



# **Çalkalanan Titreşim Sönümleyiciler Kullanarak Yapıların Depreme Dayanıklılığının Arttırılması**

**Program Kodu: 1001**

**Proje No: 113M401**

**Proje Yürütücüsü:**

**Yrd. Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER**

**Araştırmacı:**

**Yrd. Doç. Dr. Cüneyt SERT**

**Bursiyer(ler):**

**Reza AGHAZADEH**

**UfuK TOSUN**

ARALIK 2015

ANKARA



## ÖNSÖZ

Bu proje çalışmasında genelde bir depo (kap) içinde çalkalanabilen bir sıvıdan oluşan 'çalkalanan sıvılı titreşim sönümleyicilerin' yapıların sismik titreşimini azaltmadaki etkisi sayısal benzetimler ve deneysel çalışmalar ile incelenmiştir. Çalışmamızda özellikle daha alçak binalarda görülen yüksek doğal frekanslı titreşimleri azaltacak yeni kap tasarımları denenmiş ve sayısal benzetim ile başarılı sonuçlar veren bir kap tasarımı deneysel olarak test edilmiştir. Bu çalışmada sıvılı titreşim sönümleyicilerin yapının sinüs ya da deprem girdisine olan titreşim yanıtını düşürdüğü gösterilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda gerçekçi betonarme bina modelleri üzerinde tüm eksenlerden gelen sismik girdilere yanıtın incelenmesi bu yaklaşımın pratikleşmesi yolunda önemli bir adım olacaktır.

Bu çalışma TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversite'sindeki Makine Dinamiği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Sağladığı laboratuvar alanı, altyapı olanakları ve bursiyer öğrencilere verilen öğrenim ücreti bursundan dolayı proje ekibimiz TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkürlerini sunmaktadır.

Proje yürütücüsü fedakar çalışmalarından dolayı bursiyerler Ufuk TOSUN ve Reza AGHAZADEH'e ve araştırmacı Yrd. Doç. Dr. Cüneyt SERT'e teşekkür eder. Ayrıca ekibimiz deneysel çalışmalarda çok önemli bir yer tutan sarsma tablasının ve masasının üretimi ve montajını gerçekleştiren TOBB ETÜ Makine Mühendisliği teknisyenimiz Kamil ARSLAN'a minnettardır.

En önemlisi proje önerimizi destekleyen ve bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan TÜBİTAK ARDEB'e 113M401 nolu projemize verilen destekten dolayı teşekkür etmeyi bir borç biliriz.

## ÖZET

Bu çalışmada çalkalanan sıvılı titreşim sönümleyicilerin yapıların sismik titreşimi üzerine olan etkileri incelenmiştir. Araştırmaya ilk önce yalın bir dikdörtgen kabın sinüs girdisi altındaki çalkalanmasının sayısal benzetimi ile başlandı. Daha sonra dikdörtgen kabın içindeki sıvının sinüs girdisi altında çalkalanması deneysel olarak incelendi ve sayısal benzetim sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldı.

Yalın çalkalanma çalışmaları tamamlandıktan sonra dikdörtgen kaplı çalkalanan sıvı sönümleyici doğal frekansları değiştirilebilen basit bir yapı modeline konuldu ve yapı-sıvı etkileşimli sistem için sinüs girdisi altında sayısal benzetimler gerçekleştirildi. Bu sayısal benzetimler bir sonraki basamaktaki deneysel çalışmalar ile karşılaştırılarak genelde benzer eğilimler görüldü.

Daha sonra sayısal benzetim metotları kullanılarak çalkalanan sıvılı titreşim sönümleyicilerin performansını arttıran kap tasarımları denendi. Sayısal benzetimler gerçekleştirilen çok gözlü kap tasarımının düşük katlı yapılara denk gelen yüksek frekanslı yapıların titreşimini azaltmada etkili olduğunu gösterdi.

Sonraki çalışmalarda dikdörtgen kaplı değişik doğal frekanslara sahip yapıların deprem girdisi altında sönümleyicili ve sönümleyicisiz yanıtları deneysel olarak incelenerek çalkalanan dikdörtgen kaplı sönümleyicilerin bina titreşimine etkisi incelendi. Çok gözlü kap için benzeri deneysel çalışmalar yapıldı ve sayısal benzetimlere paralel olarak düşük katlı binalara denk gelen frekanslarda bu kap tasarımının bina modeli titreşimini azaltmada etkin olduğu deneysel olarak da gösterildi.

Projenin son kısmında literatürde olmayan kapların rezonans frekansı etrafında çalkalanırken sıvı yüksekliğini ve kap duvarlarına etkileyen kuvveti bulmaya yarayan görüntü işleme bazlı yeni bir ölçüm metodu geliştirildi.



## **ABSTRACT**

In this study performance tuned sloshing vibration absorbers on seismic response of structures are investigated. The study starts with numerical simulation of sloshing of fluid in a rectangular container. Later, the numerical results are compared with experimental test results for sinusoidal input.

After completion of pure sloshing studies, the sloshing vibration absorber is placed on a building model whose natural frequencies can be adjusted. Numerical simulations and experimental investigations of the fluid-structure coupled system is performed and trends for numerical simulations and test results are found to be similar.

In the next step, new fluid container design which are aimed to increase the performance of the sloshing absorber is investigated. Numerical simulations have shown that a multiple cavity container design was effective on buildings with high natural frequencies which corresponds to low storey buildings.

The next section of this report compares the experimental test results of building with no sloshing vibration absorber and with absorber under earthquake input. Initially, the results were obtained for a sloshing absorber with rectangular container. Next, earthquake input test results for the structure model with multiple cavity container are presented. The numerical simulation results are confirmed with experimental measurements which has shown that the multiple cavity container can efficiently decrease a system with high natural frequency (which is the behavior of lower storey buildings).

In the last part of the project, a new method which can measure the height of the fluid-air interface and measure the force applied by the sloshing fluid on the container walls using an image processing approach is introduced.

# İÇİNDEKİLER

<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ÖZETİ</b>	<b>6</b>
<b>3. GEREÇ ve YÖNTEM</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Çalkalanma Sayısal Benzetim Çalışmaları Metodolojisi:</b>	<b>11</b>
3.1.1 Modelin Çizimi ve Malzeme Seçimi:	11
3.1.2 Fiziksel Modüllerin Tanımlanması:	12
3.1.3 Çözüm Ağı ve Çözüm	13
3.1.4 Çözüm:	13
3.1.5 Çözüm Sonrası Veri İşleme	14
<b>3.2 Çalkalanma Deneysel Çalışmaları Deneysel Çalışma Düzenegi</b>	<b>14</b>
3.2.1 Düzenegin Temel Bileşenleri	14
3.2.2 Sensörler:	18
3.2.3 Montaj:	23
3.2.4 Veri Toplama Sistemi	24
<b>3.3 Yapı-Çalkalanan Sıvı Etkileşimli Sistemlerin Sayısal Benzetimi</b>	<b>27</b>
3.3.1 Yapı-Sıvı Etkileşimli COMSOL Sayısal Benzetimleri:	28
3.3.2 Yapı-Sıvı Etkileşimli ANSYS-FLUENT Sayısal Benzetimleri:	29
<b>3.4 Yapı-Çalkalanan Sıvı Etkileşimli Sistemin Deneysel Düzenegi</b>	<b>30</b>
<b>3.5 Yenilikçi Kap Tasarımları ile Çalkalanan Sıvı Sönümleyicilerin Performansının Yükseltilmesi Çalışmaları</b>	<b>35</b>
<b>3.6 Yapı-Çalkalanan Sıvı Etkileşimli Sistemin Deprem Girdisine Yanıtı</b>	<b>35</b>
<b>3.7 Çok Gözlü Kabın Sinüs ve Deprem Girdilerine Yanıtının Deneysel İncelenmesi</b>	<b>36</b>
<b>3.8 Görüntü İşleme Metotları ile Sıvı Yüksekliğinin ve Duvarlara Etkiyen Kuvvetin Hesaplanması</b>	<b>37</b>
<b>4. BULGULAR</b>	<b>39</b>
<b>4.1 Çalkalanma Sayısal Benzetim Çalışmaları Sonuçları</b>	<b>39</b>
4.1.1 Durum 1:	39



4.1.2	Durum 2: _____	40
4.1.3	Durum 3: _____	41
4.1.4	Durum 4: _____	41
4.1.5	Durum 5: _____	42
4.1.6	Durum 6: _____	43
4.1.7	Çalkalanma Sayısal Benzetim Sonuçlarının Yorumlanması _____	44
<b>4.2</b>	<b>Çalkalanma Deneysel Çalışmaları _____</b>	<b>44</b>
4.2.1	Durum 1: _____	44
4.2.2	Durum 2: _____	45
4.2.3	Durum 3: _____	46
4.2.4	Durum 4: _____	46
4.2.5	Durum 5: _____	47
4.2.6	Durum 6: _____	48
4.2.7	Sayısal Benzetim ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması _____	48
4.2.8	Çalkalanma Deneysel Çalışmaları Sonuçlarının Genel Değerlendirilmesi: _____	52
<b>4.3</b>	<b>Yapı-Çalkalanan Sıvı Etkileşimli Sistemin Sayısal Benzetim Sonuçları: _____</b>	<b>53</b>
4.3.1	Durum 1: _____	55
4.3.2	Durum 2: _____	56
4.3.3	Durum 3: _____	57
4.3.4	Durum 4: _____	59
4.3.5	Durum 5: _____	59
4.3.6	Durumların ANSYS-FLUENT ile Sayısal Benzetimleri _____	60
4.3.7	Sayısal Benzetim Sonuçlarının Yorumlanması: _____	63
<b>4.4</b>	<b>Yapısal-Sıvı Etkileşimli Sistemin Deneysel Çalışma Sonuçları _____</b>	<b>64</b>
4.4.1	Durum 1: _____	65
4.4.2	Durum 2: _____	68
4.4.3	Durum 3: _____	71
4.4.4	Durum 4: _____	74
4.4.5	Geçici Yanıt Rejiminde Sayısal Benzetim Sonuçları ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması _____	75
4.4.6	Deneysel Çalışma Sonuçlarının Yorumlanması _____	79
<b>4.5</b>	<b>Yenilikçi Kap Tasarımları ile Çalkalanan Sıvı Sönümleyicilerin Performansının Yükseltilmesi Çalışması Sonuçları _____</b>	<b>80</b>
4.5.1	Kavisli Kap Tasarımı _____	80
4.5.2	Çok Gözlü Kap: _____	83
4.5.3	Yeni Kap Tasarımlarının Sayısal Benzetim Sonuçlarının Değerlendirilmesi _____	87



<b>4.6</b>	<b>Sıvılı-Çalkalanan Titreşim Sönümleyicili Sistemin Depreme Karşı Yanıtının Deneysel</b>	
<b>Sonuçları</b>		<b>87</b>
4.6.1	Durum 1:	88
4.6.2	Durum 2:	92
4.6.3	Durum 3:	96
4.6.4	Durum 4:	99
4.6.5	Deprem Girdisi Altında Sıvılı Çalkalanan Sönümleyicili Yapı Deneyleleri ile İlgili Sonuçlar	102
<b>4.7</b>	<b>Çok Gözlü Kap Tasarımı Deneysel Çalışmaları Sonuçları</b>	<b>103</b>
4.7.1	Çok Gözlü Kap ve Yapısal Sistemin Sinüs Tahrikine Yanıtı:	104
4.7.2	Çok Gözlü Kap ve Yapısal Sistemin Deprem Girdisine Yanıtı:	108
4.7.3	Çok Gözlü Kap için Deneysel Çalışma Sonuçlarının Yorumlanması:	110
<b>4.8</b>	<b>Kap Duvarlarına Etkiyen Kuvvetin Kamera Görüntüleri Kullanılarak Bulunması</b>	<b>110</b>
4.8.1	Duvara Etkiyen Çalkalanma Kuvvetinin Görüntü İşleme ile Bulunması Çalışmasının Sonuçlarının Yorumlanması	126
<b>5.</b>	<b>TARTIŞMA VE SONUÇ</b>	<b>128</b>
5.1	Sonuçların Genel Yorumları	128
5.2	Gelecek Çalışmalar için Düşünceler	130
5.3	Proje Sonuçlarının Çıktılara Dönüştürülmesi	131
	<i>kaynaklar listesi</i>	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
<b>6.</b>	<b>EK:</b>	<b>1</b>

## TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Literatürdeki ilgili kaynakların birbiri ile karşılaştırılması.....	7
Tablo 2. Kullanılan alüminyum profillerin mekanik ve geometrik özellikleri.....	18
Tablo 3. Veri toplamak için kullanılan analog girdi ve analog çıktı modülleri.....	25
Tablo 4. Sayısal benzetimlerde incelenen durumlar.....	39
Tablo 5. Deneysel Sonuçlar ile Sayısal Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	48
Tablo 6. Kullanılan dört modelin boyutları ve kütleleri.....	53
Tablo 7. Sayısal Benzetimlerde Kullanılacak Durumların Özellikleri.....	55
Tablo 8. Geçici yanıt rejimindeki ilk 8 tepe noktasındaki yerdeğiştirmenin titreşim sönümleyici olmayan ve olan durumlardaki oranları.....	57
Tablo 9. Geçici yanıt rejimindeki ilk 8 tepe noktasındaki yerdeğiştirmenin titreşim sönümleyici olmayan ve olan durumlardaki oranları.....	58
Tablo 10. Deney Yapılacak Durumların Özellikleri.....	65
Tablo 11. Durum 1 için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (2 mm girdi genliği).....	65
Tablo 12. Durum 1 için sönümleyici olan sistemin yanıtı (2 mm girdi genliği).....	66
Tablo 13. Durum 1 için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (4 mm girdi genliği).....	66
Tablo 14. Durum 1 için sönümleyici olan sistemin yanıtı (4 mm girdi genliği).....	67
Tablo 15. Durum 2 için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği).....	68
Tablo 16. Durum 2 için sönümleyici olan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği).....	69
Tablo 17. Durum 2 için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (3 mm girdi genliği).....	69
Tablo 18. Durum 2 için sönümleyici olan sistemin yanıtı (3 mm girdi genliği).....	70
Tablo 19. Durum 3 için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği).....	71
Tablo 20. Durum 3 için sönümleyici olan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği).....	72
Tablo 21. Durum 3 için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (3 mm girdi genliği).....	73
Tablo 22. Durum 3 için sönümleyici olan sistemin yanıtı (3 mm girdi genliği).....	73
Tablo 23. Durum 4 için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği).....	74
Tablo 24. Durum 4 için sönümleyici olan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği).....	75
Tablo 25. Kavisli Kap Sayısal Benzetimlerinde Kullanılan Model ve Çözüm Parametreleri.....	81
Tablo 26. Çok gözlü Kap Analizinde Kullanılan Bazı Önemli Parametreler.....	85
Tablo 27. Durum 1 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali).....	88
Tablo 28. Durum 1 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali).....	90
Tablo 29. Durum 2 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali).....	93
Tablo 30. Durum 2 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali).....	94
Tablo 31. Durum 3 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali).....	96
Tablo 32. Durum 3 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali).....	97
Tablo 33. Durum 4 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali).....	100
Tablo 34. Durum 4 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali).....	101





<i>Tablo 35. Düşük Genlikli Girdi için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (0,7 mm girdi genliği) .....</i>	<i>105</i>
<i>Tablo 36. Düşük genlikli girdi için sönümleyici olan sistemin yanıtı (0,7 mm girdi genliği).....</i>	<i>105</i>
<i>Tablo 37. Yüksek genlik için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği).....</i>	<i>106</i>
<i>Tablo 38. Yüksek genlik için sönümleyici olan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği).....</i>	<i>106</i>
<i>Tablo 39. Farklı kap tasarımı için elde edilen sonuçlar.....</i>	<i>109</i>

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. a. Tek Serbestlik Dereceli Sistemin b. Tek Serbestlik Dereceli Sistemin ve Sönümleyicinin Yanıtı Frekans Yanıtı c. Sönümlü ve sönümsüz bir titreşim sönümleyicinin frekans yanıtı .....	2
Şekil 2.a. Tipik bir titreşim sönümleyicinin bir bina modeline uygulanması b. Sıvılı titreşim sönümleyicinin bina modeline uygulanması .....	3
Şekil 3. Proje Boyunca Yapılan Çalışmaları Özetleyen Şema .....	10
Şekil 4. COMSOL simülasyonlarında kullanılan iki boyutlu sistem .....	11
Şekil 5. COMSOL'da model çizimi ve malzeme seçiminde kullanılan arayüzün görüntüsü .....	12
Şekil 6. COMSOL'da model çizimi ve malzeme seçiminde kullanılan arayüzün görüntüsü .....	12
Şekil 7. Kap, hava ve sıvı alanlarının çözüm ağını gösteren program arayüzünden alınan görüntü.....	13
Şekil 8. COMSOL'da yapılan ana yapının yük altındaki statik yer değiştirme yanıtı.....	15
Şekil 9. Demir kutu profiller ve polyamid levhadan oluşan ana yapının sonlu eleman modelinin a) ilk doğal frekansı ve mod şekli, b) ikinci doğal frekansı ve mod şekli ve c) üçüncü doğal frekansı ve mod şekli	15
Şekil 10. Masa ve eklenen destek profiller ve ağırlıklar.....	16
Şekil 11. İstenilen hareketi üretmek için kullanılan cihazlar: a) Hidrolik yağ deposu ve elektrikli pompa, b) hidrolik sarsıcı, LVDT, kontrolcü ve yükseltici .....	16
Şekil 12. Doğrusal kılavuz sistemi, HIWIN Lineer yataklamalar, araba modeli: HGW30CC, ray modeli: HGR30R	17
Şekil 13. Kap, platform ve doğrusal kılavuz sisteminin montajı .....	18
Şekil 14. Doğrusal değişken diferansiyel transformatörü (LVDT) doğrusal hareket eden platformun hareketini ölçmektedir.....	19
Şekil 15. İvmeölçer mıknatıs ile kaba tutturulmuştur .....	20
Şekil 16. Sıvının belli bir noktada seviyesini belirlemek için kullanılan iki adet ultrasonik seviye sensörleri .....	20
Şekil 17. Sıvının genel hareketini belirlemek için kullanılan kamera (model: GoPro, HERO3 black edition).....	21
Şekil 18. Kabın kuvvetini ölçmek için kullanılan S-tipi yük hücresi (model: ZEMIC, H3-C3-50kg-3B).....	22
Şekil 19.Sıvı ve kap sisteminin kuvvetini ölçmek için kullanılan FlexiForce, a) FlexiForce (model: Tekscan, A201), b) düzeneğe monte edilmiş FlexiForce .....	22
Şekil 20. Düzeneğin teknik resmi .....	23
Şekil 21. Test düzeneği .....	24
Şekil 22. Analog girdi ve analog çıktı modülleri.....	25
Şekil 23. Ölçüm ve control için hazırlanan LabVIEW programının ön paneli .....	27
Şekil 24. Sayısal Benzetimlerde Kullanılacak olan Fiziki Modellerin Genel Görünüşü .....	28
Şekil 25. a. Yapısal Sistem b. Yapısal Sistem ve Çalkalanan Sıvılı Titreşim Sönümleyici .....	29
Şekil 26. ANSYS ile yapılan benzetimlere ait örnek ağlar .....	30
Şekil 27. Çalkalanan sıvı deneysel çalışmaları için hazırlanan test düzeneği .....	31
Şekil 28. Üç adet 2 mm kalınlıkta ve 60 cm uzunlukta alüminyum ayak ile oluşturulmuş bina modeli ve sonlu eleman analizi, a) 28 kg ağırlık altında sistemin doğal frekansı: 1.03 Hz, b) Kritik burkulma kuvveti: 571.87 N.....	32

Şekil 29. İki tarafta iki adet 2 mm kalınlıkta ve ortada bir adet 3 mm kalınlıkta ve 60 cm uzunlukta alüminyum ayak ile oluşturulmuş bina modeli ve sonlu eleman analizi, a) 52.5 kg ağırlık altında sistemin doğal frekansı: 1.02 Hz, b) Kritik burkulma kuvveti: 1011.86 N. ....	33
Şekil 30. İki tarafta iki adet 2 mm kalınlıkta ve ortada bir adet 3 mm kalınlıkta ve 40 cm uzunlukta alüminyum ayak ile oluşturulmuş bina modeli ve sonlu eleman analizi, 3.5 kg ağırlık altında sistemin doğal frekansı: 5.17 Hz.....	33
Şekil 31. Yapısal model ve üzerinde tutturulmuş içi sıvı dolu kap.....	34
Şekil 32. Yapısal model ve ağırlıklar, kap ve sensörlerin montajı. ....	34
Şekil 33.a. Ferndale Depremin sinyali b. Ferndale Depremin zaman örnekleme değıştirilerek etkin frekansının 1Hz'e taşınmış durumu.....	36
Şekil 34. Çok gözlü kabın teknik çizimleri .....	37
Şekil 35. a. Durum 1 için dalganın kenardan 4.7 cm içeride yüksekliği b. Duvara etkiyen net kuvvetin büyüklüğü .....	40
Şekil 36. a. Durum 2 için dalganın kenardan 4.7 cm içeride yüksekliği b. Duvara etkiyen net kuvvetin büyüklüğü .....	40
Şekil 37. a. Durum 3 için dalganın kenardan 4.7 cm içeride yüksekliği b. Duvara etkiyen net kuvvetin büyüklüğü .....	41
Şekil 38. a. Durum 4 için dalganın kenardan 4.7 cm içeride yüksekliği b. Duvara etkiyen kuvvetin büyüklüğü ....	42
Şekil 39. a. Durum 5 için dalganın kenardan 4.7 cm içeride yüksekliği b. Duvara etkiyen kuvvetin büyüklüğü .	43
Şekil 40. a. Durum 6 için dalganın kenardan 4.7 cm içeride yüksekliği b. Duvara etkiyen kuvvetin büyüklüğü ....	43
Şekil 41.a. Durum 1 için dalga yüksekliği ölçüm verileri, b. Yük Hücresi ile Net Kuvvet Ölçümü .....	45
Şekil 42 a. Durum 2 için dalga yüksekliği ölçüm verileri, b. Yük Hücresi ile Net Kuvvet Ölçümü .....	46
Şekil 43. Durum 3 için dalga yüksekliği ölçüm verileri, b. Yük Hücresi ile Net Kuvvet Ölçümü .....	46
Şekil 44. Durum 4 için dalga yüksekliği ölçüm verileri, b. Yük Hücresi ile Net Kuvvet Ölçümü .....	47
Şekil 45.a. Durum 5 için dalga yüksekliği ölçüm verileri, b. Yük Hücresi ile Net Kuvvet Ölçümü .....	47
Şekil 46.a. Durum 6 için dalga yüksekliği ölçüm verileri, b. Yük Hücresi ile Net Kuvvet Ölçümü .....	48
Şekil 47. 1 cm genlikte ve 0.5 Hz frekansında sinüs çalkalanmasında 5. saniyedeki sıvının kap içindeki görünümü (üstte: sayısal benzetim, altta: deney) .....	49
Şekil 48. 2 cm genlikte ve 0.5 Hz frekansında sinüs çalkalanmasında 2. saniyedeki sıvının kap içindeki görünümü (üstte: sayısal benzetim, altta: deney) .....	50
Şekil 49. 2.5 mm genlikte ve 1 Hz frekansında sinüs çalkalanmasında 8. saniyedeki sıvının kap içindeki görünümü (üstte: sayısal benzetim, altta: deney) .....	50
Şekil 50. 5 mm genlikte ve 1 Hz frekansında sinüs çalkalanmasında 4.5 saniyedeki sıvının kap içindeki görünümü (üstte: sayısal benzetim, altta: deney) .....	51
Şekil 51. 7 mm genlikte ve 1 Hz frekansında sinüs çalkalanmasında 6. saniyedeki sıvının kap içindeki görünümü (üstte: sayısal benzetim, altta: deney) .....	51

Şekil 52. 10 mm genlikte ve 2 Hz frekansında sinüs çalkalanmasında 1.4. saniyedeki sıvının kap içindeki görünümü (üstte: sayısal benzetim, altta: deney).....	52
Şekil 53. Rezonanstaki yapının sönümleyicisiz yanıtı----, Çalkalanan Titreşim Sönümleyici ile Yanıtı ___ a. İvme b. Yerdeğiştirme c. Gerinim .....	56
Şekil 54. Rezonanstaki yapının sönümleyicisiz yanıtı ----, Çalkalanan Titreşim Sönümleyici ile Yanıtı ___ a. İvme b. Yerdeğiştirme c. Gerinim .....	57
Şekil 55. Rezonanstaki yapının sönümleyicisiz yanıtı ----, Çalkalanan Titreşim Sönümleyici ile Yanıtı ___ a. İvme b. Yerdeğiştirme c. Gerinim .....	58
Şekil 56. Durum 1'deki sistem için rezonanstaki yapının çalkalanan titreşim sönümleyici ile 1mm zemin hareketi altındaki ___, 3mm zemin hareketi altındaki yanıtı--- a. İvme b. Yerdeğiştirme c. Gerinim .....	59
Şekil 57. Rezonanstaki yapının sönümleyicisiz yanıtı ----, Çalkalanan Titreşim Sönümleyici ile Yanıtı ___ a. Yerdeğiştirme b. Gerinim.....	60
Şekil 58. Rezonanstaki yapının sönümleyicisiz yanıtı ----, Çalkalanan Titreşim Sönümleyici ile Yanıtı ___ a. Yerdeğiştirme b. Gerinim.....	61
Şekil 59. Rezonanstaki yapının sönümleyicisiz yanıtı ----, Çalkalanan Titreşim Sönümleyici ile Yanıtı ___ a. Yerdeğiştirme b. Gerinim.....	61
Şekil 60. Durum 1'deki sistem için rezonanstaki yapının 3mm zemin hareketi altındaki hareketi ----, 3mm zemin hareketi altındaki yanıtı titreşim sönümleyici ile hareketi ___ a. Yerdeğiştirme b. Gerinim .....	62
Şekil 61. Durum 1'deki sistem için rezonanstaki yapının çalkalanan titreşim sönümleyici ile 1mm zemin hareketi altındaki ___, 3 mm zemin hareketi altındaki yanıtı--- a. Yerdeğiştirme b. Gerinim.....	62
Şekil 62. Durum 1 için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değiştirme (2 mm girdi genliği) .....	66
Şekil 63. Durum 1 için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değiştirme (4 mm girdi genliği) .....	67
Şekil 64. Durum 2 için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değiştirme (1 mm girdi genliği) .....	69
Şekil 65. Durum 2 için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değiştirme (3 mm girdi genliği) .....	70
Şekil 66. Durum 3 için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değiştirme (1 mm girdi genliği) .....	72
Şekil 67. Durum 3 için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değiştirme (3 mm girdi genliği) .....	73
Şekil 68. Durum 4 için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değiştirme (1 mm girdi genliği) .....	75
Şekil 69. Durum 2 için yapının geçici rejimde yer değiştirmesinin rezonans frekansındaki (1 Hz) deney ile ölçülen değerleri ---- Sönümleyici olmadan ___ Sönümleyiciyle .....	76
Şekil 70. Durum 3 için yapının geçici rejimde yer değiştirmesinin rezonans frekansındaki (2Hz) değerleri ---- Sönümleyici olmadan ___ Sönümleyiciyle .....	77
Şekil 71. Durum 4 için yapının geçici rejimde yer değiştirmesinin rezonans frekansındaki (3.5Hz) değerleri ---- Sönümleyici olmadan ___ Sönümleyiciyle .....	77
Şekil 72. Durum 1 için yapının geçici rejimde yer değiştirmesinin sönümleyici ile iki farklı girdi için değerleri ---- Zemin Hareket Girdisi 4mm ___ Zemin Hareket Girdisi 2mm .....	78
Şekil 73. Durum 1 için 3 mm zemin titreşim genliği altında 3.6 saniyede sıvı-hava ara yüzünün görünümü a. Deneysel Sonuç b. Sayısal Benzetim Sonucu .....	79

Şekil 74. Sayısal benzetim modeli ile test edilecek olan kavisli kap modeli.....	81
Şekil 75. Kavisli ve dikdörtgen köşeli kapların rezonans frekansındaki (1 Hz) a. Kat Yerdeğiştirme b. İvme c. Gerinim yanıtlarının karşılaştırılması (----Kırmızı: Kavisli Kap, ___ Mavi: Dikdörtgen Kap) .....	82
Şekil 76. Kavisli ve dikdörtgen köşeli kapların rezonans frekansındaki (1.2 Hz) a. Kat Yerdeğiştirme b.İvme c. Gerinim yanıtlarının karşılaştırılması (----Kırmızı: Kavisli Kap, ___ Mavi: Dikdörtgen Kap) .....	82
Şekil 77. Çok Gözlü Kap Tasarımı a. Kap tasarımının içinde sıvı yok iken b. Kap tasarımının yarısı dolu iken c. Kap tasarımının tüm gözleri dolu iken.....	83
Şekil 78. Farklı kap uzunlukları ve sıvı yükseklikleri için doğal frekans değerleri.....	84
Şekil 79. Çok gözlü kap tasarımında gözlerinin yarısı dolu iken ve kabın gözleri boşken yanıtı a. Kat yerdeğiştirme b. İvme c. Gerinim (----Kırmızı: Çok gözlü yarısı dolu kaplı sistem yanıtı, _____ Mavi: Çok gözlü içinde sıvı olmayan boş kaplı sistemin yanıtı ) .....	86
Şekil 80. Çok gözlü kap tasarımında gözlerinin tamamı dolu iken ve kabın gözleri boşken yanıtı a. Kat yerdeğiştirme b. İvme c. Gerinim (----Kırmızı: Çok gözlü tamamı dolu kaplı sistem yanıtı, _____ Mavi: Çok gözlü içinde sıvı olmayan boş kaplı sistemin yanıtı ) .....	86
Şekil 81. Durum 1 için gerinimin rms ve maksimum değerleri .....	89
Şekil 82. Durum 1 için kat yer değiştirmesinin rms ve maksimum değerleri (1. sinyal).....	89
Şekil 83. Durum 1 için gerinim rms ve maksimum değerleri (2. sinyal) .....	90
Şekil 84. Durum 1 için kat yer değiştirmesinin rms ve maksimum değerleri (2. sinyal).....	90
Şekil 85. Durum 1 için ideal çalkalanan sıvı yüksekliğinde elde edilen yanıtın çalkalanan sıvı olmadan elde edilen yanıtı oranı (düşük maksimum girdi genliği).....	92
Şekil 86. Durum 2 için gerinimin rms ve maksimum değerleri (1. sinyal) .....	93
Şekil 87. Durum 2 için yer değiştirmenin rms ve maksimum değerleri (1. sinyal) .....	93
Şekil 88. Durum 2 için gerinimin rms ve maksimum değerleri (2. sinyal) .....	94
Şekil 89. Durum 2 için yer değiştirmenin rms ve maksimum değerleri (2. sinyal) .....	95
Şekil 90. Durum 2 için ideal çalkalanan sıvı yüksekliğinde elde edilen yanıtın çalkalanan sıvı olmadan elde edilen yanıtı oranı (düşük maksimum girdi genliği).....	95
Şekil 91. Durum 3 için gerinimin rms ve maksimum değerleri (1. sinyal) .....	97
Şekil 92. Durum 3 için yer değiştirmenin rms ve maksimum değerleri (1. sinyal) .....	97
Şekil 93. Durum 3 için gerinimin rms ve maksimum değerleri (2. sinyal) .....	98
Şekil 94. Durum 3 için yer değiştirmenin rms ve maksimum değerleri (2. sinyal) .....	98
Şekil 95. Durum 3 için ideal çalkalanan sıvı yüksekliğinde elde edilen yanıtın çalkalanan sıvı olmadan elde edilen yanıtı oranı (düşük girdi genliği) .....	99
Şekil 96. Durum 4 için gerinimin rms ve maksimum değerleri (1. sinyal) .....	100
Şekil 97. Durum 4 için yer değiştirmenin rms ve maksimum değerleri (1. sinyal) .....	100
Şekil 98. Durum 4 için gerinimin rms ve maksimum değerleri (2. sinyal) .....	101
Şekil 99. Durum 4 için yer değiştirmenin rms ve maksimum değerleri (2. sinyal) .....	102
Şekil 100. Çok Gözlü Kap Tasarımın Üretim Sonrasındaki Durumu .....	104

Şekil 101. Çok gözlü kap için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değiştirme (0,7 mm girdi genliği) .....	105
Şekil 102. Çok gözlü kap için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değiştirme (1 mm girdi genliği) .....	107
Şekil 103. Deprem çalışmalarında deneysel çalışma yapılan a. Gözlerinin yarısı dolu kap durumu (Durum 2) b. Gözlerinin tamamı dolu kap durumu (Durum 3) c. Gözleri fraklı yüksekliklerde su dolu kap durumu	108
Şekil 104. Farklı kap tasarımı için elde edilen gerinim ve yer değiştirme verilerinin rms ve maksimum değerleri	109
Şekil 105. 0,5 Hz hareket frekansı ve 15 mm sıvı yüksekliği için hareket genliğinin çalkalanma kuvveti üzerindeki etkisi .....	111
Şekil 106. 1 Hz hareket frekansı ve 65 mm sıvı yüksekliği için hareket genliğinin çalkalanma kuvveti üzerindeki etkisi .....	111
Şekil 107. 2 Hz hareket frekansı ve 65 mm sıvı yüksekliği için hareket genliğinin çalkalanma kuvveti üzerindeki etkisi .....	113
Şekil 108. Kamera ve sıvı tankının yerleşimi .....	114
Şekil 109. Kameranın görüş alanı .....	114
Şekil 110. Sıvı sıçramalarının düzeltilmesi .....	116
Şekil 111. Tespit edilen serbest yüzey çizgisi .....	116
Şekil 112. Ultrasonik algılayıcıların yerleşimi .....	117
Şekil 113. Düşük büyüklükteki hareket frekansı .....	117
Şekil 114. Orta büyüklükteki hareket frekansı ve düşük hareket genliği .....	118
Şekil 115. Orta büyüklükteki hareket frekansı ve yüksek hareket genliği .....	119
Şekil 116. Yüksek büyüklükteki hareket frekansı .....	119
Şekil 117. Kullanılan koordinat sistemi .....	120
Şekil 118. Yük hücresi montajı .....	123
Şekil 119. Düşük büyüklükteki hareket frekansı .....	123
Şekil 120. Orta büyüklükteki hareket frekansı ve düşük büyüklükteki hareket genliği .....	124
Şekil 121. Orta büyüklükteki hareket frekansı ve yüksek büyüklükteki hareket genliği .....	124
Şekil 122. Yüksek büyüklükteki hareket frekansı .....	125
Şekil 123. 1 Hz doğal frekanslı sıvı yüksekliği ve 1,1 Hz hareket frekansı .....	125
Şekil 124. 1 Hz doğal frekanslı sıvı yüksekliği ve 1,2 Hz hareket frekansı .....	126

## 1. GİRİŞ

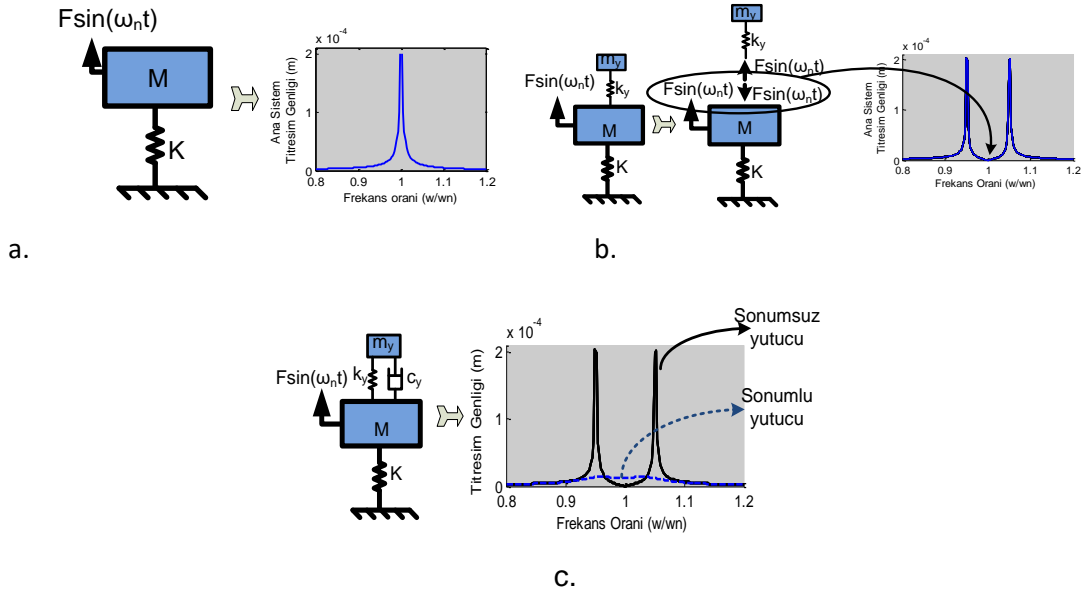
1999 yılından beri dünyanın çeşitli bölgelerinde 298 yıkıcı deprem meydana gelmiş ve bu depremlerde 473,498 kişi hayatını kaybetmiştir. Bu can kayıplarının 18,234'ü Türkiye'de olmuştur [Tekeli vd. (2010)]. 1999'daki Marmara bölgesini etkileyen depremden sonra merkezi İstanbul'a yakın olacağı öngörülen kuvvetli bir deprem beklenmektedir. Söz konusu depremin etkileyeceği bölgede yaklaşık olarak 730,000 bina vardır. Bu binaların durumu düşünüldüğünde 7.4 şiddetindeki bir depremde bu binaların yaklaşık olarak iyimser tahminlerle %4'ünün yıkılacağı öngörülmektedir. Bunun yaklaşık olarak 31,521 can kaybına mal olacağı tahmin edilmektedir [Parsons vd. (2000)]. Depremin şiddeti artarsa yıkım ve can kaybı doğrusal olmayan bir oranla artacaktır. Bina sayısının çokluğu düşünüldüğünde zayıf binaların (onbinlerce bina) depreme karşı daha dayanıklı hale getirilmesi çok büyük bir işgücü ve mali yük gerektiren bir iştir. Bu yüzden Türkiye'nin genel bina profilini oluşturan 2-6 katlı binaların depreme dayanıklılığını arttıracak ekonomik ve kolay uygulanabilir metotlar ülkemiz ve dünya için son derece önemlidir. Bu çalışmanın motivasyonu binaların depreme dayanıklılığını arttırmak için kolay uygulanabilir ve ekonomik bir metodun teknik yapılabilirliğini deneysel ve sayısal çalışmalar ile anlamaktır.

Bu projede hedef binaların deprem dayanıklılığını inşaat mühendisliği bakış açısından bakarak binaları güçlendirecek kolon ve destekler yaratmak değildir. Bu projenin amacı binanın depreme karşı göstereceği dinamik yanıtını uygulaması kolay ve ekonomik metotlarla iyileştirmektir. Bu projede probleme binaların kuvvetlendirilmesi açısından değil binanın depremde göreceği titreşim seviyesinin düşürülmesi açısından bakılmaktadır.

Pasif titreşim kontrolü titreşim sönümleyici denen mekanik sistemler kullanılarak yapılabilir. Titreşim sönümleyicinin çalışma prensibi tek serbestlik dereceli sönümsüz bir sistem üzerinde kabaca açıklanabilir. Eğer sönümlemesi düşük olan bir sisteme (yapıya) bir dış kuvvet sistemin doğal frekansında bir zorlama yaparsa ana sistem rezonans yanıtı verir. Tek serbestlik dereceli, rezonans frekansında titreştirilen bir sistemin frekans yanıtı Şekil 1a'da gösterilmiştir. Sistemin doğal frekansındaki bu yüksek genlikli yanıtını düşürmek için sisteme eşdeğer direngenliği  $k_a$  ve eşdeğer kütlesi  $m_a$  olan bir sönümleyeci eklenebilir. Genel olarak sönümleyecinin kütlesi ana sistemin kütlesinin yaklaşık olarak yüzde 1 ile 5'i arasındadır. Sönümleyecin en iyi performans sağlayacak direngenlik seçimi sönümsüz ve tek serbestlik dereceli bir sistem için basittir:

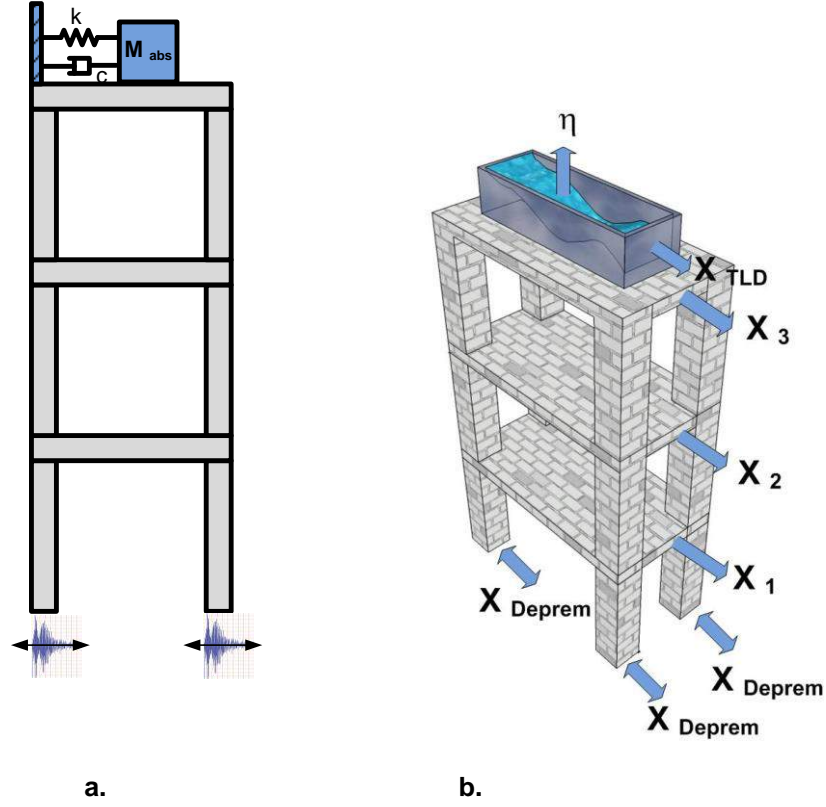
$$k_y = \frac{K}{M} \cdot m_y$$

Eğer kullanılacak sönümleyicinin kütlesi biliniyorsa, yukarıda verilmiş olan formül kullanılarak sönümleyici değeri ve sönümleyici eklendikten sonraki frekans yanıtı hesaplanırsa orijinal sistemin doğal frekansında yanıtın sıfır olduğu görülür (Şekil 1b). Sıfır genlikli yanıtın nedeni bu seçilmiş 'k<sub>a</sub>' değerinde sönümleyicinin ana sistem üzerine (yay aracılığı ile) uyguladığı kuvvetin dış kuvvet ile aynı genlikte ve ters fazda oluşudur. Bu yüzden sistemin doğal frekansında sönümleyici dış kuvvetin etkisini yok eder ve sistemin yatışkın yanıtı sıfır olur. Bu durum doğal frekans dışındaki frekanslar için geçerli değildir. Bu yüzden frekans yanıtında rezonans frekansın yakınındaki diğer frekanslardaki yanıtların genliğinde kayda değer bir düşüş yoktur. Bunun için eğer sönümleyici sistemine optimal değerde bir sönümlenme eklenirse doğal frekansta sıfır yanıt gözükmez ancak daha yaygın bir frekans bantında sönümlenme gözlenir. Sönümleyici eklenmiş durum için frekans yanıtı Şekil 1c'de gösterilmiştir. Sönümleyici olan sistemler için en iyi direngenlik ve sönümleyici değerinin bulunuşu Den Hartog tarafından yapılmıştır ve bu analitik çıkarım bu alanda genel olarak kullanılan bir bağıntıdır [Ormondroyd ve Hartog (1928)]. Bu bağıntı tek serbestlik dereceli sistemler için bulunmuştur ve çok serbestlik dereceli sistemlere uygulanışı bu sistemlerin modal analizle tek moda indirgenip bu tek mod üzerinde Den Hartog'un metodunun uygulanması şeklindedir. Ancak tek mod yaklaşımı eğer modlar birbirine yakınsa doğru yanıtlar vermez. Den Hartog'un metodunun çok serbestlik dereceli sistemlere uygulanışı ilk defa proje yürütücüsü tarafından formüle edilmiş ve yayınlanmıştır [Ozer ve Royston (2005)].



Şekil 1. a. Tek Serbestlik Dereceli Sistemin b. Tek Serbestlik Dereceli Sistemin ve Sönümleyicinin Yanıtı Frekans Yanıtı c. Sönümlü ve sönümsüz bir titreşim sönümleyicinin frekans yanıtı





**Şekil 2.a. Tipik bir titreşim sönümleyicinin bir bina modeline uygulanması b. Sıvılı titreşim sönümleyicinin bina modeline uygulanması**

Genel olarak titreşim sönümleyicilerin çalışma prensibi direngenlik elemanları tarafından dış kuvvetlere ters bir kuvvet uygulanması ve sistemin enerjisinin sönümleyici tarafından atılması üzerine dayanır. Titreşim sönümleyici prensibi binaların titreşimlerinin azaltılması amacı için uygulanmaktadır. Binanın üst katlarına kütlesi, esnekliği ve sönümleyici elemanı olan mekanik bir sistem yerleştirilir. Bu sönümleyici sistemin doğal frekansı binanın temel doğal frekansına göre ayarlanır. Bu tip titreşim sönümleyicilerin tasarımlarındaki kütleler genelde beton bloklar, direngenlik yaratan malzemeler genelde çelik kirişler ve sönümleyiciler de büyük damperler olarak kullanılmaktadır. Ancak kimi binalarda bu standart tasarımın ötesine gidilmiştir. Örneğin Taiwan'daki TAIPEI 101 binasında (460 m) titreşim sönümleyici olarak uzun çelik kablolar ile asılı bir kütle kullanılmıştır ve tipik kütle-yay-sönümleyiciden daha farklı olarak sarkaç tipi bir sönümleyici kullanılmıştır. Uygulamada titreşim sönümleyiciler binanın kütlesinin %1-2'si civarındadır. Ancak bu küçük oran bile binaların kütlelerinin büyüklüğü düşünüldüğünde titreşim sönümleyici için çok büyük kütle değeri yapmaktadır. Titreşim sönümleyicilerin yüksek kütleleri (TAIPEI 101 binasında 700 tonluk bir küredir) binaya yerleştirilmelerinde lojistik olarak sorun yaratmaktadır. Ayrıca sönümleyicinin kütlesi binanın titreşim dinamiğine göre değişmelidir. Bu yüzden eğer sönümleyicinin kütle değerinde bir değişiklik gerekirse böyle büyük bir kütlede değişiklik yapmak problem teşkil eder.

Bu sorunlar kısmi olarak sıvılı titreşim sönümleyiciler (tuned liquid vibration absorber) ile engellenebilir. Şekil 2a'da gösterilen kütle-yay-sönümleyiciden oluşan titreşim sönümleyici binaya tutturulmuş olan bir kaptaki sıvı ile değiştirilir. Böyle bir sistem temsili olarak Şekil 2b'de gösterilmiştir. Bu tip bir titreşim sönümleyicinin çalışma prensibi şöyledir. Herhangi bir dış kuvvet nedeni ile (deprem, rüzgar) bina harekete geçtiğinde sıvı eylemsizlik nedeni ile aksi yöne hareket eder. Bu hareket bulunduğu kabin duvarlarına (dolayısı ile binaya) dış kuvvetin aksi yönünde bir kuvvet uygular. Eylemsizlik ve yerçekimi kuvvetlerinden dolayı bir salınma frekansı oluşur. Aslında bu durumda elimizde standart (kütle-yay-sönümleyici) titreşim sönümleyiciye benzer bir sistem vardır. Suyun binanın ivmesine aksi yönde hareket ederek kap çeperlerinde kuvvet yaratması standart sönümleyicide kütle ve yayın ters fazda bir kuvvet yaratmasına eşdeğerdir. Çalkalanma sırasında kayma kuvvetlerinden dolayı oluşan kayıplar (genel olarak küçük bir enerji kaybıdır) sönümleyiciye karşılık gelir. Yerçekimi ve eylemsizlikten kaynaklı olarak suyun periyodik olarak salınması da standart titreşim sönümleyicideki yay-kütle etkisine denktir. Bu yüzden şekilsel olarak olmasa da fonksiyonel olarak bu sıvılı titreşim sönümleyici ve kütle-yay-sönümleyici tipi sönümleyici birbirine benzerler. Bu fonksiyonel eşdeğerliğin yanında bu tip sıvılı bir titreşim sönümleyici sisteminin standart titreşim sönümleyiciye göre bazı kullanım avantajları vardır. Bu avantajlar proje önerisinde belirtilmiştir.

Bu çalışma bu avantajlar nedeni ile sıvılı çalkalanan titreşim sönümleyicilerin basit bir bina modeli üzerinde titreşimleri nasıl etkilediğine odaklanacaktır. Proje önerisinde bu çalışmanın kapsamı çalkalanan sıvılı titreşim sönümleyicilerin basit yapılar üzerinde deneyerek çalışma prensiplerinin anlaşıldıktan sonra doğal frekansı daha yüksek olan düşük katlı bina modellerini temsil eden sistemler üzerinde uygulanabilirliğinin anlaşılması olacaktır. Bu hedefe ulaşmak için hem sayısal hem de deneysel bir yaklaşım kullanılacaktır. Proje önerisinde söz konusu sayısal problem iki ayrı basamakta incelenecektir. İlk basamakta sadece çalkalanma problemi incelenecek ve sıvının yapı ile etkileşimi hesaba katılmadan sayısal ve deneysel çalışmalar yapılacaktır. Daha sonra ise çalkalanan kap basit bir yapı modeli üzerine yerleştirilerek hem deneysel hem de sayısal çalışmalar gerçekleştirilecektir. Bu basamaklardan sonra ise yeni kap tasarımları ile çalkalanan titreşim sönümleyicinin performansının artırılması hedeflenecektir. Yukarıdaki plan proje önerisinde problem üzerindeki çalışma planını özetlemektedir. Bunlara ek olarak görülen ihtiyaç ya da fark edilen bazı literatüre katkı olanakları nedeni ile proje önerisinde belirtilen çalışmalara ek çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bunlar şöyle özetlenebilir:



- Proje önerisinde deneysel çalışmalarda sadece sinüs türü girdisi verilmesi planlanmıştı ancak titreşim sönümleyicilerin tam etkisinin anlaşılması için deneysel çalışmalarda sinüs girdisine ek olarak deprem girdileri de kullanılmıştır.
- Proje önerisinde yenilikçi kap tasarımlarının sayısal olarak deneneceği belirtilmişti. Ancak bir kap tasarımında sayısal sonuçların oldukça umut verici olmasından dolayı proje kapsamında bu yenilikçi kap tasarımı ürettirilerek deneysel olarak da incelenmiştir.
- Çalışmalar sürerken rezonans frekansındaki çalkalanmalar için bazı deney ölçüm cihazlarının deney düzeneği üzerindeki kullanımını gereksiz kılacak literatürde olmayan bir görüntü işleme yaklaşımı bulunmuştur. Kolaylık getireceği ve literatüre katkı sağlayacağı düşünülerek sadece çalkalanmanın video görüntülerinin işlenmesi ile ultrasonik seviye sensörlerini ve yük hücresinin yaptığı fonksiyonları gerçekleştirebilecek bu metot üzerine de çalışılmıştır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürdeki çalışmalar bu kısımda tablo üzerinde toparlanmıştır. Tablo 1’de çalışmalar konuya yaklaşımları açısından sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmada tablo kolonlarında kullanılan bazı özelliklerin tanımları aşağıda verilmiştir.

**Çalışma içeriği:** Bu kısımda çalışmanın deneysel içeriğinin olup olmadığı belirtilmiştir. Kimi çalışmalar hiçbir deneysel doğrulamaya girmeden sadece sayısal çalışmaların sonucunu belirtmiştir. Eğer çalkalanma ve serbest yüzey akışı problemlerinin çözümünün zorluğu düşünülürse deneysel doğrulamaya gidilmemesi bu çalışmaların güvenilirliğini azaltmaktadır.

**Yapısal Model:** Bu kısımda çalışmada kullanılan model basit bir M-K-C (kütle-direnge-lik-sönümleyici) modeli mi yoksa daha gerçekçi bir deneysel ya da sayısal bina model mi sorgulaması yapılmaktadır. Bu proje için tek serbestlik dereceli olmayan bir bina modelinin analizlerde kullanılması uygundur. Bunun temel nedeni deprem koşulları altında önerilen titreşim sönümleyicinin performansının ölçülmesinde M-K-C modelinin basit kalıp gerçekçi sonuçlar vermeyebileceğidir. Önemli performans göstergelerinden biri yapısal modeldeki gerinim ve streslerin azalmasıdır ve bu M-K-C modeli üzerinde gösterilemez.

**Akışkan Model:** Bu kısımda çalışmalarda kullanılan modelin türü belirtilmektedir. Akışkan modeli hesaplamalı akışkan dinamiği kullanılarak çözüm (Navier-Stokes denkleminin sayısal çözümü) en genel çözümdür. Her türlü kap geometrisi için ve hareket genliğinde bu metod kullanılabilir. Ticari bir yazılım (ANSYS-FLUENT, COMSOL, ADINA vb) ya da araştırmacı tarafından yazılmış bir kod kullanılabilir. Tablo 1’de CFD kolonundan kasıt Navier Stokes denkleminin herhangi bir varsayımla basitleştirilmeden numerik olarak çözümüdür. Bir başka yaygın seçenek düzleştirilmiş parçacık dinamiği (SPH) metodudur. SPH üzerine yaygın olarak kullanılan kabul edilmiş bir paket program yoktur ve bütün çalışmalarda kod araştırmacıların kendileri tarafından yazılmıştır. En son metod ise literatürde en yaygın kullanılan ve Tablo 1’de analitik metod olarak gösterilen yaklaşımdır. Navier-Stokes ve kütle korunumu denklemlerinin bazı varsayımlar yapıldıktan sonra basitleştirilmesi ve daha sonra bu varsayımlar altında analitik ya da basit sayısal çözümlerinin elde edilmesi ile gerçekleştirilir. Bu varsayımlar genelde küçük genlikli dalga hareketi ve bunun getirdiği doğrusallıktır. Aynı zamanda bu basitleştirme altında dalga kırılması, değişik kap geometrileri, yüksek dalgalar, çalkalanmalar gibi etkileri hesaba katmak mümkün değildir. Bu tip bir analitik yaklaşım küçük genlikli (örneğin yüksek binalardaki rüzgardan kaynaklı) titreşim ve su hareketi için uygulanabilir ancak kuvvetli deprem hareketleri için bu tarz bir yaklaşım başarılı olmaz.

**Kap Şekli:** Burada basit bir dikdörtgen kap veya başka tarz geometrilerin denenip denenmediği incelenmiştir.

**Azalım:** Uygulanan sıvı titreşim sönümleyici metodunun performans üzerine olan etkisi eğer incelendi ise çalışmada verilen sonuçlar bu kısımda belirtilmiştir. Pekçok çalışmada bu kısım yoktur çünkü çalışmaların önemli bir kısmı sıvının çalkalanmasının modellenmesi üzerine kuruludur ve yapısal titreşime olan ilgisi incelenmemiştir. Bütün çalışmalarda performans katların yer değiştiği ya da ivmesi olarak değerlendirilmiş olup yapıda oluşan stresin ya da gerininin azalmasına bakılmamıştır.

**Tablo 1.Literatürdeki ilgili kaynakların birbiri ile karşılaştırılması**

Kaynak	Çalışma İçeriği		Yapısal Model		Akışkan Model			Kap Şekli	Azalım
	Deneysel	Sayısal	Basit M-K-C	Bina Model	CFD	SPH	Analitik		
Reed vd.. (1998)	EVET	EVET	HAYIR	HAYIR	HAYIR	HAYIR	EVET	Dikdörtgen	---
Kareem vd.(1995)	---	---	---	---	---	---	---	---	Bina ivmelerinde %30-%60 azalma
Di Scuvia (2003)	HAYIR	EVET	EVET	HAYIR	HAYIR	HAYIR	EVET	Dikdörtgen	Yer değiştirmede %11-%35 azalma
Lee vd. (2007) [13]	EVET	EVET	EVET	HAYIR	HAYIR	HAYIR	EVET	Dikdörtgen	---
Jin et. al. (2007)	EVET	EVET	HAYIR	EVET	HAYIR	HAYIR	EVET	Silindir	İvmede %5-%50 azalma
Hemalatha ve Jaya (2008)	HAYIR	EVET	HAYIR	EVET	EVET	HAYIR	HAYIR	Dikdörtgen	---
Tait (2008)	HAYIR	EVET	EVET	HAYIR	HAYIR	HAYIR	EVET	Dikdörtgen	---
Marsh vd (2009)	EVET	EVET	EVET	HAYIR	HAYIR	EVET	HAYIR	Dikdörtgen	---
Xin,Chen ve Menglin (2009)	EVET	EVET	HAYIR	EVET	HAYIR	HAYIR	EVET	Dikdörtgen (dibi kumlu)	İvmede %4-%21azalma. Yerdeğiştirme de %0.5-%14 azalma
Marsh vd. (2010)	EVET	EVET	HAYIR	HAYIR	HAYIR	EVET	HAYIR	Dikdörtgen	---

Kaynak	Çalışma İçeriği		Yapısal Model		Akışkan Model			Kap Şekli	Azalım
	Deneysel	Sayısal	Basit M-K-C	Bina Model	CFD	SPH	Analitik		
Marsh vd.(2010)	Evet	Evet	HAYIR	HAYIR	HAYIR	Evet	HAYIR	Dikdörtgen	---
Ikeda (2010)	Evet	Evet	HAYIR	Evet	HAYIR	HAYIR	Evet	Dikdörtgen	---
Bulian vd. (2010)	Evet	Evet	HAYIR	HAYIR	HAYIR	Evet	HAYIR	Dikdörtgen	---
Love and Tait (2011)	Evet	Evet	HAYIR	HAYIR	HAYIR	Evet	Evet	Dikdörtgen, Silindir	---
Love and Tait (2011)	Evet	Evet	Evet	HAYIR	HAYIR	HAYIR	Evet	Dikdörtgen	Sönüm Enerjisi, Kinetik Enerji oranı=0.4-0.6
Marsh vd. (2011)	HAYIR	Evet	Evet	HAYIR	HAYIR	Evet	HAYIR	Dikdörtgen Üçgen	---
Banerji and Samanta (2011)]	HAYIR	Evet	Evet	Evet	HAYIR	HAYIR	Evet	Dikdörtgen	İvmeye %40-%60 azalma
Pinot and Geneves (2011),	Evet	Evet	Evet	HAYIR	HAYIR	HAYIR	Evet	Silindirik	---
Cassolato vd. (2011)	Evet	Evet	Evet	HAYIR	HAYIR	HAYIR	Evet	Dikdörtgen (Plakalı)	---
Hong-Han vd.(2011)	HAYIR	Evet	HAYIR	Evet	HAYIR	HAYIR	Evet	Dikdörtgen	%24 ivme azalımı
Love et. Al.(2011)	HAYIR	Evet	Evet	HAYIR	HAYIR	HAYIR	Evet	Dikdörtgen	%50 yerdeğiştirme genliği azalımı
Sarkar vd. (2013)	Evet	Evet	Evet	HAYIR	HAYIR	HAYIR	Evet	Pendulum Dikdörtgen	%50 genlik azalımı
Cruchaga vd. (2013)	Evet	Evet	HAYIR	HAYIR	Evet	HAYIR	HAYIR	HAYIR	---
Marivani vd. (2014)	HAYIR	Evet	Evet	HAYIR	Evet	HAYIR	HAYIR	Dikdörtgen	---
Min vd. (2014)	HAYIR	Evet	HAYIR	HAYIR	HAYIR	HAYIR	Evet	Dikdörtgen	---

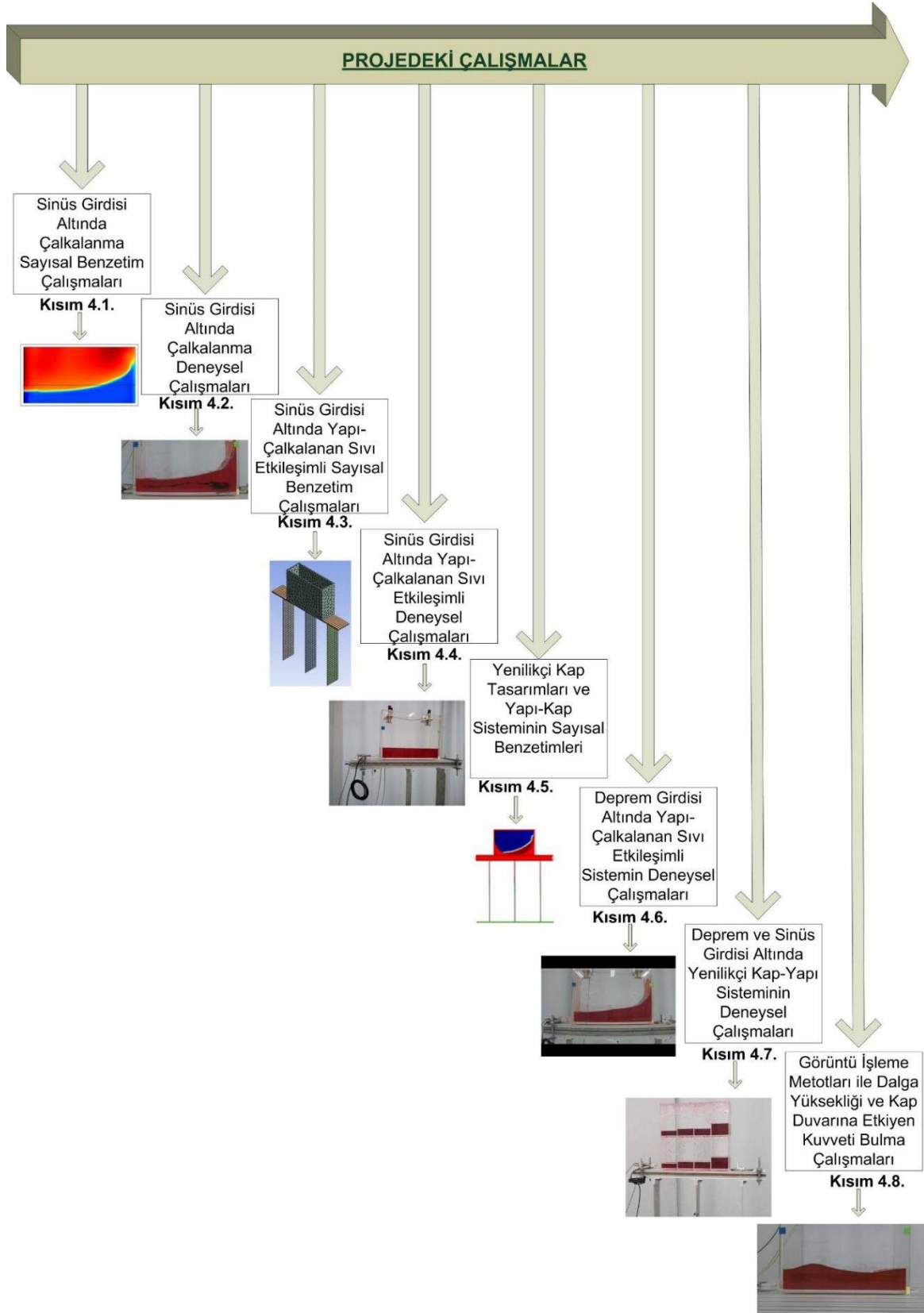
Kaynak	Çalışma İçeriği		Yapısal Model		Akışkan Model			Kap Şekli	Azalım
	Deneysel	Sayısal	Basit M-K-C	Bina Model	CFD	SPH	Analitik		
Love ve Tait (2014)	EVET	EVET	EVET	HAYIR	HAYIR	HAYIR	EVET	Dikdörtgen (Köşeleri açılı)	---
Oda vd. (2014)	HAYIR	EVET	EVET	HAYIR	EVET	HAYIR	HAYIR	Dikdörtgen	---
Lee ve Chen (2015)	EVET	HAYIR	HAYIR	HAYIR	HAYIR	HAYIR	HAYIR	Dikdörtgen (Sıvı Pompa ile harekete ediyor)	---
Grant vd. (2015)	EVET	EVET	HAYIR	HAYIR	HAYIR	EVET	HAYIR	Yumurta Şeklinde	---
Chen vd. (2015)	EVET	HAYIR	HAYIR	HAYIR	HAYIR	HAYIR	HAYIR	Küresel	%35 Maksimum %60 RMS azalma
<b>113M401 Ozer, Sert, Tosun ve Aghazadeh. (2015)</b>	<b>EVET</b>	<b>EVET</b>	<b>HAYIR</b>	<b>EVET</b>	<b>EVET</b>	<b>HAYIR</b>	<b>HAYIR</b>	<b>Dikdörtgen Ve Çok Gözlü</b>	<b>Sinüs girdisi: ~%80-%90 azalma Deprem Girdisi: %60-%70 azalma</b>

### **Çalışmanın Literatür içindeki Özgünlüğü:**

Yukarıdaki tabloda gösterildiği üzere çalışmamız literatürdeki pek çok çalışmadan daha kapsamlı bir çalışmadır.

- Hem sayısal, hem de deneysel kısmı vardır. Sayısal çalışmalarda sonlu elemanlar bina modeli ve CFD akışkan modeli kullanılmıştır.
- Elde edilen azalılar tüm çalışmalarda belirtilenlerden daha yüksektir.
- Literatürdeki hiç bir çalışmada performans ölçümü için çalışmamızda kullanılan kadar deneysel ölçüm parametresi kullanılmamıştır (Yer değiştirme, ivme ve gerinim).
- Literatürde hiç bir çalışmada projemizde bulunan görüntü işleme metotları kullanarak sıvı yüksekliği ve duvara etkiyen kuvvet ölçümü metodu yoktur.

### 3. GEREÇ VE YÖNTEM



Şekil 3. Proje Boyunca Yapılan Çalışmaları Özetleyen Şema

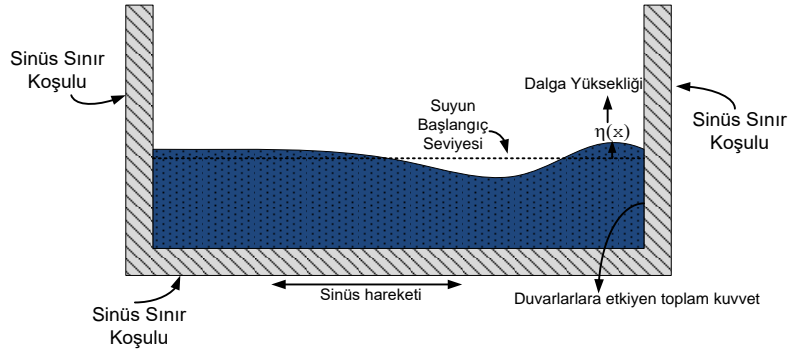


Şekil 3'te proje süresi boyunca yapılan çalışmaların özeti mevcuttur. Bu şemadaki ilk beş başlık proje önerisinde belirtilen ilk beş iş paketine denk gelmektedir. Daha sonraki çalışmalar ise proje önerisinde ön görülmemiş ancak çalışmanın bütünlüğü açısından öngörülerek yapılmış çalışmalardır. Bundan sonraki kısımlarda şemada belirtilen alt başlıklardaki çalışmaların nasıl yapıldığı açıklanmaktadır. Projenin 4. Kısımında ise çalışmalar sırasında bulunan sonuçlar verilmektedir.

### 3.1 Çalkalanma Sayısal Benzetim Çalışmaları Metodolojisi:

Bu kısımda çalkalanma olayının sayısal benzetiminin COMSOL yazılımı kullanılarak nasıl yapıldığı açıklanacaktır. Sayısal olarak modellenmeye çalışılan olay Şekil 4'de gösterildiği üzere sinus girdisi ile salınan bir kabın içindeki akışkanın hareketinin modellenmesidir. Bu akışkanın modellenmesi için iki farklı alanda analiz gerekmektedir. Bunlardan birisi mekanik alanda analizdir. Girdi mekanik bir sistem olan kaba verilmektedir. Bu mekanik sisteme etkileyen girdi, sıvıya aktarılmalı ve sıvının hareketi akışkan alan çözümü ile bulunmalıdır. Burada bir önemli nokta kabın ve sıvının net bir hareket içinde olmasıdır. Bu da kap ile beraber çözüm ağının hareket etmesi gerekmektedir. Bu nedenden dolayı COMSOL programında kullanılan modüller aşağıdaki gibidir:

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

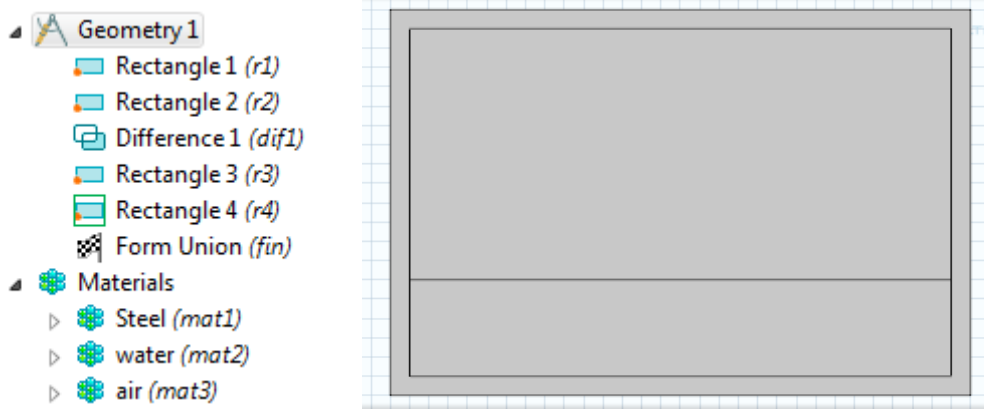


Şekil 4. COMSOL simülasyonlarında kullanılan iki boyutlu sistem

#### 3.1.1 Modelin Çizimi ve Malzeme Seçimi:

Bu üç modül belirlendikten sonra model dosyası açılır ve ilk önce geometri çizilir. Burada analizler iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiş ve üçüncü yöndeki çalkalanmanın ihmal edilebilecek kadar önemsiz olduğu varsayılmıştır. Kabın geometrisi duvar kalınlıkları ile belirlenir daha sonra analizde kullanılan su kütlelerinin yüksekliğine göre su alanı belirlenir ve kalan kısım da hava bölgesi olarak çizilir. Daha sonra bu alanlara malzeme ataması yapılır. Burada kabın malzemesi çok kritik değildir çünkü kabın duvarlarının dalgalar nedeni ile

esnemesi söz konusu değildir. Su ve hava bölgeleri de tanımlandıktan sonra bu basamak tamamlanmış olur.

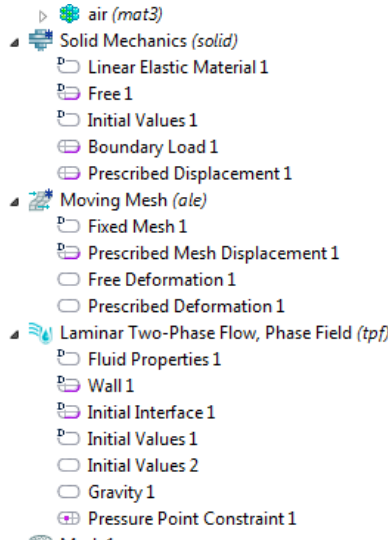


Şekil 5. COMSOL'da model çizimi ve malzeme seçiminde kullanılan arayüzün görüntüsü

### 3.1.2 Fiziksel Modüllerin Tanımlanması:

Bu noktada yukarıda değinilen üç modülde sistemin alan özelliklerinin ve sınır koşullarının detaylandırılması gerçekleşir.

**Yapısal Mekanik Modülü:** Bu kısımda kap duvarları doğrusal elastik ve izotropik malzeme olarak modellendi ve damping olarak yapısal direngenlik matrisine göre sönüm oranı tanımlandı. Kabin taban bölgesi dışındaki bütün alanların sınır koşulu 'Serbest' olarak tanımlandı. Kabin taban sınırında ise genliği ve frekansı tanımlanmış bir sinus fonksiyonu tanımlandı. Sıvı ile temasta olan duvar yüzeyleri 'Sınır Yüğü (Boundary Load)' olarak tanımlandı ve sıvının yarattığı basınç yapısal sisteme yük olarak gösterildi.



Şekil 6. COMSOL'da model çizimi ve malzeme seçiminde kullanılan arayüzün görüntüsü

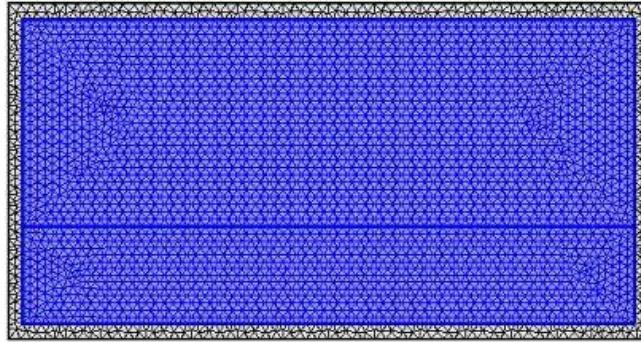
**Haraketli Ağ Modülü:** Çözüm ağının yapısal model ile birlikte hareket etmesini sağlamak için bu modül içinde hareket ağının kabin duvarları ile hareket etmesi sağlanmaktadır. Bu sayede

ağ yapısal kısmın toptan hareketi ile ve oluşan gerinimlere uyumlu olarak hareket etmektedir. Kap sert bir yapı olduğu için akışkan ve eylemsizlik kuvvetleri önemli bir gerinim yaratmaz bu yüzden ağ kabın maruz kaldığı yerdeğiştirmeye hareket eder.

**Düzgün Çift Fazlı Akış Modülü:** Bu modülde duvar sınır koşulları ve hava-sıvı katmanı tanımlanmaktadır. İki faz arasındaki başlangıç sınır bölgesi tanımlandıktan sonra bu bölgenin kalınlığı maksimum ağ boyutlarının yarısı olarak tanımlanır. Duvar sınır koşulları da hareketli duvar olarak tanımlanmıştır. Aynı zamanda Navier-Stokes denklemlerinin çözümünde yakınsama sağlanması için suni sönümleyiciler denkleminde kullanılmıştır. Ayrıca bu modülde başlangıç koşulları sıfır olarak verilmiştir ve yerçekiminin yönü belirlenmiştir.

### 3.1.3 Çözüm Ağı ve Çözüm

**Çözüm Ağı:** Comsol sayısal benzetimlerinde çözüm ağı olarak genelde en büyük boyutu 6 mm olan üçgen elemanlar kullanılmıştır. Aşağıdaki şekilde en büyük boyutu 6 mm olan ve üçgen elemandan oluşan örnek bir çözüm ağı görülmektedir. Bundan daha küçük olan eleman boyutları çok uzun süren benzetim süreleri vermiş, elemanların daha büyük olduğu benzetimlerde ise suyun çalkalanma sırasında hızla azaldığı görülmüştür. COMSOL benzetimlerinde sayısal çözüm süresi ilerledikçe sıvı korunumu sorunu yaşanmıştır. En büyük boyutu 6 mm civarı olan çözüm ağlarında sıvı eksilme sorunu simülasyonun ilk 5-10 saniyesi boyunca yaşanmamıştır. Ancak bu sürenin sonrasında sıvı eksilmesi sorun oluşturmuştur.



**Şekil 7. Kap, hava ve sıvı alanlarının çözüm ağını gösteren program arayüzünden alınan görüntü**

### 3.1.4 Çözüm:

Belirtilen sistemin çözümü için zaman adımı olarak 5 ms seçilmiştir. Eğer bu zaman adımı yakınsamayı sağlamaz ise yazılım bu değeri otomatik olarak dörtte birine düşürmektedir. Kabın salınımın frekansı ve hareketin genliği arttıkça kullanılması gereken zaman adımı da azalmaktadır. Çözüm ilk önce sadece çift faz modülünde 'Phase Initialization (Faz Tanımlama)' basamağı ile çözülmektedir. Bu başlangıç değeri kullanılarak tüm modüllerin beraber çözüldüğü gerçek çözüm yapılır.

### 3.1.5 Çözüm Sonrası Veri İşleme

Çözümünden sonra yapılan veri işleme sonucunda sol kenardan 4.7 cm uzakta olan dalganın yüksekliği ve duvarlara etkiyen net dalga kuvvetinin değeri hesaplanmaktadır. Aynı zamanda sıvı-hava yüzeyinin görünüşü dalganın yüksek olduğu bir an için alınmakta, daha sonra bu şekil kameradan alınan fotoğraflar ile karşılaştırılmaktadır.

## 3.2 **Çalkalanma Deneysel Çalışmaları Deneysel Çalışma Düzeneği**

Sayısal benzetimin sonuçlarının doğruluğu, sıvı içeren bir kabın sinüs titreşim altındaki hareketini ölçerek belirlenebilir. “Dalga yüksekliği değerleri” ve “sıvıdan kaba uygulanan kuvvet” gibi sayısal benzetimlerde belirlenen çıktılar, aynı girdiler altında deneysel olarak elde edilip benzetim ile karşılaştırılması gerekir.

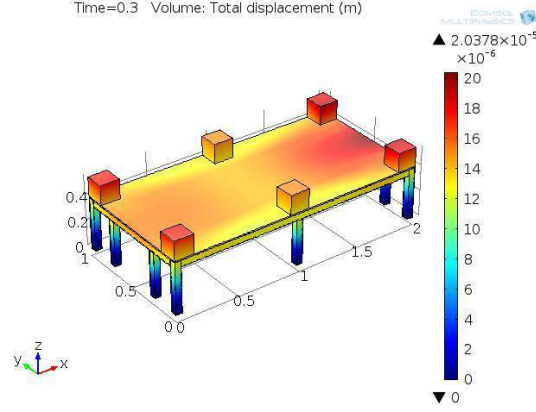
Deneysel çalışmalarda kullanılan düzeneğin temel bileşenleri, iskelet yapı, sarsıcı, kılavuzlar, doğrusal hareket eden parçalar ve algılayıcılar’dan ibarettir. Bu bileşenlerin bazıları tasarlanıp imalatı yapılmıştır veya piyasada hazır bulunan standart parçalardan seçilip temin edilmiştir. Kabın hareketini ölçmek için LVDT, kabın içindeki sıvının dalga yüksekliğini tek noktada belirlemek için ultrasonik seviye sensörleri, sıvının genel hareketini takip edebilmek için bir kamera, kuvveti ölçmek için yük hücreleri ve flexiforce kullanılmıştır. Bu bölümde düzeneğin çeşitli parçaları açıklanacaktır.

### 3.2.1 Düzeneğin Temel Bileşenleri

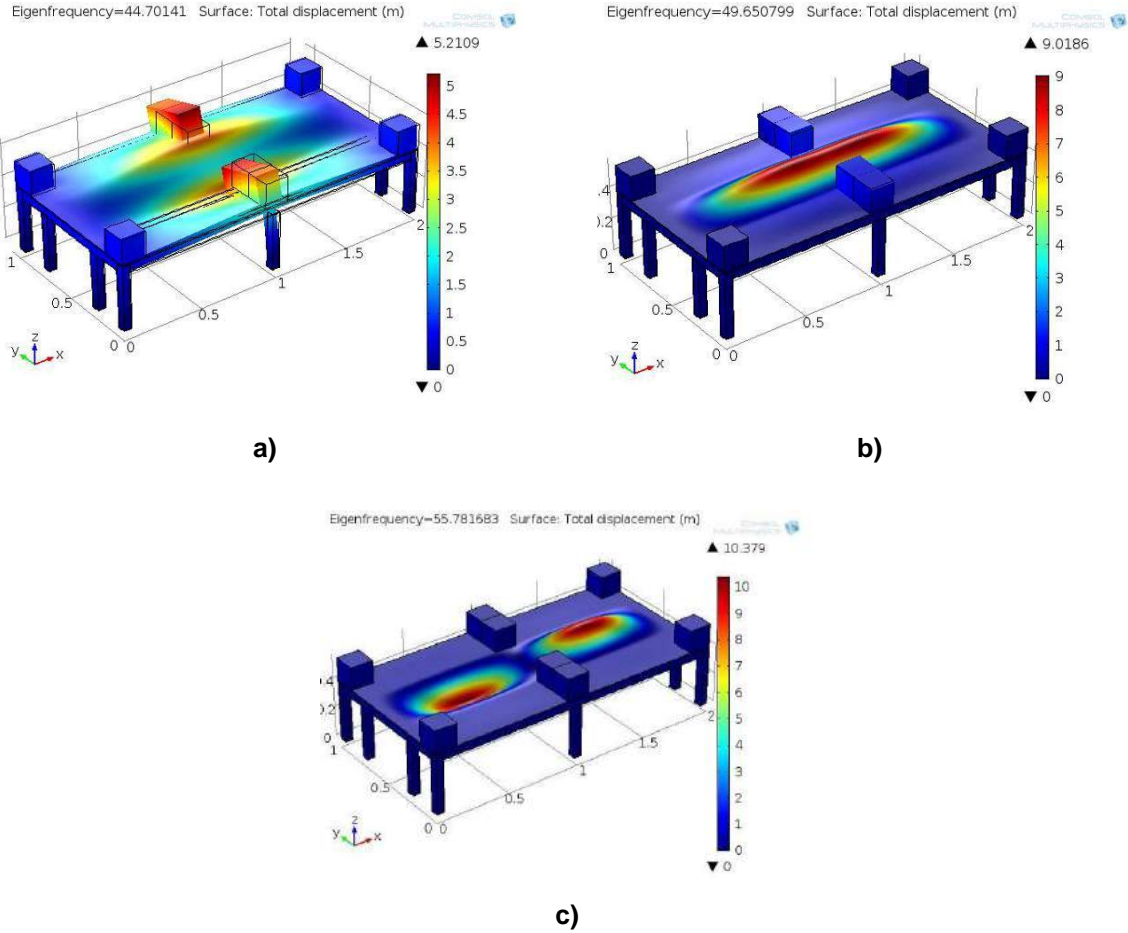
**İskelet Yapı:** Düzeneğin çeşitli parçalarını monte edip bir arada tutabilmek için bir ana yapıya ihtiyaç vardır. Bu yapı istenilen rijitliği sağlayıp başka titreşim kaynaklarından gelen titreşimlerin yapıya aktarılmasını önlemektedir. Hidrolik eyleyici ve doğrusal hareket eden parçalar ve kılavuzlar bu yapının üzerine bağlanmaktadır. Bu nedenle yapının yüzeyi yeterince düz olmalıdır ve parçaları bir arada tutmak için gereken alanı sağlaması gerekmektedir. Yapının yüksekliği, statik ve dinamik analizleri ve çalışma kolaylığı gibi kıstaslar göz önünde bulundurulurken hesaplanabilir.

Doğru iskelet yapının tasarlanması için masa şeklinde basit bir model ele alınıp sonlu eleman modelleri COMSOL’da oluşturulup analiz edilmiştir. Masanın ayakları ve çerçevesi için demir kutu profiller ve yüzeyi için poliamid levha kullanılmıştır. Analizlerde yapının üstüne monte edilecek parçalar küp şeklinde kütleler ile temsil edilmektedir. Hareket yönünde masaya aktarılan kuvvet ise maksimum 800 N olarak hesaplanıp modele girilmiştir. Şekil 8’de Görüldüğü gibi statik yer değiştirme açısından bu model uygundur (maksimum statik yer değiştirme:  $2.04 \times 10^{-5}$  m). Ayrıca analizlerde kullanılan model basit bir yapıdır ve imalat sırasında masanın rijitliğini arttıracak parçalar ve ağırlıklar eklenip maksimum yer değiştirme değeri düşecektir. Şekil 9’da bu modelin ilk üç doğal frekansları ve titreşim biçimleri verilmiştir.

Görüldüğü gibi düşük doğal frekanslar sadece poliamid levhaya aittir ve uygun ağırlık parçaları vasıtasıyla, Şekil 10'da gösterildiği gibi, levhanın doğal frekansı ve dolayısıyla düzeneğin rijitliği artırılabilir.



Şekil 8. COMSOL'da yapılan ana yapının yük altındaki statik yer değiştirme yanıtı



Şekil 9. Demir kutu profiller ve polyamid levhadan oluşan ana yapının sonlu eleman modelinin a) ilk doğal frekansı ve mod şekli, b) ikinci doğal frekansı ve mod şekli ve c) üçüncü doğal frekansı ve mod şekli

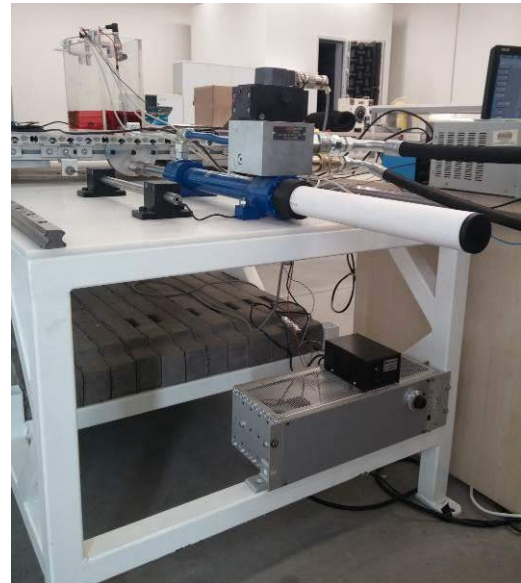


**Şekil 10. Masa ve eklenen destek profiller ve ağırlıklar**

**Sarsıcı:** Sinüs veya diğer istenilen sarsılma hareketlerini simüle edip kaba aktarabilmek için elektrikli pompa ile çalışan bir hidrolik sarsıcı kullanılmıştır. Sarsıcı alt taraftan somun ve civata ile masaya ve hareket yönünde esnemez bir çubuk ve kalın bir pim ile kaba tutturulmuştur. Sarsıcıyı çalıştırabilmek için istenilen sarsılma sinyali bilgisayardan gönderilip yükselticiden ve kontrolcüden geçirilerek hidrolik sarsıcıya verilmektedir. İstenilen hareketi üretebilmek için bir LVDT pistonun hareketini ölçüp, kontrol sinyali olarak kontrolcüye göndermektedir. Şekil 11'de hidrolik yağ deposu ve elektrikli pompa solda ve hidrolik sarsıcı, LVDT, kontrolcü ve yükseltici sağda verilmiştir.



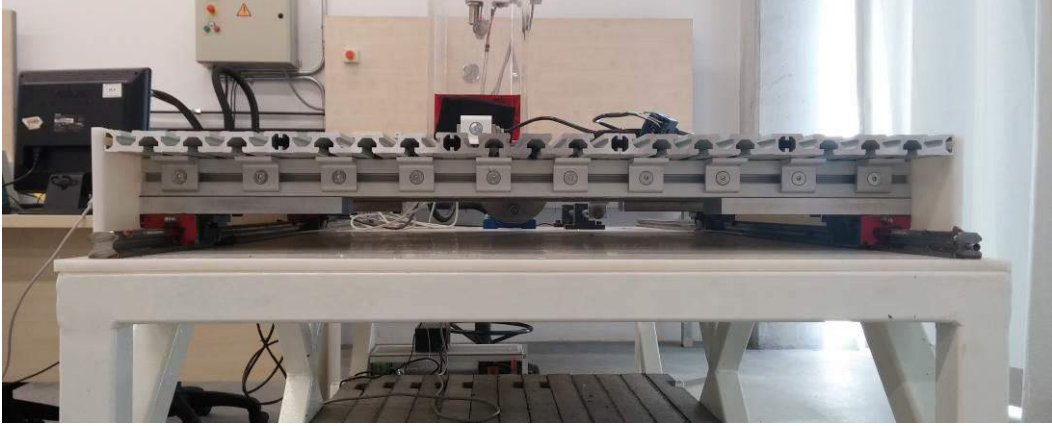
**a)**



**b)**

**Şekil 11. İstenilen hareketi üretmek için kullanılan cihazlar: a) Hidrolik yağ deposu ve elektrikli pompa, b) hidrolik sarsıcı, LVDT, kontrolcü ve yükseltici**

**Kılavuzlar:** Kap ve içerisindeki sıvıyı yalnızca yatay yönde hareket edebilecek şekilde sınırlayabilmek için doğrusal kılavuzlar kullanılmaktadır. Doğrusal kılavuz bir ray ve rayın üzerindeki bilyeli kızaktan oluşmaktadır ve ray, bilyeli kızığın hareketini yönlendirmektedir. Bilyeli kızak, yumuşak hareketi ve yapının rijitliğini sağlayabilmek için devridaim bilyeleri içermektedir. Doğrusal kılavuz yüksek rijitlikte, yüksek yük taşıma kapasitesine ve düşük sürtünme katsayısına sahip olması sebebiyle yüksek ivmelerde de kullanılabilir. Ancak doğrusal kılavuzların çok hassas bir şekilde takılması gerekir. Rayların birbirine mümkün olduğunca paralel olması çok önemlidir. Bu projede parçaların yatay yönde doğrusal hareketini sağlayabilmek için iki adet ray ve her rayın üstünde iki adet araba piyasada mevcut doğrusal rulmanlardan seçilmiştir. Raylar civata ile masaya tutturulup kurulum prosedürü takip edilerek paralellikleri sağlanmıştır. Araba üstündeki yükler ve diğer dinamik ve statik kuvvetler göz önünde bulundurularak, uygun rulmanlar seçilmiştir. Şekil 12 raylar ve arabalardan oluşan doğrusal kılavuz sistemi ve bu sistemin montajını göstermektedir.





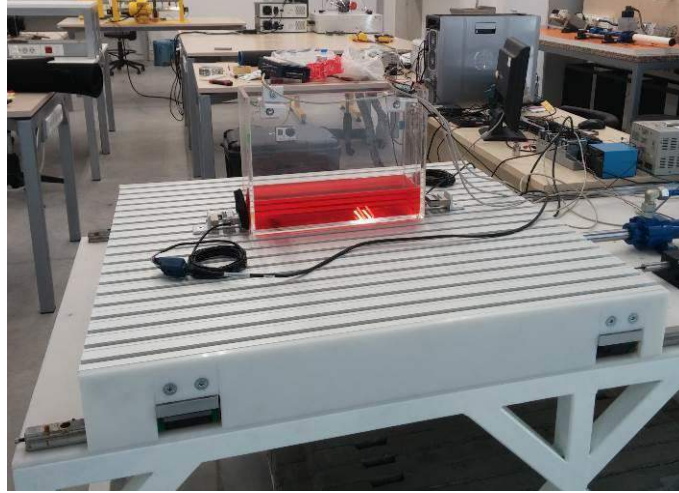
**Şekil 12. Doğrusal kılavuz sistemi, HIWIN Linear yataklamalar, araba modeli: HGW30CC, ray modeli: HGR30R**

**Doğrusal hareket eden parçalar:** Bu projenin amaçlarından biri, sayısal benzetimin doğruluğunu belirlemek için, içi sıvı dolu bir kabın titreşim altındaki tepkisini ölçüp sayısal benzetim sonuçları ile karşılaştırmaktır. Projenin sonraki aşamasında ise sıvı ve kap sistemi tek katlı basit bir bina modeli üzerinde kullanılacaktır. Kap esnemez ve optik olarak saydam olan pleksiglas malzemeden yapılmıştır ve arabaların üstüne monte edilmiş bir platformun üzerine tutturulup arabalar ve platform ile beraber hareket etmektedir. Platform rijit ve yüzeyi pürüzsüz bir yapı olmalıdır. Mekanik ve geometrik özellikleri Tablo 2’de gösterilen hazır alüminyum profiller kullanılmıştır. Bu profilleri istenilen şekillerde rahatça birbirine bağlayıp düzgün bir yapı oluşturabilmek için standart bağlantılar mevcuttur. Şekil 13 içi sıvı dolu kap, platform ve doğrusal kılavuz sistemini bir arada göstermektedir. Güvenlik ve estetik

nedenlerden dolayı platform ve doğrusal sistemin kenarları uygun polyamid levha ile kapanmıştır.

**Tablo 2. Kullanılan alüminyum profillerin mekanik ve geometrik özellikleri**

Özellikler	Profiller	
		
	<b>22.5x180 yüzey kaplama profili</b>	<b>45x90 sigma profil</b>
<b>Uzunluk [m]</b>	1	0.9
<b>adedi</b>	5	2
<b>Atalet momenti (<math>I_x</math>) [cm<sup>4</sup>]</b>	581.2	104.7
<b>Atalet momenti (<math>I_y</math>) [cm<sup>4</sup>]</b>	11.9	28.3
<b>Alan (A) [cm<sup>2</sup>]</b>	21.8	15.6
<b>Ağırlık (m) [kg/m]</b>	5.55	3.5



**Şekil 13. Kap, platform ve doğrusal kılavuz sisteminin montajı**

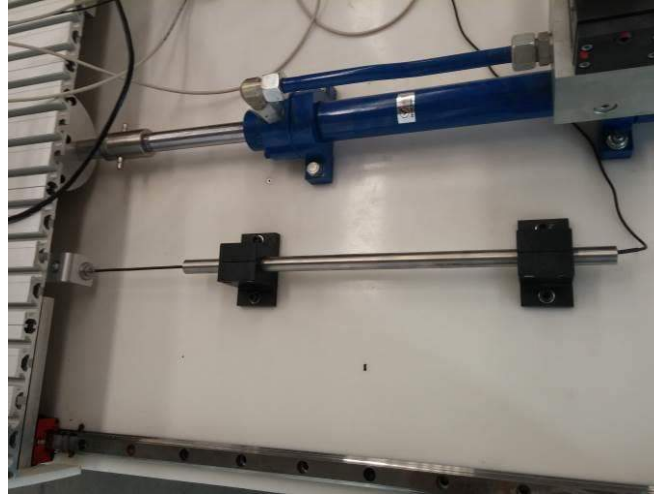
### **3.2.2** Sensörler:

Kap içerisindeki sıvının dalga yüksekliği, sıvı yüzeyinin genel hareketi, yan duvarlara uygulanan sıvı kuvveti ve kabın konumu ve ivmesi gibi istenilen çıktıları elde edip zamana göre değişimlerini belirleyebilmek için uygun sensörler seçilip kullanılması gerekmektedir. Kabın konumu ve ivmesi sırasıyla LVDT ve ivmeölçer ile ölçülmektedir. Sıvının dalga yüksekliği ve sıvı yüzeyinin genel hareketini belirlemek için ultrasonik seviye sensörleri ve kamera



kullanılmaktadır. Kuvvet ölçümleri ise yük hücreleri ve flexiforce ile yapılmaktadır. Aşağıda bu sensörler düzenek üzerinde çekilen fotoğrafları, açıklamaları ile beraber verilmiştir.

**LVDT:** LVDT(doğrusal değişken diferansiyel transformatörü) gövde içinde serbestçe hareket eden bir nüve vasıtasıyla doğrusal yer değiştirmeyi ölçebilmektedir. Nüve bir vida ile nesneye bağlanıp diğer tarafı gövde içinde serbestçe hareket edebilmektedir. LVDT'nin gürültü ve parazitlere karşı duyarlılığı azdır. DC-LVDT uygun bir voltaj ile (9-28 VDC) beslenir ve bilgisayar veya PLC tarafından tanımlanacak 0-5 VDC veya 4-20 mA çıktı sağlar. Şekil 14 platform ve hidrolik sarsıcının pistonunun hareketini ölçebilmek kullanılan LVDT ve bağlantılarını göstermektedir. LVDT'nin montajı için takviye edilmiş fenolik ve diğer iletken olmayan ve düşük sıcaklık katsayısına sahip malzemelerden yapılan hazır montaj blokları mevcuttur.



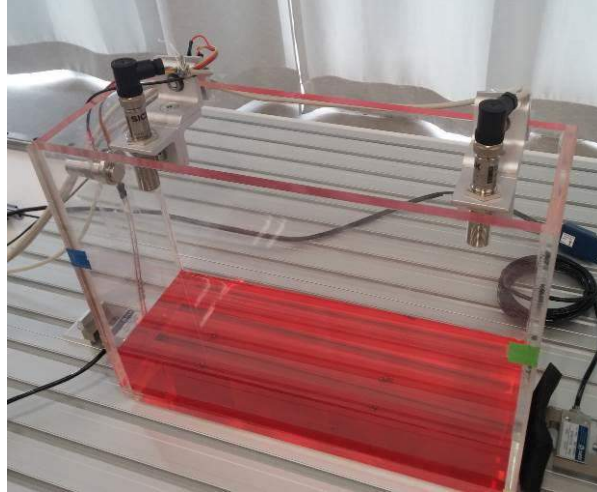
**Şekil 14. Doğrusal değişken diferansiyel transformatörü (LVDT) doğrusal hareket eden platformun hareketini ölçmektedir**

**İvmeölçer:** Kabın ivmesini ölçebilmek için piezoelektrik ivmeölçer (model: MMF, KD 41) kullanılmaktadır. Sensörün çıktısı çok düşük bir akım olduğundan dolayı sensör çıktısı yükselticiden geçerek bilgisayara aktarılır. İvmeölçer bir mıknatıs vasıtasıyla kaba tutturulmuştur.



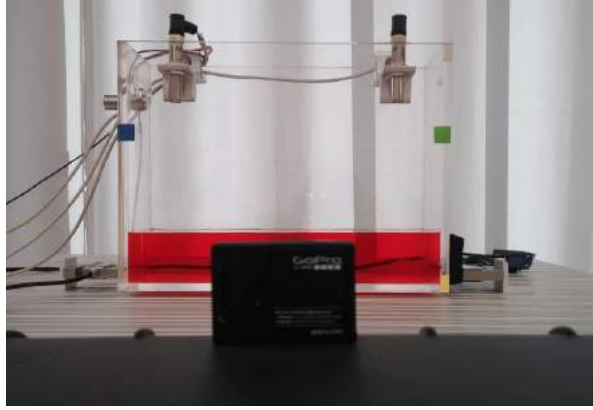
**Şekil 15. İvmeölçer mıknatıs ile kaba tutturulmuştur**

**Ultrasonik seviye sensörleri:** Sıvının tek noktada dalga yüksekliğini belirleyebilmek için ultrasonik seviye sensörü kullanılmaktadır. Ultrasonik sensör yüksek frekansta ses dalgaları üretir ve algılama mesafesinde olan bir nesneden bu dalganın yansımını alıp, sinyalin gönderme ve alma aralığını ölçerek mesafeyi belirler. Doğru ultrasonik sensörü seçebilmek için algılama mesafesi, tarama alanı, çözünürlük ve doğruluk gibi özelliklere dikkat edilmelidir. Şekil 16'da düzenek üzerinde kullanılan 30 mm – 250 mm algılama mesafe aralığına sahip iki adet ultrasonik sensör (model: SENSICK, UM 18-11116) gösterilmektedir. Bu sensörler düz köşebentler ile kaba tutturulmuştur ve deneyden önce iki adet somun ile istenilen konuma getirilip hizalanmaktadırlar.



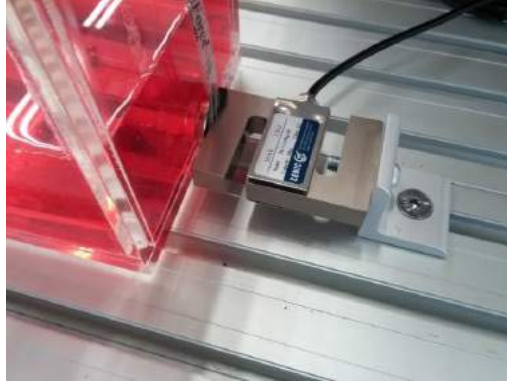
**Şekil 16. Sıvının belli bir noktada seviyesini belirlemek için kullanılan iki adet ultrasonik seviye sensörleri**

**Kamera:** Sıvının genel hareketini takip edebilmek için uygun bir kamera kaydı yapılmaktadır. Gerekli kontrast farkını yaratmak için sıvı gıda boyası ile boyanmıştır ve sıvı yüzeyinin yüksekliği kamera fotoğraflarına görüntü işleme metotları uygulanarak ölçülmektedir. Deney sırasında kamera hareketsiz tutturulup düz bir açı ile kabın içindeki suyun hareketini görüntülemektedir. Bu projede sayısal benzetim ve görüntü işleme gereksinimleri göz önünde bulundurularak Şekil 17’de gösterildiği gibi bir kamera (model: GoPro, HERO3 black edition) kullanılmıştır.



**Şekil 17. Sıvının genel hareketini belirlemek için kullanılan kamera (model: GoPro, HERO3 black edition)**

**Yük hücresi:** Sıvının kabın duvarına uyguladığı kuvveti ölçebilmek için kabın duvarlarına hareket yönünde hem sıvılı ve hem sıvısız olarak uygulanan kuvvetlerim ölçülüp farkları hesaplanmalıdır. Kuvvetleri belirlemek için yük hücresi kullanılabilir. Yük hücresi bir gerinim ölçer içermektedir ve algılanan kuvveti mekanik bir düzenleme ile elektrik sinyaline dönüştürebilir. Elektriksel sinyal çıkışı genellikle birkaç milivolt düzeyinde olup kullanılmadan önce yükseltici ile yükseltilmesi gerekir. Kabın kuvvetini ölçmek için 50 kg kapasiteye sahip iki adet S-tipi yük hücresi (model: ZEMIC, H3-C3-50kg-3b) iki taraftan Şekil 18’de görüldüğü gibi kaba tutturulmuştur.



**Şekil 18. Kabin kuvvetini ölçmek için kullanılan S-tipi yük hücresi (model: ZEMIC, H3-C3-50kg-3B)**

**FlexiForce:** Sıvının hareketinden oluşan kuvvet flexiforce kullanılarak da ölçülebilir. FlexiForce kuvvet sensörleri ince ve esnek baskı devrelerdir ve kuvvet ölçümü uygulamalarında kolayca entegre edilebilir. FlexiForce uygulanan yükün önceki duruma göre değişimini ve değişim oranını ölçme kapasitesine sahiptir. FlexiForce sensörü bir elektrik devresinde kuvveti algılayan direnç gibi çalışır. Sensör üzerindeki kuvvet kaldırıldığında direnci çok yüksektir. Kuvvet uygulandığında ise bu direnç düşer. Direncin değeri sensörün çıkış pimlerinden okunup kuvvetin değeri elde edilir. Şekil 19 projede kullanılan örnek bir FlexiForce'u (model: Tekscan, A201) ve düzeneğe monte edilmiş halini göstermektedir.



a)

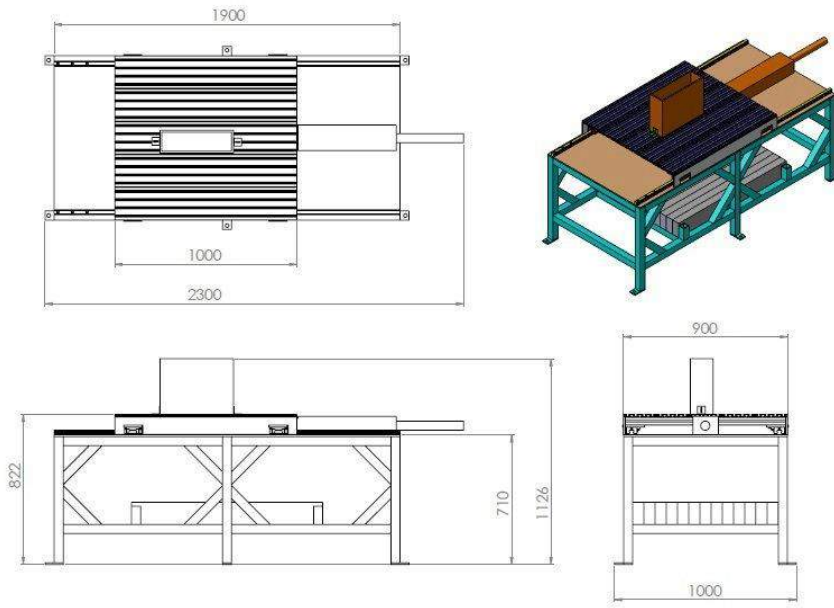


b)

**Şekil 19. Sıvı ve kap sisteminin kuvvetini ölçmek için kullanılan FlexiForce, a) FlexiForce (model: Tekscan, A201), b) düzeneğe monte edilmiş FlexiForce**

### 3.2.3 Montaj:

Düzenekte kullanılmak üzere bazı parçalar tasarlanıp teknik resimleri oluşturulduktan sonra imatları yapılmıştır, bazıları ise mevcut standart parçalardan temin edilmiştir. Yeterli araştırmalar yapıp çeşitli kataloglar incelendikten sonra uygun sensörler seçilip sipariş verilmiştir. Şekil 20 düzeneğin imalattan önce hazırlanan teknik resmini göstermektedir. Düzeneğin boyutları kabaca verilmiştir. Yukarıda bahsi geçen tüm parçalar ve bileşenler montaj prosedürleri takip edilerek birleştirilip Şekil 20'de gösterilen test düzeneği tasarlanıp üretilmiştir. Bu düzenek TOBB ETÜ Teknoloji Merkezi, Makine Mühendisliği Bölümü Makine Dinamiği Laboratuvarı'nda yer almaktadır.



Şekil 20. Düzeneğin teknik resmi



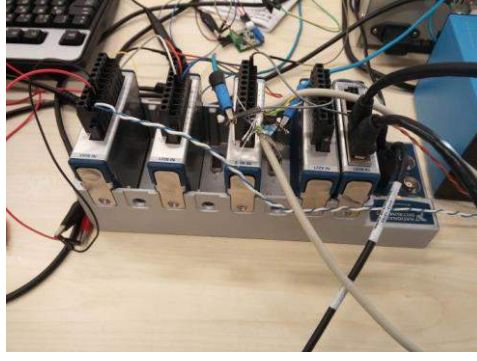
**Şekil 21. Test düzeneği**

### **3.2.4 Veri Toplama Sistemi**

DeneySEL sistemlerde sensörlerden gelen sinyalin örnekleme ve bu örnekleme bilgilerin bilgisayarın işleyebileceği dijital nümerik değerlere dönüştürülmesi veri toplama sistemi aracılığıyla sağlanmaktadır. Veri toplama işlemi birkaç basamakta açıklanabilir: ilk adımda sensörler ölçülen fiziksel parametreyi elektriksel sinyale dönüştürür ve bu sinyal uygun bir sinyal şartlandırma ile dijital değere dönüştürebilecek hale getirilir. Son olarak analog – dijital dönüştürücüler şartlandırılmış analog sinyali dijital olarak dönüştürüp bilgisayara göndermektedir. Analog sinyal ile bir cihazın çalıştırılması durumunda bu prosedürün tersi yapılarak dijital – analog dönüştürücüler kullanılmaktadır. Veri toplama cihazları ve işlemleri bir programlama dili ile oluşturulan yazılımlar ile kontrol edilmektedir. Böylece, veri toplama sistemleri donanım ve yazılım başlıkları altında incelenebilir.

#### **Veri toplama donanımları**

Bütün sensörlerden alınan sinyaller, eğer gerekirse sinyal şartlandırıcıdan geçtikten sonra, veri toplama kartları üzerinden içinde veri toplama yazılımı olan bir bilgisayara aktarılacaktır. Bu amaçla, National Instruments'ın analog girdi modüllerinin kullanılması yaygındır. Voltaj, akım ve sensörlerin diğer çıkış sinyallerinin türlerine göre uygun bir analog girdi modülünün kullanılması gereklidir. İstenilen sinyali oluşturup gönderebilmek için de uygun bir analog çıktı modülüne ihtiyaç duyulmaktadır. Deney sırasında ölçülen verileri toplamak için kullanılan modüller Şekil 22'de ve özellikleri Tablo 3'de verilmiştir. Bu modüller taşınabilir ve karmaşık ölçümler için uygun sekiz yuvalı NI cDAQ-9178 USB kasaya entegre edilmişlerdir.



Şekil 22. Analog girdi ve analog çıktı modülleri

Tablo 3. Veri toplamak için kullanılan analog girdi ve analog çıktı modülleri

Model	İşlev	Sinyal	Çalışma aralığı	Sensör / cihaz	Kanal sayısı	Adedi
NI 9221	Analog girdi	Voltaj	$\pm 60V$	<ul style="list-style-type: none"><li>• LVDT</li><li>• İvmeölçer</li><li>• FlexiForce</li></ul>	8	2
NI 9203	Analog girdi	Akım	$\pm 20mA$	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ultrasonik seviye sensörü</li></ul>	8	1
NI 9237	Köprü analog girdi	Voltaj	$\pm 25mV/V$	<ul style="list-style-type: none"><li>• Yük hüceleri</li></ul>	4	1
NI 9263	Analog çıktı	Voltaj	$\pm 10V$	<ul style="list-style-type: none"><li>• Hidrolik sarsıcı</li></ul>	4	1

### Veri toplama yazılımları

**LabVIEW:** Veri toplama sistemlerini kontrol edebilmek için BASIC, C, Pascal ve Java gibi genel amaçlı programlama dilleri ile geliştirilmiş yazılımlar kullanılabilir. Ancak, büyük ölçekli sistemler için LabVIEW, ladder logic ve MATLAB gibi ortamlar kullanılmaktadır.

Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW) “G” grafiksel programlama dilini kullanarak ölçüm ve kontrol sistemleri için güçlü bir programlama ortamı olarak National Instruments (NI) tarafından geliştirilmiştir. LabVIEW grafiksel bir arayüze sahiptir ve geleneksel programlama dillerine göre kullanımı oldukça kolaydır. Geleneksel dilleri kullanarak haftalar veya aylar içerisinde hazırlanan bir program LabVIEW ile saatler içerisinde yazılabilir. LabVIEW, veri toplamak ve veri göndermek, ölçüm almak ve sonuçları analiz etmek, verileri sunmak için özel olarak geliştirilmiştir. NI-DAQmx gibi uygulamalar sayesinde aygıt, ve enstrümanların tanımlanması ve sisteme eklenmesi kolayca yapılabilir.

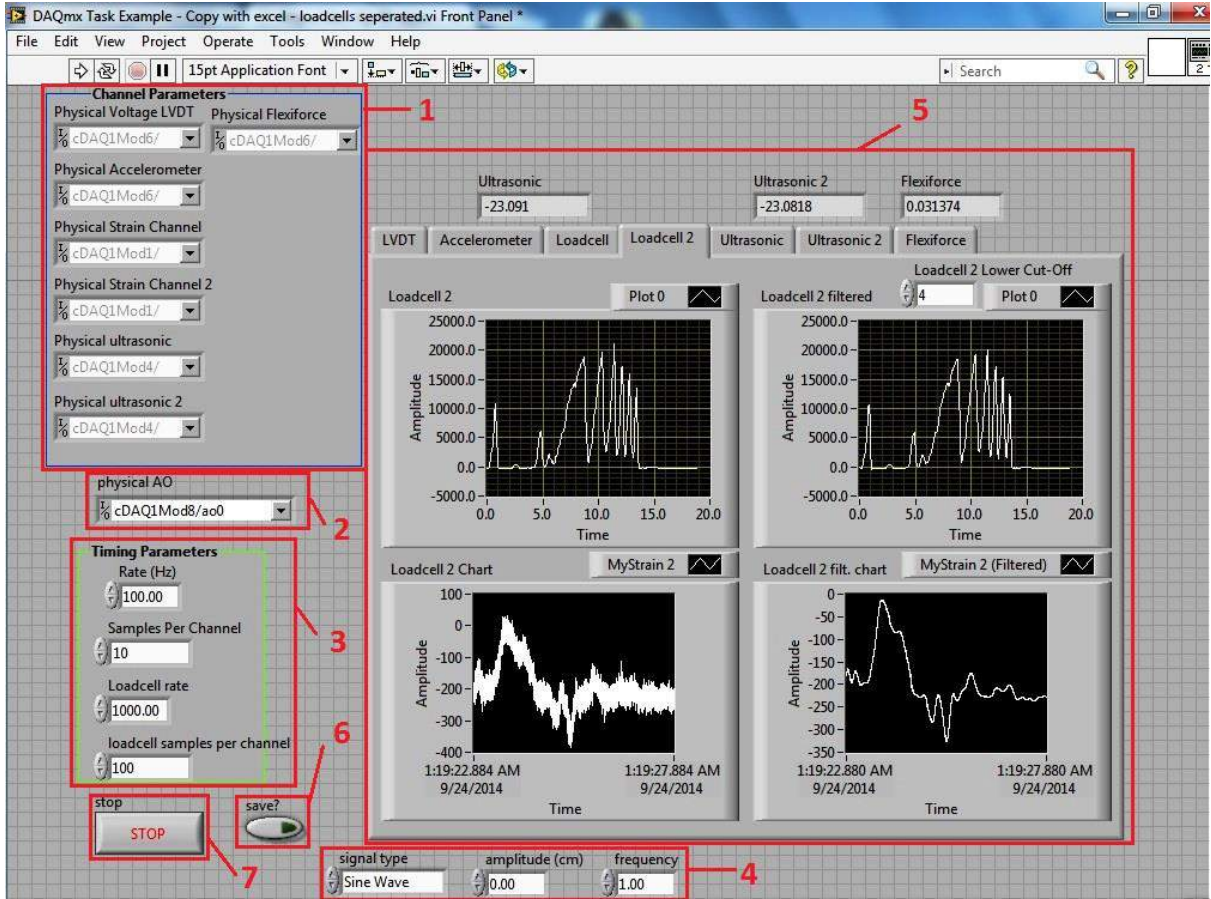
LabVIEW ekranı iki ana kısımdan oluşur: “Block Diagram” (Blok Diyagram) ve “Front Panel” (Ön Panel). Blok diyagram grafiksel kod yazma bölümü ve ön panel kullanıcı arayüzüdür.



Verileri almak, göndermek, analiz etmek, sunmak ve diğer işlemler için uygun paletler ve araçlar mevcuttur.

Şekil 23 veri toplama ve veri gönderme ve ilgili aygıtları tanımlama gibi işlemleri yapabilmek için hazırlanan LabVIEW programının ön panelini göstermektedir. Bu arayüzün nasıl çalıştığını açıklayabilmek için, ön panel yedi kısma bölünüp numaralandırılmıştır. Veri toplama donanımları başlığı altında bahsi geçen aygıtlar, ilgili kanal seçilerek, birinci ve ikinci kısımlarda bilgisayara tanımlanmıştır. Ölçüm sinyallerini alan aygıtlar ve hidrolik eyleyiciyi çalıştıran modül için uygun kanallar sırasıyla birinci ve ikinci kısımda belirlenmiştir. Üçüncü panelde örnekleme frekansı ve okunan örnek sayısı girilebilir. Bu panel zaman içerisinde okunan verilerin yoğunluğunu ve hızını belirlemektedir. Dördüncü bölümde hidrolik sarsıcıyı çalıştırmak için istenilen sinyal üretilebilir. Sinyal tipi, genliği ve frekansı bu bölümde belirlenmektedir. Beşinci kısımda sensörlerin ölçtüğü değerler grafiksel olarak görüntülenebilir. İlgili sekme seçilerek her sensörün ölçümü takip edilebilir. Ayrıca, LabVIEW'in sinyal işleme fonksiyonlarını kullanarak, ölçülen parametrelerin filtrelenmiş grafikleri de elde edilmektedir. Altı Numara ile belirlenen düğme (LED) verilerin kaydedilmesi için kullanıcıya bir seçenek sağlamaktadır. LED yandığında veriler kullanıcı tarafından kaydedilecektir. Son olarak, yedinci düğme programı durdurmak için kullanılmaktadır.





Şekil 23. Ölçüm ve control için hazırlanan LabVIEW programının ön paneli

**MATLAB Image Processing Toolbox:** MATLAB Image Processing Toolbox çekilen video görüntüsünün her bir karesini fotoğraf olarak algılayıp, bu fotoğraflar üzerinde işlem yapılabilmesini sağlamaktadır. Alınan bu fotoğraflardan kabın hareketinden bağımsız sadece kabın görüntüsü otomatik olarak kesilerek alınabilir. Daha sonra sıvı renginden sıvı hacmi tespit edilerek sıvı yüzeyinin profili elde edilir ve sıvı yüksekliği kap üzerinde bilinen ölçüler referans olarak kullanılarak hesaplanır.

### 3.3 Yapı-Çalkalanan Sıvı Etkileşimli Sistemlerin Sayısal Benzetimi

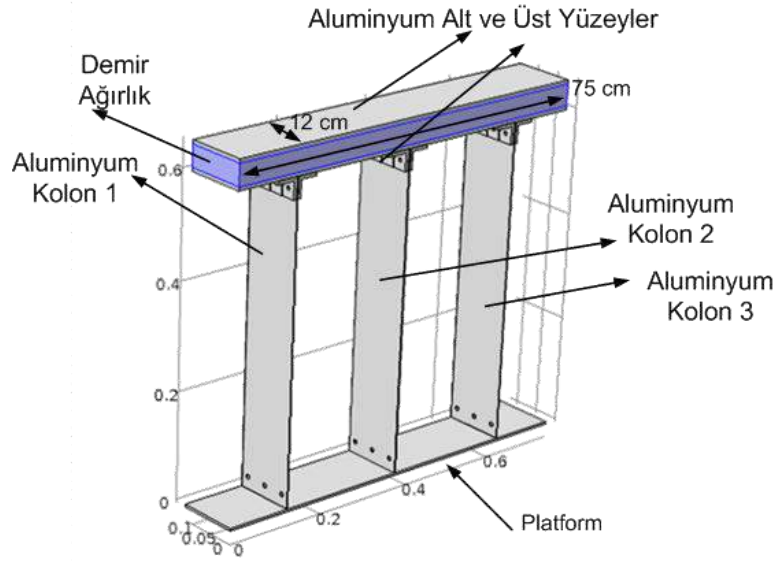
Bu kısımda yapılacak olan çalışmada amaç yapısal bir sistem ve üzerine konacak bir sıvı sistemi ile sayısal benzetim sonuçlarını elde etmektir. Bu sayısal sonuçlar kullanılarak yanıtlanmaya çalışılan bazı sorular şöyledir:

- Yapısal rezonansında titreşen bir sisteme bu rezonans frekansına ayarlanmış bir sıvılı titreşim sönümleyici konduğunda sistemin yanıtı nasıl etkilenir?
- Sıvı kütlelerinin bina kütlelerine oranı bina titreşimlerini nasıl etkilemektedir?
- Yapının doğal (rezonans) frekansından uzakta olan frekanslarda sistem titreştirildiğinde yapının titreşimi sıvılı sönümleyiciden nasıl etkilenir?

- Eğer tahrik frekansı sabit tutularak genlik arttırılırsa sıvılı titreşim sönümleyicinin sistem üzerindeki etkisi nasıl değişir?

Bu soruları yanıtlamak için sayısal benzetim yazılımları ile çözülecek değişik modeller yapılmıştır. Bu modellerin deneysel olarak test edilebilir olmasına dikkat edilmiştir.

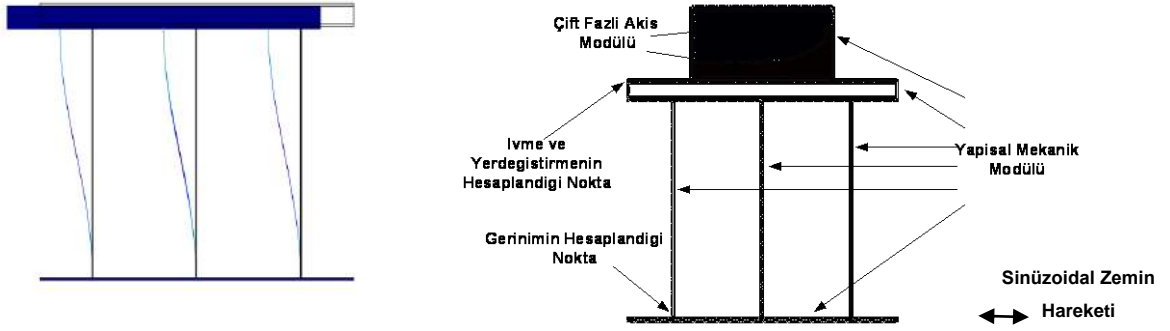
Yukarıdaki soruları yanıtlayabilmek için 4 farklı modelin 5 değişik durumu için sayısal benzetimlerin yapılmasına karar verilmiştir. Tüm farklı modeller ve durumların detaylı bilgileri bu raporun 4.3 kısmında verilecektir. Kullanılacak yapısal modelin genel görünüşü Şekil 24'de gösterilmektedir.



**Şekil 24. Sayısal Benzetimlerde Kullanılacak olan Fiziki Modellerin Genel Görünüşü**

### 3.3.1 Yapı-Sıvı Etkileşimli COMSOL Sayısal Benzetimleri:

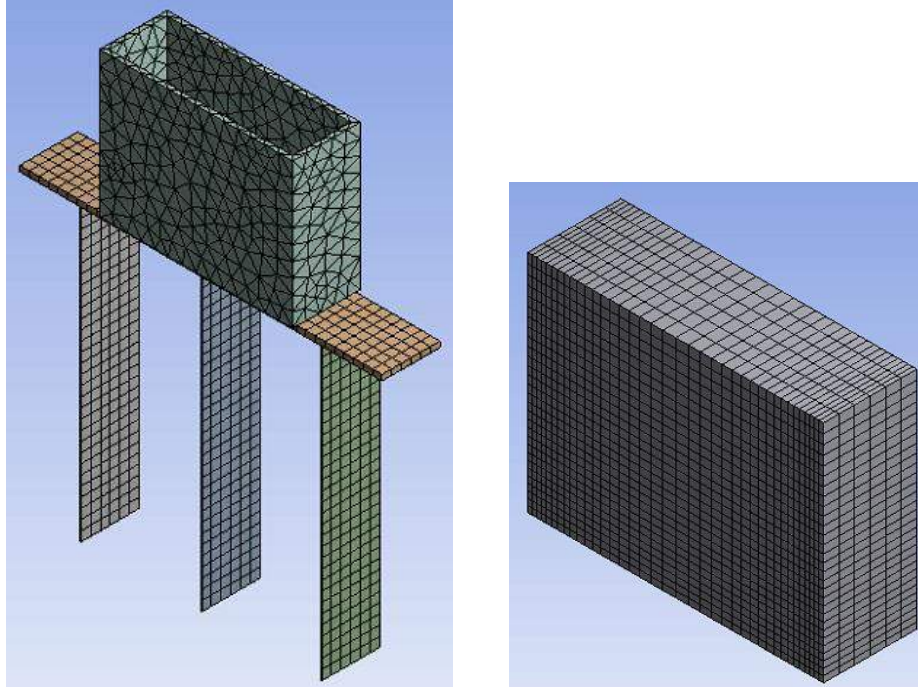
Bu kısımda COMSOL yazılımı kullanılarak incelenen durumların hangi fizik modelleri ile tanımlanacağı belirlenmiştir. Örneğin yapılan analizlerde üç farklı fizik tipi kullanılmıştır. Bunlar 'Yapısal Mekanik (Structural Mechanics)', 'Hareketli Ağ (Moving Mesh)' ve 'Laminer Çift Fazlı Akış (Laminar Two-Phase Flow)'tir. Yapının çalkalanan sıvılı titreşim sönümleyici olmadan yanıtını bulmak için sadece 'Yapısal Mekanik' fizik modülünü kullanmak yeterlidir (Şekil 25.a). Ancak sisteme çalkalanan sıvılı titreşim sönümleyici eklendiğinde yukarıda bahsedilen üç fizik modülüne ihtiyaç vardır. Şekil 25.b'de hangi cisimlerin hangi fiziksel modül ile modellendiği gösterilmiştir. 'Hareketli Ağ' modülü ise tüm geometri platform ile hareket ettiği için tüm cisimlere verilmiştir. 'Yapısal Mekanik' fizik modülü ile 'Çift Fazlı Akış Modülü' etkileşimi ise duvarlardaki sıvı basıncını 'Yapısal Mekanik' modülüne kuvvet olarak ve kap duvarlarının hızını da 'Çift Fazlı Akış Fizik' modülüne akış hızı olarak tanıtarak sağlanmıştır.



**Şekil 25. a. Yapısal Sistem b. Yapısal Sistem ve Çalkalanan Sıvılı Titreşim Sönümleyici**

### 3.3.2 Yapı-Sıvı Etkileşimli ANSYS-FLUENT Sayısal Benzetimleri:

Bu kısımda daha önce COMSOL'da çözülen durumlar ANSYS-FLUENT ile çözdürülerek bir karşılaştırılma yapılmış, sıvı eksilmesi probleminden ötürü COMSOL ile çözülemeyen durum çözülmeye çalışılmıştır. İlk olarak Tablo 7'de gösterilen 4 model ANSYS Design Modeler ile çizildi. Bu çizimlerde yapının davranışını önemli ölçüde değiştirmeyeceği düşünülen basitleştirilmelere gidildi. Örneğin bağlantı elemanları kullanılmadı. Deneylerde kullanılan ağırlıklarda ufak, kontrollü ayarlamalar yapılarak Tablo 7'de verilen her bir durum için modal analizler yapıldı ve yapısal sistemin su kabı ve içindeki su olmayan durumlarda istenen doğal frekansta davrandığından emin olundu. Sonuçların ağıdan bağımsız olduğundan emin olmak için benzetimlerden yararlanıldı ve detaylı ağıdan bağımsızlık çalışması sadece Durum 1 için gerçekleştirildi. Sistemin yapısal kısmına ve akışkan kısmına ait örnek ağlar Şekil 26'da gösterilmiştir. Bu ağda sistemin katı bölgesinde yaklaşık 12,000 ağ noktası, akışkan bölgesinde ise yaklaşık 8,000 ağ noktası bulunmaktadır. Sıvılı sönümleyici olmayan durumlarda yapı hep rezonans frekansında uyarıldığı için analizler 10 - 15 s'de sonlandırıldı. Sıvılı sönümleyici olan durumlar da kısıtlı zaman göz önüne alınarak benzer şekilde 10 -15 s için yapıldı. Zaman adımı olarak farklı çözülen farklı durumlar için 0.01 – 0.02 s mertebesinde değerler kullanıldı.



**Şekil 26. ANSYS ile yapılan benzetimlere ait örnek ağlar**

Sıvı katı etkileşimli benzetimleri yapabilmek için “Transient Structural”, “Fluid Flow (Fluent)” ve “System Coupling” analiz bileşenleri bir arada kullanıldı. Sistemin katı bölgesi ve akışkan bölgesi üzerinde birbirleri ile örtüşen yüzeyler birer birer eşleştirilerek katı çözümünün sıvı çözümüne deformasyon bilgisini vermesi ve sıvı çözümünün de katı çözümüne basınç bilgisini aktarması sağlandı. COMSOL çözümlerinden farklı olarak 3 boyutlu çözümler yapıldı. Yapısal yanıtın deneylerle daha uygun olabilmesi için 0.005 mertebesinde Nümerik Sönümleme (Numerical Damping) kullanıldı. Hava-su ara yüzünde ve suyun kap duvarlarına temas ettiği noktalarda herhangi bir yüzey gerilimi modellemesi kullanılmadı. Soldaki alüminyum ayağın ön - sağ - alt köşesinden gerinim, ayakların üstündeki ağırlık bloğunun ise ön - sağ - alt köşesinden yer değiştirme verisi toplandı. COMSOL’dakinden farklı olarak ivmelenme verisi toplanmadı.

### **3.4 Yapı-Çalkalanan Sıvı Etkileşimli Sistemin Deneysel Düzenegi**

Çalışmanın bir sonraki basamağının amacı içi kısmen sıvı dolu kabı basit bir yapısal sisteme tutturarak yapısal ve akışkan etkileşimi deneysel olarak inceleyip etkileşimli sistemin modelini elde etmektir.

İçerisi sıvı dolu bir kabı titreştirmek için hidrolik sarsıcı, iskelet yapı, kılavuzlar ve doğrusal hareket eden parçalar gibi bileşenler ve istenilen çıktıyı ölçebilmek için LVDT, ivmeölçer, yük hücresi

ve ultrasonik seviye sensörleri gibi cihazlar bir araya getirilmiştir. Şekil 27 çalkalanan sıvı deneysel çalışmaları sırasında tasarlanan test düzeneğini göstermektedir. Projenin bu aşamasında basit bir yapısal model tasarlanıp kabı tutturmak için platform üzerine monte edilmiştir.



**Şekil 27. Çalkalanan sıvı deneysel çalışmaları için hazırlanan test düzeneği**

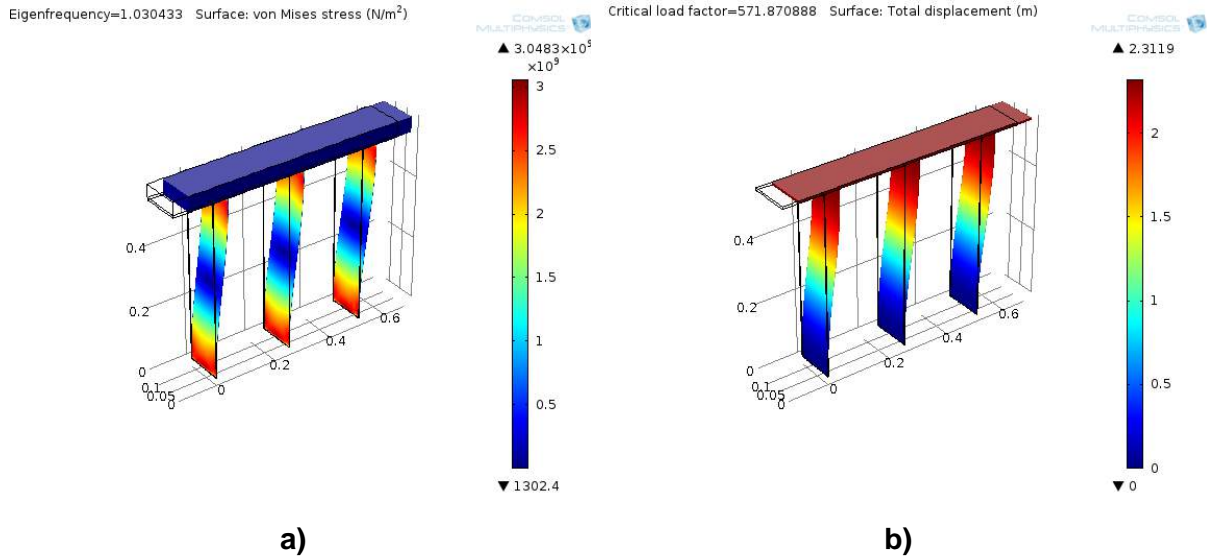
Yapısal model bir binayı temsil etmektedir ve bu modelin doğal frekansının belli bir değer aralığında ayarlanabilmesi gerekir. Bu değer 1 Hz – 5 Hz arasında değişebilir. Ayrıca, burkulma ve hareket sırasında eğilme gibi yüklerin altında dayanıklılığı göz önünde bulundurulmalıdır. Modelin üzerinde kap ve sensörleri tutturabilmek için yeterince alan bulunmalıdır. Bu kriterleri dikkate alarak bina modelinin iki veya üç levha şeklinde ayakların üzerine kabı monte edebilmek için tutturulmuş bir platformdan oluşturulması düşünülmüştür. En uygun modeli elde edebilmek için ayak sayısı, ayakların (levhaların) kalınlığı, uzunluğu ve birbirinden mesafeleri, malzeme ve diğer parametreleri değiştirerek sonlu eleman modelleri COMSOL'da oluşturulup analiz edilmiştir. Sayısal benzetimlerin iki boyutlu hareket varsayımı ile uyum sağlayabilmesi için levhaların eni kabın içindeki sıvının eni ile eşit (0.12 m) alınmıştır. Yapılan çeşitli analizler sonucunda aşağıdaki notları ifade etmek mümkündür:

Bina modelinin yüksekliği artırılınca doğal frekans ve kritik burkulma kuvvetinin değeri azalmaktadır.

- Levhaların üzerindeki ağırlık artırılınca doğal frekans azalmaktadır.
- Ayak sayısının artırılması modelin burkulma kuvvetleri altında dayanıklılığını ve doğal frekansını artırır.

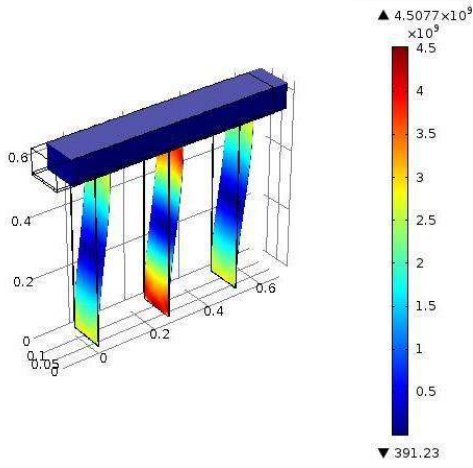
- Levhaların kalınlığının artırılması yüksek doğal frekans ve kritik burkulma kuvvetine neden olmaktadır.
- Çelik yapısal model alüminyum modele göre daha rijittir.

Yukarıdaki sonuçları göz önünde bulundurup farklı analizlerin sonuçlarını inceleyerek en uygun ve optimize bina modelleri elde edilmiştir. Bu modeller ve yapılan analizlerin çıktıları Şekil 28 ve Şekil 29 'de gösterilmiştir. Bu modellerde ana yapı, ayaklar ve onların üzerindeki ince plaka, malzeme olarak alüminyumdan yapılmıştır. İstenilen doğal frekansa ulaşabilmek için demir ağırlıklar eklenmiştir. Şekil 28'de ayak olarak üç adet 2 mm kalınlıkta ve 60 cm uzunlukta alüminyum levha kullanılmıştır. Bu modelde ortadaki ayak bir adet 3 mm kalınlıkta levha ile değiştirilir ise Şekil 29'daki model elde edilir. Bu iki model kullanılarak 1 – 3 Hz doğal frekans elde edilebilir, ancak Şekil 29'daki model burkulma kuvvetlerin altında daha yüksek dayanıklılığa sahiptir ve bina ağırlığının sıvı ağırlığına göre oranı yüksektir ki bu gerçek uygulamaya daha yakın bir örnektir (gerçek uygulamalarda bina sıvıdan çok daha ağırdır).



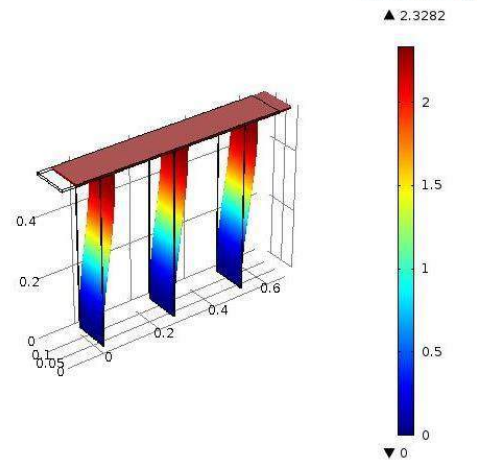
**Şekil 28. Üç adet 2 mm kalınlıkta ve 60 cm uzunlukta alüminyum ayak ile oluşturulmuş bina modeli ve sonlu eleman analizi, a) 28 kg ağırlık altında sistemin doğal frekansı: 1.03 Hz, b) Kritik burkulma kuvveti: 571.87 N.**

Eigenfrequency=1.023317 Surface: von Mises stress (N/m<sup>2</sup>)



a)

Critical load factor=1011.86009 Surface: Total displacement (m)

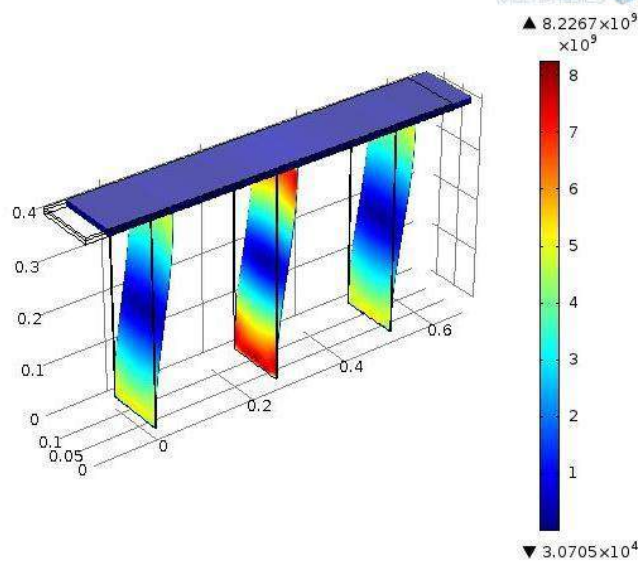


b)

**Şekil 29. İki tarafta iki adet 2 mm kalınlıkta ve ortada bir adet 3 mm kalınlıkta ve 60 cm uzunlukta alüminyum ayak ile oluşturulmuş bina modeli ve sonlu eleman analizi, a) 52.5 kg ağırlık altında sistemin doğal frekansı: 1.02 Hz, b) Kritik burkulma kuvveti: 1011.86 N.**

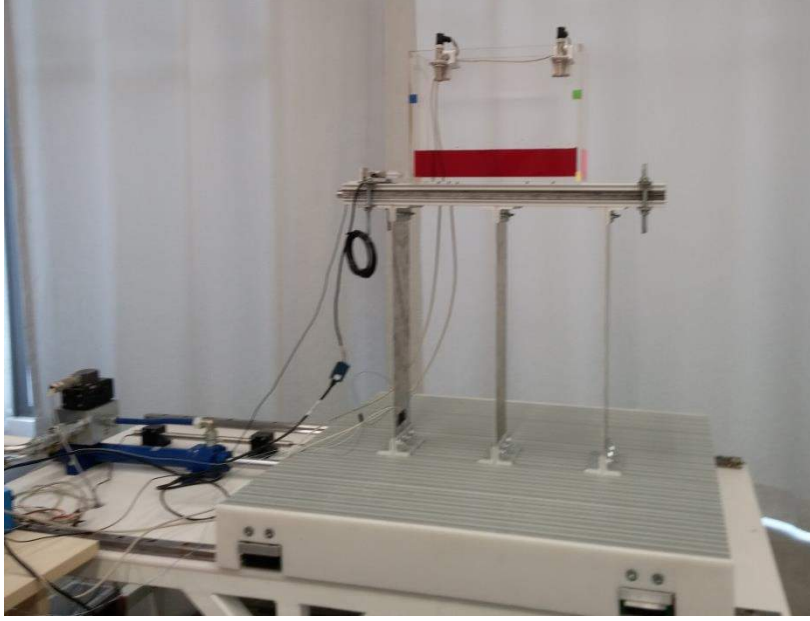
5 Hz civarındaki deneyler için benzer bir konfigürasyon kullanılabilir. Şekil 30'da 40 cm uzunlukta alüminyum levhalar kullanılarak yapının doğal frekansı 5 Hz'e ulaşmıştır. Daha sonra bu değer kata daha fazla ağırlık eklenerek yapı 3.5 Hz doğal frekansına getirilmiştir.

Eigenfrequency=5.174447 Surface: von Mises stress (N/m<sup>2</sup>)

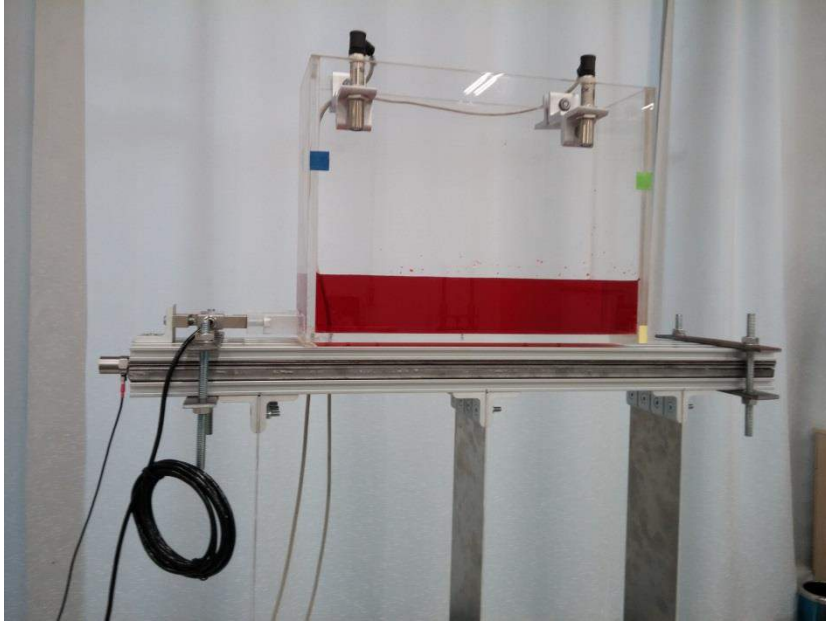


**Şekil 30. İki tarafta iki adet 2 mm kalınlıkta ve ortada bir adet 3 mm kalınlıkta ve 40 cm uzunlukta alüminyum ayak ile oluşturulmuş bina modeli ve sonlu eleman analizi, 3.5 kg ağırlık altında sistemin doğal frekansı: 5.17 Hz.**

Bu analizler kullanılarak Şekil 31'deki bina modeli tasarlanıp imal edilip düzeneğin üzerinde montajı yapılmıştır. Şekil 32'de görüldüğü gibi ayakların üstüne iki adet 15x120 alüminyum profil monte edilip istenilen ağırlıklar (demir plakalar) bu iki profilin arasına konulmuştur. Böylece kap ve yük hücresinin bina üzerinde montajı için kolaylık sağlanmıştır.



**Şekil 31. Yapısal model ve üzerinde tutturulmuş içi sıvı dolu kap.**



**Şekil 32. Yapısal model ve ağırlıklar, kap ve sensörlerin montajı.**

Önceki bölümlerde anlatılan sensörler ve bağlantı yöntemleri bazı ufak değişiklikler ile kullanılmıştır. Yük hücresi kesintisiz olarak kaba bağlı olup ikisinin arasındaki boşluktan



dolayı oluşacak hataları önleyebilmek için sadece bir yük hücresi civata ile bir taraftan kaba tutturulmuştur (Şekil 32). Ayrıca, hareketten dolayı ayaklarda oluşan gerinimleri ölçebilmek için gerinim ölçer kullanılmıştır. Yukarıda bahsedilen yöntem kullanılarak sayısal kısımda Tablo 7’de bahsedilen modeller daha önce söz edilen alüminyum bacak kalınlıkları ile uzunlukları kullanılarak ve Tablo 7’deki demir ağırlıklar eklenerek deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

### **3.5 Yenilikçi Kap Tasarımları ile Çalkalanan Sıvı Sönümleyicilerin Performansının Yükseltilmesi Çalışmaları**

Çalışmanın bu kısmında yeni kap tasarımları ile daha önce sorun yaşanan durumlar (yeterli titreşim azalımı olmayan) için çalkalanan titreşim sönümleyicinin etkinliğini arttıracak farklı kap tasarımlarına ulaşılması hedeflenmektedir. Bu kısımda proje önerisinde denenmesi düşünülen bazı kap tasarımlarının performansı sayısal benzetimler ile değerlendirilecektir.

Çalışmanın bu kısmında iki yeni kap tasarımı denenmiştir. Bu tasarımlardan ilki tabanı kavisli kap tasarımıdır. Bu tasarım ile daha rahat ve sıçramalar ve kırılmalar olmadan çalkalanma hedeflenmiştir. Böyle daha rahat çalkalanan ve çalkalanan su kısmının daha yüksek seviyelere çıkabildiği bir kaptaki iyi sonuçlar elde edilip edilemeyeceği araştırılacaktır.

Bu kısımdaki diğer bir çalışma ise çok gözlü kap tasarımıdır. Tek parça dikdörtgen kap ile aynı boyutlarda olan ancak içinde pek çok gözü olan kap tasarımı ile sıvının çalkalanma doğal frekansı yükseltilerek doğal frekansı yüksek olan (düşük katlı binalar) yapıların sinüs girdisi altındaki titreşimlerinin azalması azalmayacağı sayısal çalışmalar ile araştırılacaktır.

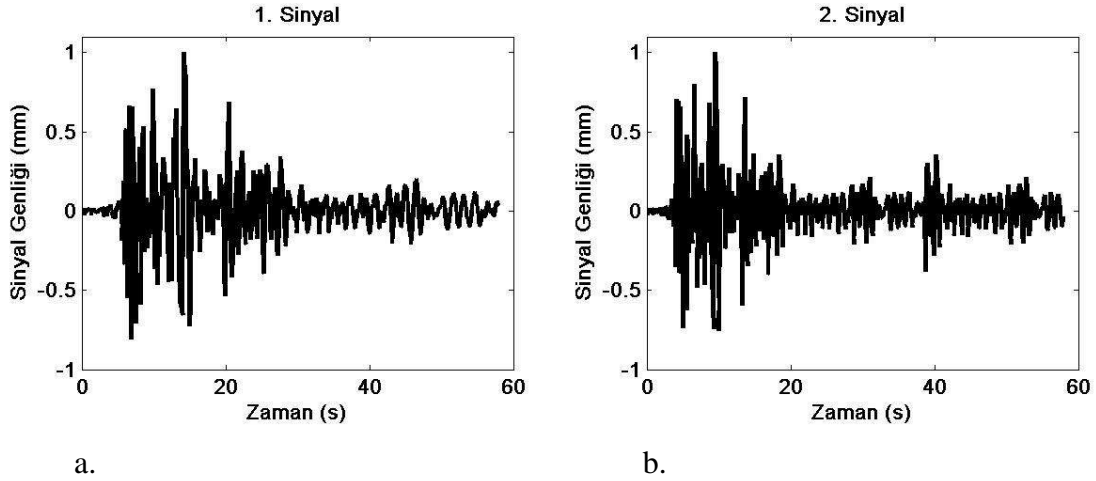
### **3.6 Yapı-Çalkalanan Sıvılı Etkileşimli Sistemin Deprem Girdisine Yanıtı**

Bu kısımda sıvılı sönümleyici-yapı etkileşimli sistemin deneysel çalışmalarında tasarlanan dört durumun (yapı doğal frekansı ve sönümleyici birleşimi) deprem girdisi altındaki performansları değerlendirilecektir. Ayrıca yine bu kısım altında sayısal benzetim çalışmalarında frekansı yüksek olan binalar için umut vadeden sonuçlar veren çok gözlü kap tasarımının hem sinüse hem de deprem girdisine olan yanıtı değerlendirilecektir.

#### **Sisteme deprem girdisi verilmesi**

Bu bölümde üç adet farklı bina modeli için sisteme iki farklı deprem girdisi verilerek sistemin yanıtları incelenmiştir. Deprem girdisi olarak kullanılan ilk sinyalin etkin frekansı 0,83 Hz, ikinci sinyalin etkin frekansı ise 1 Hz’dir. İki deprem sinyali de 58 s uzunluğundadır. Bu iki sinyal 10 Hz örnekleme frekansı ile örneklenecek, hareketli tabla için konum girdisi olarak verilmiştir. Bu veriler UC Berkeley Üniversitesine bağlı ‘PEER Ground Motion Database’ den ‘Ferndale’da

gerçekleşen depremin ölçümünden alınmıştır. Bu iki deprem verisi sisteme girdi olarak verilmeden önce maksimum genlikleri 1 mm olacak şekilde normalize edilmiştir. Daha sonra bu sinyaller sisteme girdi olarak verilirken düşük deprem girdi genliği için 6, büyük girdi genliği için 12 ile çarpılarak maksimum deprem girdi genlikleri istenilen büyüklüklere getirilmiştir. Yani düşük girdi genliği için maksimum genlik 6 mm, yüksek girdi genliği için maksimum genlik 12 mm'dir. Kullanılan deprem sinyalleri Şekil 33'de görülebilir.

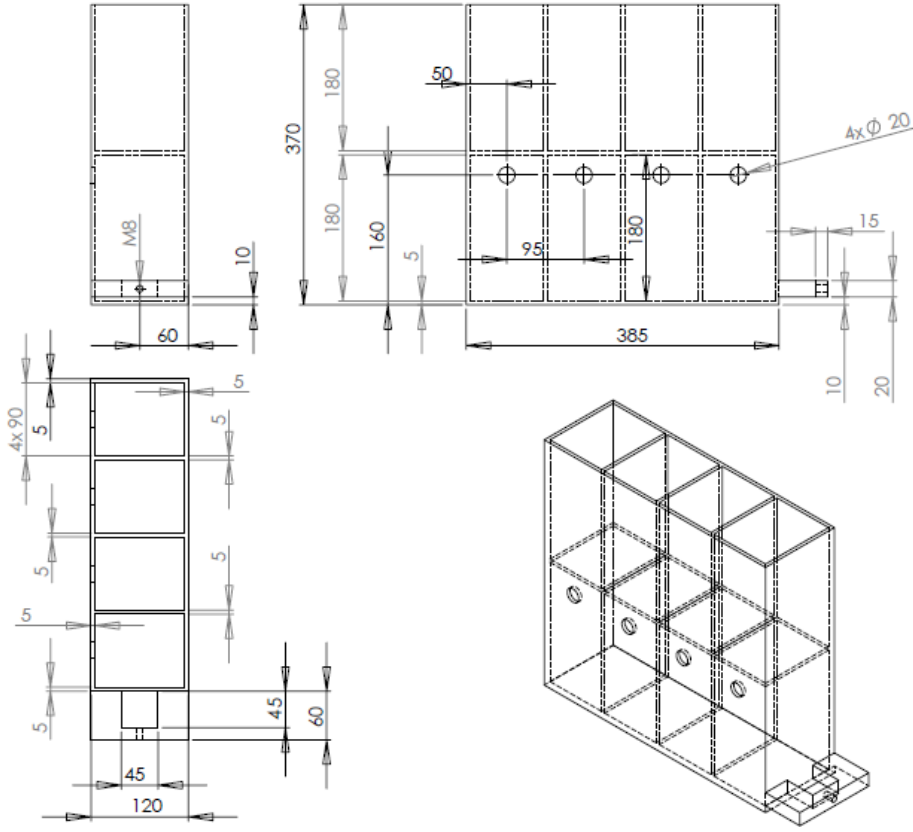


**Şekil 33.a. Ferndale Depremin sinyali b. Ferndale Depremin zaman örnekleme değiştirilerek etkin frekansının 1Hz'e taşınmış durumu**

Değişik doğal frekanslardaki yapı-çalkalanan sıvı etkileşimli sistemlerin depremlere verdiği yanıtları raporun 4.6 numaralı kısmında incelenecektir.

### **3.7 Çok Gözlü Kabın Sinüs ve Deprem Girdilerine Yanıtının Deneysel İncelenmesi**

Bu kısımda sayısal benzetimi yapılan çok gözlü ve yüksek frekanslarda etkili olan kabın üretimi gerçekleştirilerek bu kap tasarımının deneysel incelenmesi yapılmıştır. Bu çalışmalar için ilk önce kabın tasarımı katı modele taşınmış ve mühendislik çizimleri elde edilmiştir. Yeni tasarlanan bu sıvı tankı 370 mm x 385 mm x 120 mm ölçülerinde olup 5 mm kalınlığında pleksiglas malzemedir. 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. Kabın teknik çizimi Şekil 34'de verilmiştir. Bu kabın performansı hem sinus girdileri hem de deprem girdisi altında incelenecektir.



Şekil 34. Çok gözlü kabın teknik çizimleri

### 3.8 Görüntü İşleme Metotları ile Sıvı Yüksekliğinin ve Duvarlara Etkiyen Kuvvetin Hesaplanması

Çalkalanma deneylerinde ultrasonik algılayıcıların bulunduğu noktadaki sıvı seviyesi takip edilmektedir. Bu sensörler sadece buldukları noktadaki hareketi takip edebilirler. Ayrıca çalkalanma deneyleri sırasında kap ile hareket eden platform arasına yük hücresi konmaktadır. Böylece dolu bir kabın duvarına etkiyen kuvvet ölçülmektedir. Ancak bu ölçüm sırasında kabın eylemsizliğinden kaynaklı kuvvet de dalga kuvveti ile beraber ölçülmektedir. Sıvının çalkalanmasından kaynaklı kuvvetini bulmak için kabın eylemsizliğinden kaynaklı kuvvetin toplam ölçülen kuvvet değerinden çıkarılması gerekir. Bunun için kap içinde sıvı varken çalkalanır ve kuvvet ölçülür daha sonra kap boşken kabın eylemsizliğinden kaynaklı kuvvet ölçülerek iki ölçüm birbirinden çıkarılır. Bu oldukça zahmetli ve zaman harcanan bir ölçümdür.

Bu çalışmada su seviyesi ölçümleri ve dalga kaynaklı kap duvarına etkiyen kuvveti bulmak için alternatif bir metot geliştirilmiştir. Bu metotta su seviyesi ve kuvvet ölçümleri için sadece video kamera görüntüleri kullanılmaktadır. Kamera görüntüleri kullanılarak her görüntü karesi için



renk farkları kullanılarak (sıvı kırmızı renktir) sıvının yüksekliği görüntü işleme metotları ile bulunur. Bu şekilde sadece bir noktanın sıvı yüksekliği değil kap uzunluğu boyunca herhangi bir noktanın sıvı yüksekliği bulunabilir. Görüntü işleme ile elde edilen sıvı hava arayüzü çalkalanma kısmi diferansiyel denklemlerinin modal açılım çözümleri kullanılarak duvara etkiyen kuvvet de sadece görüntü işleme sonuçları ile hesaplanabilir. Böylece çalkalanmayı sadece kameraya alarak kap uzunluğu boyunca istenilen bir noktadaki sıvı yüksekliği ve kap duvarına etkiyen çalkalanma kuvveti hesaplanabilir. Görüntü işleme ve kuvvet hesaplama işlemi ile ilgili ayrıntılar raporun 4.8 nolu kısmında verilmiştir.

## 4. BULGULAR

### 4.1 Çalkalanma Sayısal Benzetim Çalışmaları Sonuçları

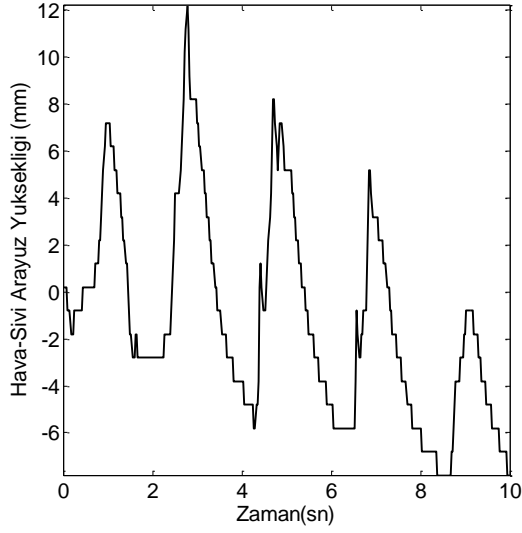
Proje önerisinde belirtilen değerlerin çerçevesinde hazırlanan Tablo 3'deki durumlar sayısal benzetim için kullanılan yazılım ile çözdürülmüştür. Tabloda 'Genlik' kabın kaç santimetre genlikle hareket ettiğini göstermektedir. Frekans ise bir saniyede kabın saniyede kaç kere gidip geldiğini göstermektedir. Sıvının yüksekliği ise bu frekansta rezonansa gelecek sıvı yüksekliğini göstermektedir. Bu belirtilen miktar sıvı kaba doldurulmuştur. Sadece 2 Hz'de rezonansa gelecek sıvı yüksekliği oldukça fazladır ve sığ sıvı teorisi ile hesaplanamamaktadır. Bu yüzden 1 Hz'de rezonansa gelecek sıvı yüksekliği 2 Hz için de kullanılmıştır. Bu durumlar için çözümler bir sonraki alt başlıkta sunulmaktadır.

**Tablo 4. Sayısal benzetimlerde incelenen durumlar**

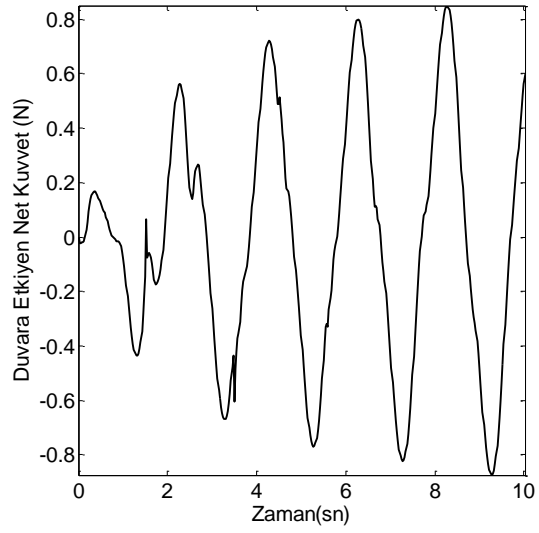
Durum#	Genlik (cm)	Frekans (Hz)	Sıvı Yüksekliği (cm)
1	1	0.5	1.48
2	2	0.5	1.48
3	0.25	1	6.43
4	0.5	1	6.43
5	0.7	1	6.43
6	1	2	6.43

#### 4.1.1 Durum 1:

Bu durum düşük frekansta (0.5 Hz) 1 cm genlik ile titreştirilen bir kabın hareketini göstermektedir. Burada Şekil 35a'dan görüldüğü üzere oluşan dalganın yüksekliği kenardan 4.7 cm ötede başlangıç seviyesinden 3 mm aşağıya ya da başlangıç seviyesinden 12 mm yukarıya çıkmaktadır. Şekilden görüldüğü üzere dalganın çıktığı maksimum yükseklik zaman ile azalmaktadır. Bunun nedeni zamanla COMSOL'da sıvı seviyesinin korunamayıp azalmasından kaynaklıdır. Ancak yapısal sistemin daha doğal frekansının daha büyük olduğu sistemlerde sorun daha yoğun olarak yaşanmamıştır. Benzetim duvara etkiyen net kuvvetin 1 N'un biraz altında kaldığını ve sinüs görünüşünden daha yüksek frekanslar içerdiğini göstermektedir ve net kuvvetin doğrusal olmayan bir yanıt olduğu görülmektedir.



a.

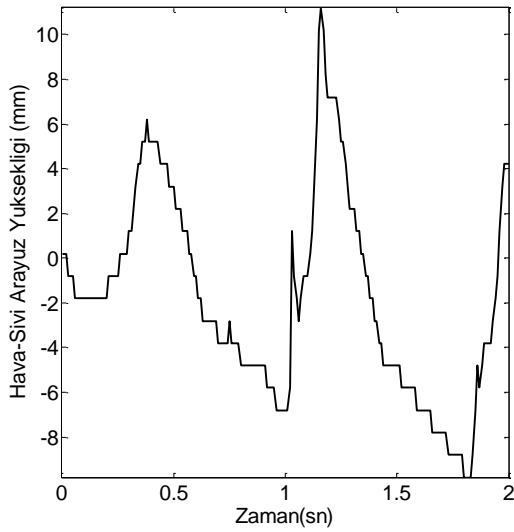


b.

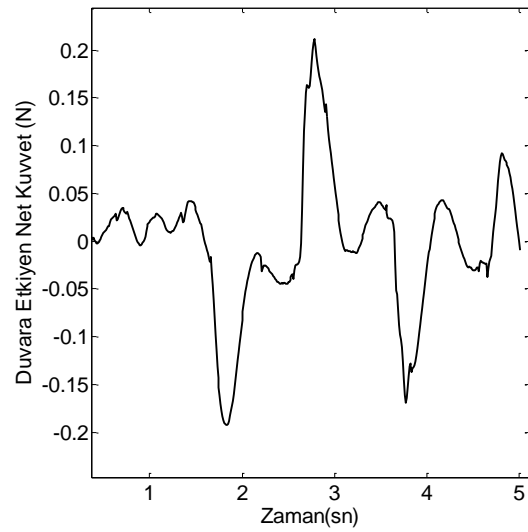
**Şekil 35. a. Durum 1 için dalganın kenardan 4.7 cm içeride yüksekliği b. Duvara etkiyen net kuvvetin büyüklüğü**

#### 4.1.2 Durum 2:

Durum 2'de kap 0.5 Hz frekansı ile ve 2 cm genlikle sallanmaktadır. Bu sallanmanın sonucunda sayısal benzetim dalga yüksekliğinin maksimum değerini yaklaşık olarak 11 mm olarak bulmuştur ve diğer uçta dalga çekildiğinde 7-8 mm alçalma olmaktadır. Net kuvvet genliği ise bu sefer oldukça yüksek olarak 0.2 N olarak bulunmuştur. Bu daha sonra gösterileceği üzere deneysel değerlerden yüksektir.



a.

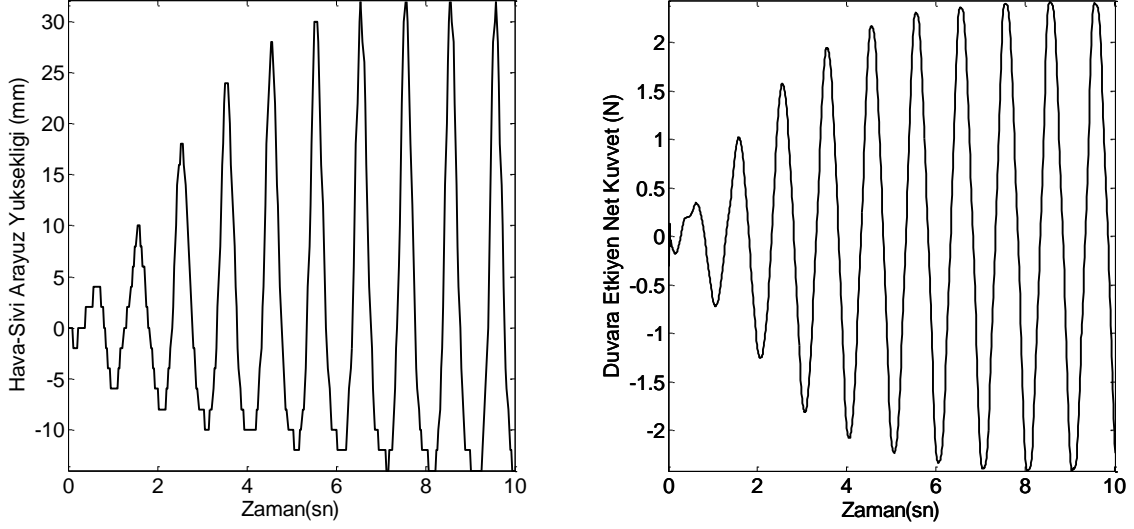


b.

**Şekil 36. a. Durum 2 için dalganın kenardan 4.7 cm içeride yüksekliği b. Duvara etkiyen net kuvvetin büyüklüğü**

#### 4.1.3 Durum 3:

Bu durumda sistem 6.4 cm yüksekliğe kadar sıvı doldurulmuş ve bu yüksekliğe denk gelen rezonans frekansı olan 1 Hz ile titreştirilmektedir. Sallamanın genliği 2.5 mm'dir. Şekil 37'de elde edilen dalga yüksekliği yaklaşık 3 cm'dir ve dalga diğer tarafa gittiğinde sıvı yaklaşık olarak 8-10 mm civarında çekilmektedir.



a.

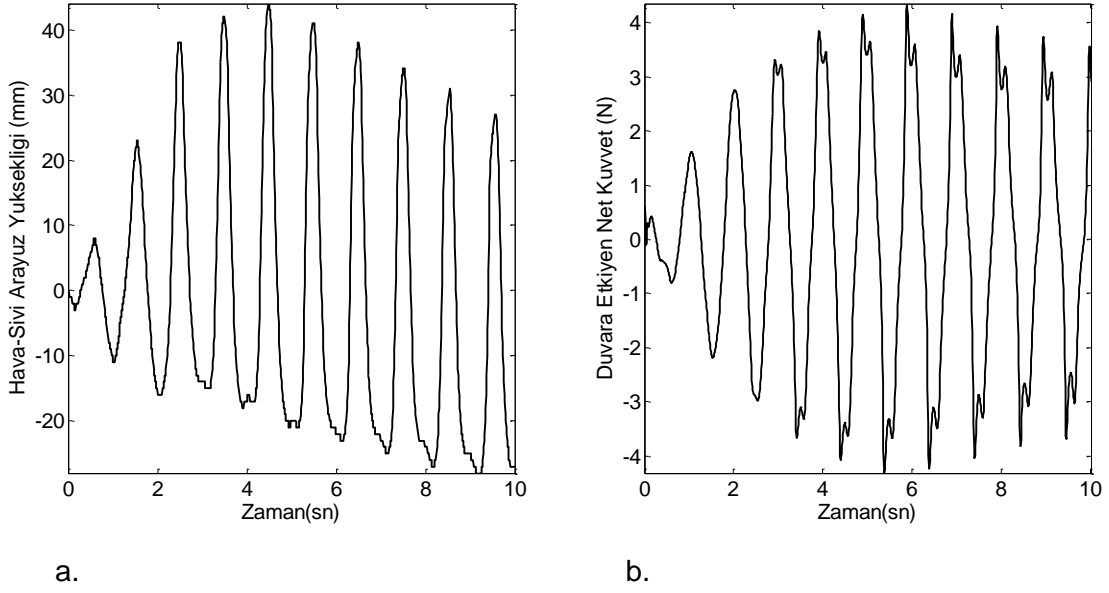
b.

**Şekil 37. a. Durum 3 için dalganın kenardan 4.7 cm içeride yüksekliği b. Duvara etkiyen net kuvvetin büyüklüğü**

Duvara vuran dalgaların kuvvet genliği ise yaklaşık olarak 2 N civarındadır. Bu verilen girdi genliğine göre (2.5 mm) oldukça yüksek genlikli bir kuvvettir.

#### 4.1.4 Durum 4:

Durum 4'te 1 Hz frekansında sıvı rezonans salınım yüksekliğinde iken dalgaların yüksekliği ve duvara etkiyen net kuvvet hesaplanmıştır. Bu sefer genlik 5 mm'ye çıkarılmıştır. Şekil 38a yüksek genlikli çalkalanma anlarında sıvının bir uçtan yaklaşık olarak 15 mm çekilirken diğer tarafında yaklaşık 40 mm yükseldiğini göstermektedir. Aynı zamanda kuvvetin genliği yaklaşık olarak 4 N seviyesine çıkmıştır. Şekil 38b'de çözümün bazı noktalarda sıçrama yaptığı görülmektedir. Bunun nedeninin çözümdeki anlık yakınsama sorunları olduğu düşünülmektedir. Çözüm farklı ağ büyüklükleri için tekrarlandığında da bu tarz bir davranış gözlenmiştir. Ancak bu sıçramalar farklı zamanlarda oluşmaktadır.



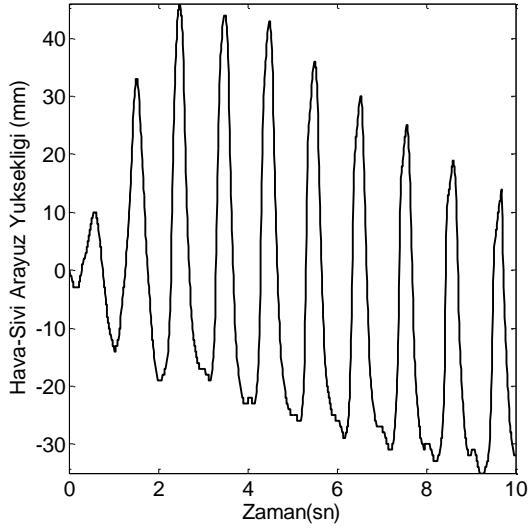
**Şekil 38. a. Durum 4 için dalganın kenardan 4.7 cm içeride yüksekliği b. Duvara etkiyen kuvvetin büyüklüğü**

Bu olayın fiziksel kaynaklı değil sayısal çözüm kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Bu yüzden sıçramaların eriştiği maksimum değer olan 5N gerçek fiziksel bir değer olmadığı düşünülmüş ve bu sıçrama olmadan gerçekleşen en yüksek değer olan 4N maksimum kuvvet olarak alınmıştır.

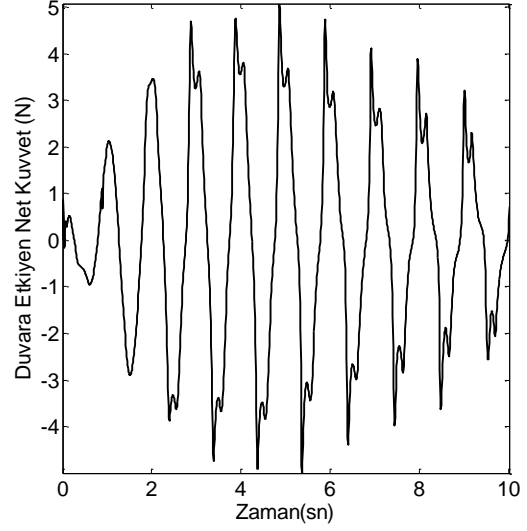
#### 4.1.5 Durum 5:

Durum 5, 1 Hz frekansında en büyük genlikle gerçekleşen titreşimdir. Bu durumda kap 7 mm genliğinde titreştirilmektedir. Bu durumda dalganın en yüksek noktası yaklaşık 45 mm ölçülmüştür. Bu anda ise kabın öbür ucunda sıvı yaklaşık olarak 20 mm çekilmektedir. Kabın duvara uyguladığı net kuvvetin genliği sayısal çözüm kaynaklı sıçramalar göze alınmaz ise yaklaşık olarak 5 N'dur.





a.

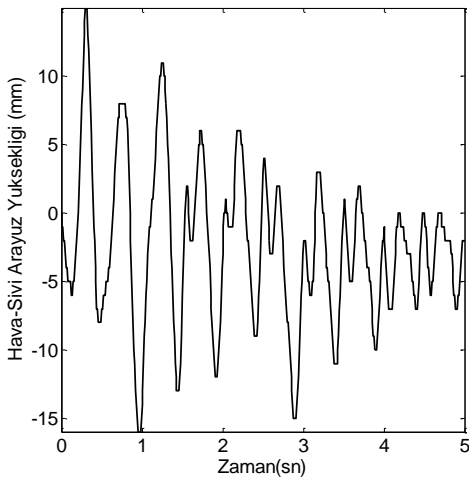


b.

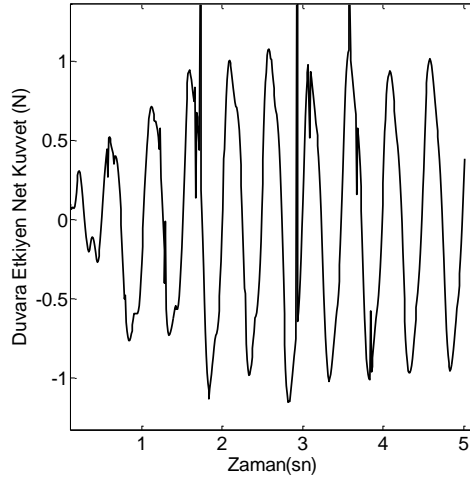
**Şekil 39. a. Durum 5 için dalganın kenardan 4.7 cm içeride yüksekliği b. Duvara etkiyen kuvvetin büyüklüğü**

#### 4.1.6 Durum 6:

Salınım frekansı 2 Hz'e çıkarılmıştır ve kabın salınım genliği 1cm'dir. 2 Hz frekansındaki salınımların sayısal benzetimlerinde COMSOL sıvıyı korumada daha fazla zorlanmaktadır. Şekil 40a'da görüldüğü üzere sıvının yüksekliği giderek azalmaktadır. Ancak sıvının bir periyot içinde en düşük ve en yüksek yüksekliği arasında fark yaklaşık 20 mm'dir. Duvara etkiyen kuvvetin maksimum genliği 1.5 N'dan biraz fazladır. Zaman zaman çözümden sayısal kaynaklı sıçramaların oluştuğu Şekil 40b'de gözükmemektedir.



a.



b.

**Şekil 40. a. Durum 6 için dalganın kenardan 4.7 cm içeride yüksekliği b. Duvara etkiyen kuvvetin büyüklüğü**

#### 4.1.7 Çalkalanma Sayısal Benzetim Sonuçlarının Yorumlanması

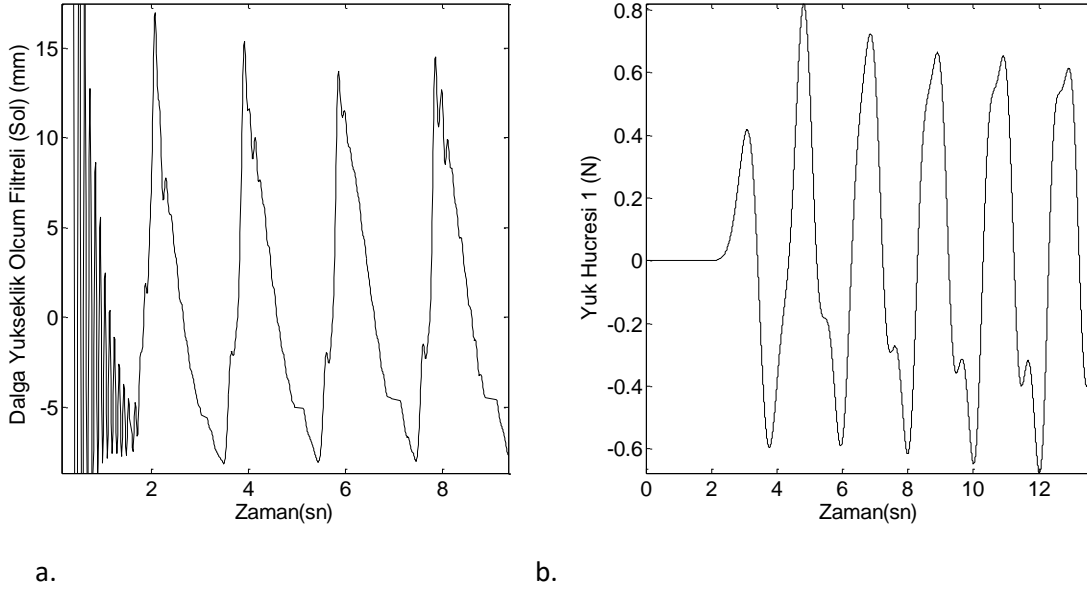
İş Paketi 1 çerçevesinde yapılan sayısal benzetimlerde COMSOL ile ilgili bazı sorunlar yaşanmıştır. Bu sorunların en önemlisi sıvıda yaşanan azalmadır. Zamanla iki fazdan sıvı olan faz gaz olan faza doğru geçmektedir ve bilgisayarın kapasitesi çerçevesinde gerçekleştirilen zaman adımı ve çözüm ağı küçültme yaklaşımları bu sorunu çözememiştir. Bu yüzden sayısal benzetimler uzun süreler devam ettirilememiştir. Yüksek zaman değerlerinde kaptta sıvı kalmamaktadır. Buna rağmen hareketin başlangıcında gerçekçi dalga yükseklikleri ve duvara etkiyen net kuvvetler elde edilmiştir. Zaman ilerledikçe kuvvet değerlerinde meydana gelen azalmaların sıvıdaki azalmadan dolayı olduğu düşünülmektedir. Bir sonraki kısımda deneysel sonuçlar gösterilmeye başlandığında aslında bulunan sayısal benzetim sonuçlarının deneysel sonuçlardan çok farklı olmadığı gözükmektedir.

### 4.2 **Çalkalanma Deneysel Çalışmaları**

Bu kısımda çalkalanan sıvı deneysel düzeneğinden elde edilen sonuçlar sunulacaktır. Bu kısımdaki deneysel çalışmalarda sunulan durumlar Tablo 4'de belirtilenler ile aynıdır. Bu kısımda kuvvet sensörlerinden toplanan veriler ve ultrasonik sensörden toplanan veriler dalga yüksekliğinin ve duvara etkiyen net kuvvetin hesaplanmasında kullanılacaktır.

#### 4.2.1 Durum 1:

Bu durum Tablo 4'de belirtildiği üzere 0.5 Hz frekansında 1 cm genliğinde titreşim ile sallanan kabın içindeki sıvının çalkalanmasını inceler. Piston LABVIEW sisteminde yaratılan 1 cm genlikli ve 0.5 Hz frekanslı sinüs sinyalinin piston kontrolcüsüne gönderilmesi sonucu kaba hareketi verir. Bunun sonucunda oluşan dalga yükseklikleri ve kuvvet genlikleri ölçülmüş ve ölçümler şekillerde gösterilmiştir. Bu kısımda gösterilen kuvvet ile ilgili veriler dijital filtrelerden geçirilmiştir. Normalde hidrolik sistemden ve elektrik motorundan kaynaklı yüksek frekanslı titreşimler nedeni ile kuvvet verisi üzerinde çok gürültü vardır ve bu gürültü dijital filtre ile atılmaktadır. Filtrenin köşe frekansı hareketin ilk üç harmoniğini kapsayacak şekilde seçilmiştir.

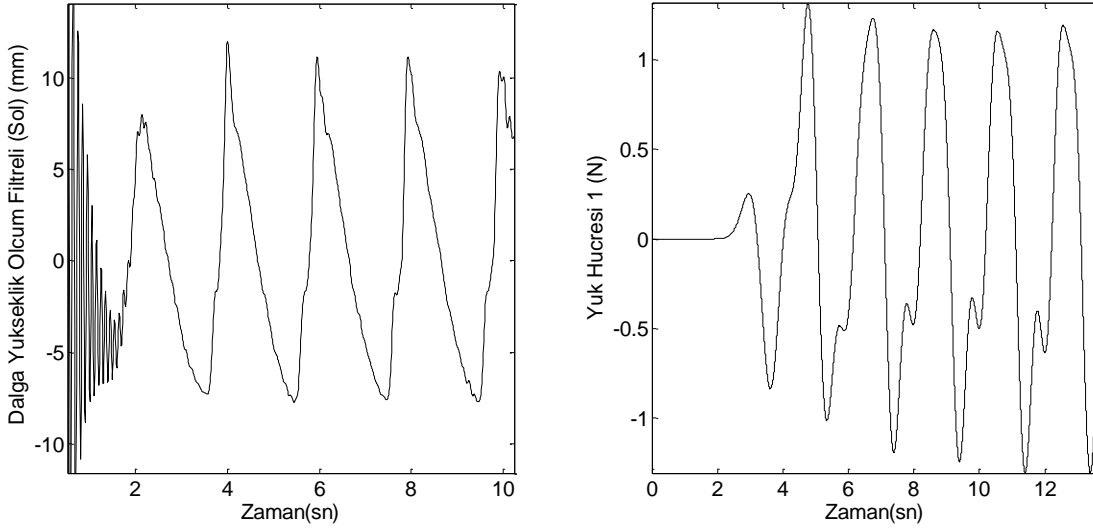


**Şekil 41.a. Durum 1 için dalga yüksekliği ölçüm verileri, b. Yük Hücresi ile Net Kuvvet Ölçümü**

Yukarıdaki şekilde gösterildiği üzere dalganın en yüksek değeri 10-15 mm olarak ölçülmüştür ve toplam yükseklikteki düşüş yaklaşık olarak 7 mm olarak görülmüştür. Kuvvet için genlik yaklaşık 0.6 N olarak görülmüştür. Bu değerler genel olarak Şekil 35'de gösterilen değerlere yakındır. Dalga yüksekliklerinin COMSOL simülasyonlarında ölçülen değerlere göre yaklaşık %200 daha düşük olduğu görülmektedir.

#### **4.2.2 Durum 2:**

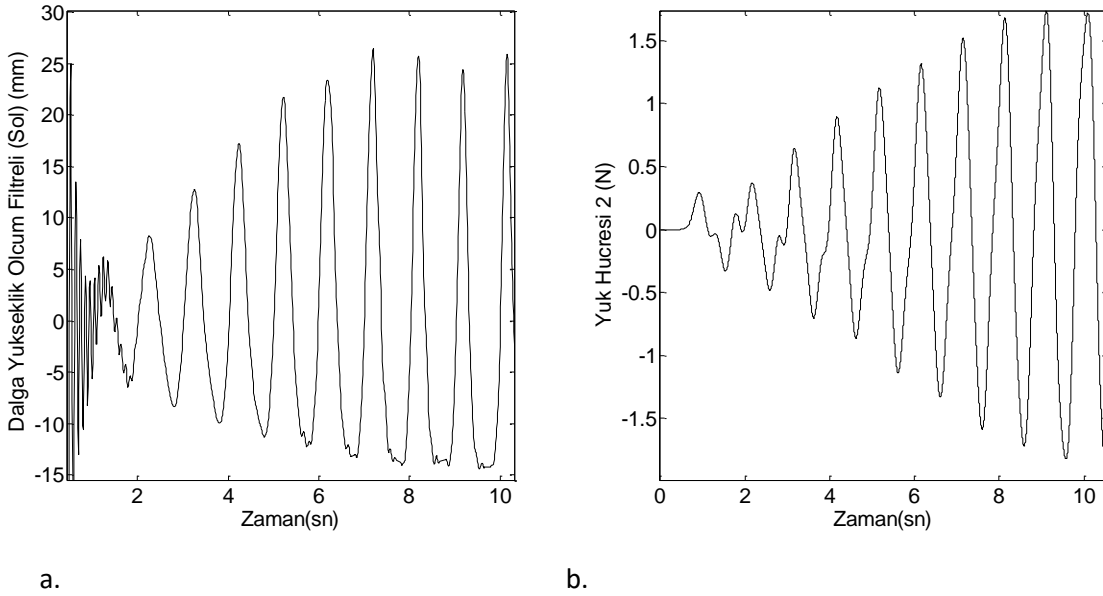
Durum 2'de 2 cm genliğinde ve 0.5 Hz frekansında bir sinüs LABVIEW sisteminden çıkarılmış ve pistonun kontrolcüsüne gönderilmiştir. Alttaki şekilde oluşan dalgaların yaklaşık olarak 10 mm yüksekliğinde olduğu ve dalga çekildiğinde ise 7 mm civarı düşme olduğu ölçülmüştür ve kuvvet genliği ise yaklaşık olarak 1.5 N olarak çıkmıştır. Bu değer COMSOL benzetiminde yaklaşık %50 daha düşüktür.



**Şekil 42 a. Durum 2 için dalga yüksekliği ölçüm verileri, b. Yük Hücresi ile Net Kuvvet Ölçümü**

#### 4.2.3 Durum 3:

Durum 3, 1 Hz frekansında en düşük incelenen en düşük genlikli salınımdır. 2.5 mm salınım genliği altında 1 Hz frekansında oluşan dalgalar 25 mm seviyesine kadar ulaşmıştır. Oluşan dalgaların duvarlarda yarattığı net kuvvetin genliği ise yaklaşık olarak 1.8 N'dur. Bu sonuçlar COMSOL sayısal benzetimlerinde belirtilen değerlere 10%-20% aralığında yakındır.

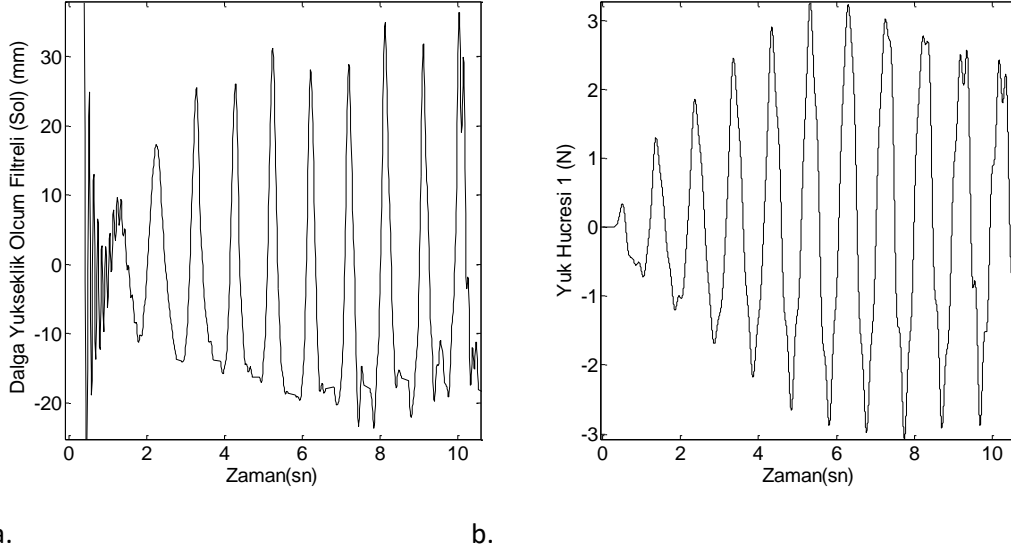


**Şekil 43. Durum 3 için dalga yüksekliği ölçüm verileri, b. Yük Hücresi ile Net Kuvvet Ölçümü**

#### 4.2.4 Durum 4:

Durum 4'te bir önceki duruma göre genlik iki katına çıkarılmıştır ve frekans hala 1 Hz'dir. Bu durumda dalgaların ölçülen maksimum yüksekliği 35 mm olmuştur. Sıvının diğer uçtaki

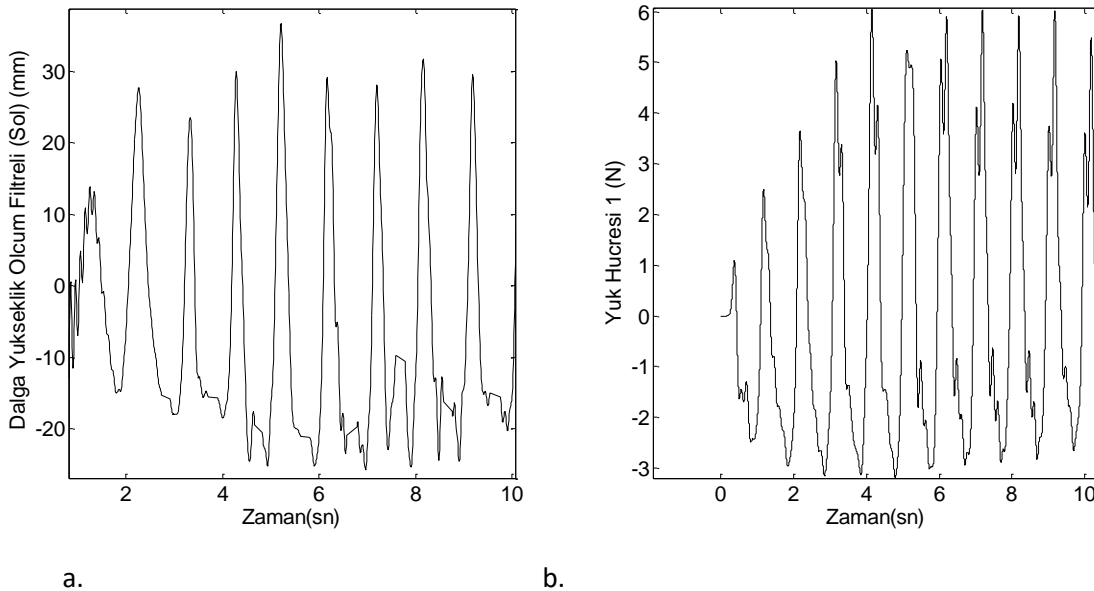
çekilmesi ise yaklaşık olarak 20 mm'dir. Dalgaların duvarlarda yarattığı net kuvvet ise 3 N'un biraz üzerindedir. Sayısal benzetim sonuçları dalga yüksekliği için ölçülen değerden 5 mm daha fazla, kuvvet için ise 0.7 N kadar daha fazla sonuç vermiştir.



**Şekil 44. Durum 4 için dalga yüksekliği ölçüm verileri, b. Yük Hücresi ile Net Kuvvet Ölçümü**

#### 4.2.5 Durum 5:

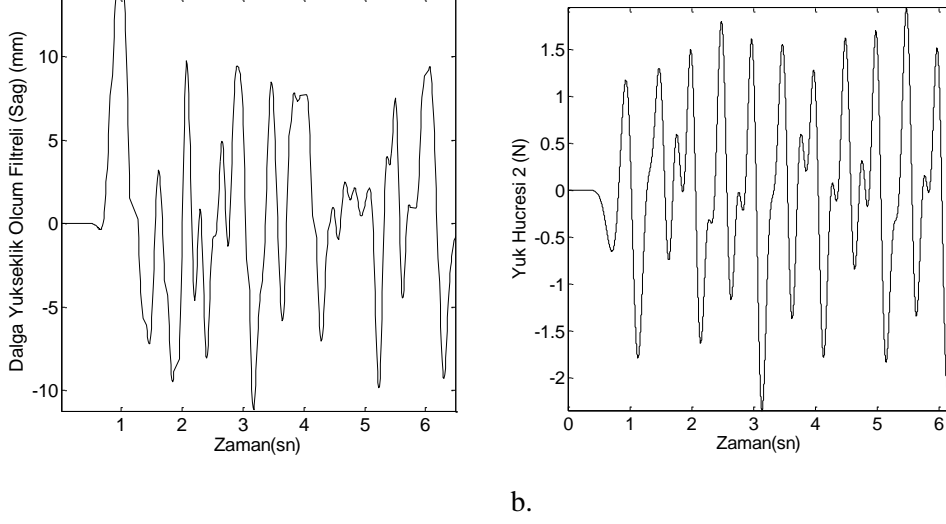
Durum 5, 1 Hz frekansındaki en yüksek genlikli salınımdır. Bu salınımın genliği 7 mm'dir ve bu genlik altında 35 mm civarında maksimum dalga yüksekliği ve 25 mm kadar dalga çekilmesi gözlenmiştir. Duvarlara vuran en yüksek net kuvvet ise yaklaşık 5.5 N'dur. Burada sistem henüz yatışkın rejime geçmediği için kuvvetlerin negatif ve pozitif değerleri arasında fark vardır. Bu fark ilerleyen zaman ile kaybolmaktadır.



**Şekil 45.a. Durum 5 için dalga yüksekliği ölçüm verileri, b. Yük Hücresi ile Net Kuvvet Ölçümü**

#### 4.2.6 Durum 6:

Durum 6'da salınım frekansı 2Hz'dir ve genlik 1 cm'dir. Aşağıdaki şekil başlangıçta sistemin yatışkın bir yanıt vermediğini göstermektedir. Başlangıçta dalga genliği yaklaşık 10-15 mm olarak görülmektedir ve duvara vuran dalganın net kuvveti 2-2.5 N civarındadır.



Şekil 46.a. Durum 6 için dalga yüksekliği ölçüm verileri, b. Yük Hücresi ile Net Kuvvet Ölçümü

#### 4.2.7 Sayısal Benzetim ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Tablo 5'de elde edilen deneysel sonuçlar ile sayısal benzetim sonuçlarını karşılaştırılmaktadır. Burada karşılaştırılan art arda gelen maksimum ve minimum dalga yüksekliği ve kuvvet arasındaki farktır. Yani simülasyon ve deneyde bir periyotta oluşan en yüksek değerlerin farkı karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere genelde sonuçlar özellikle 1 Hz frekansı ile yapılan titreşimler için birbirine yakındır.

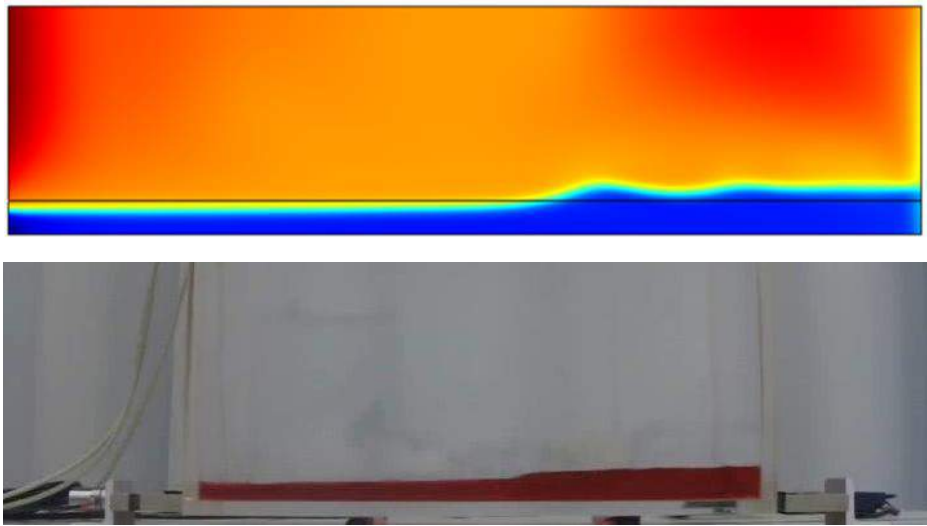
Tablo 5. Deneysel Sonuçlar ile Sayısal Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırılması

	COMSOL Sayısal Benzetim		Deney		Dalga Hatası	Kuvvet Hatası
	Maksimum Dalga Yüksekliği Farkı (mm)	Maksimum Kuvvet Değeri Farkı (N)	Max. Dalga Yükseklik Farkı (mm)	Max Kuvvet Değeri Farkı (N)		
Durum 1 (0.5Hz & 10mm)	13	0.35	13	1.5	%0	%76
Durum 2 (0.5Hz & 20mm)	21	0.6	20	1.6	%5	%62
Durum 3 (1Hz ve 2.5mm)	43	4.5	40	3.6	%7.5	%25
Durum 4 (1Hz ve 5mm)	60	8	55	6	%9	%33
Durum 5 (1Hz ve 7mm)	65	10	60	9	%8	%11
Durum 6 (2Hz ve 10 mm)	25	2.5	23	4.0	%8	%37

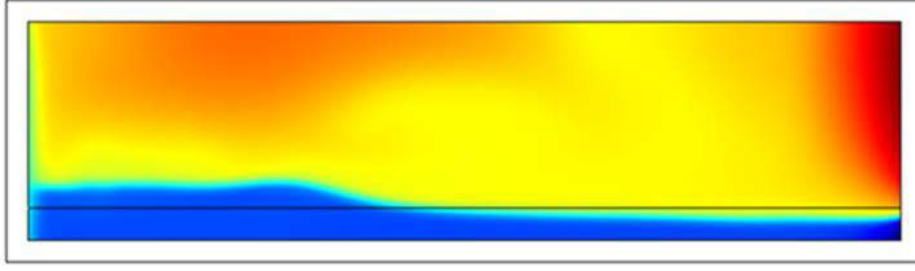
Genelde dalga yüksekliği (sıvının kaptaki hali) ile ilgili sayısal benzetimler deneysel sonuçlara %10'dan daha yakındır. Kuvvetlerdeki farklılıklar daha yüksektir ve 1 Hz dışındaki frekanslarda deneysel ve simülasyon sonuçları arasındaki net kuvvet değer farkları artmaktadır.

Tablodaki hata değerleri deney ile simülasyon arasındaki farkın deney değerine bölünmesi ile bulunmuştur. Bu da deney sonuçlarının doğru yanıt olarak alınmasından dolayıdır. Ancak ölçümlerde 0.5 Hz ile ilgili deneylerin kuvvet sonuçları ile ilgili tutarsızlıklar mevcuttur. Bunun nedenin 0.5 Hz'de oluşan kuvvetin çok küçük olmasından kaynaklı olarak gürültü tabanına yakın sinyal ölçme kaynaklı problem olduğu düşünülmektedir. Ancak kuvvet ölçümü ile ilgili bu sorun diğer frekanslarda mevcut değildir. Hem deney hem de sayısal benzetim sonuçları duvarda oluşan kuvvet açısından en verimli durumun 1 Hz frekansı olduğunu göstermektedir.

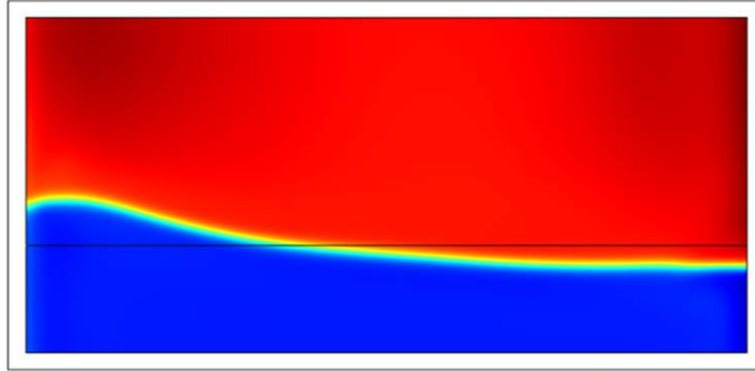
Aşağıdaki altı şekilde ise her incelenen 'Durum' için belli bir 't' anında sıvının kap içindeki görünümünün sayısal benzetim ve deney sırasındaki video çekimleri ile karşılaştırılması vardır.



**Şekil 47. 1 cm genlikte ve 0.5 Hz frekansında sinüs çalkalanmasında 5. saniyedeki sıvının kap içindeki görünümü (üstte: sayısal benzetim, altta: deney)**

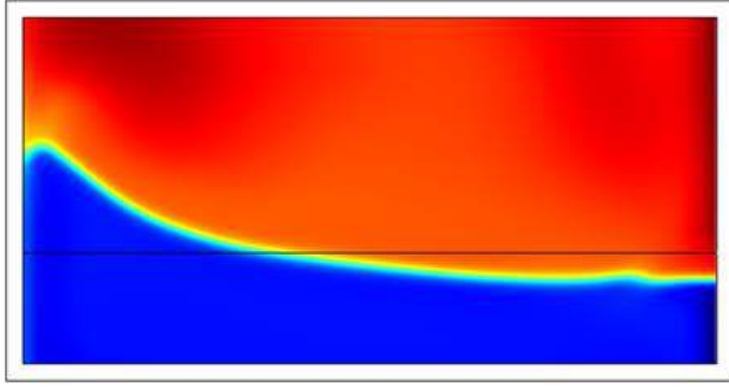


Şekil 48. 2 cm genlikte ve 0.5 Hz frekansında sinüs çalkalanmasında 2. saniyedeki sıvının kap içindeki görünümü (üstte: sayısal benzetim, altta: deney)

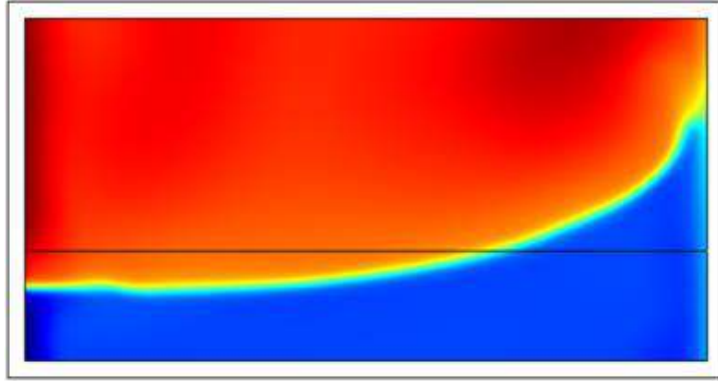


Şekil 49. 2.5 mm genlikte ve 1 Hz frekansında sinüs çalkalanmasında 8. saniyedeki sıvının kap içindeki görünümü (üstte: sayısal benzetim, altta: deney)

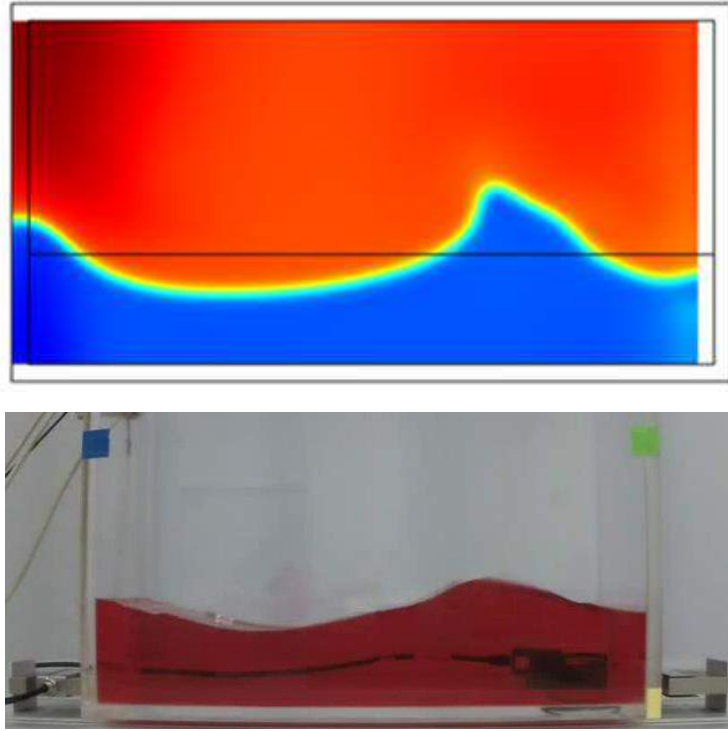




**Şekil 50. 5 mm genlikte ve 1 Hz frekansında sinüs çalkalanmasında 4.5 saniyedeki sıvının kap içindeki görünümü (üstte: sayısal benzetim, altta: deney)**



**Şekil 51. 7 mm genlikte ve 1 Hz frekansında sinüs çalkalanmasında 6. saniyedeki sıvının kap içindeki görünümü (üstte: sayısal benzetim, altta: deney)**



**Şekil 52. 10 mm genlikte ve 2 Hz frekansında sinüs çalkalanmasında 1.4. saniyedeki sıvının kap içindeki görünümü (üstte: sayısal benzetim, altta: deney)**

Şekil 47-52'de görüldüğü üzere sayısal benzetimler sinüs tahriki altında sıvının kaptaki durumunu biçimsel olarak doğru hesaplamaktadır. Bu sonuçlar genel olarak kuvvet sonuçlarına göre daha iyi görünmektedir. Serbest yüzeyin tam duvarlardaki şeklinin deneyle benzeşmemesinin (açıların hatalı olmasının) sebebinin yüzey gerilmesinin (surface tension) doğru modellenememesi olduğu düşünülmektedir.

#### **4.2.8** Çalkalanma Deneysel Çalışmaları Sonuçlarının Genel Değerlendirilmesi:

Çalkalanma deneysel çalışmaları başarılı geçmiştir. Bu kısımdaki en çok zaman ve çalışma deneysel düzeneğin kurulmasına harcanmıştır. Deneysel düzenek kurulduktan sonra deney verisi toplamak daha hızlı gerçekleşmektedir. Bu yüzden sayısal benzetim için gerekli süreler düşünüldüğünde (sayısal benzetimin bir saniyesi için gerekli süre 1 saat civarındadır) deneysel sonuç toplamak ilk baştaki deneysel düzenek kurulum süresinden sonra çok daha hızlı gerçekleşmektedir.

Genel olarak sayısal benzetimler sıvının yüksekliğini ve kap içindeki durumunu deneye paralel hesaplamakta ancak kuvvet hesaplarındaki farklılıklar özellikle düşük frekanslarda önemli noktalara çıkmaktadır. Bu sorun ağ yoğunlaştırma ve zaman basamağı düşürülerek

çözülmemiştir. Bu kuvvet farkının yapı ve sıvı etkileşimli sistemlerde titreşim değerleri hesaplamalarına ne kadar etkiyeceği bir sonraki kısımda değerlendirilecektir.

### 4.3 Yapı-Çalkalanan Sıvı Etkileşimli Sistemin Sayısal Benzetim Sonuçları:

Yapı-çalkalanan sıvı etkileşimli deneysel çalışmada farklı modeller kullanılacaktır. Bunun amacı farklı doğal frekanslara ve farklı kütlere sahip sistemlerin (ana sistem ve titreşim sönmüleyici kütle oranı farklı olan sistemler yaratabilmek için) sayısal benzetimini yapabilmektir. Burada bacaklı yapıyı gösteren figüre referans verilerek sistem tanıtılabilir. Tablo 6 dört modelin geometrik ve malzeme özelliklerini göstermektedir. Tüm modellerde ortak olan bazı uzunluklar Tablo 6'da gösterilmiştir.

**Tablo 6. Kullanılan dört modelin boyutları ve kütleleri**

	Aluminyum Kolon 1 ve Kolon 3 (cm)			Aluminyum Kolon 2 (cm)			Aluminyum ve Demir Blok Geometri (Kat Modeli)		Kütle Aluminyum Toplam (kg)	Kütle Demir (kg)	Hedef Doğal Frekans (Hz)
	En	Boy	Kalınlık	En	Boy	Kalınlık	En	Boy			
<b>Model 1</b>	12	60	2	12	60	2	12	75	3.375	12.6	1
<b>Model 2</b>	12	60	2	12	60	3	12	75	3.375	30.4	1
<b>Model 3</b>	12	60	2	12	60	3	12	75	3.375	3.04	2
<b>Model 4</b>	12	45	2	12	45	3	12	75	3.375	4.10	3.5

Modellerde dikkat edilen özellikler aşağıdaki gibidir:

- İlk iki modelin doğal frekansları 1 Hz olacak şekilde ayarlanmıştır. Ancak ilk model 16 kg civarındayken ikinci model 35 kg civarındadır. Böylece aynı doğal frekansta iki farklı ana sistem ve sönmüleyici kütlesi elde edilmiştir. Model 1 ile Model 2 arasındaki kütle farkı Model 2'de orta bacak (Kolon 2) daha kalın seçilerek yaratılmıştır. Bu kalın kolon ile sertliği daha yüksek bir sistem elde edilmiş ve eş doğal frekansa (1 Hz) ulaşabilmek için Model 2'nin kütlesi artırılmıştır.
- Model 3 ve Model 2 arasındaki temel fark ise Model 2'deki ağırlıkların azaltılarak sistemin doğal frekansının 2 Hz'e çıkarılmasıdır.
- Kullanılması planlanan sıvılı titreşim sönmüleyicilerin çalkalanma doğal frekansları 0.5 Hz ve 1 Hz olarak planlanmıştır. Bu durumda Model 4'ün doğal frekansını yüksek bir frekansa ayarlayarak sıvılı titreşim sönmüleyicinin doğal frekansı yapısal sistemin doğal frekansından oldukça farklı olursa yanıtın nasıl etkilendiği görülebilir. Ayrıca 3.5-



4 Hz doğal frekansı 4-5 katlı ortalama bir binanın ilk doğal frekansına yakındır. Bu yüzden bu proje için uygun bir doğal frekans değeridir.

Tüm modeller hem sayısal çalışmalarda hem de deneysel çalışmalarda sinüzoidal sinyal ile sallenmiştir.

Bu modeller kullanılarak sıvılı titreşim sönümleyicinin değişik çalkalanma doğal frekansları için farklı durumlar yaratılarak bazı temel soruların yanıtlanmasına çalışılacaktır. Bu beş farklı durum Tablo 7'de verilmiştir. Bu durumların sayısal benzetiminden anlaşılacak istenenler aşağıda özetlenmiştir:

- **Durum 1:** Burada istenen 1 Hz rezonans frekansında uyarılan bir yapının 1 Hz çalkalanma doğal frekansı olan bir sönümleyiciden nasıl etkileneceğinin görülmesidir.
- **Durum 2:** Burada yapısal doğal frekansı yine 1 Hz (bu sefer Model 2) olan sistem rezonans frekansında titreştirilmekte olup, çalkalanma doğal frekansı 1 Hz olan sönümleyicinin yapısal yanıtı olan etkisi incelenecektir. Burada anlaşılacak istenen temel konu eğer sıvının yapıya göre kütlesi azalırsa (Model 2'de yapı daha ağırdır) ilk duruma göre yapısal yanıtın nasıl değiştiğidir.
- **Durum 3:** Bu durumda yapısal doğal frekansı 2 Hz olan bir sistem rezonans frekansında uyarılırken çalkalanan sönümleyicinin doğal frekansı yapısal sistemin doğal frekansından farklı ise (1 Hz) titreşim sönümleyicinin yapının yanıtını nasıl etkileyeceğinin görülmesi hedeflenmektedir.
- **Durum 4:** Durum 4'te ise Durum 3'te söz edilen yapısal doğal frekans ile titreşim sönümleyicinin doğal frekansı tutarsızlığının daha ileri seviyeye götürülmesi söz konusudur. Ayrıca burada daha önce belirtildiği üzere yapısal sistemin doğal frekansı 4-5 katlı bir yapının doğal frekansına yakındır.
- **Durum 5:** Buradaki incelenen konu çalkalanma genliği artmasının sönümleyicinin verimliliğine olan etkisidir.

Tüm durumlar yapının rezonans frekansında titreştirilmesini incelemektedir. Çalkalanmanın doğal frekansı ise kaba farklı miktarlarda su konularak değiştirilmektedir.

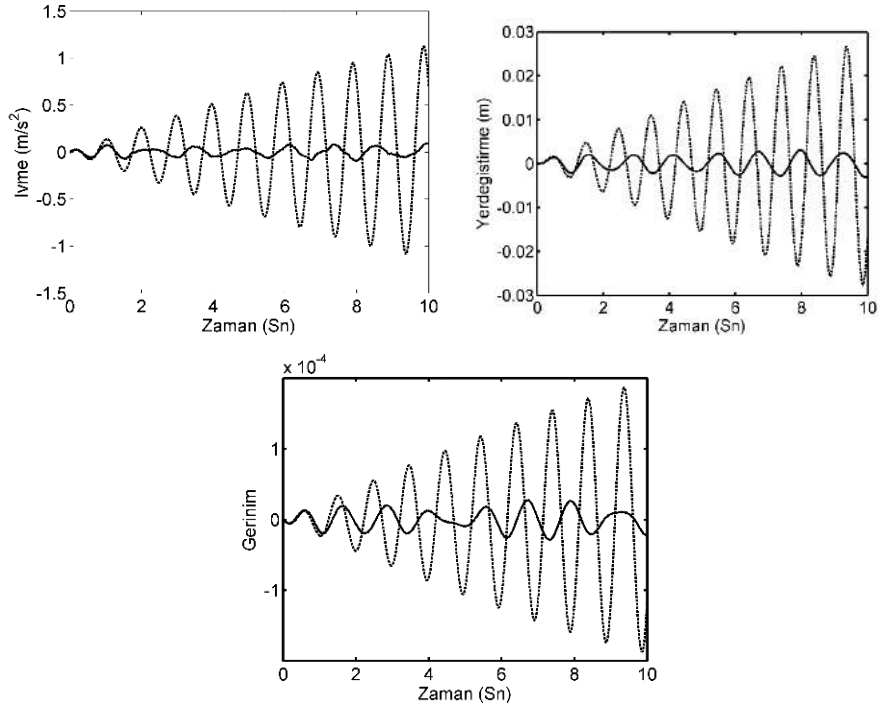
**Tablo 7. Sayısal Benzetimlerde Kullanılacak Durumların Özellikleri**

Durum	Model	Yapısal Doğal Frekans	Titreşim Sönümleyicinin Çalkalanma Doğal Frekansı	Zemin Titreşimi Frekansı	Zemin Titreşim Genliği	Titreşim Sönümleyici Sıvı/Yapı Oranı
1	Model 1	1 Hz	1 Hz	1 Hz	1 mm	0.18
2	Model 2	1 Hz	1 Hz	1 Hz	1 mm	0.087
3	Model 3	2 Hz	1 Hz	2 Hz	1 mm	0.46
4	Model 4	3.5 Hz	0.5 Hz	3.5 Hz	1 mm	0.090
5	Model 2	1 Hz	1 Hz	1 Hz	3 mm	0.085

COMSOL ile yapılan analizlerde yapının dinamik hareketi üç farklı değişkenin zamana göre değişiminin hesaplanması ile incelenmiştir. Bu değişkenlerin ikisi kolonların üstünde duran ve kat olarak modellenen geometrinin uç noktasının yer değiştirmesi ve ivmesidir. İncelenen son değişken ise kolonun hareketli zemine bağlandığı noktadaki gerinimdir. Bu noktalar Şekil 25b'de belirtilmiştir. Bu hesaplamalar gerekli olan sayısal benzetim sürelerinin uzunluğundan dolayı ve COMSOL yazılımında zaman ilerledikçe sıvı miktarı korunmasında problem olmasından dolayı 10 saniye için yapılmıştır.

#### **4.3.1 Durum 1:**

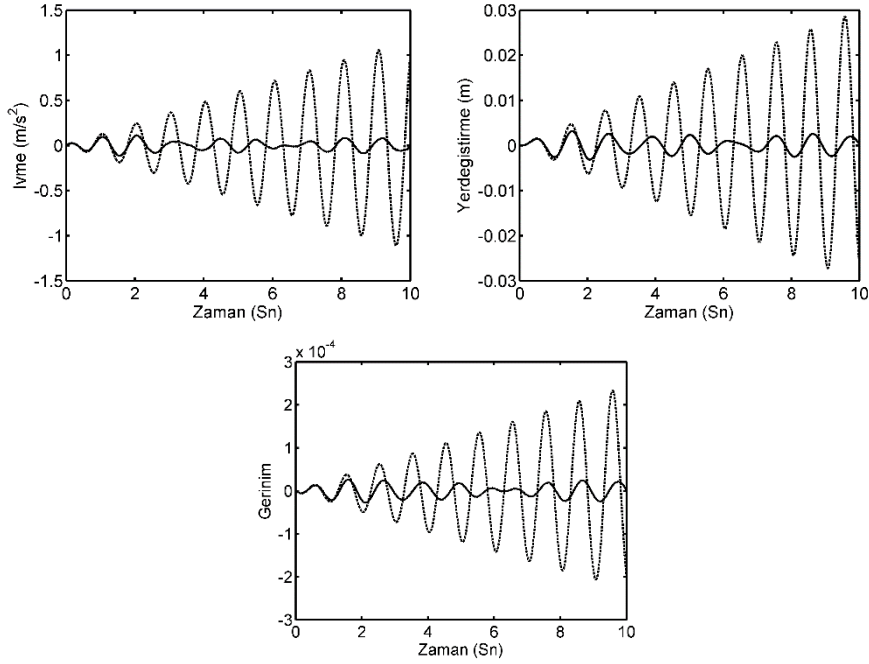
İlk olarak Tablo 7'de gösterildiği üzere rezonans frekansı 1 Hz olan yapısal sistemin sönümleyici olmadan rezonans yanıtı hesaplanmıştır (Şekil 53'de kesik çizgi). Aynı grafiklerde çalkalanan titreşim sönümleyici eklendikten sonra yapısal sistemin yanıtı da gösterilmiştir (kesik olmayan düz çizgi ile). Şekil 53'e bakıldığında çalkalanan sıvılı titreşim sönümleyici eklenmeden önce yapının açık bir rezonans davranışı gösterdiği görülmektedir. Ancak titreşim sönümleyici eklendikten sonra titreşimler (gerinim, ivme ve kat yer değiştirmesi) kontrol altına alınmıştır. Bu davranış Şekil 53'de oldukça belirgindir. Dikkat çeken bir diğer nokta titreşim sönümleyicinin devreye girerek yanıtı azaltması için 2-3 saniyelik zamana (2-3 titreşim periyodu) ihtiyaç duyulmasıdır. Titreşim sönümleyici olmadan 2-3 cm genlik değerlerine ulaşan yer değiştirme genliği, sıvılı titreşim sönümleyici eklendikten sonra birkaç milimetre genliğinde kalmıştır. Ancak hatırlanmalıdır ki bu değerler yataşkın sistem yanıtları (steady state response) değildir ve yanıt halen geçici yanıt rejimindedir. Sistem 10 saniyede yataşkın rejime geçmediği için yataşkın yanıtlar deneysel sonuçlar ile elde edilebilecektir.



**Şekil 53. Rezonanstaki yapının sönümleyicisiz yanıtı-----, Çalkalanan Titreşim Sönümleyici ile Yanıtı\_\_\_ a. İvme b. Yerdeğiştirme c. Gerilim**

#### 4.3.2 Durum 2:

Tablo 7’de belirtildiği üzere rezonansı 1 Hz olan yapısal sistemin ilk önce titreşim sönümleyici olmadan yapısal yanıtı (Şekil 54 kesik çizgi ile) hesaplanmıştır. Yanıtın genel davranışı Durum 1’e benzemektedir. İlk 1-2 periyot boyunca çalkalanma tam olarak başlamamış ancak daha sonra çalkalanmanın etkisiyle yapısal sistemin salınımı rezonans durumu altında artarken sıvılı sistem sürekli küçük genlikte kalmıştır.



**Şekil 54. Rezonanstaki yapının sönümleyicisiz yanıtı ----, Çalkalanan Titreşim Sönümleyici ile Yanıtı\_\_\_ a. İvme b. Yerdeğiştirme c. Gerinim**

Durum 1'deki yapı Model 1 olarak isimlendirilmiş yapıdır ve bu yapıda sıvının kütesinin yapının kütesine oranı yaklaşık olarak %18'dir. Durum 2'de Model 2 kullanılmıştır ve çalkalanan sönümleyicinin yapının kütesine oranı ise yaklaşık olarak %8.7'dir. İki sistemin de rezonans frekansı 1 Hz'dir. Ancak Durum 1'de sıvının kütesinin yapının kütesine oranı daha fazladır. Burada anlaşılacak istenen çalkalanan sönümleyicinin kütlesi artırıldığında geçici yanıt rejiminin nasıl etkilendiğidir. Tablo 8'de Durum 1 ve Durum 2 için titreşim sönümleyicili ve sönümleyicisiz sistemlerin yerdeğiştirme grafiklerinin tepe noktalarındaki değerleri oranlanmıştır. Tablo 8'deki değerlerin artışı daha yüksek bir sönümlenme demektir. Tablo 8'e göre zaman geçtikçe Durum 2'deki titreşim genliği azalışı Durum 1'den daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu da geçici yanıt rejiminde sıvı kütlesi oranının fazla olmasının önemli bir sönüm artışı sağlamadığını göstermektedir.

**Tablo 8. Geçici yanıt rejimindeki ilk 8 tepe noktasındaki yerdeğiştirmenin titreşim sönümleyici olmayan ve olan durumlardaki oranları.**

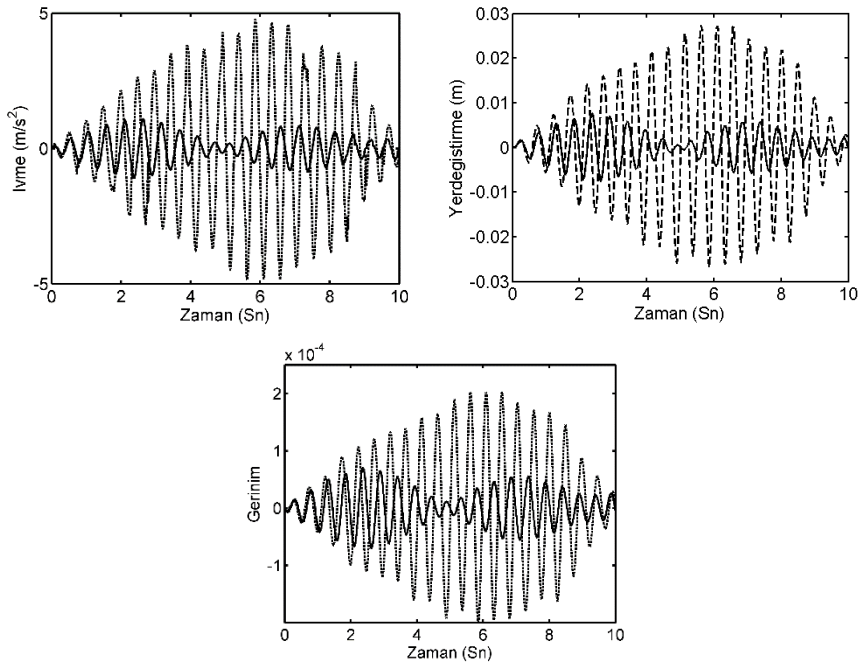
Yerdeğiştirme	1	2	3	4	5	6	7	8
Durum 1	1.50	4.27	4.48	7.10	5.87	6.39	7.60	7.35
Durum 2	1.22	1.97	5.11	5.30	8.38	13.70	8.60	10.17

#### 4.3.3 Durum 3:

Bu durumda kullanılacak fiziksel model olarak Model 3 seçilmiştir. Model 3 doğal frekansı 2 Hz olan bir yapıdır ve 2 Hz frekansında titreştirilerek sistem rezonansa getirilecektir. Bu

benzetimde sistemin doğal frekansı 2 Hz'den biraz farklıdır ve bu da 'beat' görünümüne neden olmuştur. Bu durum için sıvının çalkalanma doğal frekansı ise 1 Hz'dir. Anlaşılmaya çalışılan konu sıvının çalkalanma frekansı sistemin doğal frekansından uzak ise sistemin nasıl yanıt vereceğidir. Tahrik frekansı 2 Hz'dir ve sıvının çalkalanma frekansına eşit değildir. Bu durumda sıvı kendi doğal frekansında çalkalanmayacağı için ne kadar aktif olup yapının yanıtını nasıl etkileyeceği ilgilendiğimiz konudur.

Şekil 55'deki kesikli çizgiler çalkalanan sönümleyici olmadan yapının yanıtını göstermektedir. Düz çizgiler ise yapının çalkalanan sönümleyici ile yanıtını göstermektedir. Burada görüldüğü üzere geçici titreşim rejiminde ilk 1-2 salınım periyodundan sonra yapının titreşimi azalmaya başlamıştır.



**Şekil 55. Rezonanstaki yapının sönümleyicisiz yanıtı ----, Çalkalanan Titreşim Sönümleyici ile Yanıtı \_\_ a. İvme b. Yerdeğiştirme c. Gerinim**

Bu durumun önceki iki durumdan en önemli farkı bu durumda suyun çalkalanma frekansının yapının rezonans frekansına eşit olmayışıdır. Böyle bir durumda yapının titreşiminin daha önceki iki duruma göre (Durum 1 ve Durum 2) nasıl bir farklılık göstereceği incelenecektir. Bunun için Tablo 8'de verildiği gibi ilk 8 tepe noktasının çalkalanan titreşim sönümleyicili ve sönümleyicisiz değerleri karşılaştırılacaktır.

**Tablo 9. Geçici yanıt rejimindeki ilk 8 tepe noktasındaki yerdeğiştirmenin titreşim sönümleyici olmayan ve olan durumlardaki oranları.**

Yerdeğiştirme	1	2	3	4	5	6	7	8
Durum 3	1.35	1.48	1.36	1.82	1.84	2.33	3.10	4.75



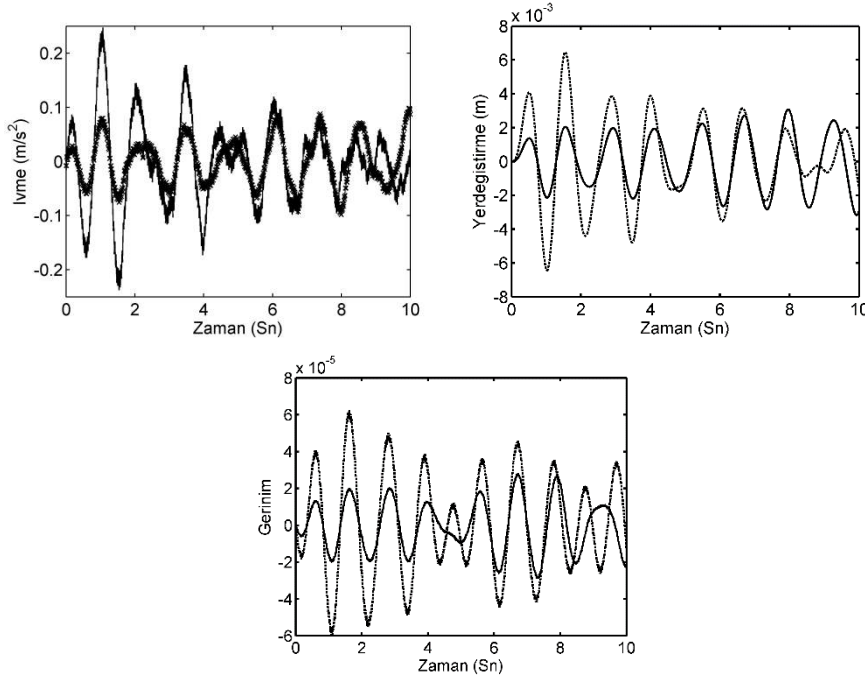
Tablo 9, Durum 3 için çalkalanan sönümleyicinin tepe noktalarında yarattığı genlik düşüşünün Durum 2 ve Durum 1'e göre daha az olduğunu göstermektedir. Bunun nedeninin sıvının çalkalanma doğal frekansının yapının doğal frekansına eşit olmaması olduğu düşünülmektedir.

#### 4.3.4 Durum 4:

Bu durumda yapının doğal frekansı suyun salınım frekansından oldukça uzaktadır. Bu durumdaki yapı davranışını anlamak için Model 4 kullanılacaktır. Bu modelin doğal frekansı 3.5 Hz'dir ve kaba konulan sıvının doğal frekansı ise 0.5 Hz'dir. Yapı 3.5 Hz frekansta titreştirilerek kendi doğal frekansında uyarılmaktadır. Bu durumun COMSOL'da simulasyonu yapılamadı. Tüm denemelere rağmen sıvı zamanla azalarak kabın içinde kütle korunamadı (bu durumda su yüksekliği daha önceki durumlardan yaklaşık 4 kat daha azdır). Bu yüzden bu sayısal benzetim sonucu COMSOL ile yapılamamıştır. Ancak ilerleyen kısımda sonuçlar ANSYS sayısal benzetimleri ile verilecektir.

#### 4.3.5 Durum 5:

Bu durumda incelenen konu tahrik genliği arttıkça yapının yanıtının bundan nasıl etkilendiğidir. Daha önce 1 mm zemin hareketi için yapılan sayısal benzetim bu kez 3 mm zemin hareketi için yapılarak (yapı ve çalkalanma doğal frekansları örtüştüğü durumlar) çalkalanan titreşim sönümleyicinin performansında bir farklılık olup olmadığına bakılmıştır.



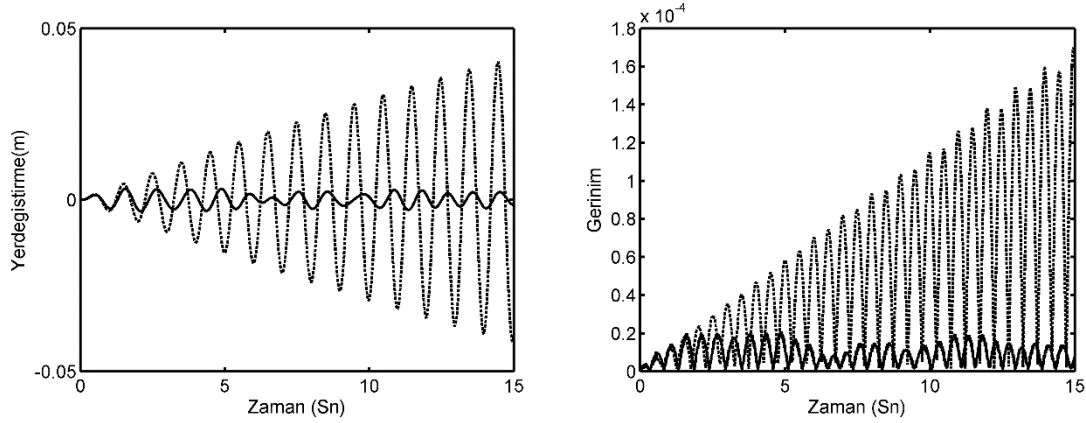
**Şekil 56. Durum 1'deki sistem için rezonanstaki yapının çalkalanan titreşim sönümleyici ile 1mm zemin hareketi altındaki \_\_\_\_\_, 3mm zemin hareketi altındaki yanıtı---- a. İvme b. Yerdeğiştirme c. Gerinim**

Şekil 56, Durum 1'deki sistemin 1 mm ve 3 mm zemin girdi hareketi altında yanıtlarını göstermektedir. Eğer sistemler doğrusal olsaydı üç kat girdi artırımı yanıtı üç kat yükseltirdi. Şekillerden görüleceği üzere başlangıçtaki birkaç periyotta 3 mm girdiye olan yanıtlar yaklaşık 2-3 kat daha yüksek olmaktadır. Ancak salınım sayısı arttıkça 1 mm girdiye ve 3 mm girdiye olan yanıtlar birbirine yaklaşmaktadır. Bu da çalkalanma miktarı arttıkça ve zaman ilerledikçe yüksek genlikli çalkalanmaların titreşimleri daha etkili düşürdüğünü göstermektedir. Ancak bunun bir üst limitinin olacağı düşünülmektedir. Eğer genlik iyice yükselip sıvı periyodik olarak çalkalanamaz duruma gelirse bu durumda yapı titreşim seviyelerinin bundan olumsuz yönde etkileneceği düşünülmektedir.

#### 4.3.6 Durumların ANSYS-FLUENT ile Sayısal Benzetimleri

##### Durum 1:

COMSOL programında çözülen durum ile aynı durum çözülmektedir. Görülen davranış COMSOL ile çok benzerdir. Model 1 için sistem başta rezonansa gelmişken çalkalanan titreşim sönümleyici 1-2 periyot içinde devreye girerek yapının girdiye olan yanıtını önemli miktarda düşürmüştür. Gerinim grafiklerinin COMSOL ile alınanlardan farklı görünmesinin sebebi ANSYS sonuçlarında gerinim değerlerinin mutlak değer olarak verilmesidir.



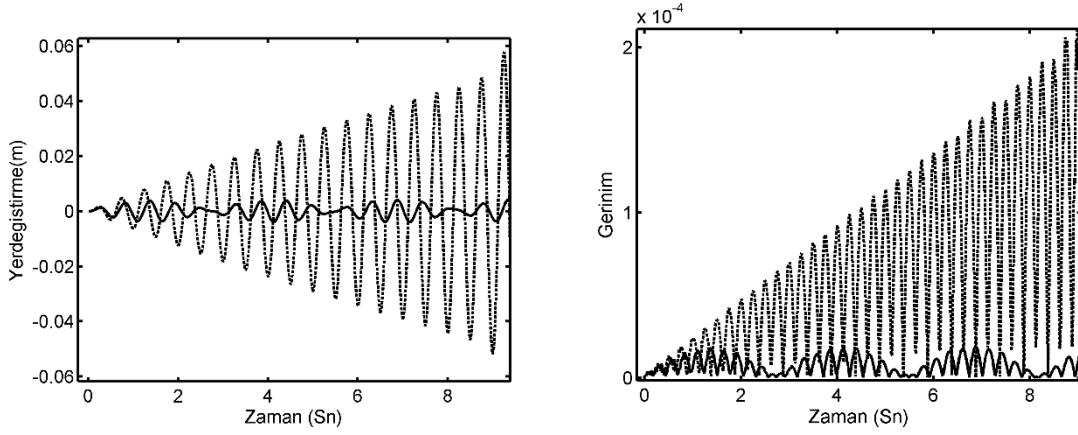
**Şekil 57. Rezonanstaki yapının sönümleyicisiz yanıtı ----, Çalkalanan Titreşim Sönümleyici ile Yanıtı \_\_\_ a. Yerdeğiştirme b. Gerinim**

##### Durum 2:

Durum 1 ve Durum 2'nin ikisi de 1 Hz doğal frekanslı bir yapının rezonansında uyarılırken 1 Hz çalkalanma doğal frekansı olan sönümleyici ile yanıtına odaklanmaktadır. Durum 1'de COMSOL ve ANSYS arasında başarılı bir uyum görüldüğü için bu durumun sayısal benzetimi yapılmamıştır.

### Durum 3:

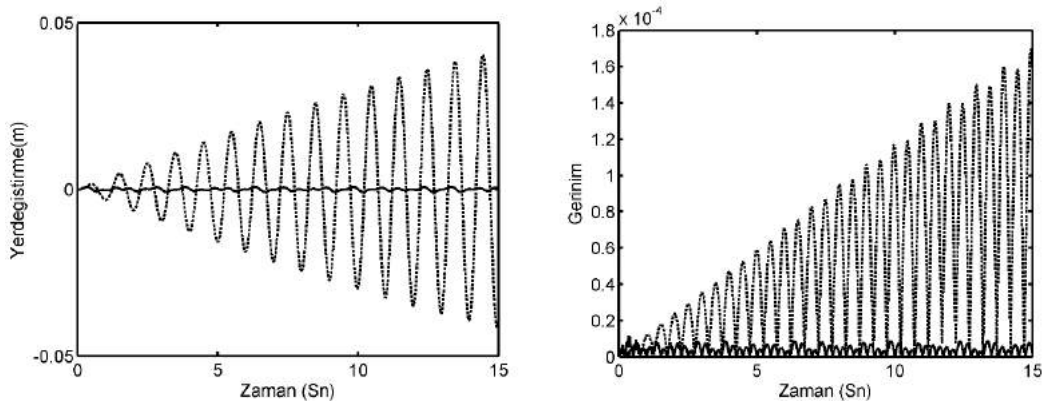
Tablo 7’de gösterilen Model 3 kullanılmıştır. Bu durumda yapının rezonansı 2 Hz’dir ve rezonansında titreştirilen yapının titreşimi çalkalanma doğal frekansı 1 Hz olan titreşim sönümleyici ile azaltılmak istenmektedir. Şekil 58’de görüldüğü üzere çalkalanan titreşim sönümleyici yapının titreşimlerini düşürmekte son derece başarılıdır. Şekil 58’de görüldüğü üzere Durum 3 titreşimleri söndürmede Durum 1 gibi başarılıdır. COMSOL simulyonları bunun aksi bir durum göstermektedir. COMSOL simulyonlarında titreşim sönümlenme Durum 3’te Durum 1’e göre daha başarısızdır.



**Şekil 58. Rezonanstaki yapının sönümleyicisiz yanıtı ----, Çalkalanan Titreşim Sönümleyici ile Yanıtı\_\_\_ a. Yerdeğiştirme b. Gerinim**

### Durum 4:

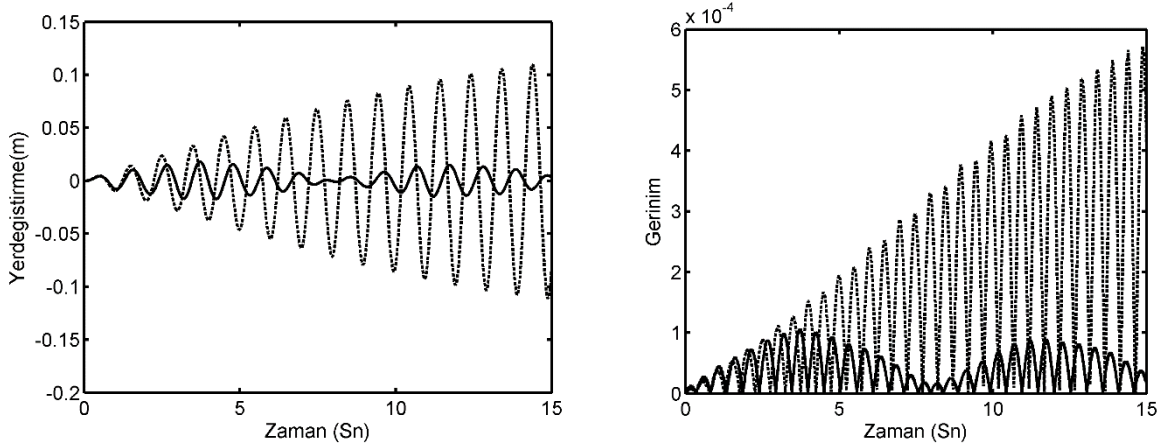
Durum 4 doğal frekansı 3.5 Hz olan, Tablo 7’de Model 4 olarak gösterilen kısa ayaklı sistemi rezonansında titreştirirken çalkalanma frekansı 0.5 Hz olan titreşim sönümleyicinin yapının yanıtına olan etkisini araştırmaktır. Bu durumun sayısal benzetimi COMSOL yazılımı kullanılarak sisteminin kütlelerini korumadaki zorluklardan dolayı yapılamamıştı. ANSYS çözümünde ise bu durumda çok başarılı bir sönümlenme görülmüştür. Yanıt neredeyse 15 saniye içinde 20 kattan fazla azalmıştır.



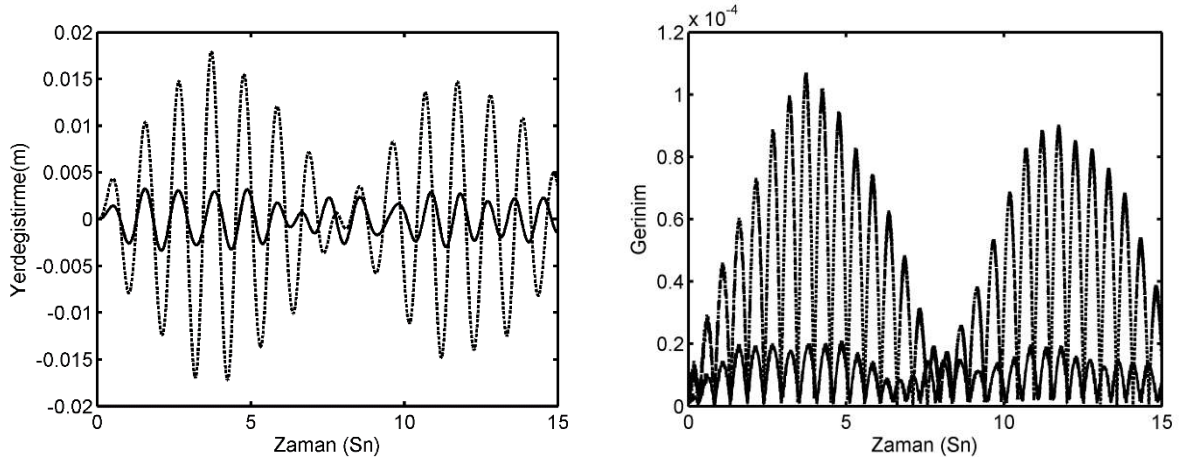
**Şekil 59. Rezonanstaki yapının sönümleyicisiz yanıtı ----, Çalkalanan Titreşim Sönümleyici ile Yanıtı\_\_\_ a. Yerdeğiştirme b. Gerinim**

### Durum 5:

Durum 5'de ise Durum 1'deki sistemin 1 mm ve 3 mm girdi genliği altında titreştiği zaman vereceği yanıtlar karşılaştırılacaktır. Daha önce Durum 1'de ANSYS-FLUENT kullanılarak 1 mm genlik altındaki yanıt incelenmişti. Bu durumda ise 3 mm genlik girdisi altındaki yanıt incelenecektir. 3 mm girdiye olan yapısal rezonanstaki sönümleyicisiz ve sönümleyicili yanıtın ANSYS-FLUENT ile gerçekleştirilen sayısal benzetimleri Şekil 60'da verilmiştir. Yanıt Durum 1'e benzemektedir ancak Şekil 61'e bakıldığında sönümleyicinin performansında bir miktar düşüş gözlenmektedir.



**Şekil 60.** Durum 1'deki sistem için rezonanstaki yapının 3mm zemin hareketi altındaki hareketi --, 3mm zemin hareketi altındaki yanıtı titreşim sönümleyici ile hareketi\_\_\_ a. Yerdeğiştirme b. Gerinim



**Şekil 61.** Durum 1'deki sistem için rezonanstaki yapının çalkalanan titreşim sönümleyici ile 1mm zemin hareketi altındaki \_\_\_\_, 3 mm zemin hareketi altındaki yanıtı---- a. Yerdeğiştirme b. Gerinim

Şekil 61'de ise çalkalanan titreşim sönümleyici ile olan yanıt 1 mm girdi genliği ve 3 mm girdi genliği için çizilmiştir. Şekil 61'de de görüldüğü üzere genelde kesik çizgili olarak gösterilen yanıtlar (3 mm girdi) düz çizgili yanıtların üç katından daha fazladır. Bu da girdi üç kat

arttırıldığında (yüksek genlikli çalkalanma için) sönümlemenin daha başarısız olduğunu göstermektedir

#### 4.3.7 Sayısal Benzetim Sonuçlarının Yorumlanması:

Bu gelişme raporu döneminde yapılan sayısal benzetimlerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Yapının doğal frekansı, sıvının çalkalanma doğal frekansı ve tahrik frekansı aynı değer olduğu zaman çalkalanan titreşim sönümleyici yapının yanıtını geçici yanıt rejiminde önemli miktarda azaltmaktadır.
- COMSOL çalışmalarında Durum 1'deki ve Durum 2'deki sistemlerin ikisinin de çalkalanma ve yapı doğal frekansları aynıdır. Ancak Durum 1'deki sistemde sönümleyicinin yapıya olan oranı (%18) Durum 2'ye göre (%9) iki kat daha yüksektir. Ancak bu kütle oran farkı geçici titreşim rejiminde sönümleyici performansı açısından önemli bir fark yaratmamıştır.
- COMSOL ile yapılan Durum 5 çözümünde rezonans frekansında çalkalanma genliği arttıkça, zamanla (6-7 periyot tamamlandıktan sonra) sönümleyicinin yapının yanıtını azaltma performansının düşük genlikte çalkalanan sisteme göre arttığı gözlenmiştir. ANSYS-FLUENT ile yapılan çalışmalarda ise bu durumun tersine genlik arttıkça geçici yanıt rejiminde sönümleyici performansının düştüğü bir durum ortaya çıkmıştır. Bir sonraki bölümde bu durum deneysel olarak incelenecek ve sayısal yanıtların doğruluğu tartışılacaktır.
- COMSOL sonuçları ile ANSYS-FLUENT sonuçları arasındaki bir başka tutarsızlık da çalkalanma doğal frekansının yapının doğal frekansından uzak olduğu durum için gerçekleşmiştir. COMSOL çalışmaları Durum 3'de yapısal sistemin doğal frekansı (2 Hz) sönümleyicinin çalkalanma doğal frekansından farklı ise (1 Hz) sönümleyici performansının düştüğünü göstermektedir. Ancak ANSYS-FLUENT sayısal benzetimleri ise yapısal doğal sistem ile çalkalanma doğal frekansının farklı olduğu durumlarda (Durum 3 ve Durum 4) sönümleyicinin performansında bir azalma göstermemektedir. Bu çelişkiye deneysel incelemelerden sonra yeniden değinilecektir.
- COMSOL ile yapılan benzetimlerde bazı durumlarda sıvı kütesinin korunması ile ilgili sorun yaşanmaya devam edilmiştir. Durum 4 bu yüzden COMSOL ile yapılamamıştır. ANSYS benzetimlerinde ise 1 dakikaya varan çalkalama denemelerinde dahi herhangi bir su eksilmesi görülmemiştir.
- İki sayısal benzetim yazılımı da yapının doğal frekansı, tahrik frekansı ve çalkalanma doğal frekansı örtüşüğünde sönümleyicinin başarılı olduğunu göstermektedir. Ancak

sayısal benzetimlerin çok uzun sürmesinden dolayı bu analizler farklı tahrik frekansları için yapılamadı. Farklı tahrik frekansları için yanıtlar deneysel kısımda incelenecektir.

- Tüm sayısal benzetimler hesapların uzun süreler almasından dolayı sadece 10-15 saniye süreler için yapılmıştır. Ancak yapısal ve yapı-sönümleyici sistemleri bu sürelerde yatışkın yanıt rejimine geçememektedirler. Bu nedenden dolayı yatışkın titreşim yanıtları deneysel kısımda incelenecektir.

#### 4.4 Yapısal-Sıvı Etkileşimli Sistemin Deneysel Çalışma Sonuçları

Tablo 6'da tanımlanan bina modelleri kullanılarak oluşturulan farklı durumlar için deneyler yapılmıştır. 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. Bina modelinin rezonans frekansından uzak frekanslardaki ölçümler durağan durum için kaydedilmiştir. Sadece bina modelinin rezonans frekansı ve rezonans frekansının hemen altı ve üstündeki frekanslar için geçici durum değerleri de kaydedilmiştir. Bunlara ek olarak çalkalanan sönümleyicinin olmadığı bazı durumlarda sistemin yanıtının çok büyümesinden dolayı yapının zarar görmemesi için durağan durum kaydedilemeden hareket sonlandırılmıştır.

Verilecek 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 tablolarda belirtilmiştir. Kare ile işaretlenmeyen değerler ise durağan durum yanıtıdır. Deneyler yapılırken 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 tablo halinde verilmiştir. Ayrıca gerinim ve kat yer değiştirmelerinin frekansa bağlı değişimi de grafik olarak verilmiştir. Bu bölümde verilen grafiklerde siyah tüm çizgi çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan durumu, kırmızı kesikli ise çalkalanan titreşim sönümleyici olan durumu göstermektedir.

Tablo 7’de sayısal benzetim ile incelenen konfigürasyonlara benzer şekilde deneysel olarak incelenecek konfigürasyonlar Tablo 10’da verilmiştir.

**Tablo 10. Deney Yapılacak Durumların Özellikleri**

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 Oranı
1	1	1	2	4	0,18
2	1	1	1	3	0,089
3	2	1	1	3	0,38
4	3,5	0,5	1	-	0,32

#### 4.4.1 Durum 1:

Bu durum Tablo 10’da belirtildiği gibi yapının doğal frekansı 1 Hz ve çalkalanan sönümleyicinin çalkalanma frekansı 1 Hz’e ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Sistemde çalkalanan sönümleyicinin olduğu ve olmadığı iki durum için farklı hareket frekanslarında 2 mm ve 4 mm hareket genliği için ölçümler yapılmıştır. Durum 1.a düşük hareket genliği, Durum 1.b ise yüksek hareket genliği için sonuçları göstermektedir. Ayrıca Durum 1’de çalkalanan sönümleyicinin bina modelinin kütesine oranı 0,18’dir.

#### Durum 1.a:

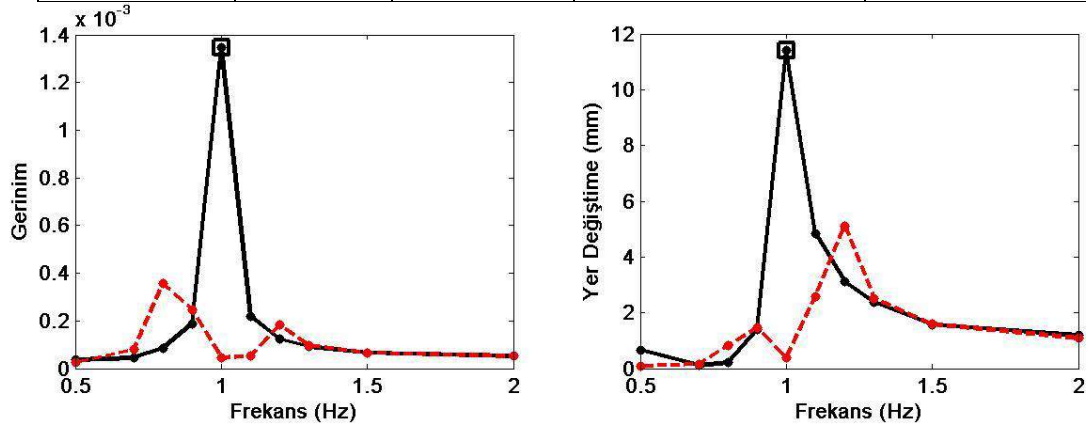
Tablo 11 düşük hareket genliği için sönümleyici olmayan durumun sonuçlarını, aynı genlik için sönümleyici olan sistemin sonuçları göstermektedir. Şekil 62’de ise gerinim ve kat yer değiştirmesinin hareket frekansına bağlı grafiği görülmektedir.

**Tablo 11. Durum 1 için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (2 mm girdi genliği)**

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

**Tablo 12. Durum 1 için sönümleyici olan sistemin yanıtı (2 mm girdi genliği)**

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Yer Değişirme (mm)	Yük Hücresi (N)
0,5	2,4E-05	0,02	0,1	0,3
0,7	8,1E-05	0,04	0,2	1,2
0,8	3,6E-04	0,25	0,8	5,6
0,9	2,5E-04	0,29	1,5	4,6
1,0	4,5E-05	0,04	0,4	1,8
1,1	5,3E-05	0,15	2,6	1,7
1,2	1,8E-04	0,29	5,1	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 62. Durum 1 için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değiştirme (2 mm girdi genliği)**

#### Durum 1.b:

Tablo 13 yüksek hareket genliği olan 4 mm için sönümleyici olmayan durumun sonuçlarını, Tablo 14 aynı genlik için yapı ile sönümleyicinin birlikte olduğu sistemin sonuçlarını göstermektedir. Şekil 63'te ise gerinim ve kat yer değiştirmenin 4 mm hareket girdisi için frekansa bağlı grafiği görölmektedir.

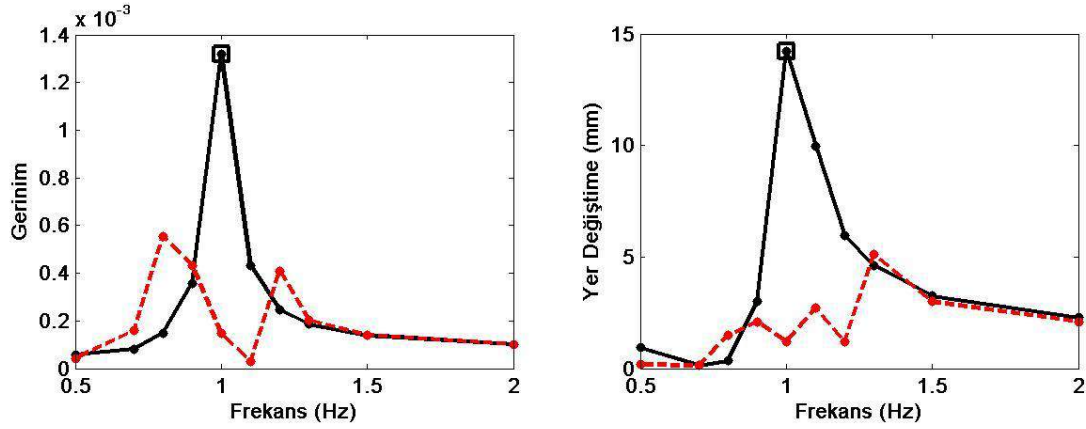
**Tablo 13. Durum 1 için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (4 mm girdi genliği)**

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Yer Değiştirme (mm)
0,5	5,7E-05	0,07	0,9
0,7	8,2E-05	0,05	0,1
0,8	1,5E-04	0,10	0,4
0,9	3,6E-04	0,28	3,0
1,0 @ 5 s	1,3E-03	0,12	14,2
1,1	4,3E-04	0,49	10,0
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



**Tablo 14. Durum 1 için sönümleyici olan sistemin yanıtı (4 mm girdi genliği)**

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



**Şekil 63. Durum 1 için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değişikliği (4 mm girdi genliği)**

Durum 1 için verilen tablo ve grafikler incelendiğinde yüksek ve düşük genlik için şu sonuçlar elde edilir. Rezonans frekansı olan 1 Hz değerinde çalkalanan titreşim sönümleyici sistemin yanıtını etkili bir şekilde düşürmektedir. Rezonans frekansının hemen altında ve üstündeki değerler olan 0,9 ve 1,1 Hz'de ise sistemin yanıtının az bir miktar da olsa düştüğü görülmektedir. Biraz daha uzak olan 0,8 Hz ve 1,2 Hz'de ise sistem yanıtı için 2 yeni tepe noktası olduğu görülür. Bu tepe noktalarındaki sistem yanıtları çalkalanan sönümleyici olmayan sistemin rezonans yanıtına göre küçüktür. Bu gözlemlerden yola çıkarak bu yapı modeli için çalkalanan titreşim sönümleyicinin etkisinin, sönümü az olan titreşim sönümleyici ile benzer olduğu söylenebilir. Sistemin hareket frekansı rezonans frekansından uzaklaştıkça ise çalkalanan titreşim sönümleyici etkisini yitirmektedir.

Girdi genliğinin sistem üzerindeki etkisi incelenirse, girdi genliğinin artması ile sönümleyici etkinliğini kaybetmemiştir. Hatta artan girdi genliği ile sönümleyici performansı az bir miktar da olsa artmıştır.

#### 4.4.2 Durum 2:

Bu durum da Durum 1’de olduğu gibi yapının doğal frekansı 1 Hz ve çalkalanan sönümleyicinin çalkalanma 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 gerekmiştir. Durum 2 için çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütle sinin yapı kütle sine oranı 0,089’dur. Bu oran Durum 1 için 0,18’dir. 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 için, sistemde çalkalanan sönümleyicinin olduğu ve olmadığı iki durum için farklı hareket frekanslarında 1 mm ve 3 mm hareket genliği için ölçümler yapılmıştır. Durum 2.a düşük hareket genliği, Durum 2.b ise yüksek hareket genliği için sonuçları göstermektedir.

#### Durum 2.a:

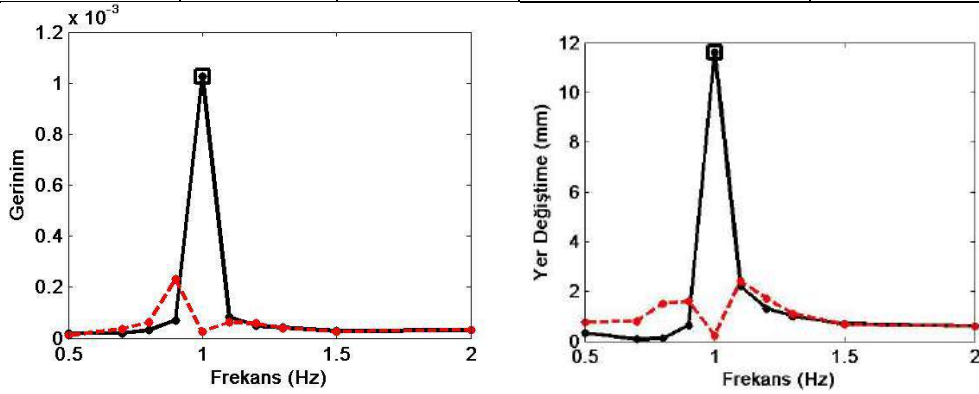
Tablo 15 Durum 2 için düşük hareket genliğinde hareket eden ve üzerinde sönümleyici olmayan sistemin sonuçlarını, Tablo 16 ise aynı genlik için üzerinde sönümleyici olan sistemin sonuçları göstermektedir. Şekil 64’de ise gerinim ve kat yer değiştirmenin hareket frekansına bağlı grafiği verilmiştir.

**Tablo 15. Durum 2 için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği)**

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m <sup>2</sup> )	Yer Değiştirme (mm)
0,5	1,9E-05	0,02	0,3
0,7	2,0E-05	0,02	0,1
0,8	3,1E-05	0,03	0,1
0,9	6,9E-05	0,07	0,6
1,0 @ 24 s	1,0E-03	0,52	11,6
1,1	8,4E-05	0,12	2,2
1,2	4,8E-05	0,09	1,3
1,3	4,1E-05	0,07	1,0
1,5	2,8E-05	0,65	0,7
2,0	3,2E-05	0,82	0,6

**Tablo 16. Durum 2 için sönümleyici olan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği)**

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme ( $m/s^2$ )	Yer Değişirme (mm)	Yük Hücresi (N)
0,5	1,1E-05	0,01	0,8	0,5
0,7	3,6E-05	0,02	0,8	1,3
0,8	6,2E-05	0,04	1,5	2,0
0,9	2,3E-04	0,25	1,6	6,2
1,0	2,5E-05	0,03	0,2	2,0
1,1	6,1E-05	0,13	2,4	2,8
1,2	5,8E-05	0,10	1,7	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	0,98	0,6	0,9
2,0	3,3E-05	0,98	0,6	0,9



**Şekil 64. Durum 2 için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değişirme (1 mm girdi genliği)**

Durum 2.b:

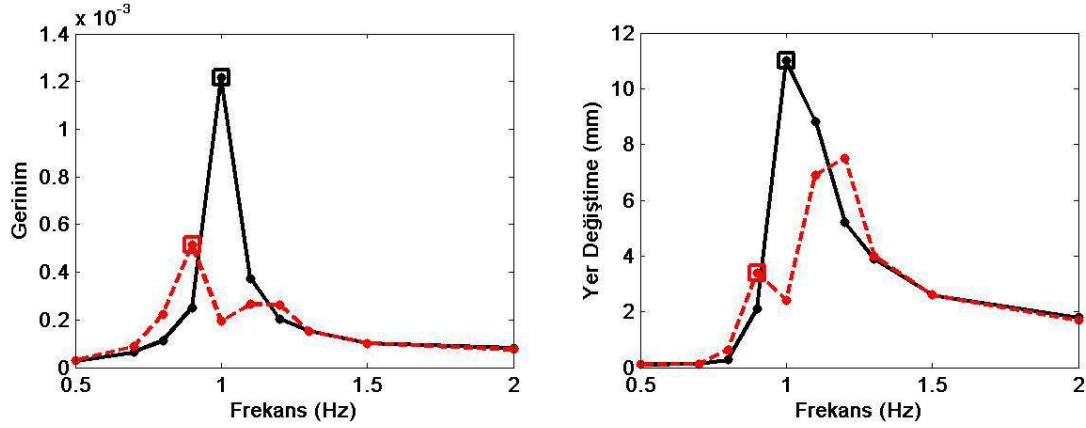
Tablo 17 yüksek hareket genliği olan 3 mm için sönümleyici olmayan durumun sonuçlarını, Tablo 18 aynı genlik için yapı ile sönümleyicinin birlikte olduğu sistemin sonuçlarını göstermektedir. Şekil 65'de ise gerinim ve kat yer değiştirmenin 3 mm hareket girdisi için frekansa bağlı grafiği görülmektedir.

**Tablo 17. Durum 2 için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (3 mm girdi genliği)**

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme ( $m/s^2$ )	Yer Değişirme (mm)
0,5	2,9E-05	0,02	0,1
0,7	6,5E-05	0,04	0,1
0,8	1,1E-04	0,08	0,3
0,9	2,5E-04	0,21	2,1
1,0 @ 6 s	1,2E-03	0,53	11,0
1,1	3,7E-04	0,45	8,8
1,2	2,0E-04	0,29	5,2
1,3	1,5E-04	0,25	3,9
1,5	1,0E-04	0,22	2,6
2,0	8,1E-05	0,29	1,8

**Tablo 18. Durum 2 için sönümleyici olan sistemin yanıtı (3 mm girdi genliği)**

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



**Şekil 65. Durum 2 için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değişirme (3 mm girdi genliği)**

Verilen grafikler ve tablolar incelendiğinde Durum 2 ile ilgili şu yorumlar yapılabilir. Durum 1'dekine benzer şekilde rezonans frekansında çalkalanan sönümleyici sistemin yanıtını önemli bir miktarda düşürmüştür. Ancak rezonansa komşu olan 0,9 Hz ile 1,1 Hz frekans değerlerinde yanıtların Durum 2 için düşmemiş olduğu görülmektedir. Durum 1'de sisteme çalkalanan titreşim sönümleyici eklenmesi ile rezonans ve etrafındaki frekanslarda daha etkili bir sönümlenme görülmekteydi. Bir önceki durumda olduğu gibi rezonans frekansından uzaklaştıkça çalkalanan titreşim sönümleyicinin etkinliğini kaybettiği görülebilir.

Durum 2 için yüksek ve düşük girdi genliğindeki yanıtlar ayrı ayrı incelenirse çalkalanan titreşim genliğinin performansının artan girdi genliğine rağmen olumsuz etkilenmediği görülür.

#### 4.4.3 Durum 3:

Durum 3'de yapının rezonans frekansı 2 Hz'e ayarlanmıştır. Çalkalanan titreşim sönümleyicinin çalkalanma frekansı ise 1 Hz'dir. Bina modeli rezonans frekansı ile çalkalanan titreşim sönümleyicinin çalkalanma frekansı diğer 2 durumdan farklı olacak şekilde aynı değere ayarlanmamıştır. Bu durumun sonuçları incelendiğinde bina modelinin doğal frekansı ile çalkalanan sönümleyicinin doğal frekansının aynı olmadığı durumlar hakkında fikir edinilecektir. Durum 3 için çalkalanan titreşim sönümleyici kütesinin bina modelinin kütesine oranı 0,38'dir. Durum 3'de, sistemde çalkalanan sönümleyicinin olduğu ve olmadığı iki durum için farklı hareket frekanslarında 1 mm ve 3 mm hareket genliği için ölçümler yapılmıştır. Durum 3.a düşük hareket genliği için sonuçlar verirken, Durum 3.b ise yüksek hareket genliği için sonuçları göstermektedir.

#### Durum 3.a:

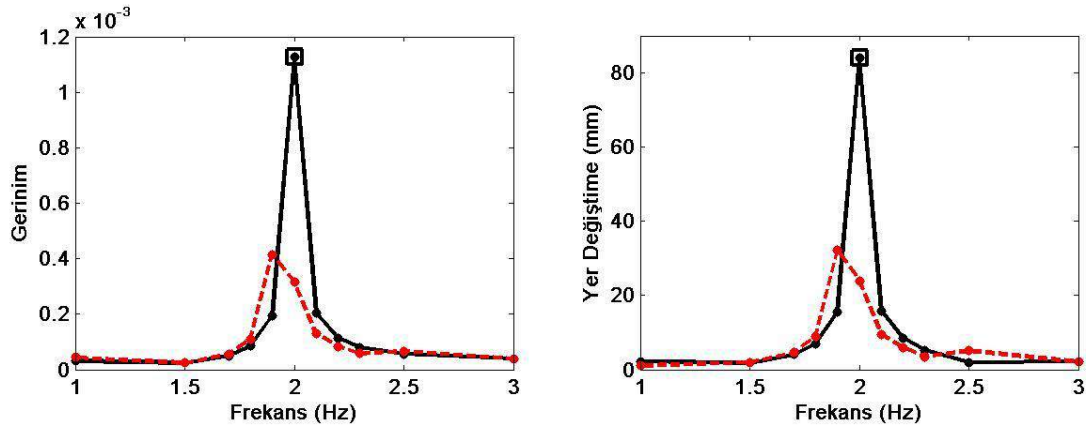
Düşük girdi genliğinde, çalkalanan titreşim sönümleyicinin olmadığı sistem için sonuçlar Tablo 19'de görülmektedir. Tablo 20'de ise yine düşük girdi genliği için ancak bu sefer üzerinde sönümleyici olan sistem için alınan sonuçlar verilmiştir. Ayrıca verilen tablolara ek olarak Şekil 66'de sönümleyici olan ve olmayan sistem için gerinim ve kat yer değiştirmesi değerlerinin frekansa bağlı grafikleri birlikte verilmiştir.

**Tablo 19. Durum 3 için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği)**

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Yer Değiştirme (mm)
1,0	3,1E-05	0,37	2,2
1,5	2,4E-05	0,22	1,9
1,7	5,0E-05	0,52	4,1
1,8	8,5E-05	0,94	6,9
1,9	2,0E-04	2,30	15,5
2,0 @ 10 s	1,1E-03	13,50	84,0
2,1	2,0E-04	2,82	15,9
2,2	1,1E-04	1,67	8,5
2,3	8,1E-05	1,36	5,2
2,5	5,6E-05	0,96	2,0
3,0	4,0E-05	0,85	2,2

**Tablo 20. Durum 3 için sönümleyici olan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği)**

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Yer Değiştirme (mm)	Yük Hücresi (N)
1,0	4,4E-05	0,13	1,1	4,3
1,5	2,5E-05	0,23	2,0	2,1
1,7	5,6E-05	0,57	4,6	3,0
1,8	1,1E-04	1,22	8,9	5,0
1,9	4,1E-04	4,68	32,2	15,7
2,0	3,2E-04	3,81	24,0	13,4
2,1	1,3E-04	1,75	9,6	6,6
2,2	8,4E-05	1,27	6,0	4,7
2,3	5,8E-05	0,77	3,5	3,3
2,5	6,7E-05	1,34	5,1	3,8
3,0	3,9E-05	0,78	2,1	3,6



**Şekil 66. Durum 3 için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değiştirme (1 mm girdi genliği)**

### Durum 3.b:

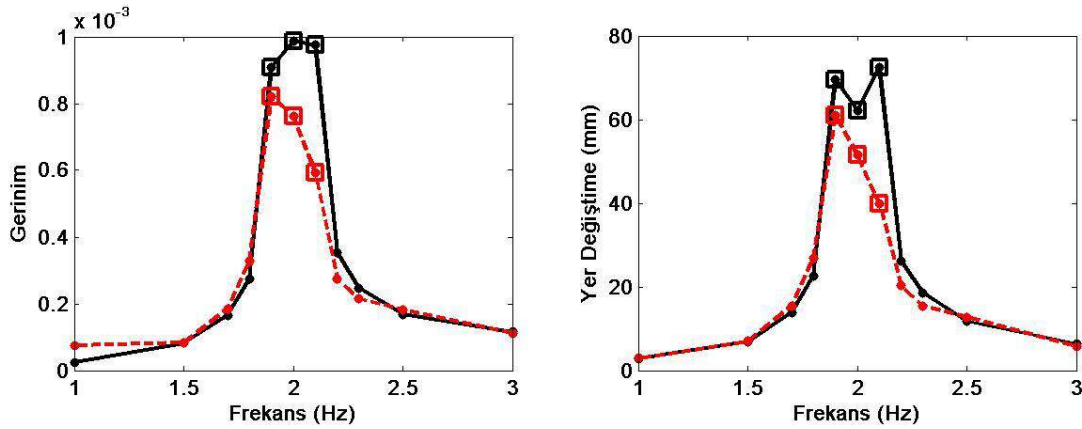
Tablo 21 yüksek hareket genliği olan 3 mm için sönümleyici olmayan durumun sonuçlarını, Tablo 22 aynı genlik için yapı ile sönümleyicinin birlikte olduğu sistemin sonuçlarını göstermektedir. Şekil 67'de Durum 3 için gerinim ve kat yer değiştirmesinin 3 mm hareket girdisi için frekansa bağlı grafiği çalkalanan titreşim sönümleyicinin olduğu ve olmadığı durum için ayrı ayrı görülmektedir.

**Tablo 21. Durum 3 için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (3 mm girdi genliği)**

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Yer Değiştirme (mm)
1,0	2,4E-05	0,34	2,8
1,5	8,2E-05	0,71	6,9
1,7	1,7E-04	1,68	13,8
1,8	2,8E-04	2,98	22,6
1,9 @ 3 s	9,1E-04	11,10	69,5
2,0 @ 2,5 s	9,9E-04	11,12	62,2
2,1 @ 2,9 s	9,8E-04	12,68	72,4
2,2	3,5E-04	5,10	26,2
2,3	2,5E-04	3,88	18,5
2,5	1,7E-04	2,90	11,7
3,0	1,2E-04	2,28	6,3

**Tablo 22. Durum 3 için sönümleyici olan sistemin yanıtı (3 mm girdi genliği)**

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Yer Değiştirme (mm)	Yük Hücresi (N)
1,0	7,5E-05	0,28	3,0	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	26,8	12,9
1,9 @ 3 s	8,2E-04	9,35	61,0	35,1
2,0 @ 2,5 s	7,6E-04	8,57	51,5	32,3
2,1 @ 2 s	5,9E-04	6,63	39,9	24,9
2,2	2,8E-04	3,81	20,3	11,8
2,3	2,1E-04	3,17	15,4	10,2
2,5	1,8E-04	3,19	12,6	7,4
3,0	1,1E-04	2,08	5,8	5,9



**Şekil 67. Durum 3 için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değiştirme (3 mm girdi genliği)**

Durum 3 için verilen tablo ve grafikler incelendiğinde, sisteme eklenen çalkalanan titreşim sönümleyicinin, sistemin davranışını Durum 1 ve 2'den farklı etkilediği görülmektedir. Durum 1

ve 2'de sisteme çalkalanan titreşim sönümleyici eklendiğinde sistemin yanıtındaki 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 durum görülmemektedir. Yani bu durumda eklenen çalkalanan titreşim sönümleyici ayarlanmış titreşim sönümleyici gibi çalışmamıştır. Durum 3'te çalkalanan titreşim sönümleyicinin eklenmesi, sisteme ek kütle eklenmesi ve sistemin sönüm oranının bir miktar yükseltilmesi ile aynı etkiyi yaratmıştır.

#### 4.4.4 Durum 4:

Durum 4'de ise Durum 3'dekine 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 için çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütle sinin bina modelinin kütle sine oranı 0,32'dir. Bu yüzden tablo ve grafikler sadece 1 mm hareket girdi genliği için verilecektir. Tablo 23'de Durum 4 için üzerinde sönümleyici olmayan sistemin yanıtı gösterilmiştir. Tablo 24'de ise üzerinde sönümleyici olan sistem için alınan veriler gösterilmiştir. Şekil 68'de de gerinim ve kat yer değiştirme verisi sönümleyici olan ve olmayan durum için verilmiştir.

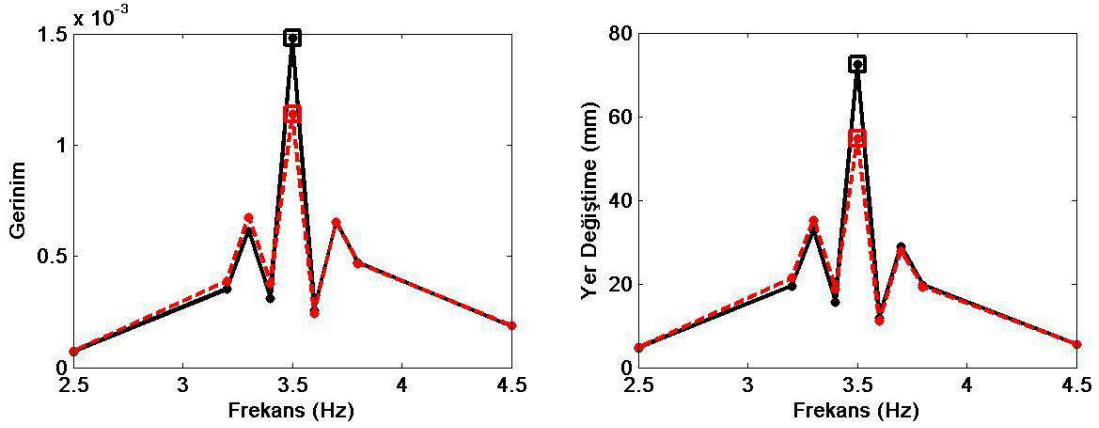
**Tablo 23. Durum 4 için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği)**

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Yer Değiştirme (mm)
2,5	7,1E-05	1,3	4,7
3,2	3,5E-04	7,8	19,5
3,3	6,1E-04	13,9	32,6
3,4	3,1E-04	7,2	15,7
3,5 @ 13,5 s	1,5E-03	35,0	72,4
3,6	2,6E-04	6,3	11,9
3,7	6,5E-04	15,7	28,9
3,8	4,7E-04	11,4	19,7
4,5	1,9E-04	4,4	5,5



**Tablo 24. Durum 4 için sönümleyici olan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği)**

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Yer Değiştirme (mm)	Yük Hücresi (N)
2,5	7,5E-05	1,2	4,8	4,1
3,2	3,9E-04	8,6	21,4	18,8
3,3	6,7E-04	15,1	35,2	30,4
3,4	3,8E-04	8,5	18,8	17,2
3,5 @ 9,5 s	1,1E-03	26,5	54,7	55,5
3,6	2,4E-04	5,7	11,1	13,4
3,7	6,5E-04	15,2	27,8	28,2
3,8	4,7E-04	11,0	19,3	22,8
4,5	1,9E-04	4,4	5,5	10,7
4,5	1,9E-04	4,4	5,5	10,7
4,5	1,9E-04	4,4	5,5	10,7



**Şekil 68. Durum 4 için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değiştirme (1 mm girdi genliği)**

Durum 4'de 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 bir miktar genlik düşmesi vardır.

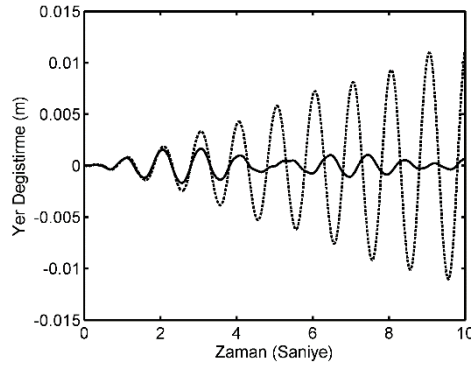
#### **4.4.5 Geçici Yanıt Rejiminde Sayısal Benzetim Sonuçları ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması**

Bir önceki kısımda deneysel çalışmaların yatışkın rejim için sonuçları incelenmişti. Ondan önceki kısımda ise geçici yanıt rejiminde çalkalanan sıvılı titreşim sönümleyicilerin davranışları sayısal benzetimler ile anlaşılmaya çalışılmıştı. Sayısal benzetimler yatışkın titreşim rejimi için yapılamamıştı çünkü bunu gerçekleştirebilmek için 1-2 dakika süren sayısal benzetim gerçekleştirmek gerekmektedir. Ancak bu gerekli hesaplama süreleri açısından mümkün

değildi. Bu nedenden dolayı bu kısımda sayısal benzetim kısmında öne sürülen bazı sonuçların geçerliliği deneysel çalışma sonuçları ile doğrulanacaktır. Doğrulanacak sonuçlar gelecek kısımlarda alt başlıklar olarak verilmiştir.

### **Çalkalanma doğal frekansı ile yapısal doğal frekansın yakın olduğu durumlar**

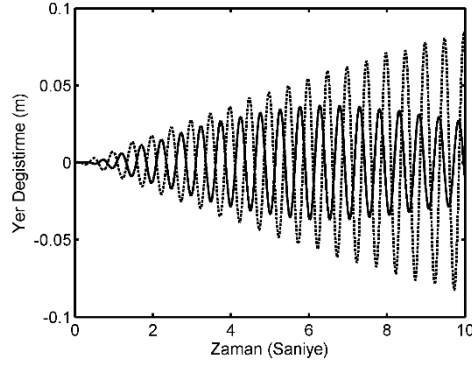
Bu koşul altında Durum 1 ve Durum 2'de incelenen sistemleri içermektedir. Bu durumlar için COMSOL ile sayısal benzetim sonuçları Şekil 53 ve Şekil 54'de görülebileceği üzere sönümleyicinin çok başarılı olduğunu belirtiyorlardı. Durum 2 için deneysel yanıt göstermektedir. Şekil 69 ve Şekil 54'den görülebileceği üzere yanıt davranışı son derece benzerdir. Bu benzerlik Şekil 57'de gösterildiği üzere ANSYS-FLUENT sonuçları için de geçerlidir. Bu durumlar için sayısal benzetim sonuçları deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır.



**Şekil 69. Durum 2 için yapının geçici rejimde yer değiştirmesinin rezonans frekansındaki (1 Hz) deney ile ölçülen değerleri ---- Sönümleyici olmadan \_\_\_\_ Sönümleyiciyle**

### **Yapısal doğal frekans ile çalkalanma doğal frekansınının birbirinden uzakta olduğu durumlar**

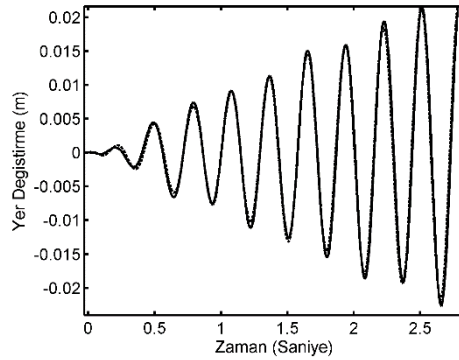
Bu durumlar sayısal benzetim kısmındaki Durum 3 (2 Hz yapı doğal frekansı, 1 Hz çalkalanma doğal frekansı) ve Durum 4'ü (3.5 Hz yapı doğal frekansı, 0.5 Hz çalkalanma doğal frekansı) kapsamaktadır. Sayısal benzetim kısmından hatırlanacağı üzere COMSOL Durum 3 için sönümleyicinin Durum 1 ve Durum 2'deki kadar etkin olmasa da rezonans yanıtında kısmi bir azalma yarattığını göstermişti (Şekil 55). ANSYS-FLUENT ise Durum 3 için etkin bir sönümleme göstermekteydi (Şekil 58).



**Şekil 70. Durum 3 için yapının geçici rejimde yer değiştirmesinin rezonans frekansındaki (2Hz) değerleri ---- Sönümleyici olmadan \_\_\_\_ Sönümleyiciyle**

Şekil 70’de görüldüğü üzere deneysel sonuçlar geçici rejim bölgesinde rezonans davranışının sönümleyici tarafından engellendiğini ancak genlik düşüşünün önceki iki duruma göre daha az olduğunu göstermektedir. COMSOL sayısal sonuçları deneysel sonuca ANSYS-FLUENT sonuçlarından daha yakın görünmektedir.

Bu yapısal doğal frekans ile çalkalanma doğal frekansının iyice ileri götürüldüğü durum olan Durum 4 COMSOL tarafından sınıının kütlesi korunamadığı için gerçekleştirilememiştir. ANSYS-FLUENT’in sayısal benzetim sonuçları ise Şekil 59’da gösterilmiştir. Durum 4’ün deneysel sonucunun grafiği Şekil 71’de gösterilmiştir.

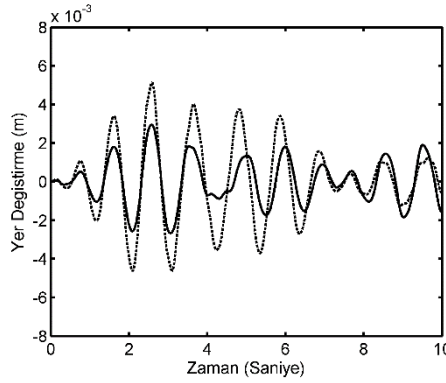


**Şekil 71. Durum 4 için yapının geçici rejimde yer değiştirmesinin rezonans frekansındaki (3.5Hz) değerleri ---- Sönümleyici olmadan \_\_\_\_ Sönümleyiciyle**

Şekil 71’deki deneysel sonuçlara bakıldığında sönümleyicili sistem ile sönümleyicisiz sistem arasında nerede ise fark yoktur. ANSYS-FLUENT sonuçları bu durum için sönümleyiciden dolayı ciddi bir genlik düşüşü göstermektedir.

## **Yüksek zemin hareketi kaynaklı yüksek genlikli titreşim altında sönümleyici performansı**

Bu kısımda genlik artışının sönümleyiciye olan etkisinin incelendiği sayısal benzetimlerden çıkan sonuçların doğruluğuna bakılacaktır. Burada Şekil 56.b (COMSOL benzetimi) ve Şekil 61a.'da (ANSYS-FLUENT benzetimi) gösterilen sonuçlar Durum 1'deki sistemin iki farklı genlikte titreştirilerek (1 mm ve 3 mm) yanıtlarına bakılmıştır. COMSOL'daki sonuçlar genlik arttıkça daha iyi performans gösteren bir sönümleyiciye işaret ederken, ANSYS-FLUENT sonuçları ise bu yönde bir davranış göstermemekte idi.



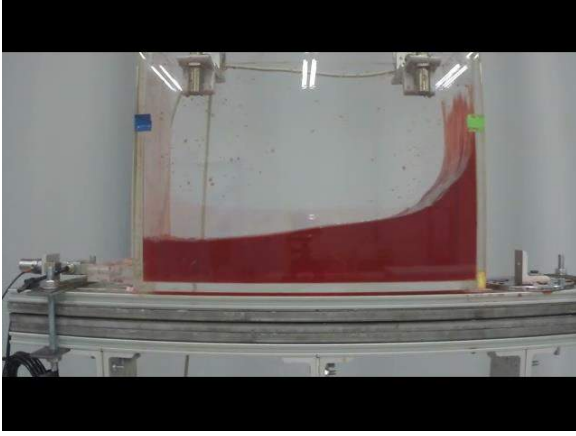
**Şekil 72. Durum 1 için yapının geçici rejimde yer değiştirmesinin sönümleyici ile iki farklı girdi için değerleri ---- Zemin Hareket Girdisi 4mm \_\_\_\_\_ Zemin Hareket Girdisi 2mm**

Şekil 72 Durum 1'deki sistemin iki farklı zemin hareketi genliği için (2 mm ve 4 mm) yanıtını göstermektedir. Bu gösterilen davranış zaman ilerledikçe daha büyük genlikli girdi için performansı daha iyi olan bir sönümleyiciyi göstermektedir. Bu açıdan genlik artışı altında COMSOL'dan elde edilen yanıtlar deneysel sonuçlar ile daha uyumludur.

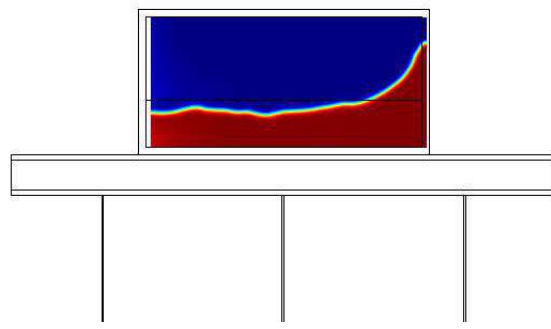
## **Kap içindeki sıvının şeklinin sayısal benzetimi**

Bu kısımda COMSOL'dan elde edilen serbest yüzey şekillerinin deneysel olarak elde edilen kamera sonuçları ile karşılaştırılması yapılacaktır. Burada genel olarak kopmalar ve dalga kırılmaları tutmasa dahi kabaca sıvının kap içindeki şeklinin deneyle paralellik gösterdiği görüldü. Ancak sayısal benzetim ilerledikçe zamansal kaymalar ve sıvı korunumu ile ilgili sorunlar da gözlenmiştir. Şekil 73.a. ve Şekil 73.b.'de Durum 2'de incelenen sistem için 3.6 saniyedeki deneysel görünüm ve sayısal benzetim sonucu görülmektedir. Bu iki resimden görülebileceği üzere sıvı-hava ara yüzü genel olarak benzemektedir. Deneysel sonuçtan görülebileceği üzere sıvı kabın duvarında oldukça yüksek bir yere kadar sıvanmıştır. Bu durum sayısal benzetimde tam olarak yakalanamamıştır. Ancak bu durumun sayısal benzetimde görülmesi için çok ince bir çözüm ağı gerekecektir. Böyle bir ağ ile hesaplama süreleri çok uzayacağı için bunun yapılabilmesi şu anki hesaplama gücümüzle mümkün değildir. Ancak bu

tarz ince sıvı tabakarından kaynaklı hataların yapısal yanıtı önemli şekilde etkileyeceği düşünülmemektedir.



a.



b.

**Şekil 73. Durum 1 için 3 mm zemin titreşim genliği altında 3.6 saniyede sıvı-hava ara yüzünün görünümü a. Deneysel Sonuç b. Sayısal Benzetim Sonucu**

#### **4.4.6 Deneysel Çalışma Sonuçlarının Yorumlanması**

Bu kısımda elde edilen sonuçlar aşağıdaki ana noktalar altında özetlenebilir.

- Hem COMSOL hem de ANSYS-FLUENT sayısal benzetim sonuçları yapısal doğal frekans ve çalkalanma doğal frekansının örtüştüğü durumlarda deney ile başarılı bir şekilde örtüşmüştür. Çalkalanan titreşim sönümleyiciler bu durumda kullanıldıklarında yapısal rezonansı kontrol altına almakta başarılı olmaktadır.
- Yapısal rezonans frekansı, sıvının çalkalanma doğal frekansından uzaklaştıkça sönümleyicilerin etkinliği azalmaktadır. Bu durum COMSOL benzetimlerinde ve deneylerde açık bir şekilde görülmüştür.
- COMSOL sayısal benzetimlerinde kabın içindeki sıvının havaya göre oranı azaldığında (sıvı yüksekliği düşük ise) sayısal benzetim sırasında suyun kütlesi korunamamaktadır. Ayrıca hem COMSOL'da hem de ANSYS-FLUENT'de sayısal benzetimlerin hesaplama süresi uzun sürmektedir. Bu nedenden dolayı sayısal benzetim sonuçları geçici yanıt rejimindeki davranışı vermektedir. Yatışkın titreşim rejiminin sonuçlarına sayısal benzetimler ile değil deneysel çalışmalar ile ulaşılmıştır.
- Deneysel çalışmalar da sayısal benzetimler gibi yapısal doğal frekans ile çalkalanma doğal frekansının yakın olduğu durumlarda başarılı bir titreşim kontrolü göstermiştir. Ayrıca deneysel sonuçlar eğer sönümleyici kütlesi yapısal sistem kütlesine göre yüksek ise daha geniş bir frekans bandında titreşim azalması göstermektedir. Daha yüksek

genlikli zemin hareketi girdisinin sonucu ile daha yüksek genlikli çalkalanma gerçekleşmiş, bu da daha başarılı titreşim kontrolü sağlamıştır.

Deneysel çalışmalardan yapı ve sönümleyici sisteminin yatışkın yanıtı ile ilgili şu yorumlar çıkmıştır.

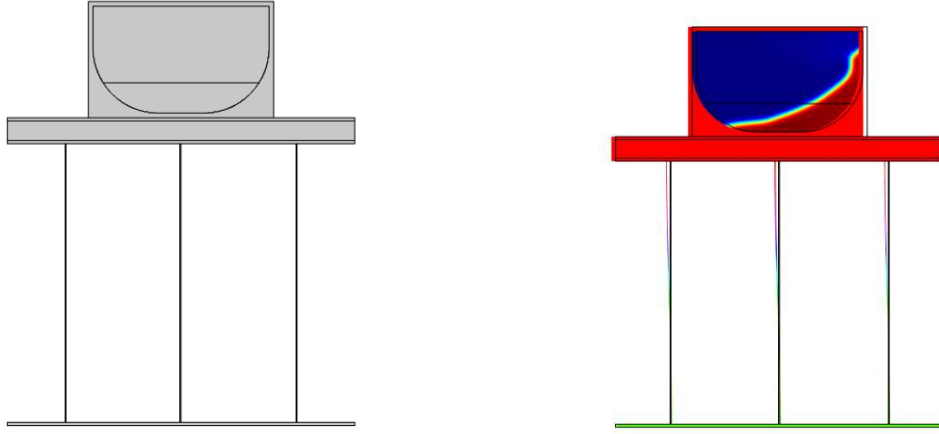
- Çalkalanma doğal frekansı ile yapının doğal frekansının yakın olduğu durumlarda rezonans frekansı etrafında etkin bir sönümleme görülmektedir.
- Rezonans frekansı etrafındaki sönümleme bölgesinin genişliği (frekans bandı) sönümleyicinin kütesinin yapıya oranı arttıkça artmaktadır. Ayrıca bu oran arttıkça rezonans etrafındaki sönümlemenin miktarı da artmaktadır.
- Bu çalışmada kullanılan genlik değerleri için çalkalanma genliği arttıkça sönümleyicinin verimliliği de artmıştır.
- Yapının doğal frekansı ile sönümleyicinin çalkalanma doğal frekansı arasındaki fark arttıkça sönümleyicinin etkinliği azalmaktadır. Bu durum Durum 3'te bir derece ve net olarak da Durum 4'de görülmüştür.

#### **4.5 Yenilikçi Kap Tasarımları ile Çalkalanan Sıvı Sönümleyicilerin Performansının Yükseltilmesi Çalışması Sonuçları**

Çalışmanın bu kısmında yeni kap tasarımları ile daha önce sorun yaşanan durumlar (yeterli titreşim azalımı olmayan) için çalkalanan titreşim sönümleyicinin etkinliğini arttıracak farklı kap tasarımlarına ulaşılması hedeflenmektedir. Bu kısımda proje önerisinde denenmesi düşünülen bazı kap tasarımlarının performansı sayısal benzetimler ile değerlendirilecektir.

##### **4.5.1 Kavisli Kap Tasarımı**

Bu kısımda proje önerisinde de belirtilen kenarlarında kavis olan kap tasarımı sayısal benzetim modeli ile denenecek ve dikdörtgen kaba göre bir avantaj sunup sunmadığı incelenecektir. Bu değerlendirme için dikdörtgen kesitli bir kaba alt kenarlarından kavis verilerek suyun daha rahat çalkalanarak duvar üzerinde yükselmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Şekil 74'de kavisli kabın fiziksel modeli ve sıvı içinde çalkalanırken sayısal benzetimde 8.3 saniyedeki görünümü gösterilmiştir.



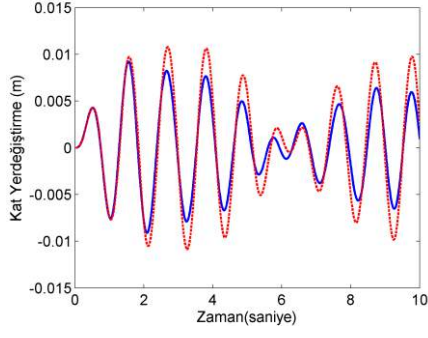
**Şekil 74. Sayısal benzetim modeli ile test edilecek olan kavisli kap modeli**

Bu kap tasarımının etkinliğini belirlemek için kap rezonansında ve rezonansına yakın bir frekansta 1 mm sinüzoidal genlik ile yapının tabanından tahrik edilecektir. Sayısal benzetimlerde kullanılacak iki durum ile ilgili bazı model ve çözüm parametreleri Tablo 25’de gösterilmiştir.

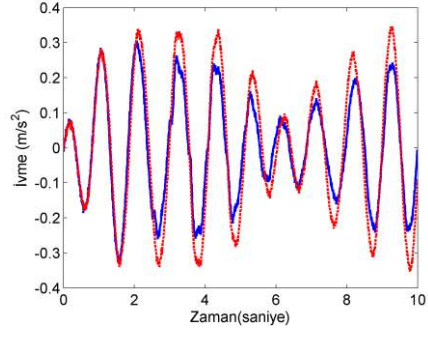
**Tablo 25. Kavisli Kap Sayısal Benzetimlerinde Kullanılan Model ve Çözüm Parametreleri**

Durum	Ana Sistemin Doğal Frekansı	Tahrik Frekansı	Tahrik Genliği	Kütle Oranı	Analiz Ağ Büyüklüğü	Analiz Zaman Adımı
1	1 Hz	1 Hz	1 mm	0.087	1.2 cm	0.01 sn
2	1 Hz	1.2 Hz	1 mm	0.087	1.2 cm	0.01 sn

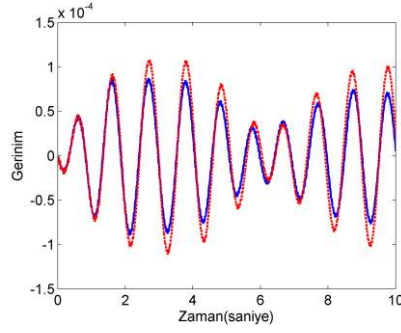
Şekil 75’de yapının temelinden verilen 1 mm genlikli yapının rezonansına denk gelen, 1 Hz frekansında tahriğe karşı yapının yanıtı verilmiştir. Kolonun zemine tutturulduğu yerdeki gerinim, katın ivmesi ve katın yer değiştirmesi ile ilgili sayısal benzetim sonuçları şeklin ‘a’, ‘b’ ve ‘c’ kısımlarında verilmiştir. Görüldüğü üzere dikdörtgen kenarlı kap ile tabanında kavis olan kap sayısal benzetim sonuçları arasında önemli bir sonuç farkı yoktur. Sonuçların tutarlılığından emin olmak için 1.2 Hz frekansında ve aynı genlikteki bir başka girdi ile sayısal benzetim işlemi tekrarlanacaktır. 1.2 Hz frekansının seçilmesinin nedeni bu frekansın sönümleyici eklendikten sonra toplam sistemin (yapı+sönümleyici) yeni rezonans frekansı olmasıdır. (Şekil 64 ve Şekil 65).



a.

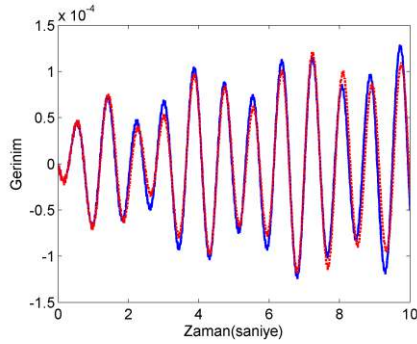
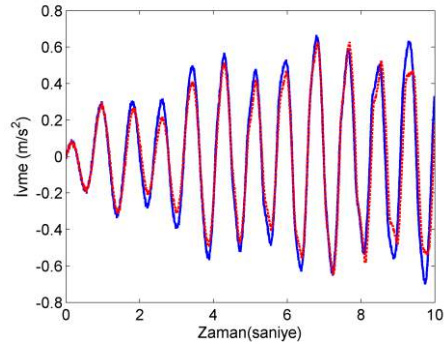
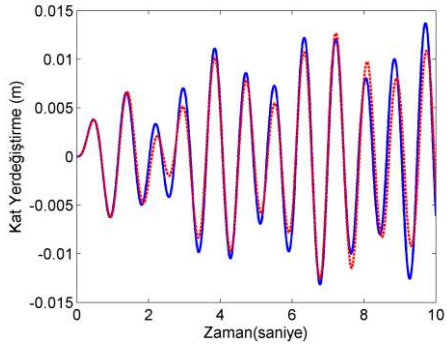


b.



c.

**Şekil 75. Kavisli ve dikdörtgen köşeli kapların rezonans frekansındaki (1 Hz) a. Kat Yerdeğiştirme b. İvme c. Gerinim yanıtlarının karşılaştırılması (---Kırmızı: Kavisli Kap, \_\_\_ Mavi: Dikdörtgen Kap)**



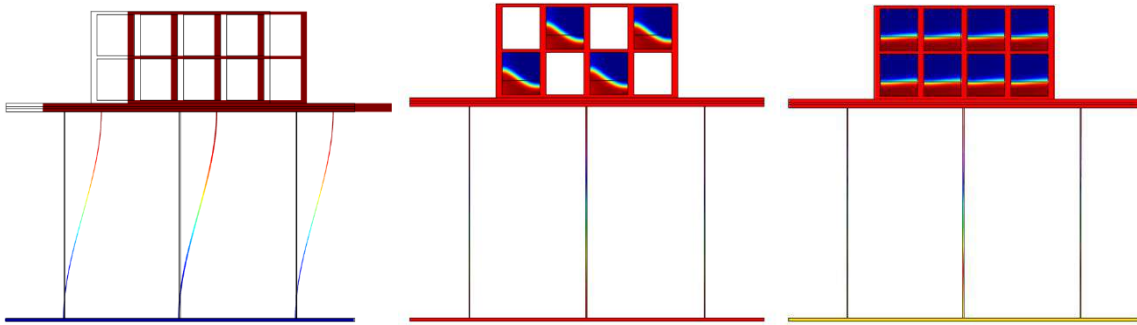
**Şekil 76. Kavisli ve dikdörtgen köşeli kapların rezonans frekansındaki (1.2 Hz) a. Kat Yerdeğiştirme b.İvme c. Gerinim yanıtlarının karşılaştırılması (---Kırmızı: Kavisli Kap, \_\_\_ Mavi: Dikdörtgen Kap)**



Şekil 76'da gösterilen sonuçlar 1.2 Hz frekansında dikdörtgen köşeli kap ile tabanında kavis olan kap için sonuçları göstermektedir. Gerinim, ivme ve yer değiştirme için elde edilen benzetim sonuçları eklenen kavisin yanıtları çok değiştirmedini göstermektedir. Bu iki sonuç ile suyun akışını sağlamak amaçlı kabın kenarlarına verilen kavislerin yanıtı fazla değiştirmedini görülmüştür. Bu nedenden dolayı yanıtlara olumlu etkisi olacak başka bir kap tasarımına gidilmesi kararlaştırılmıştır.

#### 4.5.2 Çok Gözlü Kap:

Kavisli kabın sonuçların etkili olmadığına anlaşılması üzerine katın dinamik yanıtını düşürecek başka kap tasarımı yapılmıştır. Bu kap tasarımı projemizin hedefi olan orta yükseklikteki, temel doğal frekansı daha yüksek olan binalarda yanıtı azaltacak kap tasarımı gerçekleştirilmesini hedeflenmiştir. Bu noktada daha önce dikdörtgen kap tasarımı ile başarılı olunamamış bina doğal frekansının 2 ve 3.5 Hz olduğu durumlar hedef alınmıştır. Bu doğal frekanslar yüksekliği düşük (3-8 kat) olan betonarme yerleşim yapılarına denk gelmektedir. Dolayısı ile düz dikdörtgen kaplar (daha önceki bölümlerde verilen sayısal benzetim ve deney sonuçlarının gösterdiği üzere) doğal frekansları 1 Hz olan yapılarda başarılı olurken, 2 Hz ve 3.5 Hz yapı doğal frekanslarında (Kısım 3.5.2, Durum 3 ve Durum 4) başarılı olmamıştır. Başarılı olunmayan frekansların bizim ilgi duyduğumuz orta ve düşük katlı binalara denk geldiği düşünülürse, projemiz açısından 2 Hz-3 Hz frekansı civarında başarılı sonuçlar veren kap tasarımları gerçekleştirebilmek önemlidir.



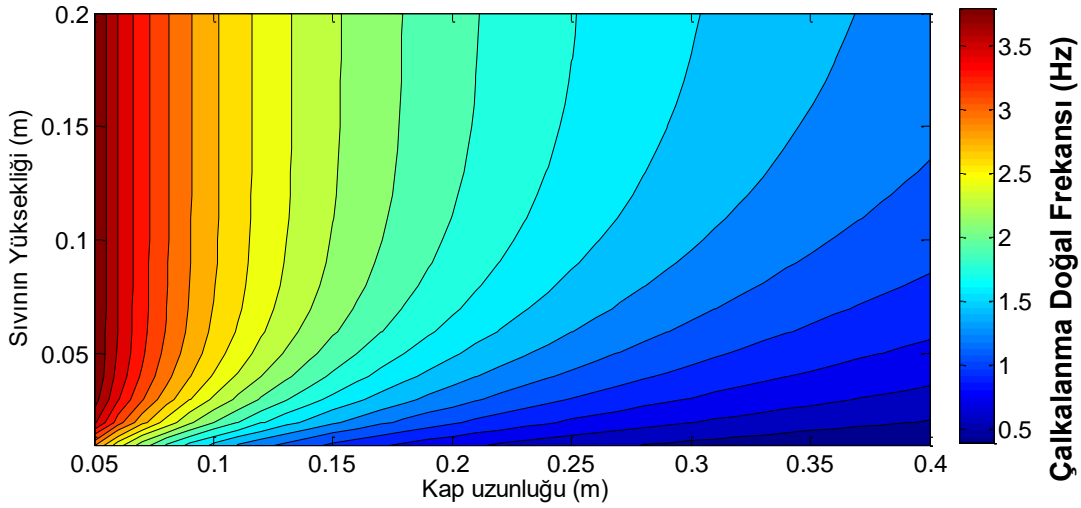
Şekil 77. Çok Gözlü Kap Tasarımı a. Kap tasarımının içinde sıvı yok iken b. Kap tasarımının yarısı dolu iken c. Kap tasarımının tüm gözleri dolu iken

Daha önceki binanın yüksek doğal frekansı olduğu durumlarda başarılı olunamamasının nedeni bina doğal frekansı ile (2 Hz ve 3.5 Hz) sıvının çalkalanma doğal frekansı (0.5 Hz ve 1Hz) arasında önemli bir fark bulunmasıdır. Düşük katlı (yüksek doğal frekansa sahip) binalarda çalkalanan sıvılı titreşim sönmüleyicilerin başarılı olabilmesi için yüksek frekansta

sıvı çalkalanmasının sağlanması gereklidir. Ancak çalkalanma frekansı olarak yüksek frekanslara ulaşmak model ve deneylerde kullanılan 40 cm uzunluğundaki bir dikdörtgen kap ile mümkün değildir. Bunun nedeni sığ sıvı bulunan kaplarda çalkalanma doğal frekansını veren denklem incelendiğinde görülebilir. Denklem aşağıda verilmiştir:

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

Yukarıdaki denklemde 'g' yerçekimi sabiti, 'a' kabın uzunluğu ve 'h' kap içindeki sıvının yüksekliği, 'f' ise çalkalanma doğal frekansının Hz biriminden değeridir. Bu denklem kullanılarak farklı kap uzunlukları ve sıvı yükseklikleri için çalkalanma doğal frekansı hesaplanırsa Şekil 78'de gösterilen kontur grafiği elde edilebilir.



**Şekil 78. Farklı kap uzunlukları ve sıvı yükseklikleri için doğal frekans değerleri**

Şekil 78'de gösterilen grafikte x-ekseni kabın uzunluğu y-ekseni ise kabın içindeki sıvının yüksekliğidir. Kontur grafikteki renkler de çalkalanma doğal frekansını vermektedir. Renk çubuğu grafiğin sağında verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi daha önceki çalışmalarda kullanılan 40 cm uzunluğundaki dikdörtgen tek gözlü kap kullanıldığında 2-3 Hz doğal frekans değerlerine ulaşmak mümkün görünmemektedir. Bu yüzden yüksek doğal frekanslara ulaşmak için uzunluğu kısa olan bir kap kullanılmalıdır ( $L < 10$  cm). Ancak böyle kısa bir kap düşük miktarda su tutacağı için bu da etkinlikte sorun olabilir. Bu nedenden dolayı uzunluğu kısa olan ancak pek çok gözden geçirilerek yeterli miktarda sıvı tutacak bir kap tasarımı düşünülmüştür

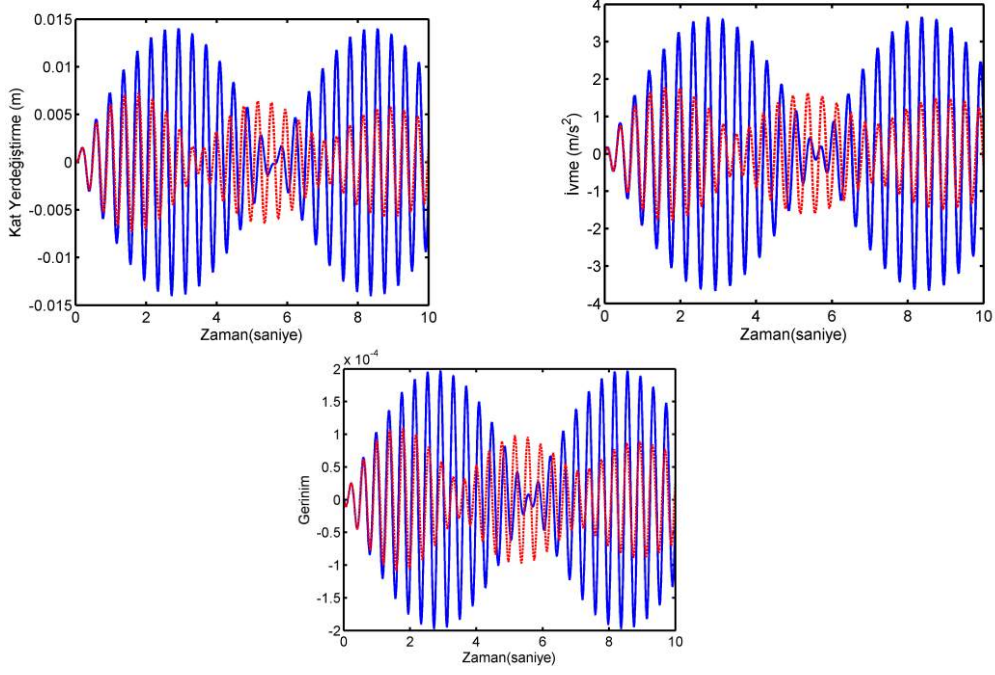
Yapılan sayısal çalışmada yapının doğal frekansı yüksek bir doğal frekans (düşük katlı binalara ait) 2.66 Hz seçilmiştir. Bu doğal frekansa yakın çalkalanma frekansı verecek kap gözünün boyu 8 cm ve sıvı yüksekliği 3 cm olarak seçilmiştir. Bu değerler Şekil 78'den görüleceği üzerine 2.66 Hz değerine yakın bir çalkalanma frekansı verecektir. Çalkalanma frekansı ile yapının doğal frekansının örtüşürülmesinden dolayı bu tasarım ile yapının rezonans frekansındaki yanıtını düşürüleceği öngörülmüştür. Sayısal benzetimlerde iki durum incelenmiştir. Kap toplam olarak 8 gözden oluşmaktadır. Durum 1'de bu gözlerin tamamı 3 cm yüksekliğinde sıvı ile doldurulmuştur. Durum 2'de ise kaptaki gözlerin sadece yarısı sıvı ile doldurulmuştur. Bu iki durum için sayısal benzetimlerde kullanılan temel parametreler Tablo 26' da verilmiştir.

**Tablo 26. Çok gözlü Kap Analizinde Kullanılan Bazı Önemli Parametreler**

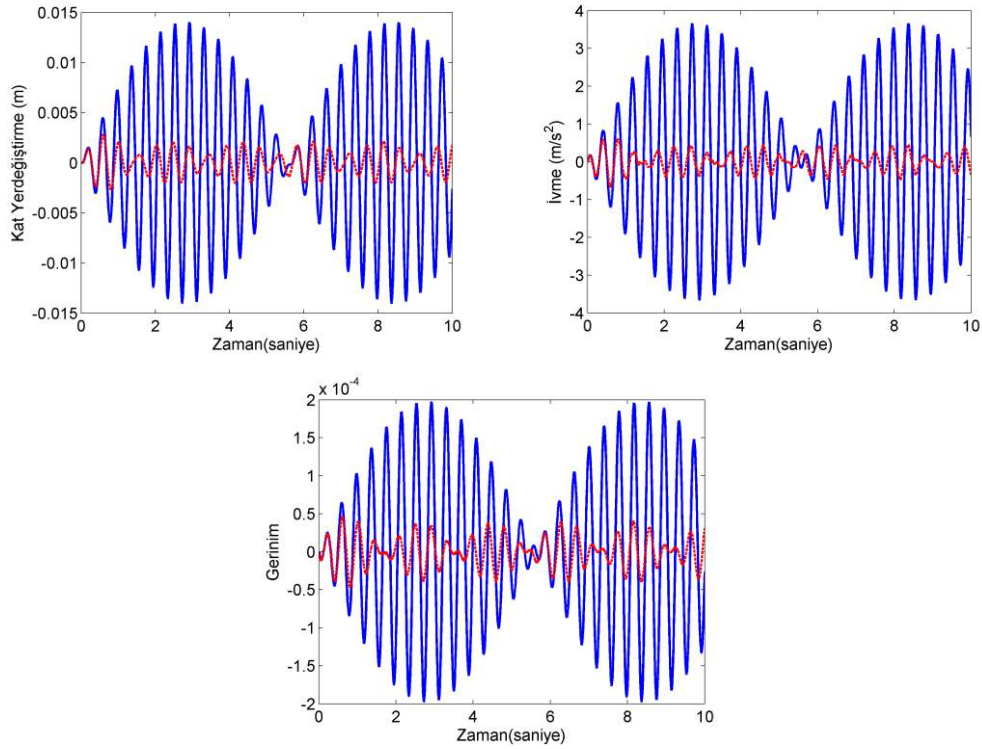
	<b>Yapı Doğal Frekansı</b>	<b>Sıvı Göz Uzunluğu</b>	<b>Gözdeki Sıvı Yüksekliği</b>	<b>Sıvı Dolu Göz Sayısı</b>	<b>Sıvı/Yapı Kütle Oranı</b>
<b>Durum 1</b>	2.66 Hz	8 cm	3 cm	4	0.14
<b>Durum 2</b>	2.66 Hz	8 cm	3 cm	8	0.28

İlk sayısal benzetim çalışması kabın gözlerinin yarısı doldurulmuşken gerçekleştirilmiştir. Şekil 79'da kabın dört gözü 3 cm yüksekliğinde su ile dolu iken bina temelinden uygulanan 1 mm genliğindeki 2.66 Hz frekansındaki bir sinüzoidal yer değiştirmeye olan benzetim sonucu gösterilmektedir. Şekilde mavi ile gösterilmiş yanıtlar kap boşken (sıvı yokken) olan yer değiştirme, ivme ve gerinim yanıtlarını vermektedir. Kırmızı ile gösterilen yanıtlar ise kabın gözlerinin yarısı dolu iken hesaplanan katın yatay yöndeki yer değiştirmesini, ivmesini ve gerinimini göstermektedir.

Şekil 80'de gösterilen yanıtlarda ise mavi ile gösterilmiş olan yanıtlar kabın tüm gözleri dolu iken, kırmızı ile gösterilmiş yanıtlar ise kabın tüm gözleri dolu iken elde edilen yanıtları göstermektedir. Şekil 80'deki yer değiştirme, ivme ve gerinim yanıtlarından görüldüğü üzere çalkalanan sıvı sönümleyici yanıtları önemli şekilde düşürmüştür. Bu da bu tarz çalkalanma doğal frekansı yüksek olan çok gözlü kap tasarımının başarılı olduğunu göstermektedir.



**Şekil 79. Çok gözlü kap tasarımında gözlerinin yarıısı dolu iken ve kabın gözleri boşken yanıtı**  
**a. Kat yerdeğiştirme b. İvme c. Gerinim (---Kırmızı: Çok gözlü yarıısı dolu kaplı sistem yanıtı,**  
**\_\_\_\_\_Mavi: Çok gözlü içinde sıvı olmayan boş kaplı sistemin yanıtı )**



**Şekil 80. Çok gözlü kap tasarımında gözlerinin tamamı dolu iken ve kabın gözleri boşken yanıtı**  
**a. Kat yerdeğiştirme b. İvme c. Gerinim (---Kırmızı: Çok gözlü tamamı dolu kaplı sistem yanıtı,**  
**\_\_\_\_\_Mavi: Çok gözlü içinde sıvı olmayan boş kaplı sistemin yanıtı )**

### 4.5.3 Yeni Kap Tasarımlarının Sayısal Benzetim Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere kavisli kap tasarımı standart dikdörtgen kap tasarımına göre önemli bir avantaj sağlamamıştır. Bu tasarımda amaç kavis ile beraber suyun kap kenarlarında daha fazla yükselerek daha fazla kuvvet yaratmasıydı. Sayısal benzetim sonuçlarında tahmin edildiği gibi sıvı kap kenarlarında daha yüksek noktalara çıkmıştır. Ancak kavisli köşe bu yükselmenin yanında aynı zamanda dalganın duvara çarpma kuvvetinde azalma yaratmıştır. Dikdörtgen köşe ile ilerleyen dalganın kabın duvarına geldiğinde kenardaki dik açıdan dolayı duvara daha sert çarptığı düşünülmektedir. Bu yüzden kavis ile sağlanan suyun duvarı takip ederek daha yüksek noktaya varma avantajının, duvara çarpma kuvvetindeki azalma ile kaybedildiği düşünülmektedir.

Kavisli kap tasarımından sonra ise proje önerimizin odak noktası olan doğal frekansı yüksek (>1 Hz) düşük katlı binaların titreşimi üzerinde etkili kap tasarımı yapılmış ve sayısal benzetim sonuçları elde edilmiştir. Bu noktada şu ana kadarki dikdörtgen kap tasarımlarında kabın boyutundan dolayı (40 cm) yüksek çalkalanma doğal frekansları elde edilememiştir. Bu nedenden dolayı da sayısal benzetim ve deneylerde 2 Hz ve 3.5 Hz doğal frekanslı yapılarda umulan titreşim azalmaları elde edilememiştir. Bu durumu iyileştirmek için çok gözlü ve her gözün uzunluğu kısa olan ve bu nedenle de yüksek doğal çalkalanma frekansına sahip olacak bir tasarım elde edilmiştir. Kabın gözlerinin boyutlarına ve içindeki sıvının yüksekliğine sıvının çalkalanma frekansı formülünden elde edilen Şekil 78 üzerinden karar verilmiştir. Kap tasarımının sayısal benzetim sonuçları yarı dolu (4 göz doluyken) ve tüm gözler dolu (8 göz) iken çok umut veren sonuçlar vermiştir. Bu iş paketi içinde sadece yeni kap tasarımlarının sayısal benzetim ile değerlendirilmesi vardır. Ancak elde edilen olumlu sonuçlar nedeni ile bu kabın üretimine ve deneysel olarak sinüzoidal ve deprem girdisine karşı yanıtının incelenmesine karar verilmiştir. Bu çalışmalar raporun bir sonraki kısmında detaylandırılacaktır.

### 4.6 **Sıvılı-Çalkalanan Titreşim Sönümleyicili Sistemin Depreme Karşı Yanıtının Deneysel Sonuçları**

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 1,22 Hz'dir. Deneylerde 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 kolondaki gerinim, kat ivmesi ve kat yer değiştirmesi bilgilerinin ortalama karekökü (Root mean square, bundan sonra 'rms' olarak belirtilecektir) ve maksimum değerleri verilmiştir. Verilen bu değerler 58 s süren deprem girdisi altında 80 saniye boyunca ölçülen değerlerdir. Ancak çalkalanan titreşim sönümleyicinin olmadığı bazı durumlarda, sistem yanıtı çok büyüdüğü için girdi sinyali kesilmek durumunda kalmıştır. Bu tip durumlar için girdi sinyali kesilene kadar toplanan veriler kullanılarak maksimum ve rms değerleri hesaplanmıştır. Bu durumlar tablolarda maksimum girdi genliği sütununda '@' işareti ve kaç saniye ölçüm yapıldığı bilgisi ile birlikte gösterilmiştir. Grafiklerde ise deprem girdi sinyali tamamlanmadan alınan ölçümler değerlerin üstüne kırmızı renkli '#' konularak gösterilmiştir.

#### 4.6.1 Durum 1:

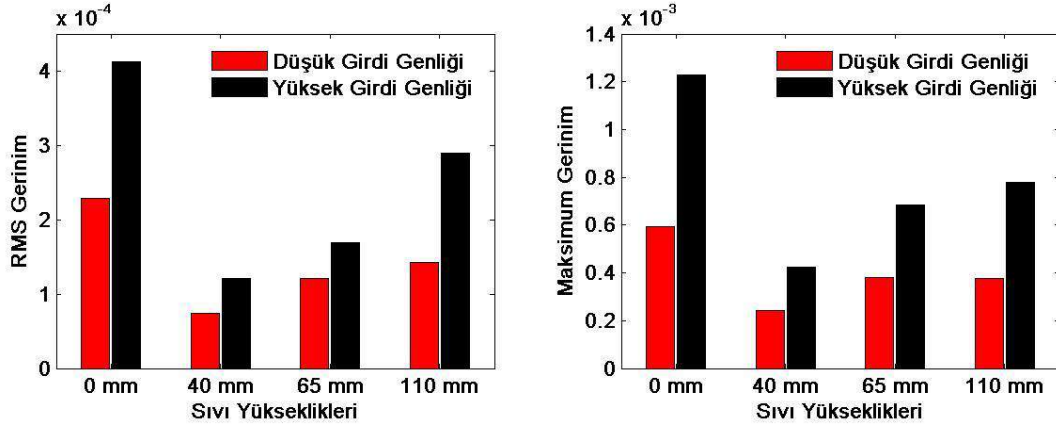
Yapının doğal frekansı 1 Hz'e ayarlanmıştır ve su yükseklikleri sırasıyla 0 mm, 40 mm, 65 mm ve 110 mm olarak değiştirilmiştir. Bu durum için yüksek ve düşük maksimum deprem girdi genlikleri sırasıyla 12 mm ve 6 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Durum 1.a'da deprem girdi sinyali olarak 1. sinyal, Durum 1.b'de ise 2. sinyal kullanılmıştır. Ayrıca Durum 1'de çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütlelerinin bina modelinin kütlelerine oranı 65 mm su yüksekliği için 0,18'dir.

##### Durum 1.a:

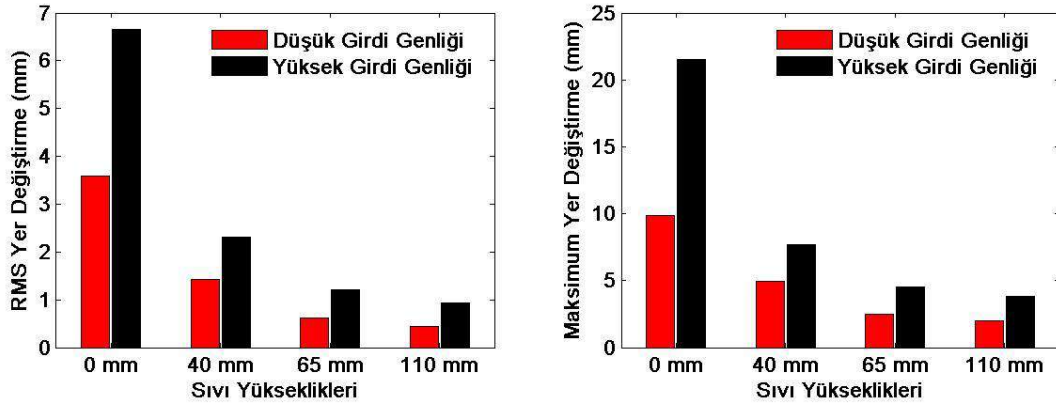
Tablo 27'de, 1. Sinyalin (tanımı kısım 3.6'da verilmiştir) deprem girdisi olarak kullanıldığı durum için farklı sıvı yükseklikleri ve maksimum girdi genliklerinde elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Şekil 81'de ise gerinim verisinin ve Şekil 82'de ise kat yer değiştirmesi verisinin; rms ve maksimum değerlerinin farklı çalkalanan sıvı yüksekliği ve maksimum girdi genliği değerleri için değişimi görülmektedir.

**Tablo 27. Durum 1 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali)**

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Genliği (mm)	Rms Gerinim	Maksimum Gerinim	Rms İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	Rms Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	12	4,1E-04	1,2E-03	0,40	1,14	6,65	21,50
0	6	2,3E-04	5,9E-04	0,21	0,60	3,58	9,85
40	12	1,2E-04	4,2E-04	0,14	0,57	2,31	7,71
40	6	7,4E-05	2,4E-04	0,08	0,31	1,42	4,98
65	12	1,7E-04	6,8E-04	0,13	0,94	1,22	4,50
65	6	1,2E-04	3,8E-04	0,08	0,37	0,63	2,49
110	12	2,9E-04	7,8E-04	0,14	0,61	0,93	3,80
110	6	1,4E-04	3,8E-04	0,07	0,27	0,45	1,98



Şekil 81. Durum 1 için gerininin rms ve maksimum değerleri



Şekil 82. Durum 1 için kat yer değiştirmesinin rms ve maksimum değerleri (1. sinyal)

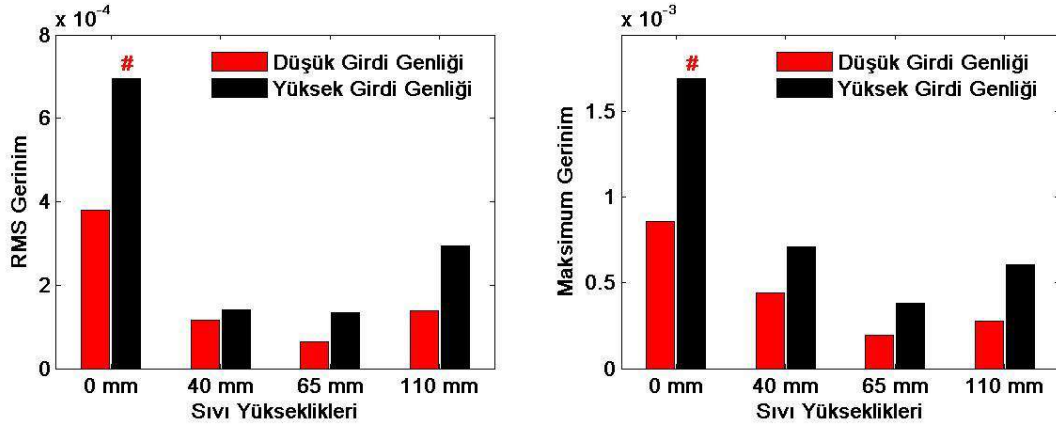
### Durum 1.b:

Durum 1.b.'de ise Durum 1.a.'dan farklı olarak verilen grafikler ve tablodaki değerler deprem girdisi için 2. sinyal 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 tabloda gösterilen veriler deprem sinyalinin ilk 16,2 s'lik kısmı içindir. Bu durum verilen gerinim ve kat yer değiştirmesi grafiklerinde de gösterilmiştir.

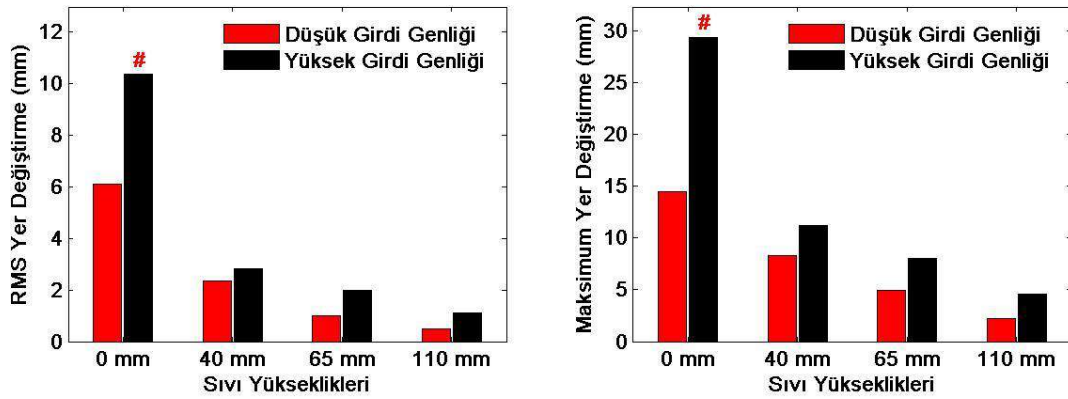
Durum 1 için grafik ve tablolar incelenerek bir takım çıkarımlar yapılabilir. Öncelikle yüksek ve düşük maksimum girdi genliği için değerler incelenirse, 12 mm maksimum girdi genliğinde alınan yanıtların kabaca 6 mm maksimum girdi genliğinde alınan yanıtların 2 katından biraz az olduğu görülmektedir. Bu durumdan yola çıkarak sistemin girdi genliğinin artırılmasının sistem yanıtını artırdığı söylenebilir. Ancak yanıtta bu artış oranı, girdi genliğinin artış oranının biraz altında kalmaktadır. Bu da genlik arttıkça sönümleyicinin etkinliğinin bir miktar artması olarak yorumlanabilir.

Tablo 28. Durum 1 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali)

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Genliği (mm)	Rms Gerinim	Maksimum Gerinim	Rms İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	Rms Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	12 @ 16,2 s	7,0E-04	1,7E-03	0,70	1,97	10,38	29,42
0	6	3,8E-04	8,6E-04	0,36	0,86	6,11	14,55
40	12	1,4E-04	7,1E-04	0,17	0,95	2,81	11,25
40	6	1,2E-04	4,4E-04	0,13	0,58	2,36	8,34
65	12	1,3E-04	3,8E-04	0,14	0,57	1,99	8,09
65	6	6,4E-05	1,9E-04	0,07	0,35	1,00	4,98
110	12	2,9E-04	6,0E-04	0,14	0,47	1,11	4,58
110	6	1,4E-04	2,8E-04	0,07	0,23	0,50	2,25



Şekil 83. Durum 1 için gerinim rms ve maksimum değerleri (2. sinyal)



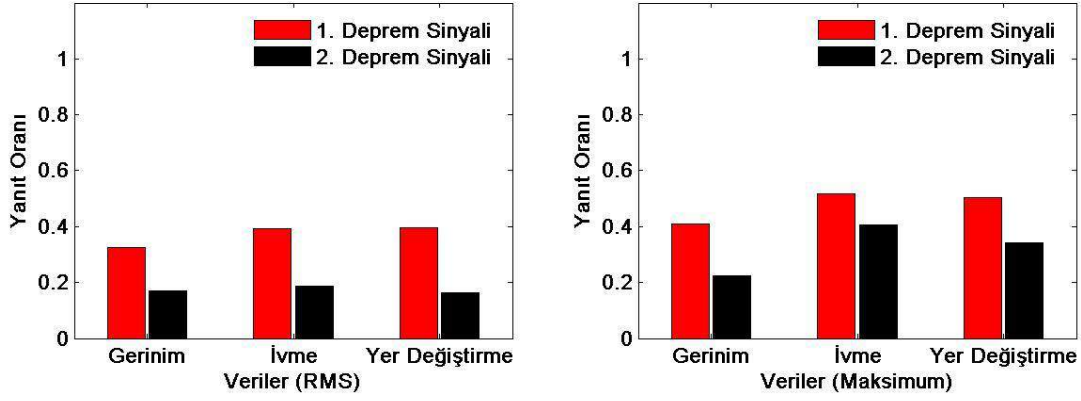
Şekil 84. Durum 1 için kat yer değiştirmesinin rms ve maksimum değerleri (2. sinyal)



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 gerekir. Bahsedilen bu sonuç da 40 mm sıvı yüksekliğinde (0,83 Hz çalkalanma doğal frekansında) görülür. Yani sistem yanıtı düşük ve yüksek maksimum girdi genlikleri için 40 mm sıvı yüksekliğinde en küçüktür. 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 grafikler incelendiğinde, sistem yanıtının da bu şekilde 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'da kullanılan bütün su yükseklikleri için çalkalanan titreşim sönümleyicinin sistem yanıtını bir miktar sönümlediği söylenebilir. Sıvının çalkalanma doğal frekansı ile sistemin hareket frekansının olabildiğince yakın olması sönümleyicinin performansını artırır.

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 olmadığı durumda görülmüştür.

Durum 1.b'de Durum1.a'dan farklı olarak yapının doğal frekansı ile sıvının çalkalanma frekansı ve sistemin hareket frekansı aynıdır. Bunun iki sonucu vardır. İlk sonuç yapının doğal frekansı ve sistemin hareket frekansı aynı olduğundan çalkalanan titreşim sönümleyici olmadığı durumda sistemin yanıtı Durum 1.a'ya göre artmıştır. Verilen tablolara 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 diğer iki frekansa eşitlenmesinin bir diğer sonucu ise bu frekansta çalkalanan titreşim sönümleyicinin performansının artmasıdır. Bu durum ile ilgili grafikler Şekil 85'de görülebilir.



**Şekil 85. Durum 1 için ideal çalkalanan sıvı yüksekliğinde elde edilen yanıtın çalkalanan sıvı olmadan elde edilen yanıt oranı (düşük maksimum girdi genliği)**

Şekil 85'de elde edilen verilerin maksimum ve rms değerleri için ideal çalkalanan sıvı yüksekliğinde elde edilen yanıtın çalkalanan sıvı olmayan durumda elde edilen yanıt oranı görülmektedir. Grafikte 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 olduğu görülür.

#### 4.6.2 Durum 2:

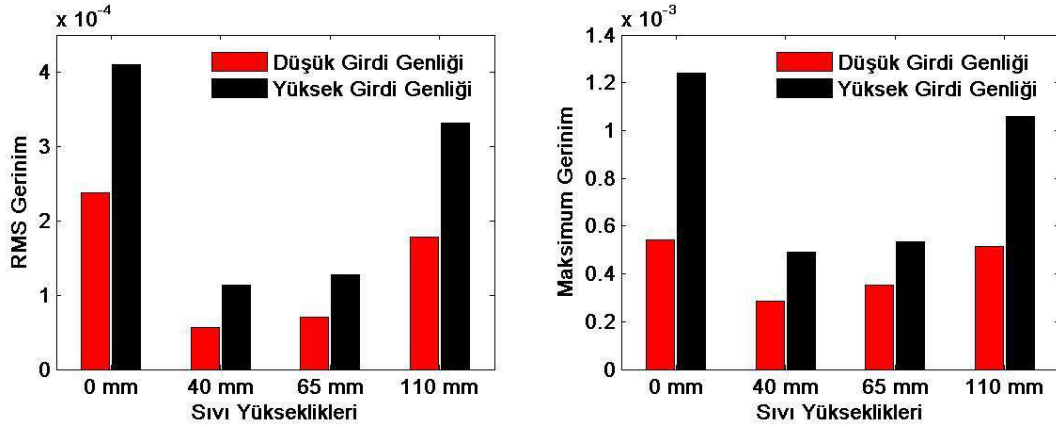
Durum 2 içinde yapının doğal frekansı Durum 1'deki gibi 1 Hz'e ayarlanmıştır. Bu durum için su yükseklikleri de Durum 1'deki aynı değerlere, yani sırasıyla 0 mm, 40 mm, 65 mm ve 110 mm yüksekliğine ayarlanmıştır. Maksimum deprem girdi genlikleri de Durum 1 için kullanılan değerlerle aynı yapılarak 6 mm ve 12 mm'ye ayarlanmıştır. Durum 2'de Durum 1'den farkı olarak başka bir bina modeli kullanılmıştır. Durum 1'de kullanılan bina modelinin üzerinde durduğu 3 adet alüminyum ayağın kalınlıkları eşit ve 2 mm'dir. Durum 2'de ise bu üç adet ayaktan ortada olan 2 mm kalınlığındaki ayak çıkarılarak yerine 3 mm kalınlığında yine aynı malzemeden yapılmış ve aynı uzunlukta başka bir ayak takılmıştır. Yapı modelindeki bu değişim ile birlikte yapının doğal frekansını 1 Hz'e ayarlamak için yapıya daha fazla ağırlık koymak gerekmektedir. Bu sebeple Durum 2'de çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütesinin bina modelinin kütesine oranı azalarak 65 mm su yüksekliği için 0,089 olmuştur. Durum 2.a'da deprem girdi sinyali olarak 1. sinyal, Durum 2.b'de ise 2. sinyal kullanılmıştır.

##### Durum 2.a:

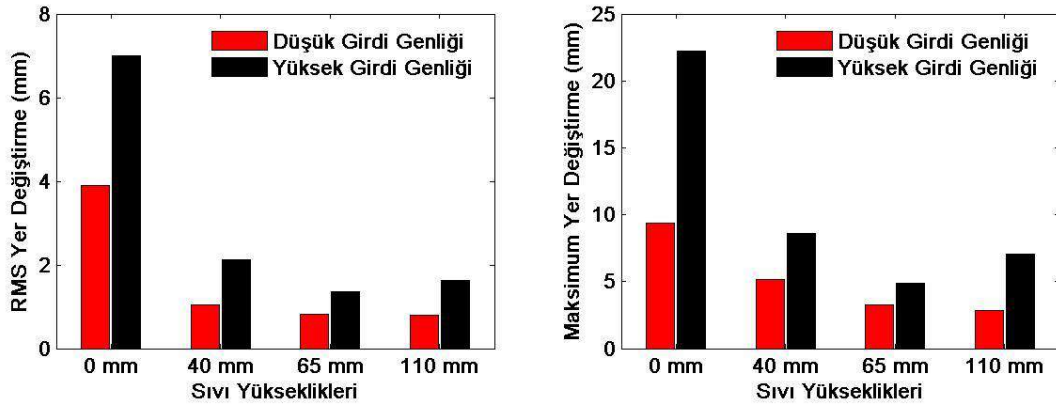
Tablo 29'da Durum 2 için, 1. sinyal deprem girdisi olarak kullanılarak, farklı su yükseklikleri ve maksimum girdi genlikleri için elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Şekil 86'da ve Şekil 87'de ise gerinim ve kat yer değiştirmesi verilerinin rms ve maksimum değerlerinin farklı çalkalanan sıvı yüksekliği ve maksimum girdi genliği değerleri için değişimi Durum 2 ve 1. Deprem sinyali girdisi için görülmektedir.

Tablo 29. Durum 2 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali)

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Genliği (mm)	Rms Gerinim	Maksimum Gerinim	Rms İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	Rms Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	12	4,1E-04	1,2E-03	0,42	1,24	7,01	22,22
0	6	2,4E-04	5,4E-04	0,24	0,55	3,91	9,41
40	12	1,1E-04	4,9E-04	0,14	0,71	2,12	8,58
40	6	5,6E-05	2,9E-04	0,07	0,31	1,05	5,14
65	12	1,3E-04	5,3E-04	0,12	0,63	1,36	4,85
65	6	7,1E-05	3,5E-04	0,07	0,37	0,83	3,30
110	12	3,3E-04	1,1E-03	0,21	0,77	1,64	7,03
110	6	1,8E-04	5,2E-04	0,11	0,38	0,79	2,85



Şekil 86. Durum 2 için gerinimin rms ve maksimum değerleri (1. sinyal)



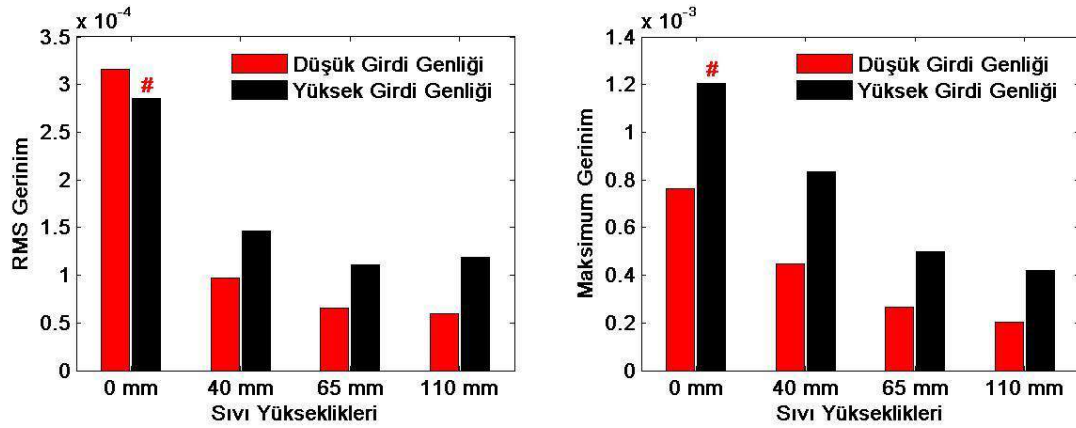
Şekil 87. Durum 2 için yer değiştirmenin rms ve maksimum değerleri (1. sinyal)

### Durum 2.b:

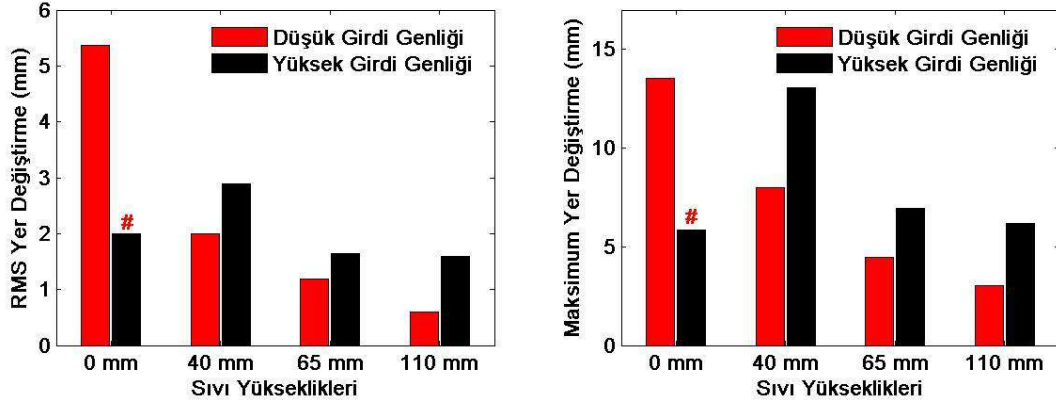
Durum 2.b.'de ise deprem girdisi olarak 2. sinyal kullanılmıştır. Durum 2.b'de sistemde sıvı tankında çalkalanan titreşim sönümleyici yok iken, 12 mm maksimum girdi genliği için yapılan ölçümlerde sistem yanıtı çok büyüdüğü için deney 10,2. s'de kesilmek durumunda kalmıştır. Bu sebeple tablo ve grafiklerdeki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

**Tablo 30.Durum 2 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali)**

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Genliği (mm)	Rms Gerinim	Maksimum Gerinim	Rms İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	Rms Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	12 @ 10,2 s	2,9E-04	1,2E-03	0,32	1,22	1,99	5,86
0	6	3,2E-04	7,6E-04	0,32	0,82	5,38	13,54
40	12	1,5E-04	8,3E-04	0,18	1,05	2,89	13,07
40	6	9,7E-05	4,5E-04	0,12	0,55	2,01	7,98
65	12	1,1E-04	5,0E-04	0,12	0,67	1,65	6,95
65	6	6,6E-05	2,6E-04	0,08	0,35	1,19	4,49
110	12	1,2E-04	4,2E-04	0,13	0,54	1,59	6,19
110	6	6,0E-05	2,0E-04	0,06	0,27	0,60	3,04

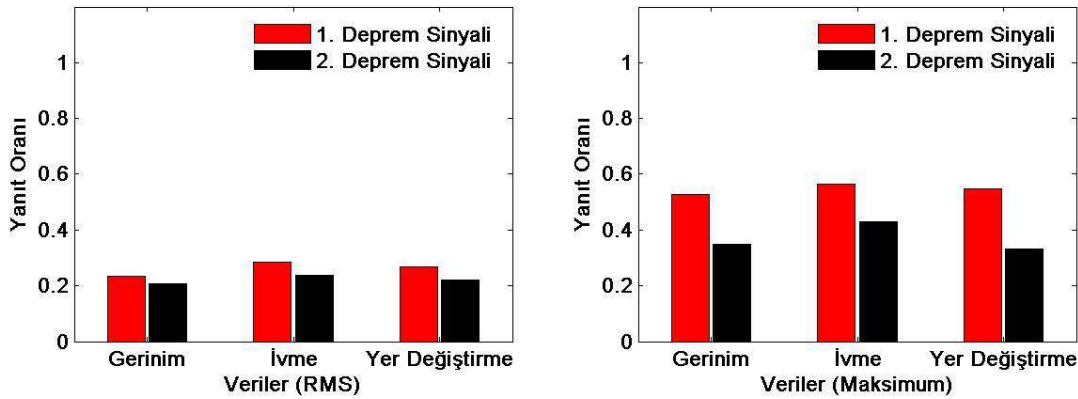


**Şekil 88. Durum 2 için gerinimin rms ve maksimum değerleri (2. sinyal)**



Şekil 89. Durum 2 için yer değiştirmenin rms ve maksimum değerleri (2. sinyal)

Durum 2 için verilen grafik ve tablolar incelendiğinde, Durum 2'de çalkalanan titreşim sönümleyicinin sistem üzerinde Durum 1'dekine benzer bir etkisi olduğu söylenebilir. Şekil 90 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 titreşim sönümleyicinin sistemin rms yanıtını düşürmekte, sistemin maksimum yanıtı düşürmekten daha başarılı olduğu görülür.



Şekil 90. Durum 2 için ideal çalkalanan sıvı yüksekliğinde elde edilen yanıtın çalkalanan sıvı olmadan elde edilen yanıtı oranı (düşük maksimum girdi genliği)

Durum 2'de Durum 1'deki duruma göre bina modelindeki ayaklardan birinin kalınlığı değiştirilmiştir ve dolayısıyla bina kütlesi değişmiştir. Durum 1'de çalkalanan titreşim sönümleyicinin bina kütlesine oranı 65 mm sıvı yüksekliği için 0,18 iken aynı oran Durum 2'de 0,089'dur. 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 kütesinin bina kütesine oranının değişiminin, çalkalanan titreşim sönümleyicinin performansı üzerindeki etkisi deprem girdisi altında net olarak gözlemlenmemiştir.

#### 4.6.3 Durum 3:

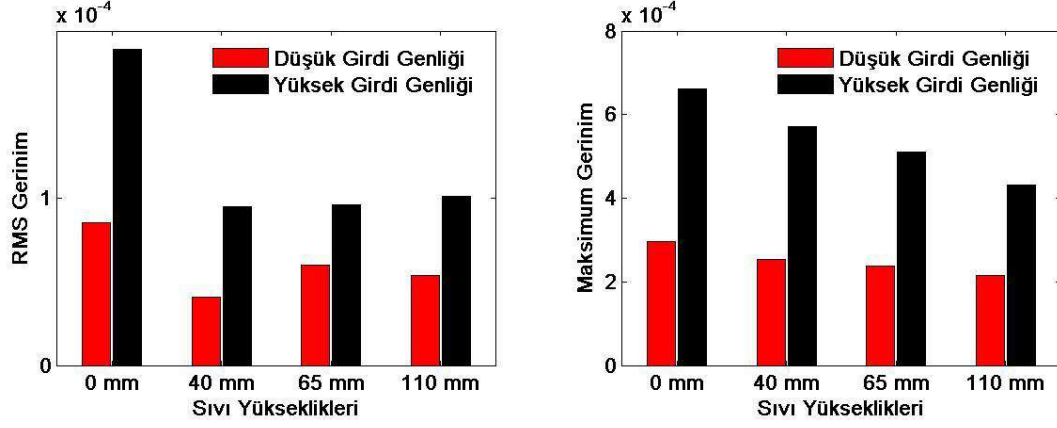
Durum 3'de Durum 1 ve Durum 2'den farklı olarak yapının doğal frekansı 2 Hz'e ayarlanmıştır. Durum 3'te, deprem frekans içeriğinin yapının doğal frekansından farklı olduğu durum incelenecektir. Bu durum için su yükseklikleri de diğer durumlardaki değerlerle aynı değerlere yani sırasıyla 0 mm, 40 mm, 65 mm ve 110 mm değerlerine ayarlanmıştır. Maksimum deprem girdi genlikleri de yine aynı 6 mm ve 12 mm'dir. Durum 3'de yapının doğal frekansı daha önceki durumlardan daha yüksek bir değere ayarlandığından (2 Hz), sisteme daha az ek kütle konulmuştur. Bu yüzden çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütesinin yapı kütesine oranı artarak 65 mm sıvı yüksekliği için 0,38 olmuştur. Durum 3.a'da deprem girdi sinyali olarak 1. sinyal, Durum 3.b'de ise 2. sinyal kullanılmıştır.

#### Durum 3.a:

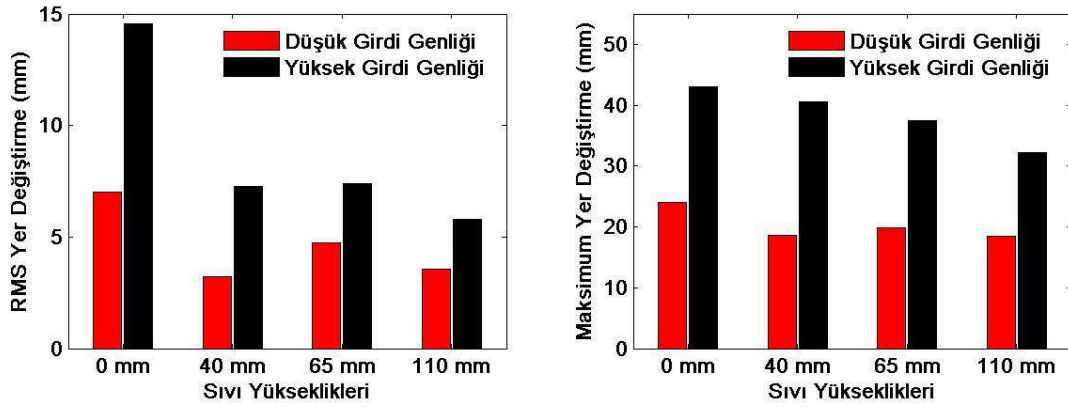
Durum 3 için deprem girdisi olarak 1. Sinyal kullanılan durumda elde edilen gerinim, ivme ve kat yer değiştirmesi değişkenlerinin rms ve maksimum değerleri Tablo 31'de görülmektedir. Ayrıca Şekil 91'de gerinim verisinin ve Şekil 92'de kat yer değiştirmesi verisinin, rms ve maksimum değerlerinin farklı sıvı yükseklikleri ve maksimum titreşim genlikleri için değişimi görülmektedir.

**Tablo 31.Durum 3 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali)**

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Genliği (mm)	Rms Gerinim	Maksimum Gerinim	Rms İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	Rms Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	12	1,9E-04	6,6E-04	2,29	5,30	14,57	43,10
0	6	8,5E-05	3,0E-04	1,10	4,04	7,00	24,03
40	12	9,5E-05	5,7E-04	1,16	5,25	7,28	40,56
40	6	4,1E-05	2,5E-04	0,51	3,68	3,24	18,58
65	12	9,6E-05	5,1E-04	1,15	5,25	7,41	37,43
65	6	6,0E-05	2,4E-04	0,72	3,37	4,73	19,80
110	12	1,0E-04	4,3E-04	0,85	5,22	5,81	32,18
110	6	5,4E-05	2,1E-04	0,53	2,98	3,56	18,41



Şekil 91. Durum 3 için gerininin rms ve maksimum değerleri (1. sinyal)



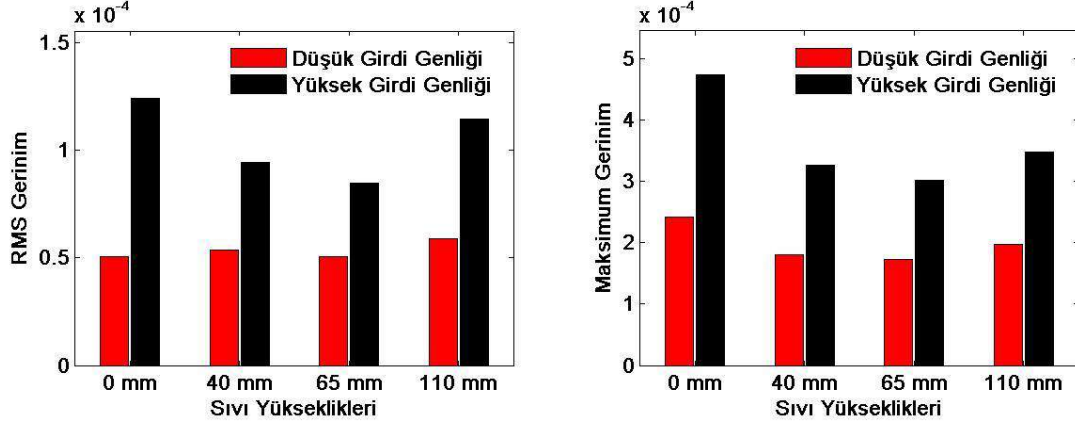
Şekil 92. Durum 3 için yer değiştirmenin rms ve maksimum değerleri (1. sinyal)

### Durum 3.b:

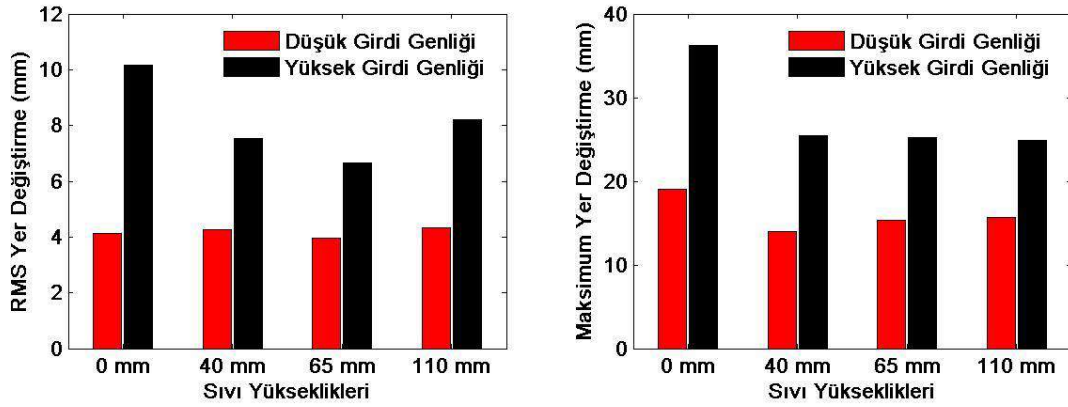
Durum 3.b.'de 2. sinyal kullanılarak elde edilen gerininim, ivme ve kat yer değiştirmesi ile ilgili değerler verilmiştir. Şekil 93'de de gerininim verisinin rms ve maksimum değerinin farklı maksimum girdi genliği ve sıvı yüksekliği ile değişimi görülmektedir.

Tablo 32. Durum 3 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali)

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Genliği (mm)	Rms Gerininim	Maksimum Gerininim	Rms İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	Rms Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	12	1,2E-04	4,7E-04	1,59	5,22	10,16	36,29
0	6	5,0E-05	2,4E-04	0,65	3,13	4,14	19,00
40	12	9,4E-05	3,3E-04	1,12	5,11	7,53	25,44
40	6	5,4E-05	1,8E-04	0,64	2,56	4,28	13,99
65	12	8,5E-05	3,0E-04	1,00	4,92	6,65	25,28
65	6	5,1E-05	1,7E-04	0,59	2,32	3,96	15,29
110	12	1,1E-04	3,5E-04	1,19	4,11	8,19	24,89
110	6	5,9E-05	2,0E-04	0,63	1,94	4,31	15,70



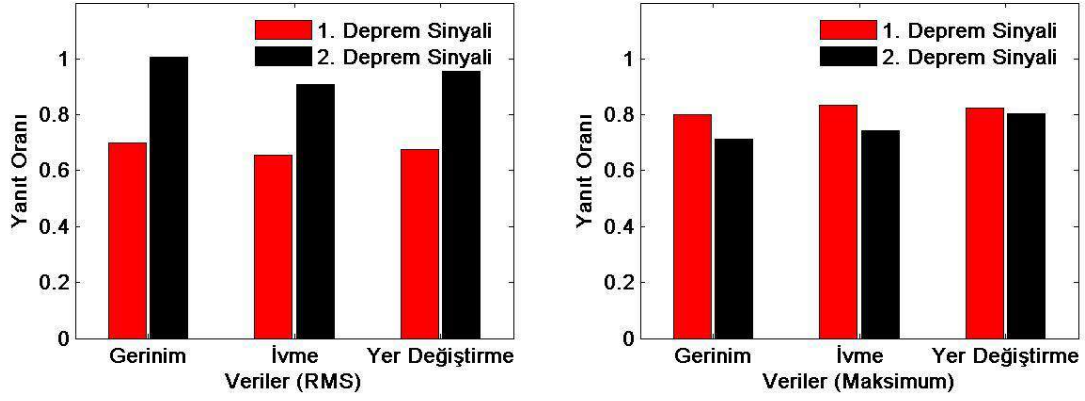
Şekil 93. Durum 3 için gerininin rms ve maksimum değerleri (2. sinyal)



Şekil 94. Durum 3 için yer değiştirmenin rms ve maksimum değerleri (2. sinyal)

Durum 3 için verilen tablo ve grafikler incelendiğinde, çalkalanan titreşim sönümleyicinin sistem yanıtını önceki durumlardaki kadar başarılı sönümleyemediği görülür. Şekil 95'deki görülen 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 oranları yaklaşık olarak 0,7'dir. Bu yanıt oranı değerleri, maksimum yanıtlar içinde 1. deprem girdisi için yaklaşık olarak 0,8, 2. deprem girdisi için de yaklaşık olarak 0,7'dir. Bu yanıt oranlarından yola çıkarak Durum 3'te çalkalanan titreşim sönümleyicinin klasik titreşim sönümleyici gibi çalışmadığı söylenebilir. Bu durumda çalkalanan titreşim sönümleyicinin sadece sistemin sönüm oranını bir miktar arttırmakla benzer bir etki yaptığı gözlenmektedir.





**Şekil 95. Durum 3 için ideal çalkalanan sıvı yüksekliğinde elde edilen yanıtın çalkalanan sıvı olmadan elde edilen yanıt oranı (düşük girdi genliği)**

#### 4.6.4 Durum 4:

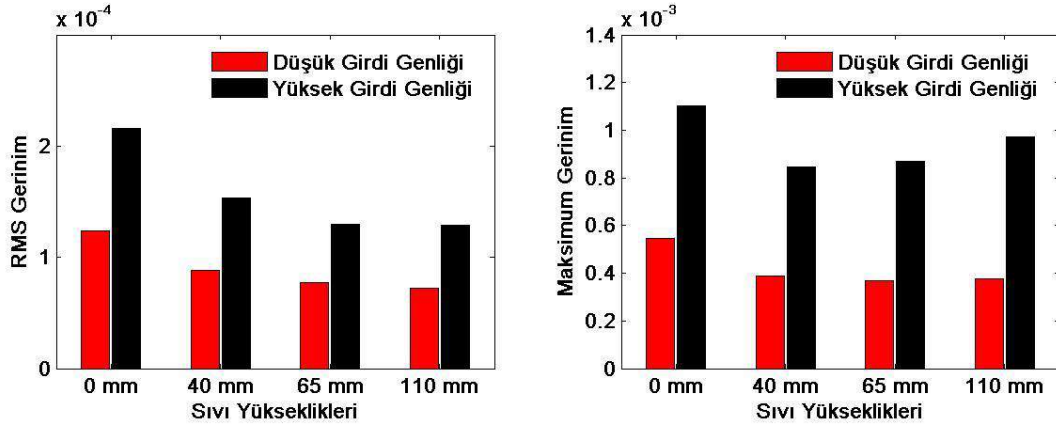
Durum 4'de yapının doğal frekansı daha da artırılarak 3,5 Hz'e ayarlanmıştır. Durum 3'te yapının doğal frekansı ile deprem girdisinin etkin frekansının farklı olduğu durum incelenmişti. Durum 4'de ise deprem girdisinin etkin frekansı ile yapının doğal frekansı arasındaki farkın daha da artması sağlanarak yapının doğal frekansı ile deprem girdisinin etkin frekansının birbirinden çok farklı olduğu durum incelenecektir. Bu durum içinde su yükseklikleri önceki durumlardaki gibi sırasıyla 0 mm, 40 mm, 65 mm ve 110 mm değerlerine ayarlanmıştır. Durum 4'de de maksimum deprem girdi genlikleri yine 6 mm ve 12 mm'dir. Durum 4'de farklı bir bina modeli kullanılmıştır. Bu bina modeli için çalkalanan titreşim sönümleyicinin kütle sinin yapı kütle sine oranı 65 mm sıvı yüksekliği için 0,32'dir. Durum 4.a'da girdi sinyali 1. deprem sinyali, durum 4.b'de ise 2. deprem sinyali dir.

#### Durum 4.a:

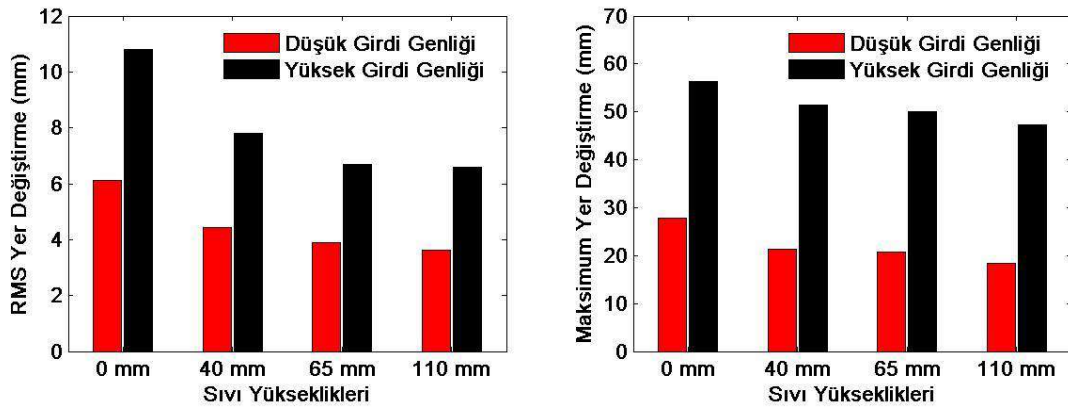
Durum 4'de anlatılan sistem, 1. deprem girdisi ile hareket ettirilerek elde edilen gerinim, ivme ve kat yer de ğiştirme verilerinin rms ve maksimum de ğerleri Tablo 33'de verilmiştir. Şekil 96'da gerinim verisinin, Şekil 97'de ise yer de ğiştirme verisinin rms ve maksimum de ğerlerinin farklı su yükseklikleri ve girdi genlikleri için de ğişimi görülmektedir.

Tablo 33. Durum 4 için sistemin yanıtı (1. Deprem sinyali)

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Genliği (mm)	Rms Gerinim	Maksimum Gerinim	Rms İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	Rms Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	12	2,2E-04	1,1E-03	5,0	25,0	10,8	56,4
0	6	1,2E-04	5,4E-04	2,9	12,0	6,1	27,9
40	12	1,5E-04	8,5E-04	3,5	19,1	7,8	51,5
40	6	8,9E-05	3,9E-04	2,0	9,8	4,4	21,3
65	12	1,3E-04	8,7E-04	2,9	18,8	6,7	50,0
65	6	7,8E-05	3,7E-04	1,7	8,0	3,9	20,8
110	12	1,3E-04	9,7E-04	2,6	18,2	6,6	47,3
110	6	7,2E-05	3,8E-04	1,5	7,4	3,6	18,3



Şekil 96. Durum 4 için gerinimin rms ve maksimum değerleri (1. sinyal)



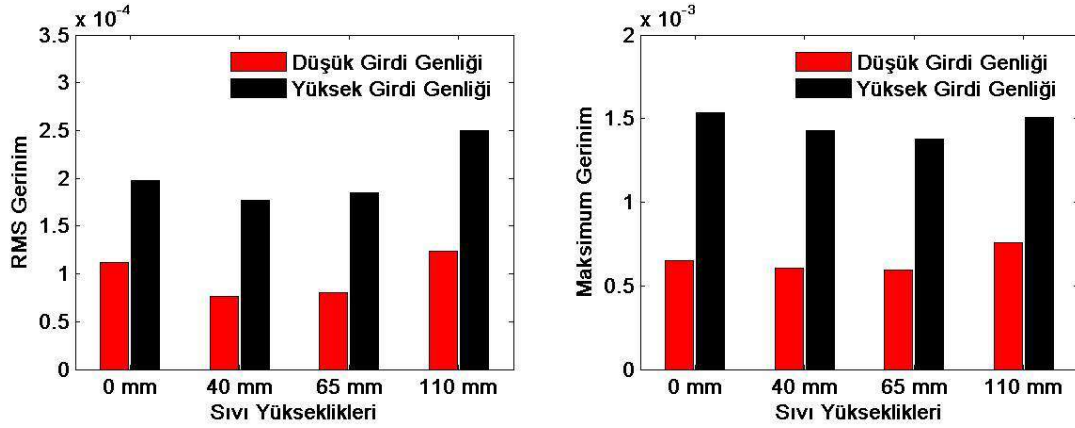
Şekil 97. Durum 4 için yer değiştirmenin rms ve maksimum değerleri (1. sinyal)

**Durum 4.b:**

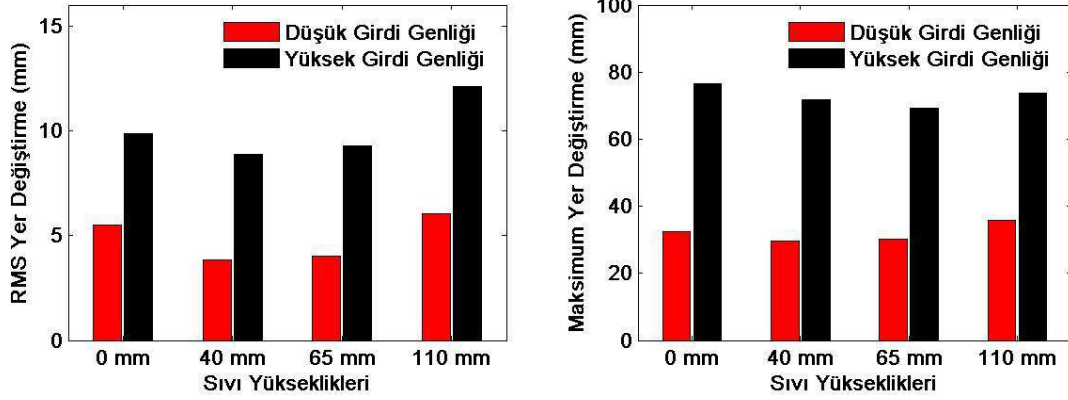
Durum 4.b'de ise 2. Deprem girdi sinyali kullanılarak Durum 4 için elde edilen değerlerin rms ve maksimum değerleri verilmiştir. Bu değerler Tablo 34'te görülebilir. Şekil 98'de gerinim, Şekil 99'da ise kat yer değiştirme verisinin farklı durumlarda değişimi görülmektedir.

**Tablo 34. Durum 4 için sistemin yanıtı (2. Deprem sinyali)**

Sıvı Yüksekliği (mm)	Maksimum Girdi Genliği (mm)	Rms Gerinim	Maksimum Gerinim	Rms İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	Rms Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
0	12	2,0E-04	1,5E-03	4,6	34,9	9,9	76,5
0	6	1,1E-04	6,5E-04	2,6	14,5	5,5	32,4
40	12	1,8E-04	1,4E-03	4,0	30,9	8,9	71,6
40	6	7,7E-05	6,0E-04	1,8	13,2	3,9	29,7
65	12	1,9E-04	1,4E-03	4,1	29,4	9,3	69,2
65	6	8,0E-05	5,9E-04	1,8	13,0	4,0	30,2
110	12	2,5E-04	1,5E-03	5,0	30,3	12,1	73,8
110	6	1,2E-04	7,6E-04	2,5	15,2	6,0	35,7



**Şekil 98. Durum 4 için gerinimin rms ve maksimum değerleri (2. sinyal)**



**Şekil 99. Durum 4 için yer değiştirmenin rms ve maksimum değerleri (2. sinyal)**

Durum 3'de yapının doğal frekansı ile deprem girdisinin etkin frekansının ve sıvının çalkalanma doğal frekansının birbirinden farklı olduğu durum incelenmişti. Bu durum için elde edilen sonuçlardan bu durumda çalkalanan titreşim sönümleyicinin, titreşim sönümleyici gibi çalışmadığı sadece sistemin sönüm oranını artırdığı çıkarımı yapılmıştı. Durum 4'de ise yapının doğal frekansı ile deprem girdisinin etkin frekansının ve sıvının çalkalanma doğal frekansının arasındaki fark daha da artırılarak bu durum incelenmiştir. Bu durum için elde edilen veriler verilen tablo ve grafiklerde görülebilir. 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 bir miktar 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 Tablo x 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 artırmıştır. Bu durumdan yola çıkılarak titreşim sönümleyicinin miktarının ilgili durum için iyi ayarlanmadığında sistem yanıtını daha da artırabileceği söylenebilir.

#### **4.6.5 Deprem Girdisi Altında Sıvılı Çalkalanan Sönümleyicili Yapı Deneyle İlgili Sonuçlar**

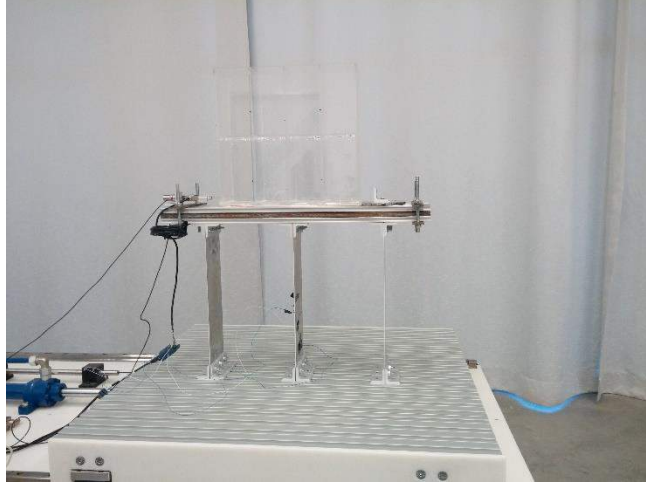
Çalışmanın bu kısmında daha önce sinüzoidal yanıtı incelenen dikdörtgen kaplı çalkalanan sıvılı sönümleyicili sistemin deprem girdilerine yanıtları incelenmiştir. Gözlemlenen sonuçlar

sinüzoidal yanıtta elde edilen sonuçlara benzerlik göstermektedir. Durum 1 ve Durum 2’de yapının doğal frekansı ile çalkalanma doğal frekansı örtüştüğü için başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar genel olarak sıvının yüksekliği 65 mm iken elde edilmiştir. Bu da çalkalanma doğal frekansının yapı doğal frekansına eşit olduğu durumdur (1 Hz). Durum 1 ve Durum 2’de rezonans etrafında 65 mm yükseklik için yanıtlarda yarıdan fazla düşüş elde edilmiştir. Bazı durumlarda 4-5 kat azalma görülmüştür. Bir diğer nokta ise Durum 1 ve Durum 2’de aynı doğal frekanstaki yapı üzerine (1 Hz), aynı çalkalanma doğal frekansına sahip sıvılı sönümleyici konulmaktadır. Bu iki sistem arasındaki fark sönümleyicinin yapıya olan kütle oranının Durum 2’de Durum 1’in yarısı olmasıdır. Görülen deneysel sonuçlar titreşim azalımında bu iki durum için önemli bir fark olmadığını göstermektedir.

Ancak çalkalanan titreşim sönümleyicinin çalkalanma doğal frekansının yapının temel doğal frekansına eşit olmadığı durumlarda ise (Durum 3 ve Durum 4) ilk iki durumlarda elde edilen başarılı sonuçlar elde edilememiştir. Yanıtlarda sadece sıvının eklenmesi kaynaklı sönümlemenin artması nedeni ile oluşan düşük bir yanıt düşüşü vardır. Çalkalanma doğal frekansı ile yapının temel doğal frekansı arasındaki farkın en yüksek olduğu durum olan Durum 4’te ise en kötü sonuçlar elde edilmiştir. Hatta Durum 4’te yüksek deprem girdili durumun 110 mm sıvı yükseklik olan durumunda ise sistemin yanıtı çalkalanan sıvı sönümleyici eklenince daha yüksek olmuştur yani sönümleyici depreme olan yanıtı kötüleştirmiştir. Bu durum deprem girdisi içinde düşük katlı binalar için (yüksek doğal frekanslı sistemler için) çalkalanma frekansı düşük olan bu dikdörtgen kabın kullanımının etkili olmayacağını göstermektedir. Bu nedenden dolayı bir sonraki kısımda sayısal benzetim çalışmalarında yüksek doğal frekanslı sistemler için iyi sonuç veren çok gözlü kap tasarımı üzerinde sinüzoidal ve deprem girdileri için deneysel çalışmalara yapılacaktır.

#### **4.7 Çok Gözlü Kap Tasarımı Deneysel Çalışmaları Sonuçları**

Çalışmanın bu kısmında daha önce sayısal benzetim sonuçları sinüs girdisine karşı doğal frekansı yüksek olan binada önemli miktar titreşim azalımı sağladığı görülen çok gözlü kap tasarımı deneysel olarak incelenecektir. Kabın üretim sonraki görüntüsü Şekil 100’de gösterilmiştir.



**Şekil 100. Çok Gözlü Kap Tasarımın Üretim Sonrasındaki Durumu**

#### **4.7.1 Çok Gözlü Kap ve Yapısal Sistemin Sinüs Tahrikine Yanıtı:**

Bu kısımda yapının rezonans frekansı ve sıvının çalkalanma frekansı 2,9 Hz'e ayarlanmıştır. Bu yönden bu durum, Durum 1 ve Durum 2'ye benzemektedir. Ancak Durum 1 ve 2'den farklı olarak doğal frekanslar düşük frekans değerine değil yüksek frekans değerine ayarlanmıştır (düşük binaların doğal frekansına yakın değerler). Bu durumun incelenmesinden sonra nispeten yüksek doğal frekans değerleri için çıkarımlar yapılabilecektir. İncelenen durum için çalkalanan titreşim sönümleyici kütlelerinin bina modelinin kütlelerine oranı 0,37'dir. Durum 3'de, sistemde çalkalanan sönümleyicinin olduğu ve olmadığı iki durum için farklı hareket frekanslarında 0,7 mm ve 1 mm hareket genliği için ölçümler yapılmıştır. Girdi genlikleri için daha büyük değerlerde yanıtın çok büyümesinden dolayı ölçüm yapılamamıştır. 'Düşük Genlik için Çok Gözlü Kap' kısmında düşük girdi genliği için sonuçları gösterirken, 'Yüksek Genlik için Çok Gözlü Kap' ise yüksek girdi genliği için sonuçları göstermektedir.

#### **Düşük Genlik için Çok Gözlü Kap Yanıtı:**

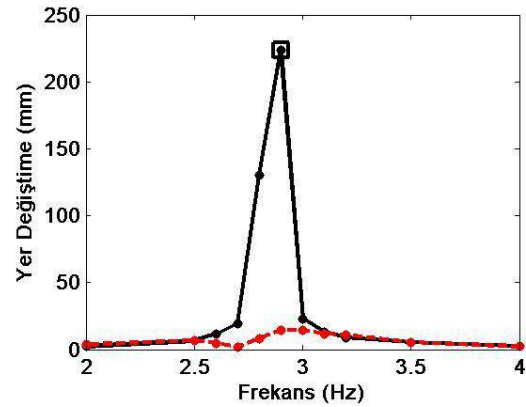
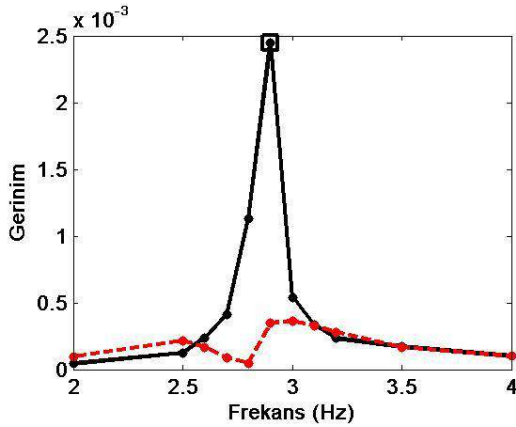
Düşük girdi genliğinde çalkalanan titreşim sönümleyicinin olmadığı durum için sonuçlar Tablo 35 Tablo 35'de görülmektedir. Tablo 36'da ise yine düşük girdi genliği için ancak bu sefer çalkalanan titreşim sönümleyici olan sistem için alınan sonuçlar verilmiştir. Ayrıca Şekil 101'de çalkalanan titreşim sönümleyicinin olduğu ve olmadığı durumlar için gerinim ve kat yer değiştirmesinin frekansa göre değişiminin grafiği verilmiştir.

**Tablo 35. Düşük Genlikli Girdi için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (0,7 mm girdi genliği)**

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Yer Değiştirme (mm)
2,0	4,3E-05	0,5	2,4
2,5	1,3E-04	1,6	6,5
2,6	2,4E-04	3,1	11,5
2,7	4,1E-04	5,5	19,3
2,8	1,1E-03	17,0	130,0
2,9 @ 10 s	2,4E-03	52,2	224,0
3,0	5,4E-04	8,0	22,7
3,1	3,3E-04	5,1	13,2
3,2	2,3E-04	3,7	9,1
3,5	1,7E-04	2,8	5,6
4,0	1,0E-04	1,7	2,6

**Tablo 36. Düşük genlikli girdi için sönümleyici olan sistemin yanıtı (0,7 mm girdi genliği)**

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



**Şekil 101. Çok gözlü kap için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değiştirme (0,7 mm girdi genliği)**

### Yüksek Genlik için Çok Gözlü Kap Yanıtı:

Yüksek girdi genliği olan 1 mm için sonuçlar şu şekildedir. Tablo 37 çalkalanan titreşim sönümleyicinin olmadığı durum için alınan verileri gösterirken, Tablo 38’de yapı ile sönümleyicinin birlikte olduğu sistem için alınan verileri göstermektedir. Şekil 102’de çalkalanan titreşim sönümleyicinin olduğu ve olmadığı durum için ayrı ayrı gerinim ve kat yer değiştirmesinin frekansa bağlı grafiği görülmektedir.

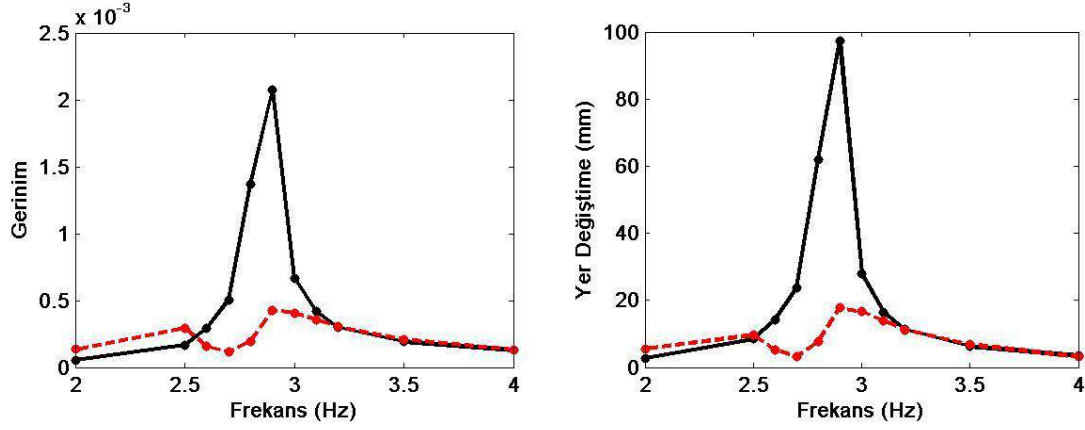
**Tablo 37. Yüksek genlik için sönümleyici olmayan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği)**

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Yer Değiştirme (mm)
2,0	5,4E-05	0,7	2,8
2,5	1,7E-04	2,1	8,5
2,6	2,9E-04	3,8	14,1
2,7	5,1E-04	6,1	23,8
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	27,9
3,1	4,2E-04	6,3	16,5
3,2	3,0E-04	4,7	11,3
3,5	1,9E-04	3,1	6,3
4,0	1,3E-04	2,2	3,4

**Tablo 38. Yüksek genlik için sönümleyici olan sistemin yanıtı (1 mm girdi genliği)**

Frekans (Hz)	Gerinim	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Yer Değiştirme (mm)	Yük Hücresi (N)
2,0	1,4E-04	1,0	5,6	6,4
2,5	3,0E-04	2,4	9,6	14,4
2,6	1,6E-04	1,4	5,1	11,1
2,7	1,2E-04	1,0	3,3	9,1
2,8	2,0E-04	2,1	7,6	11,5
2,9	4,3E-04	5,9	17,8	10,6
3,0	4,1E-04	5,8	16,7	11,1
3,1	3,6E-04	5,2	13,9	8,6
3,2	3,0E-04	4,7	11,2	9,3
3,5	2,1E-04	3,4	6,8	4,6
4,0	1,3E-04	2,0	3,1	4,6





**Şekil 102. Çok gözlü kap için yapının yanıtı a. Gerinim b. Yer değişimi (1 mm girdi genliği)**

Çok gözlü kabın sinüs girdisine yanıtı incelendiğinde, sistem yanıtının çalkalanan titreşim sönümleyici ile etkili bir şekilde düştüğü görülmektedir. Bu durum düşük doğal frekanslarda yapılan Durum 1 ve 2 ile kıyaslanırsa, rezonans etrafında önceki durumlar kadar başarılı bir sönümleme yaptığı görülür. Düşük frekans değerleri için sonuçlar incelendiğinde çalkalanan titreşim sönümleyicilerin olduğu durumlarda rezonans etrafında oluşan yeni iki tepe noktası oluştuğu görülmüştü. Çok gözlü kaplı sistemin yanıtı incelendiğinde bu iki tepe noktasının bu durumda da oluştuğu söylenebilir. Ancak çok gözlü kap için bu iki yeni tepe noktası için değerler önceki durumlara göre daha düşüktür. Yani çalkalanan sönümleyici Durum 1 ve 2’de sönümü az titreşim sönümleyici gibi çalışırken Çok gözlü kaplı sistemin sonuçları ise sistem sönüm oranı daha iyi ayarlanmış titreşim sönümleyici gibi çalışmaktadır.

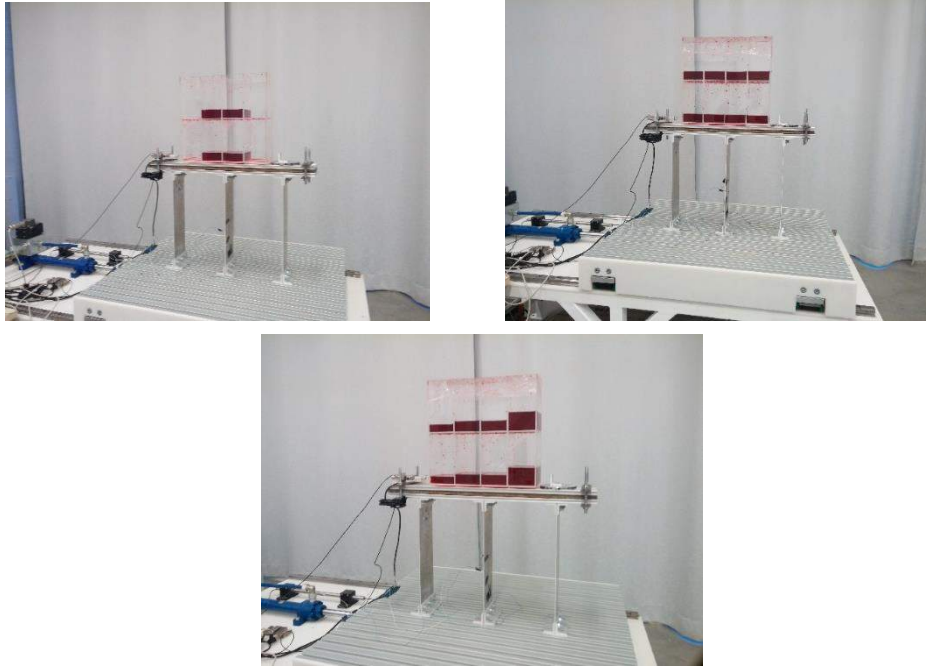
Bu durumlardan yola çıkılarak bir takım çıkarımlar yapılabilir. Öncelikle Durum 1, 2 ve çok gözlü kap incelenirse, çalkalanma doğal frekansı ile yapının doğal frekansının yakın olduğu durumlarda bu yöntem ile etkili sönümleme yapılabildiği görülür. Ancak bu durumlarda sönümleme daha çok rezonans frekansı ve etrafındaki değerlerde olmaktadır. Rezonans frekansı etrafındaki etkili sönümleme yapılan frekans aralığının genişliği çalkalanan sönümleyicinin kütlesinin yapının kütlesine oranı ile ilgilidir. Bu sonuç Durum 1 ve 2 incelenirse görülür. 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 rezonans tepesi oluşur. Oluşan bu yeni rezonans tepeleri yüksek frekanslara çıkıldıkça sönümlenerek ortadan kalmaya başlarlar. Bu durum çok gözlü kap için görülür.

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 bir miktar Durum 4'de ise net bir şekilde bu durum görülür. Yapı ile sıvının doğal frekansı arasındaki fark çok olduğunda, sistem cevabı sisteme ek kütle ve sönüm malzemesi eklenmiş sistem yanıtına benzer.

#### 4.7.2 Çok Gözlü Kap ve Yapısal Sistemin Deprem Girdisine Yanıtı:

Bu bölümdeki deneyler yapılmadan önce yapının doğal frekansı yapıya uygun miktarda ağırlık eklenerek 2,7 Hz'e ayarlanmıştır. Hareket girdisi olarak 0,83 Hz etkin frekansında 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. 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. Böylece daha geniş bir frekans aralığına ayarlanabilen bir sönümleyici tasarımı hedeflenmiştir. Durum 2, Durum 3 ve Durum 4 konfigürasyonları Şekil 103'de görülebilir.

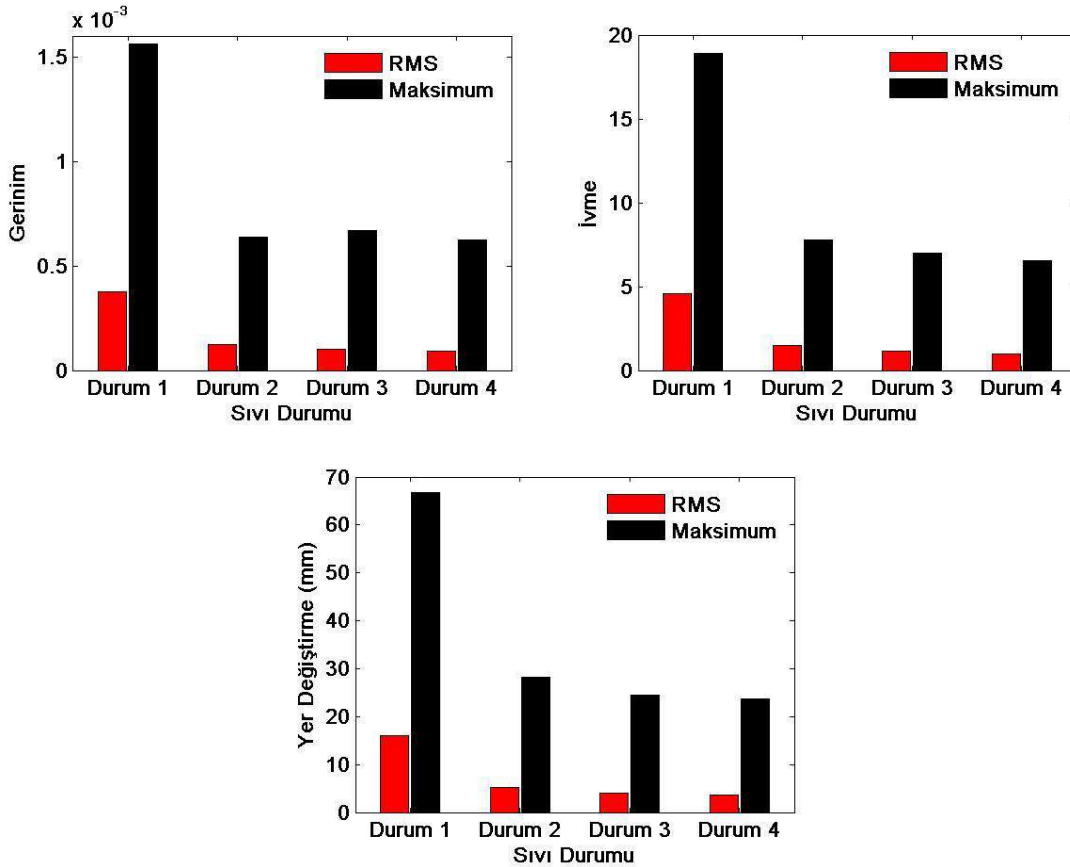


**Şekil 103. Deprem çalışmalarında deneysel çalışma yapılan a. Gözlerinin yarısı dolu kap durumu (Durum 2) b. Gözlerinin tamamı dolu kap durumu (Durum 3) c. Gözleri farklı yüksekliklerde su dolu kap durumu**

Yeni kap tasarımı için farklı su durumlarında elde edilen gerinim, ivme ve yer değiştirme verilerinin rms ve maksimum değerleri Tablo 39'da verilmiştir. Şekil 104'de ise gerinim ve yer değiştirme verisinin rms ve maksimum değerlerinin farklı su durumları için değişimi grafiklerde gösterilmiştir.

**Tablo 39.Farklı kap tasarımı için elde edilen sonuçlar**

Sıvı Durumu (mm)	Rms Gerinim	Maksimum Gerinim	Rms İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	Rms Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
1	3,8E-04	1,6E-03	4,6	18,9	16,1	66,7
2	1,2E-04	6,4E-04	1,5	7,8	5,3	28,3
3	1,0E-04	6,7E-04	1,2	7,0	4,1	24,4
4	9,2E-05	6,2E-04	1,0	6,5	3,7	23,8



**Şekil 104.Farklı kap tasarımı için elde edilen gerinim ve yer değiştirme verilerinin rms ve maksimum değerleri**

Yeni kap tasarımı için elde edilen sonuçlar incelenirse; gerinim, ivme ve yer değiştirme verilerinin rms ve maksimum değerlerinin farklı sıvı durumları içerisindeki en büyük

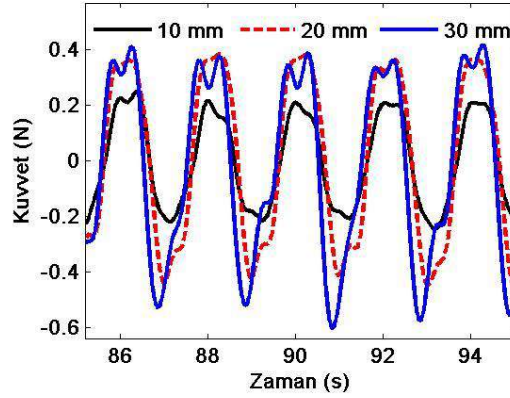
değerlerini Durum 1’de aldığı görülür. Durum 1’de sistemde çalkalanan titreşim sönümleyici olmadığından bu sonuç beklenen bir sonuçtu. Diğer 3 sıvı durumunda da çalkalanan titreşim sönümleyici olmayan duruma göre elde edilen bu verilerin genlikleri % 50’den fazla azalmaktadır. Durum 2’deki yanıt ile Durum 3’teki sistem yanıtı karşılaştırıldığında Durum 3’te elde edilen yanıtın az bir miktar olsa da Durum 2’de elde edilen yanıtın az olduğu görülür. 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 yanıtındaki düşüş oranı elde edilen veriler için % 15 civarındadır. Durum 4’de ise 4 bölme 2,7 Hz çalkalanma doğal frekansındaki su yüksekliğinde doldurulmuş iken 2 bölme 2,5 Hz ve diğer iki bölmede 2,9 Hz çalkalanma doğal frekansındaki su yükseklikleri ile doldurulmuştur. Durum 4’deki yanıt ile Durum 3’deki yanıt karşılaştırıldığında yanıtın Durum 4’de, Durum 3’e göre elde edilen veriler için ortalama yaklaşık % 10 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.

#### **4.7.3 Çok Gözlü Kap için Deneysel Çalışma Sonuçlarının Yorumlanması:**

Genel değerlendirme olarak çok gözlü kap tasarımı ile şu ana kadar sorun yaşanan yüksek doğal frekanslı yapıların (alçak katlı binalarda görülür) sinüs ve deprem girdisine karşı yanıtlarında önemli iyileşme görülmüştür. İlk defa yüksek doğal frekanslı binaların yanıtları sıvılı çalkalanan sönümleyiciler ile önemli miktarda azaltılmıştır. Söz konusu azalım sinüs girdisi için rezonans etrafında yaklaşık 10 kat ve deprem girdisi için yaklaşık 2-3 kattır. Bu projenin hedefleri açısından çok önemli bir gelişmedir. Böylece bu tür çok gözlü bir kap tasarımı ile yüksek frekanslara sahip alçak katlı binalarda sıvılı sönümleyicilerin etkin olabileceği gösterilmiştir.

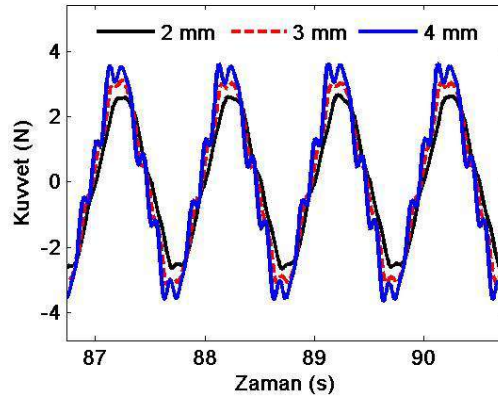
### **4.8 Kap Duvarlarına Etkiyen Kuvvetin Kamera Görüntüleri Kullanılarak Bulunması**

Bu bölümde herhangi bir bina modeli olmadan titreşim girdisi verilen sıvı tankının içindeki sıvının oluşturduğu çalkalanma kuvvetleri incelenecektir. Bu incelemeler değiştirilen sıvı yükseklikleri, hareket genlikleri ve hareket frekanslarının çalkalanma kuvvet genliği üzerindeki etkisinde üzerinde yoğunlaşacaktır. Şekil 105’de 0,5 Hz hareket frekansı ve 15 mm sıvı yüksekliği için 10 mm, 20 mm ve 30 mm hareket genliklerinde oluşan çalkalanma kuvvetlerini görülmektedir. Bu durumda 15 mm sıvı yüksekliği için sıvının çalkalanma doğal frekansı 0,5 Hz’dir. Bu grafik üzerinden hareket genliklerinin çalkalanma kuvvetlerine etkisi görülebilir.



**Şekil 105. 0,5 Hz hareket frekansı ve 15 mm sıvı yüksekliği için hareket genliğinin çalkalanma kuvveti üzerindeki etkisi**

Şekil 105'de görüldüğü gibi hareket genliği, 10 mm olduğunda pozitif ve negatif maksimum noktalarının ortalama değerinin 0,2 N değerinin çok az üstünde olduğu görülmektedir. Diğer parametreler değişmeden hareket genliği 20 mm'ye artırıldığında ise ortalama maksimum kuvvet genliğinin 0,4 N'a çok yakın bir değerde olduğu görülmektedir. Hareket genliği 30 mm yapıldığında ise ölçülen kuvvetin yine artarak 0,4 N değerinin biraz daha üzerine çıktığı görülmektedir. Çalkalanma kuvvetinin büyüklüğünün hareket genliği ile arttığını söyleyebilmek için farklı bir frekansta daha benzer karşılaştırmalar yapılmıştır. 1 Hz hareket frekansı ve 65 mm sıvı yüksekliğinde çeşitli hareket genliklerinde ölçümler alınmıştır. 65 mm sıvının çalkalanma doğal frekansı 1 Hz'dir. Şekil 106'da bu karşılaştırma görülebilir.



**Şekil 106. 1 Hz hareket frekansı ve 65 mm sıvı yüksekliği için hareket genliğinin çalkalanma kuvveti üzerindeki etkisi**

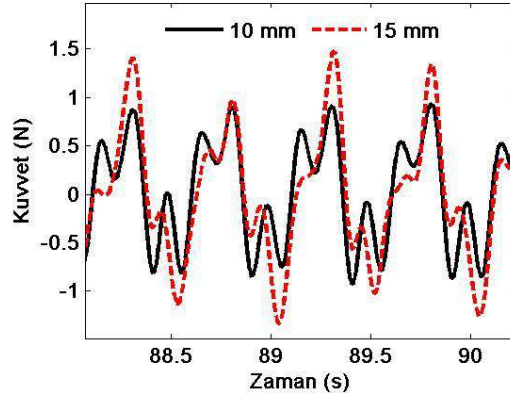
İlgili grafikte hareket genliği arttıkça çalkalanma kuvvetinin de arttığı görülebilir. Bu frekanstaki en düşük hareket genliği olan 2 mm hareket genliğinde negatif ve pozitif maksimum noktalarının ortalama değeri 2,5 N'dur. Hareket genliği 3 mm'ye artırıldığında maksimum

kuvvet genliği 3,2 N değerine çıkmaktadır. Hareket genliği 2 mm'den 3 mm'ye çıktığında görölen artışın bir benzeri de hareket genliği 3 mm'den 4 mm'ye çıktığında görölmektedir. 4 mm için ortalama maksimum çalkalanma kuvveti 3,5 N'a yakındır. Bu değerden daha büyük girdi genlikleri grafikte gösterilmemiştir. Bunun nedeni ise sıvının hareketinin 5 mm ve üzeri genlik değerlerinde doğrusal ve 2 boyutlu akış özelliğini kaybetmesidir. Şekil 105 ve Şekil 106'da artırılan hareket genliğinin sıvının 2 boyutlu ve doğrusal akışı bozulmadıkça çalkalanma kuvvetini artıracakđını göstermektedir.

Ayrıca Şekil 105 ve Şekil 106 beraber incelenebilir. 0,5 Hz hareket frekansı ve 1 Hz hareket frekansı için yapılan deneylerde sıvı tankındaki sıvı seviyesi bu hareket frekanslarında doğal frekanslarında olacak şekilde belirlenmiştir. Yani 0,5 Hz hareket frekansı için çalkalanma doğal frekansı 0,5 Hz olan sıvı yüksekliği 15 mm ve 1 Hz hareket frekansı için çalkalanma doğal frekansı 1 Hz olan sıvı yüksekliği 65 mm olarak belirlenmiştir. 0,5 Hz için hareket genlikleri 10 mm, 20 mm ve 30 mm olarak değiştirilmiştir ve en yüksek ortalama maksimum çalkalanma kuvveti 30 mm'de 0,4 N değerinin az üzerindedir. 1 Hz hareket genliği ve ilgili sıvı yüksekliği için ise hareket genliği sırasıyla 2 mm, 3 mm, 4 mm yapılmıştır. Bu durumdaki en düşük kuvvet ise 2 mm hareket genliğinde 2,5 N'dur. Bu iki durum karşılaştırıldığında artan hareket frekansıyla, hareket genliği azalsa bile çalkalanma kuvveti artmaktadır. Bu durumlarda sıvı yükseklikleri hareket frekansına göre ayarlanmıştır. Yani artan frekans ile birlikte ayarlanmış sıvı yüksekliği de artmaktadır.

Bu başlık altındaki son olarak sıvı yüksekliği ile hareket frekansının birbirine uygun olarak ayarlandığı durum ile ayarlanmadığı durum karşılaştırılacaktır. Şekil 106'da görölen 4 mm hareket genliği için elde edilen ortalama maksimum kuvvet yaklaşık olarak 3,5 N'dur. Hareket frekansının ve hareket genliğinin artırılması durumunda çalkalanma kuvvetlerinin artması beklenmektedir.

Bu yüzden yeni durumda hareket genliği 10 mm'ye ve hareket frekansı 2 Hz çıkarılmıştır. Ancak bu yeni durumda sıvı yüksekliği 2 Hz hareket frekansında doğal frekansına ulaşacak şekilde ayarlanmayıp 65 mm'de bırakılmıştır. 65 mm yüksekliği hareket frekansı olan 2 Hz değil 1 Hz doğal salınım frekansına sahiptir. 2 Hz için tanımlanan parametrelere göre sonuçlar Şekil 107'dedir.



**Şekil 107. 2 Hz hareket frekansı ve 65 mm sıvı yüksekliği için hareket genliğinin çalkalanma kuvveti üzerindeki etkisi**

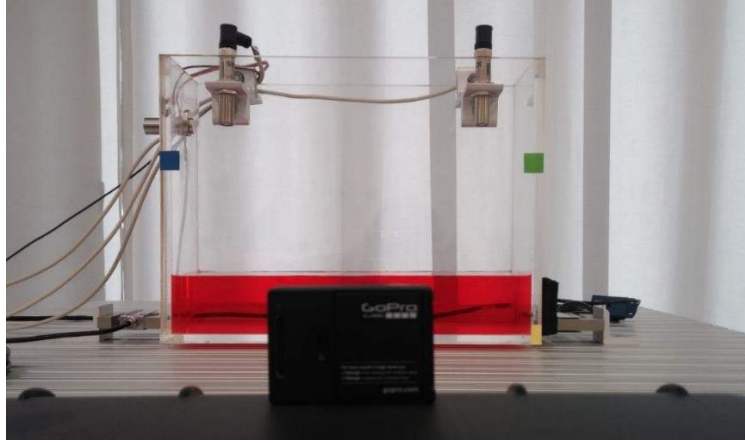
Şekil 107’de de görüleceği üzere 2 Hz hareket frekansı ve 15 mm hareket genliği için alınan çalkalanma kuvveti değeri 1,5 N’dan azdır. Ancak 1 Hz hareket frekansı ve 2 mm hareket genliği için alınan çalkalanma kuvvet değeri 2,5 N’du. Çalkalanma kuvvetinin frekans, hareket genliği ve sıvı yüksekliği ile doğru orantılı olarak artması beklenirken bu durumda artmamasının nedeni kaptaki sıvının çalkalanma doğal frekansı ile sisteme dışarıdan verilen zorlamanın hareket frekansının aynı olmamasıdır. Yani 1. Durumda sıvının çalkalanma doğal frekansı 1 Hz iken sistemde 1 Hz frekansı ile hareket ettirildi ve düşük genlik ve frekans değeri için bile çalkalanma kuvveti büyük değerlere ulaştı. Ancak hareket frekansının 2 Hz’e çıkarılması ve hareket genliğinin 15 mm artırılmasına rağmen bir sonraki durumda çalkalanma kuvveti daha düşük değer aldı. Bunun sebebi de 2 Hz hareket frekansı olmasına rağmen sıvının çalkalanma doğal frekansı 1 Hz’e ayarlanmasıdır.

### **Çalkalanma kuvvetinin görüntü işleme metotları kullanılarak elde edilmesi**

Proje önerisinde olmayan ancak proje çalışmalarına eklenen bir diğer çalışma da proje çalışmaları sırasında rezonans frekansı etrafındaki kap titreşimleri sırasında kap duvarlarında oluşan kuvveti sensör kullanmadan sadece kameradan elde edilen görüntüler sayesinde bulunmasını sağlayan görüntü işleme bazlı bir metodun geliştirilmesidir. Bu da bu kısımdaki ikinci kısımda sunulacaktır.

Çalkalanma karakteristiğinin daha iyi anlaşılabilmesi ve çalkalanmadan dolayı oluşan kuvvetin herhangi bir algılayıcı kullanmadan ölçülebilmesi için görüntü işleme metotları kullanılmıştır. Görüntü işleme işlemleri MATLAB ortamında yapılmıştır. MATLAB ortamına hareketin videosu yüklenmiş ve bu videoların her bir karesi ayrı ayrı işlenmiştir.

Görüntü işlemeye başlamadan önce 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 uzaklaştırılmıştır. Arka fon rengi beyaz yapılmıştır. Ayrıca görüntü işleme sürecinde hareket eden kabın takip edilebilmesi ve görüntü üzerindeki mesafelerin ölçebilmesi için iki adet referans noktası görüntüye eklenmiştir. Bu referans noktaları görüntüde görülen mavi ve yeşil karelerdir. Sıvının hareketinin daha kolay tespit edilebilmesi içinde sıvı kırmızı renkte gıda boyası ile boyanmıştır. Referans noktaları ve sıvı dışında mavi, yeşil ve kırmızı renkte olan cisimler kapatılmıştır. Kamera ve sıvı tankının yerleşimi Şekil 108’de görülebilir.



**Şekil 108. Kamera ve sıvı tankının yerleşimi**

Kamera sıvı tankının ortalayacak ve serbest sıvı yüzeyi ile aynı yükseklikte olacak şekilde konumlandırılmıştır ve ek olarak kamera sıvı tankına yatay ve dikey olarak paraleldir. Şekil 109’daki görüntü kameranın tarafından çekilmiştir ve kameranın görüş alanını göstermektedir. Bu görüntü MATLAB ortamına aktarılmadan önce görüntüdeki distorsiyon düzeltilmiştir.



**Şekil 109. Kameranın görüş alanı**



MATLAB ortamında, RGB görüntüler 3 boyutlu matrislerle ifade edilmektedir. Matrislerin ilk iki boyutu yatay ve dikey çözünürlüğe karşılık gelmektedir. Bu yatay ve dikey çözünürlüğe karşılık gelen iki boyutlu matristen 3 adet vardır ve bu üç katman kırmızı, yeşil ve mavi rengin görüntüye katkısını belirler. Bu üç katmanda yer alan her piksel için üç adet 0 ile 255 arası değişen bir renk değeri vardır. Bu üç değer görüntüdeki kırmızı, yeşil ve mavi renk katkısını belirler. Bu üç renk katmanlardaki renk değerlerine göre belirli oranlarda karışarak pikselin gerçek rengini oluştururlar.

Mavi ve yeşil referans noktalarının ayrı ayrı RGB değerleri tespit edilip MATLAB ortamında ikisi için de ayrı ayrı durum kıstası oluşturulur. Bu durum kıstasları oluşturulurken girdi olarak tespit edilen değerler belirli hata payları ile durum kıstası olarak girilir. Durum kıstasları yatay ve dikey çözünürlük boyutunda 1 ve 0'lardan oluşan matrisi çıktı olarak verirler. Eğer pikselin değeri durum yapısı için girilen renk aralığında ise yeni oluşturulan yatay ve dikey çözünürlük boyutundaki matristeki ilgili elemanın değeri 1 olur aksi durumda ise elemanın değeri 0 olarak belirlenir. Yeni oluşturulan matriste 1 değerlerinin olduğu bölge tespit edilen referans noktasıdır. Bu aşamada referans noktası dışında birkaç küçük noktada parlamalar ve benzer sebeplerden yanlışlıkla tespit edilebilir. Bu hatalı noktalar MATLAB Image Processing Toolbox'ta hazır bulunan gürültü giderme komutları ile temizlenebilir. Tespit edilen alanın merkezi referans noktasının merkezi olarak alınabilir. Bu adımlardan sonra iki referans noktasının hangi piksellerde olduğu tespit edilmiştir. İki referans noktası arasındaki yatay piksel sayısı ve bu iki referans noktası arasındaki gerçek uzaklıktan bir pikselin kaç cm'ye denk geldiği tespit edilebilir.

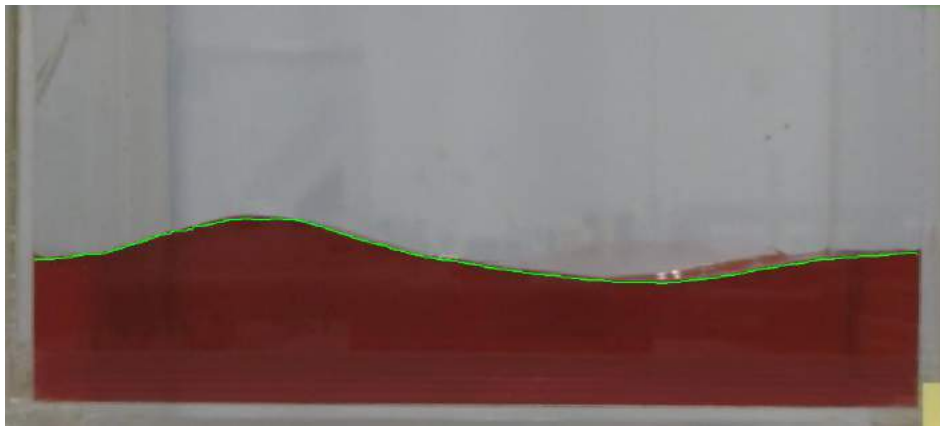
Bu aşamadan sonra görüntü ilgili referans noktaları yardımı ile kesilerek sadece tespit edilemeye çalışılan sıvı hacmi bırakılır. Daha sonra sıvı hacminin tespiti için yeni bir durum yapısı oluşturulup, referans noktaların tespitinde kullanılan yöntem ile sıvı hacminin olduğu yerler 0 olmadığı yerler ise 1 olarak işaretlenir. Önceki basamaklarda uygulanan gürültü giderme işlemleri bu adımda da uygulanır. Ancak bu gürültü giderme işlemlerine ek olarak sıvıda oluşan kopmalarında ortadan kaldırılması gerekir. Bunun için gürültü giderme filtrelerinin boyutları daha büyük alanları kapsayacak şekilde değiştirilir. Sıvı sıçramalarının kaldırıldığı durumun örneği Şekil 110'da görülebilir.



**Şekil 110. Sıvı sıçramalarının düzeltilmesi**

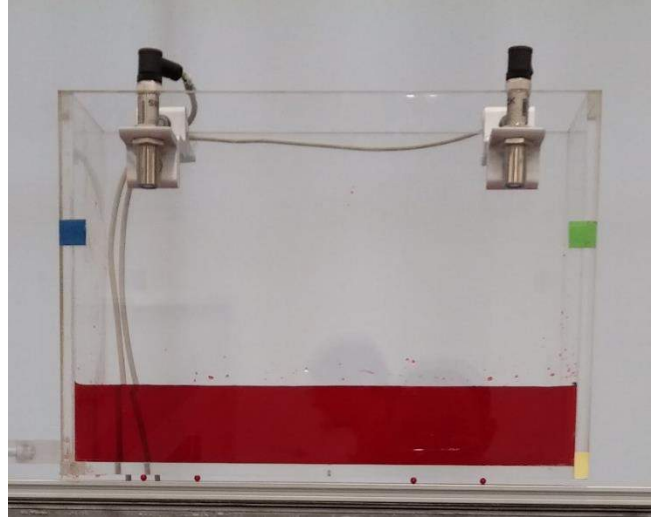
Kenar tespit etme algoritması ile kaptaki sıvı hacminin kenarları tespit edilir ve yine aynı şekilde yatay ve dikey çözünürlük boyutundaki matriste kenarlar işaretlenir. İşaretlenen yani kenar üzerinde olan pikseller 1 değerini alır.

Bu aşamalardan sonra son adım olan kap genişliği boyunca sıvı yüksekliğinin tespit edilmesi işlemine geçilir. Öncelikle 1 değerine sahip olan pikseller her bir sütun için tespit edilir. 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 büyüklükle çarpıldığında ise o sütundaki sıvı yüksekliği bulunur. 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 oluşturulur. Elde edilen bu sonuçlar yatay eksendeki konuma karşılık sıvı yüksekliği olarak her zaman adımı için matrise kaydedilir. Şuana kadar anlatılan işlemlerin çıktısı olarak kaydedilir. Şekil 111’de tespit edilen serbest yüzey çizgisini göstermektedir. Bu şekilden tespit edilen serbest yüzeyin gerçek sıvı serbest yüzeyi ile ne kadar uyum içerisinde olduğu gözlemlenebilir.



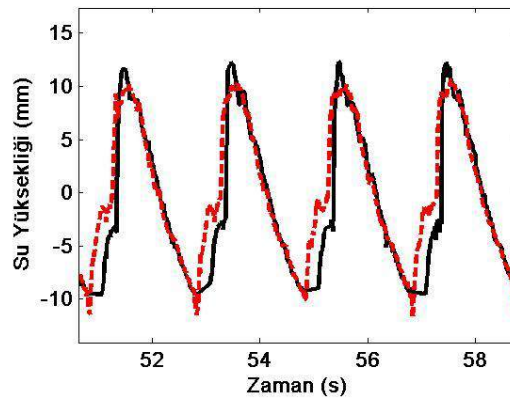
**Şekil 111. Tespit edilen serbest yüzey çizgisi**

Tespit edilen serbest sıvı yüzeyinin doğruluğunun saptanması için Şekil 112’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 şekilde yerleştirilmiştir. Algılayıcıların kap duvarlarından uzaklığı 47 mm’dir.



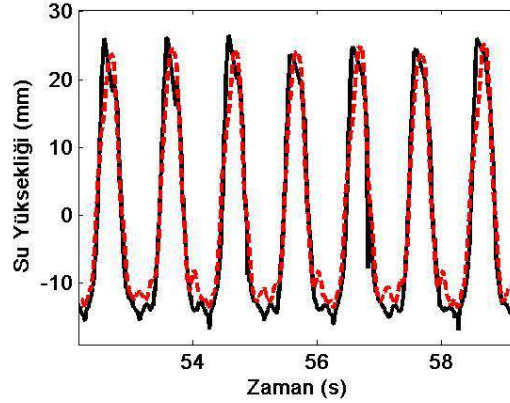
**Şekil 112. Ultrasonik algılayıcıların yerleşimi**

Mesafe algılayıcılardan elde edilen veri, tespit edilen sıvı yüksekliği verisini doğrulamak için algılayıcının bulunduğu noktadaki sıvı yüksekliği verisi ile karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma değişik sıvı yüksekliği, hareket frekansı ve hareket genlikleri için tekrar edilmiştir. Durum koşulları değişikçe sıvı yüksekliğinin genliği ve sıvının iki boyutlu hareketinin bozulması gibi sebepler yüzünden hata oranı değişmektedir. Bu bölümde verilen grafiklerde kırmızı kesikli çizgi kamera görüntüsü kullanılarak hesaplanan sıvı yüksekliği verisini, siyah düz çizgi ise ultrasonik algılayıcılar tarafından ölçülen sıvı yüksekliği verisini göstermektedir.



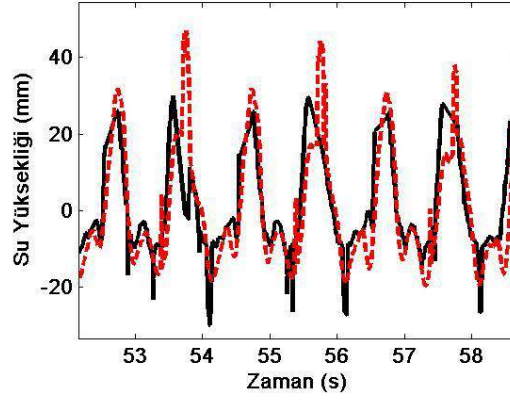
**Şekil 113. Düşük büyüklükteki hareket frekansı**

Şekil 113'de verilen grafik için hareket frekansı 0,5 Hz ve hareket genliği 30 mm'dir. Ek olarak bu karşılaştırma için kaptaki sıvı yüksekliği 15 mm yapılmıştır ve bu sıvı yüksekliğindeki sıvının doğal frekansı 0,5 Hz'dir. 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 % 6 olduğu görülmektedir. Aynı hareket frekansı ve sıvı yüksekliği için hareket genliği sırasıyla 20 ve 10 mm'ye düşürüldüğünde, tepe noktalarındaki hata ortalaması biraz daha artarak % 8-9 civarına çıkmaktadır. Bu artışın sebebi olarak ise düşen genlikle birlikte azalan sıvı yüksekliğidir. Düşük hareket frekansında deney yapılan bütün genliklerde hata oranının kabul edilebilir seviyede olduğu söylenebilir.



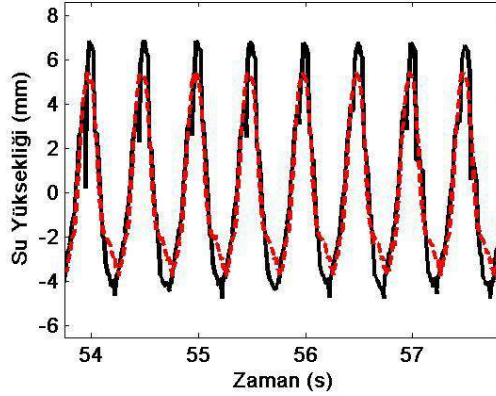
**Şekil 114. Orta büyüklükteki hareket frekansı ve düşük hareket genliği**

Bir sonraki grafik olan Şekil 114'de hesaplanan sıvı yüksekliğinin doğruluğu ise orta büyüklükteki hareket frekansı yani 1 Hz için incelenmektedir. Bu grafik elde edilirken hareket genliği 4 mm ve kaptaki sıvı yüksekliği doğal frekansı 1 Hz olan 65 mm'dir. Belirtilen koşullar altında ki sonuçlar tutarlı gözükmemekle birlikte tepe noktalarında ki ortama hata % 6'dır. Orta büyüklükteki hareket frekansında diğer koşullar aynı tutularak hareket genliği artırıldığında ve azaltıldığında düşük frekansın aksine 2 durum ile karşılaşılmaktadır. İlk durum olarak genliğin düştüğünde, azalan dalga yüksekliği ile birlikte hata oranı artarak %10 seviyesine çıkmaktadır. Bu durumdaki hata oranı kabul edilebilir gözükmemektedir. Ancak ikinci durumda ise artan hareket genliği ile hata oranı çok daha dramatik artarak hata oranı % 50'nin üzerine hareket genliği daha henüz 5 mm'de iken çıkmaktadır. Hareket genliği 5 mm yapıldığında elde edilen sonuç Şekil 115'de görülmektedir.



**Şekil 115. Orta büyüklükteki hareket frekansı ve yüksek hareket genliği**

Son olarak hareket frekansı 2 Hz'e yükseltilmiştir. Bu durumda hareket frekansı 10 mm ve sıvı yüksekliği 65 mm olarak ayarlandığında ortaya çıkan sonuçlar Şekil 116'da gösterilmiştir. 2 Hz için tepe noktalarının hatası yaklaşık olarak % 28'dir. Ayrıca hareket genliği artırıldığında da benzer sonuçlar alınmaktadır



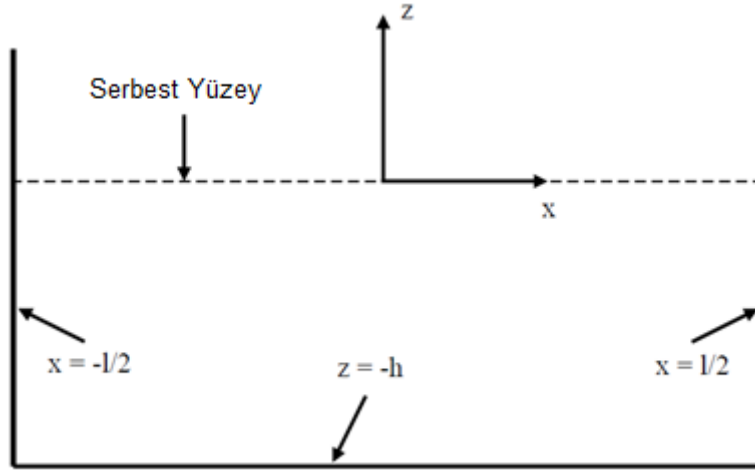
**Şekil 116. Yüksek büyüklükteki hareket frekansı**

Yapılan karşılaştırmalar incelendiğinde, uygulanan görüntü işleme metodunun çalkalanma süresince tanktaki sıvı yüksekliğinin tespiti için belli koşullarda kullanılabileceğini göstermiştir. Bu koşullar akışın iki boyutlu olması, hareket boyunca sıvıdaki sıçramaların az olması ve kamera çözünürlüğü ve sıvı yüksekliğinin fazla olmasıdır.

Sıvının çalkalanmasından dolayı oluşan net kuvvetin hesaplanması için doğrusal dalga teorisi ve görüntü işleme ile elde edilen sıvının serbest yüzeyi kullanılacaktır. Çalkalanma kuvveti hesaplanırken, bir takım ihmaller ve kabuller yapılmıştır. Bu ihmal ve kabuller aşağıda verilmiştir.

- Çalkalanma 2 boyutlu ve döngüsüdür.
- Sıvı tankının içindeki su sıkıştırılmazdır ve viskoz değildir.
- Sıvı tankı iki boyutlu ve dikdörtgendir. Ayrıca tank duvarları pürüzsüzdür.
- Sıvı yüksekliği hiçbir koşulda sıvı tankının tabanı açık kalmayacak kadar yüksek ve sıvı kabulleri yapılabilecek kadar düşüktür.
- Kuvvet hesaplama işlemleri Şekil 117'de gösterilen koordinat sistemine göre yapılmıştır.

Yukarıda belirtilen kabul ve ihmellere göre tank içindeki sıvının rezonans frekansı ve sıvı tankının hareket frekansı aynı veya yakın olması durumunda çalkalanmadan dolayı oluşan kuvvet hesaplanabilir. Bu kuvvetin hesaplanmasında sadece sıvı tankının hareketini görüntüleyen video görüntüleri girdi olarak kullanılmıştır. Herhangi bir algılayıcıdan elde edilen veri kuvvet hesaplanmasında kullanılmamıştır.



**Şekil 117. Kullanılan koordinat sistemi**

Yapılan kabuller altındaki hız potansiyeli denklem (1)'de gösterilmiştir (Faltinsen, 1999).

$$\varphi(x, z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} R_i(t) f_i(x) \frac{\cosh((i\pi/l)(z + h))}{\cosh((i\pi/l)z)} \quad (1)$$

Hız potansiyelinin hesaplanabilmesi için öncelikle  $f(x, t)$  ifadesinin bulunarak  $\beta_i(t)$  katsayı matrisinin tespit edilmesi gerekir.  $f(x, t)$  ifadesi denklem (2)'de verilmiştir (Faltinsen, 1999).

$$f(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i(t) f_i(x) \quad (2)$$

Ve  $f_i(x)$ 'in karşılığı şu şekildedir (Faltinsen, 1999).

$$f_i(x) = \cos((\pi i)/l (x + l/2)) \quad (3)$$

Denklem (1) ve (3)'te, z tank uzunluğu boyunca tespit edilen sıvı yüksekliği ve x tank uzunluğu boyunca tespit edilen noktaların konumudur.  $f(x, t)$  ise sıvı yüksekliğinin zamana ve yatay eksene göre değeridir. Yani tespit edilen sıvı yüksekliği verileri kullanılarak  $f(x, t)$  hesaplanabilir.

Elde edilen serbest yüzey verisi kullanılmadan tank kenarlarına yakın olan veriler üzerinde düzeltme işlemi yapılması gereklidir. Çünkü tank duvarlarına yakın olan noktalarda serbest yüzey şekli korunmamaktadır. Bu yüzden tank kenarlarına yakın olan verilerin bir kısmı atılır. Atılan veri noktaları tüm verilerin yaklaşık olarak % 2'sidir. Atılan veri noktalarından sonra elde edilen veri tüm kap uzunluğunu kapsayacak şekilde genişletilir. Daha sonraki adım olarak her zaman adımına karşılık gelen serbest yüzey için bir eğri uydurulur. Denklem (2) ve (3)'teki  $f(x, t)$  ve  $f_i(x)$  bilinenlerdir.  $f(x, t)$  hesaplanmış ve düzeltilmiş serbest yüzeye eşittir ve  $f_i(x)$  ise sadece yatay eksenindeki konum ve iterasyon sayısına bağlıdır. İterasyon sayısı ise hesaplamalarda 20 yapılmıştır.  $f_i(x)$  ve  $f(x, t)$  bilindiği durumda ise  $\beta_i(t)$  katsayıları fazla tanımlı sistem için çözdürülebilir.

İstenen ifadeler hesaplanmıştır. Ancak kap uzunluğu boyunca tespit edilen veri noktası sayısı her zaman adımında değişebilmektedir. Yatay eksenindeki veri noktaları için genel bir x vektörü oluşturulur. Oluşturulan bu x veri noktalarına karşılık gelen sıvı yükseklikleri uydurulan eğri kullanılarak hesaplanır ve daha sonra yukarıdaki aynı yöntem tekrar kullanılarak yeni oluşturulan x vektörüne ve sıvı yüksekliklerine göre  $\beta_i(t)$  tekrar hesaplanır. Böylece her zaman adımı için matrisler aynı boyutta olduğu için matris işlemleri daha kolay yapılabilir.

Elde edilen verilere göre denklem (4)'de verilen kinematik sınır koşulu yukarıda verilen diğer denklemler ile birlikte incelenir ise tek bilinmeyen terimin hız potansiyeli terimi içinde yer alan katsayılar matrisi  $R_i(t)$  olduğu rahatça görülebilir.

$$\frac{\partial f(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial \varphi(x, z, t)}{\partial x} \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} = \frac{\partial \varphi(x, z, t)}{\partial z} \quad (4)$$

denklem (1) denklem (4)'te yerine yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} + \sum_{i=1}^{\infty} R_i(t) \frac{\partial f_i(x)}{\partial x} \frac{\cosh((i\pi/l)(z + h))}{\cosh((i\pi/l)(z))} \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \\ = \sum_{i=1}^{\infty} R_i(t) f_i(x) \frac{\partial \left( \frac{\cosh((i\pi/l)(z + h))}{\cosh((i\pi/l)(z))} \right)}{\partial z} \end{aligned} \quad (5)$$

Denklem (5)'te  $R_i(t)$  yalnız bırakılır ise denklem (6) elde edilir ve  $R_i(t)$  hesaplanmış olur.

$$R_i(t) = \frac{\frac{\partial(f(x,t))}{\partial t}}{f_i(x) \frac{\partial \left( \frac{\cosh((i\pi/L)(z+h))}{\cosh((i\pi/L)(z))} \right)}{\partial z} - \frac{\partial(f_i(x))}{\partial x} \frac{\cosh((i\pi/L)(z+h))}{\cosh((i\pi/L)(z))} \frac{\partial(f(x,t))}{\partial x}} \quad (6)$$

$R_i(t)$  kullanılarak hız potansiyeli bulunur ve hız potansiyeli de elde edildikten sonra istenilen her noktadaki basınç değeri her zaman adımı için hesaplanabilir. Denklem (7) basınç ifadesini göstermektedir.

$$P = P_0 - \rho \left[ \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\Delta \varphi)^2 + gz - w^2 H \cos(wt)x - \frac{1}{2} H^2 w^2 \sin^2(wt) \right] \quad (7)$$

Denklem (7)'de  $P_0$  terimi sağ ve sol duvarda eşit büyüklükte olduğu için tank üzerindeki net çalkalanma kuvveti üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Basınç ifadesinde geçen  $H$  hareket genliği,  $w$  ise hareket frekansı,  $g$  yerçekimi ivmesi ve  $\rho$ 'da kullanılan sıvının özkütlesidir.

$$(\Delta \varphi)^2 = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \quad (8)$$

Denklem (8)'de görülen dönüşümde basınç ifadesinde yerine yazılırsa denklem (9) elde edilir. Denklem (9) aşağıda görülebilir.

$$P = -\rho \left[ \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right) + gz - w^2 H \cos(wt)x - \frac{1}{2} H^2 w^2 \sin^2(wt) \right] \quad (9)$$

Basınç değerleri sol duvar için  $-L/2$ 'de sıvı tankının dibinden maksimum sıvı yüksekliğini kadar 1 mm aralıklarla hesaplanır. Hesaplanan bu büyüklükler birim alan ile çarpılarak toplanır. Bu işlemlerin sonucunda ilgili zaman adımında sol duvarda çalkalanmadan dolayı oluşan net kuvvet bulunur. Aynı işlemler  $+L/2$ 'de sağ duvar için de yapılırsa bu duvardaki kuvvet elde edilir. Bu iki kuvvetin farkı ise çalkalanmadan dolayı oluşan kuvvete eşittir.

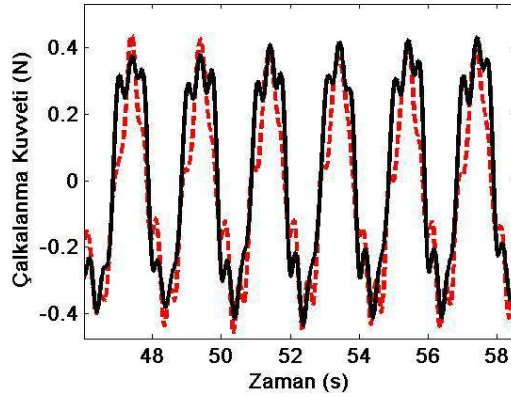
Çalkalanmadan dolayı oluşan kuvvet görüntü işleme metotları ve doğrusal dalga teorisi kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan kuvvetin doğrulanması için hesaplanan kuvvet yük hücreleri ile karşılaştırılacaktır. Şekil 118'de yük hücresinin montajı görülmektedir. Yük hücresi bu görüntüde sıvı tankının sol tarafına yerleştirilmiştir. Sıvı tankının ivmelenmesinden dolayı oluşan atalet kuvvetinin ölçülen kuvvet değerinden çıkarılması için aynı frekans ve genlik değerlerinde çalkalanan titreşim sönmüleyici 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 arasında ki sürtünme minimuma indirilmiş ve çalkalanma kuvveti doğru bir şekilde ölçülmüştür. Küreler Şekil 118'de kırmızı renkte görülmektedir.





Şekil 118. Yük hücresi montajı

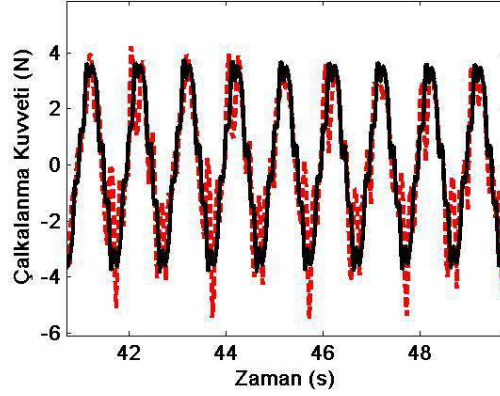
Çalkalanma kuvvetlerinin karşılaştırılması değişik sıvı yüksekliği, hareket genliği ve hareket frekansı için yapılmıştır. Bu farklı durumların bazılarında sıvıda sıçramalar olmakta ve sıvının 2 boyutlu hareketi bozulmaktadır. Yapılan karşılaştırmalar aşağıdaki gibidir. Bu bölümde verilen grafiklerde kırmızı kesikli çizgi kamera görüntüsü kullanılarak hesaplanan çalkalanma verisini, siyah düz çizgi ise yük hücresi tarafından ölçülen çalkalanma kuvvetini göstermektedir.



Şekil 119. Düşük büyüklükteki hareket frekansı

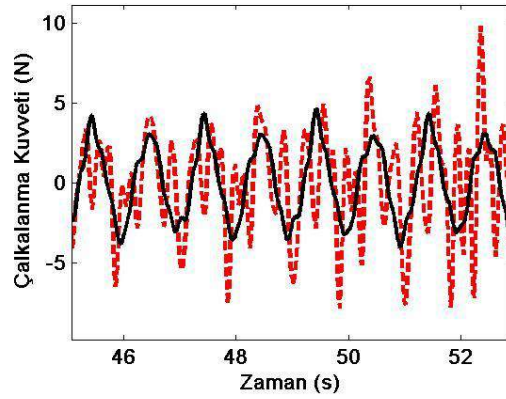
Hareket frekansının 0.5 Hz ve hareket genliğinin 20 mm olduğu durumda elde edilen sonuçlar Şekil 119'da görülmektedir. Bu durum için sıvı yüksekliği 15 mm'dir. Hareket frekansı bu sıvı yüksekliği için sıvının çalkalanma doğal frekansına eşittir. Maksimum noktaların ortalama hatası ise %4'tür. Aynı koşullar için hareket genliği 10 mm ve 30 mm yapıldığında benzer sonuçlar elde edilmektedir. Bir sonraki karşılaştırmada ise hareket frekansı 1 Hz'e yükseltilmiştir. Hareket genliği ise 4 mm'dir. Sıvı yüksekliği 1 Hz doğal frekansı olacak şekilde 65 mm olarak ayarlanmıştır. Bu girdiler için elde edilen sonuçlar Şekil 120'de görülebilir. Maksimum noktalarının hata oranı yaklaşık olarak % 22 civarındadır. Hatanın yüksek olmasının nedeni negatif ve pozitif maksimum noktalarında hesaplanan kuvvette bazı sıçramaların

olmasıdır. Bu sıçramaların nedeni ise sıvıda oluşan kopmalar ve 2 boyutlu hareketin bozulmasıdır 4 mm'den küçük hareket genliklerinde benzer sonuçlar alınmaktadır.



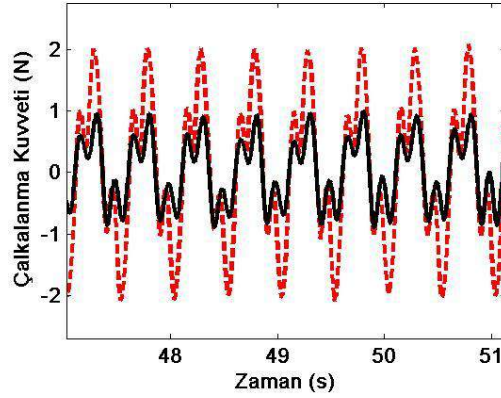
**Şekil 120.Orta büyüklükteki hareket frekansı ve düşük büyüklükteki hareket genliği**

Ancak hareket genliği 5 mm ve üstüne çıkarıldığında hata sonuçlardaki hatalar %50 ve üzeri değerlere çıkabilmektedir. Bunun nedeni yine sıvıdaki sıçramalar ve sıvının 2 boyutlu hareketinin bozulması olarak söylenebilir.



**Şekil 121.Orta büyüklükteki hareket frekansı ve yüksek büyüklükteki hareket genliği**

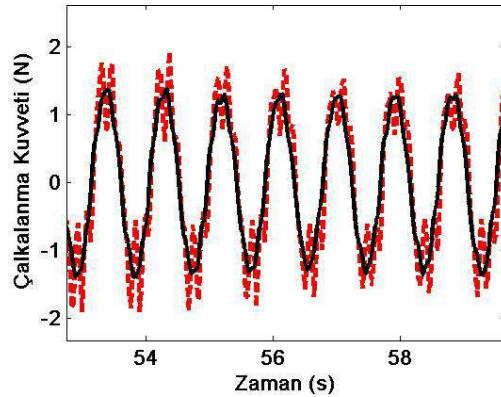
Şekil 122'de verilen grafikte girdi titreşim frekansı 2 Hz'dir ancak bu durumda önceki durumlardan farklı olarak sıvının çalkalanma doğal frekansı 1 Hz'e ayarlanmıştır. Sıvı için 1 Hz çalkalanma doğal frekansı için gerekli olan sıvı yüksekliği 65 mm'dir. Bu durum için girdi hareket genliği ise 10 mm'dir. Bu koşullar altında elde edilen sonuçlar Şekil 122'de görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere hata % 150 seviyesindedir. Hatanın bu kadar büyük olmasının sebebi yöntemin sadece doğal frekansında titreştirilen sistemler için çalkalanma kuvvetini hesaplayabilmesidir.



Şekil 122. Yüksek büyüklükteki hareket frekansı

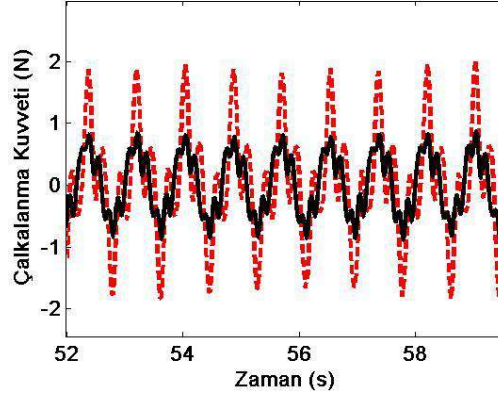
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{a} \tanh\left(\frac{\pi h}{a}\right)} \quad (10)$$

Denklem (10) çalkalanan sıvı olarak sıvının kullanılması durumunda çalkalanma doğal frekansının nasıl hesaplanacağını göstermektedir. Verilen denklemde h sıvı yüksekliğini, a tank genişliğini, g yer çekim ivmesini ve f'de çalkalanma doğal frekansını göstermektedir. Sıvının doğal frekansı sistemin doğal frekansı ile aynı olduğu zaman sistem çalkalanma kuvvetleri doğru bir şekilde hesaplanabiliyor ancak eşit olmadığı zaman doğru sonuçlar elde edilemiyor. Ancak sıvının çalkalanma doğal frekansı ile sistemin hareket frekansı birbirine yakın ama eşit olmadığı durumdaki sonuçları incelenmedi. Bu durum kaptaki sıvının çalkalanma doğal frekansını 1 Hz ve sistemin hareket frekansını 1,1 Hz olarak ayarlayarak incelendi. Hareket genliği ise Şekil 120'deki gibi 4 mm olarak ayarlandı. Bu sayede sonuçlar Şekil 120'deki hareket frekansı ve sıvının doğal frekansı 1 Hz durum ile karşılaştırılabilir. İlgili sonuçlar Şekil 123'de görülebilir.



Şekil 123. 1 Hz doğal frekanslı sıvı yüksekliği ve 1,1 Hz hareket frekansı

Bu durumda maksimum noktalarının hata ortalaması % 26'dır. 'de gözlemlendiğimiz durumdaki hata oranı ise %22 idi. Hatada bir miktar artış olsa da 1,1 Hz hareket genliği de çalışma frekansı aralığında kabul edilebilir.



**Şekil 124. 1 Hz doğal frekanslı sıvı yüksekliği ve 1,2 Hz hareket frekansı**

Hareket frekansı 1,1 Hz'den 1,2 Hz'e yükseltildiğinde elde edilen sonuçlar Şekil 124'de görülmektedir. Bu durumdaki hata oranı % 125 dolaylarındadır. Bu hata oranı ile çalkalanma kuvvetlerinin doğru hesaplandığını söylenemez. Yani 1 Hz doğal frekansına ayarlanmış sıvı yüksekliği için 1,1 Hz çalışma aralığının içinde, 1,2 Hz ise çalışma aralığının dışında kaldığı söylenebilir. 1 Hz'den daha düşük hareket frekansları için de benzer sonuçlar bulunmuştur. Kabaca bu metot çalkalanma kuvvetlerini hesaplamada, hareket frekansının kaptaki sıvının çalkalanma doğal frekansından farkının  $\pm$  % 15'den az olduğu durumlarda kullanılabilir.

#### **4.8.1 Duvara Etkiyen Çalkalanma Kuvvetinin Görüntü İşleme ile Bulunması Çalışmasının Sonuçlarının Yorumlanması**

Sonuç olarak çalkalanma karakteristiğini incelemek ve rezonans etrafında çalkalanma kuvvetini hesaplamak için bir metot geliştirildi. Bu çalışmada sallanma tablasının üzerine saydam, sert ve dikdörtgen prizma şeklindeki sıvı tankı yerleştirilmiştir. Bu tablaya verilen hareketle birlikte sıvı tankının görüntüsü çekilmiştir. Bu görüntüler kullanılarak öncelikle kap uzunluğu boyunca sıvı yüksekliği tespit edilmiştir. Bu sıvı yüksekliği ve doğrusal dalga teorisi kullanılarak çalkalanma kuvveti rezonans etrafında hesaplanmıştır. Elde edilen bu iki çıktı farklı hareket genliği, hareket frekansı ve sıvı yüksekliği için ultrasonik algılayıcılar ve yük hücreleri kullanılarak doğrulanmıştır.

Bu yöntemin geliştirilmesinde çeşitli sebepler vardır. Öncelikle ultrasonik algılayıcılar ile sadece birkaç nokta için yükseklik bilgisi elde edilebilmektedir. Ayrıca bu tip algılayıcılar tank duvarlarına yakın olması durumunda sonuçlar kap duvarları da görüş alanına girdiğinden hatalı

çıkılmaktadır. Ultrasonik algılayıcılar kullanılarak sıvıdaki kopmaların yükseklik verisinden ayrılması imkânsızdır ve algılayıcıya sıvı damlası yapıştığı durumlarda sıvı yüksekliği verisi doğru alınamamaktadır. 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. Diğer bir seçenek ise ivmeölçer ve gerinim ölçer gibi algılayıcılar ile veri toplanıp sıvı tankının ivmelenmesinden dolayı oluşan atalet kuvveti hesaplanıp yük hücresi ile ölçülen kuvvetten çıkarılmalıdır. Sallanma tablasının üzerine yapı konulduğunda ise kaptaki sıvının hareketi hareket genliklerini ve ivmeleri değiştireceğinden iki kez ölçüm yapılarak çalkalanma kuvveti tespit edilemez.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

### 5.1 Sonuçların Genel Yorumları

Proje çalışmalarından çıkan önemli sonuçlar şu şekilde toparlanabilir:

- Proje çalışmaları sayısal benzetim çalışmaları ve deneysel çalışmalardan oluşmaktadır. Sıvının çalkalanması ve yapı-sıvı etkileşimli çalkalanmada sayısal benzetim sürelerinin oldukça uzun olduğu görülmüştür. Genelde sayısal benzetim süreleri ilerledikçe COMSOL yazılımında sıvının zamanla eksildiği gözlemlenmiştir. Bu durum ağ yoğunlaştırma ve zaman adımı küçültme ile de çözümlenememiştir. Bu yüzden sayısal benzetim süreleri genelde 10 saniye altında kalmıştır. B planı çerçevesinde ANSYS-FLUENT programı ile yapılan benzetimlerde ise ANSYS-FLUENT FSI 'Fluid Structure Interaction' modülünün iki boyutlu geometriler için kullanılmadığı anlaşılmıştır. Bu nedenden dolayı ANSYS-FLUENT sıvı azalma probleminden sorun yaşamamıştır ancak sayısal benzetimlerin üç boyutta yapılmasından kaynaklı zaman sorunları yaşanmıştır. Ayrıca ANSYS-FLUENT programının düşük frekanstaki titreşimler için çözümleri genelde doğru olsa da frekans yükseldikçe (3.5 Hz) çalkalanma sayısal benzetimlerinde doğru sonuçlara ulaşamamıştır. Genel olarak sayısal benzetim çalışmaları hataları yüzde olarak %10'ların altına inememiştir. Ancak genelde COMSOL yazılımı trend (eğilim) olarak doğru yanıtlar vermiştir. Örneğin kavisli kap yaklaşımının yanıta önemli bir fark yaratmadığı ve çok gözlü kabın yüksek doğal frekanslı yapılar için başarılı olduğu ilk COMSOL sayısal benzetim çalışmaları ile görülmüştür. Sayısal benzetim sonuçlarına dayanılarak üretimine gitmeye karar verilmiş ve deneysel çalışmalar yüksek doğal frekanslı binalarda bu kap tasarımının başarılı olduğunu doğrulamıştır.
- Literatür taraması sırasında bu tür çalkalanan sıvılı titreşim sönümleyicilerin doğal frekansı düşük (yüksek binalarda) üzerinde başarılı olduğu belirtilmiştir. Ancak kütle oranın (sönümleyici/yapı kütlesi) sönümleyicinin başarısını ne miktar etkilediği tam olarak anlaşılmamıştı. Bu durum deneysel çalışmalarımızda incelenmiştir (Raporun 4.3.1 ve 4.3.2; 4.6.1 ve 4.6.2 kısımları). Bu kısımlarda Durum 1 ve Durum 2'deki sistemlerin doğal frekansları aynıdır ancak Durum 1'de kütle oranı Durum 2'nin iki katıdır. Ancak bu kütle oranı farkı önemli bir titreşim azaltma avantajı sağlamamıştır. Bu çalışmalar için %8.7 kütle oranlı bir çalkalanan titreşim sönümleyicinin sönümlemede yeterli olduğunu sönümleyici kütle oranını yükseltmenin önemli bir avantaj sağlamadığı görülmüştür.

- Genel olarak deneysel çalışmalarda çalkalanan titreşim sönümleyicilerin rezonans frekansı etrafındaki sinüs girdisini sönümlemede deprem girdisine oranla daha başarılı olduğu görülmüştür.
- Deneysel çalışmaların önemli kısmı yüksek ve düşük girdi değerleri için yapılmıştır. Örneğin raporun 4.1 ve 4.2 kısımlarında düşük deprem girdisi ile yüksek deprem girdisi arasında iki kat fark vardır. Bu sönümleyici sistemin olmadığı durum için (sıvı yokken) yanıt genliklerinde iki kat büyüme getirmiştir. Ancak çalkalanan sıvılı sönümleyicili durumlarda girdi iki kat arttırıldığında yanıtın iki kat artmadığı görülmüştür. Bu da girdi genliği büyüdükçe sönümleyicinin daha verimli olduğunu göstermektedir. Buradaki mekanizmanın genlik büyümesi ile çalkalanmanın artması bunun da sistemden enerji kaybını arttırdığı (türbülansın artması nedeni ile) düşünülmektedir.
- Tüm çalışmalarda eğer sıvının çalkalanma doğal frekansı yapının doğal frekansına yakınsa sıvılı sönümleyicinin etkin olduğu ve hem deprem girdisi hem de sinüs girdisi için sistemin yanıtını azalttığı görülmüştür. Örneğin deneysel çalışmalarda Durum 1 ve Durum 2'de hem yapının doğal frekans hem de sıvının çalkalanma doğal frekansı 1Hz'de örtüşmektedir. Deprem girdisi için bu durumlarda sönümleyiciden dolayı RMS ve tepe yanıt değerleri sönümleyicisiz sistemin yanıtına göre %60-%70 oranında düşmüştür. Ancak yapının doğal frekansının 2 Hz ve çalkalanma doğal frekansının 1 Hz olduğu durum için yanıtın maksimum (peak) değerlerindeki azalmalar %20'dir. Durum 4'de ise yapının doğal frekansı 3.5 Hz'dir ve sıvının çalkalanma doğal frekansının 1 Hz olduğu durum için yapının yanıtında bir azalma olmamıştır. Bu da çalkalanan sıvılı titreşim sönümleyicinin sistem yanıtını düşürebilmesi için yapının ve sıvının çalkalanma doğal frekansının yakın olması gerekmektedir.
- Projenin motivasyonlarından birisi yüksek doğal frekanslı (düşük katlı) binaların titreşimlerinin sıvılı çalkalanan sönümleyiciler ile azaltılmasıdır. Ancak bunun gerçekleştirilmede düz dikdörtgen kap ile zorluklar yaşanmıştır. Bu nedenden dolayı yüksek doğal frekanslı yapılara sahip olan Durum 3 ve Durum 4'de hem deneysel hem de sayısal benzetim çalışmalarında başarılı sonuçlar elde edilmemişti. Ancak çok gözlü kap tasarımı sayısal benzetim çalışmalarında ve deneylerde bu yüksek frekanslı bina modellerinde başarılı olduktan sonra sıvılı sönümleyicilerin düşük katlı binalar üzerinde başarı ile uygulanma şansı doğmuştur. Bu çok önemli bir gelişmedir.

- Deneysel ve sayısal benzetim çalışmaları sırasında çalkalanan sıvılı titreşim sönümleyicilerin başarı ile çalışmadığı durumlar olmuştur (Düz dikdörtgen kaplı sistemlerin Durum 3 ve Durum 4'te verdiği sonuçlar) ancak hemen hemen hiçbir durumda çalkalanan sönümleyiciler sistemin yanıtını kötüleştirmemiştir. Bunun tek istinası raporun 4.6.4.b kısmında RMS grafiklerinde (110 mm sıvı yüksekliği için) görülen artmadır. İncelenen tüm durumlar içinde sadece bu durum için sönümleyici sistem yanıtını negatif etkilemiştir. Bu durum yapı rezonansı ile sıvı çalkalanma rezonansının birbirinden uzakta olduğu frekans olduğu ve 110 mm sıvı yüksekliğinin deneylerde kullanılan en büyük sıvı yüksekliğidir. Bu durumda sönümleyicinin yapının yanıtını kötüleştirme durumu eğer yapı ve sıvının çalkalanma doğal frekansları birbirinden uzakta ve sönümleyici sıvı kütlesi fazla ise mümkündür.
- Bu çalışmadaki literatüre başka bir önemli katkı ise sadece çalkalanma video çekimlerinin görüntü işlenmesi ile sıvının yüksekliğinin ve duvara etkiyen kuvvetin zamana karşı değerlerinin bulunabilmesidir. Bu eğer rezonans etrafındaki çalkalanmalar incelenecek ise bu tür düzeneklerden yük hücresi ve ultrasonik seviye sensörlerinin kaldırılması imkanın sağlamaktadır.

## 5.2 Gelecek Çalışmalar için Düşünceler

Bu çalışma sıvılı çalkalanan sönümleyici sistemlerin düşük ve yüksek doğal frekanslı yapıların sinüs ve deprem girdilerine yanıtını düşürebileceğini göstermiştir. Bu sönümleyicilerin pratikleşebilmesi için gelecekte yapılması gerektiği düşünülen çalışmalar aşağıda belirtilmiştir:

- Deneysel çalışmalarımızda kullandığımız yapının iç sönümlenmesi oldukça düşüktür ve titreşim sönümleyicilerin iç sönümü düşük olan sistemlerde daha başarılı olduğu bilinmektedir. Bu nedenden dolayı daha farklı (mümkünse beton içeren) sönümü daha yüksek olan bir yapı ile gerçek bir bina da yanıtın ne kadar azalacağı daha iyi anlaşılabilir.
- Bu çalışmada binaya hareket tek yönlü olarak verilmiştir. Ancak gerçek bir deprem tüm yönlerden etkir. Gerçekçi bir deprem girdisi yaratabilmek için bir Stewart platformu üzerinde bu deprem girdilerinin yaratılması gerekmektedir. Gelecekteki çalışmalarda bu tarz bir platforma ihtiyaç olacaktır.



- Yapılan sayısal benzetim çalışmaları göstermiştir ki sonlu elaman ve sonlu hacim metotları çalkalanma problemlerinin benzetiminde gerekli zaman ve yakınsama gibi konularda sorunlar yaşayabilmektedir. Ayrıca dalga kırılması gibi durumlarda yakınsama problemleri çok artmaktadır. Bu nedenlerden dolayı bundan sonraki çalışmalarda SPH (smoothed particle hydrodynamics) metodu kullanılması planlanmaktadır ve bu yaklaşımın sorunlarda azalmaya yol açacağı düşünülmektedir. Bu metodun dezavantajı ise sonlu elemanlar gibi hazır kodların SPH alanında yaygın olmayışıdır.
- Bu çalışmada basit bina modelleri üzerinde çalkalanan titreşim sönümleyicilerin başarılı sonuçlar verdiğini gösterilmiştir. Bir sonraki basamak gerçek betonarme demir çubuk karışık deneysel bina modelleri ile bu sönümleyicilerin performansının değerlendirilmesidir. Bu da inşaat mühendisliği bilgi alanına girdiği için bundan sonraki çalışmalarda proje ekibinde inşaat mühendisi gereklidir.

### **5.3 Proje Sonuçlarının Çıktılara Dönüştürülmesi**

Şu ana kadar projeden bir uluslararası konferans bildirisi bir de uluslararası konferans sunumu gerçekleştirilmiştir. Projeden çıkacak SCI endeksli Ocean Engineering dergisine gönderilmek üzere bir makalenin yazımının son kısımlarına gelinmektedir ve şu andaki hali 'Ek' kısmına konmuştur. Bu makale duvara etkiyen kuvveti bulmakta kullanılabilecek yeni metodun açıklandığı bir makaledir. Yapı-sıvı etkileşimli sistemlerin ve çok gözlü kaplı sistemin deneysel sayısal benzetim sonuçlarını içeren bir çalışma daha SCI endeksli bir dergiye gönderilecektir. Ayrıca Ufuk TOSUN'un yüksek lisans tezi yazım aşamasındadır ve tezi 2-3 ay içerisinde savunulacaktır.

## KAYNAKLAR LİSTESİ

1. Sıdıka Tekeli-Yeşil Necati Dedeoğlu, Charlotte Braun-Fahrlaender, Marcel Tanner.2010. "Factors Motivating Individuals to Take Precautionary Action for an Expected Earthquake in Istanbul.", *Risk Analysis*, 30(8), 1181–1195.
2. Parsons T, Toda S, Stein R, Barka A, Dieterich J. 2000. "Heightened odds of large earthquakes near Istanbul: An interaction-based probability calculation". *Science*, 288:661–665.
3. Ormondroyd J., Den Hartog. 1928. "Theory of Dynamic Vibration Absorber", *Transactions of ASME*, 50, 9-22.
4. M.B. Ozer and T. J. Royston, "Extending Den Hartog's vibration absorber technique to multi degree of freedom systems," *J. of Vibration and Acoustics*, 127 (4), 341-350, 2005.
5. Reed D., J. Yu, H. Yeh, and S. Gardarsson. 1998. "Investigation of tuned liquid dampers under large amplitude excitation." *Journal of engineering mechanics* 124(4):405-413.
6. Kareem, A., T. Kijewski, and Y. Tamura. 1999. "Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications." *Wind and Structures* 2(3):201-251.
7. M. Di Sciuva, R. Ruotolo, C. Surace. 2003. 'Optimization of tuned liquid dampers for controlling earthquake response of buildings', *Proceedings of the 21st International Modal Analysis Conference*.
8. Lee, S. K. et al. 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.
9. Jin Qiao, Li Xin, Sun Ning, Zhou Jing , Guan Jiong. 2007. "Experimental and numerical study on tuned liquid dampers for controlling earthquake response of jacket offshore platforms", *Marine Structures*, 20 (2007): 238-254.
10. Hemalatha, G., and KP Jaya. 2008. "Water tank as passive TMD for seismically excited structures." *Asian journal of civil engineering (building and housing)* 9(4):349-366.
11. Tait, MJ. 2008. "Modelling and preliminary design of a structure-TLD system." *Engineering Structures* 30(10):2644-2655.
12. Marsh, AP, M. Prakash, SE Semercigil, and ÖF Turan. 2009. "Predicting the dynamic response controlled by sloshing vibration absorber using SPH", *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, Melbourne, Australia.
13. Xin, Y., G. Chen, and M. Lou. 2009. "Seismic response control with density-variable tuned liquid dampers." *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 8(4):537-546.
14. Marsh, A., M. Prakash, E. Semercigil, and Ö. F. Turan. 2010. "A numerical investigation of energy dissipation with a shallow depth sloshing absorber." *Applied Mathematical Modelling* 34(10):2941-2957.
15. Marsh, AP, M. Prakash, SE Semercigil, and ÖF Turan. 2010. "A shallow-depth sloshing absorber for structural control." *Journal of Fluids and Structures* 26(5):780-792.
16. 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.
17. Bulian, G., A. Souto-Iglesias, And E. Botia-Vera. 2010. "Smoothed particle hydrodynamics (SPH) simulation of a tuned liquid damper (TLD) with angular motion Simulation d'un amortisseur liquide (TLD) en rotation à l'aide de la méthode SPH."
18. Love, JS, and MJ Tait. 2011. "Nonlinear Multimodal Model for Tuned Liquid Dampers of Arbitrary Tank Geometry." *International Journal of Non-Linear Mechanics*.
19. Love, JS, and MJ Tait. 2011. "Equivalent Linearized Mechanical Model for Tuned Liquid Dampers of Arbitrary Tank Shape." *Journal of Fluids Engineering* 133:061105.
20. Marsh, A., M. Prakash, E. Semercigil, and Ö. F. Turan. 2011. "A study of sloshing absorber geometry for structural control with SPH." *Journal of Fluids and Structures*.
21. Banerji, P., and A. Samanta. 2011. "Earthquake vibration control of structures using hybrid mass liquid damper." *Engineering Structures*.
22. Pinot, P., and G. Genevès. 2011. "Numerical simulation for designing tuned liquid dampers to damp out double-pendulum oscillations." *Measurement Science and Technology* 22:065103.
23. Cassolato, MR, JS Love, and MJ Tait. 2011. "Modelling of a tuned liquid damper with inclined damping screens." *Structural Control and Health Monitoring* 18(6):674-681.
24. Hong-Nan, L., Y. Ting-Hua, J. Qin-Yang, H. Lin-Sheng, and W. Guo-Xin. 2011. "Wind-Induced Vibration Control of Dalian International Trade Mansion by Tuned Liquid Dampers." *Mathematical Problems in Engineering* 2012.
25. Love JS, Tait MJ, Toopchi-Nezhad H. 2011. "A hybrid structural control system using a tuned liquid damper to reduce the wind induced motion of a base isolated structure." *Engineering Structures*, 2011, 738-746.
26. Sarkar, A. & Gudmestad, O.T., 2013. "Pendulum type liquid column damper (PLCD) for controlling vibrations of a structure-Theoretical and experimental study." *Engineering Structures*, 49, pp.221–233.
27. Cruchaga, M.A. et al., 2013. "Finite element computation and experimental validation of sloshing in rectangular tanks." *Computational Mechanics*, 52(6), pp.1301–1312.
28. Marivani, M. & Hamed, M., 2014. "Numerical Study of Slat Screen Pattern Effect on Design Parameters of Tuned Liquid Dampers." *Journal of Fluids Engineering*, 136(6), p.061201.



29. Min, K.-W., Kim, J. & Lee, H.-R., 2014. "A design procedure of two-way liquid dampers for attenuation of wind-induced responses of tall buildings." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 129, pp.22–30.
30. Love, J. & Tait, M., 2014. "Equivalent mechanical model for tuned liquid damper of complex tank geometry coupled to a 2D structure." *Structural Control and Health Monitoring*, 21(1), pp.43–60.
31. Oda, T., Hamed, M. & Ghani, S., 2014. "Numerical study of the effect of liquid sloshing inside TLD on suppression of gust wind-induced vibration in high rise buildings.", International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics
32. Lee, C.-Y. & Chen, C.-Y., 2015. "Experimental application of a vibration absorber in structural vibration reduction using tunable fluid mass driven by micropump." *Journal of Sound and Vibration*, 348, pp.31–40.
33. Grant, J. et al., 2015. "Sloshing and energy dissipation in an egg: SPH simulations and experiments." *Journal of Fluids and Structures*, 54, pp.74–87.
34. Chen, J.-L. & Georgakis, C.T., 2015. "Spherical tuned liquid damper for vibration control in wind turbines." *Journal of Vibration and Control*, p.1077546313495911.
35. Faltinsen O.M., et.al., 2000. "Multidimensional modal analysis of nonlinear sloshing in a rectangular tank with finite water depth." *Journal of Fluid Mechanics*, 201-234.



## 6. EK:

### OCEAN DERGİSİNE GÖNDERİLMEK ÜZERE HAZIRLANAN MAKALENİN RAPOR TARİHİNDEKİ MAKALENİN SON DURUMU

To be submitted to Ocean Engineering

## MEASUREMENT OF FLUID-AIR INTERFACE LEVEL AND SLOSHING FORCE USING IMAGE PROCESSING

Ufuk Tosun<sup>a</sup>, Reza Aghazadeh<sup>b</sup>, Cüneyt Sert<sup>b</sup>, Mehmet Bülent Özer<sup>a</sup>

<sup>a</sup> TOBB Economy and Technology University, Ankara, Turkey

<sup>b</sup> Middle East Technical University, Ankara, Turkey

### Abstract

There is increased interest in the literature to estimate and measure the sloshing behavior of the liquid such as free surface motion and total force applied to the tank due to sloshing. This interest is partly due to increased number of theoretical and implementation studies on sloshing vibration absorbers in recent years.

In the literature, in order to measure the motion of the free surface ultrasonic level sensors are used which measure the height of the free surface at a single point. The sloshing forces are mainly measured with load sensors which measure the forces generated with and without the fluid in the tank. This paper develops a method, which track the free surface motion during sloshing with a camera and using the free surface measurements estimates the forces due to sloshing in a rectangular tank. In order for the method to correctly estimate the sloshing forces, sloshing should be around resonant sloshing frequency. This new method is able to track the motion of the complete free surface rather than the motion of a single point, also it can estimate the sloshing forces without the need for a load cell measurements or empty tank force measurements.

In the present study, the free surface motion is obtained by through image processing then the results are compared with the ultrasonic level sensor measurements. Around resonant sloshing frequency the calculated sloshing forces using the images are compared with the load cell measurements. Calculated

wave height measurements as well as the calculated sloshing force measurements using the captured images is shown to be accurate when compared with the relevant sensor measurements.

### 1. Introduction

The number of studies which focus on understanding sloshing dynamics using numerical modeling as well as experimental studies is increasing in recent years. In terms of numerical simulations sloshing is a highly non-linear difficult problem to simulate. Therefore in order to understand sloshing dynamics experimental investigation is still one of the main methods of obtaining information and gaining understanding about sloshing dynamics.

The reason for the interest in sloshing dynamics is due to sloshing motion and forces effecting several engineering systems. One such important field is transportation. As the liquefied natural gas (LNG) transportation is gaining momentum, it is becoming more important to understand sloshing loads in partially filled containers for the safety of the cargo ships [1]. Another application where sloshing effects engineering systems is in fluid height measurements especially in fuel level tracking systems [2]. Another application where understanding sloshing dynamics is important is in the use of sloshing dynamic vibration absorbers. Increased number of research articles are being published about using sloshing forces to decrease structural vibration with a particular interest in

decreasing seismic response of engineering structures [3-5].

A typical sloshing experimental setup is composed of several components. An important component is the actuator subsystem which is used to move the container and create the sloshing of the liquid. Another subsystem is the container and liquid system. The container can be in different geometries such as rectangular prism, cylindrical, etc. with different types fluids in them from water to non-Newtonian liquids. Sensors are also an important part of the sloshing experiments. They are used to measure and monitor the targeted sloshing parameters. These parameters can be pressure, free surface motion, sloshing force. Finally, these sensors are connected to a data acquisition system where data is stored for later processing.

The actuator subsystem in a sloshing experiment is the component which is used to excite the container and create controlled sloshing. The experimental setup can be designed differently if only rolling motion [6-8], translational motion [9-10] or both simultaneously (such as Stewart platforms with six degrees of freedom) [11-14] is required for sloshing motion. In literature translational motion actuation systems can be as basic as a crank-rocker mechanism attached to an electric motor or lathe for sinusoidal input to the container [9-10]. In order to study Faraday waves low amplitude, high frequency sine excitation can be obtained from an electromagnetic shaker [15].

Pressure is probably the most common sloshing parameter measured in sloshing tests. It generally is measured with pressure sensors mounted on holes in the container at the desired locations of the container. They are generally used as an array [6-8, 10, 12, 14, 17] so an understanding of a pressure distribution can be gained across a dimension of container. An important reason for measuring pressure in sloshing studies is accurate evaluation of impact pressure when the sloshing wave hits. The effects of sampling, post processing of the measured pressure data [13, 14] and the use of different types of pressure sensors [18, 19] (piezo-resistive and piezo-electric types) are investigated and their effects on accurate measurement of peak pressures are studied.

Another important parameter in sloshing measurements is the wave height measurement. This parameter is especially important for comparing the numerical simulation results and the experimental measurements. In literature the wave height is generally measured using capacitance wave probes which are floating sensors on the free surface and the capacitance value of the sensor changes as the free surface moves [9, 20,

21]. One disadvantage of this method it is a contact measurement method and sensor may affect the surface measurements. Another method for wave height measurement is ultrasonic. This method uses reflection of ultrasonic waves from the free surface and calculates the distance from the sensor from the time of flight information. This method has the advantage of being contact-free. Breaking waves and temperature sensitivity problems of this measurement method is investigated and post-processing algorithms are suggested to eliminate these unwanted effects [2]. In a different study laser triangulation sensor was used to track the motion of the free surface motion [13]. In order for the laser beam to reflect acrylic paint was added to the fluid.

Another common method to compare the numerical result predictions and experimental measurements is the use of optical cameras to capture the free surface motion. In several studies the snap shots captured from camera is used qualitatively compare the free surface characteristics predicted by the numerical solution and the experimental result [6, 13, 20, 22]. Even though there are several studies that used cameras for qualitative comparison, to the best of authors' knowledge numerical extraction of free surface characteristics from camera images has not been pursued.

Another important parameter in sloshing dynamics is the sloshing force. This parameter is the net force on the container walls due to sloshing of the fluid. That is an important parameter which can be dangerous during transportation if sloshing resonance occurs. Also, this parameter is especially important in sloshing vibration absorbers. In order for the sloshing forces to decrease the structural vibration not only the amplitude of the sloshing force is important but also the phase of the sloshing force with respect to motion of the structure is critical. However, the measurement of net sloshing force on the container is not straightforward. Despite its obvious importance only a very limited number of studies attempted to measure the sloshing force. In the work of Reed et.al. [23], net sloshing force on the container walls was measured by a load cell placed between the moving platform and the container. However, force measured by the load cell also contains the inertial forces of the container as well. Therefore, the container alone, without any fluid, is given excitation and the inertial forces due to mass of the container is measured separately. Later the two force measurements are subtracted from each other. The subtracted measurement is the measurement of the force due to sloshing liquid.

This study aims to utilize the camera images in sloshing experiments as a quantitative data measurement tool. In this study we propose an image processing method to detect fluid level for all points along to length of the tank and calculate the sloshing force during the excitation using the fluid level measurements. This method will recognize the water volume and calculate the water heights with the assistance of the reference points. After that the waveform data converted to a function with Fourier transform. As a next step, the velocity potential is calculated by using linear wave theory. The pressure distribution is obtained for each wall of the tank from the velocity potential. Lastly the summation of the pressure values for each wall will be calculated which will result in the net sloshing force for resonance sloshing.

## 2. Experimental Setup

The experimental setup used in this study is shown schematically in Figure 1. Actuation unit is used to excite the container at the desired amplitude and frequency. The container is attached to a moving platform which is moved by the piston of the actuation system. The resultant sloshing is characterized by wave height measurements and sloshing force measurements with ultrasonic distance sensors and load cell, respectively. A video-camera is used to capture sloshing motion. The data acquisition from the sensors are performed by a Labview Data Acquisition system and both the sensor data and image data is stored in a desktop computer. In the following subsections details about each major component of the experimental setup will be provided.

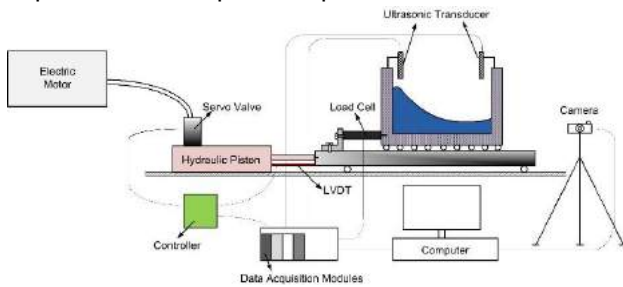


Figure 1. Schematic drawing of sloshing test setup

### 2.1. Actuation System

A hydraulic cylinder is used to move the platform where the container is placed. It is a Rexroth Bosch hydraulic servo positioning system which is composed of an electric motor, servo valve, controller, hydraulic piston and an LVDT sensor. Electric motor is used to power the system and servo valve adjust the pressure on the hydraulic piston. An input signal to the actuation system is sent from the computer to the data acquisition

system's analog output unit. The voltage reference signal is sent from the analog output card to the control unit of the actuation system. The control signal is sent to the servo valve which moves the hydraulic piston. The position of the control unit is fed back with an LVDT position sensor. The PID unit in the controller ensures the correct positioning of the piston.

### 2.2. Container and Moving Platform

The container where the sloshing fluid is placed is made out of Plexiglas. The wall thickness of the container is xxx. The length, width, height of the rectangular container is xxxXxxxxXxxx, respectively. The top of the container is open to air. The fluid inside the container is water with red food coloring in order to create contrast for image processing. The container is attached to a load cell from one end the other end of the load cell is fixed to the platform with a bracket. The container is placed on a moving platform which is built from aluminum profiles. The container is placed not directly on the moving platform but on small steel balls of xxx mm. The container still moves with the platform since container is attached to the load cell which is secured to the moving platform with a connection bracket. Moving platform is connected to the piston which moves the platform and the platform moves on linear guideways and rails.

### 2.3. Wave Height Measurement

Wave height is measure using ultrasonic position sensors SICK- UM18-11116. They are placed 4.7 cm away from the either end of the container. They are held in place by aluminum brackets which is secured to the wall of the container. The ultrasonic position sensors can be seen in Figure 4.

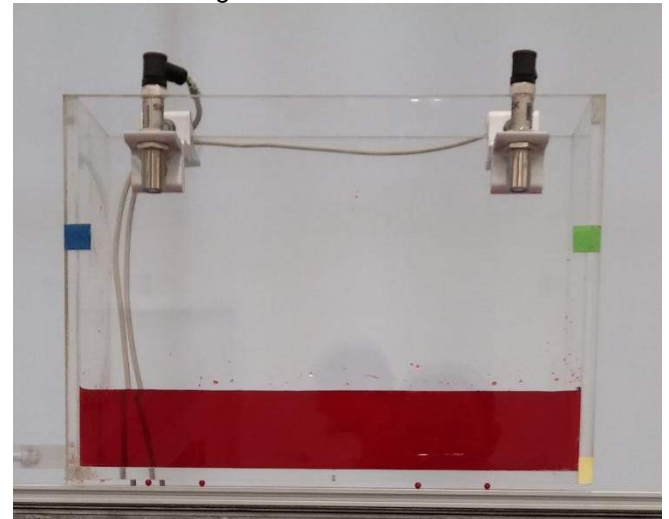


Figure 4. Ultrasonic sensors

### 2.4. Force Measurements

The force generated during sloshing is measured by a load cell, ZEMIC H3-C3-50kg-3B. The load cell is placed in between the container and an aluminum bracket where load cell is firmly screwed in to the

container and the bracket. The aluminum bracket is firmly screwed into the moving platform. The container, connections and load cell can be seen in Figure 5. The sloshing force is calculated by making two measurements one with sloshing fluid and another with an empty container. The two force measurements are subtracted from each other which results in the sloshing force.

### 2.5. Image Acquisition

The images are captured using a GoPro Hero camera. The camera can go up to xxx fps with xxx by xxx resolution. It is located xxx cm distance from the container. The image acquisition is manually started as soon as the signal is sent from data acquisition unit to actuation unit.

### 2.6. Sensor Data Acquisition, Input Signal Generation and Processing

In order to acquire sensor data NI cDAQ-9178 data acquisition chassis is used along with NI 9237 voltage analog input module, NI 9203 current analog input module and NI 9263 analog output module which was used to generate the input signal to the actuation unit. The load cell data is captured at a sample rate of 1600 Hz and ultrasonic transducer data was captured at 100 Hz sampling rate. The measured data is output at a graphical user interface and the input signal to the actuation system is sent from LABVIEW code to the analog output module and sampled with a 100 Hz sampling frequency. Figure 6a shows the data acquisition hardware and Figure 6b shows the graphical user interface used to monitor data during experiments.

## 3. Free Surface Identification and Wave Height Estimation Using Captured Image

In this part of the study, the process used to calculate the wave height from images of sloshing fluid will be explained. The next subsection explains how the wave height at a point is determined. Once coordinates of the free surface (wave height) is obtained from for each time point, one can determine how the wave height changes as a function of time for any point in the container. The wave height data obtained through image processing is compared with the ultrasonic sensor measurements of wave height for a specific location and these results will be presented in the second sub-section of this part of the study.

### 3.1. Procedure for Wave Height Determination

Once the container starts to move and the sloshing starts the camera captures the sloshing video at xxx fps and xxx resolution. The actuation and video capture continues until steady state conditions are observed which generally takes couple of minutes. The captured

video is saved in xxx format and converted to images frame by frame using MATLAB data acquisition toolbox. The first step in image processing is the identification of blue, green and yellow rectangles which are stuck on the container. These squares serve as a reference since the distance between them is always a constant. The number of pixels between these features are counted so that the physical dimension of each pixel is known. After this step red regions in the image is kept and every other color (which can be determined from RGB values of each pixel) is deleted from the picture. This results in cropped image of just the red sections (fluid region). In the third step of the process, using noise reduction algorithms splashes and third dimension sloshing effects (due to mild sloshing along the depth dimension) are removed from the image which results in the bulk fluid medium without splashes and third dimension shadows. Removed splashes can be observed from Figure 7.

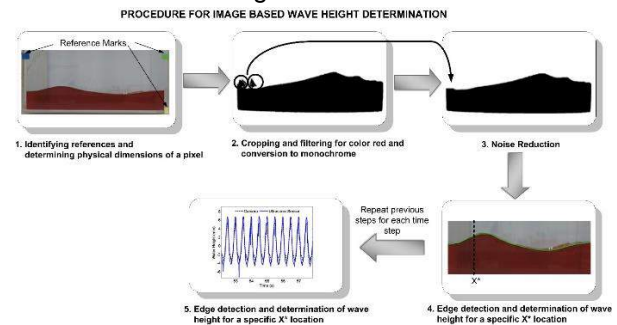


Figure 7. Procedure for image based wave height determination

In the fourth step the edges are detected with the edge detection algorithm of the image processing toolbox. The traced free surface can be seen in the fourth step of Figure 7. It also can be seen from the same figure the low amplitude sloshing along the depth direction is not taken as the free surface location due to filtering and noise reduction algorithms used in step 3. Once the edge detection algorithm determines the pixels belonging to free surface the coordinates of the free surface can be extracted. If steps described previously are repeated for each time step, the time history of wave heights of any point  $X^*$  of the container can be plotted as a function of time.

### 3.2. Wave Height Estimates from Images and Comparison with Sensor Measurements

Sloshing experiments are performed with different water height, sinusoidal excitation amplitude and frequency values. Table 1 summarizes these parameters used in each case study. Table 1 also contains the natural sloshing frequency corresponding to each water level.

The natural frequency calculation is performed by the following equation:

Equation (1) shows the relation between resonant water height and excitation frequency [23]. This equation gives the natural frequency  $f$  of the sloshing water for a given water height,  $h$ , and tank width,  $a$ . In this equation  $g$  is the gravitational acceleration.

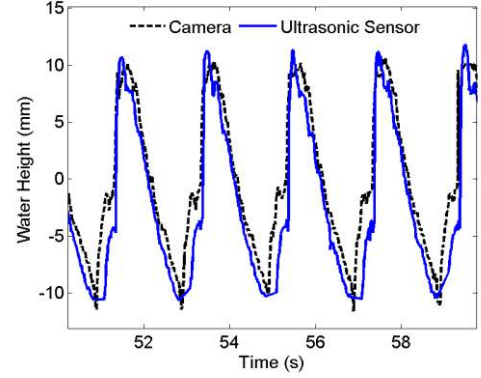
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{a} \tanh\left(\frac{\pi h}{a}\right)} \quad (1)$$

Water height measured by one of the ultrasonic sensors is compared with the values obtained through image processing are compared.

**Table 1.** Case Studies in Sloshing Experiments for Determining Wave Height

Case Number	Water Level	Natural Sloshing Frequency	Amplitude of the Sinusoidal Excitation
1a	15mm	0.5 Hz	10mm
1b	15mm	0.5 Hz	20 mm
1c	15 mm	0.5 Hz	30 mm
2a	65 mm	1 Hz	4 mm
2b	65 mm	1 Hz	???
3a	65 mm	2 Hz	10 mm
3b	65 mm	2 Hz	15 mm

Fig. 8 shows the comparison for the case of 30 mm excitation amplitude, 0.5 Hz excitation frequency and 15 mm initial water height, which corresponds to 0.5 Hz resonance frequency. As seen in the figure, the results match nicely with small deviations in the phase of the sloshing. The peak value error in Fig. 8 is about 6 %.



a. (Üste 10 mm input yanıtı) b. (Üste 20 mm input yanıtı) c.

Figure 8. Steady State Sloshing Wave Height a. 10 mm amplitude at 0.5 Hz b. 20 mm amplitude at 0.5 Hz c. 30 mm amplitude at 0.5 Hz

For the next two cases, the same water height and excitation frequency are used, but the excitation amplitude is lowered to 10 and 20 mm. Comparison of the results coming from the ultrasonic sensor and the ones obtained by image processing were similar in success to the one shown in Fig. 7. Results become closer as the excitation amplitude is lowered. It can be concluded that obtaining the water level by image processing works acceptably at lower excitation frequencies for all amplitudes.

Fig. 8 shows the results for 1 Hz excitation frequency and 4 mm excitation amplitude. The water height is 65 mm in this case, for which 1 Hz is the resonance frequency. Values coming from the ultrasonic sensor and obtained by image processing are very similar. The peak error value is about 6 %. As seen in Fig. 9, when the excitation amplitude is raised to ... mm results obtained by two different means start to deviate considerably. The peak error value is more than 50 % for this case.

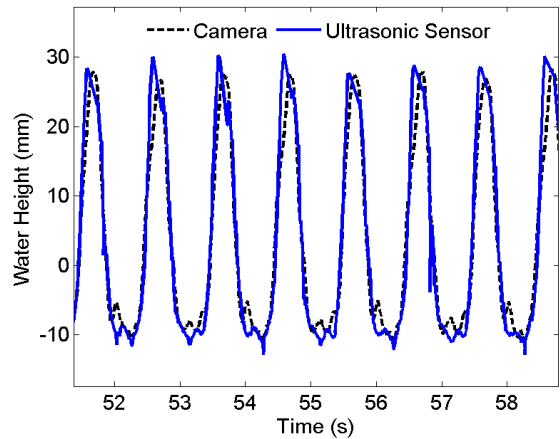


Figure 8. Medium excitation frequency and low excitation amplitude.



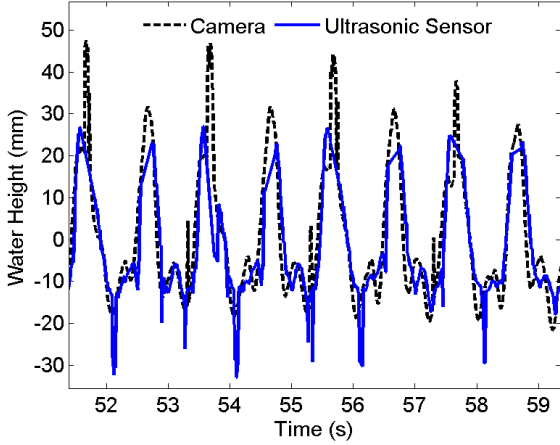


Figure 9. Medium excitation frequency and high excitation amplitude.

Lastly the results obtained for 2 Hz excitation frequency and 10 mm excitation amplitude is shown in Fig. 10. The water height is 65 mm, for which 2 Hz is *not* the resonance frequency. Although the two results match each other perfectly most of the time, deviations are seen at times corresponding to the lowest and highest water heights. Maximum deviation is about 28 %. When the excitation amplitude is raised to 15 mm, the trend cannot follow the ultrasonic sensor data sometimes but the signal height is as successful as the lower amplitude.

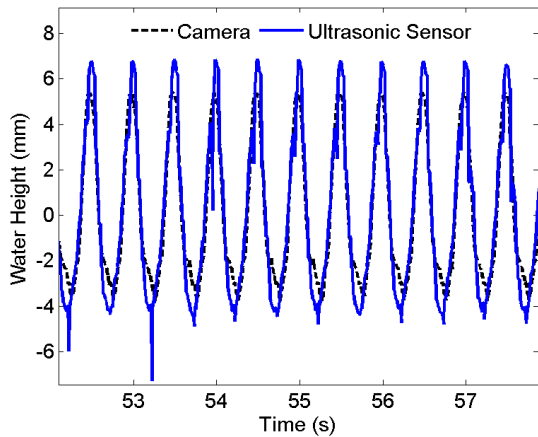


Figure 10. High excitation frequency.

According to the comparison, this method can be accepted a sufficient way to the observe water height in a tank during the sloshing. The flow must be 2D and water splashes must occurs none or less to this method works fine. The method is more consisted with the higher wave height because of the image processing algorithm and camera resolution.

### Calculation of Sloshing Force using Free Surface Images

In order to calculate the force acting on the tank by the water during sloshing, velocity potential and pressure should be determined. For this the rectangular tank is assumed to be rigid. Water in the tank is considered to be inviscid and incompressible. The flow during sloshing is simplified to be two-dimensional and irrotational. The two-dimensional tank shown in Fig. 11 has a length of  $2l$  and the mean water depth is taken to be  $h$ . Fig. 11 also shows the used coordinate system. It is important to note that the water depth should be high enough such that the bottom of the tank is not exposed to air during sloshing, and it should be low enough for shallow assumptions to be valid.

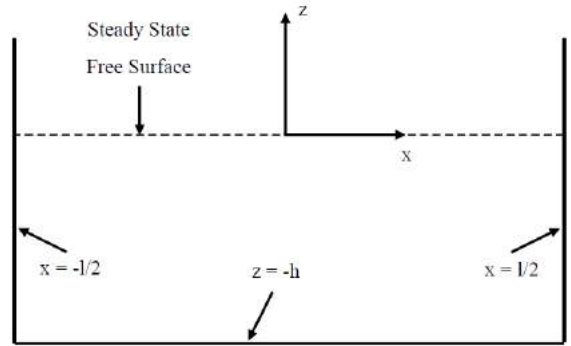


Figure 11. Coordinate system used in force calculation

Under the assumptions stated above, linear theory [1] predicts the following velocity potential for the fluid moving inside the tank

$$\begin{aligned} \varphi(x, z, t) &= \sum_{i=1}^{\infty} R_i(t) f_i(x) \frac{\cosh((i\pi/l)(z+h))}{\cosh((i\pi/l)z)} \end{aligned} \quad (1)$$

where  $f(x, t)$  is the calculated wave form, which given as [1]

$$f(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i(t) f_i(x) \quad (2)$$

and  $f_i(x)$  is equal to [1]

$$f_i(x) = \cos((\pi i)/l (x + l/2)) \quad (3)$$

In Eqn. (1) and (3)  $z$  is equal to free surface height through the tank length and  $x$  is the detected points by the camera through the tank length. The only unknown terms are  $R_i(t)$  and the velocity potential  $\varphi$ . Following kinematic boundary condition is used to reduce the unknown velocity potential term [2]

$$\frac{\partial f(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial \varphi(x, z, t)}{\partial x} \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} = \frac{\partial \varphi(x, z, t)}{\partial z} \quad (4)$$

Substituting Eqn. (1) in Eqn. (4) one gets

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(f(x,t))}{\partial t} \\ & + \sum_{i=1}^{\infty} R_i(t) \frac{\partial(f_i(x))}{\partial x} \frac{\cosh\left(\left(\frac{i\pi}{l}\right)(z+h)\right)}{\cosh\left(\left(i\pi/l\right)(z)\right)} x \\ & \frac{\partial(f(x,t))}{\partial x} \\ & = \sum_{i=1}^{\infty} R_i(t) f_i(x) \frac{\partial\left(\frac{\cosh\left(\left(i\pi/l\right)(z+h)\right)}{\cosh\left(\left(i\pi/l\right)(z)\right)}\right)}{\partial z} \end{aligned}$$

With the equation (5) the coefficient matrices for velocity potential  $R_i(t)$  can be obtained as

$$\begin{aligned} & R_i(t) \\ & = \frac{\frac{\partial(f(x,t))}{\partial t}}{\frac{\partial\left(\frac{\cosh\left(\left(\frac{i\pi}{l}\right)(z+h)\right)}{\cosh\left(\left(i\pi/l\right)(z)\right)}\right)}{\partial z} f_i(x) - \frac{\partial(f_i(x))}{\partial x} \frac{\cosh\left(\left(i\pi/l\right)(z+h)\right)}{\cosh\left(\left(i\pi/l\right)(z)\right)} \frac{\partial(f(x,t))}{\partial x}} \end{aligned}$$

(6)

Before calculated wave form is used to calculate  $R_i(t)$ , the calculated data points nearby the tank walls (about %1-2 of the all data points) are discarded because of the corruptions of wave form's nearby the tank walls. Calculated wave form needs to be matched to a proper curve form for all time steps. From equation (2) and (3),  $f(x,t)$  and  $f_i(x)$  are known.  $f(x,t)$  is equal to calculated wave form and  $f_i(x)$  is only related to  $x$  position and iteration number. The iterations number is increased up to 20.  $\beta_i(t)$  values are calculated by making matrices dividing operation between  $f(x,t)$  and  $f_i(x)$ . After these steps calculated wave form is converted to a proper curve form which is equal to multiplying  $\beta_i(t)$  and  $f_i(x)$ .

Data point's number and location can change frame by frame and this change hinders the matrices calculations. Consequently the data points must to be at the same location and number for each frame. An  $x$  position grid is generated with the constant steps to use the same grid for all frames. For the new  $x$  data points, wave form is calculated with the fitted curve

All terms in velocity potential are known including  $R_i(t)$ . Velocity potential can be used to calculate the pressure values at any time and position. Equation (7) expresses the pressure value at a specific time and position in the tank.

$$\begin{aligned} P = P_0 - \rho \left[ \frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\Delta\varphi)^2 + gz \right. \\ \left. - \sigma^2 H \cos(\sigma t)x - \frac{1}{2} H^2 \sigma^2 \sin^2(\sigma t) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

In equation (7)  $-\sigma^2 H \cos(\sigma t)x - \frac{1}{2} H^2 \sigma^2 \sin^2(\sigma t)$  and  $P_0$  is equal to zero for total force calculation. Because the value of these terms at right side of the tank and the left side of the tank is equal and in opposite directions. Also the transform in equation (8) can be applied.

$$(\Delta\varphi)^2 = \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)^2 \quad (8)$$

After that transformation the equation can be seen in equation (9).

$$P = -\rho \left[ \frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left( \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)^2 \right) + gz \right] \quad (9)$$

Pressure values are calculated at  $-l/2$  and  $l/2$  for  $x$  axis. For  $z$  axis, pressure values are calculated from  $-h$  to wave height at related wall at related time with 1 mm step height. Finally this pressure values are calculated for all time steps.

Pressure values are multiplied with the area of the specific volume (step height at  $z$  coordinate are multiplied with tank width). For each specific volume a force vector is found. Summation of these forces at one wall of the tank is equal of the net force of the wall. The difference between net forces of right and left wall is equal to the force which occurs because of the water movement.

### Sloshing Force Measurement

As seen in Fig. 12 a load cell is mounted on the left wall of the tank to measure the net force due to the sloshing. In order to measure only and whole of the net force, the tank is not located on the floor directly. 4 small iron spheres are located between the floor and the tank as seen in Fig. 12 in red.



Figure 12. Load cell assembly

Similar to the wave height measurements, sloshing force measurements are conducted for a number of different water height, excitation amplitude and excitation frequency combinations. In the first case excitation frequency and amplitude are set to 0.5 Hz and 20 mm, respectively. Initial water height in the tank

is 15 mm, for which 0.5 Hz is the resonance frequency. In Fig. 13, force measurement by the load cell is compared by the force calculation based on free surface images and potential flow theory. The match between the two techniques is acceptable.

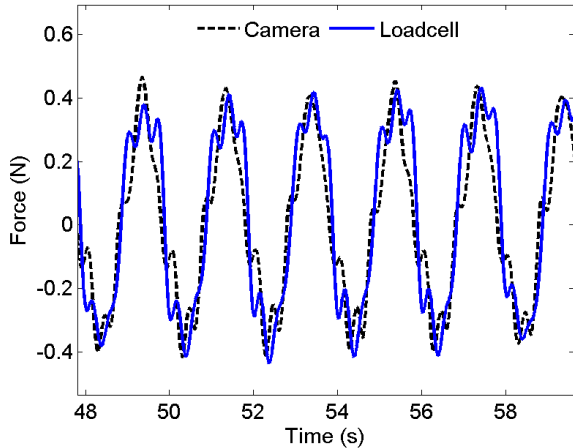


Figure 13. Low excitation frequency

Keeping the excitation frequency and initial water height the same, excitation amplitude is changed to 10 mm and 30 mm. Comparison of the two techniques for these two cases are similar to the one given in Fig. 13. The peak error is 4 %.

Fig. 14 shows the force comparison for 1 Hz excitation frequency and 4 mm excitation amplitude. The water height is 65 mm, for which the resonance frequency is also 1 Hz. Two techniques give very similar results. The error at the peak values is 20 %. It is slightly high because of the low wave height. The error is a little higher at lower amplitudes from 4 mm.

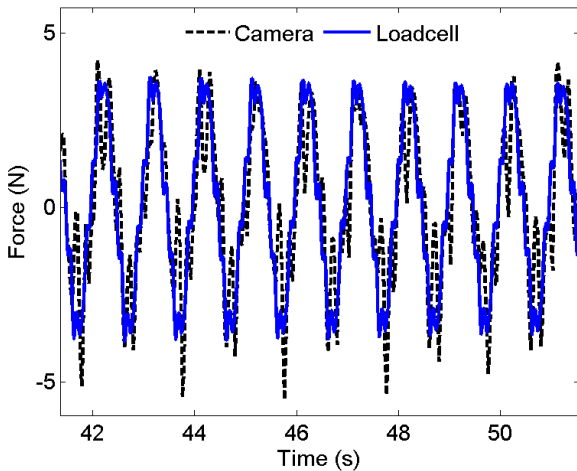


Figure 14. Medium excitation frequency and low excitation amplitude.

The calculated force is satisfactory enough to replace the load cell measurements for 4 mm excitation amplitude at low excitation frequencies. But at 5 mm

amplitude the match between the two techniques is not that satisfactory as seen in Fig. 15.

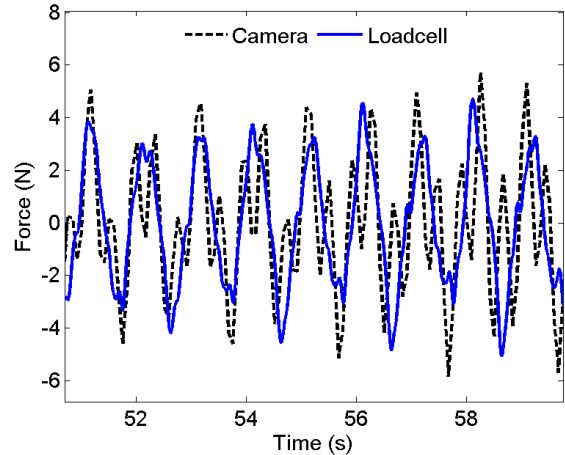


Figure 15. Medium excitation frequency and high excitation amplitude.

Figure 16 is obtained for 2 Hz excitation frequency and 10 mm excitation amplitude. The water height is 65 mm, for which 2 Hz is *not* the resonance frequency. The difference between the two techniques is about 150 % in peak values. The main reason for this poor match is the mismatch of the excitation and resonance frequencies.

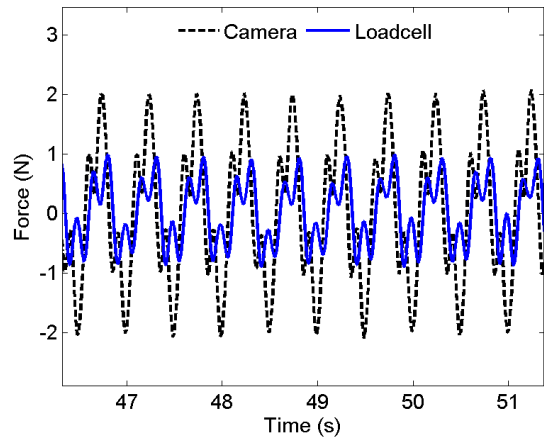


Figure 16. High excitation frequency.

2 additional cases are studied to determine the operating range about the excitation frequency. Initial water height is adjusted so that the resonance frequency for the liquid is 1 Hz and the excitation frequency is also set to 1 Hz. Results for this case are shown in Fig. 17.

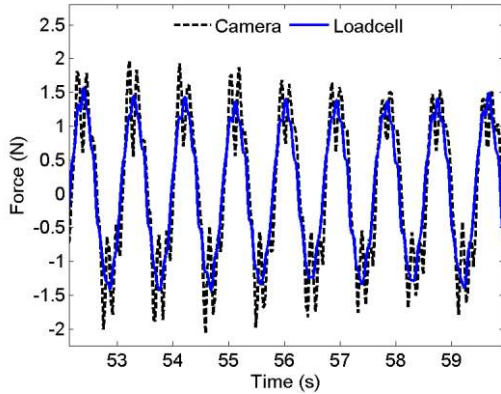


Figure 17. Excitation frequency in operation range  
The error in peak values is about 26 % for 1 Hz resonance frequency and 1.1 Hz excitation frequency. When the excitation frequency was equal to 1 Hz and liquid resonance frequency was 1 Hz for related water height, the error in peak values was 22 %. So that the results for 1.1 Hz excitation frequency with the water height which has 1 Hz natural frequency can be regarded as in allowable zone.

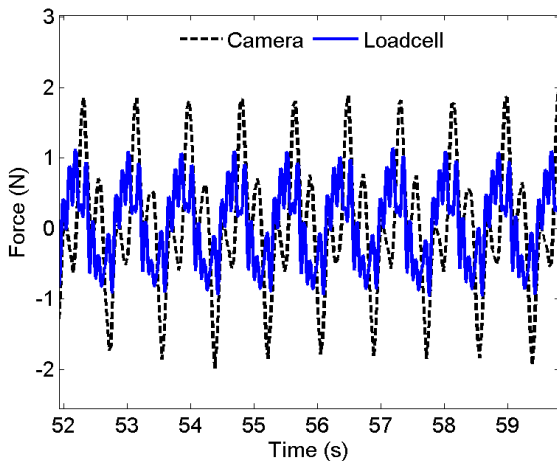


Figure 18. Excitation frequency not in operation range.

1.1 Hz is in the allowable zone for 1 Hz water height but when the excitation frequency is raised up to 1.2 Hz the result are not convincing. Figure 18 shows the experiment with the 1.2 Hz excitation frequency and 1 Hz resonance frequency for related water height. The peak value error is about 125 %. 1.2 Hz excision frequency is not in the allowable zone. It can be said that the operation frequency range is about %15 for excitation frequency.

## Conclusions

A study for the calculation of the sloshing force and for the examination of the sloshing was conducted. In this study, one rigid, transparent and rectangular tank is placed on the shaking table and the motion is captured.

Experiments are fulfilled for different excitation frequency and amplitude, water height. 2 different methods are confirmed with sensors in various cases.

Force sensors can be used to measure force but it is hard to measure sloshing force with the conventional methods. There is necessity of twice times of measurement to obtain sloshing force. Further sloshing force can't be measurement with just force sensors when the tank is located on the structure. Another type of sensor like accelerometer or strain gauge is necessary. Also the sloshing characteristic is important but with the distance sensors only a few point on the tank can be tracked. These difficulties can be eliminated with the new method. The water height can be measured accurately calculate the water height at all points along the water tank as long as splashes and wave breaks do not occur. The proposed method can measure resonant sloshing force just only using excitation videos.

## REFERENCES

1. Gavory, T., De Seze, P. & others, 2009. Sloshing in membrane LNG carriers and its consequences from a designer's perspective. In *The Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*.
2. Terzic, J., Nagarajah, C. & 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), pp.278–287.
3. Jin Qiao, Li Xin, Sun Ning, Zhou Jing, Guan Jiong. 2007. "Experimental and numerical study on tuned liquid dampers for controlling earthquake response of jacket offshore platforms", *Marine Structures*, 20 (2007): 238-254.
4. Xin, Y., G. Chen, and M. Lou. 2009. "Seismic response control with density-variable tuned liquid dampers." *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 8(4):537-546.
5. Hong-Nan, L., Y. Ting-Hua, J. Qin-Yang, H. Lin-Sheng, and W. Guo-Xin. 2011. "Wind-Induced Vibration Control of Dalian International Trade Mansion by Tuned Liquid Dampers." *Mathematical Problems in Engineering* 2012
6. Brizzolara, S. et al., 2011. Comparison of experimental and numerical sloshing loads in partially filled tanks. *Ships and Offshore Structures*, 6(1-2), pp.15–43.
7. Akyildiz, H. & Ünal, E., 2005. Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to the liquid sloshing. *Ocean Engineering*, 32(11), pp.1503–1516.
8. Akyildiz, H. & Ünal, N.E., 2006. Sloshing in a three-dimensional rectangular tank: numerical simulation and experimental validation. *Ocean Engineering*, 33(16), pp.2135–2149.
9. Pal, P. & Bhattacharyya, S., 2010. Sloshing in partially filled liquid containers—Numerical and experimental study for 2-D problems. *Journal of Sound and Vibration*, 329(21), pp.4466–4485.
10. Panigrahy, P., Saha, U. & Maity, D., 2009. Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquids in baffled tanks. *Ocean Engineering*, 36(3), pp.213–222.
11. Song, Y.K. et al., 2013. Experimental study on flow kinematics and impact pressure in liquid sloshing. *Experiments in fluids*, 54(9), pp.1–20.
12. Rafiee, A., Pistani, F. & Thiagarajan, K., 2011. Study of liquid sloshing: numerical and experimental approach. *Computational Mechanics*, 47(1), pp.65–75.

13. Pistani, F. & Thiagarajan, K., 2012. Experimental measurements and data analysis of the impact pressures in a sloshing experiment. *Ocean Engineering*, 52, pp.60–74.
14. Repalle, N. et al., 2010. The effect of sampling rate on the statistics of impact pressure. In *ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. pp. 565–572.
15. Carra, S., Amabili, M. & Garziera, R., 2013. Experimental study of large amplitude vibrations of a thin plate in contact with sloshing liquids. *Journal of Fluids and Structures*, 42, pp.88–111.
16. Souto-Iglesias, A., Bulian, G. & Botia-Vera, E., 2015. A set of canonical problems in sloshing. Part 2: Influence of tank width on impact pressure statistics in regular forced angular motion. *Ocean Engineering*, 105, pp.136–159.
17. Li, H. et al., 2014. Numerical studies on sloshing in rectangular tanks using a tree-based adaptive solver and experimental validation. *Ocean Engineering*, 82, pp.20–31.
18. Souto-Iglesias, A., Bulian, G. & Botia-Vera, E., 2015. A set of canonical problems in sloshing. Part 2: Influence of tank width on impact pressure statistics in regular forced angular motion. *Ocean Engineering*, 105, pp.136–159.
19. Kim, S.-Y., Kim, K.-H. & Kim, Y., 2015. Comparative study on pressure sensors for sloshing experiment. *Ocean Engineering*, 94, pp.199–212.
20. Bouscasse, B. et al., 2013. Numerical and experimental investigation of nonlinear shallow water sloshing. *Int. J. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 14(2), pp.123–138.
21. Pal, N., Bhattacharyya, S. & Sinha, P., 2001. Experimental investigation of slosh dynamics of liquid-filled containers. *Experimental Mechanics*, 41(1), pp.63–69.
22. Bredmose, H. et al., 2003. Experimental investigation and numerical modelling of steep forced water waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 490, pp.217–249.
23. Reed, D. et al., 1998. Investigation of tuned liquid dampers under large amplitude excitation. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(4), pp.405–413.

**TÜBİTAK  
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. MEHMET BÜLENT ÖZER
Proje No:	113M401
Proje Başlığı:	Çalkalanan Titreşim Sönümleyiciler Kullanarak Yapıların Depreme Dayanıklılığının Arttırılması
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	CÜNEYT SERT
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ Ü. MÜHENDİSLİK F. MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/10/2013 - 15/10/2015
Onaylanan Bütçe:	206171.0
Harcanan Bütçe:	166268.08
Öz:	<p>Bu çalışmada çalkalanan sıvılı titreşim sönümleyicilerin yapıların sismik titreşimi üzerine olan etkileri incelenmiştir. Araştırmaya ilk önce yalın bir dikdörtgen kabın sinüs girdisi altındaki çalkalanmasının sayısal benzetimi ile başlandı. Daha sonra dikdörtgen kabın içindeki sıvının sinüs girdisi altında çalkalanması deneysel olarak incelendi ve sayısal benzetim sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldı.</p> <p>Yalın çalkalanma çalışmaları tamamlandıktan sonra dikdörtgen kaplı çalkalanan sıvı sönümleyici doğal frekansları değiştirilebilen basit bir yapı modeline konuldu ve yapı-sıvı etkileşimli sistem için sinüs girdisi altında sayısal benzetimler gerçekleştirildi. Bu sayısal benzetimler bir sonraki basamaktaki deneysel çalışmalar ile karşılaştırılarak genelde benzer eğilimler görüldü.</p> <p>Daha sonra sayısal benzetim metotları kullanılarak çalkalanan sıvılı titreşim sönümleyicilerin performansını arttıran kap tasarımları denendi. Sayısal benzetimler gerçekleştirilen çok gözlü kap tasarımının düşük katlı yapılara denk gelen yüksek frekanslı yapıların titreşimini azaltmada etkili olduğunu gösterdi.</p> <p>Sonraki çalışmalarda dikdörtgen kaplı değişik doğal frekanslara sahip yapıların deprem girdisi altında sönümleyicili ve sönümleyicisiz yanıtları deneysel olarak incelenerek çalkalanan dikdörtgen kaplı sönümleyicilerin bina titreşimine etkisi incelendi. Çok gözlü kap için benzeri deneysel çalışmalar yapıldı ve sayısal benzetimlere paralel olarak düşük katlı binalara denk gelen frekanslarda bu kap tasarımının bina modeli titreşimini azaltmada etkin olduğu deneysel olarak da gösterildi.</p> <p>Projenin son kısmında literatürde olmayan kapların rezonans frekansı etrafında çalkalanırken sıvı yüksekliğini ve kap duvarlarına etkileyen kuvveti bulmaya yarayan görüntü işleme bazlı yeni bir ölçüm metodu geliştirildi.</p>
Anahtar Kelimeler:	Çalkalanan Sıvı Sönümleyici, Mekanik Titreşimler, Sismik Yanıt, Deprem
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- SIMULATION OF FLUID SLOSHING FOR DECREASING THE RESPONSE OF STRUCTURAL SYSTEMS (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),