



**İSKENDERUN TEKNİK**

**ÜNİVERSİTESİ**

**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**AKIŞKAN-YAPI ETKİLEŞİMİ  
PROBLEMLERİNİN DENEYSEL ve  
SAYISAL İNCELENMESİ**

**Ada YILMAZ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**OCAK 2019**



**AKIŞKAN-YAPI ETKİLEŞİMİ PROBLEMLERİNİN DENEYSEL VE  
SAYISAL İNCELENMESİ**

**Ada YILMAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

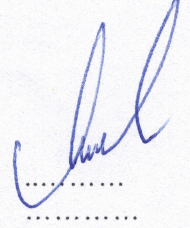
**OCAK 2019**



Ada YILMAZ tarafından hazırlanan "AKIŞKAN-YAPI ETKİLEŞİMİ PROBLEMLERİNİN DENEYSEL ve SAYISAL İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

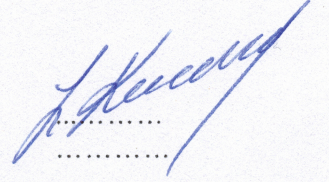
**Danışman:** Doç. Dr. Mustafa DEMİRCİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



**İkinci Danışman:** Doç. Dr. Selahattin KOCAMAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.




**Başkan:** Prof. Dr. Neslihan SEÇKİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



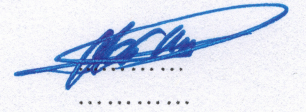
**Üye:** Doç. Dr. Hatice ÖZMEN ÇAĞATAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Üye:** Doç. Dr. Cuma KARAKUŞ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 10/01/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Tolga DEPCİ  
Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



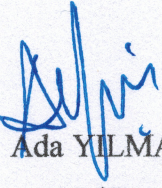


## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

  
Ada YILMAZ

10/01/2019



AKIŞKAN-YAPI ETKİLEŞİMİ PROBLEMLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL  
İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Ada YILMAZ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2019

ÖZET

Akışkan-Yapı Etkileşimi (FSI) birçok mühendislik uygulamasında karşılaşılan yaygın bir mühendislik problemidir. Bünyelerinde barındırdıkları non-lineerite ve çoklu fizik olgusu nedeniyle, bu alandaki deneysel ve sayısal çalışmalar problemin ana karakteristiklerinin belirlenmesinde büyük öneme sahiptir.

Bu tez çalışmasında, serbest yüzeyli akışkanların elastik katı cisim ile etkileşimini içeren bir Akışkan-Yapı Etkileşimi (FSI) problemi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal metot olarak akışkanların Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), katı cisimlerin ise Finite Element Method (FEM) kullanılarak modellendiği hibrit SPH-FEM metodu kullanılmıştır. İlk olarak SPH metodunun serbest yüzeyli akımları modelleyebilme etkinliğinin belirlenmesi amacı ile klasik bir baraj yıkılması deneyi gerçekleştirilmiştir. Akabinde SPH metodu FEM ile birleştirilmiş ve bir FSI probleminin incelemesinde kullanılmıştır. SPH-FEM metodunun etkinliği çeşitli noktalardaki zamana bağlı noktasal su derinlikleri ve katı cisim deplasman değerleri kullanılarak araştırılmıştır. Katı cisim deplasman değerleri görüntü işleme tekniği kullanılarak elde edilirken zamana bağlı noktasal su seviyesi değişimleri görüntü işleme tekniğinin yanı sıra ultrasonik sensörler kullanılarak elde edilmiştir.

Deneysel veriler ile sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında, sayısal analiz sonuçlarının deneysel veriler ile genel olarak makul bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Akışkan-Yapı Etkileşimi (FSI), görüntü işleme, sayısal analiz

Sayfa Adedi : 82

Danışman : Doç. Dr. Mustafa DEMİRCİ

2. Danışman : Doç. Dr. Selahattin KOCAMAN



EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF FLUID-STRUCTURE  
INTERACTION PROBLEMS

(M. Sc. Thesis)

Ada YILMAZ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

January 2019

ABSTRACT

Fluid-Structure Interaction (FSI) is a common engineering problem faced in many engineering application. Because of the nature of the phenomenon including nonlinearity and multi-physics, experimental and numerical studies in this field have great importance to determine the main characteristics of the problem.

In this thesis study, a Fluid-Structure Interaction (FSI) problem including the interaction of free-surface flows with the elastic solid body was investigated experimentally and numerically. As the numerical model, the coupled Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)-Finite Element Method (FEM), where the fluid flow was modeled using SPH and the solid body was modeled using FEM, was used. At first, in order to determine the efficiency of SPH in modeling of free surface flows, an experiment of a classic dam-break problem was carried out. Following that, the SPH method was coupled with FEM and used to investigate a FSI problem. The efficiency of SPH-FEM method was investigated using time evolution of water level and deformation of the solid body at various points. While deformation of the solid body was obtained using image processing technique, the time evolution of water level was obtained using image processing technique and also ultrasonic distance sensor.

When the experimental data are compared with the numerical results, it was seen that numerical results are generally in reasonable agreement with the experimental data.

Key Words : Fluid-Structure Interaction (FSI), image processing, numerical analysis  
Page Number : 82  
Supervisor : Doç. Dr. Mustafa DEMİRCİ  
2.Supervisor : Doç. Dr. Selahattin KOCAMAN



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanması sürecinde bilgi birikimleri ile hiçbir yardımcı esirgmeden destek olan ve daha iyisini yapmam için beni cesaretlendiren çok değerli danışman hocalarım Doç. Dr. Mustafa DEMİRCİ ve Doç. Dr. Selahattin KOCAMAN'a sonsuz saygı ve teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca ihtiyacım olduğu her an yardıma koşan çok değerli arkadaşım Arş. Gör. Kaan DAL'a teşekkürlerimi bildiririm.

Tez yazımı süresince bana en ideal ortamı sağlayan ve desteklerini bir an olsun esirgemeyen İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki hocalarıma ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında desteklerini her zaman hissettiren tüm aileme çok teşekkür ederim.



**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. MATERYAL ve YÖNTEM .....	15
3.1. Deney Düzenegi .....	15
3.2. Ölçüm Teknikleri .....	17
3.2.1. Ultrasonik sensörler .....	17
3.2.2. Görüntü işleme .....	19
3.3. Kalibrasyonlar .....	21
3.3.1. Yatay kalibrasyon.....	22
3.3.2. Metrik kalibrasyon .....	22
3.3.3. Açısal kalibrasyon.....	23
3.3.4. Perspektif kalibrasyon .....	23
3.4. Zamana Bağlı Noktasal Su Derinliği Değerlerinin Görüntü İşleme Tekniği ile Elde Edilmesi .....	24
3.5. Kauçuk Elemanın Zamana Bağlı Deplasman Değerlerinin Görüntü İşleme Tekniği ile Elde Edilmesi.....	25
3.6. Teori .....	27

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....	32
4.1. Klasik Bir Baraj Yıkılması Probleminin SPH Yöntemi ile Sayısal Olarak Modellenmesi .....	32
4.1.1. Deneysel Tekrarlanabilirlik.....	33
4.1.2. Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	36
4.1.3. SPH Sonuçlarının FVM Tabanlı OpenFOAM Çözücüsü Kullanılarak Elde Edilen Sayısal Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması .....	39
4.2. Kauçuk Malzemenin Elastisite Modülü Tayini.....	44
4.3. Akışkan-Yapı Etkileşimi Probleminin Deneysel ve Sayısal İncelemesi.....	46
4.3.1. L/H=1,5 için Oluşturulan Model.....	46
4.3.2. L/H=2 için Oluşturulan Model.....	56
4.3.3. L/H=1,5 ve L/H=2 için Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması ....	66
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	72
5.1. Sonuçlar .....	72
5.2. Öneriler .....	74
KAYNAKLAR .....	76
ÖZGEÇMİŞ .....	81



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Başlangıç su derinliği ve kauçuk malzeme konumu .....	17
Çizelge 3.2. Hal denkleminde kullanılan parametreler.....	31
Çizelge 4.1. Malzeme özellikleri ve sayısal modelde kullanılan parametreler.....	33
Çizelge 4.2. Noktasal deformasyonlar ile elastisite modülü hesabı.....	45
Çizelge 4.3. E=4 MPa için deneysel veriler ile oluşan mutlak yüzde hata değerleri.....	46
Çizelge 4.4. Sayısal analizlerde kullanılan kauçuğun malzeme parametreleri.....	46

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Dikdörtgen tank ve kapak boyutları (cm).....	15
Şekil 3.2. Deney düzeneği genel görünümü .....	16
Şekil 3.3. Kauçuk malzeme boyutları, tank kesiti içerisindeki yerleşimi ve işaretçiler (cm) .....	16
Şekil 3.4. Deney düzeneği içerisindeki kauçuk malzemenin yerleşimi (cm) .....	17
Şekil 3.5. Mic+25IU/TC sensörden çıkan dalgalar ve çalışma aralığı ( <a href="https://www.microsonic.de">https://www.microsonic.de</a> ).....	18
Şekil 3.6. Ultrasonik sensörlerin konumları (önden görünüş).....	19
Şekil 3.7. Ultrasonik sensörlerin konumları (üstten görünüş) .....	19
Şekil 3.8. Bir görüntüyü oluşturan piksellerin temsili gösterimi .....	21
Şekil 3.9. Görüntü işleme tekniği ile zamana bağlı noktasal su derinliği değerlerinin belirlenmesi .....	24
Şekil 3.10. Kauçuk malzemenin yatay ve düşey doğrultudaki deplasman ölçümü.....	26
Şekil 4.1. Deney düzeneği ve ölçüm noktaları .....	33
Şekil 4.2. Ultrasonik sensör ve görüntü işleme yöntemi ile elde edilen su derinliği değerlerinin kendi içlerinde karşılaştırılması .....	33
Şekil 4.3. Ultrasonik sensör ve görüntü işleme ile elde edilen verilerin birbirleri ile karşılaştırılması .....	34
Şekil 4.4. Çeşitli zaman adımlarındaki karşılaştırmalı deneysel ve sayısal analiz sonuçları.....	36
Şekil 4.5. Çeşitli zaman adımlarındaki karşılaştırmalı su yüzü profilleri.....	37
Şekil 4.6. Deneysel ve sayısal analiz ile elde edilen noktasal su derinliklerinin karşılaştırılması .....	38
Şekil 4.7. Deney düzeneği ve ölçüm noktaları (Özmen-Çağatay ve diğerleri, 2014) (cm) .....	40
Şekil 4.8. Çeşitli zaman adımlarına ait OpenFOAM analiz sonuçları.....	40



<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.9. Çeşitli noktalardaki zamana bağlı noktasal su derinliklerinin karşılaştırılması .....	41
Şekil 4.10. Sayısal analiz sonuçlarının çeşitli zaman adımlarındaki görsellerinin karşılaştırılması a)FVM b)SPH.....	42
Şekil 4.11. SPH ve OpenFOAM analizleri ile elde edilen su yüzü profili sonuçlarının karşılaştırılması .....	42
Şekil 4.12. SPH ve OpenFOAM analizleri ile elde edilen noktasal su derinliği sonuçlarının karşılaştırılması .....	43
Şekil 4.13. Kauçuk malzeme deplasman değerlerinin belirlenmesi .....	45
Şekil 4.14. L/H=1,5 için sensör ve görüntü işleme yöntemi ile elde edilen su derinliği değerlerinin kendi içlerinde karşılaştırılması.....	47
Şekil 4.15. L/H=1,5 için sensör ve görüntü işleme ile elde edilen verilerin karşılaştırılması .....	48
Şekil 4.16. L/H=1,5 için çeşitli zaman adımlarındaki deneysel ve sayısal analiz sonuçları .....	50
Şekil 4.17. L/H=1,5 için kauçuk malzemenin yatay (X) yöndeki deplasman değerleri.....	52
Şekil 4.18. L/H=1,5 için kauçuk malzemenin düşey (Y) yöndeki deplasman değerleri .....	53
Şekil 4.19. L/H=1,5 için zamana bağlı noktasal su derinliklerinin karşılaştırılması .....	55
Şekil 4.20. L/H=2 için sensör ve görüntü işleme yöntemi ile elde edilen su derinliği değerlerinin kendi içlerinde karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.21. L/H=2 için sensör ve görüntü işleme ile elde edilen verilerin karşılaştırılması .....	58
Şekil 4.22. L/H=2 için çeşitli zaman adımlarındaki deneysel ve sayısal analiz sonuçları.....	60
Şekil 4.23. L/H=2 için kauçuk malzemenin yatay (X) yöndeki deplasman değerleri .....	61
Şekil 4.24. L/H=2 için kauçuk malzemenin düşey (Y) yöndeki deplasman değerleri .....	63
Şekil 4.25. L/H=2 için zamana bağlı noktasal su derinliklerinin karşılaştırılması .....	64

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.26. $L/H=1,5$ ve $L/H=2$ için kauçuk malzemenin yatay (X) yöndeki deplasman değerleri .....	67
Şekil 4.27. $L/H=1,5$ ve $L/H=2$ için kauçuk malzemenin düşey (Y) yöndeki deplasman değerleri .....	68
Şekil 4.28. $L/H=1,5$ ve $L/H=2$ için noktasal su derinlikleri .....	70





## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>cm</b>	Santimetre
<b><math>\kappa</math></b>	Efektif alan sabiti
<b>h</b>	Etkileşim mesafesi
<b>H</b>	Başlangıç su derinliği
<b>L</b>	Kauçuk malzeme konumu
<b><math>\alpha_d</math></b>	Kernel fonksiyonu sabiti
<b>kg</b>	Kilogram
<b>m</b>	Metre
<b><math>m^3</math></b>	Metreküp
<b><math>m_j</math></b>	Komşu parçacık kütlesi
<b>mm</b>	Milimetre
<b>MPa</b>	Megapaskal
<b><math>\rho_j</math></b>	Komşu parçacık yoğunluğu
<b><math>\rho_i</math></b>	Odak parçacık yoğunluğu
<b><math>r_{ij}</math></b>	Parçacıklar arası mesafe
<b><math>v_i</math></b>	Odak parçacık hız değeri
<b><math>v_j</math></b>	Komşu parçacık hız değeri
<b><math>\alpha_{\pi}</math></b>	Yapay viskozite sabiti (quadric)
<b><math>\beta_{\pi}</math></b>	Yapay viskozite sabiti (lineer)
<b><math>\gamma_0</math></b>	Gruneisen gama sabiti
<b><math>c_0</math></b>	Malzeme içerisindeki ses hızı
<b><math>\rho_0</math></b>	Başlangıç yoğunluk değeri
<b>N</b>	Etki alanı içerisindeki parçacık sayısı
<b>P</b>	Basınç
<b><math>\Pi</math></b>	Yapay viskozite

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>ALE</b>	Arbitrary Lagrangian Eulerian (Keyfi Lagrangian Eulerian)
<b>DEM</b>	Discrete Element Method (Ayrık Elemanlar Metodu)
<b>DPD</b>	Dual Particle Dynamics (İkili Parçacık Dinamiği)
<b>FDM</b>	Finite Differences Method (Sonlu Farklar Metodu)
<b>FEM</b>	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Metodu)
<b>FPS</b>	Frame Per Second (Kare Hızı)
<b>FSI</b>	Fluid-Structure Interaction (Akışkan-Yapı Etkileşimi)
<b>FVM</b>	Finite Volume Method (Sonlu Hacimler Metodu)
<b>HMPS</b>	Hamiltonian Moving Particle Semi-Implicit (Hamiltonian Yarı Kapalı Hareketli Parçacık Metodu)
<b>HOSM</b>	High-Order Spectral Method (Yüksek Dereceli Spektral Metot)
<b>ISPH</b>	Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics (Sıkıştırılmaz Etkileşimli Parçacık Hidrodinamiği)
<b>LED</b>	Light-Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
<b>MEM</b>	Mode Expansion Method (Mod Genişletme Metodu)
<b>MLS</b>	Moving Least Squares (Hareketli En Küçük Kareler Metodu)
<b>MPS</b>	Moving Particle Semi-Implicit (Yarı Kapalı Hareketli Parçacık Metodu)
<b>PFEM</b>	Particle Finite Element Method (Parçacıklı Sonlu Elemanlar Metodu)
<b>RAM</b>	Random Access Memory (Rastgele Erişimli Bellek)
<b>RANS</b>	Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes
<b>RGB</b>	Red, Green, Blue (Kırmızı, Yeşil, Mavi)
<b>SPH</b>	Smoothed Particle Hydrodynamics (Etkileşimli Parçacık Hidrodinamiği)
<b>TLSPH</b>	Total Lagrangian Smoothed Particle Hydrodynamics (Bütünsel Lagrangian Etkileşimli Parçacık Hidrodinamiği)

**WCSPH**

Weakly Compressible Smoothed Particle  
Hydrodynamics (Zayıf Miktarda Sıkıştırılabilir  
Etkileşimli Parçacık Hidrodinamiği)



## 1. GİRİŞ

Birçok mühendislik uygulamasında, akışkanların neden olduğu kuvvetler etkileşim içerisinde oldukları katı sınırlar üzerinde önemli değişimlere neden olmaz. Bu gibi durumlarda, akışkanların rijit sınırlar içerisinde hareket ettiği kabul edilebilir ve problem temel akışkan dinamikleri kullanılarak tanımlanabilir. Ancak, akışkanlar bu sınırlar üzerinde yadsınamayacak değişimler yarattığında, akışkan ve katı dinamiklerinin birlikte kullanımı önem kazanmakta ve Akışkan-Yapı Etkileşimi (FSI) problemleri ortaya çıkmaktadır (Antoci, Gallati ve Sibilla, 2007). FSI problemlerinin temelini oluşturan akışkan ve katı faz, birbirleri üzerinde doğrudan ve tekrar eden etkiler yaratmaktadır. Akışkan akışının katı sınırlara uyguladığı basınç kuvvetleri bu sınırlar üzerinde deformasyonlara ve yer değişimlerine neden olabilirken, deforme olan veya yer değiştiren katı sınırlar da akış karakteristiklerini doğrudan etkilemektedir.

Akışkanlar ile katılar arasındaki bu etkileşim birçok mühendislik probleminin temelini oluşturmaktadır. Uçaklar, rüzgâr türbinleri, yüksek yapılar ve köprülerin aerodinamik yükler altındaki davranışları, kaotik serbest yüzeyli akımların etki alanı içerisindeki yapıların, açık deniz yapılarının ve kıyı-liman yapılarının hidrodinamik yükler altındaki davranışları FSI problemleri kapsamında araştırmacılar tarafından incelenmektedir. Bunun yanı sıra, kan basıncının kalp kapakçıkları ve damarlar üzerinde oluşturduğu dinamik etkiler de bu bağlamda birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir.

FSI problemleri, bünyesinde non-lineerite ve çoklu fizik olgusu barındırması itibarıyla, analitik yöntemler kullanılarak incelemek için karmaşık bir yapıya sahiptir (Wu, Yang ve Wright, 2016). Bilgisayar teknolojilerindeki donanımsal ve yazılımsal gelişmeler sayısal metotların bu tür karmaşık problemlerin çözümünde kullanımını mümkün kılmıştır. Bu doğrultuda, akışkan ve katı malzemelerin modellenmesinde kullanılacak birçok sayısal yöntem araştırmacılar tarafından geliştirilmiş ve çeşitli problemlere uygulanmıştır. Literatürde kullanılan bu sayısal metotları çözüm alanlarını tanımlama yaklaşımlarına göre ağ yapılı ve parçacık temelli olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Ağ yapılı metotlarda çözüm alanı sonlu ağ yapısı elemanları kullanılarak tanımlanırken, parçacık temelli metotlarda çözüm alanı fiziksel özellikler taşıyan parçacıklar ile tanımlanmaktadır.



Ağ yapılı metotlarda başvuru iki ana matematiksel yaklaşım mevcuttur; Lagrange ve Euler. Lagrange yaklaşımında ağ yapısı elemanları, tanımladıkları malzeme alanları ile birlikte deforme olurken, Euler yaklaşımında malzeme, sabit ağ yapısı elemanları içerisinde fakat bu yapıdan bağımsız hareket edebilmektedir. Klasik Finite Element Method (FEM) formülasyonlu ve Lagrange yaklaşımli yöntemler ile sınırlı deformasyon içeren problemlerin çözümünde gayet başarılı sonuçlar elde edilebilse de, yüksek deformasyon içeren problemlerde ağ yapısı elemanlarında meydana gelen bozulmalar çözüm doğruluğunda azalmalara neden olmaktadır. Araştırmacılar tarafından ağ yapısı elemanlarının deformasyonlar ile birlikte kendini yeniden düzenlediği yöntemler geliştirilse de, bu yöntemler bilgisayar analizlerinde zamansal olarak çok maliyetli yapılar oluşturmaktadır.

Ağ yapılı Euler yaklaşımında malzemelerin ağ yapısı elemanlardan bağımsız hareketi, yüksek deformasyon içeren problemlerde bu yöntemi daha uygun bir seçenek haline getirmektedir. Yöntem, Finite Volume Method (FVM) formülasyonu ile birlikte, birçok araştırmacı tarafından baraj yıkılması, çalkalanma gibi yüksek deformasyon içeren akışkan problemine başarı ile uygulanmıştır (Ozmen-Cagatay, Kocaman ve Guzel, 2014; Kocaman ve Ozmen-Cagatay, 2015; Erdoğan, 2018). Ancak, yöntemde serbest yüzey tanımlaması, Volume of Fluid veya Level Set gibi formülasyonların temelini oluşturduğu ilave denklemler yardımı ile hesaplanabilmektedir. Bu dolaylı yoldan hesaplama, çözülmesi gereken ilave denklemlerin yanı sıra, FSI problemlerinde akışkan-yapı temas ara yüzeyinin tespitinde hatalara sebebiyet verebilmekte ve temas noktalarında sızma sorunlarına neden olabilmektedir.

Parçacık temelli metotlar ise bünyelerinde birbirleri ile bağlantılı ağ yapısı elemanları barındırmamaları nedeni ile yüksek deformasyon içeren problemlerin çözümünde kullanılacak elverişli bir yapı sunmaktadır. Bununla birlikte doğal Lagrangian yapıları, ilave denklemlere ihtiyaç duymadan serbest yüzey ve akışkan-katı temas yüzeyinin takibini mümkün kılmaktadır. Bu nedenle, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) ve Moving Particle Semi-Implicit (MPS) gibi parçacık temelli metotlar, akışkan hareketi gibi yüksek deformasyon içeren problemlerin çözümünde son yıllarda sıklıkla başvuru metotlar haline gelmişlerdir (Dal, 2018; Turhan, 2017; Koshizuka ve Oka, 1996; Ferrari, 2010; Shao, Li, G. R. Liu ve M. B. Liu, 2012).

FSI problemlerini oluşturan her bir faz birbiriyle aynı veya farklı matematiksel yaklaşımlar kullanılarak tanımlanabilir. Seçilecek yaklaşımların birbirinden farklı dinamiklere sahip olan akışkan ve katı malzemeleri yeterli doğrulukta modelleyebilecek kabiliyette sahip olması gerekmektedir. Bununla birlikte, fazlar arasındaki veri alış-verişinin efektif bir şekilde tanımlanması yüksek doğrulukta çözümler elde edilebilmesi için hayati bir önem taşımaktadır. Bu bağlamda, sayısal metotlarda akışkan ve katı faz arasındaki veri alış-verişinin sağlanabilmesi için iki temel yaklaşım geliştirilmiştir; monolitik ve bölüntülü (partitioned). Monolitik yaklaşımda akışkan ve katı faz, tek bir denklem kümesi içerisinde simultane bir biçimde çözülmektedir. Bölüntülü yaklaşımda ise bu fazlar, ayrı çözümler tarafından ele alınıp çözülmekte ve çözümler arasındaki veri iletimi iteratif modeller ile sağlanmaktadır. Monolitik yaklaşımların stabil çözümler sunması yöntemi ön plana çıkarırken, bölünük yaklaşımların FSI problemini oluşturan her bir faz için farklı metotların kullanımını mümkün kılması araştırmacılara kullanabilecekleri efektif alternatifler sunmaktadır.

Gelişen bilgisayar teknolojileri ile sayısal metotlar, son yıllarda birçok problemde başvurulan ilk çözüm yöntemlerinden biri haline gelmiştir. Ancak çözüm alanı tanımı, kullanılan malzeme modelleri, parametrik hassasiyetleri ve teorilerindeki yaklaşımlar nedeniyle deneysel çalışmalar ile desteklenmeleri hayati öneme sahiptir. Özellikle akışkanlar gibi karmaşık yapıya sahip malzemelerin kullanıldığı ve dinamik etkilerin baskın olduğu problemlerde deneysel çalışmaların önemi bir kat daha artmaktadır. Sayısal analiz yöntemlerinde süregelen ve bundan sonra da sürececek gelişimlerin, deneysel çalışmalar ile elde edilecek veriler ışığında daha kapsamlı olacağı açıktır.

Bu amaçla mevcut tez çalışması kapsamında, kaotik baraj yıkılması akımının elastik davranış gösteren bir katı cisim ile etkileşimi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen deneysel çalışma ile dikdörtgen bir tank içerisinde oluşturulan tipik baraj yıkılması akımının, mansap kısmında bulunan ve üst kısmından mesnetlenmiş, elastik davranış gösteren kauçuk katı bir cisim ile etkileşimi sağlanmıştır. Görüntü işleme tekniği kullanılarak baraj yıkılması akımının çeşitli noktadaki noktasal su derinliği ve katı cisim üzerindeki çeşitli noktaların deformasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İşlenen video görüntüleri son kullanıcıya yönelik akıllı telefonlar kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca noktasal su derinliği değerleri ultrasonik

sensörler yardımı ile de belirlenerek, her iki ölçüm tekniğinin karşılaştırmalı performans incelemeleri ve yöntemlerin tutarlılıkları incelenmiştir.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, son yıllarda araştırmacılar tarafından akışkanların modellenmesinde sıklıkla başvurulan SPH metodu ile akışkanların, sınırlı deformasyon içeren katı cisimlerin analizlerinde süregelen yıllarca gayet başarılı sonuçlar elde edilen klasik ağ yapılı FEM metodu ile ise kauçuk malzemenin modellendiği, hibrit SPH-FEM metodu kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen ölçüm verileri ışığında, kullanılan sayısal yaklaşımın detaylı performans analizi gerçekleştirilmiştir.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Idelsohn, Onate, Del Pin ve Calvo (2006); FEM ile parçacık temelli metotların güçlü yanlarını birleştirmeyi amaçlayan Particle Finite Element Method (PFEM) yöntemini kullanarak oluşturdukları sayısal modeli çalkalanma, dalga dinamiği, baraj yıkılması gibi serbest yüzeyli akım ve bu akımların etkileşim içerisinde oldukları katı cisimleri içeren problemlere uygulamışlardır. Yöntemin çözüm başarısını vurgulayan araştırmacılar FSI, yüksek deformasyon içeren akışkan ve katı gibi karmaşık problemlerin PFEM ile kolayca analiz edilebileceğini belirtmişlerdir.

Antoci ve diğerleri (2007); katı bir cismin hipoeplastik dinamiklerle, akışkanın ise hızlı gelişen serbest yüzeyli akım ile temsil edildiği bir FSI problemini, her iki malzemenin modellenmesinde SPH metodunu kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Oluşturdukları sayısal model sonuçlarının doğruluğunu deneysel çalışmaları sonucu elde ettikleri katı cismin deformasyon değerleri ile çeşitli noktalardaki su derinliği değerlerini kullanarak sınımlamışlardır. Deney ve sayısal model sonuçları arasında başarılı bir uyum yakalayan araştırmacılar, hipoeplastik katı cisim modellemesi için kullandıkları SPH formülasyonunun geliştirilebilir bir yapıya sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Lee, Noguchi ve Koshizuka (2007); akışkan modellemesi için MPS metodunu kullandıkları çalışmalarında, bu metodun ağ yapılı FEM kullanılarak modellenmiş kabuk elemanlar ile FSI problemleri kapsamında etkileşimlerini araştırmışlardır. İlk olarak rijit sınırlar içerisindeki bir akışkanın çalkantı hareketini MPS metodu ile modelleyen araştırmacılar, bunu literatürdeki deneysel verileri kullanarak sınımlamış ve kullandıkları yöntem ile çalkalanma hareketinin başarılı bir şekilde çözülebileceğini belirtmişlerdir. Daha sonra baraj yıkılması akımı ve akışkanın çalkalanma hareketinin, rijit sınırlar ve aynı geometride ancak rijit yerine elastik deformasyon gösteren kabuk elemanların oluşturduğu sınırlar ile etkileşimini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir.

Idelsohn, Marti, Souto-Iglesias ve Onate (2008); PFEM ile oluşturdukları sayısal modeli, çalkalanma hareketi gösteren akışkan ile etkileşim içerisinde olan elastik bir malzemenin davranışını incelemek için kullanmışlardır. Dikdörtgen bir tank içerisinde, yağ ile gerçekleştirdikleri deneylerini yağ derinliği ve elastik malzeme mesnetlenme durumu itibarı ile çeşitlendiren araştırmacılar, katı elastik cismin deformasyon değerlerini elde etmiş ve bu



değerleri sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

Rafiee ve Thiagarajan (2009); SPH metodunu kullanarak oluşturdukları sayısal modeli baraj yıkılması, konsol giriş deformasyonu, serbest yüzeyle akımların rijit ve elastik katı cisimler ile etkileşimi gibi problemlerin çözümünde kullanmış ve modelin etkinliğini araştırmışlardır. Literatürdeki deneysel, sayısal ve analitik çözüm sonuçları ile oluşturdukları sayısal modelden elde ettikleri değerleri karşılaştıran araştırmacılar yüksek doğrulukta sonuçlar elde ettiklerini vurgulamışlardır.

Groenenboom ve Cartwright (2010); parçacık temelli SPH metodunun akışkan modellenmesinde, ağ yapılı klasik FEM formülasyonunun ise elastik katı cisim modellenmesinde kullanıldığı bir sayısal model oluşturmuşlar ve elde ettikleri değerleri literatürdeki diğer sayısal modellerle elde edilen veriler ile karşılaştırmışlardır. İlk olarak kullandıkları SPH metodunun parçacıklar arası mesafe gibi parametrik modifikasyonları için literatürdeki bir baraj yıkılması problemini SPH modelleri ile çözmüşlerdir. Bunun sonucunda kullandıkları SPH modelinin serbest yüzeyle akışkan modellemesi için uygun olduğu sonucuna varan araştırmacılar, modellerini FEM ile birleştirip akışkanların serbest yüzeylerine çarpan katı cisimlerin oluşturduğu FSI problemlerine uygulamışlar ve modellerinin literatürdeki diğer modellerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında yakın korelasyon değerleri gösterdiğini belirtmişlerdir.

Degroote ve diğerleri (2010); akışkanların Arbitrary Lagrangian Euleian (ALE) yöntemi, katı cisimlerin ise klasik ağ yapılı FEM formülasyonu kullanarak tanımlandığı sayısal bir model oluşturmuş ve bu modelde akışkanlar ile katılar arasındaki veri alışverişini iki farklı bölüntülü yaklaşım formülasyonu ile tanımlamışlardır. Bu formülasyonların çözüm doğruluğunu literatürdeki deneysel verileri kullanarak sıyanan araştırmacılar, modellerini açık deniz platformlarındaki deforme olabilen, kompozit, silindir biçimli elemanların dalga etkisi altındaki davranışlarını incelemek için kullanmışlardır.

Panciroli, Abrate, Minak ve Zucchelli (2012); su yüzeyine çarpan katı cisim problemini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında farklı malzeme, kalınlık ve hücum açısı özelliklerine sahip katı cisimlerin farklı yüksekliklerden serbest bırakılıp durağan haldeki su yüzeyi ile etkileşimi sağlanmış ve katı cismin çeşitli noktalarında gerilme ve birim şekil değiştirmeler ölçülmüştür. Oluşturdukları deney düzeneklerini hibrit SPH-

FEM ile sayısal olarak modelleyen araştırmacılar deneysel ölçümler ile başarılı bir uyum yakalamışlardır. Katı cisimlerin su yüzeyine çarpması ile meydana gelen şekil değiştirmelerin oluşturduğu hidroelastisite probleminin, katı cismin suya giriş anına kadar geçen zamanının, bu malzemenin doğal frekansına oranına bağlı olduğu sonucuna varan araştırmacılar, oluşturdukları sayısal modelde malzemenin suya dalması ile arada kalan havanın oluşturduğu etkinin ihmal edildiğini belirtmişlerdir.

Lee, Jhan ve Chung (2012); klasik ağ yapılı FEM formülasyonunu kullanarak modelledikleri rüzgâr türbini kanatlarının aerodinamik basınç etkisi altındaki davranışlarını araştırmışlardır. Oluşturdukları kanat modeli üzerindeki aerodinamik yükleri analitik yaklaşımlar kullanarak belirleyen araştırmacılar, bu yükleri girdi olarak kanatlara etkitmiş ve kanatların performans analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yaklaşımlarının gerçekçi sonuçlar ortaya koyduğunu vurgulayan araştırmacılar, bıçakların performanslarının geliştirilmesi amacı ile çeşitli önerilerde bulunmuşlardır.

Yang, Jones ve McCue (2012); serbest yüzeyli akımı SPH, katı cisim dinamiklerin ise klasik ağ yapılı FEM formülasyonu ile modellendiği bir sayısal model oluşturup bunu literatürdeki deneysel verileri kullanarak sınıamışlardır. Çalışmalarında akışkan ve katı fazlar arasındaki yük alışverişi için geliştirdikleri bölüntülü algoritmanın yanı sıra çeşitli sınır şartı formülasyonları kullanan araştırmacılar ayrıca Antoci ve diğerleri (2007) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada kullanılan kauçuk malzeme için lineer ve hiperelastik malzeme tanımı yapmış ve bu malzeme türlerini kullanarak elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışmaları ile deneysel veriler arasında başarılı bir uyum yakalayan araştırmacılar, bu metodun çeşitli geliştirmelerle üç boyutlu problemlerde de kullanılabilereğini vurgulamışlardır.

Mitsume, Yoshimura, Murotani ve Yamada (2014); akışkanların MPS, katı cisimlerin klasik ağ yapılı FEM formülasyonu kullanılarak ve akışkan-katı yapı arasında veri alışverişinin bölüntülü yaklaşıma dayanan bir formülasyon ile tanımlandığı hibrit bir sayısal model oluşturmuşlardır. Oluşturdukları sayısal modeli literatürdeki diğer sayısal model sonuçları ile karşılaştıran araştırmacılar sonuçlar arasında başarılı bir uyum yakalamıştır. Katıların yüksek deformasyon gösterdiği durumlar için MPS metodunun sınır elemanlarının geliştirilmesi gerektiğini vurgulayan araştırmacılar, ayrıca modelin üç boyutlu problemlere uygulanması ile pratikteki uygulamaların daha derinlemesine sınıanabileceği vurgulanmıştır.

Mittal, Chakraborty, ve Matsagar (2014); patlamalar sonucu oluşan yüklerin etkisi altındaki su tankının dinamik analizini oluşturdukları sayısal model ile araştırmışlardır. Sayısal modellerini ağ yapılı ve FEM formülasyonlu, akışkanların Eulerian, katı cisimlerin ise Lagrangian yaklaşımı ile tanımlandığı bir metot kullanarak oluşturmuşlardır. Sayısal modellerinin çözüm kabiliyetini literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilen verileri kullanarak sınavan araştırmacılar, silindir biçimli ve üst yüzeyi atmosfere açık, farklı en boy oranına, farklı doluluk oranına, farklı et kalınlığına ve farklı mesnetlenme koşullarına sahip su tankının çeşitli uzaklıklarda gerçekleşen patlamaların oluşturduğu yükler altındaki davranışlarını incelemişlerdir.

Hu, Long, Xiao, Han ve Gu (2014); FSI problemlerinde sıklıkla başvuru alan hibrit SPH-FEM metodunun, hesaplamalarında zamansal maliyetlerin büyük bir kısmını oluşturan temas saptama ve komşu parçacık saptama algoritmalarını geliştirilerek daha efektif bir algoritma elde etme amacı ile gerçekleştirdikleri çalışmalarında oluşturdukları sayısal modeli literatürdeki çeşitli deneysel ve numerik çalışmaların analizlerinde kullanmışlardır. Oluşturdukları sayısal modelin yüksek doğrulukta tahminler yaptığını ve hesaplama zamanında kazançlar sağladığını vurgulayan araştırmacılar, modellerinin hesaplama etkinliğini arttırmak için etkin bir yol olduğunu belirtmişlerdir.

Li, Leduc, Nunez-Ramirez, Combescure ve Marongiu (2015); akışkanların hibrit SPH-ALE metodu, katı elastik cisimlerin ise ağ yapılı Finite Element (FE) formülasyonu ile modellendiği bir FSI probleminde, akışkan ve katı fazlar arasındaki birleştirme stratejisi olarak enerji korunumunu esas alan bir bölüntülü formülasyon geliştirmişlerdir. Bu modeli literatürdeki bir, iki ve üç boyutlu numerik ve deneysel çalışmalara uygulayarak sınavan araştırmacılar, karşılaştırma verileri arasında uyumlu sonuçlar yakalamışlardır.

Liao, Hu ve Sueyoshi (2015); başlangıç durumunda belirli bir derinlik değerine sahip, bir kapak yardımıyla hareketsiz halde duran ve bu kapağın kaldırılması ile harekete geçen serbest yüzeyli akışkan ile elastik katı cisim etkileşiminin oluşturduğu FSI problemini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Başlangıç durumundaki su derinliği değerleri üzerinden çeşitlendirdikleri deney düzeneklerinde elastik cismin üzerindeki üç noktadaki deformasyon ölçümleri için video görüntülerinden faydalanmışlardır. Oluşturdukları deney düzeneğine uygun iki boyutlu olarak modelledikleri ağ yapısı temelli hibrit Finite Differences Method (FDM)-FEM metodu ile bu problemi çözen araştırmacılar, elastik katı

cismin deformasyon değerleri üzerinden deneysel ve sayısal model sonuçları arasında karşılaştırma yapmışlardır. Genel olarak uyumlu sonuçlar elde eden araştırmacılar belirli zaman aralıklarında elastik katı cisim üzerindeki titreşim etkilerinin neden olduğu deformasyon değerlerinin üç boyutlu modeller ile incelenmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Sun, Djidjeli ve Xing (2015); akışkanların ve katıların MPS metodu ile tanımlandığı bir sayısal model oluşturmuşlardır. Standart MPS metodunun akışkanların basınç dağılımını doğru olarak belirlenmesinde gerçekten uzak sonuçlar gösterdiğini vurgulayan araştırmacılar, klasik MPS formülasyonunu modifiye ederek daha etkin bir formülasyon oluşturmayı amaçlamışlardır. Oluşturdukları modifiye edilmiş MPS formülasyonunu literatürdeki deneysel ve sayısal çalışmalarda ele alınan iki boyutlu baraj yıkılası akımının rijit ve elastik cisimler ile etkileşimi, çalkalanma hareketi ve gemi kesitinin durgun haldeki bir su kütesine girişi problemlerine uygulayan araştırmacılar, oluşturdukları modifiye edilmiş formülasyonun bu tarz problemlerin çözümünde etkin sonuçlar verdiğini vurgulamışlardır.

Wu ve diğerleri (2016); çalışmalarında serbest yüzeyli bir akışkan için SPH, katı cisim dinamikleri için ise Discrete Element Method (DEM) metodunu kullanan hibrit bir sayısal model oluşturmuşlardır. DEM metodunun katı cisimlerdeki kırılmaları modellemede uygun bir seçim olduğunu vurgulayan araştırmacılar, oluşturdukları modelin modifikasyonları için analitik çözümler ile literatürdeki sayısal ve deneysel verileri kullanmışlardır. Kullandıkları SPH ve DEM metodlarındaki gerekli modifikasyonları yapan araştırmacılar, bu modellerini katı cisim üzerinde kırılmaların gerçekleştiği bir probleme uygulamışlardır.

Hermange, Oger ve Le Touzé (2016); FSI problemini modelleme amacı ile hibrit SPH-FEM metodunu kullandıkları sayısal modellerinde birleştirme formülasyonu olarak sayısal stabiliteyi sağlama amacı ile akışkan-yapı ara yüzünde enerjinin korunumunu esas alan bölünük bir yaklaşım önermişlerdir. Bu doğrultuda oluşturdukları sayısal modellerini literatürdeki deneysel ve analitik veriler ışığında sınımış ve sonuçlar arasında başarılı bir uyum gözlemişlerdir. Yöntemin pratik yaklaşımlar ile sınınanarak araştırmanın genişletilmesinin problemin temel dinamiklerin anlaşılması açısından yararlı olacağı vurgulanmıştır.



He, Tofighi, Yildiz, Lei ve Suleman (2017); akışkanların Weakly Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics (WCSPH), elastik davranış gösteren katı cisimlerin ise Total Lagrangian Smoothed Particle Hydrodynamics (TLSPH) formülasyonları kullanılarak tanımlandığı sayısal bir model oluşturmuşlardır. WCSPH metodunu literatürdeki bir çalkalanma problemine, TLSPH metodunu ise konsol giriş deformasyonu ve plaka şeklindeki bir levhanın serbest salınımı problemlerine uygulayıp yöntemlerin çözüm kabiliyetini sınavan araştırmacılar, bu iki metodu birleştirerek hibrit bir metot elde etmiş ve literatürdeki FSI problemlerine uygulamışlardır. Elde ettikleri karşılaştırma verileri arasında başarılı bir uyum yakalayan araştırmacılar yöntemin FSI problemlerine başarılı bir şekilde uygulanabileceğini vurgulamışlardır.

Calderer, Guo, Shen ve Sotiropoulos (2018); yüksek ölçekli dalga hareketi ve atmosferik türbülanslı rüzgârın açık deniz yapıları üzerindeki etkilerini oluşturdukları sayısal model ile incelemiştir. İki fazlı akışkan çözümü için Level Set metodunun kullanıldığı sayısal metodun dalga hareketi çözüm kabiliyeti deneysel ve analitik sonuçlar kullanılarak sınavmıştır. Sonuç olarak oluşturulan sayısal metot, açık denizlerdeki rüzgâr türbini platformlarının dalga ve rüzgâr etkisi altındaki davranışının incelenmesi amacı ile uygulanmış, ileriki çalışmalarda deneysel veriler ve farklı dalga profilleri ile geliştirilebileceği vurgulanmıştır.

Zhang ve Wan (2018); çalkalanma hareketi gösteren akışkanlar ile elastik katı cisimler arasındaki etkileşimi FSI problemleri kapsamında hibrit MPS-FEM metodu ile sayısal olarak incelemiştir. Oluşturdukları sayısal modelin etkinliğini literatürdeki baraj yıkılması akımının elastik katı cisimler ile olan etkileşiminin incelendiği bir çalışmadan elde ettikleri veriler ile sınavan araştırmacılar, modelleri ile güvenilir sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir. Daha sonra bu modellerini farklı elastisite modülü değerlerine sahip, elastik sınırlar içerisindeki kısmi dolu akışkanın çalkalanma etkisi altındaki davranışının incelenmesi amacı ile kullanan araştırmacılar, metodun FSI problemleri kapsamındaki çalkalanma hareketinin incelemelerinde başarılı bir seçenek olduğunu vurgulamışlardır.

Han ve Hu (2018); akışkanların Eulerian kernel, katı elastik cisimlerin ise Lagrangian kernel formülasyonlu SPH metotları kullanılarak tanımlandığı sayısal bir model oluşturmuşlardır. Oluşturdukları bu sayısal modeli silindir kesitli rijit bir engel ardına konumlandırılmış giriş biçimli elastik malzemenin çevreleyen akış altındaki davranışının incelenmesinde kullanan

araştırmacılar, literatürde aynı probleme uygulanmış diğer sayısal modeller ile elde edilen elastik cismin uç nokta deformasyon değerleri üzerinden metotlarının çözümlerini becerisini sınamışlardır.

Khayyer, Gotoh, Falahaty ve Shimizu (2018); Lagrangian temelli Moving Particle Semi-Implicit (MPS) ve Hamiltonian Moving Particle Semi-Implicit (HMPS) formülasyonlarının akışkan ve katı cisim modellenmelerinde kullanıldığı, MPS-MPS ve MPS-HMPS kombine metotlarını literatürdeki klasik hidroelastisite problemlerine uygulamış ve bu metotların etkinliklerini deneysel ve sayısal metot sonuçlarını kullanarak araştırmışlardır. MPS-MPS ve MPS-HMPS metotlarının araştırılan FSI problemlerinde benzer stabilite ve çözümlerine doğruluğuna ulaştığını vurgulayan araştırmacılar, metotların yüksek non-lineerite barındıran problemler ile sınanabileceğini vurgulamışlardır.

Franci ve Zhang (2018); akışkanların PFEM, hiperelastik davranış gösteren katı cisimlerin klasik FEM, akışkan-yapı faz arasındaki etkileşimin monolitik yaklaşım ile tanımlandığı bir sayısal model oluşturmuşlardır. Bingham tipi non-newtonian akışkanların kullanıldığı çalışmalarında iki ve üç boyutlu, serbest yüzeyli akışkan ve hiperelastik katı etkileşimini içeren FSI problemlerini ve tipik slump deneyi analizinde kullanan araştırmacılar, oluşturdukları sayısal modelin literatürdeki deneysel ve diğer sayısal modellerden elde edilmiş sonuçlar ile karşılaştırıldığında yüksek çözümlerine yeteneğine sahip olduğunu vurgulamışlardır.

L. Wang, Xu, Yang ve J. Wang (2018); akışkan ve katı fazların SPH formülasyonu ile tanımlandığı ve çözümlerini arttırmak amacı ile dinamik parçacık düzeltme yönteminin kullanıldığı sayısal bir model oluşturup, bu modelin FSI problemlerinin çözümlerinde oluşturduğu etkiyi araştırmışlardır. Tipik bir FSI probleminin çözümlerinden elde ettikleri sonuçlar ışığında dinamik parçacık düzeltme tekniğinin etkinliğini vurgulayan araştırmacılar, ayrıca önerdikleri yeni düzeltme tekniğinin tek fazlı düzeltme tekniğinden daha efektif sonuçlar verdiğini kanıtladığını vurgulamışlardır.

Tang, Jiang ve Zhou (2018); akışkanların SPH, katı cisimlerin ise DEM metodu kullanılarak tanımlandığı hibrit bir sayısal model oluşturmuşlardır. Oluşturdukları bu sayısal modelin çözümlerini sınamak amacı ile serbest yüzeyli akışkanların rijit, deforme olabilen ve granüler davranış gösteren katı cisimler ile etkileşimini içeren üç ayrı problemin çözümlerini

gerçekleştiren araştırmacılar, elde ettikleri sonuçları literatürdeki diğer sayısal modellerden ve deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ile karşılaştırmışlardır. Bu sonuçlar ışığında modellerinin FSI problemleri kapsamında üç ayrı katı formu için de uygulanabilir olduğunu vurgulamışlardır.

Khayyer, Gotoh, Falahaty ve Shimizu (2018); akışkanların Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics (ISPH), katı cisimlerin ise Lagrangian kernel formülasyonlu SPH metodu kullanarak tanımlandığı bir sayısal model oluşturmuşlardır. Katı cisimlerin modellenmesinde kullanılan SPH metodunun doğruluğunu konsol kiriş elemanının serbest titreşim altında, orta noktasında dairesel bir boşluk bulunan plaka biçimli bir elemanın ise çekme gerilmeleri altındaki analizleri gerçekleştirilmiş ve analitik çözümler ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu doğrulamadan sonra hibrit ISPH-SPH metotlarını literatürdeki hidrostatik ve hidrodinamik yükler altındaki elastik cisimlerin davranışlarının incelendiği çalışmaların analizinde kullanan araştırmacılar karşılaştırmalı sonuçlar ile performans analizi gerçekleştirmişlerdir.

Wu, Yang, Wright ve Khan (2018); bünyesinde daneli katı parçacıklar bulunduran akışkanların deformasyon kabiliyetli katı cisimler ile olan etkileşimini inceleme amacı ile deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Akışkanların Navier-Stokes denklemlerine dayanan SPH formülasyonu, katı cisimlerin ise DEM formülasyonu ile tanımlandığı bir sayısal model oluşturan araştırmacılar, literatürdeki sayısal ve deneysel verileri kullanarak modellerinin çözümlerini sınınamışlardır. Önerdikleri sayısal modelin parçacık-parçacık, akışkan-parçacık ve akışkan-yapı etkileşimi problemlerinin çözümünde başarılı sonuçlar verdiğini vurgulayan araştırmacılar, modellerini akışkan, parçacık ve katı eleman içeren, katı elemanda kırılma davranışının görüldüğü bir probleme uygulamışlardır.

Falahaty, Khayyer ve Gotoh (2018); akışkanların MPS, katı cisimlerin ise Moving Least Squares (MLS) ve Dual Particle Dynamics (DPD) formülasyonları ile tanımlandığı hibrit MPS-MLS ve MPS-DPD sayısal modellerini FSI problemlerinin çözümünde kullanmışlardır. MLS ve DPD modellerinin katı cisim modellerindeki etkinliğini serbest salınım gösteren kiriş eleman probleminin analitik çözüm ile elde edilen sonuçları kullanarak sınıyan araştırmacılar, uygulanabilir sonuçlar elde etmiştir. Daha sonra iki hibrit modeli literatürdeki deneysel ve farklı sayısal metotların uygulandığı FSI problemlerine

uygulayan araştırmacılar, karşılaştırmalı veriler elde etmişlerdir. Sayısal modellerin çözümlerini karşılaştıran araştırmacılar DPD modelinin saf katı cisim analizinde, MPS ile birleştirilince ise FSI probleminde daha fazla çözümler süresi gerektirdiğini vurgulamışlardır.

Martinez-Ferrer, Qian, Ma, Causon ve Mingham (2018); akışkan ve katı cisim dinamiklerinin ağ yapılı, FVM tabanlı, açık kaynak kodlu OpenFOAM çözücüsü kullanılarak modellendiği bir sayısal model oluşturmuşlardır. Oluşturdukları bu sayısal modeli literatürdeki teorik, deneysel ve diğer sayısal modeller ile incelenmiş FSI problemlerine uygulayan araştırmacılar, oluşturdukları modelin bu tarz problemlerin çözümleri için etkin bir seçenek olduğunu vurgulamışlardır.

Akrish, Rabinovitch ve Agnon (2018); sabit derinlikli su içerisinde oluşturulan dalgaların elastik davranış gösteren elemanlar ile etkileşimini, akışkanların High-Order Spectral Method (HOSM), katıların ise Mode Expansion Method (MEM) formülasyonu ile tanımlandığı bir model ile sayısal olarak incelemişlerdir. İncelemelerini iki ana gruba ayıran araştırmacılar, ilk grup olarak arka tarafına yerleştirilen sabit yaylar ile desteklenen rijit bir duvar, ikinci grup olarak ise deforme olabilen elastik katı elemanın, dalga etkileri altındaki davranışlarını sayısal olarak modellemişlerdir. İlk grup çıkırları incelendiğine araştırmacılar, dalganın maksimum tırmanma ve neden olduğu kuvvet değerlerinin rijit duvarın doğal frekansına bağlı olarak değişim gösterdiğini belirtmişlerdir. İkinci gruptaki elastik katı cismin hidrodinamik yükler altındaki davranışının dalga hareketinin dinamiklerini doğrudan etkilediği, yüksek dalga tırmanma ve kuvvet değerlerine neden olabileceği vurgulanmıştır.

Zhang ve Wan (2018); akışkanların MPS, katı cisimlerin ise ağ yapılı FEM formülasyonu kullanılarak analiz edildiği hibrit bir sayısal model oluşturmuşlardır. Oluşturdukları bu sayısal model ile üç boyutlu baraj yıkılması akımının elastik sınırlar ile etkileşimini sayısal olarak incelemişlerdir. Aynı akışkan modelinin rijit sınırlar ile etkileşiminin de incelendiği bir analiz gerçekleştiren araştırmacılar su yüzü profili ve katı sınırlara uygulanan basınç değerleri gibi değerkenleri karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir.

Xie, Ren, Qu ve Tang (2018); kompozit malzeme kullanılarak imal edilmiş gemi geometrisini temsil eden katı cismin suya girişi problemini sayısal ve deneysel olarak incelemişleridir. Sayısal modelde akışkan ağ yapılı CFD uygulaması, katı cisim ise klasik FEM formülasyonu ile modellenmiştir ve iki faz arasındaki veri alışverişi bölünük yaklaşım

ile tanımlanmıştır. Sayısal analiz sonuçları, deneysel çalışma kapsamında ölçülen basınç ve ivme değerleri kullanılarak sınıanmış, araştırmacılar tarafından yöntemin makul doğrulukta sonuçlar verdiği vurgulanmıştır.

Huang, Yan ve Zhang (2018); dalgalı bir akışkanın gemi dinamikleri üzerindeki etkilerini deneysel ve MATLAB yazılımı üzerinden sayısal olarak incelemişlerdir. Oluşturdukları deney düzeneğinde dalga üreteçleri ile üretilen dalgaların su yüzeyindeki gemi biçimli katı cisim üzerindeki etkileri noktasal ivme ölçümleri yapılarak araştırmışlardır. Dört farklı dalga hızı için dört farklı ölçüm gerçekleştiren araştırmacılar, katı cisim pik frekansının dalga hızından bağımsız olduğunu belirtmişler ve ileriki çalışmalarda oluşturdukları sayısal modelin bir boyutlu analizlerin yanı sıra iki boyutlu çözümler verecek şekilde geliştirilebileceğini belirtmişlerdir.

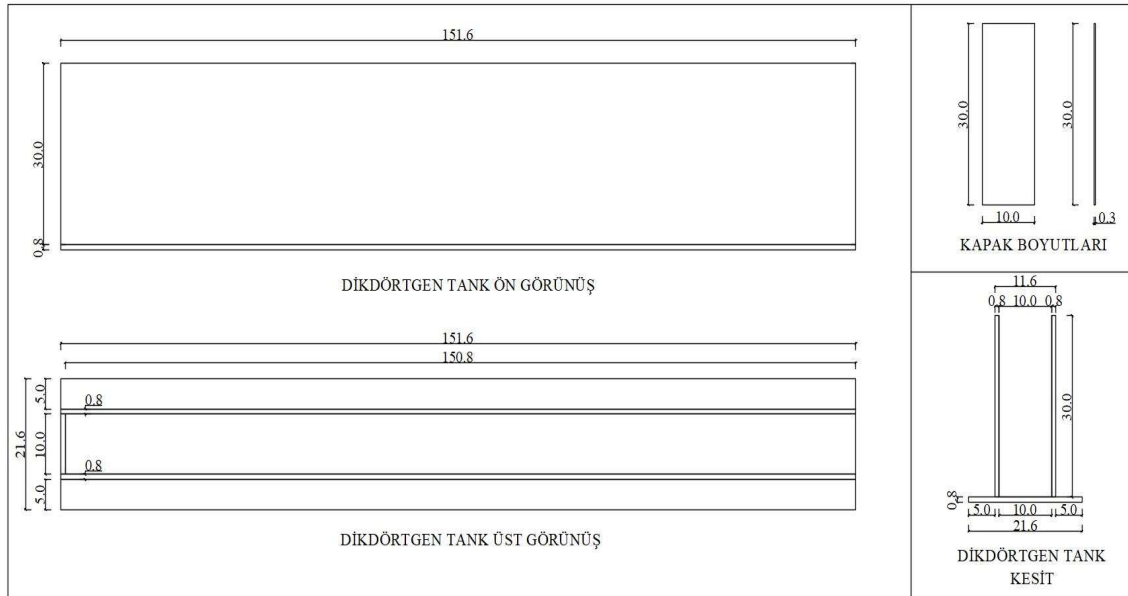
Rao ve Wan (2018); akışkanların MPS, katı cisimlerin ise FEM formülasyonu ile tanımlandığı bir sayısal model oluşturarak bu modeli FSI problemleri kapsamındaki problemlere uygulamışlardır. Dalgaların oluşturduğu dinamik yükler altında rijit ve elastik plakaların davranışını sayısal olarak modelleyen araştırmacılar literatürdeki deneysel veriler yardımı ile oluşturdukları sayısal model sonuçlarının doğruluğunu sınıamışlardır. Plaka üzerine etkiyen basınç kuvvetlerinin elastik davranış gösteren plakada rijit plakaya kıyasla daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır.

Wang ve Soares (2018); akışkanların ALE, katı cisimlerin ise FEM formülasyonu ile tanımlandığı bir sayısal model oluşturmuş ve bu modeli farklı hücum açılarındaki katı cisimlerin durgun haldeki su kütesine giriş probleminin incelenmesinde kullanmışlardır. Oluşturdukları sayısal model sonuçları ile elde ettikleri sonuçları literatürdeki diğer sayısal modeller ve katı cismin rijit davranış gösterdiğini kabul eden analitik çözümler ile karşılaştıran araştırmacılar, yöntemlerinin makul doğrulukta sonuçlar sağladığını ancak yüksek derecede bilgisayar hesaplama maliyeti getirdiğini vurgulamışlardır.

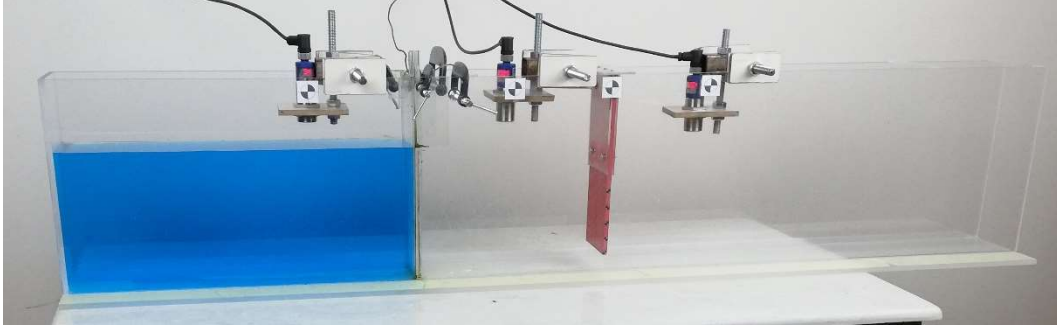
### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Deney Düzenegi

Bu tez çalışması kapsamındaki deneysel çalışmalar, İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzenegi, akrilik malzemeden yapılmış, dikdörtgen kesitli bir tank ve kapak ile elastik davranış gösteren kauçuk bir malzemeden oluşmaktadır. Dikdörtgen tank; 150,8 cm uzunluğa, 30 cm derinliğe ve 10 cm genişliğe sahip olup, 8 mm et kalınlığına sahip akrilik plakaların yapıştırılması ile oluşturulmuştur. Kapak, kanal kesitini tamamen kapatacak şekilde; 10 cm genişlik, 30 cm yükseklik ve 3 mm et kalınlığı değerlerine sahiptir (Şekil 3.1). Deney tankının 50 cm uzunluğundaki kısmı kapak yardımı ile sınırlandırılarak bu alana 20 cm derinliğinde su doldurulmuştur. Kapağın bir ucunda ağırlık bulunan bir kablo yardımı ile bir makara sistemine bağlanıp ani bir şekilde kaldırılması ile başlangıç durumunda durgun halde bulunan su kütleinin yer çekimi etkisi altında hareket etmesi sağlanmış ve tipik bir baraj yıkılması akımı oluşturulmuştur. Deney düzenegi, oluşturulan bu baraj yıkılması akımının kauçuk malzeme ile etkileşim içerisine girmesini amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, kauçuk malzeme kanalın mansap kısmında iki farklı noktada konumlandırılmış ve bu sayede iki farklı deney gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2).

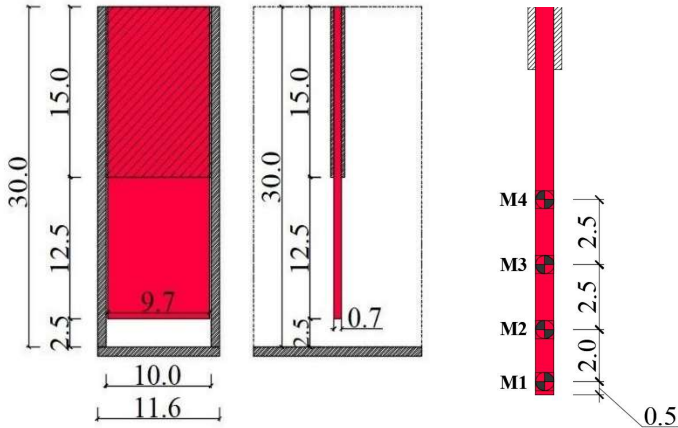


Şekil 3.1. Dikdörtgen tank ve kapak boyutları (cm)



Şekil 3.2. Deney düzeneği genel görünümü

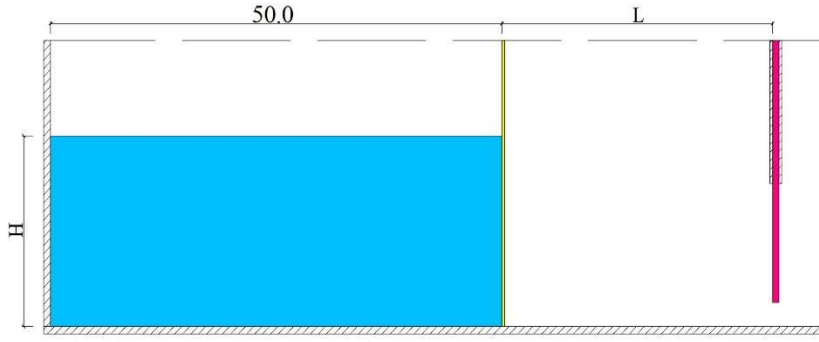
27,5 cm uzunluğa ve 7 mm et kalınlığına sahip kauçuk malzemenin üst tarafından ilk 15 cm'lik kısmı iki rijit plaka arasına sıkıştırılarak sabitlenmiş, kalan 12,5 cm uzunluğundaki kısmının ise serbest hareket edebilmesi sağlanmıştır. Üst tarafından kanala yapıştırılan kauçuk malzeme tabanı ile kanal tabanı arasında 2,5 cm değerinde boşluk bırakılarak bu alandan su geçişi mümkün kılınmıştır. Ayrıca kauçuk malzemenin genişliği, kanal duvarları ile sürtünme sonucu oluşabilecek hareket engellemelerinin önüne geçebilmek amacı ile kanal genişliğinden 3 mm daha kısa olacak şekilde, 9,7 cm olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte görüntü işleme yöntemi ile deformasyon ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için dört adet işaretçi (M1-M4) kauçuk malzeme kesitine yapıştırılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Kauçuk malzeme boyutları, tank kesiti içerisindeki yerleşimi ve işaretçiler (cm)

Kauçuk malzemenin oluşturulan deney düzeneği içerisindeki iki farklı konumu (L), başlangıç durumundaki su derinliği (H) değerinin 1,5 ve 2 katı olacak şekilde seçilmiştir. Oluşturulan deney düzeneklerinin genel görünümü Şekil 3.4'de gösterilmiş olup, bu görsel ile alakalı bilgiler Çizelge 3.1'de sunulmuştur.





Şekil 3.4. Deney düzeneği içerisindeki kauçuk malzemenin yerleşimi (cm)

Çizelge 3.1. Başlangıç su derinliği ve kauçuk malzeme konumu

Deney Düzeneği	H (cm)	L (cm)	L/H
Deney Düzeneği 1	20	30	1,5
Deney Düzeneği 2	20	40	2,0

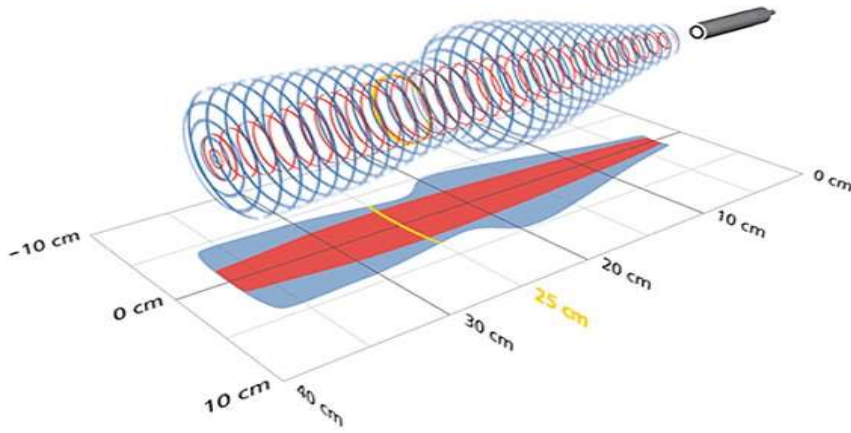
### 3.2. Ölçüm Teknikleri

Bu tez çalışması kapsamında oluşturulan deney düzeneği ile noktasal su derinliği ve katı cisim deformasyonu olmak üzere iki farklı deneysel ölçüm gerçekleştirilmiştir. Katı cisim deformasyonu verilerini elde etme amacı ile görüntü işleme tekniği kullanılırken, noktasal su derinliklerinin zamana bağlı değişimi görüntü işleme ve ultrasonik sensörler olmak üzere iki farklı ölçüm tekniği kullanılarak elde edilmiştir. İki ölçüm tekniği hakkında kapsamlı bilgiler alt bölümlerde sunulmuştur.

#### 3.2.1. Ultrasonik sensörler

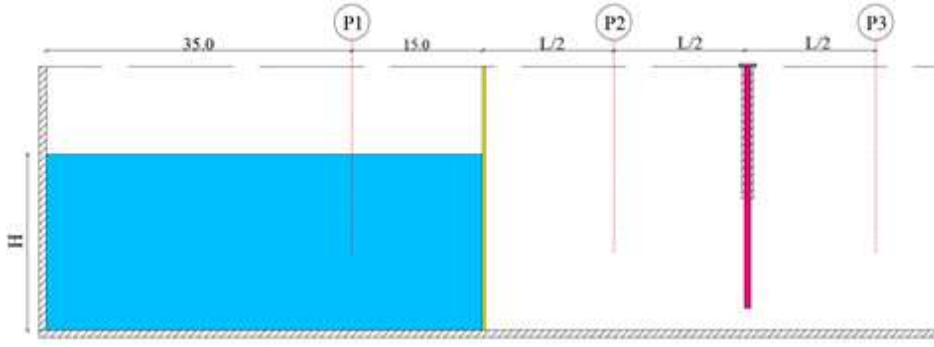
Deneysel çalışmada su derinliğinin zamana göre değişimlerinin belirlenmesi amacı ile üç adet Microsonic Mic+25/IU/TC ultrasonik sensör kullanılmıştır. Sensörler, kaynaklarından çıkan dalgaların ölçüm alınacak yüzeyden yansıması ve tekrar kaynağa ulaşması ile ölçüm yapabilmektedir. Başka bir deyişle kaynağın ölçüm yüzeyine olan uzaklığı ölçülmektedir. Bu nedenle, deney başlangıç durumunda sensörler tarafından kaydedilen değerlerin, deney süresince elde edilen değerlerden çıkarılmasıyla suyun zamana bağlı derinlik değerleri elde edilebilmektedir.

Mic+25/IU/TC sensörü 3-35 cm aralıklarında ve  $-25^{\circ}\text{C}$  ile  $+70^{\circ}\text{C}$  arası sıcaklıklarda etkin olarak çalışmaktadır. 0,01 mm hassasiyet ile ölçüm yapabilen sensörler, 32 ms tepki süresine sahiptir. Sensörler saniyede 50 veri üretecek şekilde çalıştırılmıştır. Şekil 3.5’de sensörlerin ürettiği dalgalar ve çalışma aralıkları gösterilmiştir. Sensörlerden elde edilen ölçüm verileri bir veri toplama cihazı yardımı ile bilgisayar ortamına aktarılmış ve bu sayede su derinliklerinin zamana bağlı değişimlerini ifade eden grafikler elde edilmiştir.

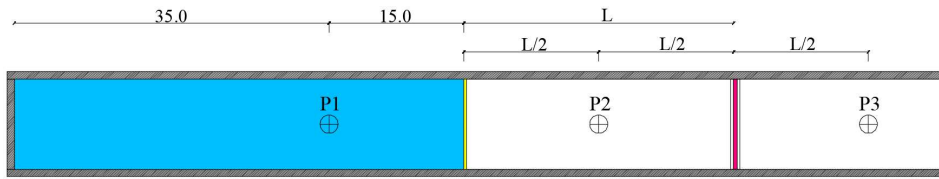


Şekil 3.5. Mic+25IU/TC sensörden çıkan dalgalar ve çalışma aralığı (<https://www.microsonic.de>)

Kullanılan üç sensör, memba tarafında bir adet ve mansap kısmında iki adet olacak şekilde konumlandırılmıştır. Memba kısmındaki (P1) sensör, kapağın memba kısmına bakan yüzeyinden membaya doğru 15 cm uzağa yerleştirilmiş ve iki deney düzeneği için de bu konumu değiştirilmemiştir. Mansap kısmındaki (P2 ve P3) iki sensör ise kauçuk malzemenin konumunun bir fonksiyonu olarak, bu malzemenin önüne ve arkasına yerleştirilmiştir. Sensörlerin detaylı yerleşim planı Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de gösterilmiş olup, değerler Çizelge 3.1’de sunulan kauçuk malzemenin konum değerleri (L) ile uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 3.6. Ultrasonik sensörlerin konumları (önden görünüş)



Şekil 3.7. Ultrasonik sensörlerin konumları (üstten görünüş)

### 3.2.2. Görüntü işleme

Video kamera, fotoğraf makinesi, tarayıcı gibi cihazlardan elde edilen dijital görüntülerin bilgisayar yazılımlarıyla işlenerek analiz edilmesine görüntü işleme denilmektedir. Görüntü işleme yöntemi ile dijital ortamda görüntüleri kaydedilmiş herhangi bir cismin ivme, hız, konum ve boyut gibi özellikleri belirlenebilmektedir.

Mevcut çalışmada görüntü işleme analizleri “Image-Pro Plus” ve “Tracker” yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Image-Pro Plus yazılımı ile noktasal su derinliklerinin zamana bağlı değişimleri ve su yüzü profilleri belirlenmiştir. Tracker yazılımı ise kauçuk malzemenin çeşitli noktalarında, yatay ve düşey yönündeki deplasmanların tespitinde kullanılmıştır.

### Kameralar ve ortam ışığı

Deneyel çalışmalardan gerekli ölçümleri elde edebilmek amacı ile işlenecek video görüntüleri, iPhone 6S Plus ve iPhone 8 Plus olmak üzere iki adet akıllı telefon kamerası kullanılarak kaydedilmiştir. Bu kameralardan bir tanesi (iPhone 6s Plus) deney tankının genel görünümüne odaklanarak zamana bağlı su derinliklerini elde edilmesi, diğeri (iPhone 8 Plus) ise deney boyunca kauçuk malzemeye odaklanarak deformasyon değerlerinin elde edilmesinde kullanılmıştır.

Görüntü işleme sonucu elde edilen verilerin kalitesi, kullanılan kameraların kalitesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Geçmiş yıllarda profesyonel kameraların sağlayabildiği bu standartlar, akıllı telefon endüstrisindeki teknolojik gelişmeler neticesinde birçok insan için ulaşılabilir bir konuma gelmiştir. Bu nedenle bu tez çalışmasında kullanılmak üzere iki adet son kullanıcıya yönelik akıllı telefon tercih edilmiştir ve deney görüntüleri, her bir akıllı telefon için de 1080p (1920x1080 piksel) çözünürlük değerine sahip olacak şekilde kaydedilmiştir.

Video görüntüleri art arda oynatılan birçok resim karesinden oluşmaktadır. Bir video kaydının bir saniyelik kısmının barındırdığı resim karesi sayısı frame per second (fps) değeri ile ifade edilmektedir. Fps değerinin artması ile video içeriğindeki yüksek hızlı hareketlerin daha belirgin temsil edilebileceği açıktır. Ancak yüksek fps değerli videoların, işlenmek üzere bilgisayar ortamına aktarılırken belleklerde kaplayacağı hacimsel büyüklüklerinden kaynaklanan çeşitli problemlere yol açabileceği de unutulmamalıdır. Bu nedenle, incelenecek problemin karakteristiklerine hâkim olunması ve bu doğrultuda kullanılacak fps değerine karar verilmesi, analizlerin verimliliği açısından önem taşımaktadır.

Bu doğrultuda zamana bağlı su değişimlerinin ölçüldüğü video görüntülerinin 60 fps değeri ile kaydedilmesi tercih edilmiştir. Gerekli analizler gerçekleştirildiğinde bu değerin probleminin doğasını tanımlamada herhangi bir yetersizliğe neden olmadığı görülmüştür. Ancak kauçuk malzeme deformasyonunun incelendiği video görüntülerinde 60 fps ve bunun yanı sıra 120 fps değerlerinin deneyin tamamında olmasa da, baraj yıkılması akımının kauçuk malzeme ile ilk teması anında hızlı gelişen deformasyonu tanımlamada yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu nedenle video kayıtlarının bu alanda 240 fps değeri ile yapılması tercih edilmiştir.

Deneysel çalışmalar, daha homojen bir ışık dağılımı yakalanması amacı ile karanlık bir ortamda, doğal ışık kaynaklarının yerine kontrol edilebilir yapay ışık kaynakları (sofbox) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Klasik ampullerin 120 fps ve 240 fps değerli video görüntülerinde dalgalanmalara yol açtığı gözlemlenmiş ve bu nedenle deneysel çalışmalar Light-Emitting Diode (LED) ampuller kullanarak gerçekleştirilmiştir.

## Görüntü işleme analizi

Bir kameradan elde edilen görüntüler piksel olarak adlandırılan ve sayıları video çözünürlüğü ile doğrudan ilişkili olan küçük birimlerden oluşmaktadır. Bu prensip temsili olarak Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Piksellerin temel iki özelliği bulunmaktadır; konum ve renk değeri. Videonun kaydedildiği çözünürlük (örn. 1920x1080), görüntünün birbirine dik iki doğrultuda (n ve m) kaç adet piksel ile temsil edildiğini ifade etmektedir. Dolayısı ile belirli ölçülerdeki nesnelerin video görüntülerinde kaç piksel ile temsil edildiği tespit edilebilirse, bir piksele karşılık gelen boyut oranlanabilir. Bu sayede görüntüler içerisindeki nesnelerin herhangi bir referans noktasına göre konumları ve bu konumlardaki boyutları belirlenebilmektedir.



Şekil 3.8. Bir görüntüyü oluşturan piksellerin temsili gösterimi

Piksellerin belirlenebilir bir diğer özelliği ise renk değerleridir. Herhangi bir piksel içerisindeki renk değeri kırmızı, yeşil ve mavi renklerin 0 ile 255 arasında aldıkları sayısal veriler ile ifade edilmektedir. Bu kavram kısaca RGB (Red, Green, Blue) olarak adlandırılır. Bu sayede her piksel değeri için özgün bir RGB değerinin var olabileceği ve böylece renkler arasında zıtlıklar yaratarak bu değerler üzerinden ara yüzeylerinin tespitinin sağlanabileceği görülmektedir.

### **3.3. Kalibrasyonlar**

Kameradan elde edilen görüntülerin görüntü işleme yöntemiyle ölçüm yapılabilmeye uygunluğu, çözünürlüğünün yanı sıra sistematik hatalar açısından uygunluğunun sağlanmasına da bağlıdır. Sistematik hatalar; mercek bozulması, elektronik transfer hataları ve algılayıcı (sensör) düzlemin deformasyonu olarak sıralanabilmektedir. Bu hataların

bilgisayar programları aracılığıyla giderilmesi ve bu sayede görüntünün sağlıklı bir şekilde işlenebilmesine kalibrasyon denilmektedir (Karlı ve Ayhan, 2005).

Bu bağlamda, video görüntülerinin çekimi sırasında, mümkün olabilecek hataların önüne geçebilmek için yatay kalibrasyon, metrik kalibrasyon, açısal kalibrasyon ve perspektif kalibrasyonun dikkatlice ele alınması gerekmektedir. Bu kavramlar alt bölümde ayrıntılarıyla açıklanmıştır.

### **3.3.1. Yatay kalibrasyon**

Bu çalışmada, noktasal su derinliklerinin yanı sıra kauçuk elemanın çeşitli noktalarındaki yatay ve düşey doğrultulardaki deplasman ölçümlerinin, kaydedilen video görüntülerinin işlenmesi yoluyla elde edilmesi amaçlanmaktadır. Ölçümlerin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için kamera ve deney düzeneği eksenlerinin yatay düzlemde herhangi bir sapma barındırmaması gerekmektedir. Yatay düzlemde, baraj yıkılması akımları gibi etkin kuvvetin yer çekimi olduğu problemlerde deney düzeneğini tabanındaki eksen kaymaları problemin doğası üzerinde doğrudan etki yaratmakta ve akış karakteristiklerini etkin bir şekilde değiştirebilmektedir. Ayrıca, kameralar ile elde edilen görüntülerdeki yatay eksen kaymalarının varlığı düşey doğrultuda çizilen ölçüm eksenlerinin yerçekimi eksenine paralellik göstermeyerek farklı derinlik verilerine ulaşılmasına veya kauçuk elemanların yatay ve düşey doğrultularında meydana gelen deplasman değerlerinin belirlenmesinde istenilen doğrultulardan farklı doğrultularda ölçüm yapılmasına neden olacaktır.

Bu nedenle deneysel çalışmalar gerçekleştirilmeden önce kameraların üzerine sabitlendiği tripodlar ve deney düzeneği, su terazisi yardımı ile yatay düzlemde hizalanmıştır. Ayrıca akıllı telefonlarda bulunan su terazisi uygulamaları ile bu değerler bir kez daha kontrol edilmiştir. Böylece hem deney düzeneği hem de kameraların yatay kalibrasyonu gerçekleştirilmiş ve yatay kalibrasyon hatalarından kaynaklanabilecek sorunların önüne geçilebilmesi sağlanmıştır.

### **3.3.2. Metrik kalibrasyon**

Metrik kalibrasyon, görüntüler içerisindeki nesnelere temsil edildiği piksel sayılarının oranlanarak her bir pikselin ifade ettiği uzunluk değerlerinin belirlenmesi olarak tanımlanabilir. Bunun için görüntü içerisinde uzunluğu bilinen herhangi bir referansın

varlığı yeterli olacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta referans düzlemi ile ölçüm yapılacak düzlemin paralellik göstermesi olacaktır. Referans ve ölçüm noktaları arasındaki düzlem farklılıkları, görüntü içerisindeki derinlik değerlerinin farklılıklarına göre büyük hatalara neden olabilecektir.

Bu tez çalışması kapsamındaki deneysel çalışma ele alınırsa; deney tankının 30 cm değerindeki yüksekliği, başlangıçtaki 20 cm değerindeki su derinliği ve ölçüm noktalarına yapıştırılan işaretçilerin deney tankının tabanına ve birbirlerine olan uzaklıkları birer referans düzlemi olarak kabul edilebilir. Bu referans düzlemleri kullanıldığı takdirde ölçümlerin, kanal duvarları boyunca hareket eden su kütesinin görüntüleri baz alınarak yapılması gerektiği unutulmamalıdır. Dikdörtgen tankın yükseklik değeri olan 30 cm'in 100 piksel ile temsil edildiği kabul edilirse, 1 pikselin  $30/100=0,3$  cm uzunluğa denk geldiği sonucuna varılabilir. Bu sayede ölçüm düzlemi üzerinde herhangi nesnenin temsil edildiği piksel sayısı ile o nesneye ait uzunluklara ulaşılabilir.

Bu doğrultuda deney düzeneğinde kullanılan dikdörtgen tankın derinlik değeri tüm analizlerde referans uzunluk olarak kullanılmıştır. Ölçüm noktalarının yatay düzlemdeki konumları deney düzeneğine yapıştırılan işaretçiler yardımı ile belirenmiş ve bu sayede noktasal su derinliği değerlerine ulaşılmıştır.

### 3.3.3. Açısal kalibrasyon

Deneysel görüntüleri elde etmede kullanılan kameraların mercek özelliklerine göre görüntülerin bombeli (dışbükey) olma ihtimali vardır. Bu durumda metrik kalibrasyon yapılmadan önce çeşitli araçlarla bu dışbükeyliğin giderilmesi gerekmektedir. Mevcut tez çalışmasında kullanılan akıllı telefonlardan elde edilen görüntüler incelendiğinde, görüntülerin dışbükeylik barındırmadığı tespit edilmiştir ve herhangi bir açısal kalibrasyon ihtiyacı duyulmamıştır.

### 3.3.4. Perspektif Kalibrasyon

Görüntü kaydeden kameraların konumları itibari ile kaydedilen hedef nesnelere dik bir perspektifte kayıt yapması gerekmektedir. Bu şart sağlanmadığı durumlarda kameraya konum olarak daha yakın olan noktalarda ölçek daha büyük, uzak olan noktalarda ise daha küçük olacaktır. Bu durumun önüne geçilebilmesi için kayıt işlemi başlamadan kameranın

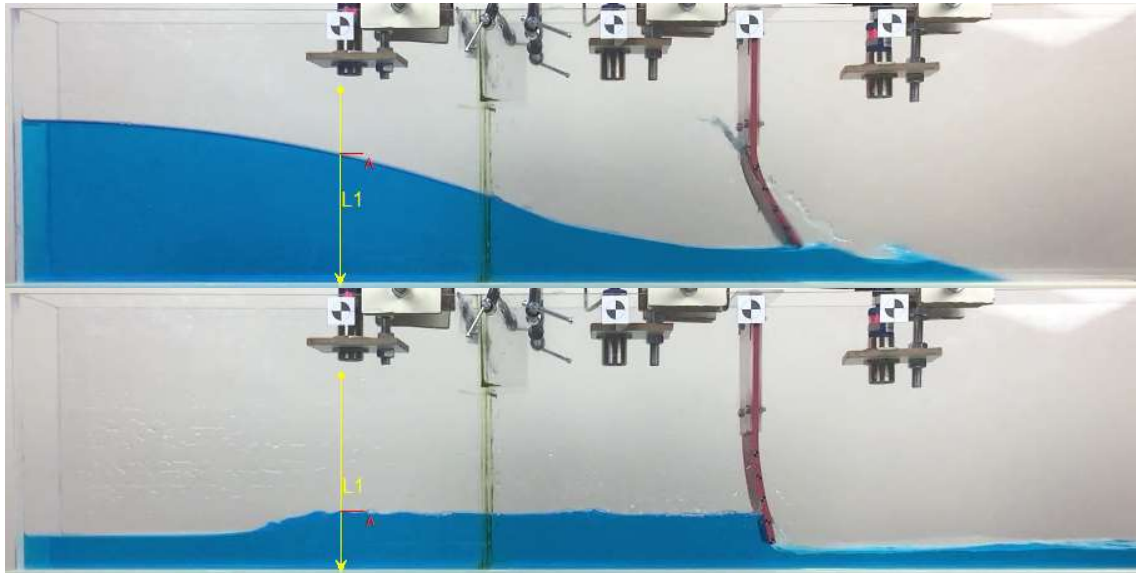


perspektif kalibrasyonunun yapılması, başka bir ifade ile kamera ile çekim yapılan düzlemin dik hale getirilmesi gerekmektedir.

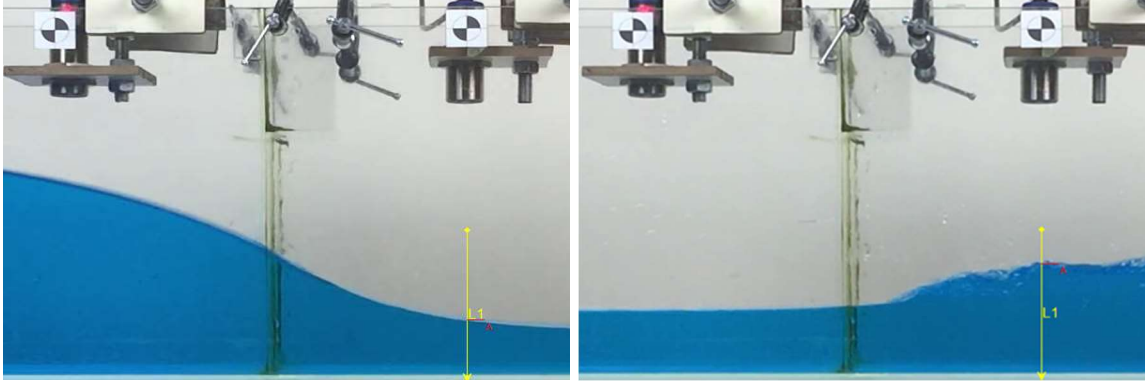
### 3.4. Zamana Bağlı Noktasal Su Derinliği Değerlerinin Görüntü İşleme Tekniği ile Elde Edilmesi

Oluşturulan baraj yıkılması akımının çeşitli notalarındaki zamana bağlı su seviyesi değişimleri görüntü işleme tekniği ve ultrasonik sensörler kullanılarak belirlenmiştir. Görüntü işleme tekniği ile verilerin elde edilmesi amacı ile Kocaman (2007) tarafından gerçekleştirilen doktora tezi çalışmasında kullanılan yöntem benimsenmiştir.

Bu yöntem, akışkanın gıda boyası ile renklendirilmesi ve bu sayede su-hava arakesiti arasında renksel bir zıtlık yaratılması prensibine dayanmaktadır. Oluşturulan bu renksel zıtlık ile bilgisayar ortamındaki kodun zıtlıkları birer kenar olarak algılaması sağlanmıştır. Video görüntülerini oluşturan resim karelerinin her biri için bir doğrultudaki bu kenar noktalarının belirlenmesi, metrik kalibrasyon ile birlikte birer uzunluğa çevrilebilmektedir. Videoların kaydedildiği fps değerinin de bilinmesi ile her bir resim arasında zaman değerine ulaşılabilmekte ve böylece zamana bağlı noktasal su derinliği değişimi elde edilebilmektedir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Görüntü işleme tekniği ile zamana bağlı noktasal su derinliği değerlerinin belirlenmesi



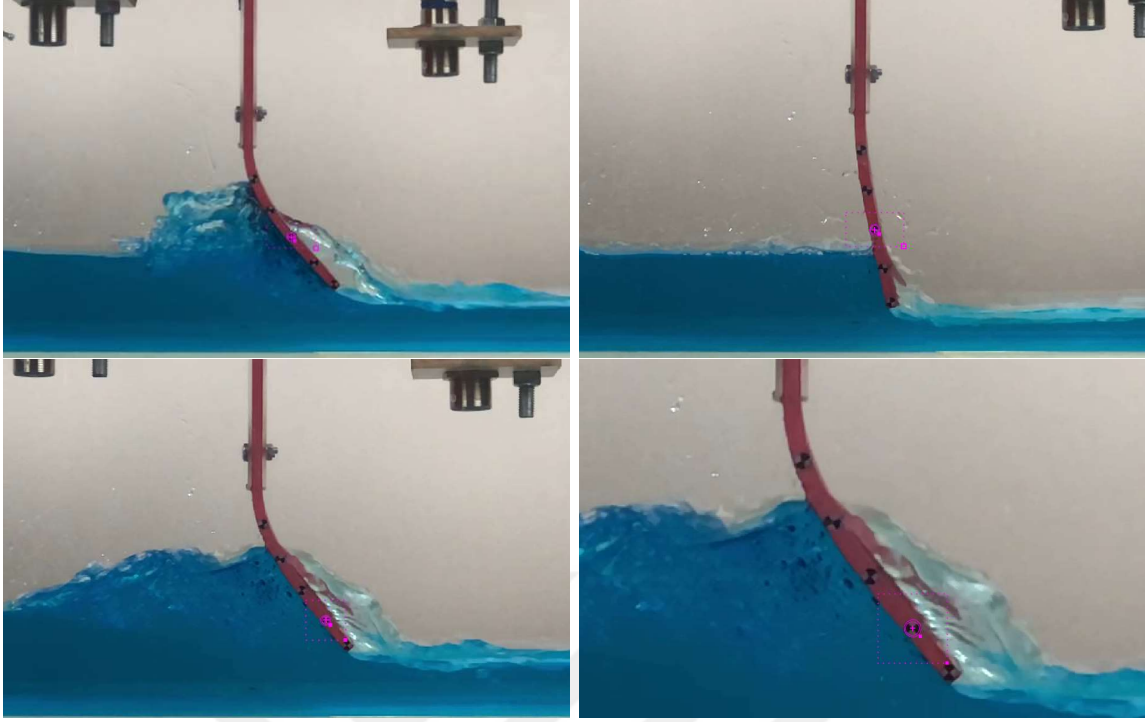
Şekil 3.9. (Devamı) Görüntü işleme tekniği ile zamana bağlı noktasal su derinliği değerlerinin belirlenmesi

Kocaman (2007) doktora çalışmasında bu yöntemi “sanal derinlik ölçer” olarak adlandırılmıştır. Yöntemde ilk olarak ölçüm yapılacak doğrultuda bir vektör oluşturulmaktadır. Bu vektör baş ve uç olmak üzere iki noktanın tanımlanması ile oluşturulmaktadır. Kod çalıştırıldığında bu vektörün oluşturduğu doğru üzerindeki renksel zıtlıklar yakalanmakta ve bu noktaların piksel sayısı ile ifade edilen konum değerleri kaydedilmektedir. Metrik kalibrasyon sonucu elde edilen bir piksele karşılık gelen uzunluk değerleri kullanılarak kaydedilen piksel sayısı verileri uzunluk cinsine çevirmektedir.

Diğer yöntemler ile kıyaslandığında görüntü işleme tekniğinin birçok avantajı bulunmaktadır. Akışkan akımı içerisine yerleştirilen ölçüm aletleri ile kıyaslandığında akımı rahatsız etmeyen bir yapısı vardır. Sensörler ile kıyaslandığında sadece yerleştirildikleri konumlarda değil sağlıklı video görüntüleri elde edildikten sonra istenilen her noktada deney tekrarlanmasına gerek kalmaksızın ölçüm yapılabilir. Ayrıca gelişen teknolojiler ile günümüzde her insanın sahip olduğu akıllı telefon ve benzeri ürünler gerekli olan görüntü kalitesini sağlamakta ve bu da yöntemi diğer yöntemler ile kıyaslandığında ekonomik olarak daha avantajlı bir konuma getirmektedir.

### 3.5. Kauçuk Elemanın Zamana Bağlı Deplasman Değerlerinin Görüntü İşleme Tekniği ile Elde Edilmesi

Kauçuk malzeme deformasyon değerleri “Tracker” adlı yazılım kullanılarak elde edilmiştir. Bu yazılım, video görüntüleri içerisinde seçilen belirli bir ilgi alanındaki görselin RGB değerleri üzerinden takibini mümkün kılmaktadır. Bu doğrultuda kauçuk malzeme kesiti üzerine işaretçiler yapıştırılmış ve bu işaretçilerin takibi gerçekleştirilerek noktasal deplasman değerlerine ulaşılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Kauçuk malzemenin yatay ve düşey doğrultudaki deplasman ölçümü

Yazılım, işaretçilerin bir dairesel alan içerisinde tanımlanması ile bu alana ait RGB değerlerini kullanarak takip yapabilmektedir. RGB eşleşmelerinin taranacağı alan seçilebilmekte ve böylece analiz süresince yalnızca tek bir işaretçinin takibi sağlanabilmektedir. Ayrıca bu karışmaların önüne geçebilmek amacı ile işaretçilerin siyah ve beyaz kısımları şaşırtmalı olarak kauçuk üzerine yapıştırılmıştır. İşaretçilerin sağlıklı bir şekilde takibi sağlandıktan sonra, deplasman değerlerinin elde edebilmesi için metrik kalibrasyonun yapılması gerekmektedir.

Yazılım takip edilmesi amacı ile tanımlanan ilgi alanının zamana göre değişimlerine adapte olabılırken, analiz içerisinde takip edilecek şekil yeniden tanımlanabilmektedir. Videonun fps değerinden elde edilebilecek zaman verisi ile takip sonucu elde edilen konum değerlerinin bilgisayar ortamında kaydedilmesi ile kauçuk malzemenin istenilen noktalarındaki zamana bağlı deplasman değerlerine ulaşılabilir.

### 3.6. Teori

Bu tez çalışması kapsamında sayısal analizler LS-DYNA isimli yazılım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bu bölümünü, sayısal analiz sonuçların elde edilmesi için kullanılan hibrit SPH-FEM metodunun dayandığı teorik bilgiler oluşturmaktadır.

FSI probleminin akışkan fazını modellemede kullanılacak Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH); başlarda astrofizik problemlerine uygulama amacıyla Lucy (1977) ve Gingold ve Monaghan (1977) tarafından geliştirilen ve daha sonraları geniş yelpazede birçok akışkan ve katı mekaniği problemlerine uygulanan, Lagrange temelli bir parçacık metodudur. Temel olarak bir interpolasyon teorisi olan SPH, iki ana yaklaşıma dayanmaktadır; kernel (çekirdek) yaklaşımı ve parçacık yaklaşımı. Metot, uzayda belirli bir konumdaki parçacığın herhangi bir fiziksel değişken değerinin, kernel fonksiyonu tarafından belirlenen etki alanı içerisindeki komşu parçacıkların ağırlıklı fonksiyonlarının interpolasyonu ile elde edilebilmesini mümkün kılmaktadır.

SPH metodu içerisindeki iki ana yaklaşımdan biri olan kernel yaklaşımı, Dirac delta fonksiyonların integrasyon özelliği ile başlar (G. R. Liu ve M. B. Liu, 2003; M. B. Liu ve G. R. Liu, 2010).

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') \delta(x - x') dx' \quad (3.1)$$

burada;  $f(x)$ , uzayda 3 boyulu bir pozisyon vektörü olan  $x'$ deki bir fonksiyonun değerini,  $\Omega$  çözüm alanını,  $\delta(x - x')$  ise Dirac delta fonksiyonunu temsil etmektedir. Eş. 3.1'de, Dirac delta fonksiyonunun yerine kernel fonksiyonunun getirilmesi ile kernel yaklaşımı gerçekleştirilmiş olur,

$$f(x) \cong \int_{\Omega} f(x') W(x - x', h) dx' \quad (3.2)$$

burada;  $W(x - x', h)$  kernel fonksiyonunu,  $h$  ise kernel fonksiyonunun etkin olduğu etkileşim mesafesini temsil etmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, kernel fonksiyonlarının bir Dirac delta fonksiyonu olmadığı ve bu nedenle Eş. 3.2'nin bir yaklaşım olduğudur. Bunun yanı sıra kernel fonksiyonları aşağıda sıralanan bazı matematiksel özellikleri sağlamaktadır,

$$W(x - x', h) \geq 0 \quad (3.3)$$

$$W(x - x', h) = W(x' - x, h) \quad (3.4)$$

$$\int_{\Omega} W(x - x', h) dx' = 1 \quad (3.5)$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(x - x', h) = \delta(x - x') dx' \quad (3.6)$$

$$W(x - x', h) = 0, \text{ ise } |x - x'| > \kappa h \quad (3.7)$$

burada  $\kappa$  kernel fonksiyonu ile ilişkili olarak efektif alanı tanımlamada kullanılan bir sabittir. LS-DYNA yazılımı tarafından desteklenen ve dolayısı ile bu tez çalışmasında esas alınacak kernel fonksiyonu; cubic-B-spline,

$$W(R, h) = \alpha_d \times \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2}R^3 & 0 \leq R \leq 1 \\ \frac{1}{6}(2 - R)^3 & 1 \leq R < 2 \\ 0 & R \geq 2 \end{cases} \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilebilir (Jonsén, Pålsson ve Häggblad, 2012). Burada;  $R = |x - x'|/h$  ve  $\alpha_d$ ; sabit değer olarak bir, iki ve üç boyutlu problemlerde sırasıyla  $1/h$ ,  $15/7\pi h^2$  ve  $3/2\pi h^3$  değerlerini almaktadır.

Eş. 3.2'deki kernel yaklaşımının integral formu, etki alanı içerisindeki parçacıkların ayrık toplamları cinsinden ifade edilebilir. Bu işlem, SPH metodunda temel iki yaklaşımdan biri olan parçacık yaklaşımı adımını oluşturmaktadır,

$$f(x_i) \cong \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \cdot W_{ij} \quad (3.9)$$

$$W_{ij} = W(x_i - x_j, h) \quad (3.10)$$

Eş. 3.9 bir fonksiyonun herhangi bir  $i$  parçacığındaki değerinin, etki alanı içerisindeki komşu parçacıkların ağırlıklı ortalamaları ile hesaplanabileceğini ortaya koymaktadır. Eş. 3.9'un derivatif formda yazılması ile,

$$\nabla \cdot f(x_i) \cong \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (3.11)$$

elde edilir. Burada  $f_i$ , fonksiyonun  $i$  parçacığındaki yaklaşık değerini,  $f_j$ ,  $i$  parçacığına komşu bir parçacıkdaki fonksiyonun değerini,  $m_j$  ve  $\rho_j$  komşu parçacığın kütle ve yoğunluğunu,  $N$  etki alanı içerisindeki komşu parçacık sayısını,  $\nabla_i W_{ij}$  derivatif formda kernel fonksiyonunu temsil etmektedir ve,

$$\nabla_i W_{ij} = \frac{x_{ij}}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{r_{ij}} \quad (3.12)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $r_{ij}$ ,  $i$  ve  $j$  parçacıkları arasındaki mesafeyi tanımlamaktadır. Literatürde SPH formülasyonlarının farklı derivatif formda gösterimleri mevcuttur. Monaghan (1992) çalışmasında derivatif formda daha iyi simetri özelliği sağlayan bir önermede bulunmuştur ve bu formülasyon araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda bu çalışmada da bu formülasyon kullanılacaktır,

$$\nabla \cdot f(x_i) \cong \rho_i \left[ \sum_{j=1}^N m_j \left[ \frac{f(x_j)}{\rho_j^2} + \frac{f(x_i)}{\rho_i^2} \right] \cdot \nabla_i W_{ij} \right] \quad (3.13)$$

Eş. 3.13'ün kütle ve momentumun korunumu denklemlerine uygulanması ile,

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j (v_i - v_j) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i} \quad (3.14)$$

$$\frac{D\vec{v}_i}{Dt} = \sum_{j=1}^n m_j \left( \frac{P_i}{(\rho_i)^2} + \frac{P_j}{(\rho_j)^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i} \quad (3.15)$$

SPH metodunda akışanların modellenmesi için kullanılan iki temel denklem olan süreklilik (Eş. 3.14) ve momentum (Eş.3.15) denklemleri elde edilir.

SPH metodunun hidrodinamik problemlerine efektif bir şekilde uygulanabilmesi için şok dalgaları etkilerinin yöntemce başarılı bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Fiziksel olmayan dalgalanmaların önüne geçilebilmesini sağlayan yapay viskozite teriminin SPH analizinde en çok kullanılan formülasyonu olan Monaghan tipi yapay viskozite,

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-\alpha_{\Pi} \bar{c}_{ij} \mu_{ij} + \beta_{\Pi} \mu_{ij}^2}{\bar{\rho}_{ij}} & v_{ij} \cdot x_{ij} < 0 \\ 0 & v_{ij} \cdot x_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (3.16)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,

$$\mu_{ij} = \frac{h_{ij} v_{ij} \cdot x_{ij}}{|x_{ij}|^2 + \varphi^2} \quad (3.17)$$

$$\bar{c}_{ij} = \frac{1}{2}(c_i + c_j) \quad (3.18)$$

$$\bar{\rho}_{ij} = \frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j) \quad (3.19)$$

$$h_{ij} = \frac{1}{2}(h_i + h_j) \quad (3.20)$$

$$v_{ij} = v_i - v_j \quad \text{ve} \quad x_{ij} = x_i - x_j \quad (3.21)$$

değerlerini almaktadır.  $\alpha_{\Pi}$  ve  $\beta_{\Pi}$  birer sabit olup, Monaghan (1994) tarafından su modellenirken  $\beta_{\Pi}$  değerinin 0,  $\alpha_{\Pi}$  değerinin ise 0.01 alınabileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte, literatürde problem dinamiklerine bağlı olarak  $\alpha_{\Pi}$  teriminin 0.01 ile 0.1 ile değişen değerler arasında seçildiği çalışmalar mevcuttur.

Yapay viskozite teriminin momentum denkleminde eklenmesi ile,

$$\frac{D\vec{v}_i}{Dt} = \sum_{j=1}^n m_j \left( \frac{P_i}{(\rho_i)^2} + \frac{P_j}{(\rho_j)^2} + \Pi_{ij} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i} \quad (3.22)$$

elde edilir ve problemin çözümünde kullanılacak momentum denklemi son halini almış olur.

Kullanılacak olan SPH metodunda akışkanlar zayıf miktarda sıkıştırılabilir kavramına göre modellenmektedir. Bu nedenle problemin tamamen ele alınıp çözülebilmesi için yoğunluk ve basınç değişkenleri arasındaki bir ilişki oluşturacak hal denkleminde ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma kapsamında suyun modellenmesi için Gruneisen hal denklemi kullanılmıştır (LS-DYNA Keyword User's Manual, 2012).



$$P_i = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu_D \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu_D - \frac{\alpha_0}{2} \mu_D^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu_D - S_2 \frac{\mu_D^2}{\mu_D + 1} - S_3 \frac{\mu_D^3}{(\mu_D + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha_0 \mu_D) E_0 \quad (3.23)$$

burada  $S_1$ ,  $S_2$  ve  $S_3$  şok ve parçacık hızlarından elde edilen eğimin sabitlerini,  $c_0$  su içerisindeki ses hızını,  $\gamma_0$  Gruneisen gama sabitini,  $\alpha_0$ ,  $\gamma_0$  değerine bağlı ilk hacim düzeltesi değerini,  $E_0$  başlangıç enerji değerini,  $\mu_D = \frac{\rho_i}{\rho_0} - 1$  değerini ve  $\rho_0$  başlangıç yoğunluk değerini temsil etmektedir. Bu formülasyon kullanılarak sayısal analizde suyu modellemek için kullanılan parametreler Çizelge 3.2’de sunulmuştur (Boyd, Royles ve El-Deeb, 2000).

Çizelge 3.2. Hal denkleminde kullanılan parametreler

$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$c_0$ (m/s)	$\gamma_0$	$\alpha_0$	$E_0$ (J/kg)
1000	1979	0	0	1484	0.11	3	$3,072 \times 10^5$

SPH metodu kullanılırken parçacıkların deney tankını temsil eden rijit duvarlar ile aralarındaki sınır şartı LS-DYNA yazılımı içerisindeki “*BOUNDARY\_SPH\_SYMMETRY\_PLANE*” formülasyonu kullanılarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte kauçuk malzeme FEM metodu kullanılarak modellenmiştir ve davranışı lineer-elastik kabuller ile ifade edilmiştir. SPH metodu ile tanımlanan akışkan ile FEM metodu kullanılarak tanımlanan kauçuk malzeme arasındaki etkileşim ise LS-DYNA yazılımı içerisindeki “*NODE\_TO\_SURFACE*” algoritması kullanılarak modellenmiştir (Hallquist, 2006; LS-DYNA Keyword User’s Manual, 2012).

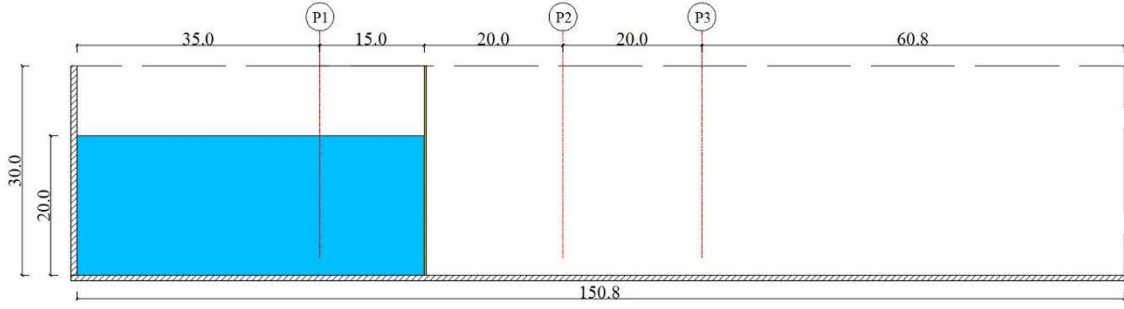
## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında, serbest yüzeyle akışkanların elastik katı cisimler ile etkileşimini esas alan bir FSI problemi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Oluşturulan deney düzeneği ile tipik bir baraj yıkılması akımı oluşturulmuş ve bu akımın, mansap kısmına konumlandırılmış, elastik davranış gösteren kauçuk bir malzeme ile etkileşimi sağlanmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışma, akışkanların SPH, katı elastik cisimlerin ise FEM metodu kullanılarak modellendiği hibrit SPH-FEM yöntemi ile sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal modellerin çözümü Intel 8750H işlemci, 8 GB RAM barındıran, 12 işlem birimli bir bilgisayar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal analiz sonuçları, zamana bağlı noktasal su derinlikleri ve kauçuk malzemenin deplasman değerleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Kauçuk malzemenin deplasman değerleri görüntü işleme tekniği kullanılarak, zamana bağlı noktasal su derinliği değerleri ise görüntü işleme tekniğinin yanı sıra ultrasonik sensörler kullanılarak elde edilmiştir.

Bu bölümde ilk olarak SPH metodunun kullanılan parametreler ile ilintili klasik bir baraj yıkılması akımını modellemedeki başarısının tespiti ve deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan kauçuk malzemenin elastisite modülünün belirlenebilmesi amacıyla bir dizi deneysel, sayısal ve analitik çalışma yürütülmüştür. Akabinde bu çalışmalar sonucu elde edilen veriler ışığında bir FSI probleminin deneysel ve sayısal incelemesi gerçekleştirilmiştir.

### 4.1. Klasik Bir Baraj Yıkılması Probleminin SPH Yöntemi ile Sayısal Olarak Modellenmesi

SPH metodunun seçilen parametreler ile alakalı baraj yıkılması problemlerini modellemedeki başarısı mevcut tez çalışması kapsamındaki baraj yıkılması akımı ele alınarak sınanmıştır. Bu amaçla deneysel ve sayısal analiz sonuçları, belirli zaman adımlarındaki su yüzü profilleri ve zamana bağlı noktasal su derinliği verileri yardımı ile karşılaştırılmış ve sayısal model performansı incelenmiştir. Oluşturulan deney düzeneği ve zamana bağlı derinlik ölçümlerinin yapılacağı noktalar Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Sayısal modelde suyu tanımlamak için kullanılan malzeme özellikleri ve çeşitli denemeler sonucu ulaşılan ve bu tez çalışması kapsamında bundan sonraki SPH analizlerde kullanılacak olan parametreler ise Çizelge 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1 Deney düzeneği ve ölçüm noktaları

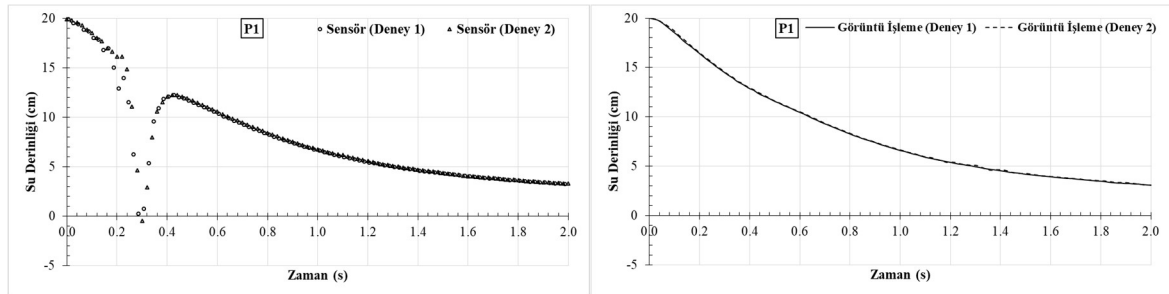
Çizelge 4.1. Malzeme özellikleri ve sayısal modelde kullanılan parametreler

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (N.s/m <sup>2</sup> )	$d_p$ (m)	$h$ (m)	$\alpha_{II}$
1000	0,001	0,0025	0,003125	0,01

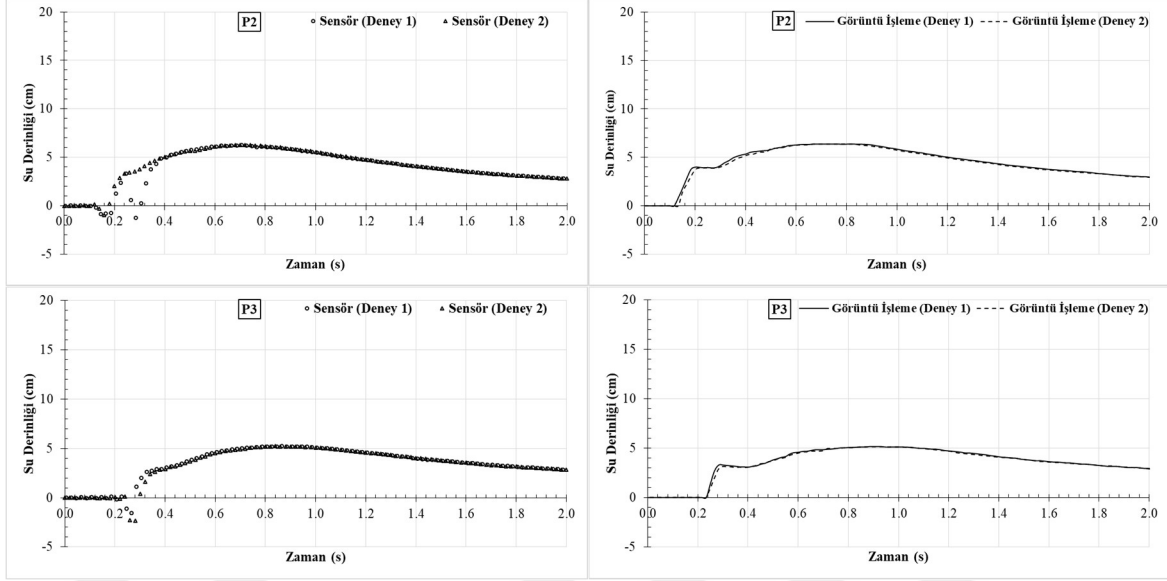
Burada;  $\rho$  yoğunluk,  $\mu$  dinamik viskozite,  $d_p$  parçacıklar arası mesafe,  $h$  etkileşim mesafesi ve  $\alpha_{II}$  yapay viskozite terimlerini temsil etmektedir.

#### 4.1.1. Deneysel Tekrarlanabilirlik

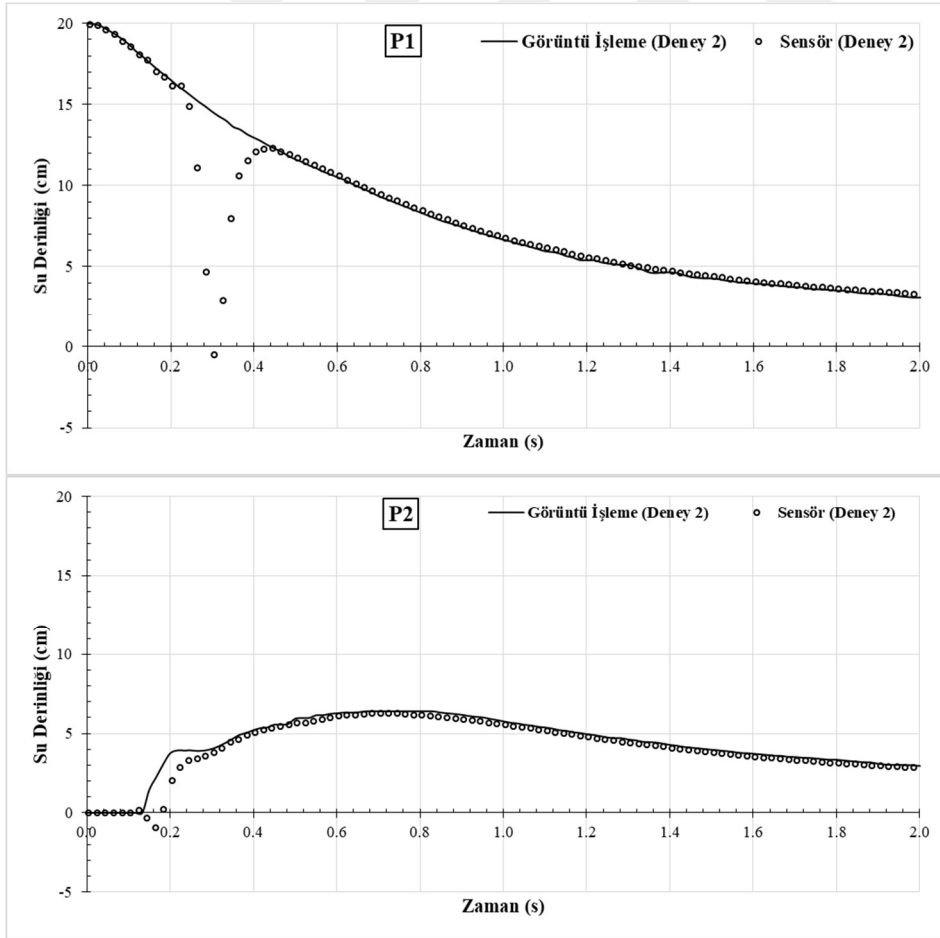
SPH analizi sonuçlarının deneysel veriler ile uyumunun araştırılması öncesinde deneysel verilerin güvenilirliği deneysel tekrarlanabilirlik kavramı üzerinden sınanmıştır. Bu amaçla deney iki kez gerçekleştirilmiş ve her iki deney ile elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda, her iki deney için sensörler ve görüntü işleme tekniği ile elde edilen sonuçlar kendi içlerinde karşılaştırılıp sonuçlar Şekil 4.2’de, sensör ve görüntü işleme tekniği kullanılarak elde edilen sonuçların birbirleri ile karşılaştırılması ise Şekil 4.3’de sunulmuştur.



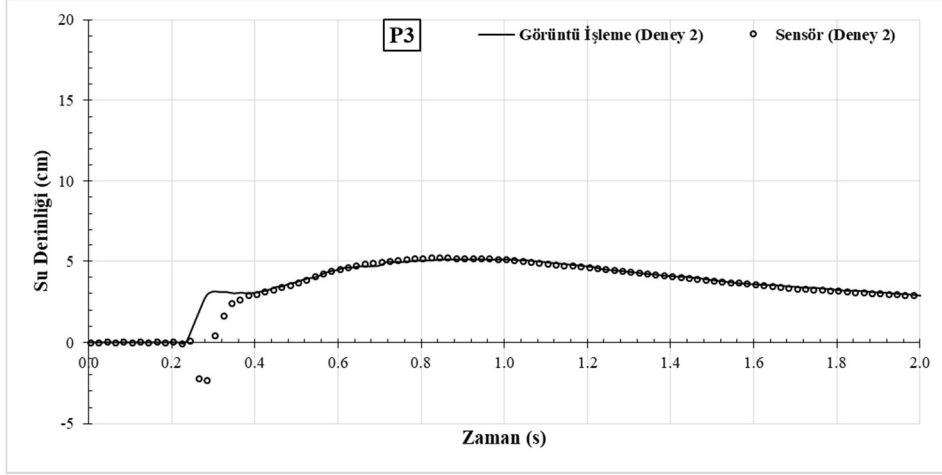
Şekil 4.2. Ultrasonik sensör ve görüntü işleme yöntemi ile elde edilen su derinliği değerlerinin kendi içlerinde karşılaştırılması



Şekil 4.2. (Devamı) Ultrasonik sensör ve görüntü işleme yöntemi ile elde edilen su derinliği değerlerinin kendi içlerinde karşılaştırılması



Şekil 4.3. Ultrasonik sensör ve görüntü işleme ile elde edilen verilerin birbirleri ile karşılaştırılması



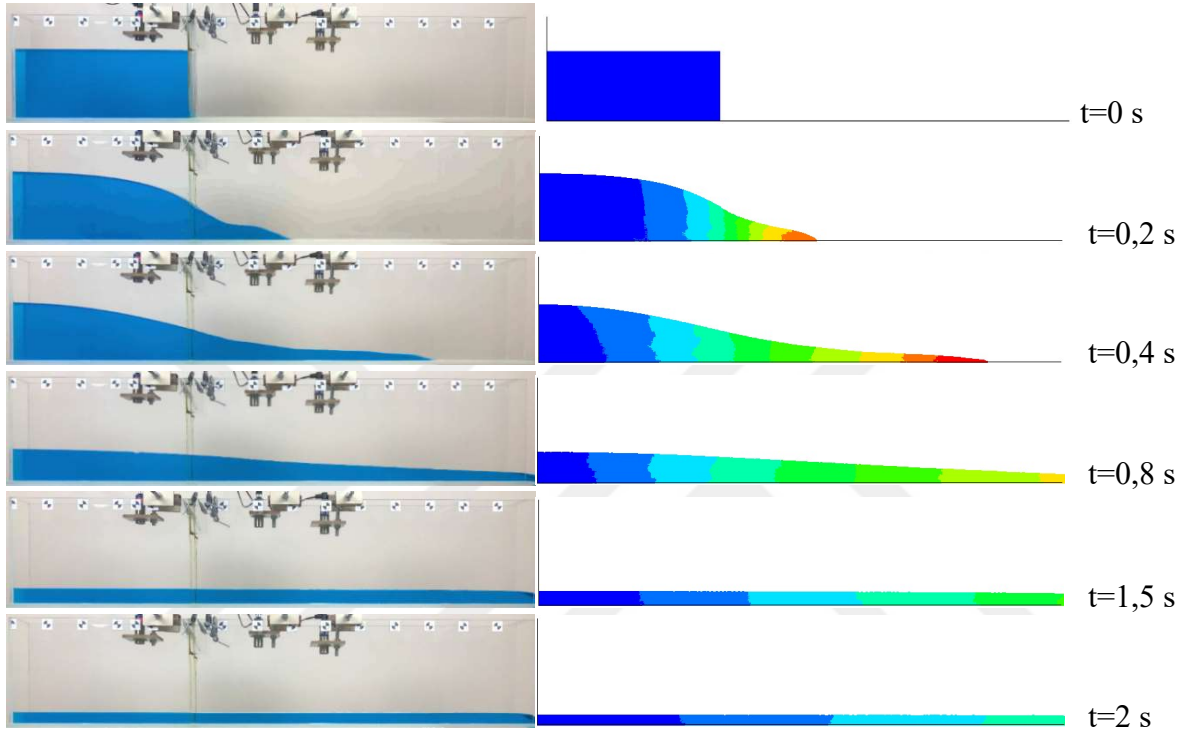
Şekil 4.3. (Devamı) Ultrasonik sensör ve görüntü işleme ile elde edilen verilerin birbirleri ile karşılaştırılması

Şekil 4.2 incelendiğinde her iki deney ile elde edilen sensör ve görüntü işleme verilerin kendi içlerinde birbirleri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte ultrasonik sensörlerin yine birbirleri ile tutarlı olacak şekilde bazı noktalarda ölçüm gerçekleştiremediği ve sıfır noktasına yaklaşan ve kimi zaman altına düşen değerler verdiği dikkat çekmektedir. Sensörlerin bu noktalarda okuma yapamamasının, kapağın ani şekilde kaldırılması ile yer çekimi etkisinde hareket eden su kütesinin barındırdığı yüzeysel eğrilikler olduğu düşünülmektedir. Bu eğriliklerin sensör kaynaklarından çıkan dalgalarda, kaynak doğrultularından farklı doğrultulara yansımaları nedeniyle sensörlerin bazı zaman adımlarında okuma gerçekleştiremediği düşünülmektedir.

Görüntü işleme ve sensör verilerinin karşılaştırıldığı Şekil 4.3 incelendiğinde ise her iki ölçüm tekniği ile elde edilen verilerin birbirleri ile tutarlılıkları göze çarpmaktadır. Bunun yanı sıra, sensörler ile bazı zaman adımlarında ölçümü yapılamayan değerlerin, görüntü işleme ile elde edilen veriler kullanılarak tanımlanabileceği görülmektedir. Tüm bu sonuçlar göz önüne alındığında, her iki deneyin de birbirleri ile tutarlı sonuçlar verdiği görülmekte ve bu verilerin sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırma yapabilmek için kullanılabilir olduğu düşünülmektedir.

#### 4.1.2. Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

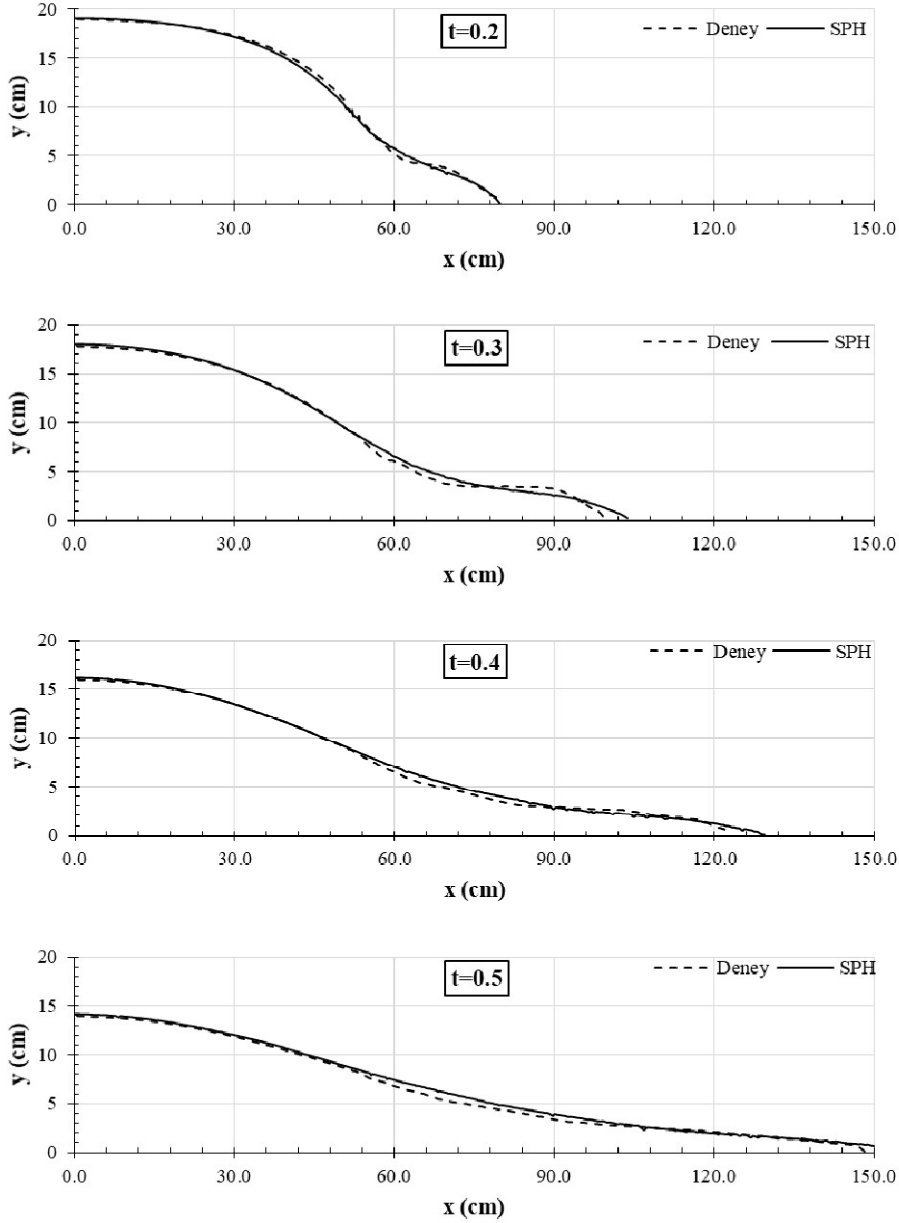
Belirlenen parametreler kullanılarak SPH metodu ile 2 saniye süreli bir sayısal analiz gerçekleştirilmiş ve çeşitli zaman adımlarındaki deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırmalı görselleri Şekil 4.4’de sunulmuştur.



Şekil 4.4. Çeşitli zaman adımlarındaki karşılaştırmalı deneysel ve sayısal analiz sonuçları

SPH analizi sonucu elde edilen çözümün etkinliği, belirli zaman adımlarındaki su yüzü profilleri üzerinden deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 4.5’de sunulmuştur. Deneysel ve sayısal analiz sonucu elde edilen karşılaştırmalı su yüzü profilleri incelendiğinde, başlangıçta (0,2 s) sonuçlar arasında yüksek uyum gözlenirken, zaman adımları ilerledikçe SPH ile elde edilen çözüm sonuçlarında dalga önü yayılma hızının deneysel çalışmaya kıyasla bir miktar daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan SPH metodunun teorisi incelendiğinde, yöntemin herhangi bir türbülans modeli ve akışkan ile katı cidar arasındaki kaymama (no-slip) sınır şartı formülasyonu barındırmadığı görülecektir. Baraj yıkılması akımlarında, problem dinamiklerine bağlı olarak dalga önü yüksek derecede türbülans etkisi altında olabilir (Shigematsu, Liu ve Oda, 2004). Bu türbülans etkilerinin enerji kayıplarına ve dalga önü hızlarında düşmelere neden olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, katı cidar ile akışkan arasındaki temas noktalarında akışkan hızının sıfır olduğunu ifade eden kaymama sınır

şartının da sonuçlar arasındaki farklılıklara neden olabileceği düşünülebilir. Bununla birlikte deneysel çalışmada suyu durağan halde tutmak amacı ile kullanılan kapak, sayısal model oluşturulurken dikkate alınmamıştır. Kapağın kalkış hızı literatürde kabul edilen, ihmal edilebilecek bir değere sahip olsa da, özellikle başlangıç aşamasında su yüzü profillerinin oluşumu üzerindeki etkileri gözden kaçırılmamalıdır (Ozmen-Cagatay ve Kocaman, 2010).

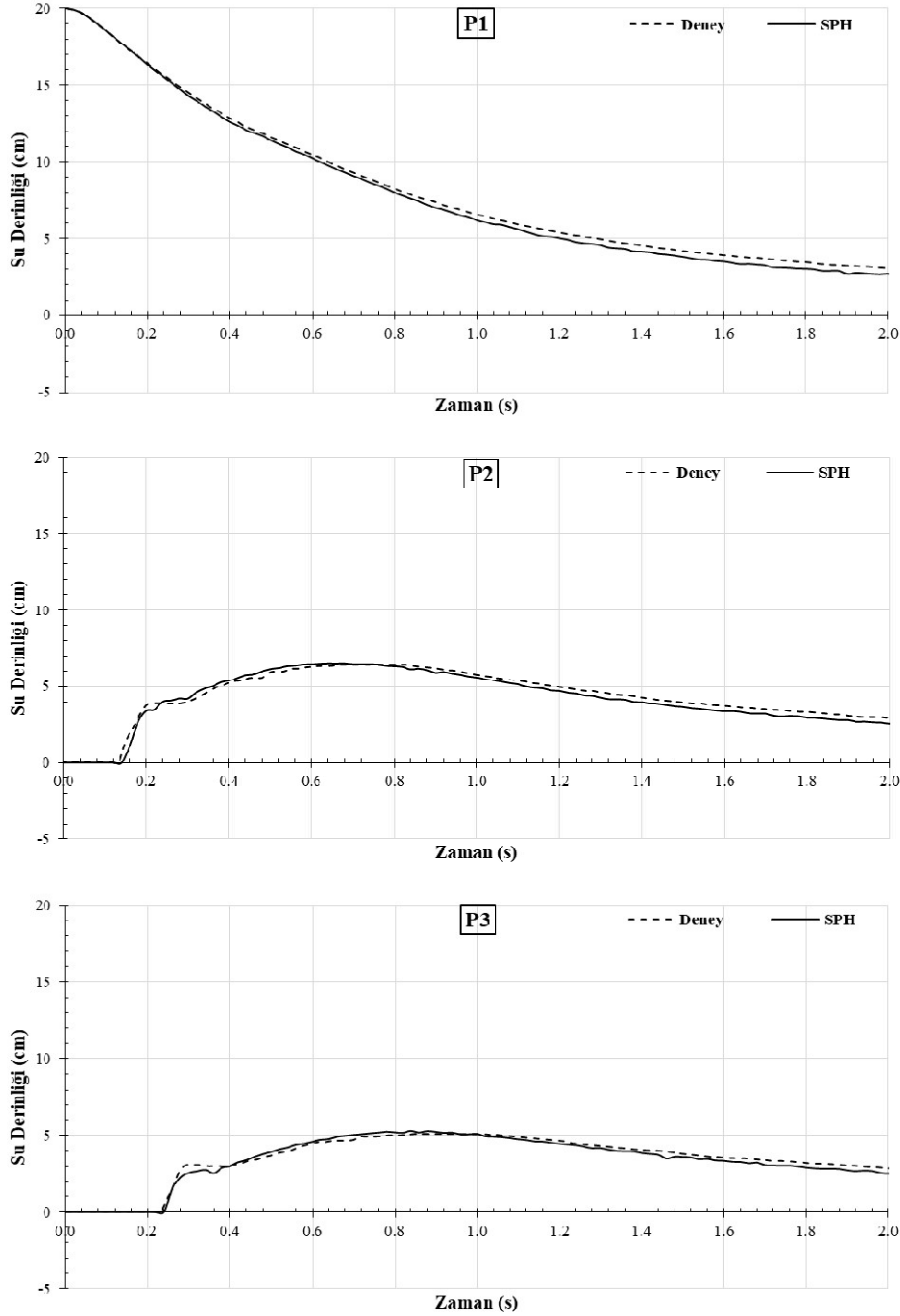


Şekil 4.5. Çeşitli zaman adımlarındaki karşılaştırmalı su yüzü profilleri

Su yüzü profillerinin yanı sıra karşılaştırmalar noktasal su derinlikleri üzerinden de gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının noktasal su derinlikleri verileri kullanılarak karşılaştırmaları Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Memba noktasındaki (P1) sayısal



analiz sonuçlarında, 0,5 saniye ve sonrasında deneysel sonuçlardan bir miktar sapma gösterip, sayısal analiz ile elde edilen su seviyesi değerlerinde daha hızlı gelişen bir düşüş göze çarpmaktadır. Mansap kısmındaki noktalarındaki (P2 ve P3) su seviyelerinin deneysel ve sayısal verileri arasında genel olarak başarılı bir uyum mevcutken, P3 noktasındaki su seviyesinin ilk yükseliş miktarının sayısal analiz sonucu elde edilen verilerden bir miktar daha yüksek olması, 0,3 saniyede oluşturulan su yüzü profili ile paralellik göstermektedir.



Şekil 4.6. Deneysel ve sayısal analiz ile elde edilen noktasal su derinliklerinin karşılaştırılması

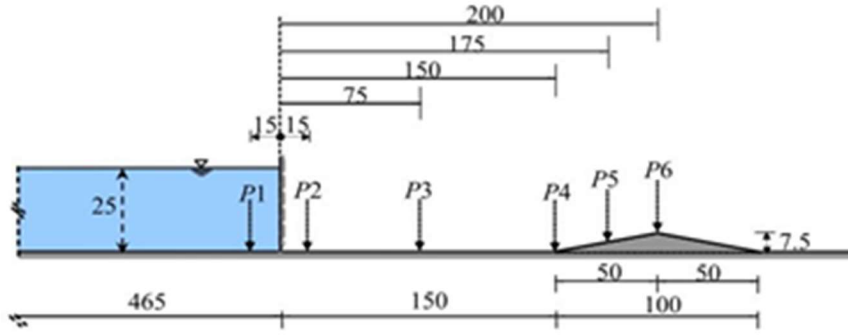
### 4.1.3. SPH Sonuçlarının FVM Tabanlı OpenFOAM Çözücüsü Kullanılarak Elde Edilen Sayısal Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması

SPH metodunun teorisinde herhangi bir türbülans modeli ve kaymama sınır şartı formülasyonu barındırmamasının, bu tez çalışması kapsamında elde edilen baraj yıkılması akımı sayısal analiz sonuçları üzerindeki etkisi, bünyesinde bir türbülans modeli ve kaymama sınır şartı formülasyonu barındıran FVM tabanlı bir sayısal yöntem kullanılarak araştırılmıştır. Bu amaçla deneysel çalışmaları gerçekleştirilen baraj yıkılması akımı, FVM temelli OpenFOAM çözücü kullanılarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar SPH metodu sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

OpenFOAM, Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) ve süreklilik denklemlerini esas alan ve serbest yüzeyli akımlarının modellemelerini gerçekleştirebilen açık kaynak kodlu bir çözücü olarak literatürde ön plana çıkmaktadır. Çözücünün kullandığı teorik altyapı hakkında kapsamlı bilgi Holzmann (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada sunulmuştur. Bu bölümde ilk olarak OpenFOAM kullanılarak literatürdeki bir baraj yıkılması akımı modellenmiş ve çözücünün etkinliği araştırılmıştır. Akabinde oluşturulan model tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen baraj yıkılması akımının modellenmesinde kullanılmış ve elde edilen sonuçlar SPH metodu ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

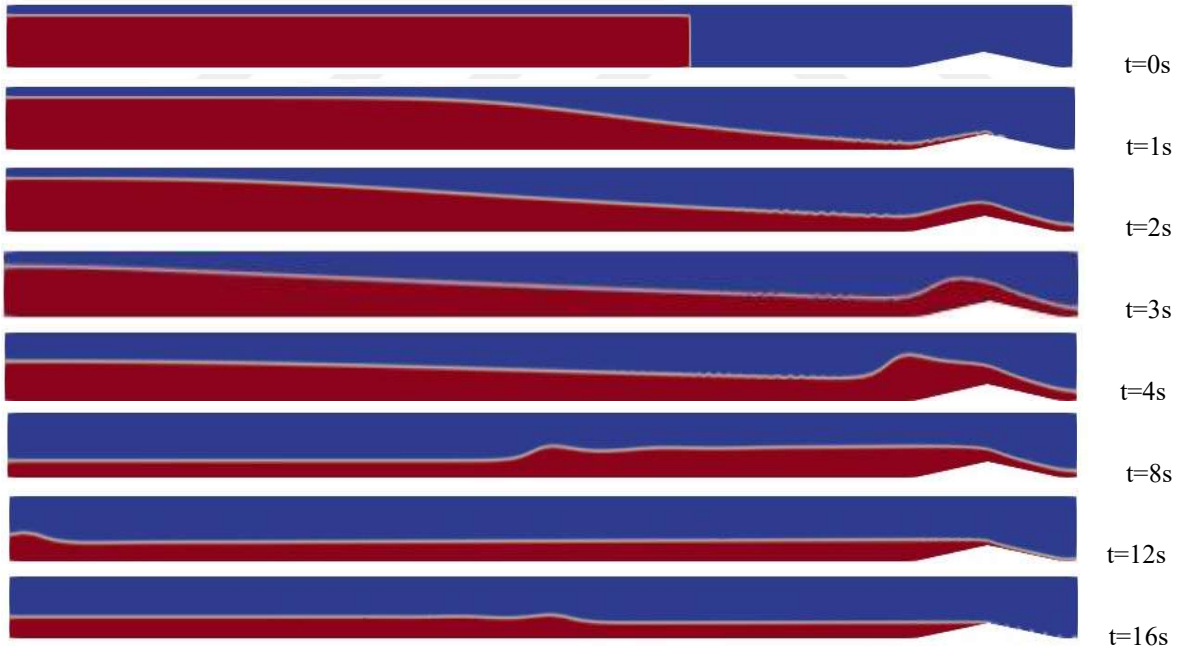
#### Literatürdeki Bir Baraj Yıkılması Probleminin OpenFOAM ile Sayısal Olarak Modellenmesi

OpenFOAM çözücüsünün baraj yıkılması problemlerini modellemedeki başarısı Özmen-Çağatay ve diğerleri (2014) tarafından gerçekleştirilen üçgen bir eşik üzerinden geçen baraj yıkılması akımının incelendiği deneysel çalışma ile elde edilen veriler kullanılarak sınanmıştır. Karşılaştırmalar çeşitli noktalardaki su derinliği verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modellenen deney düzeneği ve karşılaştırma verilerinin elde edileceği ölçüm noktaları Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

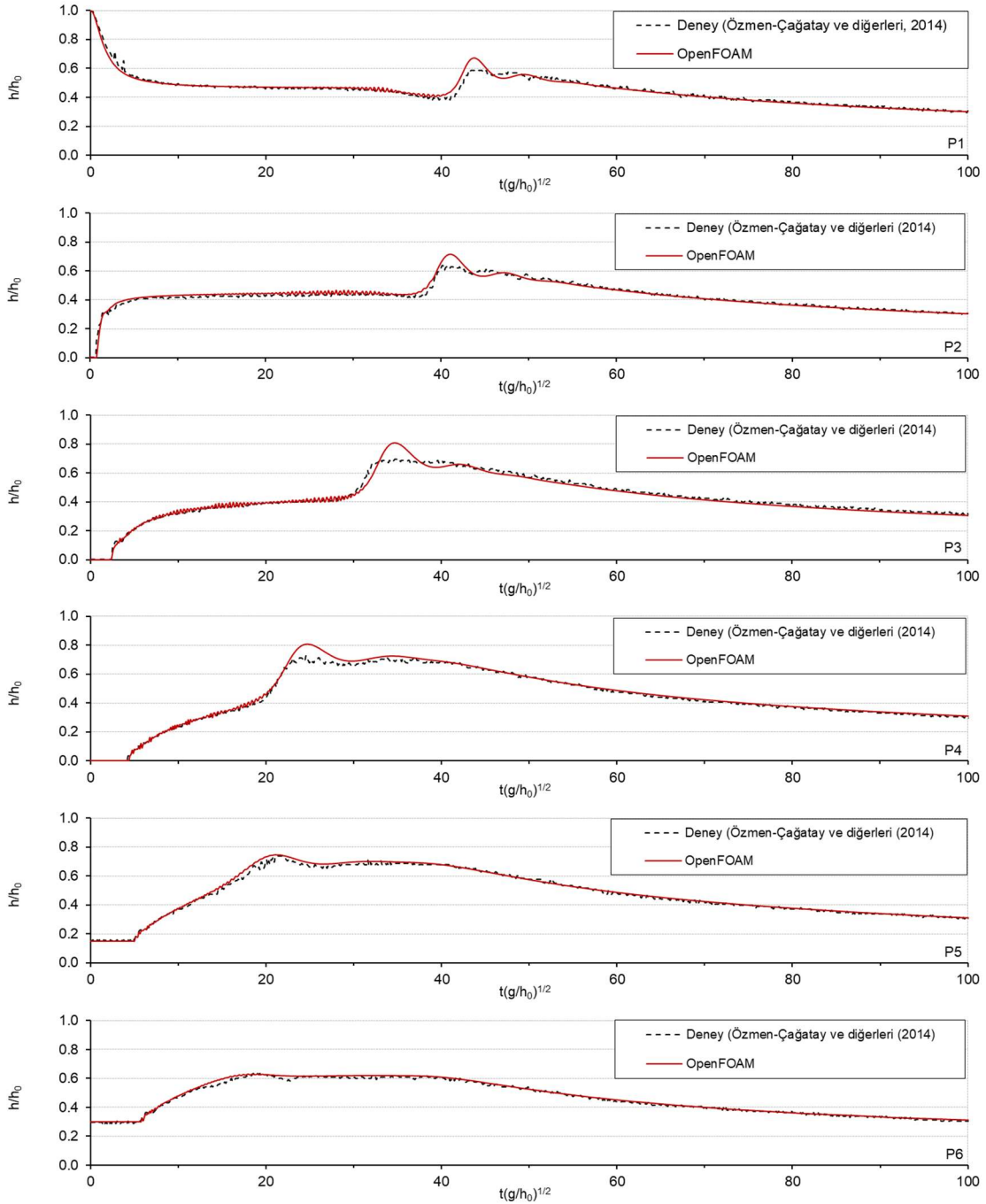


Şekil 4.7. Deney düzeneği ve ölçüm noktaları (Özmen-Çağatay ve diğerleri, 2014) (cm)

Deney düzeneğine uygun olacak şekilde 2 boyutlu olarak modellenen çalışma ile 16 saniyelik bir analiz gerçekleştirilmiş ve çeşitli zaman adımlarındaki görselleri Şekil 4.8’de sunulmuştur. Elde edilen çözüm verileri ışığında 6 nokta için elde edilen boyutsuz zamana bağlı noktasal su derinlikleri ise deneysel veriler ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.9’da sunulmuştur.



Şekil 4.8. Çeşitli zaman adımlarına ait OpenFOAM analiz sonuçları

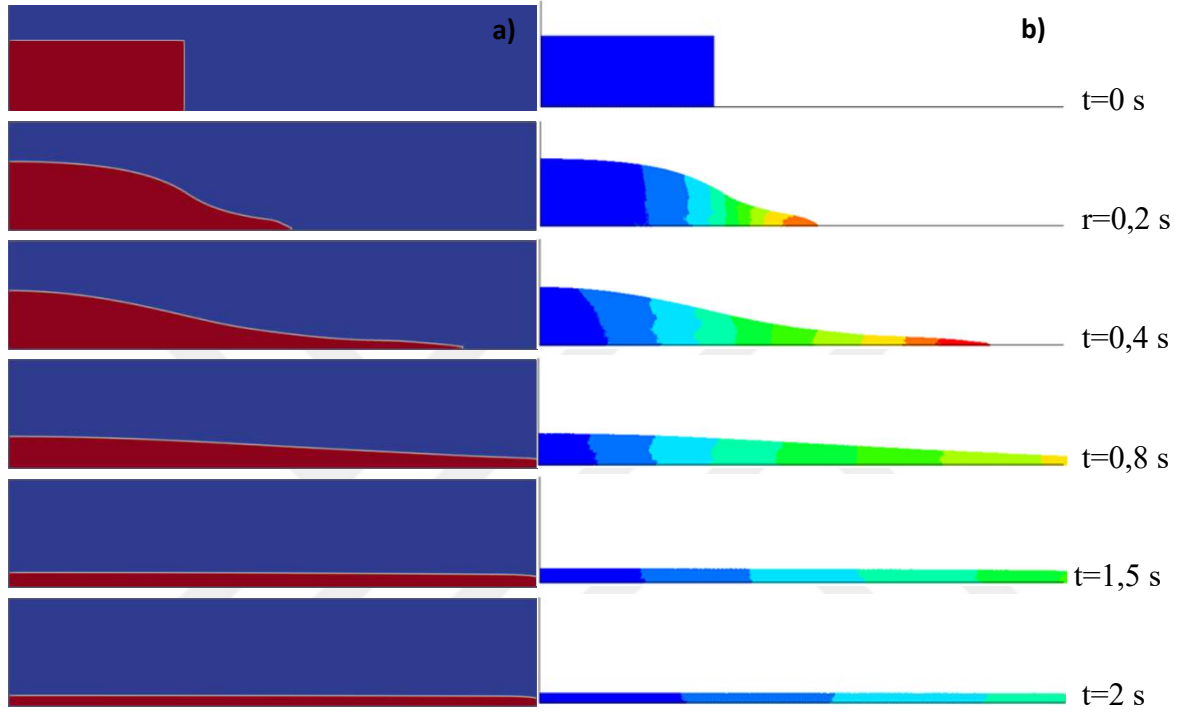


Şekil 4.9. Çeşitli noktalardaki zamana bağlı noktasal su derinliklerinin karşılaştırılması

Şekil 4.9 incelendiğinde OpenFOAM ile elde edilen sonuçların, deneysel veriler ile yüksek derecede uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda, OpenFOAM ile oluşturulan modelin bu tez çalışması kapsamında oluşturulan baraj yıkılması akımını modellemede kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu amaçla bir sonraki bölümde, bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen baraj yıkılması akımının OpenFOAM ile sayısal modellemesi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar SPH metodu sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

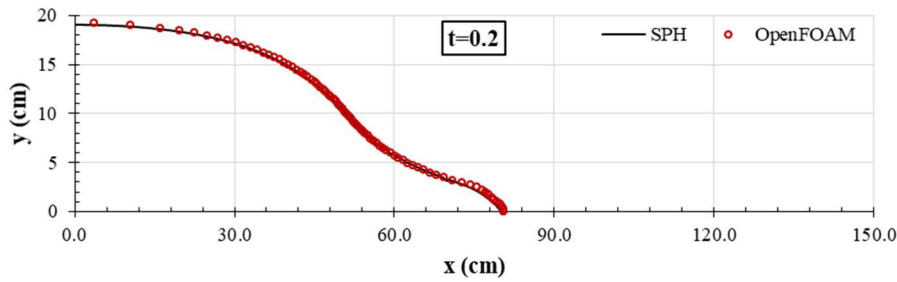
### SPH Sonuçlarının OpenFOAM Sonuçları ile Karşılaştırılması

OpenFOAM çözücüsü kullanılarak, SPH analizlerine paralel 2 saniyelik bir çözüm gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçların çeşitli zaman adımlarındaki görselleri SPH metodu çözüm sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.10'da sunulmuştur.

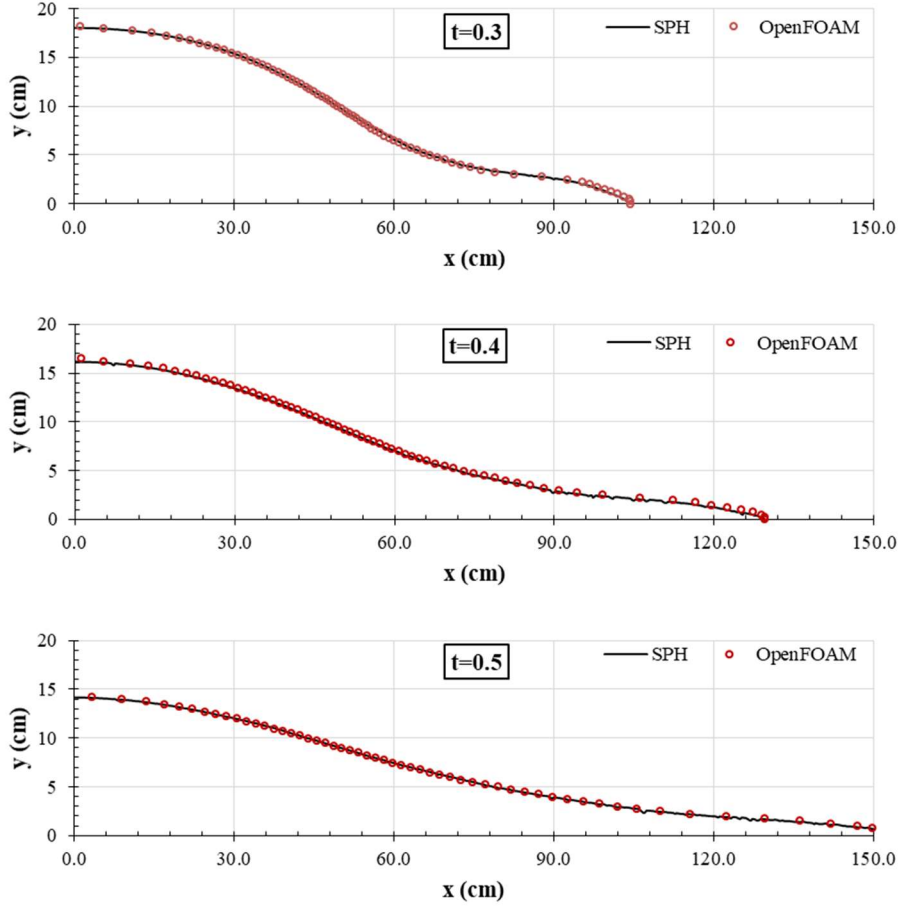


Şekil 4.10. Sayısal analiz sonuçlarının çeşitli zaman adımlarındaki görsellerinin karşılaştırılması a) FVM b) SPH

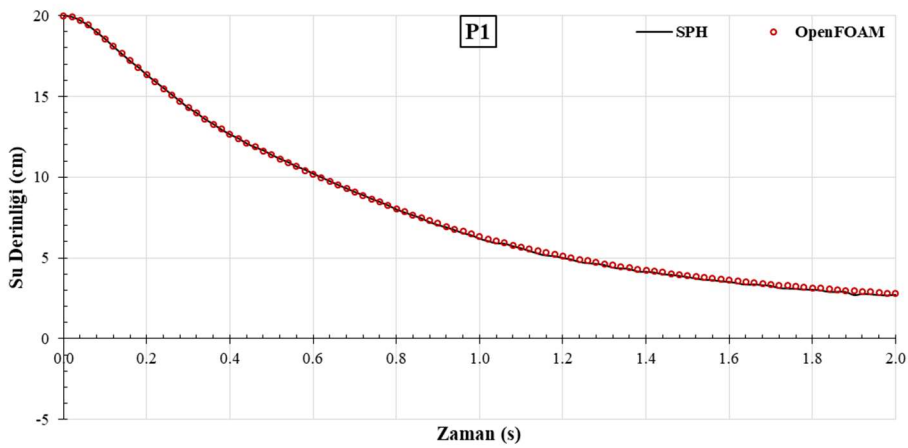
İki sayısal metod arasındaki karşılaştırmalar zamana bağlı noktasal su derinlikleri ve su yüzü profilleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmalı su yüzü profilleri Şekil 4.11'de, zaman bağlı noktasal su derinlikleri ise Şekil 4.12'de sunulmuştur.



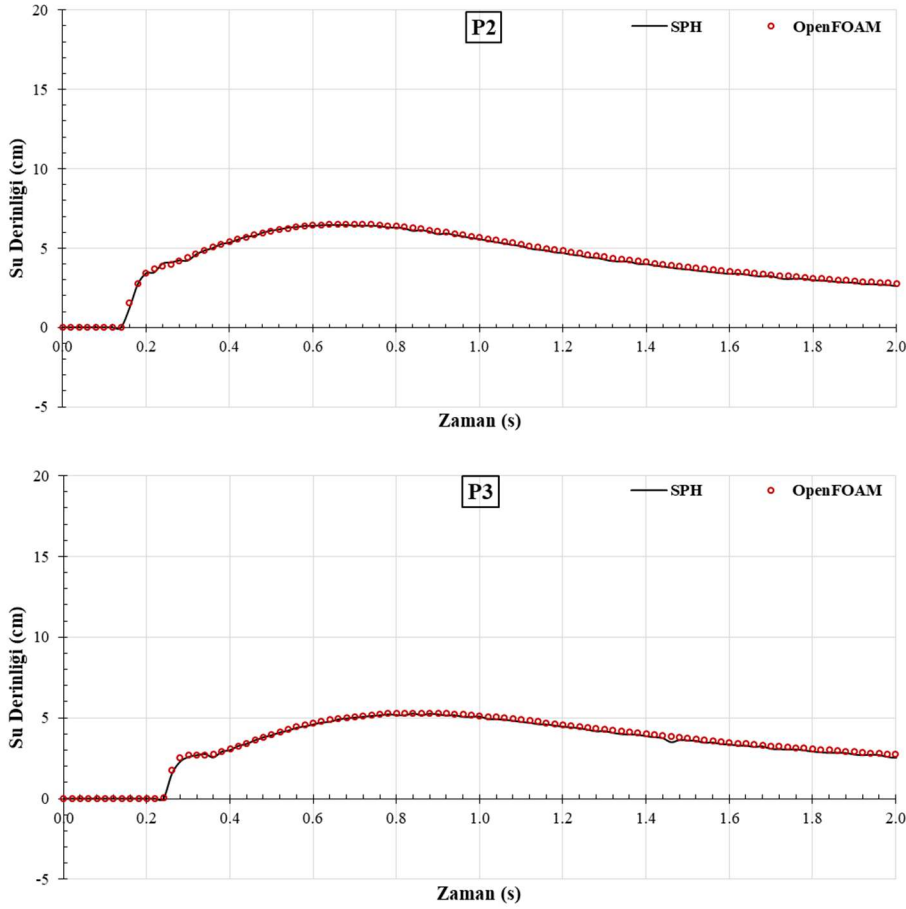
Şekil 4.11. SPH ve OpenFOAM analizleri ile elde edilen su yüzü profili sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.11. (Devamı) SPH ve OpenFOAM analizleri ile elde edilen su yüzü profili sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.12. SPH ve OpenFOAM analizleri ile elde edilen noktasal su derinliği sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.12. (Devamı) SPH ve OpenFOAM analizleri ile elde edilen noktasal su derinliği sonuçlarının karşılaştırılması

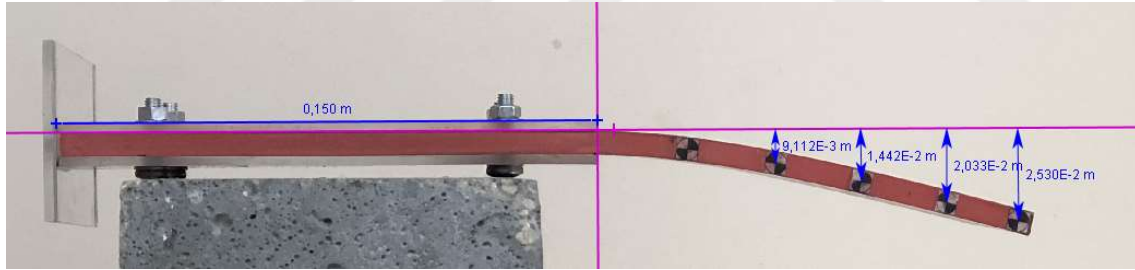
SPH ve FVM tabanlı çözücülerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde türbülans ve kaymama sınır şartlarının bu tez çalışmasında kullanılan baraj yıkılması problemi için ayırt edici farklılıklar yaratmadığı görülmüştür. Ancak her iki yöntem ile elde edilen sonuçların birbirleri ile olan uyumu dikkat çekmektedir. Bu doğrultuda incelenecek FSI probleminin akışkan fazının modelleneceği SPH metodunun başarılı bir çözüm gerçekleştirdiği ve FSI problemleri kapsamında akışkanları modelleme amacı ile kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

#### 4.2. Kauçuk Malzemenin Elastisite Modülü Tayini

Oluşturulan baraj yıkılması akımı ile etkileşim içerisine girecek olan kauçuk malzemenin elastisite modülünün tayini, sayısal analizler sonucu elde edilecek kauçuk malzeme deplasman değerlerinin doğruluğu açısından hayati bir önem taşımaktadır. Bu doğrultuda yer çekimi etkisi altında kendi ağırlığı ile deforme olan kauçuk malzemenin üzerine

yapıştırılan işaretçilerin noktasal deformasyon değerleri görüntü işleme tekniği ile ölçülmüş ve ölçülen bu değerler kauçuğun lineer-elastik davranış gösterdiği kabulü ile gerçekleştirilen analitik çözüm yardımıyla elastisite modülü tayini için kullanılmıştır (Hibbeler, 2012: 299,335).

FSI problemlerini inceleme amacı ile hazırlanan kauçuk malzemenin mesnetlenme biçimi incelendiğinde 0,125 m uzunluğundaki serbest kısmının bir konsol kiriş problemi olarak ele alınabileceği görülmektedir (Şekil 4.13). Bu şekilde, ağırlığı bilinen kauçuğun çeşitli noktalardaki deformasyonları belirlenebilecek ve analitik çözüm sonuçları kullanılarak elastisite modülünün hesaplanması gerçekleştirilebilecektir. Bu ağırlığın belirlenebilmesi amacı ile yoğunluğu hesaplanan kauçuk malzemenin bu değeri  $1250 \text{ kg/m}^3$  bulunmuştur. Şekil 4.13’de görüntü işleme tekniği ile elde edilen deplasman değerlerinin kauçuk malzemenin üst yüzeyinden başlayarak hesaplanmış olması nedeniyle, kauçuk malzeme kalınlığının yarı değeri olan 3,5 mm değeri bu deplasman değerlerinden çıkarılmış ve gerekli analitik çözüm gerçekleştirilerek her nokta için elde edilen elastisite modülü sonuçları Çizelge 4.2’de sunulmuştur.



Şekil 4.13. Kauçuk malzeme deplasman değerlerinin belirlenmesi

Çizelge 4.2. Noktasal deformasyonlar ile elastisite modülü hesabı

İşaretçi Numarası	Düşey Deformasyon (m) (Görüntü İşleme)	E (MPa) (Analitik)
M1	0,02180	3,98
M2	0,01683	4,00
M3	0,01092	3,99
M4	0,00561	3,97

Elde edilen veriler incelendiğinde sayısal modelde kullanılmak üzere kauçuk malzemenin elastisite modülünün 4 Mpa olarak seçilmesinin uygun olacağı düşünülmüştür. Bu değer esas



alınarak analitik çözüm bir kez daha gerçekleştirilmiş ve deneysel veriler ile aralarında oluşan mutlak yüzde hata değerleri Çizelge 4.3’de sunulmuştur.

Çizelge 4.3. E=4 MPa için deneysel veriler ile oluşan mutlak yüzde hata değerleri

İşaretçi	Düşey Deformasyon (Görüntü İşleme)	Düşey Deformasyon (Analitik)	Hata Oranı (%)
M1	0,02180	0,02169	0,5
M2	0,01683	0,01681	0,1
M3	0,01092	0,01089	0,3
M4	0,00561	0,00557	0,7

Elastisite modülünün 4 MPa olarak seçilmesi ile elde edilen hata oranların düşüklüğü bu değerlerin kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Tüm bu bilgiler ışığında, kauçuk malzemenin davranışın modellenmesi amacı ile kullanılacak veriler Çizelge 4.4’de özetlenmiştir. Çalışmanın bu noktasından sonra oluşturulacak hibrit SPH-FEM metodunda kauçuk malzeme bu değerler kullanılarak modellenecektir.

Çizelge 4.4. Sayısal analizlerde kullanılan kauçuğun malzeme parametreleri

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	$\nu$
1250	4,0	0,4

### 4.3. Akışkan-Yapı Etkileşimi Probleminin Deneysel ve Sayısal İncelemesi

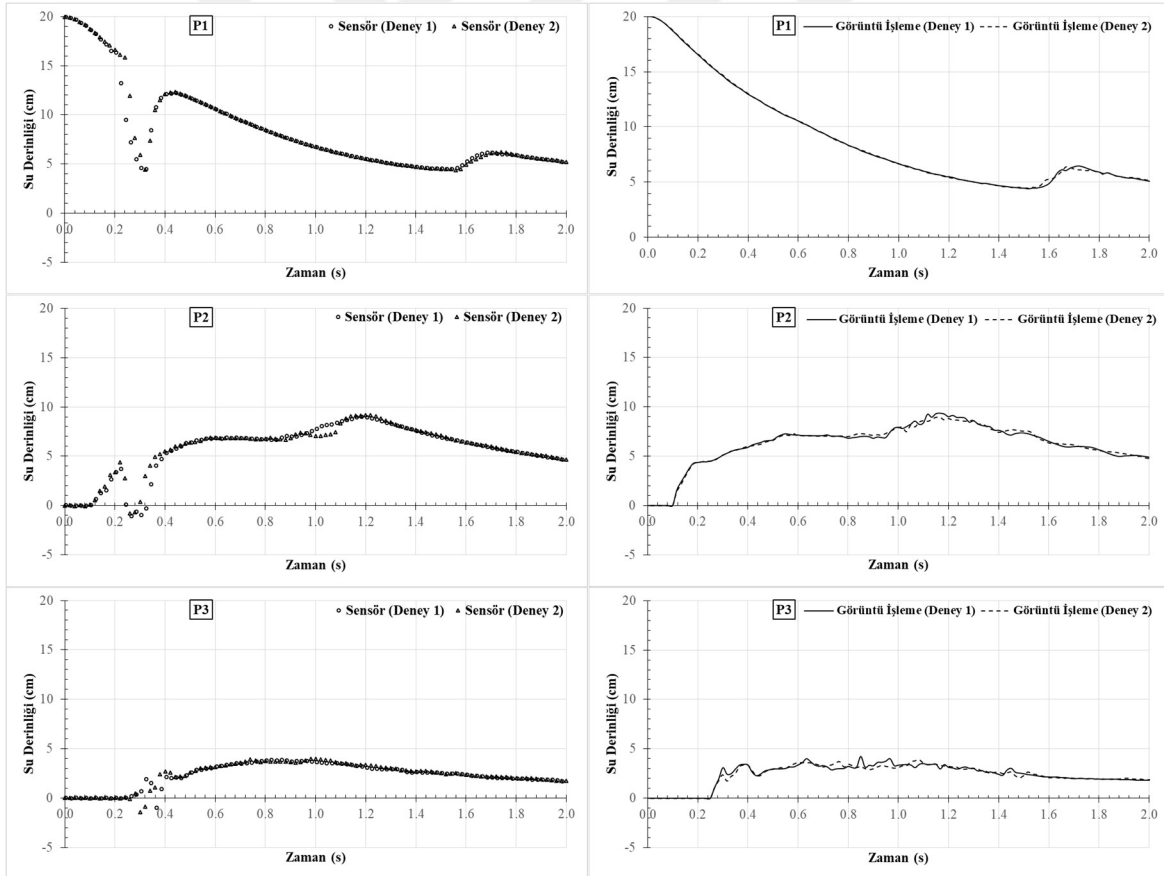
Bu tez çalışması kapsamında FSI problemlerini inceleme amacı ile iki farklı deney düzeneği oluşturulmuştur. Bu iki deney düzeneği, kauçuk malzemenin mansap kısmında yerleştirildiği konum itibarıyla farklılık göstermektedir. Her iki deney düzeneği için detaylı incelemeler alt bölümlerde sunulmuştur.

#### 4.3.1. L/H=1,5 için Oluşturulan Model

Deney düzeneğinde baraj yıkılması akımının başlangıçtaki durgun halinin sağlanması için kullanılan kapağın varlığı, sürtünmelerin kauçuk malzeme hareketini engellememesi için kauçuk malzemenin kanal genişliğinden bir miktar daha kısa yapılması sonucu oluşan sızmalar ve problemin yüksek dinamik etkiler barındırması gibi etkenler nedeniyle bu çalışmada deneysel tekrarlanabilirlik kavramının önem kazandığı düşünülmektedir. Bu doğrultuda her deney iki kez tekrarlanmış ve sonuçların tutarlılıkları kontrol edilmiştir.

## Deneysel Tekrarlanabilirlik

Deneysel verilerin güvenilirliğinden emin olunması amacıyla deneysel çalışma iki kez gerçekleştirilmiş ve ölçüm tekniklerinin kendi içlerinde ve birbirleri ile olan tutarlılıkları incelenmiştir. Sensör ve görüntü işleme tekniği ile elde edilen sonuçların kendi içlerindeki karşılaştırmaları Şekil 4.14’de sunulmuştur. Sensörler ile elde edilen verilerde, üç ölçüm noktasında da okuma yapılamayan zaman aralıklarının varlığı göze çarpmaktadır. Klasik baraj yıkılması problemlerinden farklı olarak, kauçuk malzemenin varlığı nedeni ile oluşan kabarma ve akabindeki yansıma dalgasının, görüntü işleme tekniği kullanılarak her iki deneyde de tutarlı bir şekilde yakalandığı görülürken, P2 noktasındaki sensör sonuçlarında ikinci deney ile elde edilen verilerin yansıma dalgası ölçümlerinde ufak bir sapma barındırdığı dikkat çekmektedir.

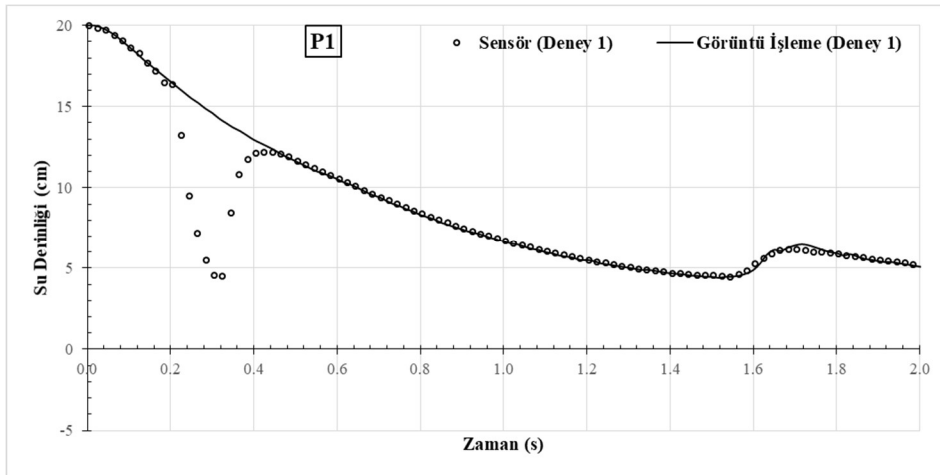


Şekil 4.14.  $L/H=1,5$  için sensör ve görüntü işleme yöntemi ile elde edilen su derinliği değerlerinin kendi içlerinde karşılaştırılması

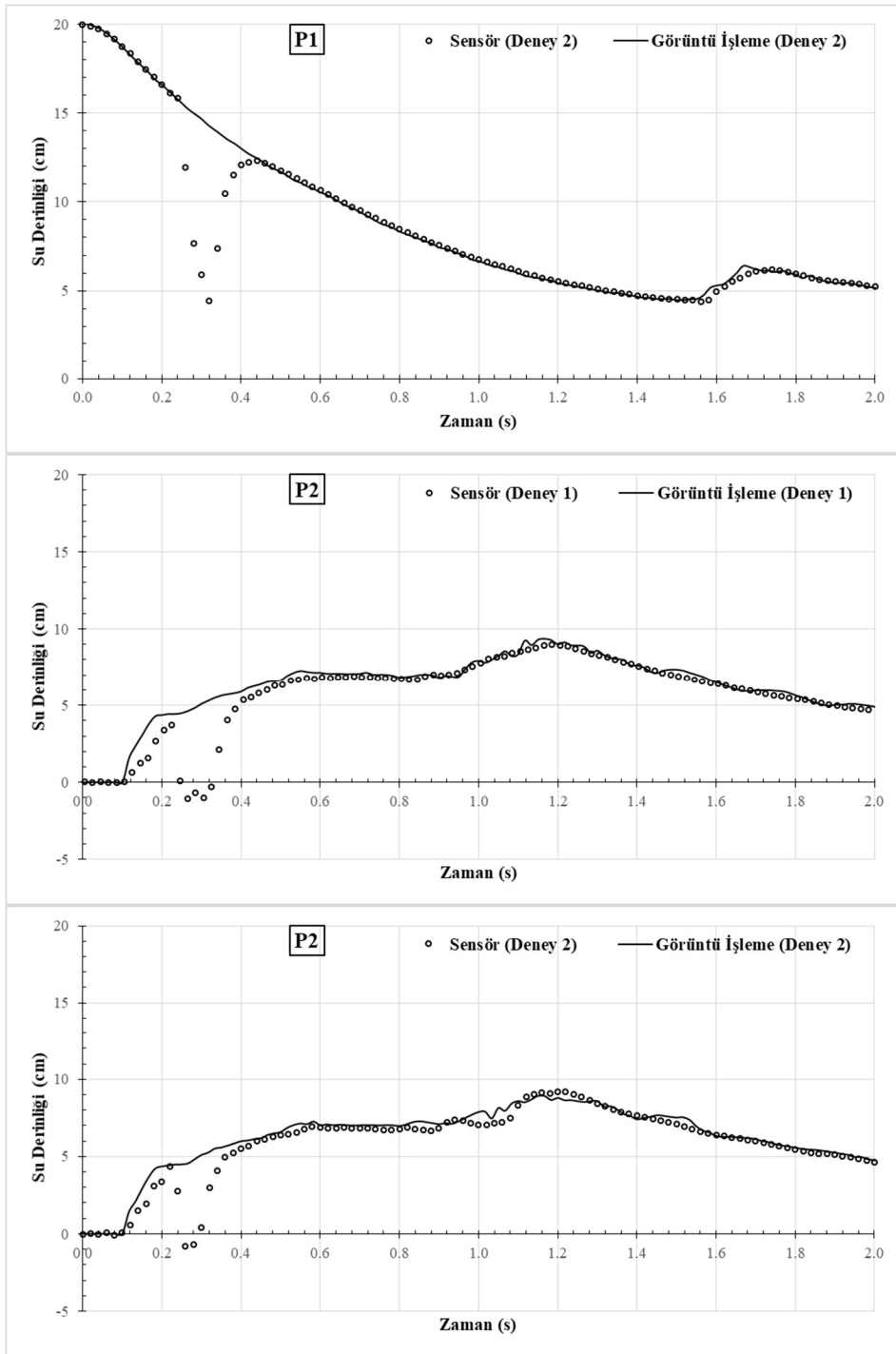
Ölçüm tekniklerinin birbirleriyle karşılaştırıldığı Şekil 4.15 incelendiğinde, yaklaşık 0,2 s-0,4 s aralıklarında su yüzeyinde meydana gelen eğriliklerden dolayı ultrasonik sensörün

okuma yapamadığı ve arada bazı hatalı değerler ürettiği görülmektedir. Görüntü işleme ile elde edilen sonuçlarda ise su seviyesi değişimlerinin kesintisiz bir biçimde elde edilebildiği göze çarpmaktadır. Ultrasonik sensörlerin su seviyesi ölçümündeki özellikle su yüzeyinde meydana gelen eğrilikler ve sensörün tepki süresi gibi nedenlerden kaynaklanan bu eksiklikler Dal (2018) tarafından da dile getirilmiştir. Bunun dışında kalan zamanlarda, ölçülen su seviyeleri arasında genel olarak yüksek derecede uyum gözlenirken, sadece kauçuk engelden sonra konumlandırılan P3 noktasında görüntü işleme tekniği ile elde edilen sonuçlardaki küçük dalgalanmalar dikkat çekmektedir. Görüntü işleme analizi ile elde edilen su derinliklerinin kanal yan duvarlarındaki değerler olduğu ve kauçuk malzeme yanlarından sızan suların bu ölçüm noktası (P3) yakınında dalgalanmalara neden olduğu düşünüldüğünde bu sonuç makul karşılanabilir. Görüntü işleme ile elde edilen sonuçlar bu noktada her ne kadar küçük frekanslarda dalgalanmalar barındırsa da, genel olarak sensör sonuçları ile başarılı bir uyum içerisindedir.

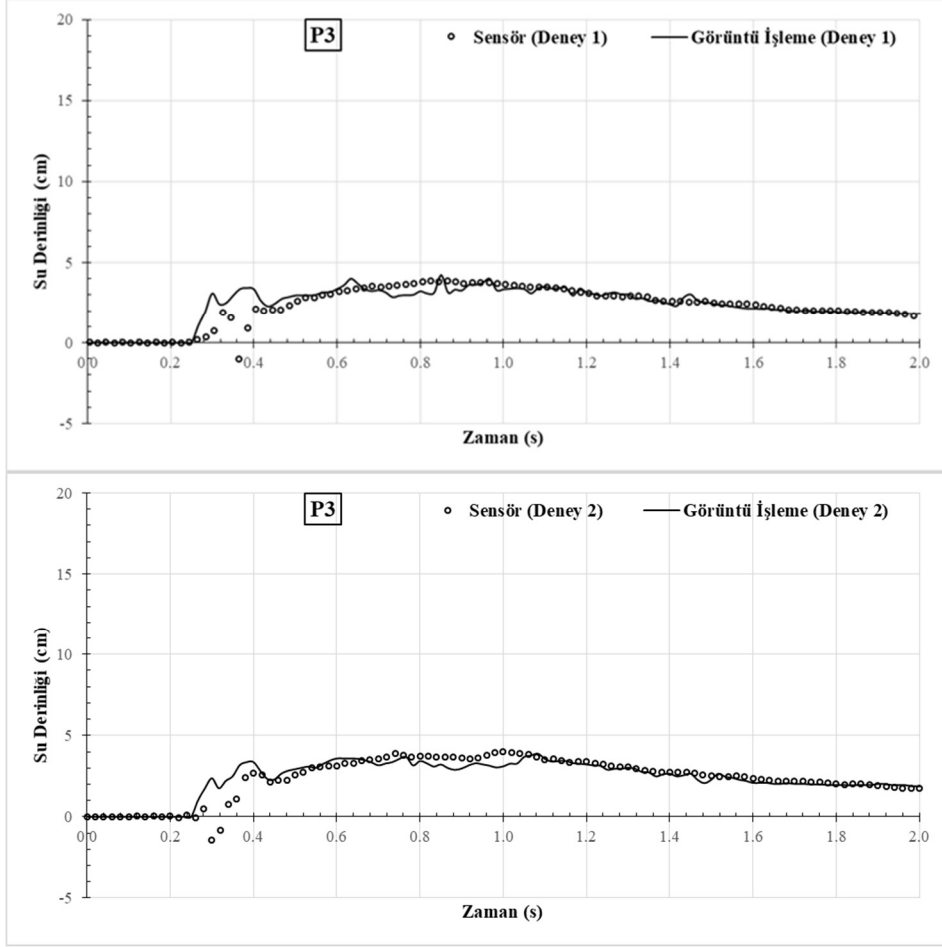
Görüntü işleme tekniği ile elde edilen su seviyeleri verileri dikdörtgen tank yan cidar yüzeylerindeki değerlerken, sensörler yerleştirildiği konum itibarıyla dikdörtgen kesitli deney tankının orta noktasından ölçüm almaktadır. Sensör ve görüntü işleme verileri arasındaki genel uyum, problem dinamiklerinin iki boyutlu olarak ifade edilebileceğini ortaya koymaktadır. Deneysel görseller incelendiğinde de, yansıma dalgası oluşum noktası ve kauçuk malzeme yan kısımlarından sızan akışkanların oluşturduğu kaotik alan haricinde akımın iki boyutlu hareketi dikkat çekmektedir. Ayrıca her iki deney ile elde edilen veriler arasındaki uyum, bu verilerin sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırmak amacı ile kullanılabilirliğini göstermektedir.



Şekil 4.15. L/H=1,5 için sensör ve görüntü işleme ile elde edilen verilerin karşılaştırılması



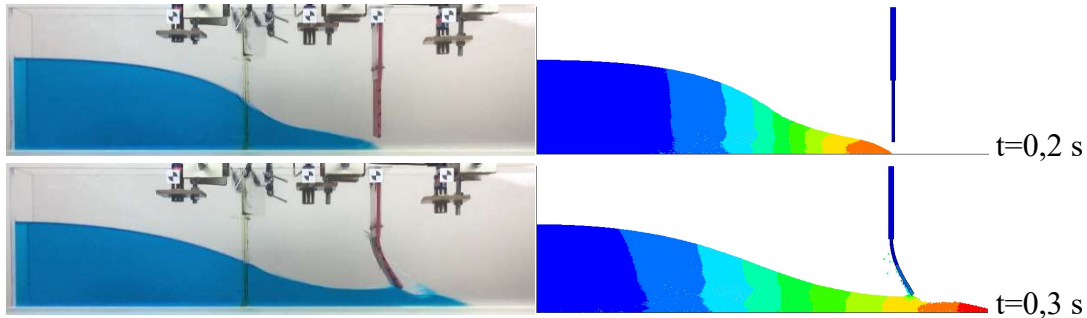
Şekil 4.15. (Devamı)  $L/H=1,5$  için sensör ve görüntü işleme ile elde edilen verilerin karşılaştırılması



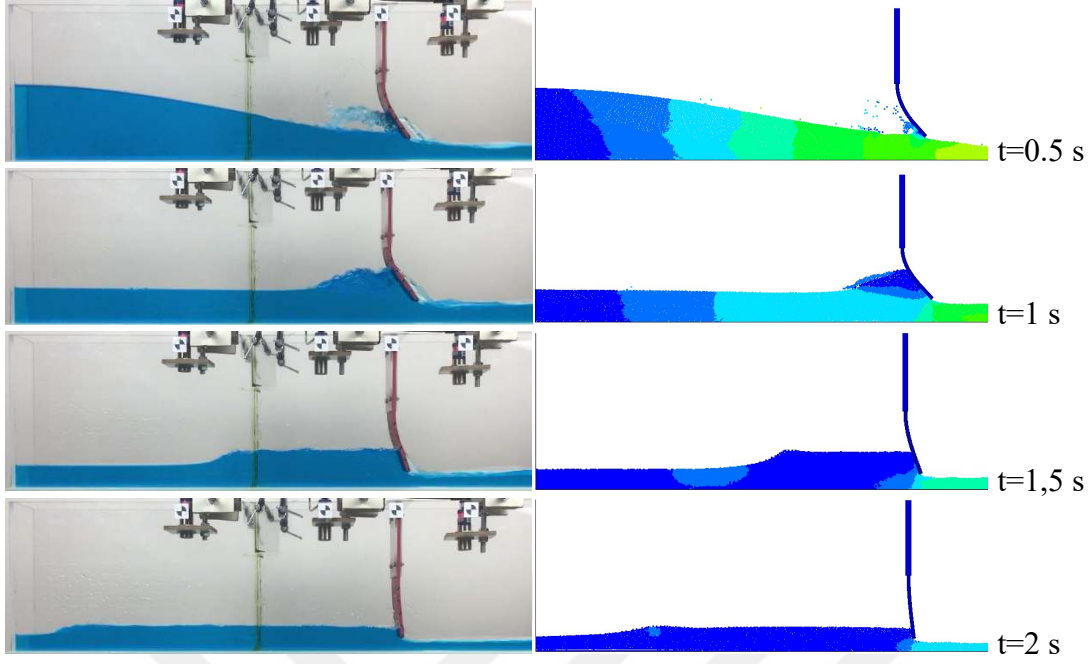
Şekil 4.15. (Devamı)  $L/H=1,5$  için sensör ve görüntü işleme ile elde edilen verilerin karşılaştırılması

#### Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Akışkanların SPH, katı cismin ise FEM metodu kullanılarak modellendiği hibrit SPH-FEM metodu kullanılarak 2 saniyelik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının çeşitli zaman adımlarına ait karşılaştırmalı görselleri Şekil 4.16'da sunulmuştur.



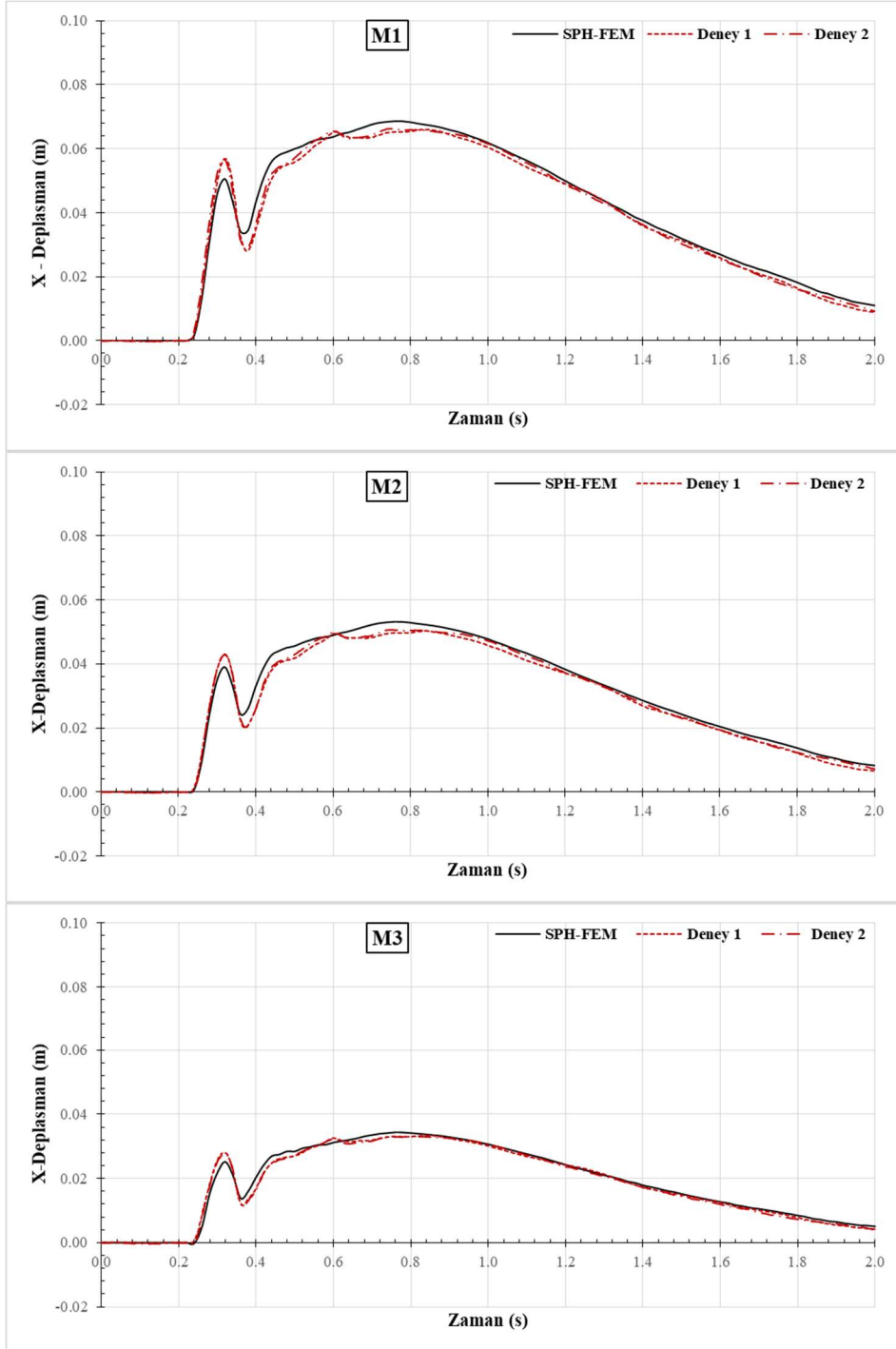
Şekil 4.16.  $L/H=1,5$  için çeşitli zaman adımlarındaki deneysel ve sayısal analiz sonuçları



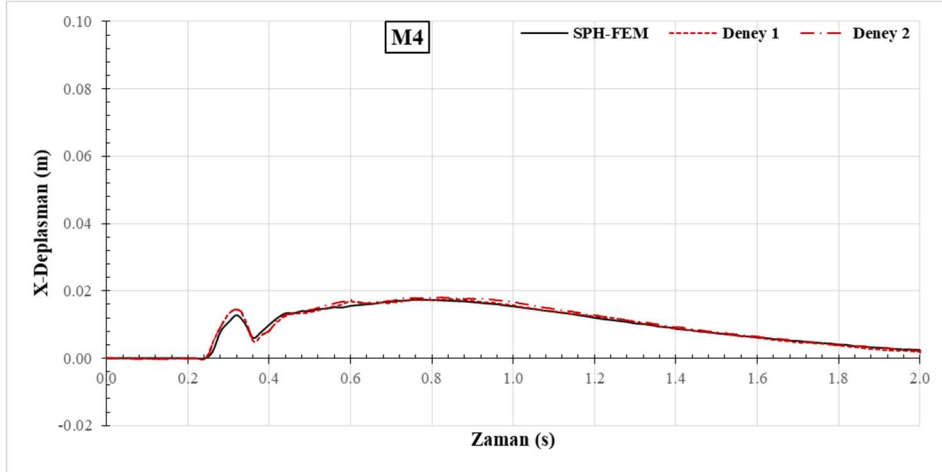
Şekil 4.16. (Devamı)  $L/H=1,5$  için çeşitli zaman adımlarındaki deneysel ve sayısal analiz sonuçları

Sayısal analiz sonucu elde edilen kauçuk malzeme kesiti üzerinde belirlenen dört nokta için yatay (x) ve dikey (y) doğrultudaki deplasman değerlerinin deneysel çalışmalar sonucu görüntü işleme yöntemi kullanılarak elde edilen veriler ile karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de sunulmuştur. İlgili şekiller incelendiğinde kauçuk malzeme üzerinde iki ana etki anı göze çarpmaktadır. Kauçuk malzeme ile su kütlesinin ilk buluşma anı (0.23 s) dinamik bir karakteristik ile kauçuk malzeme üzerinde ani gelişen bir deformasyon oluşturmuştur. Bu dinamik etkinin ardından kauçuk malzemenin başlangıç haline dönmeye çalıştığı fakat su kütlesi ile ikinci temas anına kadar gerileyebildiği görülmektedir. İkinci etki anı ile su kütlesinin kauçuk malzeme üzerinde oluşturduğu basınç kuvvetlerinde ve dolayısı ile kauçuk malzemede meydana gelen deplasman değerlerinde statik etkilerin daha baskın bir hal aldığı dikkat çekmektedir.

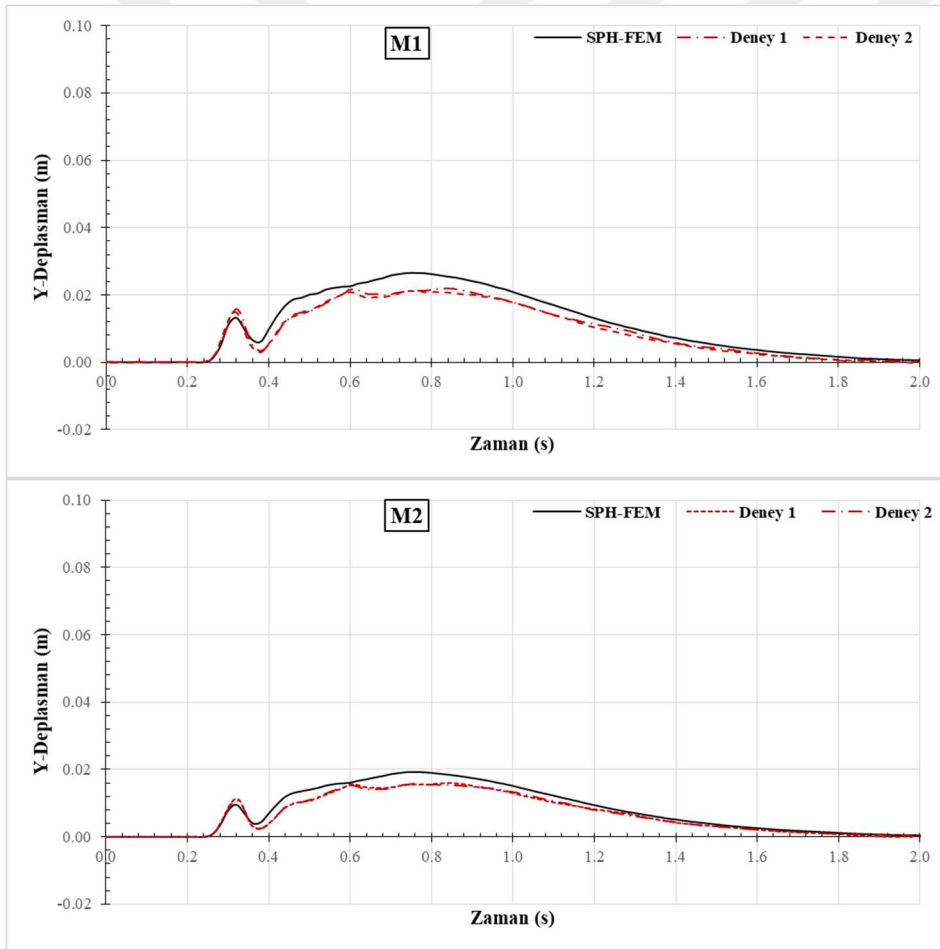
Bununla birlikte kauçuk malzemenin baraj yıkılması akımı üzerindeki kısıtlayıcı etkisi akım içerisinde kabarmalara neden olmuş ve bir yansıma dalgasının oluşumuna sebebiyet vermiştir. Pik deplasman değerlerine ulaşılması sonrası, kauçuk malzeme arkasında tutulan su kütlesi derinliğinin zamanla düşmesine paralel olarak kauçuk malzemeye etkiyen basınç değerlerinin de düştüğü ve bunun sonucunda deplasman değerlerinde zamana bağlı azalmaların yaşandığı görülmüştür.



Şekil 4.17.  $L/H=1,5$  için kauçuk malzemenin yatay (X) yöndeki deplasman değerleri

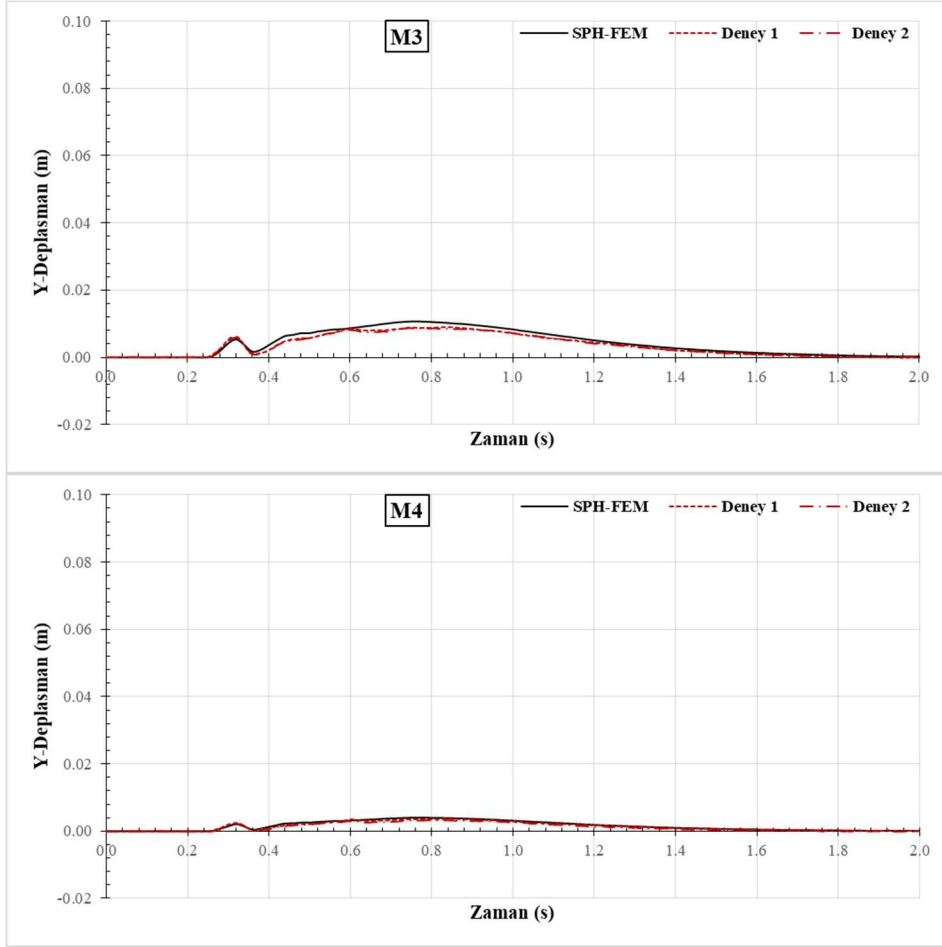


Şekil 4.17. (Devamı) L/H=1,5 için kauçuk malzemenin yatay (X) yöndeki deplasman değerleri



Şekil 4.18. L/H=1,5 için kauçuk malzemenin düşey (Y) yöndeki deplasman değerleri



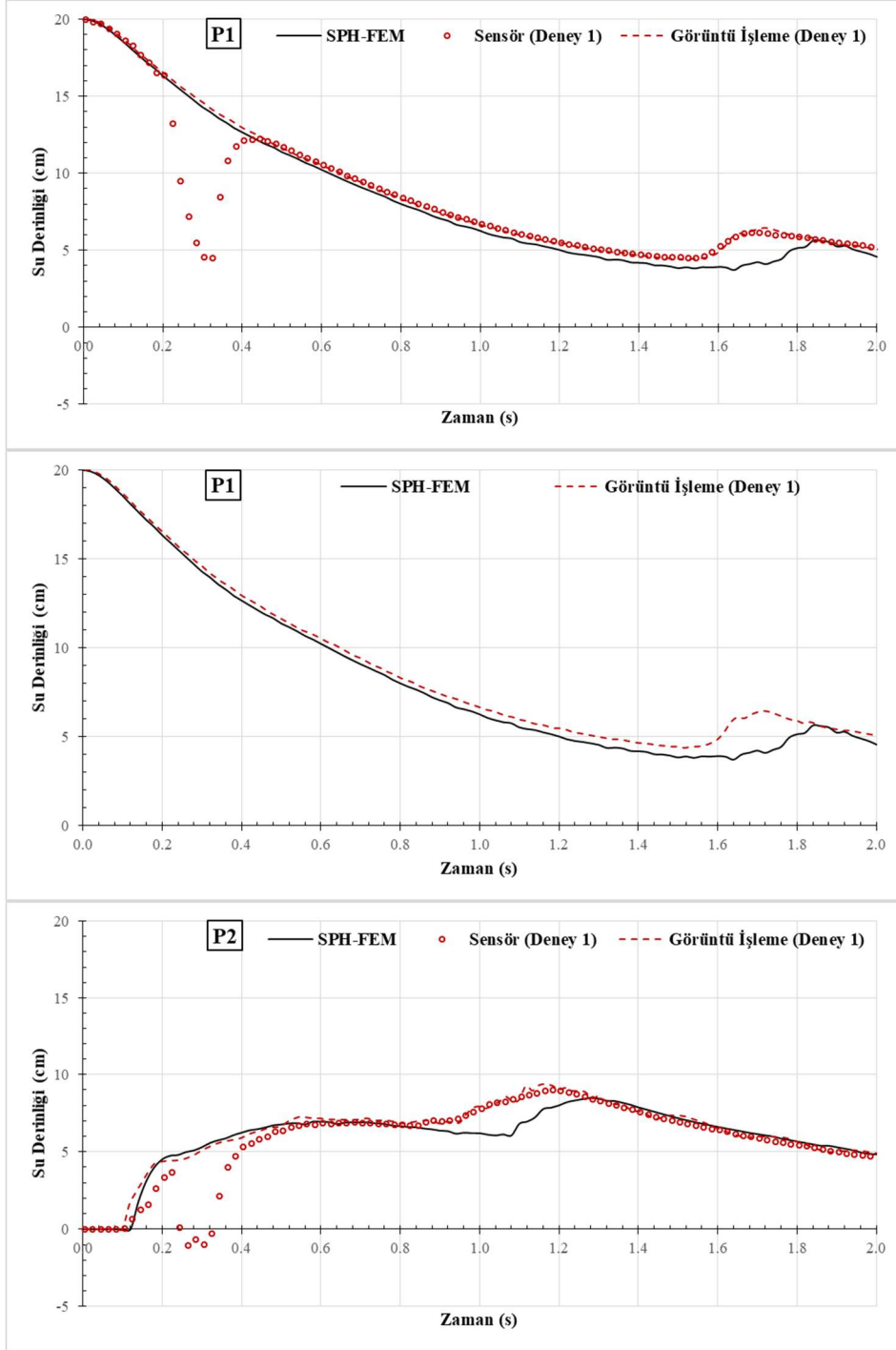


Şekil 4.18. (Devamı)  $L/H=1,5$  için kauçuk malzemenin düşey (Y) yöndeki deplasman değerleri

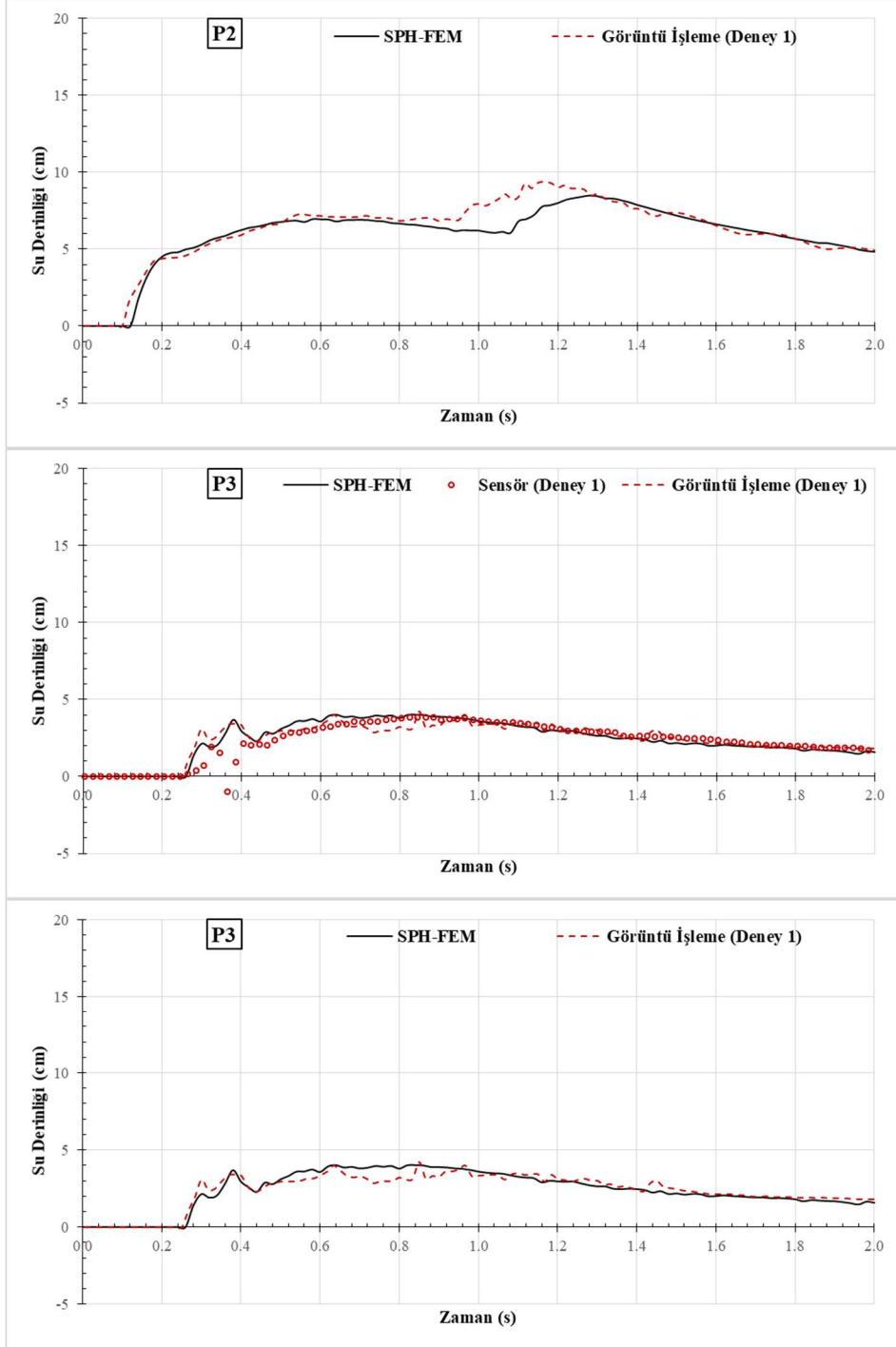
Karşılaştırmalı deplasman verileri incelendiğinde deneysel ve sayısal analiz sonuçları arasında genel olarak yüksek derecede uyum göze çarpmaktadır ve deneysel çalışmada sürtünmelerden kaynaklanabilecek engellemelerin önüne geçebilmek üzere bırakılan boşluktan sızan su nedeniyle, deneysel çalışmadaki deplasman değerlerin bir miktar düşük çıkması makul karşılanabilir.

Ölçüm noktalarındaki zamana bağlı su derinliklerinin değişimleri incelendiğinde ise klasik baraj yıkılması akımı sayısal analiz sonuçlarında karşılaşılan memba noktasındaki (P1) su seviyesinin deneysel verilerden daha hızlı düşmesi sorunu burada da kendini göstermektedir. Ayrıca kapağın arkasında birikerek kabaran su kütesinin oluşturduğu yansıma dalgasının sayısal modelde daha geç oluştuğu ve daha düşük derinlikte kaldığı dikkat çekmektedir. Sayısal analiz sonucu kauçuğun bir miktar daha fazla deplasman göstermesinin bu durumu ortaya çıkaran ana etken olduğu düşünülmektedir. Daha fazla deplasman görülen sayısal analiz sonuçlarında, membadaki su seviyesinin daha hızlı düşmesi kabul edilebilir ve ayrıca

bu durumun yansımaya dalgaları üzerinde yarattığı etki dikkatlice incelenmelidir. Ek olarak SPH metodunun hidrolik sıçrama benzeri bu kabarma ve akabindeki yansımaya dalgasının dinamiklerini yansıtabilmedeki başarısı, çeşitli çalışmalar ile incelenmeye ihtiyaç duymaktadır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19.  $L/H=1,5$  için zamana bağlı noktasal su derinliklerinin karşılaştırılması



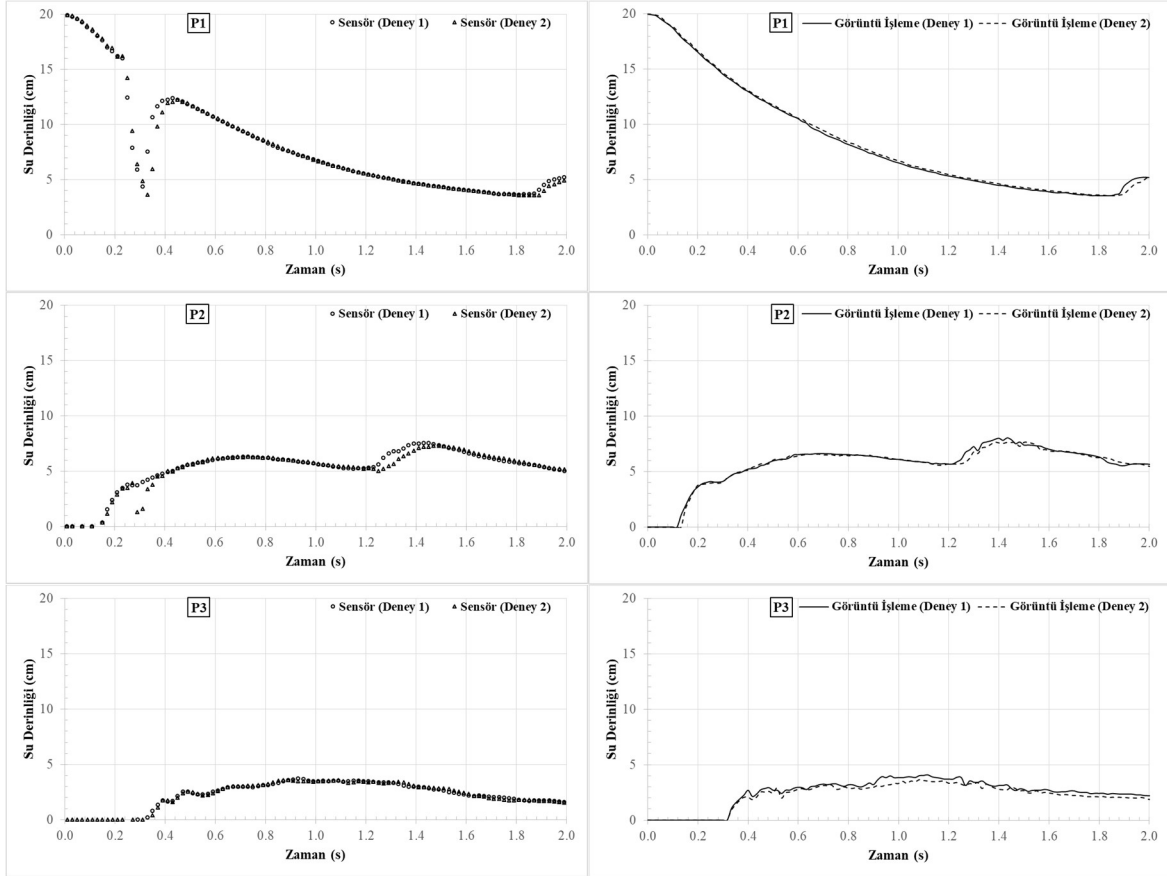
Şekil 4.19. (Devamı)  $L/H=1,5$  için zamana bağlı noktasal su derinliklerinin karşılaştırılması

#### 4.3.2. $L/H=2$ için Oluşturulan Model

FSI problemlerini inceleme amacı ile oluşturulan ikinci deney düzeneğinde, kauçuk malzemenin mansap kısmındaki konumu (L) 40 cm olarak belirlenmiş ve böylece  $L/H$  oranı arttırılmıştır. Mevcut tez çalışması kapsamında diğer deneylerde olduğu gibi bu deneyde de tekrarlanabilirlik kavramı sınanmıştır.

## Deneysel Tekrarlanabilirlik

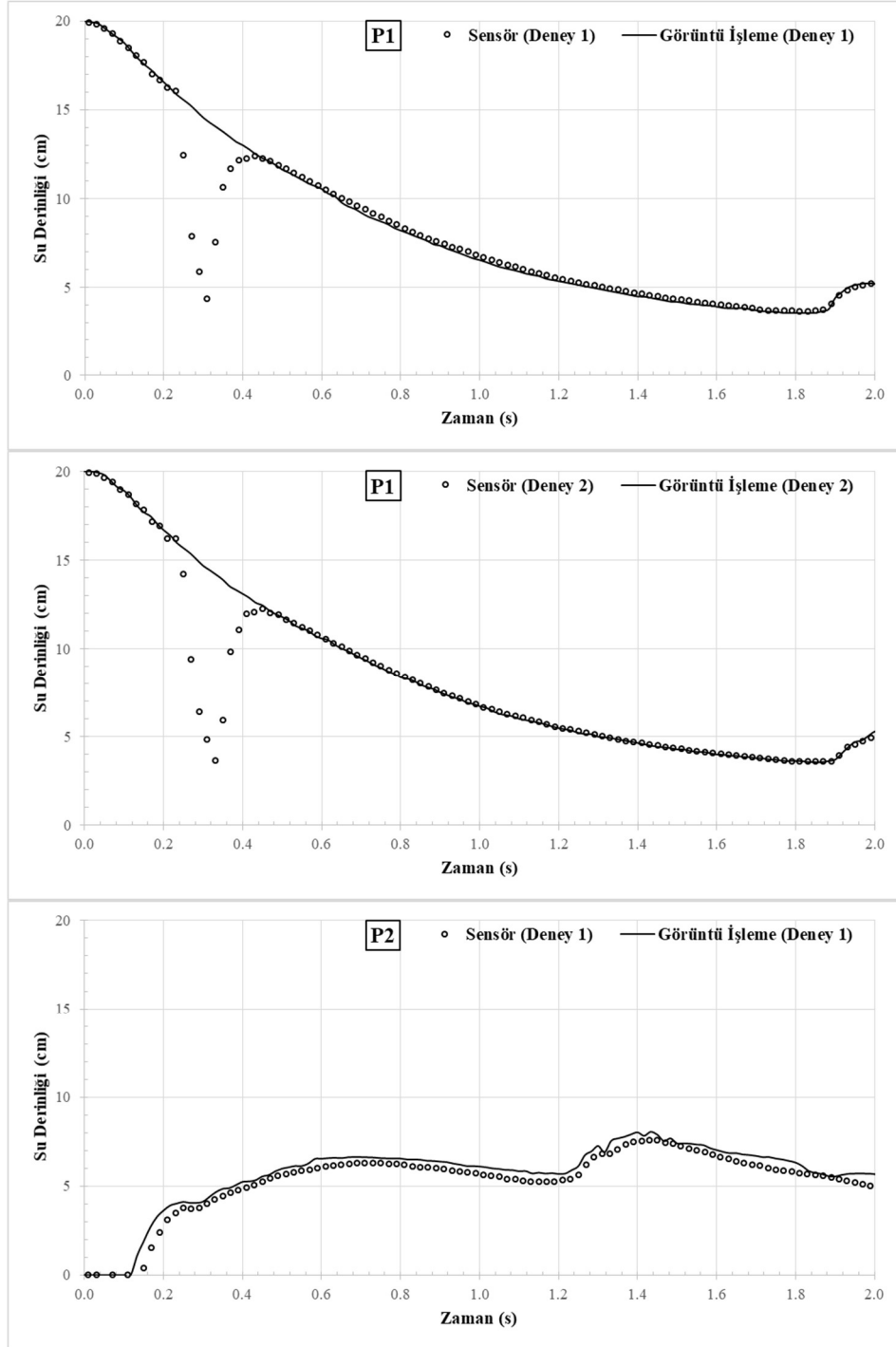
Deneysel sonuçların güvenilirliğinden emin olmak amacı ile deney iki kez gerçekleştirilmiş ve her iki deney için zamana bağlı su seviyesi değişimi verileri üzerinden ölçüm tekniklerinin kendi içlerindeki karşılaştırmaları Şekil 4.20’de sunulmuştur.



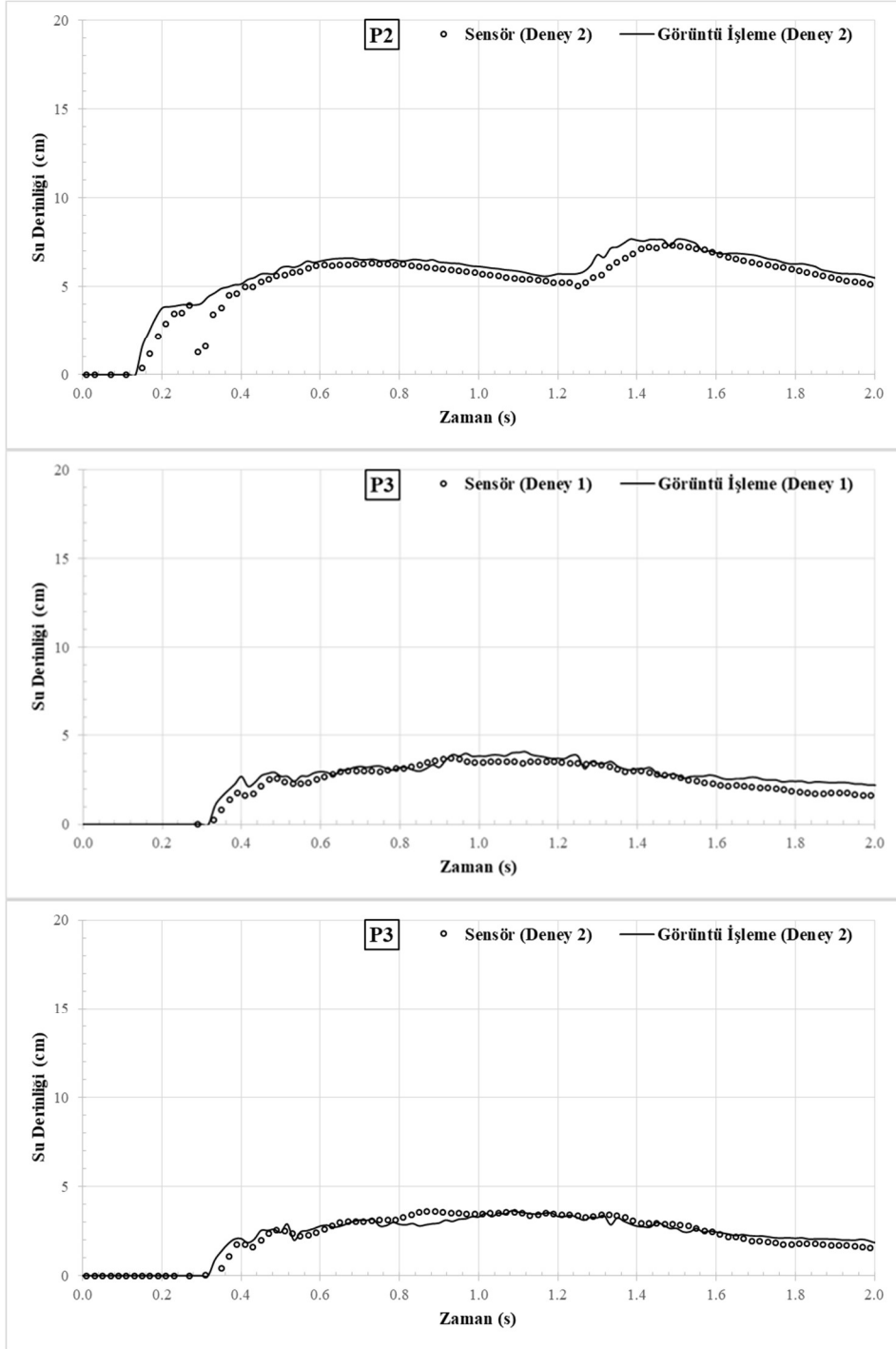
Şekil 4.20. L/H=2 için sensör ve görüntü işleme yöntemi ile elde edilen su derinliği değerlerinin kendi içlerinde karşılaştırılması

Sensör yardımı ile elde edilen P2 noktasındaki ölçüm değerleri incelendiğinde yansıma dalgasının ölçüm anındaki küçük farklılık göze çarpmaktadır. L/H=1,5 için oluşturulan deney düzeneğinde de gözlemlenen bu durumun kabarma dalgasının oluşumu sırasında kanal ortasında oluşan kaotik ortamın bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Görüntü işleme tekniği ile elde edilen sonuçlar ise bu noktada sensörlere kıyasla daha stabil sonuçlar vermiştir. Görüntü işleme ile elde edilen sonuçlarda yansıma noktasının pik değere ulaştığı noktanın her iki deneyde de 1,4 saniye civarında gerçekleştiği görülmektedir. Sensör ölçümlerinde ise birinci deneyde bu değer sağlanırken sapmanın ikinci deneyde meydana

geldiği görülmektedir. Sensörler ve görüntü işleme tekniği ile elde edilen verilerin karşılaştırmaları Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



Şekil 4.21.  $L/H=2$  için sensör ve görüntü işleme ile elde edilen verilerin karşılaştırılması



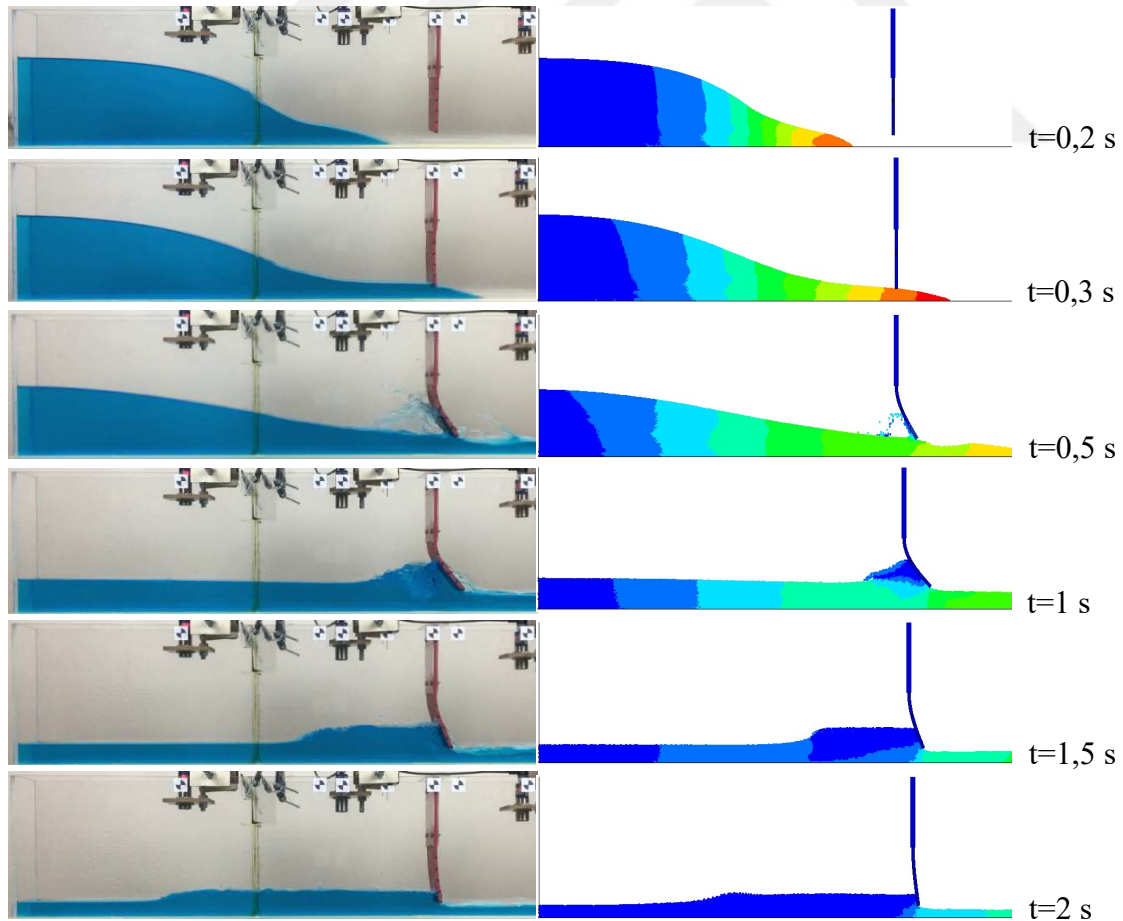
Şekil 4.21. (Devamı)  $L/H=2$  için sensör ve görüntü işleme ile elde edilen verilerin karşılaştırılması

Görüntü işleme tekniği ve sensörler arasındaki karşılaştırma verileri incelendiğinde her iki ölçüm tekniği ile P1 noktasında ulaşılan genel uyum göze çarparken daha önce bahsedilen 0,2-0,4 s aralıklarında sensörlerin veri okuyamama sorunu bu deneyde de devam etmektedir. P2 noktasında, görüntü işleme tekniğinin bir miktar yüksek derinlik değerleri vermesinin, kameranın deney tankına göre konumunun neticesi olarak ölçüm eksenlerinde oluşan arka

yüzey görünülerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Arka yüzeylerin varlığı görüntü işleme tekniğinin temelini oluşturan kenar yakalama algoritması tarafından bir kenar olarak algılanabilmekte ve iki boyutlu bir görüntüde su seviyesini olduğundan yüksek hesaplanmasına neden olmaktadır. P3 noktasında ise sensörler ile kıyaslandığında görüntü işleme tekniği sonuçlarında daha yüksek frekansta seviye alçalma ve yükselmeleri gözlemlenmektedir. Kauçuk malzeme kenarlarından sızan suların bu ölçüm noktası çevresinde kaotik bir ortamın oluşmasına neden olmasının, P3 noktasında gözlemlenen su seviyesi değerlerindeki dalgalanmaların ana nedeni olduğu düşünülmektedir.

### Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

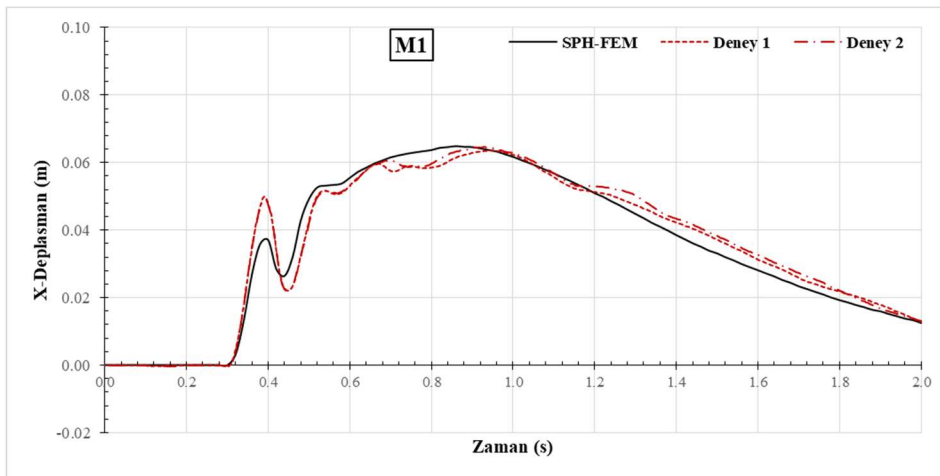
Deney düzeneğine uygun olarak SPH-FEM ile modellenen sayısal analiz 2 saniye süre ile gerçekleştirilmiş ve çeşitli zaman adımlarına ait karşılaştırmalı görseller Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22.  $L/H=2$  için çeşitli zaman adımlarındaki deneysel ve sayısal analiz sonuçları

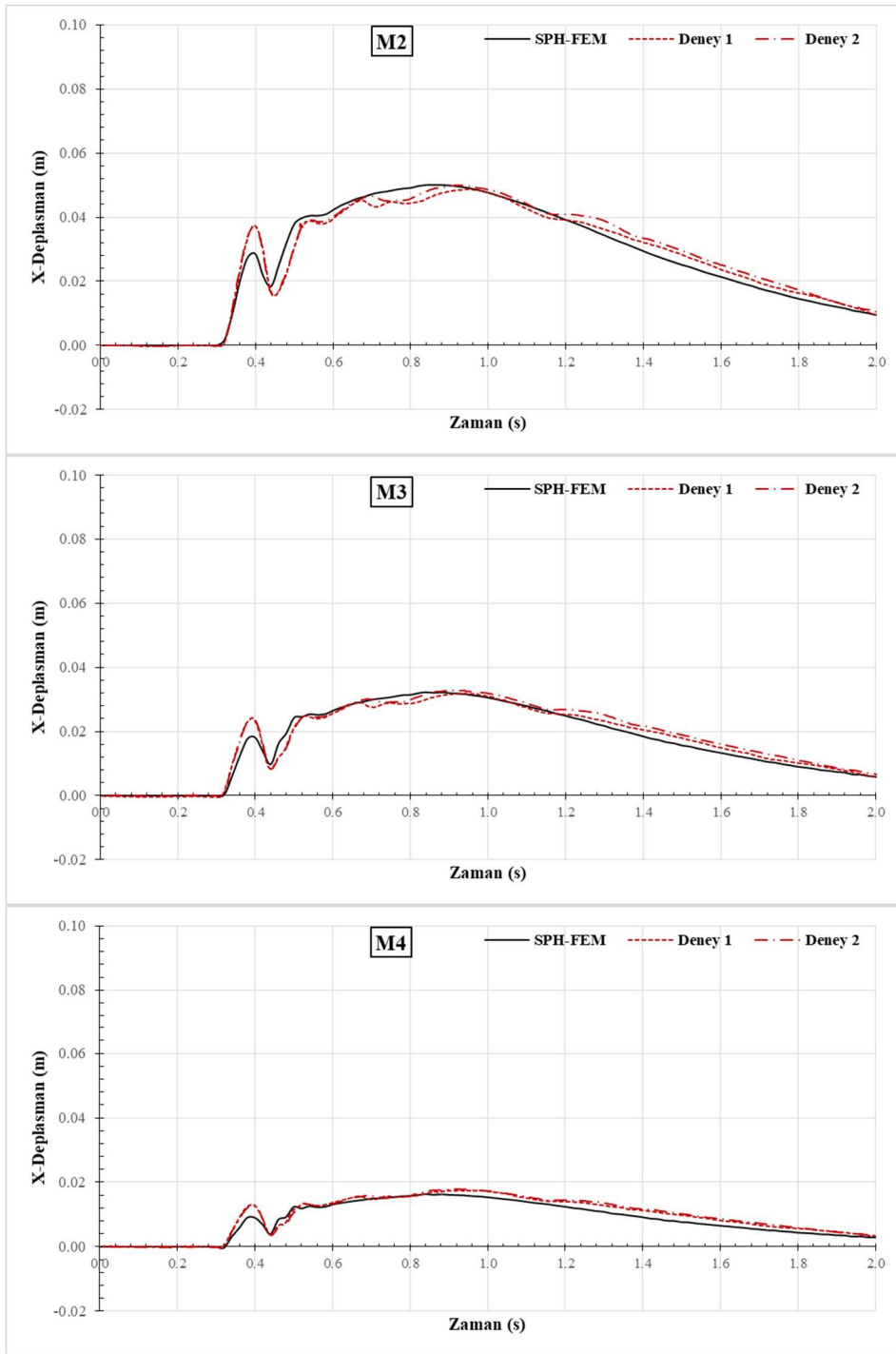
Görseller arasında genel olarak makul derecede uyum olduğu görülmektedir. Ancak diğer deney düzeneğine paralel olarak elastik cisim arkasında kabaran ve akabinde oluşan yansıma dalgasının sayısal analizlerde deneysel verilere nazaran daha geride kaldığı göze çarpmaktadır.

Kaçuk malzemenin yatay ve düşey doğrultudaki deplasman değerleri üzerinden deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırmalı grafikleri sırasıyla Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de sunulmuştur. Şekil 4.23 incelendiğinde, davranışın genel olarak  $L/H=1,5$  değerindeki deney verilerine paralel olarak iki ana etkiden oluştuğu görülmektedir. Ancak ilk etki anındaki ani deplasman verileri  $L/H=1,5$  değerindeki sayısal analiz sonuçları kadar deneysel veriler ile uyumlu değildir. Klasik baraj yıkılması akımının modellendiği ve su yüzü profillerinin incelendiği bölümde, baraj yıkılması akımının tank içerisinde mesafe kat ettikçe dalga önü hızı değerinin sayısal modelde daha fazla olduğuna dikkat çekilmiştir. Bu hız farkının su yüzü profillerinin sayısal ve deneysel sonuçları arasında bir farklılaşmaya neden olduğu da grafiklerce ortaya konmuştur. Sayısal modeldeki su yüzü profillerinde meydana gelen bu farklılıkların,  $L/H=2$  için oluşturulan deney düzeneğindeki ilk dinamik etki anında sayısal ve deneysel deplasman verileri arasındaki düşük düzeyli sapmanın ana nedeni olduğu düşünülmektedir. Ayrıca yine önceki bölümde incelenen klasik baraj yıkılması akımı çalışmasında, P3 ölçüm noktasının bu deney düzeneğinde kauçuk malzemenin yerleştirildiği konuma denk geldiği görülecektir. Bahsi geçen grafik dikkatlice incelendiğinde, deneysel su derinliği değerlerinin ilk artış anında sayısal sonuçlardan bir miktar daha fazla olduğu görülmektedir.

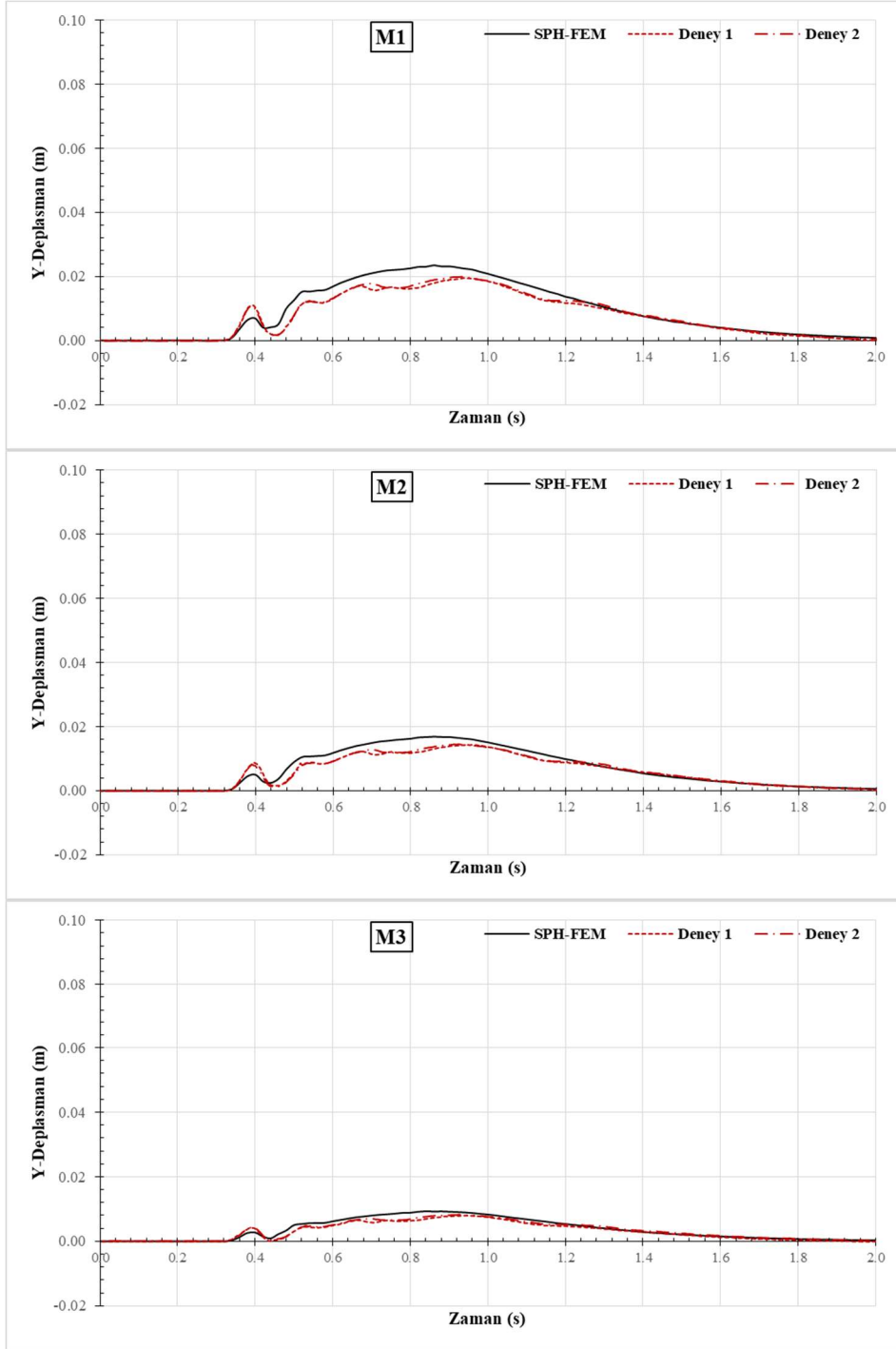


Şekil 4.23.  $L/H=2$  için kauçuk malzemenin yatay (X) yöndeki deplasman değerleri

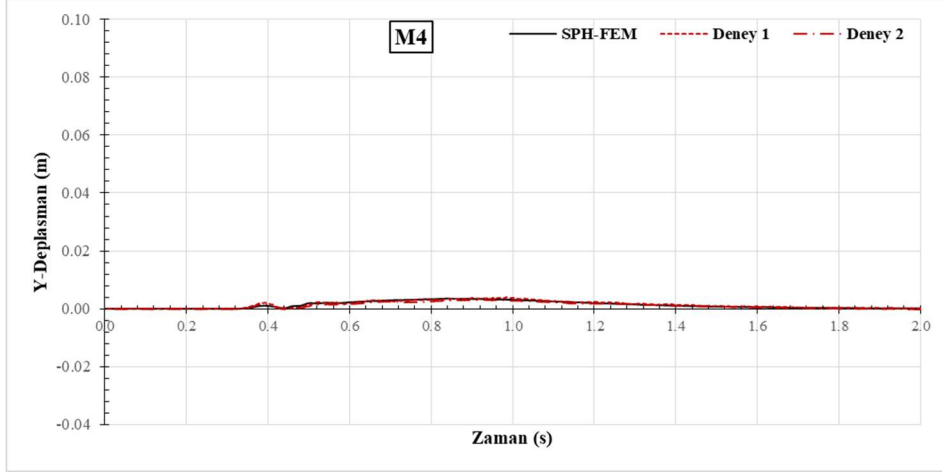




Şekil 4.23. (Devamı)  $L/H=2$  için kauçuk malzemenin yatay (X) yöndeki deplasman değerleri

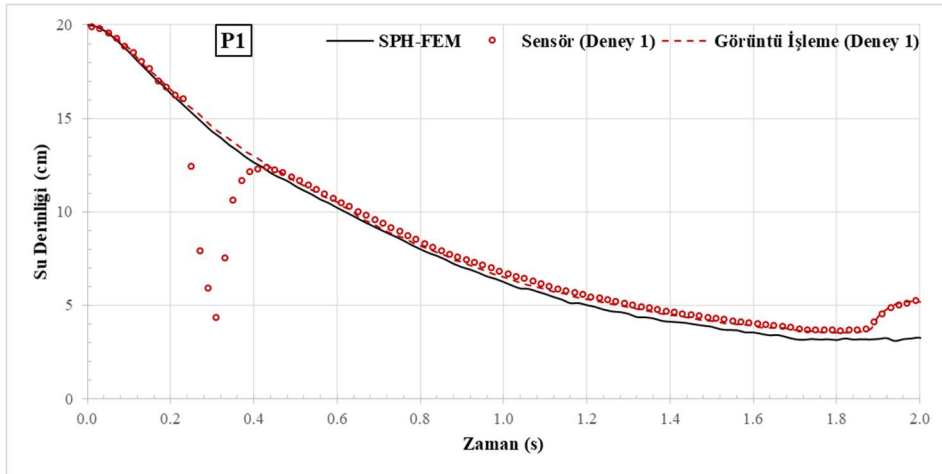


Şekil 4.24.  $L/H=2$  için kauçuk malzemenin düşey (Y) yöndeki deplasman değerleri

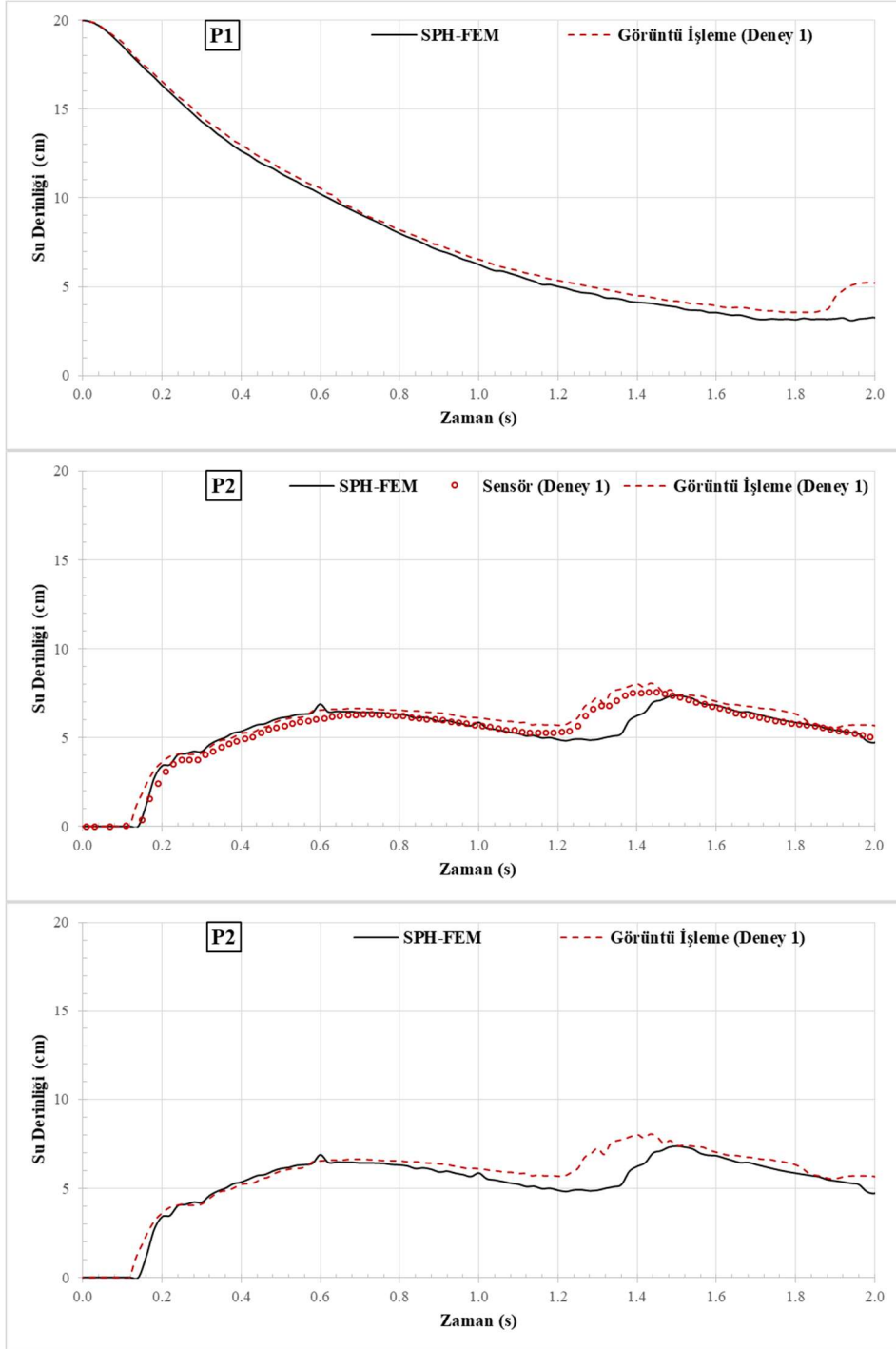


Şekil 4.24. (Devamı)  $L/H=2$  için kauçuk malzemenin düşey (Y) yöndeki deplasman değerleri

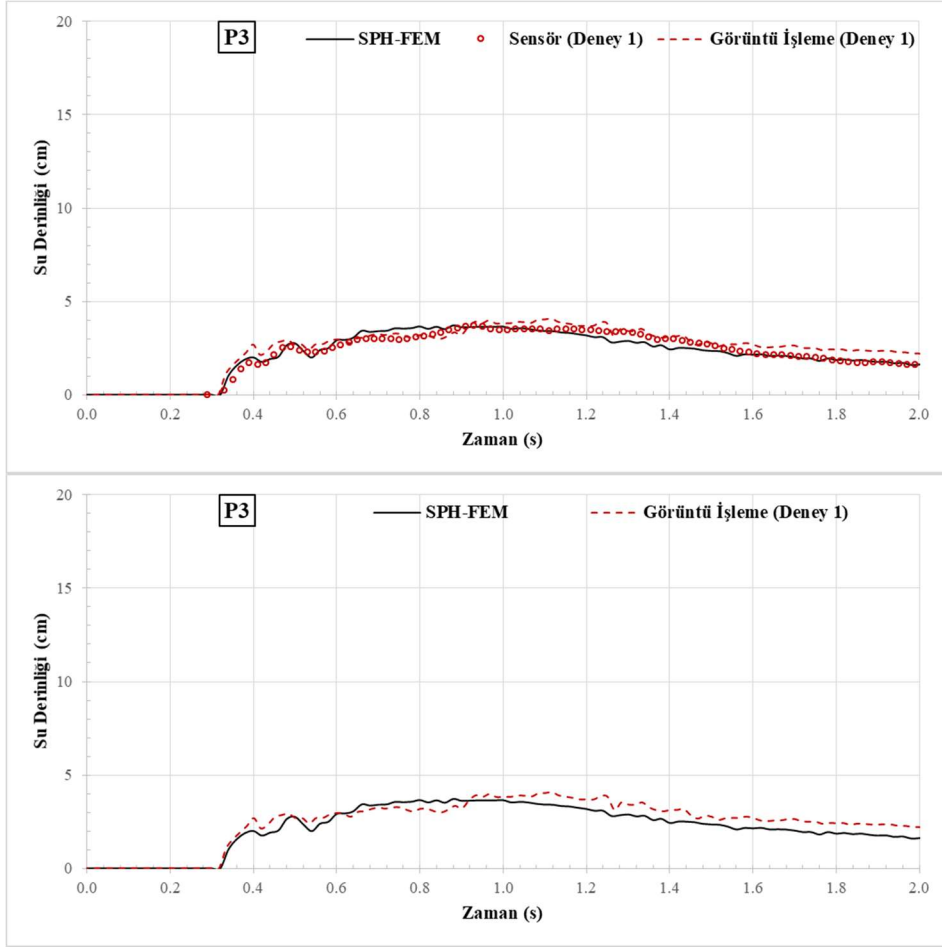
Ölçüm noktalarındaki su seviyeleri deneysel ve sayısal veriler kullanılarak karşılaştırılmış ve Şekil 4.25’de sunulmuştur. İlk deney düzeneğinde elde edilen sonuçlara paralel olarak yansıma dalgasının sayısal analizlerde daha geç oluştuğu gözlemlenmektedir. Kauçuk malzemenin membaya olan uzaklık değerinin bu deney düzeneğinde artması ile yansıma dalgasının kauçuk malzeme konumundan P1 ve P2 noktalarına ulaşmak üzere alacağı mesafe de artmış ve bu 2 saniyelik analiz süresinde sayısal analizlerdeki yansıma dalgasının P1 noktasına varışının sonuçlarda görülememesine neden olmuştur.



Şekil 4.25.  $L/H=2$  için zamana bağlı noktasal su derinliklerinin karşılaştırılması



Şekil 4.25. (Devamı)  $L/H=2$  için zamana bağlı noktasal su derinliklerinin karşılaştırılması



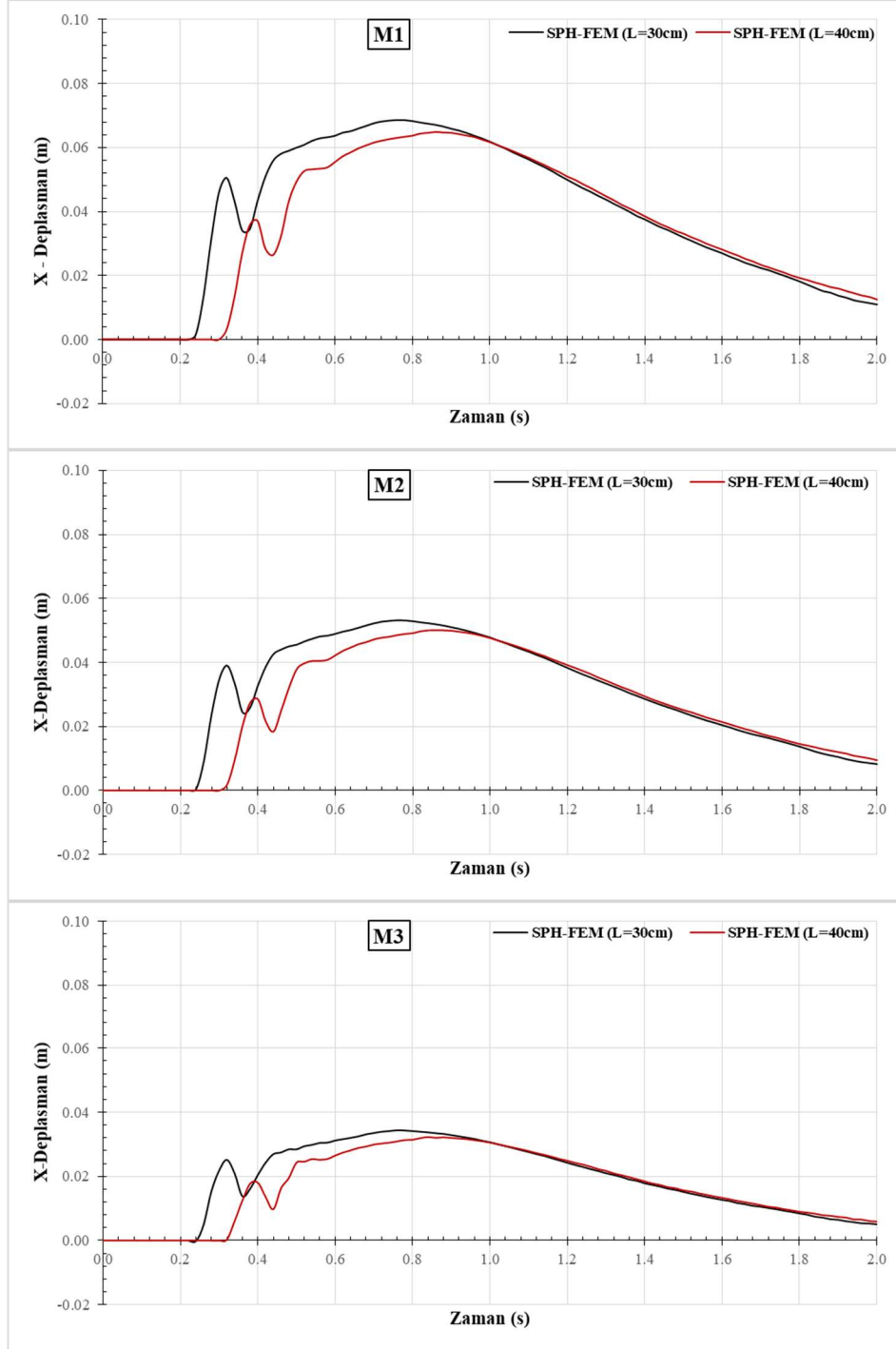
Şekil 4.25. (Devamı)  $L/H=2$  için zamana bağlı noktasal su derinliklerinin karşılaştırılması

P2 noktasında su seviyesindeki ilk değişimin görüntü işleme tekniği ile elde edilen deneysel sonuçlarda daha erken gerçekleştiği dikkat çekmektedir. Bunun ana nedenin kamera konumunun ve bununla birlikte su seviyesinin ilk anlarında düşük seviyelerde olması nedeniyle tank uzak kenarındaki arka yüzeyin görüntü işleme tekniği tarafından yakalanması ve hesaba katılması olduğu düşünülmektedir. P3 noktasında görüntü işleme tekniği ile elde edilen veriler ise yine ilk deney ile paralel olarak genel olarak dalgalanmalar içermekte ve görüntü işleme yönteminde arka yüzey oluşumu sonucu oluşan yüksek su seviyeleri görülmektedir. Ancak sonuçlar kullanılan sayısal metodun problemin ana dinamiklerini modellemede başarılı olduğunu ortaya koymaktadır.

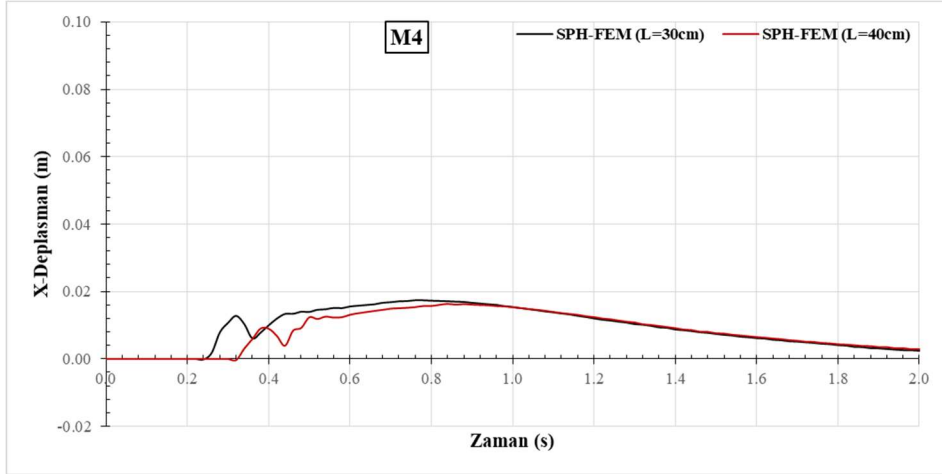
#### 4.3.3. $L/H=1,5$ ve $L/H=2$ için Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Oluşturulan iki deney düzeneği ile kauçuk malzeme deplasmanları ve çeşitli noktalardaki su seviyeleri ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kauçuk malzemenin yerleştirildiği konum itibarı

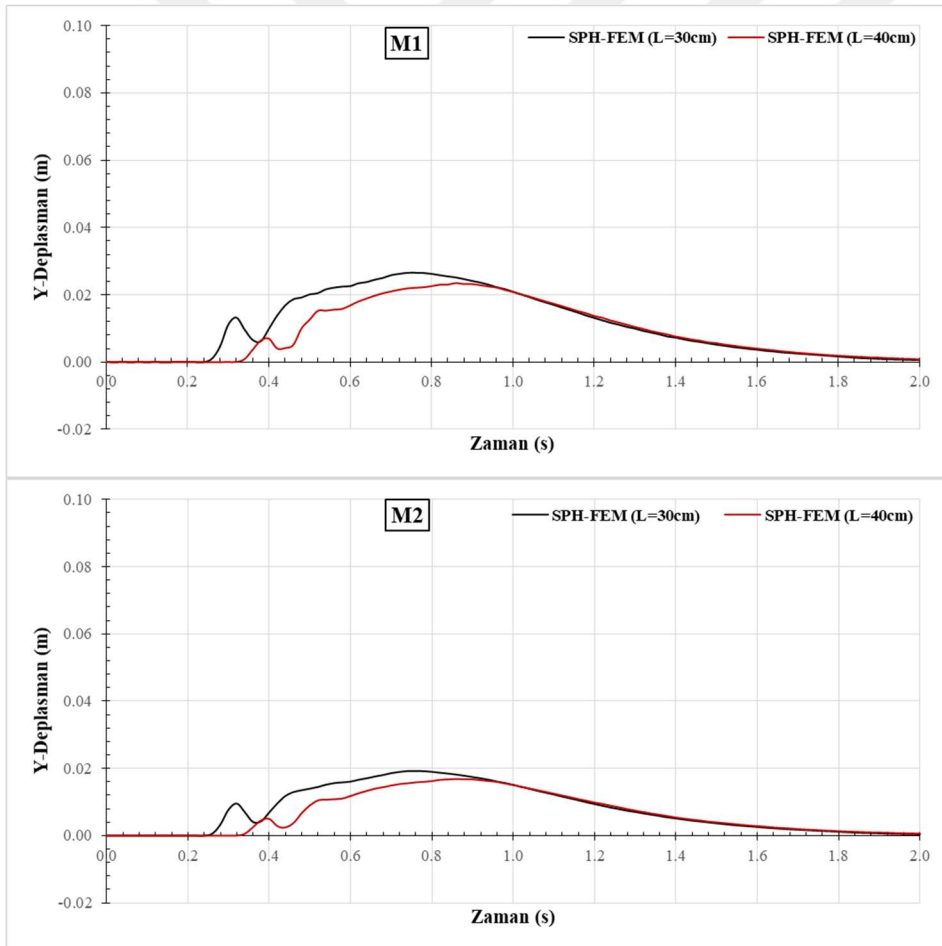
ile farklılık gösteren bu deney düzeneklerinde, malzeme konumunun FSI problemleri kapsamındaki etkisinin incelenmesi amacı ile sayısal analiz ile elde edilen kauçuk malzemenin yatay (x) ve düşey (y) doğrultudaki deplasman verileri her iki deney düzeneği için karşılaştırılmalı olarak sırasıyla Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de sunulmuştur.



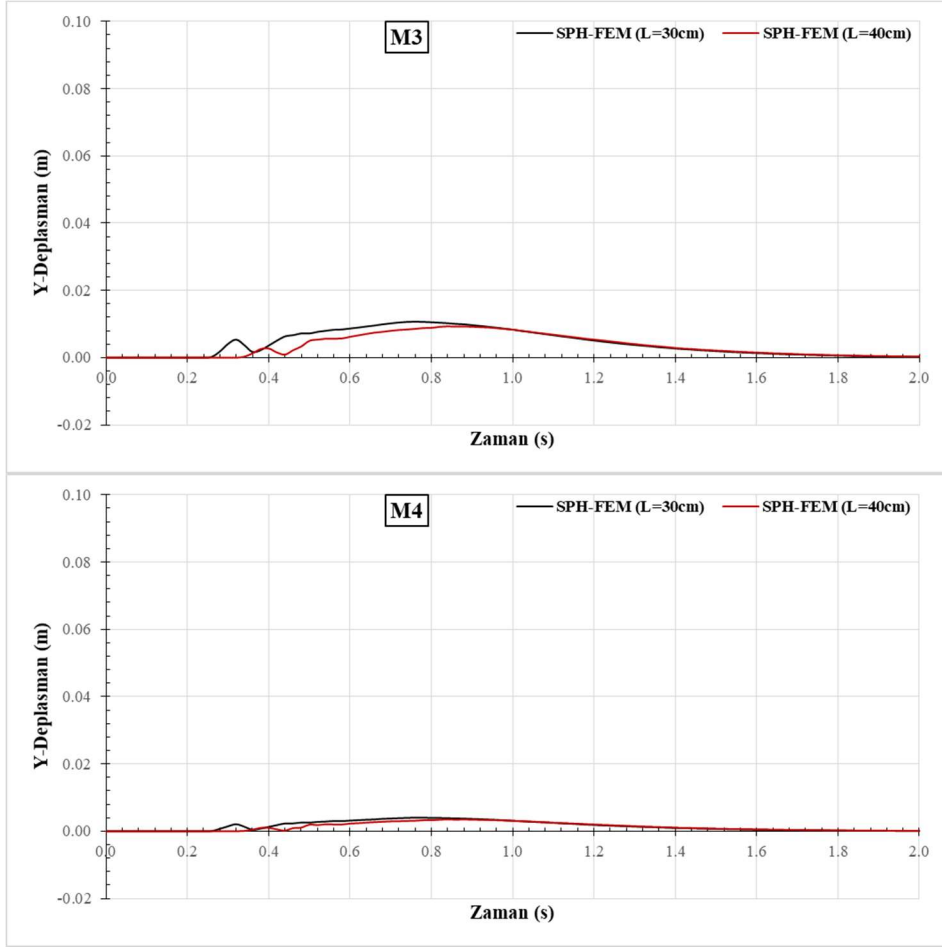
Şekil 4.26.  $L/H=1,5$  ve  $L/H=2$  için kauçuk malzemenin yatay (X) yöndeki deplasman değerleri



Şekil 4.26. (Devamı)  $L/H=1,5$  ve  $L/H=2$  için kauçuk malzemenin yatay (X) yöndeki deplasman değerleri



Şekil 4.27.  $L/H=1,5$  ve  $L/H=2$  için kauçuk malzemenin düşey (Y) yöndeki deplasman değerleri

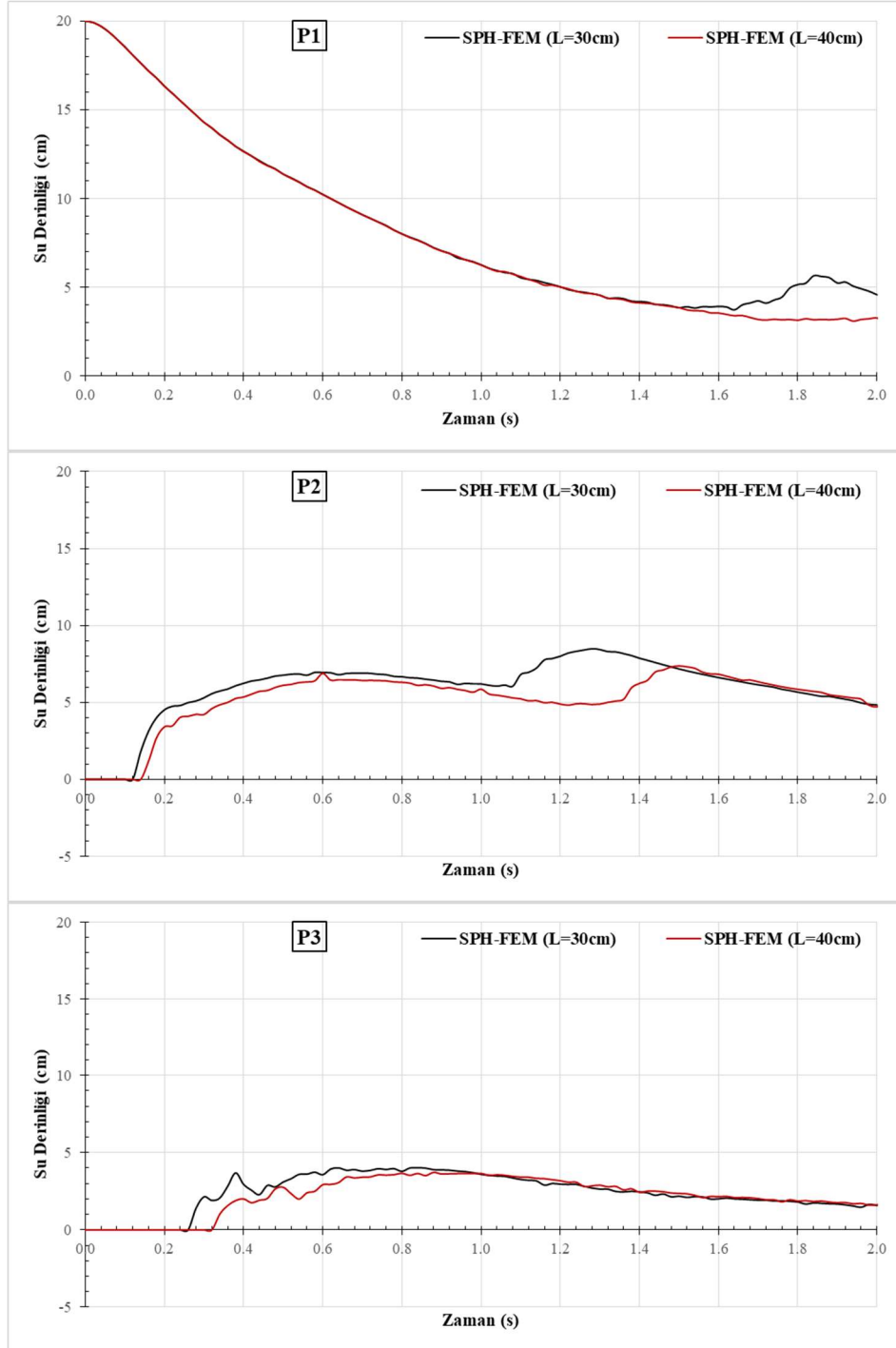


Şekil 4.27. (Devamı)  $L/H=1,5$  ve  $L/H=2$  için kauçuk malzemenin düşey (Y) yöndeki deplasman değerleri

Sonuçlar incelendiğinde tüm noktalarda ilk etki sonrası oluşan deplasman değerlerin  $L/H=1,5$  olan deney düzeneğinde daha fazla olduğu görülmektedir.  $L/H=2$  için sayısal analiz sonuçlarında ilk etki deplasman değerinin, deneysel analizler ile karşılaştırıldığında bir miktar az çıkması bu olguyu değiştirecek bir durum yaratmamaktadır. Benzer şekilde hem yatay hem düşey doğrultuda ulaştıkları maksimum deplasman değerlerinin  $L/H=1,5$  için oluşturulan deney düzeneği için daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak maksimum deplasman sonrasındaki deplasman verilerinde her iki deney düzeneği arasında keskin bir fark gözlemlenmemiştir.  $L/H=1,5$  için oluşturulan deney düzeneğinin daha yüksek su seviyelerinde su tutmasına rağmen membaya yakınlığı nedeniyle taban alanı darlığı yükseklik seviyesinin daha hızlı düşmesine ve dolayısıyla kauçuk malzeme üzerine etkileyen basınçta daha hızlı azalmalara neden olmuştur. Buna bağlı olarak deplasman değerleride daha hızlı düşmüş ve her iki deney düzeneği arasındaki deplasman farkının kapanmasına neden olmuştur.



Her iki deney düzeneği için ölçüm noktalarındaki su seviyelerinin zamana göre değişimleri karşılaştırılmalı olarak Şekil 4.28’de sunulmuştur.



Şekil 4.28.  $L/H=1,5$  ve  $L/H=2$  için noktasal su derinlikleri

Şekil 4.28 incelendiğinde su derinlikleri değerlerinin deplasman değerlerinde meydana gelen farklılıklara paralel şekilde geliştiği görülebilir. P2 ve P3 noktalarında  $L/H=1,5$  için oluşturulan model daha yüksek su seviyelerine çıkmıştır. Ancak burada memba

noktasındaki (P1) sonuçlar arasındaki uyum dikkat çekicidir. Yansıma dalgası P1 ve P2 noktasında  $L/H=2$  için oluşturulan deney düzeneği için daha geç gelişmiş ve daha düşük su derinliklerine ulaşmıştır. Bununla birlikte P2 noktasında yansıma dalgası sonrası her iki deney düzeneği için su seviyelerin zamanla eşitlendiği görülmektedir.



## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında bir FSI problemi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarlarında gerçekleştirilen deneysel çalışma ile dikdörtgen kesitli bir tank içerisinde tipik bir baraj yıkılması akımı oluşturulmuş ve ilk olarak bu akımın SPH metodu ile modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bunun akabinde, incelenen FSI problemi kapsamında bu baraj yıkılması akımı ile etkileşim içerisinde girecek olan kauçuk malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacı ile analitik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

FSI problemlerini inceleme amacı ile oluşturulan deney düzeneği, oluşturulan baraj yıkılması akımının elastik davranış gösteren kauçuk bir malzeme ile etkileşime girmesi temeline dayanmaktadır. Problem hibrit SPH-FEM metodu ile sayısal olarak modellenmiş ve modelin etkinliği zamana bağlı noktasal su derinliği ile kauçuk malzemenin çeşitli noktalarındaki yatay ve düşey deplasman değerleri kullanılarak sınanmıştır. Bu değerlerden kauçuk malzemenin çeşitli noktalarındaki deplasmanları görüntü işleme tekniği ile zamana bağlı noktasal su derinlikleri ise görüntü işleme ve ultrasonik sensörler kullanılarak elde edilmiştir. Görüntü işleme tekniği kullanılarak işlenecek video görüntüleri iki adet son kullanıcıya yönelik akıllı telefon kullanılarak elde edilmiştir.

Mevcut tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- SPH metodunun serbest yüzeyli baraj yıkılması akımlarını makul doğrulukta modelleyebildiği görülmüştür. Ancak su yüzü profilleri karşılaştırılması gerçekleştirildiğinde, elde edilen sonuçlar ile modelin geliştirilebilir bir yapıya sahip olduğu da söylenebilir. Sonuçlar üzerindeki türbülans ve kaymama sınır şartı koşulunun etkisini araştırmak amacıyla bu koşulların dikkate alındığı FVM temelli OpenFOAM çözücüsü ile elde edilen sonuçlar SPH sonuçları ile karşılaştırılmış ve birbirlerine paralel sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında, dalga önü hızı kaynaklı oluşan su yüzü profili

farklılıklarının ana nedeninin, kullanılan SPH metodunun türbülans ve kaymama sınır şartı formülasyonu yoksunluğunun olmadığı sonucuna varılmıştır.

- SPH metodunun FEM metodu ile birleştirilmesi ile oluşturulan hibrit SPH-FEM metodunun oluşturulan FSI probleminin dinamiklerini başarılı bir şekilde modelleyebildiği görülmüştür.  $L/H=1,5$  için oluşturulan modelde yüksek derecede uyum yakalanırken,  $L/H=2$  için oluşturulan modelde su kütlelerinin kauçuk malzeme ile ilk teması anındaki deplasman değerlerindeki ufak farklılık dikkat çekmektedir. Klasik baraj yıkılması akımı için gerçekleştirilen deneysel ve sayısal analizler sonucu ortaya çıkan bu noktadaki su yüzü profili farklılığının, SPH-FEM analizlerinde daha düşük deplasman değerlerinin hesaplanmasına neden olduğu düşünülmektedir. Ancak statik etkilerin daha baskın olduğu ikinci deplasman gelişiminin her iki deney düzeneğinde de başarılı bir şekilde hesaplanabildiği görülmektedir.
- Deneysel çalışmalar sonucu veri elde etme amacı ile ultrasonik sensör ve görüntü işleme tekniği olmak üzere iki farklı metot kullanılmıştır. Her iki metodun birbirleri ile kıyaslandığında avantaj ve dezavantajlı olduğu durumlar ortaya çıkmıştır. Sensörlerin su yüzeyi üzerindeki eğriliklerden kaynaklanan ölçüm yapamama sorunu ile deneysel analizler süresince sıklıkla karşılaşılmıştır. Görüntü işleme tekniğinin ise kameranın ölçüm yapılacak düzleme göre konumunun ayarlanması ve çeşitli kalibrasyonlar sebebi ile daha karmaşık bir sistem olduğu öne sürülebilir. Görüntü işleme tekniği ile elde edilen su seviyesi verilerinin cidar yüzeyindeki veriler olması bazı durumlarda olumsuzluklara neden olmuştur. Kauçuk malzeme sonrası konumlandırılan ölçüm noktasında kauçuk malzemenin yanlarından sızan suların oluşturduğu kaotik ortamın görüntü işleme tekniği ile elde edilen verilerde düşük frekanslı dalgalanmalara neden olduğu görülmüştür.
- Görüntü işleme tekniğinde kullanılmak üzere video görüntüleri akıllı telefonlar yardımı ile elde edilmiştir. Su derinliklerinin ölçümleri için 60 fps değerli videolar kullanılmıştır. Bu değer su derinliklerinin belirlenmesi amacı ile kullandığında bir olumsuzluğa neden olmamıştır fakat 60 ve 120 fps değerli çekimlerin kauçuk malzemenin dinamik deplasman hareketini tanımlamada yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu doğrultuda kauçuk malzemenin deplasman değerlerinin ölçülmesi için kullanılacak video görüntüleri 240 fps değeri ile kaydedilmiştir. Bu değer elastik malzeme deformasyonlarını tanımlamada yeterli başarıyı

sağlamıştır fakat daha yüksek değerlere çıkılması ile daha net ölçümler elde edilebileceği düşünülmektedir.

- Yüksek fps değerli video çekimlerinde kullanılan ışık kaynağının türü önem kazanmaktadır. Klasik ampullerin 120 ve 240 fps değerlerinde video görüntülerinde dalgalanmalara neden olduğu görülmüştür. Bu durumun önüne geçebilmek amacı ile deneysel çalışmalar LED ampuller kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca görüntü işleme yönteminde sağlıklı ölçümler alabilmek için ışık kaynaklarının mümkün olabilecek en homojen ışık dağılımının yakalandığı konumlara yerleştirilmesi gerekmektedir. Homojen dağılmayan ışığın su derinliklerinin belirlenebilmesi amacı ile oluşturulan zıtlıklar arasındaki belirginlikleri azaltabileceği gibi gerekli olduğunda kullanılacak filtreleme işlemlerinde sorunlara neden olabileceği düşünülmektedir.

## 5.2. Öneriler

Mevcut tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ışığında ileride gerçekleştirilebilecek çalışmalar ilgili öneriler maddeler halinde bu bölümde sunulmuştur.

- Kullanılan SPH metodunun oluşturulan baraj yıkılması akımını modellemede makul doğrulukta sonuçlar verse de geliştirilebilir bir yapıya sahip olduğu da görülmektedir. Özellikle dalga önü yayılma hızında oluşan farklılıkların, farklı kernel formülasyonların, farklı parçacıklar arası mesafelerin, farklı sınır şartı formülasyonlarının kullanıldığı modeller ile incelenip, bu değişimlerin sayısal model sonuçları üzerindeki etkileri kapsamlı parametrik çalışmalar ile ele alınmalıdır.
- Bu tez çalışması kapsamında FSI problemi SPH-FEM metodu kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir. Deneysel çalışma ile elde edilen veriler, akışkanların farklı parçacık temelli metotlarla veya ağ yapısı tabanlı metotlarla modellendiği yöntemlerin etkinliğinin belirlenmesi amacı ile kullanılabilir. Özellikle FVM temelli ve yapısında türbülans ve kaymama sınır şartı formülasyonlarını barındıran ağ yapılı metotların akışkan hareketini modellemedeki başarısı düşünüldüğünde, farklı metotlar ile birleştirilecek bu yöntemin FSI problemlerinin çözümünde göstereceği performansların incelenebileceği düşünülmektedir.

- Oluşturulan deney düzeneği ile FSI problemleri kapsamında akışkanların elastik cisimler üzerinde etkisi araştırılmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan kauçuk malzemenin aynı boyutlarda rijit bir plaka ile değiştirilmesi sonucu oluşturulacak yeni deney düzeneği ile elde edilecek veriler, elastik deformasyonunun serbest yüzeyli akım üzerindeki etkilerinin belirlenebileceği sonuçlar elde edilmesini sağlayabilir. Ayrıca bu şekilde oluşturulacak bir deney düzeneği ile SPH metodunun yansıma dalgalarını modellemedeki başarısının da incelenebileceği düşünülmektedir.
- Akışkan hareketinin görüntü işleme tekniği kullanılarak ölçüm gerçekleştirilirken kamera konumunun yüksek önemi bulunmaktadır. Ölçüm noktalarına mümkün olacak şekilde dik ve akışkanların hareket ettikleri taban seviyesine olabildiğince yakın olacak şekilde konumlandırılması hayati bir önem taşımaktadır. Bunlara özen gösterilmeden yapılan çekimlerde 3 boyutlu su hareketinde ölçüm yapılacak düzlemlerde arka yüzeyin görünür olması ölçüm verilerinin olduğundan daha yüksek çıkmasına sebep olabilecektir.
- Kauçuk malzemenin lineer-elastik davranış gösterdiği kabulü ile gerçekleştirilen analitik çalışma ile belirlenen elastisite modülünün, oluşturulan FSI probleminin katı fazını oluşturan kauçuk malzeme dinamiklerini tahminde makul başarı seviyesini yakaladığı görülmüştür. Buna ilaveten kauçuk malzeme mekanik özelliklerinin kapsamlı deneysel çalışmalar ile belirlenmesi ve bu değerler ile uyumlu olacak şekilde kullanılan yeni malzeme modelinin deneysel ve sayısal veriler arasındaki uyumu ne derecede etkileyeceği incelenmelidir.

## KAYNAKLAR

- Akrish, G., Rabinovitch, O., and Agnon, Y. (2018). Hydroelasticity and nonlinearity in the interaction between water waves and an elastic wall. *Journal of Fluid Mechanics*, 845, 293-320.
- Antoci, C., Gallati, M., and Sibilla, S. (2007). Numerical simulation of fluid–structure interaction by SPH. *Computers & Structures*, 85(11-14), 879-890.
- Boyd, R., Royles, R., and El-Deeb, K. M. M. (2000). Simulation and validation of UNDEX phenomena relating to axisymmetric structures. *In 6th International LS-DYNA Users Conference Simulation*.
- Calderer, A., Guo, X., Shen, L., and Sotiropoulos, F. (2018). Fluid–structure interaction simulation of floating structures interacting with complex, large-scale ocean waves and atmospheric turbulence with application to floating offshore wind turbines. *Journal of Computational Physics*, 355, 144-175.
- Dal, K., (2018). Eğimli kanalda ardışık baraj yıkılmasının deneysel ve sayısal incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Degroote, J., Souto-Iglesias, A., Van Paepegem, W., Annerel, S., Bruggeman, P., and Vierendeels, J. (2010). Partitioned simulation of the interaction between an elastic structure and free surface flow. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 199(33-36), 2085-2098.
- Erdoğan, B., (2018). Dikdörtgen tank içerisindeki çalkantı hareketinin deneysel ve nümerik olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Falahaty, H., Khayyer, A., and Gotoh, H. (2018). Enhanced particle method with stress point integration for simulation of incompressible fluid-nonlinear elastic structure interaction. *Journal of Fluids and Structures*, 81, 325-360.
- Ferrari, A. (2010). SPH simulation of free surface flow over a sharp-crested weir. *Advances in Water Resources*, 33(3), 270-276.
- Franci, A., and Zhang, X. (2018). 3D numerical simulation of free-surface Bingham fluids interacting with structures using the PFEM. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 259, 1-15.
- Gingold, R.A., and Monaghan, J.J., 1977. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 181, 375–389.
- Groenenboom, P. H., and Cartwright, B. K. (2010). Hydrodynamics and fluid-structure interaction by coupled SPH-FE method. *Journal of Hydraulic Research*, 48(S1), 61-73.
- Hallquist, J. O. (2006). LS-DYNA theory manual. Livermore software Technology corporation, 3, 25-31.

- Han, L., and Hu, X. (2018). SPH modeling of fluid-structure interaction. *Journal of Hydrodynamics*, 30(1), 62-69.
- He, J., Tofighi, N., Yildiz, M., Lei, J., and Suleman, A. (2017). A coupled WC-TL SPH method for simulation of hydroelastic problems. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 31(3), 174-187.
- Hermange, C., Oger, G., and Le Touzé, D. (2016). Development of a coupling strategy between Smoothed Particle Hydrodynamics and Finite Element Method for violent fluid-structure interaction problems. *In Proceedings of 3rd International Conference on Violent Flows*.
- Hibbeler, R. C., (2012). *Structural analysis SI* (8th Edition). America: Pearson, 299-335
- Holzmann, T. (2016). Mathematics, Numerics, Derivations and OpenFOAM®. Loeben, Germany: Holzmann CFD, URL: <https://holzmann-cfd.de>, Son Erişim Tarihi: 27.11.2017.
- Hu, D., Long, T., Xiao, Y., Han, X., and Gu, Y. (2014). Fluid–structure interaction analysis by coupled FE–SPH model based on a novel searching algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 276, 266-286.
- Huang, Q., Yan, X., and Zhang, C. (2018). Numerical calculation and experimental research on the ship dynamics of the fluid–structure interaction. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(7), <https://doi.org/10.1177/1687814018782347>
- Idelsohn, S. R., Marti, J., Souto-Iglesias, A., and Onate, E. (2008). Interaction between an elastic structure and free-surface flows: experimental versus numerical comparisons using the PFEM. *Computational Mechanics*, 43(1), 125-132.
- Idelsohn, S. R., Oñate, E., Del Pin, F., and Calvo, N. (2006). Fluid–structure interaction using the particle finite element method. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 195(17-18), 2100-2123.
- İnternet: URL: <https://www.microsonic.de>, Son Erişim Tarihi: 30.12.2018.
- Jonsén, P., Pålsson, B. I., and Häggblad, H. Å. (2012). A novel method for full-body modelling of grinding charges in tumbling mills. *Minerals Engineering*, 33, 2-12.
- Karslı, F. ve Ayhan, E. (2005). Orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kameraların metrik performanslarının belirlenmesi. *TMMOB Harita ve Kadastro Müh. Odası, 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara*.
- Khayyer, A., Gotoh, H., Falahaty, H., and Shimizu, Y. (2018). An enhanced ISPH-SPH coupled method for simulation of incompressible fluid-elastic structure interactions. *Computer Physics Communications*. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2018.05.012Get>
- Khayyer, A., Gotoh, H., Falahaty, H., and Shimizu, Y. (2018). Towards development of enhanced fully-Lagrangian mesh-free computational methods for fluid-structure interaction. *Journal of Hydrodynamics*, 30(1), 49-61.



- Kocaman, S., (2007). Baraj yıkılması probleminin deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Kocaman, S., and Ozmen-Cagatay, H. (2015). Investigation of dam-break induced shock waves impact on a vertical wall. *Journal of Hydrology*, 525, 1-12.
- Koshizuka, S., and Oka, Y. (1996). Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid. *Nuclear science and engineering*, 123(3), 421-434.
- Lee, C. J. K., Noguchi, H., and Koshizuka, S. (2007). Fluid-shell structure interaction analysis by coupled particle and finite element method. *Computers & structures*, 85(11-14), 688-697.
- Lee, Y. J., Jhan, Y. T., and Chung, C. H. (2012). Fluid-structure interaction of FRP wind turbine blades under aerodynamic effect. *Composites Part B: Engineering*, 43(5), 2180-2191.
- Li, Z., Leduc, J., Nunez-Ramirez, J., Combescure, A., and Marongiu, J. C. (2015). A non-intrusive partitioned approach to couple smoothed particle hydrodynamics and finite element methods for transient fluid-structure interaction problems with large interface motion. *Computational Mechanics*, 55(4), 697-718.
- Liao, K., Hu, C., and Sueyoshi, M. (2015). Free surface flow impacting on an elastic structure: Experiment versus numerical simulation. *Applied Ocean Research*, 50, 192-208.
- Liu, G. R., and Liu, M. B. (2003). Smoothed particle hydrodynamics: a meshfree particle method. World Scientific.
- Liu, M. B., and Liu, G. R. (2010). Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments. *Archives of computational methods in engineering*, 17(1), 25-76.
- LS-DYNA Keyword User's Manual (2012) Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Version 971 R6.1.0. Vol. 1 and 2.
- Lucy, L. B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The astronomical journal*, 82, 1013-1024.
- Martinez-Ferrer, P. J., Qian, L., Ma, Z., Causon, D. M., and Mingham, C. G. (2018). An efficient finite-volume method to study the interaction of two-phase fluid flows with elastic structures. *Journal of Fluids and Structures*, 83, 54-71.
- Mitsume, N., Yoshimura, S., Murotani, K., and Yamada, T. (2014). MPS-FEM partitioned coupling approach for fluid-structure interaction with free surface flow. *International Journal of Computational Methods*, 11(04), 1350101.
- Mittal, V., Chakraborty, T., and Matsagar, V. (2014). Dynamic analysis of liquid storage tank under blast using coupled Euler-Lagrange formulation. *Thin-Walled Structures*, 84, 91-111.
- Monaghan, J. J. (1992). Smoothed particle hydrodynamics. *Annual review of astronomy and*

- astrophysics*, 30(1), 543-574.
- Monaghan, J. J. (1994). Simulating free surface flows with SPH. *Journal of computational physics*, 110(2), 399-406.
- Ozmen-Cagatay, H., and Kocaman, S. (2010). Dam-break flows during initial stage using SWE and RANS approaches. *Journal of Hydraulic Research*, 48(5), 603-611.
- Ozmen-Cagatay, H., Kocaman, S., and Guzel, H. (2014). Investigation of dam-break flood waves in a dry channel with a hump. *Journal of Hydro-environment Research*, 8(3), 304-315.
- Panciroli, R., Abrate, S., Minak, G., and Zucchelli, A. (2012). Hydroelasticity in water-entry problems: Comparison between experimental and SPH results. *Composite Structures*, 94(2), 532-539.
- Rafiee, A., and Thiagarajan, K. P. (2009). An SPH projection method for simulating fluid-hypoelastic structure interaction. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198(33-36), 2785-2795.
- Rao, C. P., and Wan, D. C. (2018). Numerical study of the wave-induced slamming force on the elastic plate based on MPS-FEM coupled method. *Journal of Hydrodynamics*, 30(1), 70-78.
- Shao, J. R., Li, H. Q., Liu, G. R., and Liu, M. B. (2012). An improved SPH method for modeling liquid sloshing dynamics. *Computers & Structures*, 100, 18-26.
- Shigematsu, T., Liu, P. L. F., and Oda, K. (2004). Numerical modeling of the initial stages of dam-break waves. *Journal of Hydraulic Research*, 42(2), 183-195.
- Sun, Z., Djidjeli, K., and Xing, J. T. (2015). Modified MPS method for the 2D fluid structure interaction problem with free surface. *Computers & Fluids*, 122, 47-65.
- Tang, Y., Jiang, Q., and Zhou, C. (2018). A Lagrangian-based SPH-DEM model for fluid-solid interaction with free surface flow in two dimensions. *Applied Mathematical Modelling*. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.06.013>
- Turhan, E., (2017). Baraj yıkılması akımının deneysel ve interpolasyonlu parçacık hidrodinamiği (SPH) yöntemi ile incelenmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Wang, L., Xu, F., Yang, Y., and Wang, J. (2018). A dynamic particle refinement strategy in Smoothed Particle Hydrodynamics for Fluid-Structure Interaction problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2018.01.012>
- Wang, S., and Soares, C. G. (2018). Simplified approach to dynamic responses of elastic wedges impacting with water. *Ocean Engineering*, 150, 81-93.
- Wu, K., Yang, D., and Wright, N. (2016). A coupled SPH-DEM model for fluid-structure interaction problems with free-surface flow and structural failure. *Computers & Structures*, 177, 141-161.

- Wu, K., Yang, D., Wright, N., and Khan, A. (2018). An integrated particle model for fluid–particle–structure interaction problems with free-surface flow and structural failure. *Journal of fluids and structures*, 76, 166-184.
- Xie, H., Ren, H., Qu, S., and Tang, H. (2018). Numerical and Experimental Study on Hydroelasticity in Water-entry problem of a Composite Ship-hull Structure. *Composite Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.030>
- Yang, Q., Jones, V., and McCue, L. (2012). Free-surface flow interactions with deformable structures using an SPH–FEM model. *Ocean engineering*, 55, 136-147.
- Zhang, and Wan. (2018). MPS-FEM Coupled Method for Fluid–Structure Interaction in 3D Dam-Break Flows. *International Journal of Computational Methods*, <https://doi.org/10.1142/S021987621846009X>
- Zhang, Y., and Wan, D. (2018). MPS-FEM coupled method for sloshing flows in an elastic tank. *Ocean Engineering*, 152, 416-427.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILMAZ, Ada  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 22.06.1990, Beyoğlu  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : 0 (534) 692 69 22  
 Faks : ---  
 e-mail : ada.yilmaz@iste.edu.tr



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği/İnşaat Mühendisliği ABD	Devam ediyor
Lisans	Mustafa Kemal Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2014
Lise	Adana Ticaret Borsası Lisesi	2007

### İş Deneyimi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

1. Yılmaz, A., Demirci, M., ve Kocaman, S., (2017). Akışan-Yapı Etkileşimi Problemlerinin CEL Metodu ile Numerik Analizi. *1. Uluslararası İleri Araştırmalar Ve Mühendislik Kongresi, 16-18 Kasım 2017, Osmaniye, Türkiye.*
2. Yılmaz, A., Dal, K., Demirci, M., ve Kocaman, S. (2018). Üçgen Bir Eşik Üzerinden Geçen Baraj Yıkılması Akımının OpenFOAM ile Sayısal Analizi. *Uluslararası V. Baraj Güvenliği Sempozyumu, 27-31 Ekim 2018, İstanbul, Türkiye.*

### Hobiler

Spor, Teknoloji

**DİZİN****A**

Açısal Kalibrasyon · 22,23

**D**

DEM· 9,11,12

**F**

Fps (frame per second)  
20,24,26,73,74

**G**

Görüntü işleme  
3,16,17,19,20,21,24,25,32  
33,34,35,45,47,48,49,50  
51,57,58,59,60,66,72,73,74,75

**I**

Image pro plus 19

**K**

Kalibrasyonlar · 21

**M**

Metrik kalibrasyon ·  
22,23,24,25,26

**S**

serbest yüzey ·  
1,2,5,6,7,8,9,11,32,39,72,75

**SPH**

2,4,5,6,7,8,9,10,11,12,27,28,2  
9,30,31,32,33,36,39,41,42,43,  
44,46,50,55,60,72,73,74,75

**U**

Ultrasonik Sensör ·  
3,17,19,24,32,35,48,72,73

**Y**

Yatay kalibrasyon · 22



**TEKNOVERSITE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

