



**İSKENDERUN TEKNİK**

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**DİKDÖRTGEN TANK İÇERİSİNDEKİ  
ÇALKANTI HAREKETİNİN DENEYSEL  
VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

**Burak ERDOĞAN**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2018



**DİKDÖRTGEN TANK İÇERİSİNDEKİ ÇALKANTI HAREKETİNİN  
DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

**Burak ERDOĞAN**

**YÜKSEK LİSANS  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

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

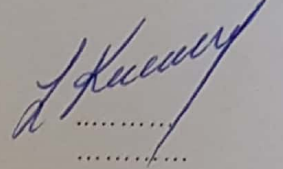
**HAZİRAN 2018**

Burak ERDOĞAN tarafından hazırlanan "DİKDÖRTGEN TANK İÇERİSİNDEKİ ÇALKANTI HAREKETİNİN DENEYSEL ve NÜMERİK OLARAK 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. Selahattin KOCAMAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

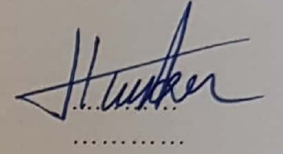
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



**İkinci Danışman:** Doç. Dr. Hakan Tacettin TÜRKER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Uludağ Üniversitesi

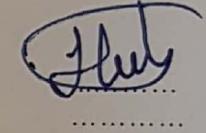
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



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

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi

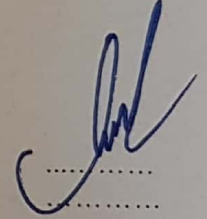
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Üye:** Doç. Dr. Mustafa DEMİRCİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

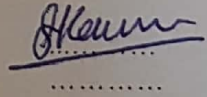
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Üye:** Dr. Öğr.Üyesi Selçuk KAÇIN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 22/06/2018

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

Doç. Dr. Tolga DEPCI  
Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü v.

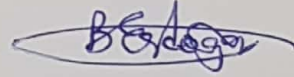


## ETİK BEYAN

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 görüntülendiğinde 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.



Burak ERDOĞAN

22/06/2018

# DİKDÖRTGEN TANK İÇERİSİNDEKİ ÇALKANTI HAREKETİNİN DENEYSSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Burak ERDOĞAN

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2018

## ÖZET

Çalkantı en genel haliyle kısmen dolu bir kap içerisinde bulunan sıvının yaptığı hareket olarak tanımlanabilir. Sıvının yaptığı bu çalkantı hareketi sonrası sıvı yüzü profili değişmektedir. Sıvı yüzü profilindeki bu değişim, sıvının içerisinde bulunduğu tanka ek dinamik etkiler doğurmasına neden olacaktır. Sıvının doğal periyodu ve içerisinde bulunduğu nesnenin hareket periyodu birbirlerine yaklaştığında çalkantı etkisi çok daha fazla hissedilecektir.

Bu tez çalışmasında, dikdörtgen bir tank içerisindeki çalkantı hareketinin deneysel ve nümerik olarak incelemesi gerçekleştirilmiştir. Literatürde çalkantı hareketinin anlaşılması adına yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmayı diğer çalışmalardan farklı kılan çalkantı hareketinin deney video görüntülerinin görüntü işleme yazılımı kullanılarak analiz edilmesiyle anlaşılmasına ağırlık verilmesidir. Görüntü işleme sistemi ile elde edilen deneysel sonuçlar bir başka deneysel yöntem olan ultrasonik mesafe ölçer sensörlerle doğrulanmıştır. Tez çalışmasında çalkantı hareketinin anlaşılmasında çalkantı etkisine maruz kalan sıvının serbest yüzey derinlik değişimlerinin belirlenmesine öncelik verilmiştir. Deney tankı üzerinde iki adet ölçüm noktası belirlenmiş ve bu noktadaki su derinliğinin zamanla değişiminin deneysel ve nümerik sonuçlarının karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ayrıca çalkantının içerisinde bulunduğu nesne üzerinde yaratacağı basınç etkisi, Madrid Politeknik Üniversitesi'nde dikdörtgen bir tank içerisinde gerçekleştirilmiş çalkantı hareketinin deneysel sonuçlarının RANS denklemlerine dayanan ve serbest yüzeyli akımların çözümünde başarılı sonuçlar veren FLOW-3D yazılımı ile karşılaştırılmasıyla irdelenmiş ve sonuçların uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir.

Deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında sonuçların uyum içinde olduğu anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler : Çalkantı, ultrasonik sensör, görüntü işleme

Sayfa Adedi : 70

Danışman : Doç. Dr. Selahattin KOCAMAN

2. Danışman : Doç. Dr. Hakan Tacettin TÜRKER

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF SLOSHING MOTION IN  
RECTANGULAR TANK

(M. Sc. Thesis)

Burak ERDOĞAN

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

June 2018

ABSTRACT

Sloshing is most commonly described as the movement of a liquid in a partially filled container. Free surface profile changes after sloshing movement of liquid. This change in the liquid surface profile will cause additional dynamic effects on the tank in which the liquid is contained. The sloshing effect will be felt much more when the natural period of the liquid and the period of motion of the object within it approach each other.

In this thesis study, an experimental and numerical study of the sloshing movement in a rectangular tank was carried out. There are many studies in the literature in order to understand the sloshing movement. The focus of this study is to understand the behavior of the sloshing movement, which is different from the other studies, by analyzing the experimental video images using image processing software. Experimental results obtained with the image processing system have been confirmed with ultrasonic distance measuring sensors, which is another experimental method. In the thesis study, in understanding the sloshing movement, priority has been given to determining the free surface depth changes of the liquid exposed to sloshing effects. Two measurement points were identified on the test tank and the experimental and numerical results of the water depth changes over time were compared. In this study, a sloshing experiment for a rectangular tank at Madrid Polytechnic University was considered and its experimental results were compared with FLOW-3D computational fluid dynamics software, which is based on the RANS equations and yields very successful results in the solution of free surface flows.

When the experimental results are compared with the numerical results, numerical data are generally in good agreement with the experimental data.

Key Words : Sloshing, ultrasonic sensor, image processing  
Page Number : 70  
Supervisor : Doç. Dr. Selahattin KOCAMAN  
2.Supervisor : Doç. Dr. Hakan Tacettin TÜRKER

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konumun belirlenmesi, araştırılması ve deneylerin yapılması sürecinde sahip olduğu bilgi birikimleri ve tecrübeleriyle çalışmaya yönlendiren ve her türlü yardımı esirgemeyen çok değerli danışman hocalarım Doç. Dr. Selahattin KOCAMAN ve Doç. Dr. Hakan Tacettin TÜRKER'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın ortaya konmasında payı büyük olan FLOW-3D yazılımının kullanımını sağladığı için Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi sayın Doç. Dr. Hatice ÖZMEN ÇAĞATAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Deney düzeneğinin hazırlanmasında kendi önceliklerinden taviz vererek fedakârlıkla yardımda bulunan çok değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Kaan DAL ve Arş. Gör. Ada YILMAZ'a teşekkürlerimi iletirim.

Tez yazım sürecinde manevi desteklerini üzerimde her daim hissettiğim Öğr. Gör. Ömer Faruk ÇOŞKUN, Öğr. Gör. Ali BİRVURAL, Öğr. Gör. Aylin VARIŞLI ve Öğr. Gör. Muzaffer ATASOY'a teşekkürü borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında desteklerini bir an olsun esirgemeyen anneme, babama ve kardeşlerime 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.....	4
3. MATERYAL ve YÖNTEM .....	12
3.1. Deney Düzenegi .....	12
3.2. Ölçüm Teknikleri .....	13
3.2.1. Ultrasonik sensörler .....	13
3.2.2. Görüntü işleme .....	16
3.2.2.1. Kameralar ve ortam ışığı .....	16
3.2.2.2. Görüntü işleme analizi .....	17
3.3. Kalibrasyonlar .....	19
3.3.1. Yatay kalibrasyon.....	19
3.3.2. Metrik kalibrasyon .....	20
3.3.3. Açısal kalibrasyon .....	21
3.3.4. Perspektif kalibrasyon.....	21
3.4. Bir Noktaya Ait Su Derinliğinin Zamana Bağlı Değişiminin Görüntü İşleme Tekniği ile Elde Edilmesi .....	22



	<b>Sayfa</b>
3.5. Teori .....	24
3.5.1. FLOW-3D yazılımı .....	24
3.5.1.1. k-ε Türbülans modeli .....	27
3.6. Tank Hareketi ve Çalkantının Doğal Frekansı .....	28
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....</b>	<b>30</b>
4.1. Cihaz Frekansının Kalibrasyonu .....	33
4.1.1. Cihaz frekansının kalibrasyonun sensör-1 ile gerçekleştirilmesi.....	33
4.1.2. Cihaz frekansının kalibrasyonun hareketli kamera ile gerçekleştirilmesi .	36
4.2. Hareketli Kamera, Sabit Kamera ve Sensör1 ile Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması .....	39
4.3. Görüntü İşleme ve Ultrasonik Sensör Kullanarak Su Seviyelerinin Karşılaştırılması .....	42
4.4. Su Seviyelerinin Görüntü İşleme ve Nümerik Sonuçlarla Karşılaştırılması.....	43
4.5. Tank Hareketi ve Su Seviyesi Değişiminin İrdelenmesi.....	51
4.6. Tank İçerisindeki Çalkantı Hareketine Ait Basınç Değerlerinin Sayısal Olarak İrdelenmesi .....	55
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>60</b>
5.1. Sonuçlar .....	60
5.2. Öneriler .....	63
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>65</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>69</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Ultrasonik sensör koordinatları .....	14
Çizelge 3.2. $h=2$ cm için doğal frekans değerleri .....	28
Çizelge 3.3. $h=4$ cm için doğal frekans değerleri .....	28
Çizelge 3.4. $h=6$ cm için doğal frekans değerleri .....	29
Çizelge 4.1. Deney çalışmalarında kullanılan değerler .....	55



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Deneş düzeneği .....	12
Şekil 3.2. Ultrasonik sensörlerin ve kameraların konumları (üstten görünüş) .....	13
Şekil 3.3. Ultrasonik sensörlerin konumları (karşıdan görünüş) .....	14
Şekil 3.4. Ultrasonik sensör ve veri toplama cihazı.....	14
Şekil 3.5. Mic+25IU/TC sensörden çıkan dalgalar ve çalışma aralığı ( <a href="https://www.microsonic.de">https://www.microsonic.de</a> ) .....	15
Şekil 3.6. Bir görüntü üzerinde piksellerin temsili gösterimi (Kocaman, 2007) .....	18
Şekil 3.7. Metrik kalibrasyon için deney tankına yapıştıran cetvel.....	21
Şekil 3.8. Belli bir noktada su derinliğinin Kocaman (2007) tarafından geliştirilen yöntem ile belirlenmesi.....	22
Şekil 4.1. Çalkantı etkisiyle su yüzü profiline değişimi (0.5 saniye aralıklı).....	31
Şekil 4.2. Çalkantı etkisiyle su yüzü profiline değişimi (0.5 saniye aralıklı).....	32
Şekil 4.3. Aynı şartlar altında boş tankın farklı cihaz frekansı için Sensör 1 verileri üzerinden karşılaştırılması (Cihaz frekansları sırasıyla 15,20,25) .....	35
Şekil 4.4. Aynı şartlar altında boş tankın farklı cihaz frekansı için Sensör 1 verileri üzerinden karşılaştırılması (Cihaz frekansları sırasıyla 30,35,40) .....	34
Şekil 4.5. Aynı şartlar altında boş tankın ve h=8 cm su bulunan tankın cihaz frekansının 29.4 olduğu durum için Sensör 1 verileri üzerinden karşılaştırılması .....	36
Şekil 4.6. Aynı şartlar altında boş tankın farklı cihaz frekansı için hareketli kamera görüntüleri üzerinden karşılaştırılması (Cihaz frekansları sırasıyla 15,20) .....	37
Şekil 4.7. Aynı şartlar altında boş tankın farklı cihaz frekansı için hareketli kamera görüntüleri üzerinden karşılaştırılması (Cihaz frekansları sırasıyla 25,30,35) .....	38
Şekil 4.8. h=2 cm ve f=0,55 hertz için sıvı tankının genliğinin kameralar ve sensör1 ile karşılaştırılması.....	40

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.9. $h=4$ cm ve $f= 0,77$ hertz için sıvı tankının genliğinin kameralar ve sensör1 ile karşılaştırılması.....	40
Şekil 4.10. $h=6$ cm ve $f= 0,93$ hertz için sıvı tankının genliğinin kameralar ve sensör1 ile karşılaştırılması.....	41
Şekil 4.11. $h=8$ cm ve $f= 1,04$ hertz için sıvı tankının genliğinin kameralar ve sensör1 ile karşılaştırılması.....	41
Şekil 4.12. $h=2$ cm ve $f= 0,55$ hertz için ultrasonik mesafe ölçer sensör2 ve hareketli kameradan elde edilen görüntülere ait deneysel sonuçların karşılaştırılması .....	42
Şekil 4.13. $h=2$ cm ve $f= 0,55$ hertz için ultrasonik mesafe ölçer sensör3 ve hareketli kameradan elde edilen görüntülere ait deneysel sonuçların karşılaştırılması .....	43
Şekil 4.14. $h=2$ cm ve $f= 0,55$ hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör2 noktası) .....	45
Şekil 4.15. $h=2$ cm ve $f= 0,59$ hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör2 noktası) .....	45
Şekil 4.16. $h=2$ cm ve $f= 0,55$ hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör3 noktası) .....	46
Şekil 4.17. $h=2$ cm ve $f= 0,59$ hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör3 noktası) .....	46
Şekil 4.18. $h=4$ cm ve $f= 0,77$ hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör2 noktası) .....	47
Şekil 4.19. $h=4$ cm ve $f= 0,91$ hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör2 noktası) .....	47
Şekil 4.20. $h=4$ cm ve $f= 0,77$ hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör3 noktası) .....	48
Şekil 4.21. $h=4$ cm ve $f= 0,91$ hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör3 noktası) .....	48
Şekil 4.22. $h=6$ cm ve $f= 0,93$ hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör2 noktası) .....	49
Şekil 4.23. $h=6$ cm ve $f= 1,10$ hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör2 noktası) .....	49

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.24. $h=6$ cm ve $f= 0,93$ hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör3 noktası) .....	50
Şekil 4.25. $h=6$ cm ve $f= 1,10$ hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör3 noktası) .....	50
Şekil 4.26. $h=2$ cm ve $f= 0,55$ hertz için tank hareketi ve su seviyesi değişiminin karşılaştırılması (Sensör2 noktası) .....	52
Şekil 4.27. $h=2$ cm ve $f= 0,55$ hertz için tank hareketi ve su seviyesi değişiminin karşılaştırılması (Sensör3 noktası) .....	52
Şekil 4.28. $h=6$ cm ve $f= 0,93$ hertz için tank hareketi ve su seviyesi değişiminin karşılaştırılması (Sensör2 noktası) .....	53
Şekil 4.29. $h=6$ cm ve $f= 0,93$ hertz için tank hareketi ve su seviyesi değişiminin karşılaştırılması (Sensör3 noktası) .....	53
Şekil 4.30. Tank geometrisi ve basınç sensörlerinin konumu (Delorme ve diğerleri, 2009) .....	56
Şekil 4.31. $h=9,3$ cm su için sensör 1'den okunan yanal basınç değerleri karşılaştırması .....	57
Şekil 4.32. $h=9,3$ cm yağ için sensör 1'den okunan yanal basınç değerleri karşılaştırması .....	57
Şekil 4.33. $h=35,53$ cm su için sensör 3'den okunan yanal basınç değerleri karşılaştırması .....	58
Şekil 4.34. $h=35,53$ cm yağ için sensör 3'den okunan yanal basınç değerleri karşılaştırması .....	58

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

### Açıklamalar

$f_i$	Bir akışkan hacmi için Reynolds gerilmeleri
$g$	Yerçekimi ivmesi
$u$	x doğrultusundaki akım hızı
$u'$	x doğrultusundaki çalkantı hızı
$u_0$	Herhangi bir noktadaki teğetsel hız
$u^*$	Kayma hızı
$\kappa$	Von Karman sabiti
$V_F$	Her bir hücredeki akışkanın sahip olduğu hacim

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

<b>FAVOR</b>	Fractional Area/Volume Obstacle Representation
<b>FPS</b>	Frame per second
<b>RANS</b>	Reynolds Averaged Navier-Stokes
<b>RONs</b>	Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes
<b>VOF</b>	Volume of Fluid-Akışkan Hacmi

## 1. GİRİŞ

Çalkantı en genel haliyle bir kap içerisinde bulunan sıvının serbest yüzeyinde meydana gelen herhangi bir harekettir. Meydana gelen çalkantı hareketi içerisinde bulunduğu tanka ek dinamik etkiler yaratması bakımından dikkate alınması gereken önemli bir problem olmaktadır. Bir sıvının çalkantı ile içerisinde bulunduğu sistemin dinamik davranışına etki edebilmesi için serbest yüzeyinin olması gerekmektedir. Serbest yüzey altında bir tankta bulunan sıvı 3 farklı çalkantı davranışı sergiler. Bunlar sırasıyla yanal çalkantı, rotasyonel çalkantı ve dikey çalkantı durumlarıdır (İtibar,2015).

Çalkantı problemi, uzay mühendisliği, inşaat mühendisliği, nükleer mühendisliği gibi birçok bilim dalında bilim insanlarının dikkatini çekmektedir. Çalkantı etkisinin dikkate alınması gereken alanlardan birisi taşımacılıktır. Günümüzde artan doğalgaz talebi, doğalgaz taşınımı için yeni alanlar yaratmaktadır. Bunlardan birisi de sıvı doğalgaz (LNG) taşımacılığıdır. Gemi içerisinde taşınan ve yanıcı özellikte olan bu maddenin taşınımı sırasında meydana gelecek kontrolsüz bir çalkantı hareketinin yaratacağı facia önlenemez boyutlarda olabilecektir. Çalkantı etkisinin dikkate alınması gereken bir diğer önemli alan da uzay çalışmaları olmaktadır. Uzay araçlarında özellikle NASA için 1960'lı yıllarda başarısız roket fırlatmaları ile sonuçlanan durumlarda problemin kaynağında, rokette yapısal sorunlara sebep olacak etkilere ek olarak çalkantı etkileri de tespit edilmiştir. Yukarıda bahsi geçen alanlara ek olarak çalkantı etkisinin dikkate alınması gereken alanlar kara taşımacılığı, karada yer alan tanklar, her türlü sıvı taşıyan diğer tüm gemi tankları örnek gösterilebilir. Tüm bunlar ışığında çalkantı mekanizmasının anlaşılmasının birçok mühendislik uygulamalarında etkili olacağını söylemek yanlış olmayacaktır.

Sıvı çalkantısının neden olacağı dinamik etkiler yapıya veya içerisinde bulunduğu tanka güvenliklerini etkileyecek yönde zarar vermektedir. Tam doldurulmamış tanklar üzerlerine etki eden kar yükü, deprem yükü ve rüzgâr yükü gibi hareketli yükler altında çalkantı etkilerine maruz kalabilmektedir. Bu etkiler sıvının doğal frekansı ile tankın hareket frekansının birbirlerine çok yakın olduğu durumlarda çok büyük mertebelere çıkmaktadır. Çalkantı etkisinin gözlenmesi muhtemel olan sıvı tanklarında veya akışkanın bulunduğu yapıda çalkantıdan oluşabilecek zararları önlemek için tankın ve yapının tasarımında, içinde bulunan akışkanın doğal frekanslarını oluşabilecek tüm rezonans durumlarından uzak tutmak oldukça önem arz etmektedir (İnce, 2012).

Günümüzde çalkantı hareketinin dinamik etkilerini incelenmesi için nümerik yöntemler ve deneysel metotlar bir arada yürütülmektedir. Çalkantının nonlineer davranışı, sıvı katı arasındaki etkileşim ve problemin serbest yüzeyli olması gibi nedenler nümerik analizlerin gerçekleştirilmesinde birtakım güçlükler ve hatalara neden olmaktadır. Buna karşın deneysel yöntemler çalkantının dinamik etkisinin anlaşılması ve nümerik yöntemlerin doğrulanmasına sağladıkları katkıdan dolayı bir hayli önemli olmaktadır. Çalkantı problemi ele alınırken 2 önemli değişken göz önünde bulundurulmaktadır. Bunlar sıvının serbest yüzeyinde meydana gelen seviye değişimleri ve tank yüzeyine etki eden çalkantı basıncıdır. Çalkantı nedeniyle sıvının serbest yüzeyinde meydana gelecek seviye değişimi kapasitif dalga ölçerler, ultrasonik sensörler ve optik kameralar aracılığıyla bulunabilmektedir. Tank yüzeyine etki eden çalkantı basıncı ise yük sensörleri, optik kameralar, basınç sensörleri aracılığıyla bulunabilmektedir (Tosun, Aghazadeh, Sert, Özer, 2017).

Çalkantı hareketinin yaratacağı sıvı etkisinin matematiksel olarak ele alınması için kullanılacak en kapsamlı denklem, 3 boyutlu süreklilik ve momentum denklemlerini içeren Navier-Stokes denklemleridir. Günümüzde teknolojinin ilerlemesiyle 3 boyutlu Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerini temel alan ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımları, hidrolik problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bahsi geçen denklemlerin karmaşık yapısı, serbest yüzeyli ve büyük ölçekli gerçek arazi problemlerinin çözümünde bazı kabullerin yapılmasını şart kılmakta ve Navier-Stokes(RANS) denklemlerinin sığ su denklemlerine (Shallow Water Equations) ya da Saint-Venant denklemlerine dönüştürülmesini gerektirmektedir. Bu dönüşümü zaruri kılan sebepler ise bilgisayarları karmaşık ve ağır hesap yüklerinden kurtarmak ve çözüm için zaman ve ekonomik açıdan tasarruf sağlamaktır.

Bu tez çalışması kapsamında, İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarı'nda dikkörtgen bir tank içerisinde bulunan sıvının çalkantı etkisini irdelemek için bir seri deneysel çalışma yapılmıştır. Sonuçlar, biri tank ile hareket eden diğeri ise sabit duran iki adet cep telefonu kamerasından elde edilen görüntüler ve ultrasonik sensörler aracılığı ile elde edilmiş ve deneysel sonuçlar kendi aralarında kıyaslanmıştır. Bu yöntemlerle elde edilen derinlik-zaman grafikleri, Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin sonlu hacimler yöntemi ile sayısal çözümünü esas alan nümerik analiz yöntemiyle ayrıca mukayese edilmiş ve bu yöntemler arasındaki uyum irdelenmiştir.



Çalışma kolaylıkla erişilebilecek cep telefonu kameralarından elde edilen video görüntülerinin, deney tankı içerisinde bulunan sıvının çalkantı hareketinin gözlenmesinde yeterli olup olmayacağını araştırılması bakımından özgün olarak kabul edilebilir. Cep telefonu görüntülerinden derinlik-zaman grafiklerinin elde edilebilmesi yöntemin akımı rahatsız etmeden sıvının serbest yüzey derinlik değerlerinin araştırılması bakımından önemlidir.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Feng (1973); çalışmasında 3 boyutlu dikdörtgen tank içerisinde bulunan sıvının çalkantı etkisini araştırmıştır. Çalışma literatürde çalkantının 3 boyutlu ele alındığı çalışmaların az olması sebebiyle oldukça önemlidir. Çalışmada çalkantının 3 boyutlu olarak incelenmesi, büyük ölçeklerde bilgisayar hafızası ve işlemcisi gerektirdiği yazar tarafından vurgulanmıştır.

Faltinsen (1974); çalışmasında tank içerisinde bulunan ve ideal akışkan kabulü yapılan sıvının iki boyutlu çalkantı etkisini pertürbasyon tekniği kullanarak çözümlenmiştir. Faltinsen ayrıca çalışmasında tam doldurulmamış bir sıvı tankına etki eden deprem yükü, rüzgâr yükü ve kar yükü gibi hareketli yükler altında akışkanın doğal frekansı ile tankın hareket frekansının birbirlerine yakın olduğu durumda çalkantı etkisinin baskın bir biçimde görüleceğini vurgulamıştır.

Chen, Haroun ve Liu (1996); sıvının çalkantı hareketini 2 boyutlu tank için incelemiştir. Tank içerisinde bulunan sıvıyı ideal akışkan ve sıkıştırılmaz olarak kabul etmişlerdir. Çalışmada çalkantı etkisindeki sıvının serbest yüzeyinde meydana gelecek değişimi rezonans etki oluşturacak frekans değerlerinde ve tanka sadece yatay yönde hareket vererek gözlemlemiştir.

Schumann (1998); çalışmasında bir gaz tankını ele almıştır ve tank içerisinde belirli bölgelere engeller koyarak tank yüzeyinde meydana gelen basınç değişimlerini incelemiştir. Yazar çalışmanın sonunda, tank içerisine konulan engellerin sıvı hareketini büyük ölçüde azalttığını ve bu sayede sıvının çalkantı etkisiyle ortaya çıkacak etkilerinin ihmal edilebilir boyutlara geldiği sonucuna varmıştır.

Kim (2001); çalışmasında sıvının çalkantı etkisini sınırlamak için içerisinde iç elemanların bulunduğu ve bulunmadığı 2 ve 3 boyutlu tankları ele almıştır. Çalışmanın nümerik kısmı sonlu farklar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazar ayrıca Sola yazılımını uygulayarak serbest yüzeyde Navier Stokes denklemlerini kullanarak bir çözüm elde etmeye çalışmıştır. Deneysel ve sayısal analiz verileri karşılaştırıldığında uyum içerisinde oldukları görülmüştür.

Çelebi ve Akyıldız (2002); çalışmalarında serbest yüzey hareketini izlemek için bir sonlu farklar yöntemi olan akışkan hacmi metodunu kullanmışlardır. Çalkantı deneyini, kısmen dolu dikdörtgen bir tank içerisinde düşey engelin bulunduğu ve bulunmadığı durumlar için 2 boyutlu olarak gerçekleştirmişlerdir. Tankın doluluk oranının az olduğu durumlarda tabana yerleştirilen düşey engellerin çalkantı hareketini sınırlamada daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Sames, Marcouly, Schellin (2002); çalışmasında farklı geometrik şekillerdeki tanklar içerisinde bulunan sıvının çalkantı hareketini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında dikdörtgenler prizması ve silindirik tanklar ele alınmıştır ve bu tanklarda bulunan sıvıların çalkantı hareketi sonucunda tank içerisinde yarattığı çalkantı etkileri deneysel ve nümerik yöntemler ele alınarak incelenmiştir. Çalışmanın sonunda dikdörtgenler prizması ve silindirik tank için en uygun sayısal model önerilmiştir.

Frandsen ve Borthwick (2003); çalışmasında 2nci merteye sonlu farklar metoduna dayanan ve ideal akışkan kabulü yapılan sıvının tank içerisindeki çalkantı hareketini nümerik olarak gözlemlemiştir. 2 boyutlu olarak ele alınan tankta meydana gelen çalkantı etkisinin gözlenebilmesi için tanka düşey yönde salınım hareketleri vermişlerdir. Genliği az olan dalgalar için 2nci merteye sonlu farklar metodu esaslı çözümler ve nümerik sonuçların birbirine oldukça benzer sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Frandsen (2004); çalışmasında ideal akışkan denklemlerini temel alarak kapsamlı bir sonlu farklar yöntemi geliştirmiştir. 2 boyutlu tanka yatay ve düşey hareketler vererek sıvının çalkantı hareketini sayısal verilerle gözlemiştir. Sığ sularda viskozite etkilerinin önemli olmasından dolayı bu derinlikler için sayısal verilerin derin sulara oranla daha yanlış sonuç verdiği bahsetmiştir.

Akyıldız ve Ünal (2005); çalışmalarında 3 boyutlu tank içerisine engel koyarak ve farklı seviyelerde sıvı durumları için çalkantının basınç etkisini nümerik ve deneysel yöntemlerle ele almışlardır. Çalışmanın esas amacının, tank içerisinde bulunan sıvının 3 boyutlu çalkantı etkisinin tankın belirli bölgelerinde yaratacağı basınç dağılımlarını takip etmek olduğu belirtilmiştir. Tank içerisinde bulunan engellerin akışkanın hareketini kısıtladığı ve dolayısıyla çalkantı basıncını önemli ölçüde azalttığı yazar tarafından vurgulanmıştır.

Bağcı (2007); yüksek lisans tez çalışmasında kısmi dolu silindir tank içerisinde bulunan sıvının harmonik hareket neticesinde oluşturduğu çalkantının basınç etkisini araştırmıştır. Bu amaç doğrultusunda bir deney düzeneği kurulmuş tankın dönme açısı, doluluk oranı, dönme frekansı ve tank içerisine yerleştirilen perde konfigürasyonları gibi parametrelerin değişimi nedeniyle ortaya çıkan çalkantı basınç değerleri ölçülmüştür ve farklı parametreler arasında da ilişkiler ortaya çıkarılmıştır. Çalışma sonrası elde edilen sonuçlar doğrultusunda çalkantıdan dolayı ortaya çıkacak olan basınçları azaltmak için tank içerisine çeşitli gövde ve taban perdeleri önermiş ve sıvı maddelerin taşınmasında veya depolanmasında kullanılan tanklarda meydana gelecek çalkantı basınçlarının tahmin edilmesine yardımcı olacak bulgular elde etmiştir.

Y. Kim, Nam, D. Kim, Y. Kim.(2007); çalışmalarında sıvı yük taşıyan gemilerde ortaya çıkan çalkantı etkisinin ikincil merteye etkilerini incelemiş ve bu bağlamda sayısal model oluşturmuşlardır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar daha önce yapılmış benzer çalışmaların sonuçlarıyla mukayese edilmiş ve sonuçların uyumu vurgulanmıştır.

Wu ve Chen (2009); 3 boyutlu tank içerisinde bulunan sıvının çalkantı etkisini incelemek için zamandan bağımsız sonlu farklar yöntemini geliştirmişler ve bu sayede çalkantının her bir rezonans durumu için spektral analiz tanımlamışlardır. Çalışmanın sonucunda sıvının rezonans modları ve çalkantı türlerinin meydana gelmesinde bir uyum olduğu belirtilmiştir.

Hou, Li, Wu (2012); çalışmalarında 2 boyutlu tank içerisinde bulunan sıvının çalkantı davranışını tankın sadece bir yönde ve birden fazla yönde doğrusal hareket yapması durumları için Ansys-fluent yazılımını kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada serbest yüzeyin modellenmesinde VOF yöntemine başvurmuşlardır. Birden fazla yönde doğrusal hareket yapan tankın içerisinde bulunan sıvının çalkantı hareketi bir yönde doğrusal hareket yapan tank içerisinde bulunan sıvıya kıyasla çok daha şiddetli olduğu çalışmanın sonuçlarında vurgulanmıştır.

İnce (2012); yüksek lisans tez çalışması kapsamında kısmen dolu su depolama tanklarında deprem yükü etkisi altında, tank içerisindeki sıvı çalkantısının akışkanın hacmi metodu kullanılarak yapı üzerinde yarattığı etkileri değişen tank geometrisi ve yapı periyodu için araştırmıştır. Çalışmada ele alınan akışkanın homojen, izotrop, viskoz, Newton kanunlarına uyan ve sınırlı sıkışıklığa sahip olduğu kabul edilmiştir. Sonlu farklar yaklaşım yöntemi ile

Navier-Stokes denklemlerini çözen yazılım sayesinde tank içerisindeki çalkantı etkisini tespit etmiş ve ortaya çıkan sonuçlar neticesinde yapıların tasarımında çalkantı etkisinin dikkate alınmasına yönelik önerilerde bulunmuştur.

Li ve Wang (2014); çeşitli kesitlere sahip tanklarda çalkantı frekansının bulunması için analitik bir çözüm gerçekleştirmişlerdir. Bu yaklaşık metod farklı geometrik özelliklere sahip kesitlerden geçen sıvının çalkantı frekanslarının bulunmasında kullanılmıştır. Yazar, çalışmada ele alınan metodun farklı kesitlere sahip tanklar için sıvı çalkantı frekansının bulunmasında kolay uygulanması bakımından önemli olduğunu vurgulamıştır.

Zang ve Sun (2014); 2 boyutlu tankta bulunan sıvının çalkantı etkisini potansiyel akım teorisine dayanan, geliştirdikleri sonlu farklar metodunu kullanarak incelemiştir. Çalışmada, duran dalga ve yatay salınım hareketine maruz bırakılmış tankta çalkantı etkileri hesaplanmış ve sonuçların kabul edilebilir ölçülerde olduğundan bahsedilmiştir. Çalışmada ele alınan nümerik metod kolay uygulanabilir olması ve doğru sonuçlar vermesi açısından literatürde karşılaşılmaması muhtemel olan çalkantı problemlerinde bilim insanlarına ışık tutacağı yazar tarafından vurgulanmıştır.

S. Kim, K. Kim, Y. Kim (2015); farklı özelliklere sahip basınç sensörlerinin çalkantının basınç etkisini ölçmesi üzerine karşılaştırılmalı deneyler yapmışlardır. Tank içerisinde bulunan sıvının çalkantı basıncının, kullanılan basınç sensörlerine göre farklılık gösterdiği vurgulanmıştır. Bu doğrultuda çalkantının basınç etkisi araştırılırken ortam ve diğer değişkenlere göre basınç sensörlerinin seçilmesi gerektiği sonucu belirtilmiştir. Çalışma ayrıca çalkantı deneyinde hangi tür basınç sensörlerinin doğru sonuç verdiğinin anlaşılması açısından birçok testin ve istatistiksel analizlerin yapılması gerektiğinden bahsetmektedir.

Cappello, Sauret, Boulogne, Dressaire, Stone (2015); çalışmalarında su yüzeyinde bulunan köpük tabakasının çalkantının sönümlenmesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu deneysel olarak gözlemişlerdir. Çalkantı sonucu oluşan dalgaların genliğinin karakterize edilmesinde su yüzeyinde bulunan köpüklerin veya tank içerisinde bulunan plakaların etkisinin araştırılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Bai, Liu, Koh (2015); sıvılaştırılmış doğalgaz taşıyan dikdörtgen kesitli gemi tankeri depolarında meydana gelen çalkantı hareketini gözlemek için bir nümerik model

geliştirmişlerdir. Seçtikleri nümerik yöntem Navier Stokes Çözücü ve level set (LS) yaklaşımını kapsamaktadır. Çalışmalarında ele aldıkları nümerik yöntem 4 farklı çalkantı durumunu kapsamaktadır. İlk 3 çalkantı durumu içerisinde sıvı ihtiva eden dikdörtgen tankın yatay ve çevrimsel salınım yaptığı durumları kapsamaktadır. Son çalkantı durumu ise şiddetli çalkantı durumunun tank yüzeyinde yaratacağı etkilerin bulunması amacıyla araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada elde edilen nümerik sonuçlar deneysel sonuçlarla değerlendirilmiş ve sonuçların oldukça uyumlu olduğundan bahsedilmiştir. Çalışmada ayrıca en büyük genliğe sahip çalkantı hareketinin, sıvının çalkantı frekansıyla sistemin frekansının birbirlerine yakın olduğu anlarda gözleneceği ifade edilmiştir. Çalkantı genliğinin arttığı bu durumda sıvının tank yüzeylerine en büyük çalkantı kuvvetini doğuracağından bahsedilmiştir.

Sauret, Boulogne, Cappelio, Dressaire, Stone (2015); ele aldıkları çalışmalarında sıvı yüzeyindeki köpüğün çalkantının sönümlenmesi üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Su yüzeyi üzerindeki çok küçük miktarlarda köpük tabakasının bile sönüm üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir.

Jung, Yoon, Lee (2015); çalışmalarında serbest yüzeyin tanımlanmasında bir sonlu farklar yaklaşımı olan level set metodunu ele alarak 2 boyutlu ve 3 boyutlu deney tanklarında bulunan sıvının çalkantı hareketini incelemişlerdir. Deney tankı içerisinde bulunan sıvının 5 farklı doğal frekans modu için çalkantı etkisi irdelenmiştir. Deney tankında meydana gelen en büyük çalkantı kuvvetinin baskın mod olan birinci modda doğduğu ifade edilmiştir. Deney tankı içerisinde bulunan sıvının diğer doğal frekans modlarında çalkantı kuvvetinin büyük mertebelerde azaldığı vurgulanmıştır. Çalışmanın sonunda 3 boyutlu çözümün 2 boyutlu çözümü doğruladığı sonucuna varılmıştır.

İtibar (2015); doktora tezi çalışmasında düzgün parçacık hidrodinamiği metoduna dayanan bir algoritma aracılığıyla küre şeklindeki tank içerisinde bulunan sıvının çalkantı hareketini 3 boyutlu olarak modellemiştir. Yazar düzgün parçacık hidrodinamiğinin eksik yönlerinden bir tanesi olan basınç alanında oluşan sayısal kirliliği, algoritmaya  $\delta$ -DPH denklemlerini ekleyerek düzeltmiştir. Çalışmada yazar tarafından gerçekleştirilen bir diğer önemli yenilik ise matematiksel çözümlerin grafik kartı aracılığıyla yapılmasıdır. Çalışmada ayrıca yazar, kullandığı metot ile literatürde bulunan diğer yöntemlerin aksine zamandan büyük tasarruf sağlamanın yanında yüksek hesap gücü gerektiren problemlerin çözülebileceğini de

vurgulamıştır.

Kocaman, Erdoğan, Türker, Dal (2017); çalışmalarında Madrid Politeknik Üniversitesi'nde dikdörtgen biçimli bir tank için gerçekleştirilmiş çalkantı deneyini ve bu deneyin deneysel sonuçlarını, RANS denklemlerine dayanan ve serbest yüzeyli akımların çözümünde oldukça başarılı sonuçlar veren FLOW-3D hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı ile kıyaslamıştır. Deney sonucunda, tank içerisinde belirlenen noktalarda ölçülen basınç değerlerinin zamanla değişimine ait deneysel ve nümerik sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğu vurgulanmıştır.

Tosun ve diğerleri (2017); çalışmalarında sıvı yüzü profilinde meydana gelen değişimin ultrasonik sensörler ve çalkantı etkisiyle ortaya çıkan çalkantı kuvvetinin ise yük sensörleriyle elde edilmesinin yanında çalkantı hareketinin kamera aracılığıyla izlenerek sıvı yüzeyindeki seviye değişimleri ve sıvının tank yüzeyinde oluşturduğu yük etkilerinin elde edilen görüntüler sayesinde de elde etmişlerdir. Çalkantı kuvvetinin yük sensörleri aracılığıyla bulunurken tankta sıvı bulunduğu ve bulunmadığı durumlar için iki aşamalı ölçüm yöntemini tek aşamaya indirilmesi bakımından önemi araştırmacılar tarafından vurgulanmıştır. Ultrasonik mesafe ölçer sensör ve yük sensörleriyle çalkantı davranışının tek bir noktada gözlenmesinin video görüntülerinden elde edilen kayıtların sıvı serbest yüzeyinde istenilen her noktada ölçüm yapılabilmesinin yanında geri planda kaldığı belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca, ele alınan yöntemin çalkantının rezonans frekansına sahip olduğu durumlarda çözümün daha ekonomik olmasının yanında zaman açısından da oldukça makul seviyelerde çözüme ulaşılacağına değinilmiştir.

Iranmanesh ve Passandideh-Fard (2017); çalışmalarında suya batırılmış silindir cisminin 2 boyutlu ve hareketli tank üzerindeki çalkantı etkisini incelemişlerdir. Çalışmanın nümerik kısmını Navier Stokes denklemleri ve akışkan hacmi (Volume of Fluid) yaklaşımını kapsayan bir yaklaşım oluşturmuştur. Nümerik model ayrıca literatürde bulunan deneysel ve nümerik çalışmalarla doğrulanmıştır. Sıvı tankında çalkantı etkisinin görebilmek için 2 durum araştırılmıştır. Bunlar sırasıyla, çalkantı tankının sabit bir ivmeye maruz bırakıldığı durum ve tankın tek salınımlı harekete zorlandığı durumlardır. Çalkantının toplam kinetik enerji içerisindeki oranı içerisinde silindir bulunan ve yukarıda bahsi geçen iki durum için ölçülmüş ve bu sonuçlar içerisinde silindir bulunmayan ve serbest çalkantı hareketi yapan durum ile mukayese edilmiştir. İlk ve ikinci durumlar karşılaştırıldığında çalkantının toplam

kinetik enerji üzerindeki etkisi sırasıyla %26,58 ve % 71,6 oranlarında azaldığı belirtilmektedir. Çalkantı tankına tamamen batırılmış olan silindirin etkisi en çok tankın tek salınımlı harekete zorlandığı durumda olduğu ifade edilmiştir.

Cavalagli, Biscarini, Facci, F. Ubertini, Ubertini (2017); ayarlı sıvı sönümleyicilerin içerisinde bulunan sıvının çalkantı etkisini irdelemek için deneysel ve nümerik çalışmalar ortaya koymuşlardır. Nümerik çalışmalar hesapmalı akışkanlar dinamiği (HAD) aracılığıyla yapılırken deneysel çalışmalar taban kesitleri 40x20 cm olan dikdörtgen bir tank içerisinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonunda, nümerik ve deneysel çalışmalar karşılaştırıldığında sonuçların birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu ifade edilmiştir.

Grotle, Bihs, Vilmar (2017); dikdörtgen bir tank içerisinde bulunan sığ sıvı derinliklerinin yarattığı çalkantı etkisini deneysel ve nümerik metotlar kullanarak incelemişlerdir. Farklı seviye ve farklı frekans değerleri için deneyler tekrarlanmıştır. Farklı doluluk oranlarına sahip durumlar için serbest yüzeyde meydana gelen seviye değişimlerini aynı doluluk oranlarına sahip durumlar için deneysel olarak da irdelemişlerdir. Serbest yüzeyde meydana gelen seviye değişimleri için deneysel ve nümerik sonuçlarının birbirlerine en yakın olduğu durumun rezonans duruma ait frekans değerinde olduğu yazarlar tarafından vurgulanmıştır.

Cho, Choi, Kim (2017); çalışmalarında yatay olarak yerleştirilmiş delikli engellerin çalkantı enerjisini kırdığını ve çalkantının yarattığı basınç etkisini düşürdüğünü ortaya koymuşlardır.

Battaglia, Cruchaga, Storti, D'Elia, Aedo, Reinoso (2018); çalışmalarında 3 boyutlu çalkantı problemini deneysel ve nümerik olarak ele almışlardır. Dikdörtgen bir tanka farklı genliklerde farklı frekans değerleri etki ettirilerek içerisindeki sıvının serbest yüzeyinde meydana gelen değişimi 3 boyutlu olarak incelemişlerdir. Ele alınan nümerik yöntemde serbest yüzeyin belirlenmesinde Level Set yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada nümerik yöntemin doğrulanması deneysel olarak elde edilen su yüzü profilleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Lu, Zhou, Cheng, Zhao, Jiang (2018); çalışmalarında dikdörtgen bir tank içerisindeki sıvının çalkantı davranışını gözlemleyebilmek için farklı su derinlerinde çalkantının ilk hareket periyodunda bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Çalkantı hareketini takip edebilmek için deney tankı farklı genliklerde harekete maruz bırakılmıştır. Çalışmanın sonunda, maksimum



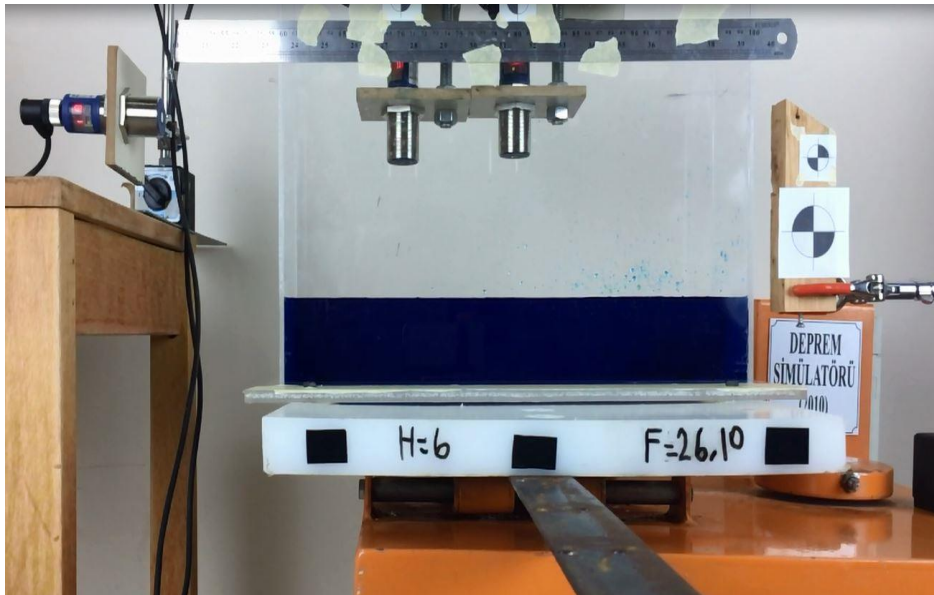
çalkantı genliğinin meydana geldiği kritik doluluk oranının, deney tankına etki ettirilen hareket genliğinin yükseltildiği zaman azaldığı çalışmacılar tarafından ortaya konmuştur.

Sanapala, Rajkumar, Velusamy, Patnaik (2018); çalışmalarında kısmi dolu dikdörtgen bir tank içerisinde bulunan yatay plakaların çalkantı hareketi üzerindeki etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Sistematik bir dizi sayısal simülasyon gerçekleştirerek plakanın yerleştirilebileceği en uygun konumu saptamışlardır. Bu bağlamda araştırmacılar, engelin sıvının serbest yüzeyine yakın bir konumda bulunması halinde çalkantı hareketi sonrası oluşacak dalga yüksekliğini ve çalkantı kuvvetini düşüreceğini saptamışlardır. Ayrıca çalkantı etkilerini kırmak için yerleştirilen engelin kalınlığının çalkantının davranışı üzerinde dikkate alınacak bir etkiye sahip olmadığı vurgulanmıştır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Deney Düzenegi

Bu çalışmanın deney düzenegi İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarı'nda kurulmuştur. Deneylerde frekans kontrollü bir sarsma tablası üzerinde yerleştirilen dikdörtgen kesitli ve tüm yüzeyleri pleksiglas olan bir tank kullanılmıştır. Bahsi geçen sıvı tankının uzunluğu 40 cm, genişliği 10 cm ve yüksekliği 30 cm'dir. Deney tankının bahsi geçen boyutlarda seçilmesinin nedeni çalkantının 3 boyutlu etkisini azaltabilmektir. Deney düzenegi Şekil 3.1'de gösterildiği gibidir. Tankın hareketini belirlemek için dışında bir, tankın içerisindeki su seviyesi değişimlerini belirlemek içinse tank içerisinde iki adet ultrasonik sensör kullanılmıştır. Tankın bağıl ve rölatif hareketlerini takip edebilmek için bir adet tank ile birlikte hareket eden ve bir adette sabit olmak üzere iki adet kamera kullanılmıştır. Tank hareketlerinin görüntüler üzerinden izlenebilmesi ve takip edilebilmesi için tank ve sarsma tablası üzerinde Şekil 3.1'de görülen izleme noktaları oluşturulmuştur. Metrik kalibrasyonun yapılabilmesi amacıyla da tank üzerinde çelik metre yapıştırılmıştır.



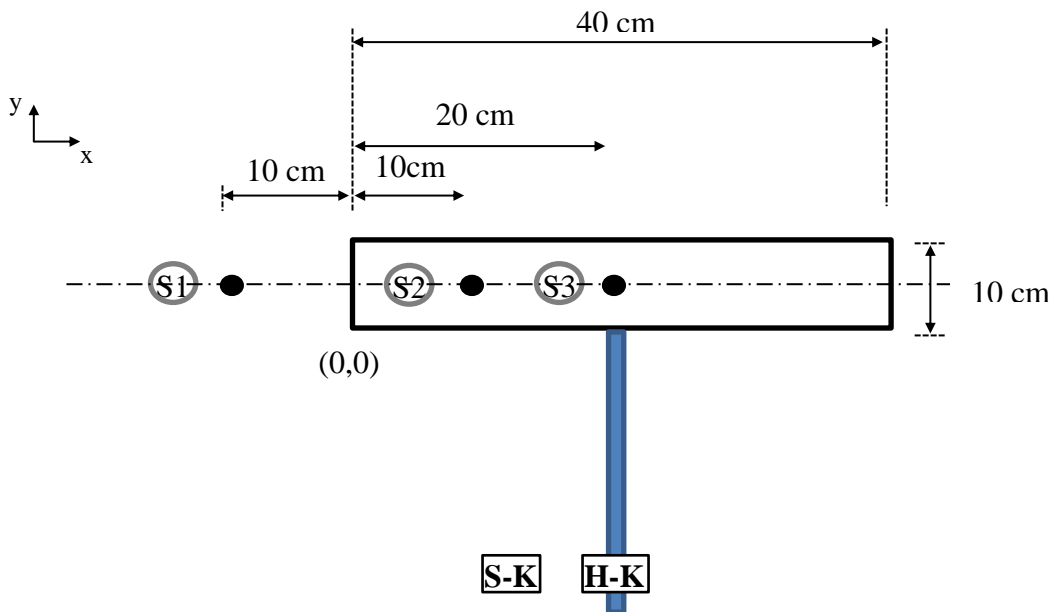
Şekil 3.1. Deney düzenegi

### 3.2. Ölçüm Teknikleri

Bu çalışmada tasarlanan sıvı tankına farklı h/L değerleri için farklı frekans değerlerinde hareket verilmiştir. Bu bağlamda ele alınan her bir durum için ortaya çıkacak çalkantı etkisi su seviyesinin derinlik-zaman değişimi ele alınarak irdelenmiştir. Bu çalışmada iki çeşit deneysel ölçüm tekniği kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla ultrasonik sensörler ve görüntü işleme olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

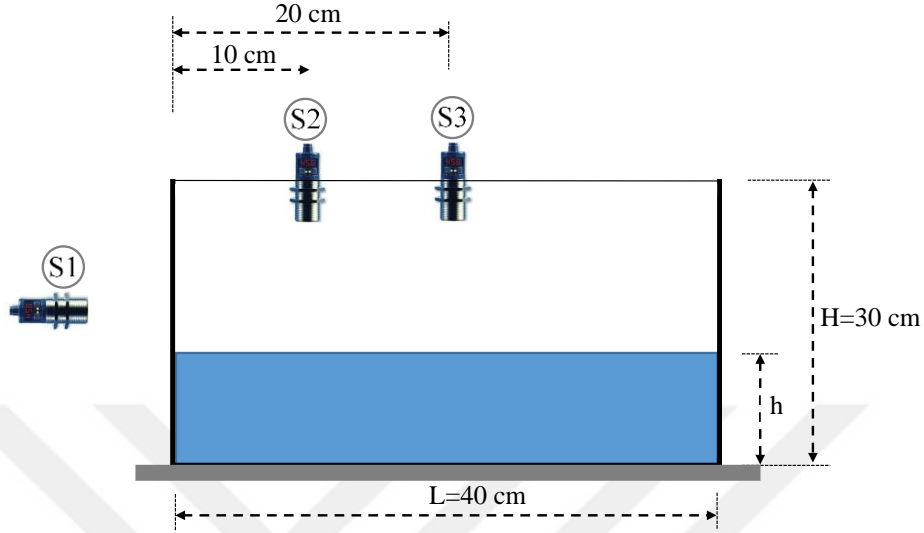
#### 3.2.1. Ultrasonik sensörler

Deneyde tank uzunluğu boyunca tank içerisindeki su seviyesi değişimlerinin belirlenebilmesi amacıyla 10. ve 20. cm'de tank üzerine 1'er adet (S2 ve S3) ve tankın yaptığı hareketin belirlenebilmesi amacıyla da tankın sol tarafına bir 1 adet (S1) olmak üzere toplamda 3 adet Microsonic Mic+25/IU/TC ultrasonik sensör yerleştirilmiştir (Şekil 3.2). Ultrasonik sensörler ile nesnelerin sensöre uzaklıkları ölçülebilmektedir. Tank boş iken okunan değer ile çalkantı hareketi başladıktan sonra okunan değerler arasındaki fark alınarak sensörlerin yerleştirildiği noktalarda su seviyesinde zaman ile ortaya çıkan derinlik değişimleri hesaplanmıştır. Sensörlerden elde edilen veriler veri toplayıcı ile bilgisayara aktarılmıştır. 3 farklı noktada su derinliğinin zamanla değişimleri grafiksel olarak elde edilmiştir. Sensör ve kamera yerleşimlerinin üstten görüntüsü Şekil 3.2'de ve deney tankının karşıdan görüntüsü ise Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.2. Ultrasonik sensörlerin ve kameraların konumları (üstten görünüş)

Sıvı tankının bakış yönüne göre sol alt kısmının koordinatları (0,0) kabul edilecek şekilde hesaplanan koordinatları ise Çizelge 3.1’de verilmiştir. Sensörlerin ve 8 kanallı veri toplama cihazının görselleri Şekil 3.3’te görülmektedir.



Şekil 3.3. Ultrasonik sensörlerin konumları (karşıdan görünüş)

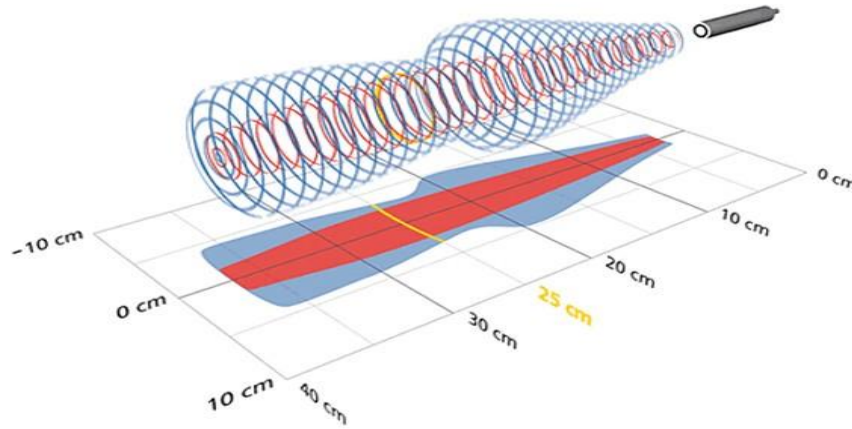
Çizelge 3.1. Ultrasonik sensör koordinatları

Sensör	x (cm)	y(cm)
S1	-10	19
S2	+10	17
S3	+20	18



Şekil 3.4. Ultrasonik sensör ve veri toplama cihazı

Mic+25/IU/TC sensörü 3-35 cm aralıklarında etkili çalışmakta ve okuma yapabilmektedir. Bu sensör türü için uygun çalışma sıcaklığı ise  $-25^{\circ}\text{C}$  ile  $+70^{\circ}\text{C}$  arasında değişmektedir. Deneyde sensörler 125 hertz frekans ile kayıt edilmiştir. Diğer bir deyişle bir sensör saniyede 125 adet veri okuyabilmiştir. Sensörlerin 125 hertz frekansında çalıştırılmasının sebebi anlık seviye değişimlerini çok daha kapsamlı bir biçimde görebilmesidir. Sensörler seviye değişimlerini ürettikleri ultrasonik ses dalgaları sayesinde okuyabilmektedir. Sensörlerin seviye değişimlerini okuyabilmeleri için ürettiği dalgalar ve sensörlerin çalışma aralıklarının şematik gösterimi Şekil 3.5'te verilmiştir. Ultrasonik sensörler su seviyesinin tespitinde akımı rahatsız etmemesi bakımından önemli bir avantaja sahiptir. Sensörler ayrıca 0.01 mm hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir. Sensörlerin ölçüm sırasında tepki süreleri Mic+25/IU/TC modeli için 32 ms olmaktadır. Sensörlerden elde edilen değerler veri toplama cihazı yardımıyla bilgisayara aktarılmış ve sensörlerin buldukları noktalarda su seviyesi derinlik değişimi grafiksel olarak elde edilmiştir.



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

### 3.2.2. Görüntü işleme

Video kamera, fotoğraf makinesi, tarayıcı gibi cihazlardan elde edilen dijital görüntülerin bilgisayar yazılımlarıyla işlenerek analiz edilmesine görüntü işleme denilmektedir. Bu yöntem sayesinde dijital görüntüsü mevcut olan herhangi bir cismin optik ve geometrik özellikleri belirlenebilir. Görüntü işleme ayrıca görüntü yakalama ve analizini gerçekleştirmek için kullanılan yazılım ve donanım birimlerinin kombinasyonu olarak da tanımlanabilir (Kocaman, 2007).

#### 3.2.2.1. Kameralar ve ortam ışığı

Deneysel çalışmanın sonuçlarını görüntü işleme yöntemiyle incelemek için, deneyler hemen hemen aynı teknik özelliklere sahip iki ayrı iPhone 6s ve iPhone 8 plus marka akıllı telefon kamerası aracılığıyla kaydedilmiştir. Kameralardan biri deney tankına sabitlenmişken diğer kamera ise deney tankından bağımsız olarak görüntüleri kaydetmiştir. Deney tankına sabitlenen kamera aracılığıyla, tank içerisinde bulunan sıvının farklı frekans değerleri için seviye değişimleri ve tankın periyot değerleri bulunurken deney tankından bağımsız olarak yerleştirilen kamera aracılığıyla da deney tankının periyot değerlerinin bulunması ve diğer yöntemlerle kıyaslanması amaçlanmıştır. Çalışmanın bundan sonraki kısımlarında deney tankına sabitlenmiş olan ve tank ile birlikte hareket eden kameraya hareketli kamera (HK) ve sıvı tankından bağımsız bir şekilde konumlandırılmış kameraya ise sabit kamera (SK) denilecektir (Şekil 3.2).

İçerisinde bulunduğu kaba, su seviyesinde meydana gelen ani değişimler yüzünden ek dinamik etkiler yaratan çalkantı etkisinin görüntü işleme yöntemiyle incelenmesi için yüksek çözünürlüklü ve hızlı çekim yapabilen endüstriyel kameralara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, endüstriyel kameralara nazaran temin edilmesi kolay olan iki ayrı akıllı telefon kamerası kullanılmıştır. Deney görüntüleri her bir akıllı telefon için 1080p (1920x1080 piksel) ve saniyede 120 kare olarak kayıt altına alınmıştır. Deneyin bu özellikler altında kayıt altına alınmasının amacı anlık su seviyesi değişimlerini çok daha kapsamlı şekilde görebilmek içindir. Saniyede 120 kare görüntüyle çekilmiş bir video kaydının görüntü işleme yöntemiyle analizinde çok fazla görüntü ile uğraşmak gerekeceğinden, bu durum standart özellikler de ekran kartına sahip bir bilgisayar açısından zorlayıcı olduğu unutulmamalıdır. Tez kapsamında görüntü işleme yöntemi image pro plus ve imagej

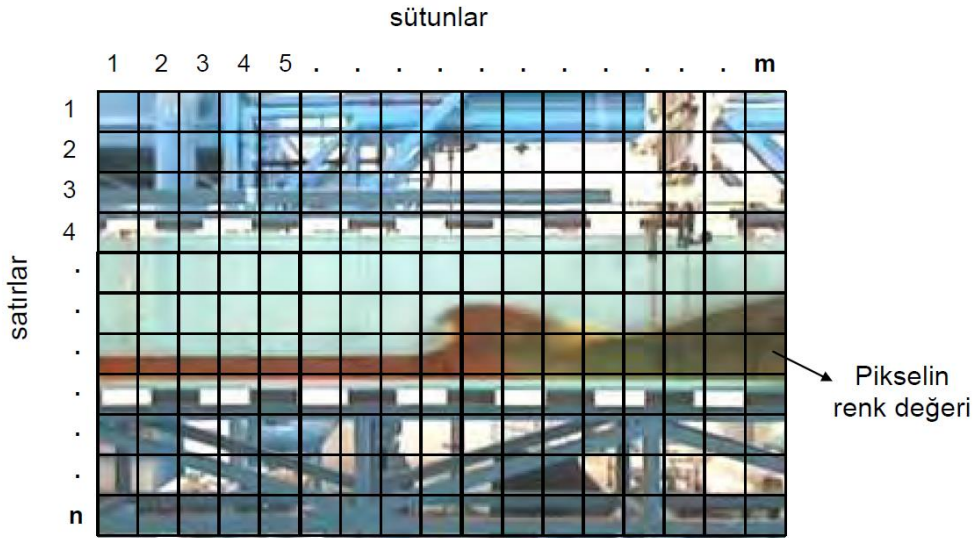
yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Saniyede 120 kare ile çekilmiş görüntülerin bilgisayar ortamında analizinin bellekten dolayı sorun oluşturması durumunda belirli aralıklarla seyreltilerek görüntüdeki kare sayısı azaltılabilmekte ve görüntülerin daha hızlı çözümü olanaklı olmaktadır. Bu nedenle başlangıç aşamasında hızlı çekim hızları ile kayıt yapmak anlık değişimlerin tespit edilmesine olanak tanınmasının yanında, görüntü işleme analizlerinde esneklikte kazandırmaktadır.

Bir video kaydının saniyedeki görüntü sayısı fps ( frame per second) ile ifade edilmektedir. Diğer bir ifade ile video görüntülerdeki kare sayısı olarakda adlandırılmaktadır. Bu tez çalışmasında Kocaman (2007)'den farklı olarak kamerada bulunan görüntülerin bilgisayara aktarılmasında kullanılan görüntü yakalama kartı kullanılmamıştır. Görüntüler akıllı telefonlara, içerilerinde bulunan hafıza kartları aracılığıyla otomatik olarak kayıt edilmiştir. Bu nedenle görüntü yakalama kartının kullanılmama sebeplerinden bir tanesi de deney tankının bir kamera aracılığıyla görüntülenebilmesi ve birden fazla kameranın senkronizasyonuna ihtiyaç duyulmaması olarak açıklanabilir.

Deneysel çalışmalar akıllı telefonlar aracılığıyla gün ışığının mevcut olmadığı kapalı bir ortamda çekilmiş ve ortam özel bir aydınlatma sistemi (softbox) yardımıyla aydınlatılmıştır. Ortam ışığının kontrol edilmesi; sağlıklı görüntülerin elde edilebilmesi ile bu görüntüler üzerinde görüntü işleme tekniklerinin kolay ve hassas bir şekilde uygulanmasına olanak sağlaması bakımından oldukça önem arz etmektedir.

### **3.2.2.2. Görüntü işleme analizi**

Bir kameradan elde edilmiş görüntüyü her biri birer renk içeren çok sayıda hücre oluşturmuştur. Genellikle kare biçiminde olan bu hücreler piksel olarak adlandırılmaktadırlar. Şekil 3.6'da görüntüyü oluşturan hücreler temsili olarak gösterilmektedir. Bir görüntüyü piksellerin oluşturduğu satır ve sütunlardan oluşan bir matris olarak düşünmek yanlış olmayacaktır. Piksellerin bu matris içerisinde iki ayrı özelliği vardır. Bunlardan ilki pikselin görüntü matrisi içerisinde bulunduğu koordinatı ikincisi ise pikselin aldığı gri renk seviyesi (ışık hassasiyeti) değeridir. Tüm bu özellikleriyle birlikte görüntüyü aslında iki boyutlu uzayda matematiksel olarak  $f(x,y)$  fonksiyonu olarak düşünebiliriz. Burada  $x$  ve  $y$  değişkenleri bir renk numarasıyla temsil edilen pikselin koordinant değerlerini vermektedir.



Şekil 3.6. Bir görüntü üzerinde piksellerin temsili gösterimi (Kocaman, 2007)

Şekil 3.6’da gösterilen görüntüde ekranın sol üst köşesindeki piksel başlangıç noktası olarak kabul edilir ve (0,0) noktası olarak ele alınır. Bu bağlamda ekranın yatay yönü x, dikey yönü ise y koordinatını gösterecektir. X koordinatı sağa doğru giderken y koordinatı ise aşağı doğru giderken artış eğilimi gösterecektir. Örneğin 1920x1080 çözünürlüğe sahip full HD olarak adlandırılan kameradan elde edilen görüntü x değeri en çok 1920, y değerinde ise 1080 piksel olacaktır.

Görüntüdeki pikselin koordinatı dışındaki bir diğer özelliği de gri renk seviyesidir. Pikselin aldığı gri renk seviyeleri 0 ile 255 değerleri arasında değişmektedir. 0 değeri siyah renge denk gelirken 255 değeri ise beyaz renge denk gelmektedir. Bu değerler arasında bulunan sayılar ise grinin farklı tonlarını temsil etmektedirler. Bu doğrultuda siyah beyaz bir görüntüde 256 farklı gri tonda renk olacağını söylemek yanlış olmayacaktır. Ele alınan renkli bir görüntü R,G,B (Red, Green, Blue) olarak filtrelenmiş üç gri seviyeli görüntünün üst üste çakıştırılıp monitöre gönderilmesi ile elde edilmiştir.

Çalışmada, elde edilen görüntünün görüntü işleme yöntemiyle analizinde ise “Image pro plus” ve Imagej” yazılımlarından yararlanılmıştır. Son yıllarda görüntü işleme tekniklerinin farklı hidrolik problemlerin çözümünde bir ölçüm aleti olarak etkili bir biçimde kullanıldığı görülmektedir (Özmen-Çağatay, Kocaman ve Güzel, 2014; Kocaman ve Özmen-Çağatay, 2015; Dal, 2017)



### 3.3. Kalibrasyonlar

Kameradan elde edilmiş olan görüntünün görüntü işleme yöntemiyle ölçüm yapılabilmeye uygunluğu, görüntünün yüksek çözünürlüklü ve belirgin renk değerlerine sahip olmasının yanında sistematik hatalar açısından uygunluğunun sağlanmasına da bağlıdır. Sistematik hataları; mercek bozulması, elektronik transfer hataları ve algılayıcı (sensör) düzlemin deformasyonu olarak sıralayabiliriz. Bu hataların bilgisayar programları aracılığıyla giderilerek görüntünün sağlıklı bir şekilde ölçülebilmesine olanak sağlamasına kalibrasyon denilmektedir. (Karlı ve Ayhan, 2005).

Video kameralardan elde edilen görüntülerde dikkat edilmesi ve/veya yapılması gereken kalibrasyonları yatay kalibrasyon, metrik kalibrasyon, açısal kalibrasyon ve perspektif kalibrasyonu olarak sınıflandırabiliriz.

#### 3.3.1. Yatay kalibrasyon

Çalışma yatay dikdörtgen bir su tankında farklı frekans değerleri için tank içerisinde bulunan sıvının çalkantı etkisinin incelenmesini amaçlamaktadır. Tank içerisinde bulunan sıvının serbest yüzey derinliğinin zamanla değişimi video kameralarından elde edilen görüntülerden de tespit edilebilmektedir (Kocaman, 2007). Bu bağlamda kameraların çekim düzlemlerinde meydana gelen hataların deney başlangıcında giderilmesi oldukça önemli olmaktadır. Kamera düzleminde meydana gelecek küçük bir hata sıvı yüzeyinde meydana gelecek değişimin olduğundan daha farklı olarak algılanmasına sebebiyet verebilecektir. Bahsi geçen tüm bu hatalar kameraların yerleştirildiği tripodlar üzerinde bulunan su terazileri aracılığıyla azaltılmış ve akıllı telefonlar içerisinde bulunan su terazisi görevi gören yazılımlar yardımıyla yatay düzlemde su yüzeyine paralel ve düşey düzlemde zemine dik hale getirilerek kameraların çekim açıları ayarlanmış ve sağlıklı görüntüler elde edilmesi sağlanmıştır.

Ayrıca deney başlangıcında tankın sarsma tablası üzerinde yatay durumda olup olmadığının da kontrol edilmesi gereklidir. Tankın yatay düzlemdeki kalibrasyonu, serbest su yüzeyi düzleminin yer düzlemine paralel olmasıyla diğer bir ifadeyle başlangıç ile bitiş y noktalarındaki su yüksekliklerinin aynı olduğu saptanarak sağlanmıştır.

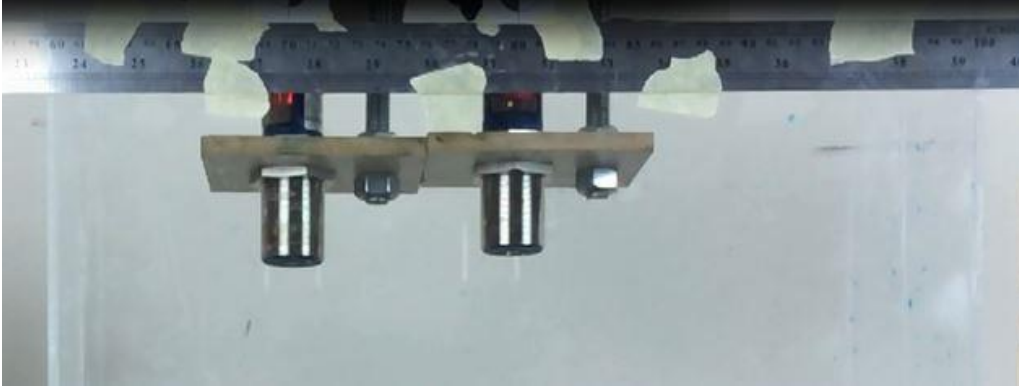
Tüm bunlara ek olarak yatay konumda bulunan tankın içerisinde bulunan sıvı gıda boyası ile belirgin hale getirilmiştir. Elde edilen kaydedilmiş görüntüler üzerinde serbest su yüzeyi dikkate alınarak çekimin ve tankın sarsma tablası üzerindeki yataylığı, tankın boyutları dikkate alınarak çekimin düzleminin uygunluğu bilgisayar ortamında kontrol edilmiştir.

### 3.3.2. Metrik kalibrasyon

Video kameralarından elde edilen sayısal görüntüleri pikseller meydana getirmektedir. Görüntüde bulunan bir nesnenin gerçekte ne kadar bir büyüklüğe sahip olduğunun saptanabilmesi için ise piksel değerlerinin metrik değerlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bahsi geçen bu metrik değerlerin saptanabilmesi için görüntü üzerinde uzunluğu bilinen gerçek bir büyüklüğe ihtiyaç duyulmaktadır. Görüntüde uzunluğu bilinen bu nesnenin kaç piksel uzunluğunda olduğu öğrenildikten sonra görüntü üzerinde bulunan her bölümün uzunluğu tespit edilebilecektir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus referans olarak seçilen obje ile ölçülmek istenen objenin aynı düzlemde olmasıdır. Bu sayede kameranın derinlik algısı yüzünden ortaya çıkacak metrik kalibrasyon hataları engellenmiş olacaktır.

Sıvı tankı üzerinde gerçek uzunluğu bilinen 30 cm uzunluğunda bir cetveli ele alalım. Bu cetvel görüntüde 60 piksel uzunluğuna eşitse oran orantı sonucu 1 pikselin  $30/60=0.5$ cm uzunluğunda olduğu saptanacaktır. Örneğin tank üzerinde ölçülmesi istenen objenin 400 piksel uzunluğuna denk geldiği biliniyorsa gerçekte bu objenin  $400*0.5=200$ cm uzunluğunda olduğu söylenecektir.

Metrik kalibrasyonda dikkat edilmesi gereken husus kameranın ve ölçülmesi istenen nesnenin aralarındaki mesafenin değişmediği takdirde bu kalibrasyonun geçerli olacaktır. Bu nedenle deneyin farklı safhalarında lens ayarları ve kameranın yeri değiştirilmemelidir. Çalışmada, metrik kalibrasyonun gerçekleştirilmesi için deney tankı üzerine bir cetvel yapıştırılmıştır (Şekil 3.7) .



Şekil 3.7. Metrik kalibrasyon için deney tankına yapıştırılan cetvel

Tüm bunlara ilave olarak diğer bir metrik kalibrasyon yöntemi de tank içerisinde bulunan sıvının yüksekliği ve tank boyutlarıdır. Örneğin uzunluğu 40 cm olan deney tankının cm/piksel değeri bulunur ve bu değerle deney tankı üzerinde her şeyin ölçüsü kolaylıkla elde edilebilir.

### 3.3.3. Açısal kalibrasyon

Geniş açılı bir mercek kullanılarak yapılan çalışmalarda elde edilen görüntüler bombeli (dış bükey) olmaktadır. Geniş açılı mercek kullanılarak elde edilen görüntülerde metrik kalibrasyonun sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için bu bombeliğin ortadan kaldırılması ve görüntünün düzlem hale getirilmesi gerekmektedir.

### 3.3.4. Perspektif Kalibrasyon

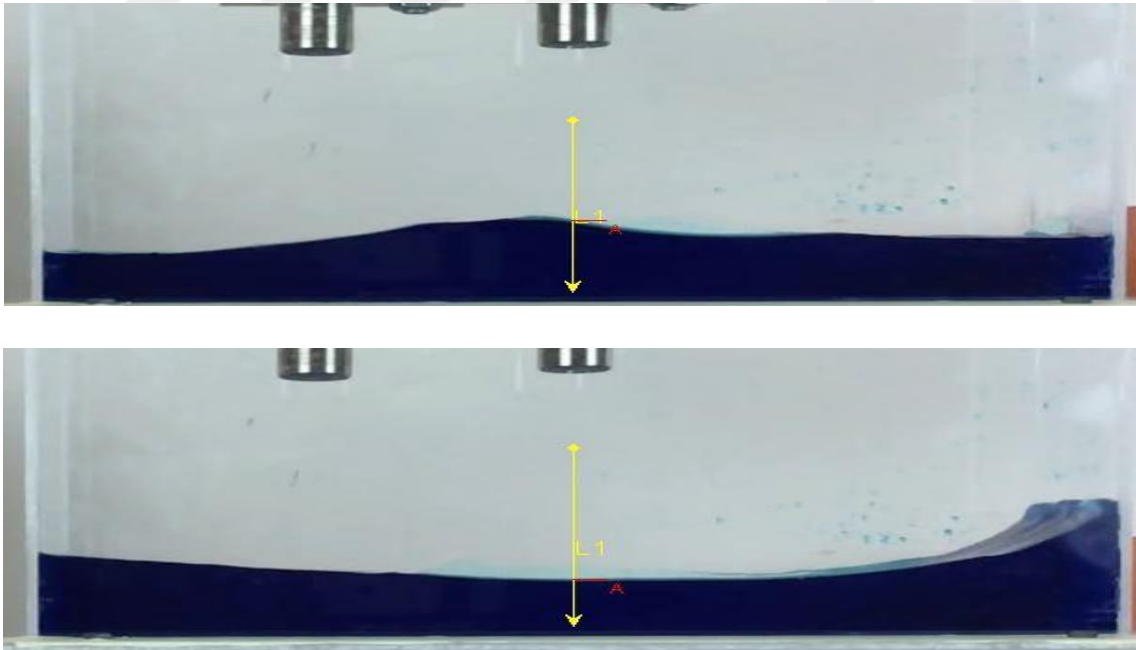
Görüntüyü alan kameraların sıvı tankı düzlemine dik olmaması başka bir deyişle kameranın sıvı tankına belirli bir açıyla konumlandırılması neticesinde perspektif bir görüntü oluşacaktır. Bu durum neticesinde tank yüksekliğinin tank düzlemi boyunca her noktada aynı olmasına karşın kameraya yakın olan kısımlarında daha yüksek olduğu uzak olan kısımlarda ise daha küçük olduğu algısına sebebiyet verecektir. Bundan dolayı görüntünün sağlıklı bir şekilde ölçülebilmesi için perspektif kalibrasyona ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında açısal ve perspektif kalibrasyona gerek duyulmamıştır. Bunun nedeni gelişen teknolojiyle beraber kameralarda kullanılan lenslerden elde edilen görüntülerde bombelerin oluşmadığı ve lineer bir görüntü elde edilmesidir.

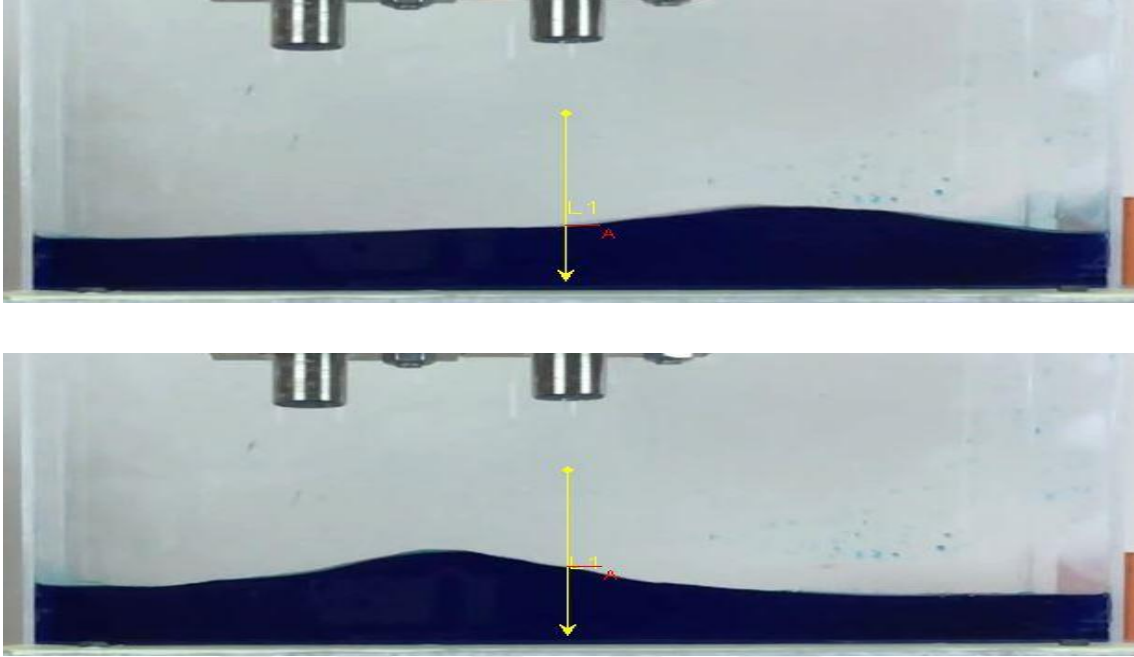
### 3.4. Bir Noktaya Ait Su Derinliğinin Zamana Bağlı Değişiminin Görüntü İşleme Tekniği ile Elde Edilmesi

Yapılan çalışmada sıvının tank üzerinde oluşturacağı çalkantı etkisi sıvı tankına uygulanan farklı frekans değerleri için sıvının serbest yüzeyinde meydana gelen değişim gözlenerek incelenmiştir. Sıvı yüzeyinde meydana gelen bu değişim için Kocaman (2007) tarafından geliştirilen yöntem kullanılmıştır.

Kocaman (2007); görüntü işleme yazılımında mevcut bulunan kenar tanıma ve filtre işlevlerinden yararlanarak bir kod geliştirilmiş ve bu kod sayesinde serbest su yüzeyinin (x,y) koordinatı belirlenmiştir. Yazılımın çalışma prensibi genel olarak görüntüdeki gıda boyasıyla renklendirilen suyun yüzeyinin arka plan rengi ile zıtlık göstermesi ve su yüzeyini (su-hava arakesiti) suyun en üst kotu olarak algılaması şeklindedir. Su-hava arakesitini aynı noktada video görüntüsünü oluşturan her kare için ardışık şekilde hesap edebilen yazılım, bu sayede belli bir noktadaki su seviyesinin zamana bağlı değişimini tespit edebilmektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Belli bir noktada su derinliğinin Kocaman (2007) tarafından geliştirilen yöntem ile belirlenmesi



Şekil 3.8. (Devamı) Belli bir noktada su derinliğinin Kocaman (2007) tarafından geliştirilen yöntem ile belirlenmesi

Kocaman (2007) tarafından bu yöntem “sanal derinlik ölçer” olarak adlandırılmıştır. Bu yöntemde ölçüsü alınmak istenen noktanın koordinatları ve boyutları işlenerek öncelikle sanal derinlik ölçeri temsil etmek üzere bir ok oluşturulmaktadır (Şekil 3.8). Sanal derinlik ölçer ile serbest su yüzeyinin belirlenmesinde temel prensip çizilen ok doğrultusunda konumlanan komşu piksellerin gri tonlu renk değerlerinin yazılım tarafından bir kenar olarak anlaşılması ve su seviyesinin gösteren bu noktanın koordinatı belirlemesidir. Bu sayede görüntülerin ardışık olarak analiziyle su seviyesinde meydana gelen değişim değerleri elde edilebilmektedir.

Bu ölçüm yönteminin diğer yöntemlere göre üstün tarafı tank içerisine yerleştirilecek kapasitif dalga ölçerlerle (wave probe) yapılacak ölçüme kıyasla akımı rahatsız etmemesi gösterilebilir. Ayrıca tank üzerinde bulunan her noktada kolaylıkla su seviye değişim değerleri deney yapıldıktan çok sonra bile kaydedilmiş görüntüler kullanılarak elde edilebilmektedir.

### 3.5. Teori

Tezin nümerik çalışma kısmı FLOW-3D isimli yazılım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bu bölümünü, nümerik sonuçların elde edilmesi için kullanılan bu yazılımın dayandığı teorik bilgiler oluşturmaktadır.

#### 3.5.1. FLOW-3D yazılımı

Tez çalışmasındaki sayısal uygulamalar Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin sonlu hacimler yöntemi ile sayısal çözümünü esas alan FLOW-3D isimli hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazılım en genel haldeki süreklilik, momentum ve enerji temel kanunlarına dayanması bakımından neredeyse tüm akışkanlar mekaniği problemlerine uygulanabilmektedir. Bahsi geçen yazılım serbest yüzeyli akımların modellenmesinde oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Akımın oldukça türbülanslı yapıya sahip olması literatürdeki benzer çalışmalarda iyi sonuçlar verdiği göz önünde bulundurularak k-e türbülans yaklaşımı sayısal çözümde tercih edilmiştir. Sayısal hesaplar, dikdörtgen geometrisine sahip hücrelerden oluşan bir çözüm ağı üzerinde yapılmış ve problemin geometrisi daha sonra bu ağ üzerinde bulunan ilgili hücrelerin engellerle kapatılması yoluyla elde edilmektedir.

Yazılımda su-hava arakesitine sahip serbest yüzeylerin belirlenmesinde akışkan hacmi (Volume of Fluid, VOF) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde laboratuvardaki deney düzeneğinin FLOW-3D yazılımında sayısal olarak çözümlenebilmesi için bahsedilen hücrelere akışkan veya solid (katı) özelliği atanması ile mümkün olacaktır. Bahsi geçen yöntemde hesaplama alanı üzerinde bir akışkan hacmi (F) tanımlanmalıdır. Eğer bir hücre tam olarak sıvı ile doluyorsa 0, tam olarak boş ise 1 değerini alacaktır. Hücrenin bir kısmının sıvı ile dolu olması halinde ise bu değer oransal olarak 0 ve 1 arasında bir değer alacaktır. Bu yöntem Fractional Area/Volume Obstacle Representation (FAVOR) metoduna oldukça benzemektedir. Bu metot sayesinde incelenen bir kontrol hacminde ne kadar akışkan veya katı olduğu ölçülebilmektedir.

Akışkan hacmi metoduyla serbest yüzeyin belirlenmesi 3 adımda gerçekleşir. İlk olarak serbest yüzeyin yeri bulunacaktır. Daha sonra serbest yüzey su ve hava arasında belirgin bir arakesit olarak belirlenecektir. Son adımda ise belirlenen bu ara kesite sınır şartları uygulanacaktır. Bu sınır şartları sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç sınır şartları olmak üzere iki türdür. Akışkanın hacim fonksiyonu  $F$ , en genel haliyle aşağıdaki gibidir;

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Denklemden bulunan  $F$  değeri akışkan ile birlikte hareket edecektir.

Ele alınan bir problem bölgesinde bulunan kontrol hacmi, tamamen sıvı, tamamen katı, bir kısmı sıvı ve diğer kısmı katı, bir kısmı sıvı ve kalanı boş veya tamamen boş olmak üzere 5 farklı durumda olabilir. Bahsi geçen bu durumların nümerik ortamda çözümü için yazılım farklı sınır şartlarını bünyesinde bulundurur. Çözüm ağı için uygulanan bu sınır şartları outflow, duvar, periyodik, basınç, hız gibi çeşitli koşullardır. Ayrıca yazılım iki denklemlilik  $k-\epsilon$ , Renormalized Group (RNG) ve Large-Eddy Simulation (LES),  $k-\omega$  gibi çeşitli türbülans modelleri bulundurması bakımından kullanıcıya çok fazla seçenek sunmaktadır.

Yazılım içerisinde, sıkışmayan akım için eş zamanlı olarak çözülen kartezyen koordinatlarındaki 3 boyutlu süreklilik ve RANS denklemleri aşağıda belirtildiği gibidir:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i A_i) = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (3.3)$$

Burada  $u_i$  i doğrultusundaki akım hızı,  $P$  akımın basıncı,  $A_i$  i doğrultusunda bulunan her bir hücredeki akışkanın alanı,  $V_F$  her bir hücredeki akışkan hacmi,  $g_i$  kütleli kuvvetleri,  $f_i$  herhangi bir türbülans modeli için Reynolds gerilmelerini ifade eder.

Reynolds gerilmelerini ifade eden  $f_i$  aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$f_i = \frac{1}{\rho V_F} \left[ w s_i - \frac{\partial}{\partial x_j} (A_j \tau_{ij}) \right] \quad (3.4)$$

Burada  $w_{si}$  duvar kayma gerilmesini,  $\tau_{ij}$  ise gerilme hızı tansörünü göstermektedir. Duvar kayma gerilmeleri aşağıda takip eden eşitlikler ifade etmektedir.

$$\tau_{ii} = -2\mu_T \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \quad (3.5)$$

$$\tau_{ij} = -\mu_T \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (3.6)$$

Eş. 3.5 ve Eş.3.6'da verilen  $\mu_T$  ifadesi türbülans etkilerini belirtir ve çalkantı gerilmelerinin de dikkate alındığı toplam dinamik viskoziteyi göstermektedir.

Yazılım ayrıca kayma hızı ( $u_*$ ) çözmek için pürüzlü ve pürüzsüz bir duvar yüzeyi için aşağıda verilen denklemi kullanmaktadır (Flow Science, INC., 2007):

$$u_0 = u_* \left[ \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{\rho u_* y_0}{\mu + \rho a u_* k_s} \right) + 5 \right] \quad (3.7)$$

Eş. 3.7'de verilen  $\kappa$  Von Karman sabitini,  $k_s$  pürüzlülüğü,  $y_0$  teğetsel hızın engele mesafesini verirken  $a$  ise k- $\epsilon$  modelinde 0,247'ye eşit olan bir katsayıdır.

Eğer hücre laminar alt tabaka olarak dikkate alınırsa aşağıdaki eşitlik dikkate alınacaktır;

$$u_* = \sqrt{\frac{\mu u_0}{\rho y_0}} \quad (3.8)$$



Yazılım içerisinde çalkantı hareketi iki şekilde tanımlanabilmektedir. Bunlardan ilki ataletsiz referans çerçeve (Non-inertial Reference Frame, NIRF) yöntemi olarak ifade edilir. Bu yöntemde tank boyutları girilmekte fakat sistem hareketsiz olarak düşünülmektedir. Açısal hız, periyot gibi değerler verilerek sarsma, salınım gibi hareketler modellenerek bu verilerin etkisi akışkan üzerine fiziksel olarak gözlenmektedir. Diğer bir yöntem genel hareketli obje (General Moving Object, GMO) ise model içerisinde tanımlanan engellerin gerçekteki gibi hareket ettirilmesidir. Tez çalışması kapsamında ikinci yöntem kullanılmıştır.

### 3.5.1.1. k-ε türbülans modeli

FLOW-3D yazılımı bünyesinde birkaç türbülans modeli içermektedir. Çalışmanın sayısal modellemesinde türbülans modeli olarak k-ε türbülans modeli seçilmiştir. Bu seçimin sebebi olarak literatürde en yaygın şekilde tercih edilen ve en çok doğrulanmış türbülans modeli olması gösterilebilir.

Genellikle iki denklemlilik olmasıyla bilinen k-ε türbülans modelinde Reynolds gerilmesini verecek türbülans viskozitesi aşağıdaki gibidir ;

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

Denklemden  $k$  kinetik enerji,  $\varepsilon$  ise sönmölme oranı olarak ifade edilmektedir. Bahsi geçen terimler için kapatma eşitlikleri takip eden denklemlerde verildiği gibidir;

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (3.11)$$

Kapatma katsayıları ve diğer değişkenler şu şekildedir;  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ;  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ;  $C_\mu = 0,09$  ve  $\sigma_k = 1,0$

### 3.6. Tank Hareketi ve Çalkantının Doğal Frekansı

Tez çalışması kapsamında ele alınan sıvı tankına x yönünde sinüzoidal hareket verilmiştir. Tankın yüksekliği  $H=40$  cm, genişliği  $b=10$  cm ve uzunluğu  $L=30$  cm'dir. Deney tankına x doğrultusunda verilen hareketin genliği  $0,5$  cm'dir. Tank içerisinde bulunan sıvının doğal frekansı Eş. 3.12'de verildiği gibidir.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{n\pi g}{L} \tanh\left(\frac{n\pi h}{L}\right)} \quad (3.12)$$

Eş. 3.12'de verilen  $g$  yerçekim ivmesi,  $L$  tank uzunluğu,  $h$  tank içerisinde bulunan sıvı yüksekliği ve  $n$  sıvının doğal frekansının mod sayılarıdır.

Deney tankı içerisinde bulunan sıvının doğal frekansıyla tank sistemine uygulanan frekans değerinin birbirlerine yakın olduğu durum rezonans durumu verecektir. Çalkantı etkisinin en fazla gözleneceği rezonans frekans değerleri bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Tank içerisindeki sıvının  $n$  sayısına bağlı olarak birden fazla rezonansa uğradığı doğal frekans değeri vardır. Tez çalışması için deneysel çalışmada  $h/L$  oranları sırasıyla  $0,05$ ;  $0,1$  ve  $0,15$  değerleri alınmıştır. İlgili  $h$  değerleri için tank içerisindeki sıvının frekans değerleri 5 mod için Çizelge 3.2, Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.2.  $h=2$  cm için doğal frekans değerleri

Mod sayıları (n)	$\omega_n$ (rad/sn)	$f_r$ (hertz)
1	3,46	0,55 ( $f_{r1}$ )
2	6,84	1,09 ( $f_{r2}$ )
3	10,07	1,60 ( $f_{r3}$ )
4	13,10	2,09 ( $f_{r4}$ )
5	15,89	2,53 ( $f_{r5}$ )

Çizelge 3.3.  $h=4$  cm için doğal frekans değerleri

Mod sayıları (n)	$\omega_n$ (rad/sn)	$f_r$ (hertz)
1	4,84	0,77 ( $f_{r1}$ )
2	9,26	1,48 ( $f_{r2}$ )
3	13,05	2,07 ( $f_{r3}$ )
4	16,19	2,58 ( $f_{r4}$ )
5	18,80	2,99 ( $f_{r5}$ )

Çizelge 3.4.  $h=6$  cm için doğal frekans değerleri

Mod sayıları (n)	$w_n$ (rad/sn)	$f_r$ (hertz)
1	5,82	0,93 ( $f_{r1}$ )
2	10,65	1,70 ( $f_{r2}$ )
3	14,33	2,28 ( $f_{r3}$ )
4	17,16	2,73 ( $f_{r4}$ )
5	19,45	3,10 ( $f_{r5}$ )

Deneysel çalışmada her bir sıvı yüksekliği için çalkantının birinci moddaki doğal frekansı deney tankına uygulanmıştır. Bunun nedeni ise sıvının birinci modda diğer modlara nazaran çok daha güçlü çalkantı etkisi göstermesidir. Çalkantı probleminin nonlineer özelliğinden dolayı rezonans etkiler sıvının doğal frekans değerlerinde olmak yerine bu değerlere yakın değerler de gözlenebilmektedir ( Akyıldız ve Ünal, 2006)

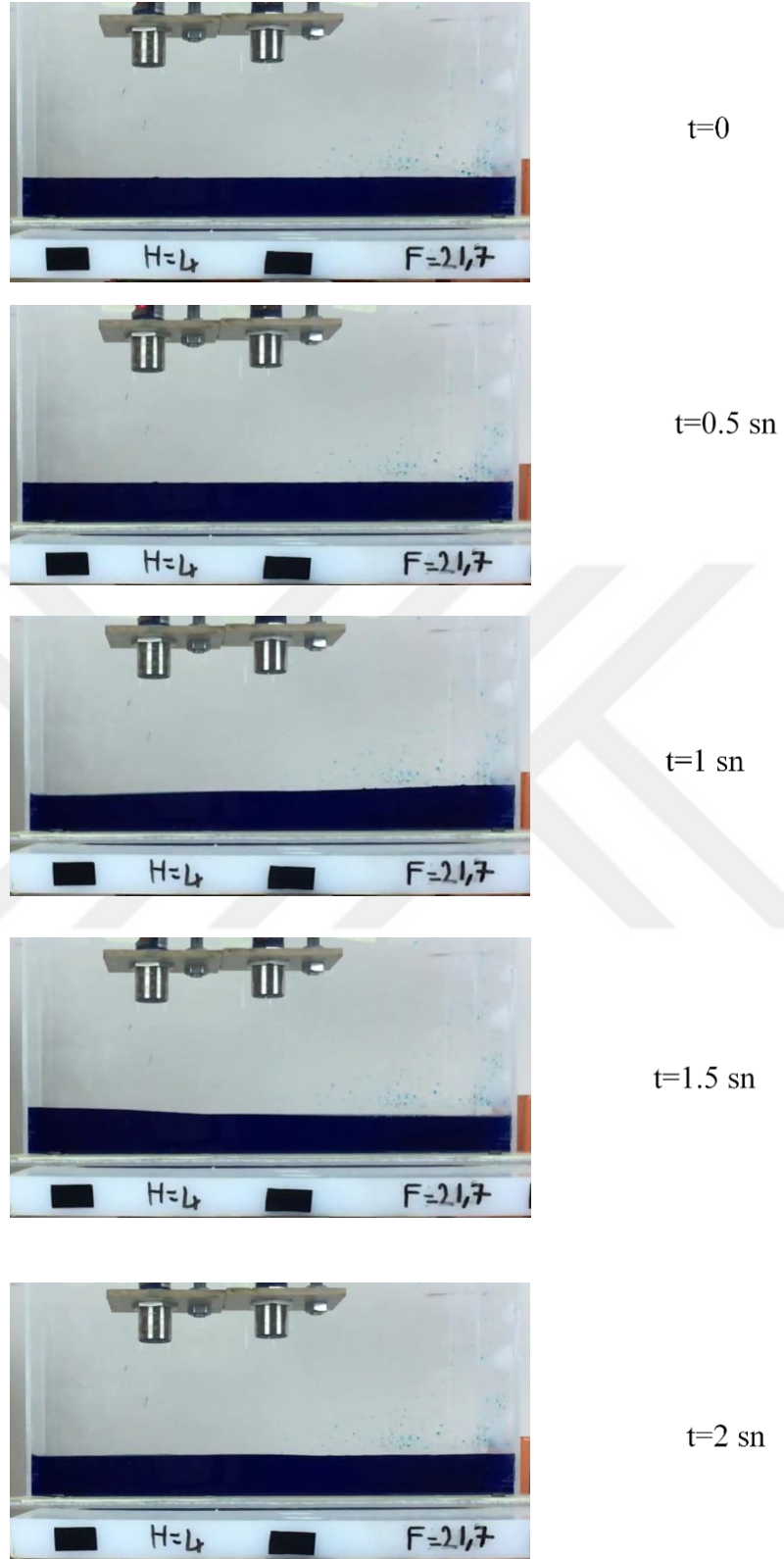
Bu bilgiler ışığında deney, her bir  $h/L$  oranı için sıvının birinci moddaki doğal frekansı ve bu doğal frekansa yakın bir frekans için tekrarlanmıştır.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

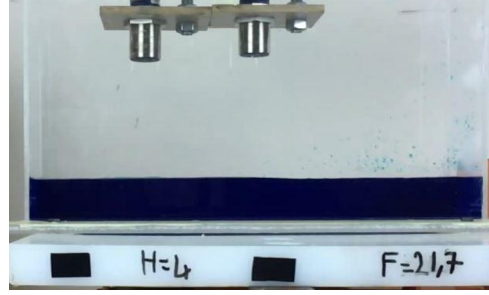
Tez çalışmasında, içerisinde belirli yükseklerde su bulunan sıvı tankına uygulanan farklı frekans değerleri için suyun tank üzerinde yaratacağı çalkantı etkisi irdelenmiştir. Sıvı tankı içerisinde bulunan suyun seviye değişiminin görüntü işleme yöntemiyle elde edilebilmesi için su içerisine belirli miktarlarda gıda boyası atılmıştır. Gıda boyası kullanılmasının temel amacı olarak su-hava arakesiti ayırmak ve bahsi geçen yazılımın ölçümlerde hata yapmasına engel olmaktır. Tez çalışmasının 4 cm su derinliği ve deney tankının 0,77 hertz'lik frekansa sahip olduğu ana ait görüntüler Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verildiği gibidir.

Şekil 4.1'de, deneyin başladığı andan itibaren 0,5 saniye aralıklarla 2 saniyelik çalkantı davranışını gözlenmiştir. Deneyin başladığı andan yaklaşık 2 saniye sonra su seviyesinin tekrar eski konumuna geldiği ve çalkantı periyodunun yaklaşık olarak 1,5-2 sn aralığında olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır.

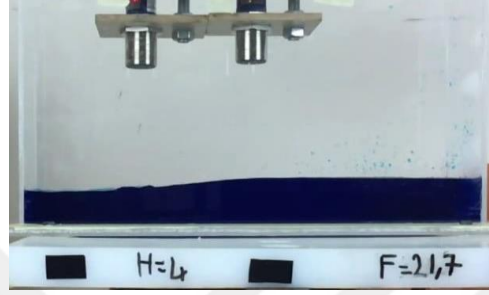
Şekil 4.2'de ise 2 - 4 saniye aralığında sıvı tankında ilgili derinlik ve frekans değerleri için rezonans etkinin daha kolay saptandığı ve sıvının serbest yüzeyinde meydana gelen deplasmanların daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır.



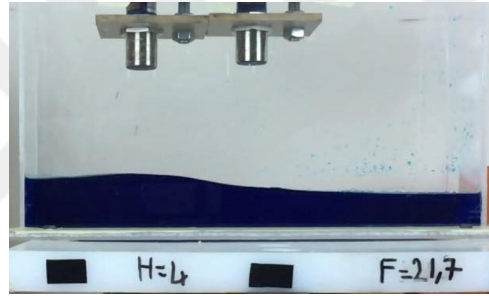
Şekil 4.1. Çalkantı etkisiyle su yüzü profilinin değişimi (0.5 saniye aralıklı)



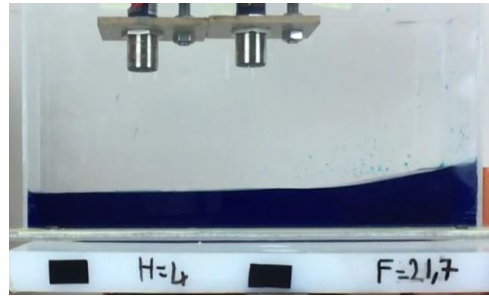
t=2.5 sn



t=3 sn



t=3.5 sn



t=4 sn

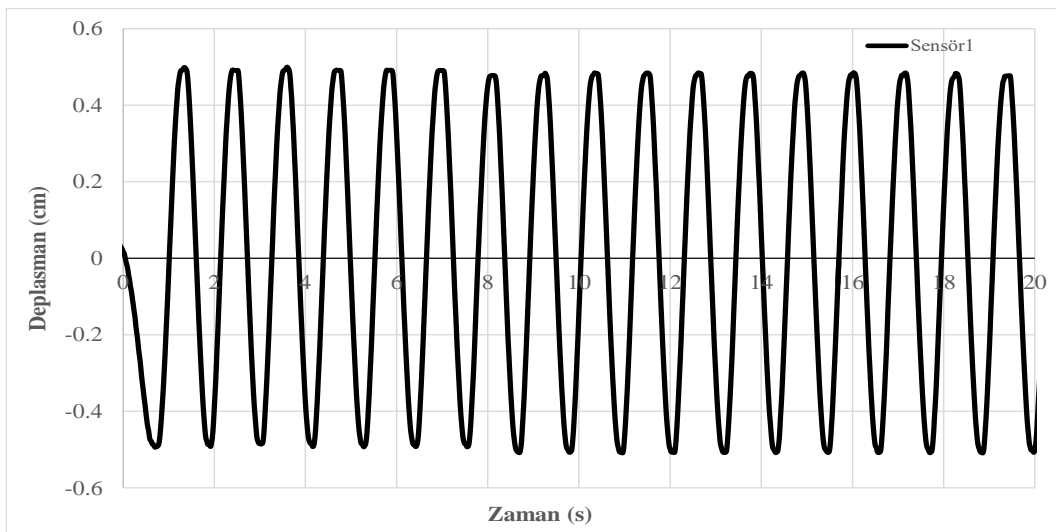
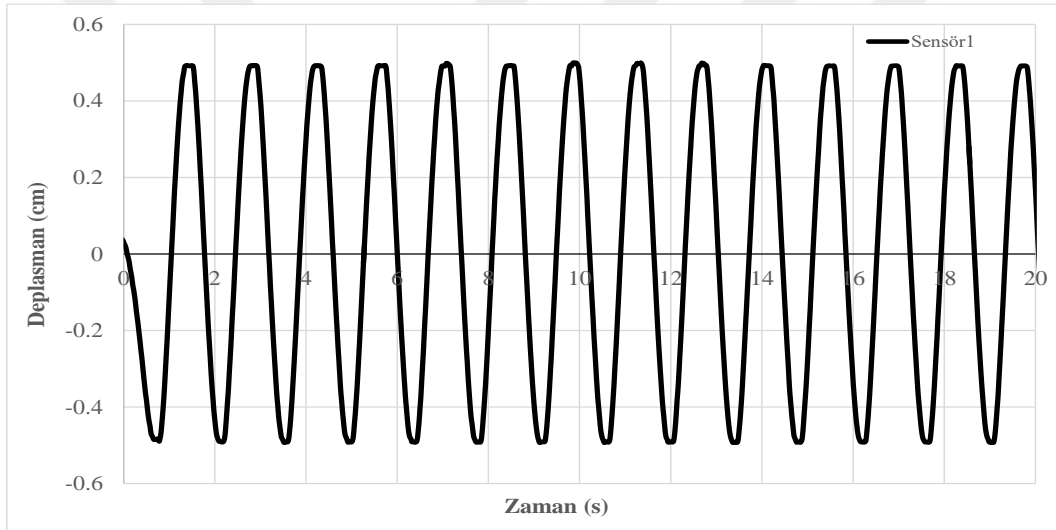
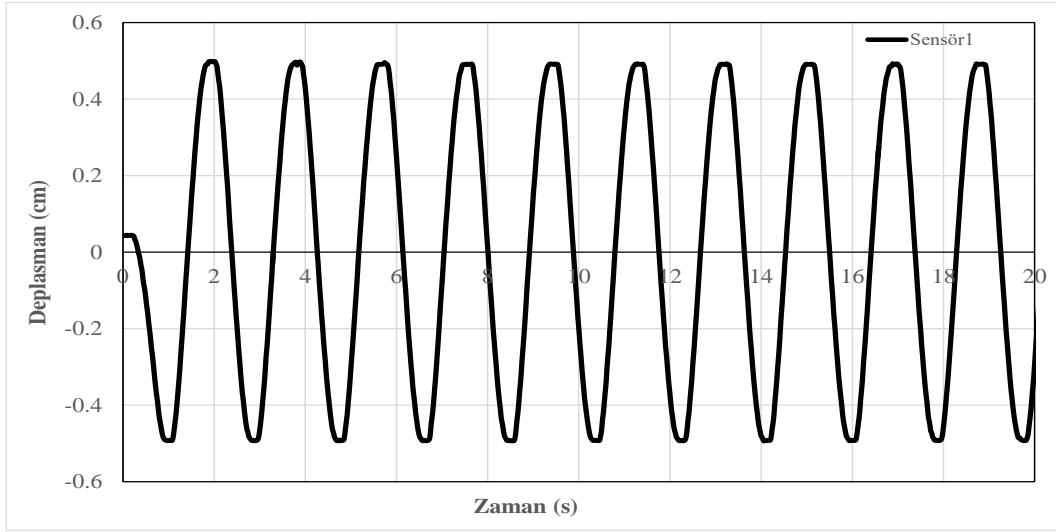
Şekil 4.2. Çalkantı etkisiyle su yüzü profilinin değişimi (0.5 saniye aralıklı)

## 4.1. Cihaz Frekansının Kalibrasyonu

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen çalkantı deneyi, sıvının birinci mod frekans değerinin, tank hareketininin frekansına yakın frekans değerlerinde tekrarlanmıştır. Sıvı tankına uygulanan frekans değerlerinin doğal frekans değerlerine yakın seçilmesinin amacı rezonans durumunda çalkantı etkisini görmek başka bir ifadeyle su yüzünde meydana gelen en büyük deplasman değerlerini irdelemektir. Tez çalışmasını için tekrarlanan deneyler aynı fiziki şartlar için gerçekleştirilmiş olup ultrasonik sensörler ve kameralar aracılığıyla kayıt altına alınmıştır. Sıvı tankına salınım hareketleri deprem simülatörü aracılığıyla verilmiştir. Cihaz üzerinde tanka uygulanan frekans değerinin gerçekte kaç hertzlik frekansa denk geldiği tankın boş ve dolu olduğu durumlar için Sensör1 ve hareketli kamera aracılığıyla elde edilmiştir.

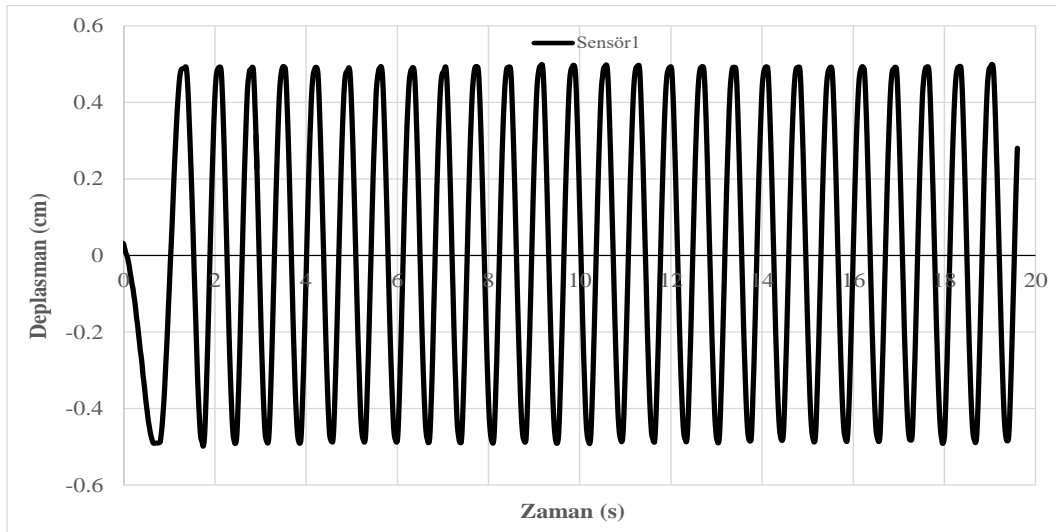
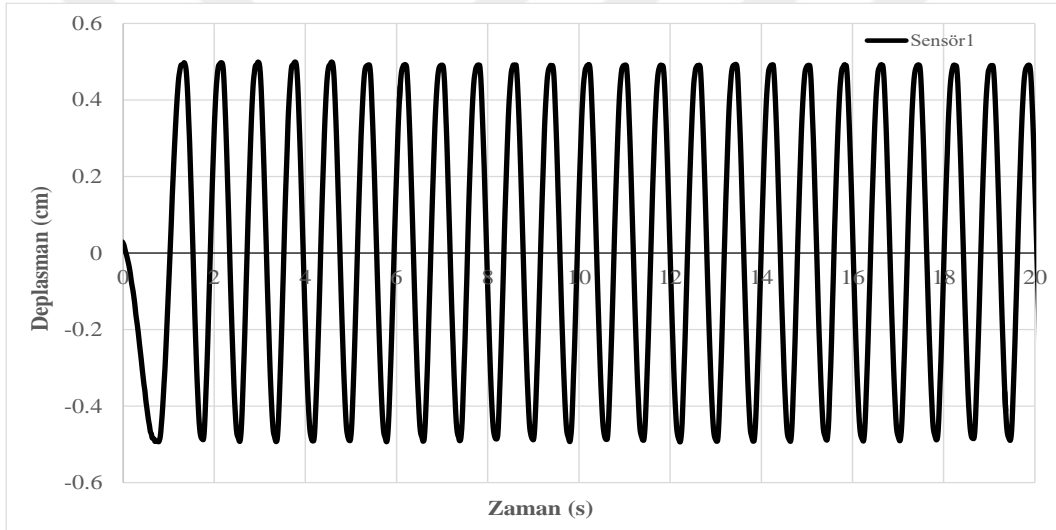
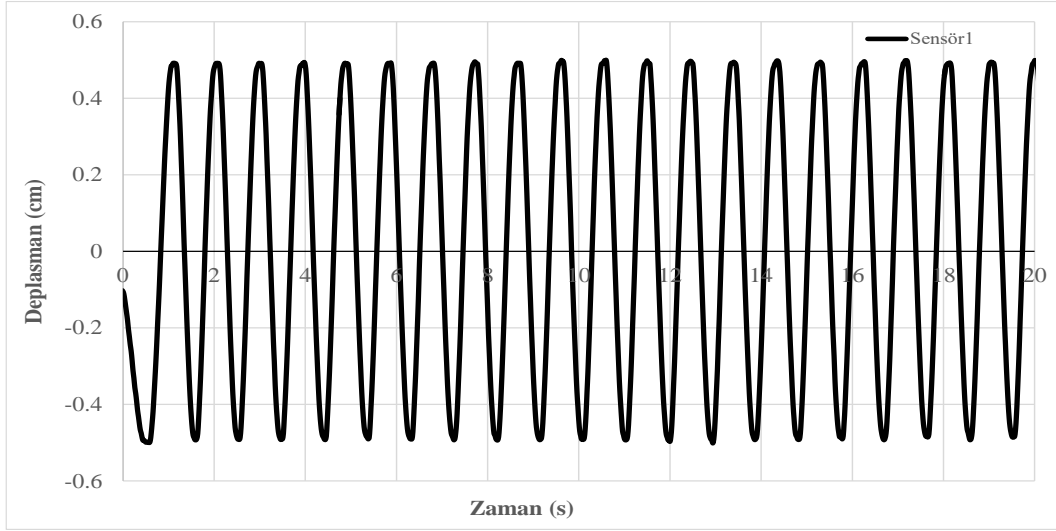
### 4.1.1 Cihaz frekansının kalibrasyonun sensör-1 ile gerçekleştirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde sıvı tankına deprem simülatörü tarafından etki eden frekansın normalde kaç hertzlik bir frekansa denk geldiği Sensör1'den elde edilen deplasman-zaman grafiğinden yararlanılarak elde edilmiştir. İçerisinde su bulunmayan deney tankına cihaz tarafından sırasıyla 15, 20, 25, 30, 35 büyüklüklerinde frekans değerleri etki edilmiştir. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'e ait grafikler incelendiğinde bahsi geçen bu cihaz frekans değerleri için sıvı tankının frekans değerleri sırasıyla 0,54 hertz; 0,71 hertz; 0,89 hertz; 1,07 hertz, 1.25 hertz ve 1,43 hertz olarak bulunmuştur. Sonuçlar cihaz frekans değerinin 28'e bölünmesiyle sıvı tankına etki eden frekansın kaç hertz olduğunun saptanacağını göstermiştir. Deneyin diğer aşamalarında deney tankına etki ettirilmesi istenen frekans değerinin 28 katı cihazda ayarlanmıştır.



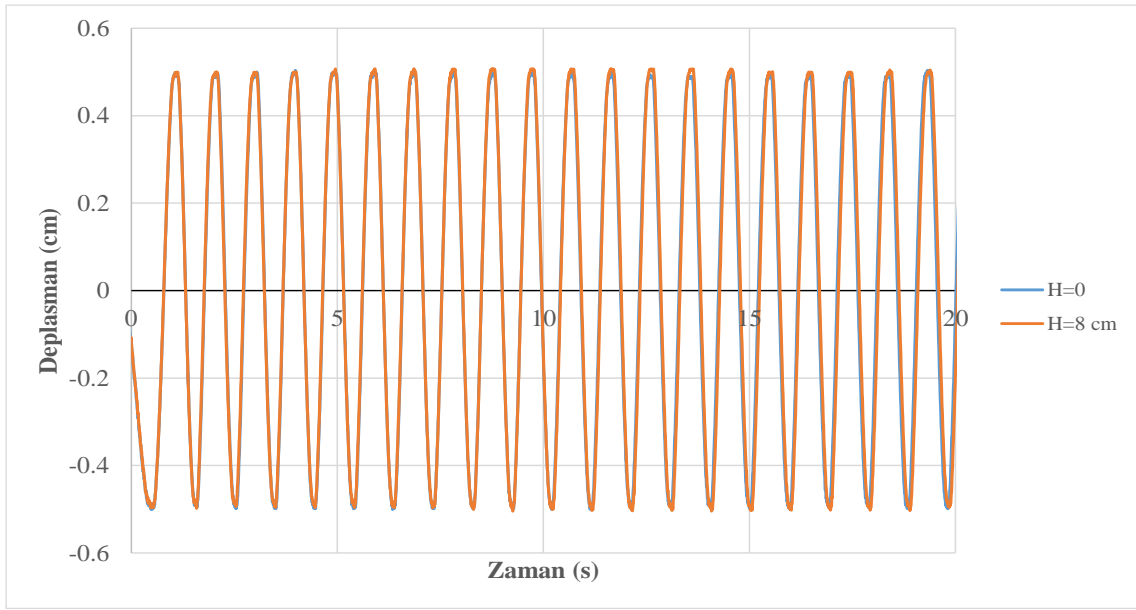
Şekil 4.3. Aynı şartlar altında boş tankın farklı cihaz frekansı için Sensör 1 verileri üzerinden karşılaştırılması (Cihaz frekansları sırasıyla 15,20,25)





Şekil 4.4. Aynı şartlar altında boş tankın farklı cihaz frekansı için Sensör 1 verileri üzerinden karşılaştırılması (Cihaz frekansları sırasıyla 30,35,40 için)

Tez çalışması kapsamında deneyler 2, 4 ,6 cm'lik su seviyeleri için tekrarlanmıştır. Deney tankının içerisinde su bulunması ve su bulunmaması durumları için cihaz tarafından etki eden frekansın aynı olması halinde tankın aynı deplasman-zaman grafiğinin gösterip gösterilmeyeceğinin anlaşılması için boş tank ve içerisinde 8 cm su bulunan ve cihaz frekansının 29,4 olduğu durum için deney tekrarlanmıştır. Burada 8 cm suyun olduğu durumun ele alınması tank için ağırlık bakımından en elverişsiz durum olmasıdır. Şekil 4.5'e ait grafik incelendiğinde cihaz frekansının 29,4 değerinde olduğu durum için her iki durum da aynı deplasman zaman grafiğini vermiştir.

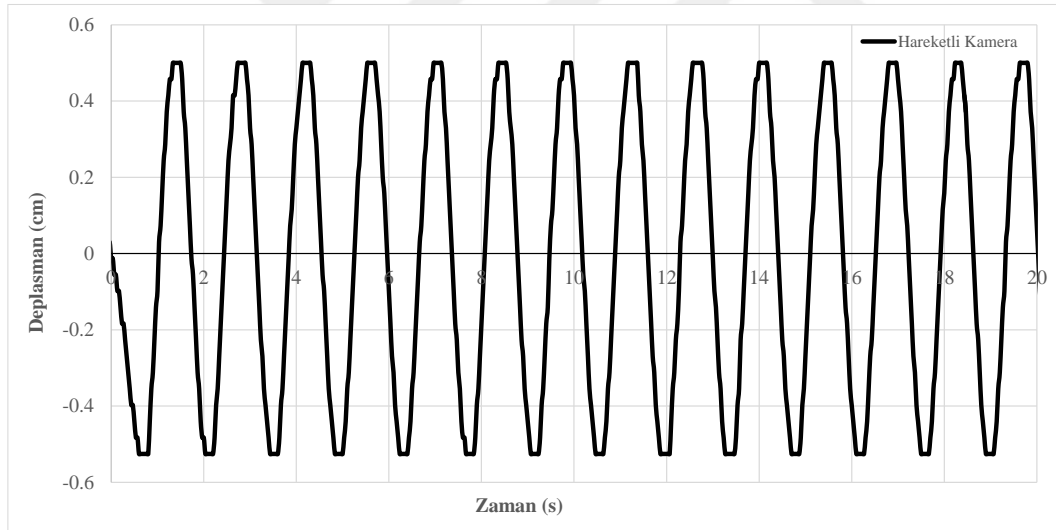
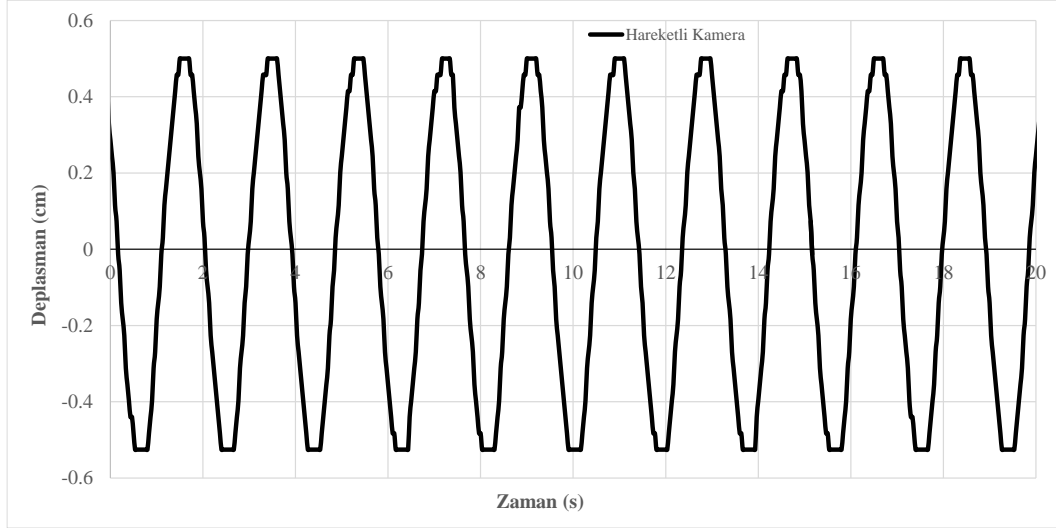


Şekil 4.5. Aynı şartlar altında boş tankın ve h=8 cm su bulunan tankın cihaz frekansının 29.4 olduğu durum için Sensör 1 verileri üzerinden karşılaştırılması

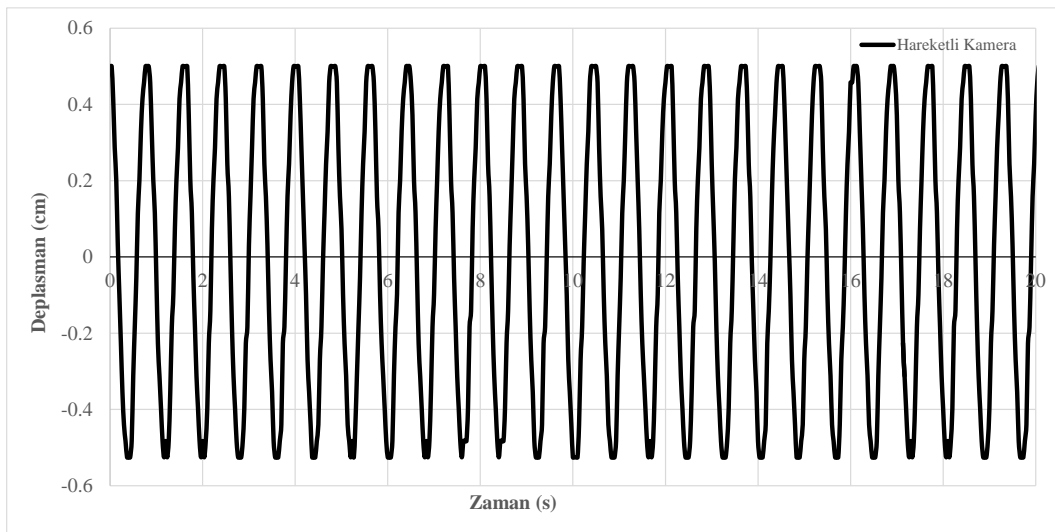
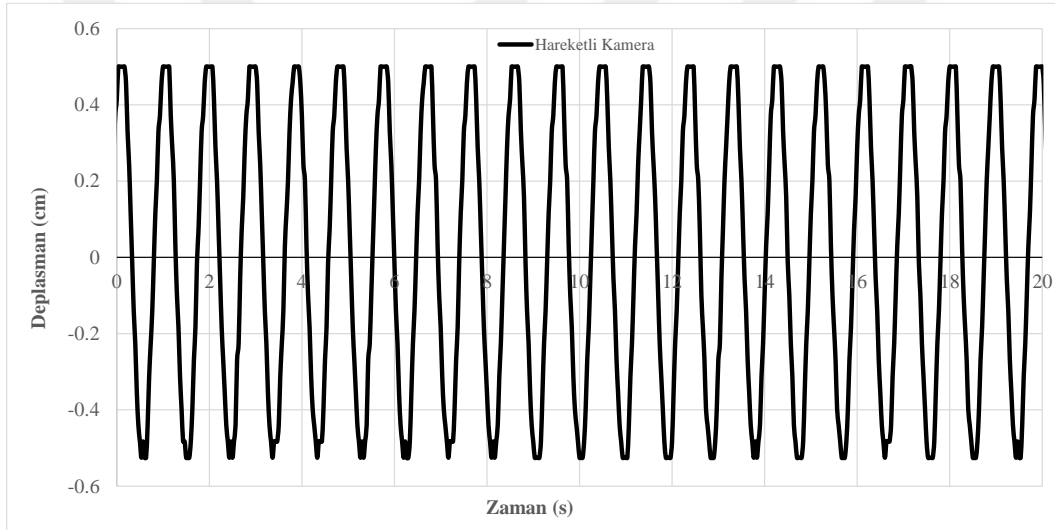
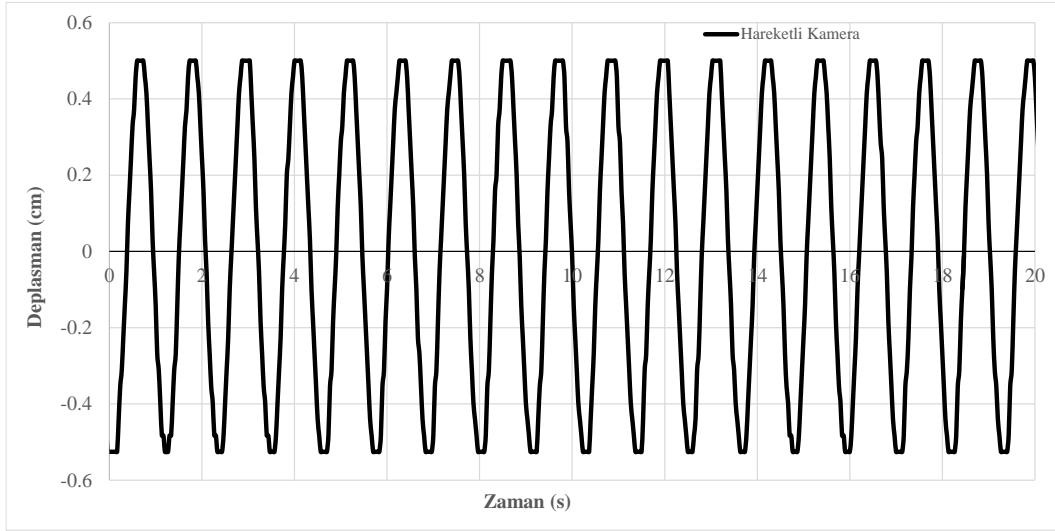
#### 4.1.2 Cihaz frekansının kalibrasyonun hareketli kamera ile gerçekleştirilmesi

Cihaz frekansının kalibrasyonu bir önceki bölümde sensör1 aracılığıyla bulunmuştur. Bu bölümde ise cihaz frekansının kalibrasyonu görüntü işleme yöntemiyle hareketli kameradan elde edilen video görüntüleri aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme yönteminin cihaz frekansının kalibrasyonunda kullanılması akımı rahatsız etmeden temassız bir ölçüm yöntemi olması bakımından oldukça önemlidir. Görüntü işleme yönteminde kullanılan görüntüler, 1080p (1920x1080 piksel) ve saniyede 120 kare olarak kayıt altına alınmış video kameralardan elde edilen görüntülerdir. 15, 20, 25, 30, 35 büyüklüklerinde cihaz frekans değerleri için deney tankının frekans değerleri sırasıyla 0,54 hertz, 0,71 hertz, 0,89 hertz, 1,07 hertz olarak elde edilmiştir. Cihaz frekans değerlerinden gerçek frekans değerlerine

geçmek için kullanılan 28 sayısı hem ultrasonik sensör hem de kamera için geçerli olmaktadır.



Şekil 4.6. Aynı şartlar altında boş tankın farklı cihaz frekansı için hareketli kamera görüntüleri üzerinden karşılaştırılması (Cihaz frekansları sırasıyla 15,20)



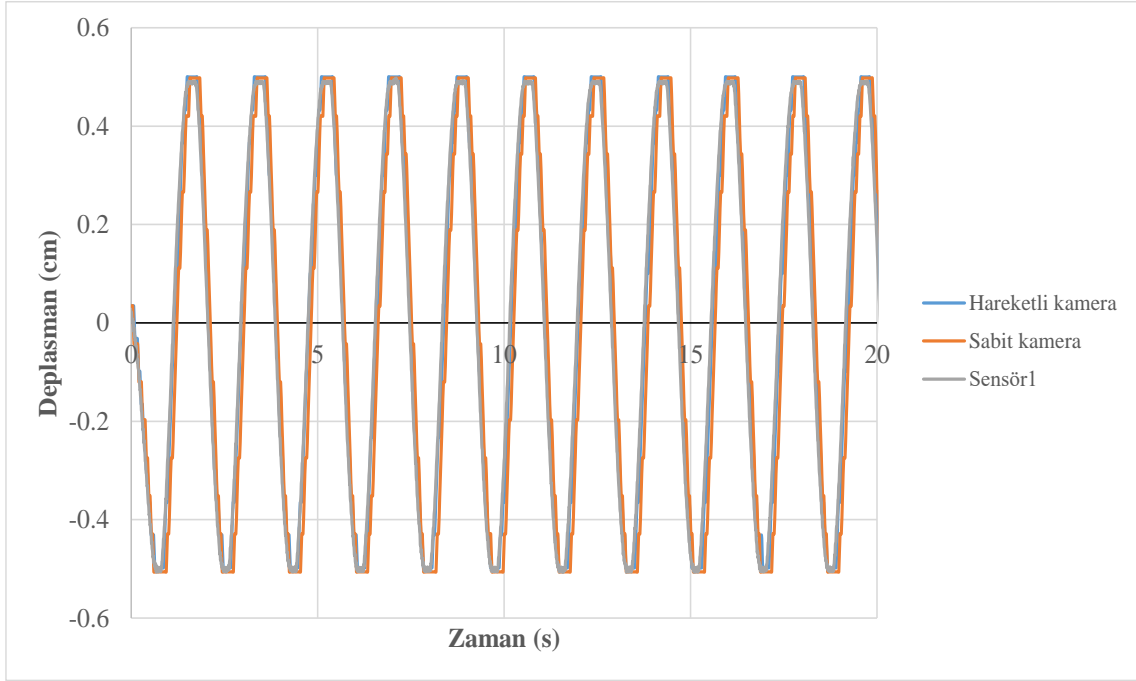
Şekil 4.7. Aynı şartlar altında boş tankın farklı cihaz frekansı için hareketli kamera görüntüleri üzerinden karşılaştırılması (Cihaz frekansları sırasıyla 25,30,35)

## 4.2. Hareketli Kamera, Sabit Kamera ve Sensör1 ile Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

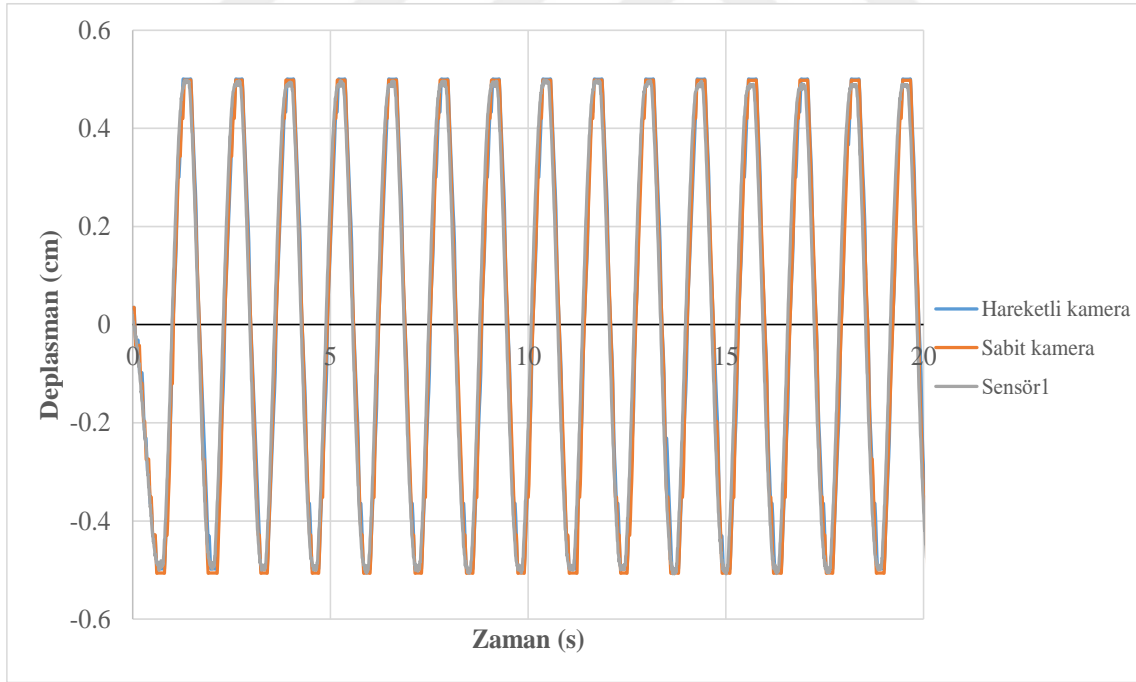
Tez çalışmasının bu bölümünde deney tankının sırasıyla 2 cm, 4 cm, 6 cm ve 8 cm su içerdiği durumlarda ve her bir derinlik için ilgili doğal frekans değerlerinde deneyler tekrarlanmış ve deney tankının deplasman zaman grafiği çizilmiştir. Deplasman-zaman grafikleri çizilirken hareketli ve sabit kameralar ve Sensör1'den elde edilen değerler karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Deney görüntüleri her iki kamera için 1080p (1920x1080 piksel) ve saniyede 120 kare olarak kayıt altına alınmış fakat görüntü işleme yönteminde 120 kare olarak kayıt altına alınan görüntüler  $\frac{1}{4}$  oranında seyreltilmiştir. Video görüntülerinin saniyede 120 kareden 30 kareye dönüştürülmesinin temel amacı görüntü işleme sisteminde kullanılan yazılımın sıradan özelliklere sahip bilgisayarlarda saniyede 120 karelik görüntüler için zorlandığı ve saniyede 30 karelik görüntülerin tankın deplasman zaman grafiğinin çıkarılması bakımından oldukça yeterli olacağı düşüncesindedir.

Yukarıdaki koşullar altında bir karşılaştırma yapılmasındaki temel amaç tankın farklı doluluk oranı ve farklı frekanslar için hareketli kamera, sabit kamera ve sensör1 gibi farklı ölçüm yöntemlerinin sıvı tankının deplasman zaman grafiğinin elde edilmesinde benzer sonuçlar verip vermediğinin kontrol edilmesidir.

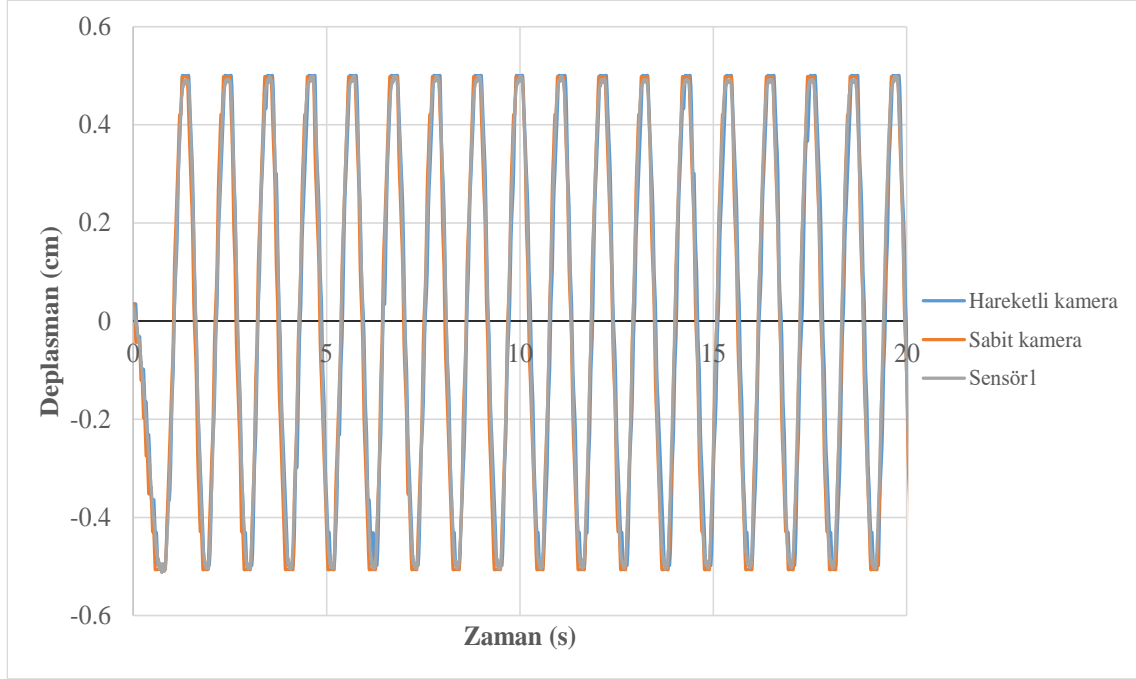
İki kameradan ve sensör1'den elde edilen deney tankının deplasman-zaman grafikleri Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11'de görüldüğü gibidir.



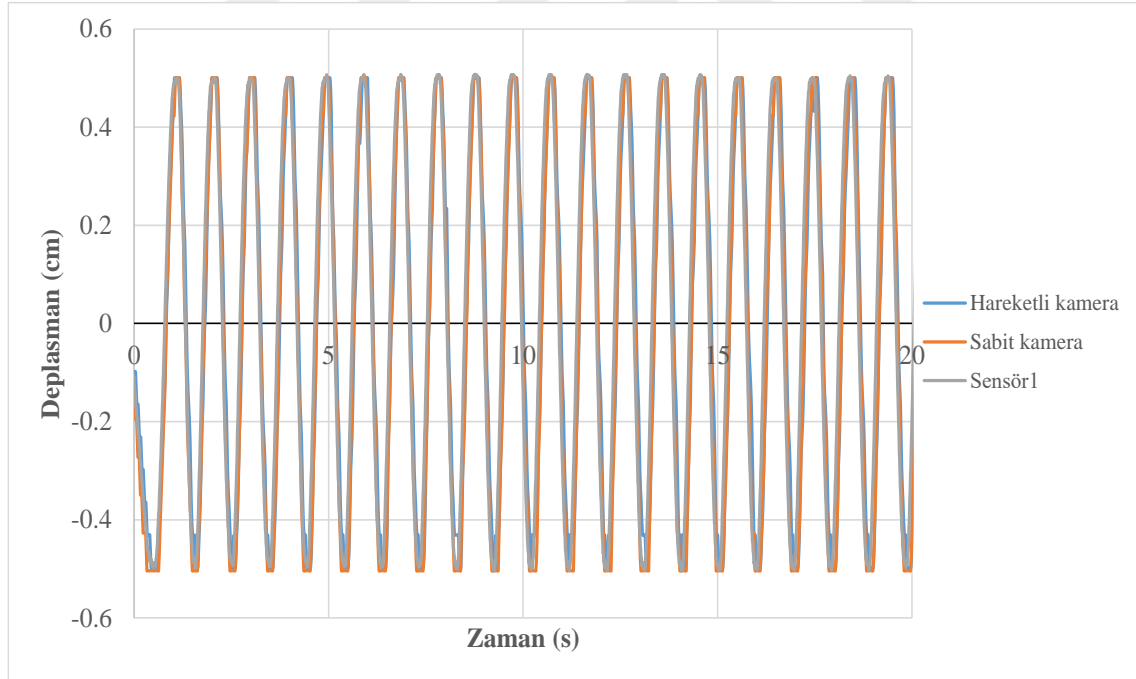
Şekil 4.8.  $h=2$  cm ve  $f=0,55$  hertz için sıvı tankının genliğinin kameralar ve sensör1 ile karşılaştırılması



Şekil 4.9.  $h=4$  cm ve  $f=0,77$  hertz için sıvı tankının genliğinin kameralar ve sensör1 ile karşılaştırılması



Şekil 4.10.  $h=6$  cm ve  $f= 0,93$  hertz için sıvı tankının genliğinin kameralar ve sensör1 ile karşılaştırılması

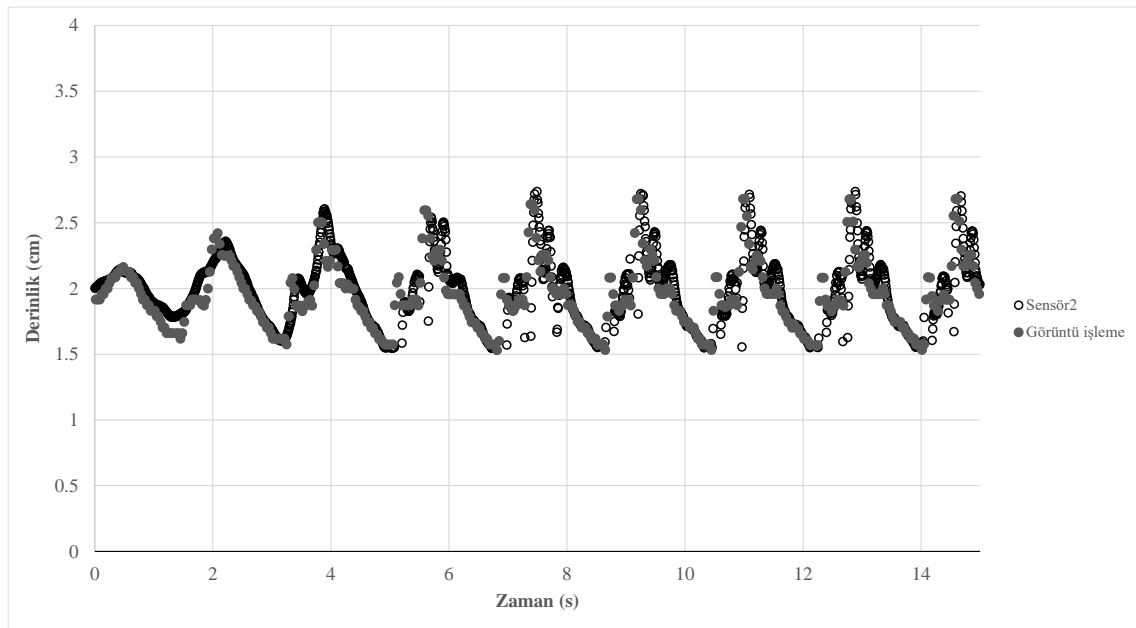


Şekil 4.11.  $h=8$  cm ve  $f= 1,04$  hertz için sıvı tankının genliğinin kameralar ve sensör1 ile karşılaştırılması

Grafikler deneyin 20 saniyelik bölümü için irdelenmiştir. Sıvı tankına uygulanan tüm frekans değerleri 2 cm, 4 cm, 6 cm ve 8 cm doluluk oranları için sırasıyla 0,55 hertz, 0,77 hertz, 0,93 hertz ve 1,04 hertz'dir. Grafikler incelendiğinde tankın ele alınan tüm doluluk oranlarında sıvı tankının genliğinin 0,5 cm olduğu belirlenmiştir. Bunlara ilaveten hareketli kamera, sabit kamera ve sensör1 gibi farklı ölçüm yöntemlerinin birbirleriyle aynı sonuçlar verdiği kolaylıkla anlaşılmaktadır.

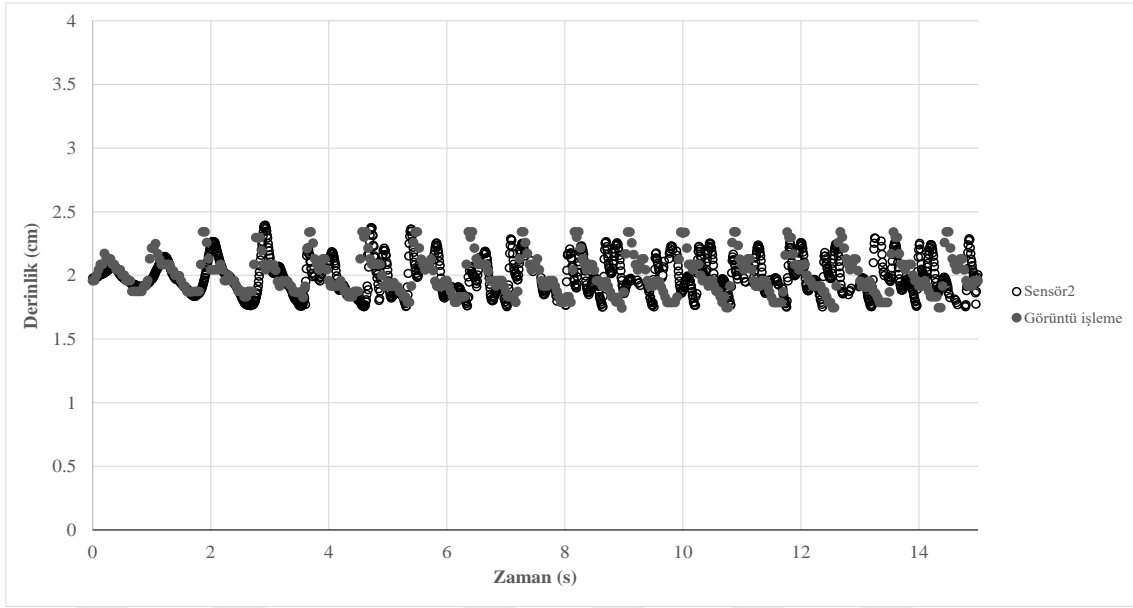
### 4.3. Görüntü İşleme ve Ultrasonik Sensör Kullanarak Su Seviyelerinin Karşılaştırılması

Çalışmanın bu bölümünde video kameralar aracılığıyla edilen edilen görüntülerin, görüntü işleme yöntemiyle analiz edilmesiyle elde edilmiş sonuçların ultrasonik mesafe ölçer sensörlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması amaçlanmıştır. Böylece tek bir yöntemle bağlı kalmak yerine iki farklı ölçüm yönteminin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bu ve bundan sonraki kısımlarında görüntü işleme yöntemiyle su seviyesinin değişimi için hareketli kameradan elde edilmiş görüntüler kullanılacaktır. Deney tankının 2 cm su ile dolu olduğu durum için deney tankına 0,55 hertz frekans uygulanmış ve Sensör2 ve Sensör3'ün bulunduğu konumlar için derinlik zaman grafikleri görüntü işleme ve sensörler için Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te görüldüğü gibi verilmiştir.



Şekil 4.12.  $h=2$  cm ve  $f= 0,55$  hertz için ultrasonik mesafe ölçer sensör2 ve hareketli kameradan elde edilen görüntülere ait deneysel sonuçların karşılaştırılması





Şekil 4.13.  $h=2$  cm ve  $f= 0,55$  hertz için ultrasonik mesafe ölçer sensör3 ve hareketli kameradan elde edilen görüntülere ait deneysel sonuçların karşılaştırılması

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 incelendiğinde su seviyelerinde ani değişimlerin olduğu Sensör2 ve Sensör3'ün bulunduğu konumlarda sensörlerin bazı anlarda okuma yapamadıkları görülmüştür. Ultrasonik sensörlerin çalışma prensibi yüzeye ses dalgası göndermek ve gönderilen bu ses dalgasının yansyarak sensöre tekrar ulaşması için geçen süreyi hesaplayarak mesafeyi belirlemektir. Bu bilgiler ışığında özellikle Şekil 4.13'de verilen 2 cm doluluk ve 0,55 hertz'lik frekans altında bulunan deney tankında su yüzeyinde meydana gelen ani değişim ve eğriliklerden dolayı sensör gönderdiği dalgayı tekrar alamamakta ve bu anlarda değer okuyamadığı gözlenmiştir. Bunlara ilaveten yine de sensör ve görüntü işleme sonuçlarının birbirleriyle kabul edilebilir ölçüde uyumlu olduğu sonucuna varılabilir.

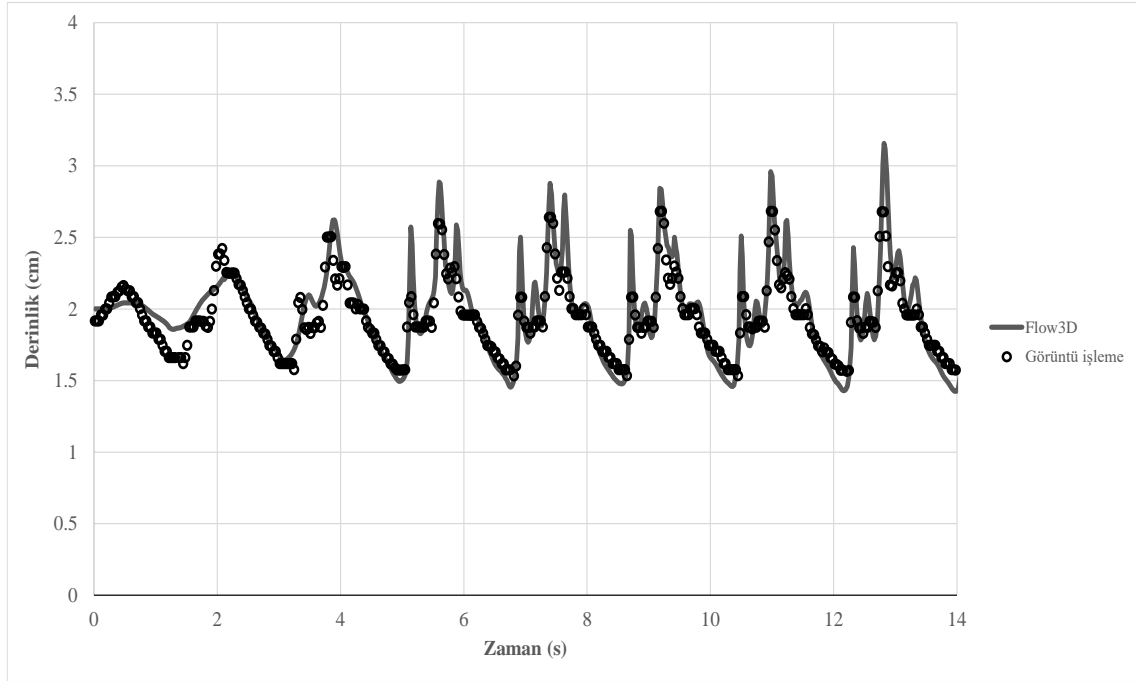
#### 4.4. Su Seviyelerinin Görüntü İşleme ve Nümerik Sonuçlarla Karşılaştırılması

Çalışmanın bu kısmında deney tankının 3 farklı doluluk oranı için farklı frekans değerlerindeki çalkantı davranışları görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deney tankının  $h/L$  oranı 0,05 ; 0,1 ve 0,15 için sırasıyla 0,55 hertz, 0,77 hertz ve 0,93 hertz frekansa tabi tutulmuştur. Bu frekans değerleri her bir sıvı seviyesi için sıvının etkin doğal frekans değerleridir. Ayrıca etki ettirilen bu frekans değerlerine ek olarak  $h/L$  oranı 0,05 ; 0,1 ve 0,15 için sırasıyla 0,59 hertz, 0,91 hertz ve 1,10 hertz frekans değerleri için de deneysel çalışma tekrarlanmıştır. Deneyin bahsi geçen frekans değerleri için tekrarlanma

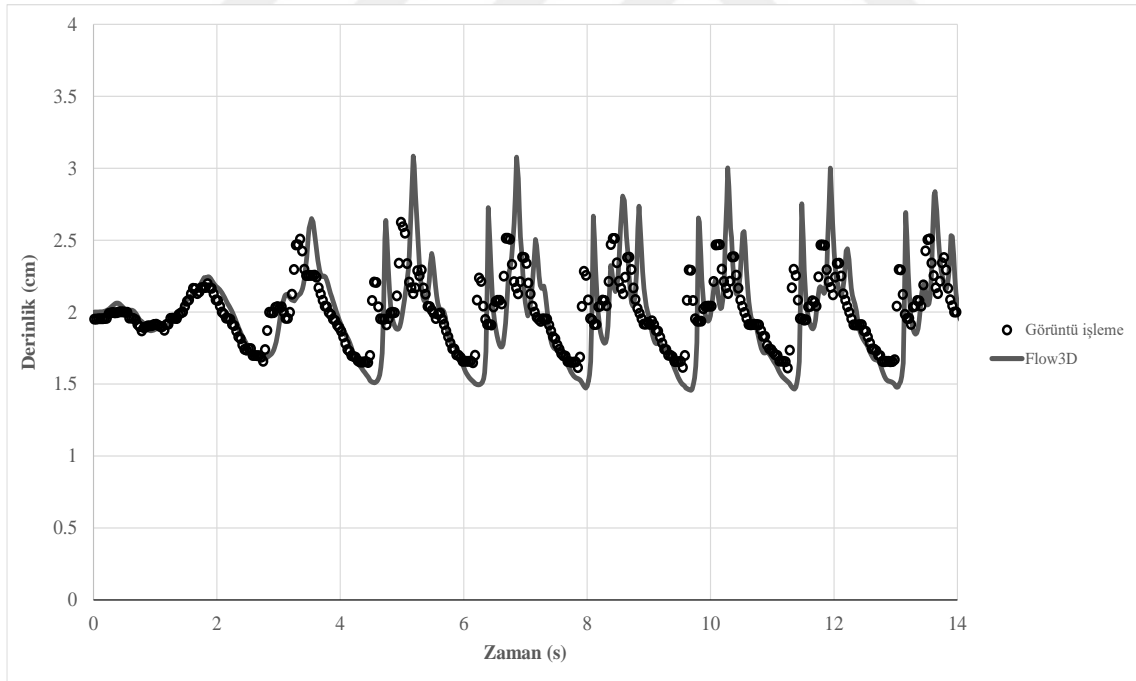
sebebi de çalkantının nonlinear davranışı yüzünden rezonans frekans değerinin sıvının doğal frekans değerinde olmayacağı ve bu değere yakın bir değerde olacağı düşüncesidir.

Her bir doluluk oranı ve frekans değeri için derinlik zaman grafikleri Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23, Şekil 4.24, Şekil 4.25'te verildiği gibidir.

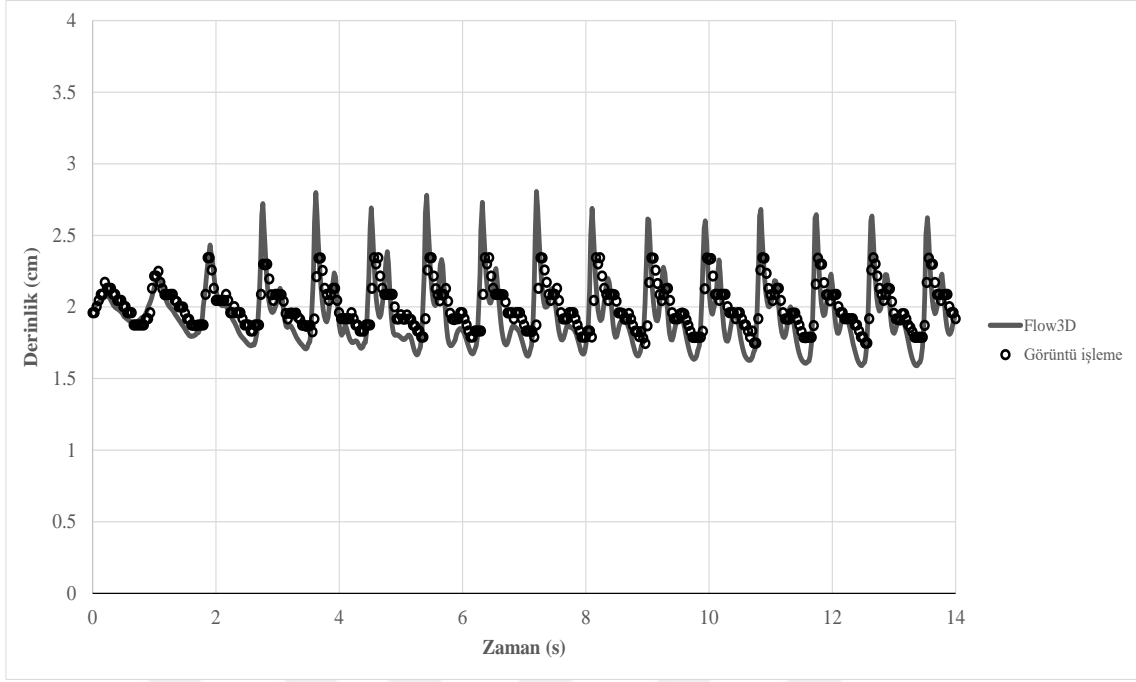




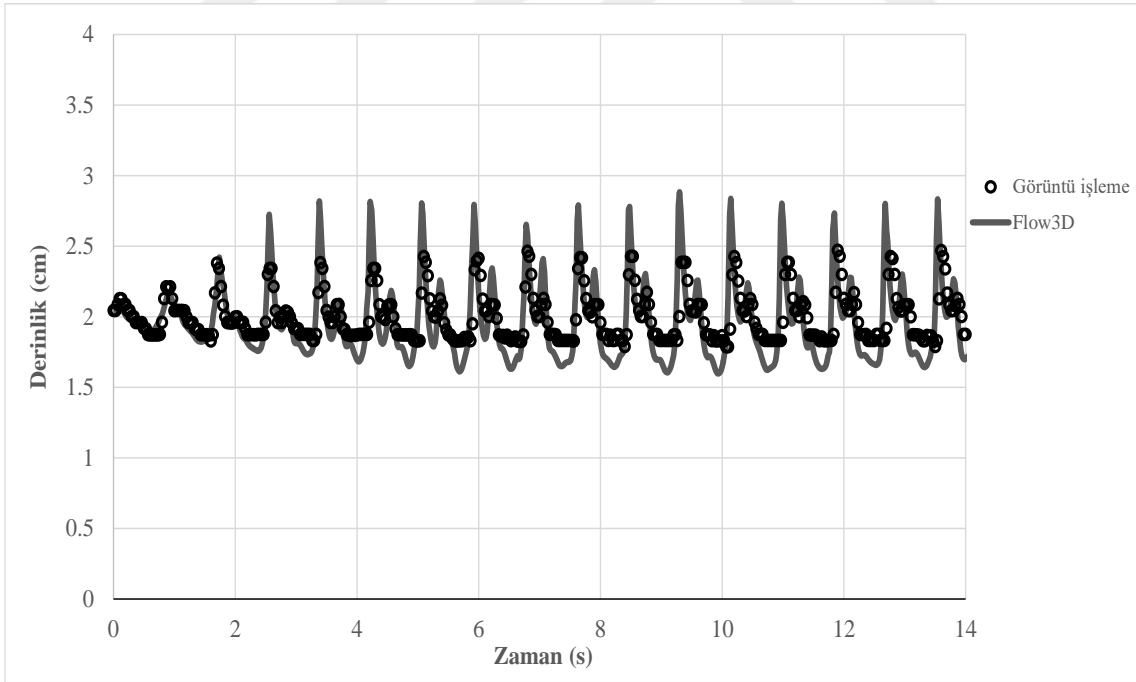
Şekil 4.14.  $h=2$  cm ve  $f=0,55$  hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör2 noktası)



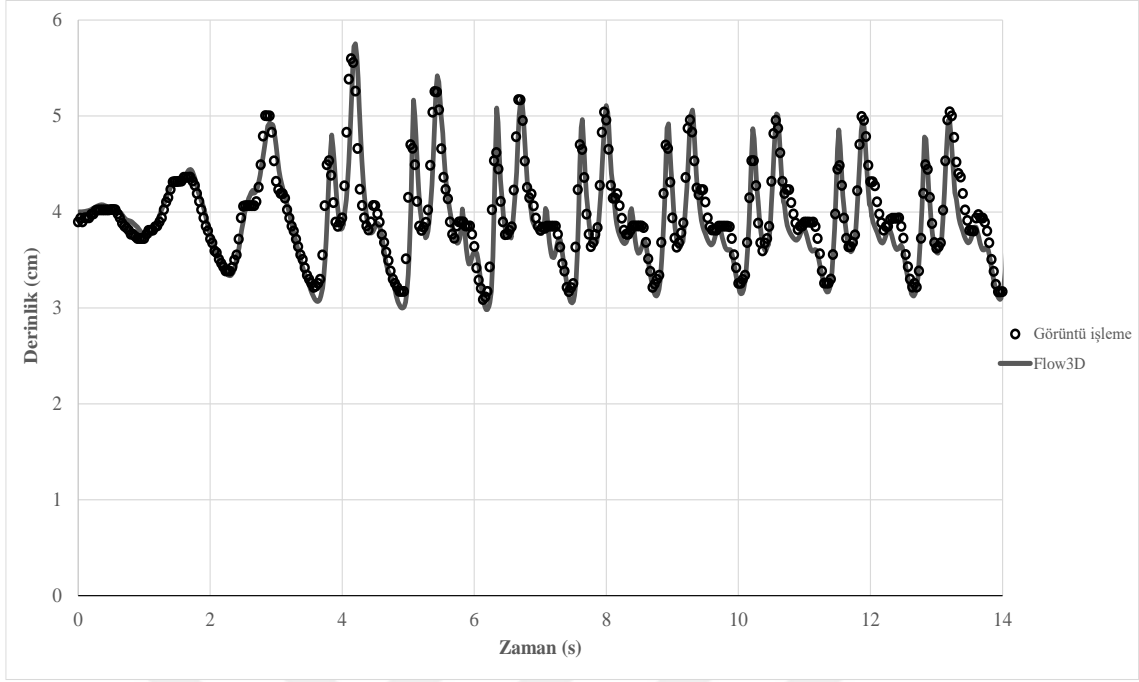
Şekil 4.15.  $h=2$  cm ve  $f=0,59$  hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör2 noktası)



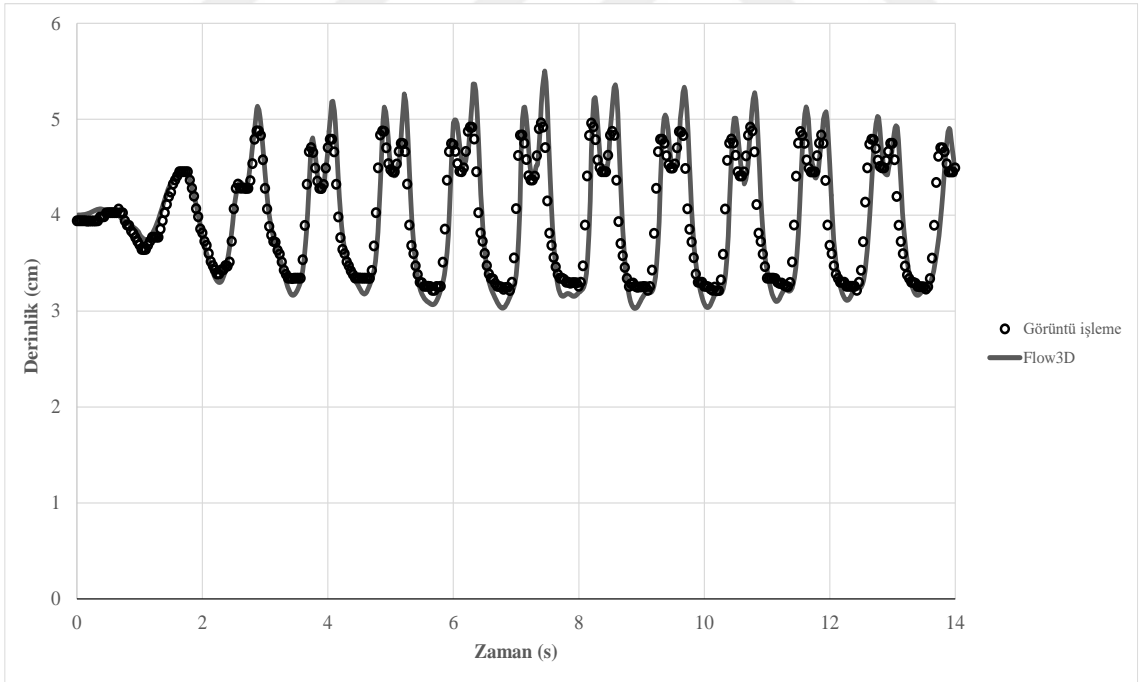
Şekil 4.16.  $h=2$  cm ve  $f=0,55$  hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör3 noktası)



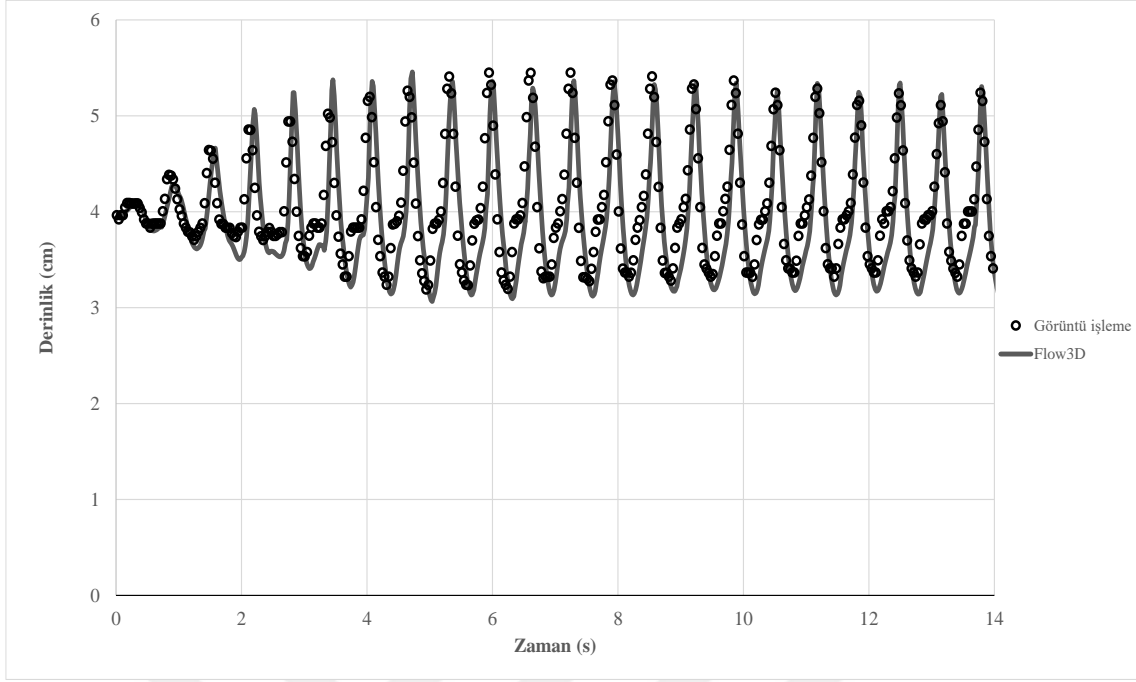
Şekil 4.17.  $h=2$  cm ve  $f=0,59$  hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör3 noktası)



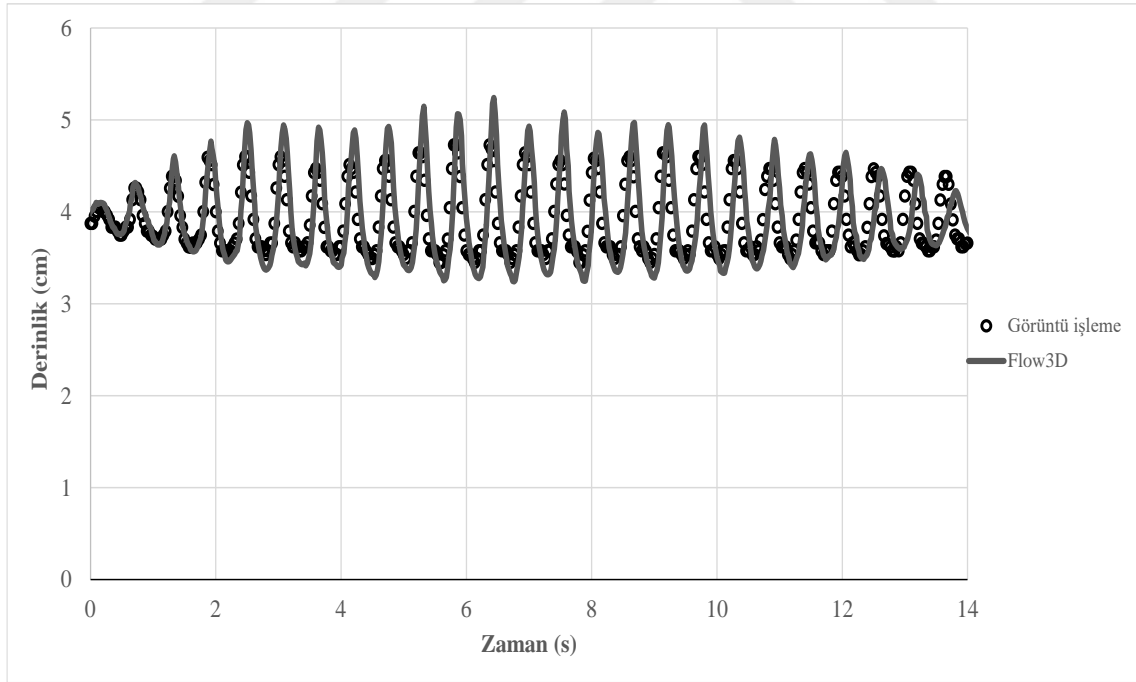
Şekil 4.18.  $h=4$  cm ve  $f=0,77$  hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör2 noktası)



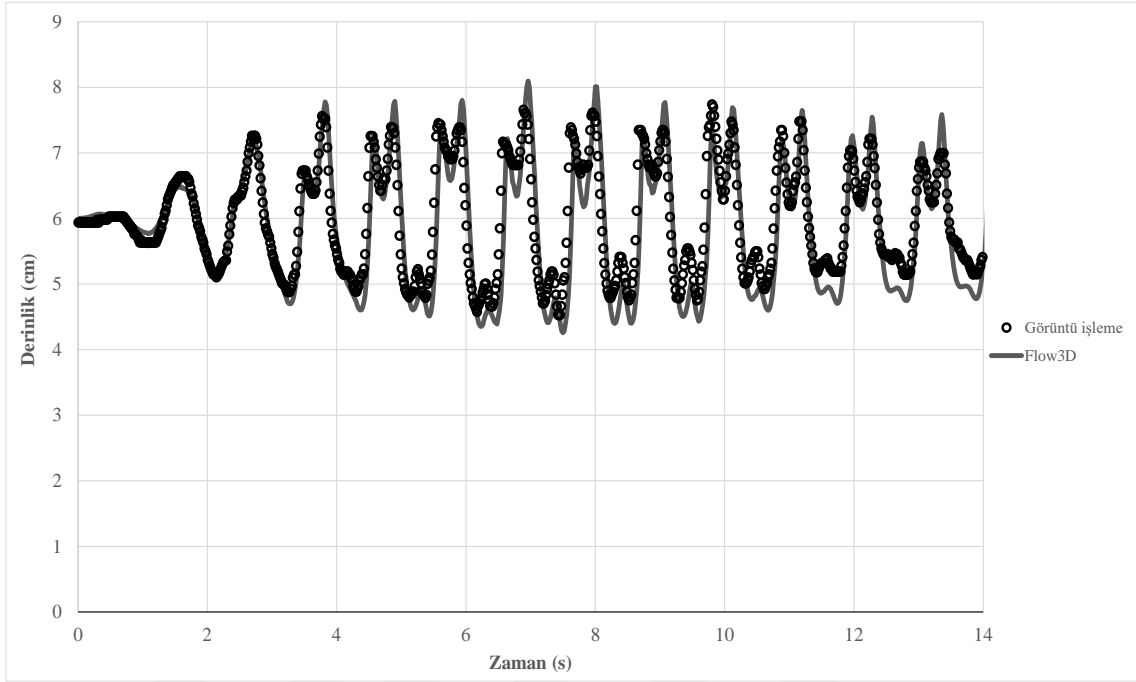
Şekil 4.19.  $h=4$  cm ve  $f=0,91$  hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör2 noktası)



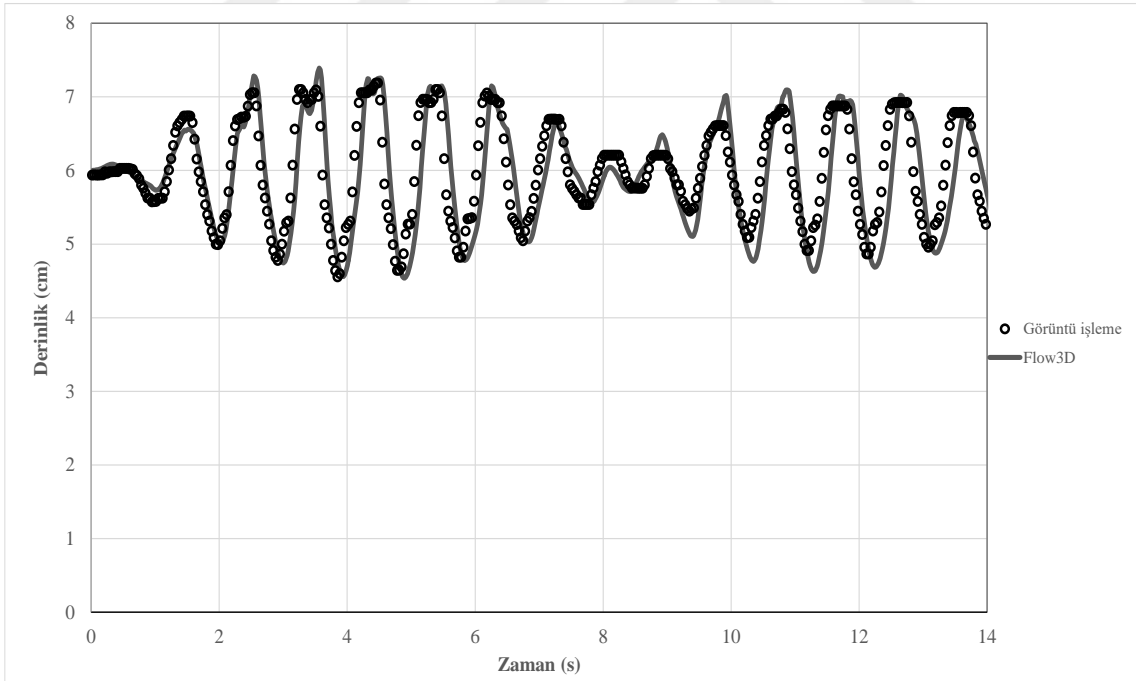
Şekil 4.20.  $h=4$  cm ve  $f=0,77$  hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör3 noktası)



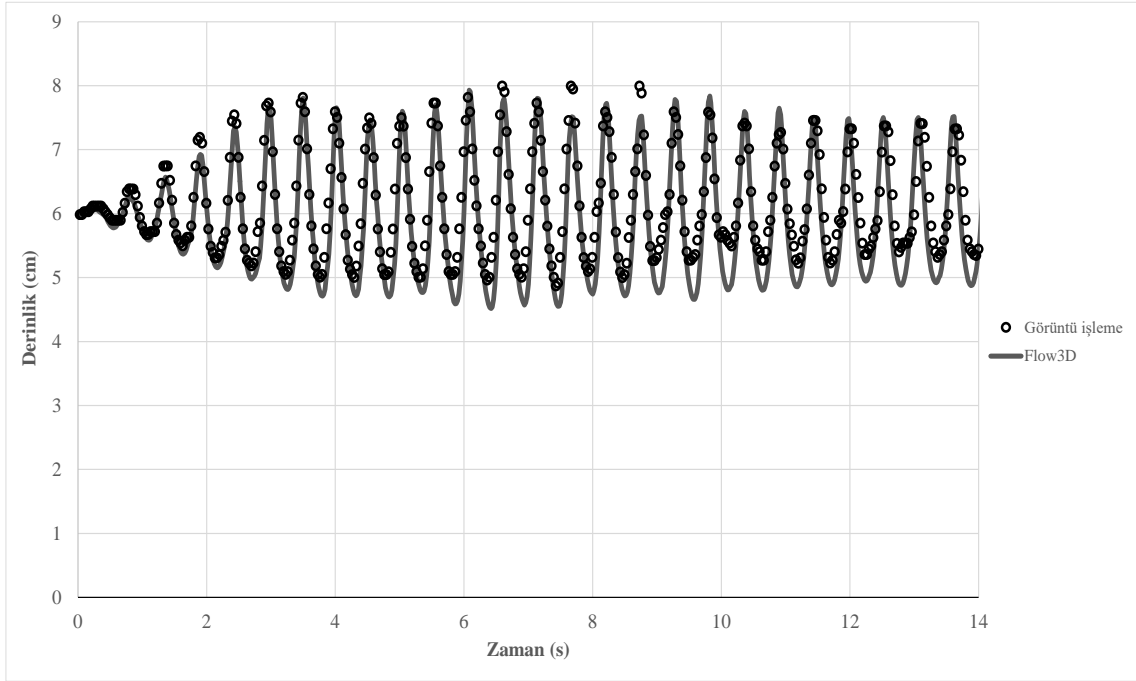
Şekil 4.21.  $h=4$  cm ve  $f=0,91$  hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör3 noktası)



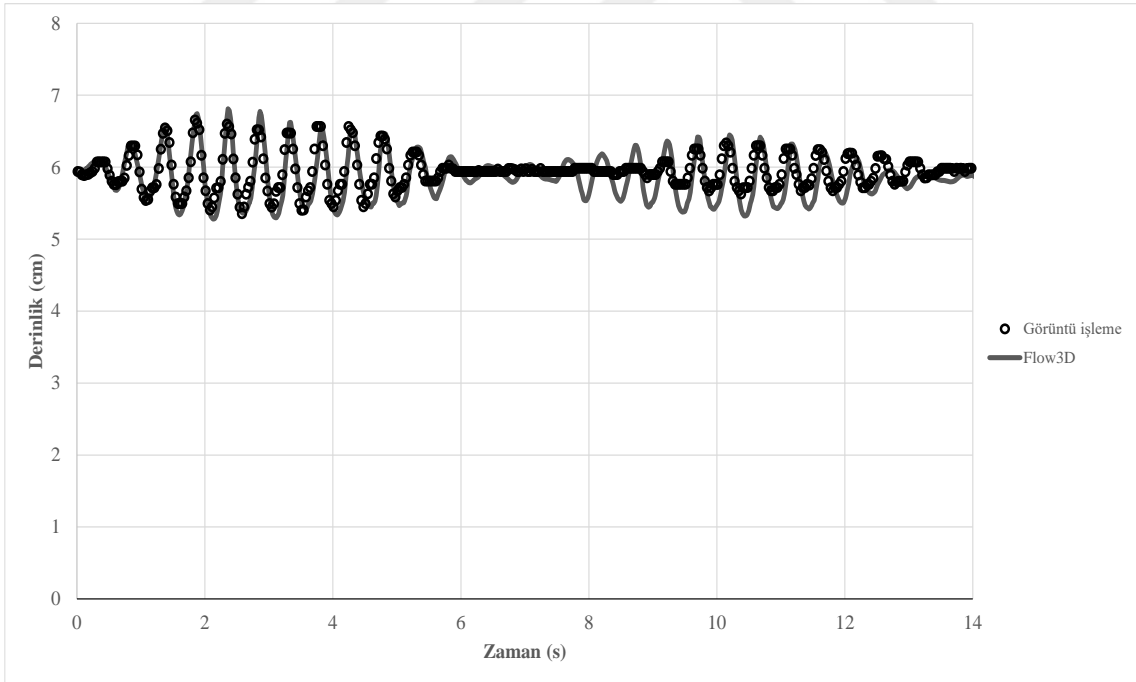
Şekil 4.22.  $h=6$  cm ve  $f= 0,93$  hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör2 noktası)



Şekil 4.23.  $h=6$  cm ve  $f= 1,10$  hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör2 noktası)



Şekil 4.24.  $h=6$  cm ve  $f= 0,93$  hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör3 noktası)



Şekil 4.25.  $h=6$  cm ve  $f= 1,10$  hertz için su seviyelerinin görüntü işleme ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılması (Sensör3 noktası)

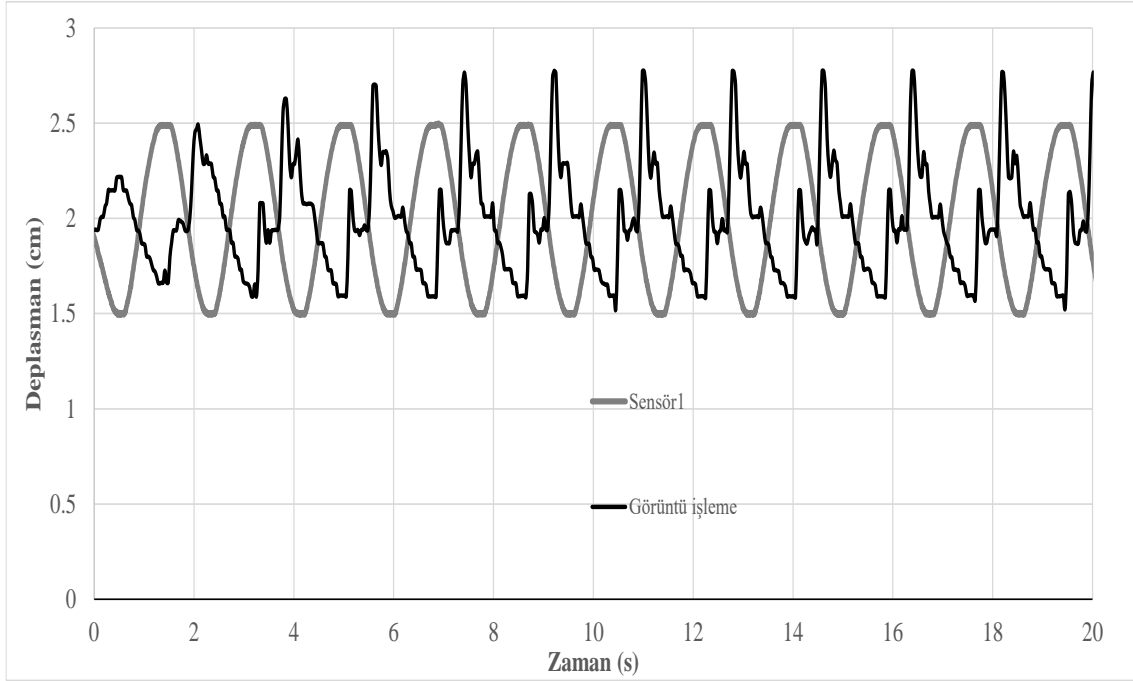


Grafikler ayrıntılı olarak incelendiğinde çalkantı etkisindeki sıvının derinliğinin zamanla değişimine ait deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında deney ve sayısal sonuçların iyi bir uyum içerisinde oldukları söylenebilir. Ayrıca derinlik değişimlerinin pik değerlere ulaşma zamanları deneysel ve nümerik sonuçlarda aynı anlara denk gelmesi bakımından sonuçların kabul edilebilirliğini kanıtlar niteliktedir. Grafikler ayrıca nümerik sonuçların pik seviye değişimlerinin deneysel sonuçlara nazaran daha yüksek değerlerde olduğunu göstermektedir. Sayısal çözümde farklı ağ aralıklarının kullanılması, farklı türbülans yöntemlerinin denenmesi, farklı nümerik yaklaşımların denenmesi ile daha iyi sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu analizler ileride ayrı bir çalışma olarak değerlendirilecektir.

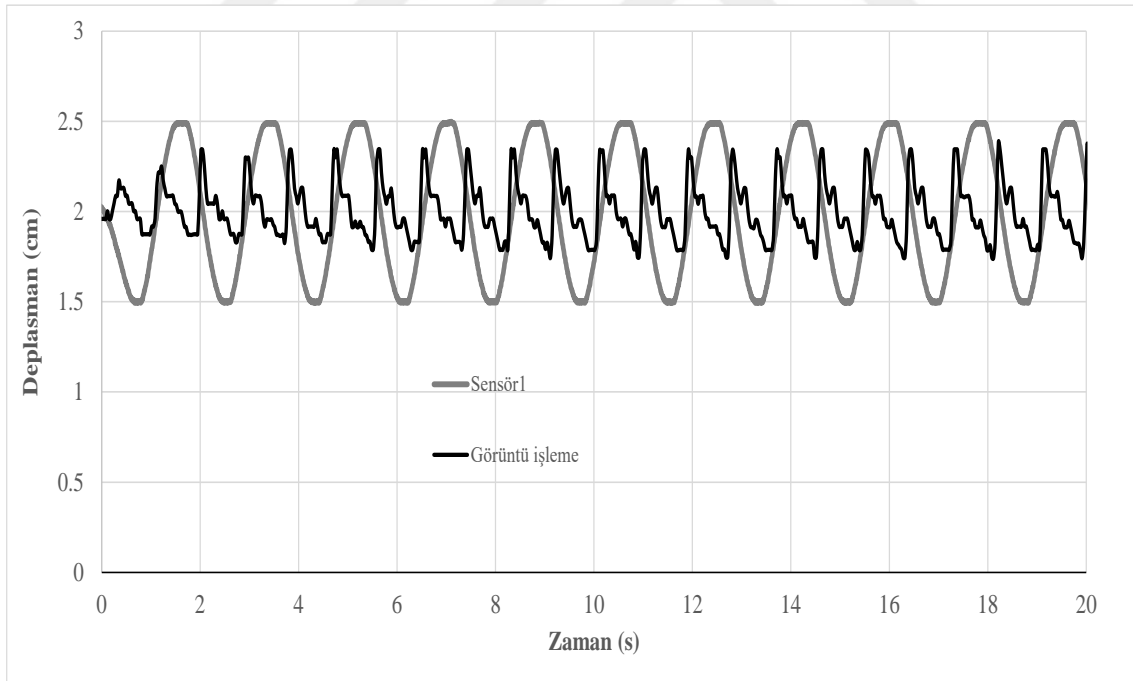
#### **4.5. Tank Hareketi ve Su Seviyesi Değişiminin İrdelenmesi**

Çalışmanın bu bölümünde tankın hareketi ile tankın hareketi neticesinde su yüzeyinde meydana gelecek seviye değişimi incelenmiştir. Deneyler, deney tankının h/L oranı sırasıyla 0,05 ve 0,015 için tekrarlanmıştır. Deney tankının hareket frekansı ise sırasıyla ilgili doluluk oranlarında çalkantı hareketinin ilk frekans değerleri olan 0,55 hertz ve 0,93 hertz'dir. Çalışma, tank hareketinin deplasman-zaman grafiğiyle su yüzeyinde meydana gelen seviye değişimi arasında bir uyum olup olmadığının görülmesi açısından önem arz etmektedir. Tank hareketinin deplasman zaman grafiği deney tankının sol tarafına yerleştirilen 1 numaralı ultrasonik sensörden elde edilen verilerle çizdirilirken su yüzünde meydana gelen seviye değişimi ise 2 ve 3 numaralı ultrasonik sensörlerin bulunduğu konumlardan görüntü işleme yöntemiyle elde edilen verilerle çizdirilmiştir.

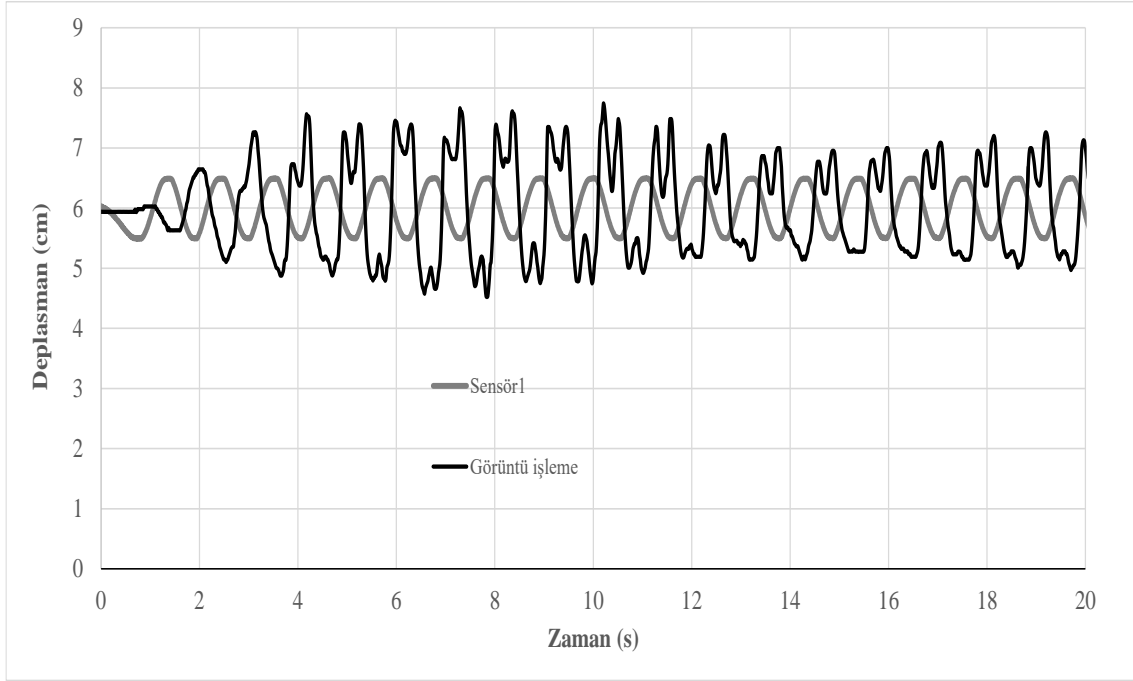
Bahsi geçen grafikler Şekil 4.26, Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29'da verildiği gibidir.



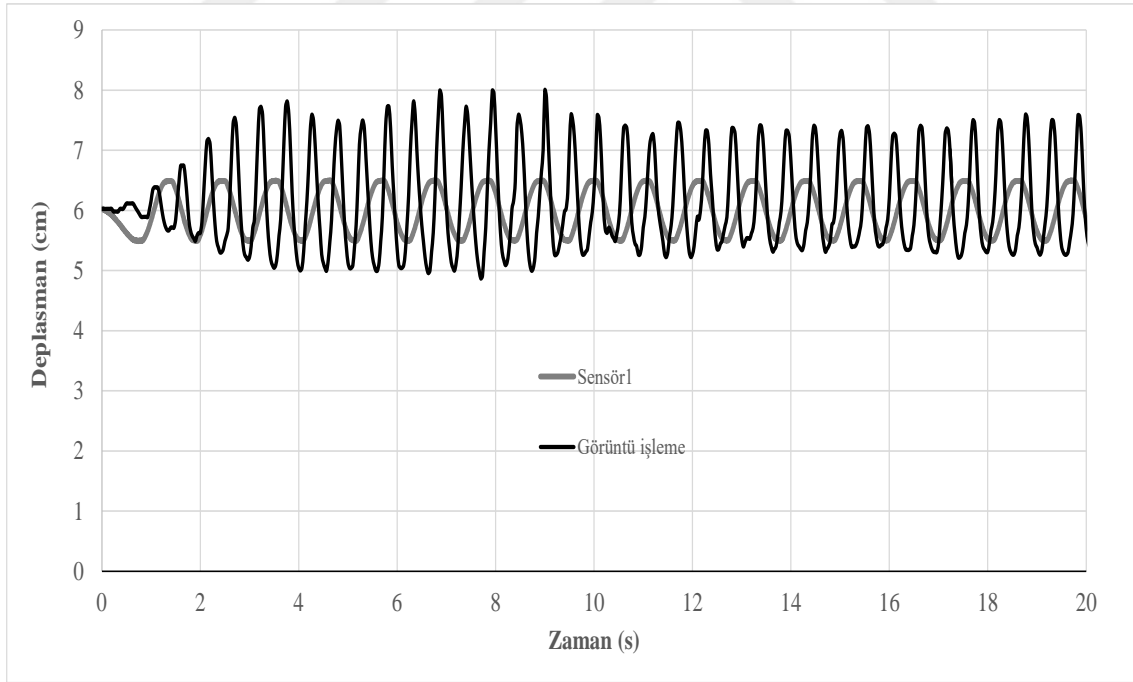
Şekil 4.26.  $h=2$  cm ve  $f=0,55$  hertz için tank hareketi ve su seviyesi değişiminin karşılaştırılması (Sensör2 noktası)



Şekil 4.27.  $h=2$  cm ve  $f=0,55$  hertz için tank hareketi ve su seviyesi değişiminin karşılaştırılması (Sensör3 noktası)



Şekil 4.28.  $h=6$  cm ve  $f=0,93$  hertz için tank hareketi ve su seviyesi değişiminin karşılaştırılması (Sensör2 noktası)



Şekil 4.29.  $h=6$  cm ve  $f=0,93$  hertz için tank hareketi ve su seviyesi değişiminin karşılaştırılması (Sensör3 noktası)

Grafikler çizilirken deney tankının deplasman-zaman grafiğiyle su yüzeyinde meydana gelen değişimin karşılaştırılabilmesi için deney tankının hareketi ele alınan derinliklerde başlatılmıştır. Su seviyesinde meydana gelen seviye değişiminin tank hareketinin deplasman-zaman grafiğiyle karşılaştırılabilmesi için tank hareketinin deplasman değeri ele alınan derinlik değeri eklenerek başlatılmıştır. Grafikler incelendiğinde deney tankının 0,005 m genlikli hareket yaptığı ve deney tankının her bir derinliği için uygulanan rezonans frekans değerlerinde su seviyesinde meydana gelen derinlik değişimleri gözükmemektedir. Deney tankının maksimum genlik yaptığı 0,005 m genliklerde Sensör 2 ve Sensör 3'ün bulunduğu konumlarda pik seviye değişimleri olduğu anlaşılmaktadır. Başka bir ifadeyle deney tankına uygulanan hareketin frekansı ile su seviyesinde meydana gelen derinlik değişiminin frekansı birbirleriyle oldukça uyumludur.

Şekil 4.26 ele alındığında deney tankının Sensör1'e göre harekete başladığı ilk anda Sensör2'nin bulunduğu konumda su seviyesinde düşüş gözlemlendiği buna ilaveten deney tankının Sensör1'e göre zıt yönde hareket yaptığı anlarda ise Sensör2'nin bulunduğu konumda su seviyesinde artış olduğu kolaylıkla anlaşılmaktadır.

Deney tankına uygulanan hareketin frekansının büyük olduğu durum olan Şekil 4.29'da ise su seviyesinde meydana gelen pik seviye değişimlerinin tank hareketinin genliğinin en büyük olduğu anlarda görüldüğü kolaylıkla anlaşılmaktadır.

#### 4.6. Tank İçerisindeki Çalkantı Hareketine Ait Basınç Değerlerinin Sayısal Olarak İrdelenmesi

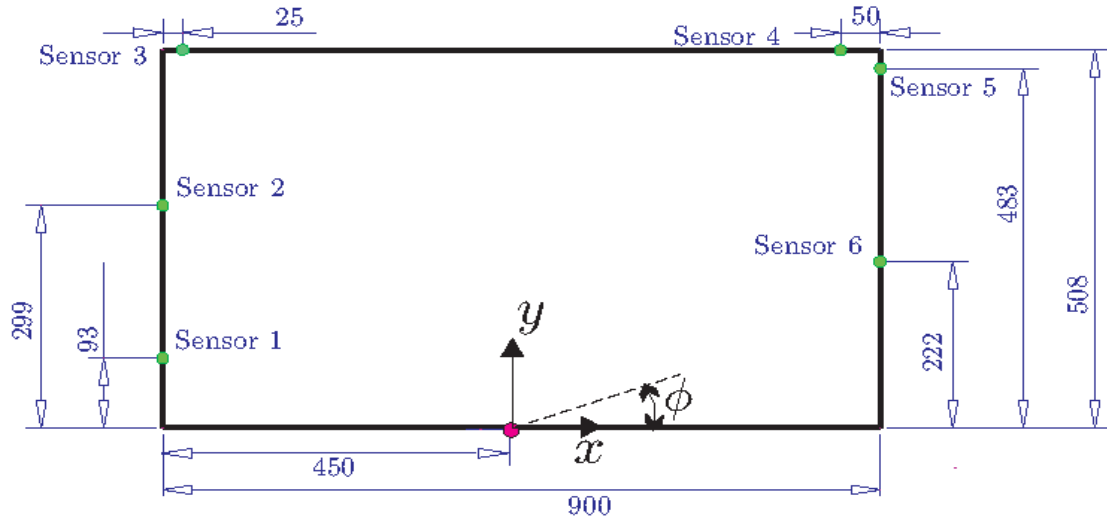
Çalışmanın bu kısmında tank içerisinde bulunan sıvının çalkantı sonrası tank yüzeyine uyguladığı çalkantı kuvvetleri irdelenmiştir. Çalkantının tank yüzeylerinde yaratacağı kuvvet basınç sensörleriyle bulunabilir. Mevcut laboratuvar ortamında basınç sensörleri bulunmadığından Prof. Dr. A. Souto Iglesias tarafından Madrid Politeknik Üniversitesi'nde dikdörtgen bir tank için gerçekleştirilen çalkantı deneyinin deneysel sonuçlarını nümerik sonuçlarla karşılaştırılmasıyla irdelenmiştir.

Deney tankının uzunluğu 90 cm, yüksekliği 52 cm ve genişliği ise 6,2 cm'dir. Çalkantı deneyi içerisinde su ve yağ olan durumlar için sırasıyla 9,3 cm ve 35,3 cm doluluk oranlarında gerçekleştirilmiştir. Deney kapsamında çalkantı hareketi deney tankına belirli periyotlarda dönme hareketi verilerek oluşturulmuştur. Deney çalışmalarında deney tankına verilen dönme periyodu ve deneyde kullanılan diğer değişkenler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney çalışmalarında kullanılan değerler

Sıvı	H (mm)	T <sub>1</sub> (sn)	T (sn)
Su	93	1,916	1,629
Yağ	93	1,916	1,629
Su	355,3	1,167	1,167
Yağ	355,3	1,167	1,167

Çizelge 4.1'de verilen ilk çalkantı periyodu değerleri Eş. 3.12'de verilen bağıntıyla bulunmuştur. Tanka verilen dönme periyodu deney tankının az doluluk oranı sahip olduğu durumlar için ilk çalkantı periyodunun 0,85 katı alınırken doluluk oranının fazla olduğu durumlar için ise 1 katı alınmıştır. Bunun nedeni olarak çalkantının nonlineer özelliğinin az doluluk oranlarında daha etkin rol oynadığı gösterilebilir.

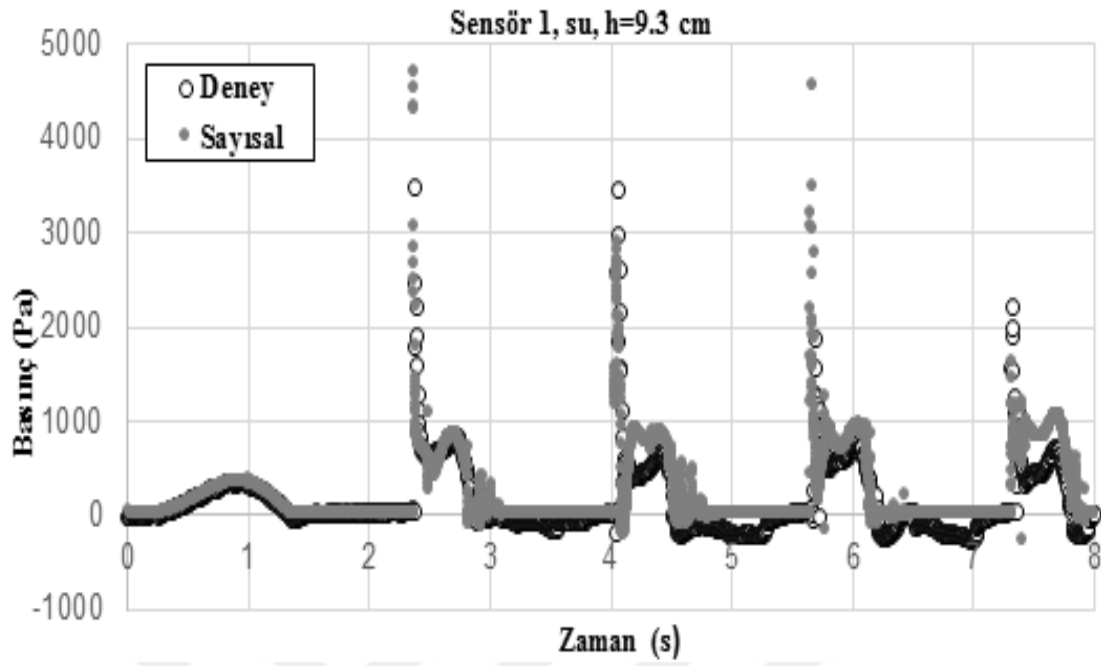


Şekil 4.30. Tank geometrisi ve basınç sensörlerinin konumu (Delorme ve diğerleri, 2009)

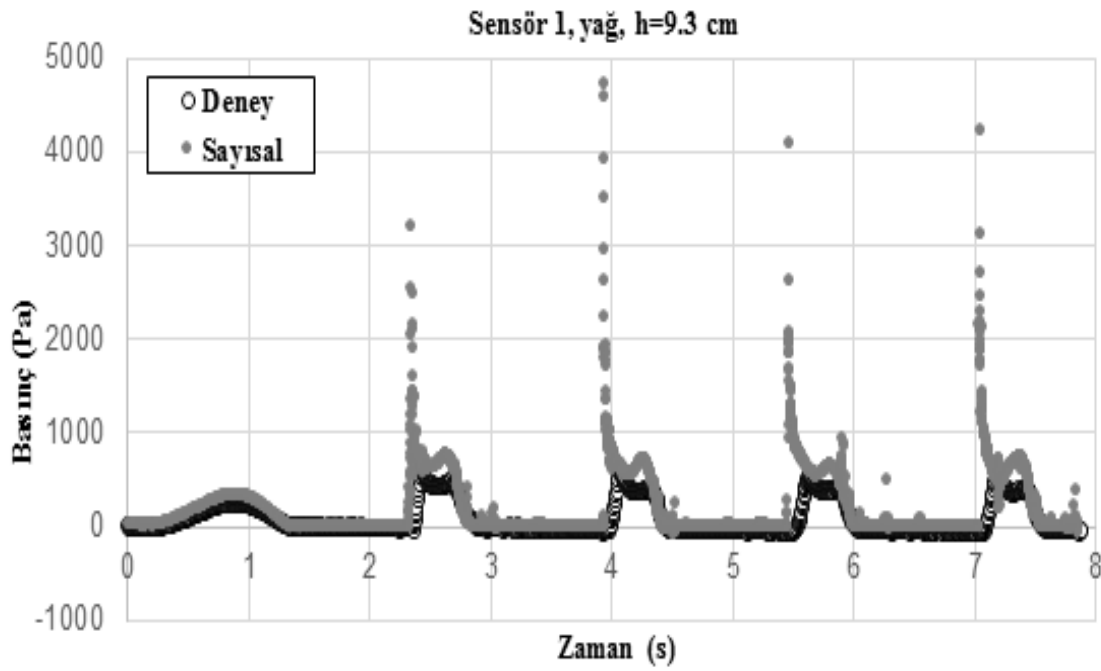
Gerçekleştirilen deney çalışmasında, çalkantının oluşturduğu çalkantı kuvveti etkisi 6 adet basınç sensörüyle gözlenmiştir. Bahsi geçen basınç sensörlerinin konumları Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Deneysel ve nümerik çalışmaların karşılaştırılması 93 mm su ve yağ bulunan durumlarda Sensör1 için, 355,3 mm su ve yağ bulunan durumlarda ise Sensör3 için gerçekleştirilmiştir.

Deneysel sonuçlar Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin sonlu hacimler yöntemi ile sayısal çözümünü esas alan FLOW-3D isimli yazımlı karşılaştırılmıştır. Yazılım sıvının serbest yüzeyinin tanımlanmasında akışkan hacmi (VOF) metodunu kullanmaktadır.

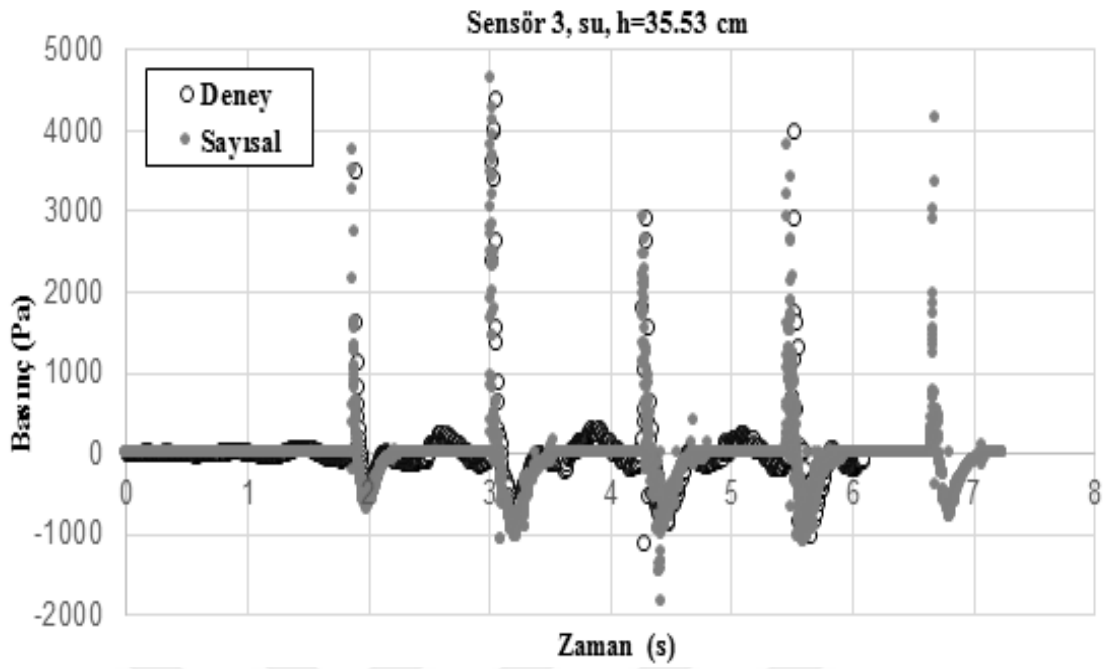
Deney tankının farklı derinliklerde su ve yağ ile dolu olması durumları için çalkantının içerisinde bulunduğu deney tankı yüzeylerine uyguladığı basınç kuvveti etkisi Şekil 4.31, Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'de verildiği gibidir.



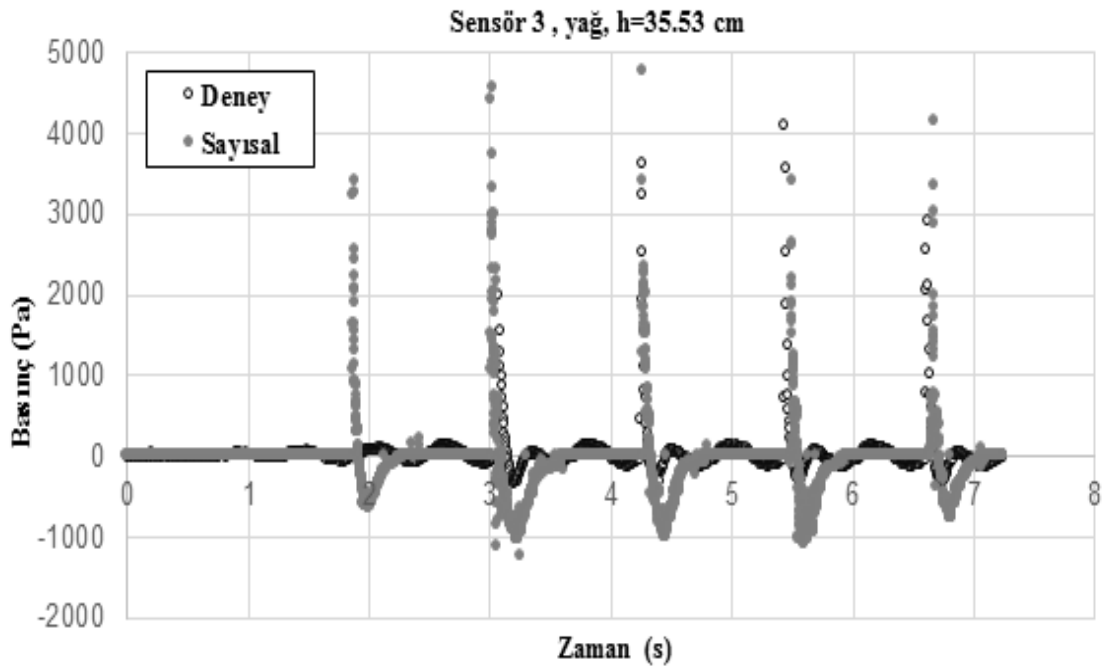
Şekil 4.31.  $h=9,3$  cm su için sensör 1'den okunan yanıl basınç değeri karşılaştırması



Şekil 4.32.  $h=9,3$  cm yağ için sensör 1'den okunan yanıl basınç değeri karşılaştırması



Şekil 4.33.  $h=35,53$  cm su için sensör 3'den okunan yanal basınç değerleri karşılaştırması



Şekil 4.34.  $h=35,53$  cm yağ için sensör 3'den okunan yanal basınç değerleri karşılaştırması



Deney tankında meydana gelen çalkantının basınç etkisi karşılaştırıldığında deney ve nümerik sonuçların birbirleriyle oldukça yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Tank üzerinde görülen basınç etkisinin pik değerlerine ulaşma süreleri çok kısa sürelerde gerçekleştiğinden deneysel ve nümerik sonuçların pik değerleri arasında farklılıklar oluşabilmektedir. Nümerik sonuçların pik değerlerinin deneysel sonuçlara nazaran çok daha fazla çıktığı belirgin bir biçimde gözlenmektedir. Buna istinaden pik değerlere ulaşma zamanları nümerik model ile rahatlıkla belirlenebilmiştir.

Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de deneysel olarak belirlenen basınç değerleri negatif iken sayısal modelde su ile temas kesildiğinde sıfır değerinin altına inmemektedir. Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’de su ve yağ için deneysel ve nümerik sonuçların uyumu iyi olmakla birlikte pik noktalarda okunan pozitif ve negatif pik basınç değerleri nümerik modelde belirgin bir şekilde yüksek çıkmaktadır.

Pik basınç değerlerinin deneysel ve nümerik sonuçlarda farklı çıkmasının sebebi olarak nümerik modelde ağ aralıkları ve türbülans yöntemi gibi değişkenlerin etkili olduğu düşünülmektedir.

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Dikdörtgen bir kanalın belirli bir yük altında hareketi sonucunda içerisinde bulunan sıvı çalkantı hareketi yapmaktadır. Bu çalışmada bahsi geçen çalkantı hareketinin deneysel ve nümerik olarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarı'nda yürütülmüştür. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel analizler görüntü işleme ve ultrasonik sensörlerden elde edilen verilerle yapılmıştır. Deneysel ölçümlerin doğrulanması ise RANS denklemlerine dayanan ve serbest yüzeyli akımların çözümünde oldukça başarılı sonuçlar veren FLOW-3D hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıyla sağlanmıştır ve yöntemin çalkantı problemlerini çözebilirliği sorgulanmıştır.

Tez çalışmasında çalkantı probleminin deneysel çalışma aşamasında görüntü işleme sisteminin kullanılabilmesi için hemen hemen aynı özelliklere sahip iki ayrı akıllı telefon kamerasından yararlanılmıştır. Deneyde kullanılan kameralardan bir tanesi deney tankına sabitlenmiş (hareketli kamera) diğeri ise deney tankından bağımsız konumlandırılmıştır (sabit kamera). Görüntü işleme analizi yapılırken kameraların farklı konumlandırılmasındaki en önemli amaç bu durumun sonuçlara etkisinin yorumlanabilmesi içindir. Deney çalışmasının video görüntüleri her bir akıllı telefon için 1080p (1920x1080 piksel) ve saniyede 120 kare olarak kayıt altına alınmıştır. Video kayıtlarının saniyede 120 karelik fotoğraf karesi içererek alınmasının en önemli sebebi çalkantı hareketinin her ayrıntısını daha iyi yakalayabilmektir. Görüntü işleme yazılımı sayesinde 120 karelik görüntüler istenildiği zaman çalışma kapsamında seyreltilmiştir. Görüntü işleme analizi sonrası elde edilen sonuçlar mesafe ölçen ultrasonik sensörlerin ve teknolojinin ilerlemesiyle gelişmeye devam eden nümerik yöntemin çalkantı problemlerini doğru veya hangi ölçüde yakın sonuçlar verebildiklerini görmeyi sağlamıştır.

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Deneysel tankının farklı su seviyelerinde farklı frekans değerlerine maruz kalması sonucu içerisinde bulunan sıvı hareketinin, asıl kullanım amacı video veya fotoğraf çekmek olmayan yakın özelliklere sahip iki akıllı telefon aracılığıyla çekimleri gerçekleştirilmiş ve bu görüntüler ultrasonik sensörler ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmaların video görüntülerini profesyonel kameralar aracılığıyla elde etmekten ziyade profesyonel kameralara oranla nispeten daha kolay elde edilebilir olan akıllı telefonlardan yararlanmak çalışmayı özgün kılmaktadır. Akıllı telefon aracılığıyla elde edilen görüntülerin görüntü işleme sistemiyle analiz edilmesiyle ortaya çıkan sonuçların ultrasonik mesafe ölçer sensör ve nümerik sonuçlarla olan uyumu bu ve buna benzer çalkantı davranışının gözlenmesinde kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir. Sonuçların uyumu ayrıca yüksek maliyet gerektiren profesyonel kameralardan ziyade daha ekonomik olan akıllı telefonların çalkantı deneyi için yeterli olduğunun ispatı niteliğindedir. Deneyin iki kamerayla takip edilmesindeki bir diğer amaç tankın içerisinde bulunan sıvının serbest yüzeyindeki derinlik-zaman değişiminin bulunması yanında deney tankına cihaz tarafından verilen frekans değerlerinin doğrulanması ve cihazın kalibrasyonunun sağlıklı bir şekilde yapılabilmesidir.
- Tez çalışmasında ele alınan iki noktaya ait derinlik-zaman grafikleri görüntü işleme metodunun yanında bir diğer deneysel ölçüm yöntemi olan ultrasonik mesafe ölçer sensörler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve iki yöntemin birbirlerine oldukça yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Çalışmada ultrasonik sensör kullanılmasının amacı, sensörlerin çalkantı problemlerinde doğruluğunu irdelemek, iki sensörün birbirlerine yakın olmasından dolayı birbirlerinin değerlerini okuyup okumadığı gözlemlemek ve deney anında zamanla değişen derinliğin sensörün çalışma aralığının dışına çıkıp çıkmadığını test etmektir. Bahsedilen tüm bu bilgiler ışığında belirli anlarda hatalı okuma veya okuma yapmamasına rağmen ultrasonik sensör ve görüntü işleme sisteminin deney tankı içerisinde bulunan sıvının derinlik-zaman grafiklerinin çıkarılmasında oldukça uyumlu sonuçlar verdiğini söylemek yanlış olmayacaktır.

Ultrasonik sensörlerin okuma hatasını en fazla yaptığı anlar farklı doluluk oranları için ilgili rezonans durumlarında meydana gelmektedir. Rezonans halde sıvının kaotik yapısı sensör okumalarını zorlaştırmakta veya hatalı sonuçlar vermesine neden olmaktadır.

- Çalkantı hareketinin nonlinear özelliği ve sahip olduğu kaotik yapısından dolayı nümerik olarak analiz etmek deneysel çalışmalara oranla daha az gerçekçi olmaktadır. Gelişen teknoloji sayesinde halen gelişmekte olan nümerik yöntemlerin bahsi geçen bu açıklığı kapatması beklenmektedir. Tez çalışması, iki farklı deneysel ölçüm yönteminden elde edilen verilerin nümerik yöntem ile elde edilen sonuçların karşılaştırılmasını da içermektedir. Bu karşılaştırmanın yapılmasındaki en önemli amaç ele alınan nümerik yöntemin çalkantı hareketinin gözlenmesi bakımından yeterli olup olmadığını gözlemlemektir. Nümerik yöntemlerin çalkantı hareketinin irdelenmesinde önemli başarılar yakalaması son derece önem arz etmektedir. Bunun nedeni sıvı çalkantı davranışının gözlenmesinde gerçek veriler bulunmadığından ele alınan deneysel yöntemlerin doğruluğunu nümerik yöntemlerle sağlayacak olmaktadır.

Tez çalışmasında irdelenen durumlar için nümerik verilerin deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğu ele alınan problem için çalkantı hareketinin gözlenmesinde nümerik çalışmanın da sağlıklı sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.

- Deneysel çalışmaların ultrasonik mesafe ölçerle ve görüntü işleme sisteme ile yapılmasında dikkat edilmesi gereken hususlardan bir tanesi de ölçümlerin yapıldığı yerlerin konumlarıdır. Görüntü işleme sistemi ile analizde video görüntüler deney tankının yan tarafından çekilmiş kameralar aracılığıyla elde edilmiştir. Ultrasonik sensörlerle gerçekleştirilen analizde ise ölçümlerin deney tankının ortasından elde edilmiştir. Bu şekilde sensör tarafından okunan değerler kanal genişliğinin az olduğu durumlarda sonuçlar üzerinde etkili olabilmektedir. Bu durumların sonuçlar irdelenirken muhakkak göz önünde bulundurulması gerekmektedir.
- Görüntü işleme sisteminin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesi için dikkat edilmesi gereken iki önemli durum vardır. Bunlardan ilki kameranın görüntüsü alınmak istenen deney tankına uygun bir şekilde konumlandırılmasıdır. Kameranın serbest su yüzeyinden çok az yukarı bir seviyede bile konumlandırması görüntü işleme sisteminin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesine engel olacaktır. Diğer durum ise ortam ışığı ve yeterli aydınlatma sistemidir. Gerçekleştirilen deney kapsamında video çekimleri gün ışığından bağımsız bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Gün ışığının yetersiz olduğu bunun gibi durumlarda gerekli aydınlatma sistemi sağlanmalıdır. Aksi durumda yazılım su-hava arakesitini sağlıklı bir şekilde belirleyemez ve yanlış sonuçlar elde edilir.

## 5.2. Öneriler

Tez çalışması kapsamında elde edilen veriler sayesinde ileride ortaya konacak çalışmalara aşağıda maddeler halinde verilen öneriler sıralanmaktadır.

- Çalkantı probleminin görüntü işleme yöntemiyle deneysel olarak irdelenmesinde kameraların konumlandırılmasına özen gösterilmeli, özellikle kameranın odak merkezinin görüntüsü alınmak istenen sıvının üst kotundan biraz daha aşağıda bir seviyede olmasına özen gösterilmelidir.
- Çalışmanın önemli bir ayağını oluşturan deneysel çalışmalar bu işin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Deneyin planlanma aşamasından uygulama aşamasına kadar tahmin edilen veya edilemeyen birçok problem ortaya çıkabilmektedir. Deney takımının tasarlanma sürecinde öngörülemeyen küçük bir hata bile deney sonuçlarını olduğundan çok daha farklı bir biçimde yorumlanmasına sebebiyet verebilir. Bu problemler deney tankının su sızdırması, deney tankının herhangi bir yüzeyinde eğrilik, tank yüksekliğinin çalkantı hareketi için yetersiz olması başka bir deyişle çalkantı hareketi sonrası deney tankının üzerinden su sızması olarak sıralanabilir. Tüm bu problemler deneysel çalışmaların hem ultrasonik mesafe ölçer sensör hem de görüntü işleme ile elde edilen sonuçların yanlış çıkmasına neden olacaktır. Ayrıca görüntü işleme yöntemiyle ölçüm almak için dikkat edilmesi gereken hususlardan bir tanesi de deney tankına gerçek uzunluğu bilinen referans bir cisim yerleştirilmesidir. Bunun unutulması deneylerin tekrarlanmasına ve çalışmanın zaman açısından problem çıkartmasına neden olacaktır.
- Tez çalışmasının nümerik sonuçlarını elde edilmesinde yazılıma birden fazla parametre girilmektedir. Bu parametrelerin sonuçlar üzerinde önemli etkileri olacağı göz ardı edilmemelidir. FLOW-3D yazılımı için ağ sıklığı ve türbülans modeli seçimi sonuçların sağlıklı bir şekilde elde edilmesi için oldukça önemlidir. Bahsi geçen bu parametrelerin değiştirilmesinin sonuçlar üzerinde etkisi ileriki çalışmalarda irdelenebilir.
- Ultrasonik sensörlerden elde edilen verilerin sıklığı sensörün ölçüm frekansı ayarlanarak gerçekleştirilir. Ölçüm frekansı artırılarak ultrasonik sensörün saniye başına elde edeceği veri sayısı artırılabilir. Bu durumun sağlıklı bir şekilde sağlanmasının sensörün tepki süresinin hızına bağlı olduğu unutulmamalıdır.

- Bu çalışmanın da önemli bir kısmını oluşturan aydınlatma görüntü işleme sisteminin önemli bir elemanıdır ve görüntü kalitesine dolayısıyla sonuçların sağlıklı elde edilmesini sağlayacaktır. Görüntü işleme sistemiyle analizin doğru bir şekilde gerçekleşmesi için ortam ışığının yetersiz olduğu durumlarda mutlaka iyi bir aydınlatma sistemi kurulmalıdır.



## KAYNAKLAR

- Akyildiz, H., and Ünal, E. (2005). Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to the liquid sloshing. *Ocean Engineering*, 32(11-12), 1503-1516.
- Akyıldız, H., and Ünal, N. E. (2006). Sloshing in a three-dimensional rectangular tank: numerical simulation and experimental validation. *Ocean Engineering*, 33(16), 2135-2149.
- Bağcı, T., (2007). *Silindirik tank içerisinde sivi çalkantisi nedeniyle oluşan basınç değişimlerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bai, W., Liu, X., and Koh, C. G. (2015). Numerical study of violent LNG sloshing induced by realistic ship motions using level set method. *Ocean Engineering*, 97, 100-113.
- Battaglia, L., Cruchaga, M., Storti, M., D'Elia, J., Aedo, J. N., and Reinoso, R. (2018). Numerical modelling of 3D sloshing experiments in rectangular tanks. *Applied Mathematical Modelling*, 59, 357-378.
- Cappello, J., Sauret, A., Boulogne, F., Dressaire, E., and Stone, H. A. (2015). Damping of liquid sloshing by foams: from everyday observations to liquid transport. *Journal of Visualization*, 18(2), 269-271.
- Cavalagli, N., Biscarini, C., Facci, A. L., Ubertini, F., and Ubertini, S. (2017). Experimental and numerical analysis of energy dissipation in a sloshing absorber. *Journal of Fluids and Structures*, 68, 466-481.
- Celebi, M. S., and Akyildiz, H. (2002). Nonlinear modeling of liquid sloshing in a moving rectangular tank. *Ocean Engineering*, 29(12), 1527-1553.
- Chen, W., Haroun, M. A., and Liu, F. (1996). Large amplitude liquid sloshing in seismically excited tanks. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 25(7), 653-669.
- Cho, I. H., Choi, J. S., and Kim, M. H. (2017). Sloshing reduction in a swaying rectangular tank by an horizontal porous baffle. *Ocean Engineering*, 138, 23-34.
- Dal, K., (2017). *Eğimli kanalda ardışık baraj yıkılmasının deneysel ve sayısal incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Delorme, L., Colagrossi, A., Souto-Iglesias, A., Zamora-Rodriguez, R., and Botia-Vera, E. (2009). A set of canonical problems in sloshing, Part I: Pressure field in forced roll—comparison between experimental results and SPH. *Ocean Engineering*, 36(2), 168-178.
- Faltinsen, O.M., (1974). A nonlinear theory of sloshing in rectangular tanks. *J. Ship. Res.* 18, 224-241.

- Feng, G. (1973). Dynamic loads due to moving liquid. In *14th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*(p. 409).
- Flow Science Inc., (2017). *Flow-3D User's Manuals*, Santa Fe,N.M.
- Frandsen, J. B. (2004). Sloshing motions in excited tanks. *Journal of computational physics*, 196(1), 53-87.
- Frandsen, J. B., and Borthwick, A. G. L. (2003). Simulation of sloshing motions in fixed and vertically excited containers using a 2-D inviscid  $\sigma$ -transformed finite difference solver. *Journal of Fluids and Structures*, 18(2), 197-214.
- Grotle, E. L., Bihs, H., and Æsøy, V. (2017). Experimental and numerical investigation of sloshing under roll excitation at shallow liquid depths. *Ocean Engineering*, 138, 73-85.
- Hou, L., Li, F., and Wu, C. (2012). A numerical study of liquid sloshing in a two-dimensional tank under external excitations. *Journal of Marine Science and Application*, 11(3), 305-310.
- İnce, E., (2012). *Dikdörtgen kesitli yükseltmiş su tankındaki su çalkantisinin yapının davranışı üzerindeki etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- İnternet: URL: <https://www.microsonic.de>, Son Erişim Tarihi: 17.04.2018.
- Iranmanesh, A., and Passandideh-Fard, M. (2017). A 2D numerical study on suppressing liquid sloshing using a submerged cylinder. *Ocean Engineering*, 138, 55-72.
- İtibar, M.D, (2015). *Küre biçimli tanklardaki çalkantının modellenmesi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Jung, J. H., Yoon, H. S., and Lee, C. Y. (2015). Effect of natural frequency modes on sloshing phenomenon in a rectangular tank. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(3), 580-594.
- Karlı, 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.
- Kim, S. Y., Kim, K. H., and Kim, Y. (2015). Comparative study on pressure sensors for sloshing experiment. *Ocean Engineering*, 94, 199-212.
- Kim, Y. (2001). Numerical simulation of sloshing flows with impact load. *Applied Ocean Research*, 23(1), 53-62.
- Kim, Y., Nam, B. W., Kim, D. W., and Kim, Y. S. (2007). Study on coupling effects of ship motion and sloshing. *Ocean Engineering*, 34(16), 2176-2187.



- Kocaman, S., & Ozmen-Cagatay, H. (2015). Investigation of dam-break induced shock waves impact on a vertical wall. *Journal of Hydrology*, 525, 1-12.
- Kocaman, S., (2007). Baraj yıkılması probleminin deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Kocaman, S., Erdoğan, B., Türker, H.T. ve Dal, K., (2017). Genel Hareketli Obje Kullanarak Dikdörge Bir Tank İçerisindeki Çalkantı Hareketinin Sayısal Modellenmesi. 1. Uluslararası İleri Araştırmalar Ve Mühendislik Kongresi, 16-18 Kasım 2017, Osmaniye, Türkiye.
- Li, Y., and Wang, Z. (2014). An approximate analytical solution of sloshing frequencies for a liquid in various shape aqueducts. *Shock and Vibration*, 2014.
- Lu, Y., Zhou, T., Cheng, L., Zhao, W., and Jiang, H. (2018). Dependence of critical filling level on excitation amplitude in a rectangular sloshing tank. *Ocean Engineering*, 156, 500-511.
- 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.
- Sames, P. C., Marcouly, D., and Schellin, T. E. (2002). Sloshing in rectangular and cylindrical tanks. *Journal of Ship Research*, 46(3), 186-200.
- Sanapala, V. S., Rajkumar, M., Velusamy, K., and Patnaik, B. S. V. (2018). Numerical simulation of parametric liquid sloshing in a horizontally baffled rectangular container. *Journal of Fluids and Structures*, 76, 229-250.
- Sauret, A., Boulogne, F., Cappello, J., Dressaire, E., and Stone, H. A. (2015). Damping of liquid sloshing by foams. *Physics of Fluids*, 27(2), 022103
- Schumann, C. (1998). Calculation of the Motion of Liquid in a Cargo Tank. *SHIP TECHNOLOGIES*, 45(2), 39-46.
- Souto-Iglesias, A., and Botia-Vera, E., *Spheric benchmark test case, sloshing wave Impact problem*, <https://wiki.manchester.ac.uk/spheric/index.php/Test10>, Son Erişim Tarihi: 08.09.2017.
- Souto-Iglesias, A., Botia-Vera, E., and Bulian, G. (2012). Repeatability and two-dimensionality of model scale sloshing impacts. In *The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Tosun, U., Aghazadeh, R., Sert, C., and Özer, M. B. (2017). Tracking free surface and estimating sloshing force using image processing. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 88, 423-433.

Wu, C. H., and Chen, B. F. (2009). Sloshing waves and resonance modes of fluid in a 3D tank by a time-independent finite difference method. *Ocean Engineering*, 36(6-7), 500-510.

Zhang, H., and Sun, B. (2014). Numerical simulation of sloshing in 2D rectangular tanks based on the prediction of free surface. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERDOĞAN, Burak  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 26.05.1988, Mardin  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : 0 (542) 317 25 58  
 Faks : ---  
 e-mail : erdoganburak@yandex.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2013
Lise	Sivas Selçuk Anadolu Lisesi	2006

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-2016	ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ	Araştırma Görevlisi
2016-Halen	MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ.	Öğretim Görevlisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayımlar

- 1.Kocaman, S., Erdoğan, B., Türker, H.T. ve Dal, K., (2017). Genel Hareketli Obje Kullanarak Dikdörgen Bir Tank İçerisindeki Çalkantı Hareketinin Sayısal Modellenmesi. *1. Uluslararası İleri Araştırmalar Ve Mühendislik Kongresi*, 16-18 kasım 2017, Osmaniye, Türkiye

### Hobiler

Yüzme, Futbol, Tenis

**DİZİN****A**

Açısal Kalibrasyon · 19,21

**Ç**

Çalkantı ·  
1,2,5,7,8,9,10,11,28,29,31,32,  
55,62,63

**F**

FLOW-3D 9, 24, 27, 57, 60,63  
Fps ( frame per second) 17

**G**

Görüntü işleme 13, 16, 17, 18,  
19, 22, 30, 36, 39, 42, 44, 46,

47, 48, 49, 50, 51, 52, 61, 62,  
63, 64

**İ**

*Image pro plus* 18

**K**

Kalibrasyonlar · 19

**N**

Nümerik 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11,  
24,25,43,45,46,47,48,49,50,51,  
,55,56,59,60,61,62,63

**M**

Metrik kalibrasyon · 20,21

**R**

RANS · 2, 9, 25

**S**

serbest yüzey · 3, 5, 19,25

**U**

Ultrasonik Sensör · 12,13,37,61

**Y**

Yatay kalibrasyon · 19



**TEKNOVERSİTE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

