Burak ERDOĞAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞUBAT 2024

İSKENDERUN TEKNİK
ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA
TEZİ

ENGEL YERLEŞİMLERİNİN SIVI ÇALKANTISININ SÖNÜMLENMESİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Burak ERDOĞAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ŞUBAT 2024

ENGEL YERLEŞİMLERİNİN SIVI ÇALKANTISININ SÖNÜMLENMESİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Burak ERDOĞAN

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2024

Burak ERDOĞAN tarafından hazırlanan "ENGEL YERLEŞİMLERİNİN SIVI ÇALKANTISININ SÖNÜMLENMESİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Selahattin KOCAMAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ……
…….……..

Başkan: Prof. Dr. Hatice ÇAĞATAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

...……
……

Üye: Prof. Dr. Mustafa DEMİRCİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……
……

Üye: Prof. Dr. Neslihan SEÇKİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……
……

Üye: Doç. Dr. Cuma KARAKUŞ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. .....……
……

Tez Savunma Tarihi: 23/02/2024

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

……..…….

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- ☑ 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 çalışmasında 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.

İmza
Burak ERDOĞAN
23/02/2024

ENGEL YERLEŞİMLERİNİN SIVI ÇALKANTISININ SÖNÜMLENMESİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Burak ERDOĞAN

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Şubat 2024

ÖZET

Tez çalışmasında, dikdörtgen kesitli bir deney tankı içerisindeki sıvının çalkantı hareketleri incelenmiştir. Frekans kontrollü bir sarsma tablası kullanılarak, deney tankının engelsiz ve engel bulunan koşullarında sıvı çalkantısının dinamiklerini analiz etmek için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Engelsiz durum için, farklı uyarma frekansları, uyarma genlikleri ve doluluk seviyelerinde deneysel çalışmalar yürütülmüş; engel bulunan durumlarda ise, tank tabanına yerleştirilen farklı sayı ve dizilimdeki engellerin çalkantı davranışına etkileri, çeşitli uyarma frekansları ve sıvı derinlikleri altında araştırılmıştır. Deney tankı ile birlikte hareket etmesi sağlanan akıllı telefon kamerası ile kaydedilen video görüntüler sayesinde, sıvı çalkantı hareketleri görüntü işleme teknikleri kullanılarak detaylıca analiz edilebilmiştir. Su seviyesi değişimlerine ait farklı noktalarda sanal derinlik ölçer ile elde edilen deneysel ölçümler, lineer teoriye dayanan analitik çözümler ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RONS) denklemlerine dayanan sayısal model sonuçları ile kıyaslanmıştır. Sayısal analizler, serbest yüzeyli akımların çözümünde başarılı sonuçlar veren FLOW-3D HYDRO yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında, çalkantı hareketinin incelenmesi sürecinde geleneksel sensör ölçümlerinin kısıtlamalarına karşın, zamana bağlı serbest su yüzeyi değişimlerini analiz etmek için özgün bir görüntü işleme algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma, zamanla değişen çalkantı hareketinin video kayıtlarından elde edilen görüntülerdeki piksellerin detaylı analizini yaparak, tank boyunca her bir noktada meydana gelen maksimum veya minimum su seviyelerinin tek bir görüntü üzerinde belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Çok sayıda görüntüyü tek bir görüntüye indirgeyerek zaman içindeki çalkantı davranışını daha anlaşılır ve basit bir şekilde gösteren bu yeni metodoloji, akışkanlar dinamiği ve mühendislik uygulamalarındaki birçok problemin çözümüne katkı sağlayacaktır. Tez kapsamında engelsiz ve engel bulunan koşullar için gerçekleştirilen deneylerde çalkantı davranışının analizlerinde bu yeni yaklaşım temel alınmıştır.

Anahtar Kelimeler : Çalkantı hareketi, görüntü işleme, FLOW-3D HYDRO, düşey engel

Sayfa Adedi : 161

Danışman : Prof. Dr. Selahattin KOCAMAN

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BAFFLE ARRANGEMENTS ON THE DAMPING OF LIQUID SLOSHING

(Ph.D. Thesis)

Burak ERDOĞAN

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY

INSTITUE OF GRADUATE STUDIES

February 2024

ABSTRACT

In this dissertation, liquid sloshing motion in a rectangular tank was investigated. Using a frequency-controlled shake table, a series of experiments were conducted to analyze the dynamics of liquid sloshing in the tank with and without baffles. In the absence of baffles, experimental studies were carried out at various excitation frequencies, excitation amplitudes, and fill levels; whereas, in the presence of vertical baffles, the effect of different number and arrangement of baffles placed on the tank bottom on sloshing behavior was examined under various excitation frequencies and liquid depths. Thanks to the video images recorded with the smartphone camera that moved with the experimental tank, liquid sloshing motions could be analyzed in detail using image processing techniques. Experimental measurements of water level variations obtained with virtual depth gauge at different points were compared with analytical solutions based on linear theory and numerical model results based on Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations. Numerical analyses were performed using FLOW - 3D HYDRO software, which gives successful results in solving free surface flows. In the study, a novel image processing algorithm was developed to analyze time-dependent free water surface variations, despite the limitations of traditional sensor measurements during the examination of sloshing motion. This algorithm provides detailed analysis of the pixels in the images obtained from the video recordings of the time-varying sloshing motion, making it possible to determine the maximum or minimum water levels occurring at each point throughout the tank on a single image. This new methodology, which shows the sloshing behavior over time in a more comprehensible and simple way by reducing a large number of images to a single image, will contribute to the solution of many problems in fluid dynamics and engineering applications. Within the scope of the thesis, this new approach was taken as the basis for understanding and analyzing the sloshing behavior in the experiments conducted with and without baffled conditions.

Key Words : Sloshing motion, image processing, FLOW-3D HYDRO, vertical baffle
Page Number : 161
Supervisor : Prof. Dr. Selahattin KOCAMAN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında sadece bir danışman hocadan çok, ailemin bir büyüğü gibi hissettiren, bilgi ve tecrübelerini benimle cömertçe paylaşan değerli hocam Prof. Dr. Selahattin KOCAMAN'a ve değerli ailesine sonsuz minnettarlığımı sunarım.

Her zaman yanımda olan, sabrı, anlayışı ve sonsuz desteğiyle en zor zamanlarımda bile bana güç veren sevgili eşim İrem ERDOĞAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Onun varlığı, bu uzun ve meşakkatli yolculukta bana ilham oldu.

Tez çalışmam sırasında bana sağladığı sonsuz manevi destek ve emekleri için Prof. Dr. Ayşe YAVUZ KOCAMAN'a sonsuz minnettarlığımı sunarım.

Deneysel çalışmalarımın gerçekleşmesi için bana sadece bir çalışma ortamı sağlamakla kalmayıp, deprem sürecinde ilk günden itibaren birçok insana kapılarını ve kalplerini açan, desteği ve emeğiyle çalışmanın önemli bir parçası haline gelen Kemal TÜYGÜZ ve değerli eşi Çiğdem TÜYGÜZ'e derin minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Doç. Dr. Sinan ERDOĞAN'a, tezimin tamamlanması sürecinde bana gösterdiği destek ve motivasyon için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmama üstün bilgi ve becerisiyle katkıda bulunan Prof. Dr. Hakan Tacattin TÜRKER'e sonsuz şükranlarımı iletiyorum.

IOG Mühendislik ve değerli çalışanlarına, araştırmamda kritik bir öneme sahip olan FLOW - 3D HYDRO yazılımına erişim sağlamam hususunda yardımları için şükranlarımı sunuyorum.

6 Şubat depreminde hayatını kaybeden tüm deprem şehitlerini saygı ve rahmetle anıyorum. Bu vesileyle, depremde hayatını kaybeden Cansu KİMYECİ, Nurten KİMYECİ ile çok değerli iş arkadaşım Mehmet EREN ve sevgili ailesini özellikle yâd etmek istiyorum; onların anıları, kalbimizde sonsuza kadar yaşayacak.

Ve son olarak, tüm eğitim hayatım boyunca beni destekleyen, fedakârlıklarıyla bugünlere gelmeme yardımcı olan kıymetli aile üyelerime ve dostlarıma teşekkür etmek istiyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xvi

1. GİRİŞ 1

1.1. Çalkantı: Tanımı, Türleri, Ölçüm Yöntemleri 1

1.2. Çalkantı Hareketinin Kontrolü ve Yapısal Etkilerinin Azaltılması Yöntemleri 4

1.3. Çalkantı Hareketinin Modellenmesi ve Sayısal Analiz Yaklaşımları 7

1.4. Tez Çalışmasının Amaç ve Kapsamı 9

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 11

3. MATERYAL VE METOD 37

3.1. Çalkantı Problemini İdare Eden Denklemler 37

3.2. Çalkantı Probleminin Analitik Çözümü 43

3.2.1. Lineer teori 43

3.3. FLOW-3D HYDRO Yazılımı 45

3.3.1. k-ε Türbülans modeli 49

3.4. Çalkantı Doğal Frekansına İlişkin Teorik Denklemler 51

3.4.1. Dikdörtgen tank içerisindeki sıvının doğal frekans hesabı 51

3.5. Görüntü İşleme Analizi 52

3.5.1. Görüntüleme sisteminin gereksinimleri 53

3.5.2. Görüntü işleme ve analiz aşamaları 58

Sayfa

4. BULGULAR VE TARTIŞMA 63

4.1. Deney Düzeneği ve Yöntemi 63

4.1.1. Çalkantı hareketinin oluşma mekanizması 65

4.1.2. Deneysel ölçüm sistemi 66

4.1.3. Çalışmaların özeti 73

4.2. Farklı Doluluk Oranları İçin Çalkantı Davranışının Lineer Teori ve Deneysel Yöntemle İncelenmesi 75

4.3. Uyarma Genliğinin Çalkantı Davranışına Etkisinin Lineer Teori ve Deneysel Yöntem ile İncelenmesi 82

4.4. Çalkantı Hareketinde Maksimum Su Seviyelerinin Görüntü İşleme Yöntemi ile Belirlenmesi 85

4.5. Çalkantı Davranışları Üzerinde Mod Frekanslarının Etkisinin Sayısal Analizi 90

4.5.1. Mod frekansları ve çalkantı davranışının değerlendirilmesi 90

4.5.2. Baskın mod frekanslarında çalkantı davranışının görsel temsilleri 93

4.6. Çalkantı Analizlerinde Görüntü İşleme ve Sayısal Yöntemlerin Karşılaştırmalı İncelenmesi 95

4.7. Farklı Engel Yerleşimlerinin Çalkantı Davranışları Üzerindeki Etkilerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi 103

4.7.1. B(20) engel diziliminde çalkantı hareketinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi 105

4.7.2. B(10 - 30) engel diziliminde çalkantı hareketinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi 115

4.7.3. B(10 - 20 - 30) engel diziliminde çalkantı hareketinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi 124

4.7.4. B(20) , B(10 - 30) ve B(10 - 20 - 30) engel dizilimlerinin çalkantı hareketi üzerine etkilerinin karşılaştırmalı analizi 133

4.7.5. İkili engel yerleşimlerinin sıvı çalkantısı davranışları üzerindeki etkisinin incelenmesi 141

4.7.6. Üçlü engel yerleşimlerinin sıvı çalkantısı davranışları üzerindeki etkisinin incelenmesi 143

Sayfa

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 145
5.1. Sonuçlar 145
5.2. Öneriler 149
KAYNAKLAR 150
DİZİN 161

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 1.1. Çalkantı sönümleme mekanizmaları [7] 5

Çizelge 1.1. (Devam) Çalkantı sönümleme mekanizmaları [7] 6

Çizelge 4.1. Farklı doluluk oranları için sıvının doğal ve tankın uyarma frekansları 76

Çizelge 4.2. Uyarma genliği ve frekansına bağlı deney parametreleri 82

Çizelge 4.3. Farklı mod sayıları için sıvının doğal frekans değerleri 90

Çizelge 4.4. Çalkantı hareketinin incelenmesinde değerlendirilen koşullar 90

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Çalkantının akışkanın hareketine bağlı olarak sınıflandırılması [3] 1

Şekil 3.1. Çalkantı hareketinin şematik diyagramı 43

Şekil 3.2. Hesaplama hücresine etkiyen değişkenler [41] 45

Şekil 3.3. VOF yönteminin şematik gösterimi 47

Şekil 3.4. Çalkantı davranışı için görüntü işleme sisteminin kullanımı [109] 53

Şekil 3.5. Görüntüde oluşan açısal bozulmalar a) asıl görüntü b) dış bükey bozulma c) içbükey bozulma [41] 60

Şekil 3.6. Kamera pozisyonundan kaynaklanan çekim hataları [135] 62

Şekil 4.1. Deney düzeneği 63

Şekil 4.2. Deney düzeneği ve kamera yerleşiminin şematik gösterimi (a) ön görünüş (b) yan görünüş 64

Şekil 4.3. Herhangi bir zamanda su derinliğinin sanal derinlik ölçer ile belirlenmesi [41] 68

Şekil 4.4. Kesit boyunca oluşan maksimum dalga yüksekliklerinin (MAKS) belirlenmesi 70

Şekil 4.5. Kesit boyunca oluşan minimum dalga yüksekliklerinin (MIN) belirlenmesi 71

Şekil 4.6. MAKS-MIN görüntülerinin belirlenmesi (a) MAKS (b) MIN (c) birleştirilmiş renkli görüntü (d) MAKS-MIN 72

Şekil 4.7. P5 noktasının şematik gösterimi 76

Şekil 4.8. h/L = 0,175 ve A = 6 mm uyarma genliğinde (a) f_e/f_1 = 1,10 ve; (b) f_e/f_1 = 0,90 uyarma frekansları için tank duvarına 5 cm uzaklıktaki sıvı yüzeyi değişimi 78

Şekil 4.9. h/L = 0,20 ve A = 6 mm uyarma genliğinde (a) f_e/f_1 = 1,10 ve; (b) f_e/f_1 = 0,90 uyarma frekansları için tank duvarına 5 cm uzaklıktaki sıvı yüzeyi değişimi 79

Şekil 4.10. h/L = 0,225 ve A = 6 mm uyarma genliğinde (a) f_e/f_1 = 1,10 ve; (b) f_e/f_1 = 0,90 uyarma frekansları için tank duvarına 5 cm uzaklıktaki sıvı yüzeyi değişimi 80

Şekil 4.11. h/L = 0,25 ve A = 6 mm uyarma genliğinde (a) f_e/f_1 = 1,10 ve; (b) f_e/f_1 = 0,90 uyarma frekansları için tank duvarına 5 cm uzaklıktaki sıvı yüzeyi değişimi 81

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.12. h/L = 0,25 ve f_e = 1,30 f_1 uyarma frekansında (a) A = 5 mm; (b) A = 8,5 mm ve (c) A = 12 mm uyarma genlikleri için tank duvarına 5 cm uzaklıktaki sıvı yüzeyi değişimi 84

Şekil 4.13. Çalkantı hareketi sonucunda sıvı yüzeyinde oluşan maksimum dalga yüksekliklerinin (MAKS) sıvı derinliklerine göre dağılımı (a) f_e = 0,90 f_1 ve (b) f_e = 1,10 f_1 87

Şekil 4.14. Çalkantı hareketi sonucunda sıvı yüzeyinde oluşan maksimum dalga yüksekliklerinin (MAKS) uyarma frekanslarına göre dağılımı (a) h = 6 cm ve (b) h = 8 cm 88

Şekil 4.15. Çalkantı hareketi sonucunda sıvı yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum dalga yüksekliklerinin (MAKS-MIN) uyarma frekanslarına göre dağılımı (a) h = 6 cm ve (b) h = 8 cm 89

Şekil 4.16. h/L = 0,25 ve f_e/f_1 oranının 0,20 - 3,267 aralığında olduğu uyarma frekanslarında (a) A = 1 mm (b) A = 5 mm ve (c) A = 10 mm uyarma genlikleri için serbest sıvı yüzeyinde meydana gelen maksimum dalga yükseklikleri 92

Şekil 4.17. h/L = 0,25 (a) A = 1 mm, $f_e = f_1$ ve $f_e = f_3$ (b) A = 5 mm, $f_e = f_1$ ve $f_e = f_3$ ve (c) A = 10 mm, $f_e = f_1$ ve $f_e = f_3$ uyarma genliği ve frekans koşullarında tankın sol duvarına 1 cm uzaklıkta sıvının serbest yüzeyinde meydana gelen maksimum dalga yükseklikleri ve oluşma anları 94

Şekil 4.18. Deney düzeneğinin tasarımı ve su seviyesinin zaman içindeki değişimlerinin tespit edildiği ölçüm noktaları 95

Şekil 4.19. Farklı ağ aralıklarının çalkantı davranışına etkisi 96

Şekil 4.20. h = 10 cm sıvı derinliği için f_e = 1,10 f_1 uyarma frekansında ve A = 5,5 mm uyarma genliğinde (a) P1 noktasında (b) P5 noktasında ve (c) P10 noktasında sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması 99

Şekil 4.21. h = 10 cm sıvı derinliği için f_e = 0,90 f_1 uyarma frekansında ve A = 5,5 mm uyarma genliğinde (a) P1 noktasında (b) P5 noktasında ve (c) P10 noktasında sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması 100

Şekil 4.22. h = 12 cm sıvı derinliği için f_e = 1,10 f_1 uyarma frekansında ve A = 5,5 mm uyarma genliğinde (a) P1 noktasında (b) P5 noktasında ve (c) P10 noktasında sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması 101

Şekil 4.23. h = 12 cm sıvı derinliği için f_e = 0,90 f_1 uyarma frekansında ve A = 5,5 mm uyarma genliğinde (a) P1 noktasında (b) P5 noktasında ve (c) P10 noktasında sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması 102

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.24. Farklı engel dizilimlerinin ve engelsiz durumun şematik olarak gösterimi . 104

Şekil 4.25. $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansı ve farklı sıvı derinliklerinde (h = 4 cm – 8 cm) maksimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS) (a) B(20) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda 107

Şekil 4.26. $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansı ve farklı sıvı derinliklerinde (h = 4 cm – 8 cm) maksimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS) (a) B(20) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda 108

Şekil 4.27. h = 6 cm sıvı derinliğinde ve farklı uyarma frekanslarında ($f_e = 0{,}80\ f_1 – 1{,}10\ f_1$) maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN) (a) B(20) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda ... 110

Şekil 4.28. h = 8 cm sıvı derinliğinde ve farklı uyarma frekanslarında ($f_e = 0{,}80\ f_1 – 1{,}10\ f_1$) maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN) (a) B(20) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda ... 111

Şekil 4.29. h = 6 cm sıvı derinliği ve $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansında (a) P1, (b) P10, (c) P20 ve h = 6 cm sıvı derinliği ve $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansında (d) P1, (e) P10, (f) P20 noktaları için B(20) engel diziliminde sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması 113

Şekil 4.30. h = 8 cm sıvı derinliği ve $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansında (a) P1, (b) P10, (c) P20 ve h = 8 cm sıvı derinliği ve $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansında (d) P1, (e) P10, (f) P20 noktaları için B(20) engel diziliminde sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması 114

Şekil 4.31. $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansı ve farklı sıvı derinliklerinde (h = 4 cm – 8 cm) maksimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS) (a) B(10 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda 116

Şekil 4.32. $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansı ve farklı sıvı derinliklerinde (h = 4 cm – 8 cm) maksimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS) (a) B(10 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda 117

Şekil 4.33. h = 6 cm sıvı derinliğinde ve farklı uyarma frekanslarında ($f_e = 0{,}80\ f_1 – 1{,}10\ f_1$) maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN) (a) B(10 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda 119

Şekil 4.34. h = 8 cm sıvı derinliğinde ve farklı uyarma frekanslarında ($f_e = 0{,}80\ f_1 – 1{,}10\ f_1$) maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN) (a) B(10 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda 120

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.35. h = 6 cm sıvı derinliği ve f_e = 1,10 f_1 uyarma frekansında (a) P1, (b) P10, (c) P20 ve h = 6 cm sıvı derinliği ve f_e = 0,90 f_1 uyarma frekansında (d) P1, (e) P10, (f) P20 noktaları için B(10 - 30) engel diziliminde sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması 122

Şekil 4.36. h = 8 cm sıvı derinliği ve f_e = 1,10 f_1 uyarma frekansında (a) P1, (b) P10, (c) P20 ve h = 8 cm sıvı derinliği ve f_e = 0,90 f_1 uyarma frekansında (d) P1, (e) P10, (f) P20 noktaları için B(10 - 30) engel diziliminde sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması 123

Şekil 4.37. f_e = 0,90 f_1 uyarma frekansı ve farklı sıvı derinliklerinde (h = 4 cm – 8 cm) maksimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS) (a) B(10 - 20 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda 125

Şekil 4.38. f_e = 1,10 f_1 uyarma frekansı ve farklı sıvı derinliklerinde (h = 4 cm – 8 cm) maksimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS) (a) B(10 - 20 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda 126

Şekil 4.39. h = 6 cm sıvı derinliğinde ve farklı uyarma frekanslarında (f_e = 0,80 f_1 – 1,10 f_1) maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN) (a) B(10 - 20 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda 128

Şekil 4.40. h = 8 cm sıvı derinliğinde ve farklı uyarma frekanslarında (f_e = 0,80 f_1 – 1,10 f_1) maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN) (a) B(10 - 20 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda 129

Şekil 4.41. h = 6 cm sıvı derinliği ve f_e = 1,10 f_1 uyarma frekansında (a) P1, (b) P10, (c) P20 ve h = 6 cm sıvı derinliği ve f_e = 0,90 f_1 uyarma frekansında (d) P1, (e) P10, (f) P20 noktaları için B(10 - 20 - 30) engel diziliminde sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması 131

Şekil 4.42. h = 8 cm sıvı derinliği ve f_e = 1,10 f_1 uyarma frekansında (a) P1, (b) P10, (c) P20 ve h = 8 cm sıvı derinliği ve f_e = 0,90 f_1 uyarma frekansında (d) P1, (e) P10, (f) P20 noktaları için B(10 - 20 - 30) engel diziliminde sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması 132

Şekil 4.43. h = 6 cm sıvı derinliğinde farklı engel dizilimlerinin (a) f_e = 0,90 f_1 ve (b) f_e = 1,10 f_1 uyarma frekanslarında maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN) 134

Şekil 4.44. h = 8 cm sıvı derinliğinde farklı engel dizilimlerinin (a) f_e = 0,90 f_1 ve (b) f_e = 1,10 f_1 uyarma frekanslarında maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN) 135

Şekil 4.45. h = 6 cm sıvı derinliği için f_e = 1,10 f_1 uyarma frekansı altında (a) farklı engel dizilimlerinde (b) farklı engel dizilimleri ve engelsiz durumda P1 noktasında sıvı seviyesi değişiminin sayısal olarak incelenmesi 137

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.46. h = 6 cm sıvı derinliği için $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansı altında (a) farklı engel dizilimlerinde (b) farklı engel dizilimleri ve engelsiz durumda P1 noktasında sıvı seviyesi değişiminin sayısal olarak incelenmesi 138

Şekil 4.47. h = 8 cm sıvı derinliği için $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansı altında (a) farklı engel dizilimlerinde (b) farklı engel dizilimleri ve engelsiz durumda P1 noktasında sıvı seviyesi değişiminin sayısal olarak incelenmesi 139

Şekil 4.48. h = 8 cm sıvı derinliği için $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansı altında (a) farklı engel dizilimlerinde (b) farklı engel dizilimleri ve engelsiz durumda P1 noktasında sıvı seviyesi değişiminin sayısal olarak incelenmesi 140

Şekil 4.49. $f_e = 0{,}85\ f_1$ uyarma frekansında (a) h = 6 cm ve (b) h = 9 cm sıvı derinliklerinde ikili engel yerleşimlerinin maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimlerine (MAKS-MIN) etkisi 142

Şekil 4.50. $f_e = 0{,}85\ f_1$ uyarma frekansında (a) h = 6 cm ve (b) h = 9 cm sıvı derinliklerinde üçlü engel yerleşimlerinin maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimlerine (MAKS-MIN) etkisi 144

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
ω	Açısal frekans
ω_n	Doğal frekans (açısal)
f_e	Dış etki frekansı
f_n	Doğal frekans (çizgisel)
A	Uyarma genliği
h	Sıvı derinliği
η	Sıvı seviyesi değişimi
f_i	Bir akışkan hacmi için reynolds gerilmeleri
g	Yerçekimi ivmesi
u_i	i doğrultusundaki akım hızı
V_F	Her bir hücredeki akışkanın sahip olduğu hacim
ε	Türbülans sönümlenme oranı

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
FAVOR	Fractional Area/Volume Obstacle Representation
FPS	Frame Per Second
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RONS	Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes
VOF	Volume of Fluid-Akışkan Hacmi
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

1. GİRİŞ

1.1. Çalkantı: Tanımı, Türleri, Ölçüm Yöntemleri

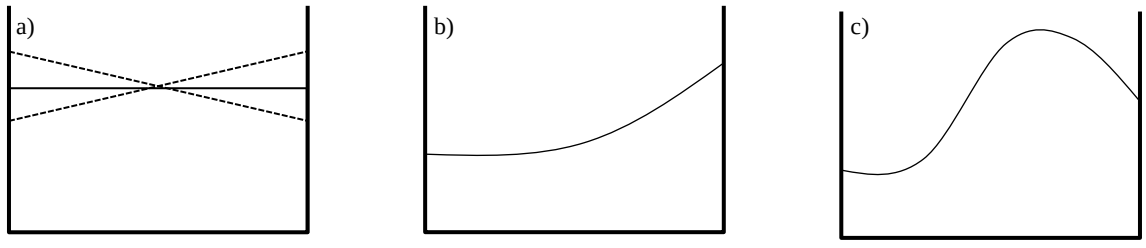
Çalkantı, kısmen dolu bir tanktaki sıvının, dış kuvvetler (örneğin bir aracın hızlanması, yavaşlaması, dönmesi veya bir gemideki dalga etkisiyle) etkisi altında serbest yüzeyinde oluşan hareket olarak tanımlanabilir. Tam dolu tanklarda serbest yüzey bulunmadığı için bu tür bir çalkantı hareketi meydana gelmez. Çalkantı davranışı; tank içerisindeki sıvının yaptığı harekete, doluluk oranına, tankın maruz kaldığı dış etkinin yapısına, tankın geometrisine ve sıvının özelliklerine göre farklılıklar gösterebilir. Tankı harekete geçiren dış etkilerin yönüne göre, çalkantı hareketi üç farklı kategori altında ele alınabilir [1,2].

1. Yanal Çalkantı: Genellikle sıvı tankının yan yüzeylerine yatay yönde etkiyen yük etkisiyle oluşmaktadır. En sık görülen çalkantı davranışlarından birisidir.

2. Dikey Çalkantı: Deney tankı içerisinde yer alan sıvının, tankın tabanı ve tavanına doğru olacak şekilde dikey yönlü hareketi neticesinde ortaya çıkmaktadır.

3. Rotasyonel Çalkantı: Dönme hareketi sonucu ortaya çıkan bu davranışta sıvı tank etrafında dönerek çalkantı davranışı gösterir.

Çalkantı hareketlerinin sınıflandırılmasındaki farklı bir yaklaşım da akışkanın hareket biçimlerine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, Şekil 1.1'de gösterildiği gibi, akışkanın tank içerisinde yaptığı çeşitli hareket türlerini temel almaktadır [1].



Şekil 1.1. Çalkantının akışkanın hareketine bağlı olarak sınıflandırılması [3]

İlk durum (a), sıvının serbest yüzeyinin düz olduğu davranışı temsil etmektedir. Bu koşulda çalkantı hareketinin analizi doğrusal denklemler sayesinde gerçekleştirilebilir. Yüksek uyarma genliğine sahip hareketlerde veya tankın hareket frekansı ile sıvının doğal frekansının örtüştüğü durumlarda ise sıvı davranışı doğrusallıktan sapmaktadır (b). Bu durumda ise doğrusal kabulün geçerliliği ortadan kalkmakta ve daha karmaşık matematiksel modellerin kullanılması zorunlu hale gelmektedir. Son olarak (c) ile temsil edilen davranışta ise, akışkan hızındaki ani sapmalar ve gezen dalga yapısı dikkat çekmektedir. Bu tür çalkantı hareketinin tanımlanması, diğerlerine nazaran zor olup, bu durumun çözümlenmesi için kapalı formda matematiksel modellerin ve sayısal simülasyonların kullanılması zaruri olmaktadır [1].

Çalkantı hareketinin neden olduğu olumsuzluklar, çeşitli mühendislik dallarında önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Bu alanlar arasında inşaat, uzay, gemi ve nükleer mühendisliği öne çıkanlardan bazılarıdır. Çalkantı hareketi, gemi balast tanklarından uzay araçlarının yakıt sistemlerine ve nükleer reaktörlere kadar bir dizi uygulamada önemli bir rol oynamaktadır. Sıvı yük taşıyan gemilerde, kara araçlarında ve uçaklarda yaygın olarak gözlemlenen bu olgu, çok yönlü ve geniş kapsamlı bir mühendislik sorunu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bütün bunlar çalkantı hareketini geniş kapsamlı ve çok yönlü bir mühendislik problemi yapmaktadır. Bu nedenle, bu tür olumsuz etkilerin önceden tespit edilmesi ve sıvı tanklarının stabilitesini tehdit eden bu problemin önlenmesi büyük önem taşımaktadır. Söz konusu yaklaşım hem güvenlik hem de işlevsellik açısından kritik bir gerekliliktir [3] .

Bir tank içerisinde bulunan sıvı sonsuz sayıda doğal frekans değerine sahiptir. Tanktaki sıvının doğal frekansına eşit veya bu frekansa yakın bir frekansta dışsal uyarılar meydana geldiğinde, tank içerisinde bulunan sıvı şiddetli çalkantı hareketleri yapmaktadır [4]. Tankın hareket frekansı ve sıvının herhangi bir doğal frekansının eşleştiği bu durum rezonans olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte çalkantı problemi ile ilgili yapılan çalışmaların büyük bir bölümü, sıvının birinci mod doğal frekans değeri temel alınarak gerçekleştirilmiştir.

Tank içerisindeki sıvının oluşturduğu çalkantı hareketi, tankın yüzeylerinde ek dinamik etkiler yaratmaktadır ve bu sebeple hareket davranışının önceden tahmin edilmesi gerekmektedir. Çalkantı hareketi, sıvının doğal frekans değeri ile tankın uyarma frekans değerinin birbirine denk geldiği durumlarda agresif bir davranış sergilemektedir. Bu yüzden, çalkantı potansiyeli taşıyan tanklar ve akışkan taşıyan araçlar için, çalkantıdan kaynaklanabilecek olumsuz etkileri minimize etmek amacıyla, akışkanın doğal frekanslarını potansiyel rezonans koşullarından farklı seviyelerde tutmak, tasarım sürecinde önemli bir rol oynamaktadır [5].

Çalkantı probleminin anlaşılabilmesi, öncelikle iki temel değişkenin belirlenmesiyle mümkün olmaktadır. Bunlardan ilki, çalkantı hareketi sebebiyle ortaya çıkan serbest sıvı yüzeyi kotundaki değişim, ikincisi ise çalkantı hareketinin tank yüzeylerinde yaratacağı hidrodinamik kuvvetlerin tespitidir.

Çalkantı deneylerinde kullanılan serbest yüzey ölçüm yöntemleri arasında kapasitif problar, ultrasonik sensörler, lazerler ve optik kameralar bulunur. Kapasitif problar, elektrotlar arasındaki değişen sıvı seviyesini algılayarak oldukça hassas ölçümler yapabilirler. Ancak bu yöntem temas gerektirir ve eğer akışkan iletken ise bazı sorunlara yol açabilir. Ultrasonik sensörler, dalgaların uçuş süresinden faydalanarak temas gerektirmeyen ölçümler sunarken, yoğun çalkantı hareketi sırasında ölçüm güvenilirlikleri azalabilir. Lazer tabanlı sistemler, doppler etkisini kullanarak yine temassız bir şekilde sıvı seviyesini ölçerler. Fakat bu sistemler maliyetli olabilir ve aşırı çalkantı durumlarında performansları düşebilir. Son olarak optik kameralar, temassız bir yöntem olan video çekimi ile tüm yüzeydeki çalkantı hareketinin analizini sağlarlar. Ancak bu analiz gerçek zamanlı olmadığı için verilerin işlenmesi için ek süre gerektirebilir [6].

Çalkantı kuvveti ölçüm yöntemlerinde ise yük hücreleri ve basınç sensörleri kullanılmaktadır. Yük hücreleri, çalkantı sırasında üretilen kuvveti ölçerek güvenilir veri sağlar. Ancak deney tankında sıvı varlığında ve yokluğunda olmak üzere iki aşamalı ölçüm yapılması gerekebilir. Basınç sensörleri, konteyner duvarlarında farklı konumlarda toplanan basınçların entegrasyonu ile akışkan kuvvetini tahmin eder ve güvenilir ölçümler yapar. Ancak birden fazla basınç sensörünün kullanımını gerektirebilir [6].

1.2. Çalkantı Hareketinin Kontrolü ve Yapısal Etkilerinin Azaltılması Yöntemleri

Çalkantı hareketine ilişkin yapılan çalışmalar, esas olarak iki durumu incelemeye yönelmektedir. Bunlardan ilki, çalkantının yaratabileceği olumsuz etkilerin ortadan kaldırılması ya da en aza indirgenmesi, ikincisi ise çalkantı hareketinin sönümleyici özelliğinin yapısal titreşimleri azaltmak amacıyla kullanılmasına yöneliktir [7].

Çalkantı hareketinin yaratabileceği olumsuz etkiler, sıvıların viskozite etkisini kullanarak, sıvı yüzeyine yüzer nesneler yerleştirerek ve tank içerisine bölme yerleştirerek kontrol altına alınmaya çalışılmaktadır. Sıvıların vizkozite özelliğini kullanarak çalkantı hareketini kontrol altına almak için uygulanan yöntemde, tankın alt katmanındaki sıvının üzerine, viskozitesi daha yüksek olan başka bir sıvı eklenir. Bu strateji, üst katmandaki viskozitesi daha yüksek sıvının, alt katmandaki sıvının çalkantı hareketini etkin bir şekilde azaltmasını sağlamaktadır. Özellikle çift katmanlı sıvı sistemlerinde uygulandığında, bu yöntem oldukça etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bir diğer sıvı çalkantısı kontrol yöntemi olarak, sıvı yüzeyine yüzer nesneler yerleştirmek tercih edilmektedir. Bu yaklaşımın etkinliği, yapılan çalışmalarla desteklenmiştir. Araştırmalar, yüzeyde yer alan tek bir tabakanın bile enerji kaybına yol açarak çalkantının genliğini azaltmada önemli bir rol oynayabileceğini göstermiştir. Bu yöntemler arasında, özellikle sıvı tanklarına ilave engeller eklemek en çok tercih edilen ve yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Zheng ve diğerlerinin [7] gerçekleştirdiği çalışmada, sıvı tanklarına eklenen engellerin detayları, Çizelge 1.1'de ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Bu tabloda, tank içerisine eklenen engel türleri, uygulanan araştırma metodolojileri, kullanılan sayısal analiz teknikleri ve tankın geometrisi gibi çeşitli değişkenler göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen araştırmalar derinlemesine incelenmiştir. Engellerin eklenmesi, tank içerisindeki sıvının hareketini fiziksel olarak kısıtlamakta ve böylece çalkantının şiddetini ve etkisini azaltmaktadır.

Çizelge 1.1. Çalkantı sönümleme mekanizmaları [7]

Engel türü	Araştırma yöntemi	Sayısal Yöntem	Tank geometrisi	Yazar
Yarı gözenekli engeller	Analitik yöntem	-	Dairesel silindirik tank	Miao ve diğerleri [8]
Yatay ve düşey engeller	Analitik yöntem/deneysel çalışma	-	Dikdörtgen tank	Goudarzi ve diğerleri [9]
Çoklu rijit engeller	Analitik yöntem	-	Dairesel silindirik konteyner	Wang ve diğerleri [10]
Delikli yüzer plakalar	Deneysel çalışma	-	Rjit dikdörtgen tank	Yu ve diğerleri [11]
Düşey engeller	Deneysel çalışma	-	Dikdörtgen tank	Chu ve diğerleri [12]
Delikli düşey engeller	Deneysel çalışma	-	Dikdörtgen tank	Xue ve diğerleri [13]
Yatay/düşey/halka bölmeler	Deneysel çalışma	-	3-boyutlu kare tank	Panigrahy ve diğerleri [14]
Horivert engeller	Sayısal/deneysel yöntem	Ansys CFX	Kare tank	Thirunavukkarsu ve Rajagopal [15]
Halka engeller	Deneysel çalışma	-	Silindir biçimli tank	Akyıldız ve diğerleri [16]
T şeklinde bölmeler	Sayısal çalışma	FDM	2-boyutlu dikdörtgen tank	Ünal ve diğerleri [17]
Gözenekli bölme	Deneysel çalışma	-	Çalkantı tankı	Nasar ve Sannasiraj [18]
Geçirgen kirişler	Sayısal çalışma	MBEM	Dikdörtgen tank	He ve diğerleri [19]
Delikli gözeneklere sahip yatay plaka	Deneysel çalışma	-	Dikdörtgen sıvı tankı	Jin ve diğerleri [20]
Düşey/yatay bölmeler	Sayısal çalışma	SBFEM	Rijit toroyidal tank	Wang ve diğerleri [21]
Geçirimsiz/geçirgen dikey bölmeler	Sayısal çalışma	FEM / ALE	Dikdörtgen tank	Yu ve diğerleri [22]
Çift düşey bölmeler	Sayısal çalışma	LBM	Dikdörtgen tank	Ma ve diğerleri [23]
Çoklu düşey bölmeler	Sayısal çalışma	STAR-CCM+	LNG tankı	Tang ve diğerleri [24]
Yatay bölmeler	Sayısal çalışma	FEM	2-boyutlu dikdörtgen tank	Cho ve diğerleri [25]
Çoklu bölmeler	Sayısal çalışma	BEM	Asimetrik tanklar	Ebrahimian ve diğerleri [26]

Çizelge 1.1. (Devam) Çalkantı sönümleme mekanizmaları [7]

Halka şeklindeki bölme	Sayısal çalışma	FEM	Silindirik tank	Biswal ve Bhattacharyya [27]
Düşey bölme	Sayısal/deneysel çalışma	FDM	Dikdörtgen tank	Xue ve diğerleri [28]
Düşey bölme	Sayısal/deneysel çalışma	UMTHINC	Dikdörtgen tank	Hu ve Kamra [29]
Düşey bölmeler	Sayısal/deneysel çalışma	FVM	Dikdörtgen tank	Hoch ve Wurm [30]
Elastik ara parça	Analitik çalışma	-	Dikdörtgen tank	Cheng ve diğerleri [31]
Çift taraflı kavisli/ düşey/ T tipi bölme	Sayısal/deneysel çalışma	FVM / ALE	Dikdörtgen tank	Zhu ve diğerleri [32]
Halka/düşey/yatay bölmeler	Sayısal çalışma	FDM/VBF	3-boyutlu dikdörtgen tank	Xue ve Lin [33]
Delikli/yatay gözenekli Bölmeler	Sayısal çalışma	BEM/MEEM	Dikdörtgen tank	Cho ve diğerleri [34]
Oluklu elek	Sayısal/deneysel çalışma	STAR-CCM+	2-boyutlu dikdörtgen tank	Poguluri ve Cho [35]
Düşey/delikli bölme	Sayısal/deneysel çalışma	FDM	3-boyutlu dikdörtgen tank	Xue ve diğerleri [36]
Gözenekli alt tabaka	Sayısal çalışma	FEM	2-boyutlu dikdörtgen tank	Zheng ve diğerleri [37]
Gözenekli malzeme tabakası	Sayısal çalışma	FVM	3-boyutlu membran tipi LNG tankı	Xue ve diğerleri [38]
Delikli dikey bölme	Sayısal çalışma	FDM/VBF	Kübik tank	Xue ve diğerleri [39]
Ara parça	Analitik yöntem	-	Küresel tank	Cheng ve diğerleri [40]

1.3. Çalkantı Hareketinin Modellenmesi ve Sayısal Analiz Yaklaşımları

Birçok araştırmacı, farklı değişkenlerin sıvı çalkantısı üzerindeki etkisini incelemek ve çalkantı problemini derinlemesine anlamak adına, daha önceki araştırma bulgularına dayalı farklı araştırma metotları kullanarak bir dizi çalışma gerçekleştirmiştir. Sıvı çalkantısını araştırmak için kullanılan başlıca yöntemler arasında potansiyel akış teorisi üzerine kurulu teorik analizler, çeşitli akış denklemlerinin çözülmesine dayanan sayısal yöntemler ve ölçeklenmiş fiziksel modeller kullanılarak yapılan deneysel ölçümler bulunmaktadır [7]. Teorik analizler, genel olarak akışkanla ilgili bazı kabullere dayanarak gerçekleştirilir ve bu yöntemler sayesinde hızlı hesaplamalar yapmak mümkündür. Ancak, çalkantı sonucu oluşan doğrusal olmayan serbest yüzey hareketlerini bu teorik analizlerle tam olarak öngörmek zor olabilir. Fiziksel model testleri üzerinden yapılan ölçümler, güvenilir veriler sunmakla birlikte, model ölçeklendirmesindeki belirsizlikler bu yaklaşımın uygulanabilirliğini kısıtlayabilmektedir. Özellikle son zamanlarda, sıvı çalkantısının incelenmesinde sıkıştırılamaz Navier-Stokes denklemleri veya Laplace denklemi gibi denklemlere dayalı sayısal simülasyonlar öne çıkan bir yöntem olarak kendini göstermiştir [7].

Çalkantı probleminin, zamanla değişen yapısı ve serbest yüzeye sahip olması gibi özelliklerinden ötürü, üç boyutlu Navier-Stokes denklemlerinin bu problemin en uygun temsili olduğu kabul edilmektedir. Bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler sayesinde, üç boyutlu Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RONS) denklemlerini esas alan ve çeşitli türbülans modelleri içerisinde barındıran hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımlarının kullanımı, çalkantı probleminin anlaşılmasında önemli kolaylıklar sağlamıştır. Bu teknolojik ilerlemeler, bilgisayarların çalkantı problemlerini daha hızlı çözmesine olanak tanımış ve ayrıca, problemin non-lineer doğasına rağmen çözümün gerçekleştirilmesini mümkün kılmıştır. Deneysel metotların her zaman uygulanabilir olmadığı durumlarda, sayısal simülasyonlar önemli bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Sayısal yöntemlerle, deneysel çalışmalarla belirlenmesi zor ya da imkânsız olan çeşitli parametreler (örneğin hız, basınç gibi) kolaylıkla elde edilebilmektedir.

Diferansiyel ve integral formdaki denklemlerin cebirsel forma indirgenmesi ve bilgisayarlar vasıtasıyla çözülmesi sayısal yöntemler sayesinde mümkün olmaktadır. Sayısal çözümleme için kullanılan yöntemler geniş bir yelpazede bulunur ve temel olarak iki ana kategoriye ayrılır. Birinci kategoride, fiziksel problemlerin bir çözüm ağı olan ızgaralar (mesh) ile

temsil edilmesini ve akışkan hareketinin tanımlanmasını içeren Euler yaklaşımı yer almaktadır. Bu yaklaşımı temel alan en yaygın kullanılan yöntemler arasında sonlu hacim metodu, sonlu farklar metodu ve sonlu elemanlar metodu bulunur [41]. Bu yöntemlerin uygulanmasını sağlayan çok sayıda ticari yazılım geliştirilmiştir ve bunların arasında en yaygın olanları Fluent, FlOW-3D, Star-CCM+, Abaqus ve Ansys'dir [1]. İkinci kategoride ise Lagrange yaklaşımını temel alan sayısal çözüm yöntemleri bulunmaktadır. Burada akışkanın küçük parçacıklarla temsil edildiği Lagrange perspektifi kullanılır ve genellikle iki ana gruba ayrılır. Bunlar Lattice-Boltzman [42] ve Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) [43] yöntemleridir.

Çalkantı probleminin anlaşılabilmesi, sıvının serbest yüzeyinin doğru bir şekilde tahmin edilmesine bağlıdır. Serbest yüzeyin konumu genellikle sadece başlangıç zaman adımında bilinir. Serbest yüzeye sahip akış problemlerinde serbest yüzeyin hareketli sınırları, ilgili noktaların yerlerinin belirlenmesini zorlaştırır. Son zamanlarda, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) alanında tercih edilen ticari yazılımlar arasında sonlu hacim metodu, diğerlerine kıyasla daha fazla öne çıkmaktadır. Navier-Stokes denklemlerine dayanan bu yöntem, serbest yüzeyli akışların modellenmesi ve su-hava ara yüzeyinin (serbest yüzeyin) belirlenmesi için çeşitli yaklaşımları gerektirir. Bu yaklaşımlar arasında en yaygın kullanılanı ve ticari HAD yazılımlarının çoğunda bulunan yöntem, Akışkan Hacmi (Volume of Fluid, VOF) yaklaşımıdır [44].

Çalkantı hareketi, bir tankın hareketinden kaynaklanan ve içerisindeki sıvı üzerinde türbülanslı yapı oluşturan sıçramalar ve yansımaları barındırır. Bu nedenle, sıvı yüzeyinde bu tür belirgin hareketlerin var olduğu çalkantı problemlerinin modellemesinde türbülans etkilerinin göz önünde bulundurulması zorunludur. Türbülanslı akış koşullarının sayısal modellerde doğru bir şekilde tanımlanması, probleme en uygun türbülans modelinin seçilmesiyle doğrudan ilişkilidir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımlarında kullanılan sayısal modellerde çeşitli türbülans modelleri mevcuttur. Bunlar arasında Direkt Sayısal Simülasyon (DNS), Büyük Girdap Simülasyonu (LES - Large Eddy Simulation) ve Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RONS) denklemleri bulunmaktadır. Diğer yöntemlere kıyasla daha ekonomik bir çözüm sunan Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RONS) temelli türbülans modelleri, günümüzde hala etkin olarak kullanılmaktadır. Bu denklemlerin analizinde, ortalama akım üzerindeki türbülans çalkantı etkileri, farklı türbülans modelleri

yardımıyla hesaplanabilir. Bu modeller arasında en yaygın ve kanıtlanmış doğruluğa sahip olanlardan biri, k- ε modelidir [45].

Yukarıda belirtilen yaklaşımların birbirlerini bütünlediği ve sıvı çalkantısının hidrodinamiğinin tam olarak anlaşılabilmesi için birbirlerinden ayrı ele alınamayacağı unutulmamalıdır.

1.4. Tez Çalışmasının Amaç ve Kapsamı

Tez çalışması kapsamında, dikdörtgen kesitli deney tankı uyarma genliği ve frekansı ayarlanabilen frekans kontrollü bir sarsma tablası üzerine konumlandırılarak sıvı çalkantı hareketi engelsiz ve engel bulunan durumlar için ayrı ayrı incelenmiştir. Engelsiz durum için farklı uyarma frekansları, uyarma genlikleri ve doluluk oranları için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, tank tabanına yerleştirilen sabit yüksekliğe sahip farklı sayı ve dizilimde engellerin çalkantı davranışına etkisi farklı uyarma frekansı ve sıvı derinlikleri için araştırılmıştır. Çalışma kapsamında görüntü işleme teknikleri kullanılarak su seviyelerine ait yapılan ölçümler, lineer teoriye dayanan analitik çözümler ve FLOW - 3D HYDRO yazılımı kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Literatürde önemli bir yere sahip olan ve çalkantı analizlerinde temel bir çözüm sunan Lineer teori kullanılarak yapılan analitik çözümlerle, engelsiz durumda farklı su derinliği ve tank uzunluğu oranları (h/L) için deneysel verilerle yapılan kıyaslamalar ile çalkantı hareketlerinin temel dinamiklerinin anlaşılması hedeflenmiştir. Tez çalışmasının deneysel veri toplama aşamasında, akıllı telefon kamerası aracılığıyla deney tankındaki çalkantı hareketleri video olarak kaydedilmiştir. Kullanılan akıllı telefon, çalkantıyı görsel olarak kaydetmek için deney tankına sabitlenmiştir. Bu sabitlemenin amacı, kameranın tank ile birlikte hareket etmesini sağlayarak, durağan bir tank görüntüsü içinde suyun hareketlerini izlemektir. Elde edilen görüntüler, bu sayede sıvının hareket dinamiklerini net bir şekilde gözlemlemeye imkân tanımış ve sonrasında bu görüntüler detaylı olarak görüntü işleme teknikleriyle analiz edilebilmiştir. Tez çalışmasının bir diğer önemli bileşeni olarak sayısal çalışmalar, akış dinamikleri ve çalkantı hareketlerini simüle etmek için 'FLOW - 3D HYDRO' yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yazılımın gelişmiş simülasyon kabiliyetleri sayesinde çalkantı hareketlerinin ve sıvı dinamiklerinin daha detaylı ve kapsamlı bir şekilde anlaşılması amaçlanmış ve sayısal model sonuçları yapılan deneysel çalışmalar ile kıyaslanarak çalkantı problemini çözebilme becerisi irdelenmiştir.

Geleneksel çalkantı hareketi incelemeleri, deney tanklarında tek bir noktadan yapılan sensör ölçümleri ile sınırlıdır. Bu yaklaşım, ölçülen noktada doğru ve güvenilir veri sağlasa da, tankın genelindeki su seviyesi değişimlerini ve çalkantı dinamiklerini geniş bir perspektifle değerlendirmede görüntü işleme teknikleriyle yapılan ölçümlere kıyasla yetersiz kalabilmektedir. Bu eksikliği gidermek adına, bu çalışmada kullanılan görüntü işleme teknikleri ile çalkantı hareketine ait zamana bağlı serbest yüzey su seviyesi değişimleri kaydedilen video görüntüleri üzerinden kodu yazılan sanal bir derinlik ölçer aracılığıyla istenilen her noktada kolaylıkla elde edilebilmiştir.

Literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak, bu tez çalışması kapsamında özgün bir görüntü işleme algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma ile, uzun süreli ve çok sayıda görüntü karesi içeren video kayıtlarından, çalkantı hareketleri sonucu deney tankı kesiti boyunca oluşan maksimum ve minimum su seviyeleri tek bir görüntü karesinde temsil edilebilmiştir. Sayısız görüntüyü bir tek görüntüye indirgeyebilen bu yaklaşım, çalkantının zaman içindeki etkilerini daha anlaşılır ve sade bir biçimde göstererek, çalkantı hareketlerinin detaylı analizine katkıda bulunmuştur. Tez kapsamında engelsiz ve engel bulunan koşullar için gerçekleştirilen deneylerde geliştirilen bu yeni yaklaşım çalkantı davranışının analizinde temel alınmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

La Rocca, Sciortino, Adduce ve Boniforti çalışmalarında hem arayüzeye hem de serbest yüzeye sahip iki farklı sıvının çalkantı hareketini hem teorik hem de deneysel olarak ele almıştır. Bu çalışma kapsamında, iki ayrı karışmayan sıvı ile doldurulmuş bir tankın çalkantı hareketini gerçekleştirdikleri deneylerle incelemişlerdir. Teorik modellemeyi, akışkan hareketinin potansiyel formülasyonuna Lagrangian varyasyon metodu uygulayarak yapmışlar ve böylece hareketin dinamiğini belirleyen bir sistem elde etmişlerdir. Sayısal entegrasyonu kullanarak elde ettikleri matematiksel modelin sonuçları deneysel bulgularla yüksek oranda uyum göstermiştir. Bu bulguların, modelin ve deneyin geçerliliğini ve uyumluluğunu güçlü bir şekilde teyit ettiğini vurgulamışlardır [46].

Turner, Bridges ve Ardakani çalışmalarında, bir sıvı tankı içerisine yerleştirilen engeller ile, tank içindeki sıvının çalkantı davranışını ve sıvıyı taşıyan kabın hareketi arasındaki dinamik ilişkiyi incelemişlerdir. Deneyin yapıldığı sıvı tankı, Cooker'in [47] çalkantı dizilimlerine dayanarak oluşturulmuştur. Engellerin sıvının çalkantı hareketini sınırlamada önemli etkisi olduğu çalışmanın sonuçlarında belirtilmiştir. Bununla birlikte bölmelerin belirli rezonans koşullarında ise genel düşüncenin aksine çalkantı hareketinin yoğunlaşmasına sebep olabileceğine dikkat çekilmiştir. Çalışmanın sonunda, her koşul için ayrıntılı bir değerlendirme yapılması gerekliliğini vurgulamışlardır [48].

Akyıldız deney tankının tabanına T şeklinde düşey engel yerleşiminin, sıvı çalkantısı üzerindeki sönümleme etkisini incelemiştir. Bu çalışma kapsamında, sıvı çalkantısının non-lineer karakterini incelemek amacıyla, sonlu hacimlere dayalı bir sayısal yöntem kullanmıştır. Deneyler, tankın tabanına yerleştirilen engel yüksekliklerinin (h_e) ve tank içerisindeki sıvı yüksekliği (h) arasındaki oran (h_e/h) değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede, yerleştirilen engellerin sıvı çalkantısına etkileri detaylıca incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarında, düşey engel yüksekliğinin sıvı yüksekliğine oranı olan $h_e/h < 0{,}8$ olduğunda, sıvı çalkantısının deney tankı üzerinde oluşturabileceği olumsuz dinamik etkilerin büyük ölçüde azaltılabileceği vurgulanmıştır. Ancak T şeklindeki engellerin kullanıldığı durumlarda, sıvı çalkantısının yarattığı olumsuz etkilerin $h_e/h > 0{,}8$ olduğunda artabileceği belirtilmiştir [49].

Cho çalışmasında, yatay salınım yapan dikdörtgen bir tank içerisindeki, kısmen batmış bir gözenekli bölme ile sıvı çalkantısının enerji kayıplarının ele alınması için analitik bir model geliştirmiştir. Özfonksiyon genişletme tekniği kullanılarak, çeşitli gözeneklik, batıklık derinliği ve tankın salınım genliği kombinasyonları için sıvı hareketinin hem tankın duvarı hem de bölmeye uyguladığı yatay hidrodinamik kuvvet değerlendirilmiştir. Cho, sıvı tankına uygun bir gözenekli bölme yerleştirmenin sıvının yaratacağı hidrodinamik kuvveti ve serbest yüzey genliğini büyük ölçüde azaltabileceğini belirtmiştir [50].

Hyeon ve Cho çalkantının tank üzerinde yaratabileceği zararı engellemek için farklı iç bölmelerin rolünü analiz etmişlerdir. Oluşturdukları model denemelerinde, beş farklı gözeneklilik oranına sahip bölmeleri, sıvı dolu bir tanka dikey olarak yerleştirerek salınım hareketi altındaki etkilerini incelemişlerdir. Çalkantı hareketi sonrası serbest yüzey değişimini ve sıvı çalkantısının tanka uyguladığı basınç değerlerini, bölmenin gözenekliliği ve batma derinliği, tank hareketinin genliği ve periyodu gibi çeşitli değişkenlerin kombinasyonlarına karşı bir görüntüleme tekniği ve basınç ölçüm cihazı kullanarak ölçmüşlerdir. Çalışmanın sonunda, deneysel sonuçların analitik çözümlerle yüksek bir uyum gösterdiği ve bir tanktaki çalkantı dinamiklerinin, bölmenin hem gözenekliliğine hem de batma derinliğine bağlı olduğunu belirtmişlerdir [51].

Jacobo, Morales, Rodríguez ve Cuatzín tarafından yapılan çalışmada, kısmen doldurulmuş bir karayolu tankerindeki LPG'nin çalkantı hareketi incelenmiştir. Çalışmada, bölmelerin LPG'nin çalkantı hareketleri üzerindeki etkisi sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Sıvı hareketini modellemek için Navier-Stokes denklemlerini ve standart $\boldsymbol{k}$-$\boldsymbol{\varepsilon}$ türbülans modelini kullanmışlardır. Sıvı-gaz arayüzünün takibi için ise Volume Of Fluid (VOF) yöntemini değerlendirmişlerdir. Bölme tasarımının en uygun şekilde seçiminde hız dağılımları, çalkantı stabilizasyon süreleri ve türbülans kinetik enerjisi konturlarının büyük önem taşıdığı belirtilmiştir. Artı (Tip I) ve X (Tip II) şeklindeki bölmelere sahip karayolu tankerleri için sırasıyla 22 ve 21 saniyelik çalkantı stabilizasyon sürelerini belirlemişler ve Tip II tasarımını, çalkantı sönümlemesi ve araç kontrolü açısından en iyi bölme tasarımı olarak önermişlerdir [52].

Kolaei, Rakheja ve Richard çalışmalarında, farklı uzunlamasına engel tasarımlarına sahip kısmen doldurulmuş yatay silindirik bir kap içerisindeki sıvı çalkantı hareketini analiz etmişlerdir. Sıvının viskoz, sıkıştırılamaz ve irrotasyonel olduğunu varsayarak, çalkantı

hareketinin deney tankı duvarına uyguladığı geçici yanal çalkantı kuvveti ve tankın devrilme momenti bakımından analiz gerçekleştirmişlerdir. Engel tasarımının ve uzunluğunun, doğal çalkantı frekansları/modları, sönüm oranları ve hidrodinamik katsayılar üzerindeki etkileri ayrıca incelenmiştir. Tankın yarısından fazlası dolu olduğunda, tankın üst kısmına yerleştirilen engellerin, sıvı çalkantı hareketini en iyi şekilde kontrol altına alan yöntem olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte deney tankının orta kısmına monte edilen engellerin %50 doluluk oranlarında, tankın alt kısmına monte edilen engellerin ise düşük doluluk oranları için daha etkili olduğu belirtilmiştir [53].

Lu, Jiang, Zhao ve Tang çalışmalarında, engel bulunan ve engel bulunmayan bir dikdörtgen tank içerisinde sıvı çalkantısı problemi için ataletsiz referans sistemine dayanan bir viskoz akışkan modeli geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, sayısal modelin doğruluğu, doğrusal ve doğrusal olmayan potansiyel akış modelleri ile farklı Navier-Stokes çözücülerin sunduğu teorik çözümler, deneysel veriler ve sayısal tahminlerle karşılaştırılarak incelenmiştir. Ayrıca, tank içerisinde engel bulunması durumunda çalkantı hareketinin, daha güçlü girdap akışları sebebiyle daha fazla sönümlendiği belirlenmiştir. Çalışmada, rezonans frekansı ve genliğinin bölme genişliği ve konumuna büyük ölçüde bağlı olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca çalkantı hareketi tahminleri için viskoz akışkan modelinin kullanılmasının önemi üzerinde durulmuştur [54].

Tang, Zhenyuan Tang ve Wan çalışmalarında, dönen bir dikdörtgen tankta engellerin etkisini, MPS (Moving Particle Semi-implicit) yöntemine dayalı bir parçacık çözümleme aracı olan MLParticle-SJTU ile sayısal olarak araştırmışlardır. İlk adımda, mevcut çözücünün güvenilirliğini teyit etmek için, engel olmayan dönen bir dikdörtgen tankta sıvı çalkantısı akışını gerçekleştirmişlerdir. Engel yüksekliğinin sıvı çalkantısı üzerindeki etkisini, beş farklı engel yüksekliği kullanarak analiz etmişlerdir. Engellerin, sıvının çalkantı hareketini önemli bir şekilde kısıtladığını sayısal sonuçlar ile doğrulamışlardır [55].

Cho ve Kim gerçekleştirdikleri çalışmalarında, çift dikey gözenekli engellerin sıvının çalkantı hareketi üzerindeki etkisini, dikdörtgen bir tankta hem teorik hem de deneysel açıdan incelemişlerdir. Çalışmada, analitik çözümler elde etmek için eşleştirilmiş özfonksiyon genişletme yöntemi, gözenekli sınır koşulları ve doğrusal potansiyel teorisi kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda, çift dikey gözenekli engellerin, optimal gözeneklilik,

batma derinliği ve kurulum konumu doğru şekilde seçilerek tasarlandığında, çalkantı hareketlerini önemli ölçüde bastırabildiği belirtilmiştir [56].

Choudhary ve Bora iki katmanlı sıkıştırılamaz bir akışkanın dikey bir silindir içindeki çalkantı davranışını detaylı olarak incelemişlerdir. Çalışmada, silindir içerisinde yer alan sıvının doğal çalkantı frekansı, lineer su dalgası teorisi kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, akışkan yüksekliklerinin ve yoğunluk oranının, doğal çalkantı frekansları üzerindeki etkileri ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Araştırmadan elde edilen bulgular, sıvı yüksekliğinin artması durumunda boyutsuz çalkantı frekansının da artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Üst sıvı yüksekliğinin daha küçük değerlerinde ve alt sıvı derinliğinde, boyutsuz frekans değerinde hızlı bir yükselme olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, yoğunluk oranının artışı ile boyutsuz frekansın azaldığı belirtilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada akışkan yükseklikleri ve yoğunluk oranı gibi parametrelerin, doğal çalkantı frekansları üzerindeki etkileri detaylı olarak ele alınmıştır [57].

Kumar ve Sinhamahapatra sabit veya yüzen delikli engellerle donatılan bir sıvı tankının tabanında meydana gelen sıvı çalkantısının, tank üzerinde yaratabileceği olumsuz dinamik etkileri sonlu elemanlar basınç formülasyonu kullanarak incelemişlerdir. Metodolojinin, çeşitli engel türlerinin çalkantı üzerindeki potansiyel etkilerini başarılı bir şekilde hesaplayabildiği vurgulanmıştır. Çalışmanın sonunda ayrıca, yüzey delikli ve alt montajlı dikey engellerin etkileri üzerine yapılan önceki çalışmaların eksikliklerine işaret edilerek, bu konuda henüz tam olarak oturmuş bir sayısal yöntemin olmadığı belirtilmiştir [58].

Sanapala, Velusamy ve Patnaik çalışmalarında, sismik yükler altında bir depolama tankındaki sıvının çalkantı dinamiklerini incelemek üzere kapsamlı sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, serbest yüzey yer değiştirmesi, basınç dağılımı ve rezonans harmonik uyarmanın çalkantı kuvvetleri üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Serbest yüzey dalgalanmalarını ve ilişkili çalkantı kuvvetini hafifletmek amacıyla, halka ve dikey bölme olmak üzere iki tip bölme önermişlerdir. Uygulanan harmonik uyarmanın tetiklediği tepki sonucunda, tankın merkezinde yer alan dikey yönlendirme plakasının etkili olduğu belirtilmiş ve plakanın boyutlarını bu bilgi doğrultusunda sistematik olarak optimize etmişlerdir. Bu bölme geometrisi El Centro depremi için test edilmiş ve serbest yüzey dalgalanmalarını ve çalkantı kuvvetlerini etkin bir şekilde bastırdığı ifade edilmiştir [59].

Wang, Peng, Zhou ve Zhang araştırmalarında, bir deney tankının, çeşitli engellerle- yüzen dairesel, duvara ankrajlı ve yüzen halka formunda engeller ve bunların kombinasyonları- donatıldığı ve bu tankın kısmen dolu olduğu bir durumda çalkantı dinamiğini incelemişlerdir. Bu analiz, birleşik çok modlu bir yaklaşım ve Ölçekli Sınır Sonlu Elemanlar Metodu (SBFEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan model mevcut diğer metodolojilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır ve kısmen dolu, yanal yönde uyarılan silindirik tankların kompleks dalgalanma problemlerinin simülasyonunda, çok az sayıda serbestlik derecesi kullanılarak mevcut yaklaşımın daha fazla doğruluk ve verimlilik sağladığı vurgulanmıştır. Araştırmada ayrıca, sıvı dolu bir kabın dinamik davranışını doğru bir şekilde modellemek için ilk dalgalanma kütlesinin hesaba katılmasının yeterli olduğu belirtilmiştir [60].

Zhang, Wu ve Hu gerçekleştirdikleri çalışmalarında, kısmen dolu prizmatik bir tanka dikey bir engel yerleştirmiş ve bu durumda nikel cevherinin çalkantı davranışını ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Nikel cevheri süspansiyonunun dinamik hareketlerini analiz etmek için, Sıvının Hacmi (VOF) yöntemi ve Newton olmayan Herschel-Bulkley ve Bingham eşitliklerine dayanan bir sayısal model önerilmiştir. Çalkantının neden olduğu moment değişiklikleri incelenmiş ve farklı bölme yüksekliklerinde serbest yüzey değişimleri gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Araştırmada ayrıca, çalkantı hareketinin neden olduğu momentle birlikte deney tankının iki yanındaki serbest yüzey yükseklik farkının, kritik engel yüksekliği üzerindeki etkileri incelenmiştir [61].

Cho, Choi ve Kim serbest yüzeye sahip sıvı içeren bir tankta çalkantı davranışını incelemişlerdir. Yatay gözenekli bölme kullanımının, çalkantı enerjisinin dağıtılması ve tank duvarlarına etki eden çalkantı basınçlarının azaltılmasındaki önemine dikkat çekilmiştir. Çalışmada ayrıca lineer potansiyel teoriye dayanan Eşleştirilmiş Özfonksiyon Genişleme Metodu (MEEM) kullanılmıştır. Ayrıca, Sınır Eleman Metodu (BEM) gözenekli sınır koşulları ile bağımsız bir şekilde geliştirilmiştir. Farklı gözenekliliklere, uzunluklara ve dalma derinliklerine sahip iki bölme pozisyonu, dikdörtgen bir tankın merkezinde ve her iki duvarında düşünülmüştür. Sonuçlar, tank duvarlarına yerleştirilen yatay gözenekli bölmenin tank merkezine yerleştirilen bölmeye kıyasla çalkantı hareketini daha etkili bir şekilde bastırdığını göstermiştir [34].

Choudhary ve Bora'nın özgün bir tasarıma sahip silindirik bir tank üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmalar, kısmen dairesel bir bölme ile örtülü olan serbest sıvı yüzeyinin doğal frekansları ve yanıtlarının değişimini gözler önüne sermiştir. Araştırmacılar, kısmen kapalı olan serbest yüzeyin doğal frekanslarının, aracın kontrol frekansının üzerine çıkacağını ve bu durumun, dinamik harekette yer alan sıvı kütlesinin salınımını azaltacağını belirtmişlerdir. Çalışmada ayrıca, deney tankında sıvı seviyesinin artırılmasının doğal frekansları yükselteceği ve bu durumun da çalkantı hareketinin olumsuz etkilerini azaltacağı belirtilmektedir [62].

Hosseini, Goudarzi ve Soroor çalışmalarında, deprem esnasında yüzer çatı hareketlerinin hafifletilmesi amacıyla yenilikçi ve uygulanabilir bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntemin etkisini kanıtlamak üzere, sarsma tablası kullanılarak bir deney tasarlanmıştır. Yeni önerilen pasif kontrol stratejisi kapsamında, yüzer çatıya asılı ve boyu ayarlanabilir iplerle donatılmış bir asma halkalı engel kullanarak en yüksek çalkantı seviyesini azaltmayı hedeflemişlerdir. Araştırmacılar, asma halkalı engelin, küçük bir model tankında harmonik ve sismik yükler altında maksimum sismik çalkantı seviyesini önemli ölçüde düşürdüğünü ifade etmişlerdir. Bunun yanı sıra, asma halkalı engel varlığının yüzer çatının dönüş hareketini büyük oranda azalttığını ifade etmişlerdir. Çalışmanın sonunda, asma halkalı engellerin avantajlarının sadece yüzer çatılı tanklarla sınırlı olmadığı, çalkantı hareketinin olumsuz etkilerinin beklenildiği tüm durumlarda, çeşitli çatı türlerine ve hatta açık tanklara sahip durumlarda da uygulanabileceği vurgulanmıştır [63].

Wang, Peng, Zhang, Ren ve Jiang çalışmalarında, kısmen doldurulmuş rijit toroidal tanklardaki sıvının çalkantı hareketi üzerinde farklı engel düzenlemelerinin etkisini araştırmışlardır. Bu bağlamda, sınır eleman yöntemi (BEM) ve sonlu eleman metodu (FEM) ilke ve tekniklerini birleştiren yarı analitik ölçekli sınır sonlu elemanlar yöntemini (SBFEM) kullanmışlardır. Çalışmada ele alınan çeşitli engel dizilimleri arasında, alttan monteli ve yüzey delici yatay halka engeller, bunların çeşitli kombinasyonları, alttan monteli ve yüzey delici halka engellerin birleşimleri ve serbest yüzeye dokunan engeller yer almaktadır. Sonuçlar, uygulanan metodolojinin karmaşık üç boyutlu sıvı çalkantısının modellemesine etkin bir şekilde katkı sağladığını göstermiştir [64].

Xue, Zheng, Lin ve Xiao, viskoz sıvıların çalkalanma ve dalga etkileşimlerini incelemek üzere, deney tankına yerleştirilen engellerle birlikte, türbülans etkilerini içeren Navier-

Stokes denklemlerine dayanan bir sonlu farklar modeli kullanmışlardır. Önerdikleri modelin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, engel bulunan prizmatik bir tankta doğrusal olmayan çalkantıyı incelemek için bir sıvı çalkalama deney cihazı kurulmuştur. Araştırmacılar, deney tankında alttan monteli dikey engeller ve serbest yüzeye temas eden dikey engeller ile dikdörtgen bir tankta çalkantının sönümleme etkilerini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Mevcut sayısal sonuçlar ve deneysel veriler arasında iyi bir uyum elde edildiği ve sayısal sonuçların, büyük serbest yüzey eğimine sahip güçlü doğrusal olmayan çalkantı hareketi için mevcut deneysel verilerle iyi bir uyum sağladığı belirtilmiştir [28].

Yu, Ma, Fan ve Gu çalışmalarında, membran tipi sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) tankında, tamamen harmonik rulo simülasyonuna maruz kalan deney tankında sıvı yüzeyine yerleştirilen iki yüzücü tabakayla çalkantı hareketini üç farklı doluluk seviyesinde deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Yüzücü tabakaların çalkantı hareketine pozitif etkilerini, elde edilen deneysel bulguların sayısal sonuçlarla karşılaştırılmasıyla ortaya çıkarmışlardır [65].

Chu, Wu, Ren Wu ve Wang tabana yerleştirilmiş çoklu bölmeleri bulunan bir dikdörtgen su tankındaki çalkantı davranışını, laboratuvar deneyleri ve Large Eddy Simulation (LES) modellemesi ile incelemiştir. Suyun yüzey hareketinin kinematik analizi, Volume of Fluid (VOF) metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar, sallanan bir platform üzerine kurulu su tankından elde edilen dalga yükseklikleri ile doğrulanmıştır. Bölmelerin mesafesinin ve yüksekliğinin sıvı çalkantısı üzerindeki etkilerini sistematik olarak belirlemek için sayısal bir model kullanmışlardır. Simülasyonların sonuçları, tankın doğal frekansının çoklu bölmeler tarafından modifiye edildiğini ve bu değişikliklerin bölme üzerindeki etkin su derinliği ile bağlantılı olduğunu göstermiştir. Birden fazla bölmenin hidrodinamik kuvvet üzerindeki azaltıcı etkisinin, tek bir bölme ile karşılaştırıldığında daha büyük olduğu belirtilmiştir [12] .

Jamalabadi, Ho-Huu ve Nguyen tarafından yapılan çalışmada, kapalı bir rezervuarda dış akışın dairesel engel bölmesine olan etkisi ile birlikte, akuple yapı titreşimlerinin bastırılması konusu, sayısal yöntemler, mühendislik analizi ve optimal tasarım metotlarıyla değerlendirilmiştir. Kütle-yay-sönümleyici sistemi olan tek serbestlik dereceli model, tankı destekleyen yapının modellemesinde kullanılmıştır. Bu entegre sistem, bir başlangıç hızı olmadan, bir başlangıç yer değiştirmesiyle serbest bırakılmıştır. Çalkantı dinamiklerinin ve

geçici yapı hareketinin kapsamlı bir analizine dayanarak, bölmenin optimal konumunu belirlemişlerdir. Ayrıca, bölmenin optimal konumu ve genişliği, hareketsiz serbest yüzeye göre sistematik bir şekilde belirlenmiştir [66].

Kim, Chung, Shin, Cho ve Park çalışmalarında, "hareketli bölmeler" adı verilen ve bir yay sistemi içeren çalkantı azaltma tekniklerinden birini kullanmışlardır. Bu hareketli bölmelerin çalkantı davranışını nasıl hafiflettiğini belirlemek adına, bir dizi çalkantı deneyi gerçekleştirmişlerdir. Bu deneyler, bir dikdörtgen tankın sallanma hareketini dikkate almış ve sonuçları, ek ekipmanın bulunmadığı durumlar ile iki farklı sertlik seviyesine sahip yay sistemi ile donatılmış bölmelerin olduğu durumlar için karşılaştırmışlardır. Çalkantı deneylerinden elde edilen görüntü, basınç ve kuvvet verileri istatistiksel analize tabi tutulmuş ve yay bölmesinin performansı bu analiz sonuçlarına dayanarak değerlendirilmiştir [67].

Kim, Parthasarathy, Choi ve Lee yatay uyarmalar altında olan 2 boyutlu bir dikdörtgen tankta sıvı çalkantısının etkilerini incelemişlerdir. Deney tankının her iki yanına, çalkantı hareketinin darbe basıncını kontrol etmek amacıyla yatay engeller yerleştirmişlerdir. Sabit engel aralıklarına ve çeşitli engel boyutlarına sahip beş durumu kullanarak, tanktaki çalkantı darbe basıncının bastırılmasının etkilerini analiz etmişlerdir. Engel içeren deney tankının çalkantı basınç değerlerini, engel içermeyen haliyle karşılaştırmışlar ve en yüksek çalkantı bastırma oranının, hava hapsolması ve engel etkilerinden dolayı %63.6 olduğunu belirtmişlerdir [68].

Liu, Lin, Guan ve Yu halka şeklindeki engellerin çalkantı etkilerini azaltma üzerindeki etkisini, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonunu kullanarak araştırmışlardır. Çalışmada ilk olarak, sayısal yöntemi doğrulamak için sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) bağımsız tip C model tank ile bir dizi sıvı çalkantı deneyi tasarlamışlardır. Halka bölmelerin dört parametresi, yükseklik (H), konum kurulumu (P), eğim açısı (θ) ve kalınlık (t) dikkate alınarak çalkantı hareketinin kısıtlanma etkisini incelemişlerdir. Engel kalınlığının çalkantı hareketi üzerinde çok az etkisinin olduğu, ancak özellikle engel yüksekliğinin, çalkantıyı bastırmada önemli bir etkiye sahip olduğu çalışmanın sonunda vurgulanmıştır [69].

Sanapala, Rajkumar, Velusamy ve Patnaik sismik yükler altında ve düşey harmonik etkilere maruz kalan kısmen doldurulmuş dikdörtgen bir tank içerisindeki sıvının çalkantı dinamiklerini araştırmak için sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada deney tankına yerleştirilen bir engel yardımıyla çalkantı kuvvetlerini ve serbest yüzey salınımlarını kontrol etmek için metodolojileri sayısal olarak simüle etmişler ve araştırmışlardır. Çalışmanın sonunda geçici dalga profillerinin, kuvvet ve basınç zaman geçmişlerinin ayrıntılı bir çalışmasına dayanarak, optimal engel tasarımına ulaşmışlardır. Ayrıca engelin optimum konumu ve genişliği hareketsiz serbest yüzey referans alınarak önerilmiştir [70].

Zheng, You, Ma, Khayyer ve Shao sıkıştırılamaz SPH (ISPH) yöntemini farklı engel dizilimlerine sahip bir 2D tankta sıvı çalkantısını simüle etmek için kullanmışlardır. Çalışmada ilk olarak, sayısal modeli deneysel sonuçlarla ve herhangi bir engel içermeyen bir çalkantı tankı için ticari HAD yazılımı STAR CCM + simülasyonlarını kullanarak doğrulamışlardır. Daha sonra uyarma frekansı ve engel diziliminin etkisini analiz etmek için farklı koşullar altında çeşitli çalkantı tanklarını simüle etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, engel kullanımının şiddetli çalkantı sebebiyle duvarda oluşan basınç etkilerini büyük oranda değiştirebileceği ve bu tür analizlerin, çalkantı hareketlerini etkili bir biçimde kontrol altına almak için mühendislik yaklaşımlarının geliştirilmesine katkıda bulunabileceği belirtilmiştir [71].

Bellezi, Cheng, Okada ve Arai çalışmalarında çalkantı tankı içerisinde delikli engeller kullanmanın çalkantı etkisini sönümlemede etkili bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır. Tank içerisine konumlandırılan engellerde yer alan deliklerin sayısı, engel geometrisi ve tank içerisindeki sıvının yüksekliği değiştirilerek çalkantının dinamik etkilerini azaltmak için optimum tasarım önerilmiş, çalışmanın deneysel sonuçları ele alınan sayısal yöntem sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğundan bahsedilmiştir [72].

Jin ve Lin harici uyarmalar altında çalkantı davranışı üzerindeki viskoz etkileri incelemişlerdir. Tank duvarlarının yakınındaki sınır tabakasını uygun şekilde çözerek, yüksek viskoziteli sıvıların çalkantısını simüle etmek için 3B iki fazlı akışın sayısal modelini simüle etmişlerdir. Sayısal modeli, mevcut analitik çözümlerle ve önceki sayısal sonuçlarla doğrulamışlardır. Bu çalışmada, sayısal modelin doğruluğunu test etmek için gliserin içeren sıvı tankında çalkantı davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada ayrıca doğal

frekans tepkisinden dışsal uyarma tepkisine geçişin gerçekleştiği kritik viskozite değeri belirlenmiştir [73].

Liu, Feng, Lei ve Li çalışmalarında sinüzoidal bir uyarı altında çalkalanan bir sıvı hidrojen tankındaki hidrodinamik performansı araştırmak için sayısal bir model oluşturmuşlardır. Çalkantı hareketi sırasında serbest yüzeyin davranışını yakalamak için akışkan hacmi metodunu (Volume of Fluid – VOF) ele almışlardır. Serbest yüzeyin çalkantı dinamik tepkisi, arayüz yükselmeleri, çalkantı kuvveti, momenti ve sıvı basıncı değişimini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmanın sonunda sıvı serbest yüzeyinin, başlangıç döneminde "Z" veya "S" tipi profillere sahip kararlı arayüz şekillerine sahipken, zaman geçtikçe uyarma dalgasının ileriye doğru yayılmasıyla, sıvı tankının ortasında hem dalga tepeleri hem de çukurların belirginleştiğini vurgulamışlardır [74].

Qin, Mu, Tang ve Hu hidroelastisiteyi göz önünde bulundurarak bir çalkantı tankındaki farklı dizilimlerdeki yatay ve düşey engellerin çalkantı hareketine etkisi üzerine sayısal bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmada sayısal yöntemlerin ve yakınsama testlerinin etkinliği konusunda iki doğrulama yapmışlardır. Yatay ve dikey engellerin yüksekliği ve uzunluğunun yapısal tepkiye etkilerini, hidroelastisitenin neden olduğu doğal titreşimin genliklerinin, farklı titreşim bileşenlerinin frekanslarının ve enerji oranlarının elde edildiği bir dizi simülasyonla incelemişler ve analiz etmişlerdir. Bunlara ek olarak, periyodik çalkantı hareketi ve hidroelastik etkilerden kaynaklanan yatay ve dikey engellerin olası yapısal rezonansları gösterilerek hidroelastisitenin dikkate alınması gerektiğine işaret etmişlerdir. Çalışmanın sonunda yapısal tepkinin özellikleri, engel diziliminin etkileri ve engellerin yapısal rezonansının oluşumu hakkında yapısal güvenlik açısından anlamlı sonuçlar çıkarılacağı vurgulanmıştır [75].

Ünal, Bilici ve Akyıldız üzeri kapalı sıvı çalkantı tankını tankın tabanına sabitlenmiş T şeklinde engelle ve tank içerisinde engel bulunmadığı durumlar için ele almış ve sıvının tank üzerinde yaratacağı çalkantı etkilerini 2 boyutlu ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deney tankını içerisinde bulunan sıvının doğal frekanslarına göre iki farklı dönme açısıyla harekete maruz bırakmışlardır. Tank içerisine konumlandırılan engelin yüksekliği, tankın dönme açısı ve tank içerisinde bulunan sıvının yüksekliği değiştirilerek deneyler tekrarlanmış ve bu değişimlerin çalkantının tank üzerinde yaratacağı olumsuz dinamik etkileri ne ölçüde etkilediği ve sıvının serbest yüzeyinde meydana getireceği seviye değişimlerini

gözlemlemişlerdir. Engel yüksekliğinin tank içerisinde bulunan sıvının yüksekliğinin %80'inden fazla olduğu durumlarda sıvı çalkantısı sonucunda tank yüzeyinde oluşan basıncı önemli mertebelerde düşürdüğü sonucuna varmışlardır [17].

Yu, Xue ve Zheng tank içerisine yerleştirilen ızgara panellerin doluluk oranları, boyutları, konumları ve sayılarının değiştirilmesiyle sıvı çalkantısının hangi mertebelerde değişeceğine dair çalışma gerçekleştirmişlerdir. Tank içerisine yerleştirilen ızgara panellerinin doluluk oranları arttırıldığında sıvı yüzeyinde meydana gelen seviye değişiminin oldukça az miktarlarda olacağı vurgulanmıştır. Çalışmada ayrıca ızgara panel sayısının artmasının her zaman çalkantının dinamik etkilerini belirgin bir şekilde azaltmayacağı bununla birlikte ızgara panellerinin tank içerisindeki konumlarının da önemli olduğu açıkça belirtilmiştir [76].

Zang, Fang, Liu ve Lin deney tankına sabitledikleri gözenekli engelleri ve bu gözenekli engeller üzerine etki eden dış uyarma etkilerini sınır şartlarına ekleyerek çalkantı davranışını incelemişlerdir. Sayısal model sonuçlarını mevcut literatürle karşılaştırarak doğrulamışlar ve sonuçların iyi bir uyum sağladığını belirtmişlerdir. Gözenekli engel uzunluğu, gözeneklilik ve tasarımın çalkantı kuvveti, dalga yüzeyi yüksekliği ve hız alanı üzerindeki etkileri incelenmiş ve çalkantı hareketini kontrol altına alabilmek için bazı önemli sonuçlar önermişlerdir [77].

Arif, Loo, Kang, Punurai, Quen, Lai ve Chong yüzen bir engel bulunan membran tipi deney tankının % 30 ve % 50 doluluk oranları için tek yönlü uyarma altında çalkantı davranışını incelemişlerdir. Çalışma kapsamında ele aldıkları LNG tankını, 3 cm'lik bir genliğe ve 1,1 saniye doğal frekansa sahip sinüzoidal hareket altında OpenFOAM'da sayısal olarak simüle etmişlerdir. Çalkantı hareketinin tank duvarında neden olduğu basınç kuvveti, sayısal sonuçlar ve basınç sensörlerinden elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçların yaklaşık % 10 sapma ile kabul edilebilir bir uyum gösterdiği ve bulguların, geleneksel LNG gemileri gibi daha güvenli deniz taşımacılığı için önemli bir referans olması beklendiği belirtilmiştir [78].

Cho ve Kim yatay salınım ve dönme hareketine maruz bırakılan dikdörtgen bir tank içerisinde bulunan sıvının çalkantı etkilerini bastırmak için, tankın merkezinde alttan menteşeli ve üst gerilimli dikey gözenekli membran engeller kullanmışlar ve bu engellerin

sıvı çalkantısının dinamik etkileri üzerindeki değişimlerini incelemişlerdir. Tank duvarındaki serbest yüzey yükselmeleri, tank üzerindeki hidrodinamik kuvvetler (ilave kütle ve sönümleme katsayısı), membranın tepkileri ve gözenekli membran engel üzerindeki dalga yüklerinin çalışmanın ana konusu olduğu vurgulanmıştır. Çalışmanın sonunda gerilmiş gözenekli membran engellerin, gerektiğinde etkili, geçici bir anti-çalkantı önlemi sistemi olabileceği belirtilmiştir [79].

Çelik, Köse, Akgül ve Apay çalışmalarında silindirik bir tankı ele almışlardır. Silindirik ve çelik malzemeden yapılmış tanklarda deformasyonlar ve burkulmaların çok kısa sürede meydana gelmesinden dolayı 0,22 saniyelik El-Centro deprem kaydı için analizler gerçekleştirmişlerdir. Yıkıcı ve kısa sürede etki eden kuvvetlerin etkisi altında yapının dinamik analizinde ANSYS Workbench "Explicit Dynamics" yazılımı oldukça etkili sonuçlar verdiğinden seçilen süre ve deprem verilerinin oldukça ideal olduğu vurgulanmıştır. Araştırmacılar çalışmalarında, üstü-açık tank, üstü-konik ve üstü-kubbe şeklinde kapatılan modelleri üç farklı cidar kalınlığı için ele almış ve analizleri tekrar etmişlerdir. Tankın cidar kalınlığı ve tankın kapak şeklinin meydana gelen deformasyon ve burkulmalar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Silindirik çelik tankların kubbe biçiminde kapatılmasının deformasyonları ve burkulmaları önemli ölçüde kısıtlayacağı vurgulanmıştır [80].

Efe, Çelik, Kocaman ve Arslan sıvı depolama için inşaa edilen 12,5 m çapında ve 12 m yüksekliğinde silo tipi sıvı depolama tankının dalga yükü altındaki davranışını ANSYS WB sonlu elemanlar programı kullanarak analiz etmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında, dalga yüklerinin silo duvarında meydana getireceği gerilme ve deformasyon etkilerini azaltmak veya sönümlemek için dikey ve yatay rijitleştirme levhalarını kullanmışlardır. Çalışmada, tasarlanan silonun çap ve yüksekliği sabit tutularak, sabit su yüksekliği ve sabit dalga boyları için sayısal analizler tekrarlanmış ve sistemi düşey ve yatay yönde rijitleştirme plakaları ile dayanıklı hale getirmişlerdir. Sistemin rijitliğini artırmak üzere konumlandırılan plakaların çalkantı davranışına etkisinin irdelenmesi için düşey ve yatay elemanların (levhaların) yerleşim biçimi ve sayısını değişken kabul edip 6 çeşit model ele alarak analizleri tekrar etmişlerdir. Çalışmanın sonunda levhaların birlikte kullanılmasının olumlu sonuçlar vereceği araştırmacılar tarafından vurgulanmıştır [81].

George ve Cho orta noktasından döndürülen ve içerisinde sıvı ihtiva eden dikdörtgen bir tankın ortasına yerleştirilen düşey gözenekli engel sayesinde sıvı çalkantısının ne ölçüde kısıtlandığını araştırmışlardır. Sıvı çalkantısının deney tankı üzerinde yaratacağı hidrodinamik etkileri deneysel, analitik ve sayısal çalışmalar ile ele almışlardır. Analitik sonuçların, sıvının rezonans değerlerinde uyarma hareketi verilmesi dışında sayısal ve deneysel sonuçlarla tatmin edici bir uyum gösterdiği belirtilmiştir. Gözenekli engellerin, sıvı çalkantısına bağlı hidrodinamik yükleri ve ayrıca sıvı çalkantısı neticesinde sıvı yüzeyinde meydana gelecek seviye değişimlerini kısıtlamaya yardımcı olduğunu vurgulamışlardır [82].

Jin, Song ve Liu yüksek dolum seviyeli bir tankta sismik yükler altında çalkantı hareketini ele aldıkları 2D modelde sayısal yöntemle incelemişlerdir. Tankın hem uzunlamasına hem de dikey yönlerde geniş bant frekanslı doğrusal olmayan yer değiştirmesini analiz etmek için iki güçlü deprem verisi kullanmışlardır. Çalışmada deneysel doğrulamaya dayalı olarak, serbest yüzey hareketi ve yan duvardaki yüksekliklerin ve çalkantı basıncının hesaplanması amaçlanmıştır. Çalışmanın sonunda silindirik tankın 2 boyutlu çözümünün, 3 boyutlu modelde çalkantı davranışının maksimum tepkisini tahmin etmek için kullanılabileceği ve sismik yükler altındaki su hareketlerinin çalkantının modal özellikleriyle tutarlı olduğu belirtilmiştir [83].

Jin, Tang, Xiaochun Tang, Mi, Wu, Liu ve Huang deney tankının rezonans ve rezonans dışı frekans değerlerinde yatay düzlemde hareket ettirilmesiyle ortaya çıkan çalkantı hareketini viskoziteleri farklı sıvılar kullanarak deneysel açıdan incelemişlerdir. Çalışmada hem musluk suyunu hem de viskozitesi ortam sıcaklığına duyarlı olarak değişen gliserini seçmişlerdir. Viskozitenin frekans yanıtı üzerinde önemli etkilerinin olduğu, yüksek viskoziteli sıvıların baskın frekanslarının, düşük viskoziteli sıvılarınkinden farklı olduğu belirtilmiştir. Tank içerisinde bulunan sıvının doğrusal olmama (nonlineer) halinin viskoz sönüm nedeniyle zayıflayacağını vurgulamışlardır [84].

Tsukamoto, Cheng, Kobayakawa, Okada ve Bellezi sığ ve orta sıvı koşullarında küçük taban ve yan duvar rijitleştiricilerinin çalkantı yükleri üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar için deney tankını, içerisinde sıvı bulunmayan dikdörtgen bir tank ve yan duvarlarında veya tankın altında takviyelerin olduğu durumlar için 2 boyutlu modeller olarak tasarlamışlardır. %5 ila %20 arasında değişen tank doluluk oranları için doğal çalkantı frekanslarında deney tankına harmonik açısal hareket

uygulamışlardır. Çalışmanın sonunda, deney tankında kullanılan rijitleştiricilerin sıvı çalkantısı üzerindeki bastırıcı etkilerini vurgulamışlardır [85].

Yu, Xue ve Jiang yüksek mod değerlerinde etkili olan parametrik çalkantı durumunu ele almışlardır. Deneysel sonuçlar neticesinde yüksek frekans ile uyarılan ve içerisinde engel bulunmayan bir sıvı tankında parametrik çalkantı neticesinde oluşacak boyutsuz serbest yüzey yükselmelerinin, düşük frekans ile uyarmalara nazaran çok daha büyük mertebelerde olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada ayrıca sıvı tankına yerleştirilen engellerin parametrik çalkantıyı bastırmadaki etkinliği ve engellerin sönümleme mekanizmasını araştırmışlardır. Tank içerisine düşey yerleştirilen engellerin parametrik çalkantıyı sönümlendirmede oldukça iyi performans gösterdiği sonucuna varmışlardır. Çalışmanın sonunda, sıvı çalkantısını kontrol altında tutabilmek için optimum engel sayısı ve konumunun çalkantı modlarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir [86].

Yu, Xue ve Zhu deney tankı içerisinde yer alan sıvının çalkantı yüklerinin değişimini tank içerisine konumlandırılan geçirimli ve geçirimsiz düşey engellerle irdelemişlerdir. Sızdırmaz engel yüksekliği, genliği ve deney tankının hareket frekansının çalkantı üzerindeki etkilerinin araştırılmasına dayanarak, engel geçirgenliğinin çalkantı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada ayrıca küçük geçirgenlik katsayısına sahip bir engel yerleştirilen tanktaki maksimum akış hızlarının, geçirimsiz engele sahip tanktakilerden daha küçük olduğu sonucuna varmışlardır. Sonuçlar ele alınan sayısal yöntem ve deneysel sonuçlarla kıyaslanmış ve sonuçların uyumlu olduğunu belirtmişlerdir [22].

Zhang çalışmasında, içerisinde yağ ihtiva eden tank içerisine yerleştirilen farklı engel türlerinin çalkantı basıncı ve zaman-alan değeri üzerindeki etkisini ele almıştır. Farklı şekillerdeki engellere sahip yakıt tanklarında petrolün çalkantı basıncı ve zaman-alan değerleri karşılaştırıldığında, kıvrımlı yapıdaki engelleri içeren yakıt tankının merkezi noktasında petrolün yaratacağı çalkantı basıncı ve düz çizgi şekilli engellere sahip yakıt tankında merkezi hat üzerinde petrolün yaratacağı çalkantı basıncı değerlerinin diğer kombinasyonlara nazaran düşük olduğu belirtilmiştir. Çalışmanın sonunda kıvrımlı şekilli bölmelerin zaman-alan değerlerini azaltmak için tercih edilmesi gerekliliği vurgulanmıştır [87].

Zhang, Gaidai, Gui ve Yurchenko harici bir harmonik uyarma hareketine maruz kalan dikdörtgen bir tankın titreşim çarpma hareketinin bir sonucu olarak ortaya çıkan çalkantı olayını incelemişlerdir. Çalışmanın amacının bir gemi ile yüzen buz arasındaki etkileşimin meydana gelebileceği gerçekçi bir senaryonun idealleştirilmesinin bir sonucu olduğu belirtilmiştir. Tankın titreşim darbe hareketini modellemek için iki taraflı hareketsiz engeller kullanmışlardır. Titreşim darbesi hareketinin çalkantı yoğunluğu üzerindeki etkisinin çalışmanın ana konusu olduğu vurgulanmış ve çalışmanın sonunda esnek, dikey olarak yönlendirilmiş bir engel bulunan çalkantı hafifletme stratejisi önerilmesi planlanmıştır. Çalışmanın sonunda, klasik bir sert bölme durumunda çalkantı yoğunluğunun daha yüksek olduğunu ve bu olumsuz durumun esnek bölme ile önemli ölçüde azaltılabileceğini vurgulamışlardır [88].

Zhang, Khalid, Long, Chang ve Liu düzgünleştirilmiş sonlu elemanlar yönteminin (SFEM) birleştirme stratejisine ve daha iyi doğruluk sunan geliştirilmiş bir düzleştirilmiş parçacık hidrodinamiği (SPH) sürümüne dayanan yakın zamanda geliştirdikleri yöntemleri sayesinde deney tankı içerisine yerleştirdikleri elastik engellerin sıvı çalkantısının sönümlenmesine etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmanın sonunda, sıvı tankı duvarındaki çarpma basıncının, elastik engellerin geometrik özelliklerinden ve dizilimlerinden önemli ölçüde etkilendiğinden bahsetmişlerdir [89].

Cho yatay salınım ve dönme hareketi yapan dikdörtgen bir sıvı tankı içerisine yerleştirilen esnek gözenekli elastik engellerin sıvı çalkantısı üzerindeki etkilerini saptamak için bir dizi çalışmalar gerçekleştirmiştir. Yazar, gözenekli elastik bir engelin çalkantı hareketi üzerindeki etkisini değerlendirmek için analitik bir model geliştirmiştir. Çalışmada ayrıca engel geometrisinin (gözeneklilik, yükseklik) ve yapısal parametrelerin (bükülme sertliği, demirleme hattının sertliği) sıvı çalkantı hareketi üzerindeki etkilerini gösteren sayısal sonuçlar sunulmuştur. Çalışmanın sonunda esnek gözenekli elastik engellerin, rijit bir engel ile karşılaştırıldığında sınırlı bir uygulama aralığında etkili bir çalkantı kısıtlayıcı olduğu belirtilmiştir [90].

Golla ve Venkatesham düşey engellere sahip bir dikdörtgen sıvı tankının farklı çalkantı rejimlerinde, engellerin çalkantı gürültüsü oluşturma mekanizmalarına ilişkin çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma için, tankın girişine yerleştirilmiş üç tip düşey engel dizilimini dikkate almışlardır; bunlar daldırılmış tabana monte, gömme montajlı ve yüzey

delici tabana monte engel dizilimleridir. Çalışmanın, farklı çalkantı rejimlerindeki çeşitli doluluk seviyeleri için düşey engellerin çalkantı gürültüsü üzerindeki etkisinin anlaşılmasına yardımcı olacağını vurgulamışlardır [91].

Iranmanesh ve Nikbakhti, harmonik ve sismik yükler altında bir deney tankında sıvı çalkantısını bastırmak için bir yay sistemine bağlı hareketli engelleri Birleştirilmiş Eulerian-Lagrange (CEL) tekniğini kullanarak sayısal olarak araştırmışlardır. Malzemenin ağdan geçebileceği Euler akışkan alanı ile malzemenin ağa sabitlenmesi gereken Lagrange tank alanı arasındaki etkileşimi, ABAQUS yazılımının CEL özelliğini kullanarak modellemişlerdir. Hareketli engellerin olduğu veya olmadığı durumlarda deney tankında sıvı çalkantısını simüle etmişler ve deneysel ölçüm sonuçlarıyla kıyaslamışlardır. Yay sertliğinin sıvı çalkantısının kinetik enerjisi üzerindeki etkisinin küçük olduğu, ancak sol duvara uygulanan normal kuvvetin yay sertliği tarafından büyük ölçüde etkilenebileceği vurgulanmıştır [92].

Kargbo, Xue, Zheng ve Yuan dikdörtgen bir tankta yoğunluk tabakalı sıvı yağ ve su katmanlarını içeren sayısal bir modeli, çalkantı koşulları altında T-şekilli bir bölme biçiminde rijit gözenekli bir yapı ile etkileşime girecek şekilde modellemişlerdir. Katmanlı sıvının ve arayüzey dalgasının gözenekli bir yapı ile etkileşimini gözlemlemeye yönelik bir dizi kurulum durumunu simüle etmişlerdir. Gözenekli yapının etkisi ve ilgili çalkantı dalgalarını ve tank duvarları üzerindeki darbe basıncını sönümlemedeki etkinliğini saptamak için, çeşitli dizilim türleri altında çalkantı analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada ayrıca, gözenekli yapıların çeşitli model kurulum koşulları altında dikdörtgen bir tankta çalkalanan katmanlı sıvı ile etkileşimini incelemişler ve bunların çalkantı sönümlemesindeki etkinliğine vurgu yapmışlardır [93].

Liu, Lin, Xue, Cheng ve Lian yatay dış uyarmalar altında iki katmanlı sıvı çalkantısını incelemek için NEWTANK olarak adlandırılan sayısal bir model geliştirmişlerdir. Ayrıca hem serbest yüzeyi hem de katmanlı sıvılar arasındaki arayüzü aynı anda izlemek için çok katmanlı bir sıvı hacmi yöntemi önermişlerdir. Modelin doğruluğunu araştırmak için, çalkantı tepkilerinin simüle edilmiş sonuçlarını, doğrusal analitik çözümler ve deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. İki katmanlı sıvı çalkantı hareketi için, daha küçük doğal frekansa sahip alt katman ve daha büyük frekansa sahip üst katmandaki sıvıların tepkisiyle ilgili olduğu bilinen frekans değerleri incelenmiştir. Farklı dışsal uyarı frekansları, üst

katman rezonansı, alt katman rezonansı veya her iki katmanın rezonanslarını tetikleyebileceği ve her biri, modlar ve katmanlar arasında çok farklı enerji taşıma desenleri sergileyebileceği belirtilmiştir [94].

Ma, Xiong ve Guowei Ma çalışmalarında farklı dizilimlerdeki düşey engellerin sıvı çalkantısını bastırmadaki etkinliğini, Lattice Boltzmann Yöntemi (LBM) ile sayısal olarak araştırmışlardır. Farklı yüksekliklere ve ayırma mesafelerine sahip tek veya çift düşey engellerin sıvı çalkantısını sönümleme üzerindeki etkisini değerlendirmek için sıvı yüksekliği, toplam darbe basıncı ve enerji dağılımını incelemişlerdir. Sıvının arayüzünde ve içerisinde meydana gelen viskoz dağılımını belirgin bir şekilde niceliklendirmek için ilk defa kullanılan yöntem sayesinde güçlü iç dağılımın çalkantı dalgasını bastırmada önemli olduğu vurgulanmıştır [23].

Morales, Rodríguez-Morales, Jacobo ve Montes-Rodriguez karayolu tankerlerindeki çalkantı fenomenini ve bu çalkantının aracın yapısal bileşenleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, sıvı hareketini sönümlemek için kullanılan artı (+) ve çapraz (X) şeklindeki perdelerin tanker yapısal bileşenlerindeki gerilmelere etkisi ele alınmıştır. Bu amaçla, dört farklı tank tasarımı temel alınarak sayısal simülasyon tekniklerini kullanmışlardır. Araştırma sonuçları, çalkantı sönümlemesi ile yapısal gerilmeler arasında belirgin bir denge olduğunu göstermiştir. Etkili bir çalkantı sönümlemesi ve yapısal gerilmelerin minimize edilmesi için kullanılan perdelerin farklı tasarımlarının önemli olduğu vurgulanmıştır [95].

Pradeep, Husain ve Ansari çalışmalarında bir sıvı tankı üzerine etki eden çalkantı hareketinin neden olduğu gerilmeleri ve yer değiştirmeleri belirlemek için tank içerisine çeşitli bölme duvarlar yerleştirmişlerdir. Bölme duvar bulunmayan durumda çalkantı hareketi neticesinde tank duvarları üzerine uygulanan yanal basınçta, sistemin yer değiştirmesini olumsuz yönde etkileyen bir artış olduğu belirtilmiştir. Bölme duvarlarının sıvı tankına yerleştirilmesiyle çalkantı hareketinden kaynaklanan bu yer değiştirmelerin sınırlandırılacağını ve böylece yapı üzerinde oluşan gerilmelerin azaltılabileceğini belirtmişlerdir [96].

Thirunavukkarasu ve Rajagopal çalışmalarında çalkantı analizi için tankın değişken kütle bölgesine yerleştirilen yatay ve düşey engellerin bir kombinasyonu olan Horivert bölmelerini dikkate almışlardır. Çalışmanın sayısal analizini 100 mm, 200 mm ve 300 mm

su ile doldurulmuş slot konfigürasyonlu yatay engellere sahip tanklar dikkate alarak gerçekleştirmişlerdir. Tank içerisindeki suyun doluluk seviyesine bağlı olarak 20 mm'lik uyarma genliği ve belirli frekans büyüklüklerinde sinüzoidal hareket ile tankı uyarmışlardır. Suyun basıncı, hızı, kayma gerilimi ve tanktaki maksimum su yüksekliğinin, bu çalışmanın temel parametrelerini oluşturduğunu belirtmişlerdir. Slot konfigürasyonuna sahip olan düşey ve yatay engellerin sıvı çalkantısının bastırılmasında oldukça etkili olduğunu vurgulamışlardır [15].

Yang, Niu ve Zhang yaptıkları çalışmada farklı sıvı tankları tasarımları altında sıvı çalkantı davranışının hızlı değerlendirmesini gerçekleştirmek için Sonlu Hacim Yöntemi (FVM) ve Kafes Boltzmann yöntemlerini (LBM) ele almışlardır. Sayısal modellerin etkinliğini mevcut deneysel verilerle doğrulamışlardır. Onaylanmış modelleri daha sonra farklı bölme halkası tasarımlarıyla çalkantı davranışını incelemek için kullanmışlardır. LBM modelinin hesaplama zaman maliyetinin, sayısal doğruluktan ödün vermeden FVM modeli için zaman maliyetinin yalnızca yaklaşık % 7.0'si olduğu belirtilmiştir. Çalkantı benzeri problemlerin hızlı tasarım değerlendirmesinde LBM modelinin gelecekteki kullanımının yaygınlaşacağını vurgulamışlardır [97].

Zhu, Xue, Yuan, Zhang ve Wei Zhang dalgalanma etkisi altında bulunan dikdörtgen bir tankın, çalkantı hareketini azaltma üzerindeki etkisini değerlendirmek için yenilikçi bir çift taraflı kavisli engel tipi önermişlerdir. Çalışmada ele alınan engel tiplerini geleneksel engellerle karşılaştırmak için, düşey engelin ve T-tipi engelin çalkantı hareketini azaltma üzerindeki etkileri, serbest yüzey dalgası yüksekliği ve tank duvarındaki hidrodinamik basınç analiz edilerek deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın sonunda radyan artışı ile engel üzerindeki efektif gerilimin azalma eğiliminde olduğunu belirtmişlerdir [32].

Bellezi, Cheng ve Nishimoto çalışmalarında deniz yapılarındaki çalkantının tasarım üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada yüzen engel temelli çalkantı azaltma düzeneklerine yoğunlaşılmıştır. Çalkantı olgusunu, Hareketli Parçacık Yarı-Örtük (MPS) yöntemi ile simüle etmişlerdir. Ayrıca, tankın farklı kısımlarına yerleştirilen sabit engellerin çalkantı davranışına etkileri de değerlendirilmiştir. Yüzen engelin geniş bir dolum aralığı için çalkantı hareketini kısıtladığı, buna karşın sabit engelin ise bazı dolum koşullarında daha şiddetli akışlara neden olduğu belirtilmiştir [98].

Gonzalez, Mondragon ve Giron, Sesam HydroD ve Hareketli Parçacık Yarı Kapalı (MPS) yöntemleri ile sayısal olarak çalkantı analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG) tankerinin küresel hareketleri üzerindeki çalkantı etkisini ve prizmatik tanklardaki bir dizi dolum fraksiyonu için rezonans periyotlarını belirleyerek gerçekçi çalışma koşulları oluşturmayı amaçlamışlardır. Geminin dönme merkezi konumunun çalkantı nedeniyle uygulanan kuvvetler ve momentler üzerindeki etkisini karşılaştırmak için MPS yöntemini uygulamışlardır. Kısmen dolu tanklara sahip LNG tankerlerinin küresel hareket tepkilerine çalkantı etkilerinin dahil edilmesi gerektiğini, dinamik basınç zaman geçmişlerini ve LNG prizmatik tank üzerindeki toplam salınım kuvvetlerinin ve toplam yuvarlanma momentlerinin ilave katkısının, farklı konumları göz önünde bulundurarak karşılaştırılması gerektiğini belirtmişlerdir [99].

Jiang, Feng ve Yan sıvı tankının hareketi neticesinde iç engellerin çalkantı hareketini azaltıcı etkisini incelemişlerdir. Çalışma sürecinde, çeşitli iç engel şemaları önerilmiş ve bir dikdörtgen kesit kutusu için salınım hareketi tepkisi altında bu engellerin sıvı çalkantısını kısıtlama etkisini deneysel ve sayısal yöntemleri kullanarak araştırmışlardır. Sayısal simülasyonlardan elde ettikleri veriler ile sığ batık derinliğe sahip yatay engellerin çalkantı hareketi tepkisini önemli ölçüde azaltabileceği sonucuna ulaşmışlardır. Çalışmada ayrıca uygun engel seçiminin büyük ölçekte çalkantı hareketini azalttığı ve çalkantı hareketinin olumsuz etkiler yarattığı gemilerde meydana gelen bu hareketin önemli derecede kısıtlanabileceği söylenmiştir. Çalışmanın sonunda doldurma derinlikleri göz önüne alındığında , birleştirilmiş salınım-çalkantı hareketi tepkisini bastırmak için çok katmanlı yatay engeller kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir [100].

Kumar, Jaikumar, Pradeep ve Bhavi %50 doluluk oranına sahip eliptik sıvı tankı için çalkantı etkisinin tank üzerinde yarattığı etkileri içerisinde engel bulunmadığı ve farklı konumlar ve sayıda yerleştirilmiş engellerin bulunduğu durumlar için incelemişlerdir. İki farklı engel tasarımı için CFD simülasyonunu, zamana dayalı çok fazlı Akışkan Hacmi (VOF) şeması kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Engellerin etkinliğini değerlendirmek için engel yerleştirilmeyen durumla karşılaştırıp, simülasyon süresi boyunca maksimum sıvı yüksekliğini, tank içindeki çalkantı etkisini ölçmek için parametre olarak kabul etmişlerdir. Deney tankına yerleştirilen engellerin, temel modele kıyasla tank içerisindeki çalkantı etkisini azalttığını belirtmişlerdir [101].

Korkmaz tarafından yürütülen çalışmada, katmanlı sıvıların viskozitesinin dikdörtgen bir tankta sıvı çalkantısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma, yan duvarlara olan sıvı etkileri ve serbest yüzey deformasyonuyla ilgili viskozite özelliğini araştırmak için beş farklı sıvının kullanılmasını içermektedir. Çalışmada rezonans ve non-rezonans frekansları kapsayan geniş bir uyarma frekansı aralığı kullanmıştır. Çeşitli sıvıların serbest yüzey deformasyonlarını, yüksek hızlı görüntüleme kullanarak tek katmanlı ve iki katmanlı durumlar için araştırmıştır. Deneysel sonuçları karşılaştırmalı olarak analiz etmiş ve sonuçlar arasında bir uyum olduğunu vurgulamıştır. Yazar daha yüksek viskoziteli bir akışkanın üst tabakaya eklenerek alt tabakadaki akışkanın çalkantı etkilerinin azaltılabileceğini vurgulamıştır [102].

Liu, Wu ve Lin bir tank içindeki iki katmanlı sıvı sisteminin yalpa uyarlaması altında non-rezonans ve rezonans tepkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Hem serbest yüzeyin hem de arayüzün hareketi, hareketli bir sistemde görsel olarak eğik kareleri düzeltebilen bir görüntü işleme yöntemiyle aynı anda otomatik olarak tanımlanmıştır. Dış uyarmanın frekansı üst katmandaki sıvıya yakın olduğunda, serbest yüzeyde bir rezonansın tetiklendiğini gözlemlemişlerdir. Öte yandan, dış uyarmanın frekansı alt katmandaki sıvıya yakın olduğunda, iki sıvı arasındaki arayüzde rezonans tepkisinin meydana geldiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, farklı koşullar altında arayüz yakınındaki ters hız yönleri nedeniyle Kelvin-Helmholtz kararsızlıklarının oluştuğunu ve bu kararsızlık uzunluklarının kritik Richardson numarasıyla tahmin edilebileceğini bulmuşlardır. Alt katman derinliğinin nispeten sığ olduğu durumlarda, tankın altının arayüzdeki dalga çukurunun gelişimini kısıtladığını; üst katmanın kalınlığı azaldığında ise serbest yüzeyin dalga tepesini sınırladığını tespit etmişlerdir. Frekans alanında, non-rezonans ve rezonans tepkiler için arayüz yer değiştirmelerinin daha detaylı incelemelerini yapmışlardır [103].

Luo, Su, Lin, Khayyer ve Zhao su ve dizel yağının iki katmanlı çalkantısını, tutarlı parçacık yöntemini (CPM) kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Mekansal türevlerin hesaplanmasını yüksek doğruluk ve tutarlılıkla sağlayan bir projeksiyon tabanlı parçacık yöntemi olan CPM'i yayınlanmış deneysel verilerle doğrulamışlardır. Daha sonra, sadece yatay salınım ve birleşik yanal-düşey hareket uyarmaları altında iki katmanlı sistemde çalkantı davranışı incelenmiştir. Birleşik uyarma durumlarında, hem yanal hem de düşey hareket frekanslarının toplamının/farkının sistemin doğal frekansının tek katına yakın

olmasının, her iki uyarmanın da doğal frekanstan daha uzak olmasına rağmen ikincil şiddetli çalkantıları tetiklediğini belirtmişlerdir [104].

Wang, Lin, Jiang, Zheng ve Chen kısmen dolu bir silindirik tankta sıvı çalkantısını incelemek için VOF (Sıvı Hacmi) yöntemini temel alan bir sayısal model kurmuşlardır. Farklı engel düzenlemeleri içeren veya engel içermeyen bir tankta çalkantı hareketlerini araştırmışlardır. Harmonik ivme uyarmaları altında ölçekli bir tankta bir dizi deney yapmışlardır. Bu modeli, ölçülen verilerle sıvı çalkantısı tepkilerini karşılaştırarak doğrulamışlardır. Doğrulanan modeli, sıvı çalkantı hareketi üzerindeki birleşik engel etkisini incelemek amacıyla kullanmışlardır. Çalışmanın sonunda geleneksel engellerin sadece uzunlamasına yönde sıvı çalkantısını sınırlayabildiği, birleşik engel eklemesiyle sıvının hem uzunlamasına hem de yanal yönde olan çalkantısını azaltabileceğini vurgulamışlardır [105].

Wen, Zhao ve Wan yaptıkları çalışmada tek fazlı ve çok fazlı MPS yöntemleri arasında karşılaştırmalı bir analiz yoluyla şiddetli çalkantı hareketine sahip sıvı tankını temsil etmek için çok fazlı simülasyonların gerekliliğini göstermeyi ve şiddetli çalkantı akışlarında hava etkisini daha iyi anlamayı amaçlamışlardır. Artan şiddetlerde sıvı çalkantısını simüle etmek için hem MMPS hem de IMPS yöntemlerini uygulamışlar ve sayısal sonuçları birbirleriyle ve deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Çalkantı yoğunluğu arttıkça hava yastığının etkisinin göz ardı edilemez hale geldiğini ve tek fazlı simülasyonun doğruluğunun önemli ölçüde azaldığını, buna karşın MMPS yöntemiyle elde edilen simülasyon sonuçlarının tüm deneysel sonuçlarla iyi uyum sağladığını belirtmişlerdir [106].

Wiegerink, Baldock, Callaghan ve Wang sıvı çalkantı etkisini azaltmak için, çalkantı bastırma blokları olarak adlandırılan, yüzen kapalı muhafazalı su ürünleri sistemlerine uyarlanmış yeni bir konsept tanıtmışlardır. Çalkantı bastırma bloklarının, tanktaki operasyonel hacimde önemli bir azalma olmaksızın serbest yüzey alanını daraltarak doğal çalkantı sürelerini azalttığı ve mevcut sistemlere sonradan takılabilmesi bakımından avantajlı olduğunu belirtmişlerdir. Maksimum çalkantı genliklerini, bir dizi uyarma frekansı için farklı boyutlarda kübik çalkantı bastırma blokları kullanarak 25 farklı test durumu için karşılaştırmışlardır. Çalkantı bastırma bloklarının, tankın ana gövdesi içindeki toplam çalkantı hacmini ve türbülanslı hareketleri azalttığını, çok daha sakin, kontrollü, düşük enerjili bir yaşam ortamı sağladığını ve bu ortamın balık sağlığı için gerekli olduğunu belirtmişlerdir [107].

Cao, Li, Gao, Xiaochen Li ve Liu yatay sinüzoidal uyarma hareketi altında dikdörtgen bir tankta serbest yüzeyli iki katmanlı sıvı çalkantısı üzerine sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Katmanlı sıvılar arasındaki arayüz yer değiştirmesinin temel olarak düşük sıvı derinliğinden etkilendiği, serbest yüzey yer değiştirmesinin ise birincil olarak toplam sıvı derinliğine bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Sayısal sonuçların boyutsal analizini kullanarak, S-modeli ifadesinde, her iki sıvının yer değiştirmelerini zorlama genliği, zorlama frekansı ve sıvı derinliği ile ilişkilendiren bir uyum eğrisi elde etmişlerdir. Ayrıca, tek katmanlı sıvı davranışından farklı olarak, güç spektral yoğunluk eğrilerinde toplam ve fark frekanslarının önemli roller oynadığını bulmuşlardır [108].

Liu, Cai ve Lu tek katmanlı ve çift katmanlı sıvı içeren deney tanklarında çalkantı hareketinin davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında tek katmanlı sıvıya sahip deney tankında serbest yüzey çalkantısını, çift katmanlı sıvıya sahip deney tankında ise arayüzey çalkantısını incelemişlerdir. Deney tankını frekans kontrollü bir tablaya yerleştirerek ilk yedi doğal modu içeren salınım frekanslarına maruz bırakmışlardır. Arayüzeyde çalkantı sonrası meydana gelen frekans tepkilerinin serbest yüzeye kıyasla benzer özellikler sergilediği, bununla birlikte arayüzeyde oluşan çalkantı genliğinin daha küçük olduğu sonucu vurgulanmıştır. Ayrıca dışsal uyarı frekansının iki katmanlı sıvı sisteminin tek sayılı mod doğal frekanslarına eşit veya yakın olduğu durumlarda çalkantı hareketinin agresif davranış gösterdiği belirtilmiştir [109].

Liu, Lu, Cai ve Lei çalışmalarında yatay harmonik hareket altındaki dikdörtgen bir tankta yer alan üç katmanlı sıvının çalkantı davranışını anlamak için laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Üç farklı sıvı olarak su, makine yağı ve etanolü seçmişlerdir. Tüm sıvılar için sıvı derinliği (h) tank uzunluğu (L) oranı h/L = 0,2 seçilerek, 0,04 - 8 cm aralığında dışsal uyarı genliği ve 0,111-2,614 Hz arasında çeşitli uyarı frekansları içeren bir dizi deneysel durumu göz önünde bulundurmuşlardır. Deneysel çalışmalar sonucu dışsal uyarı frekansının alt arayüzün birinci modal doğal frekansına ve orta arayüzün üçüncü modal doğal frekansına çok yakın olduğunda rezonans olgusunun hem orta hem de alt arayüzlerde gözleneceği vurgulanmıştır. Bu şartlar altında serbest yüzey dalga genliğinin alt ve orta arayüzlerle kıyaslandığında ihmal edilebilir derecede küçük olduğunun altı çizilmiştir. Bununla birlikte tanka verilen hareketin genliğinin artmasıyla birlikte alt arayüzeydeki dalga genliğinin agresif davranış gösterdiği de belirtilmiştir. Çalışmanın sonunda üç katmanlı sıvı

çalkantısının tek katmanlı veya çift katmanlı sıvı çalkantısına nazaran çok daha karmaşık yapıda olduğu vurgulanmıştır [110].

Liu, Lu, Qi ve Cai silindirik bir petrol depolama tankında sıvı viskozitesinin yüzey dalgası üzerindeki etkilerini anlamak için dört farklı viskoziteye sahip sıvılarla çalkantı deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucu çalkantı davranışının uyarı frekansı, uyarı genliği ve sıvı viskozitesinden etkilendiği sonucuna varılmıştır. Yağ viskozitesinin artması sonucu dalga hareketinin daha kararlı hale geldiği ve dalga genliğinin küçüldüğü belirtilmiştir. Deneysel sonuçlar teorik ve sayısal modellerle karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu vurgulanmıştır [111].

Ren, Khayyer, Lin ve Hu çalışmalarında sıvı tanklarında meydana gelen çalkantı hareketi ve bu hareketin elastik bir engelle olan etkileşimini hem sayısal hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Çalkantının yüksek derecede doğrusal olmayan bir sıvı hareketi olduğu ve şiddetli çalkantının tanka büyük darbe basınçları uygulayarak yapısal hasara yol açabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada, elastik bir engelle çalkantı akış etkileşimi, düzleştirilmiş parçacık hidrodinamiği (SPH) çerçevesinde açık kaynaklı bir kütüphane olan SPHinXsys kullanılarak hem sayısal hem de deneysel olarak araştırılmıştır. SPHinXsys modelini doğrulamak için dikdörtgen bir tankta bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Serbest yüzeyin zaman değişimi, basınç ve engel deformasyonu üzerine sayısal sonuçlar ile deneysel ölçümler arasında nicel karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışmada ayrıca farklı doluluk oranları için hız alanı sayısal olarak ve farklı su derinlikleri için ise engel üzerine etki eden toplam dinamik kuvvet incelenmiştir [112].

Wang, Jiang, Chai, Huang ve Tang yatay bir silindirik tank içerisinde kısmen dolu olan bir sıvının, serbest yüzeyi kısıtlayan elastik bir membran etkisi altında nasıl hareket ettiğini incelemek için bir akışkan-membran etkileşimi üzerine sayısal bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Sıvı-membran etkileşim analizinin, sıvının yük kaymaları, çalkantı kuvvetleri, momentler ve çalkantı frekansı açısından membranın sıvı çalkantı tepkileri üzerindeki etkisini araştırmak için yapıldığı belirtilmiştir. Membran kullanılmasının çalkantı hareketi genliği ve sıvı çalkantısının tank üzerinde yaratacağı dinamik etkiler üzerinde önemli bir azalma sağlayabildiğini vurgulamışlardır [113].

Xue, Cao, Yuan, Zheng ve Lin yatay uyarma hareketi altında iki boyutlu dikdörtgen bir tankta yer alan iki katmanlı sıvıların çalkantı davranışını tank içerisine yatay elastik bir engel yerleştirerek yarı-analitik bir çalışma ile incelemişlerdir. Yatay elastik engelleri üst katman ve alt katman sıvılara ayrı ayrı yerleştirerek çalışmaları tekrar etmişlerdir. Yarı-analitik çözümlerin geçerliliği ele aldıkları çeşitli yöntemlerle doğrulanmış ve diğer yöntemlerle uyumlu bulmuşlardır. Sayısal analiz sonuçlarına göre, elastik engellerin üst katmana yerleştirilmesi halinde yoğunluk oranının çift frekansta daha etkili olduğu vurgulanmıştır. Çalışmanın sonunda, sıvı tankında engel kullanımının katmanlı sıvılarda sıvı çalkantısını önemli derecede bastırdığı belirtilmiştir [114].

Xue, He, Yuan, Cao ve Odoom altı serbestlik derecesine sahip hareket simülasyon platformunda bulunan dikdörtgen bir tankta sıvı çalkantısını azaltmada gözenekli bir engelin etkilerini incelemek için deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Gözenekli engeli delikli paslanmaz çelik levhadan yapılmış bir kafesin içine tamamen doldurulmuş küresel parçacıklardan oluşan bir malzeme katmanı olarak önermişlerdir. Yatay olarak harekete maruz bırakılan dikdörtgen bir tankta sıvı çalkantı hareketi sonrası serbest yüzey dalga yüksekliği ve duvara etki eden darbe basıncını deneysel çalışmalar ile elde etmişlerdir. Daha sonra, OpenFOAM yazılımı ile gözenekli bir engel yerleştirilen dikdörtgen bir tankta çalkantı hareketini simüle etmişlerdir. Çalışmalarda farklı uyarma frekanslarında gözenekli engelin çalkantı hareketini sönümleme mekanizmasını incelemişler ve gözenekli engelin yüksek uyarma frekansında darbe basıncını bastırmada daha etkili olduğunu vurgulamışlardır [115].

Awad, Tait ve Love çalışmalarında yüksek binalarda rüzgar kaynaklı hareketlerin oluşturduğu rahatsızlıkları ve bina üzerinde yarattığı olumsuz etkileri azaltmak için çift işlevli su tanklarını kullanmışlardır. Ayarlanabilir sıvı sönümleyici (TLD) ve yangın söndürme amacıyla tasarlanan bu tanklar, yangın kodu gerekliliklerini ve bina hareket kontrolünü karşılamak için delikli bir tabana sahip olacak şekilde modellenmiştir. Yazarlar, ISPH kodunu kullanarak bu delikli tabanın tankın genel çalkantı hareketine olan etkisini anlamak için makro ve mikro seviyede modeller geliştirmişlerdir. Çalışma, farklı uyarma genlikleri ve frekansları altında yapılan sayısal analizlerle desteklenmiş ve TLD tank sistemine ait yanıtlar sunulmuştur [116].

Chen, Ming, Yu, Tan ve Yuan çalışmalarında sismik yükler altındaki delikli yapıların sıvı çalkantısı sönümlemesi ve yapısal dinamik analizini ele almışlardır. Çalışmada, akış ve yapısal dinamiklerin sayısal modellemesi yapılmış ve delikli yapıların çalkantı davranışlarına olan etkileri incelenmiştir. Bu bağlamda çalkantı davranışı, farklı ivmelere sahip üç sismik yükleme durumu altında araştırılmıştır. Çalışmanın ilgili alanlarda tasarım ve güvenlik açısından önemli katkılar sunduğu vurgulanmıştır [117].

He, Tang ve Lin uzun süreli dalga etkileşimlerinin altında sıvı çalkantısının başlangıç etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, farklı viskozitelerdeki sıvılar kullanılmış ve görüntü tanıma yöntemi ile serbest yüzey yükseklikleri doğru bir şekilde tespit edilmiştir. Viskozitenin sönümleme sürecine ve durağan duruma olan etkileri, Hızlı Fourier ve dalgalet dönüşümleri kullanılarak analiz edilmiştir. Farklı viskozitelerdeki sıvı çalkantısının sönümleme oranları nicel olarak ölçülüp analiz edilmiş ve bu bulgular potansiyel akış teorisine uyarlanarak viskozite etkilerini temsil eden bir sönümleme terimi ile uzun vadeli çalkantı evrimini tanımlamak için kullanılmıştır [118].

Hou, Yu, Liu, Ding ve Cui çalışmalarında, mikro yerçekimi ortamında büyük genlikli uyarmalara kıyasla, yüksek frekanslı boyuna harmonik uyarmanın tanktaki fiziksel parametrelerde önemli değişikliklere yol açtığını belirtmişlerdir. Bu durumun sıvı hidrojen depolama ve tedarik sistemlerinin güvenliği için olumsuz bir faktör olabileceği ortaya koyulmuştur. Ayrıca, geleneksel engel tasarımlarının, uzay aracı yük değiştirme süreci sırasında meydana gelebilecek yüksek frekanslı boyuna uyarmalara karşı sıvı hidrojen hareketi üzerinde sınırlı bir etkisi olduğu vurgulanmıştır. Çalışmanın sonunda bu bulguların uzay araçlarındaki sıvı hidrojen tanklarının tasarımı ve güvenliği açısından önemli etkilere sahip olduğuna dikkat çekilmiştir [119].

Li, Zhang ve Yang çalışmalarında, mühendislik uygulamalarında sıkça karşılaşılan sıvı çalkantısı problemini ele almışlardır. Bu makalede, özellikle serbest yüzeyin büyük deformasyonu ve ayrılmasının zorluklarını aşmak amacıyla, düzgünleştirilmiş parçacık hidrodinamiği (SPH) ve uyarlanabilir mekansal çözünürlük (ASR) temelli bir sayısal yöntem sunulmuştur. Literatürdeki deneysel sonuçlarla doğrulanmış olan bu yöntemi, dikdörtgen prizması şeklindeki tankta yer alan sıvının çalkantı davranışına uygulamışlardır. Çalışmada, sıvı doluluk seviyesi, dış uyarma frekansı ve genliğinin sıvı çalkantısı üzerindeki etkileri,

tank duvarı üzerindeki farklı noktalardaki basınç ve tankın dönen milindeki toplam moment değerleri karşılaştırılarak analiz edilmiştir [120].

Wu ve He çalışmalarında, otomobil yakıt tanklarında çalkantı davranışını kapsamlı bir şekilde ele almışlardır. Çalışmada farklı uyarma koşullarının ve çalkantı parametrelerinin çalkantı davranışı üzerindeki etkilerini, serbest yüzeyin çalkantı karakteristiği, dinamik basınç, çalkantı kuvveti ve çalkantı momenti dahil olmak üzere, sıvı hacmi yöntemi kullanılarak sayısal olarak incelemişlerdir. Uyarma frekansı ve genliği artışının daha şiddetli çalkantı hareketlerine ve büyük genlikli sıvı yüzeyi kırılma davranışına yol açacağı vurgulanmıştır [121].

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Çalkantı Problemini İdare Eden Denklemler

Çalkantı, sıvıların tank içerisinde veya taşıma tanklarında hareket etmesi neticesinde meydana gelen dalgaların veya sıvı hareketlerinin oluşturduğu olguyu açıklayan bir terimdir. Hareketin lineer olmayan yapısı ve zamandan bağımsız oluşu bu fiziksel olayın anlaşılmasına engel olmaktadır. Çalkantı ile ilgili problemlerin anlaşılması, deneysel ve sayısal analiz yöntemlerinin bir arada uygulanması ile mümkün hale gelmektedir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), akışkanların hareketini ve etkileşimlerini incelemek için sayısal yöntemler ve algoritmalar kullanarak bilgisayar tabanlı simülasyonları içeren bir yöntemdir. Bu alandaki sayısal yöntemler, sıvıların çalkantı davranışlarını tahmin etmek ve mühendislik tasarımlarını optimize etmek için de kullanılmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamalarında kullanılan yöntemler en genel halleriyle Panel Yöntemleri, Euler Denklemleri ve Navier-Stokes Denklemleri olarak sınıflandırılabilir. Panel yöntemler, kapalı formda ifade edilen çözümlerin potansiyel akım teorisinden türetilmesine dayanır. Euler denklemleri ise Navier-Stokes denklemlerinde mevcut bulunan viskoz etkileri ihmal ederek elde edilmektedir. Navier-Stokes denklemleri, yüksek bilgisayar kapasitesi ve işlem gücü gerektirmelerine rağmen, gerçek akışı en doğru şekilde temsil eden denklemler olarak kabul edilmektedir. Bu denklemler, karmaşık akışkan hareketlerin anlaşılmasında ve modellemesinde temel rol oynamaktadır [1].

Çalkantı problemi, Navier-Stokes denklemleri ve süreklilik denklemleri gibi karmaşık matematiksel denklemler kullanılarak modellenebilmektedir. Bu denklemler, sıvı hareketlerini ve dinamiklerini ifade eden diferansiyel veya integral formdaki denklemlerdir. Bu tür denklemler karmaşık analitik çözümler içerir ve bu özelliğinden dolayı yüksek hesaplama kapasitesi ihtiyacı doğurabilmektedir. Bu nedenle, çalkantı probleminin çözümünde bilgisayar teknolojisinin ve sayısal çözümleme yöntemlerinin verimli kullanımı büyük önem taşımaktadır. Sayısal yöntemler, matematiksel denklemleri çözümlemek için belirli bir yaklaşım kullanır ve bu denklemleri cebirsel hale indirger. Bu yaklaşımlar, problemleri ayrık noktalarda çözme yeteneği ile ifade edilmektedir. Son yıllarda, bilgisayar teknolojisi ve sayısal çözümleme yöntemleri alanındaki büyük gelişmeler, çalkantı problemlerinin daha doğru ve güvenilir bir şekilde çözülmesine imkân sağlamıştır. Bununla birlikte, doğru denklemleri seçmek ve en uygun sayısal çözümleme yöntemini belirlemek

ciddi bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu aşamada atılacak adımlar, çözümün doğruluğunu ve güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla, çalkantı problemlerini çözmede sayısal yöntemlerin seçimi ve seçilen yöntemin doğru bir şekilde uygulanması, karmaşık ve dikkatli olunması gereken bir süreci gerektirmektedir.

Çalkantı problemi serbest yüzeyli bir akışkanlar dinamiği problemidir. Navier-Stokes denklemleri sağladığı birçok avantajla birlikte serbest yüzeyin belirlenmesindeki zorluk ve türbülans etkilerin dikkate alınması gerekliliği gibi problemleri beraberinde getirmektedir. Denklemlerin sayısal çözümünde serbest sıvı yüzeyinin sınırlarını belirlemek için Akışkan Hacmi Yaklaşımı (VOF) yaygın olarak tercih edilir. Ancak, bu yaklaşımın dışında da birçok alternatif yöntem mevcuttur. Bunlardan bazıları "MAC (Marker and Cell)" akışkanla beraber hareket eden kütlesiz parçacıkların izlenmesini temel alan işaretleyici ve hücre yöntemi [122], diğeri ise iki akışkan ara yüzeyini sıfır olarak benimseyen gösterge fonksiyonu kullanan sabitlenmiş seviye Level Set yöntemleridir [123]. Lattice-Boltzman [42] ve Yumuşatılmış Parçacık Hidrodinamiği (SPH - Smoothed Particle Hydrodynamics) [43] gibi yöntemler, Lagrange bakış açısını benimsemektedir. Bu yöntemlerde akışkan, parçacıklar aracılığıyla temsil edilmekte ve su yüzeyinin belirlenmesi için ek bir yönteme ihtiyaç duyulmamaktadır. Sonuç olarak, serbest yüzeyli akımların modellenmesinde çeşitli modeller kullanılmaktadır ve bu modeller arasında en yaygın olanı Akışkan Hacmi (VOF) yöntemidir. Bu yöntemle ilgili detaylı bilgiler çalışmanın ilerleyen kısımlarında sunulacaktır.

Navier-Stokes denklemleri sıvılar ve gazlar gibi akışkanların hareketlerini tanımlamada kullanılan süreklilik ve hareket denklemlerinden meydana gelen akışkanlar mekaniğinin temel denklemlerinden biridir. Newtonien bir akışkanın analizinde, Navier-Stokes denklemlerinin türetilmesinden önce, kütlenin korunumu ilkesini temsil eden Eşitlik 3.1 ve momentumun korunumu ilkesini temsil eden Eşitlik 3.2'de yer alan denklemler temel alınmaktadır.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . (\rho V) = 0 \tag{3.1}$$

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g \tag{3.2}$$

Burada V hız vektörünü, ρ yoğunluğu, τ gerilme tansörünü, g kütlesel kuvvetleri, t zamanı, p basıncı temsil etmektedir. Suyun sıkışmaz olduğu kabulü sayesinde yoğunluğu sabit olarak alınacaktır.

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \tag{3.3}$$

Böylelikle süreklilik ve momentum denklemleri Eş. 3.4'de belirtildiği forma dönüşecektir.

$$\nabla . V = 0 \tag{3.4}$$

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + (V . \nabla) V \right) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g \tag{3.5}$$

Eş. 3.4 ve Eş. 3.5'de verilen denklemler tansör formatında ise aşağıdaki gibi yazılabilirler.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3.6}$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \tag{3.7}$$

Akışkanın sıkışmaz ve Newtonien kabulü doğrultusunda Eş. 3.8'de bulunan gerilme tansörü, dinamik viskozite katsayısı, μ ve şekil değiştirme hızlarına bağlı olarak yazılabilir.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{3.8}$$

Eş. 3.8'de verilen gerilme tansörü Eş. 3.7'de yerine konulursa momentum denklemi aşağıdaki halini alacaktır.

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i \tag{3.9}$$

Navier-Stokes denklemleri en genel halleriyle kartezyen koordinatlarda Eş. 3.10, Eş. 3.11, Eş. 3.12 ve Eş. 3.13'de olduğu gibi yazılabilmektedir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{3.10}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + \rho g_x \tag{3.11}$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) + \rho g_y \tag{3.12}$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) + \rho g_z \tag{3.13}$$

Bu formüllerde göz önünde bulundurulan tek kütlesel kuvvet yer çekimi olduğundan, bu nedenle formüllerdeki g_x ve g_y terimleri sıfır olarak kabul edilmektedir. Eşitliklerde bilinmeyen büyüklükler basınç p, hız vektörleri u, v, w olmak üzere dört adettir. Bununla birlikte verilen mevcut denklem sayısı dört olduğu için yukarıda verilen denklemler çözülebilir formda görünmesine rağmen, sıkışmayan ve sabit viskoziteli akışkanlar için bu denklem takımlarının genel bir çözümü bulunmamaktadır. Fakat uygun başlangıç ve sınır şartları için denklem takımları sayısal yöntemler ile çözülebilmektedir. Çözümlerin elde edilebilmesi için akışkana ait yoğunluk, viskozite özellikleri ile kütlesel kuvvetlerin (yer çekimi) bilinmesi şarttır.

Böylece Eş. 3.11, Eş. 3.12 ve Eş. 3.13'ten meydana gelen hareket denklemleri en genel haliyle aşağıdaki gibi kapalı formda yazılabilmektedir [41].

$$\rho\frac{dV}{dt} = -\nabla p + \mu\nabla^2 V + \rho g \tag{3.14}$$

Eş. 3.14'te verilen Navier-Stokes denklemlerinde viskozite içeren terim ihmal edildiğinde Euler denklemleri ortaya çıkmaktadır.

$$\rho\frac{dV}{dt} = -\nabla p + \rho g \tag{3.15}$$

Bu denklemde viskozite etkilerinin ihmal edilmesinin dışında sınır koşullarının farklılığı da söz konusudur. Viskoz etkilerin dikkate alındığı bir akışkanda katı sınırda hız vektörü sıfıra

eşit olmaktadır. Bu haliyle akışkan katı madde sınırını geçemediği gibi bu sınır üzerinde kayamaz (Kaymama (no-slip) sınır koşulu). Buna karşın, viskoz olmayan bir akışkanda ise bundan farklı olarak katı madde sınırı geçilemez ama sınır üzerinde kayma durumu gerçekleşebilir (serbest kayma (free-slip) sınır koşulu).

Türbülans, akışkanlar mekaniğinde karmaşık ve kaotik bir akış rejimidir. Navier-Stokes denklemleri bir akış alanı içerisinde akışın laminer akıştan tamamen türbülanslı akışa dönmesine kadar olan tüm süreci temsil edebilmektedir. Bu denklemlerin DNS (Direct Numerical Simulation) yöntemi ile doğrudan sayısal çözümleri mümkündür ve türbülanslı akışlar için en doğru simülasyon yöntemidir. Türbülansın karmaşık ve kaotik davranışını doğrudan çözebilme becerisine karşın bu yöntem oldukça yüksek hesaplama maliyeti ve uzun çözüm süresi nedeniyle sınırlı sayıda uygulamada kullanılabilmektedir. Türbülans etkilerini optimum çözüm süresi ve yüksek doğrulukta hesaplayabilmek için farklı türbülans modellerini içeren çözüm yaklaşımları kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de akım alanındaki hız ve basınçların ortalama ve anlık sapınçlar ile ifade edildiği Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RONS) denklemlerini kullanmaktır. Doğru türbülans modeli seçimi, RONS denklemlerine dayalı sayısal çözümlerin doğruluğu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Akışkanların hareketinde, akımın rejimi Reynolds sayısına göre laminer veya türbülanslı akış olarak sınıflandırılmaktadır.

$$R_e = \frac{\rho V L}{\mu} \tag{3.16}$$

Burada, 'V' ortalama hızı, 'L' ise uzunluk ölçeğini temsil etmektedir. Çalkantı üzerine yapılan çalışmaların büyük bir kısmında genellikle Reynolds sayısı olarak yaklaşık $R_e \approx 1000$ değerinin tercih edildiği anlaşılmaktadır [1]. Çalkantı problemi birçok mühendislik problemi gibi türbülanslı bir yapıya sahiptir.

Türbülanslı akım alanları için farklı bir noktada hız ve basınç büyüklüklerinin şiddeti ve yönü zamanla değişebilmektedir. Hız ve basıncın istenilen zamandaki değeri ortalama ve anlık sapmaların birlikte değerlendirilmesiyle yazılabilmektedir [41].

$$u = \overline{u} + u' \,, \qquad v = \overline{v} + v' \qquad w = \overline{w} + w' \,, \qquad p = \overline{p} + p' \tag{3.17}$$

Burada $\overline{u}$, $\overline{v}$, $\overline{w}$ ve $\overline{p}$ hız ve basınca ait ortalama değerleri u', v', w' ve p' ise anlık sapma değerlerini belirtmektedir.

RANS denklemlerinin tansör notasyonlu genel gösterim şekli aşağıda takip eden eşitliklerde verildiği gibidir [124].

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3.18}$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \rho \frac{\partial \left(\overline{u'_i u'_j}\right)}{\partial x_j} + \rho g_i \tag{3.19}$$

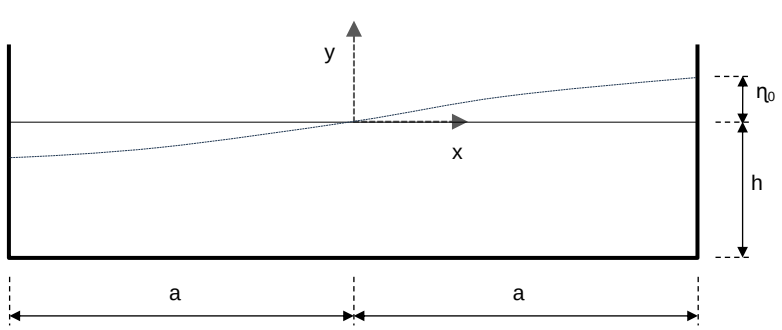
Eş. 3.19'da verilen x_i kartezyen koordinatları, u_i hız bileşenlerini ifade etmektedir. RANS denklerimde Navier Stokes denklemlerinden farklı olarak $\frac{\partial \left(\overline{u'_i u'_j}\right)}{\partial x_j}$ ifadesinin ilave edildiği görülmektedir. Bunun nedeni ise türbülanstan dolayı oluşan çalkantı gerilmelerini ifade etmek başka bir deyişle Reynolds gerilmelerini hesaba katmaktır. Laminer akım durumunda bilinmeyen (u, v, w, p) sayısı kadar dört denkleme (Eş. 3.10, 3.11, 3.12 ve 3.13) sahip iken türbülanslı akım durumunda ilave bilinmeyenlerin (u', v', w') eklenmesiyle problemin çözümü için ek denklemlere gereksinim duyulmaktadır. Bu ilave denklemlere türbülans modelleriyle erişilebilmektedir. Denklem sayısının bilinmeyen sayısına eşitlendiği bu işlemlere kapatma (closure) adı verilmektedir [41]. Farklı kapatma modelleri üzerinde bilimsel çalışmalar devam etmekte olup bu sorun farklı türbülans modelleri kullanılarak giderilmektedir.

3.2. Çalkantı Probleminin Analitik Çözümü

3.2.1. Lineer teori

Faltinsen [125] tarafından geliştirilen lineer teori, havuz veya tank içerisinde bulunan kısmen dolu bir sıvının çalkantı hareketini tahmin etmek için potansiyel dalga teorisine dayalı basit bir analitik çözüm sunmaktadır. Teori, sıvı depolama tanklarının sismik tepkisini değerlendirmek amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [126]. Lineer teori, sıvı depolama tanklarının düşük uyarma frekansları ve genliklerinde çalkantı hareketini analiz etmek için kullanılan bir yöntemdir. Teori, viskoz olmayan akış varsayımı yaparak iki boyutlu çalkantı hareketlerini ve periyodik yatay taban yer değiştirmesini incelemektedir. Lineer teorinin temel varsayımlarından biri, sıvının viskoz etkileri göz ardı edilerek idealize edilmesidir. Lineer teori, sıvının hareketini basit matematiksel denklemlerle modelleyerek çalkantının genliğini ve frekansını tahmin etmeye yardımcı olmaktadır. Ancak gerçek sistemlerde viskoz etkiler, türbülans ve diğer karmaşık faktörler dikkate alınmalıdır. Bu durumda, daha ileri düzey sayısal modeller veya deneysel çalışmalar gerekmektedir. Sonuç olarak, lineer teori, düşük genlikli ve düşük frekanslı çalkantı hareketlerini analiz etmek için kullanılan bir yöntemdir. Ancak gerçek sistemlerin daha karmaşık özelliklerini modellemek ve analiz edebilmek için daha ileri sayısal yöntemlerin kullanılması ve detaylı deneysel çalışmaların yapılması önemlidir. Bu, sıvı çalkantısı problemlerinin daha kapsamlı anlaşılabilmesine ve güvenilir çözümler üretilmesine yol açacaktır.

Teorinin anlaşılması için tankın yaptığı hareket $X_t = A \sin(\omega t)$ eşitliğiyle incelenmiştir. Burada; 'A' sıvı tankını uyarma genliği, 't' zaman ve 'ω' ise tankı uyaran hareketin açısal frekansıdır. Koordinat sistemi, durgun suyun serbest yüzeyi merkezinde sabitlenmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Çalkantı hareketinin şematik diyagramı

Lineer teori kullanılarak elde edilen çalkantı yüksekliği (η, Eş. 3.20) iki terime ayrılır [126]: dış uyarmaya karşılık gelen çalkantı yüksekliği (η_1, Eş. 3.21) ve sıvı taşınımına karşılık gelen çalkantı yüksekliği (η_2, Eş. 3.22).

$$\eta(x,t) = \eta_1(x,t) + \eta_2(x,t) \tag{3.20}$$

$$\eta_1(x,t) = \frac{A}{g}\left(x\omega^2 + \sum_{n=0}^{\infty} C_n \omega \, sin(k_n x)\right) sin(\omega t) \tag{3.21}$$

$$\eta_2(x,t) = -\frac{A}{g}\sum_{n=0}^{\infty} \omega_n \left(C_n + \frac{H_n}{\omega^2}\right) sin(k_n x)\, sin(\omega_n t) \tag{3.22}$$

$$\eta = \frac{A}{g} x\omega^2 sin\omega t + \frac{A}{g}\left(\frac{8a}{\pi^2}\right) sin\left(\frac{\pi x}{2a}\right)\left(\frac{\omega^4}{\omega_0^2 - \omega^2}\, sin\omega t - \frac{\omega\omega_0^3}{\omega_0^2 - \omega^2} sin\omega_0 t\right) \tag{3.23}$$

$x = a$, noktasında serbest sıvı yüzeyinde meydana gelen değişim takip eden eşitlikteki gibi elde edilebilir.

$$\eta = \frac{A}{g} a\omega^2 sin\omega t \left(\frac{8a^2}{g\pi^2(\omega_0^2 - \omega^2)}\right) (\omega^4 sin\omega t - \omega\omega_0^3 sin\omega_0 t) \tag{3.24}$$

Burada ω_n sıvının doğal frekans değerini, k_n ise dalga numarasını vermektedir. Diğer iki parametre $H_n$ve C_n takip eden Eşitlikler'de verilmiştir.

$$\omega_n^2 = g k_n \, tanh(k_n h) \tag{3.25}$$

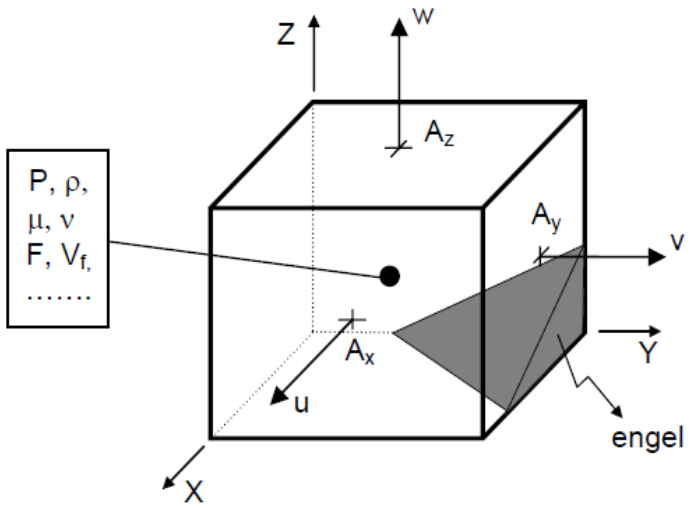
$$k_n = \frac{(2n+1)}{2a}\pi \tag{3.26}$$

$$H_n = \omega^3 \left(\frac{2}{a}\right)\left(\frac{(-1)^n}{{k_n}^2}\right) \tag{3.27}$$

$$C_n = \frac{H_n}{\omega_n^2 - \omega^2} \tag{3.28}$$

3.3. FLOW-3D HYDRO Yazılımı

Ticari bir yazılım olan FLOW - 3D HYDRO, tez çalışmasının sayısal simülasyonlarını gerçekleştirmek için kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıdır. Flow Science, Inc. Şirketi tarafından geliştirilen bu yazılım, süreklilik, momentum ve enerji gibi temel kanunlara dayanarak geniş bir alanda akışkanlar mekaniği problemlerini çözebilme kapasitesine sahiptir [127]. Yazılım, hidrolik, çevre, havacılık, uzay ve deniz bilimleri gibi çeşitli alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Yazılımda hesaplamalar, bir çözüm ağını oluşturan uniform olmayan dikdörtgen hücreler üzerinde gerçekleştirilmektedir. İlk bakışta bu çözüm ağı sorun gibi görünse de kolay oluşturulması, uygun düzeni ve daha düşük bellek ihtiyacı gibi özellikler yazılımı avantajlı kılmaktadır. Skaler büyüklükler olan viskozite, basınç ve yoğunluk, kontrol hacmi merkezinde yer alırken, hızlar (u, v, w) kontrol hacminin yüzeyinde hesaplanmaktadır (Şekil 3.2) [41]. Yazılım ayrıca, üç boyutlu süreklilik ve hareket (RANS: Reynolds Averaged Navier Stokes) denklemlerini içeren diferansiyel denklem sisteminin çözümünde sonlu hacimler metodunu kullanmaktadır.



Şekil 3.2. Hesaplama hücresine etkiyen değişkenler [41]

Problem geometrisinin modellemesi, çözüm ağı üzerinde bazı hücrelerin engellerle kapatılması yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem FAVOR adıyla bilinen bir hacim fraksiyonu tekniğidir. Bu yöntemle, engelin hacim içindeki oranı, yani hacim fraksiyonu hesaplanır. Hesaplama tamamlandığında, engelin kontrol hacminin yüzeyinde ne kadarlık bir alan kapladığı da belirlenir. Sonrasında, engelin hacim ve yüzey alanındaki bu iki değer, engelin tanımlanmasında birbiriyle orantılı olarak kullanılır, böylece engelin boyutu ve

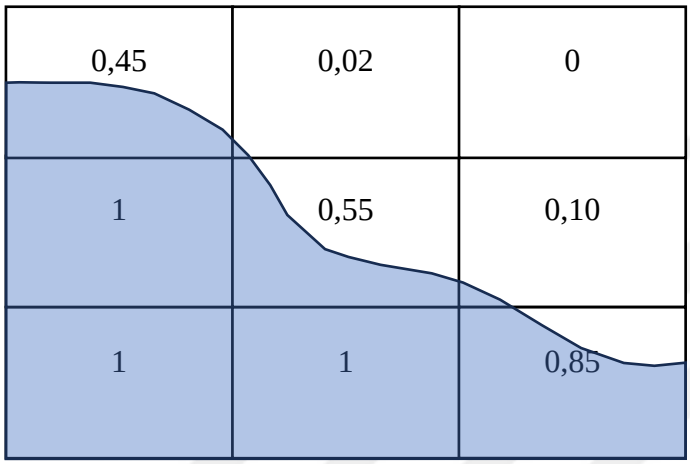
konumu daha net bir şekilde anlaşılabilir. Eğer kontrol hacmi tamamen engel ile doluysa, oran '0', buna karşılık, kontrol hacmi tamamen boşsa, oran '1' olmaktadır. Kontrol hacmi kısmen engel ile doluysa, bu oran '0' ile '1' arasında, dolu olan hacmin yüzdesine göre değişmektedir. Bu yöntemle, hücrenin ne kadarının akışkana açık olduğu, yani akıma açık yüzey alanları belirlenebilir. FAVOR metodu sayesinde, kaba ağ aralıkları kullanılan karmaşık geometrilerde bile engel tanımlamaları başarılı bir şekilde yapılabilirken, sayısal çözümün hassasiyeti büyük ölçüde garanti edilebilmektedir. Ayrıca, daha küçük ağ aralıkları kullanımı, çözüm bölgesi içindeki engel sınırlarının daha hassas ve yumuşak bir şekilde modellenmesini sağlar. Bu, karmaşık geometrilerin daha detaylı ve hassas bir şekilde temsil edilmesine olanak sağlar, böylece genel çözümün doğruluğu ve güvenilirliği artmaktadır. Bu durum yazılımın geometriyi başarılı bir şekilde modelleyip, hesaplamalarını gerçekleştirebilme yeteneğini göstermektedir. Bunun yanı sıra, FAVOR yöntemi birçok akışkan dinamiği problemine daha geniş bir fiziksel perspektiften yaklaşım sunarken diğer hacim tabanlı engel temsil yöntemlerine kıyasla daha hassas ve etkili sonuçlar elde etmeye olanak tanımaktadır.

Yazılımda, su ve hava arasındaki serbest yüzeylerin belirlenmesi için Volume of Fluid (VOF) olarak adlandırılan bir hacim kesir yöntemi kullanılır [44]. FAVOR yöntemine benzer şekilde, VOF yöntemi de hücrelerin tamamen boş, tamamen suyla dolu, ya da kısmi su içeriğine sahip olup olmadığını belirler. Bu yöntemde, bir hücrenin akışkan içeriğini temsil eden ve F ile sembolize edilen bir değer tanımlanır. Eğer bir hücre tamamen akışkanla doluysa, F değeri 1 olur; eğer tamamen boşsa, F değeri 0 olur ve eğer kısmen doluysa, F değeri hücre içerisindeki akışkan hacmine karşılık gelen bir değer almaktadır (Şekil 3.3). Bu değer aynı zamanda akışkan hacmi fonksiyonu olarak da adlandırılır. VOF yöntemi ile serbest yüzeyin izlenmesi üç aşamadan oluşur: İlk olarak, serbest yüzeyin konumu belirlenir. Daha sonra, bu yüzey hava ve su arasında net bir arayüz olarak tanımlanır. Son aşamada, bu belirlenen arayüze sınır koşulları uygulanır. Bu sınır koşulları, sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç sınır koşulları olarak düzenlenir. Akışkan hacmi fonksiyonu (Volume of Fluid) F'nin değişimi Eş. 3.29'da verilen denkleme göre belirlenir [41].

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u\frac{\partial F}{\partial x} + v\frac{\partial F}{\partial y} + w\frac{\partial F}{\partial z} = 0 \tag{3.29}$$

Eş. 3.29'dan da anlaşılabileceği gibi, akışkanın hareketiyle birlikte F değerleri de değişir. VOF yönteminin belirgin bir avantajı, akışkanın sabit bir ağ üzerinde akması ve bu süreçte deformasyon ya da ağın yer değiştirmesinin olmamasıdır [128]. Bu sayede sürekli değişen ve dinamik akış koşullarını modelleme gereksinimi olan uygulamalarda başarılı sonuçlar vermektedir.

VOF yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.3'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.3. VOF yönteminin şematik gösterimi

FLOW-3D HYDRO, üç boyutlu ve serbest yüzeye sahip engelli akışkanlar mekaniği problemlerini çözebilen bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımıdır. Bu yazılımda, çözüm ağı üzerindeki bir hücrenin dört farklı durumu şu şekilde sıralanabilir: Sadece katı ile dolu durum, kısmen katı ve sıvı ile dolu durum, sadece sıvı ile dolu durum ve tamamen boş durum.

Bu çalışma kapsamında kullanılan FLOW-3D HYDRO yazılımının bünyesinde mevcut bulunan türbülans modellerini aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- İki Denklemli $\boldsymbol{k}$-$\boldsymbol{\varepsilon}$ Modeli
- RNG (Renormalized Group) Model
- LES (Large-Eddy Simulation) Modeli
- İki Denklemli $\boldsymbol{k}$-$\boldsymbol{\omega}$ Modeli

Türbülans modelleri Reynolds gerilmelerini ek ilave terimleri asgari hata ile elde edebilecek hesaplama metodu sunması bakımından oldukça önemlidir [129]. Tez çalışmasında üstün çözme kabiliyeti, genel kabul görmesi ve doğruluğunun denenmiş olması gibi özellikleri barındırmasıyla ön plana çıkan $(k-\varepsilon)$ modeli uygulanmıştır.

Türbülans modellerinin yanı sıra mesh aralığı belirlenmesi de önemli bir süreçtir. Yazılımda, sadece kübik şeklinde çözüm ağları oluşturulabilmektedir. Bu özellik, çözüm ağının oluşturulma sürecini hızlandırarak kullanıcıya zaman kazandırmaktadır. Ağ hücrelerinin boyutlarının seçimi, modelleme sürecinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Küçük boyutlu hücreler, genellikle katı gövde modellemesi için daha uygun olup, detaylı ve hassas bir çözüm sağlarlar; buna karşın, bu yaklaşım çözüm süresinin uzamasına neden olmaktadır. Bu nedenle, hücre boyutunun seçimi, problemin gerekliliklerine ve modellemenin detay seviyesine göre değişmektedir. Yazılımda ayrıca simetri, duvar, bağlayıcı, periyodik, belirlenmiş basınç, hız ve çıkan akım olmak üzere farklı sınır şartları uygulanmaktadır.

Bu yazılımda üç boyutlu süreklilik ve hareket denklemlerinin çözümü birlikte sağlanabilmektedir. Kartezyen koordinatlarında, sıkışmayan akımda süreklilik ve hareket denklemleri aşağıda takip eden denklemlerde verildiği gibidir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i A_i) = 0 \tag{3.30}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F}\left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + f_i \tag{3.31}$$

Yukarıdaki denklemlerde u_i i doğrultusunda akım hızını, P basınç değerini, A_i i doğrultusunda her bir hücre içerisindeki akışkan alanını, V_F akışkan hacmini, g_i kütlesel kuvvetleri ve son olarak f_i ele alınan türbülans modeli için Reynolds gerilmelerini temsil etmektedir. Reynolds gerilmeleri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilmektedir.

$$f_i = \frac{1}{\rho V_F}\left[ws_i - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(A_j \tau_{ij}\right)\right] \tag{3.32}$$

Yukarıdaki denklemde ws_i duvar kayma gerilmesi, τ_{ij} ise gerilme hızı tansörüdür.

Duvar kayma gerilmelerini aşağıda takip eden eşitliklerdeki gibi gösterebiliriz.

$$\tau_{ii} = -2\mu_T \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right] \tag{3.33}$$

ve

$$\tau_{ij} = -\mu_T \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right] \tag{3.34}$$

μ_T türbülans etkilerini temsil eden ve çalkantı gerilmelerini de barındıran toplam dinamik viskozitedir ($\mu_T = \mu + \mu_t$).

3.3.1. *k-ε* Türbülans modeli

FLOW-3D HYDRO yazılımında, çeşitli türbülans modelleri bulunmaktadır. Bu modeller arasında, birçok çalışmada sıklıkla kullanılan ve doğruluğu kanıtlanmış olan iki denklemli $(k-\varepsilon)$ modeli öne çıkmaktadır. İki denklemli $(k-\varepsilon)$ modeli, yüksek Reynolds sayısına sahip akışlar için daha doğru sonuçlar elde etmek amacıyla tercih edilmektedir. Model, akışta kinetik enerji (k) ve sönümlenme oranı (ε) olmak üzere iki ayrı taşınım denklemi içermektedir. Kinetik enerji denklemi, akışın kinetik enerji dağılımını hesaplamaya yönelik bir denklemdir, sönümlenme oranı denklemi ise türbülansın nasıl sönümlendiğini modellemektedir. Kısacası bu model, türbülansın çeşitli özelliklerini simüle etmek ve yüksek Reynolds sayısına sahip akışları doğru bir şekilde modellenmek için etkili bir araç olarak kullanılmaktadır [41].

$(k-\varepsilon)$ Modelinde türbülans viskozite hesabı aşağıdaki eşitlikte verildiği gibidir.

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \tag{3.35}$$

Yukarıdaki denklemde C_μ model sabitini (kapatma katsayısı), k kinetik enerjiyi ve ε ise sönümleme oranını ifade etmektedir. C_μ model sabiti yaklaşık olarak 0,09 değerini almaktadır. Kapatma denklemleri en genel haliye Eş. 3.36 ve Eş. 3.37'de verildiği gibidir. Eş. 3.36'da k, Navier-Stokes denklemleri aracılığıyla, Eş. 3.37'de ε ise dalgalanma

özelliklerinin korelasyonundan belirlenmiştir [130]. Aşağıdaki eşitliklerde τ_{ij}, Reynolds gerilme tansörünü ifade ederken, υ ise akışkanın dinamik viskozitesini göstermektedir.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\upsilon + \frac{\upsilon_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{3.36}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{z1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{z2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\upsilon + \frac{\upsilon_t}{\sigma_z}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] \tag{3.37}$$

Verilen denklemlerde C_{z1}=1,44 , C_{z2}=1,92 , σ_k=1 ve σ_z=1,3 sabit sayılardır.

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \tag{3.38}$$

$$l = \frac{C_\mu k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \tag{3.39}$$

Reynolds gerilme tansörü, τ_{ij} ve ortalama gerilme oranı tansörü aşağıda takip eden eşitliklerde verildiği gibidir.

$$\tau_{ij} = 2\upsilon_t e_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \tag{3.40}$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{3.41}$$

3.4. Çalkantı Doğal Frekansına İlişkin Teorik Denklemler

3.4.1. Dikdörtgen tank içerisindeki sıvının doğal frekans hesabı

Yatay basit harmonik harekete zorlanmış tank içerisindeki sıvının çalkantı davranışı tankın geometrisine, sıvı derinliğine, tankı uyarma genliğine ve frekansına bağlı olarak değişmektedir. Yatay harmonik hareket altında tank hareketi aşağıdaki eşitlikte verildiği gibidir.

$$X(t) = -A\cos\omega t \tag{3.42}$$

Burada A tankı uyarma genliğinin büyüklüğünü, t zamanı ve ω ise tankı uyarma frekansını vermektedir. Bu çalışmada tank sinüzoidal hareketlerle, farklı frekans ve genliklerde harekete maruz bırakılacak ve tank içerisindeki sıvının çalkantı davranışı analiz edilecektir. Kısmen dolu tanklarda sıvının hareketi, sonsuz sayıda doğal frekans değeri ve doğal mod içerir. Lineer dalga teorisine göre tank uzunluğu L , su derinliği h olan dikdörtgen bir tank için lineer çalkantı frekans değerleri her bir mod için aşağıda verilen eşitlikteki gibi yazılabilir. Eş. 3.43 ve Eş. 3.44'te sırasıyla açısal ve çizgisel doğal frekans denklemleri verilmiştir.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{ng\pi}{L}tanh\left(\frac{n\pi h}{L}\right)} \qquad n = 1,2,3\ldots \tag{3.43}$$

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \tag{3.44}$$

Çalkantı doğal frekansları için verilen bu denklem düşük sıvı yükseklikleri ve tankın düşük uyarma genlikleri için geçerlidir. Denklem, su yüksekliğinin deney tankının uzunluğuna oranının h/L 0,04 - 0,5 olduğu durumlarda geçerliliğini korumaktadır [131]. Kısmi dolu tanklarda, tankın hareket frekansı ile içerisinde bulunan sıvının doğal frekanslarının birbirine yakın olduğu durumda, sıvı çalkantısı en agresif davranışı sergilemektedir. Tank içerisinde bulunan sıvının sonsuz sayıda doğal frekansı bulunmasına rağmen, çalkantı hareketi açısından en etkin modun ilk mod olduğu bilinmektedir. Bu tez çalışmasında, sıvının birinci mod doğal frekansı ve bu frekansa yakın hareket frekansları, deney tankına uygulanarak

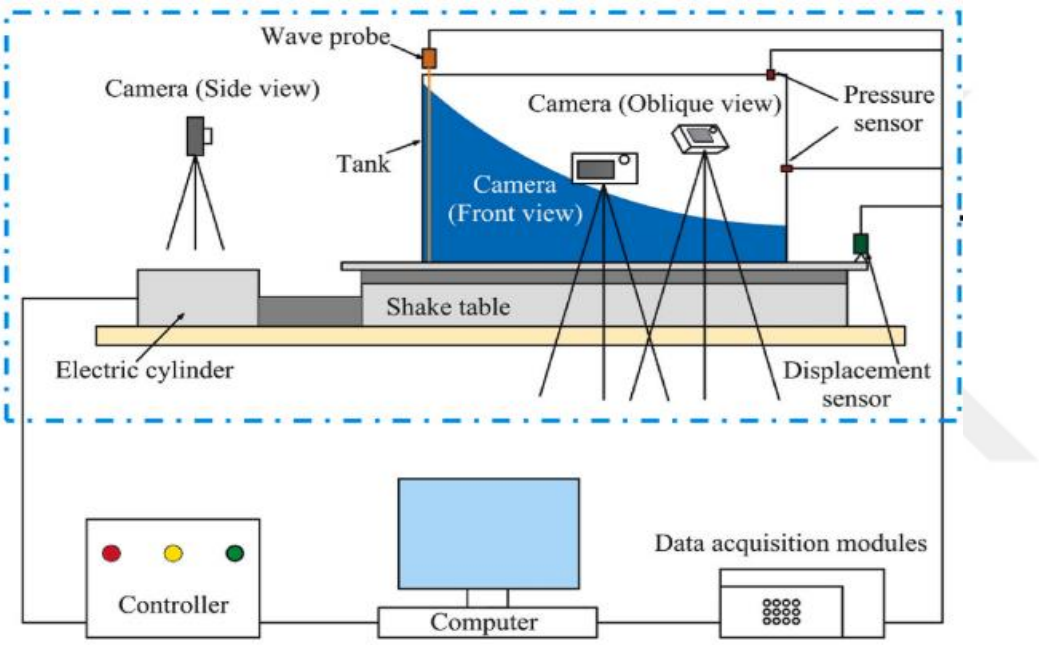
çalkantı hareketinin davranışı incelenmiştir. Çalkantı hareketinin nonlineer yapısı sayesinde, kritik durumu sıvının doğal frekans değerleri yerine bu değerlere yakın hareket frekanslarında aramak daha doğru bir yaklaşım olmaktadır [132].

3.5. Görüntü İşleme Analizi

Görüntü işleme, video kameralar, fotoğraf makineleri ve benzeri aygıtlarla alınan görüntülerin dijital hale getirilerek, farklı amaçlar için (iyileştirme, düzeltme, kategorize etme, sıkıştırma, analiz etme ve yorumlama) bilgisayarlar kullanılarak işlenmesini tanımlayan bir süreçtir. Aynı zamanda, görüntü işleme, görüntülerin yakalanması ve analiz edilmesi amacıyla kullanılan donanım ve yazılım kombinasyonları olarak da tanımlanabilir [41]. Bu iki tanımlama da Görüntü İşleme Sistemi (GİS) kavramını özetlemektedir. Görüntü işleme, dijital ortamdaki nesnelerin çeşitli özelliklerini tespit etmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu özellikler arasında nesnenin ivmesi, hızı, konumu ve boyutları gibi fiziksel nitelikleri yer alır. Bu yöntemlerin kullanılması, görüntülerin daha detaylı anlaşılması ve analiz edilmesi için önemli bir araçtır. Görüntü işleme ayrıca bir nesnenin veya sistemin renk, ışık ve yansıma gibi optik özelliklerinin analizini ve belirlenmesini de kapsar. Teknolojinin ilerlemesi ve bu ilerlemeyle beraber gelişen görüntü işleme sistemleri, bu tekniğin kullanım alanını genişletmiştir. Havacılık, tıbbi görüntüleme, biyoloji, ziraat, yapay zekâ uygulamalarında, güvenlik sistemlerinde, tıbbi görüntüleme ve akışkanlar mekaniği gibi birçok farklı disiplinde kullanılan görüntü işleme teknikleri, bilgi çıkarımı ve karar verme süreçlerine katkı sağlar. Görüntü işleme analizleri genellikle birden fazla yazılımın bir arada kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Çalışmanın kapsamı ve amacına uygun olarak en uygun yazılımın seçilmesi, yöntemin en etkin ve doğru şekilde kullanılmasını sağlar. Görüntü işleme sisteminin başarılı bir şekilde çalışması için, temel gereklilik sağlıklı ve yüksek kaliteli bir görüntünün elde edilmiş olmasıdır. Bu görüntü, bir veya daha fazla dijital video kamera, fotoğraf makinesi, mercek gibi ekipmanlar kullanılarak, yeterli aydınlatmaya sahip bir ortamda elde edilir. Yüksek kaliteli bir görüntü, analiz sürecinde daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlar ve işleme sürecinin genel başarısını artırır. Görüntü işleme analizlerinin gerçekleştirilmesi, elde edilen görüntünün gerekli bilgisayar donanımı ve uygun yazılımlar ile işlenmesini gerektirir. Kullanılacak her bir donanım ve ekipmanın uygunluğu, analizlerin başarı oranını doğrudan etkiler. Bu nedenle, doğru ve uygun donanım ile ekipmanların seçilmesi, sağlıklı ve güvenilir sonuçların elde edilmesi için önemli bir ön koşuldur. Özellikle, çalkantı problemi gibi akış hızının ve türbülans etkilerinin agresif

davranış sergilediği durumlarda, yüksek hızda çalışabilen kameraların kullanımı bu tür görüntü işleme sistemleri için zorunlu hale gelmektedir.

Liu, Cai ve Lu'nun çalkantı davranışının izlenmesi için kullandıkları görüntü işleme sisteminin bileşenleri Şekil 3.4'de detaylı olarak gösterilmiştir [109]. Bu bileşenler, kamera, mercek, aydınlatma, bilgisayar donanımı ve yazılımlar gibi görüntü işleme sürecinde önemli rol oynayan ekipmanları içermektedir. Bu bileşenlerin her biri, görüntü işleme analizlerinin doğruluğunu ve başarı oranını belirlemektedir.



Şekil 3.4. Çalkantı davranışı için görüntü işleme sisteminin kullanımı [109]

3.5.1. Görüntüleme sisteminin gereksinimleri

Günümüzde üstün teknolojik yetenekleri ve göreceli olarak düşük maliyetleri sayesinde kameralar, bilimsel araştırmalarda görüntü elde etme sürecinde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Bu çalışmada, ölçümlerin alınmasında sadece görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Kameralar, görüntü işleme sisteminin en önemli bileşenlerinden biri olup, lens özelliklerini kullanarak yakaladıkları görüntüleri, üzerlerinde bulunan görüntü sensörleri aracılığıyla elektronik sinyallere dönüştürürler. Bilimsel araştırmalar için kullanılacak kameranın teknik özellikleri, projenin türüne ve ihtiyaçlarına bağlı olarak farklılık gösterebilir. Örneğin, çalkantı akımının davranışının video kameralarla izlenmesinde, hızlı hareketlerin yakalanabilmesi için yüksek hızlı kameralara ihtiyaç

duyulmaktadır. Diğer yandan, parçacık görüntülemeli hız (PIV-Particle Image Velocimetry) çalışmalarında, hassas ölçümler yapmak için yüksek çözünürlüklü bir kamera gerekmektedir. Bu tür özel ihtiyaçlar, çalışmanın niteliğine ve hedeflerine göre belirlenir ve doğru kamera seçimi, analizlerin doğruluğunu ve başarısını büyük ölçüde etkileyebilir.

Günümüz kameralarında genellikle iki tip sensör bulunur. Bunlar: Şarjlı Çift Cihazlar (CCD - Charged Coupled Device) ve Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletkenlerdir (CMOS - Complementary Metal Oxide Semiconductor). Üst seviye kameralarda kullanılan CCD sensörleri, CMOS sensörlere kıyasla ışığa daha duyarlıdır, bu da düşük ışık koşullarında daha iyi görüntü kalitesi sağlamaktadır. Bununla birlikte, CCD sensörlerinin yüksek maliyeti ve büyük enerji ihtiyacı, onların cep telefonları gibi cihazlarda nadiren tercih edilmesine neden olur. Diğer taraftan, CMOS sensörlerin maliyeti genellikle daha düşük olup, daha küçük boyutları sayesinde cep telefonları gibi küçük kameralara kolayca entegre edilebilirler. Ancak, CMOS sensörler genellikle CCD sensörlere göre daha düşük fotoğraf kalitesi sağlar ve çekim yapabilmek için daha fazla ışığa ihtiyaç duyarlar. Sensör seçimi önemli olmakla birlikte, tek başına belirleyici bir faktör değildir. Profesyonel kameralar genellikle üç CCD sensör içerir, her biri görüntünün oluşturulmasında temel olan üç ana rengi (kırmızı, yeşil, mavi) ayrı ayrı algılar ve bu sayede daha yüksek kalitede görüntüler elde edilir. Kamerada kullanılan sensörlerin boyutları genellikle 1, 2/3, 1/3 ve 1/4 inç gibi büyüklüklerle ifade edilir. Bu boyutlar, sensörün köşegen boyutunu temsil eder ve genellikle kullanılabilir büyüklüklerini belirler. Seçilecek lenslerin bu boyutlara uygun olması gerekir. Sensör boyutları arttıkça çözünürlük ve ışık algılama yeteneği de artar. Örneğin, 1 inçlik bir sensör, diğer boyutlara kıyasla en yüksek çözünürlük ve ışık algılama kapasitesine sahiptir. Fakat bu genellikle sadece özel uygulamalarda tercih edilir. Boyutlar azaldıkça çözünürlük ve ışık algılama kapasitesi genellikle azalır. Ancak teknoloji geliştikçe bu eğilim değişebilir.

Kameranın çözünürlüğü, sensörde bulunan piksel (görüntü hücresi) sayısıyla ve bu sayede kaç piksellik görüntü oluşturabileceğiyle doğrudan ilişkilidir. Sensör üzerindeki ışığa duyarlı kapasitörler, yatay ve dikey sıralar halinde düzenlenmiş olup, her biri bir piksel oluşturacak şekilde kayıt yaparlar. Bu şekilde elde edilen piksel sayısı, görüntünün çözünürlüğü hakkında bilgi verir. Piksel, dijital görüntüler için en küçük görüntü birimidir. Bir görüntü, yatay ve dikey olarak sıralanmış piksellerden oluşur. Yatay ve dikey piksel sayısının çarpımı, görüntünün kaç piksele sahip olduğunu gösterir. Kamera çözünürlüğü,

256 x 256 pikselden başlayıp, günümüzde çok daha yüksek değerlere kadar çıkar. Piksel sayısı (yani çözünürlük) arttıkça, elde edilen görüntü daha net ve kaliteli olur. Bu sayede, yüksek çözünürlüklü görüntülerden alınan sonuçlarda kalite kaybı olmadan daha hassas ölçümler yapılabilir. Ancak, kameraların çözünürlük değeri arttıkça, elde edilen görüntülerin boyutu da doğru orantılı olarak artar. Bu da daha fazla depolama alanı gereksinimi doğuracaktır. Bu nedenle, çalışma kapsamı için gerekli olan çözünürlük değerinin belirlenmesi önemli bir konudur. Bir piksel genellikle küçük bir kareyi temsil eder. Ancak, bazı kameralar elde ettikleri video kayıtlarını kare piksellere dönüştürmek yerine dikdörtgen piksellere dönüştürürler. Genişlik/yükseklik oranını temsil eden bu oran (en/boy oranı veya aspect ratio) mutlaka bilinmelidir. Eğer elde edilen görüntülerde metrik ölçümler yapılması gerekiyorsa ve bu oran 1:1 (kare) değilse, görüntü işlemede ve kalibrasyonunda büyük sorunlar yaşanabilir.

Video kameralarda genellikle PAL (Avrupa ve Türkiye'de kullanılan) ve NTSC (Amerika'da kullanılan) olmak üzere iki çeşit çekim ve kayıt formatı bulunmaktadır. PAL formatında bir kamera saniyede 25 kare kaydederken, NTSC formatında bir kamera saniyede 30 kare kaydedebilir. PAL kameralarda genellikle daha düşük çekim hızıyla yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilirken, NTSC kameralarda ise yüksek çekim hızında daha düşük çözünürlüklü görüntüler yakalanabilir [41].

Video kameralar sürekli görüntü kaydedebilme özelliğine sahiptir. Kameraların çekim hızları, saniyede elde edebildikleri kare sayısı (fps: frame per second) ile ifade edilir. Bir insanın bir görüntüyü akıcı bir şekilde görebilmesi için saniyede 15 kare yeterli olmaktadır. Bu değerin altında kare sayılarında, görüntülerin takıldığı hissiyatı oluşabilir. Standart bir video kamerasında saniyede 25 kare (25 fps) kaydedilebilir. Gelişen teknoloji ile birlikte, bazı özel kameralar saniyede 100000 kareye kadar çekim yapabilme kapasitesine sahip olmuşlardır. Fps değeri arttıkça, çalkantı hareketinin rezonans durumundaki agresif davranışı çok daha belirgin olarak izlenebilir. Ancak, çok yüksek fps değerlerine sahip görüntülerin bilgisayarlarda kapladığı hafıza alanı da dikkate alınmalıdır. Sonuç olarak, problemin gerektirdiği ölçüde fps değerlerinde kayıt yapmak en optimum çözüm olacaktır. Tez çalışmasında, 60 fps, 120 fps ve çalkantı hareketinin rezonans durumundaki davranışını daha net gözlemlemek için 240 fps değerlerinde kayıtlar gerçekleştirilmiştir. Gerekli ölçümleri elde etmek için video görüntüleri, bir adet Apple marka akıllı telefon kamerası kullanılarak elde edilmiştir. Yüksek maliyetli ve düşük özelliklere sahip profesyonel

kameraların yerine, günümüzde daha yüksek standartlara sahip ve daha ekonomik olan cep telefonu kameralarının kullanımı önem kazanmıştır.

Yapılan çalışmada, 1 adet Apple iPhone 15 Plus marka cep telefonu kamerası kullanılmıştır.

Kullanılan cep telefonu kamerasının bazı teknik özellikleri aşağıda verildiği gibidir:

- Sinyal Sistemi : PAL/NTSC
- Görüntü hızı : 60 fps, 120 fps ve 240 fps
- Görüntü sensörü : CMOS
- Görüntü sensörü boyutu : 1/2 inç
- Etkili piksel sayısı : 3840 x 2160 piksel (8294400 piksel)
- Etkili video kalitesi :4K @ 60 fps
- Odak uzaklığı :26 mm
- Piksel boyutu :1 μm

Görüntü işleme sürecinde, kullanılan aydınlatma sistemlerinin özellikleri, kritik bir rol oynamaktadır. Etkin bir görüntü işleme sistemi tasarımında, kamera özelliklerine ek olarak, aydınlatma sistemlerinin de dikkatle ele alınması gerekmektedir. Eksik veya yetersiz aydınlatma koşulları altında gerçekleştirilen deneyler, genellikle arzu edilen görüntü kalitesini sağlayamamakta, bu da sonuçların doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir. Optimal aydınlatma, sıklıkla göz ardı edilen bir faktör olup, bu durum deneylerin tekrarını zorunlu kılmakta veya hatalı ölçüm sonuçlarına yol açabilmektedir. Kameraların nesnelerden yansıyan ışığı algılama kapasiteleri göz önünde bulundurulduğunda, fotoğraf kalitesini optimize etmek için uygun aydınlatma koşullarının oluşturulması şarttır. Bu aydınlatma, doğal ışık, yapay ışık ya da bu iki kaynağın uyumlu bir kombinasyonu ile sağlanabilir. Yetersiz aydınlatma koşullarında yapılan bir deney, görüntü işleme sistemlerinin diğer modülleri ne kadar etkin çalışırsa çalışsın, yanıltıcı sonuçlara sebebiyet verebilir.

Deneylerde kullanılması planlanan kameranın özellikleri, ışık kaynağının nasıl düzenleneceğini belirler. Kameranın ışığa olan hassasiyeti, algılayıcısının gelen ışık miktarını algılama kapasitesi ile doğru orantılıdır. Bu oran genellikle lüks (lux) olarak ifade edilir. Düşük bir lux değeri, kameranın ışığa karşı hassas olduğunu gösterir, yani bu

özellikteki bir kamera düşük ışık koşullarında daha iyi sonuçlar vermektedir. Deneylerde elde edilen görüntülerin kaliteli olması için, aydınlatma sisteminin kameraların görüş alanlarına homojen bir şekilde ışık sağlaması gereklidir. Ayrıca, deney düzeneğinde gölgelerin veya yansımaların önlenmesi gerekmektedir. Farklı alan tipleri için farklı yoğunluklarda aydınlatma yapabilen birçok sistem mevcuttur.

Görüntü işleme sistemlerinde bilgisayarların kilit bir rolü bulunmaktadır. Bu sistemlerin etkin çalışması için, bilgisayarlar kameralardan alınan sayısal görüntüleri işlemekte ve kaydetmekte, böylece bu görüntülerin analiz ve değerlendirilmesinde merkezi bir işlev görmektedirler. Görüntülerin hatasız ve hızlı bir şekilde işlenip değerlendirilmesi için, yüksek işlem gücüne ve geniş depolama kapasitesine sahip bilgisayarlar gereklidir. Bu, özellikle büyük veri setlerinin işlenmesi ve karmaşık görüntü analizlerinin gerçekleştirilmesi durumlarında büyük önem taşımaktadır. Kısacası yüksek performanslı bilgisayarlar, görüntü işleme sürecinin verimliliğini ve doğruluğunu artırarak, daha hızlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar.

Tez çalışması kapsamında kullanılan bilgisayarın bazı genel özellikleri aşağıda verildiği gibidir:

- İşlemci ve modeli : Intel Core i7 13650HX
- Ram : 16GB DDR5-4800 SO-DIMM
- Depolama : 512GB PCIe® 4.0 NVMe™ M.2 SSD
- Ekran kartı : NVIDIA GeForce RTX 4050

Video kameralar sayesinde elde edilen görüntülerin kaydedilmesi sonrasında, kalibrasyonlarının gerçekleştirilmesi, işlenmesi ve metrik okumaların gerçekleştirilmesi için farklı yazılımlar kullanılmıştır. Çalkantı hareketinin neden olduğu serbest yüzeyin zamana bağlı değişiminin görüntü işleme sistemi ile incelenmesinde Image Pro Plus yazılımı kullanılmıştır. Image Pro Plus yazılımı içerisine daha önce oluşturulan bir kodun entegre edilmesiyle ölçümler gerçekleştirilmiştir.

3.5.2. Görüntü işleme ve analiz aşamaları

Video kameralardan elde edilen sayısal görüntüler, genellikle kare şeklindeki çok sayıda hücrelerden oluşur ve her hücre bir renk değerini temsil eder. Bu hücrelere "piksel" adı verilmektedir. Bir görüntüyü, piksellerin oluşturduğu bir matris olarak kabul edebiliriz. Matriste yer alan her bir piksel, iki temel özellik barındırır. Bunlar pikselin matristeki koordinatı ve pikselin sahip olduğu gri tonlama değeri yani ışık hassasiyeti değeridir [41]. Bu özellikleri bir arada düşündüğümüzde, bir görüntüyü aslında iki boyutlu bir fonksiyon, f(x,y), ile tanımlayabiliriz. Burada x ve y değişkenleri, belirli bir pikselin koordinatlarını temsil eder ve yalnızca tam sayı değerlerini alabilirler. f(x,y) fonksiyonunun değeri, belirli koordinatlardaki pikselin ışık yoğunluğu değerini, yani gri tonlama seviyesini temsil eder. Bir görüntüde, ekranın sol üst köşesi (0,0) noktasını verir, ekranın yatay yönü x eksenini, dikey yönü ise y eksenini temsil etmektedir. x eksenindeki değerler sağa doğru artarken, y eksenindeki değerler ise aşağıya doğru artmaktadır. Örneğin, 1920 x 1080 çözünürlüğe sahip bir Full HD görüntüde, x ekseninde en fazla 1920 piksel ve y ekseninde en fazla 1080 piksel bulunur.

Sayısal görüntü işleme alanında bir pikselin gri renk seviyesi, pikselin parlaklık değerini ifade eder ve bu genellikle bir sayısal değerle gösterilir. Gri seviyenin gösterildiği değer, genellikle 2'nin kuvvetleri olacak şekilde belirlenir. Bu durum, bilgisayar sistemlerinde bilgiyi saklama ve işleme yöntemlerinden kaynaklanmaktadır. En yaygın tercih edilen, her bir pikselin 8-bit ile kodlandığı durumdur. Böyle bir durumda, her bir pikselin temsil edebileceği farklı gri ton değerleri 2^8 yani 256'dır. Dolayısıyla, piksellerin gri değer aralığı G = {0, 1, 2,…, 255} şeklinde ifade edilebilir. Bu 256 farklı değer, gri seviyeleri belirtir. Değerlerin sınırlarında bulunan 0 değeri siyah renk, 255 değeri ise beyaz renk anlamına gelir. Aradaki değerler, siyah ve beyaz arasındaki farklı gri tonları temsil etmektedir. Bazı durumlarda, daha fazla renk çeşitliliği ve derinliği gerektiğinde, pikseller 16-bit ile kodlanabilir. Bu durumda, her bir pikselin temsil edebileceği farklı gri ton değerleri 2^{16} yani 65,536'dır.

Bilgisayar ekranlarında renkli görsellerin her bir pikseli, 24 bitlik veri olarak temsil edilmektedir. Bu 24 bitlik veri, R (Red-Kırmızı), G (Green-Yeşil) ve B (Blue-Mavi) olacak biçimde her renk için 8 bit ayrılarak üç farklı renk tonu oluşturulur. Bu renkli görsellerin oluşumu, R (Red-Kırmızı), G (Green-Yeşil), B (Blue-Mavi) kodlamalarına tabi tutulmuş üç

gri tonlamanın bir araya getirilmesiyle gerçekleşir. Bilgisayar hafızasında renkli görsellerin kapladığı alan, gri tonlamalı görüntülere oranla üç kat daha fazladır. Ancak bu durum, kullanıcıların görselleri daha verimli bir şekilde kullanmasını sağlar [41].

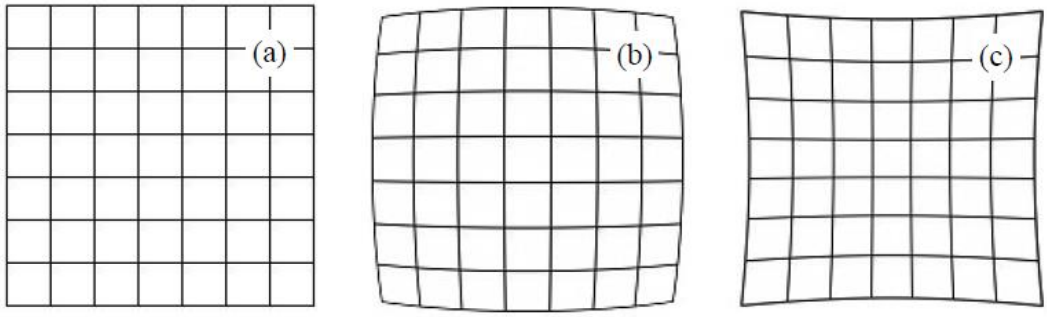
Görüntü işleme teknikleri kapsamında, renklerin çeşitli renk uzaylarına ayrılabilmesi mümkün olabilmektedir. En genel olarak kullanılan gruplama metodu, RGB (Red-Green-Blue, Kırmızı-Yeşil-Mavi) düzenidir. Bu düzenleme ile herhangi bir renk, bu üç temel rengin belirli oranlarda kombinasyonu ile türetilebilir. Elde edilmek istenen bir renk, (R, G, B) koordinatları ile ifade edilebilir. Örneğin, (0,0,0) koordinatı siyah renge karşılık gelirken (255,255,255) koordinatı ise beyaz renge karşılık gelmektedir. Ayrıca, (255,0,0) koordinatı kırmızı rengi, (0,255,0) yeşil rengi ve (0,0,255) mavi rengi ifade etmektedir. Bu sayede 16.777.216 farklı renk tonu elde edilebilir. Bu hususlar, görüntü işlemenin renk gruplama ve temsil etme konusunda nasıl bir yaklaşım sergilediğini göstermektedir.

Görüntülerin sağlıklı bir biçimde toplanmasının ardından, bilgisayarla bir dizi işlem gerçekleştirilir. Bu işlemlerden bazıları arka plan gürültüsünün (noise) giderilmesi ve aydınlatma sisteminin neden olduğu istenmeyen yansımaları önlemek için uygulanan filtreleme süreçleridir. Ayrıca, görüntü kalitesini artırmak ve görüntünün geometrik bozulmalarını, deformasyonlarını düzeltmek adına gerçekleştirilen görüntü onarımı da bu işlemler içerisinde yer almaktadır. Bu tür işlemler sayısal görüntü işleme (digital image processing) kapsamında değerlendirilir. Görüntü işleme uygulamaları çeşitli evrelerle yürütülmektedir. Bunlar arasında görüntü onarımı, görüntü filtreleme, görüntü iyileştirme, görüntü sıkıştırma, görüntüdeki varlıkların algılanması ve görüntüdeki nesnelerin özelliklerinin ve sınırlarının belirlenmesi yer alır. Bu uygulamalar arasında görüntü iyileştirme, görüntünün anlaşılabilirliğini artırmak için gerçekleştirilir. Görüntü iyileştirme süreçleri arasında görüntünün bulanıklığını giderme veya azaltma, kenarları belirginleştirme, parlaklığı artırma gibi aşamalar bulunabilir. Bu süreçler, görüntünün kalitesini ve kullanım verimliliğini artırmak için uygulanır.

Görüntü elde etme sürecindeki hataların tespiti ve bu hataların düzeltilmesi, görüntü işleme sistemlerinin etkin bir biçimde yönetilmesinde kritik bir öneme sahiptir. Dijital kameralarla elde edilen görüntüler, mercek bozulması (lens distortion), sensör düzleminde gerçekleşen deformasyonlar ve elektronik transfer sürecindeki hatalar nedeniyle metrik kalite açısından olumsuz etkilenebilir. Görüntülerin metrik kalitesini etkileyen bu unsurları ortadan

kaldırmak adına uygulanan işlemlere kalibrasyon denilmektedir. Sayısal görüntülerde ortaya çıkan bozulmalar, uygun algoritma ve yazılımlar kullanılarak bilgisayar aracılığıyla düzeltilebilir [133]. Bu yaklaşım, görüntü işleme uygulamalarında verimlilik ve doğruluk açısından önemli bir rol oynamaktadır.

Kameralarla elde edilen görüntülerde genellikle iki tür bozulma meydana gelir. Bu bozulmalar açısal bozulma ve teğetsel bozulma olarak tanımlanır. Açısal bozulma, bir görüntüdeki noktaların asıl pozisyonlarından farklı bir konumda görünmesi durumunu ifade eder. Açısal bozulma genellikle dış bükey (barrel distortion) ve iç bükey (pincushion distortion) olmak üzere iki farklı şekilde oluşmaktadır. Dış bükey bozulmada, görüntünün merkezinden dışarıya doğru bir genişleme söz konusu olurken, iç bükey bozulmada merkezden dışarıya doğru bir daralma yaşanır. Bu iki bozulma türüne dair örnekler Şekil 3.5'te verilmiştir. Bu bozulmaların anlaşılması ve düzeltilmesi, görüntü işleme süreçlerinde önemli bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır.



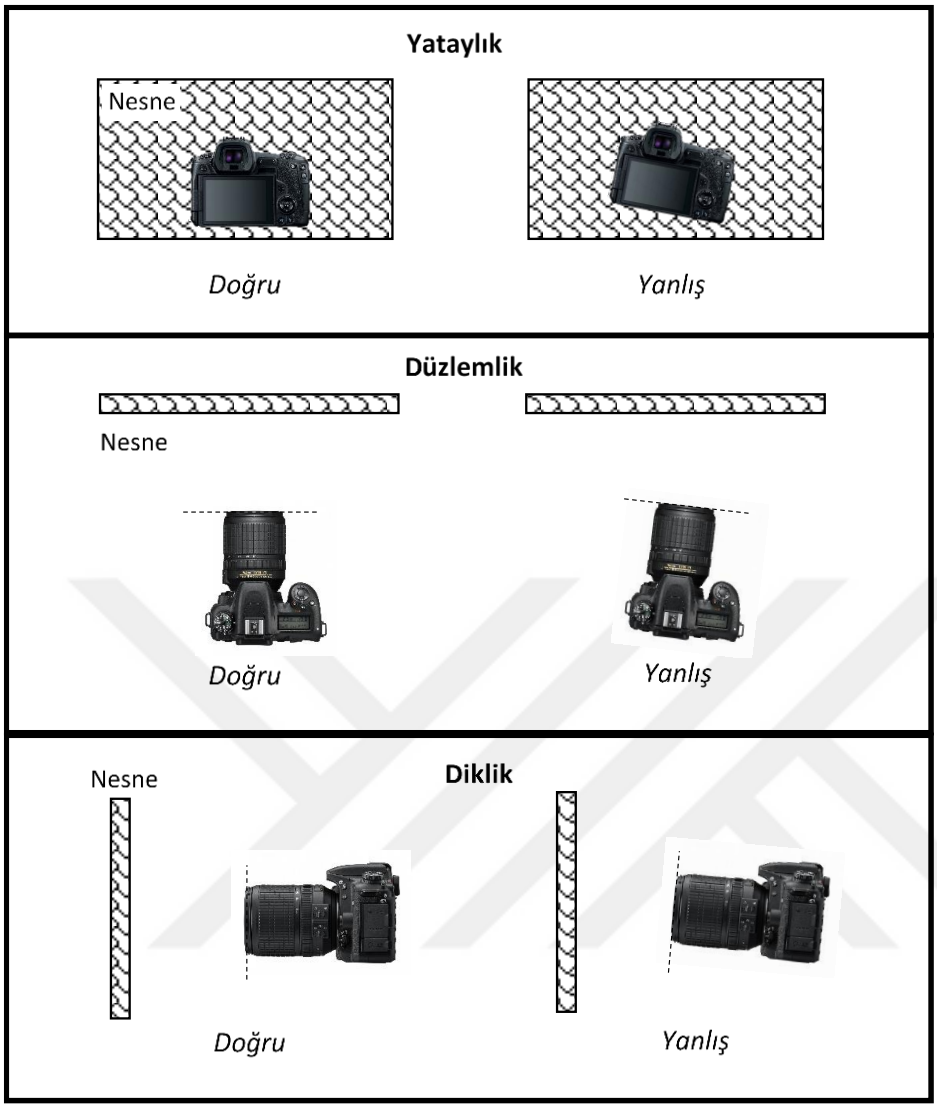
Şekil 3.5. Görüntüde oluşan açısal bozulmalar a) asıl görüntü b) dış bükey bozulma c) içbükey bozulma [41]

Birden fazla mercek içeren sofistike lens sistemlerinde, tüm merceklerin odak noktalarının aynı hizadan olması esastır. Teğetsel bozulma, genellikle mercek sistemi bileşenlerinin görüntü eksenlerinin yeterince hizalanmamasından kaynaklanır. Açısal bozulmaların varlığında, bu bozulmaların düzeltilmesi amacıyla açısal kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilir. Bu, görüntü işleme sistemleri içerisinde doğru ölçümlerin yapılabilmesi için önemlidir. Bu tez çalışması kapsamında, cep telefonu kamerası ile elde edilen deney görüntülerinde dış bükey ve iç bükey bozulmaların meydana gelmediği belirlenmiştir. Dolayısıyla, açısal kalibrasyon işlemine gerek duyulmamıştır.

Açısal kalibrasyonlara ek olarak, belirli durumlarda perspektif, yatay ve metrik kalibrasyonlar da gereklilik arz edebilir. Kamera ile görüntülenmek istenen obje arasındaki konumlandırma idealde dik bir açı oluşturmalıdır. Fakat, kameranın objeye belirli bir açı ile konumlandırıldığı durumlarda, perspektif bir görüntü elde edilir. Bu, kameranın objenin daha yakın bölgelerini büyütülerek, daha uzak bölgelerini ise küçültülerek algılamasına yol açar. Bu tip bir görüntü üzerinde işlem yapılabilmesi için perspektif kalibrasyonunun uygulanması gerekmektedir. Bu işlem, görüntünün doğru bir şekilde yorumlanabilmesi ve sonuçların güvenilirliği için kritik öneme sahiptir.

Kamera ölçümlerinin doğruluk ve güvenilirliği, kamera ve deney düzeneğinin yatay ve düşey bir düzlemde sapma göstermemesi ile doğrudan ilişkilidir. Kameraların çekim düzlemlerinde oluşabilecek en küçük bir hata bile, sıvı yüzeyindeki seviye değişimlerinin ölçümünde önemli okuma hatalarına neden olabilir. Bu sebeple, hassas ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi için ilk adım, kameraların yerleştirildiği tripodların ve deney düzeneğinin su terazileri yardımıyla yatay ve düşey düzlemde hizalanması olmalıdır. Ayrıca, akıllı telefonlarda bulunan su terazisi uygulamaları da yatay ve düşey düzlemde hizalama işlemi için kullanılabilir. Yanlış kamera yerleştirilmesi sonucu ortaya çıkan çekim hatalarından bazıları Şekil 3.6'da verildiği gibidir. Bu çekim hataları, görüntü işleme tekniklerinin bilgisayar ortamında uygulanmasıyla sonradan düzeltilebilir, fakat bu süreç oldukça zaman almaktadır. Ancak, kameranın başlangıçta doğru şekilde yerleştirilmesi ve konumlandırılmasıyla bu tür sorunlar kolaylıkla önlenebilecektir [134].

Bir görüntüde belirli bir nesnenin gerçek boyutunun ne olduğunu belirlemek için, piksel değerlerinin metrik değerlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm sürecine metrik kalibrasyon adı verilir. Metrik kalibrasyonun gerçekleştirilebilmesi için, görüntü içerisinde gerçek uzunluğu bilinen bir referans ölçüye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu referans ölçü olarak, deney tankının uzunluğu, tankta bilinen bir su yüksekliği veya deney tankına yerleştirilmiş belirteçler kullanılabilir. Referans ölçü ile uzunluk, alan ve açı gibi metrik ölçümler görüntü üzerinde kolaylıkla hesaplanabilir. Metrik kalibrasyon işleminin ilk adımı, referans ölçünün kaç piksele denk geldiğini belirlemektir. Bu, görüntüde bir pikselin hangi uzunluğu temsil ettiğini belirler. Örneğin, 40 cm uzunluğundaki bir deney tankının 100 piksele eşit olduğu biliniyorsa, piksel başına uzunluk oranı 40/100 = 0,4 cm/piksel olacaktır. Bu oran, görüntüdeki herhangi bir noktanın veya nesnenin gerçek boyutunun, o nokta veya nesnenin temsil ettiği piksel sayısı ile hesaplanmasına olanak sağlar.

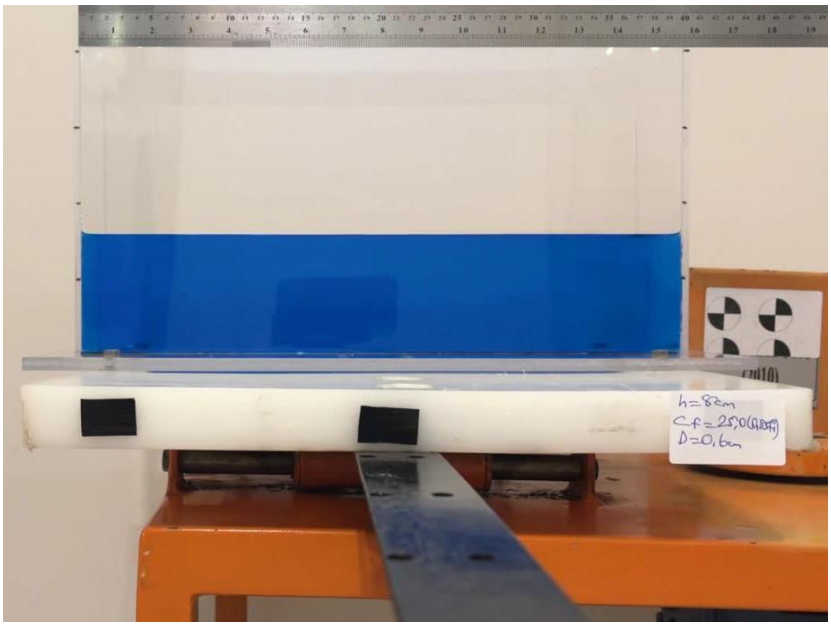


Şekil 3.6. Kamera pozisyonundan kaynaklanan çekim hataları [135]

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

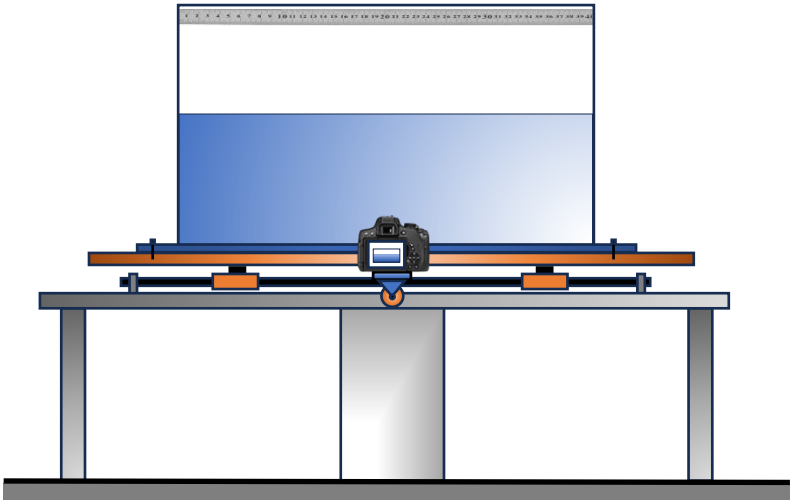
4.1. Deney Düzeneği ve Yöntemi

Dikdörtgen kesite sahip bir deney tankında yer alan sıvının çalkantı davranışı, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve ele alınan ölçüm yöntemleri ile birlikte incelenmiştir. Deney tankının uzunluğu 40 cm, yüksekliği 30 cm ve genişliği ise 10 cm'dir (Şekil 4.1). Deney tankı, uyarma genliği ve frekansı ayarlanabilen frekans kontrollü bir sarsma tablası üzerine konumlandırılmıştır (Şekil 4.2). Tankın genişliği bilinçli olarak küçük tutularak, çalkantı hareketlerinden kaynaklanan üç boyutlu etkilerin genel davranış üzerindeki olumsuz etkileri minimize edilmeye çalışılmıştır. Frekans ve genlik kontrollü sarsma tablası sayesinde deney tankı belirli uyarma frekansları ve genlikleri altında harekete maruz bırakılmıştır. Deney tankı, tüm yüzeyleri 4,8 mm kalınlığında pleksiglas malzemeden tasarlanmıştır. Pleksiglas şeffaf oluşu sayesinde tank içerisindeki sıvının görüntü işleme yöntemi ile analizinde sağladığı kolaylığın yanı sıra, cama kıyasla daha az yansımaya sahip olması, darbeye dayanıklılığı, kir tutmayışı, hafif oluşu, kolay işlenebilirliği ve UV direnci gibi olumlu özellikleri bakımından da oldukça avantajlı bir malzemedir. Çalışmanın bundan sonraki kısımlarında tank uzunlukları ve ölçüm yapılan noktalar santimetre (cm) birimiyle verilmiştir.

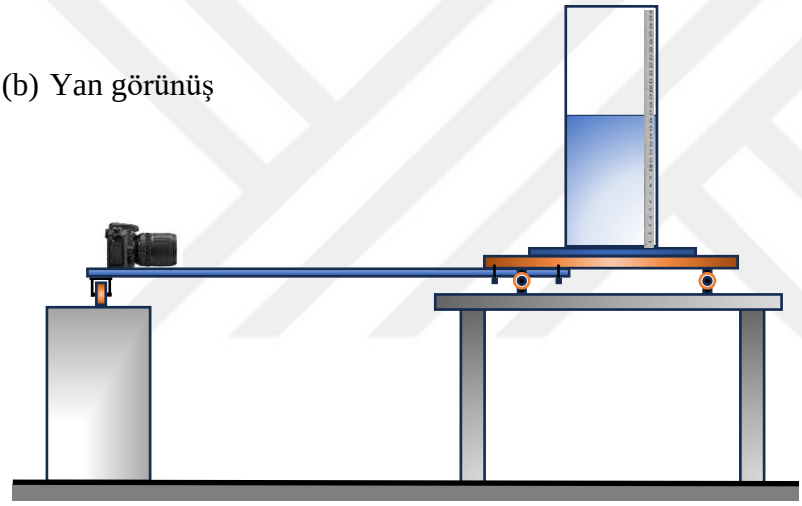


Şekil 4.1. Deney düzeneği

(a) Ön görünüş



(b) Yan görünüş



Şekil 4.2. Deney düzeneği ve kamera yerleşiminin şematik gösterimi (a) ön görünüş (b) yan görünüş

Deney tankındaki sıvının çalkantı hareketi sonucu meydana gelen seviye değişimi ve tankın bağıl ile rölatif hareketleri, sarsma tablasına monte edilen çelik profil üzerine yerleştirilmiş bir cep telefonu kamerası aracılığıyla izlenmiştir (Şekil 4.2). Bu sabitleme, tankla beraber hareket eden kameranın, suyun hareketlerini sabit bir tank görüntüsü içinde net bir şekilde yakalamasını sağlamıştır. Düzenek ayrıca frekans kontrollü bir sarsma tablasıyla bütünleşik olarak tasarlanmıştır; böylece tankı uyarma genliği ve frekansı özel izleme noktaları aracılığıyla görüntü işleme yöntemi ile rahatlıkla ölçülebilmektedir. Ayrıca, metrik kalibrasyon işlemlerini gerçekleştirmek için de tankın üzerine çelik bir metre yapıştırılmıştır.

4.1.1. Çalkantı hareketinin oluşma mekanizması

Çalkantı hareketi kısmen sıvı ile dolu tanklarda, tankın dış etkilere maruz kalması sonucu meydana gelen karmaşık bir olaydır. Çalkantı hareketinin davranışı, tankın geometrisi, doluluk oranı, sıvının viskozitesi ve yoğunluğu, deney tankının hareket genliği ve frekansı gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu faktörler çalkantı hareketini doğrudan veya dolaylı yollardan etkilemektedir.

Sıvı tankının geometrisi ve sınırlayıcı koşulları çalkantı davranışı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Tankın şekli ve boyutları içerisinde mevcut bulunan sıvının yayılma özelliklerini etkilerken, tankın sınırlayıcı yüzeyleri ise sıvının yansıma ve kırılma gibi durumları neticesinde çalkantı hareketini doğrudan etkileyebilmektedir.

Doluluk oranının nispeten az olduğu durumlarda çalkantı hareketi daha stabil ve düşük enerjiye sahip bir şekilde meydana gelmektedir. Bu durumda sıvının hareketi daha homojen olup dalga etkileri daha az belirgin olmaktadır. Başka bir deyişle sıvının çalkantı hareketi daha sınırlı bir bölgede kalmaktadır. Bununla birlikte artan doluluk oranlarında çalkantı hareketi daha belirgin bir form yakalayacak ve sıvı yüzeyinde meydana gelen çalkantı hareketi daha keskin bir biçimde gözlemlenebilecektir. Tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar, h/L oranının 0,05-0,30 aralığında gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler içinde suyun çalkantı davranışları ve etkileşimleri detaylı olarak incelenmiştir.

Sıvı tankına etki eden dış etkiler, çalkantı hareketinin meydana gelmesinde aktif bir rol oynamaktadır. Özellikle deney tankı içerisinde yer alan sıvının doğal frekans değeriyle örtüşen hareket frekansları neticesinde çalkantı hareketinin agresif davranış göstermesi beklenmektedir. Buna ilaveten tank hareketinin genlik değeri arttıkça çalkantı hareketinin genliği de belirli oranlarda artış göstermektedir.

Deney tankı içerisinde yer alan sıvı sonsuz sayıda doğal frekans değerine sahip olmasına rağmen, tez çalışması kapsamında, en olumsuz durumu ele almak için en etkili mod değeri olan ilk mod değeri dikkate alınmıştır. Deney tankındaki sıvının ilk mod doğal frekans değeri ile bu frekansa yakın değerlerin tankın hareket frekansı ile örtüşmesi durumunda çalkantı davranışları incelenmiştir. Buradaki amaç, rezonans ve rezonans dışı durumlarda çalkantı

hareketinin davranışını analiz etmektir. Bu bağlamda, doğal mod frekanslarının belirlenmesinde Eşitlik 3.43 ve Eşitlik 3.44'te verilen bağıntılar kullanılmıştır.

Sonuç olarak, çalkantı hareketinin tek bir parametreye göre değerlendirilmesi yanlış bir yaklaşım olmaktadır. Bir veya birden fazla parametrenin etkili olduğu farklı koşullar için çalkantı hareketinin davranışı bu tez çalışmasının temelini oluşturmaktadır. Çalkantı en genel haliyle, viskozite, yoğunluk, dış etkiler, rezonans frekansları ve tank geometrisi gibi faktörlerin karmaşık etkileşimi sonucunda meydana gelen önemli bir olaydır. Çalkantı probleminin daha iyi anlaşılması, hidrodinamik prensiplerin ve sıvı mekaniğinin derinlemesine incelenmesine bağlıdır.

4.1.2. Deneysel ölçüm sistemi

Tez çalışmasının deneysel ölçüm aşamaları görüntü işleme sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme (image processing), video görüntülerine matematiksel işlemler uygulanarak, bu görüntülerden arzu edilen bilgileri elde etmeyi, görüntü kalitesini artırmayı veya istenmeyen öğeleri geliştirilmiş tekniklerle filtrelemeyi sağlayan bir yöntemler bütünüdür. Görüntü işleme yöntemi, diğer yöntemlere kıyasla, çalkantı problemini doğrudan ve gerçek zamanlı olarak gözlemleme ve analiz etme imkanı sunar. Görüntü işleme teknolojisi sayesinde, çalkantı hareketini gerçek zamanlı olarak izleyebilir ve buna bağlı risklere anında yanıt vererek, durumu düzeltici önlemler alabiliriz. Sayısal ve analitik yöntemler belirli varsayımlar ve sınırlamalar altında sonuçlar verirken, görüntü işleme sistemi gerçek dünya koşullarında doğrudan ölçümler sağlayarak, çok daha güvenilir sonuçlar elde etmeyi mümkün kılmaktadır.

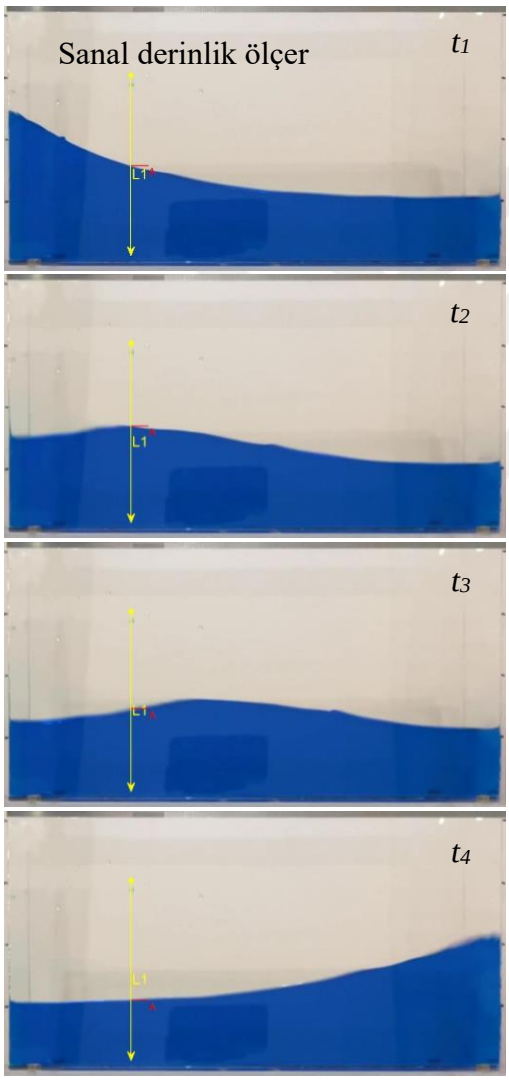
Sıvı çalkantı hareketinin deneysel ölçümlerinde kullanılan alternatif bir yöntem de ultrasonik sensör teknolojisidir. Ancak, ultrasonik sensörler, çalkantı hareketi gibi karmaşık problemlerde yeterli hassasiyeti sunamayabilir. Özellikle tepki sürelerinin fazla olabilmesi, birim zamanda yaptıkları ölçümlerde veri sayılarının sınırlı olması gibi sebeplerden ötürü agresif sıvı davranışlarında bu sensörlerden doğru sonuçlar elde edilmesi zor olabilmektedir. Ayrıca, ultrasonik sensörlerin çalışma mesafesi, su yüzeyinde meydana gelen eğrilikler ölçümler açısından problem oluşturabilir. Sensörün, ölçüm alınması istenen noktaya çok yakın veya uzak olması durumunda hatalı okumalar gerçekleştirebileceği göz önünde bulundurulmalıdır [136]. Ultrasonik sensörler temassız bir ölçüm sağlamasına karşın, bazı

durumlarda çalkantı hareketinin ölçümünde sıvı yüzeyine olan mesafelerinin doğru konumlandırılmamaları durumunda sıvı akışını rahatsız etme olasılıkları bulunmaktadır. Sensörün yerleştirildiği konumda sıvı ile temas etmesi durumunda akışın dinamikleri değişir ve yanlış okumalar meydana gelebilir. Geleneksel sensör teknolojileri genellikle tek bir noktada ölçüm yapabilirken görüntü işleme sistemleri sıvı yüzeyi üzerinde her noktada sınırsız ve hassas ölçüm yapabilme yetisine sahiptir [136]. Bu sayede çalkantı hareketi daha geniş bir yüzey üzerinde detaylı bir şekilde araştırılabilmektedir.

Tez çalışması çerçevesinde, erişimi ve kullanımı kolay olan bir adet cep telefonu kullanılarak sıvı tankı hareketlerinin video kayıtları alınmıştır. Elde edilen video görüntüleri, bilgisayar yazılımları kullanılarak işlenmiş ve bu işlem sonucunda sıvı yüzeyindeki her noktada meydana gelen çalkantı hareketlerinin ardından sıvı seviyesindeki değişimlerin ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deney çalışmasında, akıllı telefon kamerası ile 1080p (1920 x 1080 piksel) çözünürlükte ve saniyede 60 kare hızında video kayıtları gerçekleştirilmiştir. Yüksek kare hızının tercih edilmesinin temel nedeni, çalkantı hareketinin dinamik yapısının ve bu harekete bağlı karmaşık ayrıntıların daha etkin bir şekilde izlenebilmesidir. Görüntü işleme yazılımının devreye sokulması ile birlikte, 60 karelik görüntüler, çalışmanın gerekliliklerine uygun bir şekilde seyreltilmiş, bu sayede analiz için daha elverişli bir hale getirilmiştir. Bu yaklaşım, hareketin daha detaylı incelenmesine imkân vermiş ve analiz sürecinin esnekliğini ciddi anlamda artırmıştır.

Elde edilen görüntülerin analizi ve işlenmesi Image-Pro Plus ve Imagej yazılımları ile yapılmıştır. Çalkantı hareketi ile ilgili metrik ölçümler bu yazılımlar sayesinde kolaylıkla elde edilebilmektedir. Kocaman [41], doktora tezi kapsamında gerçekleştirdiği çalışmasında görüntü işleme yazılımı bünyesinde mevcut bulunan kenar tanıma ve filtreleme fonksiyonlarından yararlanarak istenilen bir noktada su seviyelerinin zamana bağlı değişimlerinin belirlenebildiği bir kod geliştirmiştir. Sanal derinlik ölçer olarak adlandırılan bu yöntem sayesinde serbest su yüzeyinin (x,y) koordinatları her bir zaman adımında hassas bir biçimde belirlenebilmektedir (Şekil 4.3). Serbest su yüzeyinin rahatlıkla belirlenebilmesi için deney tankı içerisindeki sıvı mavi renkli gıda boyasıyla renklendirilmiştir. Yazılıma entegre edilen kod sayesinde, su-hava arakesiti suyun en yüksek noktası olarak algılanır ve bu sınır, video üzerindeki her bir karede sırayla tespit edilerek hesaplanabilmektedir. Böylece, belirli bir noktadaki su seviyesinin koordinatı ve zaman içindeki değişimi tespit edilebilir. Ölçüm yapılacak noktanın koordinatları ve boyutları işlendikten sonra, sanal

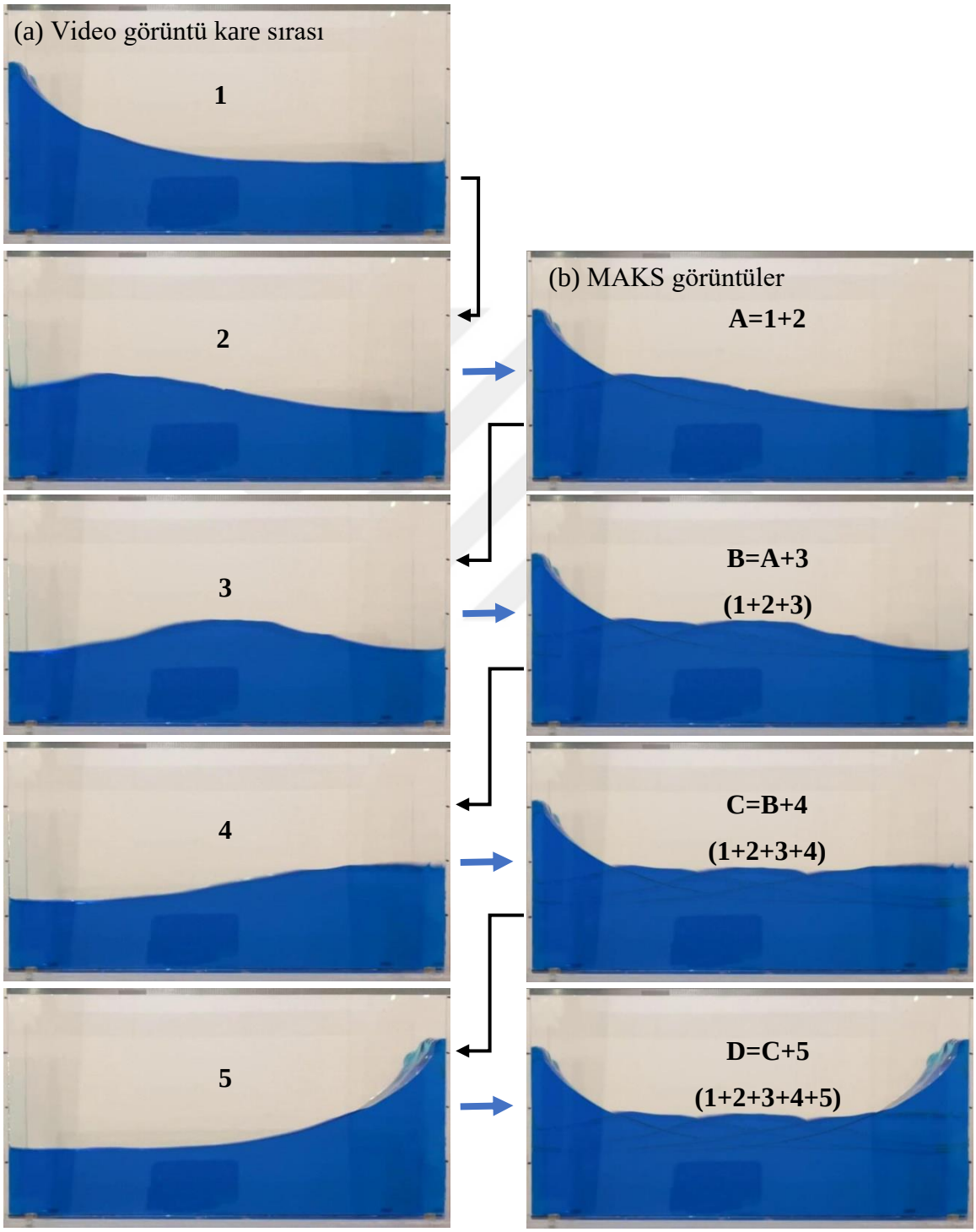
derinlik ölçeri temsil etmek üzere bir ok oluşturulmaktadır. Bu yaklaşımda, serbest su yüzeyinin belirlenmesinin temel ilkesi, çizilen ok yönündeki komşu piksellerin gri tonlu renk değerlerindeki ani bir değişimin yazılım tarafından bir kenar olarak algılanmasıdır. Su seviyesini gösteren bu noktanın koordinatları böylece belirlenebilmektedir. Bu yöntem, akımın davranışını rahatsız eden, çalkantı davranışının tespitinde yer yer okuma hataları yapan ve hepsinden önemlisi sadece tek bir noktada ölçüm yapabilen sensörlere kıyasla üstünlük sağlamakta ve önemli bir alternatif ölçüm yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır.



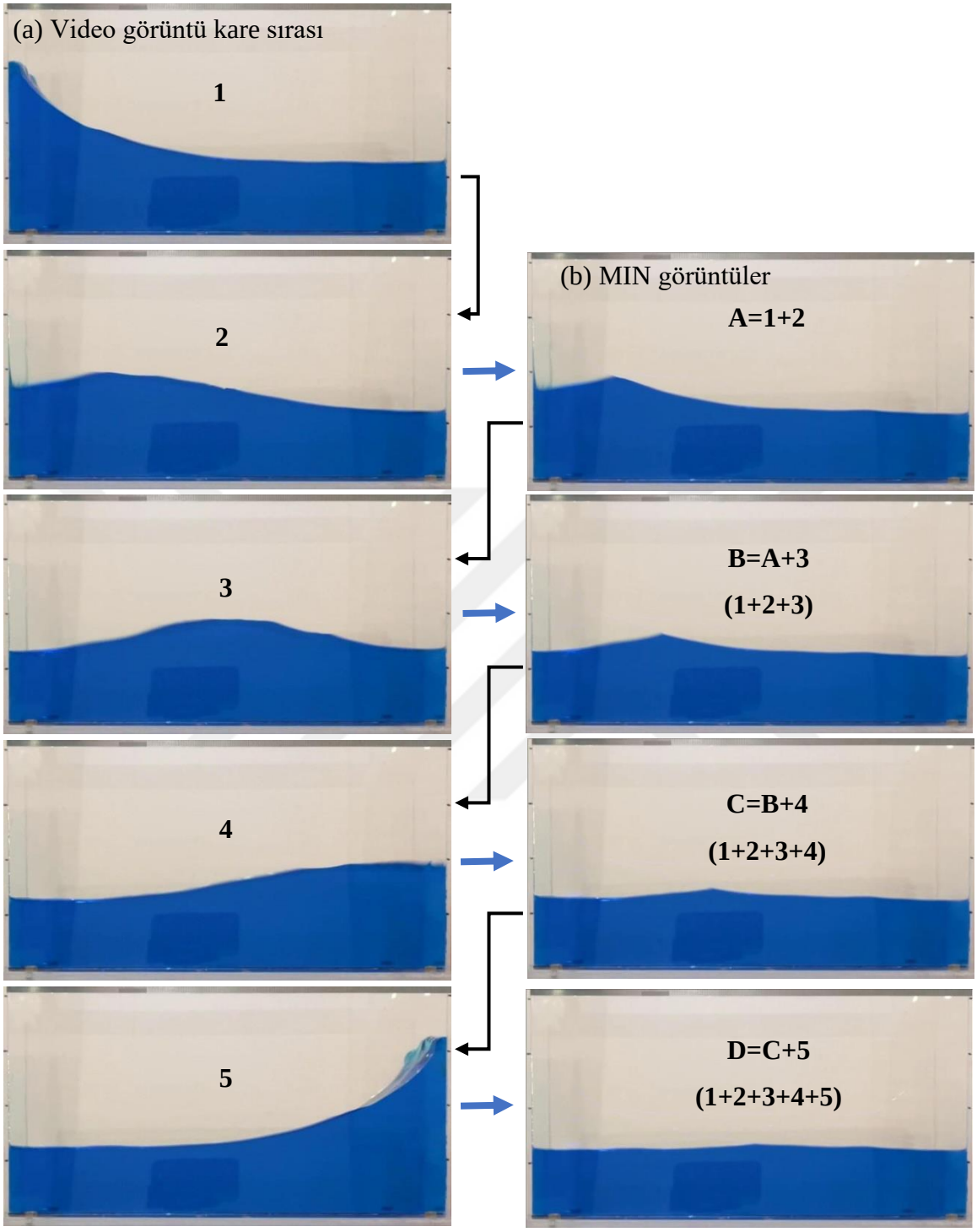
Şekil 4.3. Herhangi bir zamanda su derinliğinin sanal derinlik ölçer ile belirlenmesi [41]

Bu tez çalışması kapsamında, literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak, çalkantı probleminin analizinde kesit boyunca oluşan maksimum ve minimum su seviyelerinin tek bir görüntü ile gösterilebildiği özgün bir görüntü işleme algoritması geliştirilmiştir. Sayısız görüntüyü tek bir görüntüye indirgeyebilen bu yenilikçi yaklaşım, çalkantının zaman içindeki etkilerini daha anlaşılır ve sade bir biçimde göstererek, farklı koşullar altında gerçekleştirilen deneylerdeki çalkantı hareketlerinin detaylı analizlerinde kullanılmıştır. Bu yöntem sayesinde, belirli bir görüntü karesi (frame) sayısına sahip video verisi kullanılarak, sıvının zaman içerisindeki serbest yüzey profilinin her bir noktasında meydana gelen maksimum dalga yükseklikleri belirlenmiştir. Bu süreç, video içerisindeki ilk görüntü karesinin değerlendirilmesiyle başlar ve bu referans alınan ilk görüntü, ardışık olarak takip eden ikinci görüntü karesi ile kıyaslanır. Kıyaslama işlemi, her iki görüntü karesindeki eşleşen piksellerin değerlerinin karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilir. Bu süreçte, maksimum değere sahip olan pikseller tespit edilir ve bu pikseller, birinci görüntü üzerine işlenerek iki görüntünün birleşiminden oluşan yeni bir görüntü elde edilir. Bu birleştirme işlemi, bir sonraki görüntü karesi ile birleştirilmiş yeni görüntünün kıyaslanması şeklinde tekrar edilerek, video içerisindeki tüm görüntü kareleri için sırasıyla uygulanır. Her birleştirme adımında, bir önceki adımda elde edilen maksimum değerler korunarak, ardışık olarak yeni gelen görüntüdeki değerlerle sırasıyla karşılaştırılır ve maksimum olan değerler her seferinde ilk görüntüye işlenir. Böylelikle, ilk görüntü üzerinde tüm zaman adımlarında kesit boyunca oluşan maksimum su seviyeleri elde edilebilmektedir (Şekil 4.4). Bu yöntemin, çalkantı hareketinin analizinde, özellikle de çalkantı olaylarının mühendislik uygulamalarında, sıvının serbest yüzeyindeki en yüksek noktaların tespit edilmesi için oldukça değerli olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu yöntem, zamana bağlı değişken açık kanal akımı problemlerinin (baraj yıkılması, köprü ayaklarında kabarma, oyulma, taşkın, kıyı vb.) analizlerinde kesit boyunca oluşacak maksimum su seviyelerinin belirlenebilmesi amacıyla etkili bir biçimde kullanılabilecektir. Geliştirilen kod sayesinde ayrıca, maksimum dalga yüksekliklerinin belirlenmesinde kullanılan sürecin benzeri minimum dalga yüksekliklerini tespit etmek için de uygulanabilmektedir. Bu süreçte, video verisinin her karesindeki pikseller karşılaştırılarak, bu kez en düşük değerlere sahip olanlar seçilir ve ardışık olarak ilk görüntü üzerine işlenerek tek bir görüntü üzerinde birleştirilir. Böylece, seçilen zaman aralığındaki çalkantı süresince dalga hareketlerinin oluşturduğu sıvının serbest yüzeyindeki en düşük yükseklikler belirlenmiş olur (Şekil 4.5). Çalışmanın ilerleyen kısımlarında, tankın tüm kesitlerinde görülen en yüksek dalga yüksekliklerini içeren görüntülere “MAKS”, en düşük dalga yüksekliklerini içeren görüntülere ise “MIN” adı

verilecektir. Bundan sonraki aşamalarda, “MAKS” ve “MIN” belirlenmesinde, görüntü işleme analizleri için çalkantı hareketinin başlangıcından itibaren 20 saniyelik videolar kullanılacaktır.

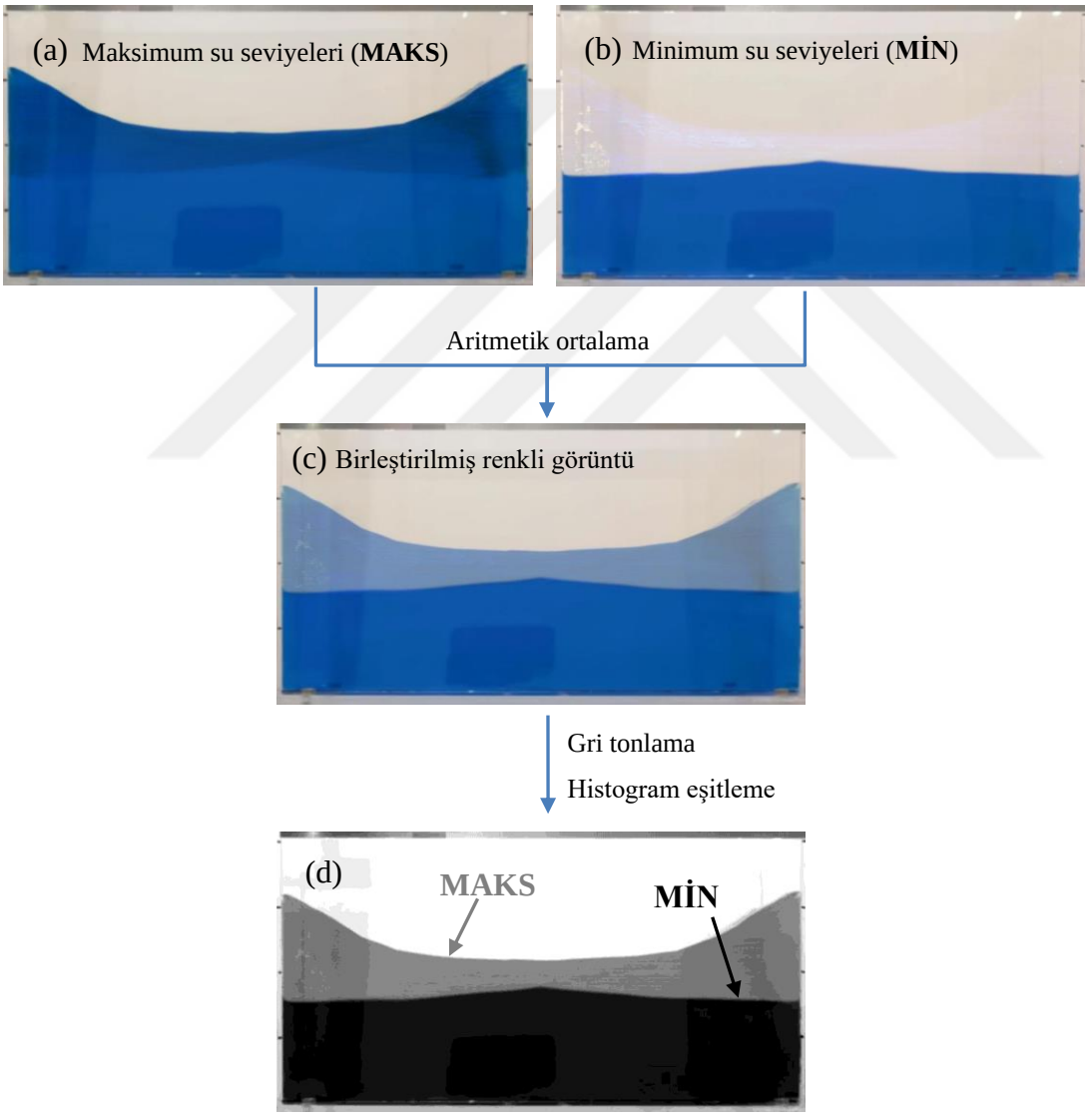


Şekil 4.4. Kesit boyunca oluşan maksimum dalga yüksekliklerinin (MAKS) belirlenmesi



Şekil 4.5. Kesit boyunca oluşan minimum dalga yüksekliklerinin (MIN) belirlenmesi

Herhangi bir deney şartları için elde edilen maksimum ve minimum seviyelerine ait görüntülerin aritmetik ortalamalarının alınması ve bu görüntülerin gri tona çevrilmesi ile çalkantı hareketine ait MAKS ve MIN görüntüleri tek bir görüntü üzerinde temsil edilebilmiştir (Şekil 4.6). Bu yeni yaklaşım sayesinde, görüntü üzerinde kesit boyunca oluşan maksimum ve minimum su seviyeleri aynı anda görülebilmektedir. Bunun yanında, çalkantı dalga hareketinin hangi sınırlar içerisinde hareket ettiği tek bir görüntü ile izlenebilmekte, bir başka ifade ile çalkantı dalgasının oynaklığı hakkında da fikir sahibi olunabilmektedir.



Şekil 4.6. MAKS-MIN görüntülerinin belirlenmesi (a) MAKS (b) MIN (c) birleştirilmiş renkli görüntü (d) MAKS-MIN

4.1.3. Çalışmaların özeti

Çalışmada ilk olarak, deney tankı 6 mm genliğindeki sinüzoidal harekete maruz bırakılmıştır. Bu etki altında, tankın sol duvarına 5 cm mesafedeki bir noktada sıvı yüzeyindeki değişimler, lineer teori ve görüntü işleme yöntemleriyle irdelenmiştir. Araştırmada, özellikle farklı doluluk oranlarının çalkantı davranışları üzerindeki etkisi önemli bir inceleme konusu olmuştur. Bu bağlamda, çeşitli doluluk oranları altında sıvı dinamiklerinin nasıl davrandığı, lineer teori ve görüntü işleme yöntemlerinin etkinlikleri ve bu koşullar altında sınırları detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Çalışmada daha sonra, kısmen dolu bir tankın farklı uyarma genliklerine tepkisi incelenmiştir. Bu inceleme, lineer teori ve deneysel yöntemler kullanılarak yürütülmüş ve çalkantı davranışının bu genliklere nasıl yanıt verdiği detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, doluluk oranının 0,25 olduğu ve uyarma genliklerinin 5 mm; 8,5 mm ve 12 mm olduğu durumlar üzerine odaklanılmıştır. Bu çalışmada, çeşitli genlikler altında çalkantı hareketlerinin nasıl değiştiği incelenmiş ve özellikle uyarma frekansı olarak birinci mod doğal frekans değerinin (f_1) 1,30 katı olan 1,30 f_1 değerinin etkileri üzerinde durulmuştur.

Tez kapsamında, dalga yüksekliklerinin piksel düzeyinde karşılaştırılması ve MAKS-MIN değerlerinin analizi de önemli bir yer tutmaktadır. Bu analizler, sıvının serbest yüzeyindeki dalga hareketlerinin zaman içinde nasıl değiştiğini ve engel dizilimlerinin bu hareketleri nasıl etkilediğini detaylı bir şekilde göstermektedir. Bu bağlamda araştırmada, sıvı derinliklerinin 2 cm'den 10 cm'ye kadar değişen koşullarında f_e = 0,90 f_1 ve f_e = 1,10 f_1 iki farklı uyarma frekansı altında MAKS değerleri ve 6 cm ve 8 cm sıvı derinliklerinde, 0,80 f_1'den 1,10 f_1'e kadar değişen uyarma frekanslarında MAKS-MIN değerleri verilmiştir.

Çalışmada daha sonra, deney tankı yatay olarak farklı frekans aralıklarında uyarılarak, sıvının rezonans frekanslarının ilk yedi modunu kapsayan f_e/f_1 (uyarma frekansı/birinci mod doğal frekans) değerleri 0,20'den 3,27'ye kadar incelenmiştir. Tankın doluluk oranı h/L = 0,25 iken 1 mm, 5 mm ve 10 mm uyarma genlikleri için yapılan deneylerde, tankın sol duvarına 1 cm uzaklıktaki noktada sıvı yüzeyindeki değişimler gözlemlenmiştir. FLOW - 3D HYDRO yazılımı ile ölçülen maksimum dalga yükseklikleri, farklı mod frekanslarının sıvı dinamiklerine etkilerini analiz etmek için kullanılmıştır.

Yukarıdaki çalışmalara ilave olarak P1, P5 ve P10 olarak belirlenen üç farklı ölçüm noktasında su seviyesi değişimleri hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiştir (Şekil 4.18). Sayısal analizler, tankın boyutlarına uygun bir şekilde tasarlanan ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RONS) denklemlerine dayanan bir hesaplama alanında gerçekleştirilmiştir. Akımın türbülanslı yapısını modellemek için, serbest yüzey akımlarında etkili olduğu bilinen ***k-ε*** türbülans modeli kullanılmıştır. Ayrıca, ağ aralığı boyutlarının seçimi üzerine yapılan ön çalışmalarla, çalkantı hareketlerinin serbest yüzey profilleri üzerindeki tepkileri incelenmiş ve çeşitli boyutlardaki sonuçlar karşılaştırılarak uygun ağ aralığı boyutu belirlenmiştir. Bu analizler sonucunda, ağ aralıklarını daraltmanın sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki uyumu artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, ağ aralığının daralmasıyla birlikte hem hesaplama süresi hem de sonuç dosyalarının büyüklüğünün arttığı da tespit edilmiştir.

Tez çalışmasında ayrıca B(20), B(10 - 30) ve B(10 - 20 - 30) engel yerleşimlerinin tank içerisindeki sıvının çalkantı davranışına etkileri, hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelenmiştir (Şekil 4.24). Dalga yüksekliklerinin zaman içindeki değişimleri, deneyin farklı yatay kesitlerinde (P1, P10, P20) yapılan ölçümlerle detaylı bir şekilde ele alınmış ve bu ölçümler, FLOW-3D HYDRO yazılımından elde edilen sayısal simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Özellikle, sıvı derinliği ve uyarma frekansı değişkenlerine bağlı olarak, engel yerleşimlerinin çalkantı davranışları üzerindeki etkileri derinlemesine analiz edilmiştir. Bu bağlamda, çeşitli sıvı derinlikleri ve farklı uyarma frekansları altında, engelsiz durumla kıyaslanarak engel yerleşimlerinin çalkantı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çerçevede, çeşitli engel dizilimlerinin çalkantı hareketlerini sönümlemedeki etkinlikleri, hem sıvının serbest yüzeyindeki dalga hareketleri hem de dalga yükseklikleri ve genlikleri açısından değerlendirilmiştir. Çalışmada ayrıca Şekil 4.24'te tanımlanan B(20), B(10 - 30) ve B(10 - 20 - 30) engel dizilimlerinin çalkantı hareketleri üzerindeki etkileri, MAKS ve MIN verileri kullanılarak da incelenmiştir. Bu yöntemle, farklı engel yerleşimlerinin çalkantı hareketleri üzerindeki etkileri video görüntüleri aracılığıyla değerlendirilmiş ve bu sayede çalkantı hareketlerinin anlaşılması konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir.

Tez çalışmasında son olarak, Şekil 4.24'te şematik gösterimleri verilen ikili ve üçlü engel dizilimlerinin (B(20), B(20 x 2), B(15 - 25), B(10 - 30), B(5 - 35), B(20 x 3), B(15 - 20 - 25), B(10 - 20 - 30), B(5 - 20 - 35)) çalkantı davranışları üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Bu kapsamda, sıvı yüksekliği ve uyarma frekansı dikkate alınarak, çeşitli

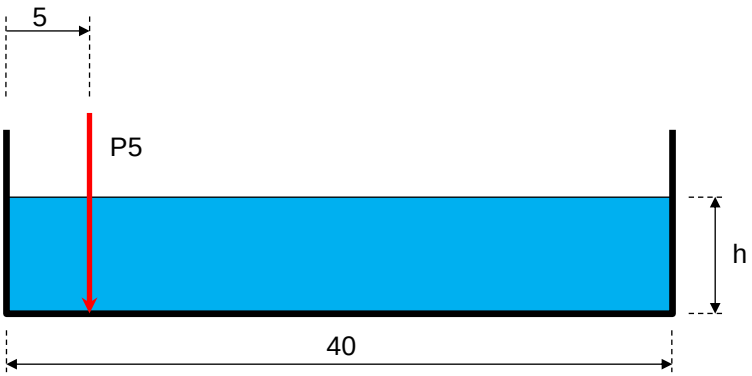
engel dizilimlerinin çalkantıyı kontrol etme kapasitesi değerlendirilmiştir. Özellikle, $f_e = 0{,}85\, f_1$ uyarma frekansında ve farklı sıvı yüksekliklerinde (6 cm ve 9 cm) gerçekleştirilen analizler, engel dizilimlerinin çalkantı davranışlarını nasıl etkilediğini belirginleştirmiştir. Sonuçlar, engel dizilimlerinin çalkantı hareketini sınırlamada ve dalga yüksekliklerini azaltmada farklı derecelerde etkili olduğunu ortaya koymuştur.

4.2. Farklı Doluluk Oranları İçin Çalkantı Davranışının Lineer Teori ve Deneysel Yöntemle İncelenmesi

Çalkantı probleminin anlaşılması için kullanılan denklemlerin karmaşık yapısından dolayı, bazı kabuller yapılarak elde edilebilen analitik yöntemler, uygulamada büyük önem taşımaktadır. Çalkantı hareketini anlamak için kullanılan lineer teori yaklaşımı sayesinde çalkantı davranışı matematiksel olarak temsil edilebilmektedir. Sıvı ortamındaki dalgaların hareketini açıklamak için teorik yaklaşımlar içerisinde doğrusal (lineer) denklemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Lineer teori çalkantı hareketinin mekanizmasını basitleştirmek için çeşitli varsayımlar içermektedir. Bu varsayımlara göre çalkantı hareketi düşük uyarma genliklerinde ve düşük uyarma frekansları altında gerçekleşmektedir [137]. Buna ilaveten lineer teori uygulamasında sıvının viskozite, yoğunluk ve yüzey gerilimi gibi özellikleri dikkate alınmamaktadır.

Kısacası lineer teori çalkantı hareketinin matematiksel olarak açıklanmasında ve sıvı ortamının hareketini tahmin edilmesinde önemli bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Buna karşın, çalkantı hareketinin doğası gereği lineer olmayan etkiler barındırması, bu etkilerin de hesaba katılmasını gerektiren karmaşık modellerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Sonuç olarak, lineer teori, bu tez kapsamında da olduğu gibi çalkantı hareketlerinin daha genel bir perspektiften anlaşılması için kullanılabilmektedir. Bu yaklaşım, özellikle düşük uyarma genlikleri ve frekanslarına sahip çalkantı problemlerinin incelenmesi açısından önemli bir araç olmaktadır.

Çalışmanın bu aşamasında, deney tankı 6 mm uyarma genliğine sahip sinüzoidal harekete maruz bırakılmıştır. Bu hareketin etkisinde, tankın sol duvarına 5 cm mesafedeki bir noktada, çalkantı hareketi sonucu sıvı yüzeyinde meydana gelen seviye değişimi, lineer teori ve görüntü işleme yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir (Şekil 4.7). Çalışmalar Çizelge 4.1.'de verilen durumlar için gerçekleştirilmiştir.



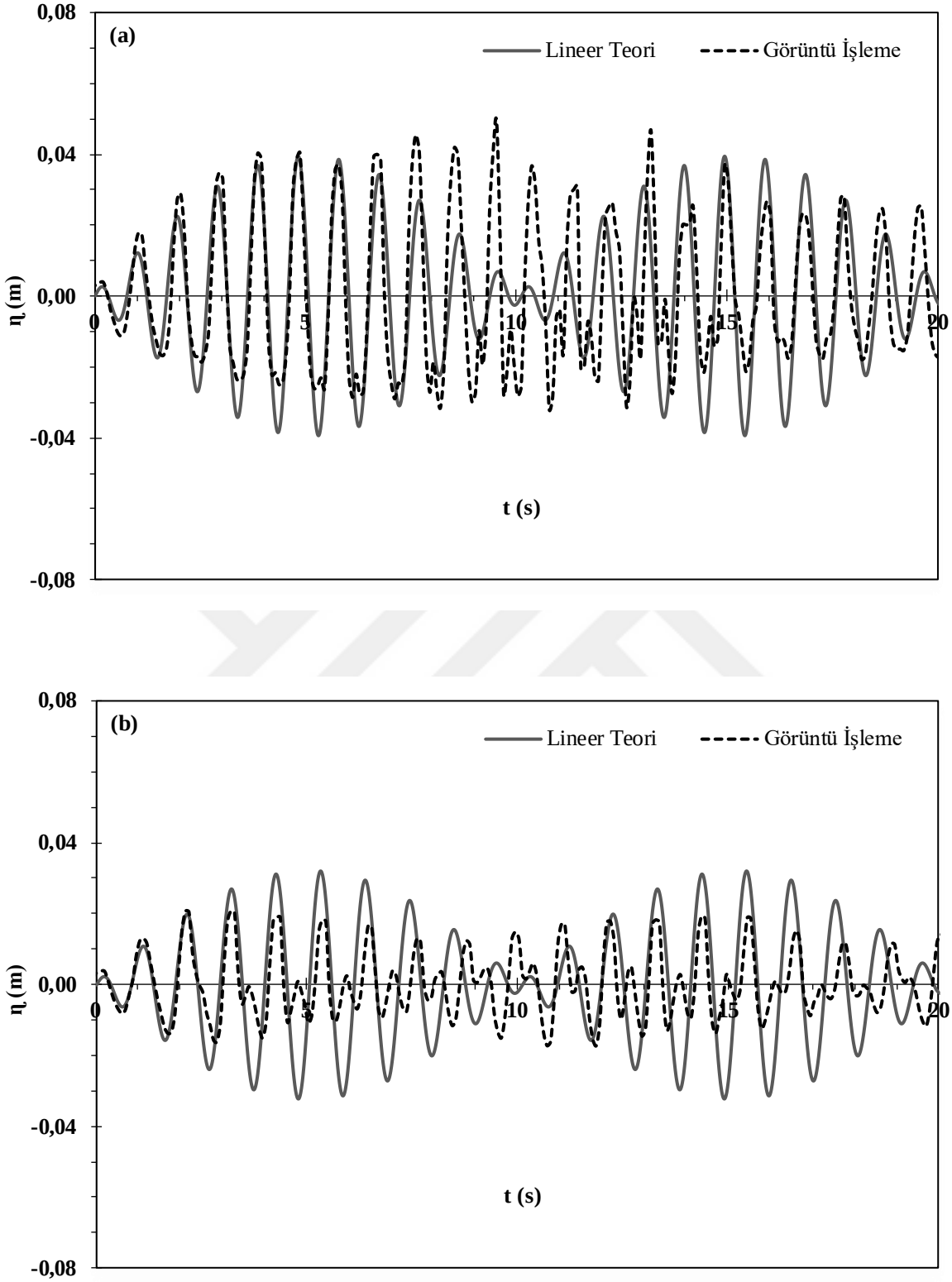
Şekil 4.7. P5 noktasının şematik gösterimi

Çizelge 4.1. Farklı doluluk oranları için sıvının doğal ve tankın uyarma frekansları

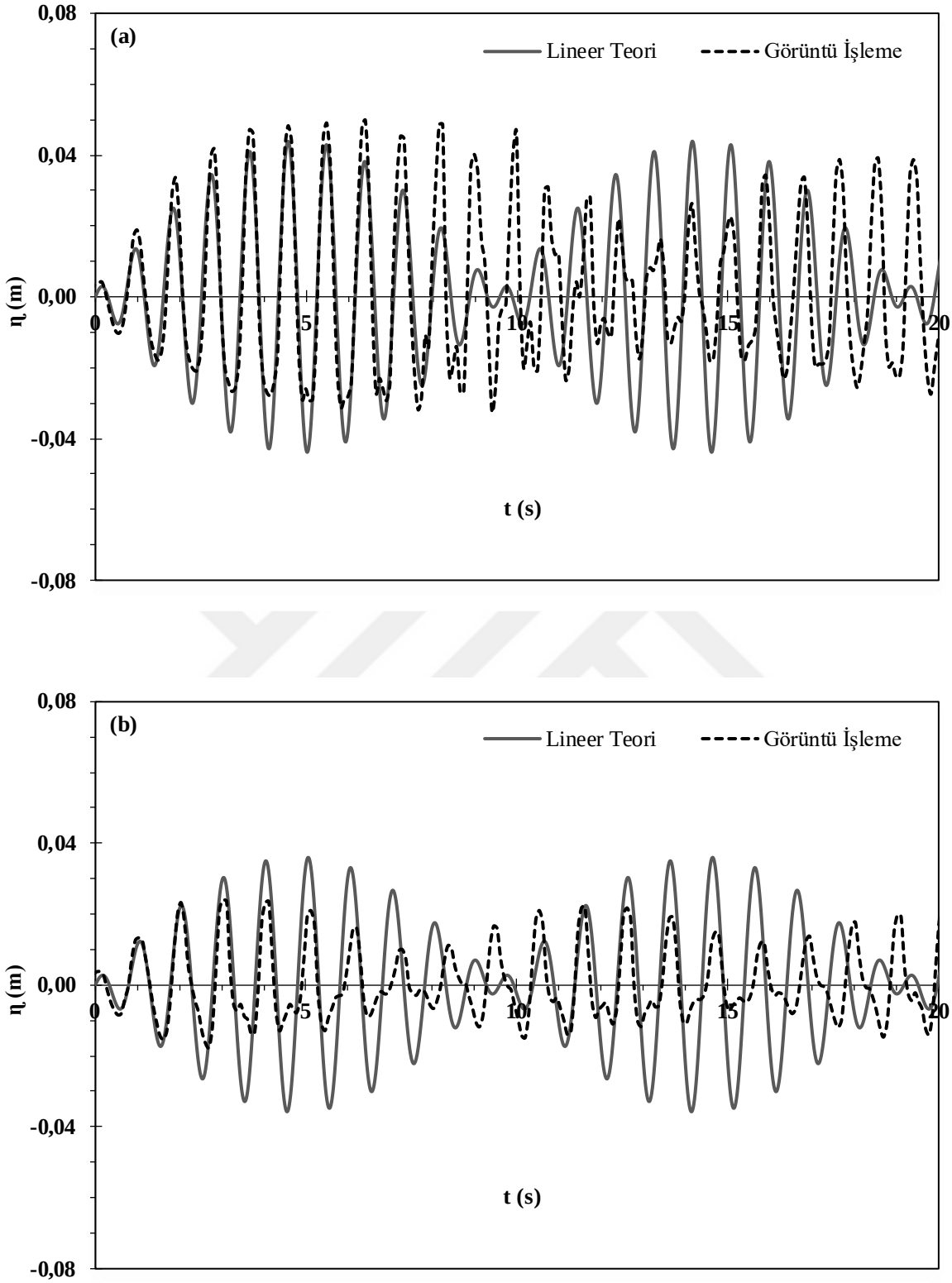
h (cm)	h/L	f_1 (hertz)	f_e
7	0,175	0,988	1,10 f_1
7	0,175	0,988	0,90 f_1
8	0,20	1,042	1,10 f_1
8	0,20	1,042	0,90 f_1
9	0,225	1,089	1,10 f_1
9	0,225	1,089	0,90 f_1
10	0,25	1,131	1,10 f_1
10	0,25	1,131	0,90 f_1

Çalışmalardan elde edilen sonuçlar Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de sunulmuştur. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 üzerinde yapılan incelemede, her iki yöntemin frekans tepkisi analiz edildiğinde, özellikle hareketin başlangıcında benzer sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Uyarma frekansının $f_e = 1{,}10\ f_1$ olduğu Şekil 4.8 (a) ve Şekil 4.9 (a) koşullarında pozitif dalga genliklerinin genellikle görüntü işleme sonuçlarında daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte bahsi geçen grafiklerde negatif dalga genliklerinde ise lineer teori ile elde edilen sonuçların yüksek çıktığı görülmektedir. Uyarma frekansının $f_e = 0{,}90\ f_1$ olduğu Şekil 4.8 (b) ve Şekil 4.9 (b) sonuçlarında ise dalga genliklerinin lineer teori sonuçlarında genellikle daha yüksek olduğu saptanmıştır. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 birlikte değerlendirildiğinde, çalkantı hareketinin başlangıcından belirli bir süre sonrası görüntü işleme sonuçları ile lineer teori arasında belirgin bir faz kayması olduğu anlaşılmaktadır. Bu, sistem dinamikleri bakımından lineer modelin bazı durumlarda çalkantı hareketini yakalamada sorun yaşadığına işaret etmektedir. Sonuçlar bu şartlar altında lineer teorinin eksik yönlerine dikkat çekmektedir.

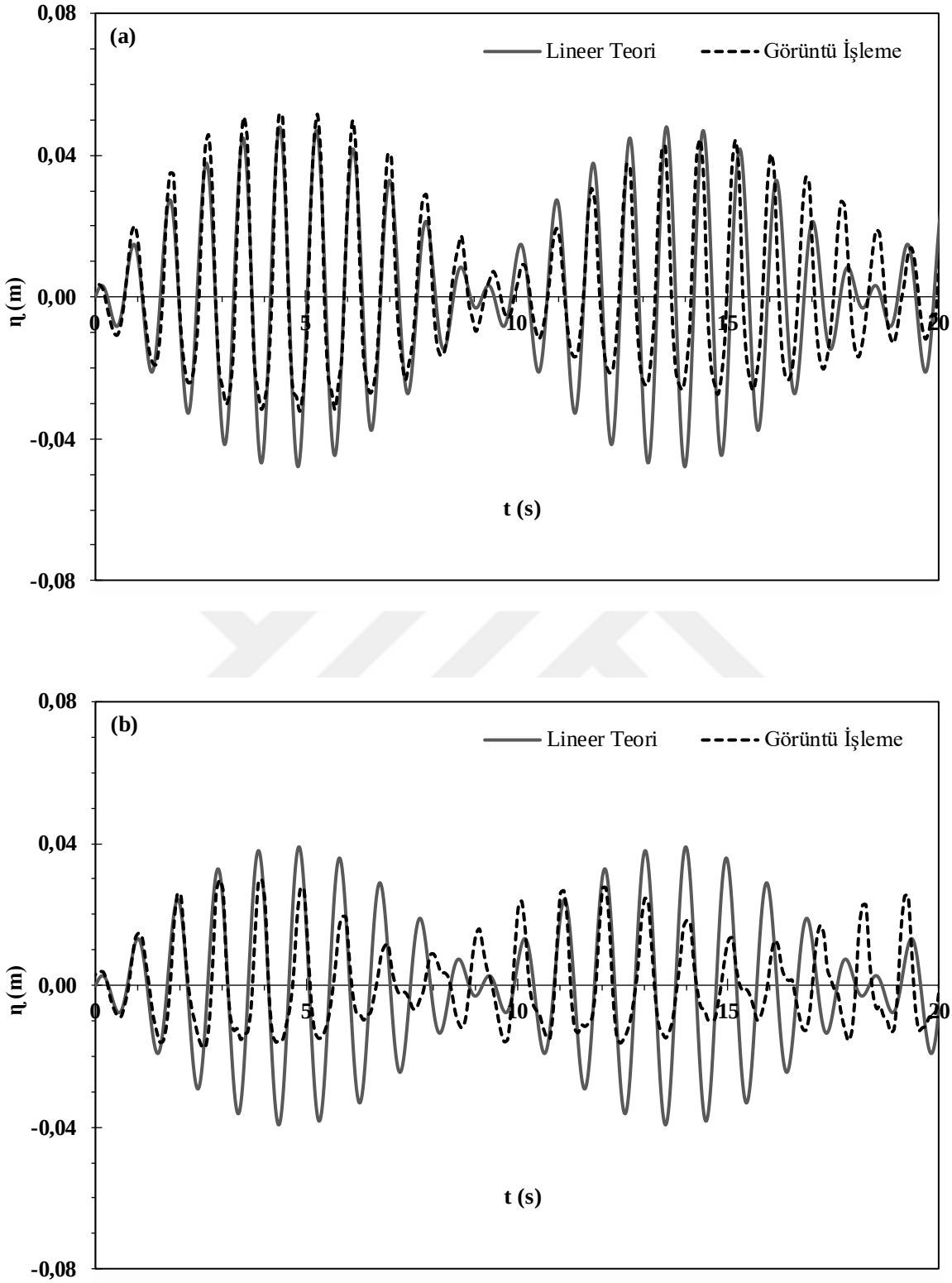
Doluluk oranının görece yüksek olduğu sonuçlar Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de sunulmuştur. Goudarzi ve diğerleri [126] ve Park ve diğerlerinin [138] çalışmalarına benzer şekilde, serbest sıvı yüzeyindeki çalkantı hareketi sonrası oluşan dalga yüksekliklerine dair, Şekil 4.10 (a) ve Şekil 4.11 (a)'da sunulan sonuçlar, iki farklı yöntemle elde edilen bulguların birbirleriyle oldukça uyumlu olduğunu göstermektedir. Çalkantı hareketinin başladığı andan itibaren, ilk 15 saniye süresince, tepe ve çukur dalga yüksekliklerinin her iki yöntemle de aynı zamanlarda oluştuğu görülmektedir. Bu süre zarfında, bazı ufak sapmaların dışında, dalga yüksekliklerinin zamanlaması iki yöntem arasında büyük ölçüde uyumlu olmaktadır. Tankın uyarma frekansının birinci mod doğal frekans değerinden düşük olduğu Şekil 4.10 (b) ve Şekil 4.11 (b) sonuçlarında ise yer yer uyumsuzluklar görünse de, sonuçların genel hatlarıyla iyi bir uyum yakaladığı söylenebilmektedir. Sonuç olarak özellikle $f_e/f_1 = 1{,}10$ uyarma frekansında doluluk oranındaki artış, lineer teori ve görüntü işleme sonuçlarını birbirlerine yaklaştırmaktadır. Bu durum, doluluk oranı arttıkça lineer teorinin daha doğru sonuç verdiğini göstermektedir. Kısacası, Lineer Teori'nin belirli koşullar altında sıvı yüzeyindeki dinamik hareketleri tahmin etmede başarılı olduğu söylenebilir.



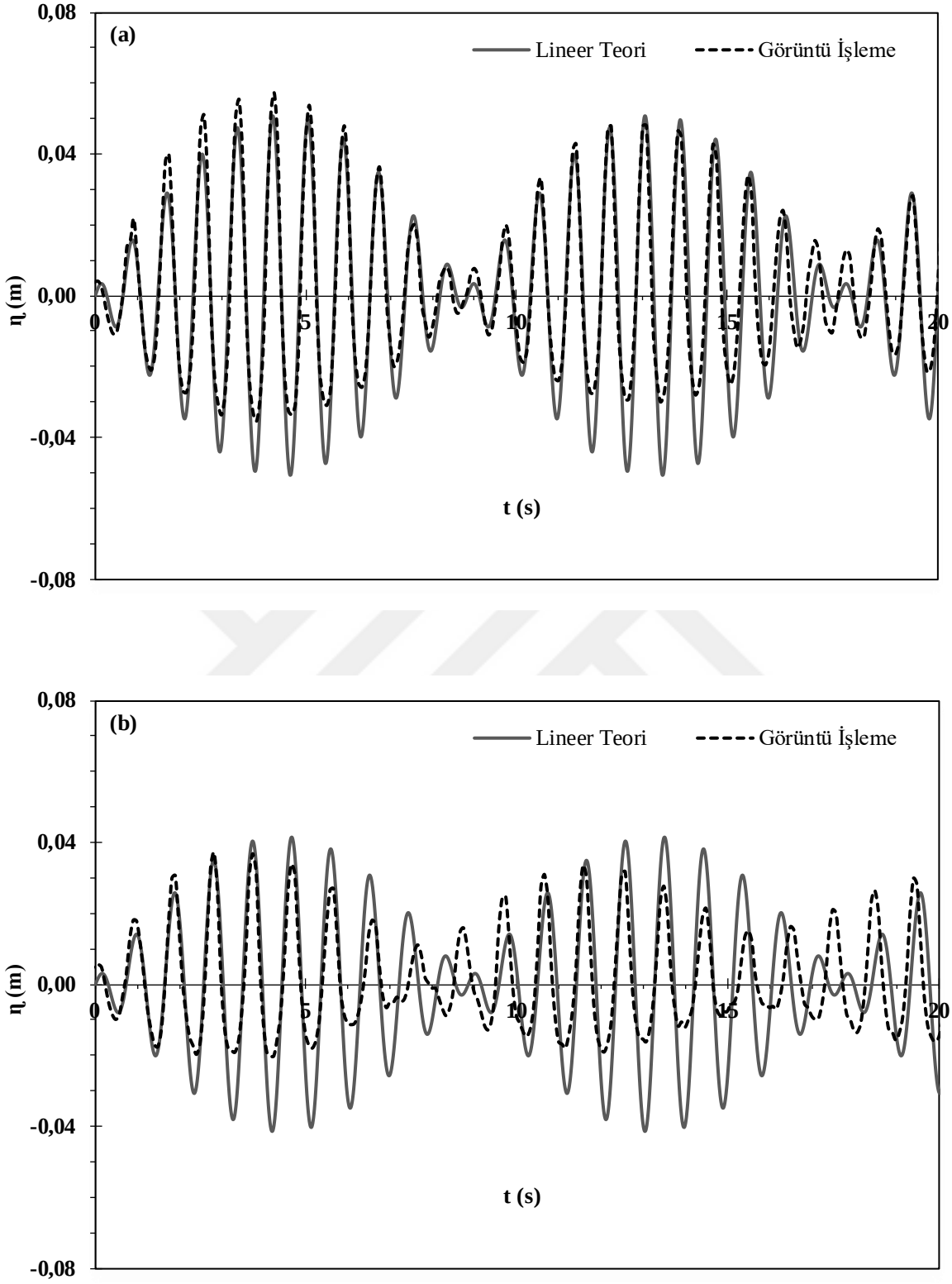
Şekil 4.8. h/L = 0,175 ve A = 6 mm uyarma genliğinde (a) f_e/f_1 = 1,10 ve; (b) f_e/f_1 = 0,90 uyarma frekansları için tank duvarına 5 cm uzaklıktaki sıvı yüzeyi değişimi



Şekil 4.9. h/L = 0,20 ve A = 6 mm uyarma genliğinde (a) f_e/f_1 = 1,10 ve; (b) f_e/f_1 = 0,90 uyarma frekansları için tank duvarına 5 cm uzaklıktaki sıvı yüzeyi değişimi



Şekil 4.10. h/L = 0,225 ve A = 6 mm uyarma genliğinde (a) f_e/f_1 = 1,10 ve; (b) f_e/f_1 = 0,90 uyarma frekansları için tank duvarına 5 cm uzaklıktaki sıvı yüzeyi değişimi



Şekil 4.11. h/L = 0,25 ve A = 6 mm uyarma genliğinde (a) f_e/f_1 = 1,10 ve; (b) f_e/f_1 = 0,90 uyarma frekansları için tank duvarına 5 cm uzaklıktaki sıvı yüzeyi değişimi

4.3. Uyarma Genliğinin Çalkantı Davranışına Etkisinin Lineer Teori ve Deneysel Yöntem ile İncelenmesi

Sıvı çalkantısının genliğinin, depolanan sıvının doğal frekansının yanı sıra tankın uyarma genliğine ve frekansına bağlı olduğu bilinmektedir [126]. Bu bağlamda çalışmanın bu aşamasında, deney tankını uyarma genliğinin çalkantı davranışına etkisi lineer teori ve deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Bu sayede, kısmen dolu tanklardaki çalkantı hareketinin, farklı uyarma genliklerine tepkisi ve bu genliklerin çalkantı üzerindeki etkileri daha ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmalar doluluk oranının (h/L) 0,25; uyarma genliklerinin ise 5 mm; 8,5 mm ve 12 mm olduğu durumlar için gerçekleştirilmiştir. Uyarma frekansı olarak 1,30 f_1 seçilmiştir.

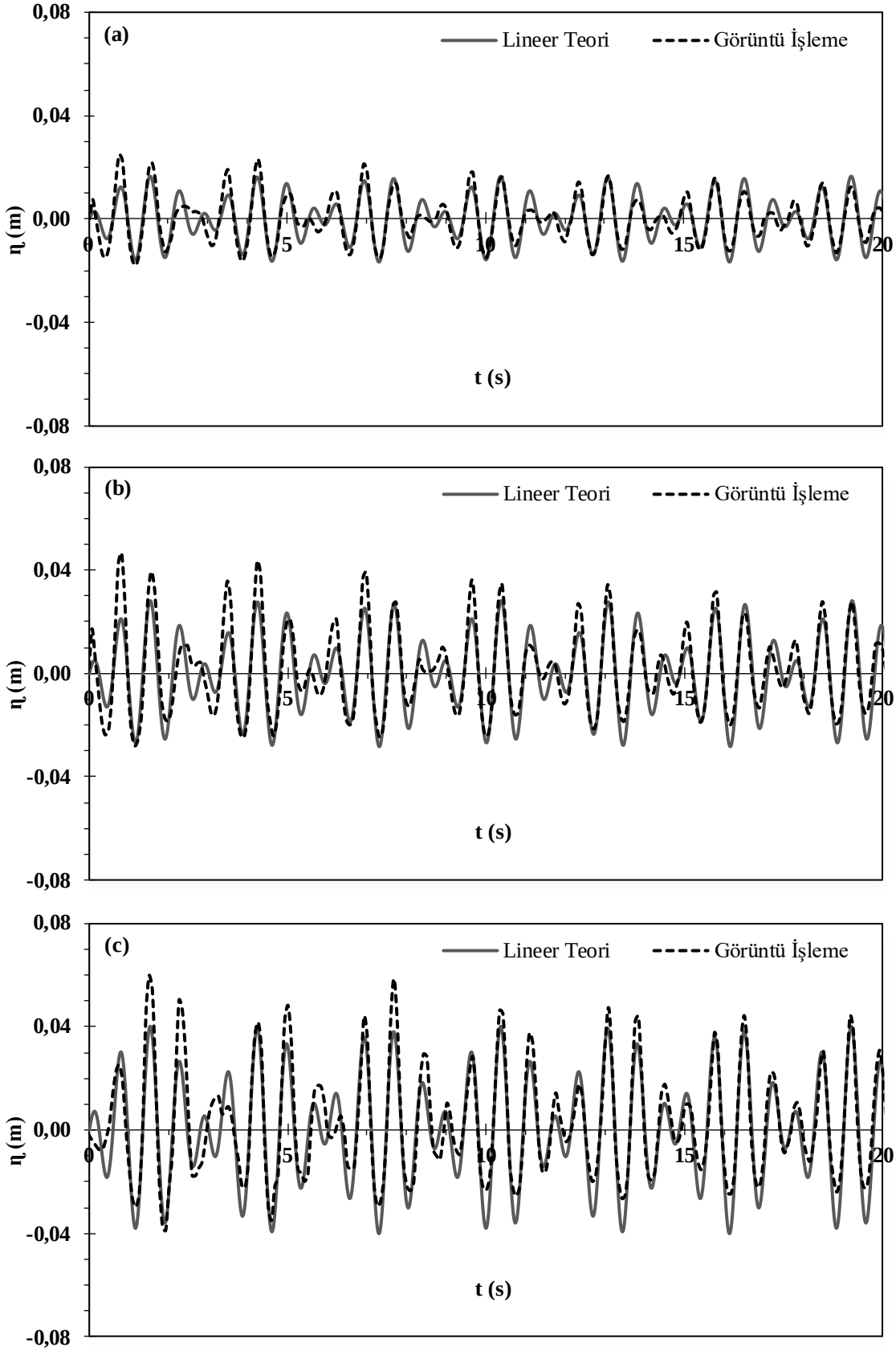
Çalkantı hareketlerini incelemek için referans alınan nokta, tankın sol duvarından 5 cm uzaklıkta belirlenmiştir (Şekil 4.7). Çizelge 4.2'de, yukarıda açıklanan tüm deney koşulları tablo halinde sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Uyarma genliği ve frekansına bağlı deney parametreleri

Durum	A (mm)	h (cm)	h/L	f_1(hertz)	f_e
1	5	10	0,25	1,13	1,30 f_1
2	8,5	10	0,25	1,13	1,30 f_1
3	12	10	0,25	1,13	1,30 f_1

Yukarıda bahsi geçen durumlar için elde edilen sonuçlar Şekil 4.12'de verilmiştir. Araştırma bulguları incelendiğinde, uyarma genliğinin artırılmasının sıvı yüzeyindeki seviye değişimini artırdığı bununla birlikte lineer teori ile görüntü işleme teknikleri ile elde edilen verilerin yüksek oranda uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte sonuçlar arasındaki uyumun uyarma genliği arttıkça bir miktar azaldığı da görülmektedir. Bu durum, uyarma genliği arttıkça lineer teorinin geçerliliğini yitireceğine ve daha karmaşık bir modelleme yaklaşımına ihtiyaç duyulabileceğine işaret etmektedir. Özellikle yüksek genliklere sahip uyarma hareketlerinde lineer olmayan etkilerin daha belirgin hale geldiği ve dalga dinamiğinin daha karmaşık hale geldiği anlaşılmaktadır. Bu bulgular, çalkantı analizinde uyarma genliğinin önemli bir parametre olduğunu ve deneysel verilerle teorik modellerin karşılaştırılmasının, modelin doğruluğunu ve geçerliliğini değerlendirmede kritik olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak lineer analitik yöntemler düşük uyarma frekanslarında ve genliklerinde elde ettikleri başarı sayesinde sayısal ve deneysel yöntemlerin doğrulanmasında oldukça önemli bir yöntem olarak karşımıza çıkmasına karşın yüksek uyarma frekansları ve genliklerinde istenilen başarıyı ortaya koyamamaktadır. Son zamanlarda yüksek frekans ve genliklere sahip uyarma hareketleri için modifiye edilmiş lineer teori yöntemleri kullanılmıştır [138,139]. Bu tez çalışmasında lineer teori yönteminin geçerli olduğu uyarma frekansı ve genlik değerleri araştırıldığından modifiye edilmiş lineer teoriye dayanan analitik çözümler ile kıyaslama yapılmamıştır.



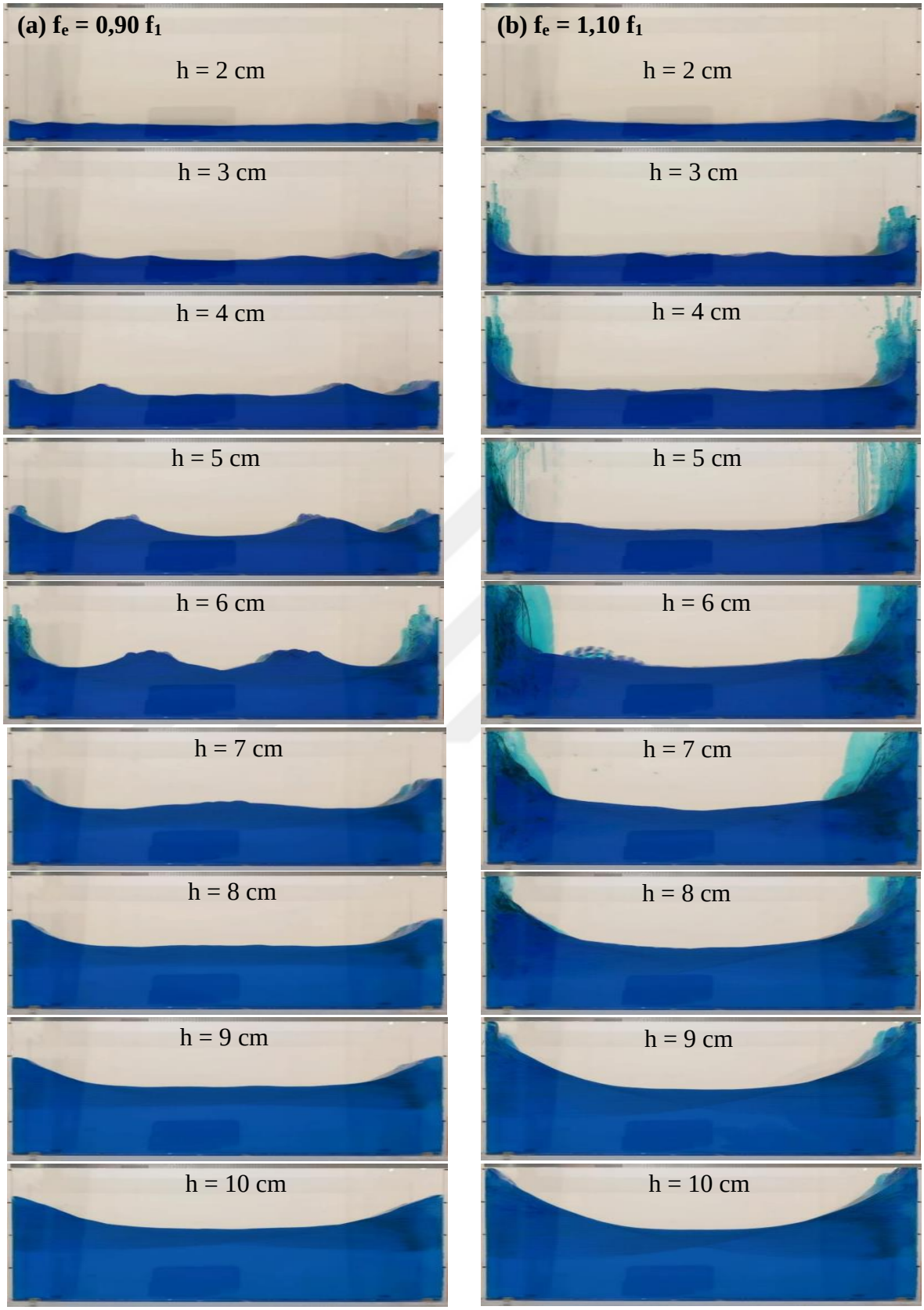
Şekil 4.12. h/L = 0,25 ve f_e = 1,30 f_1 uyarma frekansında (a) A = 5 mm; (b) A = 8,5 mm ve (c) A = 12 mm uyarma genlikleri için tank duvarına 5 cm uzaklıktaki sıvı yüzeyi değişimi

4.4. Çalkantı Hareketinde Maksimum Su Seviyelerinin Görüntü İşleme Yöntemi ile Belirlenmesi

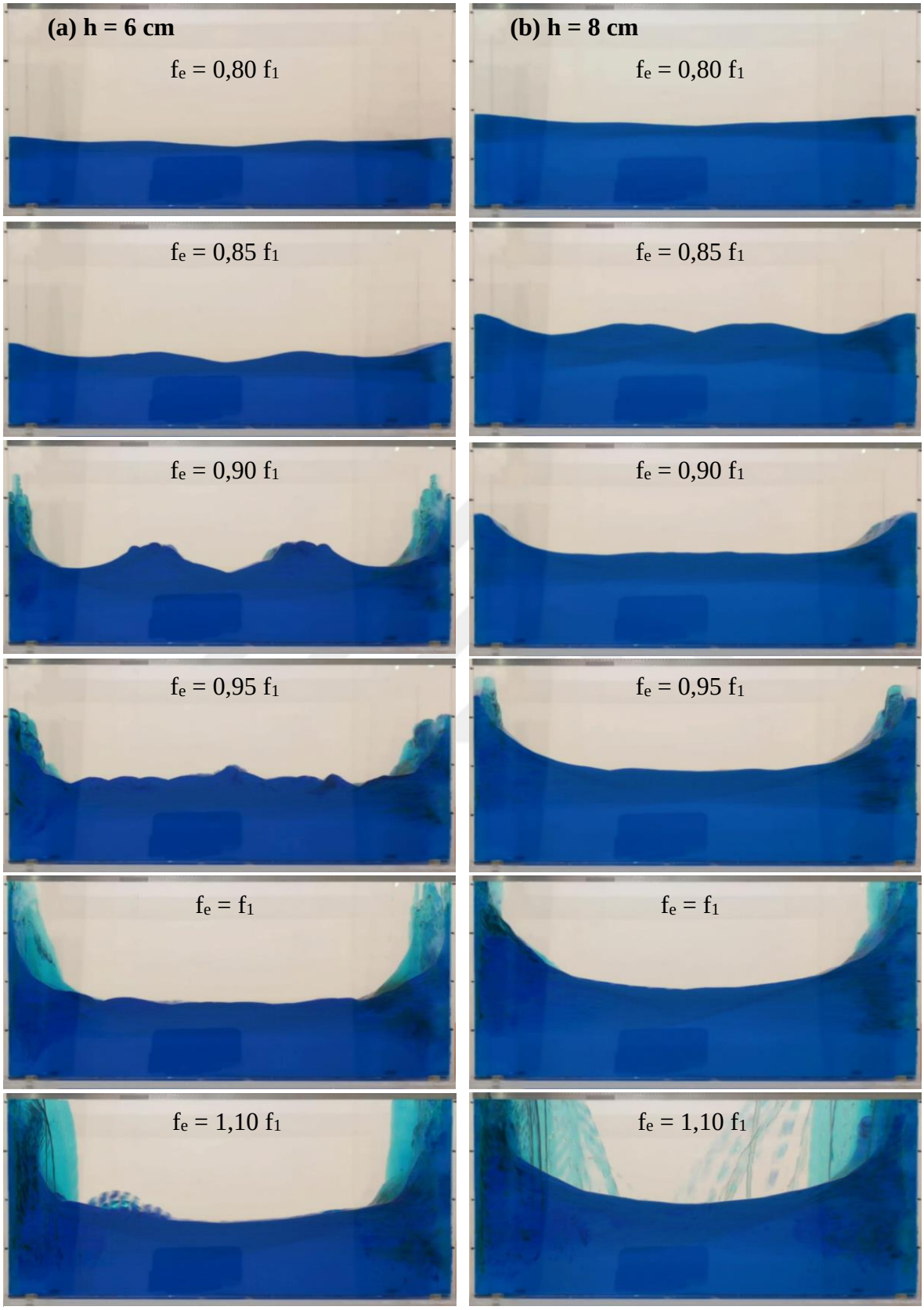
Şekil 4.13 (a) ve Şekil 4.13 (b)'de sırasıyla sıvının birinci mod doğal frekansının %10 altında ve üzerinde uyarma frekanslarında, 2 cm'den 10 cm'ye kadar değişen sıvı derinliklerinde çalkantı hareketi neticesinde sıvı yüzeyinde oluşan MAKS değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.13 (a)'da $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansında, sıvının yüzeyinde oluşan dalgaların enerji seviyesinin ve yüksekliklerinin görece düşük olduğu anlaşılmaktadır. Dalgaların daha yatay ve geniş formda olması, sıvının nispeten daha stabil bir davranış sergilediğini ve bu frekansta davranışın kontrol edilebilir ölçüde olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan, uyarma frekansının $f_e = 1{,}10\ f_1$ olduğu Şekil 4.13 (b)'de ise çalkantı davranışının MAKS sonuçları açısından daha büyük dalga yüksekliklerine ve daha belirgin rezonans etkilere neden olduğu anlaşılmaktadır. Başka bir deyişle sıvının daha volatil (oynak) bir hareket sergilediği ve dalga genliklerinin büyüklüğünde önemli bir artış olduğu açıkça görülmektedir.

Şekil 4.14'te, çalkantı hareketi sonucunda tüm kesit boyunca oluşan MAKS verilerinin farklı uyarma frekanslarına göre nasıl değiştiği iki farklı derinlikte (a) h = 6 cm ve (b) h = 8 cm için gösterilmiştir. Bu çalışma, rezonans frekansının altında, rezonans frekansta ve rezonans frekansının üzerindeki durumları kapsayacak şekilde, uyarma frekansının $0{,}80\ f_1$'den $1{,}10\ f_1$'e kadar sistemli bir şekilde artırılmasıyla yürütülen deney serilerini içermektedir. Bu çalışmanın amacı, farklı frekans seviyelerinde çalkantı hareketinin özelliklerini belirleyerek, çalkantı davranışının dinamiklerini ayrıntılı bir biçimde çözümlemektir. Şekil 4.14 (a) ve Şekil 4.14 (b)'de rezonans duruma yaklaştıkça, yani uyarma frekansı birinci mod doğal frekans (f_1) değerine yaklaştıkça dalga yüksekliklerinde önemli derecelerde artış gözlenmektedir. Bu durum uyarma frekansı rezonans frekansına yaklaştıkça sistemin enerjiyi sıvıya daha etkin bir şekilde aktardığını ve bu sayede sıvının daha büyük dalgalar oluşturduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, $f_e = f_1$ veya bu değere yakın frekans değerlerinde uyarma frekanslarının deney tankına uygulanması çalkantı hareketinin analizi için özellikle ilgi çekicidir. Bunun nedeni bu frekans aralıklarının, sıvının dinamik tepkisinin en yoğun olduğu ve mühendislik uygulamalarında dikkate alınması gereken kritik noktaları temsil etmesidir.

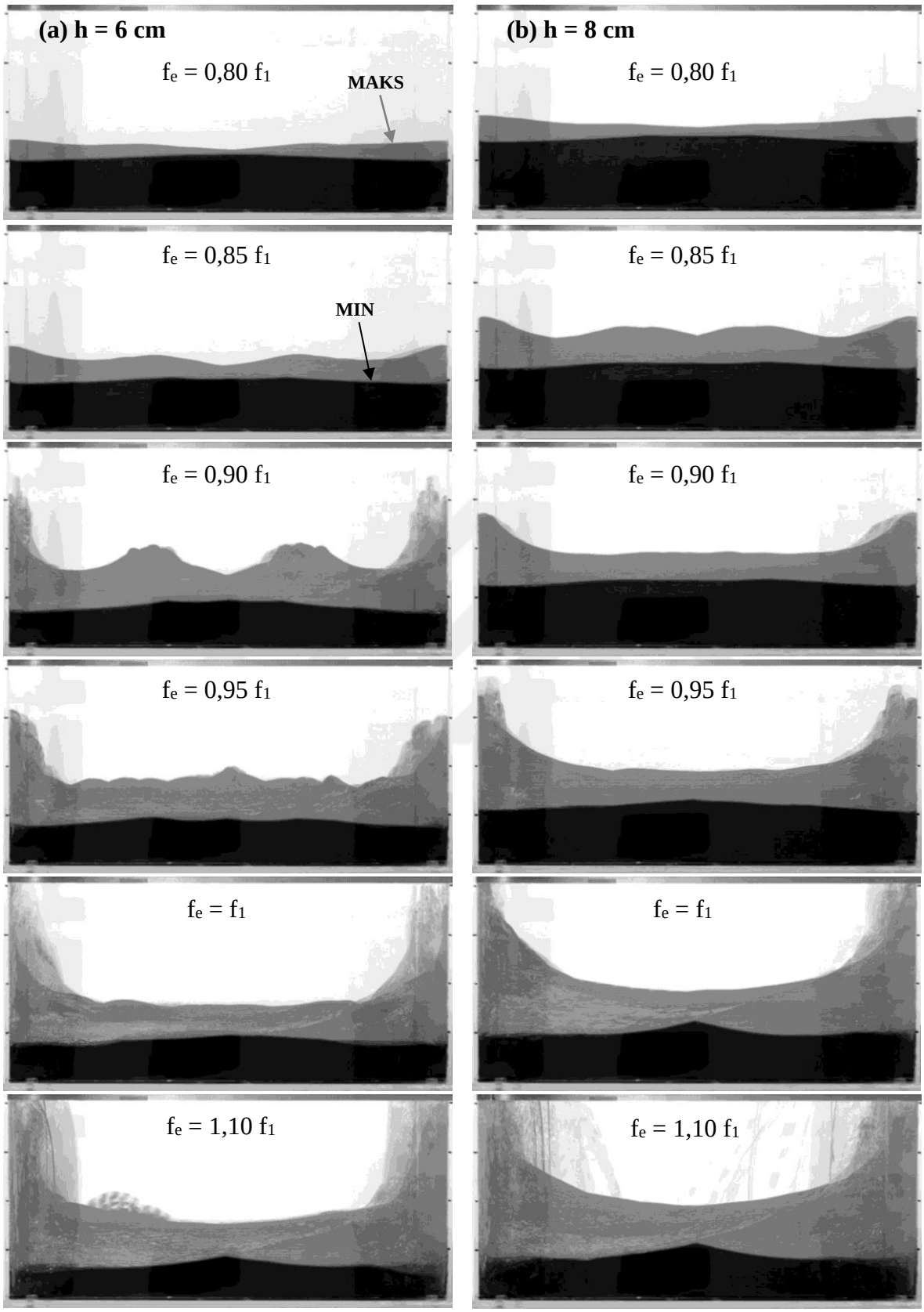
Şekil 4.15 çalkantı hareketinin gerçekleştiği süre boyunca sıvının MAKS-MIN davranışlarını bir arada göstermektedir. Grafiklerde, açık renkli alanların tepe noktaları sıvının her bir kesitte ulaştığı MAKS değerlerini temsil ederken, koyu siyah alanların tepe noktaları ise MIN değerlerini temsil etmektedir. Bu temsil, sıvının hareket aralığının bir genlik ölçüsünü verirken, çalkantının şiddetini belirleyebilmek için kritik bir gösterge olarak düşünülebilir. Şekil 4.15 (a) ve Şekil 4.15 (b) birlikte değerlendirildiğinde 0,95 f_1; f_1 ve 1,10 f_1 uyarma frekanslarında, MAKS-MIN arasındaki genişleyen alan, bu frekans değerlerinde çalkantının daha agresif bir davranış sergilediğini ve su seviyesinin oynaklığını göstermektedir.



Şekil 4.13. Çalkantı hareketi sonucunda sıvı yüzeyinde oluşan maksimum dalga yüksekliklerinin (MAKS) sıvı derinliklerine göre dağılımı (a) f_e = 0,90 f_1 ve (b) f_e = 1,10 f_1



Şekil 4.14. Çalkantı hareketi sonucunda sıvı yüzeyinde oluşan maksimum dalga yüksekliklerinin (MAKS) uyarma frekanslarına göre dağılımı (a) h = 6 cm ve (b) h = 8 cm



Şekil 4.15. Çalkantı hareketi sonucunda sıvı yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum dalga yüksekliklerinin (MAKS-MIN) uyarma frekanslarına göre dağılımı (a) h = 6 cm ve (b) h = 8 cm

4.5. Çalkantı Davranışları Üzerinde Mod Frekanslarının Etkisinin Sayısal Analizi

4.5.1. Mod frekansları ve çalkantı davranışının değerlendirilmesi

Bu çalışmanın ilgili bölümünde, deney tankı yatay yönde belirli frekans aralıkları altında uyarılmıştır. Bu uyarma frekansları, sıvının rezonans frekanslarının ilk yedi modunu içerecek şekilde seçilmiştir. Üç farklı uyarma genliği ve 15 farklı uyarma frekansı kullanılarak sıvı tankı dinamiklerinin sayısal analizleri yürütülmüştür. Uyarma frekansları, sıvının birinci mod doğal frekansı olan f_1'e oranlanarak f_e/f_1 değerleri 0,20'den başlayıp 3,27'ye kadar sıralanmıştır. Deneyler, tankın doluluk oranı h/L = 0,25 iken gerçekleştirilmiş ve hareket genliği, 1 mm, 5 mm ve 10 mm değerlerinde ayarlanarak deneyler tekrarlanmıştır. Belirtilen şartlar altında, deney tankının sol duvarına 1 cm uzaklıktaki noktada çalkantı hareketi sonrası sıvı yüzeyindeki değişimler incelenmiştir. Bu inceleme sırasında elde edilen maksimum dalga yükseklikleri FLOW-3D HYDRO yazılımı ile sayısal olarak ölçülmüş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Sıvının doğal mod frekansları, Eş. 3.43 ve Eş. 3.44 kullanılarak hesaplanmış ve bu frekanslar Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Deneylerin gerçekleştirildiği koşullar ise Çizelge 4.4'te belirtilmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı mod sayıları için sıvının doğal frekans değerleri

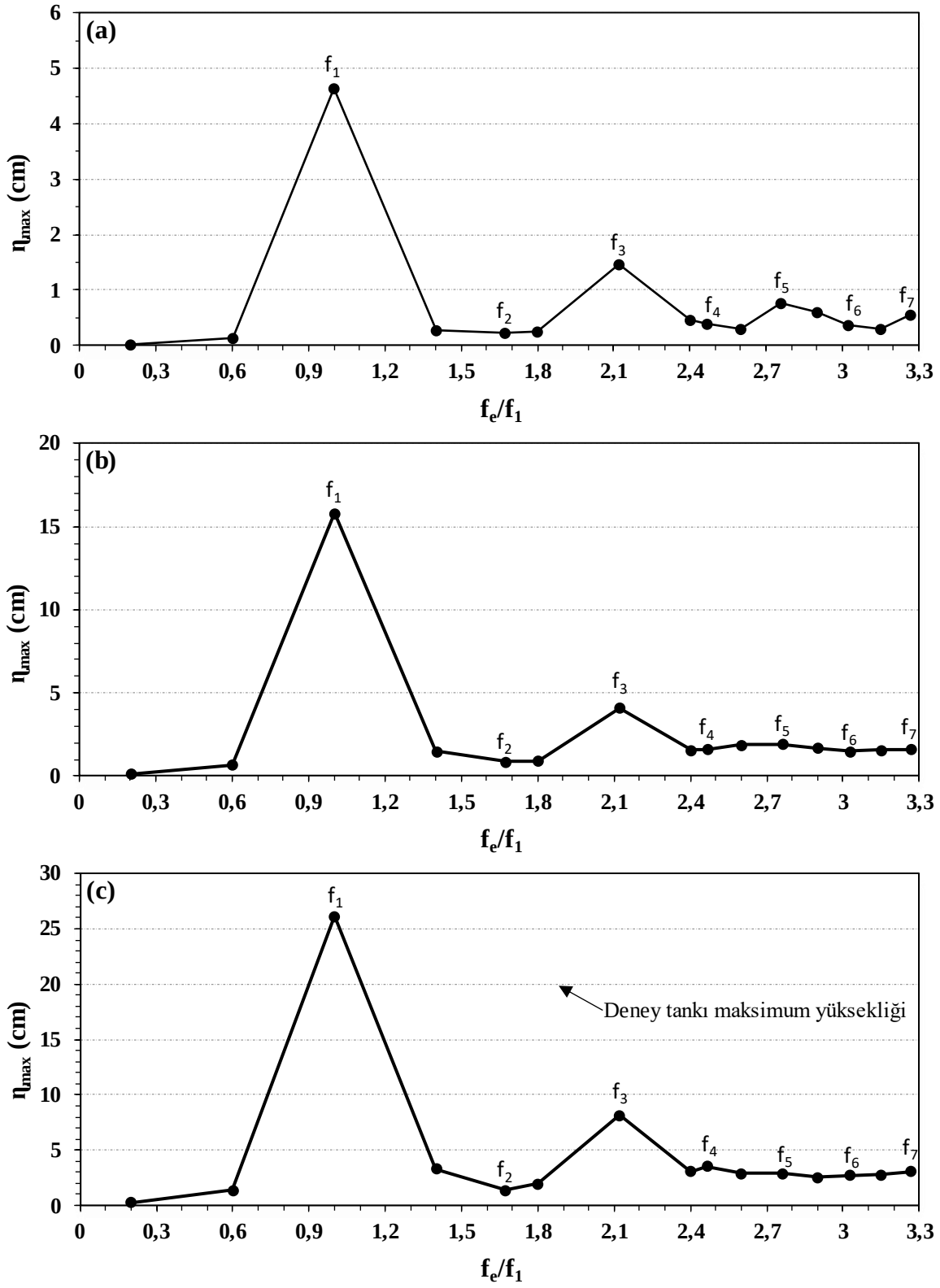
Mod sayısı	h (cm)	w_n (rad/sn)	f_n (hertz)
1	10	7,1083	1,1313
2	10	11,8882	1,8921
3	10	15,0674	2,3981
4	10	17,5226	2,7888
5	10	19,6199	3,1226
6	10	21,4991	3,4217
7	10	23,2232	3,6961

Çizelge 4.4. Çalkantı hareketinin incelenmesinde değerlendirilen koşullar

Durum	A (mm)	h/L	f_e (hertz)	f_e/f_1
1	1	0,25	0,226-3,696	0,20-3,267
2	5	0,25	0,226-3,696	0,20-3,267
3	10	0,25	0,226-3,696	0,20-3,267

Şekil 4.16'da verilen analiz sonuçları göz önünde bulundurulduğunda çalkantı hareketinin en yoğun olduğu durumun sistemin birinci mod doğal frekansında (f_1) olduğu tespit edilmiştir. Bu aynı zamanda doğal frekans modları arasında en düşük değere sahip olan moddur. Grafikler incelendiğinde f_e/f_1 değerinin 0,20'den 0,60'a yükseldikçe dalga yüksekliklerinin arttığı ve f_e/f_1 değeri 1 olduğunda serbest sıvı yüzeyinin maksimum dalga yüksekliğine ulaştığı görülmektedir. Deney tankı birinci mod doğal frekans değerine eşit bir uyarma frekansı ile harekete geçirildiğinde, uyarma genliğine bağlı olarak kaydedilen maksimum dalga yükseklikleri farklılık göstermiştir. Uyarma genliği 1 mm olduğunda dalga yüksekliği 4,65 cm, 5 mm olduğunda 15,81 cm ve 10 mm olduğunda ise 26,11 cm olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler, maksimum dalga yüksekliğinin, uyarma genliğinin artışıyla birlikte arttığını göstermektedir. Bununla birlikte, Şekil 4.16 (c)'de görüldüğü gibi 10 mm'lik uyarma genliğinde, deney tankında sıvı kaybına rastlanmıştır. Bu bulgu, deney tankında uygulanan 10 mm'lik uyarma genliği ve tankın birinci mod doğal frekansına eşit olan uyarma frekansının, sıvı taşma riskini önlemek için yetersiz olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, bahsedilen uyarma genliği ve frekans kombinasyonunda, tankın tasarımının revize edilmesi gerekmektedir.

Liu ve diğerlerinin [109] çalışmalarına paralel olarak, tankın birinci mod doğal frekansına eşit olan uyarma frekansında gözlemlenen agresif çalkantı davranışlarının yanı sıra, üçüncü mod doğal frekansına eşit uyarma frekansındaki durumlar da önemli bir ikinci mod olarak dikkate alınmalıdır. Bu modun etkisi, birinci mod doğal frekansa kıyasla daha düşük olmasına karşın diğer modlara nazaran dikkate alınması gereken çalkantı hareketlerine neden olmuştur. Diğer doğal frekans modları farklı uyarma genliklerinde farklı davranışlar sergilemiştir. Sonuç olarak çalkantı hareketinin anlaşılması ve olumsuz etkilerinin minimize edilmesi için birinci mod doğal frekans değerinin öncelikli olarak dikkate alınması gerekmektedir. İkinci olarak dikkate alınması gereken ise üçüncü mod doğal frekans değeridir. Bunların dışında kalan doğal frekans modlarının önemi uyarma genliği, tankın doluluk oranı ve uyarma frekansı gibi farklı parametreler altında değişkenlik göstermektedir.



Şekil 4.16. h/L = 0,25 ve f_e/f_1 oranının 0,20 - 3,267 aralığında olduğu uyarma frekanslarında (a) A = 1 mm (b) A = 5 mm ve (c) A = 10 mm uyarma genlikleri için serbest sıvı yüzeyinde meydana gelen maksimum dalga yükseklikleri

4.5.2. Baskın mod frekanslarında çalkantı davranışının görsel temsilleri

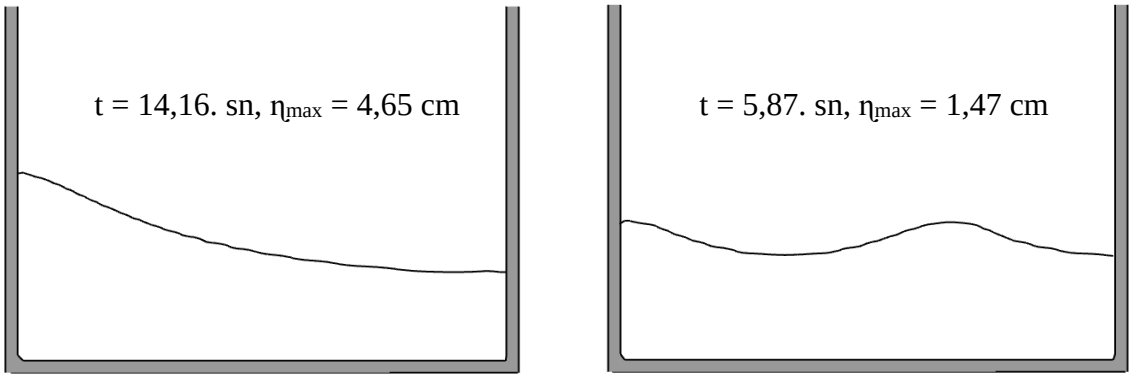
Çalışmanın bu aşamasında, baskın mod frekanslarındaki çalkantı davranışı, FLOW - 3D HYDRO yazılımı sonuçlarına dayanarak görselleştirilmiştir. İncelemeler her bir genlik değeri için çalkantının en agresif davranış gösterdiği birinci mod doğal frekans (f_1) ve üçüncü mod doğal frekans (f_3) değerleri için yapılacaktır. Diğer mod frekanslarında gözlenen etki, birinci ve üçüncü moda kıyasla önemsiz kaldığından çalışmalarda dikkate alınmamıştır.

Doluluk oranının (h/L) 0,25 olduğu sıvı tankında, uyarma genliği A = 1 mm, A = 5 mm ve A = 10 mm olacak şekilde sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde, uyarma frekansları sıvının birinci ve üçüncü mod doğal frekanslarına eşit olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu koşullar altında deney tankının sol duvarına 1 cm uzaklıktaki konum için maksimum dalga yükseklikleri ve oluşma anları Şekil 4.17'de verilmiştir.

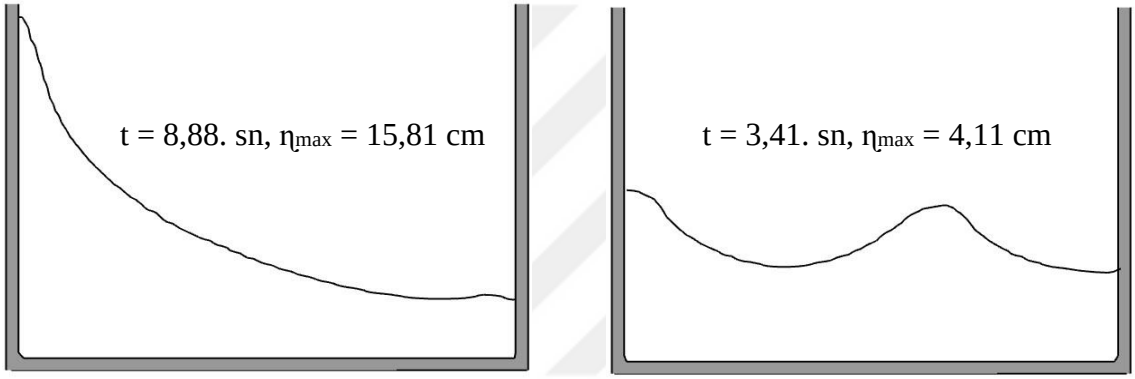
Şekil 4.17 (a)'da uyarma frekansının sıvının birinci mod doğal frekansında olması durumunda ($f_e = f_1$) görülen en büyük dalga yüksekliği t = 14,16. saniyede meydana gelmiş ve 4,65 cm olarak ölçülmüştür. Tankı uyarma frekansının sıvının üçüncü mod doğal frekansıyla eşleştiği ($f_e = f_3$) durumda ise sıvı yüzeyi çift tepe şeklinde oluşmuş ve en büyük dalga yüksekliği t = 5,87. saniyede 1,47 cm büyüklüğünde kaydedilmiştir.

Şekil 4.17 (b) tankı uyarma frekansının sıvının ilk mod doğal frekansına denk geldiği durumda en büyük dalga yüksekliği t = 8,88. saniyede 15,81 cm büyüklüğünde kaydedilmiştir. Uyarma frekansının sıvının üçüncü mod doğal frekansına eşit olduğu durumda ise maksimum dalga yüksekliği t = 3,41. saniyede ve 4,11 cm yüksekliğinde kaydedilmiştir.

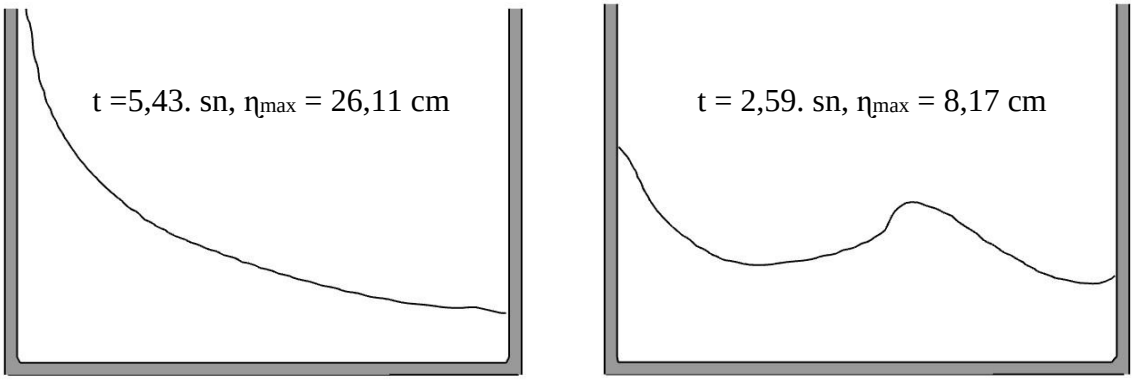
Şekil 4.17 (c)'de ise uyarma frekansının birinci mod doğal frekansına eşit olduğu durumda, deney tankında ilk olarak 5,43. saniyede sıvı kayıpları yaşanırken tankın tasarımı mevcut doluluk oranı, uyarma genliği ve frekansı için uygun olmayacaktır. Uyarma frekansının üçüncü mod doğal frekansa eşit olduğu durumda, sıvı yüzeyindeki maksimum dalga yüksekliği, t = 2,59. saniyede 8,17 cm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, artan uyarma genliği ve frekansının sıvı yüzeyindeki maksimum dalga yüksekliğini artırdığını göstermektedir.



(a)



(b)

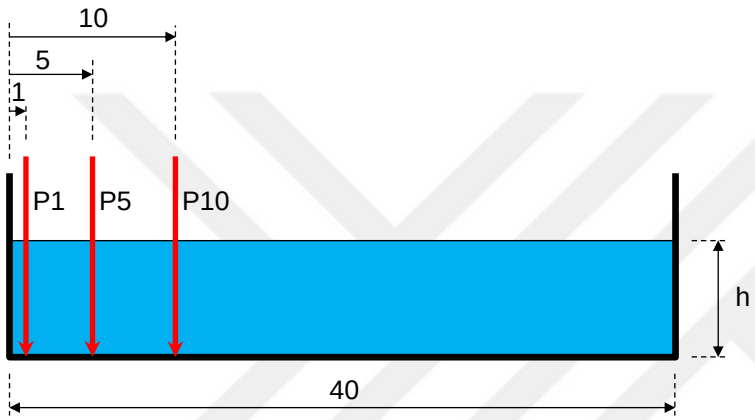


(c)

Şekil 4.17. h/L = 0,25 (a) A = 1 mm, $f_e = f_1$ ve $f_e = f_3$ (b) A = 5 mm, $f_e = f_1$ ve $f_e = f_3$ ve (c) A = 10 mm, $f_e = f_1$ ve $f_e = f_3$ uyarma genliği ve frekans koşullarında tankın sol duvarına 1 cm uzaklıkta sıvının serbest yüzeyinde meydana gelen maksimum dalga yükseklikleri ve oluşma anları

4.6. Çalkantı Analizlerinde Görüntü İşleme ve Sayısal Yöntemlerin Karşılaştırmalı İncelenmesi

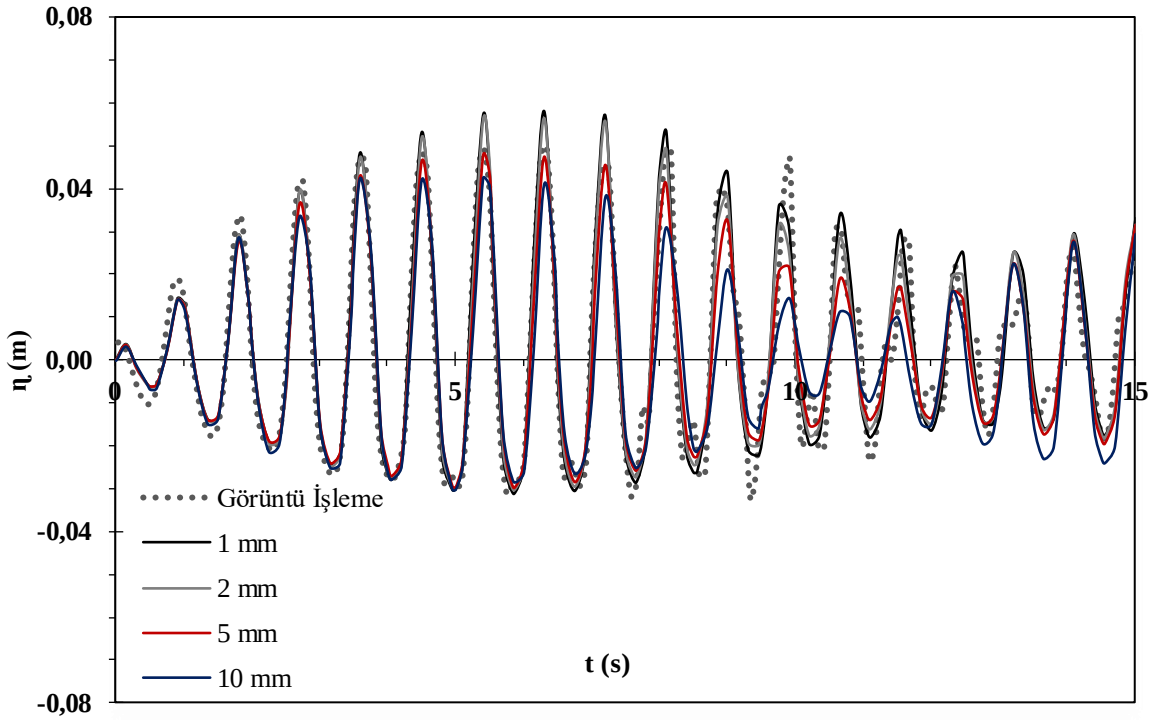
Çalışmanın bu bölümünde, çalkantı hareketlerinin sayısal analizi, Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS-Reynolds Averaged Navier-Stokes) denklemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalkantı davranışının sayısal analizleri FLOW-3D HYDRO yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 4.18'de deney tankı ve ölçüm alınan üç farklı noktanın şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.18. Deney düzeneğinin tasarımı ve su seviyesinin zaman içindeki değişimlerinin tespit edildiği ölçüm noktaları

Şekil 4.18'de gösterildiği gibi, deney tankı içindeki sıvının çalkantı hareketlerini incelemek için P1, P5 ve P10 olarak belirlenen ölçüm noktaları seçilmiştir. Noktalardan biri (P1) çalkantının en yoğun yaşandığı tank duvarına yakın, diğerleri (P5 ve P10) ise çalkantı yoğunluğunun azaldığı daha uzak bölgelerde yer almaktadır. Her bir noktadaki su seviyelerinin zamana bağlı değişimleri deneysel ve sayısal yöntemler ile karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Sayısal analizlerde, deney setinin fiziksel ölçülerine uygun olarak, Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RONS) denklemleri için 0,50 metre genişlik ve 0,40 metre yükseklik ölçülerine sahip bir hesaplama alanı tasarlanmıştır. Akımın türbülanslı yapısı, serbest yüzey akımlarında etkinliği kanıtlanmış olan bir türbülans modeli tercihini gerektirmektedir. Bu bağlamda, Shigematsu ve arkadaşlarının [140] test ettiği ***k-ε*** türbülans modeli esas alınmıştır. Bu model, türbülansın dinamiklerini ve serbest yüzey akımlarını doğru bir şekilde yakalamak için seçilmiştir. Sayısal analizlerde, uygun ağ boyutlarının seçimi çözüm sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [24,28,29,141]. Bu yüzden, en uygun ağ boyutunu belirlemek amacıyla, çeşitli ağ boyutları kullanılarak bir dizi ön çalışma

yapılmıştır. Bu çalışmalar, çalkantı hareketinde serbest yüzey profillerinin mesh boyutlarına nasıl tepki verdiğini anlamak için gerçekleştirilmiştir. 1 mm, 2 mm, 5 mm ve 10 mm olmak üzere dört farklı ağ boyutu kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Bu sonuçlar, uygun ağ boyutu seçiminin önemi ile bu seçimin akışkan hareketleri üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Sayısal analizler ve deneysel sonuçlar arasındaki uyumluluk, ağ aralığının küçülmesi ile birlikte artış göstermektedir. Ayrıca, ağ aralıklarının daralması, çözülmesi gereken bilinmeyenlerin sayısını artırarak hem bilgisayarın hesaplama süresini uzatmakta hem de çıktı dosyasının boyutunu büyütmektedir. Bu nedenle, mevcut çalışmada, hesaplama verimliliği ve çözüm doğruluğu arasında bir denge sağlamak amacıyla ağ aralıkları 2 mm olarak ayarlanmıştır. FLOW-3D HYDRO yazılımında gerçekleştirilen hesaplamalar, yalnızca dikdörtgen hücreler içeren bir çözüm ağı üzerinde yürütülmektedir. Bu araştırmada, RONS modeli kapsamında, x ve z eksenlerinde üniform 2 mm büyüklüğündeki ağ aralıkları tercih edilmiştir. Diğer bir ifadeyle, çözüm ağı, homojen kare hücrelerden oluşturulmuştur.



Şekil 4.19. Farklı ağ aralıklarının çalkantı davranışına etkisi

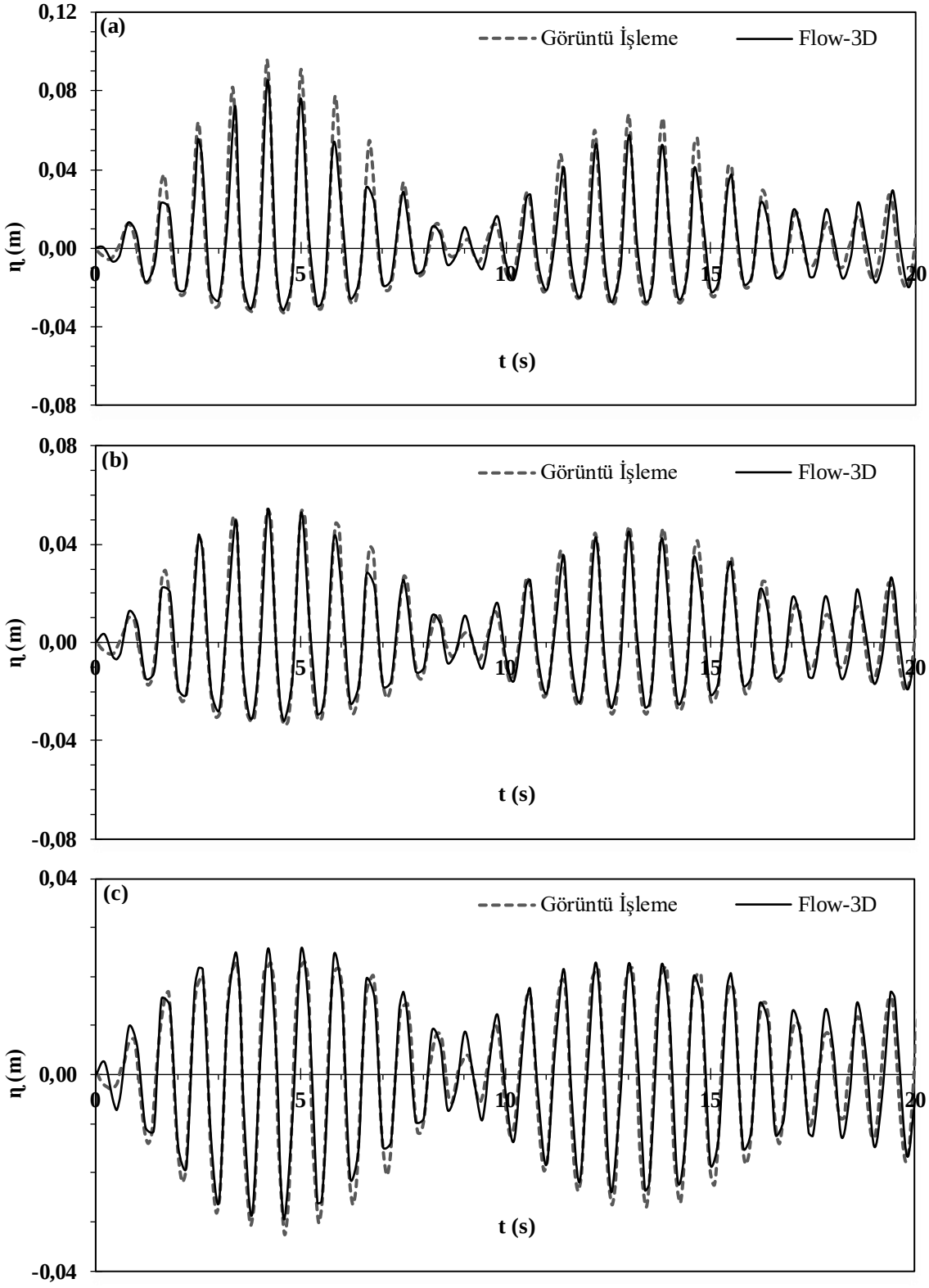
Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de, h = 10 cm sıvı derinliğinde ve sırasıyla $f_e = 1{,}10\ f_1$ ile $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekanslarında gerçekleştirilen deneylerdeki çalkantı davranışı sonuçları verilmiştir. Deney tankının uyarma genliği A = 5,5 mm seçilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu grafiklerde, görüntü işleme yöntemi kullanılarak elde edilen deneysel veriler ile FLOW-3D HYDRO yazılımı aracılığıyla üretilen sayısal sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ölçümler deney tankının sırasıyla 1. cm'sinde konumlandırılmış P1, 5. cm'sinde P5 ve 10. cm'sinde yer alan P10 noktalarında gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.20'de verilen grafikler incelendiğinde genel olarak deneysel veriler ile sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu gözlemlenmektedir. Buna karşın dalga tepe ve çukur noktalarında küçük farklılıklar göze çarpmaktadır. Bu farklılıkların deney ve modelleme süreçlerinin doğası gereği kaçınılmaz olduğu düşünülmektedir. Özellikle, bilgisayar modelinin iki boyutlu olması ve deneyin üç boyutlu gerçekleştirilmesi, bu farklılıkların temel nedenlerinden birkaçı olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte Şekil 4.20 (a) ve Şekil 4.20 (b) ve Şekil 4.20 (c) birlikte değerlendirildiğinde dalga yüksekliklerinin belirli bir düzenlilik ve periyodiklik gösterdiği anlaşılmaktadır. Her üç grafik incelendiğinde, sayısal simülasyonlar ile deneysel ölçümler arasında bazı sapmalar gözlemlenmektedir. Ancak bu sapmaların makul sınırlar içinde olması, sayısal modelleme parametrelerinin ve kullanılan deneysel yöntemin fiziksel olayların özelliklerini etkili bir şekilde yansıttığına işaret etmektedir.

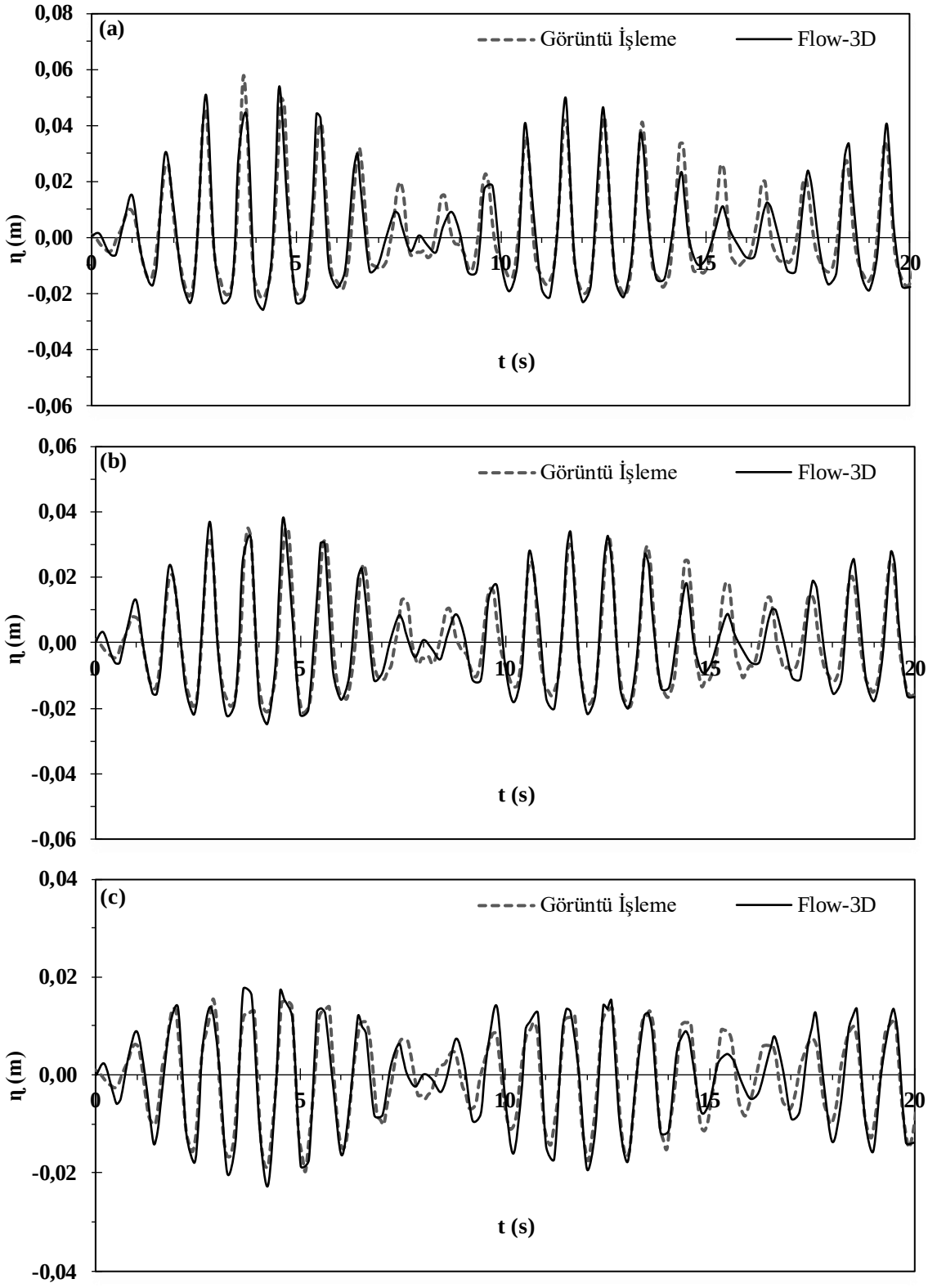
Şekil 4.21'de de sayısal ve deneysel veriler arasında genel bir uyum göze çarpmaktadır. Yüksek uyarma frekanslı davranışa nazaran Şekil 4.21'de deneysel ve sayısal verilerin daha uyumlu olduğu ve pik noktalarının daha iyi eşleştiği gözlemlenmiştir. Bu, sayısal modelin daha yavaş değişen koşulları deneysel veriler ile birlikte daha doğru yakalayabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te, sıvı derinliğinin 12 cm olduğu deney düzeneğinde, 5,5 mm uyarma genliği ve farklı uyarma frekanslarında ($f_e = 1{,}10\ f_1$ ve $f_e = 0{,}90\ f_1$) çalkantı davranışları karşılaştırılmış ve her iki durumda da P1, P5 ve P10 noktalarındaki sıvı yüksekliği değişimleri gösterilmiştir. Her iki grafik setinde de dalga genliklerinin deneysel ve sayısal sonuçlar ile uyumlu olduğu, ancak uyarma frekansındaki değişikliğin dalga formu üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Yüksek uyarma frekansında ($f_e = 1{,}10\ f_1$) dalgaların

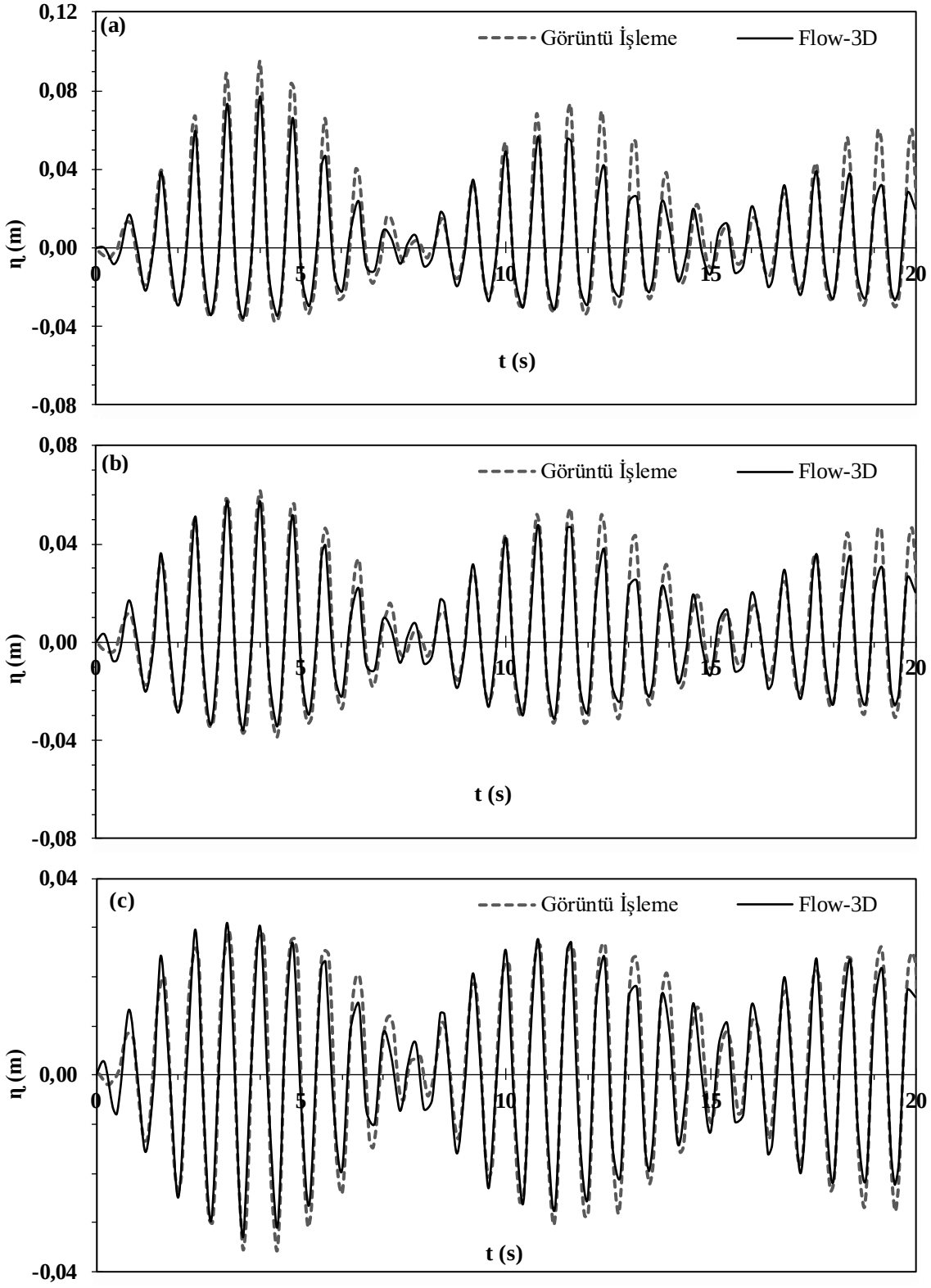
oluşum sıklığı artmaktadır; bu durum, dalgaların daha yoğun bir frekansta oluştuğunu ve yayıldığını göstermektedir. Düşük frekansta ($f_e = 0{,}90\ f_1$) ise dalgaların biraz daha geniş aralıklarla ve düşük genlikte oluştuğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte belirli zaman dilimlerinde, özellikle dalga tepe noktalarında, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında küçük farklılıklar olsa da, bu farkların genel davranışı etkilemediği görünmektedir. Tüm durumlar birlikte değerlendirildiğinde sayısal modelin ve deneysel yöntemlerin, çalkantı hareketlerini anlama konusunda güvenilir veriler sunduğu anlaşılmaktadır. Bulgular, çalkantı hareketinin dinamiklerinin daha iyi anlaşılmasında, karşılaşılan problemlerin çözümünde sayısal modelin ve deneysel çalışmaların birlikte ele alınmasının önemini göstermektedir.



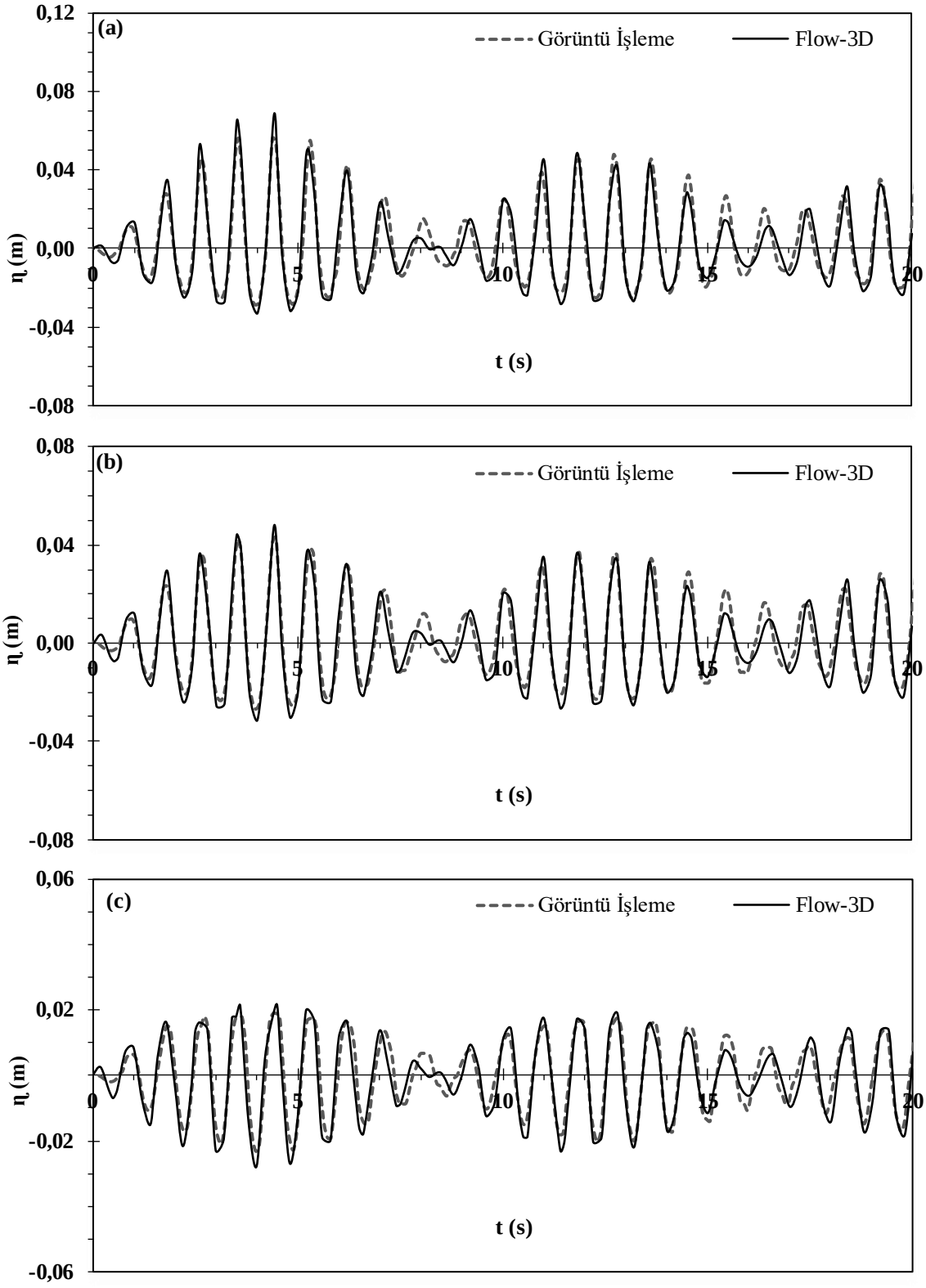
Şekil 4.20. h = 10 cm sıvı derinliği için $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansında ve A = 5,5 mm uyarma genliğinde (a) P1 noktasında (b) P5 noktasında ve (c) P10 noktasında sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması



Şekil 4.21. h = 10 cm sıvı derinliği için $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansında ve A = 5,5 mm uyarma genliğinde (a) P1 noktasında (b) P5 noktasında ve (c) P10 noktasında sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması



Şekil 4.22. h = 12 cm sıvı derinliği için $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansında ve A = 5,5 mm uyarma genliğinde (a) P1 noktasında (b) P5 noktasında ve (c) P10 noktasında sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması



Şekil 4.23. h = 12 cm sıvı derinliği için $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansında ve A = 5,5 mm uyarma genliğinde (a) P1 noktasında (b) P5 noktasında ve (c) P10 noktasında sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması

4.7. Farklı Engel Yerleşimlerinin Çalkantı Davranışları Üzerindeki Etkilerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi

Tez çalışmasının daha önceki bölümlerinde, dikdörtgen bir deney tankında, engel bulunmayan durumlar için farklı doluluk oranları, uyarma genlikleri ve frekanslarında çalkantı davranışlarının deneysel, analitik ve sayısal olarak incelenmesi üzerine odaklanılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde ise farklı engel yerleşimlerinin çalkantı davranışları üzerindeki etkileri, hem deneysel hem de sayısal yöntemler ile birlikte detaylı bir şekilde incelenecektir. Bu analizler, daha önce engelsiz durumlar için yapılan çalışmaların üzerine inşa edilecek ve çalkantı davranışlarının, engellerin varlığında nasıl değiştiğini ortaya koyacaktır.

Deney tankının sol alt köşesi orijin noktası olarak kabul edilerek, tez çalışması kapsamında uygulanan engel dizilimleri aşağıda verildiği gibi sıralanabilir:

1.) B(20): 20. cm'de tek engel bulunan durum

2.) B(20 x 2) : 20. cm'de iki engel bulunan durum

3.) B(20 x 3) : 20. cm'de üç engel bulunan durum

4.) B(15 - 25): 15. cm ve 25. cm'de iki engel bulunan durum

5.) B(10 - 30): 10. cm ve 30. cm'de iki engel bulunan durum

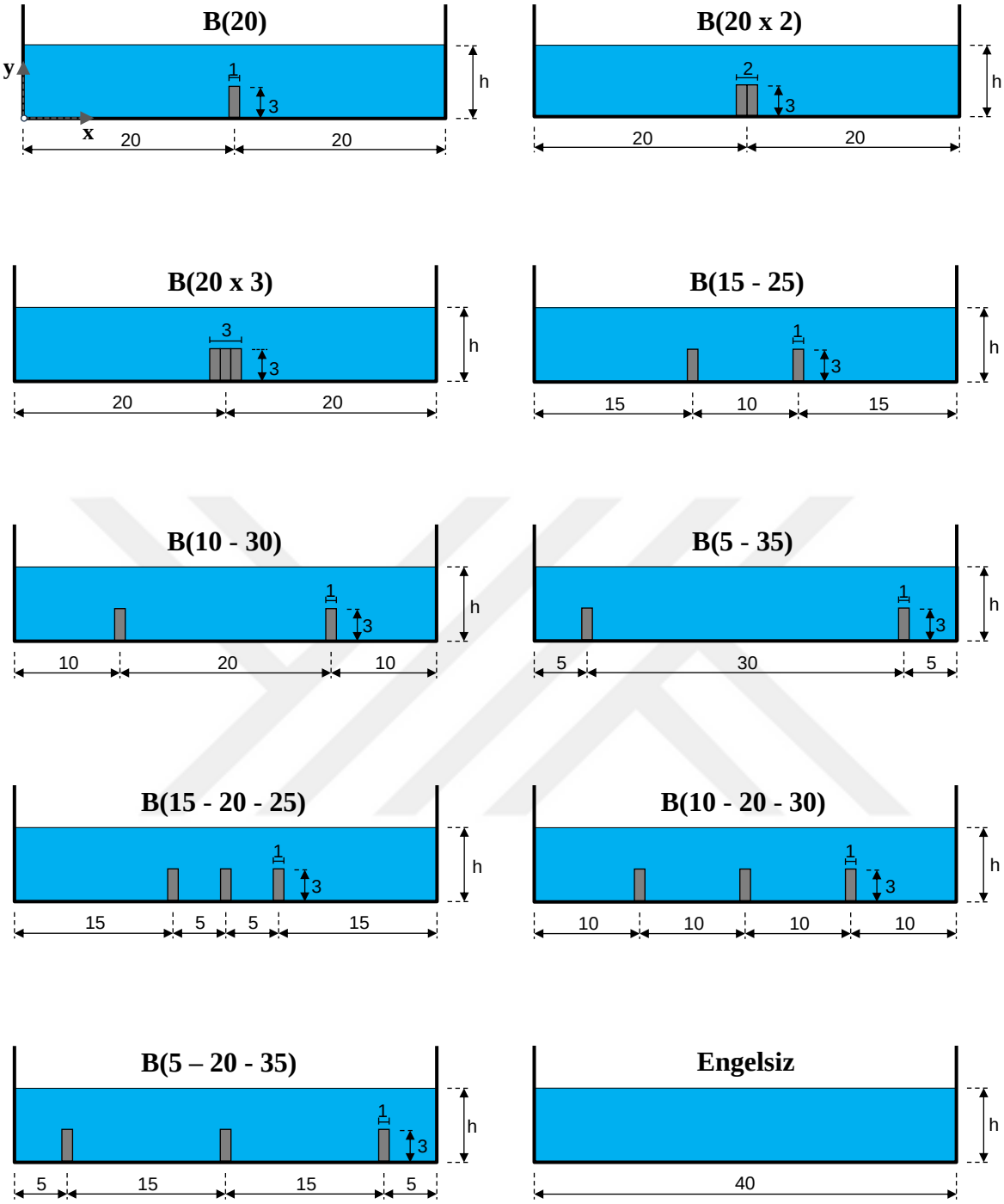
6.) B(5 - 35): 5. cm ve 35. cm'de iki engel bulunan durum

7.) B(15 - 20 - 25): 15. cm, 20. cm ve 25. cm'de üç engel bulunan durum

8.) B(10 - 20 - 30): 10. cm, 20. cm ve 30. cm'de üç engel bulunan durum

9.) B(5 - 20 - 35): 5. cm, 20. cm ve 35. cm'de üç engel bulunan durum

Tüm engellerin kalınlığı 1 cm ve yüksekliği 3 cm'dir. Şekil 4.24'te, bu çalışmada incelenen dokuz farklı engel yerleşimi ve engelsiz durum şematik olarak gösterilmiştir



Şekil 4.24. Farklı engel dizilimlerinin ve engelsiz durumun şematik olarak gösterimi

4.7.1. B(20) engel diziliminde çalkantı hareketinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi

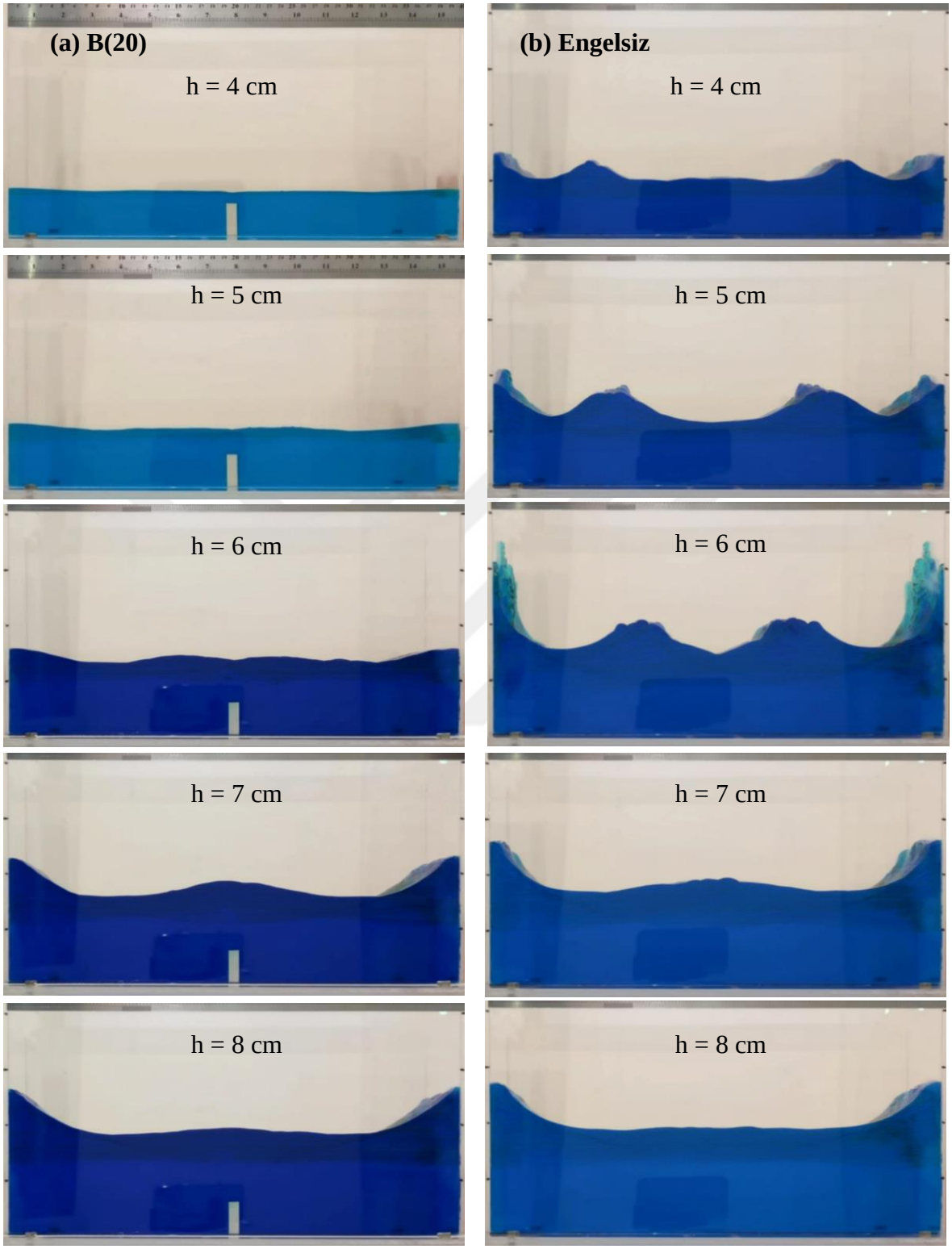
Çalışmanın bu aşamasında, B(20) noktasına konumlandırılan bir engelin, çalkantı hareketlerini nasıl etkilediği ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da, hem engelli hem de engelsiz durumlarda, farklı sıvı derinliklerinde (h = 4 cm – 8 cm) ve iki farklı uyarma frekansında ($f_e = 0{,}90\ f_1$ ve $f_e = 1{,}10\ f_1$) meydana gelen çalkantı hareketleri gösterilmiştir. Bu grafiklerde, dalga yüksekliklerinin zirve noktalarını temsil eden MAKS görselleri sunulmuştur. Bu frekans değerleri, engelsiz ortamda sıvı hareketlerini önemli ölçüde artırabilen ve rezonans oluşturma ihtimali bulunan kritik değerler olarak özellikle tercih edilmiştir. Kısacası bu uyarma frekansları sıvı hareketlerini maksimize edebilecek ve en yoğun çalkantıya sebep olabilecek durumları temsil etmektedir. Bu durumlar, engelin sönümleme kapasitesinin, zorlayıcı koşullarda nasıl performans gösterdiğini değerlendirmek için ideal bir test ortamı sağlamaktadır. Çalışmanın bu ve sonraki kısımlarında incelenen tüm durumlar için uyarma genliği 6 mm olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.25 (a)'da görüldüğü üzere özellikle düşük derinliklerde (4 cm, 5 cm ve 6 cm) engel kullanımının sıvının hareket alanını sınırlayarak dalga yüksekliklerini ve genliklerini azalttığı görünmektedir. Ancak, sıvı seviyesi arttıkça (7 cm ve 8 cm), engelin sönümleme etkisi nispeten azalmakta ve dalga hareketleri daha belirgin hale gelmektedir. Engel yüksekliği ile sıvı derinliği arasındaki oran ($h_e/h_{sıvı}$) ne kadar yüksek olursa, engelin çalkantı hareketleri üzerinde olumlu etkisinin de o derece arttığı gözlenmektedir. Elde edilen bulgular, Bellezi ve diğerlerinin [98] araştırmasındaki sonuçlarla benzer özellikler taşımaktadır. Şekil 4.25 (b)'de ayrıca engelsiz durum için 4 cm, 5 cm ve 6 cm sıvı derinliklerinde gözlenen çift tepe şeklindeki dalga formasyonlarının engel yerleştirilmesiyle birlikte önemli ölçüde azaldığı ve sıvı yüzeyinin daha düzenli bir dalga formuna ulaştığı görülmektedir. Bununla birlikte sıvı seviyesinin yükselmesiyle birlikte, B(20) konumundaki engelin dalga formasyonları üzerindeki düzenleyici ve sönümleyici etkisi belirgin bir iyileşme göstermemektedir. Bu durum, sıvı yüksekliğinin artmasıyla birlikte engelin göreceli etkinliğinin azalabileceğini işaret etmektedir. Çünkü daha yüksek sıvı seviyeleri ile birlikte, serbest yüzeyde meydana gelen dalga hareketinin etkisi derinlik boyunca azalmaktadır. Bu da derinlik oranı (h/L) arttıkça engelin sönümleme kapasitesinin azalacağını göstermektedir. Bu durum, engel tasarımlarında sıvı derinliğinin önemli bir parametre olarak dikkate alınması gerektiğini ve en uygun sönümleme performansı için

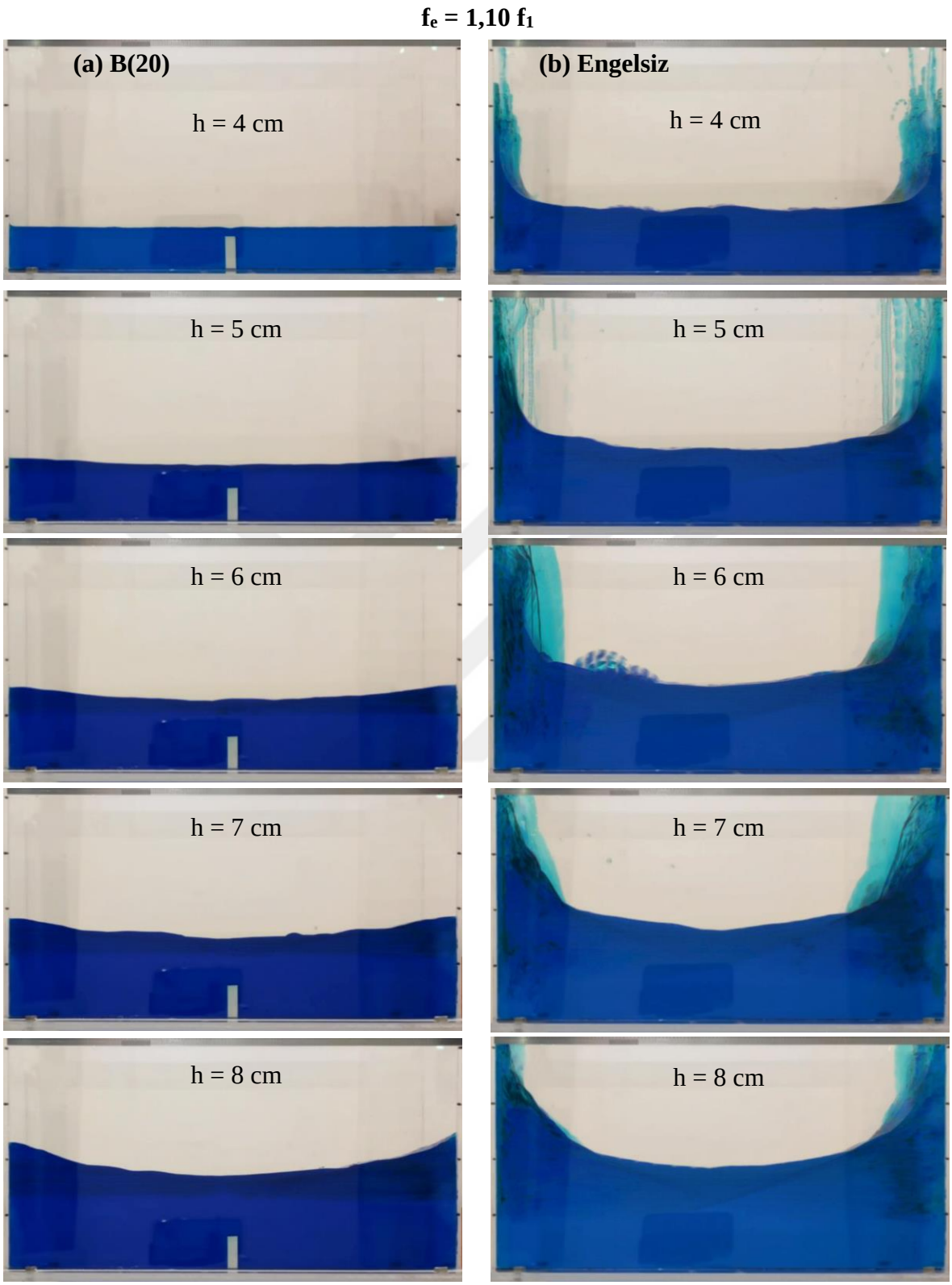
engel boyutlarının ve yerleşiminin sıvı seviyesi (h/L oranı) ve uyarma frekansları baz alınarak ayarlanması gerektiğini göstermektedir [98].

Şekil 4.26 (a) ve Şekil 4.26 (b)'de verilen sonuçlar incelendiğinde, B(20) engelinin ele alınan sıvı derinliklerinin tamamında çalkantı davranışını önemli ölçüde bastırdığı anlaşılmaktadır. Özellikle düşük derinliklerde (4 cm ve 5 cm gibi), engelin çalkantı üzerinde daha belirgin bir sönümleme etkisi olduğu gözlemlenmektedir. Orta ve yüksek sıvı derinliklerinde (6 cm, 7 cm ve 8 cm gibi), engel kullanımının çalkantı hareketini kısıtladığı görünse de, bu etkinin düşük derinliklere kıyasla göreceli olarak azaldığı sonucuna ulaşılmaktadır. Sonuç olarak özellikle daha derin sıvılarda, çalkantı hareketini etkili bir şekilde sönümlemek için tankın yan duvarlarında ek yatay engel kullanımı veya farklı kontrol yöntemleri gerekebilmektedir.

$f_e = 0{,}90\ f_1$



Şekil 4.25. $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansı ve farklı sıvı derinliklerinde (h = 4 cm – 8 cm) maksimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS) (a) B(20) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda

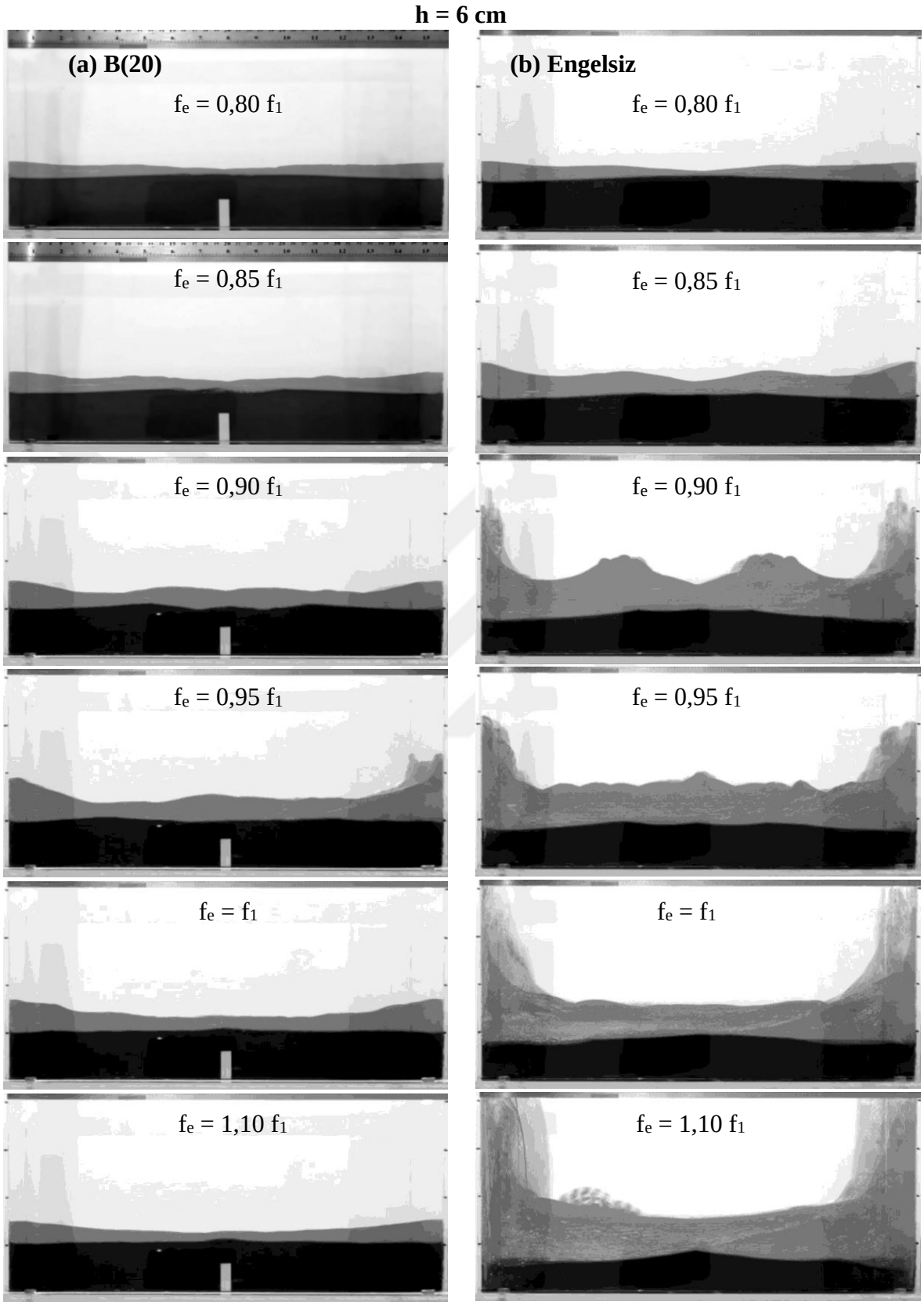


Şekil 4.26. $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansı ve farklı sıvı derinliklerinde (h = 4 cm – 8 cm) maksimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS) (a) B(20) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda

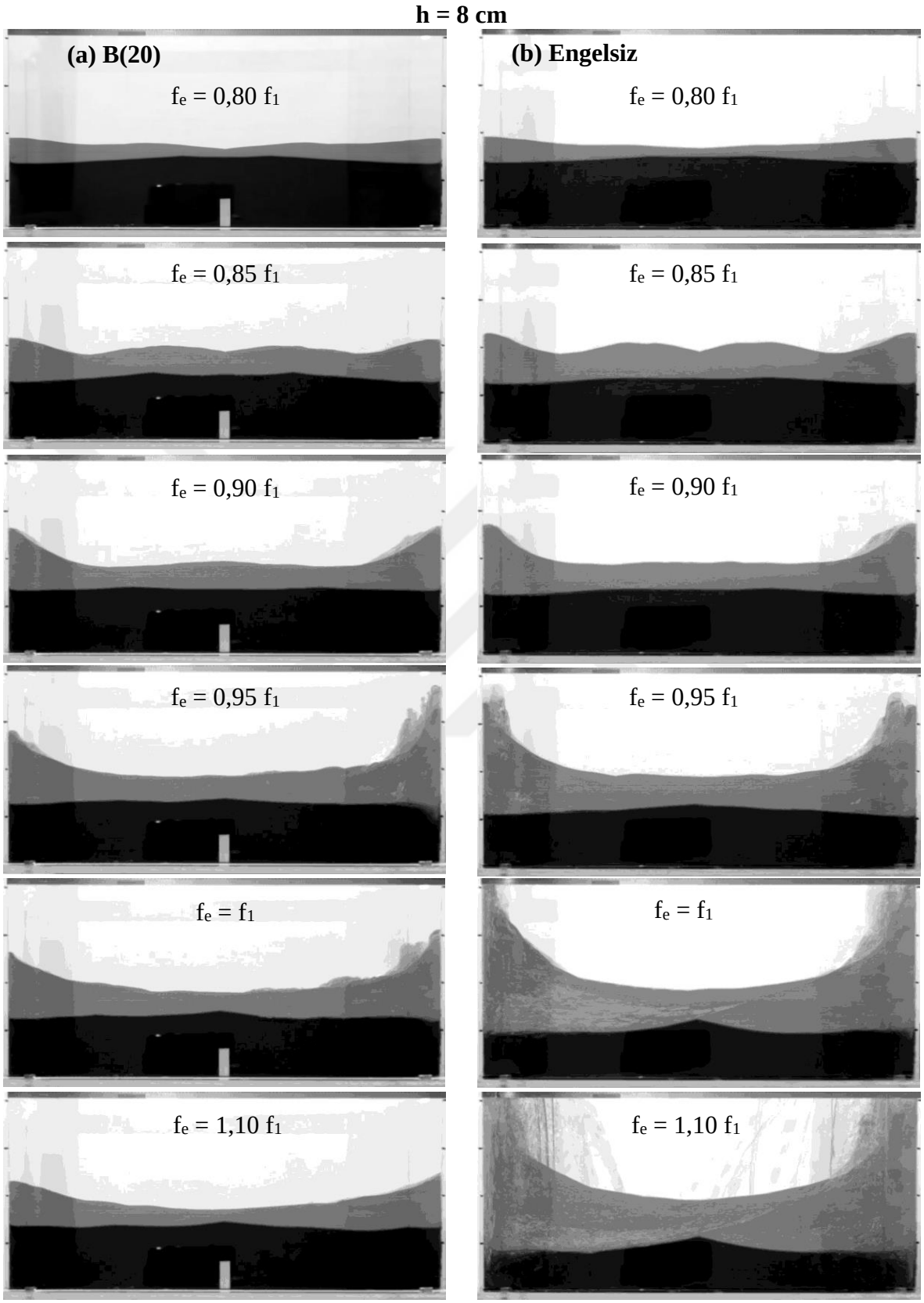
Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de, deney tankında B(20) engeli kullanıldığında sıvı derinliklerinin h = 6 cm ve h = 8 cm olduğu durumlar için, farklı uyarma frekansları altında oluşan çalkantı davranışının MAKS-MIN verileri gösterilmiştir. Bu veriler, engelsiz durumlarla karşılaştırmalı olarak ilk 20 saniye için sunulmuştur.

Şekil 4.27'de, $f_e = 0{,}80\ f_1$ ve $f_e = 0{,}85\ f_1$ düşük uyarma frekanslarında B(20) engel diziliminin çalkantı davranışını belirgin şekilde değiştirmediği buna karşın yüksek uyarma frekanslarında ise B(20) engelinin çalkantı hareketlerini etkili bir şekilde kısıtladığı görülmektedir. Açık gri renkli alana bakıldığında, sıvı salınımlarının kapsadığı alanın büyüklüğü, engel kullanımı ile birlikte azalmıştır. Bu durum, özellikle 6 cm sıvı derinliğinde, engelin çalkantı hareketinin yoğunluğunu ve dalga yüksekliklerini etkili bir şekilde sınırladığını ortaya koymaktadır. Engel varlığının, sıvının agresif salınım davranışlarını azalttığı ve bu sayede sıvı içerisindeki enerji yayılımının daha kontrollü olduğu sonucuna varılabilir.

Şekil 4.28 incelendiğinde birinci mod doğal frekansın altında etki ettirilen $f_e = 0{,}80\ f_1$, $f_e = 0{,}85\ f_1$, $f_e = 0{,}90\ f_1$ ve $f_e = 0{,}95\ f_1$ uyarma frekanslarında B(20) engelinin çalkantı davranışını sönümleme etkisinin sınırlı olduğu görülmektedir. Bu frekanslarda, açık gri renkli alandaki azalmanın, engelin çalkantı hareketlerine etkisini bir miktar azalttığı görülse de, bu değişikliğin yeterince belirgin olmadığı anlaşılmaktadır. Bu, engelin belirli bir frekans aralığında çalkantı hareketini bastırma kapasitesinin kısıtlı olabileceğini gösterir. Ancak, $f_e = f_1$ ve $f_e = 1{,}10\ f_1$ gibi görece yüksek uyarma frekanslarında, engel etkisinin daha önemli olduğu anlaşılmaktadır. Bu frekanslarda, B(20) engelinin varlığı, açık gri renkli alanın önemli ölçüde küçülmesine neden olarak, sıvı salınımını belirgin şekilde azaltmıştır. Bu, engelin dalga yüksekliklerini ve genliklerini sınırlayarak çalkantı hareketlerini daha etkili bir şekilde sönümlediğini göstermektedir. Yüksek frekanslarda sıvının enerjisinin ve salınımının daha fazla olduğu düşünüldüğünde, B(20) engelinin bu enerjiyi absorbe etme ve sıvı hareketlerini kontrol altına alma yeteneğinin, çalkantıyı yönetme açısından kritik öneme sahip olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 4.27. h = 6 cm sıvı derinliğinde ve farklı uyarma frekanslarında (f_e = 0,80 f_1 – 1,10 f_1) maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN) (a) B(20) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda



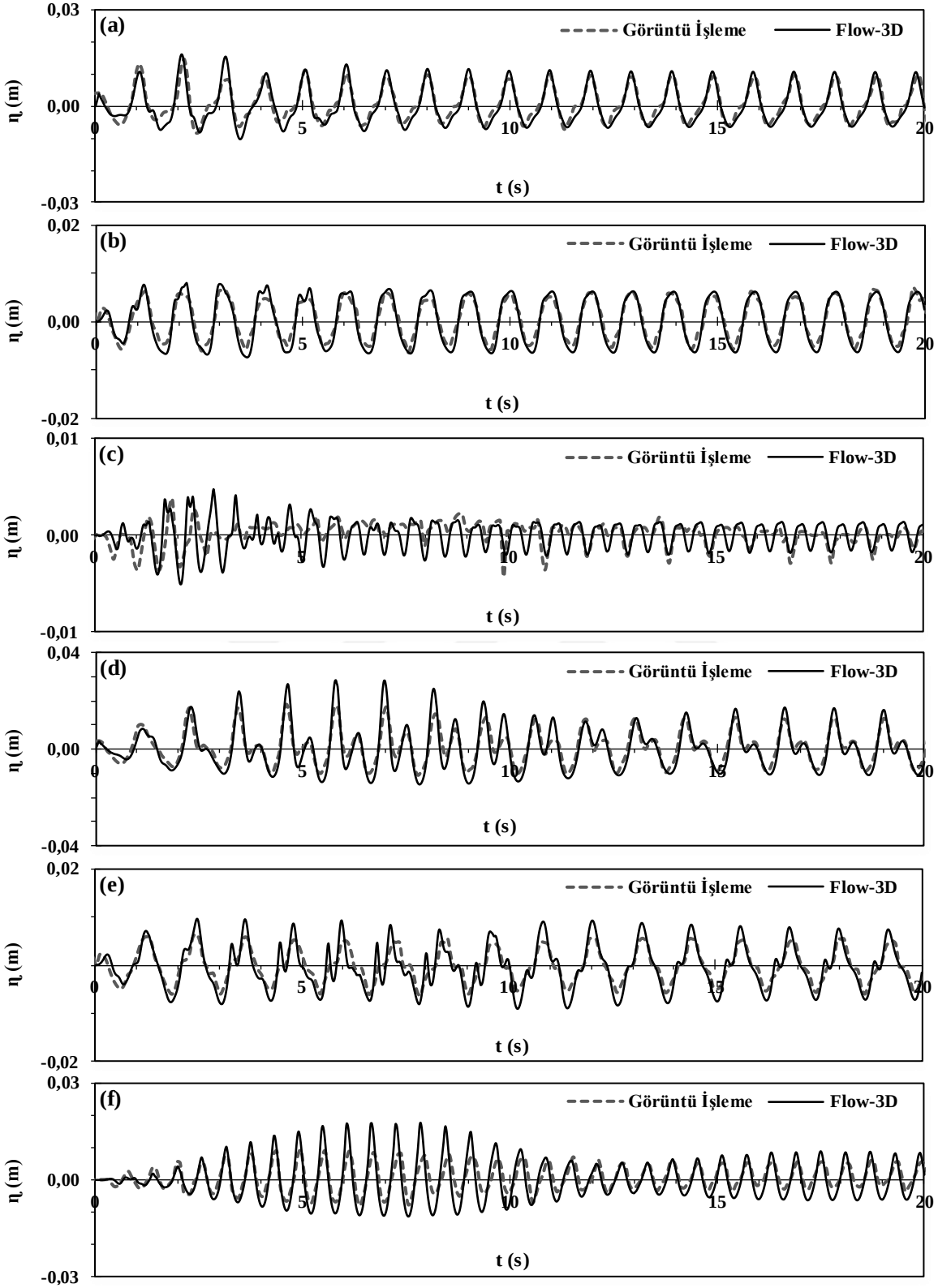
Şekil 4.28. h = 8 cm sıvı derinliğinde ve farklı uyarma frekanslarında (f_e = 0,80 f_1 – 1,10 f_1) maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN) (a) B(20) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda

Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da sırasıyla, B(20) engel diziliminde deney tankının 6 cm ve 8 cm sıvı derinliğinde olduğu durum için sıvı yüksekliği değişimi, iki farklı uyarma frekansı altında ($f_e = 1{,}10\ f_1$; $f_e = 0{,}90\ f_1$) , tankın üç farklı yatay kesitinde (P1, P10, ve P20) gösterilmiştir. Zamana bağlı olarak sıvı yüzeyinde meydana gelen değişimler, deneysel yöntemler ve sayısal simülasyonlar ile elde edilen verilerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

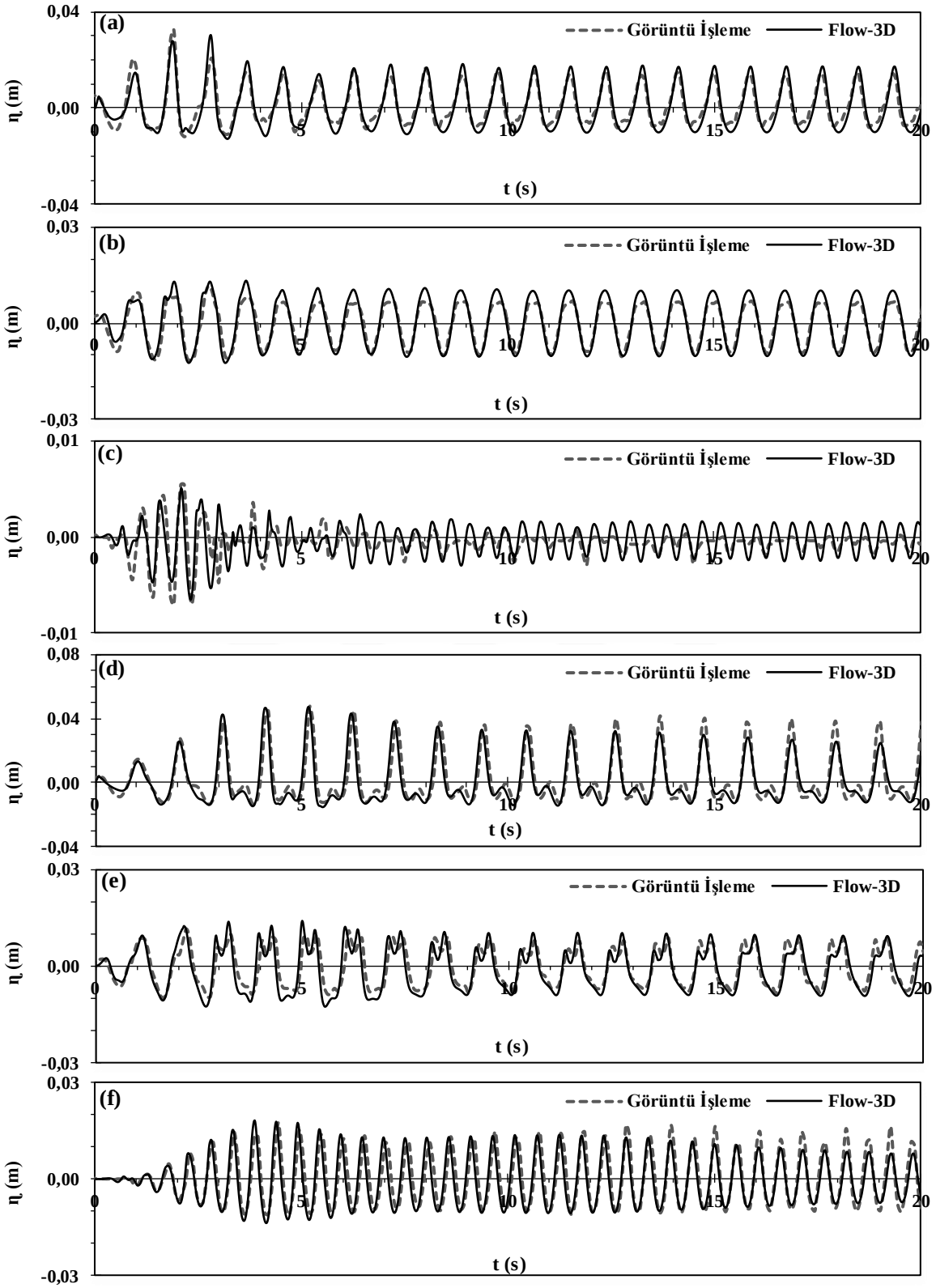
Şekil 4.29 (a), (b), ve (c)'de h = 6 cm için, $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansında sırasıyla P1, P10 ve P20 pozisyonlarındaki sıvı yüksekliği değişimleri yer alırken; Şekil 4.29 (d), (e), ve (f)'de ise $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansında aynı pozisyonlardaki sıvı yüksekliği değişimleri gösterilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, her iki yöntemle elde edilen verilerin genel eğilimlerinin büyük ölçüde uyumlu olduğu anlaşılmakta, bununla birlikte P20 noktasında her iki uyarma frekansında gözlemlenen uyumsuzluklar dikkat çekmektedir.

Şekil 4.30 (a), (b) ve (c) grafiklerinde ise h = 8 cm sıvı derinliği için, $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansında P1, P10 ve P20 pozisyonlarında sıvı yüksekliği değişimlerini gösterilirken; (d), (e) ve (f) grafiklerinde ise $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansında bu pozisyonlardaki değişimler sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, her iki yöntemle elde edilen sonuçların genel eğilimleri büyük ölçüde uyumlu görünmekle birlikte, $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansında P20 noktasında belirgin bir uyumsuzluk göze çarpmaktadır. Öte yandan Şekil 4.29 (f)'e kıyasla Şekil 4.30 (f)'de verilen deneysel ve sayısal sonuçlar arasında daha iyi bir uyum olduğu gözlenmektedir.

Şekil 4.29 ve Şekil 4.30 birlikte değerlendirildiğinde, çalkantı davranışı açısından en kritik frekansın, rezonansın altında kalan $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansı olduğu belirlenmiştir. Bu frekansta, dalga genliklerinin incelenen $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansına nazaran daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Xue ve diğerlerinin [13] çalışmalarına benzer sonuçlar elde edilmiş olup, alttan monte edilmiş tek düşey engelin bulunduğu durumda, sıvının birinci mod doğal frekansının engelsiz duruma göre düştüğü ve bu durumun yüksek dalga genliklerine yol açtığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.29. h = 6 cm sıvı derinliği ve $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansında (a) P1, (b) P10, (c) P20 ve h = 6 cm sıvı derinliği ve $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansında (d) P1, (e) P10, (f) P20 noktaları için B(20) engel diziliminde sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması



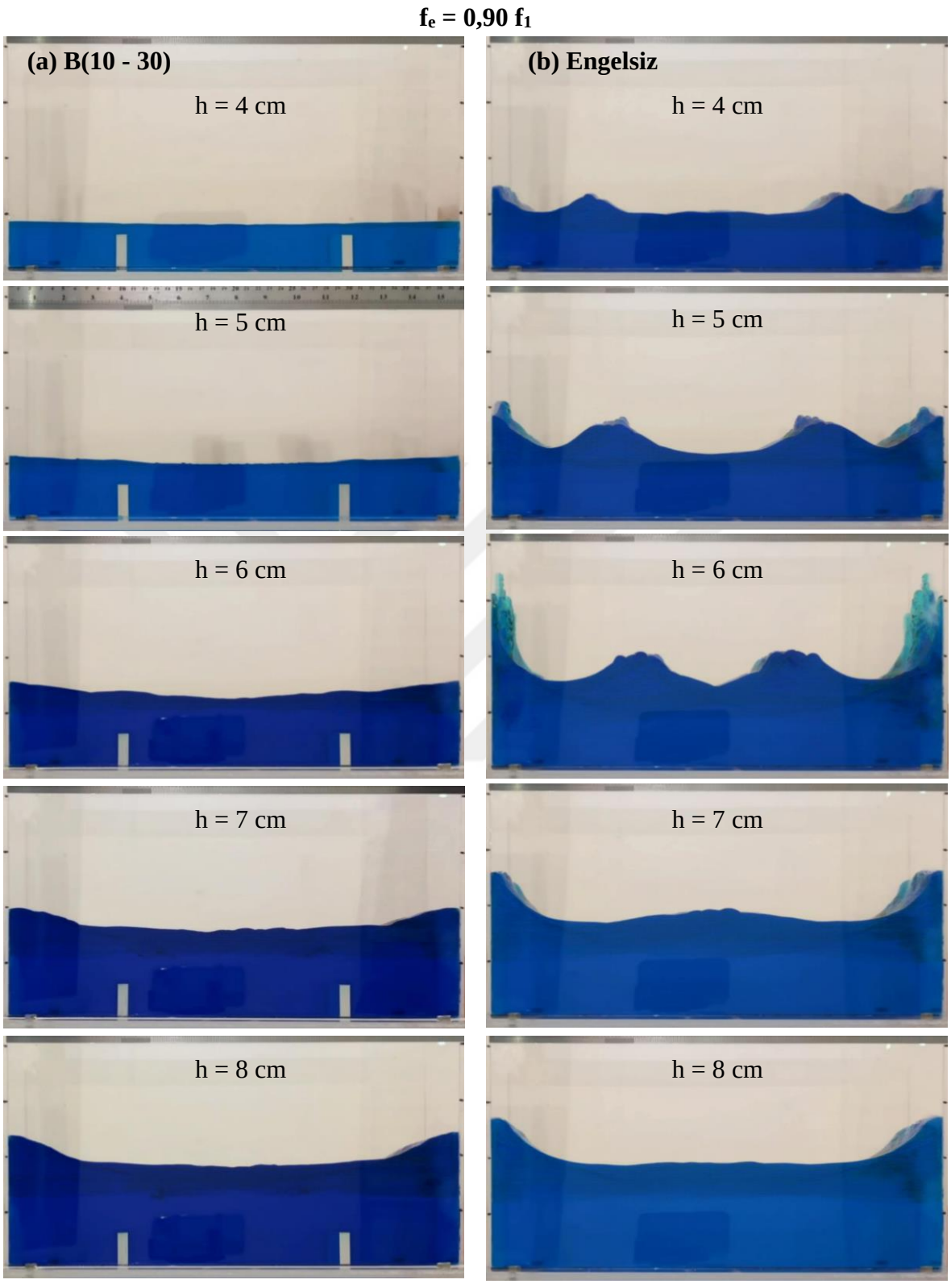
Şekil 4.30. h = 8 cm sıvı derinliği ve $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansında (a) P1, (b) P10, (c) P20 ve h = 8 cm sıvı derinliği ve $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansında (d) P1, (e) P10, (f) P20 noktaları için B(20) engel diziliminde sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması

4.7.2. B(10 - 30) engel diziliminde çalkantı hareketinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi

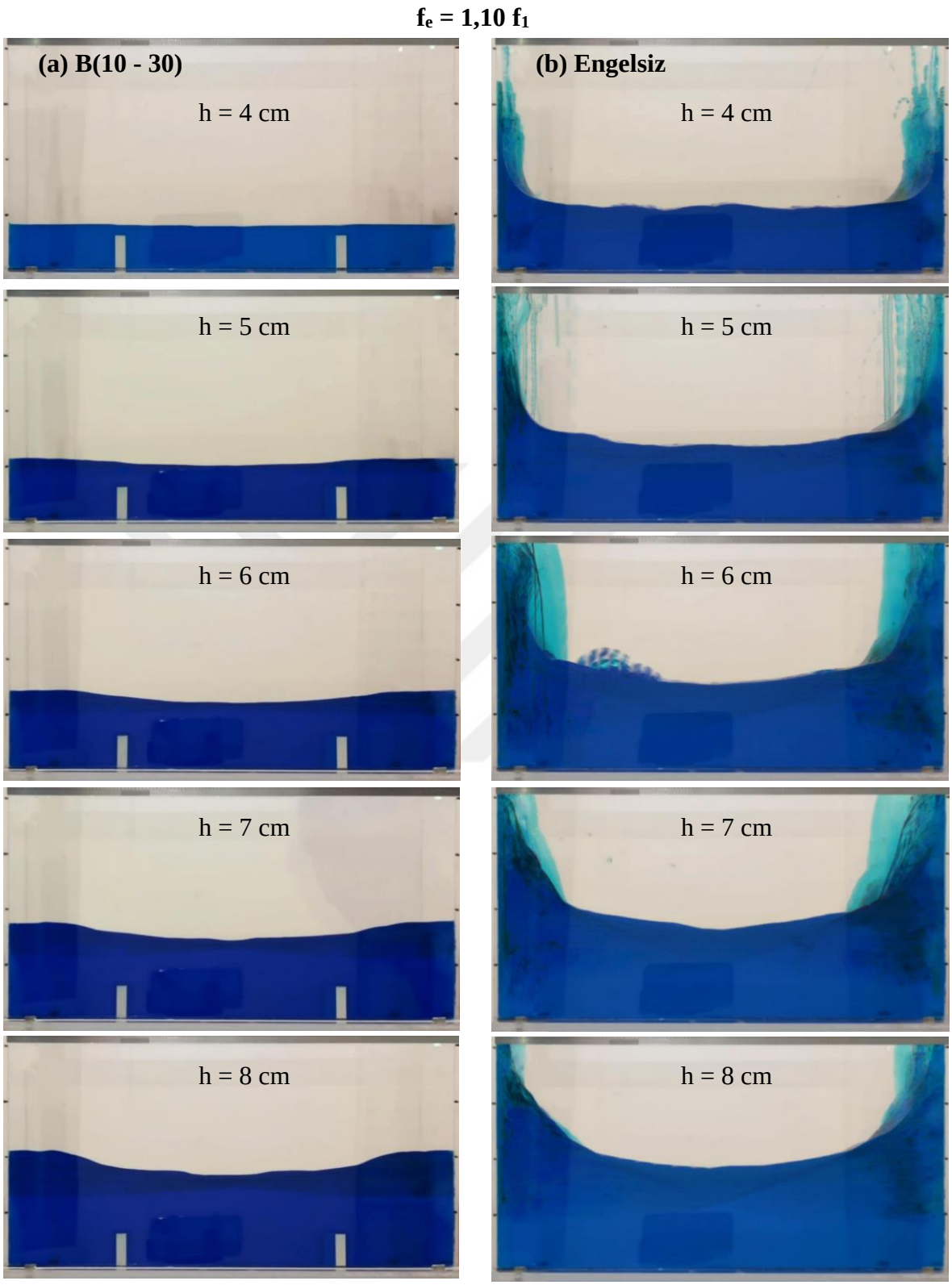
Çalışmanın bu bölümünde, deney tankının 10. cm ve 30. cm'sine konumlandırılan B(10 - 30) engellerin çalkantı hareketi üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Şekil 4.31'de, $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansında çeşitli sıvı seviyeleri (h = 4 cm - h =8 cm) için B(10 - 30) engelinin çalkantı davranışı üzerindeki etkisini gösteren MAKS sonuçları sergilenmiştir.

B(10 - 30) engel dizilimi altında 4 cm, 5 cm ve 6 cm gibi görece düşük sıvı seviyelerinde, çalkantı hareketlerinin engelsiz duruma kıyasla önemli derecede azaldığı Şekil 4.31'de, sunulmuştur. Başka bir deyişle, bu sıvı seviyelerinde engel diziliminin çalkantı hareketini sönümlemede önemli bir katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Sıvı derinliğinin 7 cm olduğu durumda ise engellerin sönümleme etkisi, düşük sıvı seviyelerine kıyasla azalmış olsa da, engelsiz duruma göre dalga hareketlerini azalttığı belirgin bir şekilde gözlemlenebilir. Buna karşın sıvı derinliğinin 8 cm olduğu koşulda ise engellerin sönümleme etkisinin daha da azaldığı anlaşılmaktadır. Başka bir ifadeyle bu engel dizilimi altında dalga boyunun ve genliğinin, engelsiz durumla karşılaştırıldığında önemli ölçüde azalmadığı, yani engellerin sönümleme etkisinin bu sıvı seviyesinde sınırlı kaldığı görülmektedir. Sonuç olarak, B(10 - 30) engel dizilimine sahip deney tankının $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansı etkisi altında, düşük sıvı seviyelerinde çalkantı üzerinde daha belirgin bir sönümleme etkisi sağladığı, ancak sıvı seviyesi arttıkça B(20) engel durumunda olduğu gibi bu etkinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, çalkantı kontrolü için engel yerleşimi ve boyutlandırılmasının sıvı seviyesine uygun şekilde tasarlanması gerektiğini göstermektedir.

Şekil 4.32'de, uyarma frekansının $f_e = 1{,}10\ f_1$ olduğu koşulda, değişen sıvı derinliğine (h = 4 cm - 8 cm) bağlı olarak B(10 - 30) engellerin sıvı hareketleri üzerindeki sönümleme etkisi gösterilmiştir. İki sütunlu düzende, Şekil 4.32 (a)'da B(10 - 30) engelleri yerleştirilmiş durumda yapılan deneysel sonuçlar yer alırken, sağ tarafta Şekil 4.32 (b)'de ise herhangi bir engel olmaksızın çalkantı davranışları verilmiştir. Yüksek uyarma frekansında ($f_e = 1{,}10\ f_1$), engelsiz durum altında çalkantı davranışı göz önüne alındığında B(10 - 30) engellerinin varlığı önem kazanmaktadır. Bu şartlar altında engeller, sıvı hareketlerini daha kontrollü bir şekilde sönümlerken, dalga hareketlerinin enerjisini ve genliğini azaltmakta ve daha stabil bir çalkantı davranışı oluşturduğu anlaşılmaktadır.



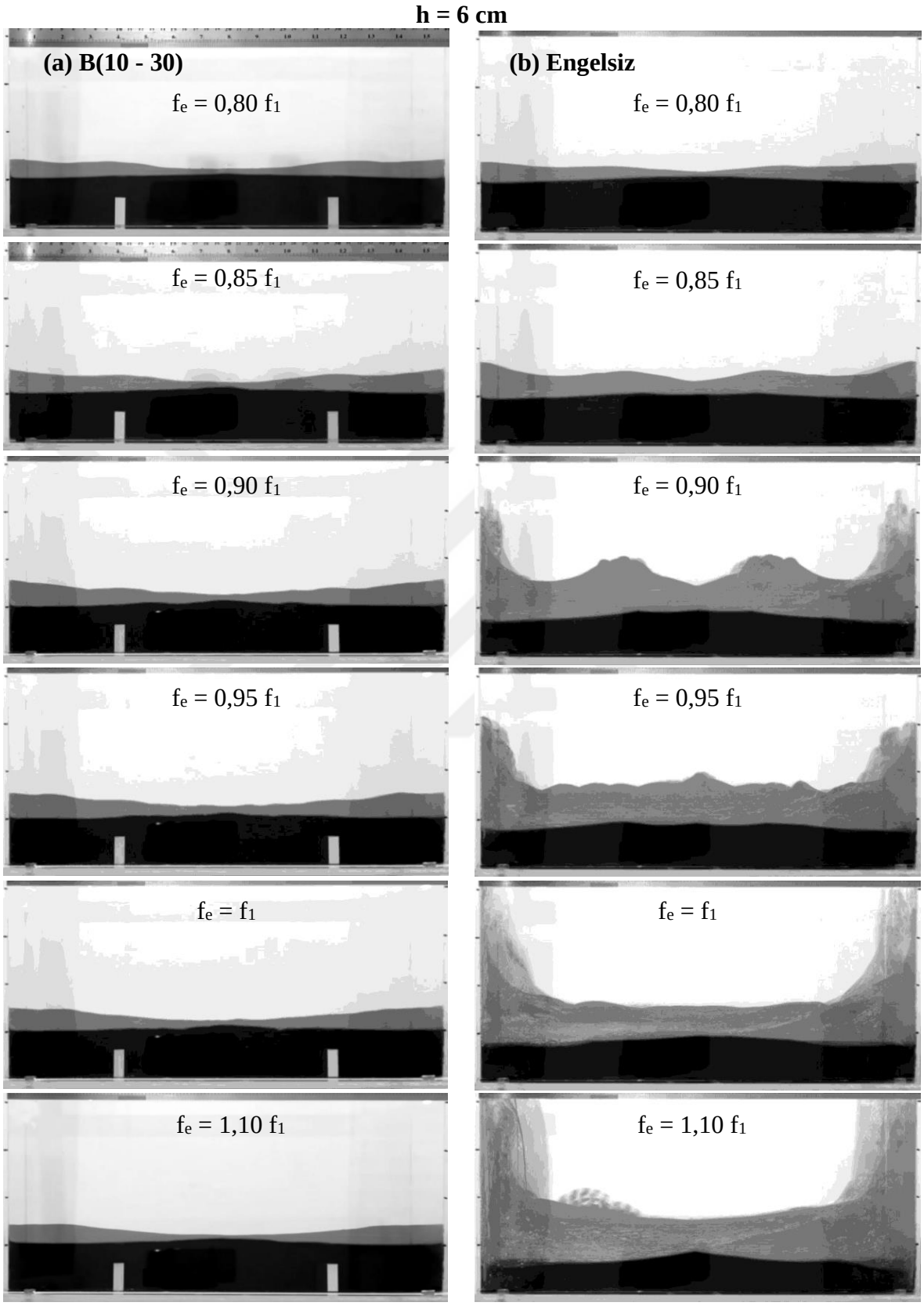
Şekil 4.31. $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansı ve farklı sıvı derinliklerinde (h = 4 cm – 8 cm) maksimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS) (a) B(10 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda



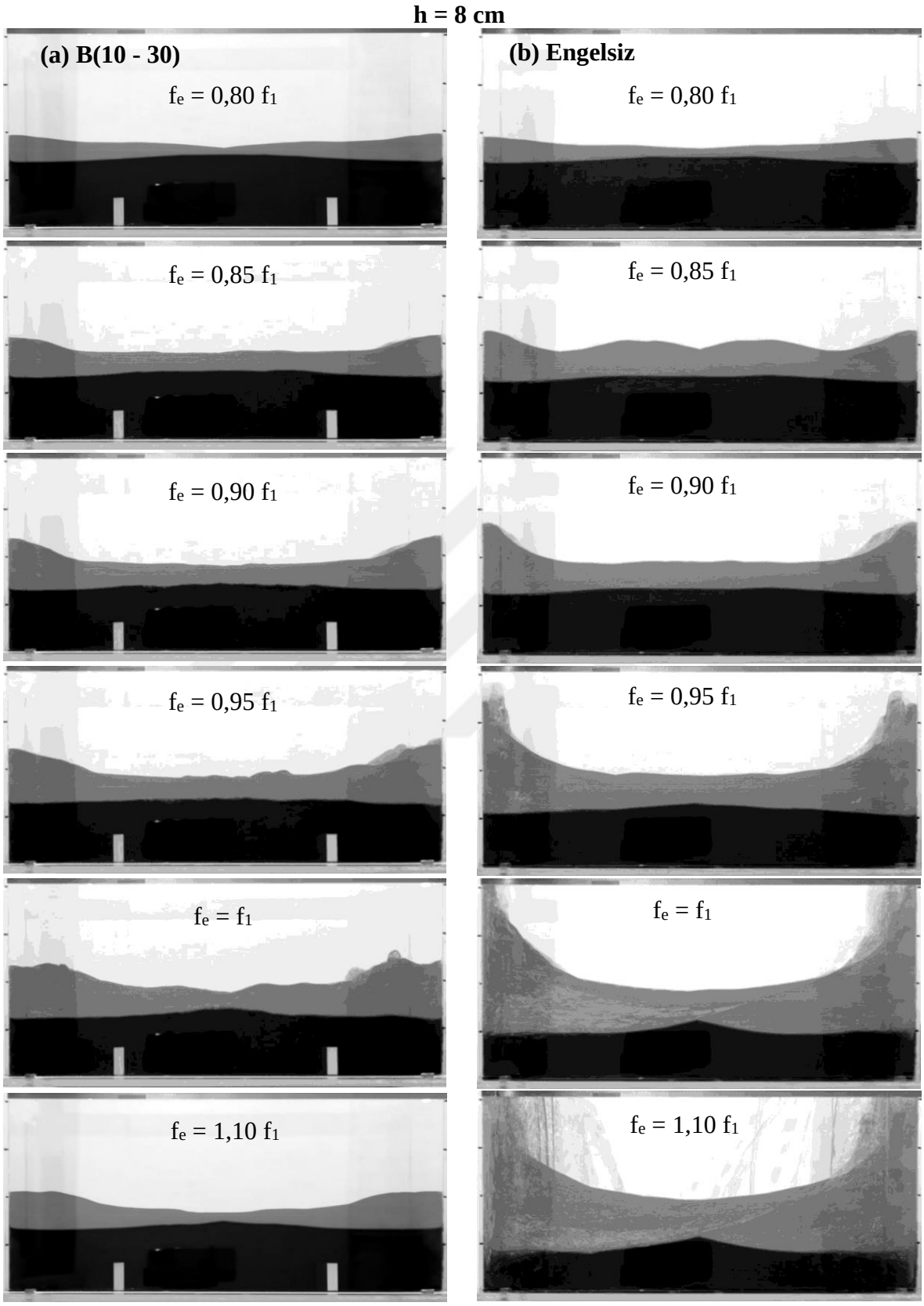
Şekil 4.32. $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansı ve farklı sıvı derinliklerinde (h = 4 cm – 8 cm) maksimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS) (a) B(10 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda

Şekil 4.33 ve 4.34'te deneyin ilk 20 saniyesi için MAKS - MIN sonuçları verilmiştir. Şekil 4.33'te MAKS - MIN görsellerindeki açık gri alana bakıldığında özellikle düşük uyarma frekanslarında ($f_e = 0{,}80\ f_1$; $f_e = 0{,}85\ f_1$) hem engelsiz durumda hem de B(10 - 30) engel diziliminde sıvının nispeten daha sakin bir davranış izlediği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte uyarma frekansının hemen rezonans altı, rezonans ve rezonans üstü olduğu durumlarda engel diziliminin sıvının agresif davranışını önemli ölçüde bastırdığı görülebilmektedir. Özellikle $f_e = 0{,}90\ f_1$ ve $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekanslarında engel kullanımının oldukça etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Sıvı derinliğinin 8 cm olduğu Şekil 4.34, Şekil 4.33 ile kıyaslandığında, $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekanslarında B(10 - 30) engel düzenlemelerinin sıvının çalkantı hareketleri üzerindeki etkisinin gözle görülür bir fark yaratmadığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte**,** Şekil 4.34 incelendiğinde, $f_e = 0{,}95\ f_1$, $f_e = f_1$ ve $f_e = 1{,}10\ f_1$ gibi agresif davranışların gözlendiği daha yüksek uyarma frekanslarında B(10 - 30) engel düzenlemelerinin olumlu etkilerinin olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum sıvı derinliği arttıkça B(10 - 30) engel diziliminin özellikle rezonans veya rezonans üzeri frekanslarda sıvı dinamiklerini düzenlemede etkili olabileceğini göstermektedir.

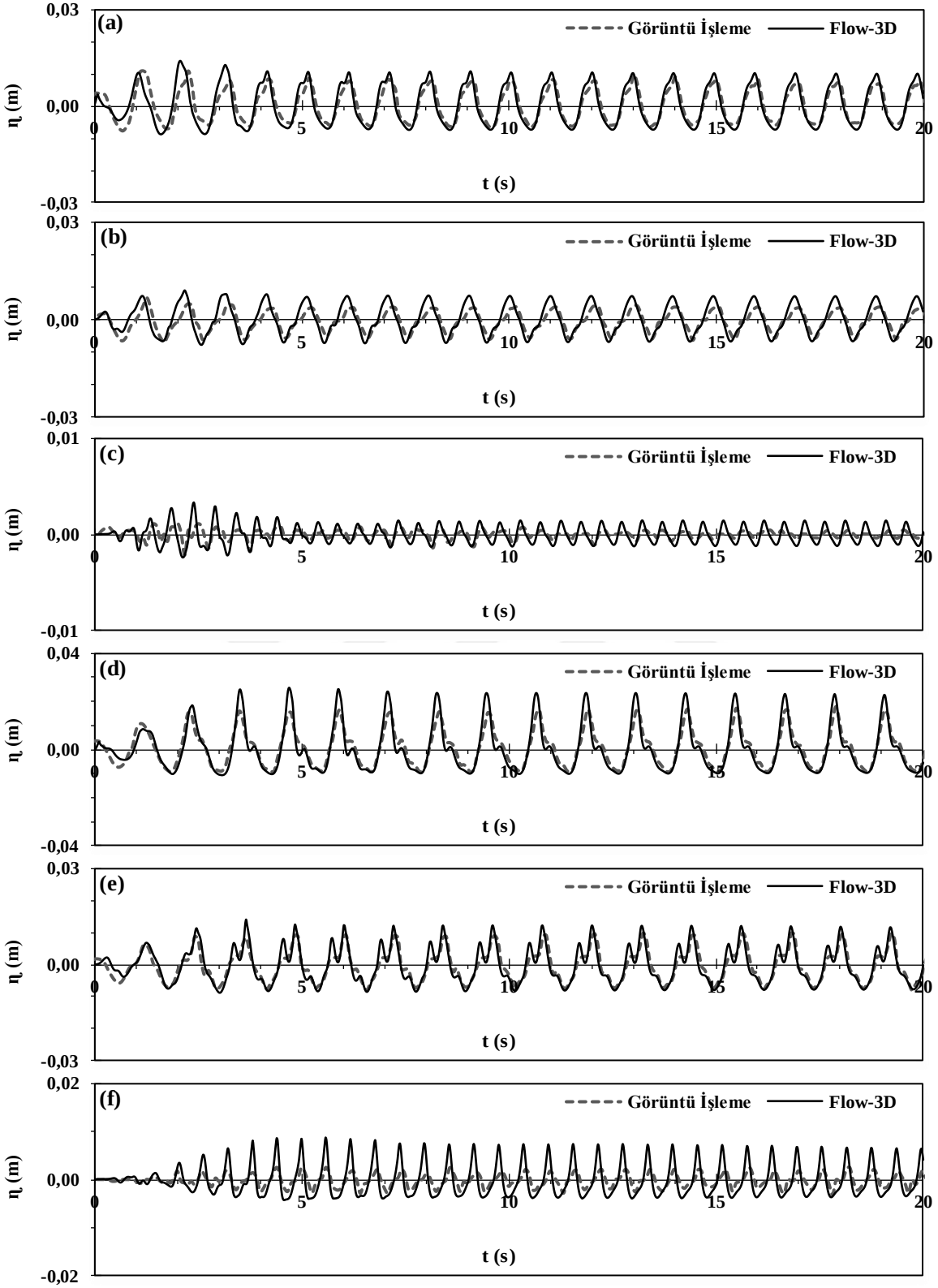


Şekil 4.33. h = 6 cm sıvı derinliğinde ve farklı uyarma frekanslarında (f_e = 0,80 f_1 – 1,10 f_1) maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN) (a) B(10 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda

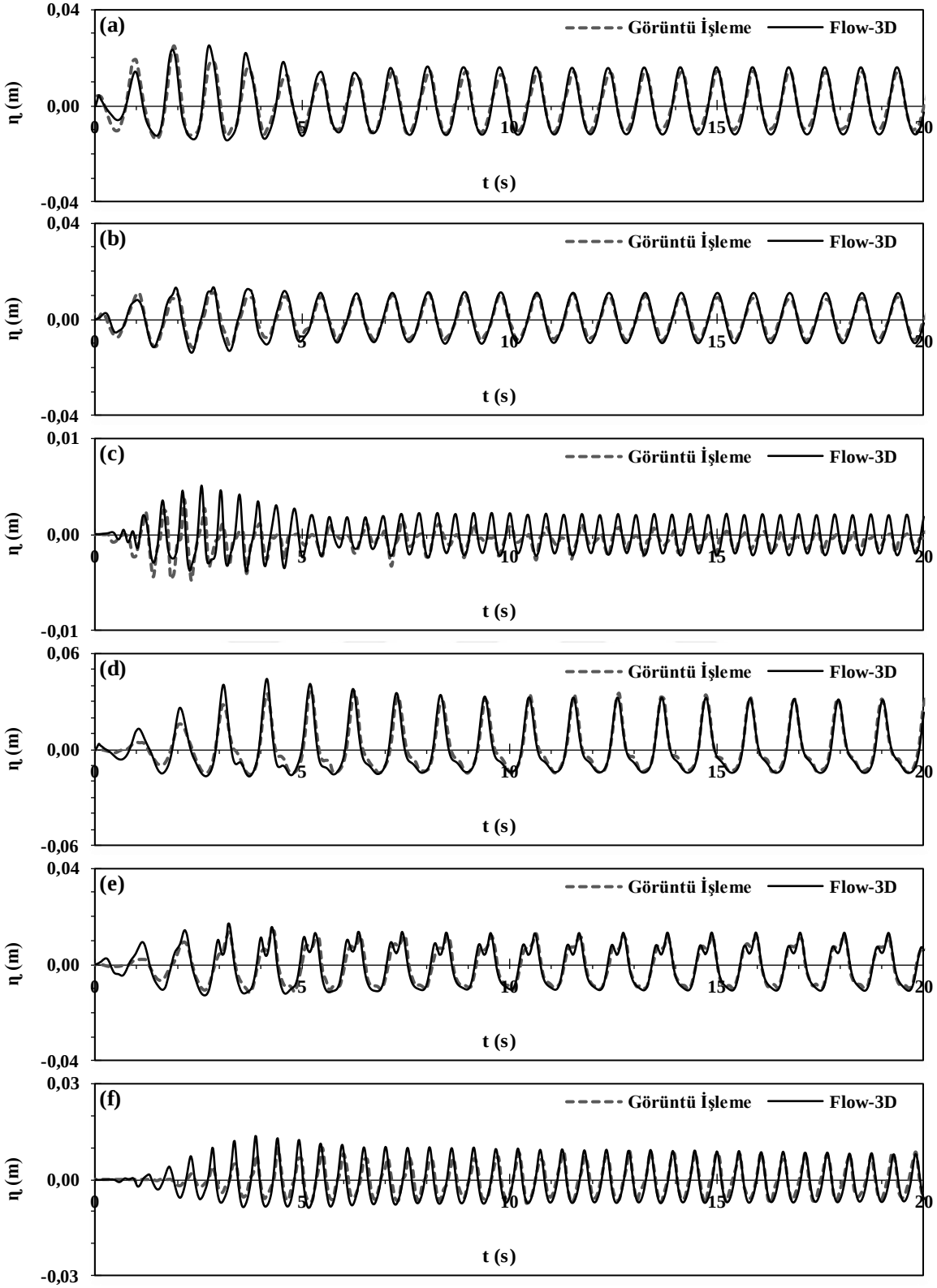


Şekil 4.34. h = 8 cm sıvı derinliğinde ve farklı uyarma frekanslarında (f_e = 0,80 f_1 – 1,10 f_1) maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN) (a) B(10 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda

Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da, görüntü işleme ve sayısal analizle elde edilen verilerin karşılaştırılmalı sonuçları yer almaktadır. Bu grafiklerde h = 6 cm ve h = 8 cm olmak üzere iki farklı sıvı derinliği ve $f_e = 1{,}10\ f_1$ ve $f_e = 0{,}90\ f_1$ olacak şekilde iki farklı uyarma frekansı altında deney tankının P1, P10 ve P20 ölçüm noktalarında sıvı seviyesinin zaman içerisindeki değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da sıvı yüzeyindeki dalgalanma genlikleri ve frekans tepkileri, genel eğilimde bir uyum sergilemesine rağmen, özellikle $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansında P20 ölçüm noktasındaki farklılıklar, sayısal model ve deneysel yöntemlerin potansiyel sınırlılıklarını ve hassasiyet gerektiren alanlarını gözler önüne sermektedir. P20 ölçüm noktasında, dalga yüksekliklerindeki zaman serileri arasında gözlenen farklılıklar, dalga hareketlerinin küçük olduğu noktalarda her iki metodolojinin bu özel durumda nasıl farklı sonuçlar üretebileceğine dair önemli göstergeler sunmaktadır.



Şekil 4.35. h = 6 cm sıvı derinliği ve f_e = 1,10 f_1 uyarma frekansında (a) P1, (b) P10, (c) P20 ve h = 6 cm sıvı derinliği ve f_e = 0,90 f_1 uyarma frekansında (d) P1, (e) P10, (f) P20 noktaları için B(10 - 30) engel diziliminde sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması

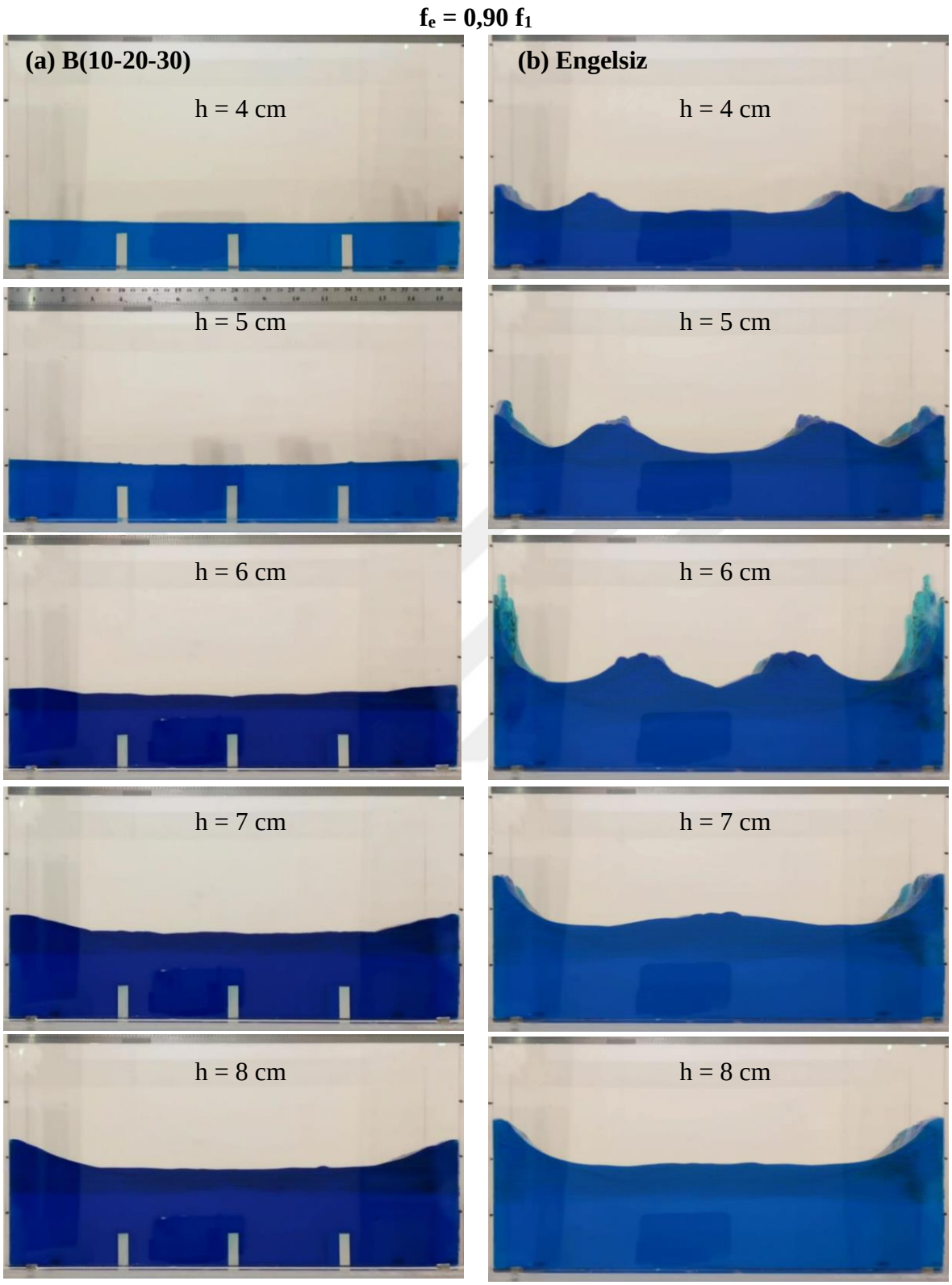


Şekil 4.36. h = 8 cm sıvı derinliği ve $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansında (a) P1, (b) P10, (c) P20 ve h = 8 cm sıvı derinliği ve $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansında (d) P1, (e) P10, (f) P20 noktaları için B(10 - 30) engel diziliminde sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması

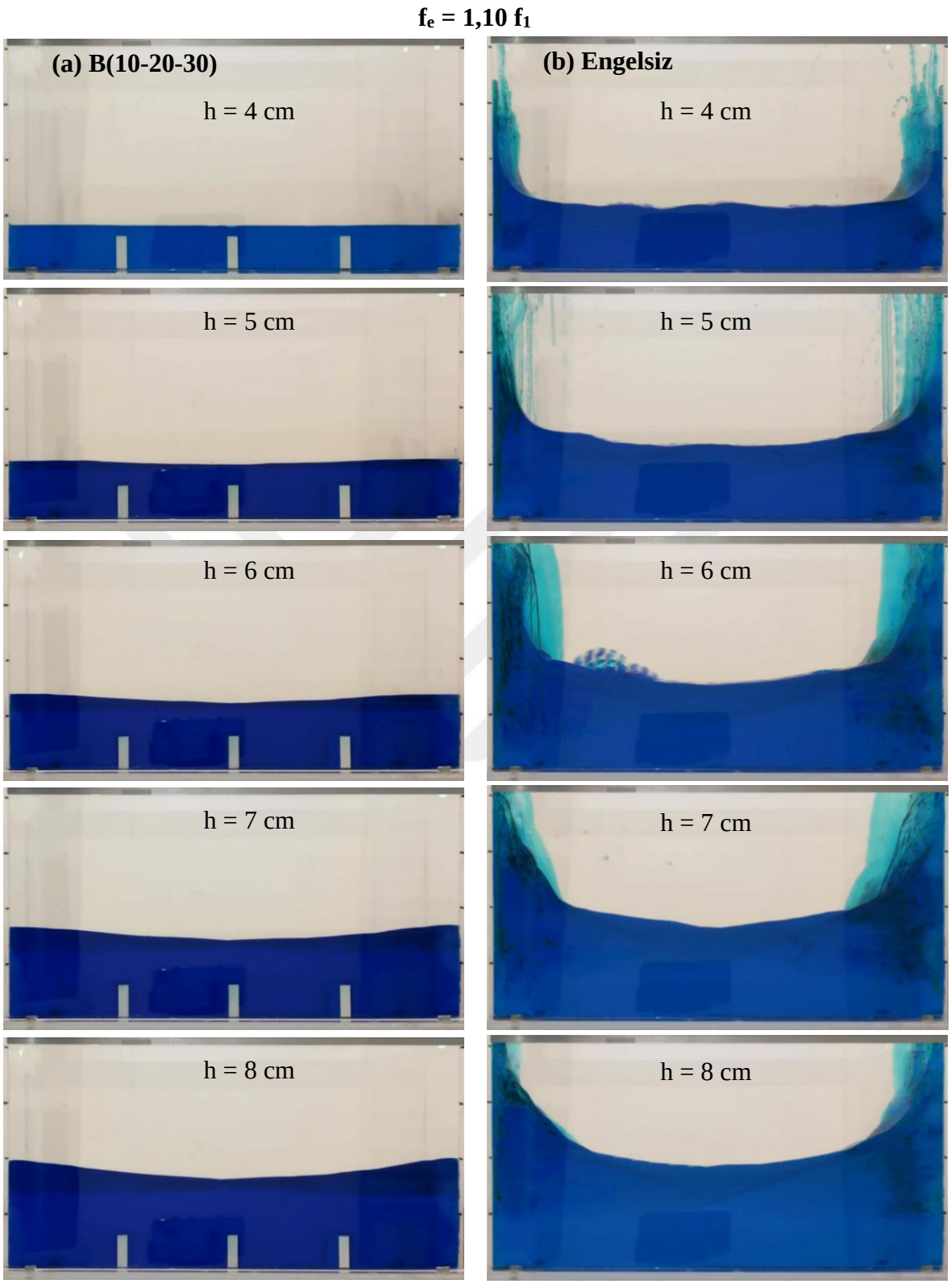
4.7.3. B(10 - 20 - 30) engel diziliminde çalkantı hareketinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde deney tankının 10. cm, 20. cm ve 30. cm'lerine yerleştirilen B(10 - 20 - 30) engel diziliminin çalkantı davranışına etkileri analiz edilmiştir. Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de sırasıyla $f_e = 0{,}90\, f_1$ ve $f_e = 1{,}10\, f_1$ uyarma frekanslarında B(10 - 20 - 30) engel diziliminin çalkantı davranışına etkileri MAKS sonuçları açısından farklı derinlikler (4 cm' den 8 cm' ye kadar) için gösterilmiştir. Şekil 4.37 (b)'de, deney tankında engel bulunmayan durumda, sıvının 4 cm, 5 cm ve 6 cm derinliklerinde yapılan ölçümler sonucunda, MAKS analizlerinde çift tepe formasyonları belirgin olarak görülmektedir. Şekil 4.37 (a)'da verilen B(10 - 20 - 30) engel diziliminin olduğu durumda ise, bu çift tepe formasyonlarının belirginliği azalmış ve dalga profilinin daha düzenli hale geldiği görülmüştür. Şekil 4.37'de ayrıca, sıvı seviyesi 7 cm ve 8 cm olduğunda, hem engel kullanılan hem de engelsiz koşullar altında MAKS sonuçları bakımından benzer bir yapı görülmektedir. Her iki durumda da dalgaların zirveleri belirgin ve düzenli bir tepe ile karakterize edilirken, engellerin varlığı dalga formasyonunu belirgin bir şekilde bozmamıştır. Bununla birlikte engel kullanımı durumunda, maksimum dalga yüksekliklerinde bir miktar azalma gözlenmektedir.

Şekil 4.38'de, tank içerisinde engel bulunmayan durumda farklı sıvı derinlikleri (4 cm – 8 cm) için MAKS sonuçlarında benzer dalga formasyonları görülmektedir. Öte yandan B(10 - 20 - 30) engel diziliminin, incelenen tüm sıvı derinliklerinde dalga formasyonları üzerinde etkili olduğu, engellerin eklenmesiyle dalga yüksekliklerinin azaldığı ve dalga formasyonlarının genel olarak daha düzgün bir yapıya büründüğü anlaşılmaktadır.



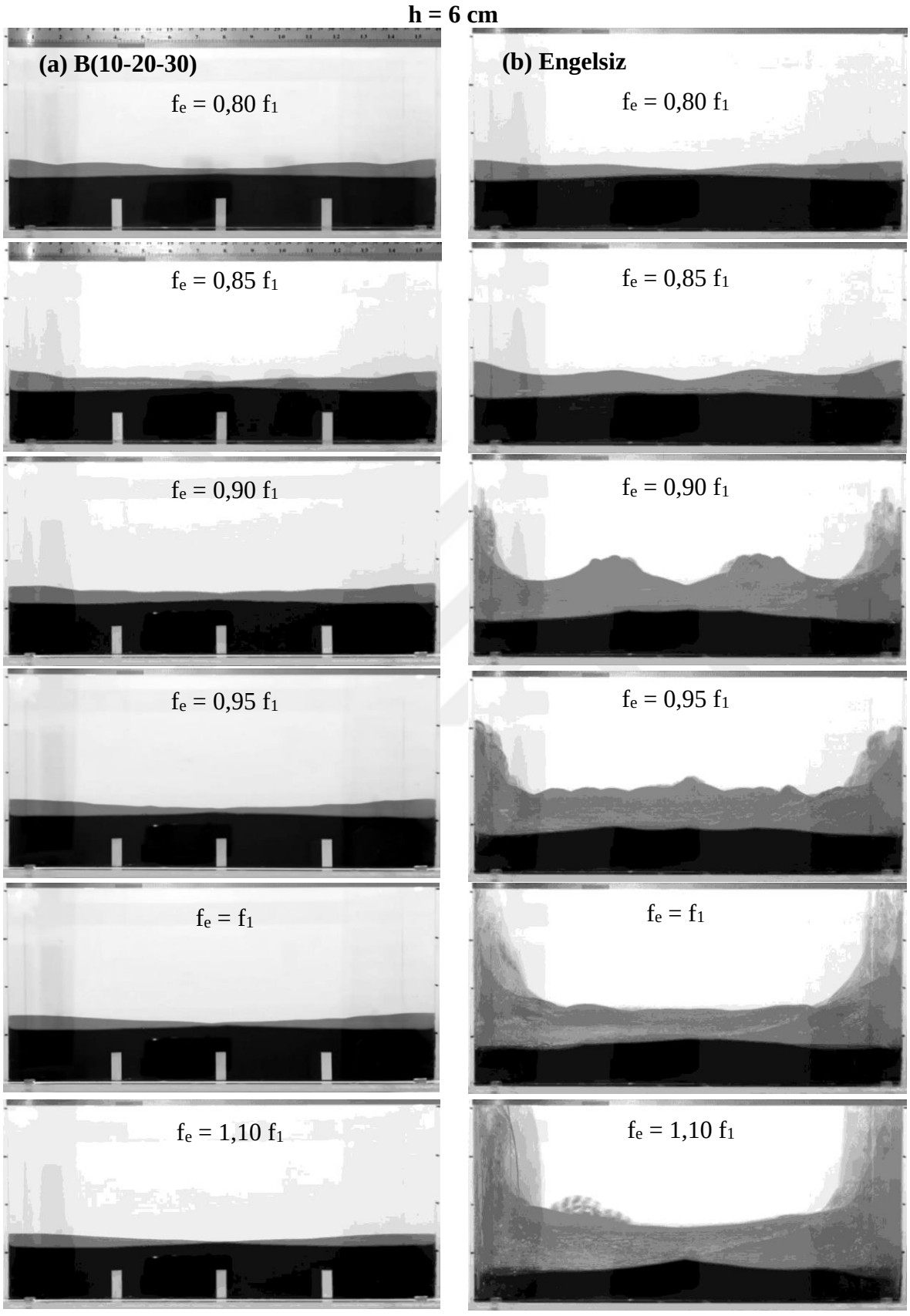
Şekil 4.37. $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansı ve farklı sıvı derinliklerinde (h = 4 cm – 8 cm) maksimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS) (a) B(10 - 20 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda



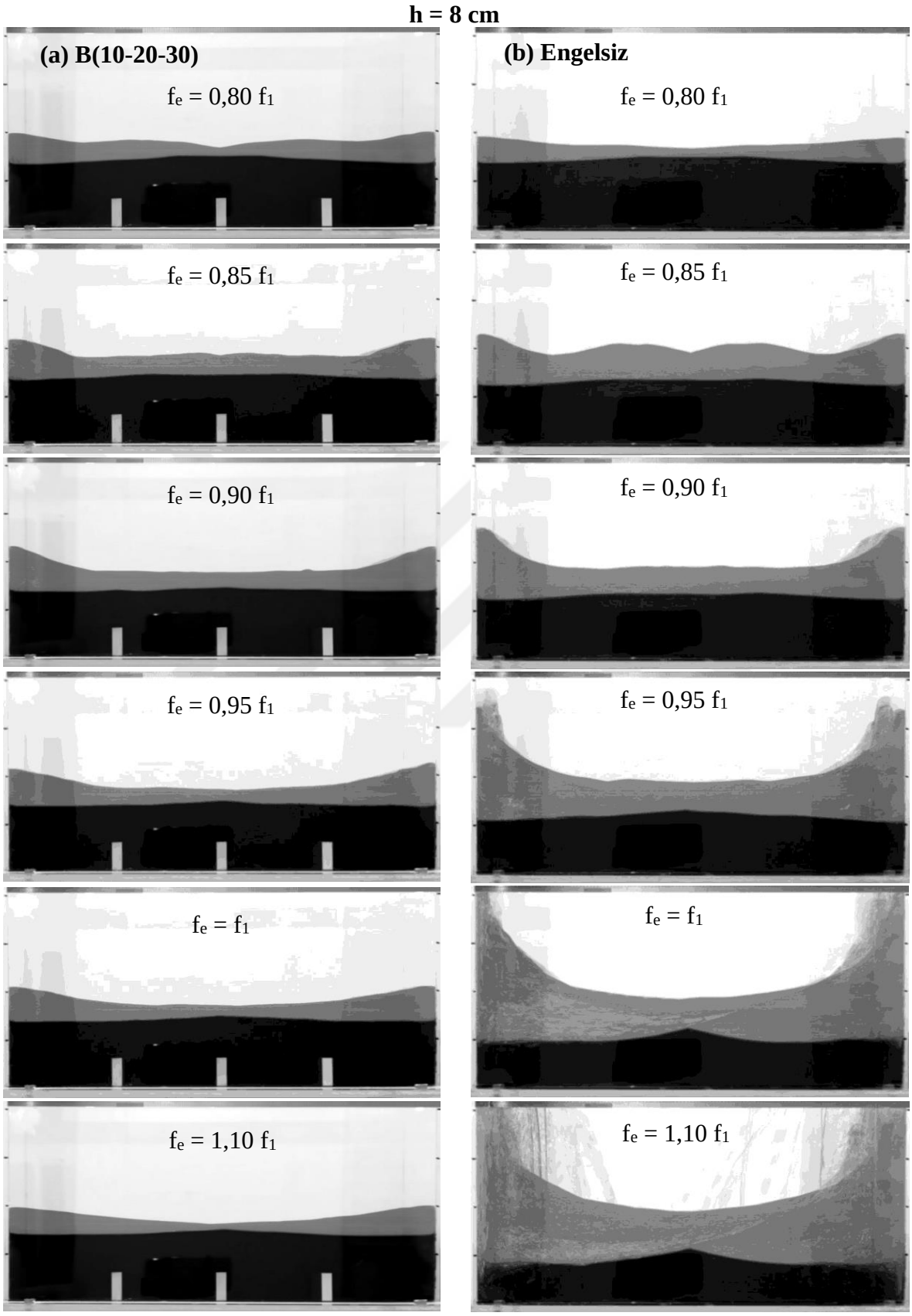
Şekil 4.38. $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansı ve farklı sıvı derinliklerinde (h = 4 cm – 8 cm) maksimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS) (a) B(10 - 20 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda

Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'ta sırasıyla h = 6 cm ve h = 8 cm sıvı derinliklerinde ve değişen uyarma frekanslarında (f_e = 0,80 f_1'den f_e = 1,10 f_1'e kadar) B(10 - 20 - 30) engel düzenlemesinin çalkantı davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 4.39 (a) ve Şekil 4.40 (a)'da engel düzenlemesi durumunda, Şekil 4.39 (b) ve Şekil 4.40 (b)'de ise engelsiz durumda çalkantı hareketi boyunca MAKS-MIN görselleri bir arada verilmiştir. B(10 - 20 - 30) engel düzenlemesi, görece düşük uyarma frekanslarında (f_e = 0,80 f_1 ve f_e = 0,85 f_1), engelsiz duruma kıyasla çalkantı davranışında hafif bir kısıtlama sağlasa da, bu kısıtlamanın oldukça sınırlı bir bölgede kaldığı Şekil 4.39 (a)'da görülmektedir. Şekil 4.39'da bununla birlikte rezonans altı, rezonans ve hemen rezonans üstü uyarma frekanslarında B(10 - 20 - 30) engel düzenlemesinin sıvının çalkantı davranışları üzerindeki etkisinin önemli ölçüde arttığı anlaşılmaktadır. Bu frekanslarda, engel dizilimi, dalga hareketlerini önemli ölçüde sınırlayarak ve dalga genliğini azaltarak sıvının daha stabil bir hareket sergilemesine yardımcı olmuştur.

Şekil 4.40 incelendiğinde, görece düşük uyarma frekansları olan f_e = 0,80 f_1 ve f_e = 0,85 f_1'de B(10 - 20 - 30) engel diziliminin çalkantı davranışlarını sönümlemede önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Şekil 4.40'ta ayrıca f_e = 0,90 f_1 uyarma frekansından başlayarak artan uyarma frekanslarında B(10 - 20 - 30) engel diziliminin çalkantı üzerindeki baskılayıcı etkisinin arttığı gözlenmiştir. Bu uyarma frekanslarında engel diziliminin çalkantı hareketlerini daha fazla sönümlediği ve dalga yüksekliklerini azalttığı anlaşılmaktadır.

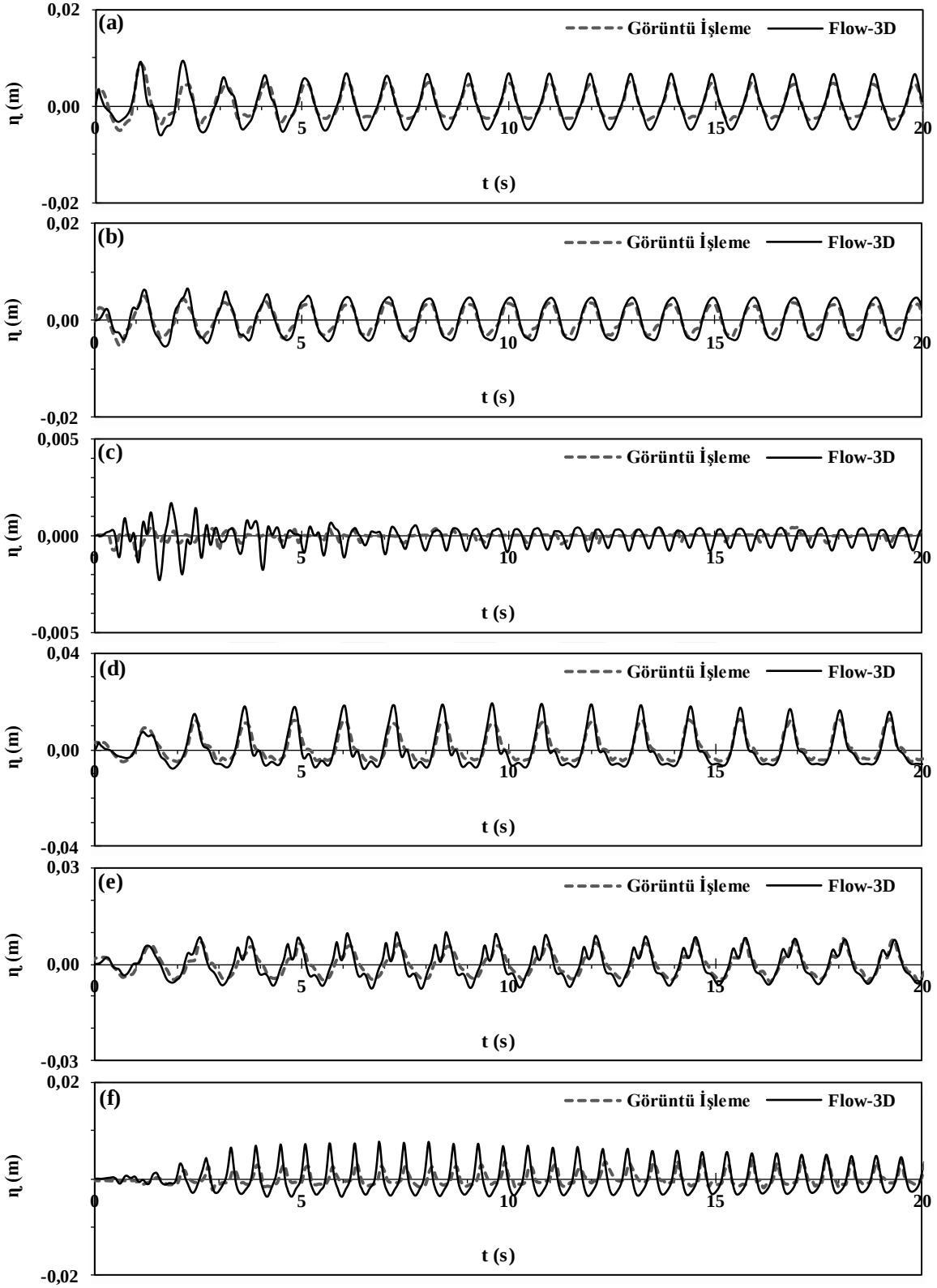


Şekil 4.39. h = 6 cm sıvı derinliğinde ve farklı uyarma frekanslarında (f_e = 0,80 f_1 – 1,10 f_1) maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN) (a) B(10 - 20 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda

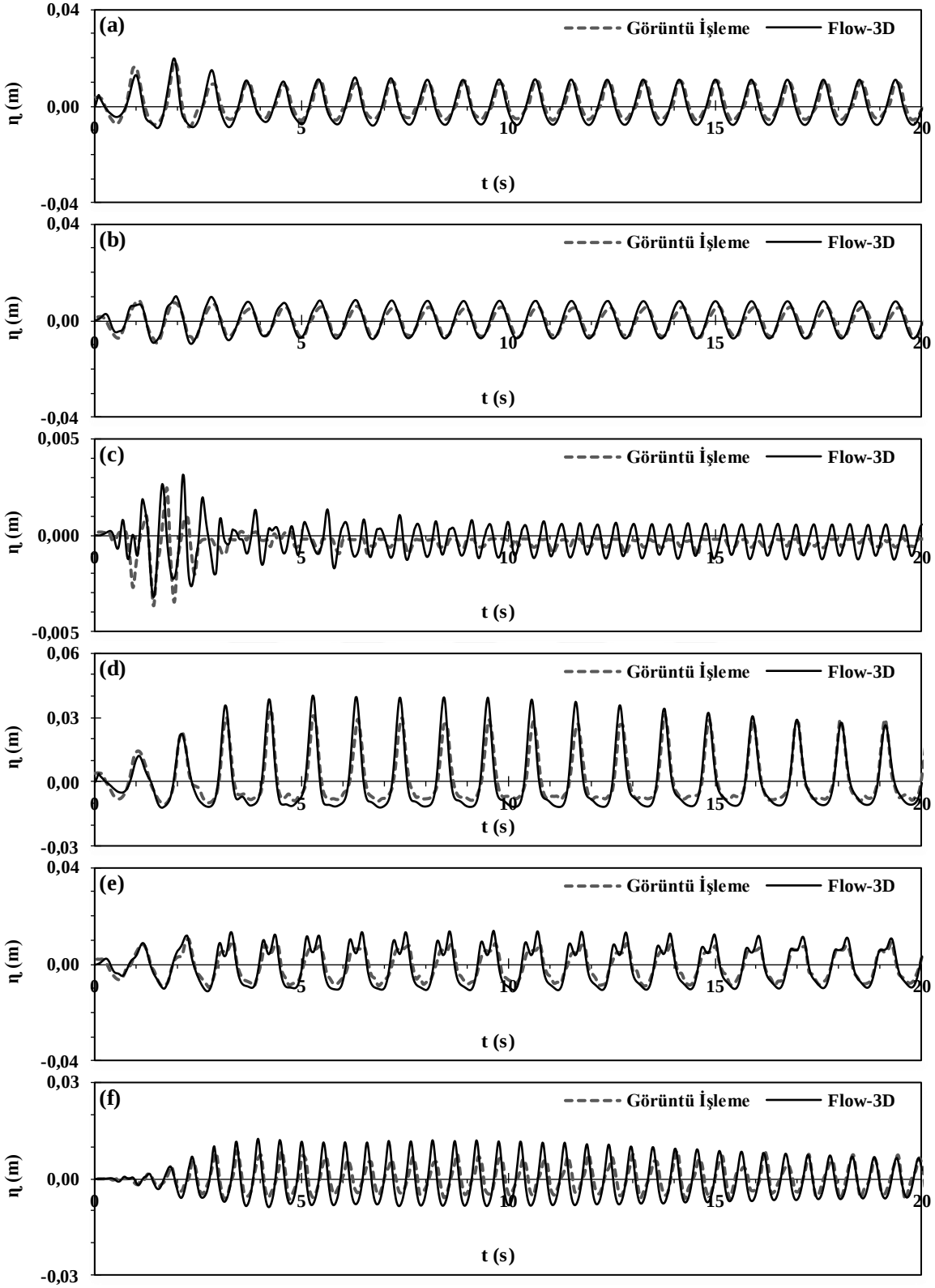


Şekil 4.40. h = 8 cm sıvı derinliğinde ve farklı uyarma frekanslarında (f_e = 0,80 f_1 – 1,10 f_1) maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN) (a) B(10 - 20 - 30) engel varlığında (b) engelin olmadığı durumda

Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'de, h = 6 cm, h = 8 cm olmak üzere farklı sıvı derinliklerinde ve $f_e = 1{,}10\ f_1$, $f_e = 0{,}90\ f_1$ iki farklı uyarma frekansında çalkantı hareketi sonrası dalga yüksekliklerinin zaman içinde nasıl değiştiği deneysel ve sayısal yöntem sonuçlarıyla birlikte gösterilmiştir. Her iki grafik, deneyin üç farklı yatay kesitinde (P1, P10 ve P20) yapılan ölçümleri içermektedir. Şekil 4.41 ve Şekil 4.42 grafiklerinde P1 ve P10 ölçüm noktalarında, deneysel görüntü işleme yöntemi ile FLOW-3D HYDRO sayısal simülasyonu arasında genel bir uyum olduğu görülürken, su seviyelerinin çok fazla değişim göstermediği P20 noktasında elde edilen sonuçlarda ise uyumsuzluklar olduğu anlaşılmaktadır. P1 ve P10 ölçüm noktalarında dalga yükseklikleri zaman içinde benzer desenler ve eğilimler sergilemektedir ki bu durum her iki yöntemin bu ölçüm noktaları için çalkantı davranışlarını tutarlı bir şekilde kaydedebildiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte her iki derinlik (6 cm ve 8 cm) için yapılan ölçümlerde, en kritik uyarma frekansının $f_e = 0{,}90\ f_1$ olduğu anlaşılmaktadır. Bu frekansta, dalga yüksekliklerinin diğer frekanslara kıyasla daha belirgin olduğu ve çalkantı etkilerinin daha şiddetli yaşandığı anlaşılmaktadır. Bu durum $f_e = 0{,}90\ f_1$ frekansının sistemin rezonans frekansına yakın olduğunu ve rezonans benzeri bir etki yaratabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.41. h = 6 cm sıvı derinliği ve f_e = 1,10 f_1 uyarma frekansında (a) P1, (b) P10, (c) P20 ve h = 6 cm sıvı derinliği ve f_e = 0,90 f_1 uyarma frekansında (d) P1, (e) P10, (f) P20 noktaları için B(10 - 20 - 30) engel diziliminde sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması



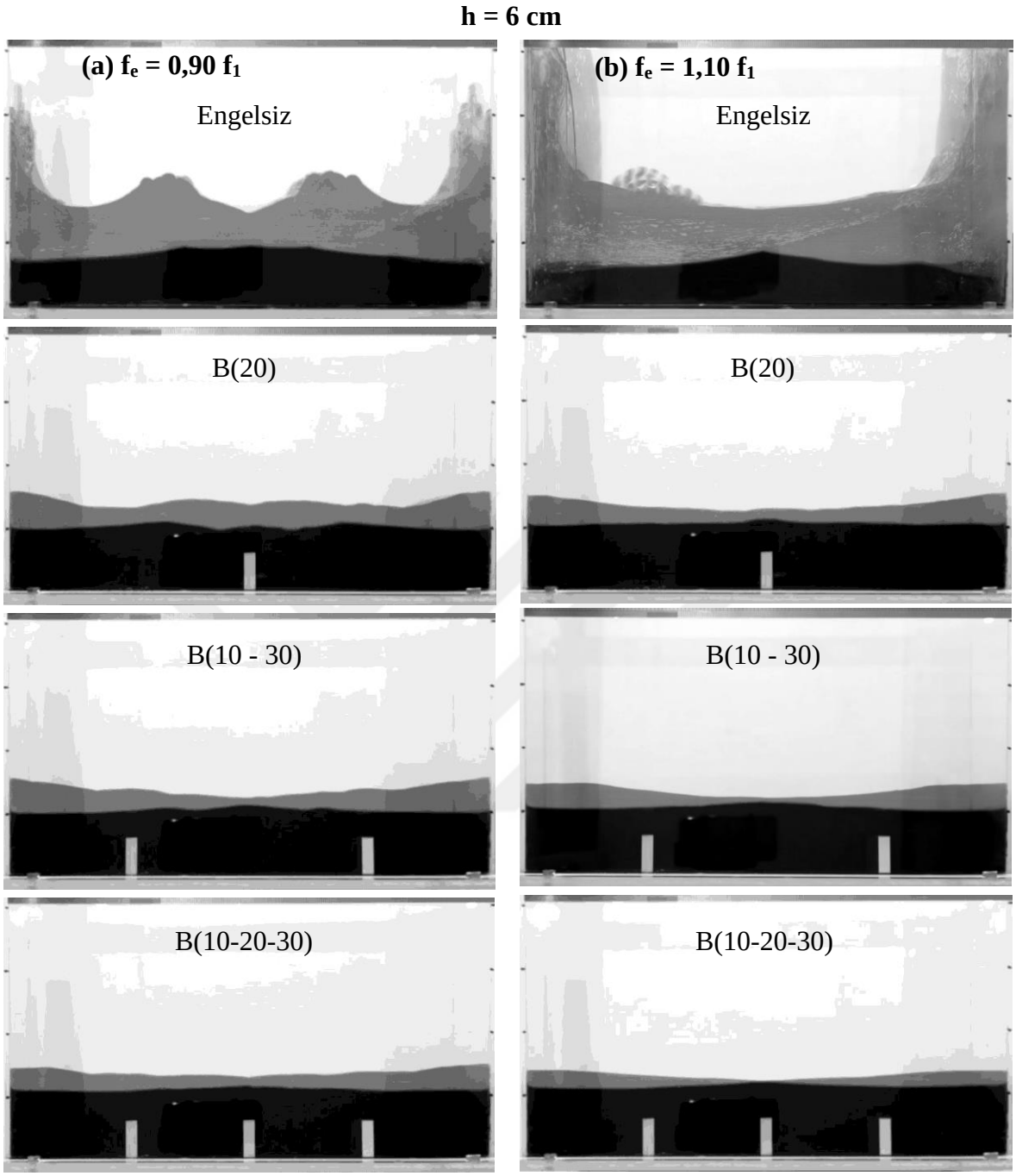
Şekil 4.42. h = 8 cm sıvı derinliği ve f_e = 1,10 f_1 uyarma frekansında (a) P1, (b) P10, (c) P20 ve h = 8 cm sıvı derinliği ve f_e = 0,90 f_1 uyarma frekansında (d) P1, (e) P10, (f) P20 noktaları için B(10 - 20 - 30) engel dizileminde sıvı yüksekliği değişiminin deneysel ve sayısal yöntem ile karşılaştırılması

4.7.4. B(20) , B(10 - 30) ve B(10 - 20 - 30) engel dizilimlerinin çalkantı hareketi üzerine etkilerinin karşılaştırmalı analizi

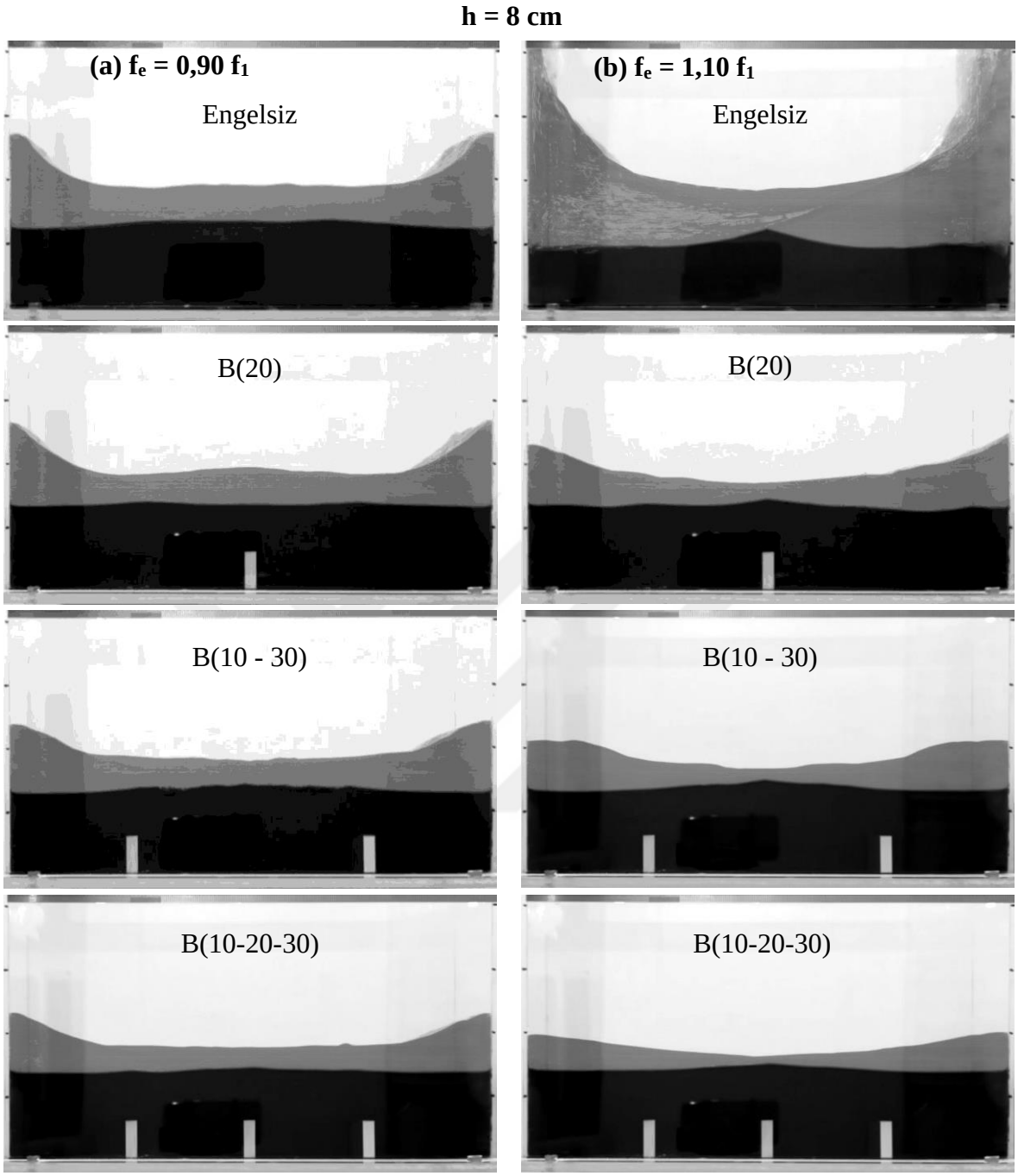
Çalışmanın bu bölümünde sıvı derinliğinin 6 cm ve 8 cm olduğu durumda iki farklı uyarma frekansı ($f_e = 0{,}90\ f_1$ ve $f_e = 1{,}10\ f_1$) altında çalkantı hareketi incelenmiştir. Bu koşullar altında hem engelsiz durum hem de B(20), B(10 - 30) ve B(10 - 20 - 30) farklı engel dizilimleri için MAKS-MIN grafikleri Şekil 4.43 ve Şekil 4.44'te gösterilmiştir.

Şekil 4.43'te, hem $f_e = 0{,}90\ f_1$ hem de $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekanslarında, B(20), B(10 - 30) ve B(10 - 20 - 30) engel dizilimlerinin çalkantı hareketleri üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. Her iki uyarma frekansında da engel dizilimlerinin, engelsiz duruma kıyasla dalga genliklerini azaltarak çalkantı davranışlarını sönümlediği görülmektedir. Bu durum incelenen engel dizilimlerinin, ilgili sıvı derinliği ve uyarma frekanslarında, çalkantı hareketini kısıtlamada, etkili olduğunu kanıtlamaktadır.

B(20), B(10 - 30), B(10 - 20 - 30) engel dizilimlerinin h = 8 cm sıvı derinliği ve $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansı altında çalkantı hareketini kısıtlamada benzer davranışlar sergilediği Şekil 4.44 (a)'da verilen MAKS-MIN grafiklerinden anlaşılmaktadır. İlgili uyarma frekansında, incelenen engel dizilimlerinin, engelsiz durumun çalkantı davranışlarına kıyasla belirgin bir iyileştirme sağlamadığı görülmektedir. Buna karşın $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansı altında engel düzenlemelerinin çalkantı hareketlerini etkin bir şekilde kısıtladığı Şekil 4.44 (b)'de verilen MAKS-MIN sonuçlarından çıkarılmaktadır. İncelenen engel dizilimleri içerisinde, B(10 - 20 - 30) düzenlemesi dalga yüksekliklerini en fazla azaltan başka bir deyişle çalkantı hareketini en iyi kısıtlayan dizilim olarak öne çıkmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde genellikle birden fazla engelin çalkantı hareketi üzerindeki azaltıcı etkisinin, tek bir engelin etkisinden daha iyi olduğu ve Chu ve diğerlerinin [12] çalışmasıyla benzer sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.43. h = 6 cm sıvı derinliğinde farklı engel dizilimlerinin (a) $f_e = 0{,}90\ f_1$ ve (b) $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekanslarında maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN)



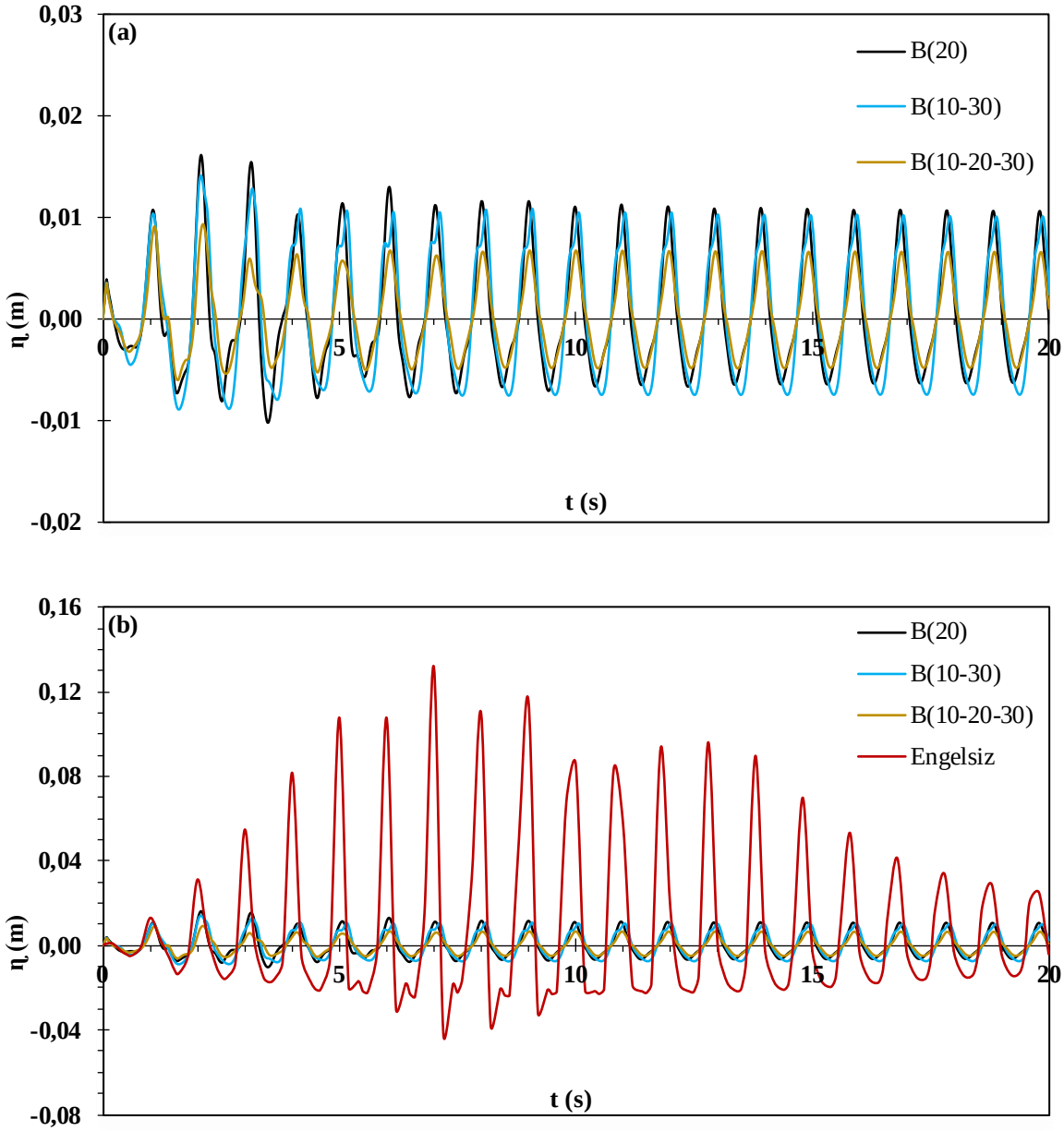
Şekil 4.44. h = 8 cm sıvı derinliğinde farklı engel dizilimlerinin (a) $f_e = 0{,}90\ f_1$ ve (b) $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekanslarında maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimleri (MAKS-MIN)

Deney tankının 6 cm sıvı derinliğine sahip olduğu durum için, $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansı altında P1 noktasında meydana gelen seviye değişiminin sayısal simülasyon sonuçları Şekil 4.45'te verilmiştir. Şekil 4.45 (a)'da B(20), B(10 - 30) ve B(10 - 20 - 30) engel dizilimlerinin sıvı seviyesi değişimleri üzerindeki etkileri incelenmiş, Şekil 4.45 (b)'de ise bu dizilimlerin engelsiz durum ile karşılaştırılması yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre B(10 - 20 - 30) engel diziliminin, incelenen uyarma frekansı ve sıvı derinliğinde, çalkantı hareketlerini en etkili şekilde sınırlandırdığı anlaşılmaktadır. Şekil 4.45 (b)'de ayrıca engelsiz durum ile kıyaslandığında, tüm engel dizilimlerinin dalga hareketlerinin şiddetini ve genliklerini önemli mertebelerde kısıtladığı görülmektedir. Bu bulgular, B(10 - 20 - 30) diziliminin, çalkantı hareketini sönümlemede diğer dizilimlere karşın, önemini göstermektedir.

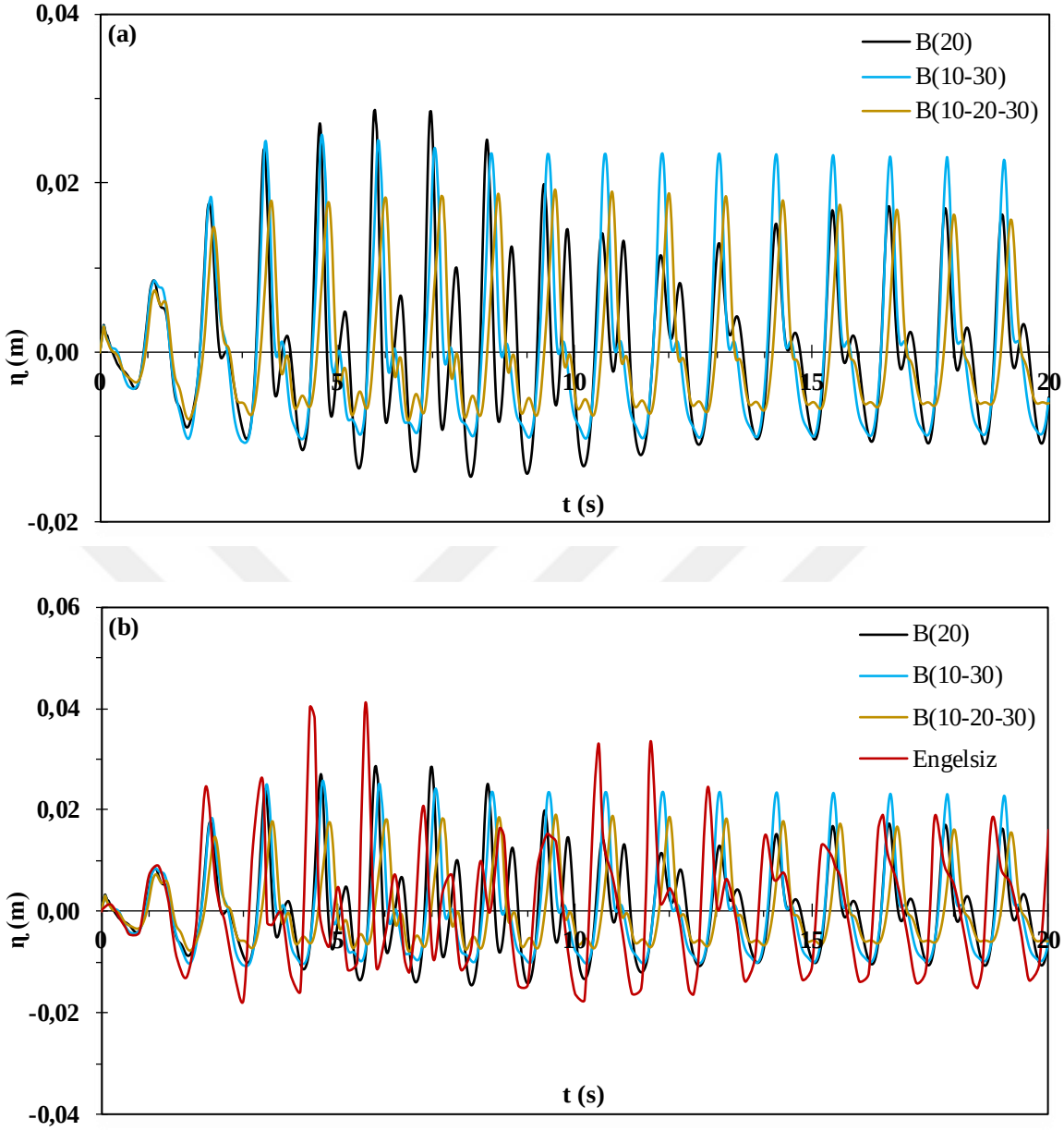
Şekil 4.46, $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansında, deney tankında 6 cm derinlikte sıvı bulunan durum için, P1 noktasındaki seviye değişimlerini gösteren sayısal analiz sonuçlarını içermektedir. Şekil 4.46 (a)'da B(20), B(10 - 30) ve B(10 - 20 - 30) engel dizilimlerinin çalkantı hareketi üzerinde etkilerinin sonuçları verilirken, Şekil 4.46 (b)'de ise bu dizilimlerin engelsiz durumla karşılaştırmalı sonuçları bir arada sunulmuştur. Bu uyarma frekansı ve sıvı derinliği için incelenen engel düzenlemeleri arasında, B(10 - 20 - 30) engel diziliminin, çalkantı hareketlerinin büyük bir bölümünde en etkili sönümlemeyi sağladığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte bu uyarma frekansı ve sıvı derinliği koşullarında incelenen engel dizilimlerinin, çalkantı hareketlerini kısıtlamada tam bir başarı gösteremediği, ancak belirli bir düzeyde sınırlandırdığı görülmektedir.

Şekil 4.47'de, 8 cm sıvı derinliğine sahip deney tankının $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansı altında ve farklı engel dizilimlerinde çalkantı hareketi etkilerini incelemek için P1 noktasında yapılan ölçümlerin sayısal sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.47 (a)'da B(20), B(10 - 30), ve B(10 - 20 - 30) engel dizilimlerinin çalkantı hareketini ne derece sönümlediği, Şekil 4.47 (b)'de ise bu dizilimlerin engelsiz bir durumla nasıl bir kontrast oluşturduğu sunulmuştur. Şekil 4.47'de verilen grafiklerden elde edilen bulgular, Şekil 4.45'e benzer bir şekilde ele alınan tüm engel dizilimlerinde çalkantı hareketini etkili bir şekilde bastırdığını göstermektedir. Özellikle B(10 - 20 - 30) diziliminin, çalkantıyı sınırlamada üstün bir başarı gösterdiği görülmektedir.

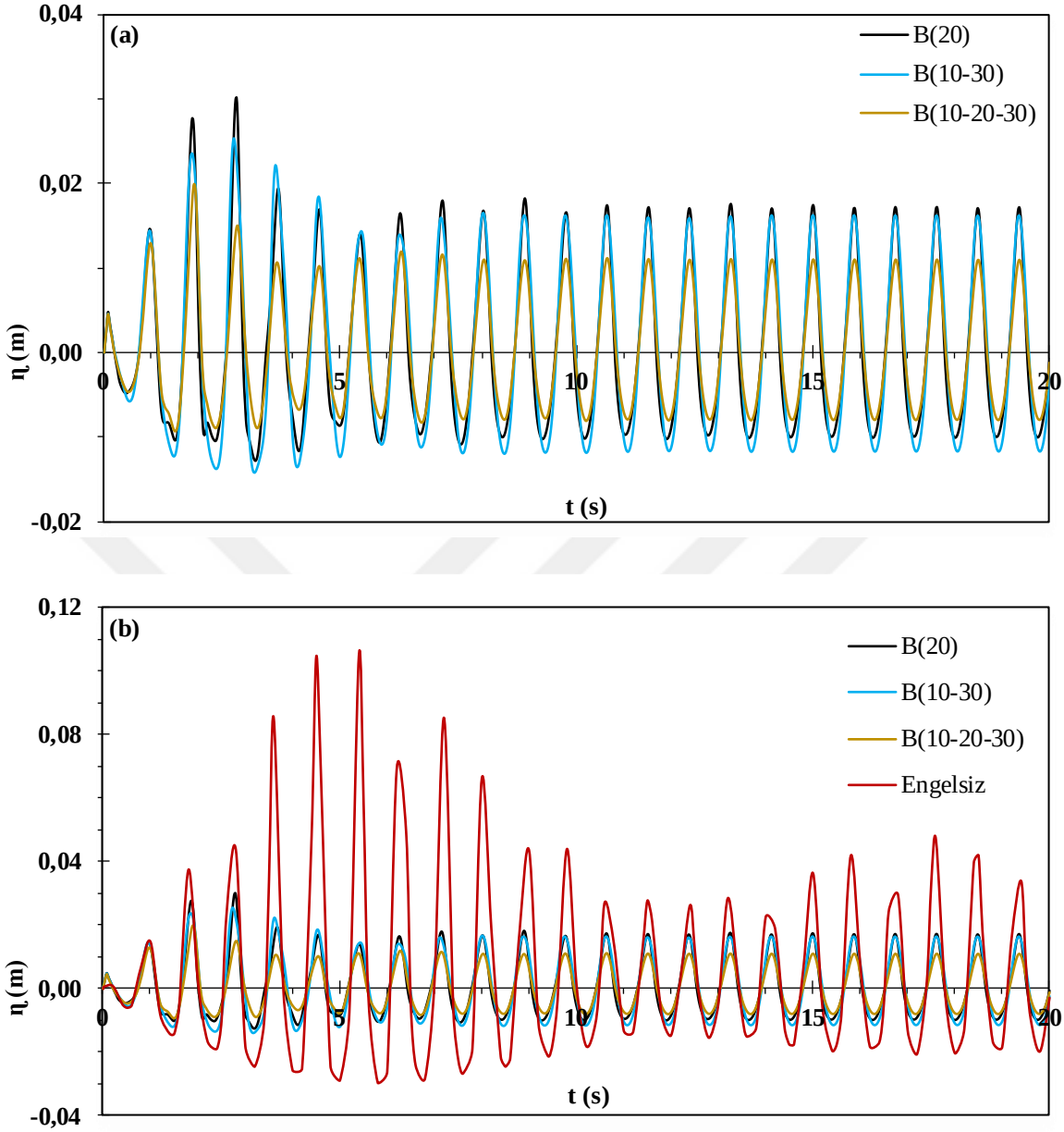
Şekil 4.48'de, $f_e = 0{,}90\ f_1$ uyarma frekansı altında, deney tankının 6 cm derinlikte sıvı içerdiği durum için, P1 noktasındaki seviye değişimlerini gösteren sayısal analiz sonuçları verilmiştir. B(20), B(10 - 30), B(10 - 20 - 30) engel düzenlemelerinin engelsiz durum ile karşılaştırılması sonucunda, çalkantı hareketini önemli ölçüde kısıtlayamadığı görülmektedir. Kısacası bu engel dizilimlerinin, ilgili derinlik ve uyarma frekansında çalkantı hareketini bastırmada sınırlı bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.



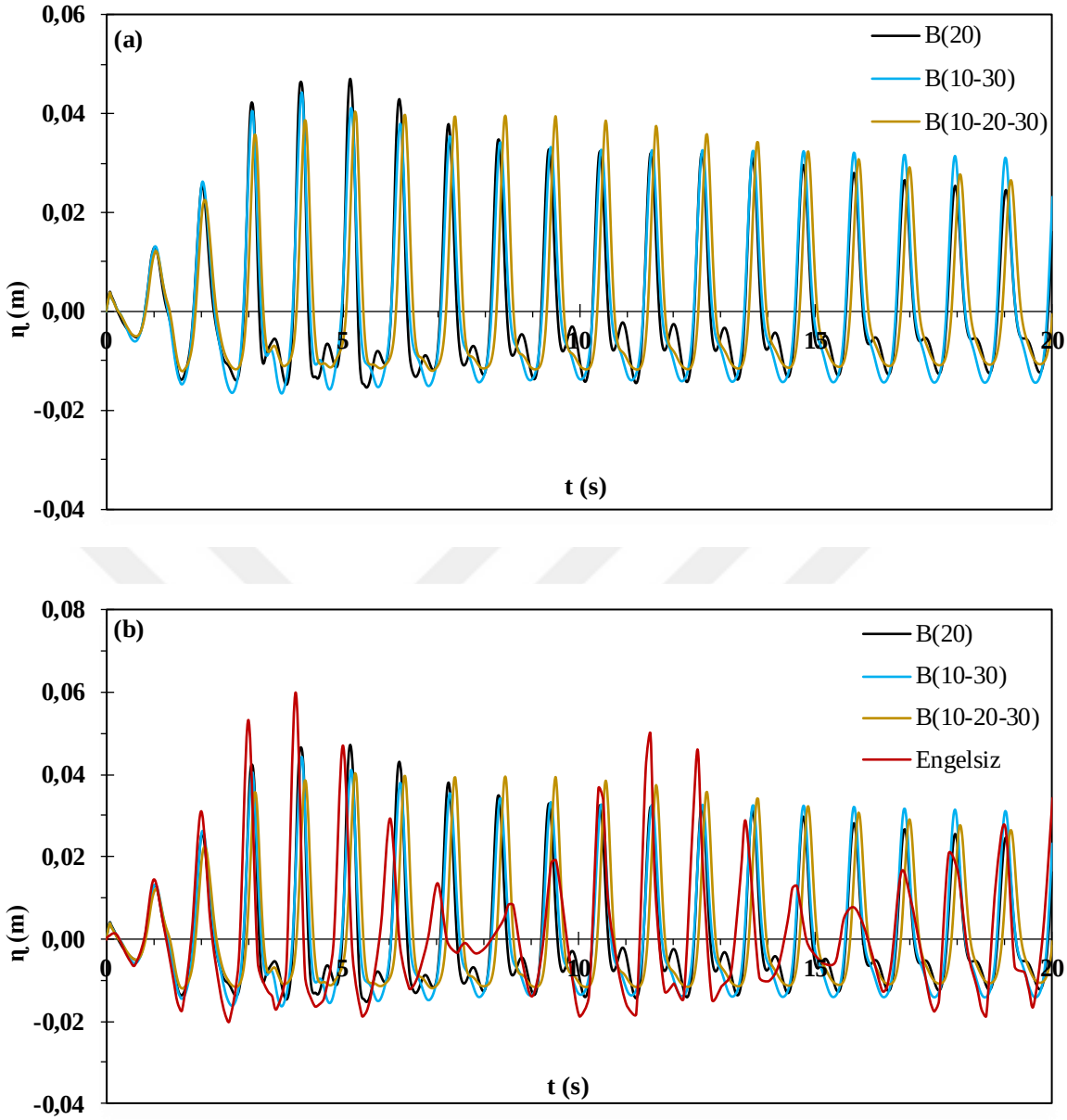
Şekil 4.45. h = 6 cm sıvı derinliği için $f_e = 1{,}10\ f_1$ uyarma frekansı altında (a) farklı engel dizilimlerinde (b) farklı engel dizilimleri ve engelsiz durumda P1 noktasında sıvı seviyesi değişiminin sayısal olarak incelenmesi



Şekil 4.46. h = 6 cm sıvı derinliği için f_e = 0,90 f_1 uyarma frekansı altında (a) farklı engel dizilimlerinde (b) farklı engel dizilimleri ve engelsiz durumda P1 noktasında sıvı seviyesi değişiminin sayısal olarak incelenmesi



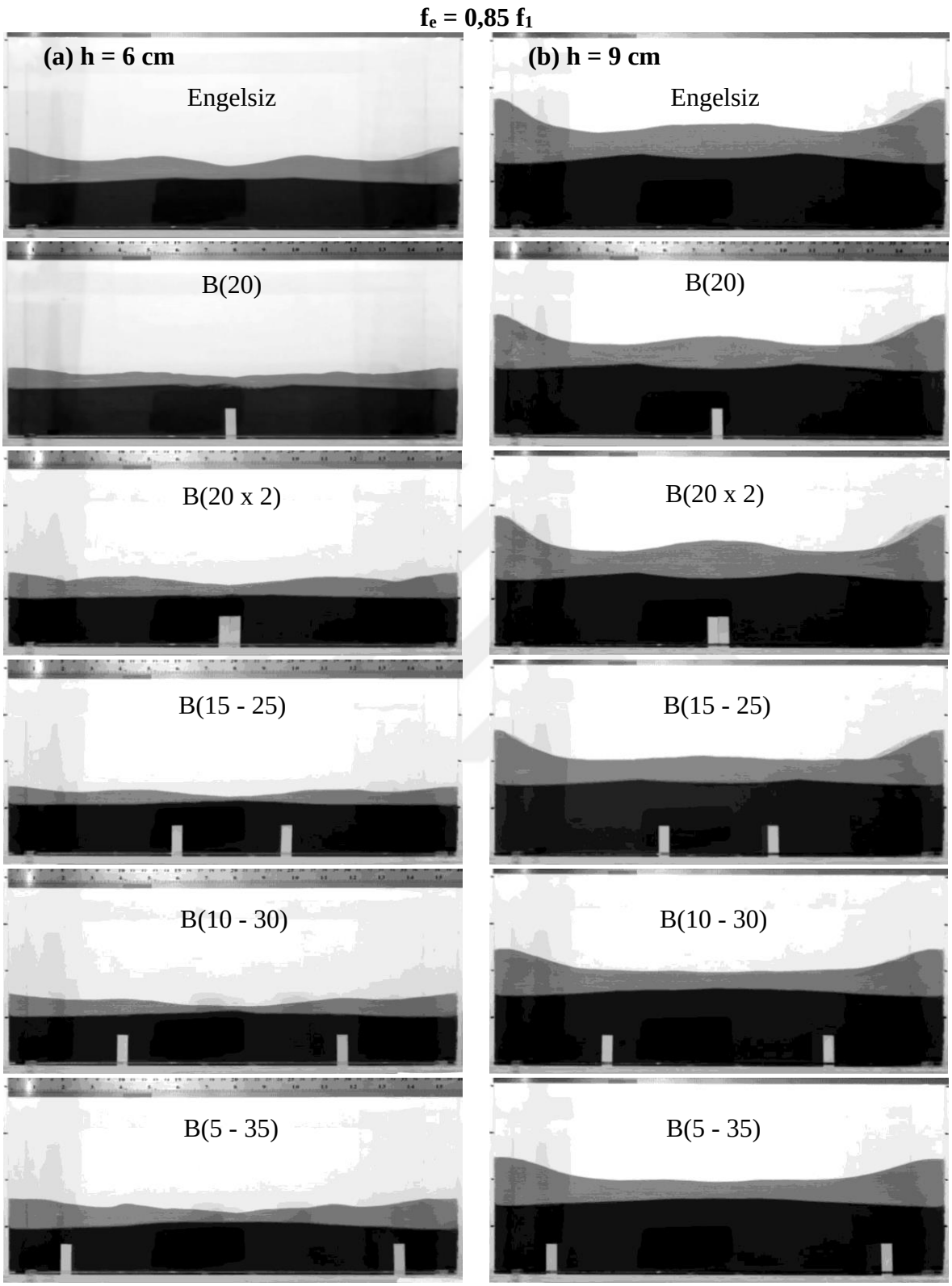
Şekil 4.47. h = 8 cm sıvı derinliği için f_e = 1,10 f_1 uyarma frekansı altında (a) farklı engel dizilimlerinde (b) farklı engel dizilimleri ve engelsiz durumda P1 noktasında sıvı seviyesi değişiminin sayısal olarak incelenmesi



Şekil 4.48. h = 8 cm sıvı derinliği için f_e = 0,90 f_1 uyarma frekansı altında (a) farklı engel dizilimlerinde (b) farklı engel dizilimleri ve engelsiz durumda P1 noktasında sıvı seviyesi değişiminin sayısal olarak incelenmesi

4.7.5. İkili engel yerleşimlerinin sıvı çalkantısı davranışları üzerindeki etkisinin incelenmesi

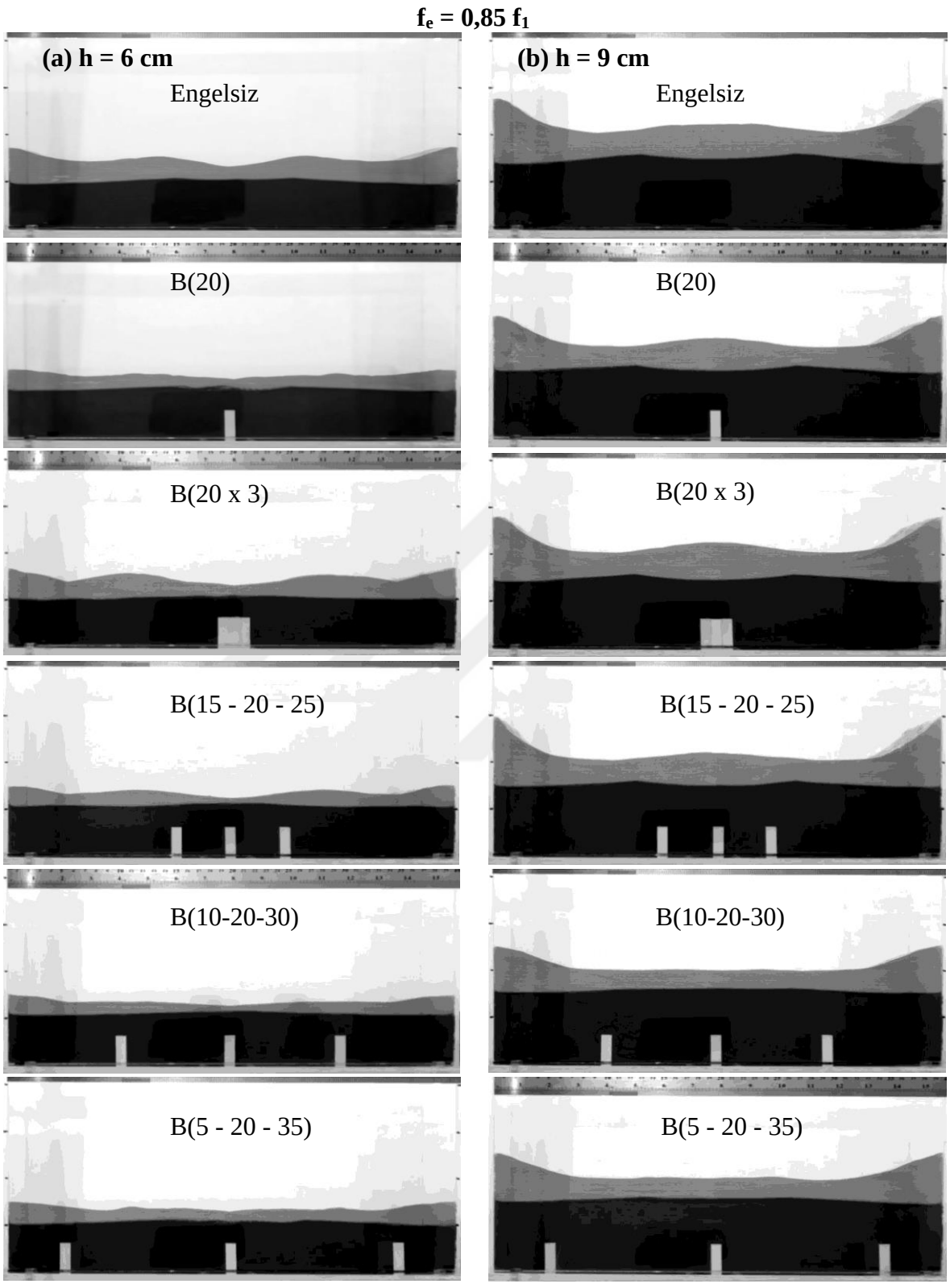
Deney tankında engel bulunmayan durum, orta noktada tek engel bulunan durum (B(20)) ve deney tankının orta noktasından başlayarak tank duvarlarına doğru giderek birbirinden uzaklaşan engellerin h = 6 cm ve h = 9 cm olmak üzere iki farklı sıvı derinliği ve deney tankının $f_e = 0{,}85\ f_1$ uyarma frekansı altında sıvı çalkantısına etkileri MAKS sonuçları açısından Şekil 4.49'da gösterilmiştir. Çalışmada çift engel dizilimi olarak "B(20 x 2) ", "B(15 - 25)", "B(10 - 30)", ve "B(5 - 35)" düzenlemeleri ele alınmıştır. Bu çalışmada, $f_e = 0{,}85\ f_1$ uyarma frekansının tercih edilmesinin nedeni, rezonansın altındaki koşullarda çift engel dizilimlerinin çalkantı davranışına olan etkilerini inceleyebilmektir. Sonuçlar incelendiğinde, Şekil 4.49 (a)'da, engelsiz durum ve farklı engel dizilimlerinin MAKS - MIN verileri açısından benzer sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Deney tankının h = 6 cm sıvı derinliğinde olduğu ve $f_e = 0{,}85\ f_1$ uyarma frekansı altında yapılan deneylerde, "B(15 - 25)", "B(10 - 30)" ve "B(5 - 35)" çift engel dizilimlerinin etkileri karşılaştırıldığında, MAKS verilerine göre en etkili dağılımın, tank merkezine daha yakın ve dengeli konumlandırılan "B(15 - 25)" engel yerleşimi olduğu belirlenmiştir. Sonuçların çift engel diziliminin çalkantı davranışına etkilerini inceleyen Goudarzi ve Danesh [142] ile Ma ve diğerlerinin [23] çalışmalarından elde edilen sonuçlarla benzer bulgular gösterdiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte bu şartlar altında B(20) engel diziliminin, belirlenen uyarma frekansı ve sıvı yüksekliğinde çalkantı hareketini etkili bir şekilde yönetmek için yeterli olduğu görülmektedir. Şekil 4.49 (b)'den görüleceği üzere sıvı derinliği artırıldığında, ele alınan tüm engel dizilimlerinin çalkantı hareketini bastırmadaki etkinliğinin düştüğü anlaşılmıştır. Bu durumun, artan sıvı derinliğiyle birlikte engel dizilimlerinin çalkantı üzerindeki kontrolünün zayıfladığının göstergesi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.49. $f_e = 0{,}85\ f_1$ uyarma frekansında (a) h = 6 cm ve (b) h = 9 cm sıvı derinliklerinde ikili engel yerleşimlerinin maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimlerine (MAKS-MIN) etkisi

4.7.6. Üçlü engel yerleşimlerinin sıvı çalkantısı davranışları üzerindeki etkisinin incelenmesi

"Engelsiz" ve "B(20)", "B(20 x 3)", "B(15 - 20 - 25)", "B(10 - 20 - 30)", "B(5 - 20 - 35)" engel koşullarının sıvı çalkantı hareketi üzerindeki etkilerinin anlaşılabilmesi için MAKS verileri Şekil 4.50'de verilmiştir. Çalışmalar h =6 cm ve h =9 cm olmak üzere iki ayrı sıvı yüksekliğinde ve deney tankını uyarma frekansı olarak $f_e = 0{,}85\, f_1$ seçilerek gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.50 (a) incelendiğinde özellikle B(20) ve B(10 - 20 - 30) engel dizilimlerinin, ilgili uyarma frekansı ve sıvı yüksekliği dikkate alındığında, çalkantı hareketini etkili bir şekilde kontrol edebildiği anlaşılmaktadır. Engellerin kenara yaklaştıkça etkilerinin bir miktar azaldığı orta bölgede daha dengeli yerleştirilmelerinin daha iyi sonuç verdiği gözlenmektedir. Diğer yandan, Şekil 4.50 (b)'de sıvı derinliği arttıkça engel dizilimlerinin çalkantıyı kontrol etme etkinliğinin azaldığı görülmüştür. Bu gözlem, artan derinlikle beraber engellerin çalkantı hareketini sınırlama kapasitesinin azaldığını göstermektedir. Bu durum engel dizilimlerinin çalkantı hareketi üzerindeki etkisinin sıvı yüksekliğine bağlı olarak değişkenlik gösterebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.50. f_e = 0,85 f_1 uyarma frekansında (a) h = 6 cm ve (b) h = 9 cm sıvı derinliklerinde üçlü engel yerleşimlerinin maksimum ve minimum sıvı seviyesi değişimlerine (MAKS-MIN) etkisi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu doktora tez çalışması, çalkantı hareketi davranışının anlaşılması üzerine deneysel, analitik ve sayısal olmak üzere üç farklı yöntem ile detaylı bir inceleme sunmaktadır. Çalışma kapsamında deneysel çalışmalar dikdörtgen bir sıvı tankında gerçekleştirilmiştir. Çalkantı hareketi gibi, deneysel verilerin yetersiz olduğu problemlerde, sayısal modellerin test edilerek çalkantının karmaşık hareketlerinin anlaşılması için ilave deneysel çalışmalar gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Tanktaki çalkantı hareketi sırasında su seviyesindeki zamana bağlı değişimler, görüntü işleme tekniklerinin kullanılmasıyla elde edilen video görüntüleri analiz edilerek incelenmiştir. Bu sayede, deneysel ölçümler yapılarak suyun seviye değişimleri detaylı bir şekilde gözlemlenebilmiştir. Böylece tank içerisinde istenilen her noktada ölçüm yapılarak hem zaman hem de maliyet açısından tasarruf sağlanabilmektedir. Bu çalışmanın dikkat çeken özelliklerinden biri, Kocaman [41] tarafından geliştirilen bir kod kullanılarak, cep telefonu ile kaydedilen görüntüler üzerinden, çalkantı hareketine bağlı olarak su seviyesindeki zamana bağlı değişimlerin, kesitin herhangi bir noktasında tespit edilebilmesidir. Elde edilen bulgular, deneysel çalışmaların genişletilmesi çalkantı hareketinin kontrolü veya kısıtlanması için doğrudan uygulanabilir stratejilerin geliştirilmesi ve görüntü işleme tekniklerinin diğer mühendislik uygulamalarına uyarlanması yönünde önemli rol oynamaktadır.

Çalışma kapsamında deney tankında hem farklı engel dizilimlerinin bulunduğu hem de engel bulunmayan durumlar için çalkantı davranışının sayısal analizleri, FLOW-3D HYDRO yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonucu elde edilen sonuçların görüntü işleme teknikleriyle elde edilen deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Sonuç olarak çalışma kapsamında sayısal modelleme için kullanılan FLOW-3D HYDRO yazılımı sayesinde sıvı dinamiklerinin karmaşık yapısı ve çalkantı hareketinin sıvı yüzeyi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde simüle edilebilmiştir. Böylece gerçek dünya koşullarını yansıtan sonuçlar elde edilerek sıvı yüzeyinin dinamik değişimlerinin, hem lokal hem de genel ölçekte, doğru bir şekilde modellenmesi sağlanmıştır.

Çalkantı hareketinin davranışının anlaşılmasında çalkantı dinamiğinin karmaşık matematiğini basitleştirerek, daha kolay analiz edilebilir hale getirmesi bakımından lineer teori çok önemlidir. Bu sayede çalkantı hareketlerinin hızlı bir şekilde değerlendirilmesi mümkün olmaktadır. Özellikle düşük uyarma frekansı ve genliğine sahip hareketlerde, lineer teori etkili bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bununla birlikte özellikle yüksek uyarma frekansları ve genliklerinde ise lineer teorinin bazı sınırlamalara sahip olduğu da bilinmektedir. Bu şartlar altında yöntemin çalkantı hareketlerinin tüm yönlerini kapsayamayabileceği anlaşılmıştır. Kısacası lineer teori bahsi geçen koşullar altında, bazı doğrusal olmayan etkileşimlerin ve karmaşık rezonans olayların göz ardı edilerek analizin eksik veya yetersiz kalmasına yol açabilmektedir. Bununla birlikte, literatürde bazı çalışmalarda modifiye edilmiş lineer teori ile bu uyumsuzlukların önüne geçilebileceği belirtilmiştir. Ancak bu tez çalışmasında düşük genlik ve uyarma frekansına sahip hareketler incelendiğinden bu yöntemlere başvurulmamıştır. Sonuç olarak, lineer teori çalkantı hareketinin anlaşılmasında önemli bir araçtır. Fakat problemin doğasına bağlı olarak bazı kısıtlamaları da bulunmaktadır. Bu kısıtlamaların bilincinde olmak ve gerektiğinde düzeltmeler yapmak, analizin daha doğru ve etkili olmasını sağlamaktadır.

Çalışmada ayrıca geleneksel çalkantı hareketi incelemelerinde tek noktadan ölçüm yapmanın zorluklarını aşmak için geliştirilen yeni bir görüntü işleme yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntem, video verileri üzerinden çalkantı hareketlerinin bütünsel olarak analiz edilmesine olanak tanımış ve sıvının serbest yüzeyindeki her noktada meydana gelen maksimum ve minimum dalga yüksekliklerinin tek bir görüntü üzerinde belirlenmesini sağlamıştır. Bu süreç, video karelerindeki piksellerin karşılaştırılması ve birleştirilmesi yoluyla gerçekleştirilerek, sıvının yüzeyindeki dalga hareketlerinin daha detaylı bir şekilde incelenmesine imkân sağlamıştır. Geliştirilen bu yöntem sayesinde, sıvı tankında engel bulunmayan ve farklı dizilim ve sayıda engel bulunan durumda çeşitli senaryolar için “MAKS” ve “MIN” görselleri elde edilerek, tankın tüm kesitlerindeki dalga yüksekliklerinin detaylı analizi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, çalkantı hareketlerinin zaman içindeki değişimlerini görsel olarak kaydetmeye ve bu değişimleri analiz etmeye olanak tanıyarak, çalkantı dinamiklerinin daha ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasına katkı sağlamıştır.

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıdaki gibi sunulmuştur:

- Farklı doluluk oranlarının çalkantı hareketleri üzerindeki etkileri rezonans üstü ve rezonans altı olmak üzere (f_e = 1,10 f_1 ve f_e = 0,90 f_1) iki farklı uyarma frekansı için lineer teori ve görüntü işleme yöntemleri kullanılarak ele alınmıştır. Genel olarak, her iki metodun bazı durumlarda benzer sonuçlar verdiği, ancak özellikle doluluk oranının ve uyarma frekanslarının değişmesiyle sonuçların farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları incelendiğinde, özellikle yüksek doluluk oranı ve uyarma frekansının rezonans frekansının üstü olduğu koşullar altında, lineer teori ve görüntü işleme yöntemlerinin daha uyumlu sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.
- Uyarma genliğinin çalkantı davranışına etkisi, lineer teori ve deneysel yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Araştırma kapsamında 5 mm, 8,5 mm ve 12 mm olmak üzere üç farklı uyarma genliği dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, uyarma genliği arttıkça sıvı yüzeyindeki seviye değişimleri de artmaktadır. Bununla birlikte lineer teori ve görüntü işleme yöntemi sonuçlarının büyük ölçüde uyumlu olmasına rağmen uyarma genliğinin artmasıyla bu uyumun azaldığı gözlemlenmiştir.
- Çalışmada ek olarak deney tankı yatay yönde farklı frekans aralıklarında uyarılarak sıvının rezonans frekanslarının ilk yedi modu incelenmiştir. Toplamda 15 farklı uyarma frekansı ve üç farklı uyarma genliği kullanılmış, bu frekanslar sıvının birinci mod doğal frekansına (f_1)'e oranlanarak f_e/f_1 değerleri 0,20'den 3,27'ye kadar belirlenmiştir. Deneyler, tankın doluluk oranının h/L = 0,25 olduğu koşullarda gerçekleştirilmiş ve sıvı yüzeyindeki dalga yüksekliklerinin değişimleri sayısal analizler sonucu elde edilmiştir. Sonuçlara göre, çalkantı hareketinin en agresif davranışı gösterdiği durumun birinci mod doğal frekansa eşit uyarma frekansının deney tankına uygulanması ile ortaya çıktığı anlaşılmıştır. İkinci en büyük etki, üçüncü modun doğal frekansına sahip uyarma frekanslarında görülmektedir.
- Tez çalışmasında B(20), B(10 - 30), B(10 - 20 - 30) engel yerleşimlerinin çalkantı davranışı üzerindeki etkileri, hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Çeşitli sıvı derinlikleri ve uyarma frekansları altında yapılan deneylerde, engelsiz duruma kıyasla engel yerleşimlerinin çalkantı hareketi üzerindeki etkileri MAKS-MIN sonuçlarıyla ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Özellikle, sıvı derinliği ve uyarma frekansına bağlı olarak, farklı engel düzenlemelerinin çalkantı hareketlerini nasıl etkilediği üzerinde durulmuştur. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel ölçümler ve FLOW - 3D HYDRO

sayısal simülasyonlarıyla elde edilen veriler karşılaştırılarak, çalkantı dinamiklerinin daha iyi anlaşılmasına yönelik önemli bulgular ortaya konmuştur. Bu analizler sayesinde, engel yerleşimlerinin sıvının serbest yüzeyindeki dalga hareketleri ve genlikleri üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenebilmiştir. Sonuç olarak, çeşitli engel dizilimlerinin çalkantı hareketlerini sönümlemede farklı etkinlikler gösterdiği ve özellikle B(10 - 20 - 30) diziliminin belirli koşullar altında en etkili sönümleme etkisine sahip olduğu belirlenmiştir.

- Bununla birlikte sıvı derinliğinin artmasıyla engel düzenlemelerinin çalkantı hareketleri üzerindeki etkisinin incelenmesi de tez çalışmasının önemli bir odak noktası olmuştur. Yapılan deneyler ve modellenen sayısal simülasyonlar, sıvı derinliği arttıkça engellerin çalkantıyı sönümleme ve dalga hareketlerini kontrol etme kapasitesinin azaldığını göstermiştir. Özellikle, daha yüksek sıvı derinliklerinde, engellerin sönümleme etkinliğinin göreceli olarak azaldığı ve çalkantı hareketlerinin daha karmaşık hale geldiği belirlenmiştir. Bu durum, engel yerleşimlerinin ve çalkantı kontrol stratejilerinin, sıvı derinliğine göre özelleştirilmesi gerekliliğini göstermekte ve bu parametrenin çalkantı yönetimi açısından önemini ortaya koymaktadır.
- Tez çalışmasında son olarak B(20), B(20 x 2), B(15 - 25), B(10 - 30), B(5 - 35), B(20 x 3), B(15 - 20 - 25), B(10 - 20 - 30), B(5 - 20 - 35) ikili ve üçlü engel yerleşimlerinin çalkantı davranışları üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda, sıvı yüksekliği ve uyarma frekansı göz önünde bulundurularak, farklı engel dizilimlerinin çalkantı hareketini kontrol etme kapasitesi değerlendirilmiştir. Deney tankına $f_e = 0{,}85\ f_1$ uyarma frekansında hareket etki ettirilerek birinci mod doğal frekansın altında uyarma frekanslarında engel dizilimlerinin çalkantı davranışını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bu dizilimler, dalga yüksekliklerini ve genliklerini belirli ölçüde azaltmış ve sıvının serbest yüzeyindeki dalga hareketlerini kısıtlamıştır. İkili engel dizilimlerine dair $f_e = 0{,}85\ f_1$ uyarma frekansında ve 6 cm sıvı derinliğinde gerçekleştirilen çalışmalarda, B(15 - 25) engel diziliminin çalkantı hareketini bastırmada diğer dizilimlere nazaran ön plana çıkmıştır. Bununla birlikte üçlü engel dizilimlerinde ise B(10 - 20 - 30) ve B(15 - 20 - 25) gibi dizilimlerin öne çıktığı görülmüştür. Bu dizilimler, daha yüksek sıvı derinliklerinde ve farklı uyarma frekanslarında etkili çalkantı sönümleme kapasitesine sahip olmuştur. Özellikle 9 cm sıvı derinliğinde ve $f_e = 0{,}85\ f_1$ uyarma

frekansında, B(10 - 20 - 30) dizilimi, çalkantı hareketlerini sınırlamada ve dalga yüksekliklerini azaltmada oldukça başarılı olmuştur.

5.2. Öneriler

Bu tez çalışmasında yapılan sayısal, analitik ve deneysel çalışmaların sonuçlarına dayanarak, gelecekteki araştırmalar için önerilen potansiyel çalışma alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Engel optimizasyonu: Farklı sıvı derinlikleri ve uyarma koşulları için en etkili engel yerleşimlerinin belirlenmesine yönelik ek çalışmalar yapılması faydalı olacaktır. Bu çalışmaların çalkantı kontrol stratejilerinin optimize edilmesine yardımcı olabileceği düşünülmektedir.
- Daha geniş parametre aralığı: Çalkantı dinamiklerinin daha geniş bir parametre aralığında incelenmesi, bu olgunun anlaşılmasına katkı sağlayabilir. Özellikle farklı tank geometrileri ve sıvı özellikleri üzerinde yapılan çalışmalar, çeşitlilik ve kapsam açısından önemlidir.
- Engel malzemesi etkisi: Farklı malzemelerle tasarlanan engellerin çalkantı davranışı üzerindeki etkileri problemin anlaşılmasına katkı sağlayabilir.
- Viskozite tayini üzerine çalışmalar: Çalkantı davranışlarından sıvıların viskozite değerlerinin tayin edilmesine yönelik araştırmalar yapılabilir. Bu, çeşitli sıvıların dinamik özelliklerinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olabilecektir.

KAYNAKLAR

1. İtibar, M.D. (2015). Küre Biçimli Tanklardaki Çalkantının Modellenmesi, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

2. Olsen, H., (1976b). What is sloshing? In Seminar on Liquid Sloshing. Det Norske Veritas.

3. Pilipchuk, V.N., and Ibrahim, R.A. (1997). The dynamics of a non-linear system simulating liquid sloshing impact in moving structures. *Journal of Sound and Vibration*, 205(5), 593–615.

4. Ibrahim, R.A. (2005). Liquid sloshing dynamics: theory and applications. Cambridge University Press.

5. İnce, E. (2012). Dikdörtgen kesitli yükseltilmiş su tankındaki su çalkantısının yapının davranışı üzerindeki etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* İstanbul.

6. 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.

7. Zheng, J.H., Xue, M.A., Dou, P., and He, Y.M. (2022). A review on liquid sloshing hydrodynamics. *Journal of Hydrodynamics*, 33(6), 1089–1104.

8. Miao, G. P., Ishida, H., Saitoh, T., and Kurosaki, K. (2001). Analytical solutions for the sloshing loading on circular cylindrical liquid tanks with interior semi-porous barriers. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 13(2), 32–39.

9. Goudarzi, M.A., Sabbagh-Yazdi, S.R., and Marx, W. (2010). Investigation of sloshing damping in baffled rectangular tanks subjected to the dynamic excitation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8, 1055–1072.

10. Wang, J., Wang, C., and Liu, J. (2019). Sloshing reduction in a pitching circular cylindrical container by multiple rigid annular baffles. *Ocean Engineering*, 171, 241–249.

11. Yu, Y.M., Ma, N., Fan, S.M., and Gu, X.C. (2019). Experimental studies of suppressing effectiveness on sloshing with two perforated floating plates. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11(1), 285–293.

12. Chu, C.R., Wu, Y.R., Wu, T.R., Wang, C.Y. (2018). Slosh-induced hydrodynamic force in a water tank with multiple baffles. *Ocean Engineering*, 167, 282–292.

13. Xue, M.A., Zheng, J., Lin, P., and Yuan, X. (2017). Experimental study on vertical baffles of different configurations in suppressing sloshing pressure. *Ocean Engineering*, 136, 178–189.

14. Panigrahy, P.K., Saha, U.K., and Maity, D. (2009). Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquids in baffled tanks. *Ocean Engineering*, 36(3–4), 213–222.

15. Thirunavukkarasu, B., and Rajagopal, T.K.R. (2021). Numerical investigation of sloshing in tank with horivert baffles under resonant excitation using CFD code. *Thin-Walled Structures*, 161, 107517.

16. Akyıldız, H., Ünal, N.E., and Aksoy, H. (2013). An experimental investigation of the effects of the ring baffles on liquid sloshing in a rigid cylindrical tank. *Ocean Engineering*, 59, 190–197.

17. Ünal, U.O., Bilici, G., and Akyıldız, H. (2019). Liquid sloshing in a two-dimensional rectangular tank: A numerical investigation with a T-shaped baffle. *Ocean Engineering*, 187, 106183.

18. Nasar, T., and Sannasiraj, S.A. (2019). Sloshing dynamics and performance of porous baffle arrangements in a barge carrying liquid tank. *Ocean Engineering*, 183, 24–39.

19. He, Z., Zhu, R.C., and Miao, G.P. (2010). The simulation and analysis of tank sloshing with porosity girder by Multi-domain Boundary Element Method. *Journal of Hydrodynamics*, 22(4), 546–553.

20. Jin, H., Liu, Y., and Li, H.J. (2014). Experimental study on sloshing in a tank with an inner horizontal perforated plate. *Ocean Engineering*, 82, 75–84.

21. Wang, W., Zhang, Q., Ma, Q., and Ren, L. (2018). Sloshing effects under longitudinal excitation in horizontal elliptical cylindrical containers with complex baffles. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 144(2), 04017044.

22. Yu, L., Xue, M.A., and Zhu, A. (2020). Numerical investigation of sloshing in rectangular tank with permeable baffle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(9), 671.

23. Ma, C., Xiong, C., and Ma, G. (2021). Numerical study on suppressing violent transient sloshing with single and double vertical baffles. *Ocean Engineering*, 223, 108557.

24. Tang, Y. ying, Liu, Y. dong, Chen, C., Chen, Z., He, Y. ping, Zheng, M. min (2021). Numerical study of liquid sloshing in 3D LNG tanks with unequal baffle height allocation schemes. *Ocean Engineering*, 234, 109181.

25. Cho, J.R., Lee, H.W., and Ha, S.Y. (2005). Finite element analysis of resonant sloshing response in 2-D baffled tank. *Journal of Sound and Vibration*, 288(4–5), 829–845.

26. Ebrahimian, M., Noorian, M.A., Haddadpour, H. (2013). A successive boundary element model for investigation of sloshing frequencies in axisymmetric multi baffled containers. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 37(2), 383–392.

27. Biswal, K.C., and Bhattacharyya, S.K. (2010). Dynamic response of structure coupled with liquid sloshing in a laminated composite cylindrical tank with baffle. *Finite Elements in Analysis and Design*, 46(11), 966–981.

28. Xue, M.A., Zheng, J., Lin, P., and Xiao, Z. (2017). Violent transient sloshing-wave interaction with a baffle in a three-dimensional numerical tank. *Journal of Ocean University of China*, 16, 661–673.

29. Hu, C., and Kamra, M.M. (2020). An unstructured mesh method for numerical simulation of violent sloshing flows. *Journal of Hydrodynamics*, 32, 259–266.

30. Hoch, R., and Wurm, F.H. (2021). Numerical and experimental investigation of sloshing under large amplitude roll excitation. *Journal of Hydrodynamics*, 33(4), 787–803.

31. Cheng, X.D., Liang, Y., and Wen, J.H. (2004). Hydroelastic vibrations and liquid sloshing suppression in a rectangular tank with elastic spacer. *Journal of Hydrodynamics B-English Edition*, 16, 336-340.

32. Zhu, A., Xue, M.A., Yuan, X., Zhang, F., and Zhang, W. (2021). Effect of double-side curved baffle on reducing sloshing in tanks under surge and pitch excitations. *Shock and Vibration*, 2021, 1–17.

33. Xue, M.A., and Lin, P. (2011). Numerical study of ring baffle effects on reducing violent liquid sloshing. *Computers & Fluids*, 52, 116–129.

34. 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.

35. Poguluri, S.K., and Cho, I.H. (2020). Mitigation of liquid sloshing in a rectangular tank due to slotted porous screen. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 234(3), 686–698.

36. Xue, M.A., Lin, P.Z., Zheng, J.H., Ma, Y.X., Yuan, X.L., and Nguyen, V.T. (2013). Effects of perforated baffle on reducing sloshing in rectangular tank: Experimental and numerical study. *China Ocean Engineering*, 27, 615–628.

37. Zheng, J., Kargbo, O., Xue, M.A., and Jiang, Z. (2020). Numerical study of the interfacial sloshing wave interaction with a porous bottom layer in a partially filled rectangular tank. *Ocean Engineering*, 217, 107990.

38. Xue, M.A., Jiang, Z., Hu, Y.A., and Yuan, X. (2020). Numerical study of porous material layer effects on mitigating sloshing in a membrane LNG tank. *Ocean Engineering*, 218, 108240.

39. Xue, M.A., Zheng, J., and Lin, P. (2012). Numerical simulation of sloshing phenomena in cubic tank with multiple baffles. *Journal of Applied Mathematics*, 2012.

40. Cheng, X.D., Hu, M.Z., and Wen, J.H. (2005). Equivalent mechanical models of liquid sloshing in a spherical tank with spacer under low gravity. *Journal of Hydrodynamics, Series B*, 17(1), 110–116.

41. Kocaman, S. (2007). Baraj Yıkılması Probleminin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Adana.

42. Mohamad, A.A. (2019). Lattice Boltzmann Method: Fundamentals and Engineering Applications with Computer Codes, Second Edition. *Lattice Boltzmann Method: Fundamentals and Engineering Applications with Computer Codes, Second Edition*, 70.

43. Liu, G.R., and Liu, M.B. (2003). Smoothed Particle Hydrodynamics. *Smoothed Particle Hydrodynamics*.

44. Hirt, C.W., and Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201–225.

45. Chen, Q. (1995). Comparison of different k-ε models for indoor air flow computations. *Numerical Heat Transfer, Part B Fundamentals*, 28(3), 353–369.

46. LaRocca, M., Sciortino, G., Adduce, C., and Boniforti, M.A. (2005). Experimental and theoretical investigation on the sloshing of a two-liquid system with free surface. *Physics of Fluids*, 17(6).

47. Cooker, M.J. (1994). Water waves in a suspended container. *Wave Motion*, 20(4), 385–395.

48. Turner, M.R., Bridges, T.J., and Ardakani, H.A. (2013). Dynamic coupling in Cooker's sloshing experiment with baffles. *Physics of Fluids*, 25(11).

49. Akyıldız, H. (2015). Sloshing in a T-baffled rectangular storage tank numerical study for 2–d problems. *GİDB Dergi*, (01), 13–34.

50. Cho, I.-H. (2015). Sloshing analysis in rectangular tank with porous baffle. 29(1), 1–8.

51. Hyeon, J.-W., and Cho, I.-H. (2015). Experimental study on sloshing in rectangular tank with vertical porous baffle. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(4), 291–299.

52. Bautista-Jacobo, J.L., Rodríguez-Morales, E., Montes-Rodríguez, J.J., and Gámez-Cuatzín, H. (2015). Effect of Baffles on the Sloshing in Road Tankers Carrying LPG: A Comparative Numerical Study. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.

53. Kolaei, A., Rakheja, S., and Richard, M.J. (2015). A coupled multimodal and boundary-element method for analysis of anti-slosh effectiveness of partial baffles in a partly-filled container. *Computers and Fluids*, 107, 43–58.

54. Lu, L., Jiang, S.C., Zhao, M., and Tang, G.Q. (2015). Two-dimensional viscous numerical simulation of liquid sloshing in rectangular tank with/without baffles and comparison with potential flow solutions. *Ocean Engineering*, 108, 662–677.

55. Tang, Z., Tang, Z., and Wan, D. (2015). Numerical Study of Sloshing in Baffled Tanks by MPS. *In ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference (pp. ISOPE-I). ISOPE*.

56. Cho, I.H., and Kim, M.H. (2016). Effect of dual vertical porous baffles on sloshing reduction in a swaying rectangular tank. *Ocean Engineering*, 126, 364–373.

57. Choudhary, N., and Bora, S.N. (2016). Liquid sloshing in a circular cylindrical container containing a two-layer fluid. *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, 8, 240–248.

58. Kumar, A., and Sinhamahapatra, K.P. (2016). Dynamics of rectangular tank with perforated vertical baffle. *Ocean Engineering*, 126, 384–401.

59. Sanapala, V.S., Velusamy, K., and Patnaik, B.S.V. (2016). CFD simulations on the dynamics of liquid sloshing and its control in a storage tank for spent fuel applications. *Annals of Nuclear Energy*, 94, 494–509.

60. Wang, W., Peng, Y., Zhou, Y., and Zhang, Q. (2016). Liquid sloshing in partly-filled laterally-excited cylindrical tanks equipped with multi baffles. *Applied Ocean Research*, 59, 543–563.

61. Zhang, J., Wu, W., and Hu, J. (2016). A numerical study of the effects of the longitudinal baffle on nickel ore slurry sloshing in a prismatic cargo hold. *Marine Structures*, 46, 149–166.

62. Choudhary, N., and Bora, S.N. (2017). Linear sloshing frequencies in the annular region of a circular cylindrical container in the presence of a rigid baffle. *Sadhana*, 42, 805–815.

63. Hosseini, M., Goudarzi, M.A., and Soroor, A. (2017). Reduction of seismic sloshing in floating roof liquid storage tanks by using a Suspended Annular Baffle (SAB). *Journal of Fluids and Structures*, 71, 40–55.

64. Wang, W., Peng, Y., Zhang, Q., Ren, L., and Jiang, Y. (2017). Sloshing of liquid in partially liquid filled toroidal tank with various baffles under lateral excitation. *Ocean Engineering*, 146, 434–456.

65. Yu, Y.M., Ma, N., Fan, S.M., and Gu, X.C. (2017). Experimental and numerical studies on sloshing in a membrane-type LNG tank with two floating plates. *Ocean Engineering*, 129, 217–227.

66. Jamalabadi, M.Y.A., Ho-Huu, V., and Nguyen, T.K. (2018). Optimal design of circular baffles on sloshing in a rectangular tank horizontally coupled by structure. *Water (Switzerland)*, 10(11), 1504.

67. Kim, S.P., Chung, S.M., Shin, W.J., Cho, D.S., and Park, J.C. (2018). Experimental study on sloshing reduction effects of baffles linked to a spring system. *Ocean Engineering*, 170, 136–147.

68. Kim, H., Parthasarathy, N., Choi, Y.H., and Lee, Y.W. (2018). Reduction of sloshing effects in a rectangular tank through an air-trapping mechanism – a numerical study. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32, 1049–1056.

69. Liu, G., Lin, Y., Guan, G., and Yu, Y.Y. (2018). Numerical research on the anti-sloshing effect of a ring baffle in an independent type C LNG tank. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 19(10), 758–773.

70. 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.

71. Zheng, X., You, Y., Ma, Q., Khayyer, A., and Shao, S. (2018). A comparative study on violent sloshing with complex baffles using the ISPH method. *Applied Sciences*, 8(6), 904.

72. Bellezi, C.A., Cheng, L.Y., Okada, T., and Arai, M. (2019). Optimized perforated bulkhead for sloshing mitigation and control. *Ocean Engineering*, 187, 106171.

73. Jin, X., and Lin, P. (2019). Viscous effects on liquid sloshing under external excitations. *Ocean Engineering*, 171, 695–707.

74. Liu, Z., Feng, Y., Lei, G., and Li, Y. (2019). Fluid sloshing dynamic performance in a liquid hydrogen tank. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(26), 13885–13894.

75. Qin, H., Mu, L., Tang, W., and Hu, Z. (2019). Numerical study on structural response of anti-sloshing baffles of different configurations in a sloshing tank considering hydroelasticity. *Ocean Engineering*, 188, 106290.

76. Yu, L., Xue, M.A., and Zheng, J. (2019). Experimental study of vertical slat screens effects on reducing shallow water sloshing in a tank under horizontal excitation with a wide frequency range. *Ocean Engineering*, 173, 131–141.

77. Zang, Q., Fang, H., Liu, J., and Lin, G. (2019). Boundary element model for investigation of the effects of various porous baffles on liquid sloshing in the two dimensional rectangular tank. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 108, 484–500.

78. Arif, U.G.M., Loo, C.Y., Kang, H.S., Punurai, W., Quen, L.K., Lai, G.N.Y., and Chong, W.T. (2020). Suppression of hydrodynamic sloshing in liquefied natural gas tank with floating baffle: Experimental and numerical studies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 463(1), 012111.

79. Cho, I.H., and Kim, M.H. (2020). Effect of a bottom-hinged, top-tensioned porous membrane baffle on the sloshing reduction in a rectangular tank. *Applied Ocean Research*, 104, 102345.

80. Çelik, A.İ., Köse, M.M., Akgül, T., ve Apay, A.C. (2020). Yıkıcı sismik yükler altında silindirik çelik su tanklarının doğrusal olmayan analizi. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B - Teorik Bilimler*, 8(2), 154–170.

81. Efe, M.E., Çelik, D., Kocaman, T., ve Arslan, K. (2020). Rijitleştirme levhalı sıvı depolama tankının yapısal davranışının dalga yükü altında incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(2), 296–303.

82. George, A., and Cho, I.H. (2020). Anti-sloshing effects of a vertical porous baffle in a rolling rectangular tank. *Ocean Engineering*, 214, 107871.

83. Jin, H., Song, R., and Liu, Y. (2020). Sloshing motion in a real-scale water storage tank under nonlinear ground motion. *Water*, 12(8), 2098.

84. Jin, X., Tang, J., Tang, X., Mi, S., Wu, J., Liu, M., and Huang, Z. (2020). Effect of viscosity on sloshing in a rectangular tank with intermediate liquid depth. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 118, 110148.

85. Tsukamoto, M.M., Cheng, L.Y., Kobayakawa, H., Okada, T., and Bellezi, C.A. (2020). A numerical study of the effects of bottom and sidewall stiffeners on sloshing behavior considering roll resonant motion. *Marine Structures*, 72, 102742.

86. Yu, L., Xue, M.A., and Jiang, Z. (2020). Experimental investigation of parametric sloshing in a tank with vertical baffles. *Ocean Engineering*, 213, 107783.

87. Zhang, E. (2020). Numerical research on sloshing of free oil liquid surface based on different baffle shapes in rectangular fuel tank. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(2–3), 363–377.

88. Zhang, J., Gaidai, O., Gui, B., and Yurchenko, D. (2020). Influence of the vibroimpact interaction on sloshing dynamics in a rectangular tank. *Ocean Engineering*, 217, 107821.

89. Zhang, Z.L., Khalid, M.S.U., Long, T., Chang, J.Z., and Liu, M.B. (2020). Investigations on sloshing mitigation using elastic baffles by coupling smoothed finite element method and decoupled finite particle method. *Journal of Fluids and Structures*, 94, 102942.

90. Cho, I.H. (2021). Liquid sloshing in a swaying/rolling rectangular tank with a flexible porous elastic baffle. *Marine Structures*, 75, 102865.

91. Golla, S.T., Venkatesham, B. (2021). Experimental study on the effect of centrally positioned vertical baffles on sloshing noise in a rectangular tank. *Applied Acoustics*, 176, 107890.

92. Iranmanesh, A., and Nikbakhti, R. (2021). Numerical study on suppressing liquid sloshing of a rectangular tank using moving baffles linked to a spring system. *Ocean Engineering*, 229, 109002.

93. Kargbo, O., Xue, M.A., Zheng, J., and Yuan, X. (2021). Multiphase sloshing dynamics of a two-layered fluid and interfacial wave interaction with a porous T-shaped baffle in a tank. *Ocean Engineering*, 229, 108664.

94. Liu, D., Lin, P., Xue, M.A., Cheng, L., and Lian, J. (2021). Numerical simulation of two-layered liquid sloshing in tanks under horizontal excitations. *Ocean Engineering*, 224, 108768.

95. Hernández-Morales, J.J., Rodríguez-Morales, E., Bautista-Jacobo, J.L., and Montes-Rodríguez, J.J. (2021). Analysis of sloshing-induced stresses in the baffles-shell joints in a road tanker transporting LPG. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 45, 741–754.

96. Pradeep, S., Husain, S.A., and Ansari, K. (2021). Analytical study of elevated service reservoir with water baffles under seismic loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1130(1), 012050.

97. Yang, C., Niu, R., and Zhang, P. (2021). Numerical analyses of liquid slosh by Finite volume and Lattice Boltzmann methods. *Aerospace Science and Technology*, 113, 106681.

98. Bellezi, C.A., Cheng, L.Y., and Nishimoto, K. (2022). A numerical study on sloshing mitigation by vertical floating rigid baffle. *Journal of Fluids and Structures*, 109, 103456.

99. Felix-Gonzalez, I., Sanchez-Mondragon, J., and Cruces-Giron, A.R. (2022). Sloshing study on prismatic LNG tank for the vertical location of the rotational center. *Computational Particle Mechanics*, 9(4), 843–862.

100. Jiang, S.C., Feng, A., and Yan, B. (2022). Numerical simulations for internal baffle effect on suppressing sway-sloshing coupled motion response. *Ocean Engineering*, 250, 110513.

101. Kumar, A., Jaikumar, V., Pradeep, A.G., and Bhavi, S. (2022). Study of the sloshing phenomenon in a tank filled partially with liquid using CFD simulation. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 16(2), 27–30.

102. Korkmaz, F.C. (2022). Damping of sloshing impact on bottom-layer fluid by adding a viscous top-layer fluid. *Ocean Engineering*, 254, 111357.

103. Liu, D., Wu, Y., and Lin, P. (2022). An experimental study of two-layer liquid sloshing under pitch excitations. *Physics of Fluids*, 34(5).

104. Luo, M., Su, X., Lin, P., Khayyer, A., and Zhao, X. (2022). Investigation of two-layer liquid sloshing by using the consistent particle method. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 32(01), 7–15.

105. Wang, Q.Y., Lin, G.M., Jiang, L., Zheng, G.F., and Chen, J.J. (2022). Numerical and experimental study of anti-slosh performance of combined baffles in partially filled tank vehicles. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 196, 104555.

106. Wen, X., Zhao, W., and Wan, D. (2022). Multi-phase moving particle semi-implicit method for violent sloshing flows. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 95, 1–22.

107. Wiegerink, J.J., Baldock, T.E., Callaghan, D.P., and Wang, C.M. (2022). Slosh suppression blocks - a concept for mitigating fluid motions in floating closed containment fish pen in high energy environments. *Applied Ocean Research*, 120, 103068.

108. Cao, W., Li, X., Gao, Y., Li, X., and Liu, Z. (2023). A numerical analysis of sloshing dynamics of two-layer liquid with a free surface. *Ocean Engineering*, 268, 113295.

109. Liu, D., Cai, W., and Lu, T. (2023). Comparative assessment of liquid sloshing in dry and wet storage tank of floating offshore platform. *Marine Structures*, 90, 103425.

110. Liu, D., Lu, T., Cai, W., and Lei, L. (2023). Experimental study on the sloshing of a three-layer liquid system with a free surface. *Ocean Engineering*, 279, 114422.

111. Liu, D., Lu, T., Qi, C., and Cai, W. (2023). Influence of liquid viscosity on surface wave motion in a vertical cylindrical tank. *Ocean Engineering*, 289, 116192.

112. Ren, Y., Khayyer, A., Lin, P., Hu, X. (2023). Numerical modeling of sloshing flow interaction with an elastic baffle using SPHinXsys. *Ocean Engineering*, 267, 113110.

113. Wang, Q.Y., Jiang, L., Chai, M., Huang, H., and Tang, J.H. (2023). Numerical and experimental analysis of the effect of elastic membrane on liquid sloshing in partially filled tank vehicles. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 51(3), 1741–1757.

114. Xue, M., Cao, Z., Yuan, X., Zheng, J., and Lin, P. (2023). A two-dimensional semi-analytic solution on two-layered liquid sloshing in a rectangular tank with a horizontal elastic baffle. *Physics of Fluids*, 35(6).

115. Xue, M.A., He, Y., Yuan, X., Cao, Z., Odoom, J.K. (2023). Numerical and experimental study on sloshing damping effects of the porous baffle. *Ocean Engineering*, 285, 115363.

116. Awad, B.N., Tait, M.J., and Love, J.S. (2024). Numerical modelling of dual function tanks for fire suppression and tuned liquid damper applications. *Engineering Structures*, 299, 117080.

117. Chen, Y., Ming, P., Yu, G., Tan, Z., and Yuan, M. (2024). Sloshing damping assessment and structural dynamic analysis of perforated structures for heavy liquid metal under seismic excitation. *Annals of Nuclear Energy*, 195, 110178.

118. He, W., Tang, L., and Lin, P. (2024). Experimental study of viscous effects on long-duration sloshing characteristics under surge excitations. *Physics of Fluids*, 36(1).

119. Hou, C., Yu, Y., Liu, X., Ding, J., and Cui, Z. (2024). Effects of longitudinal excitation on liquid hydrogen sloshing in spacecraft storage tanks under microgravity conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 51, 765–780.

120. Li, H., Zhang, X., and Yang, X. (2024). Numerical study of liquid sloshing using smoothed particle hydrodynamics with adaptive spatial resolution. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 159, 272–287.

121. Wu, X., and He, R. (2024). Numerical study on characteristics and mechanism of fuel sloshing in automobile fuel tank. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 46(1), 44.

122. Harlow, F.H., and Welch, J.E. (1965). Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface. *The Physics of Fluids*, 8(12), 2182–2189.

123. Osher, S., and Fedkiw, R. (2005). Level set methods and dynamic implicit surfaces. *New York: Springer*, 153, 273.

124. Kırkgöz, M.S. (2013). Akışkanlar Mekaniği. Birsen Yayınevi.

125. Faltinsen, O.M. (1978). A numerical nonlinear method of sloshing in tanks with two-dimensional flow. *Journal of Ship Research*, 22(03), 193–202.

126. Goudarzi, M.A., and Sabbagh-Yazdi, S.R. (2012). Investigation of nonlinear sloshing effects in seismically excited tanks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43, 355–365.

127. FLOW SCIENCE Inc., "Flow-3D User's Manuals", Santa Fe, N.M., 2007.

128. Ghasemlounia, R. (2021). Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliğinde FLOW - 3D. Nobel Akademik Yayıncılık.

129. Çalışır, T. (2011). Çarpan Akışkan Jetleri Kullanarak Kanatçıklı Yüzeyler Üzerindeki Isı Transferinin Sayısal Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği*, Ankara.

130. Bayramoğlu, T. (2021). Farklı şekil ve konumlardaki perde tipi engellerin dikdörtgen bir tankta çalkantıya etkisinin sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

131. Tosun, U. (2016). Çalkalanan titreşim sönümleyicilerin performansının deneysel yöntemlerle incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Tobb Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

132. Akyildiz, H., and Ünal, N.E. (2006). Sloshing in a three-dimensional rectangular tank: numerical simulation and experimental validation. *Ocean Engineering*, 33(16), 2135–2149.

133. Karslı, F., ve Ayhan, E. (2005). Orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kameraların metrik performanslarının belirlenmesi. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 10.*

134. Kocaman, S., Dal, K. (2020). A new experimental study and SPH comparison for the sequential dam-break problem. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 905.

135. Duman, K. (2019). Dikdörtgen bir hazneden suyun boşalması probleminin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi/Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay.

136. Erdoğan, B. (2018). Dikdörtgen tank içerisindeki çalkantı hareketinin deneysel ve nümerik olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü,* Hatay.

137. Goudarzi, M.A., Sabbagh-Yazdi, S.R. (2012). Analytical and experimental evaluation on the effectiveness of upper mounted baffles with respect to commonly used baffles. *Ocean Engineering*, 42, 205–217.

138. Park, W.M., Choi, D.K., Kim, K., Son, S.M., Oh, S.H., Lee, K.H., Kang, H.S., and Choi, C. (2020). Simple analytical method for predicting the sloshing motion in a rectangular pool. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(5), 947–955.

139. Man, W., Kyung, D., Hong, S., Man, S., Seok, H., Hee, K. (2018). A Modification of the Linear Theory to Predict Sloshing in the Spent Fuel Pool under High Frequency Seismic Conditions. 25–27.

140. Shigematsu, T., Liu, P.L.F., and Oda, K. (2004). Numerical modeling of the initial stages of dam-break waves. *Journal of Hydraulic Research*, 42(2), 183–195.

141. Liu, D., Lin, P. (2008). A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks. *Journal of Computational Physics*, 227(8), 3921–3939.

142. Goudarzi, M.A., Danesh, P.N. (2016). Numerical investigation of a vertically baffled rectangular tank under seismic excitation. *Journal of Fluids and Structures*, 61, 450–460.

DİZİN

A

Ağ aralıkları · 46, 97

Ç

Çalkantı hareketi · 1, 3, 9, 10, 12, 13, 16, 17, 18, 20, 25, 26, 27, 29, 31, 33, 34, 51, 64, 65, 66, 76, 77, 78, 83, 86, 91, 116, 128, 131, 134, 137, 138, 145, 147, 148, 150

D

Doğal frekans · 2, 3, 20, 44, 51, 52, 65, 74, 78, 86, 91, 92, 94

F

FAVOR · 45, 46
FLOW-3D HYDRO · 75, 97, 98, 147

G

Görüntü işleme · 9, 10, 30, 52, 53, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 63, 64, 66, 67, 69, 74, 77, 78, 83, 98, 122, 131, 147, 148, 149

K

Kalibrasyon · 60, 61, 64

L

Lineer teori · 43, 74, 76, 77, 78, 83, 84, 148, 149

M

MAKS · 70, 73, 74, 75, 86, 87, 90, 106, 110, 116, 119, 125, 128, 134, 142, 145, 148, 150
MIN · 70, 73, 74, 75, 87, 90, 110, 119, 128, 134, 148, 150

S

Sanal derinlik ölçer · 67
Sarsma tablası · 9, 16, 63

T

Türbülans · 7, 8, 12, 16, 38, 41, 42, 43, 47, 48, 49, 53, 75, 96

U

Uyarma frekansı · 9, 19, 30, 31, 74, 75, 76, 84, 86, 91, 92, 113, 122, 134, 137, 138, 148, 149, 150
Uyarma genliği · 9, 43, 63, 64, 83, 91, 92, 94, 98, 106, 149

V

Volume Of Fluid · 12

TEKNOVERSİTE

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

teknoversite AYRICALIĞINDASINIZ

İSTE