

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇALKALANAN TİTREŞİM SÖNÜMLEYİCİLERİN PERFORMANSININ
DENEYSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ufuk TOSUN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER

ARALIK 2016

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 131511030 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ufuk TOSUN**'un ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**ÇALKALANAN TİTREŞİM SÖNÜMLEYİCİLERİN PERFORMANSININ DENEYSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**" başlıklı tezi **13,12,2016** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Selin ARADAĞ (Başkan)**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞÇIOĞLU
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. Yiğit YAZICIOĞLU
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cüneyt SERT
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Ufuk TOSUN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇALKALANAN TİTREŞİM SÖNÜMLEYİCİLERİN PERFORMANSININ

DENEYSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Ufuk TOSUN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER

Tarih: Aralık 2016

Yapıların rüzgar ve deprem gibi dış girdilerden daha az etkilenmeleri için yöntemler geliştirilmesi günümüzde üzerinde yoğun bir şekilde çalışılan konulardan birisidir. Çalkalanan titreşim sönümleyiciler de yapı titreşimlerinin azaltılması için sıklıkla kullanılan pasif titreşim sönümleme yöntemlerindedir. Bu çalışmada çalkalanan titreşim sönümleyicilerin yapıların titreşim yanıtlarını sönümlemedeki başarımları farklı durumlar için deneysel yöntemler kullanılarak incelenmiştir.

Çalışmada ilk olarak yapı modeli olmadan titreştirilen tank içerisindeki sıvının çalkalanması üzerinde çalışılmıştır. Titreşim girdisi ile oluşan çalkalanma kuvvetinin büyüklüğü üzerinde, titreşim girdisinin genliğinin ve frekansının etkisi incelenmiştir. Ayrıca hareket frekansı ile sıvının çalkalanma doğal frekansı değerlerinin yakın ve uzak olduğu durumlar oluşturularak, bu iki durumun kuvvet genliği üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Bina modeli ile yapılan çalışmalarda ise farklı kütle ve doğal frekans gibi parametrelere sahip yapı modellerinden titreşim sönümleyicinin olduğu ve olmadığı durumlar için sinüs ve deprem girdisi ile veriler toplanmıştır. Toplanan bu veriler ile çalkalanan titreşim sönümleyicilerin titreşim sönümleme verimlilikleri farklı girdi genlikleri ve tipleri, yapı doğal frekansları ve kütleleri, çalkalanan sıvı

kütlesinin bina kütlesi oranı ve hareket frekansı ile yapı doğal frekansının uyumu gibi değişimler için incelenmiştir. Sonuç olarak çalkalanan titreşim sönümleyiciler yapı titreşimlerinin sönümlenmesinde başarılıdır; ancak verimleri arttırılabilir.

Bu çalışmada ayrıca sıvı serbest yüzeyinin takibi ve çalkalanma kuvvetinin ölçümü için kullanılabilir yeni bir metot geliştirilmiştir. Bu metot sadece sıvı tankının kaydedilen görüntüsünü girdi olarak kullanarak, görüntü işleme işlemleri ile sıvı yüzeyinin hareketini elde edebilmekte ve rezonans durumundaki çalkalanma kuvvetini hesaplayabilmektedir. Hesaplanan sıvı serbest yüzeyi ve çalkalanma kuvveti ultrasonik algılayıcılar ve yük hücreleri kullanılarak doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çalkalanan titreşim sönümleyiciler, Yapı-sıvı etkileşimi, Çalkalanma, Görüntü işleme.

ABSTRACT

Master of Science

INVESTIGATING THE PERFORMANCE OF THE TUNED LIQUID DAMPERS WITH EXPERIMENTAL METHODS

Ufuk TOSUN

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Assoc. Prof. Mehmet Bülent ÖZER

Date: December 2016

The development of methods that causes structures to be effected less from environmental loadings such as earthquake and wind is an important research field. Tuned liquid dampers are used frequently as passive vibration absorbers to mitigate the vibration of structures. In this work, the performance of tuned liquid dampers to mitigate the structural response is investigated with experimental methods for different cases.

Initially, sloshing of water in a tank without any structure is studied. The influence of vibration amplitude and frequency on the magnitude of sloshing force is examined. Additionally, how closeness of sloshing natural frequency and vibration frequency affects the magnitude of sloshing force is also studied. A modular structure the parameters of which (such as natural frequency and mass) can easily be modified is designed. The sloshing vibration absorber is placed on this structure. Experimental data is collected for the base line and cases with sloshing vibration absorber. Mass and natural frequency of structure, sloshing natural frequency of water, input signal type such as earthquake and sinus input, vibration amplitude and frequency and the mass ratio between the structure and the water are changed for these cases and the

experimental results are investigated. The results from the experiments show that the sloshing vibration absorbers can be used to mitigate the response of structures for both low and high structures but it is possible to increase their efficiency.

Furthermore, an image processing method is developed to detect and track the free surface motion and to calculate the resonant sloshing force. This method uses only the recorded video of the experiments as input and obtains the free surface motion and resonant sloshing force with the help of image processing operations. The calculated free surface motion is verified with the ultrasonic sensors and the calculated resonant sloshing force is also verified with the load cell data.

Keywords: Tuned liquid dampers, Fluid-structure interaction, Sloshing, Image processing.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca bana sürekli yol gösteren ve yardımını esirgemeyen tez danıőmanım ve hocam Doç. Dr. Mehmet Bülent Özer'e, deney düzeneği kurulumunda yardımlarını esirgemeyen ve deneyler esnasında tecrübelerini benimle paylaşan Reza Aghazadeh'e, imalat sürecinde desteğini esirgemeyen bölümümüz teknisyeni Kamil Arslan'a ve son olarak destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Ayrıca Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na bu tez çalıőmasını 113M401 numaralı proje kapsamında desteklediği için teşekkür ederim. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne de çalıőmalarım süresince sağladığı burstan dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalkalanan Titreşim Sönümleyicinin Çalışma Prensipleri.....	1
1.2 Çalkalanma Probleminin Sayısal Çözümü için Yapılan Çalışmalar	4
1.3 Çalkalanma Problemi ile ilgili Deneysel Çalışmalar	5
1.4 Yapılar için Pasif Titreşim Sönümleme Uygulamaları	11
1.5 Çalkalanma Probleminin Takibi için Kullanılan Algılayıcılar.....	11
2. DENEY DÜZENEGİ VE DENEY YÖNTEMİ	15
2.1 Deney Düzeneginin Yapısal Tasarımı.....	16
2.2 Eyleyici Sistemi.....	18
2.3 Algılayıcılar.....	19
2.4 Veri Toplama Sistemi.....	22
2.5 Deney Yöntemi	23
3. SIVI TANKI İÇERİSİNDEKİ ÇALKALANMANIN İNCELENMESİ	27
3.1 Farklı Su Yüksekliği, Hareket Frekansı ve Genliği için Çalkalanmanın İncelenmesi	27
3.2 Çalkalanan Sıvının Serbest Yüzey Profilinin Görüntü İşleme Metotları ile Elde Edilmesi	31
3.3 Elde Edilen Sıvı Serbest Yüzey Profili Kullanılarak Çalkalanma Kuvvetinin Hesaplanması.....	41
4. YAPI-SIVI ETKİLEŞİMİ İLE ÇALKALANAN TİTREŞİM SÖNÜMLEYİCİNİN PERFORMANSININ DENEYSEL İNCELENMESİ	57
4.1 Sinüs Girdisi için Çalkalanan Titreşim Sönümleyicinin Performansının İncelenmesi	58
4.2 Deprem Girdisi için Çalkalanan Titreşim Sönümleyicinin Performansının İncelenmesi	72
5. YÜKSEK FREKANSLARDA SÖNÜMLEME YAPABİLECEK YENİ KAP TASARIMI ÇALIŞMASI	93
5.1 Yeni Kap Tasarımı için Sayısal Analizler	94
5.2 Sinüs Girdisi için Yeni Kapın Sönümleme Performansının Deneysel İncelenmesi	99
5.3 Deprem Girdisi için Yeni Kapın Sönümleme Performansının İncelenmesi ..	103
5.4 Yeni Kap-Eski Kap Performans Karşılaştırması.....	105
5.5 Kütle Oranının Sönümleme Performansı Üzerindeki Etkisi	106
6. SONUÇLAR	111

KAYNAKLAR.....	115
EKLER.....	119
ÖZGEÇMİŞ.....	127

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : a. Mekanik titreşim yutucu b. Çalkalanan titreşim sönümleyici.	2
Şekil 1.2 : a. Yutucusuz sistem b. Yutuculu sistem.	2
Şekil 1.3 : Yutucunun sistem yanıtı üzerindeki etkisi.	3
Şekil 1.4 : Örnek deney düzeneği [17].	6
Şekil 2.1 : Deney düzeneğinin genel görünüşü.	15
Şekil 2.2 : Deney düzeneğinin mekanik tasarımı.	16
Şekil 2.3 : Raylar, doğrusal kızaklar ve hareketli platform.	17
Şekil 2.4 : a. Hidrolik eyleyici, LVDT, kontrolcü b. Elektrikli yağ pompası.	19
Şekil 2.5 : LVDT ve hidrolik eyleyici.	20
Şekil 2.6 : Yük hücresi, ultrasonik algılayıcı ve ivmeölçer.	21
Şekil 2.7 : NI cDAQ-9178 USB kasa, girdi ve çıktı modülleri.	23
Şekil 2.8 : Deneylerde kullanılan programın arayüzü.	24
Şekil 3.1 : 0,5 Hz hareket frekansı ve 15 mm sıvı yüksekliği için dalga yüksekliği ve çalkalanma kuvvetinin hareket genliği ile değişimi.	28
Şekil 3.2 : 1 Hz hareket frekansı ve 65 mm sıvı yüksekliği için dalga yüksekliği ve çalkalanma kuvvetinin hareket genliği ile değişimi.	29
Şekil 3.3 : 2 Hz hareket frekansı ve 65 mm sıvı yüksekliği için dalga yüksekliği ve çalkalanma kuvvetinin hareket genliği ile değişimi.	29
Şekil 3.4 : Kamera ve sıvı tankının yerleşimi.	32
Şekil 3.5 : Kameranın görüş alanı.	32
Şekil 3.6 : Sıvı sıçramalarının düzeltilmesi.	34
Şekil 3.7 : Tespit edilen serbest yüzey çizgisi.	35
Şekil 3.8 : Ultrasonik algılayıcıların yerleşimi.	35
Şekil 3.9 : Durum 1 için dalga yükseklikleri karşılaştırması.	36
Şekil 3.10 : Durum 2 için dalga yükseklikleri karşılaştırması.	37
Şekil 3.11 : Durum 2 için 55,7. saniyedeki yüzey profili (görüntü işleme).	37
Şekil 3.12 : Durum 3 için dalga yükseklikleri karşılaştırması.	38
Şekil 3.13 : Durum 3 için 55,7. saniyedeki yüzey profili (görüntü işleme).	39
Şekil 3.14 : Durum 4 için dalga yükseklikleri karşılaştırması.	39
Şekil 3.15 : Kullanılan koordinat sistemi.	41
Şekil 3.16 : $i=1, 4$ ve 10 için elde edilen serbest yüzey profil yaklaşımları.	44
Şekil 3.17 : Yük hücresi montajı.	47
Şekil 3.18 : Durum 1 için çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması.	48
Şekil 3.19 : Durum 2 için çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması.	48
Şekil 3.20 : Durum 2 için ilk 10 s'deki çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması.	49
Şekil 3.21 : Durum 3 için çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması.	50
Şekil 3.22 : Durum 4 için çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması.	50
Şekil 3.23 : Durum 5 için çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması.	51
Şekil 3.24 : Durum 6 için çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması.	52
Şekil 4.1 : Bina modeli.	57

Şekil 4.2 : Durum 1 için sistem yanıtı (2 mm girdi genliği).	60
Şekil 4.3 : Durum 1 için sistem yanıtı (4 mm girdi genliği).	62
Şekil 4.4 : Durum 2 için sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).	64
Şekil 4.5 : Durum 2 için sistem yanıtı (3 mm girdi genliği).	65
Şekil 4.6 : Durum 3 için sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).	67
Şekil 4.7 : Durum 3 için sistem yanıtı (3 mm girdi genliği).	68
Şekil 4.8 : Durum 4 için sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).	70
Şekil 4.9 : Normalize edilmiş 1. deprem sinyali ve frekans içeriği.	73
Şekil 4.10 : Normalize edilmiş 2. deprem sinyali ve frekans içeriği.	73
Şekil 4.11 : Durum 1 için gerininin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).	75
Şekil 4.12 : Durum 1 için yer değiştirimenin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).	75
Şekil 4.13 : Durum 1 için gerininin RMS ve maksimum değerleri (2. sinyal).	76
Şekil 4.14 : Durum 1 için yer değiştirimenin RMS ve maksimum değerleri (2. sinyal).	77
Şekil 4.15 : Durum 1 için yanıt oranı (düşük girdi genliği).	79
Şekil 4.16 : Durum 2 için gerininin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).	80
Şekil 4.17 : Durum 2 için yer değiştirimenin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).	81
Şekil 4.18 : Durum 2 için gerininin RMS ve maksimum değerleri (2. sinyal).	82
Şekil 4.19 : Durum 2 için yer değiştirimenin RMS ve maksimum değerleri (2. sinyal).	82
Şekil 4.20 : Durum 2 için yanıt oranı (düşük girdi genliği).	83
Şekil 4.21 : Durum 3 için gerininin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).	84
Şekil 4.22 : Durum 3 için yer değiştirimenin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).	84
Şekil 4.23 : Durum 3 için gerininin RMS ve maksimum değerleri (2. sinyal).	85
Şekil 4.24 : Durum 3 için yer değiştirimenin RMS ve maksimum değerleri (2. sinyal).	85
Şekil 4.25 : Durum 3 için yanıt oranı (düşük girdi genliği).	86
Şekil 4.26 : Durum 4 için gerininin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).	87
Şekil 4.27 : Durum 4 için yer değiştirimenin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).	88
Şekil 4.28 : Durum 4 için gerininin RMS ve maksimum değerleri (2. Sinyal).	88
Şekil 4.29 : Durum 4 için yer değiştirimenin RMS ve maksimum değerleri (2. sinyal).	89
Şekil 4.30 : Durum 4 için yanıt oranı (düşük girdi genliği).	89
Şekil 5.1 : Tasarlanan yeni sıvı tankı.	93
Şekil 5.2 : COMSOL modelinin görünümü.	95
Şekil 5.3 : COMSOL’da tanımlanan çözüm ağı.	97
Şekil 5.4 : COMSOL analizinde suyun yapı ile birlikte hareketi.	97
Şekil 5.5 : Yeni kap tasarımı için COMSOL analiz sonuçları.	99
Şekil 5.6 : Yeni kap tasarımı için sistem yanıtı (0,7 mm girdi genliği).	101
Şekil 5.7 : Yeni kap tasarımı için sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).	102
Şekil 5.8 : Su yüksekliğine göre oluşturulan durumlar.	103
Şekil 5.9 : Yeni kap tasarımı için elde edilen sonuçlar (deprem girdisi).	104
Şekil 5.10 : Yeni kap-Eski kap performans karşılaştırması.	105
Şekil 5.11 : Dolu bölme sayısına göre yanıtındaki düşme yüzdeleri.	108
Şekil Ek. 1: Deney düzeneği teknik resmi.	120

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Literatürdeki deneysel çalışmalar.	9
Çizelge 2.1 : Kullanılan girdi ve çıktı modülleri.....	22
Çizelge 3.1 : Titreştirilen kaptaki çalkalanmayı incelemek için yapılan deneyler. ...	27
Çizelge 3.2 : Dalga yüksekliği ve çalkalanma kuvveti incelemeleri için yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar.	30
Çizelge 3.3 : Elde edilen yüzey profilini doğrulamak için yapılan deneyler.	36
Çizelge 3.4 : Görüntü işleme işlemleri ile elde edilen dalga yüksekliği verisinin ultrasonik algılayıcı verisi ile karşılaştırılması.	40
Çizelge 3.5 : Çalkalanma kuvveti hesabını doğrulamak için yapılan deneyler.	47
Çizelge 3.6 : Hesaplanan çalkalanma kuvveti verisinin yük hücresi verisi ile karşılaştırılması.	52
Çizelge 4.1 : Sinüs girdisi için deney yapılan durumlar.	59
Çizelge 4.2 : Durum 1 için sönümleyicisiz sistem yanıtı (2 mm girdi genliği).	60
Çizelge 4.3 : Durum 1 için sönümleyicili sistem yanıtı (2 mm girdi genliği).	60
Çizelge 4.4 : Durum 1 için sönümleyicisiz sistem yanıtı (4 mm girdi genliği).	61
Çizelge 4.5 : Durum 1 için sönümleyicili sistem yanıtı (4 mm girdi genliği).	61
Çizelge 4.6 : Durum 2 için sönümleyicisiz sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).	63
Çizelge 4.7 : Durum 2 için sönümleyicili yanıtı (1 mm girdi genliği).....	63
Çizelge 4.8 : Durum 2 için sönümleyicisiz sistem yanıtı (3 mm girdi genliği).	64
Çizelge 4.9 : Durum 2 için sönümleyicili sistem yanıtı (3 mm girdi genliği).	65
Çizelge 4.10 : Durum 3 için sönümleyicisiz sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).	66
Çizelge 4.11 : Durum 3 için sönümleyicili sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).	67
Çizelge 4.12 : Durum 3 için sönümleyicisiz sistem yanıtı (3 mm girdi genliği).	68
Çizelge 4.13 : Durum 3 için sönümleyicili sistem yanıtı (3 mm girdi genliği).	68
Çizelge 4.14 : Durum 4 için sönümleyicisiz sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).	70
Çizelge 4.15 : Durum 4 için sönümleyicili sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).	70
Çizelge 4.16 : Sinüs girdisi için yanıt düşüş oranları.	71
Çizelge 4.17 : Deprem girdisi için deney yapılan durumlar.	73
Çizelge 4.18 : Durum 1 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali).	75
Çizelge 4.19 : Durum 1 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali).	76
Çizelge 4.20 : Durum 2 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali).	80
Çizelge 4.21 : Durum 2 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali).	81
Çizelge 4.22 : Durum 3 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali).	84
Çizelge 4.23 : Durum 3 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali).	85
Çizelge 4.24 : Durum 4 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali).	87
Çizelge 4.25 : Durum 4 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali)	88
Çizelge 4.26 : Sinyal 1 için en iyi su yüksekliklerinde yanıt düşme yüzdeleri.....	90
Çizelge 4.27 : Sinyal 2 için en iyi su yüksekliklerinde yanıt düşme yüzdeleri.....	90
Çizelge 5.1 : Yeni kap tasarımı için sönümleyicisiz sistemin analiz sonuçları.	98
Çizelge 5.2 : Yeni kap tasarımı için sönümleyicili sistemin analiz sonuçları.....	98

Çizelge 5.3 : Sönümleyicisiz sistemin deneysel yanıtı (0,7 mm girdi genliği).....	100
Çizelge 5.4 : Sönümleyicili sistemin deneysel yanıtı (0,7 mm girdi genliği).....	100
Çizelge 5.5 : Sönümleyicisiz sistemin deneysel yanıtı (1 mm girdi genliği).....	101
Çizelge 5.6 : Sönümleyicili sistemin deneysel yanıtı (1 mm girdi genliği).....	102
Çizelge 5.7 : Yeni kap tasarımı ile deprem girdisi için elde edilen sonuçlar.....	104
Çizelge 5.8 : Sinüs girdisi için kütle oranı-yanıt düşme yüzdesi.....	107
Çizelge 5.9 : Deprem girdisi için kütle oranı-yanıt düşme yüzdesi.....	107

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler Açıklama

M	Tek serbestlik dereceli sistemin kütlesi
K	Tek serbestlik dereceli sistemin yay sabiti
M_s	Tek serbestlik dereceli sisteme eklenen sönümleyicinin kütlesi
K_s	Tek serbestlik dereceli sisteme eklenen sönümleyicinin yay sabiti
C_s	Tek serbestlik dereceli sisteme eklenen sönümleyicinin sönüm oranı
w	Hareket frekansı
w_n	Doğal frekans
g	Yer çekim ivmesi
h	Sıvı tankındaki su yüksekliği
L	Sıvı tankının genişliği
t	Zaman
f	Sıvının çalkalanma doğal frekansı
x	Sıvı tankı üzerindeki yatay eksendeki konum
z	Sıvı tankı üzerindeki dikey eksendeki konum
H	Hareket genliği
ρ	Su yoğunluğu
Φ	Sistemin hız potansiyeli
φ	Akışkanın hız potansiyeli
P	Basınç

1. GİRİŞ

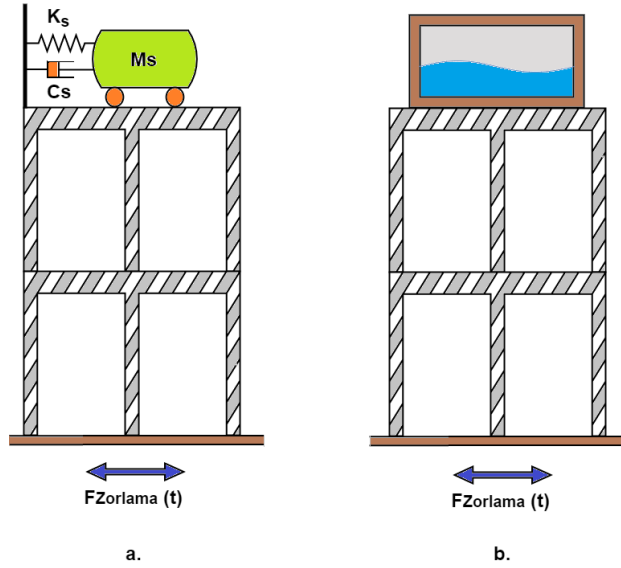
Yapıların deprem ve rüzgar gibi çevresel dış girdilere maruz kaldığı durumlardaki dinamik yanıtlarının iyileştirilmesi ve bu girdilerden daha az etkilenmeleri için alternatif yöntemler üretilmesi günümüzde üzerinde önemli sayıda çalışma olan konulardan biridir. Yapıların bu tip girdilerden daha az zarar görmeleri için uygulanabilecek en uygun iki çözüm, binaların güçlendirilmesi ve bina titreşimlerinin çeşitli titreşim sönümleyici uygulamaları ile azaltılmasıdır. Binaların güçlendirilme maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı, yapıların dinamik yanıtını iyileştirmek için çeşitli aktif, yarı-aktif ve pasif titreşim sönümleme yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır [1]. Aktif ayarlanmış mekanik titreşim sönümleyiciler ve dağıtılmış eyleyiciler gibi yöntemler yapılarda aktif titreşim kontrol yöntemi olarak kullanılabilir [2]. Yarı-aktif sistemler ise direngenlik kontrol cihazları, sürtünme kontrol cihazları ve kontrol edilebilir sönüm oranlı sönümleyiciler kullanılarak oluşturulmaktadır [3]. Ayarlanmış mekanik titreşim sönümleyiciler, ayarlanmış sıvılı sönümleyiciler ve ayarlanmış sıvılı kolon sönümleyiciler ise yapıların pasif titreşim kontrolü uygulamalarında sıklıkla kullanılır [4]. Bahsedilen bu yöntem ve cihazlar hibrit sistemler ile birlikte de kullanılabilir [5]. Bu çalışmada pasif titreşim sönümleme yöntemlerinden biri olan ayarlanmış sıvılı sönümleyiciler yani diğer bir adıyla çalkalanan titreşim sönümleyiciler üzerinde durulacaktır.

1.1 Çalkalanan Titreşim Sönümleyicinin Çalışma Prensibi

Pasif titreşim sönümleyicilerin çalışma prensibi, tek serbestlik dereceli sisteme eklenen bir mekanik titreşim yutucu üzerinden anlatılacaktır. Mekanik titreşim yutucunun temsili çizimi Şekil 1.1.a'da görülmektedir. Şekil 1.1.b'de ise bu çalışmada performansı incelenecek olan çalkalanan titreşim sönümleyici görülmektedir.

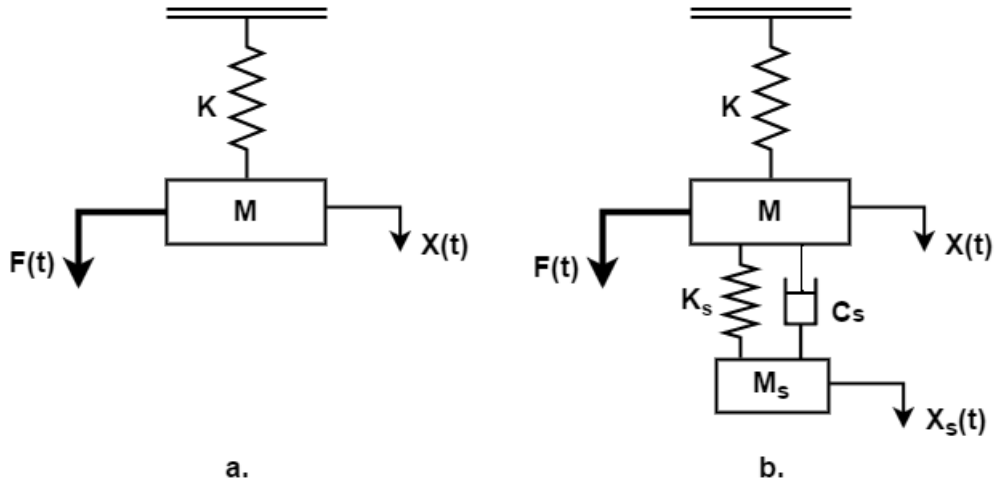
Üzerinde titreşim yutucu bulunmayan ve sadece ' M ' kütlesi ve ' K ' yayından oluşan tek serbestlik dereceli sistemin ayrık modeli Şekil 1.2.a'da görülmektedir. Bu sisteme doğal frekansında girdi uygulanırsa sistem rezonans yanıtı verir. Yani doğal frekansında hareket ettirilen sistemin yanıtı, sistemde sönüm olmaması durumunda

sonsuzu gider. Bu durum Şekil 1.3’de verilen grafikte, yutucusuz sistemin yanıtına bakılarak görülebilir.



Şekil 1.1 : a. Mekanik titreşim yutucu b. Çalkalanan titreşim sönümleyici.

Sistemin doğal frekansında verdiği yanıtını düşürmek için sisteme mekanik yutucu eklenebilir. Bahsedilen tek serbestlik dereceli sisteme yutucu eklenmesi ile oluşan yeni iki serbestlik dereceli sistem ise Şekil 1.2.b’de görülmektedir.



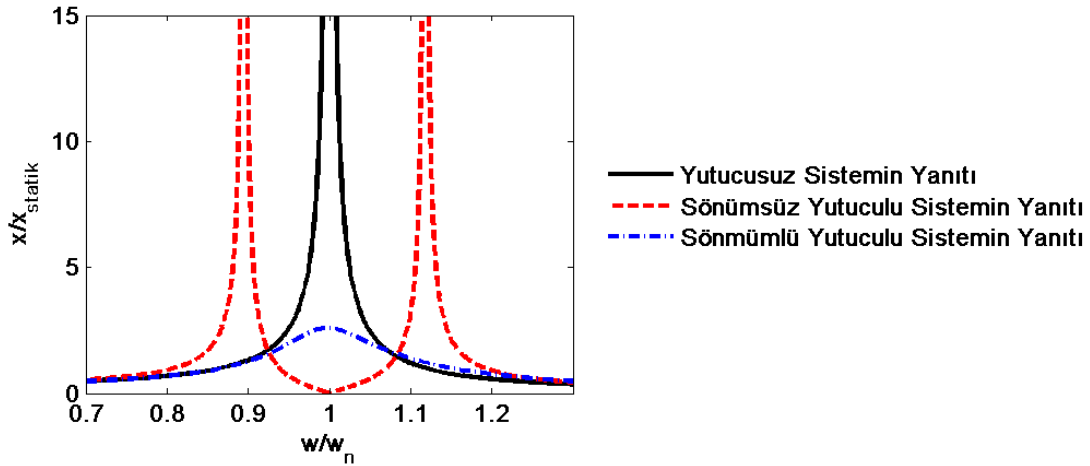
Şekil 1.2 : a. Yutucusuz sistem b. Yutuculu sistem.

Şekil 1.2.b’de görülen sistemdeki damperin olmadığını ve yapıya sadece yeni bir yay ve kütle eklendiğini düşünelim. Eklenen bu M_s ’ kütle ve K_s ’ yayı ile birlikte ana kütle için rezonans frekansındaki yanıtı 0’a düşürülebilir. Ancak sistem yanıtının 0’a düşürülebilmesi için eklenen yayın yay sabitinin ve yutucunun kütlelerinin ana kütle ve

yay sabitine göre ayarlanması gerekmektedir. Bu ayarlama kullanılmak üzere kütle ve yay sabiti oranları arasındaki bağıntı Denklem (1.1)'deki gibidir.

$$K_s = \frac{K}{M} M_s \quad (1.1)$$

Bu ayarlama işlemi yapıldıktan sonra sönümsüz sistem için yanıtın ana sistemin rezonans frekansında 0'a düştüğü Şekil 1.3'teki grafikte verilen sönümsüz yutuculu sistemin yanıtı incelenerek görülebilir. Bu yöntemde eklenen yeni kütle ve yay, ana kütleye, dış zorlamanın büyüklüğünde ve ters yönünde bir kuvvet uygulayarak ana kütle için sistemin doğal frekansında 0'a düşürür. Ancak yutucusuz sistemin doğal frekansının hemen altındaki ve üstündeki frekans değerlerinde yeni iki rezonans tepesi oluşmaktadır. Sistem yanıtında istenmeyen bu iki rezonans tepesi ise Şekil 1.2.b'de görülen sistemdeki damperin sönüm oranı uygun bir değere ayarlanarak ortadan kaldırılabilir. Sisteme ekli olan damperin sönümü artırıldıkça Şekil 1.3'te görülen sönümsüz yutuculu sistemin yanıtı değişerek, yine aynı grafikteki görülen sönümlü yutuculu sistemin yanıtına dönüşmektedir.



Şekil 1.3 : Yutucunun sistem yanıtı üzerindeki etkisi.

Tek serbestlik dereceli sistemler için en uygun direngenlik ve sönümleyici değerinin bulunması Den Hartog tarafından yapılmıştır [6]. Çok serbestlik dereceli sistemlerde bu çıkarımların kullanılabilmesi için sistemler modal analiz ile tek serbestlik dereceli sistemlere indirgenir ve hesaplanan bu tek serbestlik dereceli sisteme Den Hartog'un yaklaşımı uygulanır. Ancak bu yöntem çok serbestlik dereceli sistemin doğal frekansları birbirine çok yakınsa doğru yanıt veremez. Den Hartog'un yaklaşımı çok serbestlik dereceli sistemlere ilk olarak Mehmet Bülent Özer ve Thomas J. Royston

tarafından uygulanmıştır [7]. Titreşim yutucu uygulamalarında genellikle eklenen kütle, ana kütlelerin %1'i ile %5'i ağırlığında olmaktadır.

Çalkalanan titreşim sönümleyiciler de mekanik titreşim yutuculara benzer bir mantıkla çalışmaktadır. Mekanik titreşim yutucularda ana kütleyle eklenen yay, kütle ve damper yerine, çalkalanan titreşim sönümleyicilerde ana sisteme sıvı tankı ve sıvı eklenmektedir. Mekanik sistemdeki ana kütleyle eklenen kütle, yay ve damperin etkisi çalkalanan titreşim sönümleyicideki sıvının etkisine denktir.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{L} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right)} \quad (1.2)$$

Bu sistemlerde dış kuvvet nedeni ile yapı harekete geçtiğinde sıvı eylemsizlik kuvveti nedeniyle ters yönde hareket eder ve yapıya sıvı tankı üzerinden dış kuvvetin tersi yönünde bir kuvvet uygular. Eylemsizlik ve yer çekiminin etkisi ile sıvı salınım yapmaya başlar. Sıvı tankındaki sıvı yüksekliği değiştirilerek sıvının çalkalanma doğal frekansı ayarlanabilir. Çalkalanma doğal frekansı düşük sıvı yükseklikleri ve çalkalanma genlikleri için Denklem (1.2)'de verilen bağıntı ile hesaplanır [8]. Denklem (1.2)'de verilen bu bağıntı su yüksekliğinin kap uzunluğuna oranının 0,04-0,5 arasında olduğu durumlar için geçerlidir. Bu bağıntıda 'f' çalkalanma doğal frekansı, 'g' yer çekim ivmesi, 'h' su yüksekliği, 'L' kap genişliğidir. Mekanik yutucular için olduğu gibi çalkalanan titreşim sönümleyiciler için de yutucunun doğal frekansının ana sistemin doğal frekansına göre ayarlanması sistem yanıtının başarılı bir şekilde sönümlenebilmesi için önemlidir.

1.2 Çalkalanma Probleminin Sayısal Çözümü için Yapılan Çalışmalar

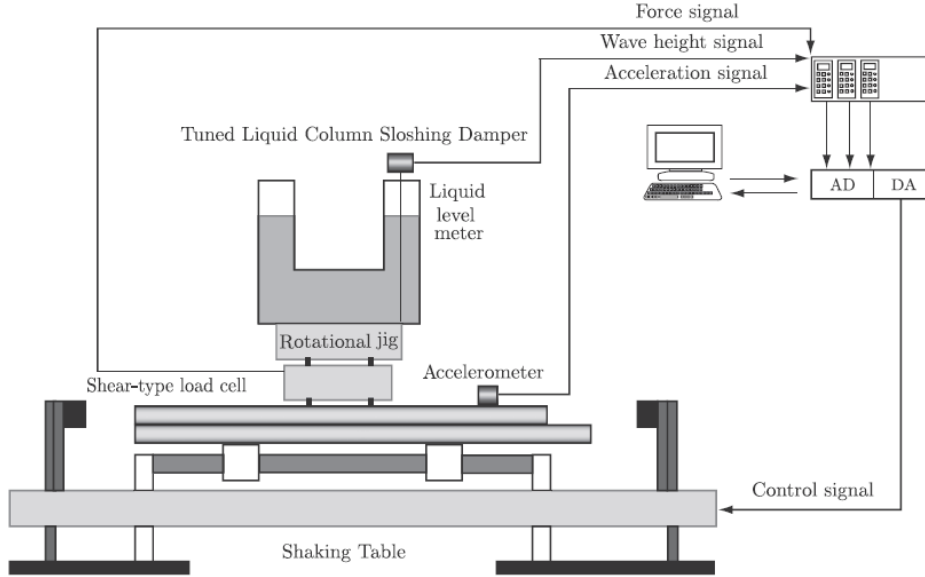
Çalkalanan titreşim sönümleyicilerin verimliliklerinin arttırılabilmesi için sıvının kap içerisindeki hareketinin bilinmesi gerekmektedir. Sıvının kap içerisindeki hareketini analitik çözümlerle hesaplayabilmek sıvının doğrusal olmayan davranışından dolayı imkansızdır. Bu yüzden çalışmalar çalkalanma probleminin sayısal çözümü üzerine yoğunlaşmıştır. Literatürdeki sayısal çalışmalarda, çalkalanma problemlerinin çözülebilmesi için çeşitli teoriler ve denklemlerden faydalanılmıştır. Bu çalışmalarda Navier-Stokes denklemlerinin yanı sıra potansiyel akış teorisi, sığ dalga teorisi, doğrusal dalga teorisi ve sınır tabaka teorisi gibi yaklaşımların bazıları kullanılarak

oluşturulan matematiksel modeller çeşitli sayısal yöntemler vasıtası ile çözülmüştür [9, 10, 11, 12]. Ancak yapılan çalışmaların çoğunda basitleştirilmiş doğrusal teoriler kullanıldığından dolayı bu matematiksel modeller sadece küçük deformasyonlar için doğru sonuçlar verir [13]. Oluşturulan bu modellerinin çözümünde doğru sonuçlara ulaşabilmek için hareketli çözüm ağı kullanılmalıdır. Hareketli çözüm ağı problemlerinin çözümünde kullanılan sayısal yöntemler; Lagrange Methodu, Euler Metodu, Birleştirilmiş Euler ve Lagrange Metodu ile Düzleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiğidir. Lagrange Metodunda çözüm ağı her parçacığın konumu zamana bağlı olarak takip edilir [14]. Bu yaklaşım genellikle mekanik sistemlerin analizinde kullanılır. Euler metodunda ise çözüm ağı parçacıkları takip etmez, parçacıklar çözüm ağı içerisinde yer değiştirir. Euler metodu deformasyonların büyük olduğu akışkanlar mekaniği problemlerinde sıklıkla kullanılır. Bu iki metot birleştirilerek oluşturulan Birleştirilmiş Euler ve Lagrange Metodunda ise hem çözüm ağı parçacıkları takip eder hem de parçacıklar ağı içerisinde yer değiştirir. Bu metot akışkan-yapı etkileşimi problemleri ve sıvı-gaz ara yüzeyi içeren problemlerde sıklıkla tercih edilir [15]. Düzleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği ise diğer yöntemlerden farklı olarak çözüm ağı içermez. Sıvının benzetiminde kullanılan parçacıkların birbirleri ve tank ile olan etkileşimlerini hesaba alır [16]. Birleştirilmiş Lagrange ve Euler Metodunun diğer metotlara göre daha başarılı sonuçlar verdiği söylenebilir. Analiz süreleri dikkate alındığında ise sonuçların doğruluğunda diğer metotların gerisinde kalan Düzleştirilmiş Parçacık Dinamiği Yöntemi öne çıkmaktadır [15]. Ancak bu çözümlerde yapılan varsayım ve kabuller nedeni ile bu çalışmaları deneysel yöntemlerle doğrulamak oldukça önemli ve gereklidir.

1.3 Çalkalanma Problemi ile ilgili Deneysel Çalışmalar

Yukarıda bahsedildiği gibi çalkalanma problemleri sayısal olarak çözülmesi zor olan doğrusal olmayan problemlerdir. Bu yüzden literatürdeki çalışmalar incelendiğinde çalkalanma problemlerinin çözümünde ve sayısal çözümlerin doğrulanmasında deneysel çalışmaların önemli bir yer tuttuğu görülmektedir. Bu çalışmada da çalkalanan titreşim sönümleyicilerin performansı deneysel yöntemlerle incelenecektir. Bu sebeple konu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan örnek bir deney düzeneğinin şeması Şekil 1.4'te verilmiştir. Şekil 1.4'te verilen algılayıcıların yanı sıra yapı modelinin bulunduğu deney

düzeneklerinde sistemlere sıklıkla LVDT ve ivmeölçer de eklenmiştir. Çalkalanmanın takibi için literatürdeki çalışmalarda sıklıkla kullanılan algılayıcılar hakkında detaylı bilgi Bölüm 1.5’te verilmiştir.



Şekil 1.4 : Örnek deney düzeneği [17].

Lee ve ark.’nın yarı-deneysel çalışmasında 4 farklı deprem girdisi için çalkalanan titreşim sönümleyici performansını incelemiştir [17]. Bu çalışmada deney düzeneğinde fiziksel yapı modeli bulunmamaktadır. Yapı için oluşturulan analitik model tanımlı deprem girdisi için anlık çözümlerle sarsma tablası vasıtasıyla yapının üst katının yer değiştirmesi çalkalanan titreşim sönümleyiciye girdi olarak verilmektedir. Çalkalanan titreşim sönümleyici ile tabla arasında bulunan yük hücresi ile sıvının çalkalanmasından dolayı oluşan çalkalanma kuvveti ölçülerek yapı modeli için oluşturulan analitik modele kuvvet geri beslemesi olarak anlık verilmektedir. Tek katlı bina modeli ve geleneksel sarsma tablası ile elde edilen sonuçlar bu yöntem ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak geliştirilen yöntem doğrulanmıştır. Daha sonra bu yöntem ile oluşturulan 3 katlı bina modelinin 4 farklı deprem girdisi altında çalkalanan titreşim sönümleyicinin olduğu ve olmadığı durumlardaki yanıtları toplanmıştır. Çalışmada dikdörtgenler prizması geometrisinde sıvı tankı kullanılmıştır. Çalkalanan titreşim sönümleyici sistem yanıtını ivmelerin maksimum değerlerinde %4-30, RMS değerlerinde ise %18-60 oranında düşürmüştür. Yanıtlardaki düşüşler yapı rezonans frekansı etrafındaki girdi frekanslarında en fazladır.

Jin ve ark. tarafından yapılan çalışmada açık denizlerdeki petrol ve doğal gaz arama kulelerinde deprem girdisi ile oluşan yanıtın düşürülmesi hedeflenmiştir [18]. Bu

çalışmada gerçek bir platformun 1/25 ölçeğinde küçültülerek oluşturulan modeli kullanılmıştır. Bu çalışmada ise sıvı tankı olarak silindirik sıvı tankı tercih edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda 3 farklı deprem verisi girdi olarak kullanılmıştır. Üç farklı sıvı yüksekliği için yapılan ölçümlerde çalkalanan titreşim sönümleyici ile maksimum ivmede %4-51 oranında düşüş gözlemlenmiştir. Maksimum yer değiştirmedeki düşüş ise %2-64 oranındadır. Deneysel sistem yanıtı en çok suyun çalkalanma doğal frekansı ile yapının temel doğal frekansının yakın olduğu durumlarda düşmüştür.

Xin ve ark.'nın çalışmasında 4 farklı deprem girdisi kullanılarak dikdörtgenler prizması şeklindeki kap için farklı kap taban şekilleri ile deneyler yapılmıştır [19]. Kullanılan kap taban şekilleri düz, V şeklinde ve W şeklindedir. Bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran önemli bir özellikte sıvı tankının zemininde kum bulunmasıdır. Deneysel 3 katlı bir yapı modeli kullanılmış ve bu model üzerindeki her kat için yer değiştirme ve ivme verileri toplanmıştır. Deneysel elde edilen verilere göre ivmelerde %3-22 oranında azalma olurken yer değiştirmelerde bu oran %0,5-15'tir. Taban şekillerine göre çalkalanan titreşim sönümleyici performansları karşılaştırıldığında ise herhangi bir taban şeklinin diğer taban şekillerinden yapı yanıtını sönümlemede daha başarılı olduğu söylenemez. Farklı taban şekilleri için yapılan deneylerde benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Lee ve ark.'nın çalışmasında ise çalkalanan titreşim sönümleyiciler ile sıvılı kolon sönümleyicilerin performansları deneysel yöntemler ile karşılaştırmıştır [20]. Çalışmada yapı yoktur. Sıvı tankı ile hareketli platform arasına yerleştirilen yük hücresi vasıtası ile sıvının hareketinden dolayı oluşan çalkalanma kuvveti ölçülmektedir. Tasarlanan U şeklinde sıvı tankı hareket yönüne dik yerleştirildiğinde çalkalanan titreşim sönümleyici, paralel yerleştirildiğinde ise sıvılı kolon sönümleyici olmaktadır. İki titreşim sönümleyicinin de doğal frekansı aynı değere ayarlanmıştır. Her iki titreşim sönümleyici için hareket frekansına göre ölçülen kuvvet değerleri grafik olarak verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, sıvının hareketinden dolayı oluşan kuvvetin rezonans frekansı etrafında çalkalanan titreşim sönümleyicide sıvılı kolon titreşim sönümleyiciye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Rezonans frekansından yüksek ancak rezonans frekansına yakın frekanslarda ise sıvılı kolon titreşim sönümleyici ile daha fazla kuvvet elde edilmektedir.

Raok tarafından yapılan çalışmada çalkalanan titreşim sönümleyicilerin performansları hem deneysel hem de sayısal olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [21]. Bu çalışmayı diğer çalışmalardan farklı kılan özellik ise çalkalanan sıvı kütlesinin yapı kütlesine oranının değişiminin çalkalanan titreşim sönümleyicinin performansı üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesidir. Bu çalışma sıvının kütlesinin yapının kütlesine oranı %0,5 iken çalkalanan titreşim sönümleyicinin maksimum kat yer değiştirmesinde %27,5 azalma sağladığını göstermiştir. Kütle oranı %3 olduğunda yer değiştirmedeki azalma %45,5 olmaktadır. Kütle oranı %3'ün üstüne çıktığında ise yer değiştirmedeki azalma çok az değişmekte ve bununda toplam kütle artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışmaların yanı sıra matematiksel modellerin ve sayısal analizlerin doğrulanması içinde deneysel yöntemlere başvurulmuştur. Ikeda tarafından yapılan çalışmada, tasarlanan 2 katlı bina modeline 2 adet dikdörtgen prizması sıvı tankı yerleştirilerek harmonik zorlama altında deneyler yapılmıştır ve deneyler farklı durumlar için yapılan sayısal çözümleri doğrulamasında kullanılmıştır [22].

Love ve Tait tarafından yapılan çalışmada ise sığ su dalga teorisi kullanılarak oluşturulan analitik modelin farklı su yükseklikleri ve girdi genlikleri için verdiği sonuçların doğruluğu deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak incelenmiştir [23]. Bu çalışmada bina modeli kullanılmamıştır ve su tankının içerisine sönüm oranını arttırmak için 2 adet delikli plaka yerleştirilmiştir. Sarsma tablasının üzerine yük hücresi ile tutturulan sıvı tankı için sinüs konum girdisi altında kuvvet ve dalga yüksekliği ölçümleri yapılmıştır. Su yüksekliğinin kap uzunluğuna oranı 0,05 ile 0,15 aralığında olduğunda geliştirilen modelin doğru çözümü verebildiği görülmüştür. Bu oran 0,15'in üzerinde çıktığında ise model geçerli olmamaktadır. Yukarıda bahsedilen deneysel çalışmalardan yapı yanıtını çalkalanan titreşim sönümleyici ile düşürmeyi hedefleyen çalışmalar Çizelge 1.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 1.1 : Literatürdeki deneysel çalışmalar.

Makale	Bina Modeli	% Kütle Oranı	Girdi Tipi	Yanıttaki % Düşme	Veri Tipi	İncelenen Değer
Bigdeli ve ark. [4]	3 katlı bina	14	Dinamik yüklenme	15	Yer değiştirme	Maksimum
				55	İvme (PSD)	Ortalama
Lee ve ark. [17]	Tek katlı bina	1,3	4 farklı deprem	30-73	İvme	Ortalama
Le ve ark. [17]	3 Katlı bina	2	4 farklı deprem	4-30	İvme	Maksimum
				18-60	İvme	RMS
Jin ve ark. [18]	Petrol Arama Platformu	-	3 farklı deprem	2-64	Yer değiştirme	Ortalama
				4-51	İvme	Ortalama
Xin ve ark. [19]	3 katlı bina	1,6	4 farklı deprem	3-22	İvme	Maksimum
				1-15	Yer değiştirme	Maksimum
Raok ve ark. [21]	1 katlı basit yapı	-	Sinüs	57	Yer değiştirme	Maksimum
		0,5 ile 6 Arası		27-47	Yer değiştirme	Maksimum

Literatürdeki çalışmalar daha çok çalkalanma probleminin sayısal olarak çözümü üzerinde yoğunlaşmıştır. Deneysel çalışmalardan ise sıklıkla yapılan sayısal çözümlerin doğrulanmasında faydalanılmıştır. Sayısal çözümleri doğrulamak için yapılan bu çalışmalarda, deneyler sadece birkaç durum için yapılarak elde edilen sonuçlar sayısal çözüm ile karşılaştırılmışlardır. Daha az sayıda bulunan deneysel çalışmalarda ise çalkalanan titreşim sönümleyicilerin performansları tamamen deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Bu çalışmaların bir kısmında sıvı tankı bir yapının üzerine konmayıp direkt sarsma tablasının üzerine yerleştirilmiştir. Sarsma tablasına yerleştirilen sıvı tankındaki sıvının hareketinden dolayı oluşan çalkalanma kuvveti ve dalga yüksekliği takip edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalarda genellikle harmonik konum zorlaması girdi olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada ise hem sıvı tankının direkt sarsma tablasına tutturulduğu durum hem de sarsma tablası üzerindeki bina modeline tutturulduğu durum ayrı ayrı incelenmiştir.

Bina modeli kullanılan deneysel çalışmalarda deneyler sıklıkla, titreşim yanıtı düşürülmesi hedeflenen tek bir bina modeli için yapılmıştır. Bu çalışmada ise bina modellerindeki ağırlıklar ve plakaların uzunluğu değiştirilerek farklı doğal frekans ve ağırlıktaki bina modelleri için deneyler yapıldı ve yapı ile ilgili bu parametrelerin değişiminin çalkalanan titreşim sönümleyicinin performansı üzerindeki etkisi

incelendi. Yapılan çalışmalarda araştırmacılar daha çok 0,2-1,2 Hz aralığında doğal frekansa sahip yapı modelleri üzerinde çalışmıştır. Gökdelenler gibi uzun yapıların temel doğal frekansı bu değer aralığındadır. Ancak 3-5 katlı ve nispeten alçak yapıların doğal frekansları ise 2-4 Hz aralığındadır ve bu doğal frekans aralığındaki yapıların deprem girdileri için yanıtlarının çalkalanan titreşim sönümleyiciler kullanılarak azaltılması ile ilgili yeterli sayıda ve içerikte araştırma bulunmamaktadır. Sunulan çalışma bu yönüyle de yapılmış olan çalışmalardan ayrılmaktadır. Bunlara ek olarak çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütesinin yapı kütesine oranının çalkalanan titreşim sönümleyicinin performansı üzerindeki etkisi de sadece 1 çalışmada incelenmiştir [21]. Bu çalışmada bu durum da incelenmiştir.

Bina modeli kullanılan çalışmalarda sisteme ya harmonik zorlama ya da deprem girdisi verilmiştir. İki zorlama çeşidinin de ayrı ayrı girdi olarak sisteme uygulandığı az sayıda çalışma vardır. Bu çalışmada sisteme hem harmonik girdi hem de deprem girdisi verilerek elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda çalkalanan titreşim sönümleyicinin çalkalanma doğal frekansı hep yapının doğal frekansına ayarlanmış olup, bu iki değerin aynı olmadığı durumlar incelenmemiştir. Deneysel çalışmalarda yapıların yanıtları sadece yapıların doğal frekansına ayarlanmış tek bir çalkalanan titreşim sönümleyici ile sönümlenmeye çalışılmıştır. Sadece Ikeda tarafından yapılan çalışmada 2 adet çalkalanan titreşim sönümleyici kullanılmıştır [22]. Ancak bu çalışmada da 2 çalkalanan titreşim sönümleyici de aynı çalkalanma doğal frekansına ayarlanmış, çalışma çalkalanan titreşim sönümleyicinin bina üzerindeki konumunun sönümleme performansı üzerindeki etkisi üzerine yoğunlaşmıştır. Birden fazla frekansta etkili olan deprem sinyalleri için farklı çalkalanma doğal frekanslarına ayarlanmış sönümleyicilerin birlikte kullanımını sunulan bu çalışmada mevcuttur. Son olarak literatürdeki deneysel çalışmalarda çalkalanma kuvveti, suyun kap duvarlarında oluşturduğu basınç, dalga yüksekliği, kat yer değiştirmesi ve ivmesi sıklıkla ölçülmüştür ancak yapıdaki gerinimler incelenen hiçbir çalışmada ölçülmemiştir. Bu çalışmaların hedefi yapının maruz kaldığı kuvveti ve yapıda meydana gelen deformasyonları azaltmak olduğundan gerinimde ölçülmesi gereken önemli parametrelerdendir. Bu çalışmada yapının ayaklarında oluşan gerinim değerleri de ölçülerek incelenmiştir.

1.4 Yapılar için Pasif Titreşim Sönümlenme Uygulamaları

Pasif titreşim sönümleyiciler yapılarda rüzgar ve deprem girdileri ile oluşan bina titreşimlerinin azaltılması amacıyla 1960'lı yıllardan itibaren sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Bu amaçla kullanımlarının ilk örneklerinden biri 1973 yılında kullanıma açılan New York'taki World Trade Center Towers'tır. Bu uygulamada yapının çeşitli yerlerine yerleştirilmiş viskoelastik sönümleyiciler kullanılmıştır. Yapımı 2004 yılında tamamlanan ve tamamlandığında dünyanın en uzun yapısı olan Tayvan'daki Tapei 101'de de 800 ton ağırlığındaki sarkaç, titreşim sönümleyici olarak kullanılmıştır. Chicago'da bulunan 67 katlı ve 257 m yüksekliğindeki Park Tower için yapılan rüzgar tüneli testlerinde 10 yıllık dönem için ivmenin 26–30 mili-g aralığında olacağı öngörülmüştür. İvme değerinin istenen değer 15 mili-g değerine düşürülebilmesi için 300 ton ağırlığında ayarlanmış kütleli titreşim sönümleyici kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan titreşim sönümleyicinin ağırlığı yapının ağırlığının %1,4'ü kadardır [24].

Yokohoma Marine Tower, Tokyo International Airport Tower ve Nagasaki Airport Tower gibi ayarlanmış sıvılı sönümleyicilerin bulunduğu örnekler ise Japonya'da bulunmaktadır [25]. 365 m yüksekliğinde olan ve 2016 yılında tamamlanması beklenen Çin'deki Dalian Internatioanal Trade Center'da yapının %1 ağırlığındaki sıvılı çalkalanan titreşim sönümleyici ile yapıdaki rüzgardan kaynaklı titreşimler yapı modeli üzerinde yapılan çalışmalara göre %15-25 oranında düşürülmüştür [26]. Wanchai, Hong Kong'ta bulunan York Place'de ise yapının bölgede oluşan şiddetli tayfunlardan daha az etkilenmesi için binanın en üst katına 2 adet su tankı konulmuştur. Bu su tanklarına, çalkalanma doğal frekansları yapının ilk 2 doğal frekansına karşılık gelecek yüksekliklerde su konulmuştur. Bu çalışma sonrası yapının titreşim yanıtının önemli bir oranda düşürüldüğü çalışmada verilen grafikte görülmüştür [27]. Verilen örnek çalışmalarda hedefler genellikle yapılarda rüzgardan kaynaklı oluşan ivmelerin ISO 6897:1984 standardına uygun seviyelere getirilmesidir.

1.5 Çalkalanma Probleminin Takibi için Kullanılan Algılayıcılar

Çalkalanma durumu gibi sıvıların çok hızlı hareket ettiği durumlarda sıvı hareketinin ve bu hareket dolayısıyla oluşan kuvvetin doğru tespiti geleneksel algılayıcılar ile kolay olmamaktadır. Bu konuya örnek olarak, hareket halinde taşıtlarda yakıt seviyesi

ölçümünün zorluğu gösterilebilir [28]. Çalkalanma deneylerinde çeşitli algılayıcılar kullanılarak ölçülen basınç, kuvvet, dalga yüksekliği gibi parametreler incelenerek çalkalanma takip edilmektedir.

Deneysel en çok ölçülen parametrelerden biri basınçtır. Basınç ölçümleri için basınç algılayıcıları genellikle hareket yönüne dik olan duvarlara, duvar yüksekliği boyunca yerleştirilip bu basınç algılayıcılarıyla, dalgaların duvarlara vurması ile bu duvarlarda oluşan basınç dağılımı ölçülmeye çalışılmıştır [29, 30]. Yapılan çalışmalarda basınç ölçümü için kullanılan algılayıcı tipinin [31] ve elde edilen verilerin işleme yönteminin [32] sonuçların doğruluğu üzerinde etkisi olduğu görülmüştür.

Kap duvarlarında çalkalanma dolayısıyla oluşan net kuvvetin ölçümü de deneysel çalışmalarda sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemle ölçülen çalkalanma kuvvetinin büyüklüğü ve bu kuvvet ile yapının hareketi arasındaki faz farkı da önemlidir. Ancak net çalkalanma kuvvetinin ölçümünü direkt olarak yapmak mümkün değildir. Reed ve ark. tarafından yapılan çalışmada hareketli platforma yük hücresi ile bağlı olan sıvı tankı, hareketli platform vasıtasıyla hareket ettirilmiş ve bu hareket sırasında yük hücresi tarafından ölçüm yapılmıştır [32]. Ölçülen bu kuvvette sıvının çalkalanma kuvvetinin yanı sıra sıvı tankının ataletinden kaynaklı oluşan atalet kuvveti de vardır. Bu sebeple, sıvı tankında sıvı bulunmayan durum için aynı hareket girdisi ile bir ölçüm daha yapılmıştır ve bu iki ölçüm birbirinden çıkartılarak net çalkalanma kuvveti bulunmuştur. Ancak bina modeli bulunan deneylerde aynı girdi için bile sıvı bulunan ve bulunmayan durumlarda kabın ivmesi farklı olacağından bu yöntem ile net çalkalanma kuvveti tespit edilemez. Net çalkalanma kuvvetini tek bir ölçümde elde edebilmek için ise sıvı tankının ivmesinin de ölçülmesi gerekmektedir.

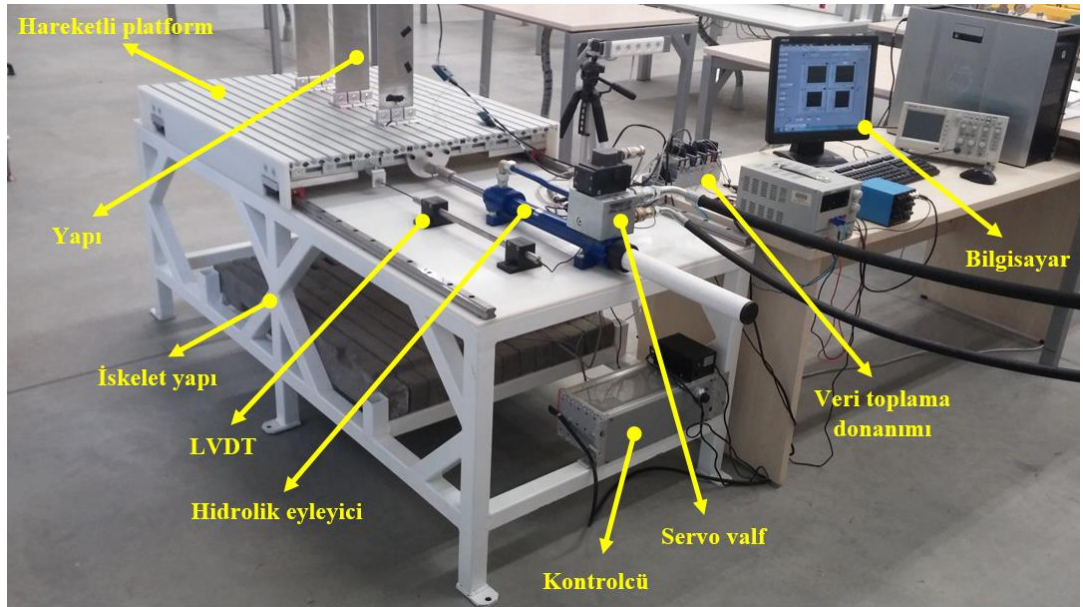
Dalga yüksekliğinin ölçümü ise özellikle sayısal çözümler ile deneysel çalışmaların karşılaştırılması için önemlidir. Dalga yüksekliği ölçümlerinde kapasitif problar ve ultrasonik algılayıcılar sıklıkla kullanılır. Sıvının içerisine yerleştirilen kapasitif problar sıvı yüksekliğini gecikme olmadan ölçebilirler [33, 34]. Ancak bu tip algılayıcılar sıvı ile temas halinde olduklarından çalkalanma sırasında sıvının hareketini etkilerler. Dalga yüksekliğini ölçme işlemleri için ultrasonik algılayıcılarda birçok çalışmada tercih edilmiştir. Ultrasonik algılayıcılar sıvı ile temas halinde değildir. Bu metotta üretilen ultrasonik dalgalar sıvı yüzeyinden yansıtılarak tekrar algılayıcıya döner. Bu iki eylemin gerçekleşme zamanları arasındaki süre farkı kullanılarak sıvı yüksekliği hesaplanabilir. Ultrasonik algılayıcılar ile toplanan veriler deneylerden sonra işlenerek

verilerin doğruluğu arttırılabilir [28]. Ancak bu tip dalga yüksekliğini ölçmeye yarayan algılayıcılar ile tüm serbest yüzey boyunca dalga yüksekliği ölçülememekte sadece ilgili algılayıcının altındaki noktada dalga yüksekliği ölçülebilmektedir. Bu algılayıcıların dışında serbest yüzey hareketinin kamera tarafından kaydedilen görüntüsü de sayısal analiz ve deney verilerini kıyaslamak için kullanılmıştır [35, 36]. Ancak bu çalışmalarda deneyden alınan ekran görüntüsü ile sayısal çözüm ile elde edilen serbest yüzey görsel olarak kıyaslanmıştır. Deneyde oluşan serbest yüzeyin profili sayısal olarak çıkarılmamıştır. Matteo ve ark.'nın çalışmasında ise kamera vasıtasıyla sıvılı kolon sönümleyicinin bir kolonunun deney boyunca görüntüsü kaydedilmiştir [37]. Kaydedilen bu görüntü üzerinde görüntü işleme işlemleri yapılarak kolondaki su yüksekliği zamana bağlı olarak hesaplanmıştır. Ancak bu çalışmada da sıvı serbest yüzeyi çıkarılmamış, sadece ortalama su yüksekliği hesaplanmıştır.

Sunulan bu çalışmada dalga yüksekliği ve çalkalanma kuvveti ölçümü için bahsedilen bu algılayıcılar yerine kamera ile elde edilen görüntülerin kullanılması hedeflenmiştir. Bunun için geliştirilen görüntü işleme algoritmasıyla sıvı hacmi tespit edilerek kap uzunluğu boyunca sıvı yüksekliği her zaman adımı için hesaplanmaktadır. Tespit edilen bu serbest yüzey verisi Fourier Dönüşümü kullanılarak sinüslerden oluşan bir fonksiyona dönüştürülür. Bir sonraki aşamada ise bu veriler ve doğrusal dalga teorisi kullanılarak akış için hız potansiyeli hesaplanmaktadır. Elde edilen hız potansiyeli vasıtasıyla kabın hareket yönüne dik iki duvar için basınç dağılımı hesaplanır. Son olarak basınç dağılımları kullanılarak net çalkalanma kuvveti rezonans durumu etrafında elde edilmektedir. Bu metot ile ölçülen dalga yüksekliği ultrasonik algılayıcı verisi ile çalkalanma kuvveti verisi de yük hücresi verisi ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Geliştirilen bu metot, dalga yüksekliğini ölçmede kullanılan seviye algılayıcıları ile çalkalanma kuvvetini ölçmede kullanılan yük hücresinin yaptığı işi yapabilmektedir. Ayrıca bu metot ile kabın yer değiştirmesini de ölçmek mümkündür.

2. DENEY DÜZENEĞİ VE DENEY YÖNTEMİ

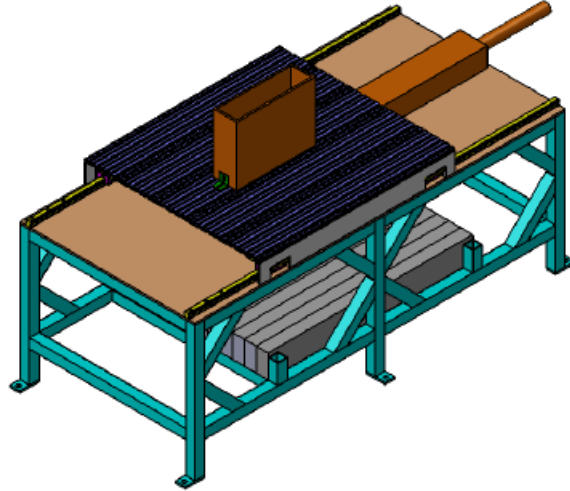
Deneysel çalışmaların yapılabilmesi için Şekil 2.1’de görülen deney düzeneği tasarlanmıştır. Tasarlanan deney düzeneği 4 ana başlık altında anlatılabilir. Bu başlıklar: Yapısal tasarım, eyleyici sistemi, algılayıcılar ve veri toplama sistemidir. Bu deney düzeneği kullanılarak yapılan deneyler hazırlanan deney yöntemi takip edilerek yapılmıştır. Deney düzeneğinin yapısal parçaları iskelet yapı, doğrusal kılavuzlar ve üzerindeki hareketli platformdan oluşmaktadır. Hareketli platformu hareket ettirebilmek için hidrolik eyleyici sistemi kullanılmıştır. Sıvı tankı ise hareketli platformun üzerine tutturulmuştur. Deney verilerini toplayabilmek için sistem üzerinde çeşitli algılayıcılar bulunmaktadır. Bu algılayıcılardan toplanan verileri ölçebilmek ve bu verileri bilgisayara aktarabilmek için de veri toplama donanımları ve yazılımları kullanılmıştır. Bu deney düzeneği oluşturulurken ihtiyaç duyulan parçaların bir kısmı piyasadan hazır olarak alınmıştır. Hazır olarak bulunamayan parçalar ise tasarlanarak ürettirilmiştir.



Şekil 2.1 : Deney düzeneğinin genel görünüşü.

2.1 Deney Düzeneginin Yapısal Tasarımı

Deney düzeneginin mekanik tasarımını gösteren katı model Şekil 2.2’de görülebilir. Deney düzeneginin yapısal kısımları iskelet yapı, doğrusal kızaklama sistemi, hareketli platform ve sıvı tankıdır.



Şekil 2.2 : Deney düzeneginin mekanik tasarımı.

İskelet Yapı:

Deney düzeneginin üzerine kurulacağı iskelet yapının çerçevesi, 50 mm genişliğinde demir kutu profillerden inşa edilmiştir. İskelet yapı yere sabitlenmemiştir. Bu sebeple, yüksek yatay kuvvetler altında iskelet yapının hareket etmemesi için yapının alt katına ağır beton bloklar yerleştirilmiştir. Masanın üst yüzeyi ise 10 mm kalınlığında polyamid levha ile kaplanmıştır. İskelet yapının büyük kuvvetlere maruz kalacağı düşünülmektedir ve deneylerin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için iskelet yapının bu büyük kuvvetler altında çok az deforme olması gerekmektedir. Bunun sağlanması için sayısal analiz programında iskelet yapının maruz kalabileceği maksimum kuvvet girdi olarak verilip yapının kritik noktalarında elde edilen deformasyon verileri incelenmiştir. Ayrıca iskelet yapının doğal frekansları da sayısal analiz programları ile yapılan analizlerle incelenmiştir. İskelet yapının doğal frekansı ile deneylerde uygulanacak girdi sinyallerinin frekans içeriği karşılaştırılıp, iskelet yapının deneyler süresince rezonansa girmeyeceği tespit edilmiştir. Bu analizler ile tasarım istenen sonuçlar alınca kadar güncellenmiştir. Ek 1’de tasarlanan iskelet yapının teknik resmi verilmiştir. Tasarlanan yapının ölçüleri ilgili teknik resim üzerinde gösterilmiştir.

Doğrusal Kızaklama Sistemi:

Hareketli platformun hidrolik eyleyici yardımı ile tek yönde rahat bir şekilde hareket etmesi gerekmektedir. Platformun kolay hareket edebilmesi için 2 adet çelik HIWIN HGR30R ray kullanılmıştır. Çelik rayların birbirlerine paralel olduklarından emin olunduktan sonra polyamid levha üzerinden demir profillere sabitlenmişlerdir. Çelik raylar üzerinde hareket etmek ve platformu taşımak üzere 4 adet HIWIN HGW30CC bilyeli kızak kullanılmıştır. 4 adet kızak kullanılmasının sebebi platformun rijitliğini arttırabilmek ve platformun verilen girdi hareketlerini zorlanma olmadan yapabilmesini sağlamaktır. Kullanılan ray ve doğrusal kızaklar yüksek rijitlikte ve yük taşıma kapasitesindedir. Ayrıca kullanılan ray ve kızakların sürtünme katsayıları düşüktür. Ray ve kızaklar Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Raylar, doğrusal kızaklar ve hareketli platform.

Hareketli Platform:

Doğrusal kızakların üzerine alüminyum malzemeden yapılan bağlantı plakaları gelmektedir. Bu bağlantı plakaları 45 mm x 90 mm ölçülerinde ve 90 cm uzunluğunda iki adet sigma profile, ikişer doğrusal kızak raylar üzerinde aynı hizada olacak şekilde ve raylara dik bir şekilde bağlanmıştır. Bu profillerin üzerinde düz bir yüzey elde edebilmek için 5 adet 22,5 mm x 180 mm ölçülerinde ve 1 m uzunluğunda alüminyum yüzey kaplama profili raylarla paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yüzey kaplama profillerinin üzerinde bulunan kanallar sayesinde platform üzerine yerleştirilmek istenen donanımlar kolaylıkla montajlanabilecektir. Yüzey kaplama profillerinin bağlantıları yapılırken profillerinin birbirine tutturulmasında alüminyum köşebentler kullanılmıştır. Platformun rijitliğini arttırmak için çok sayıda köşebent kullanılmıştır. Oluşturulan hareketli platform ve bu platformum ray ve kızaklara bağlantısı Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

Sıvı Tankı:

Sıvı tankı ise 40 cm genişliğinde 30 cm yüksekliğinde 14 cm enindedir. Tank saydam ve esnemez 10 mm kalınlığında pleksiglas malzemeden üretilmiştir. Şekil 2.6'da deneylerde kullanılan sıvı tankı görülmektedir.

2.2 Eyleyici Sistemi

İstenen hareket girdisinin oluşturulabilmesi için sistemi harekete geçirecek bir eyleyici gerekmektedir. Hidrolik ekipmanlar bu amaçla kullanılmıştır. Eyleyici sisteminin çalışması hidrolik yağ pompasının açılması ile başlar ve çalışma prensibi şu şekildedir:

- Hidrolik yağ pompası çalışarak basınçlı yağ üretir ve servo valfe gönderir.
- Bilgisayarda oluşturulan girdi sinyali, bilgisayara bağlı olan çıktı modülleri üzerinden kontrolcüye gönderilir.
- Kontrolcü bu girdi verisi ile LVDT'den aldığı konum geri beslemesi bilgisini kullanarak yeni bir kontrol sinyali üretir.
- Üretilen kontrol sinyali kontrolcü tarafından hidrolik eyleyici üzerinde bulunan servo valfe gönderilir.
- Servo valf aldığı bu kontrol sinyaline göre valf açıklığını değiştirerek hidrolik eyleyicinin ileri geri hareket etmesini sağlar.
- Kontrolcüye gönderilen konum geri beslemesi sinyalini üretmek için LVDT hidrolik eyleyiciye paralel bağlanır.
- LVDT sistemin yer değiştirmesini ölçerek kontrolcüye ve veri toplama bilgisayarına gönderir.

LVDT ile daha ayrıntılı bilgi algılayıcılar ile ilgili bölümde verilmiştir. Hidrolik eyleyici hareketli platforma kalın bir pim ve bağlantı parçaları vasıtasıyla esneme olmayacak şekilde tutturulmuştur. Platforma istenen hareket girdisi bu şekilde verilmiş olur. Şekil 2.4.a'da hidrolik eyleyici, LVDT, kontrolcü görülebilir. Elektrikli yağ pompası ise Şekil 2.4.b'de verilmiştir.



a



b

Şekil 2.4 : a. Hidrolik eyleyici, LVDT, kontrolcü b. Elektrikli yağ pompası.

2.3 Algılayıcılar

Sistemden istenen deney verilerinin elde edilebilmesi için sistem üzerindeki çeşitli yerlere algılayıcılar yerleştirilmiştir. Bu algılayıcılar LVDT, ultrasonik mesafe algılayıcıları, yük hücresi ve ivmeölçerdir. Ayrıca sistemin hareket görüntüsünü kaydetmek üzere deneylerde 1 adet kamera da kullanılmıştır.

LVDT:

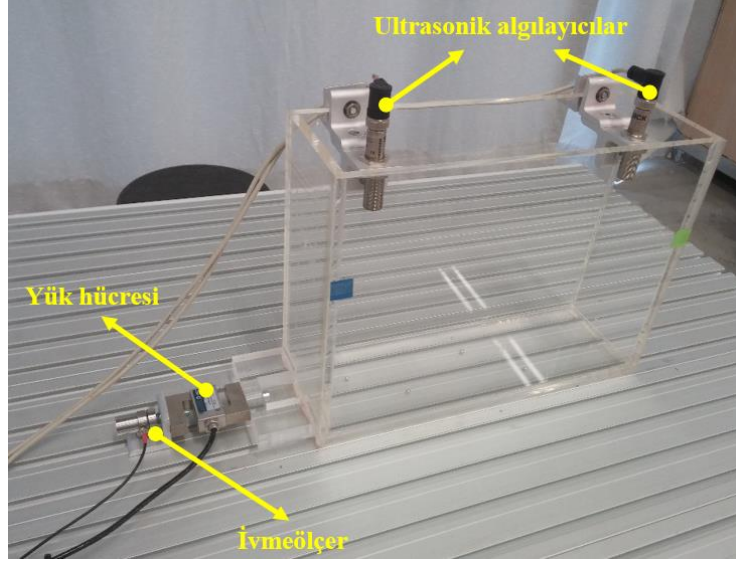
LVDT Şekil 2.5'te hidrolik eyleyici ile birlikte görülebilir. LVDT doğrusal değişken diferansiyel transformatörü anlamına gelmektedir. Gömlek yapısının içerisinde bulunan ve dış konum zorlaması ile serbestçe hareket eden manyetik çubuk ile doğrusal yer değiştirmeyi ölçebilir. LVDT'nin bir ucu sabit duracak şekilde iskelet yapının üzerine bağlanmıştır. Hareket eden çubuk ise hidrolik eyleyiciye paralel olacak şekilde hareketli platforma bağlanmıştır. LVDT ile kontrolcünün yer değiştirme geri beslemesi yapılır. Ayrıca hareketli platformun yer değiştirme bilgisi veri toplama ekipmanları ile de okunarak daha sonra kullanılmak üzere depolanır.



Şekil 2.5 : LVDT ve hidrolik eyleyici.

Ultrasonik Algılayıcılar:

2 adet SENSICK, UM 18-11116 ultrasonik algılayıcı sıvı tankının üzerine kap kenarlarından 47 mm uzaklıkta olacak şekilde köşebentler kullanılarak yerleştirildi. Ultrasonik algılayıcılar yüksek frekansta ses dalgalarını üreterek yayarlar. Daha sonra üretilen bu dalgalar algılama mesafesindeki nesnelere çarparak ultrasonik algılayıcılara geri gelirler. Dalga üretilme zamanı ve geri toplama zamanı arası geçen zaman farkı kullanılarak cismin uzaklığı hesaplanır. Ultrasonik algılayıcı seçiminde çözünürlük, doğruluk, tarama alanı ve algılama mesafesi önemli özelliklerdir. Seçilen algılayıcının ilgili özellikleri bu tip bir çalışma için yeterli görülmüştür. Ultrasonik algılayıcılar Şekil 2.6'da görülebilir.



Şekil 2.6 : Yük hücresi, ultrasonik algılayıcı ve ivmeölçer.

Yük Hücresi:

Sıvının hareketi ile kabın duvarlarında oluşan kuvvetin ölçülebilmesi için ZEMIC H3-C3-50kg-3b model yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresi Şekil 2.6’da görüldüğü gibi sıvı tankının sol tarafına vida ile gevşemeyecek şekilde tutturulmuştur. Yük hücresi ile sıvı tankının yapıya veya platforma uyguladığı kuvvet ölçülecektir. Ancak yük hücresini bu deney düzeneğinde kullanmadan önce dikkat edilmesi gereken bir husus vardır. Yük hücresinin kuvveti doğru bir şekilde ölçebilmesi için sıvı kabının zemine teması minimuma indirilmelidir. Sıvı kabının zemine temas ettiği noktalarda oluşacak sürtünme kuvveti nedeni ile ölçülecek kuvvette azalma meydana gelir. Bu da kuvvetin yanlış ölçülmesi anlamına gelir. Sıvı tankı bu sebeple yük hücresinden başka bir yere tutturulmamalıdır ve su tankı tablaya mümkün olduğunca az temas etmelidir. Su tankının zemine temasını azaltmak için su tankı ile zemin arasına 4 adet 5 mm çapında metal bilye konulmuştur.

İvmeölçer:

İvmeölçer olarak MMF-KD 41 kullanılmıştır. Kullanılan bu ivmeölçer piezoelektrik ivmeölçer olup çıkış sinyali elektrik yüküdür. Ayrıca ivmeölçer tarafından ölçülen veri, veri toplama donanımına gönderilmeden önce yükseltici tarafından yükseltilmektedir. Bahsedilen bu algılayıcılardan toplanan veriler uygun düşük ve yüksek geçiren filtreler ile filtrelenerek kullanılmıştır.

Kamera:

Bu algılayıcıların yanı sıra bir adet kamera sıvı tankının hareketini takip etmek için kullanılmıştır. Kamera olarak GoPro HERO3⁺ Black Edition seçilmiştir. Bu kamera 4K çözünürlüğe ve saniyede 240 kareye kadar görüntü alabilmektedir. Deneyler sırasında kamera sabit olup sıvı tankını karşıdan görmekte ve sıvı tankının içindeki sıvının hareketini görüntülemektedir. Kaptaki sıvı hareketinin daha iyi gözlemlenebilmesi için kaba konulan su, gıda boyası ile renklendirilmiştir.

2.4 Veri Toplama Sistemi

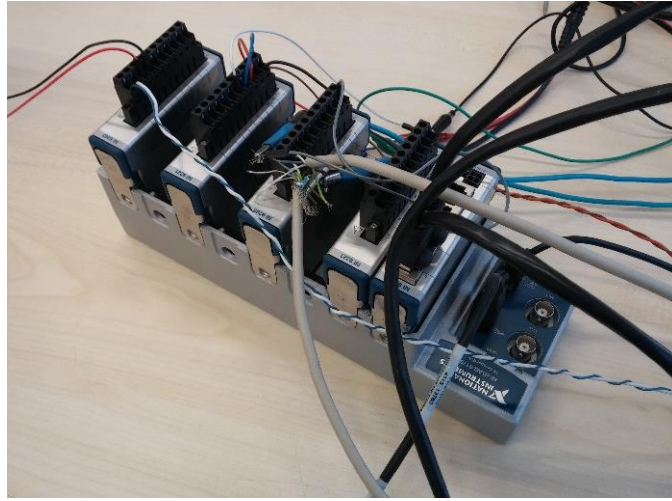
Algılayıcılar tarafından ölçülen verileri bilgisayar ortamına aktarabilmek ve bilgisayar üzerinde oluşturulan sinyalleri sisteme girdi olarak verebilmek için çeşitli girdi ve çıktı modülleri ile veri toplama yazılımına ihtiyaç duyulmaktadır. Veri toplama yazılımı olarak LABVIEW yazılımı kullanılmıştır. Donanım olarak ise 5 adet modül ve 2 adet terminal alınmıştır. Bu modüllerden 4'ü girdi modülü, 1'i ise çıktı modülüdür. Bahsedilen bu modüller National Instrument firmasının ürünleridir ve teknik özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Kullanılan girdi ve çıktı modülleri.

Model	İşlev	Kanal Sayısı	Sinyal Türü	Çalışma Aralığı	Birlikte Çalıştığı Cihaz / Algılayıcı	Adedi
NI 9263	Analog çıktı	4	Voltaj	± 10 V	Hidrolik eyleyici	1
NI 9221	Analog girdi	8	Voltaj	± 60 V	LVDT, İvmeölçer	2
NI 9237	Köprü analog girdi	4	Voltaj	± 25 mV/V	Yük hücresi	1
NI 9203	Analog girdi	8	Akım	± 20 mA	Ultrasonik algılayıcı	1
NI 9949	Terminal	1	Voltaj	-	Gerinim ölçer	2

Yukarıdaki çizelgede özellikleri ile birlikte verilen bu girdi ve çıktı modülleri NI cDAQ-9178 USB kasaya takılarak kullanılmaktadır. USB kasa modüller ile veri toplama bilgisayarı arasındaki bağlantıyı sağlamaktadır. Algılayıcılar ölçtükleri fiziksel parametreyi elektrik sinyaline çevirirler ve bağlı buldukları analog girdi modüllerine gönderirler. Analog girdi modülleri algılayıcılardan aldıkları analog voltaj veya akım sinyalini dijital sinyale çevirerek USB kasa üzerinden veri toplama yazılımı

aracılığıyla bilgisayara göndermektedir. Herhangi bir cihazı çalıştırmak için analog çıktı üretilmek istendiğinde ise işlemler ters sırada yapılmaktadır. Yani bilgisayarda üretilen dijital sinyal veri toplama yazılımı yardımıyla USB kasa üzerinden analog çıktı modülüne gönderilir. Burada sinyal dijitalden analoğa çevrilir. Analoğa çevrilen bu sistem istenilen sisteme girdi olarak verilebilir. Şekil 2.7’de USB kasa ve üzerindeki girdi ve çıktı modülleri görülebilir. Örnekleme frekansı yük hücresi ve gerinim ölçer için 1613 Hz iken diğer algılayıcılar için 100 Hz’dir. Hidrolik eyleyici için oluşturulan çıktı sinyali ise 1 saniyede 10 kez güncellenmektedir.



Şekil 2.7 : NI cDAQ-9178 USB kasa, girdi ve çıktı modülleri.

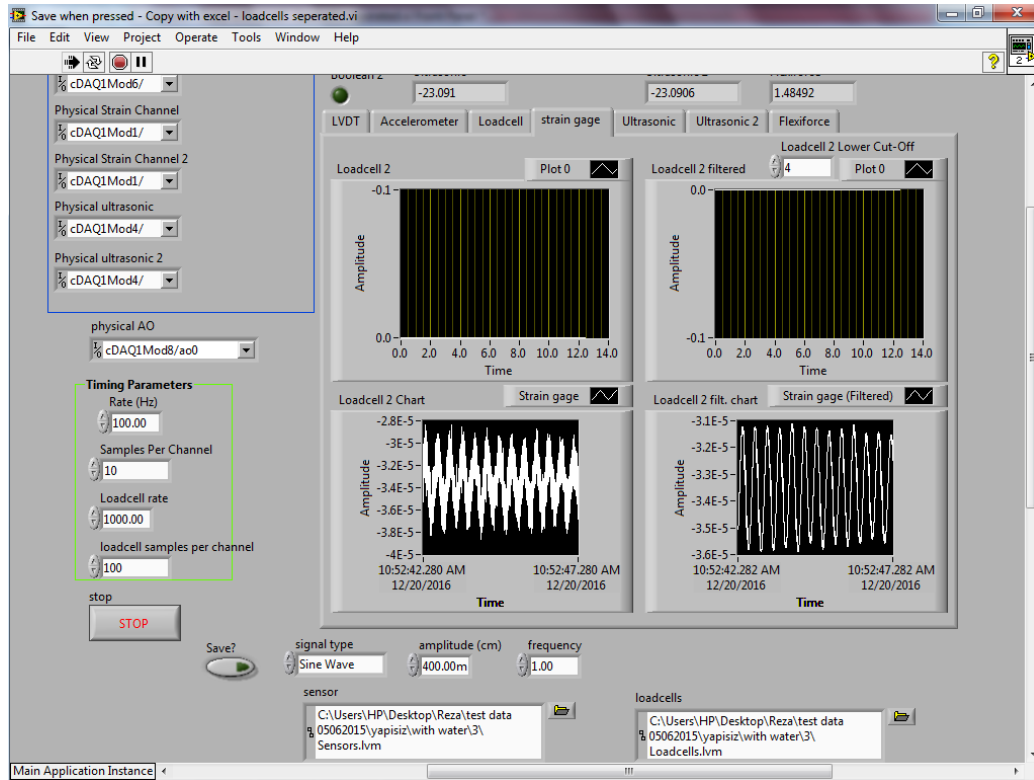
2.5 Deney Yöntemi

Tasarlanan deney düzeneği kullanılarak ilgili deney durumları için veriler toplanırken aşağıdaki prosedür takip edilmiştir:

- Yapının ve sıvı tankının hareketli platforma bağlantısı kontrol edilir.
- Sistem çalıştırılmadan önce kontrolcü ve LVDT aktif hale getirilir.
- Elektrik pompası düşük basınçta yağ üretecek şekilde çalıştırılır.
- Tahliye vanası kontrollü bir şekilde kapatılarak sistem basıncı 100 Bar’a çıkarılır.
- Sinüs girdisi için deney bilgisayarında “Final labview\sinusoidal” klasöründe bulunan “.vi” uzantılı LabVIEW programı çalıştırılır.
- Deprem girdisi için ise deney bilgisayarında “Final labview\deprem” klasöründe bulunan “.vi” uzantılı LabVIEW programı çalıştırılır.

- Ultrasonik algılayıcılara güç veren DC güç kaynağı 12 V değerinde çalıştırılır.
- NI cDAQ-9178 USB kasa ve ivmeölçer için kullanılan yükseltici aktif hale getirilir.
- Yükseltici üzerindeki “LOWPASS” değeri “50”, “INTEGRATOR HIGHPASS” değeri ise “ACC” olarak ayarlanır.
- Yükselticinin “GAIN” yani kazanç değeri de deneye uygun olarak (Aşırı yüklemeye olmayacak şekilde) ayarlanarak kaydedilir.

LabVIEW kodu ile oluşturulan ve deneyleri kontrol etmekte kullanılan programın arayüzü Şekil 2.8’de verilmiştir. Bu arayüz kullanılarak deney girdisi otomatik olarak sisteme gönderilir. Deney verileri de otomatik olarak okunarak kaydedilir.



Şekil 2.8 : Deneylerde kullanılan programın arayüzü.

- Sinüs deneylerinde hareketli platformun harekete “0” konumundan başladığına emin olmak için deney arayüzünde hareket genliği (“amplitude (cm)”) değeri “0” girilir ve sağ ok tuşuna basılarak sistemin “0” konumuna gitmesi sağlanır.
- Arayüzde “STOP” tuşuna basılarak program durdurulur. “STOP” tuşunun basılı kalmaması için tuşa tekrar basılır.

- Sinüs deneyleri için deney yapılacak genlik ve frekans değerleri sırasıyla arayüzdeki “amplitude (cm)” ve “frequency” kısımlarına girilir.
- Deprem deneylerinde “max amplitude” değeri düşük genlik için “0.6”, yüksek genlik için “1.2” olarak sisteme girilir.
- Deney verileri hareketin başından itibaren kaydedilmek isteniyorsa arayüzdeki “Save?” tuşu aktif hale getirilir.
- Verilerin kaydedileceği adresler “Sensors” ve “Loadcells” kısımlarına girilir.
- Deney sayfanın sol üstünde yer alan sağ ok şeklindeki tuşa basılarak başlatılır.
- Deney sırasında her veri için arayüzde görülen grafiklere bakılarak algılayıcılardan verilerin doğru bir şekilde alındığına emin olunur.
- Deney verileri hareket başladıktan sonra herhangi bir zamandan itibaren kaydedilmek isteniyorsa “Save?” tuşu program çalışırken aktif hale getirilir.
- Deney tamamlandığında “STOP” tuşu ile program durdurulur. “STOP” tuşunun basılı kalmaması için tuşa tekrar basılır.
- Deprem girdisi için deneyin deprem sinyalinin uzunluğu olan 58 s’den önce durdurulmadığından emin olunur.
- Verilerin kaydedileceği ilgili adrese giderek verilerin kaydedilip-kaydedilmediği kontrol edilir.
- Deneyler birden fazla durum için tekrarlanacaksa verilerin kaydedildiği adres değiştirilmez. Program ilk durumdan itibaren deneylere sıra numarası vererek durumları otomatik bir şekilde sıra ile kaydeder.
- Deneyler tamamlandıktan sonra elektrikli yağ pompası üzerindeki tahliye valfi açılarak sistem basıncı düşürülür.
- Elektrik pompası kapatılır.
- Güç verilen diğer sistem ekipmanları (Kontrolcü, LVDT vs.) kapatılır.

Deneyler yukarıda belirtilen prosedüre göre yapıldıktan sonra veriler sonradan kullanılmak üzere sistemli bir şekilde arşivlenmiştir.

3. SIVI TANKI İÇERİSİNDEKİ ÇALKALANMANIN İNCELENMESİ

Bu bölümde herhangi bir bina modeli olmadan, titreşim girdisi verilen sıvı tankının içindeki sıvının hareketi dolayısıyla oluşan çalkalanma kuvvetleri incelenmiştir. Ayrıca bu bölümde sıvı tankının hareket boyunca görüntüsü kaydedilerek, bu görüntü vasıtası ile kap uzunluğu boyunca sıvı yüksekliği ve çalkalanma kuvveti görüntü işleme yöntemleri ile hesaplanmıştır.

3.1 Farklı Su Yüksekliği, Hareket Frekansı ve Genliği için Çalkalanmanın İncelenmesi

Bu başlık altında kabın direkt hareketli platform üzerine yerleştirildiği durum için çalkalanma kuvveti takip edilerek çalkalanma incelenmiştir. Titreşim girdi sinyali olarak farklı frekans ve genliklerde sinüs konum girdi sinyali kullanılmıştır. Bu incelemelerde değiştirilen sıvı yükseklikleri, hareket genlikleri ve hareket frekanslarının dalga yüksekliği ve çalkalanma kuvvetinin genliği üzerindeki etkisinde yoğunlaşmıştır. İncelemeler durağan durumda elde edilen veriler için yapılmıştır. Çizelge 3.1’de dalga yüksekliğini ve çalkalanma kuvvetini incelemek için yapılan deneylerin özellikleri verilmiştir.

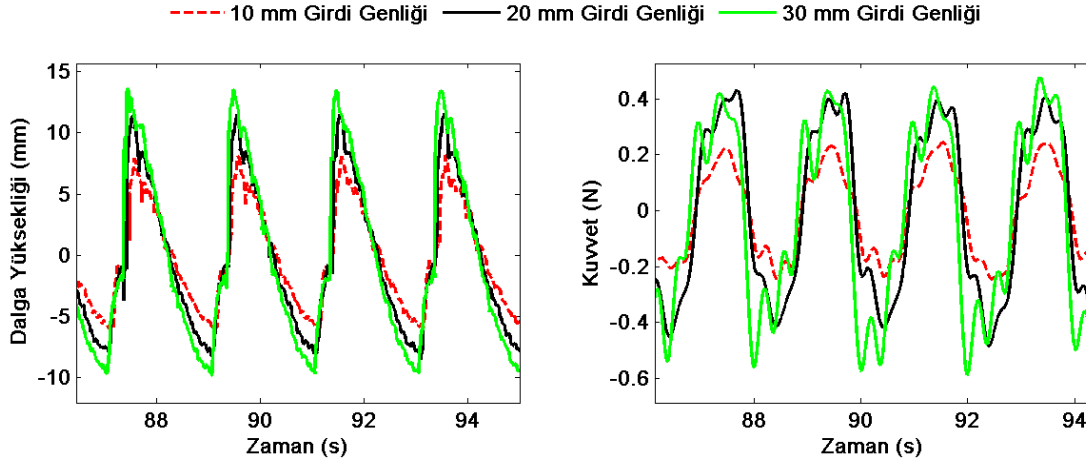
Çizelge 3.1 : Titreştirilen kaptaki çalkalanmayı incelemek için yapılan deneyler.

Durum	Hareket Frekansı (Hz)	Çalkalanma Doğal Frekansı (Hz)	Su Yüksekliği (mm)	Hareket Genlikleri (mm)
1	0,5	0,5	15	10, 20, 30
2	1	1	65	2, 3, 4
3	2	1	65	10, 15

Durum 1:

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi hareket genliği 10 mm olduğunda ortalama maksimum dalga yüksekliği 6 mm ve ortalama maksimum çalkalanma kuvveti 0,2 N’dur. Diğer parametreler değişmeden hareket genliği 20 mm’ye arttırıldığında ise ortalama dalga

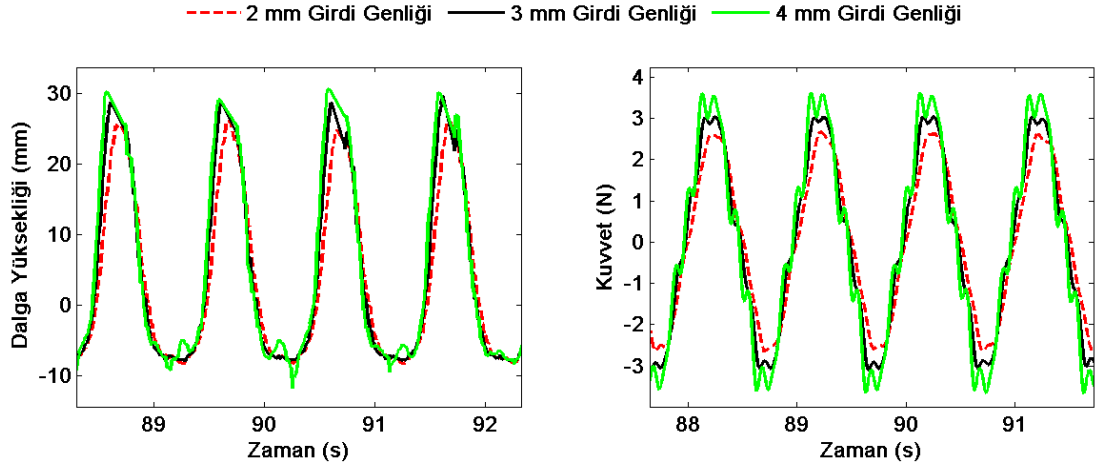
yüksekliği 10 mm'ye ve ortalama maksimum kuvvet genliği ise 0,35 N'a yükselmiştir. Hareket genliği 30 mm yapıldığında ise ölçülen kuvvetin değeri yine artarak 0,4 N değerinin biraz daha üzerine çıktığı görülmektedir. Bu durumdaki dalga yüksekliği de artarak 12 mm olmuştur. Çalkalanma kuvvetinin ve dalga yüksekliğinin hareket genliği ile birlikte arttığını söyleyebilmek için Durum 2'de farklı bir frekansta daha benzer karşılaştırmalar yapılmıştır.



Şekil 3.1 : 0,5 Hz hareket frekansı ve 15 mm sıvı yüksekliği için dalga yüksekliği ve çalkalanma kuvvetinin hareket genliği ile değişimi.

Durum 2:

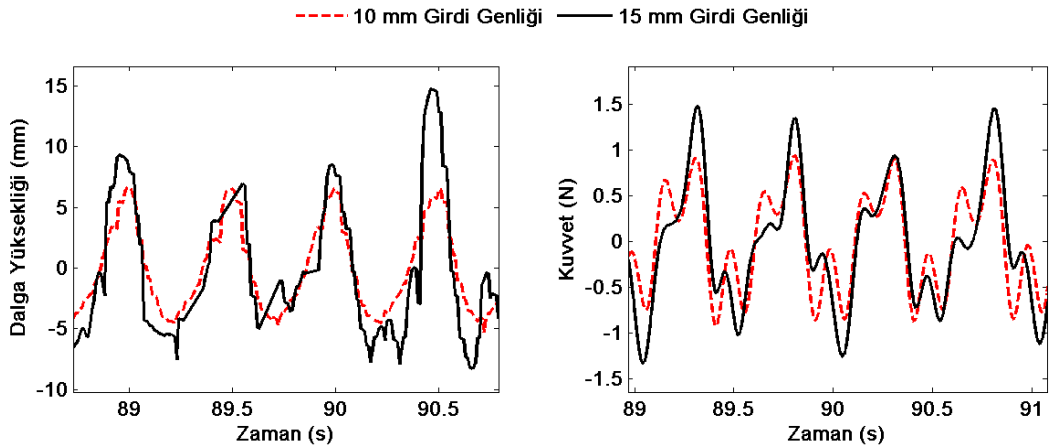
Durum 2 için Şekil 3.2'de verilen grafiğe bakılarak hareket genliği arttıkça dalga yüksekliğinin ve çalkalanma kuvvetinin de arttığı görülmektedir. Bu frekanstaki en düşük hareket genliği olan 2 mm hareket genliğindeki ortalama maksimum dalga yüksekliği 22 mm ve ortalama çalkalanma kuvveti değeri 2,5 N'dur. Hareket genliği 3 mm'ye artırıldığında ise ortalama maksimum dalga yüksekliği 25 mm'ye ve ortalama maksimum kuvvet genliği ise 3 N değerine çıkmaktadır. Hareket genliği 2 mm'den 3 mm'ye çıktığında görülen artışın bir benzeri de hareket genliği 3 mm'den 4 mm'ye çıktığında görülmektedir. 4 mm için ortalama maksimum çalkalanma kuvveti 3,5 N'a yakındır. Bu durumdaki dalga yüksekliği ise 27 mm'dir. 4 mm girdi genliğinden daha büyük girdi genlikleri grafikte gösterilmemiştir. Bunun nedeni ise sıvının 5 mm ve üzeri genlik değerlerinde 2 boyutlu akışının bozulmasıdır. Suyun 2 boyutlu akışının bozulması ile birlikte çalkalanma kuvvetinin periyodik olma özelliği kaybolmaktadır.



Şekil 3.2 : 1 Hz hareket frekansı ve 65 mm sıvı yüksekliği için dalga yüksekliği ve çalkalanma kuvvetinin hareket genliği ile değişimi.

Durum 3:

Bu başlık altında son olarak sıvı yüksekliği ile hareket frekansının birbirine uygun olarak ayarlanmadığı durum incelenmiştir. Hareket frekansının ve hareket genliğinin artırılması durumunda çalkalanma kuvvetlerinin daha da artması beklenmektedir. Bu yüzden yeni durumda hareket genliği 10 ve 15 mm'ye ve hareket frekansı da 2 Hz'e çıkarılmıştır. Doğal frekansı 1 Hz olan 65 mm yüksekliğindeki sıvı 2 Hz hareket frekansında sallanmıştır. Durum 3 için 2 Hz hareket frekansında elde edilen sonuçlar Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 : 2 Hz hareket frekansı ve 65 mm sıvı yüksekliği için dalga yüksekliği ve çalkalanma kuvvetinin hareket genliği ile değişimi.

Şekil 3.3'te de görüldüğü üzere, 2 Hz hareket frekansı ve 15 mm hareket genliği için elde edilen çalkalanma kuvveti değeri 1,5 N'dan azdır. Bu durumdaki ortalama maksimum dalga yüksekliği de 10 mm civarındır. 10 mm hareket genliği için ise dalga yüksekliği yaklaşık 7 mm'dir. 10 mm hareket genliğindeki çalkalanma kuvveti de 1

N'un altındadır. Bu başlık altında yapılan deneyler ve sonuçları Çizelge 3.2'de özet halinde verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Dalga yüksekliği ve çalkalanma kuvveti incelemeleri için yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar.

Durum	Hareket Frekansı (Hz)	Çalkalanma Doğal Frekansı (Hz)	Su Yüksekliği (mm)	Hareket Genliği (mm)	Dalga Yüksekliği (mm)	Çalkalanma Kuvveti (N)
1	0,5	0,5	15	10	6	0,2
1	0,5	0,5	15	20	10	0,35
1	0,5	0,5	15	30	12	0,4
2	1	1	65	2	22	2,5
2	1	1	65	3	25	3
2	1	1	65	4	27	3,5
3	2	1	65	10	7	1
3	2	1	65	15	10	1,5

Deney yapılan 3 durumda arttırılan hareket genliğinin sıvının 2 boyutlu ve doğrusal akışı bozulmadıkça dalga yüksekliğini ve dolayısıyla çalkalanma kuvvetini arttıracaklarını göstermektedir. Ancak bu artış doğrusal değildir. Yani dalga yüksekliği ve çalkalanma kuvvetindeki artış oranı hareket genliğindeki artış oranından daha düşük olmaktadır.

Durum 1'de en yüksek dalga yüksekliği ve çalkalanma kuvveti değerleri 30 mm girdi genliği için elde edilmiştir. Durum 1 için en yüksek ortalama dalga yüksekliği 12 mm, en yüksek maksimum çalkalanma kuvveti ise 0,45 N'dur. Durum 2 için ise en düşük değerler 2 mm girdi genliğinde elde edilmiştir. Durum 2 için en düşük ortalama maksimum dalga yüksekliği 22 mm ve en düşük ortalama maksimum kuvvet ise 2,5 N'dur. Bu iki durum karşılaştırıldığında artan hareket frekansı ile, hareket genliği azalsa bile dalga yüksekliğinin ve çalkalanma kuvvetinin de arttığı görülmüştür. Sonuç olarak, hareket frekansının arttırılmasının dalga yüksekliğini ve çalkalanma kuvvetini arttırdığı söylenebilir. Ancak sıvı yükseklikleri hareket frekansına göre ayarlandığı için artan hareket frekansı ile birlikte ayarlanmış sıvı yüksekliğinin de arttığı unutulmamalıdır.

Durum 2 ve Durum 3'te birlikte incelenebilir. Durum 3'te hareket frekansı ve hareket genlikleri Durum 2'den daha yüksek olmasına karşın bu durumda elde edilen dalga yükseklikleri ve çalkalanma kuvvetleri Durum 2'dekine kıyasla daha düşük kalmaktadır. Dalga yüksekliğinin ve çalkalanma kuvvetinin hareket frekansı ve genliği

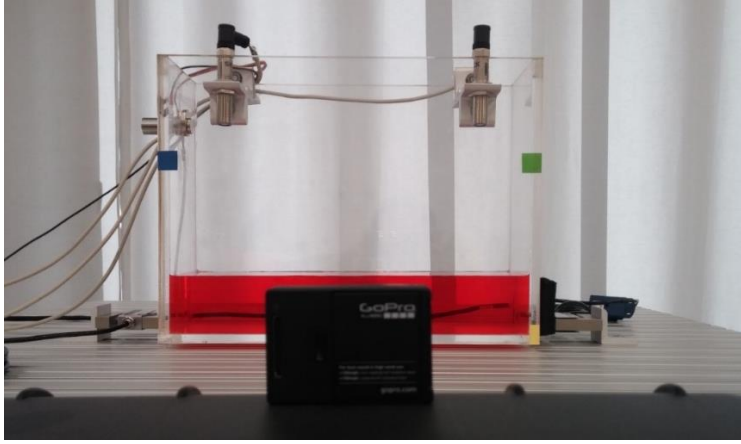
ile doğru orantılı olarak artması beklenirken bu durumda artmamasının nedeni kaptaki sıvının çalkalanma doğal frekansı ile sisteme dışarıdan verilen zorlamanın hareket frekansının aynı değerlerde olmamasıdır. Yani 1. durumda sıvının çalkalanma doğal frekansı 1 Hz iken sistem de 1 Hz hareket frekansı ile hareket ettirildi ve düşük genlik ve hareket frekansı değerleri için bile çalkalanma kuvveti ve dalga yüksekliği büyük değerlere ulaştı. Ancak hareket frekansının 2 Hz'e çıkarılmasına ve hareket genliğinin 15 mm'ye arttırılmasına rağmen bir sonraki durumda dalga yüksekliği ve çalkalanma kuvveti daha düşük değerler aldı. Hareket frekansı ile sıvının çalkalanma doğal frekansının aynı değerlere ayarlanması elde edilen su yüksekliğinin ve dolayısıyla çalkalanma kuvvetinin maksimum olmasına sebep olmaktadır. Hareket frekansı ile sıvının çalkalanma doğal frekansı arasındaki fark arttıkça elde edilen dalga yükseklikleri ve çalkalanma kuvvetleri azalmaktadır.

3.2 Çalkalanan Sıvının Serbest Yüzey Profilinin Görüntü İşleme Metotları ile Elde Edilmesi

Çalkalanma karakteristiğinin daha iyi anlaşılabilmesi ve çalkalanmadan dolayı oluşan çalkalanma kuvvetinin herhangi bir algılayıcı kullanmadan ölçülebilmesi için görüntü işleme metodları kullanılmıştır. Görüntü işleme işlemleri MATLAB ortamında yapılmıştır. MATLAB ortamına hareketin kaydedilen videosu yüklenmiş ve bu videolarda bulunan her bir kare ayrı ayrı işlenerek çalkalanma süresince değişen sıvı serbest yüzey profilinin zamana bağlı değişimi hesaplanarak kaydedilmiştir. Görüntülerin alınacağı kamera ile ilgili ayrıntılı bilgi deney düzeneği bölümünde verilmiştir. Yazılan görüntü işleme algoritması ise Ek 2.'de verilmiştir.

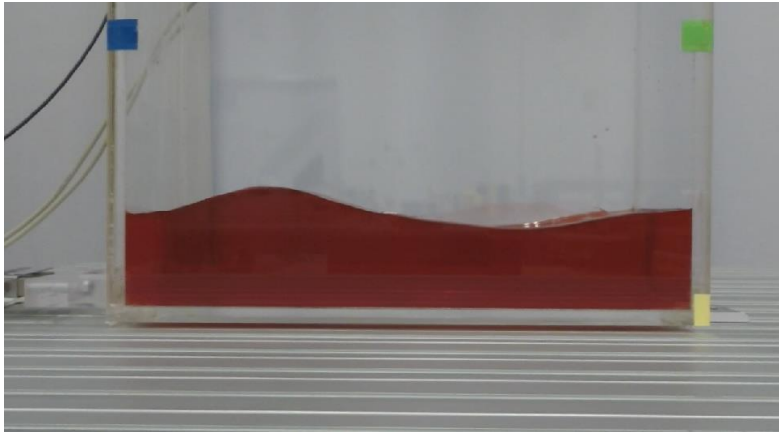
Görüntüler kaydedilmeden önce görüntülerin alınacağı kameranın görüş açısı içerisinde görüntü işleme sürecini kolaylaştıracak bir takım değişiklikler yapılmıştır. Görüş açısında, görüntü işleme süresince kullanılmayacak olan algılayıcı ve bağlantı aparatı gibi cisimler görüntüden uzaklaştırılarak görüntü olabildiğince sadeleştirilmeye çalışılmıştır. Arka fon rengi beyaz yapılmıştır. Ayrıca görüntü işleme sürecinde hareket eden kabın takip edilebilmesi ve görüntü üzerindeki mesafelerin ölçülebilmesi için iki adet referans noktası görüntüye eklenmiştir. Bu referans noktaları Şekil 3.4'te görülen mavi ve yeşil karelerdir. Sıvının hareketinin daha kolay tespit edilebilmesi içinde sıvı kırmızı renkte gıda boyası ile boyanmıştır. Referans noktaları ve sıvı hacmi dışında mavi, yeşil ve kırmızı renkte olan cisimlerin üzerleri siyah

malzeme ile kaplanarak kapatılmıştır. Kamera ve sıvı tankının yerleşimi Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4 : Kamera ve sıvı tankının yerleşimi.

Kamera sıvı tankının ortalayacak ve sıvı serbest yüzeyi ile aynı yükseklikte olacak şekilde konumlandırılmıştır. Kamera sıvı tankına yatay ve dikey olarak paralel duruma getirilmiştir. Şekil 3.5'te verilen görüntü uygun duruma getirilen kamera tarafından çekilmiştir. Kameranın görüş alanını göstermektedir. Bu görüntü MATLAB ortamına aktarılmadan önce görüntüdeki dış bükey optik bozulmalar (Barrel şekil bozunumu) kameranın kendi yazılımı olan “GoPro Studio” yazılımı kullanılarak düzeltilmiştir.



Şekil 3.5 : Kameranın görüş alanı.

MATLAB ortamında, RGB formatındaki görüntüler 3 boyutlu matrislerle ifade edilmektedir. Matrislerin ilk iki boyutu yatay ve dikey çözünürlüğe karşılık gelmektedir. Matrisin 3. boyutunda ise 3 adet katman bulunmaktadır ve bu 3 katman kırmızı, yeşil ve mavi rengin ilgili pikseldeki yoğunluğunu göstermektedir. Bu üç katmanda, her piksel için üç adet 0 ile 255 arası değişen bir renk tonu değeri vardır.

Bu üç değer görüntüdeki kırmızı, yeşil ve mavi renk katkısını belirler ve bu katmanlardaki değerler kullanılarak ilgili pikselin gerçek rengi oluşturulur.

Görüntü işleme adımlarında ilk olarak, mavi ve yeşil referans noktalarının ayrı ayrı RGB değerleri tespit edilip MATLAB ortamında ikisi için de ayrı ayrı durum kıstası (if-else-end yapısı) oluşturulmuştur. Girdi olarak tespit edilen tek bir değer değil de elde edilen değer aralıkları durum kıstası olarak girilmiştir. Çünkü referans noktasının kapladığı alandaki her bir pikselin değeri tam olarak aynı değildir. Ancak bu pikseller çok yakın renkte olduklarından birbirine yakın değerlerdedirler. Durum kıstasları görüntüdeki her pikselin kıstası sağlayıp sağlamadığına bakıp ve bu işlemin sonucunu yeni bir çözünürlük boyutundaki 2 boyutlu matrise yazmışlardır. Eğer pikselin değeri durum yapısı için girilen renk aralığında ise yeni oluşturulan yatay ve dikey çözünürlük boyutundaki matristeki ilgili elemanın değeri 1 olarak girilmiştir. Ancak değer kıstasa uymuyorsa elemanın değeri 0 olarak kaydedilmiştir. Yeni oluşturulan matriste 1 değerlerinin olduğu bölge tespit edilen referans noktasıdır. İki referans noktası için bu işlemler ayrı ayrı yapılmıştır. Bu aşamada gerçek referans noktası dışında kalan piksellerde parlamalar ve benzer sebeplerden yanlışlıkla referans noktası olarak tespit edilebilmektedir. Bu hatalı noktalar MATLAB Image Processing Toolbox'ta hazır bulunan gürültü giderme komutları ile temizlenmiştir. Tespit edilen alanın merkezi referans noktasının merkezi olarak alınmıştır. Bu adımlardan sonra iki referans noktasının da hangi piksellerde olduğu tespit edilmiştir. İki referans noktası arasındaki yatay piksel sayısı ve bu iki referans noktası arasındaki bilinen gerçek uzaklıktan bir pikselin kaç 'mm'ye denk geldiği tespit edilmiştir. Bir pikselin kaç "mm"ye karşılık geldiği kameranın sıvı tankına uzaklığıyla değişmekte olup yapılan çalışmalar boyunca yaklaşık 0,4 mm civarı değerler almıştır.

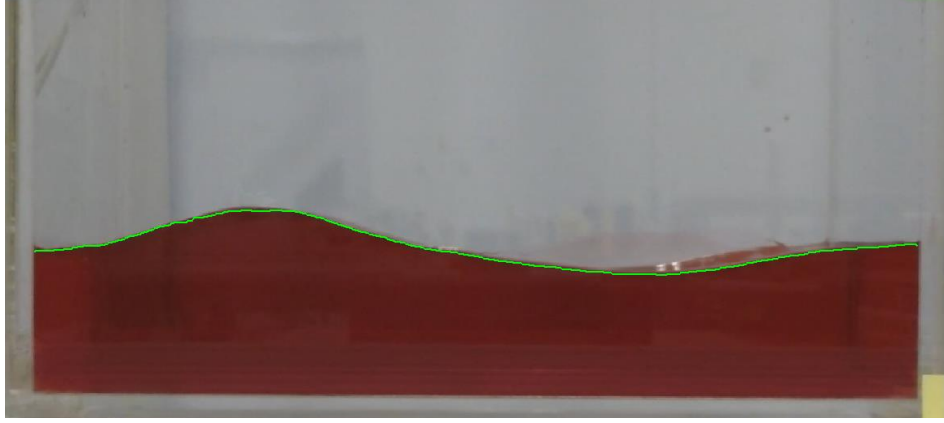
Bu aşamadan sonra görüntü ilgili referans noktaları yardımı ile kırılarak görüntüde sadece tespit edilemeye çalışılan sıvı hacmi bırakılmıştır. Daha sonra sıvı hacminin tespiti için yeni bir durum kıstası oluşturulup, referans noktaların tespitinde kullanılan yöntem ile sıvı hacminin olduğu yerler 1 olmadığı yerler ise 0 olarak işaretlenmiştir. Önceki basamaklarda uygulanan gürültü giderme işlemleri bu adımda da uygulanmıştır. Ancak bu gürültü giderme işlemlerine ek olarak sıvıda oluşan kopmaların da ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bunun için gürültü giderme filtrelerinin boyutları daha büyük alanları kapsayacak şekilde arttırılmışlardır. Sıvı sıçramalarının kaldırıldığı durumun örneği Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6 : Sıvı sıçramalarının düzeltilmesi.

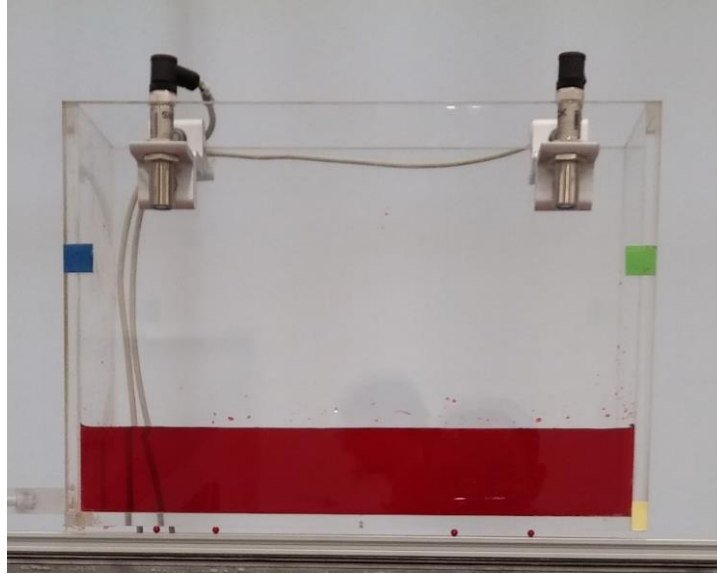
Kenar tespit etme komutu ile kaptaki sıvı hacminin kenarları tespit edilip yatay ve dikey çözünürlük boyutundaki matriste kenarlar işaretlenmiştir. İşaretlenen yani kenar üzerinde olan pikseller 1 değerini almıştır.

Daha sonra, son adım olan kap genişliği boyunca sıvının dalga yüksekliğinin tespit edilmesi işlemine geçilmiştir. Öncelikle kenar bilgilerinin saklandığı matriste 1 değerine sahip olan pikseller her bir sütun için tespit edilmiştir. MATLAB’da 1. satır, 1. sütun görüntünün sol üst köşesini temsil ettiğinden her bir sütun için tespit edilen kenarların bulunduğu yerler küçükten büyüğe sıralanırsa; en üstte sıvının maksimum yüksekliğe ulaştığı piksel, en altta ise sıvının tabanı tespit edilmiş olur. Her sütun için ayrı ayrı alt ve üst nokta arası piksel farkı hesaplanıp bir piksel için hesaplanan ‘cm’ karşılığı ile çarpıldığında ise o sütundaki sıvı yüksekliği bulunmaktadır. Sıvı yükseklikleri tespit edildikten sonra benzer işlemler yatay eksen için de yapılır. Kenar tespit edilen ilk sütun yatay ekseninin başlangıç noktası olur ve diğer sütunların bu başlangıç noktasına uzaklıkları hesaplanarak yatay eksen oluşturulmuştur. Elde edilen bu sonuçlar yatay eksendeki konuma karşılık sıvı yüksekliği olarak her zaman adımı için matrise kaydedilip ve bu matrisin MATLAB ortamı dışına ‘.mat’ dosya formatında kaydedilmesi sağlanmıştır. Şekil 3.7 görüntü işleme işlemleri ile tespit edilen örnek serbest yüzey çizgisini göstermektedir. Bu şekil incelenerek tespit edilen serbest yüzey çizgisinin gerçek sıvı serbest yüzeyi ile ne kadar uyum içerisinde olduğu gözlemlenebilir.



Şekil 3.7 : Tespit edilen serbest yüzey çizgisi.

Tespit edilen serbest sıvı yüzeyinin doğruluğunun araştırılabilmesi için Şekil 3.8’de görülen deney düzeneği oluşturulmuştur. Bu deney düzeneğinde sıvı yüksekliğini noktasal olarak tespit edebilecek iki adet ultrasonik algılayıcılar bulunmaktadır. Ultrasonik algılayıcılar sıvı tankının üst tarafına sıvıyı dik olarak görecek biçimde yerleştirilmiştir. Algılayıcıların kabın sol ve sağ yanındaki duvarlardan uzaklığı 47 mm’dir.



Şekil 3.8 : Ultrasonik algılayıcıların yerleşimi.

Ultrasonik mesafe algılayıcılarından elde edilen sıvı yüksekliği verisi, görüntü işleme yöntemi ile tespit edilen sıvı yüksekliği verisini doğrulamak için algılayıcının bulunduğu noktadaki su yüksekliği verisi ile karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma değişik su yükseklikleri, hareket frekansları ve hareket genlikleri için tekrar edilmiştir. Elde edilen yüzey profilini doğrulamak için deney yapılan durumların özellikleri Çizelge 3.3’te verilmiştir.

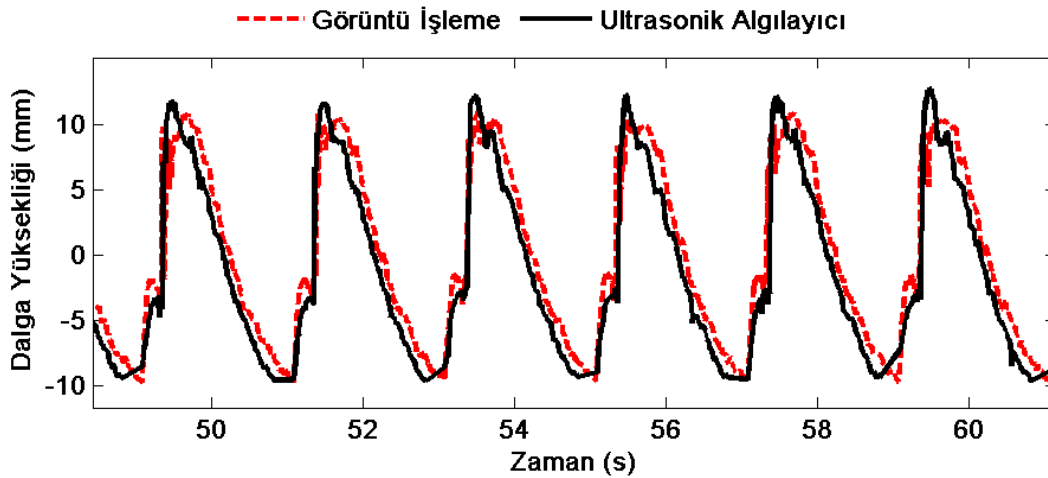
Çizelge 3.3 : Elde edilen yüzey profilini doğrulamak için yapılan deneyler.

Durum	Hareket Frekansı (Hz)	Çalkalanma Doğal Frekansı (Hz)	Hareket Genliği (mm)	Su Yüksekliği (mm)
1	0,5	0,5	30	15
2	1	1	4	65
3	1	1	5	65
4	2	1	10	65

Deney koşulları değiştikçe, dalga yüksekliğinin genliğinin değişmesi ve sıvının 2 boyutlu hareketinin bozulması gibi sebepler yüzünden hata oranı değişmektedir.

Durum 1:

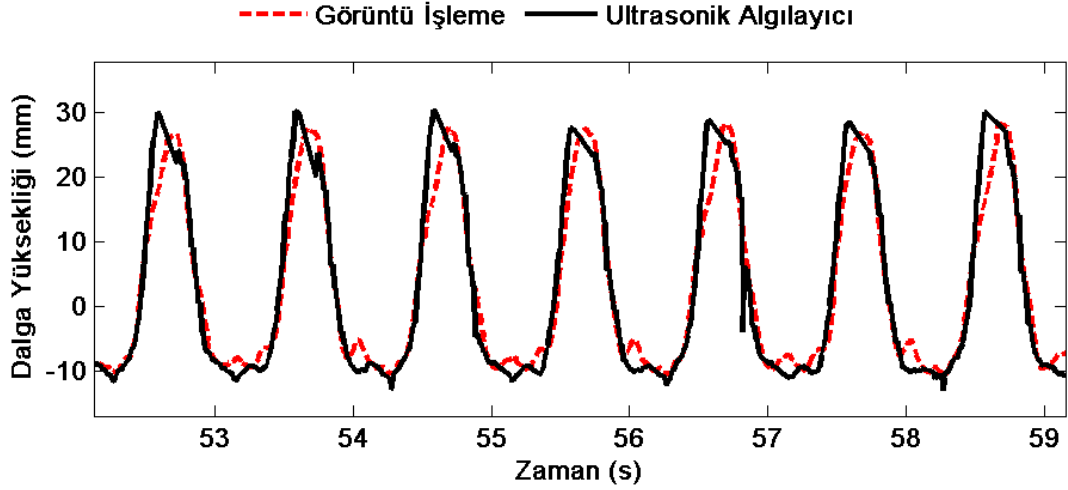
Durum 1, 0,5 Hz hareket frekansı ve 30 mm hareket genliği için elde edilen sonuçları incelemektedir. Durum 1 için elde edilen veriler Şekil 3.9'daki grafikte verilmiştir. İki veri incelendiğinde hesaplanan verinin zaman eksenini boyunca şekil ve genlik olarak belirli bir hata aralığında mesafe algılayıcısı verisine benzediği gözükmemektedir. Hata oranına bakıldığında ise tepe noktalarındaki ortalama hata oranının yaklaşık olarak %11 olduğu görülmektedir. Aynı hareket frekansı ve sıvı yüksekliği için hareket genliği sırasıyla 20 mm ve 10 mm'ye düşürüldüğünde ise, tepe noktalarındaki hata ortalaması biraz daha artarak %16 civarına çıkmaktadır. Bu hata artışının temel sebebi ise düşen hareket genliğiyle birlikte azalan dalga yüksekliğidir. Durum 1'de yapılan düşük hareket frekansındaki bütün deneyler için (farklı genliklerde) hata oranının kabul edilebilir seviyelerde olduğu söylenebilir.



Şekil 3.9 : Durum 1 için dalga yükseklikleri karşılaştırması.

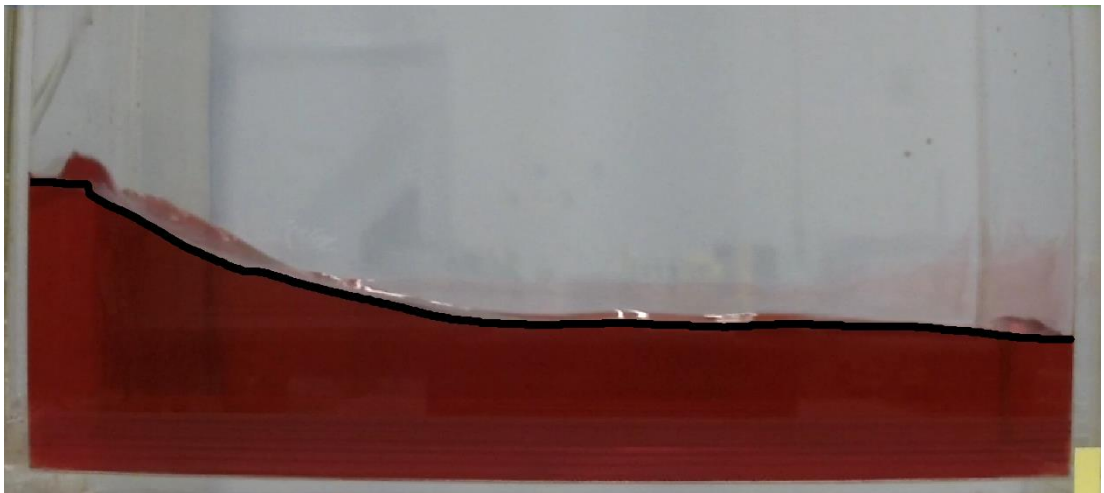
Durum 2:

Durum 2’de, hesaplanan sıvı yüksekliğinin doğruluğu 1 Hz hareket frekansı için incelenmiştir. Durum 2 için elde edilen veriler Şekil 3.10’da verilen grafikte gösterilmiştir. Durum 2 için sonuçlar tutarlı gözükmeyle birlikte tepe noktalarındaki ortalama hata %7’dir.



Şekil 3.10 : Durum 2 için dalga yükseklikleri karşılaştırması.

Durum 2 için hareketin 55,7. saniyesinde görüntü işleme yöntemi ile elde edilen yüzey profili Şekil 3.11’de verilmiştir. Verilen şekilde görüldüğü gibi kap uzunluğu boyunca sıvı yüksekliği gerçeğe yakın ve başarılı bir şekilde tespit edilmiştir.



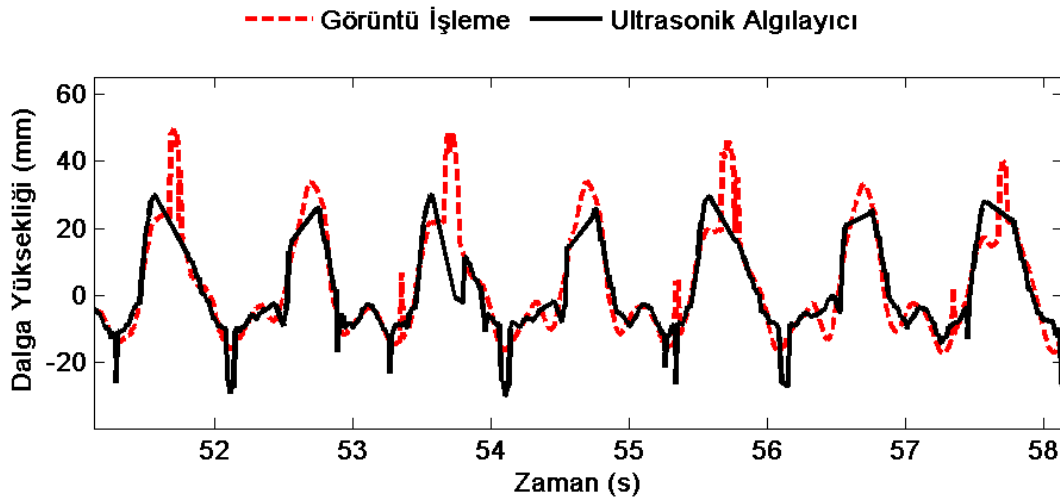
Şekil 3.11 : Durum 2 için 55,7. saniyedeki yüzey profili (görüntü işleme).

Durum 2’deki hareket frekansında diğer koşullar aynı tutularak hareket genliği artırıldığında ve azaltıldığında düşük frekansın aksine farklı 2 sonuç ile

karşılaşmıştır. İlk olarak genlik düşürüldüğünde, azalan dalga yüksekliği ile birlikte hata oranında %3-5 oranlarında artış görülmüştür. Ancak yine de bu durumdaki hata oranı kabul edilebilir gözükmemektedir. Hareket genliği 5 mm yapıldığında elde edilen sonuçlar ise Durum 3’te verilmiştir.

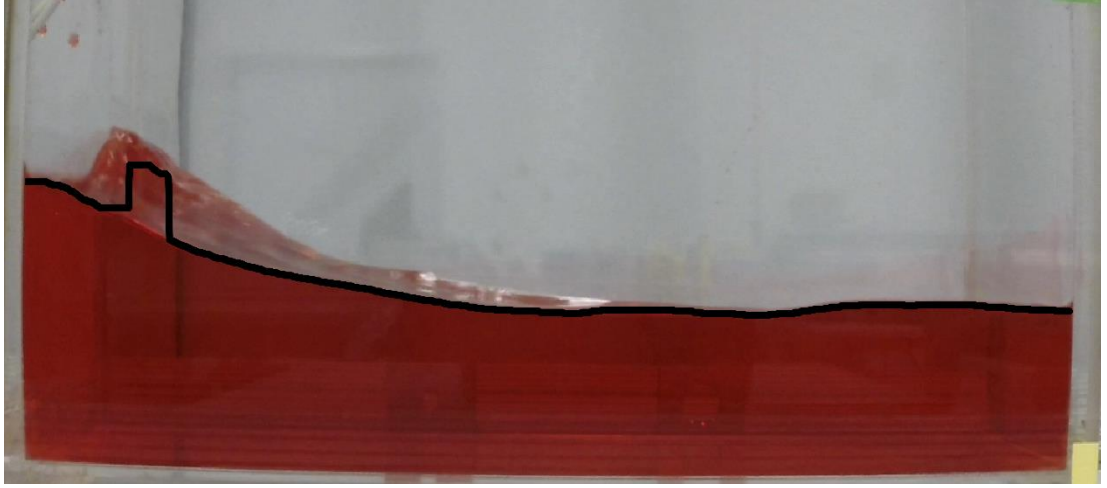
Durum 3:

Durum 3’te hareket frekansı Durum 2’deki ile aynıdır. Hareket frekansı ise 5 mm’ye çıkarılmıştır. Durum 3 için elde edilen veriler Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12 : Durum 3 için dalga yükseklikleri karşılaştırması.

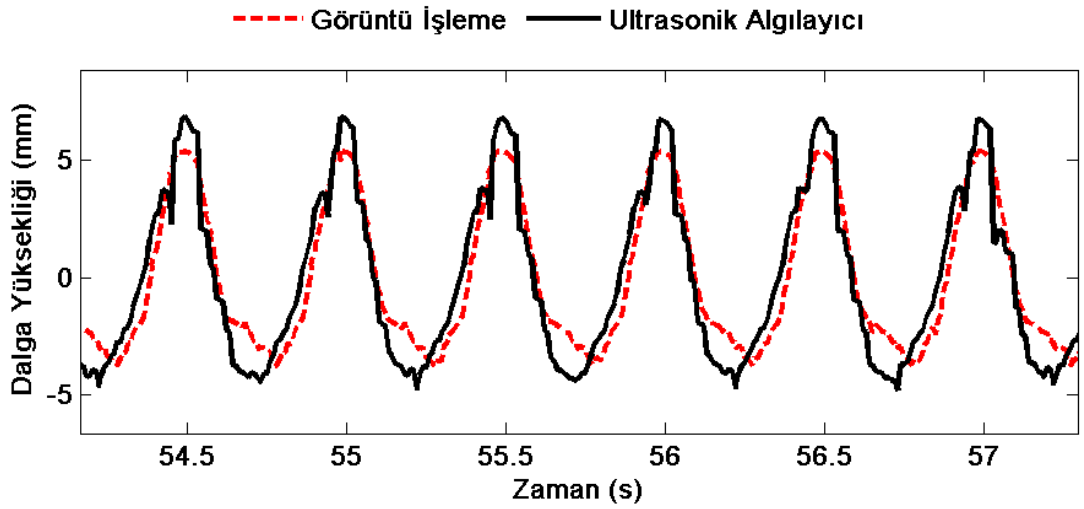
Durum 3’te hata oranı artan hareket genliği ile hata oranı çok daha dramatik bir şekilde artarak %39’a yükselmiştir. Durum 3 için hareket genliği daha da arttırıldığında hata oranı da artmaktadır. Bu yüksek hatanın başlıca sebebi suyun 2 boyutlu, suda kopma ve sıçramaların az olduğu doğrusal akışının bozulmasıdır. Durum 3 için hareketin 55,7. saniyesinde görüntü işleme yöntemi ile elde edilen yüzey profili Şekil 3.11’de verilmiştir. Verilen şekilde görüldüğü gibi suyun 2 boyutlu hareketinin bozulmasından dolayı yüzey profili bu görüntüde hatalı tespit edilmiştir. Şekil 3.12’de verilen grafikte gösterilen karşılaştırmanın 55,7. saniyesindeki ultrasonik algılayıcı tarafından ölçülen ve görüntü işleme işlemleri ile elde edilen dalga yükseklikleri arasındaki fark da bu durumu doğrulamaktadır.



Şekil 3.13 : Durum 3 için 55,7. saniyedeki yüzey profili (görüntü işleme).

Durum 4:

Son olarak Durum 4'te hareket frekansı 2 Hz'e yükseltilmiştir. Bu durumda hareket genliği 10 mm'ye ve sıvı yüksekliği de 65 mm'ye ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.14'teki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 3.14 : Durum 4 için dalga yükseklikleri karşılaştırması.

2 Hz için tepe noktalarının hatası yaklaşık olarak %27'dir. 10 mm olan hareket genliği artırıldığında da benzer sonuçlar alınmaktadır. Hata oranının nispeten büyük çıkmasının sebebi dalga yüksekliğinin düşük olması ve suyun rezonans frekansında hareket ettirilmemesinden dolayı suyun iki boyutlu akışının bozulmasıdır.

Çizelge 3.4 : Görüntü işleme işlemleri ile elde edilen dalga yüksekliği verisinin ultrasonik algılayıcı verisi ile karşılaştırılması.

Durum	Hareket Frekansı (Hz)	Çalkalanma Doğal Frekansı (Hz)	Hareket Genliği (mm)	Su Yüksekliği (mm)	Hata Oranı (%)
1	0,5	0,5	30	15	11
2	1	1	4	65	7
3	1	1	5	65	39
4	2	1	10	65	27

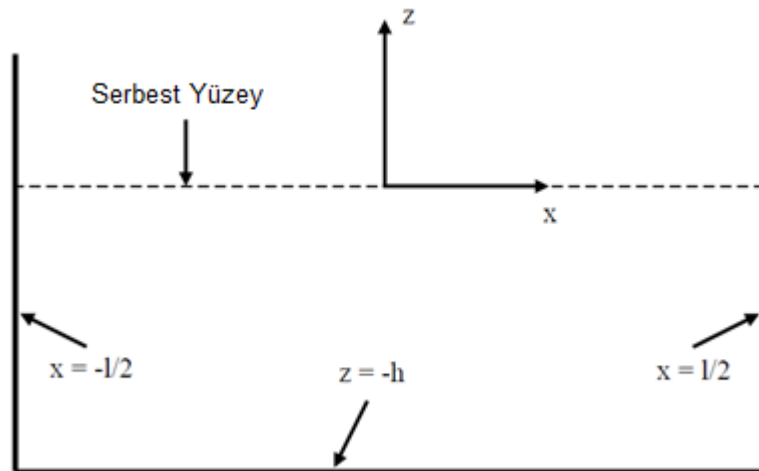
Bu bölümde yapılan karşılaştırmalarda elde edilen durağan durumdaki maksimum değerlerin ortalama hata oranları Çizelge 3.4’te verilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar uygulanan görüntü işleme metodunun çalkalanma süresince tanktaki sıvı yüksekliğinin tespiti için belli koşullarda kullanılabileceğini göstermiştir. Kamera kullanılarak elde edilen sıvı yüksekliği verisinin doğru olabilmesi için, akışın iki boyutlu olması ve hareket boyunca sıvıdaki sıçrama ve kopmaların az olması gerekmektedir. Ayrıca, kamera çözünürlüğünün ve sıvı yüksekliğinin de daha fazla olması da hata oranını düşmesini sağlayacaktır.

Ultrasonik algılayıcıdan elde edilen ve kamera ile hesaplanan dalga yüksekliği değerleri arasında hata olmayan bir takım farklılıklar da vardır. Ultrasonik algılayıcı dalga yüksekliğinin ölçülmek istendiği noktanın etrafındaki bir alanı görmektedir ve bu alandaki ortalama dalga yüksekliğinin ölçümünü yapmaktadır. Bunun yanında kameradan hesaplanan dalga yüksekliği verisi kabın derinliğini görmeyip sadece ölçülmek istenen tek bir noktanın dalga yüksekliği verisini göstermektedir. İkinci farklılık ise, ultrasonik algılayıcı ile dalga yüksekliği tespit edilirken sudaki kopma ve sıçramalarda dalga olarak kabul edilmektedir. Kamera ile dalga yüksekliği hesaplanırken ise bu kopma ve sıçramalar temizlenerek gerçek su yüksekliği verisi elde edilmektedir. İki su yüksekliği ölçümü arasındaki bu farklılıklar aslında hata olmayıp hata oranının yüksek çıkmasına sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca sıvı üzerindeki dalgaların aldığı şekle göre ultrasonik algılayıcının yaydığı ses dalgaları zaman zaman algılayıcıya birden fazla kez yansyarak geri dönmekte bu da sıvı yüksekliği verisinde hataya yol açmaktadır. Bu sebeplerle verilen hata oranlarının sadece geliştirilen yeni metodun hatası olduğunu düşünmek doğru değildir.

3.3 Elde Edilen Sıvı Serbest Yüzey Profili Kullanılarak Çalkalanma Kuvvetinin Hesaplanması

Çalışmanın bu bölümünde, elde edilen sıvı serbest yüzey profili kullanılarak dikdörtgen kap içindeki sıvının rezonans frekansı veya rezonans frekansına yakın frekanslarda hareket ettirildiğinde oluşturduğu çalkalanma kuvveti hesaplanmıştır. Bu yeni metot, görüntü işleme yöntemleri ile elde edilen serbest yüzey profilini ve doğrusal dalga teorisini çalkalanma hareketinin hız potansiyelini hesaplamak için kullanılmaktadır. Hesaplanan hız potansiyeli ile birlikte, kap duvarlarındaki basınç dağılımı ve çalkalanma kuvveti hesaplanabilmektedir. Karşılıklı iki kap duvarı için hesaplanan çalkalanma kuvvetleri birbirlerinden çıkartılarak sıvı tankı için net çalkalanma kuvveti bulunmuştur. Çalkalanma kuvveti hesaplanırken, bir takım ihmallere ve kabullere başvurulmuştur. Bu ihmal ve kabuller aşağıda verilmiştir.

- Çalkalanma 2 boyutlu ve döngüsüzdür.
- Sıvı tankının içindeki su sıkıştırılmazdır ve viskoz değildir.
- Sıvı tankı iki boyutlu ve dikdörtgendir. Ayrıca tank duvarları pürüzsüzdür.
- Sıvı sığ değildir.
- Hiçbir koşulda sıvı tankının tabanı açık kalmaz.
- Kabın içerisindeki sıvının kap duvarlarına sıvanması da ihmal edilmiştir.
- Kuvvet hesaplama işlemleri Şekil 3.15’de gösterilen koordinat sistemine göre yapılmıştır.



Şekil 3.15 : Kullanılan koordinat sistemi.

Yukarıda belirtilen kabul ve ihmellere göre tank içindeki sıvının çalkalanma doğal frekansının ve sıvı tankının hareket frekansının aynı veya yakın olması durumunda çalkalanmadan dolayı oluşan kuvvet hesaplanabilir. Bu kuvvetin hesaplanmasında sadece sıvı tankının hareketini görüntüleyen video görüntüleri girdi olarak kullanılmıştır. Kamera dışında herhangi bir algılayıcıdan elde edilen hiçbir veri kuvvet hesaplanmasında kullanılmamıştır. Yazılan kuvvet hesaplama algoritması Ek 3.'te verilmiştir.

Hız potansiyeli ve belirli bir noktadaki akışkanın hızı arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$v_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} , \quad v_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (3.1a-b)$$

Bütün sistemin hız potansiyeli ise (su tankı ve çalkalanan akışkan) aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\Phi = V_{0x} x + \varphi \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)'de, sistemin hız potansiyeli ' Φ ' ile gösterilirken çalkalanan akışkanın hız potansiyeli ' φ ' ile gösterilmiştir.

Akışkan sıkıştırılmaz ve akış ise viskoz olmayan ve dögüsüz olarak kabul edilirse, Laplace denklemi hız potansiyeli için aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\nabla^2 \Phi = 0 , \quad \nabla^2 \varphi = 0 \quad (3.3a-b)$$

Denklem (3.3a-b) 2 boyutlu sistemler için aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 , \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.4a-b)$$

Faltinsel ve ark. çalışmasında [38], rezonans modu etrafındaki çalkalanmanın çok boyutlu modal sistem ile tanımlanabileceği gösterilmiştir. Yani bu çalışmada, sıvı serbest yüzeyinin hareketinin ve çalkalanmanın hız potansiyelinin Fourier seri açılımı ile ifade edilebileceği gösterilmiştir. Sıvı serbest yüzeyinin hareketi aşağıdaki ifade ile temsil edilebilir:

$$f(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i(t) f_i(x) \quad (3.5)$$

Yukarıda Denklem (3.5)'te verilen ifade dikdörtgen bir kap içerisindeki sıvı serbest yüzeyinin zamana bağlı değişimini temsil etmek için kullanılabilir. Ancak bu ifadenin sıvı serbest yüzeyini doğru bir şekilde temsil etmesi için sağlanması gereken bir takım kısıtlar vardır. İlk olarak kabın hareket frekansı, sıvının ilk çalkalanma doğal frekansına yakın olmalıdır. Ayrıca sıvının diğer yüksek çalkalanma doğal frekansları sıvının ilk çalkalanma doğal frekansından uzak olmalıdır. İkinci olarak yukarıdaki ifadenin sıvı serbest yüzey hareketini ifade etmede kullanılabilmesi için akışta kopmalar, sıçramalar ve dalga kırılmaları olmamalı ve akış dögüsüz olmalıdır.

Denklem (3.5)'teki ' $f_i(x)$ ' fonksiyon grubu serbest yüzey üzerinde ortogonal olmalı ve Denklem (3.6)'da verilen hacim korunumu ifadesini sağlamalıdır.

$$\int_{Serbest\ Yüzey} f_i(x, t) dx = 0 \quad (3.6)$$

Serbest yüzey hareketine benzer olarak, hız potansiyeli için de bir seri açılımı aşağıda gösterildiği gibi yazılabilir [38]:

$$\varphi(x, z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} R_i(t) \varphi_i(x, z) \quad (3.7)$$

' $\varphi_i(x, z)$ ' denklem grubu, Denklem (3.4b)'de verilen Laplace eşitliğini tüm akışkan ortamı için sağlamalıdır. Ayrıca aşağıda Denklem (3.8a-b) ve Denklem (3.9a-b)'de ıslak yüzeyler için (sıvı tankı duvarları) verilen şartlar da sağlanmalıdır.

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right|_{x=-L/2, L/2} = V_{0x} , \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=-L/2, L/2} = 0 \quad (3.8a-b)$$

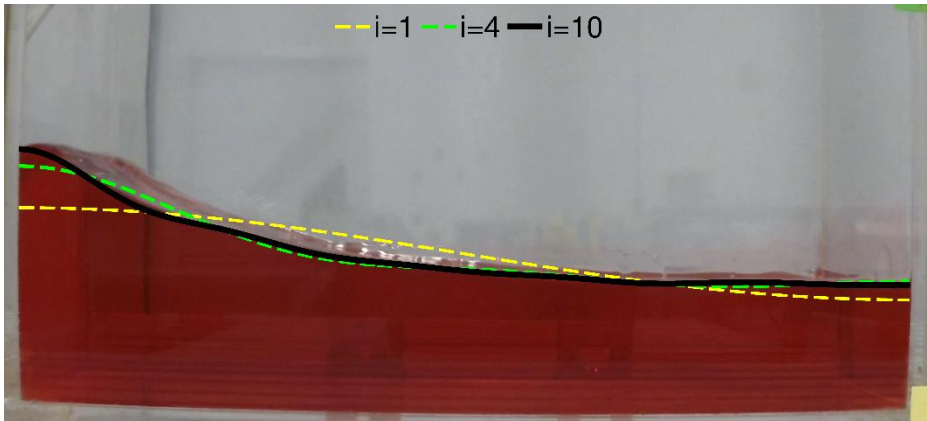
$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{x=-h} = 0 , \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right|_{x=-h} = 0 \quad (3.9a-b)$$

' $f(x, t)$ ' ve ' $\varphi(x, z, t)$ ' denklem grupları içerisinde yer alan ' $f_i(x)$ ' and ' $\varphi_i(x, t)$ ' ifadeleri Denklem (3.10) ve Denklem (3.11)'de verilmiştir [38].

$$f_i(x) = \cos\left(\frac{i\pi}{L}\left(x + \frac{L}{2}\right)\right) \quad (3.10)$$

$$\varphi_i(x, z) = f_i(x) \frac{\cosh\left(\frac{i\pi}{L}(z + h)\right)}{\cosh\left(\frac{i\pi}{L}h\right)} \quad (3.11)$$

Denklem (3.10) ve Denklem (3.11)'de, 'i' modal açılımdaki mod sayısını göstermektedir. Kullanılması gereken mod sayısı gereken hassasiyete ve serbest yüzeyin kompleksliğine göre değişmektedir. ' $\beta_i(t)$ ' terimleri, Denklem (3.5)'te verilen ' $f(x, t)$ ' ve görüntü işleme işlemleri sonucu elde edilen serbest yüzey kullanılarak elde edilmiştir. Kap uzunluğu boyunca yer alan her 'x' noktası için ' $\beta_i(t)$ ' terimi bilinmeyen bir denklem vardır. Bu denklemlerin oluşturduğu denklem setindeki 'x' noktası sayısı bilinmeyen ' $\beta_i(t)$ ' terimi sayısından daha fazla olduğu için elimizdeki denklem seti fazla tanımlı bir denklem setidir. ' $\beta_i(t)$ ' terimleri fazla tanımlı bir denklem seti için hataların karelerinin toplamı en küçük olacak şekilde (en küçük kareler yöntemi ile) çözülmüştür. Bu hesaplama her bir zaman adımı için değişen sıvı serbest yüzeyi profili ile tekrar çözülmüştür.



Şekil 3.16 : i=1, 4 ve 10 için elde edilen serbest yüzey profil yaklaşımları.

Şekil 3.16 i=1, 4 ve 10 için (1, 4 ve 10 mod için) elde edilen ' $\beta_i(t)$ ' terimleri kullanılarak çizilen örnek serbest yüzey profil yaklaşımlarını göstermektedir. Verilen şekilden de kolaylıkla anlaşılacağı üzere bir Fourier modu serbest yüzeyi yeterince iyi temsil edememektedir. Ancak 4 Fourier terimi kullanılarak oluşturulan serbest yüzey çizgisinin gerçek sıvı serbest yüzeyi ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. 10 Fourier terimi kullanımı ise serbest yüzeyi oldukça başarılı bir

şekilde ifade etmektedir. Bu çalışmada 4 Fourier terimi kullanılarak serbest yüzey Fourier açılımı ile ifade edilmiştir.

Serbest yüzey fonksiyonu ' $f(x)$ ' her zaman adımı için ayrı ayrı hesaplanır. Basınç değerlerini ve çalkalanma kuvvetini hesaplayabilmek için çalkalanma hareketinin hız potansiyelinin hesaplanması gerekmektedir. ' $\varphi(x,z)$ ' ve ' $f(x)$ ' terimleri arasında bir bağıntı kurabilmek için kinematik sınır koşulu ifadesi kullanılmıştır [39]. Kinematik sınır koşulu ifadesi Denklem (3.12)'de verilmiştir.

$$\frac{\partial \varphi(x, z, t)}{\partial z} = \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \cdot \frac{\partial \varphi(x, y, t)}{\partial x} \quad (3.12)$$

Denklem (3.12)'de verilen kinematik sınır koşulu ifadesi sıvı serbest yüzeyinde ($z(x,t)=f(x,t)$) geçerlidir. Serbest yüzey hızının 'z' bileşeni kullanılarak hız potansiyeli ve serbest yüzey fonksiyonu arasında bir ilişki elde edilir. Denklem (3.10) ve Denklem (3.11)'i, Denklem (3.12)'de yerlerine yazarak ' $R_i(t)$ ' çözülebilir. Elde edilen ' $R_i(t)$ ' aşağıdaki gibidir:

$$R_i(t) = \frac{\beta_i(t) \cdot \left(\frac{L}{i\pi}\right) \cdot \cosh\left(\frac{i\pi h}{L}\right) / \sinh\left(\frac{i\pi(z+h)}{L}\right)}{\left[1 - \left(\frac{i\pi}{L}\right) \cdot \left(\tan\left(\frac{i\pi}{L}\left(x + \frac{L}{2}\right)\right) \cdot \cotanh\left(\frac{i\pi}{L}(z+h)\right)\right) \cdot \left(\sum_{j=1}^N \left(\beta_j(t) \cdot \sin\left(\frac{j\pi}{L}\left(x + \frac{L}{2}\right)\right)\right)\right)\right]} \quad (3.13)$$

Yukarıda Denklem (3.13)'te verilen ' $R_i(t)$ ' ifadesi ' $\beta_i(t)$ ' teriminin zamana bağlı türevinin sayısal olarak hesaplanıp yerine konması ile hesaplanabilir. Hesaplanan ' $R_i(t)$ ' değerleri kullanılarak Denklem (3.11)'de verilen hız potansiyeli çalkalanan sıvı için her bir zaman adımında ayrı ayrı hesaplanır. Hesaplanan hız potansiyeli ile basınç arasındaki ilişki [38] aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \Phi)^2 - \nabla \Phi \cdot V_{0x} + gz + \frac{p - p_0}{\rho} = 0 \quad (3.14)$$

Ancak Denklem (3.14)'de verilen ifade tüm sistemin (sıvı tankı ve akışkan) hız potansiyeli için geçerlidir. Eğer Denklem (3.2), Denklem (3.14) içerisinde yerine yazılırsa ve sıvı kabının yer değiştirme hareketi aşağıdaki formda kabul edilirse:

$$x(t) = H \sin(\omega t) \quad (3.15)$$

Basınç ifadesi sadece akışkanın hız potansiyeline bağlı olarak (tüm sistemin değil) aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$p = p_0 - \rho \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} + (\nabla \varphi)^2 + gz + H\omega^2 \cos(\omega t) \cdot x - \frac{1}{2} H^2 \omega^2 \sin^2(\omega t) \right) \quad (3.16)$$

Yukarıdaki bağıntıda ' p_0 ' açık hava basıncıdır ve hesaplamalarda gösterge basıncı olduğu için 0 alınmıştır. Denklemden geçen diğer ifadeler ise: ' g ' yerçekim ivmesi, ' H ' sıvı tankının yer değiştirme genliği, ' ω ' kabın titreşim hareketinin frekansı, ' ρ ' ise kap içerisindeki sıvının yoğunluğudur. Denklem (3.16) kullanılarak kap içindeki herhangi bir noktadaki basınç hesaplanabilir. Kabın sağ ve sol duvarları üzerindeki basınç değerleri hesaplanıp kap duvarları boyunca integre edilirse, çalkalanan sıvının bu duvarlar üzerinde oluşturduğu çalkalanma kuvveti elde edilir. Sağ ve sol duvardaki çalkalanma kuvvetleri birbirlerinden çıkarılarak net çalkalanma kuvveti bulunabilir.

Çalkalanmadan dolayı oluşan kuvvet görüntü işleme metotları ve doğrusal dalga teorisi kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan kuvvetin doğrulanması için hesaplanan kuvvet yük hücreleri ile ölçülen kuvvet verisi ile karşılaştırılacaktır. Şekil 3.17'de yük hücresinin montajı görülmektedir. Yük hücresi bu görüntüdeki gibi sıvı tankının sol tarafına yerleştirilmiştir. Sıvı tankının ivmelenmesinden dolayı oluşan atalet kuvvetinin ölçülen kuvvet değerinden ayrılabilmesi için aynı girdi frekans ve genliğinde sistemde çalkalanan titreşim sönümleyici olan ve olmayan durumlar için ölçümler yapılmıştır. Bu iki ölçüm arasındaki fark yük hücresinin ölçtüğü çalkalanma kuvvetine eşittir. Ayrıca sıvı tankı 4 adet küçük demir küre ile platformdan ayrılmıştır. Böylece sıvı tankı ile platform arasındaki sürtünme minimuma indirilmiş ve çalkalanma kuvveti sürtünme kuvvetinin etkisinden arındırılarak ölçülmüştür. Küreler Şekil 3.17'de kırmızı renkte görülmektedir.



Şekil 3.17 : Yük hücresi montajı.

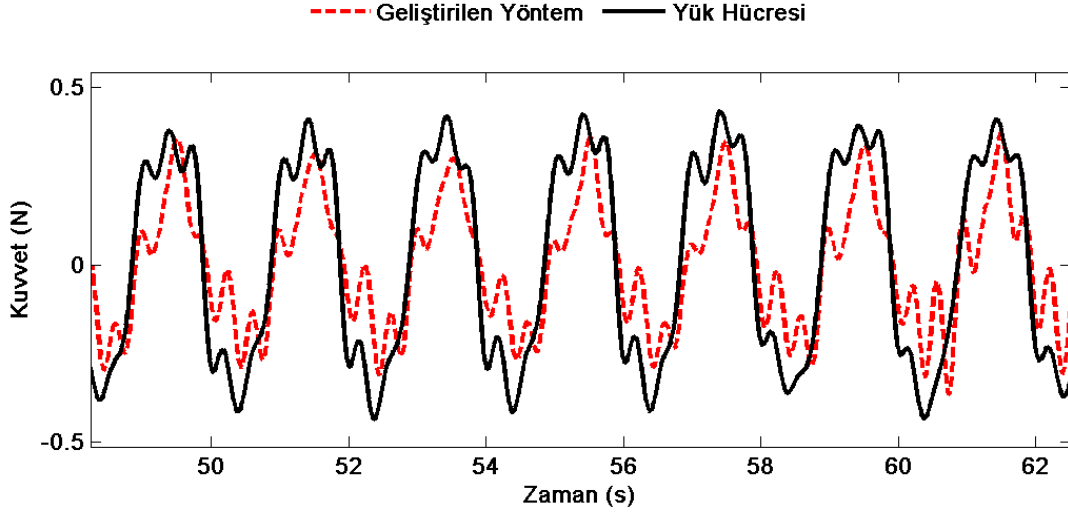
Görüntü işleme algoritması ve doğrusal dalga teorisi kullanılarak hesaplanan çalkalanma kuvveti, yük hücresi vasıtası ile ölçülen çalkalanma kuvveti verisi ile karşılaştırılarak geliştirilen yöntem doğrulanmaya çalışılmıştır. Çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması değişik su yüksekliği, hareket genliği ve hareket frekansı için yapılmıştır. Hesaplanan çalkalanma kuvvetini doğrulamak için karşılaştırma yapılan durumların özellikleri Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Çalkalanma kuvveti hesabını doğrulamak için yapılan deneyler.

Durum	Hareket Frekansı (Hz)	Çalkalanma Doğal Frekansı (Hz)	Hareket Genliği (mm)	Su Yüksekliği (mm)
1	0,5	0,5	20	15
2	1	1	3	65
3	1	1	4	65
4	2	1	10	65
5	1,1	1	3	65
6	1,2	1	3	65

Durum 1:

Hareket frekansının 0,5 Hz ve hareket genliğinin 20 mm olduğu durumda elde edilen sonuçlar Durum 1’de görülmektedir. Durum 1 için elde edilen verilen Şekil 3.18’de verilen grafikte gösterilmiştir.

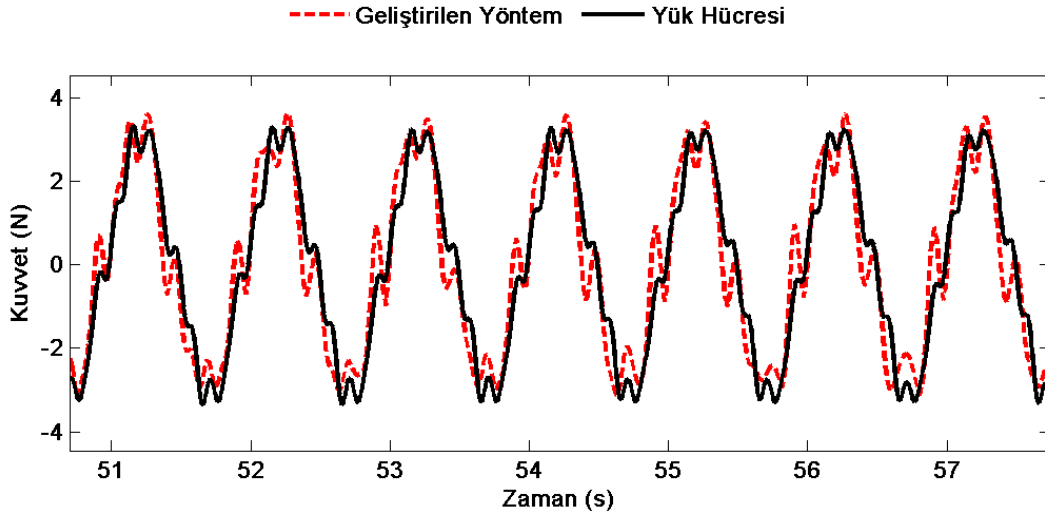


Şekil 3.18 : Durum 1 için çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Durum 1’de maksimum noktaların ortalama hatası %17’dir. Aynı koşullar için hareket genliği 10 mm ve 30 mm yapıldığında da benzer sonuçlar elde edilmektedir. Elde edilen bu hata oranı kabul edilebilir seviyededir.

Durum 2:

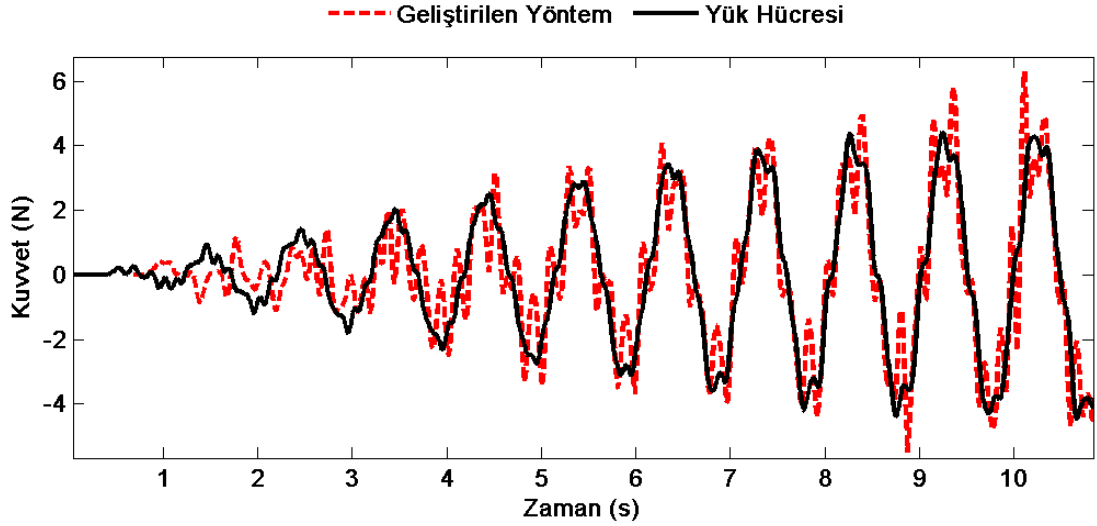
Bir sonraki karşılaştırmada yani Durum 2’de ise sistemin hareket frekansı 1 Hz’e yükseltilmiştir. Durum 2 için elde edilen sonuçlar Şekil 3.19’da görülebilir.



Şekil 3.19 : Durum 2 için çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Durum 2 için elde edilen tepe noktalarının ortalama hatası yaklaşık olarak %10’dur. Durum 2’de elde edilen hata oranının Durum 1’dekinden daha iyi olmasının nedeni Durum 2’nin daha fazla su yüksekliği ile yapılması ve çalkalanma kuvvet genliğinin daha büyük olmasıdır. Durum 2’deki hareket genliği 3 mm’nin altına düşürüldüğünde görüntü işleme yöntemi ile elde edilen sıvı yüksekliği profilindeki hata oranı

arttığından dolayı çalkalanma kuvvetindeki hata oranı da düşük miktarlarda artmaktadır. Durum 2 için ilk 10 s’de hesaplanan çalkalanma kuvveti ve yük hücresi verisi karşılaştırması Şekil 3.20’de görülmektedir.

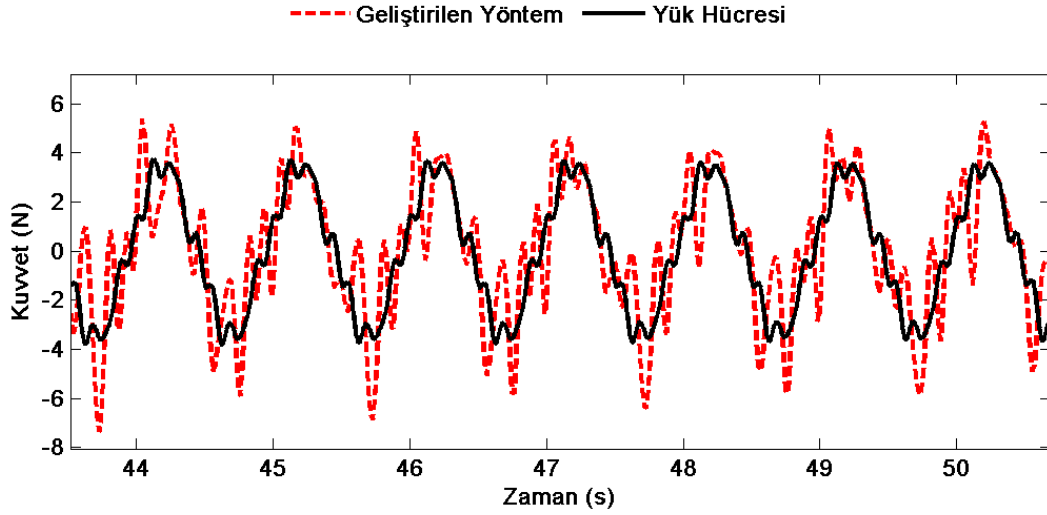


Şekil 3.20 : Durum 2 için ilk 10 s’deki çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Şekil 3.20’de görüldüğü gibi çalkalanma kuvveti geliştirilen yöntem ile kaptaki suyun salınım yapmaya başlaması ile hesaplanabilmektedir. Bu sebeple yük hücresi verisinde görülen ilk tepe noktasında kaptaki su henüz salınım yapmaya başlamadığından dolayı çalkalanma kuvveti doğru hesaplanamamıştır. Bundan sonraki tepe noktalarında (2-11 s arası) hata oranları değişse de çalkalanma kuvvetinin doğru bir şekilde hesaplandığı söylenebilir.

Durum 3:

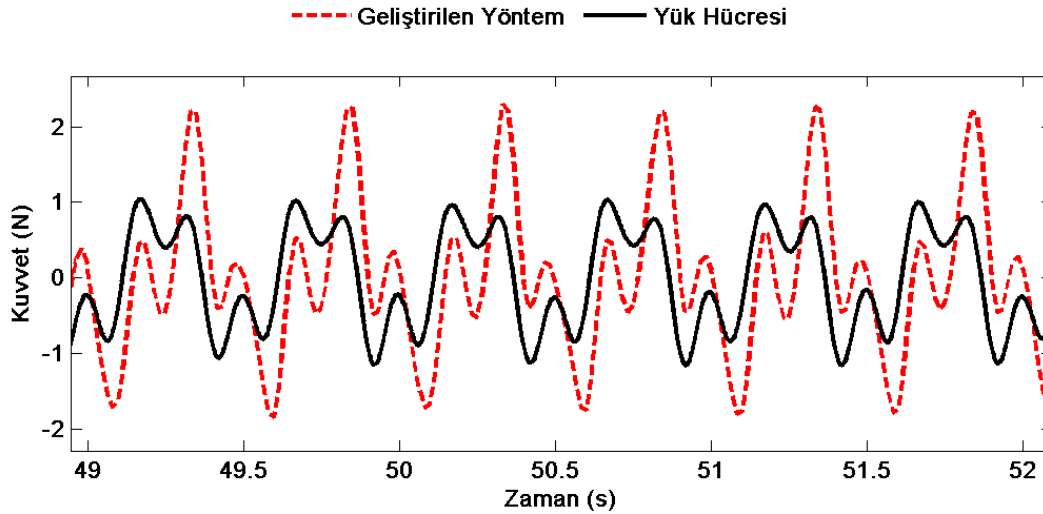
Durum 3’te hareket frekansı Durum 2 ile aynıdır. Ancak Durum 3’te hareket genliği 4 mm’ye çıkarılmıştır. Bu durumdaki hata oranı artarak %31 olmuştur. Bunun nedeni sıvıdaki sıçramalar ve sıvının 4 mm ve üzeri hareket genliklerinde 2 boyutlu hareketini sürdürememesi olarak söylenebilir. Bu durum Şekil 3.21’de verilen grafikte görülmektedir. Hareket genliği 4 mm değerinin de üzerine çıkarıldığında hata oranı daha da artmaktadır. 4 mm hareket genliğinin üzerindeki hareket genliklerinde 1 Hz hareket frekansı için çalkalanma kuvvetinin doğru olarak hesaplanamadığı söylenebilir.



Şekil 3.21 : Durum 3 için çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Durum 4:

Durum 4'te girdi titreşim frekansı 2 Hz'dir ancak bu durumda önceki durumlardan farklı olarak sıvının çalkalanma doğal frekansı 1 Hz'e ayarlanmıştır. Sıvının 1 Hz çalkalanma doğal frekansına sahip olması için gerekli olan sıvı yüksekliği 65 mm'dir. Bu durum için girdi hareket genliği ise 10 mm'dir. Bu koşullar altında elde edilen sonuçlar Şekil 3.22'de görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere hata %125 seviyesindedir. Hatanın bu kadar büyük olmasının sebebi yöntemin sadece doğal frekansında titreştirilen sistemler için çalkalanma kuvvetini hesaplayabilmesidir.

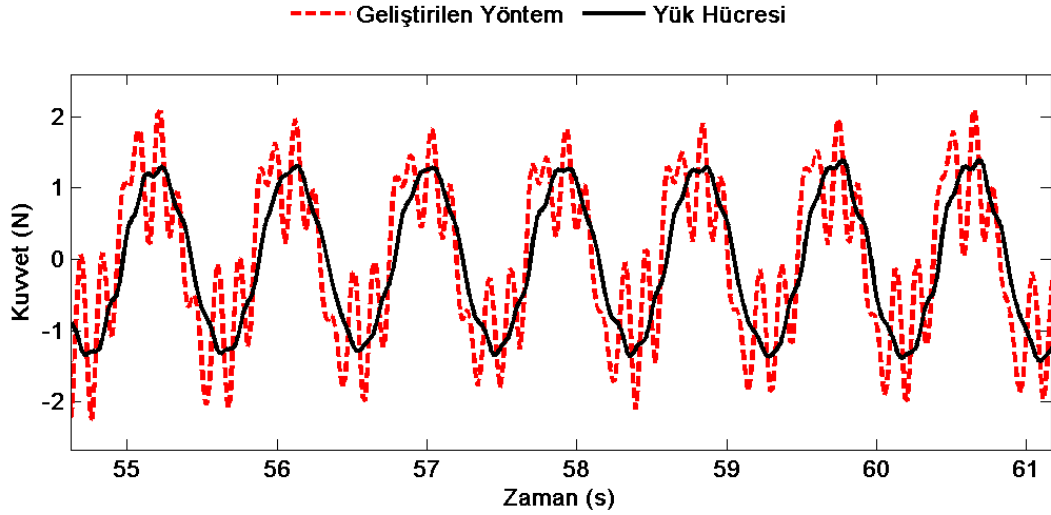


Şekil 3.22 : Durum 4 için çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Durum 5:

Bölüm 1.2'deki Denklem (1.2)'de sıvıların dikdörtgen kap içerisindeki çalkalanma doğal frekanslarının nasıl bulunacağı gösterilmiştir. Sıvının doğal frekansı sistemin doğal frekansı ile aynı olduğu zaman, bu yöntem kullanılarak sıvının çalkalanma kuvveti doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Ancak bu iki değer eşit olmadığı durumlarda doğru sonuçlar elde edilememektedir. Bununla beraber sıvının çalkalanma doğal frekansı ile sistemin hareket frekansının birbirine yakın ama eşit olmadığı durumdaki sonuçlar önceki durumlarda incelenemedi. Bu yüzden kaptaki sıvının çalkalanma doğal frekansı 1 Hz'e ve sistemin hareket frekansı 1,1 Hz'e ayarlanarak oluşturulan yeni durumun sonuçları incelendi. Bu durum için hareket genliği ise 3 mm olarak ayarlandı. Bu sayede sonuçlar Şekil 3.19'da verilen hareket frekansı ve sıvının doğal frekansı 1 Hz olan durum ile karşılaştırılabilir. Yeni durum için elde edilen sonuçlar Şekil 3.23'teki grafikte görülmektedir.

Bu durumda maksimum noktalarının hata ortalaması %48'dir. Şekil 3.19'de gözlemlediğimiz durumdaki hata oranı ise %10 idi. Hareket frekansı ile suyun çalkalanma frekansının değerlerinin birbirinden farklı olması durumunda geliştirilen yöntemin başarısının düştüğü söylenebilir.

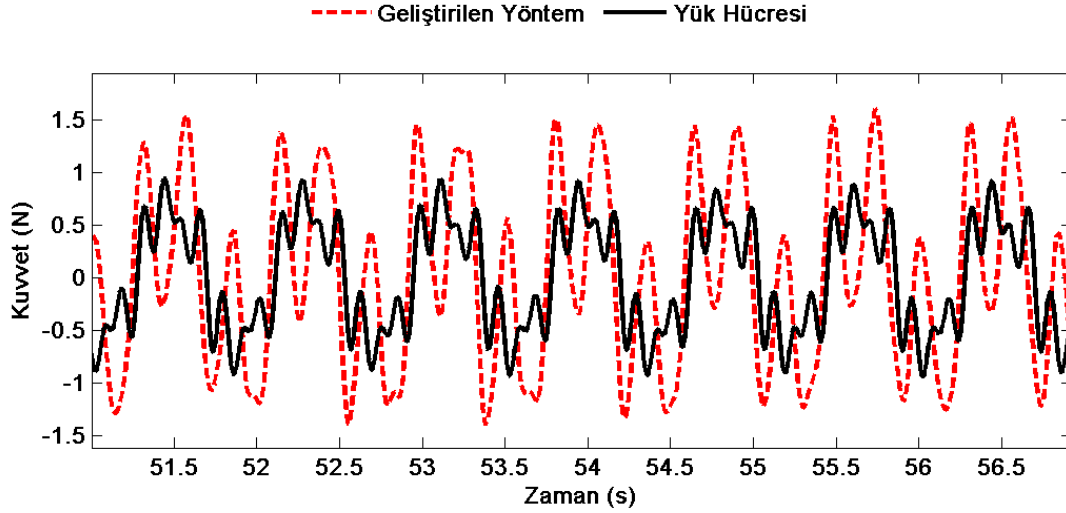


Şekil 3.23 : Durum 5 için çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Durum 6:

Durum 6'da hareket frekansı 1,1 Hz'den 1,2 Hz'e yükseltilmiştir. Bunun dışındaki diğer deney parametreleri Durum 5 ile aynıdır. Bu durumdaki hata oranı Şekil 3.24'te görüldüğü gibi %64'e yükselmiştir. Durum 5, Durum 6 ile kıyaslanırsa, hareket

frekansı ile suyun çalkalanma doğal frekansı arasındaki fark arttığında yöntemin hata oranının arttığı söylenebilir. Bu yoruma ek olarak, Durum 6'daki sistemin hareket frekansı 1,2 Hz'den 1,5 Hz'e çıkarıldığında yöntemin hata oranı daha da artarak %262'ye kadar çıkmaktadır.



Şekil 3.24 : Durum 6 için çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Geliştirilen yöntem kullanılarak elde edilen durağan durumdaki maksimum değerlerin ortalama hatası (yük hücresine göre) değerleri farklı durumlar için Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Hesaplanan çalkalanma kuvveti verisinin yük hücresi verisi ile karşılaştırılması.

Durum	Hareket Frekansı (Hz)	Çalkalanma Doğal Frekansı (Hz)	Hareket Genliği (mm)	Su Yüksekliği (mm)	Hata Oranı (%)
1	0,5	0,5	20	15	17
2	1	1	3	65	10
3	1	1	4	65	31
4	2	1	10	65	125
5	1,1	1	3	65	48
6	1,2	1	3	65	64

Sonuç olarak çalkalanma karakteristiğini incelemek ve rezonans etrafında çalkalanma kuvvetini hesaplamak için bir metot geliştirildi. Bu metotta kaydedilen çalkalanma görüntüleri kullanılarak öncelikle kap uzunluğu boyunca sıvı yüksekliği tespit edilmiştir. Bu sıvı yüksekliği ve doğrusal dalga teorisi kullanılarak çalkalanma kuvveti sıvının çalkalanma doğal frekansı etrafındaki hareket frekansı değerlerinde

hesaplamıştır. Elde edilen bu iki çıktı farklı hareket genliği, hareket frekansı ve sıvı yüksekliği değerleri için ultrasonik algılayıcılar ve yük hücreleri kullanılarak doğrulanmıştır.

Geliştirilen yöntemin çalkalanma kuvvetini sıvının ilk rezonans frekansından uzak frekanslarda hesaplayamamasının nedeni ise şu şekildedir. Geliştirilen bu kuvvet hesaplama yönteminde çalkalanmanın sadece sistemin ilk rezonans frekansında olduğu varsayılmaktadır. Yani sistemin 2. veya daha yüksek dereceli rezonans frekanslarının çalkalanma kuvveti üzerindeki etkisi ihmal edilmektedir. Bu varsayım sistem ilk rezonans frekansı veya ilk rezonans frekansına yakın frekanslarda hareket ettirildiği zaman doğrudur. Çünkü bu durumda sistemin 2. veya daha yüksek dereceli rezonans frekanslarında verdiği yanıtlar, ilk rezonans frekansında verdiği yanıtla göre ihmal edilebilecek kadar küçük olmaktadır. Ancak sistem ilk rezonans frekansından uzak frekanslarda hareket ettirildiği zaman sistemin 2. veya daha yüksek dereceli rezonans frekanslarında verdiği yanıtlarında değerleri artarak sistemin ilk rezonans frekansındaki yanıtına yakın genlikler elde etmeye başlayabilir. Yani bu çalışmada geliştirilen yöntem sistemin 2. veya daha yüksek dereceli rezonans frekanslarının çalkalanma kuvveti üzerindeki etkisini ihmal ettiğinden dolayı ilk rezonans frekansından uzak frekanslarda hareket eden sıvılar için hesaplanan çalkalanma kuvvetleri yanlış çıkmaktadır. Küçük hareket genlikleri için sistemin 2. rezonans frekansının sistem yanıtına olan etkisi Denklem (3.17)'de verilen değerlerin komşuluğu dışında önemli duruma gelmektedir [38].

$$\frac{\sigma_1}{\sigma} \rightarrow i(2, h/l) = \frac{\tanh\left(\frac{2\pi h}{l}\right)}{\sqrt{2 \tanh\left(\frac{\pi h}{l}\right)}} \quad (3.17)$$

Yani ' $i(2, h/l)$ ' ifadesinin değerinin 1'e yakın olduğu durumlarda geliştirilen yöntem sadece rezonans frekansında hareket eden sistemler için çalkalanma kuvvetini doğru hesaplarken, ' $i(2, h/l)$ ' ifadesinin değerinin 1'den uzaklaşmasıyla yöntem suyun ilk rezonans frekansının etrafında daha geniş bir frekans aralığında çalkalanma kuvvetini doğru olarak hesaplayabilmektedir. ' $i(2, h/l)$ ' ifadesinin değeri su yüksekliğinin kap uzunluğuna oranı yani ' h/l ' düşükken 1'e yakın çıkmakta ' h/l ' ifadesinin değeri (kaptaki su yüksekliği) arttıkça ' $i(2, h/l)$ ' ifadesinin değeri 1'den uzaklaşmaktadır. Örneğin bu çalışmada kullanılan 0,5 Hz rezonans frekansına sahip sıvı yüksekliği 15

mm için ' $i(2, h/l)$ ' değeri 0,99 olurken, 1 Hz rezonans frekansına sahip sıvı yüksekliği 65 mm için ' $i(2, h/l)$ ' değeri 0,9 olmaktadır. İlk rezonans frekansı 0,5 Hz olan 15 mm sıvı yüksekliğinde çalkalanma kuvvetinin doğru hesaplanabilmesi için sistemin rezonans frekansına çok yakın bir değerde hareket ettirilmesi gerekirken, 1 Hz ilk rezonans frekansına sahip sıvı yüksekliği 65 mm'de ise çalkalanma kuvvetinin rezonans frekansı etrafında $\pm \%10$ 'luk bir frekans bölgesinde doğru olarak hesaplandığı söylenebilir.

Geliştirilen bu yöntemin sıvı yüksekliğini ölçmede ultrasonik algılayıcıya ve çalkalanma kuvvetini ölçmede ise yük hücrelerine karşı bir takım avantajları vardır. Ultrasonik algılayıcı ile sıvı yüksekliği kap üzerinde sadece birkaç noktada tespit edilebilmektedir ve su yüksekliğinin tespit edilmek istendiği her nokta için ayrı bir ultrasonik algılayıcı kullanılmalıdır. Kamera ile hesaplanan sıvı yüksekliği verisi ile sıvı yüksekliği verisi kamera çözünürlüğünün izin verdiği ölçüde çok fazla noktada tespit edilebilir. Örneğin bu çalışmada yapılan uygulamalarda kap üzerinde eşit aralıklarla yaklaşık 1000 noktada sıvı yüksekliği tespit edilmiştir. Kamera çözünürlüğünü arttırarak bu sayıyı kolayca arttırmakda mümkündür.

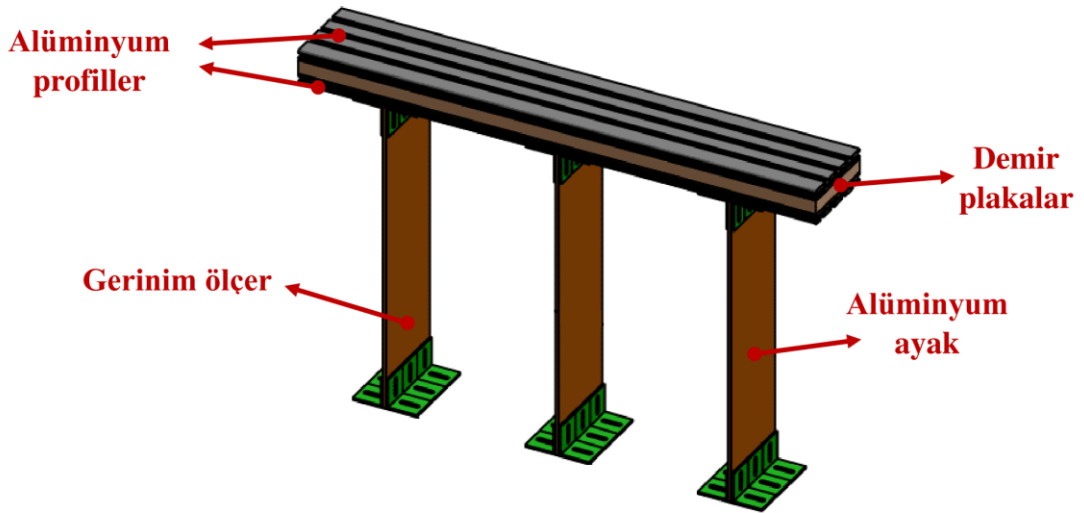
Ultrasonik algılayıcı su yüksekliğinin ölçülmek istendiği noktanın etrafındaki bir alanı görmektedir ve bu alandaki ortalama su yüksekliğinin ölçümünü yapmaktadır. Bunun yanında kameradan hesaplanan su yüksekliği verisi kabın derinliğini görmeyip sadece ölçülmek istenen tek bir noktanın su yüksekliği verisini göstermektedir. Bu yüzden sunulan yöntem sıvı yüzeyinin hareket sırasında aldığı şeklin ayrıntılı olarak çıkarılması için daha uygundur. Ayrıca bu tip algılayıcılar kullanılarak yapılan ölçümlerde algılayıcılar tank duvarlarına yakın olduğunda durumlarda kap duvarları da algılayıcının görüş alanına girdiği için hatalı olmaktadır. Algılayıcıya sıvı damlası yapıştığı durumlarda ise sıvı yüksekliği verisi alınmamaktadır ve böyle bir durumda yapılan çalışma tekrarlanmak zorundadır. Son olarak, ultrasonik algılayıcı ile su yüksekliği tespit edilirken sudaki kopma ve sıçramalarda, kopan bu su hacmi dalgalarının bir parçası olarak kabul edilmektedir. Ancak bu istenmeyen bir durumdur. Kamera ile hesap yapılırken bu kopma ve sıçramalar temizlenerek gerçek su yüksekliği verisi elde edilmektedir.

Yük hücrelerinin de çalkalanma kuvvetlerini ölçmekte bir takım dezavantajları vardır. Sıvı tankı sallanma tablasının üzerine direkt konumlandırıldığında bile net çalkalanma kuvvetinin elde edilebilmesi için çalkalanan titreşim sönümleyici olan ve olmayan

durum olmak üzere iki ölçüm yapılmalıdır. Bu iki ölçümün farkı alınarak net çalkalanma kuvveti hesaplanabilmektedir. Diğer bir seçenek ise ivmeölçer ve gerinim ölçer gibi algılayıcılar ile veri toplanıp sıvı tankının ivmelenmesinden dolayı oluşan atalet kuvveti ayrıca hesaplanarak yük hücresi ile ölçülen kuvvetten çıkarılmasıdır. Sarsma tablasının üzerine yapı konulduğunda ise kaptaki sıvının hareketi hareket genliklerini ve ivmeleri değiştireceğinden iki kez ölçüm yapılarak da çalkalanma kuvveti tespit edilememektedir. Bu sebeple yapı modeli kullanılan durumlarda çalkalanma kuvveti sadece ivmeölçer verisi kullanılarak hesaplanan kap atalet kuvveti yük hücresi verisinden çıkarılarak hesaplanabilir. Bu yöntem ile çalkalanma kuvvetini hesaplamak için birden fazla algılayıcının kullanılması ve bir takım matematiksel işlemler yapılması gerekmektedir. Önerilen yöntem ise sadece kamera verisi kullanılarak başka algılayıcıya gerek kalmadan çalkalanma kuvvetini rezonans durumunda titreşen sistemler için hesaplayabilmektedir.

4. YAPI-SIVI ETKİLEŞİMİ İLE ÇALKALANAN TİTREŞİM SÖNÜMLEYİCİNİN PERFORMANSININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Bu aşamaya kadar bina modeli olmadan sadece sıvı tankına hareket girdisi verilerek sıvı tankının içerisinde bulunan sıvının hareketi incelenmişti. Bu aşamada ise sisteme parametreleri değiştirilebilen bir bina modeli eklenerek bina modelinin sinüs ve deprem girdisi için verdiği yanıtlar incelenecektir. Bina modelinin katı modeli Şekil 4.1’de görülebilir. Bina alüminyum malzemeden yapılmış üç adet esnek ayak üzerinde durmaktadır. Bu ayaklar köşebentler yardımıyla hareketli platforma herhangi bir kayma olmayacak şekilde tutturulmuştur. Bina modelinde alüminyum ayakların üzerine, hazır alüminyum profil monte edilerek bina modelini tamamlayacak olan ağırlıkları koymak için yer oluşturulmuştur. Oluşturulan bu kata farklı kalınlıklarda demir plakalar konulmaktadır. Bu demir plakaların üzerine yine hazır alüminyum profil konulmuştur. Hazır profilin konulması ile sıvı tankı ve ilgili algılayıcıların montajı kolaylıkla yapılabilecektir.



Şekil 4.1 : Bina modeli.

Kullanılan bu alüminyum plakaların kalınlığı ve uzunluğu değiştirilerek bina modelinin kütle, direngenlik ve doğal frekans gibi özellikleri değiştirilebilmektedir. Ayrıca kullanılan demir plakaların kalınlığı değiştirilerek doğal frekansın daha hassas

ayarlanması sağlanmaktadır. Bina modelinin yüksekliği sıvı tankı olmadan 45 cm ile 70 cm arasında değişmektedir. Modelin genişliği 75 cm, eni ise 12 cm'dir.

Bina modelinin deneyler sırasındaki durumunun daha iyi takip edilebilmesi için yapısız deney düzeneğinden farklı olarak sisteme yeni bir algılayıcı daha eklenmiştir. Bu algılayıcı gerinim ölçerdir. Gerinim ölçer bina modelini taşıyan alüminyum ayaklardan birinin üzerine platformdan 5,5 cm yukarıya, plakanın enini ortalayacak biçimde yerleştirilmiştir. Gerinim ölçer rezonans frekansı 2 Hz ve daha düşük olan yapı modelleri için yapının sol tarafında kalan ayağına, 2 Hz'den yüksek rezonans frekansına sahip yapı modelleri için ise yapının ortada bulunan ayağına bağlanmıştır. Literatürdeki incelenen çalışmalarda, yapı yanıtını takip etmek için gerinim ölçer kullanılan bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Gerinim ölçer verisi kat yer değiştirmesi ve ivmesinin aksine doğrudan yapının deprem anındaki deformasyonunu ölçtüğünden yapının dış girdiye mağruz kaldığı süre boyunca alabileceği hasar hakkında daha doğru fikir edinilebilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada kullanılan gerinim ölçer ile yapıda oluşan deformasyonlar anlık olarak takip edilmiştir.

Bu bina modeli kullanılarak oluşturulan farklı durumlar için deneyler yapılmıştır. Durumlarda bina modelinin kütle, direnç ve doğal frekans özellikleri değiştirilmiştir. Bu durumlarda ölçümler sadece binanın rezonans frekansında değil rezonans frekansından büyük ve küçük farklı frekanslarda da yapılmıştır. Böylece çalkalanan sönümleyicinin rezonans durumu dışındaki performansı da incelenebilecektir.

4.1 Sinüs Girdisi için Çalkalanan Titreşim Sönümleyicinin Performansının İncelenmesi

Bu bölümde yapı modelinin sinüs girdisi için verdiği yanıtların durağan durumdaki genlikleri incelenecektir. Bina modelinin rezonans frekansından uzak frekans değerlerindeki ölçümler durağan durumda elde edilen periyodik yanıt için kaydedilmiştir. Sadece bina modelinin rezonans frekansı ve rezonans frekansının hemen altındaki ve üstündeki frekanslar için geçici durum değerleri de kaydedilmiştir. Ayrıca çalkalanan sönümleyicinin olmadığı bazı durumlarda sistemin yanıtının çok büyümesinden dolayı yapının zarar görmemesi için durağan durum yanıtı kaydedilemeden hareket sonlandırılmak zorunda kalınmıştır. Verilen grafiklerde kare

ile işaretlenmiş değerlerde bu durumdan dolayı geçici yanıt kullanılmıştır. Yani kare ile işaretli veri noktalarında sistem için durağan yanıt alınamamış geçici yanıt kullanılmıştır. Bu geçici yanıtın hareketin kaçınıcı saniyesinde olduğu verilen çizelgelerde belirtilmiştir. Kare ile işaretlenmeyen değerler ise durağan durum yanıtıdır.

Deneyle yapılrken girdi olarak düşük ve yüksek genlikli sinüs sinyali kullanılarak her durum için 2 ayrı titreşim girdi genliğinde ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen gerinim, ivme, ivmenin 2. integralinden elde edilen kat konumu ve yük hücresi verisi ilgili durumlar için hareket frekansı ve genliğine göre çalkalanan titreşim sönümleyici olan ve olmayan durumlar için çizelge halinde verilmiştir. Ayrıca gerinim ve kat yer değıştirmelerinin frekansa bağılı değışimi de grafik olarak verilmiştir. İncelenen durumlar için yapının doğal frekansı, sıvının çalkalanma frekansı, hareket genliği ve sönümleyici sıvı-yapı kütlesi oranı Çizelge 4.1'deki gibidir.

Çizelge 4.1 : Sinüs girdisi için deney yapılan durumlar.

Durum	Bina Modelinin Doğal Frekansı (Hz)	Çalkalanan Sönümleyicinin Çalkalanma Doğal Frekansı (Hz)	a-) Düşük Zemin Hareket Genliği (mm)	b-) Yüksek Zemin Hareket Genliği (mm)	Titreşim Sönümleyici Sıvı/Yapı Kütlesi Oranı (%)
1	1	1 (65 mm su)	2	4	14
2	1	1 (65 mm su)	1	3	7,5
3	2	1 (65 mm su)	1	3	22
4	3,5	0,5 (15 mm su)	1	-	5

Durum 1:

Bu durum Çizelge 4.1'de belirtildiği gibi yapının doğal frekansı ve çalkalanan sönümleyicinin çalkalanma doğal frekansı 1 Hz'e ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Durum 1.a düşük hareket genliği, Durum 1.b ise yüksek hareket genliği için elde edilen sonuçları göstermektedir.

Durum 1.a:

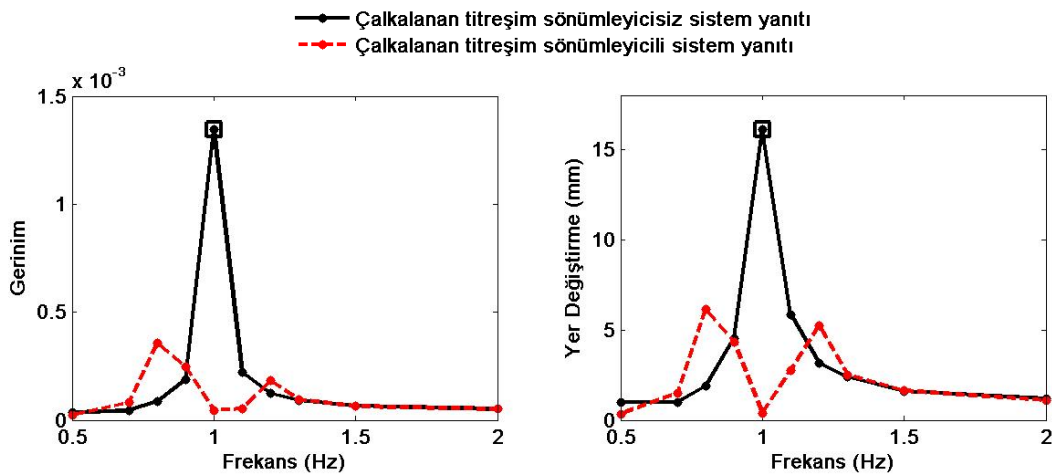
Çizelge 4.2 düşük hareket genliği için sönümleyici olmayan durumun sonuçlarını, Çizelge 4.3 aynı genlik için sönümleyici olan sistemin sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.2'de ise gerinim ve kat yer değıştirmesinin hareket frekansına bağılı değışimleri görülmektedir.

Çizelge 4.2 : Durum 1 için sönümleyicisiz sistem yanıtı (2 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değişirme (mm)
0,5	3,7E-05	0,04	1,0
0,7	4,4E-05	0,04	1,0
0,8	8,6E-05	0,06	1,9
0,9	1,9E-04	0,16	4,5
1,0 @ 11,5 s	1,3E-03	0,51	16,1
1,1	2,2E-04	0,26	5,8
1,2	1,2E-04	0,18	3,2
1,3	9,3E-05	0,17	2,4
1,5	6,7E-05	0,14	1,6
2,0	5,2E-05	0,19	1,2

Çizelge 4.3 : Durum 1 için sönümleyicili sistem yanıtı (2 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değişirme (mm)	Yük Hücresi (N)
0,5	2,4E-05	0,02	0,3	0,3
0,7	8,1E-05	0,04	1,5	1,2
0,8	3,6E-04	0,25	6,1	5,6
0,9	2,5E-04	0,29	4,3	4,6
1,0	4,5E-05	0,04	0,4	1,8
1,1	5,3E-05	0,15	2,7	1,7
1,2	1,8E-04	0,29	5,2	0,5
1,3	9,7E-05	0,17	2,5	0,6
1,5	6,5E-05	0,13	1,6	1,3
2,0	5,2E-05	0,16	1,1	1,1



Şekil 4.2 : Durum 1 için sistem yanıtı (2 mm girdi genliği).

Durum 1.b:

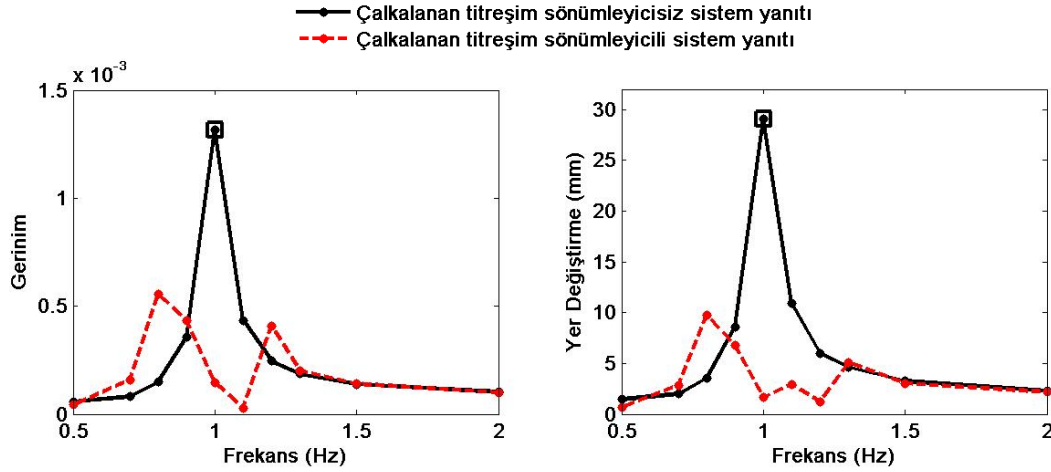
Çizelge 4.4 yüksek hareket genliği olan 4 mm için sönümleyici olmayan durumun sonuçlarını, Çizelge 4.5'te aynı genlik için yapı ile sönümleyicinin birlikte olduğu sistemin sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.3'te ise gerinim ve kat yer değiştirmesinin 4 mm hareket girdisi için frekansa bağlı değişimini gösteren grafikler görülmektedir.

Çizelge 4.4 : Durum 1 için sönümleyicisiz sistem yanıtı (4 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)
0,5	5,7E-05	0,07	1,5
0,7	8,2E-05	0,05	2,0
0,8	1,5E-04	0,10	3,5
0,9	3,6E-04	0,28	8,6
1,0 @ 5 s	1,3E-03	0,12	29,1
1,1	4,3E-04	0,49	10,9
1,2	2,5E-04	0,32	6,0
1,3	1,9E-04	0,31	4,6
1,5	1,4E-04	0,27	3,3
2,0	1,0E-04	0,35	2,3

Çizelge 4.5 : Durum 1 için sönümleyicili sistem yanıtı (4 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)	Yük Hücresi (N)
0,5	4,3E-05	0,03	0,7	0,80
0,7	1,6E-04	0,07	2,9	2,5
0,8	5,6E-04	0,34	9,8	9,7
0,9	4,3E-04	0,52	6,8	9,6
1,0	1,5E-04	0,13	1,7	5,2
1,1	2,9E-05	0,19	2,9	4,9
1,2	4,1E-04	0,73	12,0	6,1
1,3	2,0E-04	0,33	5,1	3,9
1,5	1,4E-04	0,26	3,1	4,4
2,0	1,0E-04	0,34	2,2	4,1



Şekil 4.3 : Durum 1 için sistem yanıtı (4 mm girdi genliği).

Durum 1 için verilen çizelge ve grafikler incelendiğinde yüksek ve düşük girdi genliği için şu sonuçlar elde edilir. Rezonans frekansı olan 1 Hz değerinde çalkalanan titreşim sönümleyici sistemin yanıtını etkili bir şekilde düşürmektedir. Rezonans frekansının hemen altındaki ve üstündeki değerler olan 0,9 ve 1,1 Hz’de ise sistemin yanıtının çoğu değer için yaklaşık olarak aynı değerlerde kaldığı görülmektedir. Özellikle 1,1 Hz hareket frekansında sistem yanıtının iyi bir şekilde sönümlendiği görülmektedir. 0,9 Hz’de ise sistem yanıtı sönümsüz sistem ile yaklaşık olarak aynı değerleri almıştır. Biraz daha uzak olan 0,8 Hz ve 1,2 Hz’de ise sistem yanıtı için 2 yeni tepe noktası oluştuğu görülür. Bu tepe noktalarındaki sistem yanıtları çalkalanan sönümleyici olmayan sistemin rezonans yanıtına göre en az birkaç kat daha küçüktür. Bu gözlemlerden yola çıkarak bu yapı modeli için çalkalanan titreşim sönümleyicinin etkisinin, sönüm oranı düşük olan titreşim sönümleyici ile benzer olduğu söylenebilir. Sistemin hareket frekansı yapının rezonans frekansından uzaklaştıkça çalkalanan titreşim sönümleyici etkisini önemli ölçüde yitirmekte ve sönümleyici olan sistem ile olmayan sistem için alınan yanıtların birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir.

Durum 2:

Bu durumda, Durum 1’de olduğu gibi yapının doğal frekansı ve çalkalanan sönümleyicinin çalkalanma doğal frekansı 1 Hz’e ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Durum 2’de sistemin üzerinde durduğu ayaklardan ortada olanının kalınlığı 2 mm’den 3 mm’ye çıkarılmıştır. Yapılan bu değişiklikten dolayı yapının doğal frekansını 1 Hz’e ayarlamak için yapıya daha fazla ağırlık konulması gerekmektedir. Durum 2 için çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütesinin yapı kütesine oranı %7,5’tir. Bu oran Durum 1 için %14 idi. Yapının ve çalkalanan sıvının rezonans frekansları aynı olan

sadece kütle oranları farklı olan bu iki durum incelendiğinde kütle oranının sönümleyici performansına etkisi gözlemlenebilecektir. Durum 2.a düşük hareket genliği, Durum 2.b ise yüksek hareket genliği için elde edilen sonuçları göstermektedir.

Durum 2.a:

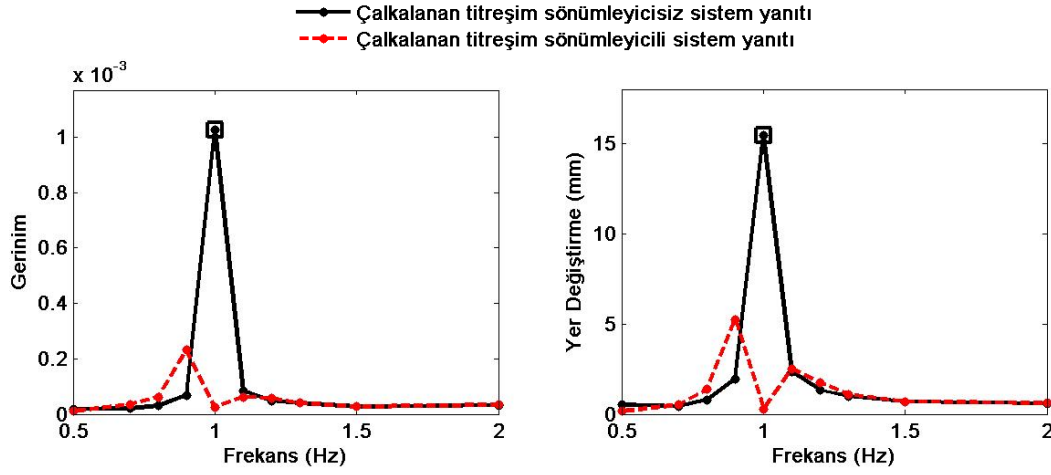
Çizelge 4.6 Durum 2 için düşük hareket genliğinde hareket eden ve üzerinde sönümleyici olmayan durumdaki sistemin sonuçlarını, Çizelge 4.7’de aynı genlik için üzerinde sönümleyici olan sistemin sonuçları göstermektedir. Şekil 4.4’te ise gerinim ve kat yer değiştirmesinin hareket frekansına bağlı değişiminin grafiği Durum 2.a için verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Durum 2 için sönümleyicisiz sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m ²)	Yer Değiştirme (mm)
0,5	1,9E-05	0,02	0,5
0,7	2,0E-05	0,02	0,4
0,8	3,1E-05	0,03	0,8
0,9	6,9E-05	0,07	1,9
1,0 @ 24 s	1,0E-03	0,52	15,4
1,1	8,4E-05	0,12	2,3
1,2	4,8E-05	0,09	1,3
1,3	4,1E-05	0,07	1,0
1,5	2,8E-05	0,07	0,7
2,0	3,2E-05	0,08	0,6

Çizelge 4.7 : Durum 2 için sönümleyicili yanıtı (1 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)	Yük Hücresi (N)
0,5	1,1E-05	0,01	0,2	0,5
0,7	3,6E-05	0,02	0,5	1,3
0,8	6,2E-05	0,04	1,4	2,0
0,9	2,3E-04	0,25	5,2	6,2
1,0	2,5E-05	0,03	0,3	2,0
1,1	6,1E-05	0,13	2,5	2,8
1,2	5,8E-05	0,10	1,8	0,7
1,3	4,0E-05	0,08	1,1	0,8
1,5	2,7E-05	0,07	0,7	1,0
2,0	3,3E-05	0,10	0,6	0,9



Şekil 4.4 : Durum 2 için sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).

Durum 2.b:

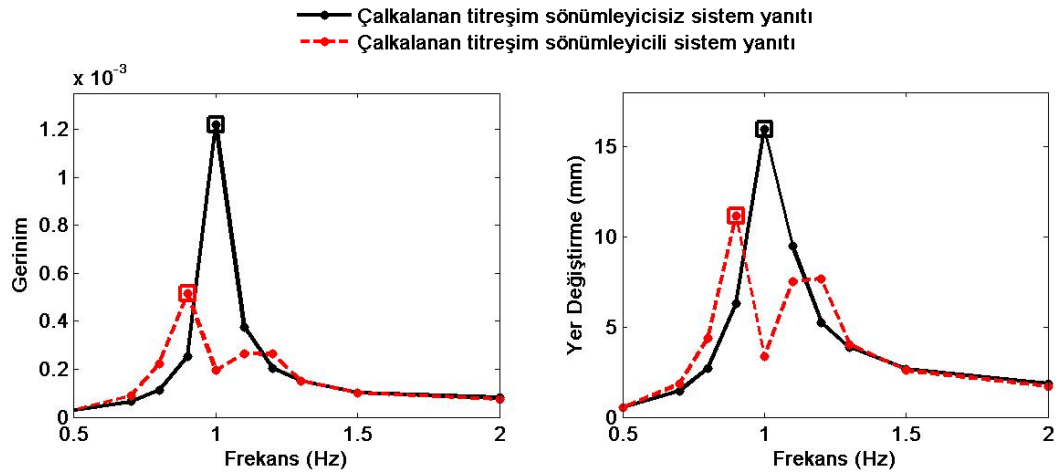
Çizelge 4.8 yüksek hareket genliği olan 3 mm için sönümleyici olmayan durumun sonuçlarını, Çizelge 4.9'da aynı genlik için yapı ile sönümleyicinin birlikte olduğu sistemin sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.5'te ise gerinim ve kat yer değiştirmesinin 3 mm hareket girdisi için frekansa bağlı değişimlerini gösteren grafikler görülmektedir.

Çizelge 4.8 : Durum 2 için sönümleyicisiz sistem yanıtı (3 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)
0,5	2,9E-05	0,02	0,5
0,7	6,5E-05	0,04	1,5
0,8	1,1E-04	0,08	2,7
0,9	2,5E-04	0,21	6,3
1,0 @ 6 s	1,2E-03	0,53	16,0
1,1	3,7E-04	0,45	9,5
1,2	2,0E-04	0,29	5,3
1,3	1,5E-04	0,25	3,9
1,5	1,0E-04	0,22	2,7
2,0	8,1E-05	0,29	1,9

Çizelge 4.9 : Durum 2 için sönümleyicili sistem yanıtı (3 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)	Yük Hücresi (N)
0,5	3,1E-05	0,02	0,5	0,9
0,7	8,8E-05	0,04	1,8	2,1
0,8	2,2E-04	0,19	4,4	5,3
0,9 @ 7,1 s	5,1E-04	0,53	11,2	11,1
1,0	2,0E-04	0,19	3,4	6,4
1,1	2,7E-04	0,38	7,5	7,4
1,2	2,6E-04	0,42	7,7	0,9
1,3	1,5E-04	0,26	4,0	2,0
1,5	1,0E-04	0,21	2,6	1,5
2,0	7,6E-05	0,27	1,7	1,9



Şekil 4.5 : Durum 2 için sistem yanıtı (3 mm girdi genliği).

Verilen grafikler ve çizelgeler incelendiğinde Durum 2 ile ilgili şu yorumlar yapılabilir. Durum 1'dekine benzer şekilde rezonans frekansında çalkalanan sönümleyici sistemin yanıtını önemli bir oranda düşürmüştür. Ancak rezonansa komşu olan 0,9 Hz ile 1,1 Hz frekans değerlerinde sistem yanıtlarının Durum 2'de etkili sönümlenemediği görülmektedir. Durum 1'de sisteme çalkalanan titreşim sönümleyici eklenmesi ile rezonans ve etrafındaki frekanslarda daha etkili bir sönümlenme görülmekteydi. Durum 1'de 1,2 ve 0,8 Hz değerlerinde oluşan rezonans tepeleri Durum 2'de 1,1 ve 0,9 Hz'de oluşmaktadır. Bu farkın sebebi ise Durum 1'de çalkalanan titreşim sönümleyicinin yapının kütesine oranının Durum 2'den daha yüksek olmasıdır. Ayrıca Durum 2'de de önceki durumda olduğu gibi hareket frekansı yapının rezonans frekansından uzaklaştıkça çalkalanan titreşim sönümleyicinin etkinliğini kaybettiği görülebilir.

Durum 3:

Durum 3'te yapının rezonans frekansı 2 Hz'e ayarlanmıştır. Çalkalanan titreşim sönümleyicinin çalkalanma doğal frekansı önceki durumlardan farklı şekilde yapının doğal frekansından farklı bir değere 1 Hz'e ayarlanmıştır. Bu durumun sonuçları incelenerek bina modelinin doğal frekansı ile çalkalanan sönümleyicinin doğal frekansının aynı olmadığı durumlar hakkında fikir edinilecektir. Durum 3.a düşük hareket genliği için sonuçlar verirken, Durum 3.b yüksek hareket genliği için alınan sonuçları göstermektedir.

Durum 3.a:

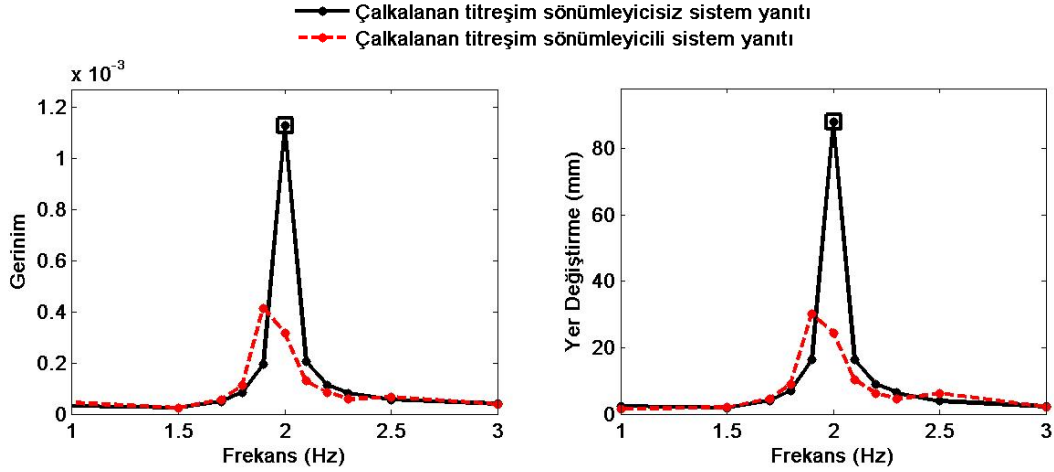
Durum 3 için düşük girdi genliğinde çalkalanan titreşim sönümleyicinin olmadığı sistem için sonuçlar Çizelge 4.10'da görülmektedir. Çizelge 4.11'de ise yine düşük girdi genliği için ancak bu sefer üzerinde sönümleyici olan sistem için alınan sonuçlar verilmiştir. Ayrıca verilen çizelgelere ek olarak Şekil 4.6'da sönümleyici olan ve olmayan sistemler için gerinim ve kat yer değiştirmesi değerlerinin frekansa bağlı grafikleri birlikte verilmiştir.

Çizelge 4.10 : Durum 3 için sönümleyicisiz sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)
1,0	3,1E-05	0,37	2,3
1,5	2,4E-05	0,22	1,8
1,7	5,0E-05	0,52	4,1
1,8	8,5E-05	0,94	7,0
1,9	2,0E-04	2,30	16,4
2,0 @ 10 s	1,1E-03	13,50	88,0
2,1	2,0E-04	2,82	16,3
2,2	1,1E-04	1,67	8,9
2,3	8,1E-05	1,36	6,4
2,5	5,6E-05	0,96	3,9
3,0	4,0E-05	0,85	2,3

Çizelge 4.11 : Durum 3 için sönümleyicili sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)	Yük Hücresi (N)
1,0	4,4E-05	0,13	1,5	4,3
1,5	2,5E-05	0,23	1,9	2,1
1,7	5,6E-05	0,57	4,6	3,0
1,8	1,1E-04	1,22	9,0	5,0
1,9	4,1E-04	4,68	30,1	15,7
2,0	3,2E-04	3,81	24,4	13,4
2,1	1,3E-04	1,75	10,4	6,6
2,2	8,4E-05	1,27	6,2	4,7
2,3	5,8E-05	0,77	4,5	3,3
2,5	6,7E-05	1,34	6,2	3,8
3,0	3,9E-05	0,78	2,2	3,6



Şekil 4.6 : Durum 3 için sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).

Durum 3.b:

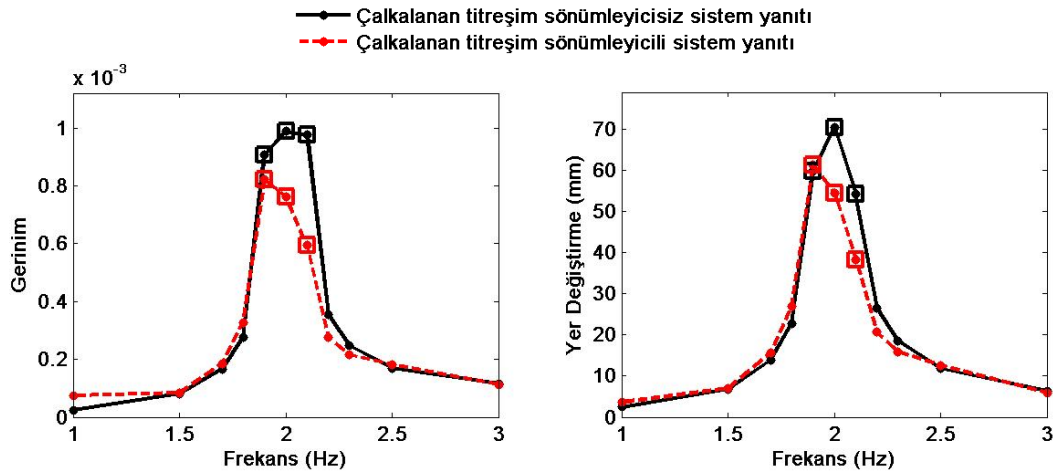
Çizelge 4.12’de yüksek hareket genliği olan 3 mm için sönümleyici olmayan durumun sonuçları, Çizelge 4.13’de ise aynı genlik için yapı ile sönümleyicinin birlikte olduğu durumun sonuçları verilmiştir. Şekil 4.7’de Durum 3 için 3 mm hareket girdisinde elde edilen gerinim ve kat yer değiştirmesinin frekansa bağlı grafiği çalkalanan titreşim sönümleyicinin olduğu ve olmadığı durumlar için verilmiştir.

Çizelge 4.12 : Durum 3 için sönümleyicisiz sistem yanıtı (3 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)
1,0	2,4E-05	0,34	2,5
1,5	8,2E-05	0,71	6,8
1,7	1,7E-04	1,68	13,8
1,8	2,8E-04	2,98	22,8
1,9 @ 3 s	9,1E-04	11,10	59,9
2,0 @ 2,5 s	9,9E-04	11,12	70,5
2,1 @ 2,9 s	9,8E-04	12,68	54,3
2,2	3,5E-04	5,10	26,5
2,3	2,5E-04	3,88	18,6
2,5	1,7E-04	2,90	11,8
3,0	1,2E-04	2,28	6,4

Çizelge 4.13 : Durum 3 için sönümleyicili sistem yanıtı (3 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)	Yük Hücresi (N)
1,0	7,5E-05	0,28	3,6	7,8
1,5	8,4E-05	0,71	7,0	3,7
1,7	1,9E-04	1,82	15,5	7,3
1,8	3,3E-04	3,59	26,9	12,9
1,9 @ 3 s	8,2E-04	9,35	61,3	35,1
2,0 @ 2,5 s	7,6E-04	8,57	54,5	32,3
2,1 @ 2 s	5,9E-04	6,63	38,3	24,9
2,2	2,8E-04	3,81	20,7	11,8
2,3	2,1E-04	3,17	15,9	10,2
2,5	1,8E-04	3,19	12,5	7,4
3,0	1,1E-04	2,08	5,8	5,9



Şekil 4.7 : Durum 3 için sistem yanıtı (3 mm girdi genliği).

Durum 3 için verilen çizelge ve grafikler incelendiğinde, sisteme eklenen çalkalanan titreşim sönümleyici, sistemin davranışını Durum 1 ve 2'den farklı etkilediği görülmektedir. Durum 1 ve 2'de sisteme çalkalanan titreşim sönümleyici eklendiğinde sistemin yanıtın verdiği tek tepeli cevap değişmekte ve bu tek tepenin frekans değerinin biraz altı ve üstü frekans değerlerinde yeni daha küçük iki tepe oluşmaktaydı. Ancak Durum 3'te bu sonuç görülmemektedir. Yani bu durumda sisteme eklenen çalkalanan titreşim sönümleyici ayarlanmış titreşim sönümleyici gibi çalışmamıştır. Durum 3'te çalkalanan titreşim sönümleyicinin eklenmesi, sisteme ek kütle eklenmesi ve sistemin sönüm oranının yükseltilmesi ile aynı etkiyi yaratmıştır. Yalnızca Durum 3'te düşük girdi genliği için ve sistemde çalkalanan titreşim sönümleyicinin olduğu durumda alınan sistem yanıtında yapının rezonans frekansında düşüş görülmektedir. Bu durumun sebebinde sönümleyicisiz sistem yanıtının geçici durumda alınabilmesi olduğu düşünülmektedir. Düşük ve yüksek hareket genlikleri ve sistemde sönümleyicinin olduğu durumlar için elde edilen sonuçlarda iki adet yeni rezonans tepesi oluşmamıştır.

Durum 4:

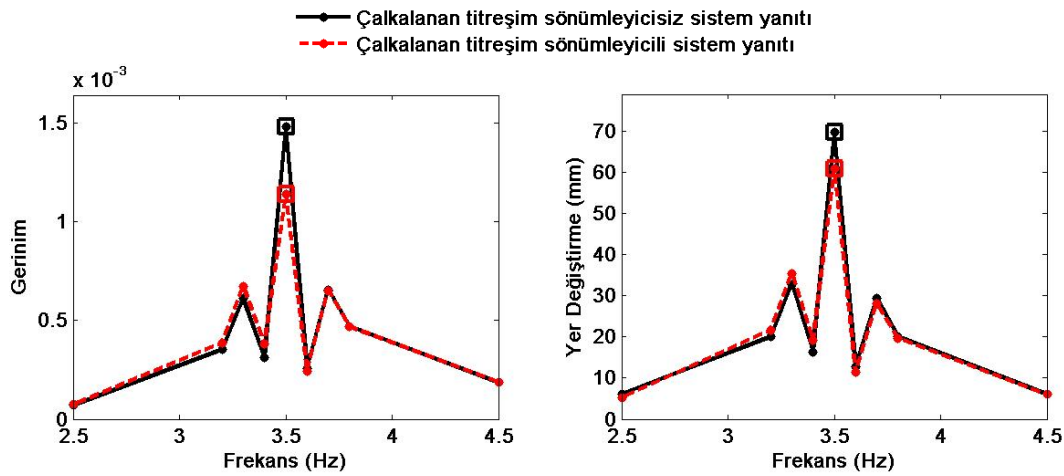
Durum 4'te ise Durum 3'tekine benzer bir durum vardır. Ancak Durum 4 için yapının doğal frekansı ile sıvının çalkalanma frekansı arasındaki fark Durum 3'e göre oldukça fazladır. Durum 4 için yapının doğal frekansı 3,5 Hz ve çalkalanan titreşim sönümleyicinin çalkalanma doğal frekansı ise 0,5 Hz'dir. Durum 4 sistemin yanıtının çok büyümesinden dolayı yüksek genlikte yapılamamıştır. Bu yüzden çizelge ve grafikler sadece 1 mm hareket girdi genliği için verilecektir. Çizelge 4.14'de Durum 4 için üzerinde sönümleyici olmayan sistemin yanıtı gösterilmiştir. Çizelge 4.15'de ise üzerinde sönümleyici olan sistem için alınan veriler gösterilmiştir. Şekil 4.8'te de gerinim ve kat yer değiştirme verileri sönümleyici olan ve olmayan durumlar için verilmiştir.

Çizelge 4.14 : Durum 4 için sönümleyicisiz sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)
2,5	7,1E-05	1,3	6,1
3,2	3,5E-04	7,8	20,0
3,3	6,1E-04	13,9	32,8
3,4	3,1E-04	7,2	16,4
3,5 @ 13,5 s	1,5E-03	35,0	69,8
3,6	2,6E-04	6,3	12,6
3,7	6,5E-04	15,7	29,3
3,8	4,7E-04	11,4	20,1
4,5	1,9E-04	4,4	6,1

Çizelge 4.15 : Durum 4 için sönümleyicili sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)	Yük Hücresi (N)
2,5	7,5E-05	1,2	5,2	4,1
3,2	3,9E-04	8,6	21,7	18,8
3,3	6,7E-04	15,1	35,5	30,4
3,4	3,8E-04	8,5	19,1	17,2
3,5 @ 9,5 s	1,1E-03	26,5	60,9	55,5
3,6	2,4E-04	5,7	11,4	13,4
3,7	6,5E-04	15,2	28,1	28,2
3,8	4,7E-04	11,0	19,6	22,8
4,5	1,9E-04	4,4	6,0	10,7
4,5	1,9E-04	4,4	5,2	10,7
4,5	1,9E-04	4,4	21,7	10,7



Şekil 4.8 : Durum 4 için sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).

Durum 4'te çalkalanan titreşim sönümleyicinin çalkalanma doğal frekansı ile yapının doğal frekansı arasındaki fark çok fazla olduğundan dolayı, çalkalanan titreşim sönümleyicinin sistem cevabının üzerinde etkisi çok azdır. Bu yüzden sistem cevabı çalkalanan sönümleyici olan durum ve olmayan durum için oldukça yakındır. Sadece eklenen sıvının kütlesi ve sönümünden kaynaklanan yanıtta önceki durumlara kıyasla çok düşük bir oranda genlik düşmesi vardır.

Çizelge 4.16 : Sinüs girdisi için yanıt düşüş oranları.

Durumlar	Gerinimdeki % Azalma		Yer Değiştirmek % Azalma	
	Rezonans	Genel	Rezonans	Genel
Durum 1.a	96,6	88,9	97,5	94,3
Durum 1.b	73,6	57,8	61,8	66,5
Durum 2.a	97,6	84,0	98,1	79,0
Durum 2.b	77,4	57,8	66,0	30,1
Durum 3.a	72,1	22,9	72,2	22,7
Durum 3.b	63,3	16,8	65,8	13,0
Durum 4	23,0	23,0	12,8	12,8

Bu başlık altında yapılan deneylerde elde edilen yanıtta düşüş oranları Çizelge 4.16'da verilmiştir. Çizelge 4.16'da verilen değerler sistemde çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan ve olan durumlardaki alınan yanıtlar kullanılarak hazırlanmıştır. Rezonans sütununda yapının rezonans frekansında elde edilen yanıtındaki düşme değerleri verilmiş olup, genel bölümünde ise tüm frekans değerleri için elde edilen maksimum yanıtlar kullanılarak bulunmuş değerler verilmiştir. Çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan durumlarda özellikle yüksek hareket genliklerinde rezonans frekansında sistemin durağan yanıtının alınamayıp sistemin geçici yanıtının kullanıldığı unutulmamalıdır.

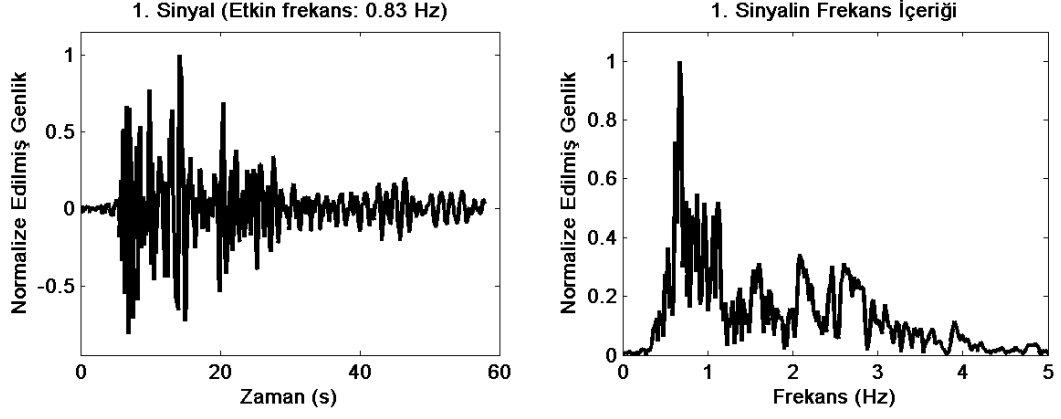
Bu durumlar için elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak bir takım çıkarımlar yapılabilir. Öncelikle Durum 1 ve Durum 2 incelenirse, çalkalanma doğal frekansı ile yapının doğal frekansının yakın olduğu durumlarda bu yöntem ile etkili sönümleme yapılabildiği görülmektedir. Ancak bu durumlarda sönümleme daha çok rezonans frekansı ve etrafındaki değerlerde olmaktadır. Rezonans frekansı etrafındaki etkili sönümleme yapılan frekans aralığının genişliği, çalkalanan sönümleyicinin kütlesinin yapının kütlesine oranı ile ilgilidir. Ayrıca sıvı kütlesinin binanın kütlesine oranı arttığında sistemin sönümleme performansı da artar. Ancak bu performans artışı kütle

oranı artışı ile doğrusal orantılı değildir. 1 Hz civarı düşük doğal frekans değerlerinde ve çalkalanan titreşim sönümleyicinin olduğu durumda, eski rezonans frekansı değerinin biraz altında ve üstünde yeni iki daha küçük genlikli rezonans tepesi oluşur. Bu frekans değerlerinde sistem yanıtı yaklaşık olarak aynı kalmaktadır.

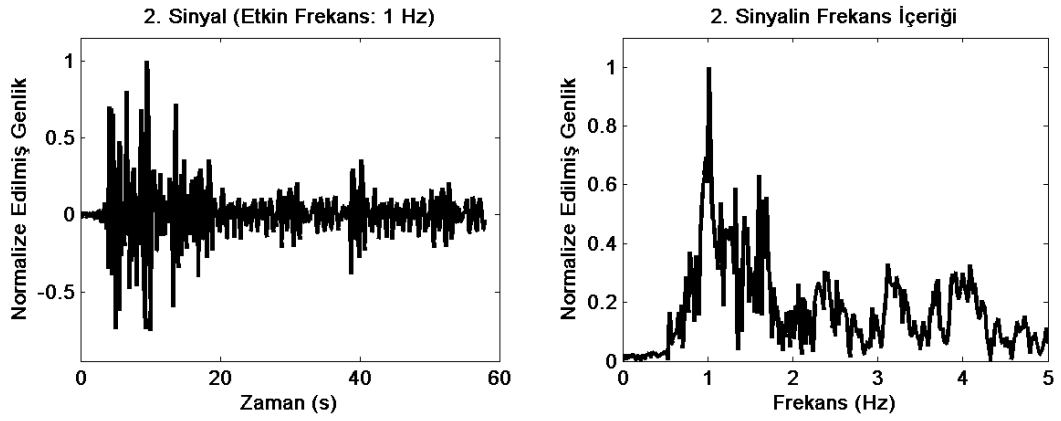
Sıvının çalkalanma doğal frekansı ile yapının doğal frekansı arasındaki fark arttıkça etkili sönümleme yapılamamaya başlar. Ancak yine de sistem yanıtı çalkalanan sönümleyicinin olmadığı durumdan kötü hale gelmemektedir. Durum 3'te ve Durum 4'te bu durum görülür. Yapı ile sıvının doğal frekansı arasındaki fark çok olduğunda, sistem cevabı sisteme ek kütle ve sönüm malzemesi eklenmiş sistem yanıtına benzetilmektedir.

4.2 Deprem Girdisi için Çalkalanan Titreşim Sönümleyicinin Performansının İncelenmesi

Bu bölümde dört farklı bina modeli için sisteme iki farklı deprem girdisi verilerek sistemin yanıtları incelenmiştir. Kullanılan deprem girdi sinyalleri, 2014 yılında Ferndale, California'da yerin 16,6 km altında gerçekleşen deprem için kaydedilen veriler kullanılarak üretilmiştir. İki deprem sinyali de 58 s uzunluğundadır. Ayrıca bu iki sinyalde 10 Hz örnekleme frekansı ile örneklenerek, hareketli tabla için konum girdisi olarak sisteme verilmiştir. Deprem girdisi olarak kullanılan ilk sinyalin etkin frekansı 0,83 Hz'dir. Bu değer Ferndale Depremi için kaydedilen veri ile aynıdır, değiştirilmemiştir. İkinci sinyalin etkin frekansı ise 1 Hz'dir. İkinci sinyal gerçek deprem verisi hızlandırılarak üretilmiştir. Bu iki sinyal sisteme girdi olarak verilmeden önce maksimum genlikleri 1 birim olacak şekilde normalize edilmiştir. Daha sonra bu sinyaller sisteme girdi olarak verilirken düşük deprem girdi genliği için 6 mm, büyük girdi genliği için 12 mm ile çarpılarak maksimum deprem girdi genlikleri istenilen büyüklüklere getirilmiştir. Yani düşük girdi genliği için maksimum hareket genliği 6 mm, yüksek girdi genliği için maksimum hareket genliği 12 mm'dir. Normalize edilmiş 1. deprem sinyali ve frekans içeriği Şekil 4.9'da, normalize edilmiş 2. deprem sinyali ve frekans içeriği Şekil 4.10'da görülebilir.



Şekil 4.9 : Normalize edilmiş 1. deprem sinyali ve frekans içeriği.



Şekil 4.10 : Normalize edilmiş 2. deprem sinyali ve frekans içeriği.

Deneyler sırasında sıvı tankının içerisinde çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan durum ve sıvı tankı içerisinde 40 mm, 65 mm ve 110 mm yüksekliğinde çalkalanan titreşim sönümleyici olan durumlar için ölçümler yapılmıştır. İlgili su yükseklikleri için suyun çalkalanma doğal frekansları sırasıyla; 40 mm için 0,83 Hz, 65 mm için 1 Hz ve 110 mm için 1,2 Hz'dir. Deney yapılan durumların özellikleri Çizelge 4.17'de verilmiştir.

Çizelge 4.17 : Deprem girdisi için deney yapılan durumlar.

Durum	Bina Modelinin Doğal Frekansı (Hz)	Çalkalanan Sönümleyicinin Çalkalanma Doğal Frekansı (Hz)	Su Yüksekliği (mm)	Titreşim Sönümleyici Sıvı/Yapı Kütle Oranı (%) (65 mm su için)
1	1	1	65	14
2	1	1	65	7,5
3	2	1	65	22
4	3,5	0,5	15	5

Deneyleerde farklı bina modelleri, sıvı yükseklikleri ve deprem girdileri için gerinim ve ivme verisi toplanmıştır. Ölçülen bu ivme verisinin 2. integrali hesaplanarak kat yer değiştirmesi bilgisi de elde edilmiştir. Elde edilen gerinim, ivme ve kat yer değiştirmesi bilgilerinin RMS ve maksimum değerleri verilmiştir. Verilen bu değerler 80 s boyunca kaydedilen verilerden elde edilmiştir. Kullanılan deprem sinyalleri ise 58 s uzunluğundadır. Yani 80 s uzunluğunda sistem yanıtının 58 s uzunluğundaki ilk kısmında deprem anındaki sistem yanıtı, kalan 22 s uzunluğundaki kısmında ise deprem sonrası serbest hareketine devam eden yapının yanıtı kaydedilmiştir. Deneyleer yapılırken çalkalanan titreşim sönümleyicinin olmadığı bazı durumlarda, sistem yanıtı çok büyüdüğü için deney durdurulmak durumunda kalınmıştır. Bu tip durumlar için girdi sinyali kesilene kadar toplanan veriler kullanılarak maksimum ve RMS değerleri hesaplanmıştır. Bu durumlar çizelgelerde maksimum girdi genliği sütununda '@' işareti ve kaç saniye ölçüm yapıldığı bilgisi ile birlikte gösterilmiştir. Grafiklerde ise deprem girdi sinyali tamamlanmadan alınan ölçümler kırmızı renkli '#' işareti konularak gösterilmiştir.

Durum 1:

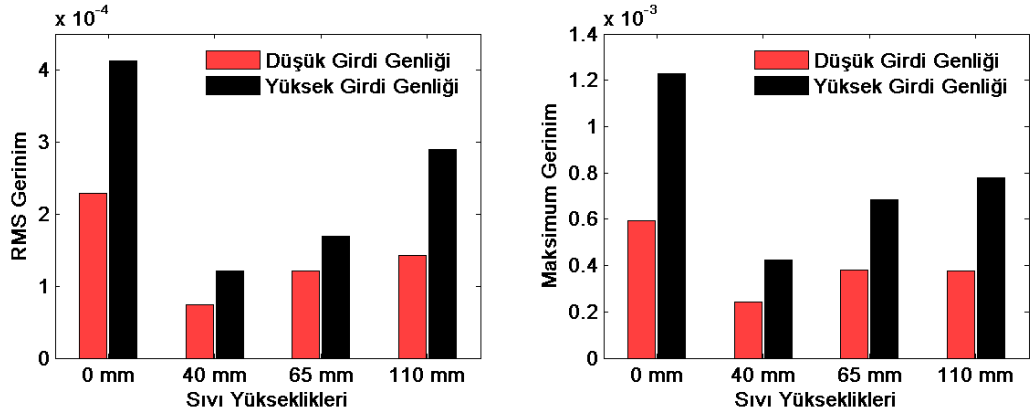
Durum 1'de yapının doğal frekansı 1 Hz'e ayarlanmıştır. Durum 1.a'da deprem girdi sinyali olarak 1. sinyal, Durum 1.b'de ise 2. sinyal kullanılmıştır.

Durum 1.a:

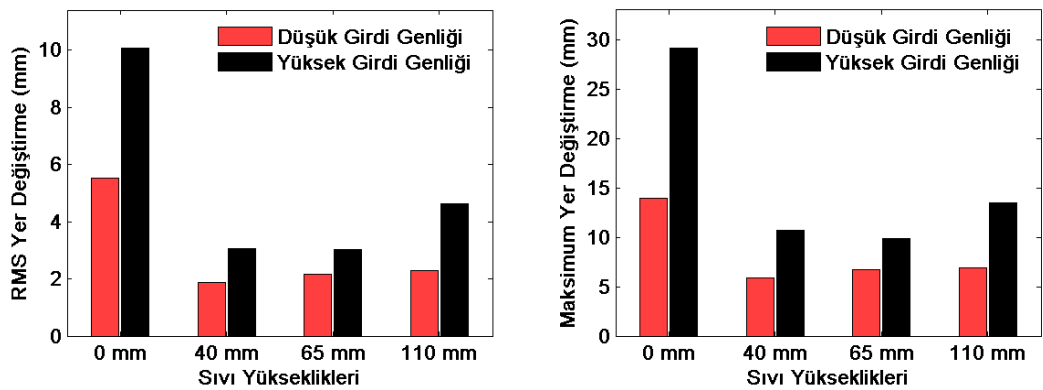
Çizelge 4.18'de, 1. sinyalin deprem girdisi olarak kullanıldığı durum için farklı sıvı yükseklikleri ve maksimum girdi genliklerinde elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Şekil 4.11'de gerinim verisinin ve Şekil 4.12'de ise kat yer değiştirmesi verisinin; RMS ve maksimum değerlerinin farklı çalkalanan sıvı yüksekliği ve maksimum girdi genliği değerleri için değişimi görülmektedir.

Çizelge 4.18 : Durum 1 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali).

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Genliği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s ²)	Maksimum İvme (m/s ²)	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	6	2,30E-04	5,90E-04	0,21	0,6	5,53	13,99
0	12	4,10E-04	1,20E-03	0,4	1,14	10,06	29,16
40	6	7,40E-05	2,40E-04	0,08	0,31	1,88	5,86
40	12	1,20E-04	4,20E-04	0,14	0,57	3,04	10,74
65	6	1,20E-04	3,80E-04	0,08	0,37	2,16	6,76
65	12	1,70E-04	6,80E-04	0,13	0,94	3,04	9,85
110	6	1,40E-04	3,80E-04	0,07	0,27	2,29	6,93
110	12	2,90E-04	7,80E-04	0,14	0,61	4,61	13,5



Şekil 4.11 : Durum 1 için gerinimin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).



Şekil 4.12 : Durum 1 için yer değiştirmenin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).

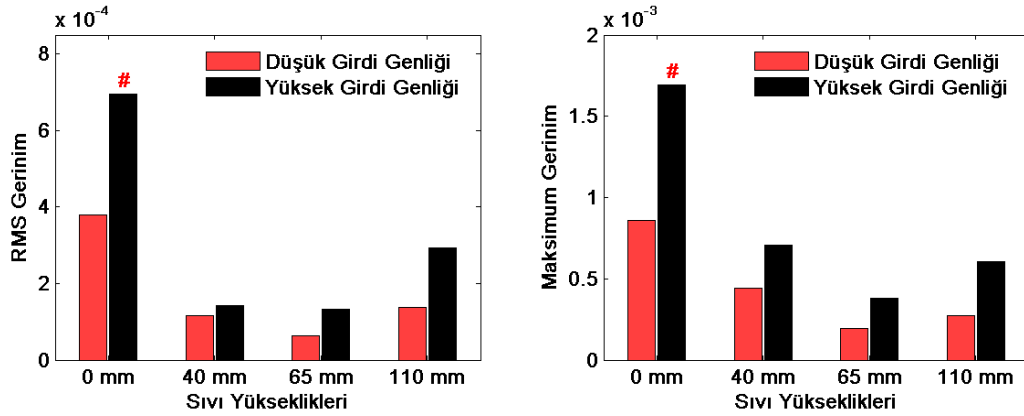
Durum 1.b:

Durum 1.b.'de ise Durum 1.a.'dan farklı olarak verilen grafikler ve çizelgedeki değerler 2. deprem sinyali, kullanılarak elde edilmiştir. Durum 1.b'de sistemde

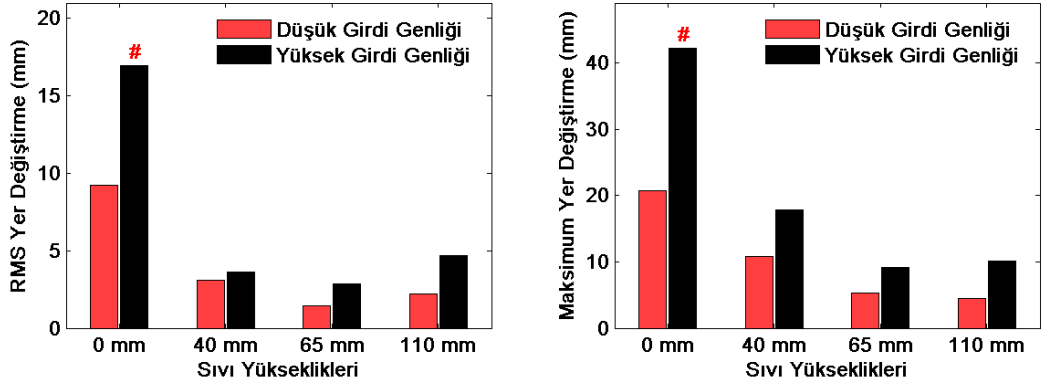
çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan durumda, 12 mm maksimum girdi genliği için yapılan ölçümlerde sistem yanıtı çok büyüdüğü için deney 16,2. s’de kesilmek durumunda kalmıştır. Bu sebep dolayısıyla Çizelge 4.19’da 12 mm hareket genliği ve sistemde çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan durum için verilen veriler deprem sinyalinin ilk 16,2 s’lik kısmı içindir. Bu durum verilen Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’teki gerinim ve kat yer değiştirmesi grafiklerinde de gösterilmiştir.

Çizelge 4.19 : Durum 1 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali).

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Genliği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s ²)	Maksimum İvme (m/s ²)	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	6	3,80E-04	8,60E-04	0,36	0,86	9,22	20,76
0	12 @ 16,2 s	7,00E-04	1,70E-03	0,7	1,97	16,97	42,21
40	6	1,20E-04	4,40E-04	0,13	0,58	3,08	10,84
40	12	1,40E-04	7,10E-04	0,17	0,95	3,61	17,87
65	6	6,40E-05	1,90E-04	0,07	0,35	1,43	5,25
65	12	1,30E-04	3,80E-04	0,14	0,57	2,84	9,18
110	6	1,40E-04	2,80E-04	0,07	0,23	2,21	4,54
110	12	2,90E-04	6,00E-04	0,14	0,47	4,69	10,15



Şekil 4.13 : Durum 1 için gerinimin RMS ve maksimum değerleri (2. sinyal).



Şekil 4.14 : Durum 1 için yer değiştirmenin RMS ve maksimum değerleri (2. sinyal).

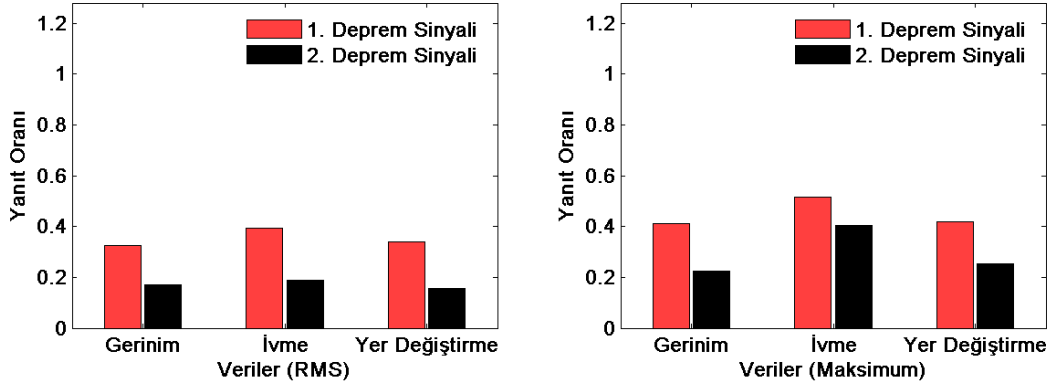
Durum 1 için verilen grafik ve çizelgeler incelenerek bir takım çıkarımlar yapılabilir. Öncelikle yüksek ve düşük maksimum girdi genliği için değerler incelenirse, 12 mm maksimum girdi genliğinde alınan yanıtların kabaca 6 mm maksimum girdi genliğinde alınan yanıtların 2 katından biraz az olduğu görülmektedir. Bu durumdan yola çıkarak sistemin girdi genliğinin artırılmasının sistem yanıtını arttırdığı söylenebilir. Ancak yanıtta bu artış oranı, girdi genliğinin artış oranının biraz altında kalmaktadır.

Durum 1.a için kullanılan sinyalin etkin frekansı 0,83 Hz ve yapının doğal frekansı ise 1 Hz'dir. Bu durumda çalkalanan titreşim sönümleyicinin çalkalanma doğal frekansının hareket frekansına en yakın olduğu sıvı yüksekliğinde, sistem yanıtının en düşük olması ve çalkalanan titreşim sönümleyicinin sönüm performansının maksimum olması beklenir. Bahsedilen bu sonuç da 40 mm sıvı yüksekliğinde (0,83 Hz çalkalanma doğal frekansında) alınan veriler incelendiğinde görülür. Yani 40 mm su yüksekliğinde her iki genlik için de ivme, yer değiştirme ve gerinim verilerinin maksimum ve RMS değerlerinin minimum olduğu söylenebilir. 65 mm yüksekliğindeki suyun çalkalanma doğal frekansı ise 1 Hz'dir. Bu yükseklikteki sıvı, 40 mm sıvı yüksekliğinden sonra hareket frekansına en yakın sıvı çalkalanma doğal frekansına sahiptir ve bu durumda sistem yanıtının 40 mm sıvı yüksekliğinden sonra en düşük bu su yüksekliğinde olması gerekir. Durum1.a için verilen çizelge incelendiğinde, sonuçların bu düşünceyle uyum içinde olduğu görülür. Sistem hareket frekansı ile sıvının çalkalanma doğal frekansı arasındaki fark arttıkça çalkalanan sönümleyicinin sönümleme performansı düşer. Ancak yine de deneyde kullanılan üç su yüksekliği için de sistem yanıtı, sistemde çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan durumdan daha iyidir. Bu sonuçtan yola çıkarak Durum 1.a kullanılan bütün su yükseklikleri için çalkalanan titreşim sönümleyicinin sistem yanıtını sönümlediği

söylenbilir. Sıvının çalkalanma doğal frekansı ile sistemin hareket frekansının yakın olması sönümleyicinin performansını arttırmaktadır.

Durum 1.b'de Durum 1.a'dan farklı olarak etkin hareket frekansı 1 Hz olan deprem sinyali girdi olarak kullanılmıştır. Bu durumda da çalkalanan titreşim sönümleyici sistem yanıtını en çok, sıvı çalkalanma frekansı ile hareket frekansının en yakın olduğu sıvı yüksekliğinde yani 65 mm sıvı yüksekliğinde düşürmüştür. 65 mm sıvının çalkalanma doğal frekansı 1 Hz'dir. Durum 1.b'de de, sıvının çalkalanma frekansı ile sistemin hareket frekansı arasındaki fark arttıkça, çalkalanan titreşim sönümleyicinin sönüm performansı düşmüştür ve en kötü durum yani en büyük yanıt yine çalkalanan titreşim sönümleyicinin sistemde olmadığı durumda görülmüştür. Yapı doğal frekansı olan ve deprem sinyalinin en güçlü olduğu 1 Hz'e yakın çalkalanma doğal frekansına sahip su yükseklikleri olan 40 ve 110 mm için alınan sonuçlarda da sistem yanıtının 65 mm su yüksekliğindeki kadar olmasada yine önemli bir ölçüde sönümlendiği görülmüştür.

Durum 1.b'de Durum1.a'dan farklı olarak yapının doğal frekansı ile sıvının çalkalanma frekansı ve sistemin hareket girdisinin etkin frekansı aynıdır. Bunun iki sonucu vardır. İlk sonuç yapının doğal frekansı ve sistemin etkin hareket frekansı aynı olduğundan çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan durumda sistemin yanıtı Durum 1.a'ya göre artmıştır. Verilen çizelgelere bakılarak bu durum görülebilir. Hatta sistem yanıtının artmasından dolayı Durum 1.b'de çalkalanan titreşim sönümleyicinin olmadığı ve yüksek maksimum girdi genliğinin sisteme verildiği durum için sistem yanıtı çok büyüdüğünden dolayı deney 16,2. s'de durdurulmak zorunda kalmıştır. Sistemin doğal frekansının suyun çalkalanma ve girdinin etkin frekansına eşitlenmesinin bir diğer sonucu ise bu frekansta çalkalanan titreşim sönümleyicinin performansının artmasıdır. Bu durum ile Şekil 4.15'te verilen grafiklerde görülebilir.



Şekil 4.15 : Durum 1 için yanıt oranı (düşük girdi genliği).

Yanıt oranı grafikleri verilerin RMS ve maksimum değerleri için ayrı ayrı çizdirilmiştir. Bu grafiklerdeki yanıt oranı değerleri, 1. deprem sinyalinin girdi olarak kullanıldığı Durum 1.a, Durum 2.a, Durum 3.a ve Durum 4.a'da 40 mm sıvı yüksekliğinde alınan sistem yanıtı, sistemde çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan durumdaki sistem yanıtına bölünerek hesaplanmıştır. 2. Deprem sinyalinin girdi olarak kullanıldığı Durum 1.b, Durum 2.b, Durum 3.b ve Durum 4.b'de ise 65 mm sıvı yüksekliğinde alınan sistem yanıtı, çalkalanan titreşim sönümleyicinin sistemde bulunmadığı durumda alınan yanıtı bölünerek sönüm oranları hesaplanmıştır. Şekil 4.15, Şekil 4.20, Şekil 4.25 ve Şekil 4.30'da verilen yanıt oranı grafikleri bu yöntem ile oluşturulmuştur. Ayrıca yanıt oranı grafikleri sadece düşük girdi genliği için hesaplanmıştır.

Şekil 4.15'te verilen yanıtların düşme oranları incelenirse, 2. deprem sinyalinin girdi olarak kullanıldığı Durum 1.b'de çalkalanan titreşim sönümleyicinin, 1. deprem sinyalinin girdi olarak kullanıldığı Durum 1.a'ya göre daha başarılı sönümlenme yaptığı görülür. Bunun sebebi ise Durum 1.a'da yapı doğal frekansı (1 Hz) ile deprem sinyalinin güçlü olduğu frekans değerleri (1 Hz) birbirinden uzak iken Durum 1.b'de ise bu değerler (ikiside 1 Hz) birbiri ile örtüşmesidir.

Durum 2:

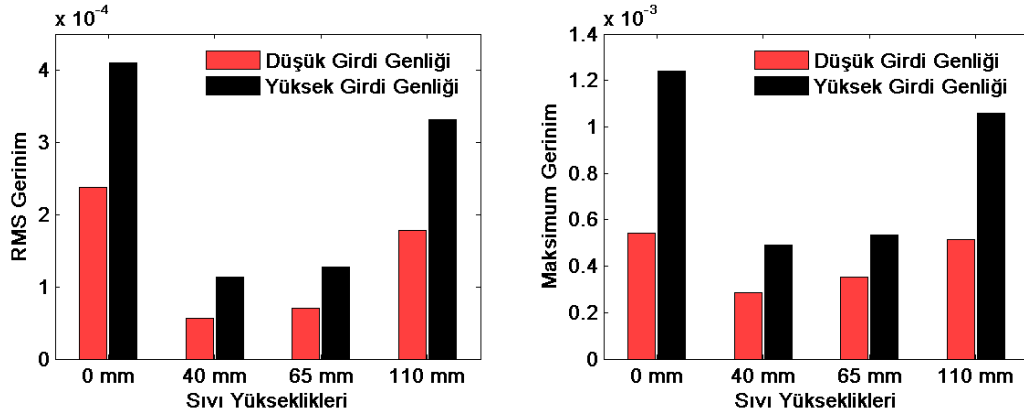
Durum 2 içinde yapının doğal frekansı Durum 1'deki gibi 1 Hz'e ayarlanmıştır. Durum 2'de çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütlesinin bina modelinin kütlesine oranı Durum 1'den farklı olarak 65 mm su yüksekliği için %7,5'tir. Durum 1'de bu oran %14 idi. Durum 2.a'da deprem girdi sinyali olarak 1. sinyal, Durum 2.b'de ise 2. sinyal kullanılmıştır.

Durum 2.a:

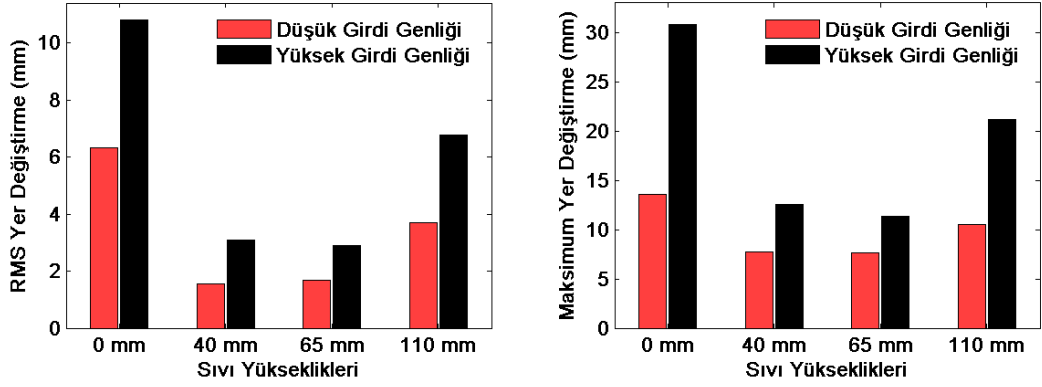
Çizelge 4.20’de Durum 2 için, 1. sinyal deprem girdisi olarak kullanılarak, farklı su yükseklikleri ve maksimum girdi genliklerin için elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de ise gerinim ve kat yer değiştirmesi verilerinin RMS ve maksimum değerlerinin farklı çalkalanan sıvı yüksekliği ve maksimum girdi genliği değerleri için değişimi Durum 2 ve 1. Deprem girdi sinyali için görülmektedir.

Çizelge 4.20 : Durum 2 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali).

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Genliği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s ²)	Maksimum İvme (m/s ²)	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	6	2,40E-04	5,40E-04	0,24	0,55	6,34	13,62
0	12	4,10E-04	1,20E-03	0,42	1,24	10,8	30,79
40	6	5,60E-05	2,90E-04	0,07	0,31	1,56	7,77
40	12	1,10E-04	4,90E-04	0,14	0,71	3,09	12,52
65	6	7,10E-05	3,50E-04	0,07	0,37	1,67	7,65
65	12	1,30E-04	5,30E-04	0,12	0,63	2,89	11,36
110	6	1,80E-04	5,20E-04	0,11	0,38	3,7	10,5
110	12	3,30E-04	1,10E-03	0,21	0,77	6,77	21,15



Şekil 4.16 : Durum 2 için gerinimin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).



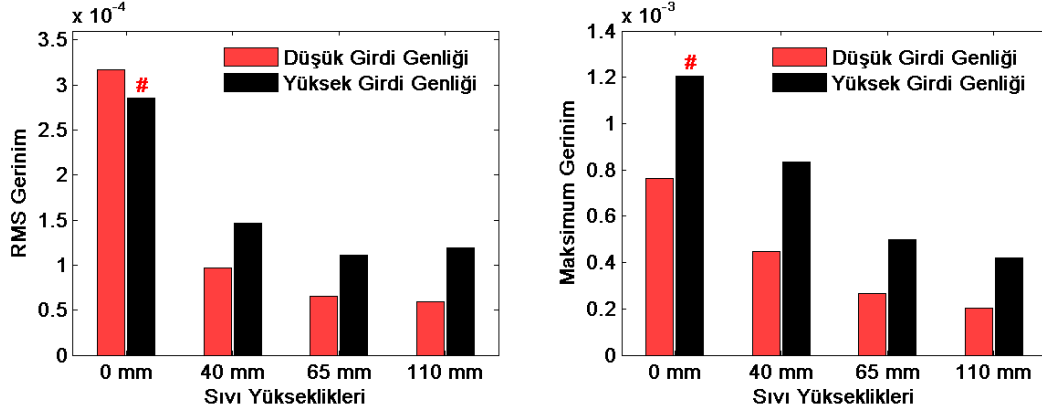
Şekil 4.17 : Durum 2 için yer değiştirmenin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).

Durum 2.b:

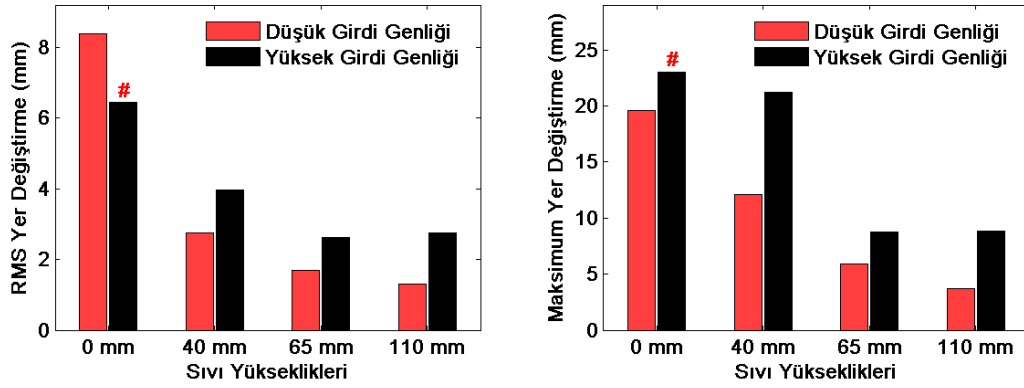
Durum 2.b.'de ise deprem girdisi olarak 2. sinyal kullanılmıştır. Durum 2.b'de sistemde sıvı tankında çalkalanan titreşim sönümleyici yok iken, 12 mm maksimum girdi genliği için yapılan ölçümlerde sistem yanıtı çok büyüdüğü için deney 10,2 s'de kesilmek durumunda kalmıştır. Bu sebeple Çizelge 4.21 ve Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'deki değerler ilgili durum için ilk 10,2 s'de alınan veri dikkate alınarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.21 : Durum 2 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali).

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Genliği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s ²)	Maksimum İvme (m/s ²)	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	6	3,20E-04	7,60E-04	0,32	0,82	8,39	19,56
0	12 @ 10,2 s	2,90E-04	1,20E-03	0,32	1,22	6,45	23
40	6	9,70E-05	4,50E-04	0,12	0,55	2,76	12,07
40	12	1,50E-04	8,30E-04	0,18	1,05	3,97	21,18
65	6	6,60E-05	2,60E-04	0,08	0,35	1,7	5,94
65	12	1,10E-04	5,00E-04	0,12	0,67	2,63	8,8
110	6	6,00E-05	2,00E-04	0,06	0,27	1,31	3,71
110	12	1,20E-04	4,20E-04	0,13	0,54	2,74	8,87

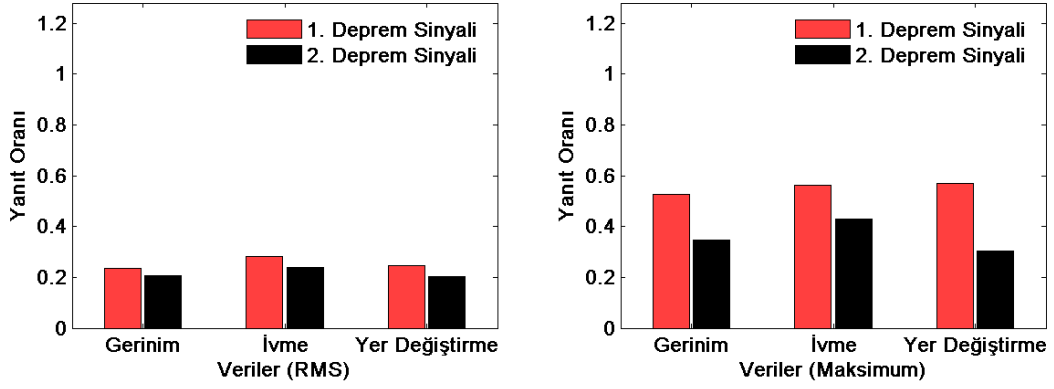


Şekil 4.18 : Durum 2 için gerininin RMS ve maksimum değerleri (2. sinyal).



Şekil 4.19 : Durum 2 için yer değiştirmenin RMS ve maksimum değerleri (2. sinyal).

Durum 2 için verilen grafik ve çizelgeler incelendiğinde, Durum 2'de çalkalanan titreşim sönümleyicinin sistem üzerinde Durum 1'dekine benzer bir etkisi olduğu söylenebilir. Şekil 4.20'de verilen grafikler incelenirse, çalkalanan titreşim sönümleyicinin sistem yanıtını gerinim, ivme ve yer değiştirme verilerinin RMS ve maksimum değerleri için benzer oranlarda düşürdüğü görülür. Sistem yanıtının düşme oranı 1. ve 2. deprem sinyallerine göre incelenirse, 2. Deprem sinyali için uygun su yüksekliğinde yanıtın daha iyi sönümlendiği görülür. Ayrıca RMS ve maksimum veriler için verilen grafikler karşılaştırılırsa, titreşim sönümleyicinin sistemin RMS yanıtını düşürmekte, sistemin maksimum yanıtı düşürmekten daha başarılı olduğu görülür.



Şekil 4.20 : Durum 2 için yanıt oranı (düşük girdi genliği).

Durum 2'nin Durum 1'den farkı sadece kütle oranıdır. Bu kütle oranını değerlerinin değişiminin sistem üzerindeki etkisini incelemek için, Durum 1 ve Durum 2 için verilen yanıt oranı grafikleri incelenebilir. Durum 1 ve Durum 2 için verilen yanıt oranı grafikleri incelenerek çalkalanan titreşim sönümleyicinin bu iki durumdan herhangi biri için, diğerine göre sistem yanıtını daha iyi sönümlediği söylenemez. Bu sebeple, çalkalanan titreşim sönümleyici kütle oranının bina kütle oranının değişiminin, çalkalanan titreşim sönümleyicinin performansı üzerindeki etkisi deprem girdisi altında net olarak gözlemlenememiştir. Bu durum Bölüm 5.4'te daha ayrıntılı işlenecektir.

Durum 3:

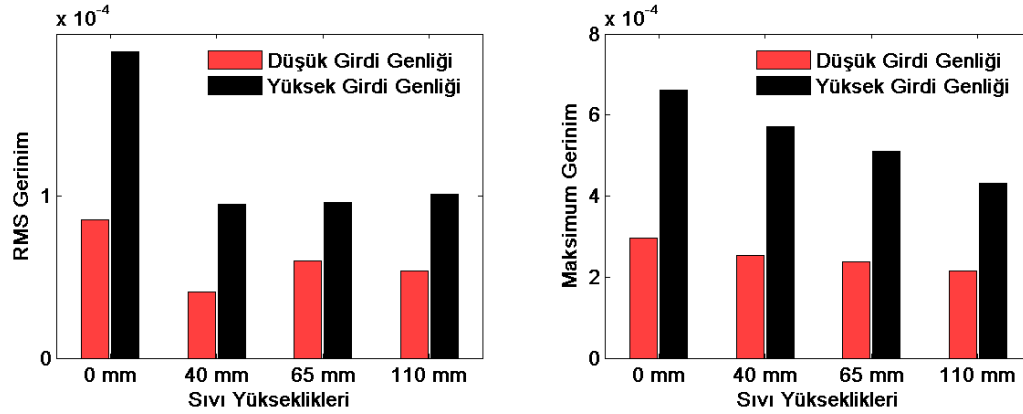
Durum 3'de Durum 1 ve Durum 2'den farklı olarak yapının doğal frekansı 2 Hz'e ayarlanmıştır. Durum 3'te, depremin etkin olduğu frekans ile yapının doğal frekansının farklı olduğu durum incelenecektir. Durum 3.a'da deprem girdi sinyali olarak 1. sinyal, Durum 3.b'de ise 2. sinyal kullanılmıştır.

Durum 3.a:

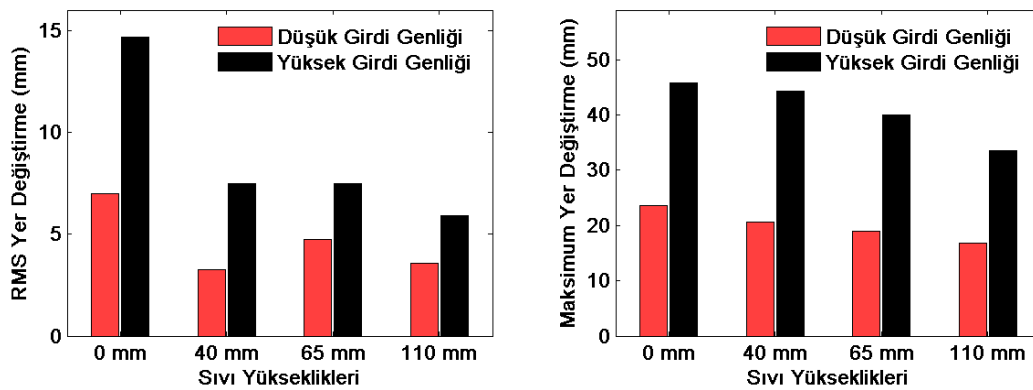
Durum 3 için deprem girdisi olarak 1. sinyal kullanılan durumda elde edilen gerinim, ivme ve kat yer değiştirmesi değişkenlerinin RMS ve maksimum değerleri Çizelge 4.22'de görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.21'de gerinim verisinin ve Şekil 4.22'de ise kat yer değiştirmesi verisinin, RMS ve maksimum değerlerinin farklı sıvı yükseklikleri ve maksimum titreşim genlikleri için değişimi görülmektedir.

Çizelge 4.22 : Durum 3 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali).

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Genliği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s ²)	Maksimum İvme (m/s ²)	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	6	8,50E-05	3,00E-04	1,1	4,04	7,01	23,65
0	12	1,90E-04	6,60E-04	2,29	5,3	14,66	45,86
40	6	4,10E-05	2,50E-04	0,51	3,68	3,28	20,59
40	12	9,50E-05	5,70E-04	1,16	5,25	7,46	44,36
65	6	6,00E-05	2,40E-04	0,72	3,37	4,74	18,93
65	12	9,60E-05	5,10E-04	1,15	5,25	7,5	39,99
110	6	5,40E-05	2,10E-04	0,53	2,98	3,59	16,82
110	12	1,00E-04	4,30E-04	0,85	5,22	5,92	33,6



Şekil 4.21 : Durum 3 için gerinimin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).



Şekil 4.22 : Durum 3 için yer değiştirmenin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).

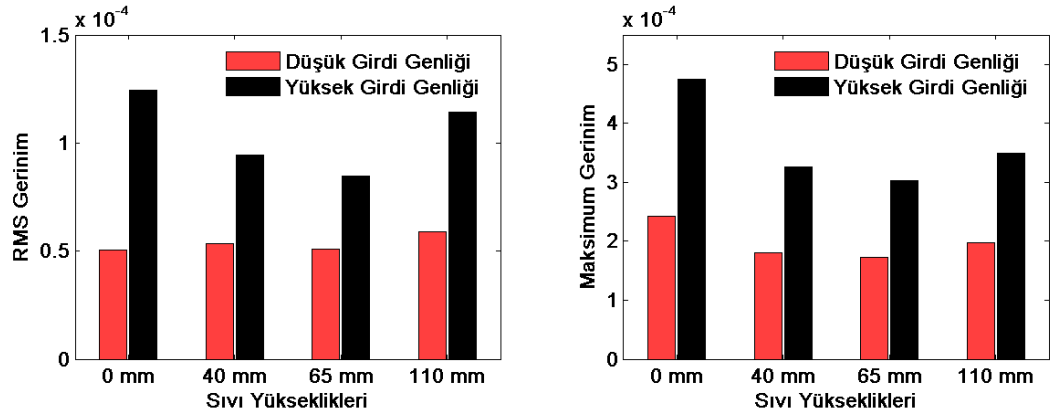
Durum 3.b:

Çizelge 4.23'te 2. deprem sinyali kullanılarak elde edilen gerinim, ivme ve kat yer değiştirmesi ile ilgili değerler verilmiştir. Şekil 4.23'te de gerinim verisinin RMS ve

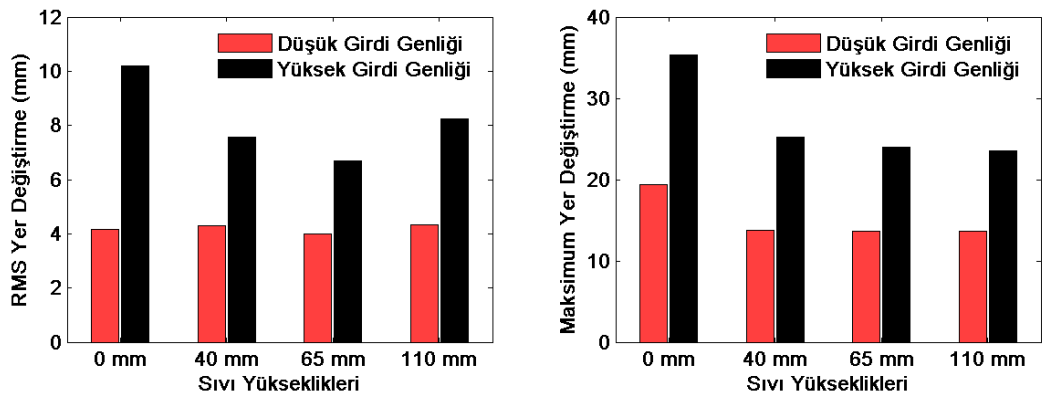
maksimum değerinin farklı maksimum girdi genliği ve sıvı yüksekliği ile değişimi görülmektedir. Şekil 4.24'te ise yer değiştirme verisinden elde edilen grafikler verilmiştir.

Çizelge 4.23 : Durum 3 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali).

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Genliği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s ²)	Maksimum İvme (m/s ²)	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	6	5,00E-05	2,40E-04	0,65	3,13	4,16	19,43
0	12	1,20E-04	4,70E-04	1,59	5,22	10,2	35,37
40	6	5,40E-05	1,80E-04	0,64	2,56	4,29	13,81
40	12	9,40E-05	3,30E-04	1,12	5,11	7,57	25,21
65	6	5,10E-05	1,70E-04	0,59	2,32	3,99	13,66
65	12	8,50E-05	3,00E-04	1	4,92	6,68	23,96
110	6	5,90E-05	2,00E-04	0,63	1,94	4,34	13,62
110	12	1,10E-04	3,50E-04	1,19	4,11	8,24	23,5

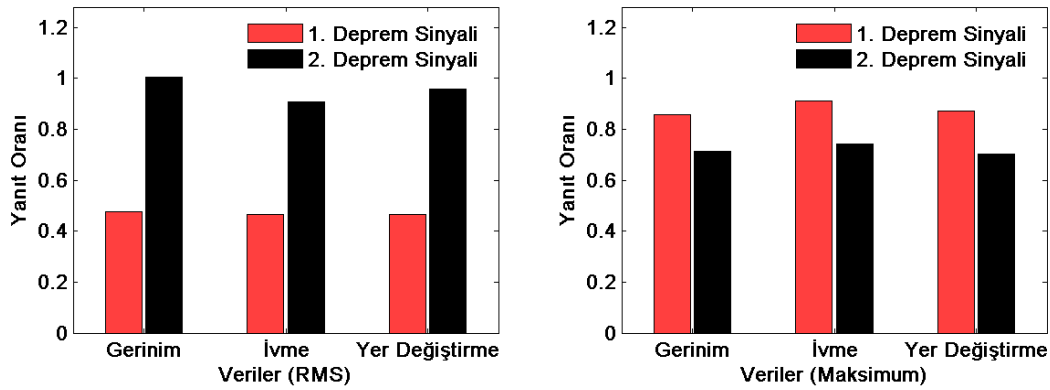


Şekil 4.23 : Durum 3 için gerinimin RMS ve maksimum değerleri (2. sinyal).



Şekil 4.24 : Durum 3 için yer değiştirmenin RMS ve maksimum değerleri (2. sinyal).

Durum 3 için verilen çizelge ve grafikler incelendiğinde, çalkalanan titreşim sönümleyicinin sistem yanıtını önceki durumlardaki kadar başarılı sönümleyemediği görülür. Şekil 4.25'te görünen yanıt oralarına bakılırsa, çalkalanan titreşim sönümleyicinin özellikle 2. deprem girdisi için sistem yanıtının RMS değeri üzerinde neredeyse hiç etkisi olmadığı söylenebilir. 1. Deprem girdisi için alınan verilerin RMS değerlerinden hesaplanan yanıt oranlarına göre ise Durum 1 ve Durum 2'deki kadar etkili olmasada yanıt %50 civarında sönümlenmiştir. Maksimum değerlerden hesaplanan yanıt oranlarına göre ise yanıtlarda çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan durumlara göre az bir oranda düşme vardır. Ancak bu düşme oranları çalkalanan titreşim sönümleyicinin başarılı çalıştığını söyleyebilmek için çok azdır. Bu durumda çalkalanan titreşim sönümleyicinin sadece sistemin sönüm oranının arttırmasıyla benzer bir etki yaptığı gözlenmektedir. Durum 3, Durum 1 ve Durum 2 ile kıyaslanırsa çalkalanan titreşim sönümleyicilerin sönümleme performanslarının iyi olmasında yapı doğal frekansı ile sınının çalkalanma doğal frekansının birbirine yakın olmasının ne kadar önemli olduğu görülür. Ayrıca çalkalanan titreşim sönümleyici Durum 3'te maksimum yanıtın sönümlenmesi 2. Deprem sinyali için 1. Deprem sinyaline göre daha başarılı yapılabilmektedir.



Şekil 4.25 : Durum 3 için yanıt oranı (düşük girdi genliği).

Durum 4:

Durum 4'de yapının doğal frekansı daha da arttırılarak 3,5 Hz'e ayarlanmıştır. Durum 3'te yapının doğal frekansı ile deprem girdisinin etkin frekansının farklı olduğu durum incelenmişti. Durum 4'de ise deprem girdisinin etkin frekansı ile yapının doğal frekansı arasındaki farkın daha da artması sağlanarak yapının doğal frekansı ile deprem girdisinin etkin frekansının birbirinden çok farklı olduğu durum

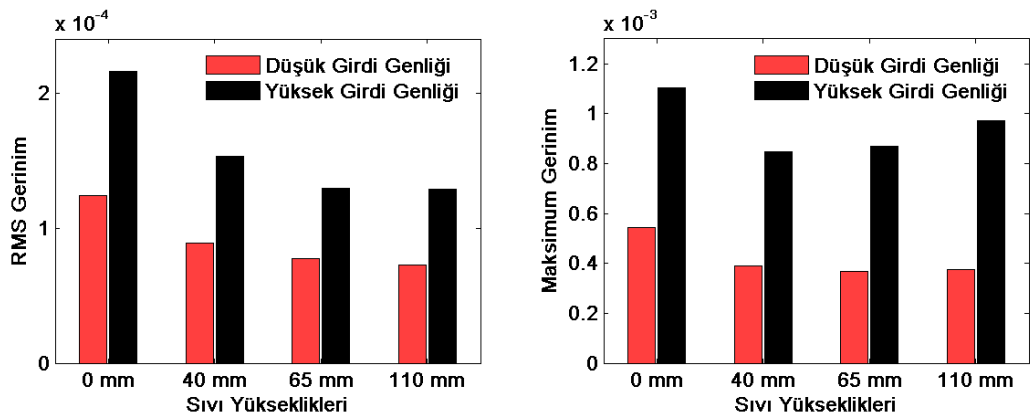
incelenecektir. Durum 4.a'da girdi sinyali 1. deprem sinyali, durum 4.b'de ise 2. deprem sinyalidir.

Durum 4.a:

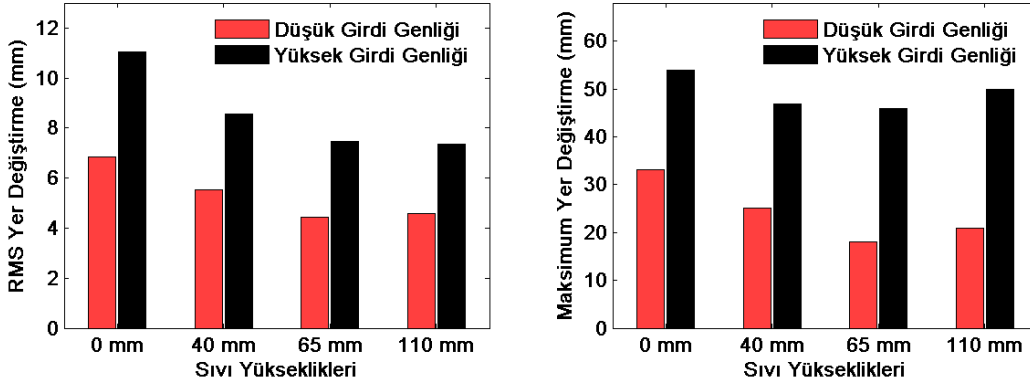
Durum 4'de anlatılan sistem, 1. deprem girdisi ile hareket ettirilerek elde edilen gerinim, ivme ve kat yer değiştirmesi verilerinin RMS ve maksimum değerleri Çizelge 4.24'te verilmiştir. Şekil 4.26'da gerinim verisinin, Şekil 4.27'de ise yer değiştirme verisinin RMS ve maksimum değerlerinin farklı su yükseklikleri ve girdi genlikleri için değişimi görülmektedir.

Çizelge 4.24 : Durum 4 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali).

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Genliği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s ²)	Maksimum İvme (m/s ²)	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	6	1,20E-04	5,40E-04	2,9	12	6,85	33,21
0	12	2,20E-04	1,10E-03	5	25	11,04	53,97
40	6	8,90E-05	3,90E-04	2	9,8	5,52	25,09
40	12	1,50E-04	8,50E-04	3,5	19,1	8,55	46,88
65	6	7,80E-05	3,70E-04	1,7	8	4,43	18,01
65	12	1,30E-04	8,70E-04	2,9	18,8	7,47	45,94
110	6	7,20E-05	3,80E-04	1,5	7,4	4,56	20,84
110	12	1,30E-04	9,70E-04	2,6	18,2	7,36	50,04



Şekil 4.26 : Durum 4 için gerinimin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).

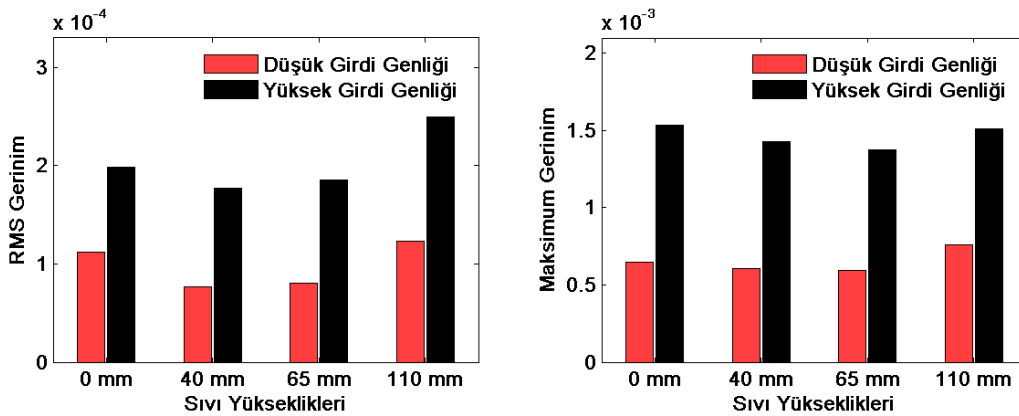


Şekil 4.27 : Durum 4 için yer değiştirmenin RMS ve maksimum değerleri (1. sinyal).

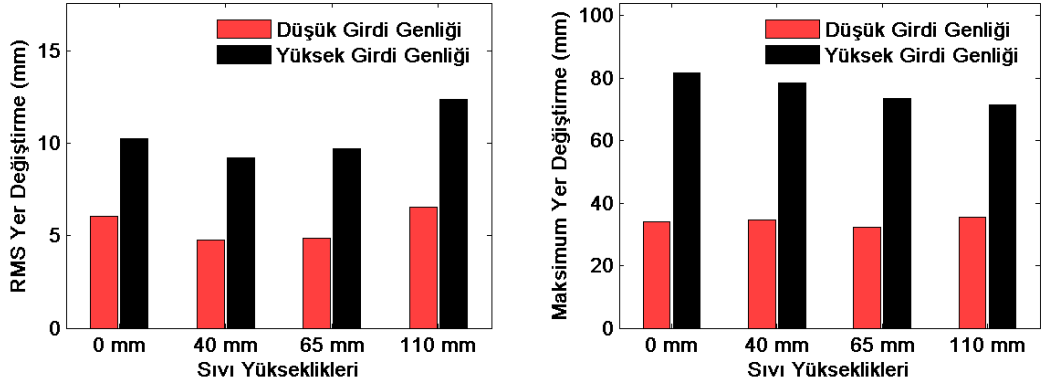
Durum 4.b'de ise 2. Deprem girdi sinyali kullanılarak Durum 4 için elde edilen değerlerin RMS ve maksimum değerleri verilmiştir. Bu değerler Çizelge 4.25'te verilmiştir. Şekil 4.28'de gerinim, Şekil 4.29'da ise kat yer değiştirme verisinin farklı durumlardaki değişimi görülmektedir.

Çizelge 4.25 : Durum 4 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali)

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Geniği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s ²)	Maksimum İvme (m/s ²)	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	6	1,10E-04	6,50E-04	2,6	14,5	6,04	33,91
0	12	2,00E-04	1,50E-03	4,6	34,9	10,26	81,58
40	6	7,70E-05	6,00E-04	1,8	13,2	4,77	34,7
40	12	1,80E-04	1,40E-03	4	30,9	9,23	78,48
65	6	8,00E-05	5,90E-04	1,8	13	4,87	32,38
65	12	1,90E-04	1,40E-03	4,1	29,4	9,7	73,37
110	6	1,20E-04	7,60E-04	2,5	15,2	6,56	35,58
110	12	2,50E-04	1,50E-03	5	30,3	12,4	71,51

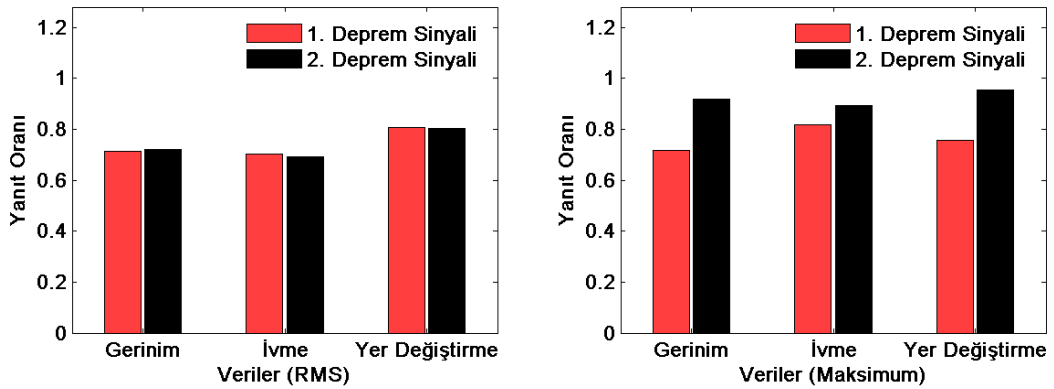


Şekil 4.28 : Durum 4 için gerinimin RMS ve maksimum değerleri (2. Sinyal).



Şekil 4.29 : Durum 4 için yer değiştirmenin RMS ve maksimum değerleri (2. sinyal).

Durum 4'de Durum 3'tekine benzer bir durum incelenecektir. Ancak Durum 4'de yapının doğal frekansı ile deprem girdisinin etkin frekansının ve sıvının çalkalanma doğal frekansının arasındaki fark daha da artırılarak bu durum incelenmiştir.



Şekil 4.30 : Durum 4 için yanıt oranı (düşük girdi genişliği).

Deprem girdisi olarak 1. sinyalin kullanıldığı Durum 4.a'da sistemden farklı su yükseklikleri için elde edilen yanıtın sistemde çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan duruma göre çok az bir oranda daha iyi olduğu görülür. Yani çalkalanan titreşim sönümleyici bütün su yükseklikleri için sistem yanıtın az bir oranda da olsa düşürmüştür. Ancak sistem yanıtının düşme oranının çok az olmasından dolayı çalkalanan titreşim sönümleyicinin bu durumda da sistemin sönüm oranının artırma veya sisteme ağırlık eklemeye benzer bir etki yaptığı söylenebilir. Durum 4.b için de 40 mm ve 65 mm su yüksekliklerinde benzer yorumlar yapılabilir. Ancak verilen Çizelge 4.25 incelendiğinde 110 mm su yüksekliğinde çalkalanan titreşim sönümleyici olan sistemden alınan yanıtların çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan durumda alınan yanıtlardan daha büyük olduğu görülür. Bu durumda 110 mm sıvının yapının yanıtını sönümlemediği gibi daha da arttırmıştır. Bu durumdan yola çıkılarak titreşim

sönümleyicideki sıvı yüksekliğinin ilgili durum için iyi ayarlanmadığında sistem yanıtını daha da arttırabileceği söylenebilir. Ayrıca Şekil 4.30’da verilen en iyi su yüksekliklerindeki yanıt oranlarına göre yanıtta düşmeler Durum 4 için maksimum %30 civarında olmuştur. Bu düşme oranı diğer durumların oldukça gerisindedir.

Çizelge 4.26 : Sinyal 1 için en iyi su yüksekliklerinde yanıt düşme yüzdeleri.

Sinyal 1	Durum 1		Durum 2		Durum 3		Durum 4	
	40 mm		40 mm		110 mm		110 mm	
Seçilen Su Yüksekliği								
Maks. Genlik	6	12	6	12	6	12	6	12
RMS Gerinim	67	71	76	72	37	46	42	40
Maks. Gerinim	59	66	47	61	27	35	31	12
RMS İvme	61	64	72	67	52	63	48	48
Mak. İvme	48	50	44	43	26	1	38	27
RMS Yer Değiştirme	66	70	75	71	49	60	33	33
Maks. Yer Değiştirme	58	63	43	59	29	27	37	7
Ortalama	60	64	60	62	37	39	38	28

Çizelge 4.27 : Sinyal 2 için en iyi su yüksekliklerinde yanıt düşme yüzdeleri.

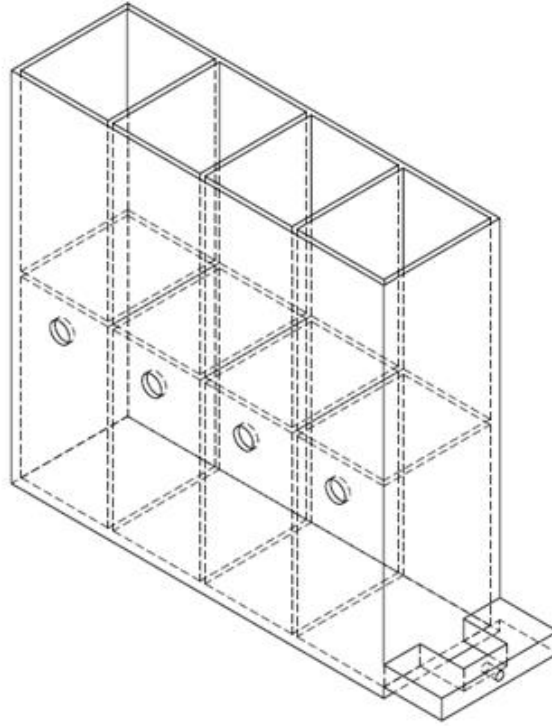
Sinyal 2	Durum 1		Durum 2		Durum 3		Durum 4	
	65 mm		65 mm		65 mm		65 mm	
Seçilen Su Yüksekliği								
Maks. Genlik	6	12	6	12	6	12	6	12
RMS Gerinim	83	81	79	61	-1	32	28	7
Maks. Gerinim	77	77	65	58	29	36	8	10
RMS İvme	81	80	76	61	9	37	31	11
Mak. İvme	59	71	57	45	26	6	11	16
RMS Yer Değiştirme	84	83	80	59	4	34	19	5
Maks. Yer Değiştirme	75	78	70	62	30	32	5	10
Ortalama	77	78	71	58	16	30	17	10

Çizelge 4.26’da sinyal 1 için, Çizelge 4.27’de de sinyal 2 için ilgili durumda yapı yanıtının en iyi sönümlendiği su yüksekliğinde çalkalanan titreşim sönümleyicinin yapı yanıtını düşürme yüzdeleri verilmiştir. Deprem girdisi ile yapılan deneylerde sıvının çalkalanma doğal frekansının yapının doğal frekansına ve hareket frekansına yakın olmasının titreşim sönümleyicinin performansını sinüs girdisi için yapılan deneylerdeki gibi arttırdığı görüldü. Ayrıca çalkalanan titreşim sönümleyicinin binanın kütesine oranının artması ile titreşim sönümleyicinin performansı aynı oranda artmamıştır. Çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütesinin yapının kütesine oranının artması, sistem yanıtının maksimum değerinin düşürülme yüzdesini sistem yanıtının

RMS deęerinin dűşűrűlme yűzdesine kıyasla daha çok etkilemiřtir. Yanıtın RMS deęerindeki ortalama dűřűş yűzdesi %7,5 kűtle oranı için %71 iken kűtle oranının %14'e çıkarılması ile % 77'ye çıkmıřtır. Ancak maksimum deęerler için kűtle oranı %7,5 iken %58 olan yanıtta ki dűřme yűzdesi kűtle oranının %14'e çıkarılması ile %78'e çıkmıřtır. Bűtűn durumlar içinde yapılabilecek bir dięer çıkarım da çalkalanan titreřim sűnűmleyicinin RMS yanıtı sűnűmlemede maksimum yanıtı sűnűmlemekten daha bařarılı olmasıdır.

5. YÜKSEK FREKANSLARDA SÖNÜMLEME YAPABİLECEK YENİ KAP TASARIMI ÇALIŞMASI

Bu başlığa kadar yapılan çalışmalarda üstü açık dikdörtgen prizma şeklinde sıvı tankı kullanılmıştı. Bu sıvı tankı yüksek katlı ve düşük doğal frekanslı yapılarının titreşim yanıtının düşürülmesi için uygundu. Ancak sunulan bu çalışmanın amaçlarından biriside düşük yükseklikte ve 2-4 Hz aralığında doğal frekansa sahip yapıların titreşim yanıtlarının düşürülmesidir. Eski su tankının fiziksel özelliklerinden dolayı 2-4 Hz gibi nispeten yüksek frekanslarda sönümlenememektedir. Bu sebeple suyun 2-4 Hz arası frekanslarda çalkalanmasına olanak sağlayacak yeni bir su tankı tasarımının yapılması yüksek doğal frekanslı sistemlerin titreşim yanıtının düşürülebilmesi için önemlidir. Bu bölümde ise bahsedilen bu yüksek frekanslarda çalkalanmaya izin verecek su tankı tasarımı yapılarak bu yeni kap tasarımının sonuçlar üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenecektir. Tasarlanan yeni sıvı tankı Şekil 5.1’de görülebilir.



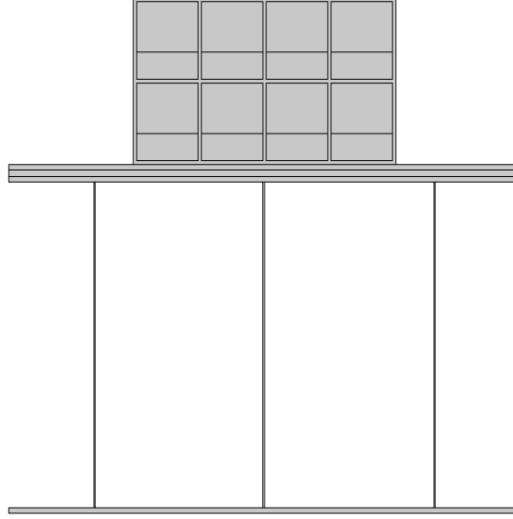
Şekil 5.1 : Tasarlanan yeni sıvı tankı.

Yeni kap tasarımı üretilmeden önce COMSOL programında uygun bir model oluşturularak ilgili çalışma genlikleri için elde edilen sonuçlara göre tasarım ve model güncellenmiştir. Analizler sonrası elde edilen sıvı tankının özellikleri şu şekildedir. Sıvı tankı içerisinde 8 adet bölme olan dikdörtgen prizma şeklindedir. Yeni tasarlanan bu sıvı tankı 370 mm x 385 mm x 120 mm ölçülerinde olup 5 mm kalınlığında pleksiglas malzemedan yapılmıştır. Sıvı tankında her bir bölme ise 90 mm x 180 mm x 110 mm ölçülerindedir. Alt katta bulunan bölmelere ulaşabilmek için bu bölmelere 20 mm çapında delik açılmıştır. Üst katta bulunan bölmelerin ise üstü açıktır.

5.1 Yeni Kap Tasarımı için Sayısal Analizler

Tasarlanan bu yeni su tankı için COMSOL yazılımı kullanılarak yapılan analiz sonuçları verilmeden önce bu programda analizlerin nasıl yapıldığı açıklanacaktır. Tek katlı bina modelinin üzerinde bulunan su tankı ve bu su tankının üzerindeki bölmelerdeki suyun sinüs konum girdisi ile hareketi ve yapının hareketi sayısal olarak modellenmiştir.

Model dosyası açıldıktan sonra ilk olarak geometri inşa edilmektedir. Analizlerde kullanılan geometriler iki boyutlu oluşturulmuştur. Geometrinin oluşturulması sırasında takip edilen işlemler şu şekildedir. Öncelikle yapının bileşenleri ayrı ayrı çizilir. Daha sonra su tankı bir bütün olarak çizildikten sonra su tankı üzerindeki bölmeler çıkarma işlemi ile oluşturulur. Geometri oluşturulurken yapılan son işlem su ve hava fazlarının da oluşturulmasıdır. Su ve hava fazları da katı bir bileşen gibi kapalı bölge olarak çizilir. Daha sonra oluşturulan her bir parça için bir malzeme ataması yapılır. Su tankı için pleksiglass malzeme tanımlanmıştır. Ağırlık olarak kullanılan ve yapının üst katındaki iki adet alüminyum plaka arasında yer alan kütle demir olarak tanımlanmıştır. Yapının kalan kısımları ise alüminyum malzemedan oluşmaktadır. Oluşturulan geometrinin ve tanımlanan malzemelerinin COMSOL programında oluşturulan modelin analiz sırasındaki görünümü Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2 : COMSOL modelinin görünümü.

Bu aşamadan sonra oluşturulan modelin çözümü için kullanılması gereken fizik modülleri seçilecektir. Öncelikle mekanik ve akışkanlı kısımların sayısal olarak çözülebilmesi için iki farklı fizik modülüne ihtiyaç vardır. Sisteme konum girdisi mekanik sistem üzerinden olmaktadır. Yapı modelinin alt tablasına verilen konum girdisi ile yapı hareket etmekte ve yapının bu hareketi sıvı tankını ve dolayısıyla sıvıyı harekete geçirmektedir. Daha sonra sıvının hareketi akışkan modülü çözümü ile hesaplanacaktır. Ancak bu aşamada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus vardır. Sıvı net bir hareket içindedir bu yüzden su tankının hareketi ile sıvı için tanımlanan çözüm ağında hareket etmesi gerekmektedir. Bu sebeple hareketli çözüm ağı modülünde çözümden kullanılmıştır. Kullanılan modüller aşağıdaki gibidir:

- Yapısal Mekanik Modülü (Structural Mechanics)
- Hareketli Ağ Modülü (Moving Mesh)
- Laminar Çift Fazlı Akış Modülü (Laminar Two-Phase Flow Module)

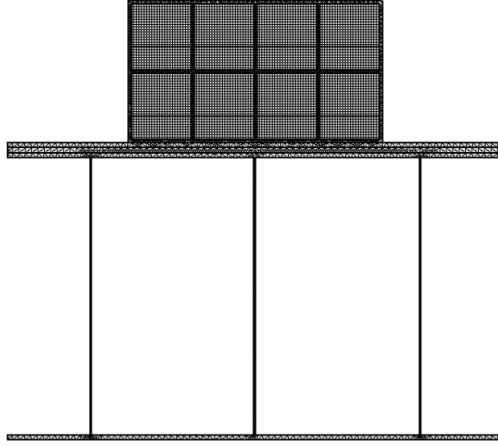
Yukarıda verilen modüller için ayrı ayrı kullanılan alan özellikleri ve sınır koşullarının detaylandırılması anlatılacaktır. Yapısal mekanik modülünde yapı ve sıvı tankı esnek malzeme olarak tanımlandı ve sönüm tipi olarak “Rayleigh damping” seçildi. Kütle ve direnç sönüm parametreleri deneme yanılma yöntemi ile önceki deneysel yapılarla benzer bir sönüm olacak şekilde seçildi. Ayrıca doğrusal elastik malzeme izotropik olarak tanımlandı. Su tankının tabanı ve iç kısımları ve yapının en altında bulunan plakanın alt kısmı hariç diğer bütün alanların sınır koşulları “Serbest” olarak tanımlandı. Yapının altında bulunan alüminyum plakaya tabanına genliği ve frekansı

önceden belirlenen bir sinüs fonksiyonu konum girdisi olarak verildi. Sıvı tankı içerisinde ise serbest yüzey olarak tanımlanmayan ve sıvı ile temas eden tank kenarlarına ise “Sınır Yüğü (Boundry Load)” tanımlandı. Bunlara ek olarak tüm katı bölgeleri için konum ve hız başlangıç şartları “0” olarak tanımlandı.

Hareketli çözüm ağının yapısal model ile birlikte hareket etmesini sağlamak için bu modül içerisinde hareketli çözüm ağının su tankının duvarları ile birlikte hareket etmesi sağlanmaktadır. Oluşturulan hareketli çözüm ağı ile birlikte yapısal kısmın ile akışkanlı kısım uyum içinde hareket etmektedir. Hareketli çözüm ağı da su tankının yer değiştirmesi ile hareket eder.

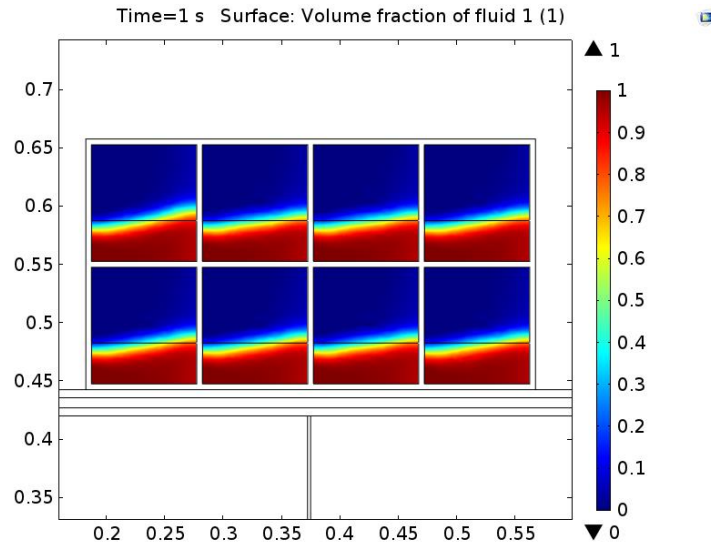
Laminer çift fazlı akış modülünde ise su tankının duvarındaki sınır koşulları ve hava-sıvı fazları tanımlanmaktadır. Bu modülde akış iki fazlı, sıkıştırılmaz ve laminer olarak tanımlanmıştır. Su ve hava fazları arasındaki serbest yüzey belirlenmiş ve bu serbest yüzey kalınlığı maksimum çözüm ağı kalınlığının yarısı olacak şekilde ayarlanmıştır. Su tankının duvarları için sınır koşulları da hareketli duvar olarak tanımlanmıştır. Birinci ve ikinci faz için ayrı ayrı su ve havanın fiziksel özellikleri girilmiştir. Başlangıç koşulları sıfır olarak ayarlanıp, yer çekimi uygun şekilde tanımlanmıştır.

Çözüm ağını gösteren COMSOL programından alınan ekran görüntüsü Şekil 5.3’te verilmiştir. Yapı için en büyük eleman büyüklüğü 20 mm olan üçgen elemanlardan oluşan çözüm ağı kullanılmıştır. Akışkan fazları içinde çözüm daha zor olacağından çözüm ağı küçültülerek maksimum eleman büyüklüğü 4 mm olan doğrusal çözüm ağı kullanılmıştır. Akışkanlı alandaki çözüm ağındaki maksimum eleman büyüklüğü daha da düşürüldüğünde çözüm süreleri çok artmıştır ve eleman büyüklüğü arttırıldığında ise yakınsama ve su seviyesinin değişmesi problemleri ile karşılaşılmasıdır.



Şekil 5.3 : COMSOL’da tanımlanan çözüm ağı.

Tanımlanan sistem için geçici yanıt çözümü yapılmış ve zaman adımı olarak 0,01 s kullanılmıştır. Bu zaman adımı için yakınsama sağlanamaması durumunda ise zaman adımın dörtte biri değerine düşmektedir. Çözüm çalıştırıldığında ilk olarak faz tanımlama işlemini yapmakta daha sonra ise bu adımda elde ettiği verileri başlangıç değeri olarak kullanıp tüm modüller için eş zamanlı çözümü hesaplanmaktadır. Çözüm sırasında 1. saniyedeki suyun hareketini gösteren örnek ekran görüntüsü Şekil 5.4’te görülmektedir.



Şekil 5.4 : COMSOL analizinde suyun yapı ile birlikte hareketi.

Oluşturulan bu COMSOL modeli kullanılarak çeşitli girdi frekansları ve 0,5 mm hareket genliğinde sistemde çalkalanan titreşim sönümleyici olan ve olmayan durumlar için sayısal çözüm bittikten sonra ivme, yer değiştirme ve gerinim değerleri zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Bu analizler yapılmadan önce yapının doğal

frekansı 2,7 Hz'e ayarlanmıştır. Çizelge 5.1'de tank boş iken elde edilen gerinim, ivme ve yer değiştirme sonuçları gösterilmiştir. Çizelge 5.2'de ise tanktaki 8 bölmede de 35 mm yüksekliğinde su bulunmaktadır. Bu su yüksekliğinin ilgili tank genişliğindeki çalkalanma doğal frekansı 2,7 Hz'dir. Yani yapının doğal frekansı ile sıvının çalkalanma doğal frekansı eşittir. Analizlerdeki bu durum için sönümleyici sıvının yapı kütlesine oranı 0,14'dür.

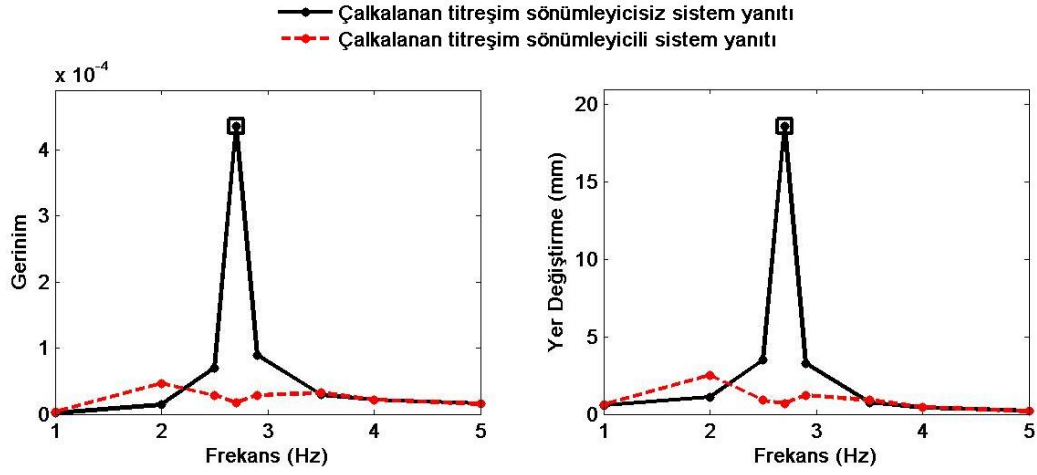
Çizelge 5.1 : Yeni kap tasarımı için sönümleyicisiz sistemin analiz sonuçları.

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)
1,0	1,9E-06	0,02	0,6
2,0	1,4E-05	0,18	1,1
2,5	7,0E-05	0,86	3,5
2,7 @ 5 s	4,4E-04	5,52	18,6
2,9	9,0E-05	1,10	3,3
3,5	2,9E-05	0,36	0,7
4,0	2,1E-05	0,27	0,4
5,0	1,7E-05	0,21	0,2

Çizelge 5.2 : Yeni kap tasarımı için sönümleyicili sistemin analiz sonuçları.

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)
1,0	3,0E-06	0,03	0,6
2,0	4,6E-05	0,40	2,5
2,5	2,8E-05	0,23	0,9
2,7	1,8E-05	0,21	0,7
2,9	2,9E-05	0,41	1,2
3,5	3,2E-05	0,44	0,9
4,0	2,2E-05	0,28	0,4
5,0	1,6E-05	0,19	0,2

Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de verilen sonuçların daha kolay anlaşılabilmesi için gerinim ve yer değiştirme verileri Şekil 5.5'te grafik olarak verilmiştir. Grafiklerdeki siyah tüm çizgi sönümleyici olmayan durumu, kırmızı kesikli çizgi ise sönümleyici olan durumu göstermektedir.



Şekil 5.5 : Yeni kap tasarımı için COMSOL analiz sonuçları.

Yeni kap tasarımı için verilen sonuçlar incelendiğinde kap tasarımının istenen çalışma frekanslarında başarılı bir şekilde çalıştığı görülmektedir. Sönümleyici sıvı sistem yanıtını rezonans frekansı ve çevresinde 50 kattan daha fazla bir oranda düşürmüştür. Analizlerden elde edilen bu sonuçlar sonrasında, yeni kap tasarımı üretilip bu kap tasarımının performansı sinüs ve deprem girdileri kullanılarak deneysel olarak incelenecektir.

5.2 Sinüs Girdisi için Yeni Kabın Sönümleme Performansının Deneysel İncelenmesi

Bu durumda yapının rezonans frekansı ve sıvının çalkalanma frekansı 2,9 Hz'e ayarlanmıştır. Bu yönden bu durum, Sinüs girdisinin verildiği bölümdeki Durum 1 ve Durum 2'ye benzemektedir. Ancak sinüs girdisi bölümündeki Durum 1 ve Durum 2'den farklı olarak doğal frekanslar düşük frekans değerine değil yüksek frekans değerine ayarlanmıştır. Bu da yeni kap tasarımı ile mümkün olmuştur. Bu durumun incelenmesinden sonra nispeten yüksek doğal frekans değerlerinde çalkalanan titreşim sönümleyicilerin performansları hakkında çıkarımlar yapılabilecektir. Bu durum için çalkalanan titreşim sönümleyici kütlelerinin bina modelinin kütlelerine oranı 0,27'dir. Sistemde çalkalanan sönümleyicinin olduğu ve olmadığı iki durum için farklı hareket frekanslarında 0,7 mm ve 1 mm hareket genliği için ölçümler yapılmıştır. Durum 1.a düşük girdi genliği için sonuçları gösterirken, Durum 1.b ise yüksek girdi genliği için sonuçları göstermektedir.

Durum 1.a:

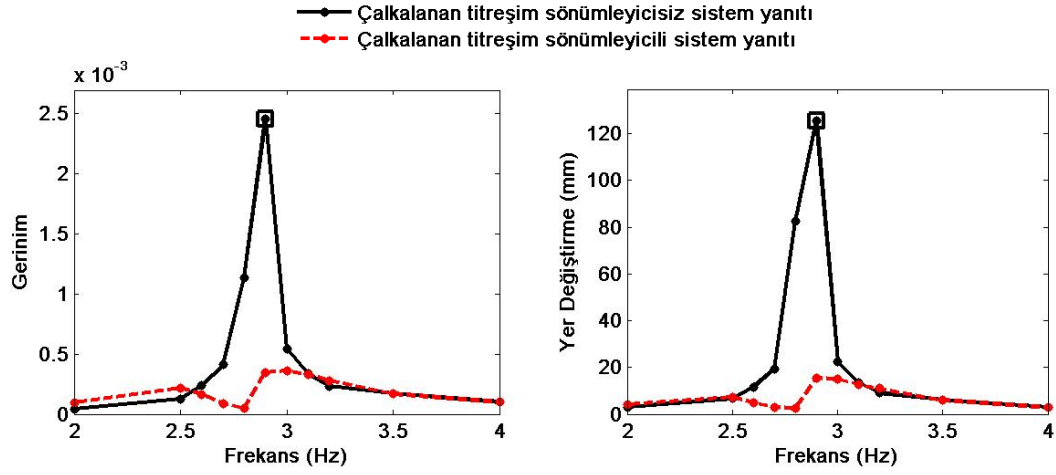
Düşük girdi genliğinde çalkalanan titreşim sönümleyicinin olmadığı durum için sonuçlar Çizelge 5.3'te görülmektedir. Çizelge 5.4'te ise yine düşük girdi genliği için ancak bu sefer çalkalanan titreşim sönümleyici olan sistem için alınan sonuçlar verilmiştir. Ayrıca Şekil 5.6'da çalkalanan titreşim sönümleyicinin olduğu ve olmadığı durumlar için gerinim ve kat yer değiştirmesinin frekansa göre değişiminin grafiği verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Sönümleyicisiz sistemin deneysel yanıtı (0,7 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)
2,0	4,3E-05	0,5	3,0
2,5	1,3E-04	1,6	6,7
2,6	2,4E-04	3,1	11,5
2,7	4,1E-04	5,5	19,4
2,8	1,1E-03	17,0	82,5
2,9 @ 10 s	2,4E-03	52,2	125,4
3,0	5,4E-04	8,0	22,6
3,1	3,3E-04	5,1	13,5
3,2	2,3E-04	3,7	9,1
3,5	1,7E-04	2,8	6,2
4,0	1,0E-04	1,7	3,0

Çizelge 5.4 : Sönümleyicili sistemin deneysel yanıtı (0,7 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)	Yük Hücresi (N)
2,0	9,8E-05	0,7	4,2	4,9
2,5	2,2E-04	1,7	7,4	12,5
2,6	1,7E-04	1,3	4,9	10,2
2,7	9,0E-05	0,8	3,1	6,8
2,8	4,9E-05	0,3	2,4	7,9
2,9	3,5E-04	5,0	15,5	8,5
3,0	3,6E-04	5,3	14,9	8,2
3,1	3,3E-04	4,8	12,7	9,8
3,2	2,8E-04	4,4	11,1	5,2
3,5	1,7E-04	2,8	5,9	3,8
4,0	1,0E-04	1,6	2,8	5,2



Şekil 5.6 : Yeni kap tasarımı için sistem yanıtı (0,7 mm girdi genliği).

Durum 1.b:

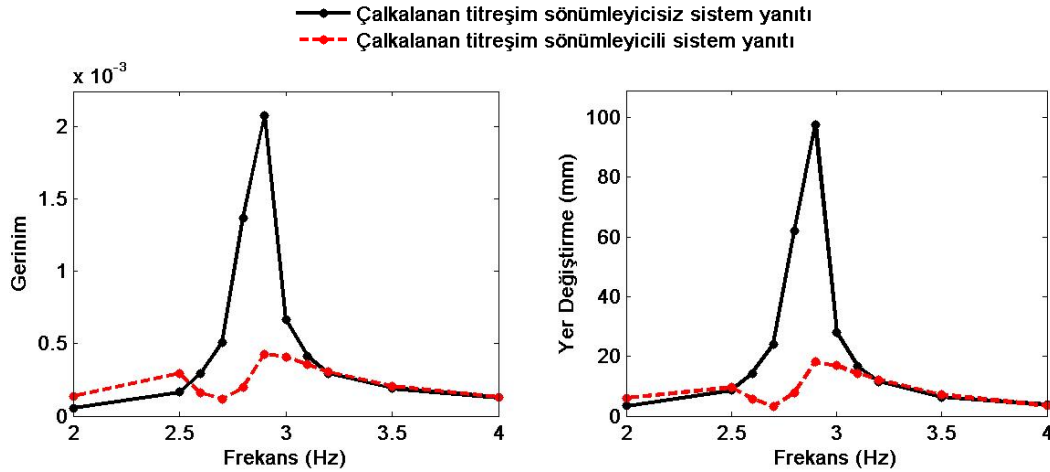
Durum 1.b’de yüksek girdi genliği olan 1 mm için sonuçlar şu şekildedir. Çizelge 5.5 çalkalanan titreşim sönümleyicinin olmadığı durum için alınan verileri gösterirken, Çizelge 5.6 yapı ile sönümleyicinin birlikte olduğu sistem için alınan verileri göstermektedir. Şekil 5.7’de çalkalanan titreşim sönümleyicinin olduğu ve olmadığı durum için ayrı ayrı gerininim ve kat yer değiştirmesinin frekansa bağlı grafiği görülmektedir.

Çizelge 5.5 : Sönümleyicisiz sistemin deneysel yanıtı (1 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerininim	İvme (m/s ²)	Yer Değiştirme (mm)
2,0	5,4E-05	0,7	3,4
2,5	1,7E-04	2,1	8,7
2,6	2,9E-04	3,8	14,4
2,7	5,1E-04	6,1	24,1
2,8	1,4E-03	19,2	62,0
2,9	2,1E-03	32,2	97,4
3,0	6,7E-04	9,9	28,0
3,1	4,2E-04	6,3	16,6
3,2	3,0E-04	4,7	11,5
3,5	1,9E-04	3,1	6,4
4,0	1,3E-04	2,2	3,8

Çizelge 5.6 : Sönümleyicili sistemin deneysel yanıtı (1 mm girdi genliği).

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s ²)	Yer Değişirme (mm)	Yük Hücresi (N)
2,0	1,4E-04	1,0	6,0	6,4
2,5	3,0E-04	2,4	9,6	14,4
2,6	1,6E-04	1,4	5,7	11,1
2,7	1,2E-04	1,0	3,3	9,1
2,8	2,0E-04	2,1	7,9	11,5
2,9	4,3E-04	5,9	18,1	10,6
3,0	4,1E-04	5,8	16,9	11,1
3,1	3,6E-04	5,2	14,1	8,6
3,2	3,0E-04	4,7	12,1	9,3
3,5	2,1E-04	3,4	7,1	4,6
4,0	1,3E-04	2,0	3,5	4,6



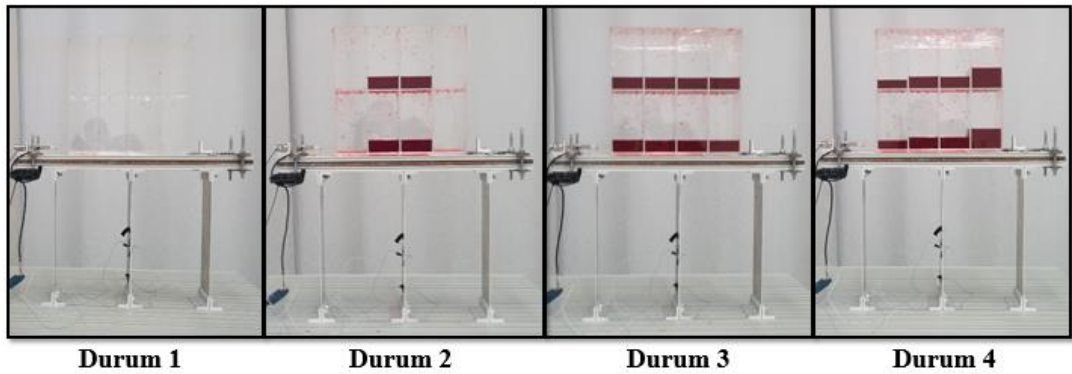
Şekil 5.7 : Yeni kap tasarımı için sistem yanıtı (1 mm girdi genliği).

Durum 1'de verilen veriler incelendiğinde, sistem yanıtının çalkalanan titreşim sönümleyici ile etkili bir şekilde düştüğü görülmektedir. Durum 1, eski kap tasarımı için sinüs girdisi ile yapılan ve Bölüm 4.1'de yer alan düşük doğal frekanslardaki yapılara sahip Durum 1 ve 2 ile kıyaslanırsa, çalkalanan titreşim sönümleyicinin rezonans etrafında önceki durumlar kadar başarılı bir sönümleme yaptığı görülür. Düşük frekans değerleri için Bölüm 4.1'de verilen sonuçlar incelendiğinde çalkalanan titreşim sönümleyicilerin olduğu durumlarda rezonans etrafında oluşan yeni iki tepe noktası oluştuğu görülmüştü. Yeni kap tasarımı için oluşturulan Durum 1 incelendiğinde bu iki tepe noktasının bu durumda da oluştuğu söylenebilir. Ancak Durum 1'de bu iki yeni tepe noktası için okunan değerler eski kap tasarımı için okunan değerlere göre daha düşüktür. Yani sistem eski kap tasarımı ve düşük çalışma frekanslarında sönümü az titreşim sönümleyici gibi çalışırken yeni kap tasarımı ile

mümkün olan yüksek frekanslarda sönüm oranı daha iyi ayarlanmış titreşim sönümleyici gibi çalışmaktadır.

5.3 Deprem Girdisi için Yeni Kabın Sönümlenme Performansının İncelenmesi

Bu bölümdeki deneyler yapılmadan önce yapının doğal frekansı yapıya uygun miktarda ağırlık eklenerek 2,7 Hz'e ayarlanmıştır. Hareket girdisi olarak etkin frekansı 0,83 Hz olan deprem girdisi kullanılmıştır. Bu deprem girdisinin maksimum hareket girdi genliği ise 6 mm'dir. Bu deneyde 4 farklı sıvı durumu vardır. Bu sıvı durumları şu şekildedir. Durum 1'de 8 adet bölmenin hepsi boştur. Durum 2'de bu 8 adet bölmeden 4'üne 35 mm yüksekliğinde su konulmuştur ve kalan bölmeler boş bırakılmıştır. 35 mm yüksekliğinde suyun çalkalanma doğal frekansı 2,7 Hz'dir. Durum 3'de ise bütün bölmeler 35 mm yüksekliğinde su ile doldurulmuştur. Bu durum için çalkalanan titreşim sönümleyici kütesinin bina modelinin kütesine oranı 0,14'dür. Son olarak Durum 4'de ise 4 adet bölmeye 35 mm yüksekliğinde su konulmuştur. Diğer 4 bölmeden 2'sine 26 mm yüksekliğinde su konulurken, kalan son iki bölmeye ise 60 mm yüksekliğinde su konulmuştur. 26 mm yüksekliğindeki suyun çalkalanma doğal frekansı 2,5 Hz iken, 60 mm yüksekliğindeki suyun çalkalanma doğal frekansı 2,9 Hz'dir. Oluşturulan bu durumlardaki sistem görünüşleri Şekil 5.8'de verilmiştir.

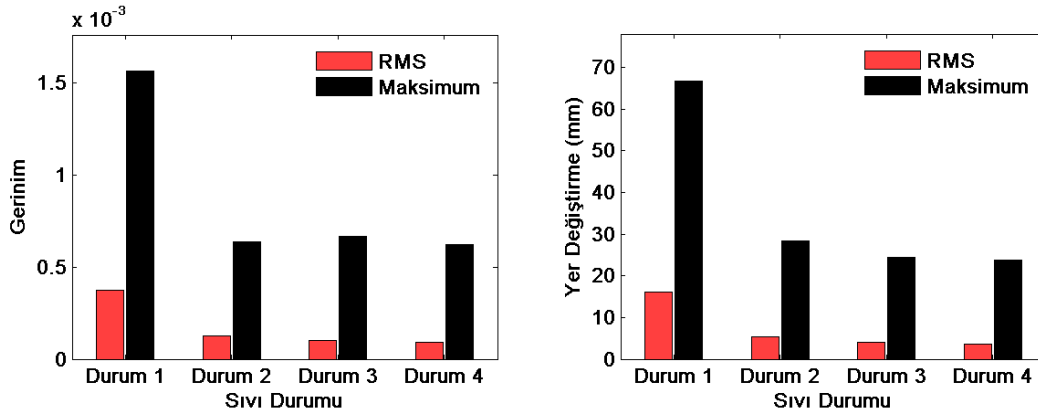


Şekil 5.8 : Su yüksekliğine göre oluşturulan durumlar.

Yeni kap tasarımı için farklı su durumlarında elde edilen gerinim, ivme ve yer değiştirme verilerinin RMS ve maksimum değerleri Çizelge 5.7'de verilmiştir. Şekil 5.9'da ise gerinim ve yer değiştirme verisinin RMS ve maksimum değerlerinin farklı su durumları için değişimi grafiklerde gösterilmiştir.

Çizelge 5.7 : Yeni kap tasarımı ile deprem girdisi için elde edilen sonuçlar.

Sıvı Durumu	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s ²)	Maksimum İvme (m/s ²)	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
1	3,8E-04	1,6E-03	4,6	18,9	16,4	66,7
2	1,2E-04	6,4E-04	1,5	7,8	6,0	31,8
3	1,0E-04	6,7E-04	1,2	7,0	4,5	25,0
4	9,2E-05	6,2E-04	1,0	6,5	4,3	23,7



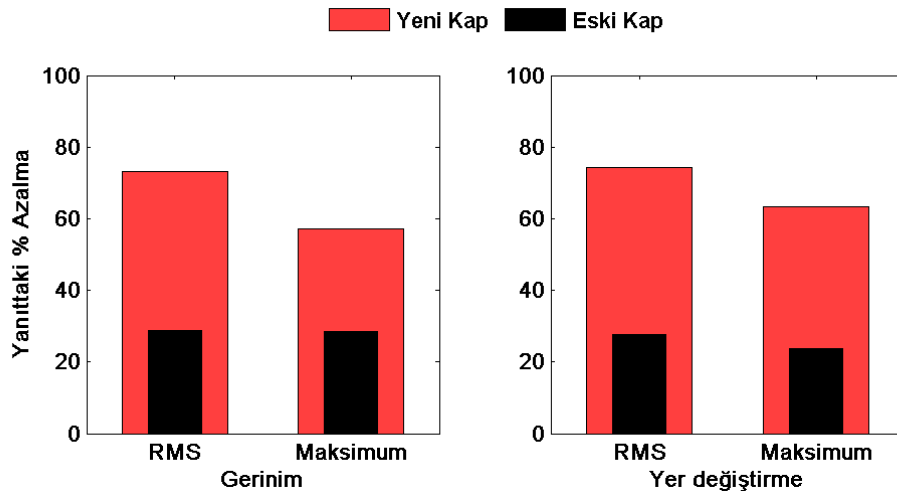
Şekil 5.9 : Yeni kap tasarımı için elde edilen sonuçlar (deprem girdisi).

Yeni kap tasarımı için elde edilen sonuçlar incelendiğinde en büyük sistem yanıtının Durum 1'de olduğu görülür. Durum 1'de sistemde çalkalanan titreşim sönümleyici olmadığından bu sonuç beklenen bir sonuçtur. Diğer 3 sıvı durumunda da sistem yanıtları sistemde çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan durumdaki sistem yanıtına göre %60'dan fazla azalmaktadır. Durum 2 için yanıtta düşüş oranı %61'dir. Durum 3'te elde edilen yanıtta düşüş oranı ise %67'ye çıkmıştır. Ancak iki durumda da aynı çalkalanma doğal frekansındaki sıvı yüksekliğinde, Durum 2'de 4 bölme doldurulurken Durum 3'te ise 8 bölme doldurulmuştur. Yani aynı bina modeli için çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütlesi 2 katına çıkarken yanıtta düşüş oranı elde edilen veriler için %16 civarındadır. Durum 4'de bölmelere farklı yüksekliklerde su konulmuştur. Durum 4'deki yanıt ile Durum 3'deki yanıt karşılaştırıldığında yanıtın Durum 4'de, Durum 3'e göre elde edilen veriler için ortalama yaklaşık %3 daha düşük olduğu görülür. Bu sebeple tek bir frekansta gelmeyen hareket girdileri için çalkalanan titreşim sönümleyicinin doğal frekansını birkaç farklı frekansa ayarlamamanın tek bir frekansa ayarlamaktan daha iyi sonuç verebileceği söylenebilir.

5.4 Yeni Kap-Eski Kap Performans Karşılaştırması

Yeni kap tasarımı ile suyun çalkalanma doğal frekansının 2,5-3 Hz arası yüksek frekans değerlerine çıkarılabilmesi mümkün olmuştur. Daha önceki bölümlerde yapı doğal frekansı ile sıvının çalkalanma doğal frekansının birbirine yakın olmasının çalkalanan titreşim sönümleyicinin sönümleme performansında çok büyük bir öneme sahip olduğu vurgulanmıştı. Ancak yüksek frekanslarda, sıvının çalkalanma doğal frekansı ile yapının rezonans frekansının uyumlu olduğu ve olmadığı iki durum karşılaştırılmamıştı. Bu bölümde yapının doğal frekansı ile sıvının çalkalanma doğal frekansının uyumlu olduğu ve olmadığı durumlardaki çalkalanan titreşim sönümleyici performansı incelenecektir.

Karşılaştırmaya başlamadan önce karşılaştırılacak iki durum için sistem parametreleri tanıtılacaktır. Öncelikle eski kap tasarımı için yapılan deneylerde yapının doğal frekansı 3,5 Hz olup kaptaki bulunan su yüksekliği 4 cm'dir. 4 cm yüksekliğindeki suyun eski kap tasarımı için çalkalanma doğal frekansı 0,83 Hz'dir. Bu konfigürasyon için çalkalanan sıvının kütesinin-yapı kütesine oranı %13,3'tür. Yeni kap için yapılan deneylerde ise yapının doğal frekansı 2,7 Hz'e ayarlanmıştır. Bu deneylerde yeni tasarlanan kaptaki 8 bölmeye 3,5 cm yüksekliğinde su konulmuştur. Yeni kap için 3,5 cm yüksekliğindeki suyun çalkalanma doğal frekansı 2,7 Hz'dir. Yeni kap tasarımı için oluşturulan konfigürasyonda kütle oranı %14'dür. Bu bölümde yapılan deneylerde Bölüm 4.2'deki deneylerde kullanılan 1. Deprem sinyali hareket girdisi olarak kullanılmıştır.



Şekil 5.10 : Yeni kap-Eski kap performans karşılaştırması.

Şekil 5.10’da tanımlanan bu iki durum için çalkalanan titreşim sönümleyicinin sistem yanıtını, sistemde çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan duruma göre ne kadar düşürdüğü görülmektedir. Eski kap tasarımı için, yani yapı doğal frekansı ile sıvının çalkalanma doğal frekansının birbirinden uzak değerlerde olduğu durum için sistem yanıtı çalkalanan titreşim sönümleyici ile %20-30 oranında düşürülebilmıştır. Ancak yeni kap tasarımı ile yapının doğal frekansı ve sıvının çalkalanma doğal frekansı aynı değere ayarlanmış olup, sistem yanıtı bu sayede maksimum değerler için %55-65, RMS değerler içinse %70-75 oranında düşürülmüştür. Bu iki durumda çalkalanan sıvının kütesinin yapı kütesine oranının yaklaşık olarak aynı olduğu da göz önünde bulundurulursa yapı doğal frekansı ile sıvının çalkalanma doğal frekansı arasındaki uyumun yüksek frekanslı yapılar içinde sistem yanıtını sönümlemede ne kadar önemli olduğu görülür.

5.5 Kütle Oranının Sönümleme Performansı Üzerindeki Etkisi

Yeni tasarlanan su tankının çok gözlü yapısından faydalanılarak su kütesinin yapı kütesine oranının değişiminin, çalkalanan titreşim sönümleyicinin performansı üzerindeki etkisi bu başlık altında incelenecektir. Deneyler yapılmadan önce yapının doğal frekansı 2,5 Hz’e ayarlanmıştır. Su tankında bulunan eşit 8 adet bölme sırayla doldurularak dolu bölme sayısı 0’dan 8’e çıkana kadar ölçümler yapılmıştır. Yani bu başlıkta yapılan deneylerde 9 durum vardır. İlk durumda su tankındaki tüm bölmeler boştur. İkinci durumda su tankında sadece bir bölmede sıvı vardır. Bu şekilde her yeni durumda bir bölmeye daha su eklenerek ölçüm alınmıştır. 9. Durum olan son durumda ise su tankındaki tüm bölmeler doludur. Bahsedilen dolu bölmelere 2,6 cm yüksekliğinde su konulmuştur. 2,6 cm yüksekliğindeki suyun çalkalanma doğal frekansı yapının doğal frekansı ile aynı olacak şekilde 2,5 Hz’dir. Verilen çizelgelerde ise dolu bölme sayısı ile ölçülen sistem yanıtlarının bütün bölmelerin boş olduğu duruma göre yanıtındaki düşüş yüzdesi gösterilmektedir. Deneyler sırasında gerinim, ivme ve yer değiştirme verileri ölçülmüştür. Ölçümler sinüs ve deprem girdisi olmak üzere iki farklı girdi için yapılmıştır. Sinüs girdisi için hareket frekansı 2,5 Hz ve hareket genliği ise 1 mm’dir. Sinüs girdisi için durağan durumda elde edilen verilerin tepe noktalarının ortalamalarından hesaplanan yanıtındaki düşme oranları Çizelge 5.8’de verilmiştir. Deprem girdisi olarak ise Bölüm 4.2’de ayrıntılı olarak anlatılan Sinyal 1 kullanılmıştır. Deprem girdisi için 80 saniye ölçüm yapıp elde edilen sonuçlar ise

Çizelge 5.9’da verilmiştir. Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9’da verilen sonuçlar ilgili dolu bölme sayısı için alınan yanıtın sistemde çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan durumda alınan yanıtı göre düşme oranıdır. Deprem girdisi için yanıtın RMS ve maksimum değerlerinden hesaplanan düşme oranları ayrı ayrı verilmiştir. Bahsedilen iki çizelgede verilen değerler ilgili durumda alınan yanıtın bütün bölmeler boş olduğu durumdaki alınan yanıtı göre düşme yüzdesidir. Sıvı kütesinin yapı kütesine oranı ise sıvı tankında bir bölme dolu iken %1,2, tüm bölmeler doldurulduğunda ise %9,6 olmaktadır.

Çizelge 5.8 : Sinüs girdisi için kütle oranı-yanıt düşme yüzdesi.

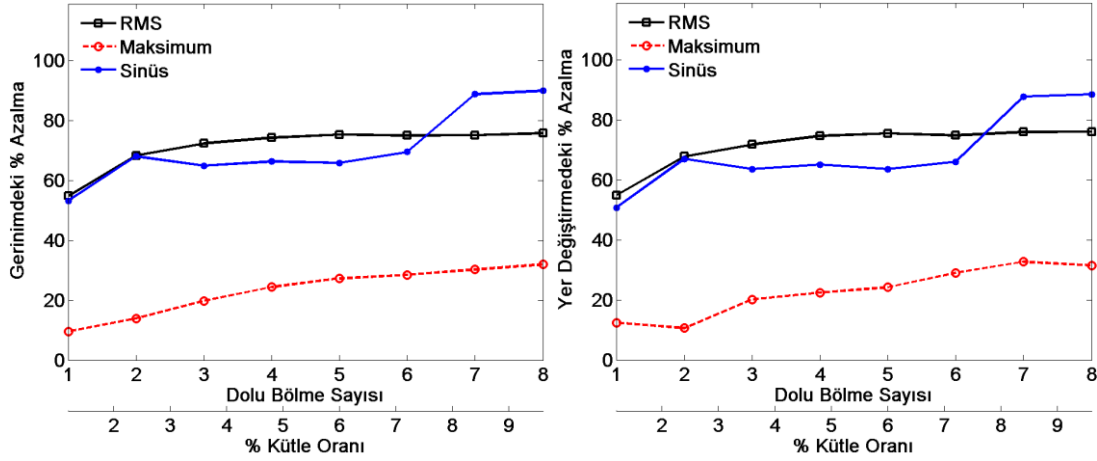
Dolu Bölme Sayısı	Kütle Oranı	Sinüs Gerinim	Sinüs İvme	Sinüs Yer Değiştirme
1	1,2	53,2	44,6	50,7
2	2,4	68,1	58,3	67,0
3	3,6	65,0	53,9	63,6
4	4,8	66,3	55,8	65,1
5	6	65,9	52,9	63,6
6	7,2	69,5	59,5	66,0
7	8,4	88,8	82,4	87,8
8	9,6	90,0	82,9	88,5

Çizelge 5.9 : Deprem girdisi için kütle oranı-yanıt düşme yüzdesi.

Dolu Bölme Sayısı	Rms Gerinim	Maksimum Gerinim	Rms İvme	Maksimum İvme	Rms Yer Değiştirme	Maksimum Yer Değiştirme
1	54,8	9,6	54,7	5,5	54,9	12,5
2	68,3	13,9	67,9	10,6	67,8	10,6
3	72,4	19,8	71,6	11,4	71,8	20,1
4	74,3	24,4	74,0	20,7	74,7	22,4
5	75,3	27,3	74,5	18,7	75,5	24,2
6	75,0	28,5	74,1	30,6	74,9	29,0
7	75,1	30,3	75,0	27,3	76,0	32,8
8	75,8	32,0	75,2	18,5	76,1	31,5

Verilen çizelgelere ek olarak gerinim ve yer değiştirmedeki düşme oranlarının dolu bölme sayısı ve sönümleyici sıvının kütesinin yapının kütesine oranı ile değişimi Şekil 5.11’deki grafikte verilmiştir. Bu grafikte deprem girdisi için alınan verilerin RMS ve maksimum değerlerinden elde edilen düşme oranları ayrı ayrı gösterilmiştir.

Sinüs girdisi için ise durağan durumda elde edilen verilerin tepe noktalarının ortalama değerlerinden hesaplanan düşme yüzdesi verilmiştir.



Şekil 5.11 : Dolu bölme sayısına göre yanıtındaki düşme yüzdeleri.

Sinüs girdisi için Çizelge 5.8'de verilen sistem yanıtındaki düşme yüzdeleri incelendiğinde sadece tek bölme dolu iken bile çalkalanan titreşim sönümleyici sistem yanıtını farklı veri tipleri için %45 ve üzeri oranlarda düşürebildiği görülmektedir. Tek bölme dolu iken çalkalanana titreşim sönümleyicinin kütesinin yapı kütesine oranı %1,2 idi. Dolu bölme sayısı artırılarak 8'e çıkartıldığı durumda yani çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütesinin yapı kütesine oranının %9,6 olduğu durumda ise çalkalanan titreşim sönümleyici sistem yanıtını farklı veri tiplerinden hesaplanan sonuçlara göre %90'a kadar düşürebilmektedir. Bu iki durum arasındaki durumlarda ise doğrusal bir ilişki görülmemesine karşın dolu bölme sayısının artması ile sönüm oranı ya yaklaşık olarak aynı seviyelerde kalmaya devam etti ya da az bir oranda arttı. Kısaca hareket frekansı yapı doğal frekansı ile aynı değere ayarlanmış sinüs girdisi için uygun su yüksekliğinde sistem yanıtı %45-90 arası düşürülebilmektedir ve yanıtındaki düşme oranında çalkalanan sıvı kütesinin yapı kütesine oranı önemlidir. Ayrıca sistem yanıtının düşme oranı bahsedilen kütle oranındaki artış kadar olamamaktadır. Örneğin 2 bölme dolu iken yanıtındaki düşüş oranı ortalama %64,4 iken, dolu bölme sayısı 3 katına çıkarılarak 6 yapıldığında ise düşüş oranı sadece ortalama %65'e çıkmıştır.

Deprem girdisi için alınan sonuçlar incelendiğinde ise ilk olarak çalkalanan titreşim sönümleyicinin sistem yanıtının RMS değerini düşürmede maksimum değerini düşürmeye göre daha başarılı olduğu görülmektedir. Bunun dışında sinüs girdisinin

aksine çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütlelerinin arttığı neredeyse her durumda çalkalanan titreşim sönümleyicinin sönümleme performansı artmıştır. Ancak çalkalanan titreşim sönümleyici bulunan dolu bölme sayısı 1'den 8'e artarken sistem yanıtındaki düşüş oranı dolu bölme sayısı arttıkça daha az artmaktadır. Özellikle verilerin Rms değerlerine göre hesaplanan düşme oranları incelenirse dolu bölme sayısı 5'den fazla artmasının sistem yanıtındaki düşmeyi neredeyse hiç arttırmadığı görülmektedir. Yani çalkalanan titreşim sönümleyici kütlelerinin %6'dan fazla olması Rms yanıtındaki düşme oranını daha fazla arttırmamaktadır. Verilerin Rms değerleri üzerinden hesaplanan yanıtındaki düşme oranı dolu bölme sayısına göre %55-76 arasında değişmektedir. Yine deprem girdisi için alınan verilerin maksimum değerlerine göre hesaplanan düşme oranları %5-32 arasında değişmektedir. Maksimum değerlere göre hesaplanan düşme oranı ise dolu bölme sayısı 6'nın üzerine çıktığında düşme oranı daha fazla artmamaktadır. Yani kütle oranının %7,2'nin üzerine çıkarılması sistemin maksimum yanıtının sönümlenmesinde olumlu bir etki yaratamamaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada ilk olarak çalkalanma sırasında kap uzunluğu boyunca dalga yüksekliğini tespit edebilecek ve rezonans frekansı etrafındaki hareket frekansları için çalkalanma kuvvetini hesaplayabilecek bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem için elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Çalkalanma dinamiğinin takibi için geliştirilen görüntü işleme metodu ile çalkalanma süresi boyunca serbest yüzey profilini çıkarılmıştır.
- Görüntü işleme yöntemi ile elde edilen kap uzunluğu boyunca dalga yüksekliği verisi ve doğrusal dalga teorisi kullanılarak çalkalanma kuvveti rezonans frekansı etrafında hesaplanmıştır.
- Geliştirilen metodun verdiği sonuçlar ultrasonik algılayıcı ve yük hücresi vasıtasıyla elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak metod doğrulanmıştır.
- Sıvının 2 boyutlu hareketinin bozulmadığı ve hareket frekansı ile sıvının ilk çalkalanma doğal frekansının yakın olduğu durumlarda bu metod deney düzeneklerinde sıvı seviye algılayıcılarının ve yük hücrelerinin yerine kullanılabilir.

Bu çalışmada çalkalanan titreşim sönümleyicilerin performansları deneysel yöntemler kullanılarak farklı durumlar için incelenmiştir. Yapı modeli olmadan yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çalkalanma kuvveti artan hareket genliği ve frekansı ile birlikte artmaktadır.
- Çalkalanma kuvvetinin istenen büyüklüklerde olması için sıvının çalkalanma doğal frekansı ile kabın hareket frekansı birbirlerine yakın olmalıdır.
- Sıvının çalkalanma doğal frekansı ile kabın hareket frekansının yakın olmadığı durumlarda hareket genliği ve frekansı büyük olsa bile yüksek çalkalanma kuvveti değerleri elde edilememektedir.
- Hareket genliği arttırıldığında çalkalanma kuvveti artmaktadır. Ancak çalkalanma kuvvetindeki artış oranı hareket genliğindeki artış oranından daha

düşük olmaktadır. Yani hareket genliğindeki artış oranı ile kuvvetteki artış oranı doğrusal değildir.

Doğal frekansı ve kütlesi değiştirilebilen modüler bir bina modeli kullanılarak hem deprem hem de sinüs girdisi için yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ise aşağıdaki gibidir:

- Hem deprem hem de sinüs girdisi için, sönümleyicinin çalkalanma doğal frekansı ile yapının doğal frekansının yakın olduğu durumlarda, çalkalanan titreşim sönümleyici başarılı bir şekilde yapının dinamik yanıtını düşürmektedir.
- Çalkalanan titreşim sönümleyici yapı yanıtını sinüs girdisi için rezonans frekansının etrafında düşürmektedir.
- Çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütlesinin yapı kütlesine oranı arttığında sinüs girdisi için etkili sönümleme yapılabilen frekans bölgesinin genişliği artmaktadır.
- Çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütlesinin yapının kütlesine oranı arttıkça sinüs girdisi için sönümleyicinin sistem yanıtını düşürme oranı artmaktadır. Ancak performans artış oranı kütle artış oranının gerisinde kalmaktadır. Örneğin kütle oranı %2,4 iken yanıtta ortalama %65 düşüş görülmüştür. Kütle oranı %8,4'e çıkarıldığında ise yanıtta düşüş %86 olmuştur.
- Çalkalanan titreşim sönümleyiciler yapının rezonans frekansı etrafında yapının sinüs girdisine verdiği yanıtı düşürmede deprem girdisi için verdiği yanıtı düşürmeye göre daha başarılıdır. Bunun sebebi deprem sinyalinin birden fazla frekansta etkin olması ve deprem sinyali içerisinde bulunan rezonans frekansına yakın olmayan frekanstaki girdiler için titreşim sönümleyicinin etkili sönümleme yapamamasıdır.
- Çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütlesinin yapı kütlesine oranının %5 olmasının çalışma kapsamındaki koşullar için yapının deprem girdisine verdiği yanıtı sönümlemede yeterli olduğu görülmüştür. Kütle oranının %5'in üzerine çıkması, yapı yanıtının düşürülme yüzdesini bu çalışmada incelenen durumlar için çok fazla etkilememektedir. Örneğin deprem girdisi ile elde edilen sistem yanıtını %4,8 kütle oranı için çalkalanan titreşim sönümleyici ortalama %48,4

düşürmüştür. Kütle oranının aynı durum için %9,6'ya çıkarılması ile yanıtta ki düşüş oranı sadece %3,1 artarak %51,5'e çıkmıştır.

- Yüksek girdi genliklerinde çalkalanan titreşim sönümleyiciler özellikle deprem girdisi için daha başarılı sönümleme yapmaktadır. Hareket genliğinin büyümesi ile sistemdeki çalkalanmanın ve türbülansın artmasının sistemdeki sönümlenen enerji miktarını arttırması bu durumun olası nedeni olabilir.
- Çalkalanan titreşim sönümleyiciler hem düşük yapı rezonans frekanslarında (1 Hz civarı) hem de yüksek yapı rezonans frekanslarında (2,5-3 Hz arası) yapıların titreşim yanıtlarını başarılı bir şekilde sönümleyebilmektedir.
- Sıvının çalkalanma doğal frekansı ile yapının doğal frekans değerleri birbirlerinden uzaklaşmaya başladıkça, iki girdi tipi içinde çalkalanan titreşim sönümleyicinin yapının titreşim yanıtını düşürme oranı azalmaktadır.

Yukarıda verilen sonuçlara ek olarak çalkalanan titreşim sönümleyici sistem yanıtını hemen hemen hiçbir durumda sistemde sönümleyici olamayan duruma göre daha kötü hale getirmemiştir. Bu durumun tek istisnası ise Bölüm 4.2'deki Durum 4'te 2. deprem girdisi için 110 mm sıvı yüksekliğinde elde edilen sonuçlardır. Bu durum incelendiğinde ise çalkalanan titreşim sönümleyicinin sistem yanıtını arttırmasının sadece yapı doğal frekansı ile sıvı doğal frekansının birbirlerinden çok uzak değerlerde olduğu ve sıvı yüksekliğinin çok fazla olduğu durumlarda mümkün olabildiği görülmektedir. Bu durumdaki yanıt artışının da en fazla %20 civarında olduğu görülmüştür. Bu istisna dışında titreşim sönümleyicideki sıvının çalkalanma doğal frekansı ile yapının doğal frekansı arasındaki fark arttıkça titreşim sönümleyici yanıtı düşürmedeki etkinliğini kaybederek sonuçlar üzerinde yapıya eklenmiş kütle veya ek sönüm ile benzer bir etki göstermektedir.

Yapılan deneyler sırasında çalkalanmanın ve yapının dinamik yanıtının takip edilebilmesi için kullanılan deney düzeneği ve algılayıcılar ile ilgili de bir takım öğrenimler olmuştur. Bunlar şu şekildedir:

- Sisteme istenen hareket girdisini sağlamak için kullanılan hidrolik eyleyici sistemin hareket frekansından yüksek frekanslarda gürültü üretmektedir. Bu sebeple algılayıcılar tarafından ölçülen sistem yanıtının dijital ortamda filtrelenmesi gerekmektedir. Sistemi hareket ettirmek için hidrolik eyleyici

yerine elektrik motoru ile sürülen gürültüsü az bir mekanik sistem kullanılır ise sistem yanıtı gürültüden arındırılmış bir şekilde daha doğru okunabilir.

- Yapı modeli ile yapılan ölçümlerde, kat yer değiştirmesi ilk olarak katın ivmesinin 2. integrali alınarak bulunmuştur. Bu hesap yapılırken kullanılan çeşitli düşük ve yüksek geçiren filtrelerden ve yapılan sayısal integral işlemlerinden kaynaklı oluşabilecek hatalar sebebiyle hesaplanan kat yer değiştirmesi verisinin doğruluğunun araştırılması gerekmiştir. Bu doğrulama işlemi için çalkalanmada dalga yüksekliğinin takibinde kullanılan ultrasonik algılayıcılar kat yer değiştirmesinin ölçümünde de kullanılmıştır. Bu işlem sonrası ivme verisinden hesaplanan yer değiştirme verisi doğrulanmıştır. Ayrıca ultrasonik algılayıcının kat yer değiştirmesini ölçmede ivmenin 2. integraline kıyasla daha zahmetsiz bir biçimde kullanılabilceği görülmüştür.
- Çalkalanma kuvvetinin ölçüldüğü deneyler sırasında çalkalanma kuvveti ilk olarak kabı hareket ekseninde sıkıştırıcı 2 yük hücresi ile ölçülmeye çalışılmıştır. Bu ölçüm denemelerinde basma kuvveti yük hücreleri tarafından doğru okunabilirken, çekme kuvveti yük hücreleri sıvı tankına mekanik bağlantı ile bağlı olmadığından doğru okunamamıştır. Bu sebeple sıvı tankı tasarımını güncellenerek yük hücresi cıvatalı bağlantı ile doğrudan sıvı tankına bağlanmıştır ve doğru sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışmanın güvenilirliğini arttırmak için gelecekte bir takım ek çalışmalar yapılabilir. Öncelikle bu çalışmada tek boyutta titreşimler incelenmiştir. Deprem senaryosu için daha gerçekçi olan iki boyutlu deprem girdisi ve bina modelinin iki boyuttaki titreşimlerinin incelenmesi gelecekte sonuçların doğruluğunun arttırılması için yapılması planlanan çalışmalardandır. Ayrıca bu sönümleyicilerin sahadaki binalar üzerindeki performansının daha gerçekçi olarak anlaşılması için sadece alüminyum ve demirden oluşan bina modelleri yerine betonarme bina modellerinin kullanılması da gelecekteki çalışmanın güvenilirliğini arttıracaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **El-Khoury, O., Adeli, H.,** (2013). Recent Advances on Vibration Control of Structures, *Computational Methods in Engineering*, 20, 4, 353-360.
- [2] **Fisco, N.R., Adeli, H.,** (2011). Smart Structures: Part I—Active and Semi-Active Control, *Scientia Iranica*, 18, 3, 275-284.
- [3] **Symans, M.D., Constantinou, M.C.,** (1999). Semi-active Control Systems for Seismic Protection of Structures: a State-of-the-Art Review, *Engineering Structures*, 21, 6, 469-487.
- [4] **Bigdeli, Y., Kim, D.,** (2016). Damping Effects of The Passive Control Devices on Structural Vibration Control: TMD, TLC and TLCD for Varying Total Masses, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20, 1, 301-308.
- [5] **Fisco, N.R., Adeli, H.,** (2011). Smart Structures: Part II — Hybrid Control Systems and Control Strategies, *Scientia Iranica*, 18, 3, 285-295.
- [6] **Den Hartog, J.P.,** *Mechanical Vibrations*, The Damped Vibration Absorber: Chapter 3.3 (sf: 93-106), New York, Dover Publications, Inc., (1956).
- [7] **Ozer, M.B., Royston, T.J.,** (2005). Extending Den Hartog's Vibration Absorber Technique to Multi-Degree-of-Freedom Systems, *Journal of Vibration and Acoustics*, 127, 4, 341-350.
- [8] **Sun, L. M., Fujino, Y., Pacheco, B. M., Chaiseri, P.,** (1992). Modelling of Tuned Liquid Damper (TLD), *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 43, 1, 1883-1894.
- [9] **Marivani, M., Hamed, M.S,** (2009). Numerical Simulation of Structure Response Outfitted with a Tuned Liquid Damper, *Computers and Structures*, 87, 17-18, 1154-1165.
- [10] **Marivani, M., Hamed, M.S,** (2014). Numerical Study of Slat Screen Pattern Effect on Design Parameters of Tuned Liquid Dampers, *Journal of Fluids Engineering*, 136, 6, 201-212.
- [11] **Shimizu, T., Hayama, S.,** (1986). Nonlinear Response of Sloshing Based on the Shallow Water Wave Theory, *JSME International Journal*, 30, 263, 806-813.
- [12] **Malekghasemi, H., Ashasi-Sorkhabi, A., Ghaemmaghami, A.R., Mercan, O.,** (2015). Experimental and Numerical Investigations of The Dynamic Interaction of Tuned Liquid Damper-Structure Systems, *Journal of Vibration and Control*, 21, 14, 2707-2720.
- [13] **Marivani, M., Hamed, M.S,** (2011). Numerical Modeling of Sloshing Motion in a Tuned Liquid Damper Outfitted with a Submerged Slat

Screen, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 65, 7, 834–855.

- [14] **Kanok-Nukulchai, W., Tam, B.T.**, (1999). Structure–Fluid Interaction Model of Tuned Liquid Dampers, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 46, 9, 1541–1558.
- [15] **Koli, G.C., Kulkarni, V.V.**, (2010). Simulation of Fluid Sloshing in a Tank, *Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol II*, London, England.
- [16] **Grant, J., Prakash, M., Semercigil, S.E., Turan, F.Ö.**, (2015). Sloshing and Energy Dissipation in an Egg: SPH Simulations and Experiments, *Journal of Fluids and Structures*, 54, 4, 74-87.
- [17] **Lee S.K., Park, E.C., Min, K.W., Lee, S.H., Chung, L., Park, J.H.**, (2007). Real-Time Hybrid Shaking Table Testing Method for The Performance Evaluation of a Tuned Liquid Damper Controlling Seismic Response of Building Structures, *Journal of Sound and Vibration*, 302, 3, 596–612.
- [18] **Jin, Q., Li, X., Sun, N., Zhou, J., Guan, J.**, (2007). Experimental and Numerical Study on Tuned Liquid Dampers for Controlling Earthquake Response of Jacket Offshore Platform, *Marine Structures*, 20, 4, 238-254.
- [19] **Xin, Y., Chen, G., Menglin, L.**, (2009). Seismic Response Control with Density-Variable Tuned Liquid Dampers, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8, 4, 537-546.
- [20] **Lee, S.K., Min, K.W., Lee, H.R.**, (2011). Parameter Identification of New Bidirectional Tuned Liquid Column and Sloshing Dampers, *Journal of Sound and Vibration*, 330, 7, 1312-1327.
- [21] **Raok, V.**, Experimental and Numerical Studies on Tuned Liquid Damper, *M.Sc. thesis*, Department of Civil Engineering National Institute of Technology, Orissa, (2013).
- [22] **Ikeda, T.**, (2010). Non-Linear Dynamic Responses of Elastic Two-Story Structures with Partially Filled Liquid Tanks, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 45, 3, 263–278.
- [23] **Love, J.S., Tait, M.J.**, (2013). Parametric Depth Ratio Study on Tuned Liquid Dampers: Fluid Modelling and Experimental Work, *Computers & Fluids*, 79, 13-26.
- [24] **Irwin, P., Breukelman, B.**, (2001). Recent Applications of Damping Systems for Wind Response, *CTBUH 2001 6th World Congress*, Melbourne.
- [25] **Kareem, A., Kijewski, T.**, (1999). Mitigation of Motions off Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications, *Wind and Structures*, 2, 3, 201-251.
- [26] **Li, H.N., Yi, T.H., Jing, Q.Y., Hou, L.S., Wang, G.X.**, (2012). Wind-Induced Vibration Control of Dalian International Trade Mansion by Tuned Liquid Dampers, *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 848031, 1-21.

- [27] **Lee, D.D.W., Ng, M.,** (2010). Application of Tuned Liquid Dampers for The Efficient Structural Design of Slender Tall Buildings, *CBTUH Journal*, 4, 30-36.
- [28] **'erzic, J., Nagarajah, C.R., Alamgir M.,** (2010). Fluid Level Measurement in Dynamic Environments Using a Single Ultrasonic Sensor and Support Vector Machine (SVM), *Sensors and Actuators A: Physical*, 161, 1-2, 278-287.
- [29] **Akyildiz, H., Ünal, E.,** (2005). Experimental Investigation of Pressure Distribution, *Ocean Engineering*, 32, 11-12, 1503-1516.
- [30] **Rafiee, A., Pistani, F., Thlagarajan, K.,** (2011). Study of Liquid Sloshing: Numerical and Experimental Approach, *Computational Mechanics*, 47, 1, 65-75.
- [31] **Kim, S.Y., Kim, K.H., Kim Y.,** (2015). Comparative Study on Pressure Sensors for Sloshing Experiment, *Ocean Engineering*, 94, 15, 199-212.
- [32] **reed, D., Yu, J., Yehi H., Gardarsson, S.,** (1998). Investigation of Tuned Liquid Dampers under Large Amplitude Excitation, *Journal of Engineering Mechanics*, 124, 4, 405-413.
- [33] **'al, P., Bhattacharyya, S.K.,** (2010). Sloshing in Partially Filled Liquid Containers-Numerical and Experimental Study for 2-D Problems, *Journal of Sound and Vibration*, 329, 21, 4466–4485.
- [34] **Pal, N.C., Bhattacharyya, S.K., Sinha, P.K.,** (2001). Experimental Investigation of SLOSH Dynamics of Liquid-Filled Containers, *Experimental Mechanics*, 41, 1, 63-69.
- [35] **Li, H., Li, J., Zong, Z., Chen, Z.,** (2014). Numerical Studies on Sloshing in Rectangular Tanks Using a Tree-Based Adaptive Solver and Experimental Validation, *Ocean Engineering*, 82, 3, 20-31.
- [36] **Bredmose, H., Brocchini, M., Peregrine, D.H., Thais, L.,** (2003). Experimental Investigation and Numerical Modelling of Steep Forced Water Waves, *Journal of Fluid Mechanics*, 490, 217-249.
- [37] **Di Matteo, A., Lo Lacono, F., Navarra, G., Pirrotta, A.,** (2015). Innovative Modeling of Tuned Liquid Column Damper Motion, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 23, 1-3, 229-244.
- [38] **Faltinsen, O.M., Rognebakke, O.F., Lukovsky, I.A., Timokha, A.N.,** (2000). Multidimensional Modal Analysis of Nonlinear Sloshing in a Rectangular Tank with Finite Water Depth, *J. Fluid Mech.*, 407, 201-234.
- [39] **Limin, S.,** Semi-Analytical Modelling of Tuned Liquid Damper, *M.Sc. thesis*, The University of Tokyo, Tokyo, (1991).

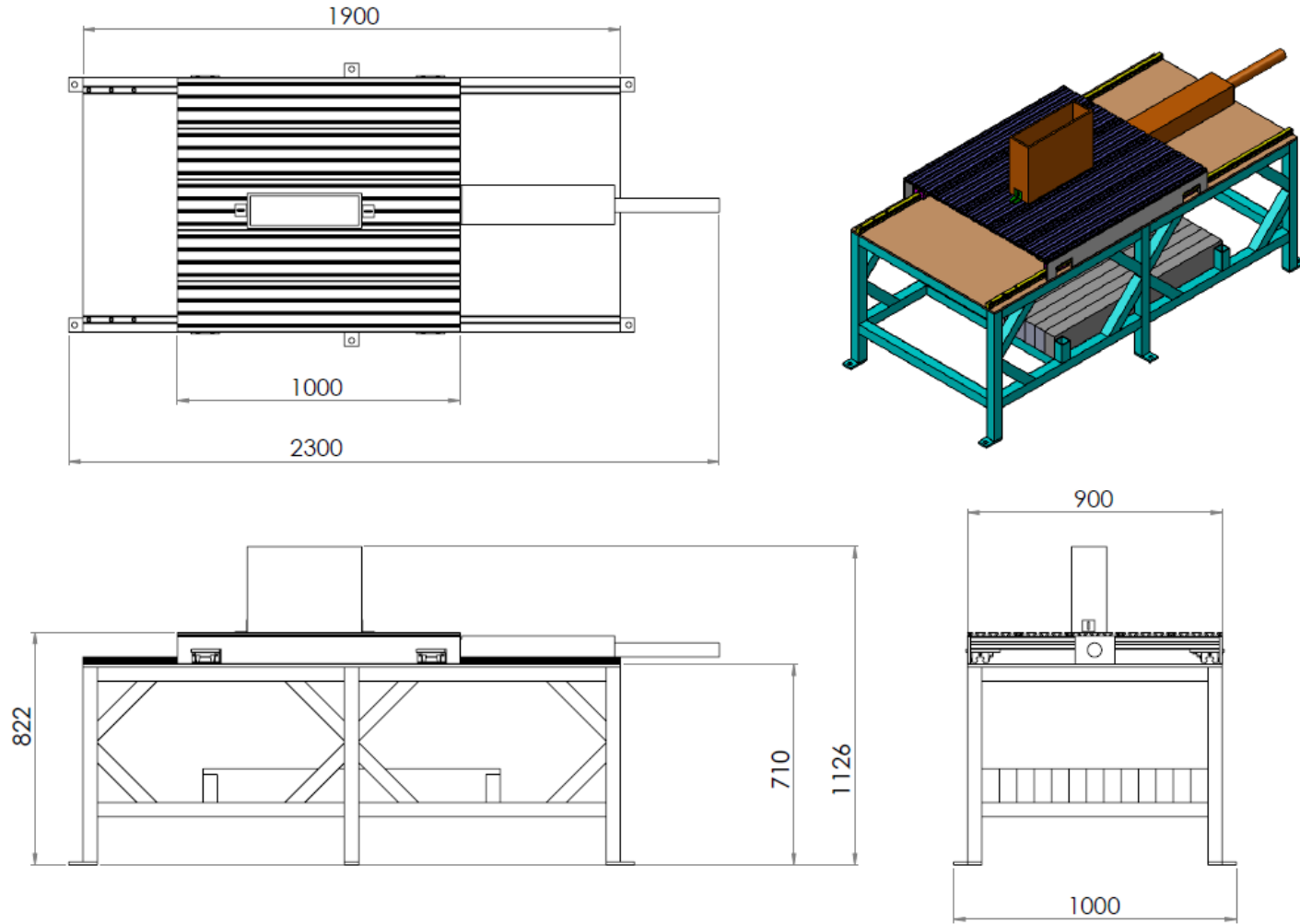
EKLER

EK 1: Deney Düzeneği Teknik Resmi

EK 2: Görüntü İşleme Algoritması

EK 3: Çalkalanma Kuvveti Hesaplama Algoritması

EK 1



Şekil Ek. 1: Deney düzeneği teknik resmi.

EK 2

```
%% Görüntü İşleme Algoritması
clc ; clear all ; close all; tic
% Çalkalanan su tankının kaydelilen görüntüsü işlenerek sıvı serbest
yüzey hareketinin elde edilmesi
% İşlenecek video dosyalarının MATLAB ortamına aktarılır
for v=199:1:203;
name= {'GOPR0', '.mp4'}; fileName = strjoin(name,num2str(v));
video = VideoReader(fileName); nFrames = video.NumberOfFrames;
vidHeight = video.Height; vidWidth = video.Width;
frames(1:nFrames) =struct('cdata',zeros(vidHeight,vidWidth,
3,'uint8'),'colormap',[]);
% Video fotoğraf karelerine dönüştürülür
% Her bir kare ayrı ayrı işlenir
for k = 1:1:nFrames;
frames(k).cdata = read(video,k); originalImage = frames(k).cdata;
% Mavi referans noktasının tespit edilir
squareb = originalImage(:,:,1) < 73 & originalImage(:,:,2) < 94 &
originalImage(:,:,3) > 82;
se = strel('rectangle',[3 3]); holesize = 500;
bwb = imclose(squareb,se); bwb = bwareaopen(bwb, holesize);
bwb = imfill(bwb,'holes');
[Bb,Lb] = bwboundaries(bwb,'noholes');squareb = bwb;
[rowb,colb] = find(squareb==1);
sumrowb = sum(rowb); sumcolb = sum(colb);
areab = sum (sum(squareb));
ylocb = sumrowb/areab; xlocb = sumcolb/areab;
% Yeşil referans noktasının tespit edilir
squareg = originalImage(:,:,1) < 122 & originalImage(:,:,2) > 135 &
originalImage(:,:,3) < 110;
bwg = imclose(squareg,se);
bwg = bwareaopen(bwg, holesize);
bwg = imfill(bwg,'holes');
[Bg,Lg] = bwboundaries(bwg,'noholes');
squareg = bwg;
[rowg,colg] = find(squareg==1);
sumrowg = sum(rowg); sumcolg = sum(colg);
areag = sum (sum(squareg));
ylocg = sumrowg/areag; xlocg = sumcolg/areag;
% Referans noktalarından faydalanılarak 1 pikselin mm cinsinden
% karşılığının bulunur
xmax = xlocb-((xlocg- xlocb)*1/38) ;
ymax = ylocb+((xlocg- xlocb)*1/38) ;
xdis = ((xlocg- xlocb)*40/38); ydis = ((xlocg- xlocb)*18/38);
pixel = ((xlocg- xlocb)/380);
% Referans noktaları ve hesaplanan piksel boyutu yardımıyla resmin
% kesilir
croppedImage = imcrop(originalImage,[xmax ymax xdis ydis]);
cropped1 = croppedImage;
% Sıvı üst yüzeyi düzeltilir
squarec = croppedImage(:,:,1) > 82 & croppedImage(:,:,2) >44 &
croppedImage(:,:,3) > 44 & croppedImage(:,:,1) < 140 &
croppedImage(:,:,2) <125 & croppedImage(:,:,3) < 125;
[rowc,colc] = find(squarec==1);
for i =1:size(rowc);
croppedImage(rowc(i),colc(i),:) = 130;
end
% Kesilen görüntü önce siyah-beyaza ve sonrada Binarye dönüştürülür
grayimage = rgb2gray(croppedImage);
threshold = graythresh(grayimage);
```

```

bw = im2bw(grayimage, threshold);
bw = grayimage > 85;
% Suda oluşan kopma ve sıçramalar silinir
se = strel('rectangle',[20 20]);
bw = imclose(bw,se);
bw = bwareaopen(bw, 250);
[B,L] = bwboundaries(bw,'noholes');
% Su hacminin kenarları tespit edilir
edges = edge(L,'sobel');
[rowl,coll] = find(edges==1);
rep=unique(coll,'rows');
sizeline = size(rep);
% Tespit edilen kenarlar su yüksekliğine dönüştürülür
for i = 1:sizeline(1);
    [rowl2,coll2] = find(coll==rep(i));
    loc(i,1)= coll(rowl2(1));
    loc(i,2)= rowl(rowl2(1));
end
% Piksel büyüklüğü sıvının yataydaki sınırları üzerinden tekrar
% hesaplanarak doğrulanır
pixel = (loc(end,1)-loc(1,1))/380; % bu kadar pixel 1mm uzunluğunda
% Tespit edilen serbest yüzey görüntünün üzerine çizilerek görsel
olarak son kez kontrol edilir
figure
imshow(cropped1);
hold on
plot ( loc(1:end-1,1), loc(1:end-1,2),'g-','Linewidth',2);
% Hesaplanan serbest her bir zaman adımı için kaydedilir
coory = 170- loc(:,2)./pixel;
coorx = loc(:,1)./pixel;
coorx(:)= coorx(:)-coorx(1);
coor(k).cdata =[coorx(:),coory(:)];
% Bir sonraki zaman adımında hesaplanacak değişkenler temizlenir
clear originalImage squareb rowb colb sumrowb sumcolb areab xlocb
ylocb cropped1;
clear i xdis ydis xmax ymax sumy sizey rowc colc squarec Bb Bg bwb
bwg holesize Lb Lg;
clear squareg rowg colg sumrowg sumcolg areag xlocg ylocg
croppedImage grayimage;
clear threshold bw se B L edges rowl coll rep sizeline rowl2 coll2
coory coorx;
end
% Kabın yatay hareketi zamana bağlı yerdeğiştirme bilgisine
dönüştürülür
Posx=(Posx-Posx(1,1))/pixel;
Amplitude = max(Posx)-min(Posx);
% Hesaplanan veriler daha sonra kullanılmak üzere kaydedilir
matfile = {fileName,'mat'};
str = strjoin(matfile, '.');
str2 = strjoin(matfile, 'Displacement. ');
save(str, 'coor');
save(str2, 'Posx');
% Ara değişkenler temizlenir
clear frames loc nFrames video vidHeight vidWidth Plot10x a b str k
fileName matfile v name coor Displacement coor Posx
end
toc
% Not: Referans noktaları ve sıvı hacmi tespit edilirken görüntüler
üzerinde gürültü giderme ve düzelme işlemleri yapılmıştır

```

EK 3

```
% Çalkalanma Kuvveti Hesaplama Algoritması
%% Görüntü işleme algoritması ile hesaplanan değerler kullanılarak
% çalkalanma kuvvetinin hesaplanması
clc; clear all; close all; tic
% İlgili video için hesaplanan yüzey profili ve diğer büyüklükler
okunur
videoName = 'GOPR0203.MP4.mat';
coor = load(videoName);
sizeCoor= size(coor.coor);
% Su tankı ile ilgili parametreler girilir
l=0.380;
width = 0.12;
zStep = 0.001;
h = round(mean(coor.coor(1,1).cdata(:,2)))/1000;
% Hesap ile ilgili sabitler tanımlanır
ro = 1000;
g = 9.81;
it = 4;
jump = 2;
senk_name = [videoName(1,1:12), 'Senk.mat'];
smat = load(senk_name);
senk = (round(smat.senk/jump)-1);
frequency = 2;
amplitude = 0.01;
timeStep = 1/119.88*jump;
jumpSize = floor((sizeCoor(2)-1)/jump)+1;
w=0;
% Su yüksekliği verisi için hatanın karesi en küçük olacak şekilde
eğri
% uydurulur
for k=1:jump:sizeCoor(2);
w=w+1;
f = round(size((coor.coor(1,k).cdata(:,1)),1)*0.006/1);
x = (coor.coor(1,k).cdata(f:end-f+1,1));
x(:) = (x(:)/(-x(1)+x(end)));
x(:) = (x(:)-x(1)-0.5)*1;
z = (coor.coor(1,k).cdata(f:end-f+1,2))/1000;
z = z-h;
Fi1 = zeros(size(x,1),it);
for i=1:1:it;
Fi1(:,i) = cos(pi*i/l*(x+1/2));
end
c = Fi1\z;
c = transpose(c);
% Beta matrisi hesaplanır
B(w,:) = c(1,:);
% Su yüksekliği verisi, uydurulan eğri kullanılarak her bir zaman
adımı
% için eşit veri noktası olacak şekilde yeniden hesaplanır
xg = (-0.5:0.002:0.5)*1;
xg = transpose(xg);
for i=1:1:it;
Fi(i,:) = cos((pi*i/l)*(xg+1/2)) ;
end
zg(w,:) = B(w,)*Fi;
clear x z c Fi1
end
zg = transpose(zg);
```

```

clear coor f k x w z
% Beta matrisinin zamana göre türevi hesaplanır
for m=1:1:jumpSize;
    if m==1;
Bt(m,:) = (B(m+1,:)-B(m,:))/(timeStep);
    elseif m==jumpSize;
Bt(m,:) = (B(m,:)-B(m-1,:))/(timeStep);
    else
Bt(m,:) = (B(m+1,:)-B(m-1,:))/2/(timeStep);
    end
end
% F'in zamana göre türevi hesaplanır
Ft= Bt*Fi;
% Fi'nin x'e göre türevi hesaplanır
for i =1:1:it;
Fix(i,:) = (-pi*i/l)*sin((pi*i/l)*(xg+l/2)) ;
end
% F'in t'ye göre türevi hesaplanır
Fx= B*Fix;
% Hız potansiyeli ifadesindeki cosinüs'lü terimin türevi alınır
for i=1:1:it;
A(i,::) = (cosh((i*pi/l)*(zg+h)))/(cosh((i*pi/l)*h));
Az(i,::) = ((i*pi/l)*sinh((i*pi/l)*(zg+h)))/(cosh((i*pi/l)*h));
end
% Hız potansiyeli ifadesi içerisindeki R matrisi hız potansiyeli
% sınır koşulu ifadesinde yerine konularak çözülür
for k=1:1:jumpSize;
    for z = 1:1:it;
        Fxi(z,:) = Fx(k,:);
    end
        Rss = Ft(k, :)/(Fi(:, :).*Az(:, :, k) -
(Fix(:, :).*A(:, :, k).*Fxi));
        R(:, k) = Rss;
end
R = transpose(R);
% R matrisinin zamana göre türevi alınır
for m=1:1:jumpSize;
    for n=1:1:it;
        if m==1;
Rt(m,:) = (R(m+1,:)-R(m,:))/(timeStep);
        elseif m==jumpSize;
Rt(m,:) = (R(m,:)-R(m-1,:))/(timeStep);
        else
Rt(m,:) = (R(m+1,:)-R(m-1,:))/2/(timeStep);
        end
    end
end
% R matrisinin hesaplanması ile hız potansiyeli her zaman adımı için
hesaplanabilir durumdadır. Bilinenler basınç ifadesinde yerine
konularak her iki duvardaki basınçlar hesaplanır
for s =1:1:jumpSize;
    for x = (-0.5*1):(1):0.5*(1);
        j = 0;
        for z = -h:0.001:0.150;
            j=j+1;
            Fix = 0;
            Fiz = 0;
            Fit = 0;
            for i=1:1:it;
                Fix1 = (i*pi/l*R(s,i))*((-sin(i*pi/l*(x+l/2)))*
(cosh(i*pi/l*(z+h))/cosh(i*pi/l*h)));

```



```

        Fiz1 = (i*pi/l*R(s,i))*
((cos(i*pi/l*(x+l/2)))*(sinh(i*pi/l*(z+h))/cosh(i*pi/l*h)));
        Fit1 = (Rt(s,i))*
((cos(i*pi/l*(x+l/2)))*(cosh(i*pi/l*(z+h))/cosh(i*pi/l*h)));
        Fix = Fix1+ Fix;
        Fiz = Fiz1+ Fiz;
        Fit = Fit1+ Fit;
    end
    % Su tankının sağ ve sol duvarı üzerindeki basınç dağılımı
    % lmm aralıklarla hesaplanır
    P(s,j,(x/l+1.5))= ro*(Fit+0.5*(Fix.^2+Fiz.^2)
end
end
end
Pright= zeros(jumpSize,1);
Pleft = zeros(jumpSize,1);
% Duvarlardaki basınçlar birim alan ile çarpılıp toplanarak sağ ve
% sol duvardaki çalkalanmadan dolayı oluşan kuvvetler bulunur
for s=1:1:jumpSize;
    j=0;
    for z=-h:0.001:zg(1,s);
        j=j+1;
        Pleft(s,1) = P(s,j,1)+ Pleft(s,1);
    end
    j=0;
    for z=-h:0.001:zg(end,s);
        j=j+1;
        Pright(s,1) = P(s,j,2)+ Pright(s,1);
    end
    Forcec(s,1) =(4* frequency * frequency *pi*pi* amplitute *cos(2*pi*
frequency*(s-senk)/119.88*jump))*width*h*1*ro;

    Forces(s,1) =(2*frequency*frequency*pi*pi*amplitute* amplitute
*sin(2*pi* frequency *(s-senk)/119.88*jump)*sin(2*pi* frequency*(s-
senk)/119.88*jump))*width*h*1*ro;

end
% İki duvar için bulunan kuvvetler birbirlerinden çıkartılarak
% çalkalanmadan dolayı oluşan net çalklanma kuvveti hesaplanır
Force = (Pleft-Pright)*zStep*width+Forcec+Forces;
Force = transpose(Force);
% Çalklanma kuvveti sonradan kullanılmak üzere kaydedilir
avr = mean(abs(Force));
sizeV = size(videoName,2);
matfile = {videoName(1,1:sizeV-4), 'mat'};
str = strjoin(matfile, 'Force2. ');
matfile2 = {videoName(1,1:13), 'mat'};
str2 = strjoin(matfile, 'Jump. ');
save(str, 'Force');
save(str2, 'jump');
% Tanımlanan ara değişkenler temizlenir
clear Fit1 Fit Fix Fix1 Fiz Fiz1 g i k l m n Rss s szeCoor videoName
sizeV matfile str
clear it j jumpSize str2 timeStep xg zg
toc

```


ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ufuk Tosun
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 22/09/1990, Düzce
E-posta : ufuktosun@yandex.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, TOBB ETÜ, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2016, TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2013-2015	TOBB ETÜ	TÜBİTAK Projesi Araştırma Asistanı
2015-2016	TOBB ETÜ	Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi

YABANCI DİL:

- İngilizce
- Almanca (Sınırlı Çalışma Yetkinliği)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Tosun, U., Aghazadeh, R., Ozer, M. B., 2016, Experimental setup design for liquid sloshing, Vibroengineering Procedia of The JVE 23rd Vibroengineering Conference 2016 İstanbul, Turkey, October 7-9, İstanbul, Turkey.**