

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MANYETİK TİTREŞİM SÖNÜMLEYİCİLERİN SAYISAL VE DENEYSEL  
YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Eren Can ERGÜL**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanları: Doç. Dr. Bülent ÖZER**

**Prof. Dr. Yücel ERCAN**

**AĞUSTOS 2018**



Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞUL**  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....  
**Prof. Dr. Murat Kadri AKTAŞ**  
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151511028 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Eren Can ERGÜL** 'ün ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**MANYETİK TİTREŞİM SÖNÜMLEYİCİLERİN SAYISAL VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**" başlıklı tezi **02.08.2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Yücel ERCAN** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Eş Danışman :** **Doç. Dr. M. Bülent ÖZER** .....  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Yiğit YAZICIOĞLU** .....  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Yiğit TAŞCIOĞLU** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi



## TEZ BİLDİRİMİ

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

Eren Can Ergül



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### MANYETİK TİTREŞİM SÖNÜMLEYİCİLERİN SAYISAL VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Eren Can Ergül

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

Danışmanlar: Prof. Dr. Yücel ERCAN, Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER

Tarih: Ağustos 2018

Dış etkenlerin yapılar ve çeşitli mekanik sistemler üzerinde oluşturabileceği zorlanmaların doğrusal olmayan titreşim sönümleyicilerle iyileştirilmesi üzerinde yoğunlukla çalışılan konulardan biridir. Günümüzde doğrusal olmayan direngenliğe sahip bir çok pasif titreşim sönümleyici geliştirilmiştir ve manyetik titreşim sönümleyiciler bunlardan biridir. Bu çalışmada farklı manyetik titreşim sönümleyici konfigürasyonlarının titreşim sönümlenme performansı farklı zorlama durumları için deneysel olarak incelenecektir.

Çalışmanın ilk başında mıknatısların birbirine bakan aynı kutuplarından doğan itki kuvvetinin oluşturduğu doğrusal olmayan direngenlik incelenmiştir. Bu direngenliğin sebep olduğu geri döndürücü kuvvet ile manyetik titreşim sönümleyicinin kinetik analizleri yapılmıştır. Daha sonra mıknatısları arasındaki uzaklığı ve sönüm seviyesi rahatça ayarlanabilen, kütlesi değiştirilebilen, doğal frekansı geniş bir frekans aralığında ayarlanabilen manyetik titreşim sönümleyici tasarlanıp üretilmiştir. Üretilen

manyetik titreşim sönümleyici farklı zorlama frekansları ve genliklerinde deneysel olarak incelenmiştir. Bu deneylerde artan genlik ve frekans değerlerinde manyetik sönümleyicinin davranışına ve kütle miktarı, sönüm seviyesi gibi değişkenlerin bu davranışı nasıl etkilediğine bakılmıştır.

Çalışmanın izleyen kısmında kütlesi değiştirilebilen ve doğal frekansı ayarlanabilen bina modelinin, üzerinde etkin bir sönüm yöntemi olmadan sinüs ve deprem tipi girdiler karşısındaki yanıtlarına bakılmıştır. Ardından aynı yapı üzerine manyetik titreşim sönümleyici yerleştirilmiştir. Belli bir ayardaki manyetik titreşim sönümleyicinin farklı doğal frekanstaki yapılar üzerindeki performansı sinüs ve deprem zorlamaları yönünden deneysel olarak incelenmiştir. Tüm deneylerde yapı üzerindeki yıkıcı kuvvetleri temsil eden veriler toplanmış ve kaydedilmiştir.

Çalışmanın sonucunda, manyetik titreşim sönümleyicinin ayarlarının değiştirilmesine gerek kalmadan farklı doğal frekanslı binalarda başarılı olduğu görülmüştür. Ancak her girdi tipi için iyileşme elde edilmesi için manyetik titreşim sönümleyicinin ayarlanmasında dikkat edilmesi gereken bazı ayrıntılar vardır. Bu ayrıntılara dikkat edildiğinde manyetik titreşim sönümleyicinin verimi artmaktadır ve daha yüksek sönümleme performansı görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Manyetik titreşim sönümleyici, Eddy akım sönümü, Ayarlanmış kütle sönümleyici, Doğrusal olmayan direngenlik



## **ABSTRACT**

Master of Science

### **INVESTIGATING THE PERFORMANCE OF THE MAGNETIC VIBRATION ABSORBERS WITH NUMERICAL AND EXPERIMENTAL METHODS**

Eren Can Ergül

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

Supervisors: Prof. Yücel ERCAN, Assoc. Prof. Mehmet Bülent Özer

Date: August 2018

Reducing the stress caused by external factors on buildings and other mechanical systems using non-linear vibration absorbers is one of the subjects that has been studied extensively. Nowadays, many vibration absorbers with non-linear stiffness elements have been developed which includes magnetic vibration absorbers. In this study, vibration attenuation performances of magnetic vibration absorbers with different tuning configurations against different types of disturbances is examined.

Initially, non-linear stiffness that results from the repulsive force caused by facing identical poles of two magnets is investigated. Kinetic analysis of the magnetic vibration absorber is performed with the help of restoring force derived from this non-linear stiffness. Afterwards, a magnetic vibration absorber that features a wide spectrum of natural frequencies by adjusting distance between magnets, along with changable mass and damping level was designed and manufactured. This magnetic vibration absorber was tested experimentally by various disturbing frequencies and

amplitudes. In these experiments, the behaviour of the magnetic vibration absorber against increasing amplitudes and frequencies was examined and the effect of parameters such as mass and damping level on this behaviour was investigated.

In the following part of this study, dynamic responses of a primary building model with adjustable mass and natural frequency against sinusoidal and seismic inputs were obtained in absence of an effective damping method. Then, the magnetic vibration absorber was placed on the same primary building model and performances of the magnetic vibration absorber on building models with different natural frequencies against the same sinusoidal and seismic inputs were examined experimentally. In the end of every experiment, data measured by sensors which quantifies the destructive forces on the primary building were recorded.

In the conclusion of this study, it was observed that the magnetic vibration absorber is capable of mitigating the responses of the primary buildings of different natural frequencies without requiring to re-tune. However, there are certain tuning parameters to consider if an effective absorbing performances for all types of inputs is desired. If these parameters is set correctly, efficiency of the magnetic vibration absorber is increased and improved attenuation is observed.

**Keywords:** Magnetic vibration absorber, Eddy current damping, Tuned mass absorber, Non-linear stiffness

## TEŞEKKÜR

Tez danıőmanım olmayı kabul eden Prof. Dr. Yücel Ercan'a, bu çalışma süresince bana bir çok konuda yol göstermiő, tavsiye ve yardımlarını esirgememiő, gerektiğinde moral vermiő eş danıőmanım ve hocam Doç. Dr. Mehmet Bülent Özer'e, üç boyutlu yazıcı kullanımında ve gerekli parçaların imalatında destek olmuő bir başka kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Yiğit Taőçıođlu'na ve daima yanımda olan, sevgi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xiv</b>
<b>RESİM LİSTESİ</b> .....	<b>xviii</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xviii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xxi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Günümüzde Ayarlanmış Kütle Titreşim Sönümleyici Çalışmaları ve Uygulamaları.....	2
1.2 Doğrusal Olmayan Titreşim Sönümleyicilerin Doğrusal Titreşim Sönümleyicilerden Farkı .....	3
1.3 Doğrusal Olmayan Titreşim Sönümleyiciler ve Yapı Etkileşimi Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar .....	5
1.4 Manyetik Doğrusal Olmayan Enerji Yutucular Üzerine Yapılan Çalışmalar ....	7
1.5 Literatür Sonuçları ve Çalışmada İzlenecek Yol.....	9
<b>2. TEK SERBESTLİK DERECELİ DOĞRUSAL OLMAYAN SÖNÜMLEYİCİNİN ANALİTİK VE SAYISAL BENZETİMİ</b> .....	<b>11</b>
3.1 Mıknatıs İtki Kuvveti Deneyi ve Sonuçları.....	11
3.2 Tek Serbestlik Dereceli Doğrusal Olmayan Sönümleyicinin Analitik Benzetimi .....	14
3.3 Tek Serbestlik Dereceli Doğrusal Olmayan Sönümleyicinin Sayısal Benzetimi .....	24
<b>3. DENEY DÜZENEGİ VE DENEY METODU</b> .....	<b>35</b>
<b>4. TEK SERBESTLİK DERECELİ DOĞRUSAL OLMAYAN SÖNÜMLEYİCİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ</b> .....	<b>41</b>
4.1 Farklı Mıknatıs Arası Mesafeler için Manyetik Titreşim Sönümleyicinin Yanıtının İncelenmesi .....	41
4.2 Farklı Mıknatıs-Bakır Plaka Arası Mesafeler için Eddy Akımı Sönümünün İncelenmesi ve Viskoz Sürtünme Katsayısının Elde Edilmesi .....	53
4.3 Farklı Kütle Değerleri için Aynı Doğal Frekansa Ayarlanmış Sönümleyicinin Davranışının İncelenmesi .....	57
<b>5. YAPIYA ENTEGRE EDİLEN MANYETİK TİTREŞİM SÖNÜMLEYİCİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ</b> .....	<b>61</b>
5.1 Minimum Doğal Frekansı Birincil Binanın Doğal Frekansına Ayarlanan Manyetik Titreşim Sönümleyicinin Sinüs Girdisi için Deneysel İncelenmesi	61
5.2 Minimum Doğal Frekansı Birincil Binanın Doğal Frekansına Ayarlanan Manyetik Titreşim Sönümleyicinin Deprem Girdisi için Deneysel İncelenmesi .....	73
<b>6. SONUÇLAR</b> .....	<b>87</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>95</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>99</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Zorlama genliğine göre doğrusal olmayan sistemin cevabı.....	4
Şekil 2.1 : Mıknatıs arası mesafe-İtki kuvveti deneyi sonuçları. ....	13
Şekil 2.2 : Mıknatıslarla direngenlik verilmiş $M$ kütlesi ve konum $x$ 'e göre üzerine etki eden kuvvetler. ....	14
Şekil 2.3 : Mıknatıslar arası uzaklık $L$ 'ye göre direngenlik eğrileri.....	15
Şekil 2.4 : Kütle, yay, viskoz sönümleyici ve konum zorlaması benzetimli sistem. .	16
Şekil 2.5 : $L = 65$ mm, $Y = 4$ mm, $M_s = 1$ kg, $c_s = 0.5$ N.s/m iken tek serbestlik dereceli sistemin cevabı ve faz farkı. ....	19
Şekil 2.6 : $L = 65$ mm, $Y = 1$ mm, $M_s = 1$ kg, $c_s = 0$ N.s/m iken tek serbestlik dereceli sistemin cevabı. ....	20
Şekil 2.7 : $L = 65$ mm, $Y = 4$ mm, $M_s = 1$ kg, $c_s = 0.5$ N.s/m, $a = 0$ iken tek serbestlik dereceli sistemin iteratif ve kapalı form çözümü. ....	22
Şekil 2.8 : $L = 65$ mm, $Y = 1.5$ mm, $M_s = 1$ kg, $c_s = 0.5$ N.s/m, $a = 0$ iken tek serbestlik dereceli sistemin iteratif ve kapalı form çözümleri.....	23
Şekil 2.9 : Analizle elde edilen kuvvet eğrisi ve deney verisi.....	26
Şekil 2.10 : Dinamik zorlama altındaki kütlenin genliği için COMSOL nümerik analiz sonuçları ve tanımlayıcı fonksiyonlar çözümün karşılaştırılması. Sistemde; $L = 75$ mm, $M_s = 1.6$ kg, $c_s = 0.5$ N.s/m, $a = 0$ .....	32
Şekil 2.11 : Tanımlanan yay fonksiyonuyla COMSOL nümerik analiz sonuçları ve tanımlayıcı fonksiyonlar çözümün karşılaştırılması. Sistemde; $L = 65$ mm, $M_s = 1.0$ kg, $c_s = 0.5$ N.s/m, $a = 0$ .....	34
Şekil 4.1 : Deney durumu 1 için (a) yatışkın durum konum genlikleri (b) yatışkın durum kuvvet genlikleri. ....	44
Şekil 4.2 : Deney durumu 2 için (a) yatışkın durum konum genlikleri (b) yatışkın durum kuvvet genlikleri. ....	46
Şekil 4.3 : Deney durumu 3 için (a) yatışkın durum konum genlikleri (b) yatışkın durum kuvvet genlikleri. ....	49
Şekil 4.4 : Deney durumu 4 için (a) yatışkın durum konum genlikleri (b) yatışkın durum kuvvet genlikleri. ....	51
Şekil 4.5 : Durum 1 için deneysel sonuçlarla analitik çözümlerin karşılaştırılması. (a) Tanımlayıcı fonksiyon iterasyonları, (b) Kapalı form analitik çözümü. "o" deneysel sonuçlar, "-" analitik çözümler.....	52
Şekil 4.6 : Durum 4 için deneysel sonuçlarla analitik çözümlerin karşılaştırılması. (a) Tanımlayıcı fonksiyon iterasyonları, (b) Kapalı form analitik çözümü. "o" deneysel sonuçlar, "-" analitik çözümler.....	52
Şekil 4.7 : Sönüm kademeleri için 6 mm zorlama genliğinde elde edilen veriler. Her iki sistem için $M_s = 1$ kg, (a) mıknatıslar arası mesafe $L = 62.5$ mm, (b) mıknatıslar arası mesafe $L = 67.5$ mm. ....	55

Şekil 4.8 : $L = 62.5$ mm için deney verileri üzerine oturtulan sönümlü analitik çözümler. ‘o’ deneysel veriler, ‘+’ analitik çözümler.....	56
Şekil 4.9 : $L = 67.5$ mm için deney verileri üzerine oturtulan sönümlü analitik çözümler. ‘o’ deneysel veriler, ‘+’ analitik çözümler.....	56
Şekil 4.10 : 900 g ve 1550 g için farklı mıknatıs arası mesafelere denk gelen doğal frekans değerleri.....	58
Şekil 4.11 : 900 g ve 1550 g için 5 mm zorlama genliğinde frekans taraması (a) genlik sonuçları (b) kuvvet sonuçları.....	59
Şekil 5.1 : Farklı mıknatıslar arası uzaklık için seçilen kütle değerlerindeki minimum doğal frekanslar.....	62
Şekil 5.2 : Kırmızı eğri: 0.05 kütle oranında, orta sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.....	64
Şekil 5.3 : Kırmızı eğri: 0.05 kütle oranında, yüksek sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.....	65
Şekil 5.4 : Kırmızı eğri: 0.07 kütle oranında, orta sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.....	66
Şekil 5.5 : Kırmızı eğri: 0.07 kütle oranında, yüksek sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.....	67
Şekil 5.6 : Kırmızı eğri: 0.06 kütle oranında, orta sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.....	69
Şekil 5.7 : Kırmızı eğri: 0.06 kütle oranında, yüksek sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.....	70
Şekil 5.8 : Kırmızı eğri: 0.09 kütle oranında, orta sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.....	71
Şekil 5.9 : Kırmızı eğri: 0.09 kütle oranında, yüksek sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.....	72
Şekil 5.10 : Kullanılan deprem sinyalleri (a) Birinci deprem sinyali: 2014 Ferndale Depremi, (b) İkinci deprem sinyali: 1999 Düzce Depremi.....	74
Şekil 5.11 : Durum 1.a için birinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum gerinim seviyeleri.....	76
Şekil 5.12 : Durum 1.a için birinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum ivme seviyeleri.....	76
Şekil 5.13 : Durum 1.a için birinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum yer değiştirme seviyeleri.....	77
Şekil 5.14 : Durum 1.b için ikinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum gerinim seviyeleri.....	78
Şekil 5.15 : Durum 1.b için ikinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum ivme seviyeleri.....	78
Şekil 5.16 : Durum 1.b için ikinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum yer değiştirme seviyeleri.....	79

Şekil 5.17 : Yüksek girdi genlikli ikinci deprem sinyali için, 0.07 kütle oranında, yüksek sönüm seviyesinde sistem ile sönümsüz sistemin yanıtı.....	80
Şekil 5.18 : Durum 2.a için birinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum gerinim seviyeleri. ....	81
Şekil 5.19 : Durum 2.a için birinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum ivme seviyeleri. ....	82
Şekil 5.20 : Durum 2.a için birinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum yer değiştirme seviyeleri. ....	82
Şekil 5.21 : Durum 2.b için ikinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum gerinim seviyeleri. ....	83
Şekil 5.22 : Durum 2.b için ikinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum ivme seviyeleri. ....	84
Şekil 5.23 : Durum 2.b için ikinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum yer değiştirme seviyeleri. ....	84
Şekil 5.24 : Yüksek genlikli ikinci deprem sinyalinde sönümsüz sistem ve sönümlü sistemin 15-40 s aralığında yanıtı. Manyetik titreşim sönümleyici kütle oranı 0.09, sönüm seviyesi yüksektir. ....	85



## RESİM LİSTESİ

### Sayfa

Resim 2.1 : Uzaklığa göre mıknatıs kuvvetinin ölçümü için hazırlanan deney düzeneği. ....	12
Resim 2.2 : Hava kümesi içinde mıknatıs çifti. ....	24
Resim 2.3 : Mıknatıs ve çerçeve hava yüzeyinde oluşturulan çözüm ağı.....	26
Resim 2.4 : Tek serbestlik dereceli analiz geometrisi.....	27
Resim 2.5 : Kullanılan modüller ve sınır koşulu tanımlamaları. ....	28
Resim 2.6 : Üzerinde Laplace Denklemi tanımlanan çizgiler.....	29
Resim 2.7 : Tek serbestlik dereceli sistemin dinamik analizi için oluşturulan çözüm ağı.....	31
Resim 2.8 : Çoklu Cisim Dinamiği modülü, geometri ve tanımlanan yay noktaları. 33	
Resim 3.1 : Tasarlanan doğrusal olmayan manyetik sönümleyici sistemi.....	35
Resim 3.2 : Üretilen 3 adet takılıp çıkarılabilir, paslanmaz çelik kütle. ....	36
Resim 3.3 : Tamamıyla monte edilmiş manyetik titreşim sönümleyici sistemi. ....	37
Resim 3.4 : Eylici ve veri alma düzeneği.....	38
Resim 3.5 : Deney düzeneği üzerinde sensör yerleşimi.....	39
Resim 4.1 : Bakır plaka, hareket eksenini ve bu eksene dik yerleştirilen mıknatıslar. .	54

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 3.1 : Kullanılan veri işleme modülleri ve özellikleri. ....	39
Çizelge 3.2 : Kullanılan sensörler, bağlandıkları modül ve örnekleme bilgileri. ....	40
Çizelge 4.1 : Deney durumları, kuvvet eğrileri ve deney koşulları.....	42
Çizelge 4.2 : 2 mm girdi genliği için Durum 1 ileri ve geri tarama sonuçları. ....	43
Çizelge 4.3 : 4 mm girdi genliği için Durum 1 ileri ve geri tarama sonuçları. ....	43
Çizelge 4.4 : 6 mm girdi genliği için Durum 1 ileri ve geri tarama sonuçları. ....	43
Çizelge 4.5 : 2 mm girdi genliği için Durum 2 ileri ve geri tarama sonuçları. ....	45
Çizelge 4.6 : 4 mm girdi genliği için Durum 2 ileri ve geri tarama sonuçları. ....	46
Çizelge 4.7 : 6 mm girdi genliği için Durum 2 ileri ve geri tarama sonuçları. ....	46
Çizelge 4.8 : 2 mm girdi genliği için Durum 3 ileri ve geri tarama sonuçları. ....	48
Çizelge 4.9 : 4 mm girdi genliği için Durum 3 ileri ve geri tarama sonuçları. ....	48
Çizelge 4.10 : 6 mm girdi genliği için Durum 3 ileri ve geri tarama sonuçları. ....	48
Çizelge 4.11 : 2 mm girdi genliği için Durum 4 ileri ve geri tarama sonuçları. ....	50
Çizelge 4.12 : 4 mm girdi genliği için Durum 4 ileri ve geri tarama sonuçları. ....	50
Çizelge 4.13 : 6 mm girdi genliği için Durum 4 ileri ve geri tarama sonuçları. ....	50
Çizelge 4.14 : Sönüm seviyelerine göre analitik ve sayısal benzetimlerde kullanılan sönüm katsayısı.....	57
Çizelge 4.15 : 900 g ve 1550 g için 5 mm zorlama genliğinde kuvvet değerleri.....	59
Çizelge 5.1 : Sönümleyici olmayan, 2.7 Hz doğal frekanslı sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler. ....	63
Çizelge 5.2 : 0.05 kütle oranında, orta sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.....	63
Çizelge 5.3 : 0.05 kütle oranında, yüksek sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.....	64
Çizelge 5.4 : 0.07 kütle oranında, orta sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.....	66
Çizelge 5.5 : 0.07 kütle oranında, yüksek sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.....	67
Çizelge 5.6 : Sönümleyici olmayan, 3.0 Hz doğal frekanslı sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler. ....	68
Çizelge 5.7 : 0.06 kütle oranında, orta sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.....	69
Çizelge 5.8 : 0.06 kütle oranında, yüksek sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.....	70
Çizelge 5.9 : 0.09 kütle oranında, orta sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.....	71
Çizelge 5.10 : 0.09 kütle oranında, orta sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.....	72

Çizelge 5.11 : Durum 1.a için orta sönüm seviyesinde sistemin birinci deprem sinyaline yanıtı. ....	75
Çizelge 5.12 : Durum 1.a için yüksek sönüm seviyesinde sistemin birinci deprem sinyaline yanıtı. ....	76
Çizelge 5.13 : Durum 1.b için orta sönüm seviyesinde sistemin ikinci deprem sinyaline yanıtı. ....	77
Çizelge 5.14 : Durum 1.b için yüksek sönüm seviyesinde sistemin ikinci deprem sinyaline yanıtı. ....	78
Çizelge 5.15 : Durum 2.a için orta sönüm seviyesinde sistemin birinci deprem sinyaline yanıtı. ....	81
Çizelge 5.16 : Durum 2.a için yüksek sönüm seviyesinde sistemin birinci deprem sinyaline yanıtı. ....	81
Çizelge 5.17 : Durum 2.b için orta sönüm seviyesinde sistemin ikinci deprem sinyaline yanıtı. ....	83
Çizelge 5.18 : Durum 2.b için yüksek sönüm seviyesinde sistemin ikinci deprem sinyaline yanıtı. ....	83





## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler Açıklama

L	Mıknatıslar arası uzaklık
$M_s$	Manyetik titreşim sönümleyicinin kütlesi
$c_s$	Manyetik titreşim sönümleyicinin viskoz sönüm katsayısı
a	Manyetik titreşim sönümleyicinin kuru sönüm katsayısı
$c_{s5}$	Kuvvet eğrisinin beşinci derece teriminin katsayısı
$c_{s3}$	Kuvvet eğrisinin üçüncü derece teriminin katsayısı
k	Kuvvet eğrisinin birinci derece teriminin katsayısı
$\omega_n$	Doğal frekans (rad/s)
$f_n$	Doğal frekans (Hz)
$\zeta$	Sönüm oranı
Y	Zorlama genliği
y	Sabit mıknatısların konumu
x	Manyetik titreşim sönümleyicinin konumu
z	Sabit mıknatıslarla hareketli sönümleyici kütlelerin konumları farkı
$\alpha$	Reseptans
$\Delta$	Tanımlayıcı fonksiyonlar bütünü
$\mu_0$	Artık manyetik akı
S	Maxwell Gerilim Tensörü
B	Manyetik alan
A	Mıknatıs yüzey alanı
n	Yüzey normal vektörü



## 1. GİRİŞ

Dış etkenlerden doğan titreşim, mekanik yapılar üzerinde yıkıcı sonuçlara sebep olabilmektedir ve bu problem, uzun zamandır üzerinde çalışılan mühendislik konularından biridir. Bu titreşimlerin yapılar üzerinde sebep olduğu dinamik cevabın yatıştırılması için çeşitli çözümler geliştirilmiştir. Temelini Hermann Frahm'ın attığı, pasif ayarlanmış mekanik titreşim sönümleyiciler, bu çözümler içerisinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir [1]. Titreşimi sönümlenmek istenen yapının doğal frekansına göre ayarlanan pasif ayarlanmış mekanik titreşim sönümleyiciler, bu problemin çözümünde etkili sonuç verseler de, bu ayar prosedürü çoğu zaman zor olmakta ve istenen sönümlü cevap yüksek kütle oranlarında görülebilmektedir. Ayrıca, dinamik cevabı sönümlenmek istenen yapı doğrusal sistemden uzaklaştıkça, pasif ayarlanmış mekanik titreşim sönümleyicilerin performansı düşmektedir.

Böyle durumlarda doğrusal olmayan titreşim sönümleyiciler öne çıkmaktadır. 2000'li yılların başında pasif doğrusal olmayan enerji yutucuların titreşen yapılara etkisi araştırılmaya başlanmış ve hedeflenmiş enerji transferinin temelleri atılmıştır [2]. Sabit bir doğal frekansı olmayan bu enerji yutucular, birincil yapının dinamik yanıtının şiddetine göre doğal frekansları değişebilmektedir [3]. Bu özellikten dolayı, doğrusal olmayan enerji yutucular, verimli bir şekilde artık enerjiyi hızlı bir şekilde kendilerine transfer edebilmekte ve birincil yapıda daha geniş bir sönüm aralığı ortaya çıkarmaktadırlar.

Doğrusal olmayan direngenlik elemanının yanında doğrusal olmayan sönüm elemanları da öne çıkmaktadır. Bu alanda mıknatıslarla birlikte kullanılması mümkün olan Eddy akımı sönümleyicilerin kullanımı artmaktadır. Temassız olmaları ve dış etkenlerden minimum derecede etkilenmeleri ve sönüm katsayılarının rahatlıkla ayarlanabilir olması bu sönüm elemanlarını diğer viskoz sönüm olarak modellenebilen bileşenlerden ayırmaktadır [4], [5]. Özellikle inşaat mühendisliği çalışma alanlarından

biri olarak, küçük ölçekli büyük köprü modelleri üzerinde manyetik Eddy akımından doğan sönümleyiciler deneysel olarak incelenmekte ve uygulanmaktadır [6], [7].

Bu çalışmada, neodimium mıknatısların doğrusal olmayan itki kuvvetinden sertliğini alan, geniş bir doğal frekans aralığı olan bir doğrusal olmayan titreşim sönümleyici analitik olarak incelenecek ve sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilecektir. Analizi yapılan doğrusal olmayan enerji tutucu tasarlanıp, üretilecek ve analizler deneysel olarak da teyit edilecektir. Sisteme daha sonra sönüm katsayısı ayarlanabilir Eddy akımı sönümleyici eklenecektir. Üretilen titreşim sönümleyici daha sonra birincil bina modeline monte edilecek ve birincil yapıya sinüs zorlama, düşük ve yüksek genlikte deprem zorlama uygulanacaktır. Bu deneylerin sonucunda ortalama verilere bakılacak ve doğrusal olmayan sönümleyicinin performansı değerlendirilecektir.

## **1.1 Günümüzde Ayarlanmış Kütle Titreşim Sönümleyici Çalışmaları ve Uygulamaları**

Temelleri Frahm tarafından atıldıktan sonra, ayarlanmış kütle titreşim sönümleyiciler ilk olarak Den Hartog tarafından incelenmiştir [8]. Dış etkenlerden doğan titreşime maruz kalan tek serbestlik dereceli birincil yapıya eklenen fazladan kütle sistemi, birincil yapının doğal frekansına ayarlandığında bu frekansta teorik olarak hareket gözlenmemektedir. Eklenen bu kütle sistemi iki serbestlik dereceli biçime getirir ve birincil yapının en baştaki doğal frekansı etrafında iki ayrı rezonans tepesi görülür. Bu iki rezonans tepesinin şiddetini sisteme eklenen kütlelerin büyüklüğü, iki kütle arasındaki sönüm ve direngenlik elemanının özellikleri belirler. Hartog, tek serbestlik dereceli sistemler için bu değerlerin en uygun biçimde seçilişini ve hesaplanmasını göstermiştir. Çok serbestlik dereceli sistemlerde Den Hartog'un yaklaşımını uygulayabilmek için sistem önce tek serbestlik dereceli sisteme indirgenmelidir. M. Bülent Özer ve Thomas J. Royston çalışmalarında Hartog'un tek serbestlik dereceli sistemler için olan yaklaşımlarını çok serbestlik dereceli sistemlere uyarlamışlardır [9].

Birincil yapıya eklenen fazladan kütle için günümüzde çeşitli uygulamalar mevcuttur [10]. Bunların en başında sarkaç tipi ayarlanmış kütle sönümleyiciler gelmektedir ve üzerinde hala çalışmalar yapılmaktadır [11]–[13]. Sarkaç tipi titreşim sönümleyicilerin uygulanışına örneklerden biri Avustralya, Sydney'deki Chifley Tower'dır [14].



Hidrolik silindirlerle desteklenmiş sarkaç yapıya %2-4 arası sönüm artışı kazandırmıştır. Daha güncel uygulamalardan biriyse Tayvan'da yapımı 2004 senesinde tamamlanan Taipei 101 gökdelenidir. Gökdelende rüzgar ve depreme karşı yaklaşık 800 ton ağırlığında sarkaç kullanılmıştır. Bir başka uygulama ise Shanghai Tower'da mevcuttur. Yapıya hidrolik şok emicilerle destekli, yaklaşık 1000 ton ağırlığında çelik plakalar sarkaç gibi monte edilmiştir. Sistem mknatıslardan oluşan taban üzerinde hareket edebilmektedir, böylece Eddy akımlarından doğan sönüm titreşim sönümleyicinin performansını arttırmıştır.

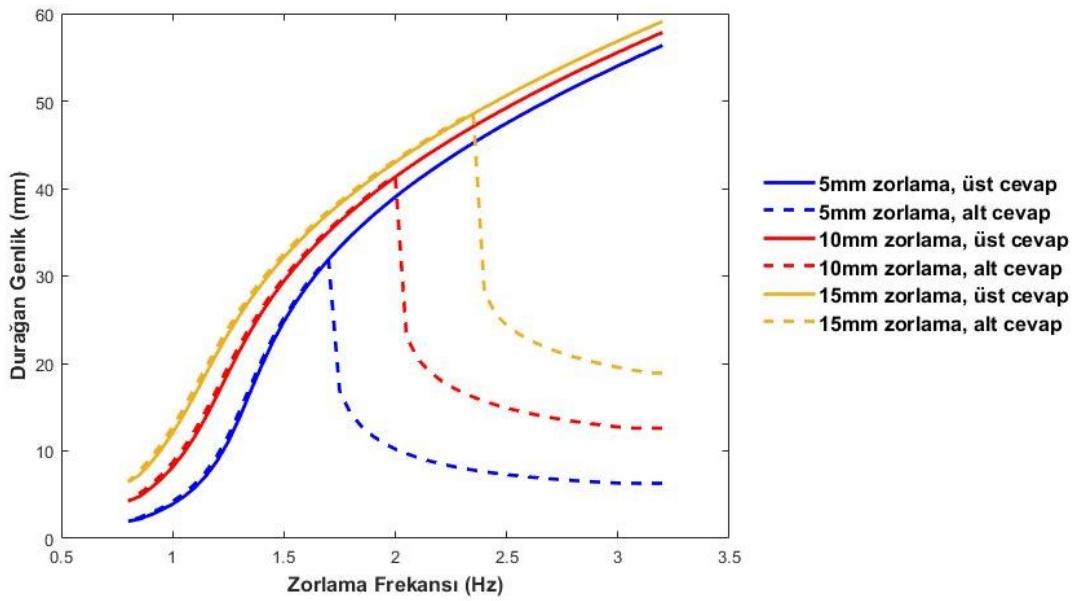
Bir diğer uygulama örneği ise ayarlanmış sıvı sönümleyicilerdir. Bu sönümleyiciler iki dala ayrılabilir: ayarlanmış çalkanan sönümleyiciler ve ayarlanmış sıvı sütun sönümleyiciler. Çalkanan sönümleyiciler bir kap içerisindeki sıvının harmonik zorlama altında çalkalanmasından doğan atalet kuvvetleri prensibine dayanır. Çok geniş bir araştırma alanı olmakla beraber, üzerine sayısal ve deneysel bir çok çalışma mevcuttur [15], [16]. Bu sönümleyicilerin doğal frekansı içerisinde buldukları kabın geometrisiyle ve su yüksekliğiyle ayarlanabilmektedir ve sivil yapıların yanında uydular ve deniz taşıtlarında da kullanımları vardır. Uygulama örneklerinden biri Japonya, Kagawa'daki Gold Tower'dır. Yaklaşık 10 ton ağırlığında su barındıran çalkanan sönümleyiciler yapının sönümsüz yanıtına oranla %50'e varan azalım sağlamışlardır [10]. Ayarlanmış sıvı sütun sönümleyiciler ise dikdörtgen, "U" harfi biçiminde rijit bir kap içerisinde bulunan suyun çalkalanmasıyla benzer işlevleri yerine getirir. Bu sönümleyicilerin performansları ve optimizasyonları üzerine literatürde bir çok çalışma bulunabilir [17]–[19]. Shanghai World Financial Center'da kullanılan 800 ton ağırlığındaki sıvı sütun sönümleyici biricil yapının %1 kütle oranında çalışmaktadır ve ISO standartlarına uygun şekilde bina üzerindeki ivme ve gerinimleri kabul edilebilir seviyelere indirgemıştır [10].

## **1.2 Doğrusal Olmayan Titreşim Sönümleyicilerin Doğrusal Titreşim Sönümleyicilerden Farkı**

Doğrusal olmayan enerji yutucular en temelinde, doğrusal olmayan direngenlik elemanına sahip titreşim sönümleyicilerdir. Doğrusal ve tek serbestlik dereceli bir sistemin tek bir doğal frekansı vardır. Fakat direngenlik elemanının doğrusal olmayan biçimde olması, sistemin doğal frekansını sisteme verilen girdi genliğine bağlı duruma

getirir. Ve sistem cevabında “atlama” görülür. Bu atlamadan sonra, başlangıç koşullarına bağlı sistemin iki yatışkın durum cevabı vardır. Sistem bileşenlerinin özelliğine göre, görülen bu iki cevap daha sonra tek bir cevaba düşebilir.

Sistem cevabındaki atlama, sistemin zorlandığı girdi genliğine göre farklı frekanslarda görülebilir. Bu tezde incelenen doğrusal olmayan davranışta girdi genliği arttıkça atlama daha yüksek frekanslarda görülmeye başlanır. Yüksek girdi genlikli çözüm için sistemin başlangıç koşullarının sıfırdan farklı olması gerekmektedir. Bunun için, sistem bir önceki frekans cevabından harekete başlayabilir veya düşük girdi genlikteki cevabındayken sisteme dışarıdan bir kuvvet girdisi verilebilir. Böylece sistem yüksek genlikli cevabına zıplayacaktır ve yatışkın durum olarak bu genlikte hareketine devam edecektir. Şekil 1.1’de üç farklı girdi genlikleri için tek serbestlik dereceli doğrusal olmayan sistemin cevabı verilmiştir.



Şekil 1.1 : Zorlama genliğine göre doğrusal olmayan sistemin cevabı.

Şekil 1.1’de görüldüğü üzere sistem üç farklı girdi genliği için üç farklı dinamik cevap vermektedir. Alt ve üst cevabın birbirinden ayrıldığı frekans, sistemin atlama yaptığı frekans değeridir. Belli bir girdi genliği için, bu frekansın altında kalan frekanslarda sistemin daima tek bir cevabı vardır. Bu atlama frekansı girdi genliği arttıkça yüksek frekanslara kaymaktadır, dolayısıyla sistemin tek bir cevabının olduğu frekans aralığı artmaktadır.

Bilindiği üzere, doğrusal tek serbestlik dereceli sistemlerin tek bir rezonans frekansı olur ve bu rezonans frekansından sonra sistem cevabı sifıra yaklaşır. Bu durum ayarlanmış kütle sönümleyicilerin ayarlanmasını zor kılabilir. Özellikle sönümlenmek istenen yapının özellikleri zamanla değişebilir nitelikteyse, ayarlanmış kütle sönümleyicinin zamanla verimi düşecektir. Bu durumlarda, doğrusal olmayan enerji yutucuların geniş frekans spektrumu bu probleme çözüm olabilir. Frekans ayarlama işlemi dikkatle yapılmamış, birincil sistemin yapısal özellikleri değişmiş olsa da doğrusal olmayan enerji yutucu bu duruma adapte olabilir ve görece yüksek verimle titreşimi sönümleyebilir.

### **1.3 Doğrusal Olmayan Titreşim Sönümleyiciler ve Yapı Etkileşimi Üzerine**

#### **Yapılan Deneysel Çalışmalar**

Günümüz bina titreşimi sönümlemekte kullanılan çoğu titreşim sönümleyici doğrusal kabul edilebilir. Bu titreşim sönümleyiciler bağlı oldukları yapıya fazladan kütle katmaktadır. Bu yüzden deprem gibi dış etkilere maruz kalabilecek yapılarda, tasarımcılar ve mühendisler yapının toplam kütle oranını azaltma arayışındadırlar. Doğrusal olmayan titreşim sönümleyiciler doğrusal titreşim sönümleyicilere kıyasla daha küçük kütle oranlarında tasarlanabilir. Ayrıca geniş bir frekans spektrumunda sönüm kabiliyetlerinden dolayı, deprem gibi tek bir frekansta sabit olmayan, rastgele sismik girdilere karşı etkilidirler [20]. Bu gibi durumlarda birincil yapıdaki kinetik enerji tek yönlü olarak doğrusal olmayan titreşim sönümleyiciye aktarılır ve sönüm elemanları yardımıyla, aktarılan bu enerji sistemden dışarı atılır [21–23].

E. Gourdon ve ark.'nın yaptığı çalışmada doğrusal olmayan titreşim sönümleyici monte edilen birincil binanın yarı periyodik cevapları ve deprem girdisine karşı performansları incelenmiştir [20]. Sayısal ve deneysel çalışmalarda birincil bina ile doğrusal olmayan sönümleyicinin kütle oranı % 10'dur. Tasarımda doğrusal olmayan direngenlik elemanı olarak sönümleyici kütlelenin hareket eksenine dik olarak monte edilmiş iki adet yay kullanılmıştır.

Ayrıca, çalışmada yarı periyodik yatışkın cevap için gereken sönüm oranı kaydedilmiştir. Bu sönüm oranının altında birincil bina periyodik zorlama altında yarı periyodik yatışkın cevap vermektedir. Bu doğrusal olmayan sönümleyicinin performansı için kritik bir durumdur. Periyodik zorlama altında sistemin yarı periyodik

cevap vermesi enerjinin hangi koşullar altında tek yönlü olarak sönümleyiciye aktarılacağını göstermektedir.

Çalışmanın deneysel incelenmesinde birincil binanın doğal frekansı 4.65 Hz olarak ayarlanmıştır ve gerçek deprem girdisi uygulanan birincil binanın yer değiştirmesinde yaklaşık % 85 azalım kaydedilmiştir.

Bir başka çalışmada F.B. Sayyad ve N.D. Gadhve birincil yapı olarak desteklenmiş kiriş üzerinde manyetik ayarlanmış kütle sönümleyicinin performansını incelemiştir [24]. Direngenlik olarak mıknatıs itki kuvveti kullanılmıştır. Kirişin ilk üç doğal frekansı sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiştir.

Manyetik titreşim sönümleyicinin doğal frekansı doğrusal direngenlik katsayısından benzetilmiştir. Bu doğal frekans benzetiminden mıknatıslar arası uzaklığa göre değişen doğal frekans eğrisi grafike edilmiş ve titreşim sönümleyici bu eğri üzerinden ayarlanmıştır. Birincil yapının birinci doğal frekansının 0.8 ila 1.2 katı arasında performans sergilemesi planlanan manyetik titreşim sönümleyici, alt sınıra, yani birincil yapının doğal frekansının 0.8 katı civarına ayarlanmıştır.

Titreşim sönümleyici uygulanmadan önceki doğal frekans çevresinde %90'a varan gerinim azalımı görülmüştür. Buna ek olarak, araştırmacılar çalışmada kütle oranının önemli bir faktör olduğunu vurgulamışlardır.

J. Wang ve ark.'nın çalışmasında ise iki katlı bir bina modeli üzerine, dairesel yataklarda hareket edebilen araba şeklinde kütle konulmuştur [25]. Çalışmada birincil yapının doğal frekansları 1.63 Hz ve 4.56 Hz olarak ölçülmüştür. İki kat toplamda 48.5 kg ağırlığındadır. Titreşim sönümleyici olarak monte edilen araba ise 2.425 kg olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu sayı birincil yapının kütesinin %5'ine denk gelmektedir.

Yapıya deneysel olarak impuls tipi ve sismik tipi girdi uygulanmıştır. Farklı genliklerde uygulanan bu zorlamalar sonrası RMS ivme ve RMS yer değiştirme kaydedilmiştir. Düşük genlikte zorlamalarda, kaydedilen bu değerlerde sırasıyla %22 ve %39 civarında düşme olurken, yüksek genlik zorlamalarda bu oranlar %42 ve %54 olmaktadır. Çalışmanın izleyen bölümünde sisteme 10 farklı sismik deprem verisi uygulanmıştır ve %80'e varan titreşim azalımı elde edilmiştir.

#### 1.4 Manyetik Doğrusal Olmayan Enerji Yutucular Üzerine Yapılan Çalışmalar

Doğrusal olmayan enerji yutucular kaotik yapıları gereği sayısal olarak incelenmesi zor mekanik sistemlerdir. Bir başka zorluk ise sistemde kullanılacak doğrusal olmayan direngenlik elemanıdır. Pratikte kullanılan çoğu direngenlik elemanı, yüksek gerinimler altında doğrusal olmayan davranış sergileyebilir, fakat sistem cevabında atlama görülebilmesi için direngenlik elemanının çalışma gerinimlerinde yüksek derecede doğrusal olmayan özellikte olması gerekmektedir.

Bu doğrultuda Yamakawa ve ark. 1977'de, yeni bir dinamik titreşim sönümleyici başlığı altında üç mıknatıstan oluşan bir tasarım sunmuşlardır [26]. Tasarımda, iki mıknatıs karşılıklı sabit iken ortalarında hareketli tek bir mıknatıs vardır. Hareketli mıknatıs diğer iki mıknatısın itki kuvveti altında sabit kalmaktadır. Mıknatıs olarak artık akı yoğunluğu 0.86 Tesla olan nadir toprak Kobalt mıknatısları kullanmışlardır. İtke kuvveti modellenmesi için deneysel mıknatıslardan elde edilen deneysel veri en küçük kareler yöntemi ile incelenmiştir ve Denklem (1.1) ile modellenmiştir.

$$F(x) = kx^{-n} \quad (1.1)$$

Burada  $x$  mıknatısların merkezleri arası uzaklıktır.  $k$  ve  $n$  ise en küçük kareler yönteminden elde edilen katsayılarıdır. Ardından bu itki kuvvetinden doğan kuvvet farkı 3. derece Taylor Serisi yardımıyla açılmış ve tüm sistem 3. derece Duffing tipi geri döndürme kuvvetiyle modellenmiştir. Bu geri döndürücü kuvvet Denklem (1.2)'de verilmiştir. Elde edilen analitik bağıntılar ayrıca geliştirilen analog bilgisayar devresiyle teyit edilmiştir.

$$F(x) - F(y) = -\bar{\alpha}_0 z - \bar{\gamma}_0 z^3 \quad (1.1)$$

Burada  $z$  hareketli mıknatısın yer değiştirmesidir.  $x$  ve  $y$  hareketli mıknatısın diğer iki sabit mıknatısa olan uzaklığıdır.  $\bar{\alpha}_0$  ve  $\bar{\gamma}_0$  Duffing tipi direngenlik katsayılarıdır. Sönüm elemanı olarak, tasarımının çeperlerini elektrik iletkenliği olan ama manyetik olmayan alüminyumdan yapmışlardır. Böylece, mıknatıs dinamik davranış sergilerken Lenz kanunlarında göre eddy akımları oluşmakta ve hareket sönümlenmektedir.

Sönüm arttıkça sistem doğrusal olmayan özelliğini yitirebilmektedir ve sistem cevabındaki atlama olayı azalmaktadır.

Yazarlar elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda, titreşim sönümleyicinin tasarlanırken atlama bölgesinin birincil yapının rezonans frekansının üzerinde kalması gerektiğini belirtmişlerdir. Sabit mıknatıslar arası uzaklık ayarlanarak atlama frekansı rahatlıkla değiştirilebilmektedir.

S. Igarasi ve ark.'nın yaptığı çalışmada da benzer şekilde sertliğini birbirini iten mıknatıslardan alan tasarım incelenmiştir [27], [28]. Çalışmada Yamakawa ve ark.'nın çalışmasına benzer şekilde nadir toprak Kobalt mıknatıslar kullanılmıştır ve itki kuvveti aynı yöntemlerle modellenmiştir.

Çalışmada sabit mıknatıslardan biri step motor yardımıyla eylenebilir şekilde tasarlanmıştır. Doğrusal olmayan titreşim sönümleyici için doğrusal sistem doğal frekansı varsayımı yapılmış ve mıknatıslar arası uzaklık ile doğal frekansın nasıl değiştiğine bakılmıştır. Bu varsayımla öngörülen doğal frekans deneysel çalışmada elde edilen doğal frekanslar geniş bir aralıkta tutarlıdır.

Araştırmacılar daha sonra birincil yapıya monte edilen titreşim sönümleyicinin performansını incelemişlerdir. Burada birincil yapının doğal frekansı 33.4 Hz'dir ve titreşim sönümleyicinin kütle oranı yaklaşık %7.6'dır. Çalışmada mıknatıslar arası uzaklığın ayarlanmasında deneme-yanılma algoritması çıkarılmıştır ve küçük genlikteki zorlamalar için doğrusal itki kuvveti yaklaşımının uygulanabilirliği doğrulanmıştır.

Mıknatıslardan oluşan bir başka tasarım ise Al-Shudeifat tarafından incelenmiştir [3]. Bu tasarımda geri döndürücü sağlayan mıknatıslardan bir taraf daha güçlü mıknatıslardan oluşmaktadır. Asimetrik yapıdaki bu tasarım birincil yapının şok azaltımında artırılmış performans vermektedir.

Çalışma nümerik olarak yapılmış ve düşük sönümle beraber % 5 kütle oranı kullanılmıştır. Sayısal analizlere göre normal bir doğrusal olmayan titreşim sönümleyiciye göre, birincil yapıya uygulanan impuls altında %30'a varan performans artışı elde edilmiştir.

S. Benacchio ve ark. ise 2016'da silindirik mıknatıslardan oluşan ve sertliği farklı şekillerde ayarlanabilen bir tasarım yayınlamışlardır [29]. Tasarımda dinamik hareket

eksenin paralel iki adet mıknatıs serisi bulunmaktadır. Bu paralel mıknatıs serilerinin, dinamik hareket gösteren mıknatısa uzaklıkları ayarlanarak doğrusal direngenlik katsayısı çok düşük seviyelere indirilebilmektedir.

Ayrıca silindirik mıknatısların multipol açılımı yardımıyla teorik olarak modellenmesi yapılmıştır ve itki kuvveti ile paralel mıknatıs serilerinden gelen düzeltici kuvvet beşinci derece polinom olarak modellenmiştir.

Tasarlanan düzenek deneysel olarak, doğrusal olmayan ayarlanmış titreşim sönümleyici, doğrusal olmayan enerji yutucu ve yarı kararlı yutucu olarak üç kategoride incelenmiştir. Modellenen sistemde, beşinci derece polinom benzetimi yapılan direngenlik kuvvetinin birinci derece terimi, yani doğrusal varsayımı yapılan terim sıfırdan büyükse doğrusal olmayan ayarlanmış titreşim sönümleyici, sıfırdan büyük ama sıfıra yakınsa doğrusal olmayan enerji yutucu, eğer sıfırdan küçükse yarı kararlı yutucu teyit edilmiştir.

### **1.5 Literatür Sonuçları ve Çalışmada İzlenecek Yol**

Literatür araştırması sonucunda görülmüştür ki mıknatıslarla doğrusal olmayan direngenlik kazandırılmış titreşim sönümleyici kullanılarak sönümlenmek istenen bina yanıtında etkili iyileştirmeler görülebilmektedir ve mıknatıs boyutları, mıknatıslar arası uzaklık değiştirilerek titreşim sönümleyicinin doğal frekansı geniş frekans aralıklarında değiştirilebilmektedir. Manyetik titreşim sönümleyici üzerine yapılan çalışmalar genelde küçük kütle seviyesindedir ve hedeflenen frekans ile sönümlenmek istenen yapının doğal frekansı 20-30 Hz gibi yüksek bir seviyededir. Ayrıca kütle seviyesi, sönüm oranı, birincil yapıya uygulanan zorlama seviyesi gibi etkenlerin sönümleyici performansını nasıl etkilediği üzerine deneysel çalışılmamıştır.

Bu çalışmada ise sönüm hedeflenen frekans değerleri 2.7 Hz ve 3.0 Hz gibi literatür çalışmalarına kıyasla küçük değerlerdir. Bu frekanslarda Yamakawa ve ark. [26] çalışmalarında bahsettiği gibi titreşim sönümleyici üzerine rezonans görülen en küçük frekans değeri sönümü istenen birincil yapıya göre ayarlanacaktır. Yapı doğal frekanslarından biri bu frekans değerinde iken diğer yapının doğal frekansı bu değerinde üstünde kalacaktır. Yapılacak sinüs zorlama deneylerinde iki farklı ayarlama yapılarının yanıtları ve manyetik titreşim sönümleyicinin periyodik zorlama

altında performansı incelenecektir. Aynı zamanda kütle oranı ve sönüm seviyesinin bu yanıtları nasıl etkilediğine bakılacaktır. Ardından farklı deprem girdileri üzerinden çeşitli deneyler yapılacaktır. Bu deneylerde kullanılan deprem girdileri iki yapı modelinde doğal frekansına yakın baskın frekanslar içermektedir. Bu iki deprem zorlaması üzerinden manyetik titreşim sönümleyicinin sistemin RMS ve maksimum değerlerini iyileştirip iyileştirmediği incelenecektir. Manyetik titreşim sönümleyicinin zorlama genliğine bağlı davranışının deprem şiddetine göre iyileştirme performansını nasıl etkilediğine bakılacaktır. Bu deneylerde sinüs deneylerine benzer şekilde farklı kütle ve sönüm oranlarında yapılacak olup, bu parametrelerin manyetik titreşim sönümleyicinin iyileştirme performansını nasıl etkilediği incelenecektir.





## **2. TEK SERBESTLİK DERECELİ DOĞRUSAL OLMAYAN SÖNÜMLEYİCİNİN ANALİTİK VE SAYISAL BENZETİMİ**

Çalışmada sayısal analizlerin yapılabilmesi için sistemde kullanılacak mıknatısların itme kuvveti altında nasıl bir kuvvet eğrisi oluşturdukları bilinmelidir. Bu bölümde, ilk olarak bu kuvvetin elde edilmesi için tasarlanan deney düzeneği anlatılacak ve sonuçları verilecektir. İzleyen bölümde ise elde edilen itki kuvveti eğrisi yardımıyla tek serbestlik dereceli doğrusal olmayan sönümleyici ‘Tanımlayıcı Fonksiyonlar’ (Describing Functions) yardımı ile analitik olarak incelenecektir. Ardından COMSOL programında mıknatıslar arası kuvvet Maxwell Gerilim Tensörü ile sayısal olarak elde edilip, çözdürülen sonuçlar analitik sonuçlarla karşılaştırılacaktır.

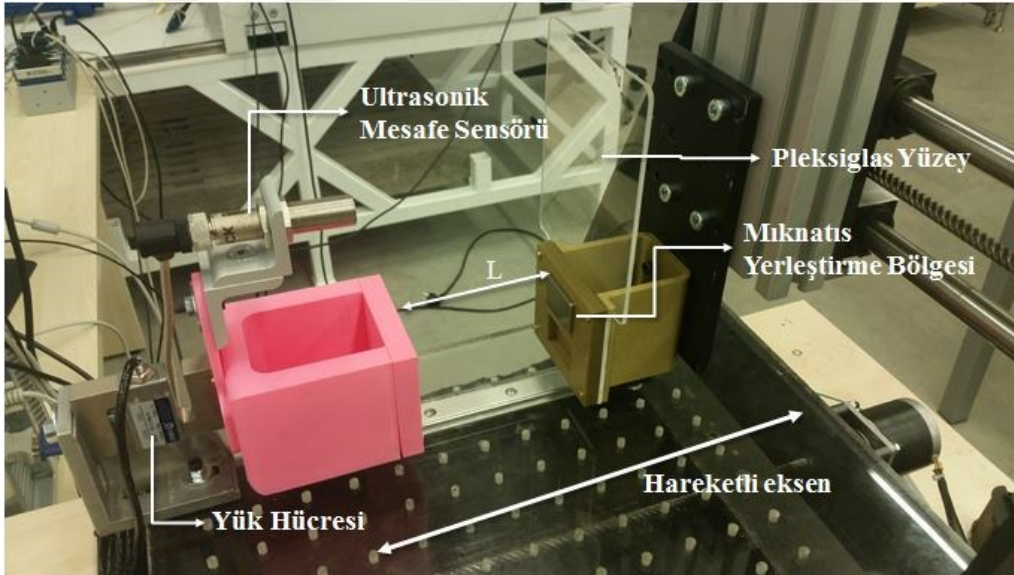
### **2.1 Mıknatıs İtme Kuvveti Deneyi ve Sonuçları**

Manyetik titreşim sönümleyicilerde direngelik sağlayan mıknatıs itme kuvvetinin, yakın mesafelerde analitik olarak hesaplanması yüksek hata paylarıyla sonuçlanmaktadır. Literatürde olan eşitlikler genelde silindirik mıknatıslar için tutarlı olsalar da, kuvvet eğrisini prizmatik mıknatıslar için analitik olarak elde etmek çok zordur. Bu problemin aşılması amacıyla çeşitli prizmatik mıknatıs kombinasyonlarının itme kuvvetinin ölçülebilmesi için deney düzeneğine ihtiyaç duyulmuştur. Mıknatıslar küçük adımlarla veya sürekli olarak birbirine yaklaştırılması ve uzaklık verisi ile kuvvet verisi eş zamanlı kaydedilmelidir. Bu amaca uygun bir deney sistemi hazırlanmıştır. Deney düzeneği Resim 2.1’de görülebilir.

Düzeneğin temel bileşeni olarak iki eksenli bir platform kullanıldı. Her bir eksen Japan Servo Co. LTD. şirketinin KP6M2-001 model step motorlarıyla kontrol edilmektedir. Step motora vida adımı 5 mm olan vidalı mil takılıdır. Düzeneğin bir eksenini ray ve araba sistemiyle sabitlemiş olup, araba ray üzerinde diğer eksen üzerinde hareket edecek şekilde yerleştirildi. Mıknatısların yerleştirileceği parçalar üç boyutlu yazıcı yardımıyla üretildi ve en fazla dört tane mıknatısın yerleştirilebileceği şekilde

tasarlandı. Hareketli mıknatısı tutan parçanın arkasına, itki kuvvetini ölçmek üzere, ZEMIC firmasının H3-C3-50kg-3b model yük hücresi yerleştirildi. İki mıknatıs arası mesafeyi ölçmek üzere ise bir adet SENSICK, UM 18-11116 ultrasonik mesafe algılayıcısı kullanıldı. İtki kuvveti ölçülürken mıknatıslar arası en uzun mesafe 110 mm en kısa mesafe ise 4 mm olacaktır. Bu mesafe aralığında ultrasonik mesafe algılayıcısının optimum sonuç vermesi için, ultrasonik dalganın yansıtacağı, 3 mm kalınlıkta 90x90 mm pleksiglas levha kesildi. Tüm sensörlerin manyetik alandan etkilenmemesine dikkat edildi.

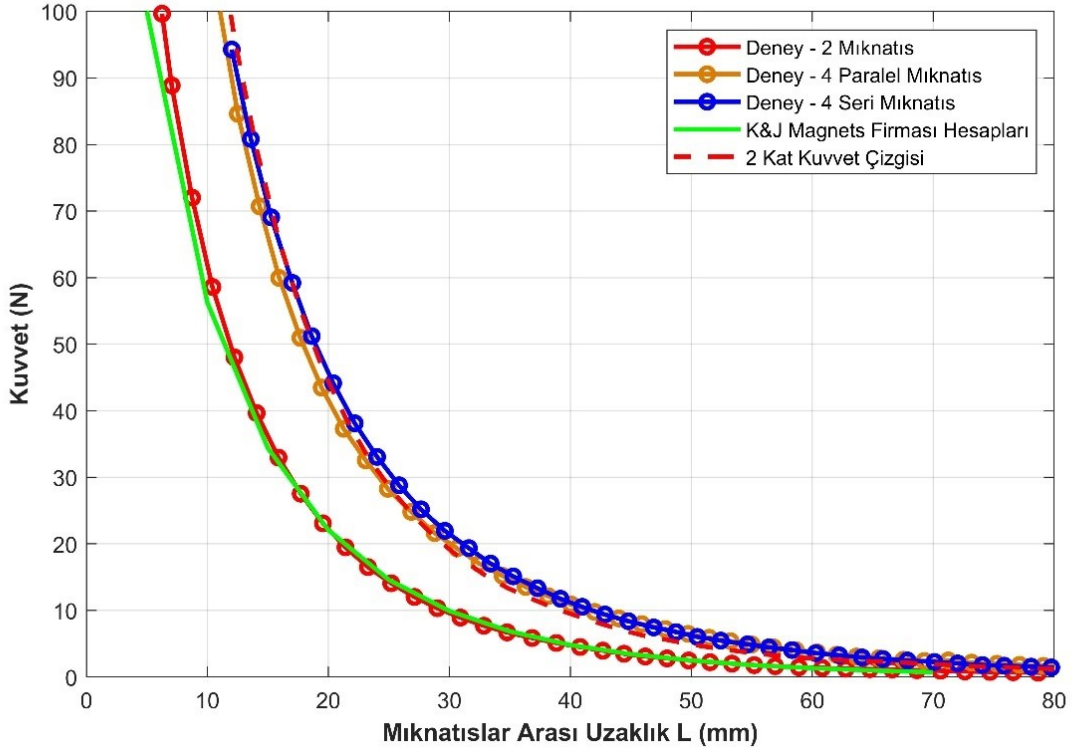
Step motor Arduino mikrokontrolcü aracılığıyla kontrol edildi. Ultrasonik mesafe algılayıcı ve yük hücresinin sinyalleri National Instruments firmasının NI 9237 ve NI 9203 modülleri yardımıyla LABVIEW yazılımıyla işlendi. Veri işleme modülleri Bölüm 3’de daha ayrıntılı olarak anlatılacaktır.



Resim 2.1 : Uzaklığa göre mıknatıs kuvvetinin ölçümü için hazırlanan deney düzeneği.

Arduino hareketli eksene bağlı step motoru her bir veri noktası için 2 mm oynatmaktadır. Sistem bu veri noktasında 4 saniye beklemektedir. Bu 4 saniye süresince ultrasonik mesafe sensörü ve yük hücresi devamlı biçimde veri toplar. Daha sonra bu verilerin ortalaması alınarak belli bir mıknatıs arası uzaklığa denk gelen mıknatıs itki kuvveti kaydedilir.

Deneyde 40 mm x 25 mm x 10 mm ölçülerinde, N42 sınıfı mıknatıslar kullanılmıştır. Bir çift mıknatısın itki gücünün yanında, yan yana ayrı konulan ve birleştirilen iki çift mıknatısın da itki kuvvetine bakıldı. Bunun sebebi mıknatıs sayısı iki katına çıkarıldığında elde edilen kuvvet eğrisinin de iki katına çıkıp çıkmadığını görmektir. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 : Mıknatıs arası mesafe-İtki kuvveti deneyi sonuçları.

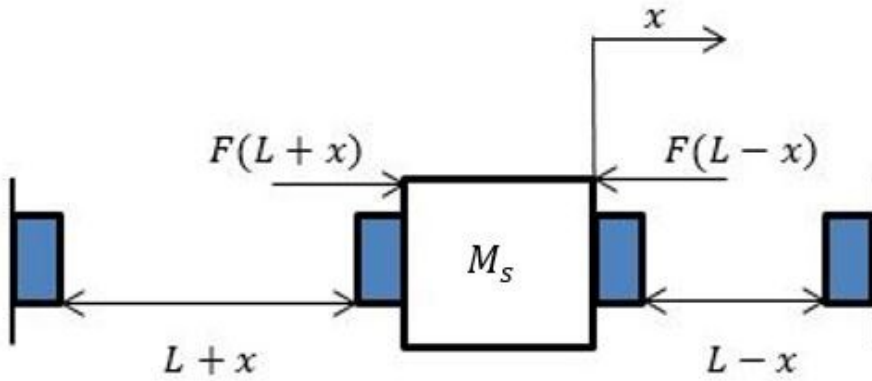
Görüldüğü gibi deneyden elde edilen itki kuvveti sonuçları mıknatıs sağlayıcı firmanın deneysel sonuçlarıyla 10 mm yakınlığa kadar tutarlıdır. Ayrıca mıknatıs sayısı iki katına çıkarıldığında kuvvet eğrisi de orantılı biçimde yaklaşık iki katına çıkmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda dört mıknatıslı düzeneğin kullanılmasının gerekenden fazla direngenlik yaratacağı görüldü, bu yüzden yapılan benzetimlerde ve deneylerde iki mıknatısın birbirine etkilediği itki kuvveti eğrisi kullanılacaktır.

Deneyde yaklaşık 10.5 kg yük üzeri ölçülemedi, bunun sebebi bu yük aşıldığında seçilen step motorun gücünün yetersiz olmasıdır. Fakat bu üst sınır ve elde edilen veri noktaları direngenlik eğrisi için yeterli görüldü.

## 2.2 Tek Serbestlik Dereceli Doğrusal Olmayan Sönümleyicinin Analitik

### Benzetimi

Tek serbestlik dereceli sistemin analitik olarak benzetilebilmesi için Şekil 3.1’de elde edilen mıknatıslar arası itki kuvvetinin direngenlik eğrisi oluşturulmalı ve elde edilen eğrinin analitik bağıntısı elde edilmelidir. Sistem birbirine itki kuvveti uygulayan dört mıknatıstan oluştuğu için, toplam kuvvet eğrisini, birbirinin orjine göre simetrisi olan iki eğrinin toplamı gibi düşünülebilir.

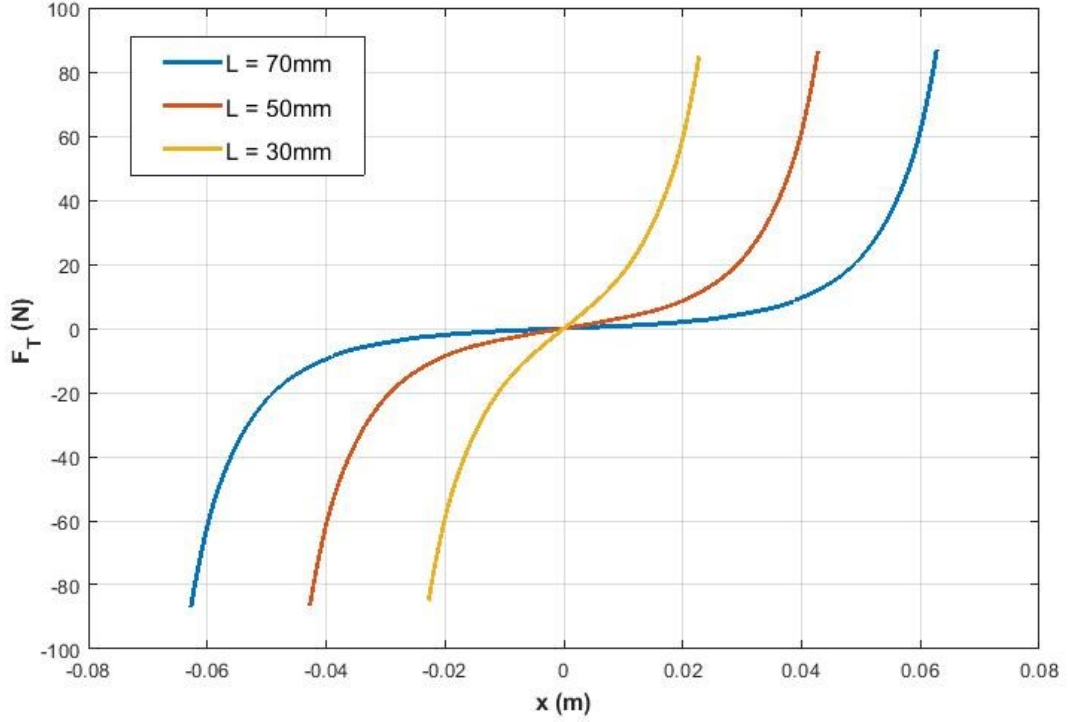


Şekil 2.2 : Mıknatıslarla direngenlik verilmiş  $M$  kütlesi ve konum  $x$ 'e göre üzerine etki eden kuvvetler.

Şekil 2.2’de,  $M_s$  kütlesinin denge noktasından  $x$  mesafe saptıkça üzerine etki eden kuvvetler verilmiştir. Bu kuvvetler mıknatıslar arası sabit uzaklık  $L$  ve  $x$ 'in bir fonksiyonudur ve herhangi sabit bir  $L$  için, kütleye etki eden toplam direngen kuvvet  $F_T$ ;

$$F_T(x) = F(L - x) + F(L + x) \quad (2.1)$$

Mıknatısların özdeş olduğu ve her bir mıknatıs çiftinin aynı kuvvet eğrisine sahip olduğu varsayımıyla toplam kuvvet ve direngenlik eğrisi bulunabilir. Bu varsayımla, deneyden elde edilen statik kuvvet eğrisi,  $M_s$  kütlesinin denge konumundan olan  $x$  koordinatına göre işlenmiştir ve Şekil 2.3’teki direngenlik eğri örnekleri, ayarlanan mıknatıslar arası uzaklık  $L$ 'ye göre elde edilmiştir.

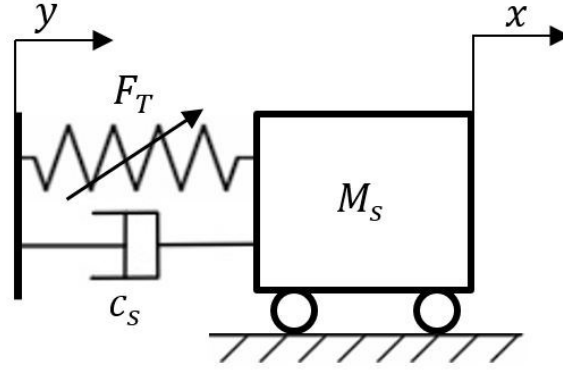


Şekil 2.3 : Mıknatıslar arası uzaklık  $L$ 'ye göre direngenlik eğrileri.

Şekil 2.3'te beklendiği üzere  $L$  arttıkça direngenlik eğrisinin doğrusal olmayan özellikleri artmaktadır. Benzer şekilde, mıknatıslar birbirine yaklaştırıldıkça direngenlik doğrusallaşmaktadır. Elde edilen bu direngenlik eğrileri incelenerek sistemin dinamik cevabı bulunabilir. Bu amaçla MATLAB programının Eğri Uydurma (Curve Fitting) arayüzü yardımıyla eğrileri mümkün olduğunca en iyi biçimde tanımlayacak fonksiyonlara bakıldı. Bu bağlamda, hem çalışma uzaklıklarında tutarlı sonuç vermesi hem de analitik benzetimde kolaylık sağlaması açısından beşinci derece polinom yaklaşımı uygun görüldü. Fakat, beşinci derece polinom yaklaşımı kuvvet eğrisinin tamamında tutarlı olmamaktadır. Bu yüzden verilerden gelen eğrinin % 80'i kullanılmıştır. Beşinci derece polinom olarak  $F_T$  aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$F_T(x) = cs_5x^5 + cs_3x^3 + kx \quad (2.2)$$

Yukarıda denklemleri verilen toplam mıknatıs kuvveti  $F_T$ , tek bir yay olarak benzetilebilir. Sistemdeki viskoz sürtünme ve zorlama genliği de düşünülerek Şekil 2.4'teki benzetim yapılabilir.



Şekil 2.4 : Kütle, yay, viskoz sönümleyici ve konum zorlaması benzetimli sistem.

Şekil 2.4'teki benzetim yapıldığında, toplam mıknatıs kuvveti  $F_T$  Denklem (2.3)'teki formu alır ve onunla beraber sistemin dinamik hareket denklemi Denklem (2.4)'teki gibi yazılabilir.

$$F_T(y, x) = cs_5(x - y)^5 + cs_3(x - y)^3 + k(x - y) \quad (2.3)$$

$$M_S\ddot{x} + c_s(\dot{x} - \dot{y}) + cs_5(x - y)^5 + cs_3(x - y)^3 + k(x - y) = 0 \quad (2.4)$$

Bu aşamada çözüme daha kolay yoldan ulaşmak için yeni bir konum değişkeni tanımlanır. Bu konum değişkeni kütle  $M_S$ 'in yer değiştirmesi  $x$ 'in ve zorlama girdisi  $y$ 'nin farkıdır. Tanımlanan yeni değişken ve türevleri Denklem (2.5a-b-c)'de verilmiştir. Bu dönüşümden sonra hareket denklemi Denklem (2.6)'daki halini alır.

$$z = x - y, \quad \dot{z} = \dot{x} - \dot{y}, \quad \ddot{z} = \ddot{x} - \ddot{y} \quad (2.5a-b-c)$$

$$M_S\ddot{z} + c_s\dot{z} + cs_5z^5 + cs_3z^3 + kz = -M_S\ddot{y} \quad (2.6)$$

Denklem (2.6)'daki hareket denkleminde, zorlamanın harmonik olduğu bilinmektedir. Bununla beraber, harmonik zorlama altındaki sistem cevabının ve doğrusal olmayan kuvvetlerin harmonik olacağı varsayımı yapılabilir. Sistemin tek serbest dereceli sistem olduğu da göz önünde bulundurulursa aşağıdaki bağlantılar yazılabilir:

$$y = Y e^{i\omega t}, \quad z = Z e^{i\omega t} \quad (2.7a-b)$$

Burada  $Y$  ve  $Z$ , zorlama ve doğrusal sistemin zorlama altındaki cevap genlikleridir.  $i$  birim karmaşık sayı,  $\omega$  zorlama frekansı,  $t$  ise zamandır. Denklem (2.7a-b), Denklem (2.6)'da yerine konur ve doğrusal olmayan terimler tek bir terim altında toplanırsa:

$$(-\omega^2 M_s + i\omega c_s + k) \cdot Z + G = \omega^2 M_s Y \quad (2.8)$$

Denklem (2.8)'de,  $G$  sistemin cevabına bağlıdır ve doğrusal olmayan iç kuvvetlerin tanımlayıcı fonksiyonlarla tanımlanmasından oluşur. Çok serbestlik dereceli sistemler için  $[G]$  olarak matris formatında yazılabilir ve “non-linearity matrix” olarak adlandırılır [30]. Tanımlayıcı fonksiyonlar ve çok serbestlik dereceli sistemlerde doğrusal olmayan bileşenler üzerine bir çok çalışma mevcuttur [30-34].  $[G]$  matrisi Tanrıku ve arkadaşları'de çok serbestlik dereceli sistemler için elde edilmiştir [31]. Tek serbestlik dereceli sistem için  $G$  aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$G = \Delta \cdot Z \quad (2.9)$$

Burada  $\Delta$ , doğrusal olmayan terimlerin harmonik tanımlayıcı fonksiyonlarından oluşmaktadır ve Denklem (2.10)'daki integralle elde edilebilir [35].

$$\Delta = \frac{i}{\pi Z} \int_0^{2\pi} [cs_5(Z \sin \varphi)^5 + cs_3(Z \sin \varphi)^3] d\varphi \quad (2.10)$$

Denklem (2.10)'daki integral hesaplanır ve Denklem (2.8)'de elde edilen  $G$  yerine konur ve gerekli düzenlemeler yapılır ve sistemdeki kuru sürtünmenin etkisi  $a$  katsayısı ile çözüme yansıtılmak istenilirse, sistem cevabı  $Z$  Denklem (2.11)'deki gibi yazılabilir.

$$Z = \frac{\omega^2 M_s Y}{-\omega^2 M_s + i\omega c_s + k + \frac{5}{8} c_{s_5} Z^4 + \frac{3}{4} c_{s_3} Z^2 + i \frac{4a}{\pi Z}} \quad (2.11)$$

Çözümün payda kısmında görüldüğü gibi,  $\Delta$  sistem cevabı  $Z$ 'nin bir fonksiyonudur, dolayısıyla çözümün kendisine bağlıdır. Bu durumda  $Z$ 'yi bulmak için iteratif bir çözüm yolu izlenebilir. Başlangıç değeri olarak doğrusal sistemin çözümü verilebilir ve bir sonraki iterasyonda hata değeri belli bir değer altına düşene kadar bu yol izlenir. Eğer belli bir frekans aralığında çalışılıyorsa, en düşük frekans değeri çözüldükten sonra, bulunan cevap bir sonraki frekans değeri için başlangıç koşulu olarak kullanılır. Böylece yüksek değerdeki çözümler bulunur. Düşük değerli çözümler için, frekans aralığındaki en yüksek değerdeki frekanstan çözüme başlanır. Ve yine aynı şekilde bir önceki frekansın çözümü başlangıç koşulu olarak kullanılarak çözüm bulunur.

Yukardaki yöntemle, mıknatıslar arası uzaklık  $L = 65$  mm, sönümleyici kütlesi  $M_s = 1$  kg, viskoz sönüm  $c_s = 0.5$  N.s/m,  $a = 0$  ve zorlama genliği  $Y = 4$  mm iken, 1 Hz – 3 Hz aralığında elde edilen örnek çözüm aşağıda anlatılacaktır.

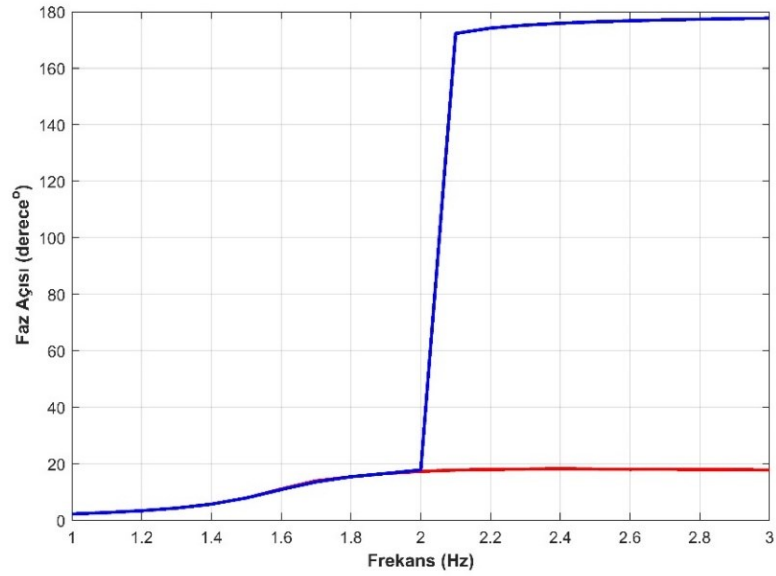
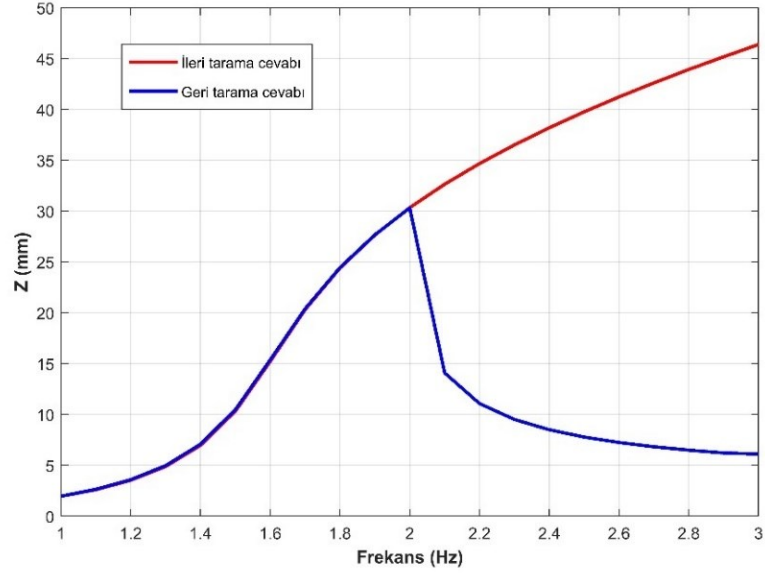
Öncelikle Bölüm 2.1'deki kuvvet deneyinden elde edilen veriler işlenir ve mıknatıs arası uzaklığın  $L = 65$  mm olduğunda direngenlik eğrisinin katsayıları eğri uydurma yöntemiyle bulunur. Elde edilen eğri Denklem (2.12)'de verilmiştir

$$F_T(x) = (7.84E7)x^5 + (2.33E4)x^3 + (120.2)x \quad (2.12)$$

Denklem (2.12)'de verilen eğri katsayıları Denklem (2.11)'de yerine konular ve belirlenen frekans aralığı için anlatıldığı gibi ileri ve geri tarama yapılarak iterasyon yolu izlenir.

Şekil 2.5'de örnek bir sistem için genlik çözümleri ve faz farkları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi örnek sistem 2 Hz zorlama frekansında atlama yapmaktadır ve bu değerden sonra iki farklı çözüm değerine sahiptir. Eğer 2 Hz'den yüksek bir zorlama frekansıyla, sistem yatışkın halden zorlanmaya başlarsa sistem çözümü daima mavi eğriye yakınsayacaktır. Sistemin kırmızı eğriye yakınsaması için, başlangıç koşulları sıfırdan farklı olabilir veya sistem mavi eğride yatışkın durumdayken, sisteme dışarıdan kuvvet uygulanabilir.





Şekil 2.5 :  $L = 65$  mm,  $Y = 4$  mm,  $M_s = 1$  kg,  $c_s = 0.5$  N.s/m iken tek serbestlik dereceli sistemin cevabı ve faz farkı.

Faz farkına bakıldığında ise, atlama sonrasında mavi eğri zorlama girdisinin  $180^\circ$  gerisine düşmektedir. Bu davranış doğrusal sistemlere benzerdir. Fakat sistemin üst değer çözümü kırmızı eğri  $20^\circ$  gibi düşük bir değerde sabitlenmektedir. Bu nedenle, sistem kırmızı eğri üzerindeki her değerde rezonansda benzetimi yapılabilir. Sönümleyici olarak kullanmak istenen doğrusal olmayan sönümleyicinin geniş sönüm aralığı bu eğriden doğmaktadır.

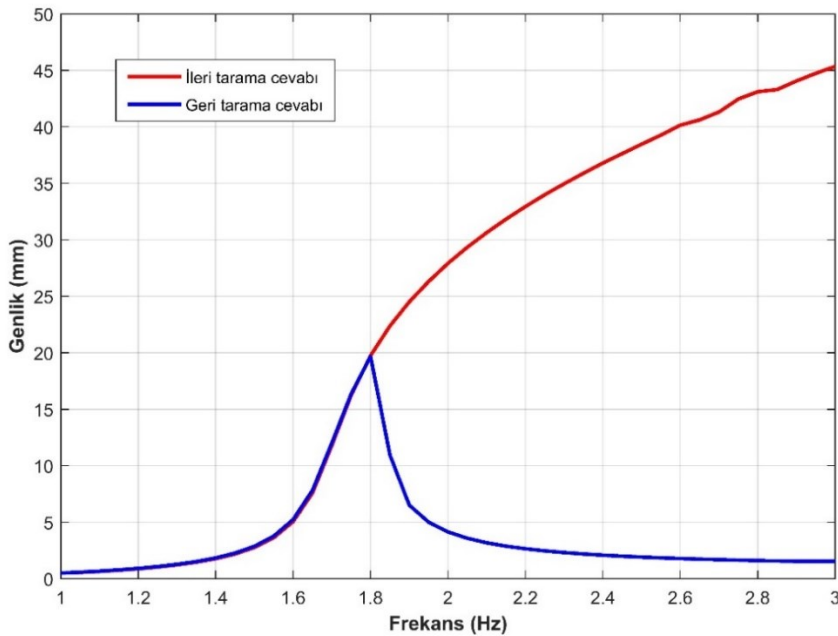
Ayrıca, düşük genlik zorlamalarda sistemin doğrusal tanımlanan kısmı baskın olduğu için, doğrusal bileşenlerden doğrusal sistemlerdekiyle özdeş bir sönüm oranı tanımlanabilir. Bu değer doğrusal sistem için Denklem (2.13)'de verilmiştir.

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{kM_s}} = 0.023 \quad (2.13)$$

Aynı benzetim yöntemiyle sistemin düşük genliklerdeki doğal frekansı ve rezonans tepesi de hesaplanabilir.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M_s}} = 10.95 \text{ rad/s}, \quad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = 1.74 \text{ Hz} \quad (2.14a-b)$$

Eğer sistemin sönüm katsayısı  $c_s = 0 \text{ N.s/m}$  alınır ve aynı sistem  $Y = 1 \text{ mm}$  ile düşük bir genlikle zorlanırsa Denklem (2.14b) hesaplanan doğal frekans değeri çevresinde sistemin rezonansı gözlenir. Şekil 2.6'da  $Y = 1 \text{ mm}$  zorlama genliğinde sönümsüz örnek sistemin genlik cevabı çizdirilmiştir.



Şekil 2.6 :  $L = 65 \text{ mm}$ ,  $Y = 1 \text{ mm}$ ,  $M_s = 1 \text{ kg}$ ,  $c_s = 0 \text{ N.s/m}$  iken tek serbestlik dereceli sistemin cevabı.

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi Denklem (2.14b)'de doğrusal yaklaşımla öngörülen doğal frekansında sistem geri taramada maksimum genliğe ulaşmaktadır. Bu frekans değerinden yüksek frekanslarda ileri tarama daha yüksek genlikler vermektedir. Ama 1.8 Hz'de başka bir çözümün olmadığı için, sistem bu frekans değerinde, başlangıç koşullarından bağımsız olarak tek bir yüksek yanıt verecektir.

Düşük genlikteki bu rezonans noktası, doğrusal olmayan sönümleyinin birincil binanın doğal frekansına ayarlanmasında önemli bir rol oynamaktadır [26]. Doğrusal yaklaşımlı bu ayarlama yöntemi daha sonra Bölüm 5'de deneysel olarak uygulanacaktır.

Yukarıda anlatılan iteratif çözüm yönteminin yanında, Özer[36] çalışmasında Sherman-Morrison ters matris yöntemi yardımıyla, doğrusal olmayan çok serbestlik dereceli sistemin cevabının kapalı formda da çözülebileceğini göstermiştir. Çalışma sonucunda elde edilen eşitlik, Şekil 2.4'teki tek serbestlik dereceli sistem için uygulanacak olursa aşağıdaki Denklem (2.15) elde edilir.

$$[1 + 2\Delta Re(\alpha) + \Delta^2 |\alpha|^2] |Z_{NL}|^2 = |Z_L|^2 \quad (2.15)$$

$Z_L$  doğrusal sistemin belirlenen zorlama altındaki doğrusal çözümüdür.  $Z_{NL}$  ise çözümü istenen doğrusal olmayan cevaptır. Burada  $\alpha$  sistemin doğrusal olarak tanımlanan kısmının reseptansıdır(receptance) ve Denklem (2.16)'daki gibi tanımlanır.

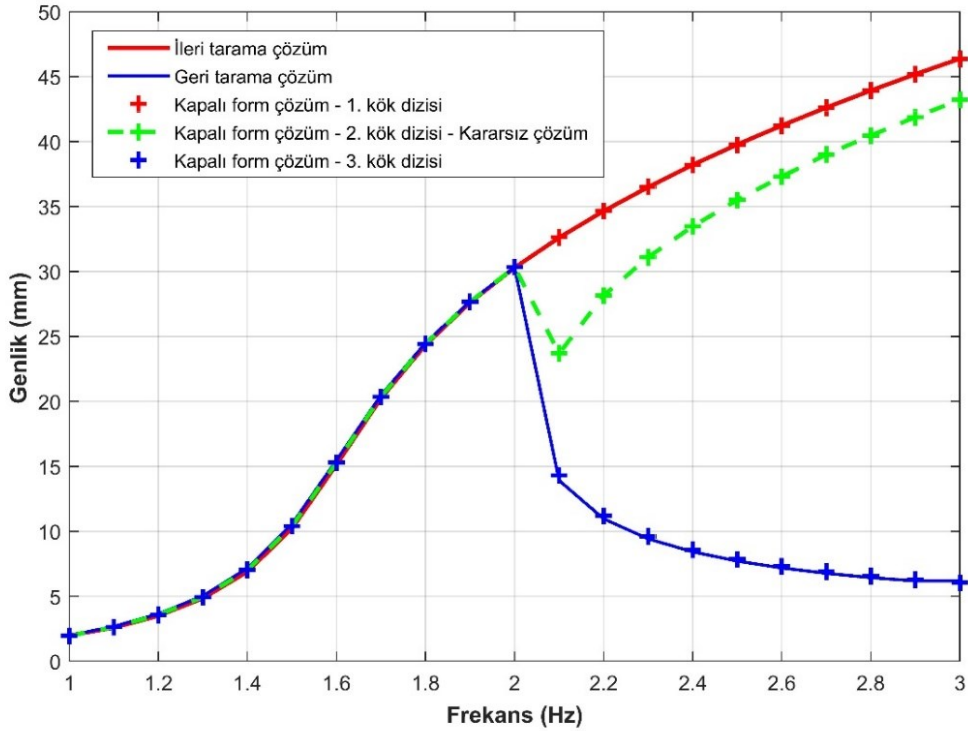
$$\alpha = (k - \omega^2 M_s + i\omega c)^{-1} \quad (2.16)$$

Gerekli cebirsel işlemler yapıldığında ve  $\Delta$  Denklem (2.10)'da elde edildiği gibi yerine konduğunda ve Denklem (2.17)'deki cebirsel benzetim yapılırsa Denklem (2.18) elde edilir.

$$t = |Z_{NL}|^2 \quad (2.17)$$

$$\left(\frac{5}{8}cs_5|\alpha|\right)^2 t^5 + \left(\frac{15}{16}cs_5cs_3|\alpha|^2\right)t^4 + \left(\frac{5}{4}cs_5Re(\alpha) + \left(\frac{3}{4}cs_3|\alpha|\right)^2\right)t^3 + \left(\frac{3}{2}cs_3Re(\alpha)\right)t^2 + t - |Z_L|^2 = 0 \quad (2.18)$$

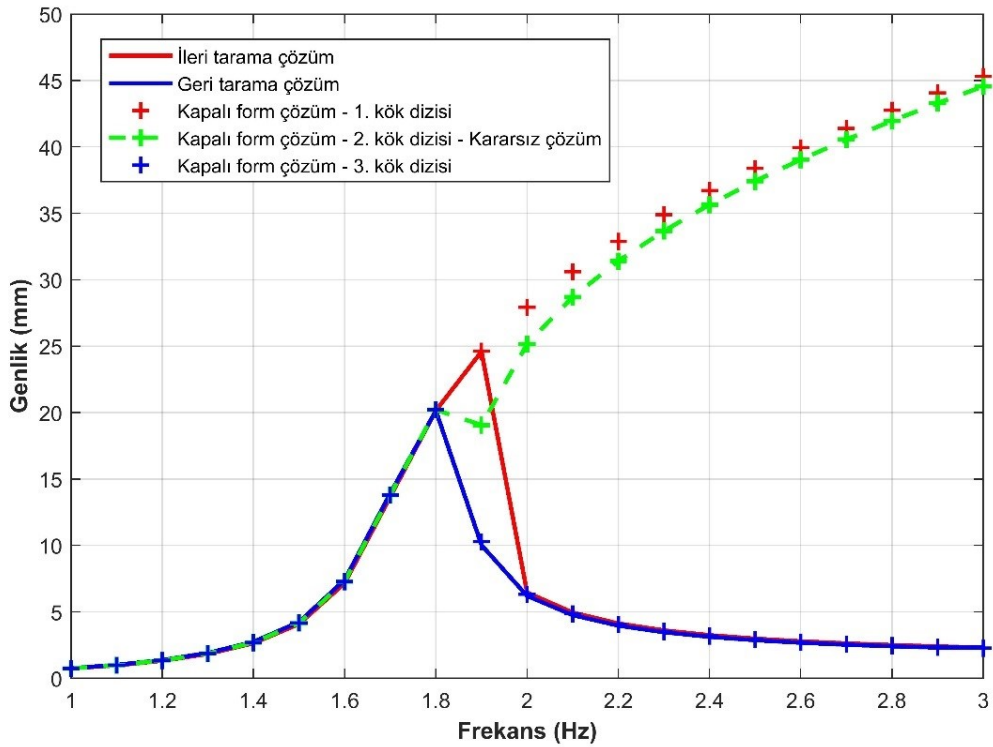
Denklem (2.18) beşinci derece bir polinomdur ve kökleri matematiksel olarak bulunabilir. MATLAB programı aracılığı ile polinomun kökleri bulunmuştur. Karmaşık kökler dikkate alınmamıştır. Şekil 2.5'te örnek olarak çözülen sistem için aynı frekans aralığında bulunan reel kökler Şekil 2.7'de grafiğin üzerine eklenmiştir.



Şekil 2.7 :  $L = 65$  mm,  $Y = 4$  mm,  $M_s = 1$  kg,  $c_s = 0.5$  N.s/m,  $a = 0$  iken tek serbestlik dereceli sistemin iteratif ve kapalı form çözümü.

Görüldüğü üzere iki çözüm yöntemi örnek sistem için aynı yanıtları vermektedir. Kapalı form yanıtında fark olarak, atlamadan sonra bir yanıt dizisi daha görülmektedir. Fakat bu yanıt dizisi kararsız bir çözümdür. Bölüm 4'de deneysel olarak incelenen tek serbestlik dereceli doğrusal olmayan sönümleyicinin, bu üçüncü çözüm dizisi üzerinde deneysel olarak gözlenebilen bir yanıt bulunamamıştır.

Bu iki farklı yöntemin birbirlerine kıyasla birkaç olumlu ve olumsuz yönleri mevcuttur. İteratif yöntemde, ileri tarama yapılırken, frekans tarama aralığına göre yukarı çözüm eğrisi düşük genliklerde çözüme yansımayaabilir. Bunun sebebi, ileri tarama yapılırken birbirini izleyen iterasyonlarda, bir önceki iterasyonun çözümünün başlangıç koşulu olarak kullanılmasıdır. Eğer bahsedilen çözümden aldığı başlangıç değeri, sistemin yukardaki çözüme ulaşmasına yetersiz kalırsa yüksek genlikli çözüm yanlış bulunabilir. Kapalı form çözümü ise sonuca bulunan köklerle direkt gittiği için bu durum gözlenmez. Frekans tarama aralığından bağımsız olarak gerçek sonuçlar daha hızlı olarak hesaplanır. Şekil 2.8’de bu duruma bir örnek verilmiştir.



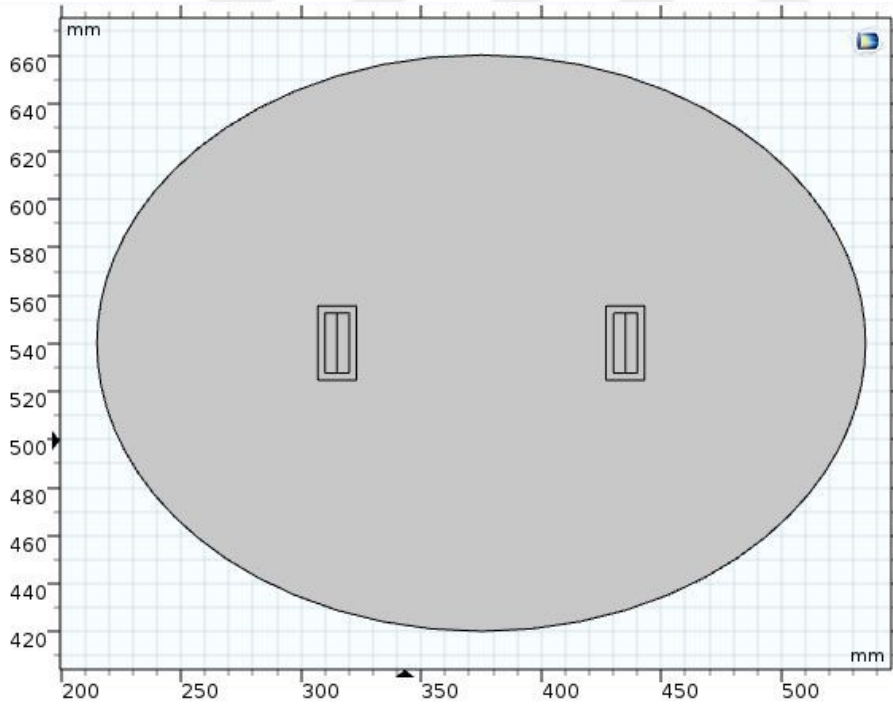
Şekil 2.8 :  $L = 65$  mm,  $Y = 1.5$  mm,  $M_s = 1$  kg,  $c_s = 0.5$  N.s/m,  $a = 0$  iken tek serbestlik dereceli sistemin iteratif ve kapalı form çözümleri.

Görüldüğü gibi düşük zorlama genliğinde ve görece büyük bir frekans tarama aralığında, zorlanan sistemde atlama sonrası çözüm kaybı iteratif yöntemde mevcuttur. Öte yandan kapalı form çözümü tüm frekans aralığı için varolan tüm sonuçları vermiştir.

Buna ek olarak, daha geniş mıknatıs uzaklıkları için daha yüksek mertebeden bir eğri kullanılmak istenilirse, örneğin; yedinci derece polinomla direngenlik eğrisi modellenirse, kapalı form çözümü için yeniden aritmetik işlemler aracılığıyla yeni bir denklem çıkarılması gerekir. İteratif yöntemde ise  $\Delta$  terimine yedinci derece doğrusal olmayan eğrinin tanımlayıcı fonksiyonunu eklemek yeterli olacaktır.

### 2.3 Tek Serbestlik Dereceli Doğrusal Olmayan Sönümleyicinin Sayısal Benzetimi

Doğrusal olmayan manyetik sönümleyicinin tek serbestlik derecesinde analiz edilmeden önce mıknatıslar arası kuvvetin sayısal olarak elde edilmesi gerekmektedir. Bunun için basit, iki boyutlu bir COMSOL modeli hazırlanmıştır. Model geometrisi, eksenleri 160 mm x 120 mm olan oval bir hava kümesinin içindeki, zıt kutupları birbirine bakan iki mıknatıstan oluşmaktadır. Model geometrisinin genel görüntüsü Resim 2.2’de görülebilir.



Resim 2.2 : Hava kümesi içinde mıknatıs çifti.

Mıknatısların boyutları 40 mm x 25 mm x 10 mm'dir. Yüzey akısı olarak, N42 sınıfı neodimiyum mıknatıslar için ortalama bir değer olan 1.28 T girilmiştir. Mıknatıslar 10 mm kalınlığındaki eksen üzerinde polarize edilmişlerdir.

Mıknatis itki kuvveti nümerik olarak Maxwell Gerilim Tensörü yardımıyla hesaplandı. İtke kuvveti eşitliği Denklem (2.19)'da görülebilmektedir.

$$F_x = \frac{1}{\mu_0} \iint dA S_x \cdot n \quad (2.19)$$

Denklemde  $F_x$  x eksenindeki kuvvet,  $n$  yüzey normal vektörünü temsil etmektedir.  $\mu_0$  mıknatısın yüzey artık manyetik akısıdır.  $A$  mıknatısın herhangi bir kapalı alanı olabilir.  $S_x$ , Maxwell Gerilim Tensörü'nün x eksenindeki bileşkesidir. Gerilim tensörü daha genel biçimde, üç eksen bileşkesi halinde Denklem (2.20)'deki gibi yazılabilir.

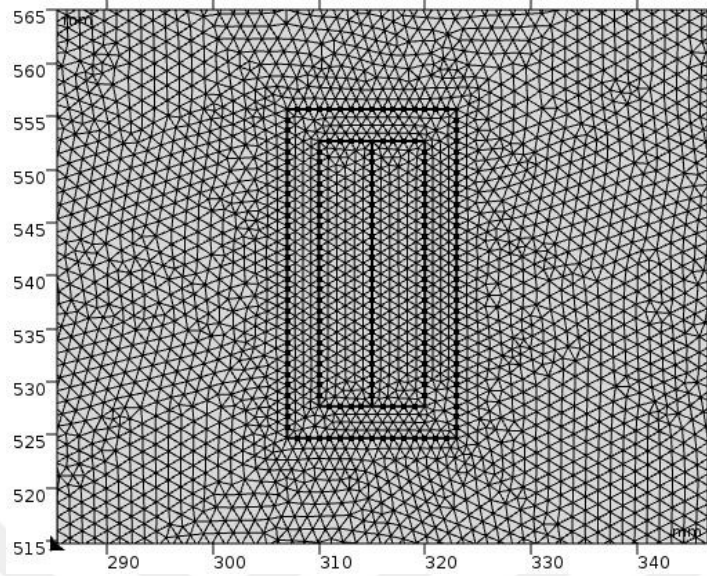
$$S = \begin{bmatrix} B_x^2 - \frac{B^2}{2} & B_x B_y & B_x B_z \\ B_y B_x & B_y^2 - \frac{B^2}{2} & B_y B_z \\ B_z B_x & B_z B_y & B_z^2 - \frac{B^2}{2} \end{bmatrix}, \quad B^2 = B_x^2 + B_y^2 + B_z^2 \quad (2.20)$$

Denklem (2.19)'daki integralin  $\mu_0 = 1$  Wb/m.A olan, manyetik cismi içine alan kapalı bir yüzey üzerinde alınması gerekmektedir. Bunun için Resim 2.2'deki gibi mıknatısların yüzeyinden 3 mm ötelenmiş hava yüzeyleri oluşturuldu. Bir hava çerçevesindeki dört yüzey üzerinde Denklem (2.19)'daki integral hesaplanarak toplandı.

Bu analiz için Akımsız Manyetik Alanlar (Magnetic Fields, No Current) modülü yeterli görülmüştür. Büyük hava küresinin dış yüzeyleri "Manyetik Yalıtım (Magnetic Insulation)" olarak seçildi. Mıknatis geometrileri için itke kuvveti ekseninde "Manyetik Akı Koruma (Magnetic Flux Conservation)" seçildi ve görece geçirgenlik değeri (Relative Permeability) olarak N42 neodimiyum mıknatısların katalog değeri olan 1.28 T girildi.

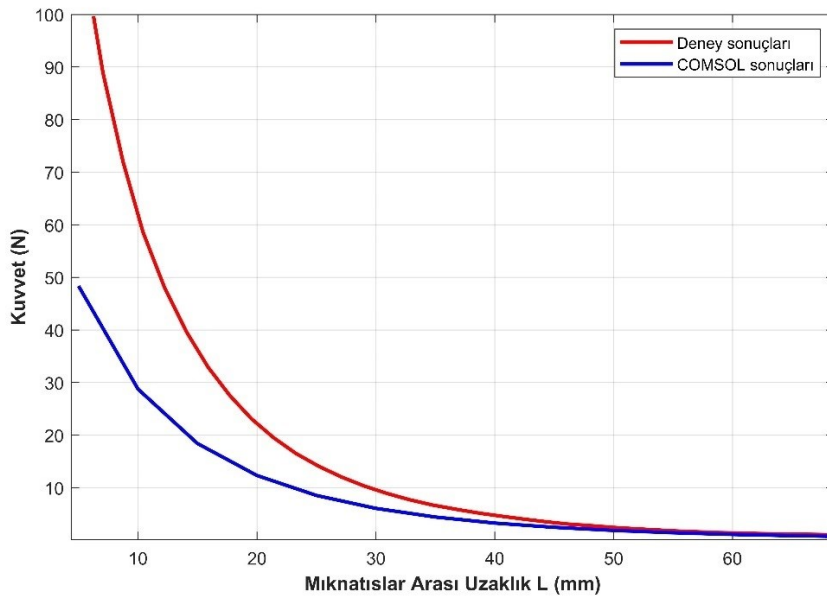
Mıknatis yüzeylerinde integralin hata payının olabildiğince düşük olması ve, uzak mesafelerde hassasiyetin düşmemesi için, mıknatis yüzeyleri ve çerçeveleyen hava yüzeylerinde maksimum 1 mm, minimum 0.5 mm büyüklüğünde çözüm ağı oluşturuldu. İki mıknatısı kümeleyen hava alanı ise, maksimum büyüklüğü 1.5 mm

olan üçgen çözüm ağı elemanlarıyla kaplandı. Mıknatıs yüzeyindeki çözüm ağı Resim 2.3’de görülebilir.



Resim 2.3 : Mıknatıs ve çerçeve hava yüzeyinde oluşturulan çözüm ağı.

Daha sonra parametrik tarama yöntemiyle mıknatıslar arası uzaklık 2.5 mm aralıklar azaltılmış, ve her yeni uzaklık için yatışkın konumda, hava yüzeyindeki integral toplamları çizdirilmiştir. Şekil 2.9’da, deneysel olarak elde edilen kuvvet eğrisiyle COMSOL programında Maxwell Gerilim Tensörü aracılığıyla elde edilen eğri görülebilir.

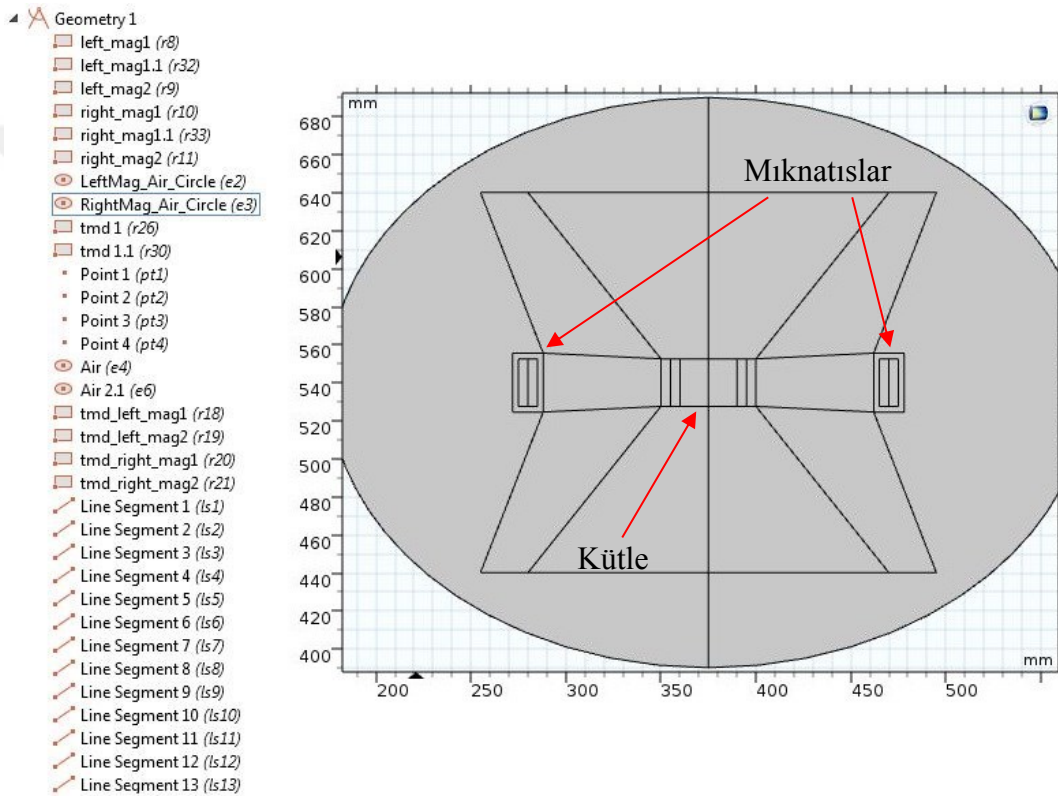


Şekil 2.9 : Analizle elde edilen kuvvet eğrisi ve deney verisi.



Mıknatıslar arası mesafe yaklaştıkça iki eğri arasındaki hata payı çok artmaktadır . Fakat 30-60 mm aralığındaki uzaklıklar için hata payı düşüktür. Bundan dolayı, düşük genlik cevabı veren sistemler için bu yöntemin kullanılabilmesi varsayıldı.

Ardından bu kuvvet eğrisinin sayısal çözümünün, Bölüm 2.2'deki analitik yöntemlerle karşılaştırılması için tek serbestlik dereceli bir model oluşturuldu. Model, iki adet mıknatıs arasında, üzerinde iki adet mıknatıs bulunan, karşılıklı itme kuvveti altındaki geri döndürücü kuvveti olan, hareketli kütlelen oluşmaktadır. Yeni geometri Resim 2.4'de verilmiştir.



Resim 2.4 : Tek serbestlik dereceli analiz geometrisi.

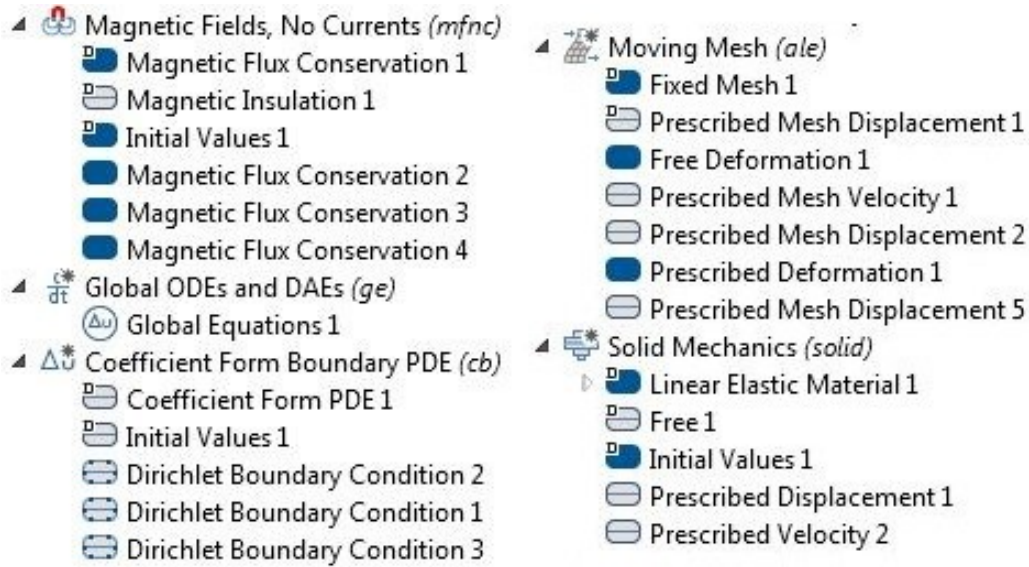
Ayrıca, geometri üzerinde çözüm ağı oluşumunu rahatlatmak ve deforme olan çözüm ağlarının önlenmesi için, ana sisteme görece uzak bir mesafeden, mıknatıs ve hareketli kütleyle sekiz adet çizgi çizildi.. Hareketli kütle ile, zorlamanın verileceği mıknatıslar arasına da, yine aynı amaca hizmet etmek üzere dört adet çizgi çizildi.

Hareketli kütle için, manyetik özellik taşımadığı için, alüminyum türevi UNS A95005 materyali seçildi. Mıknatıslar Neodimiyum ve kalan diğer tüm bölgeler hava olarak tanımlandı.

Çözüm için beş ayrı modül kullanıldı. Bu modüller aşağıdaki gibidir:

- Akımsız Manyetik Alanlar (Magnetic Fields, No Current)
- Global ADD ve DCDS (Global ODEs and DAEs)
- Katsayı Formunda Sınır KDD (Coefficient Form Boundary PDE)
- Hareketli Ağ (Moving Mesh)
- Katı Mekaniği (Solid Mechanics)

Bu modüller ve girilen sınır koşul atamaları Resim 2.5’de verilmiştir.



Resim 2.5 : Kullanılan modüller ve sınır koşulu tanımlamaları.

Akımsız Manyetik Alanlar modülü içinde birbirini iten mıknatısların manyetik akı korunumu, itki ekseninde 1.28 T olarak tanımlandı. Kütleli oluşturan UNS A95005 materyali için ise COMSOL veritabanında kayıtlı olan değerler kullanılmıştır. En dış hava yüzeyi manyetik yalıtım yüzeyidir.

Evrensel ADD ve DCDS (Global Adi Diferansiyel Denklemler ve Diferansiyel-Cebirsel Denklem Sistemleri) modülünde ise hareketli kütle için Denklem (2.21)’deki dinamik hareket denklemi çözdürüldü.

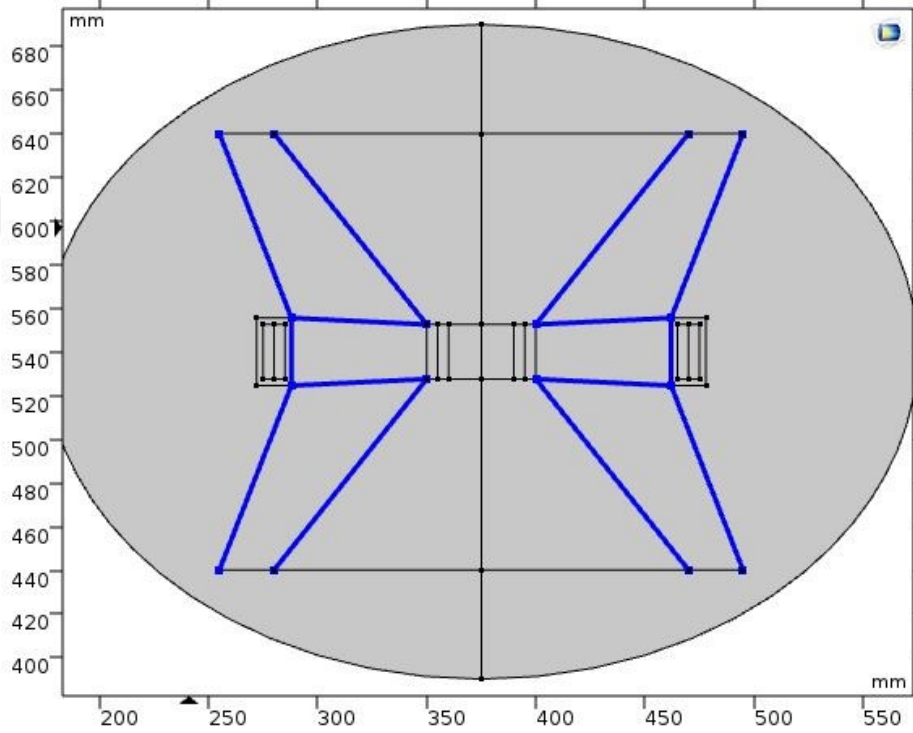
$$\dot{v} + \frac{c}{M_s} v + \frac{F_T}{M_s} = 0 \quad (2.21)$$

Burada  $F_T$  toplam itki kuvveti,  $v$  kütle hızıdır. Girilen kütle ve sönüm katsayılarına göre, Maxwell Gerilim Tensöründen hesaplanan toplam itme kuvveti altında,  $v$  değeri bulundu.

Katsayı Formunda Sınır KDD modülü yardımıyla, modül için gerekli katsayılar girilerek sınır kısmi diferansiyel denklemi olarak, Denklem (2.22)'de verilen Laplace Denklemi oluşturuldu.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (2.22)$$

Burada  $u$  toplam yer değiştirmedir. Oluşturulan Laplace Denklemi geometride ek olarak oluşturulan çizgiler üzerinde tanımlandı. Bu çizgiler Resim 2.6'de gösterilmiştir.



Resim 2.6 : Üzerinde Laplace Denklemi tanımlanan çizgiler.

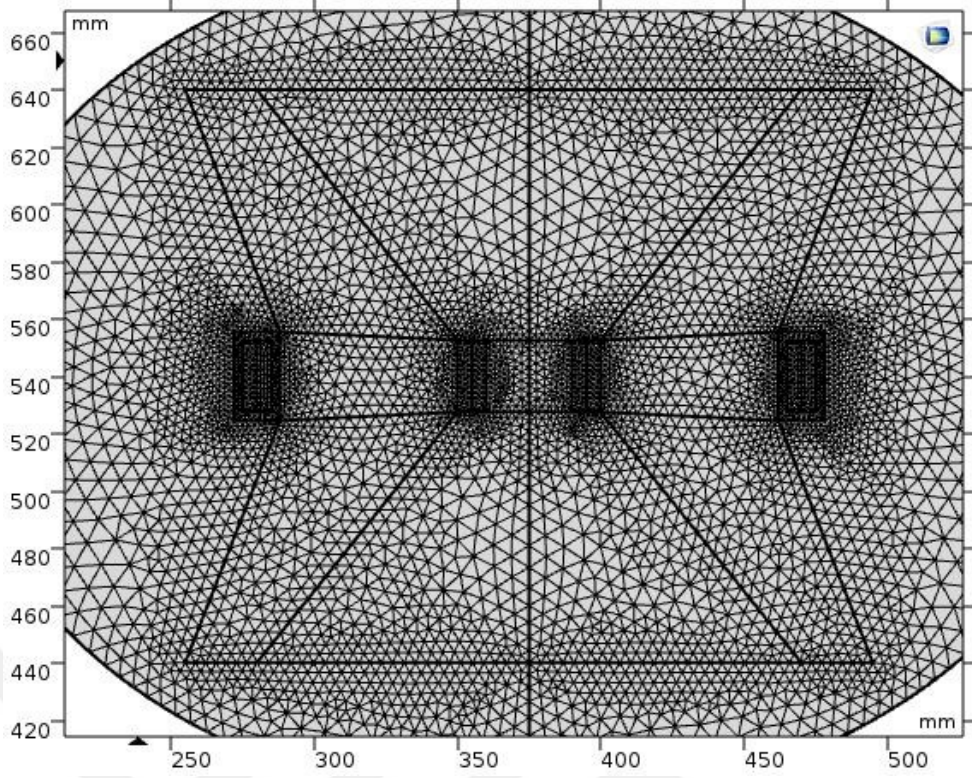
Çizgilerin bitim noktalarında Dirichlet Sınır Koşulu (Dirichlet Boundary Condition) tanımlandı. Bu sınır şartları, hava küresi üzerinde olan bitim noktaları için sıfır, kenarlardaki zorlama genliği verilen mıknaatıslar için çalışılan frekansta ve genlikte sinüs, hareketli kütlede ise Denklem (2.21)'de hesaplanan  $v$  değeri girilmiştir.

Sistem dinamik çözüleceği için Hareketli Ağ Modülü gerekli görüldü. Modül içinde geometri seçimi olarak sadece hava küresi seçildi. Ve bu kürenin içinde kalan alan için Serbest Deformasyon (Free Deformation) tanımlandı. Hava ve hareketli kütle arasında kalan yüzey için Öngörülen Ağ Hızı (Prescribed Mesh Velocity) atandı ve hız değeri olarak Denklem (2.21)'de hesaplanan  $v$  değeri girildi. Zorlama verilen mıknatısların çevresinde oluşturulan, integral yüzeyleri ve içlerinde kalan küçük hava alanı için Öngörülen Ağ Yerdeğişimi (Prescribed Mesh Displacement) atandı. Yerdeğişim değeri olarak çalışılan frekans ve girdi olarak sinüs fonksiyonu girildi. Resim 2.6'de gösterilen çizgiler üzerinde de Öngörülen Ağ Yerdeğişimi ataması yapıldı ve değer olarak Katsayı Formunda Sınır KDD modülünde, Laplace denklemi ile çözdürülen yerdeğişim değeri girildi.

Son olarak Katı Mekanik modülünde hareketli kütle için hız değeri olarak Öngörülen Hız (Prescribed Velocity) atandı ve  $v$  değeri girildi. Hareket eksenine dik olan eksenlerdeki hız değeri sıfır girilerek hareketin sadece yatay ekseninde olacağı tanımlandı. Zorlamanın verildiği mıknatıslar için ise Öngörülen Yerdeğişimi (Prescribed Displacement) atanarak, sinüs zorlama verildi.

Çözüm ağı oluşturulurken önce mıknatıs yüzeyleri ve Laplace Denklemi ile çözdürüldüğü çizgiler belli ölçülere bölündü. Mıknatıs ve integral hava yüzeyleri maksimum 2 mm, minimum 1mm, kütle ve kenardaki mıknatısı bağlayan çözüm çizgileri maksimum 10 mm, minimum 1.5 mm, uzak hava noktasından kütle ve mıknatıslara bağlanan çözüm çizgileri ise maksimum 5 mm, minimum 1.5 mm olacak şekilde parçalara ayrıldı. Bu çizgilerin ve sistemin içerisinde kaldığı geniş hava alanı maksimum 8 mm olacak şekilde, 1.2 maksimum eleman büyüme oranıyla (Maximum element growth rate) üçgen eleman çözüm ağıyla kaplanmıştır. Açıkta kalan diğer tüm alanlara ise maksimum 10 mm, 1.1 maksimum eleman büyüme oranına sahip üçgen elemanlardan oluşan çözüm ağı atanmıştır. Oluşturulan çözüm ağı Resim 2.7'de görülebilir.

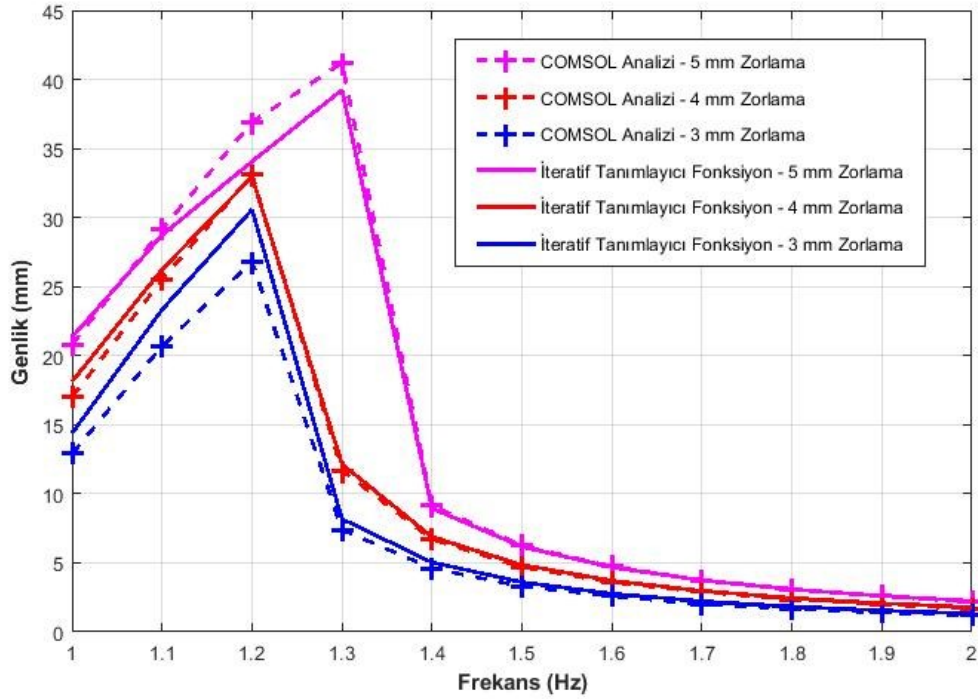
Çalışılmak istenen frekans aralığı için Parametrik Tarama (Parametric Sweep) tanımlanmıştır ve daha önce atanan tüm sinüs fonksiyonlarına bu frekans değeri verilmiştir.



Resim 2.7 : Tek serbestlik dereceli sistemin dinamik analizi için oluşturulan çözüm ağı.

Çözücü için çözüm zaman aralığı 0.05 s girildi, Ayrılmış Çözücü (Segregated Solver) seçildi ve çözdürülmesi gereken değişkenler sırayla çözdürüldü. Önce tüm sistemdeki manyetik skalar potansiyel hesaplanır (Magnetic Scalar Potential). Daha sonra bulunan manyetik alandan mıknatısları üzerindeki hava yüzeylerindeki Maxwell Gerilim Tensörü integrali alınır ve toplam kuvvet hesaplanır. Elde edilen toplam kuvvetten Denklem (2.21)'de verilen hareket denklemi yardımıyla, hareketli kütlelerin hızı  $v$  bulunur. Bu iki basamaktan sonra diğer tüm değişkenler tek bir basamakta çözdürülebilir.

Şekil 2.10'da üç farklı zorlama genliğinde örnek bir sistem için elde edilen COMSOL sonuçları ve aynı sistem için Bölüm 2.2'de tanımlayıcı fonksiyonlar yardımıyla elde edilen analitik sonuçlar verilmiştir. Elde edilen nümerik sonuçlarda görülmektedir ki Maxwell Gerilim Tensörü aracılığıyla hesaplanan manyetik kuvvet düşük genliklerde, küçük hata paylarıyla, analitik çözümlerle tutarlı sonuçlar vermektedir. Atlama frekansı öncesi, özellikle sistem maksimum genlik cevabındayken hata payı en fazladır. En yüksek hata payı 3 mm zorlama genliğinde, 1.2 Hz zorlama frekansında görülmüştür ve yaklaşık % 11'dir.



Şekil 2.10 : Dinamik zorlama altındaki kütlenin genliği için COMSOL nümerik analiz sonuçları ve tanımlayıcı fonksiyonlar çözümünün karşılaştırılması. Sistemde;  $L = 75$  mm,  $M_S = 1.6$  kg,  $c_S = 0.5$  N.s/m,  $a = 0$ .

Fakat çözüm sürelerinin çok uzun olması ve bu çalışmada hedeflenen frekans seviyelerinde yüksek genlikli girdilerin hesaplanamıyor oluşu yeni bir sayısal modelleme ihtiyacı doğurdu. Bu amaçla, Bölüm 2.1'de elde edilen deneysel kuvvet eğrisini, herhangi bir miktatıslar arası uzaklık  $L$  için direngelik eğrisini verecek bağıntı arandı.

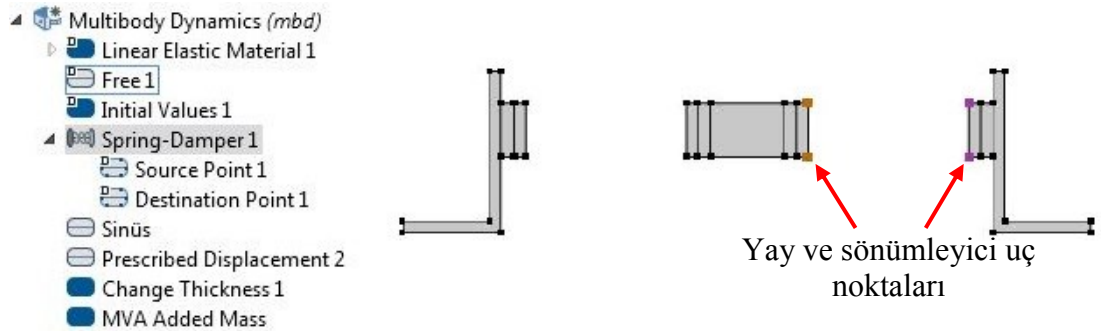
Önce MATLAB progamının Eğri Uydurma (Curve Fitting) arayüzünde, tek taraflı, üzerinde hiçbir işlem yapılmamış itki kuvveti eğrisini en iyi tanımlayacak fonksiyonlara bakıldı. Şekil 2.1'deki sonuçlarda da görülebileceği gibi, işlenmemiş veri logaritmik bir eğriyi andırdığı için, iki terimli Gauss Eğri Uydurma Denklemi uygun görüldü. Uygun görülen eğri denklemi Denklem (2.23)'de görülebilir.

$$F(x) = a_1 \cdot e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 \cdot e^{-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2} \quad (2.23)$$

Burada, mesafe değişkeni  $x$  Şekil 2.2'deki gibi hareketli kütlenin konumu olarak yazılmalıdır. Elde edilen eşitlik, tek bir tarafın kuvvet eğrisi olacağı için, diğer mıknatıs çifti için de benzer işlemler yapılması gerekir. Koordinat değişimi ve öteleme işlemleri yapılırsa toplam kuvvet eşitliği  $F_T$  Denklem (2.24)'deki halini alır.

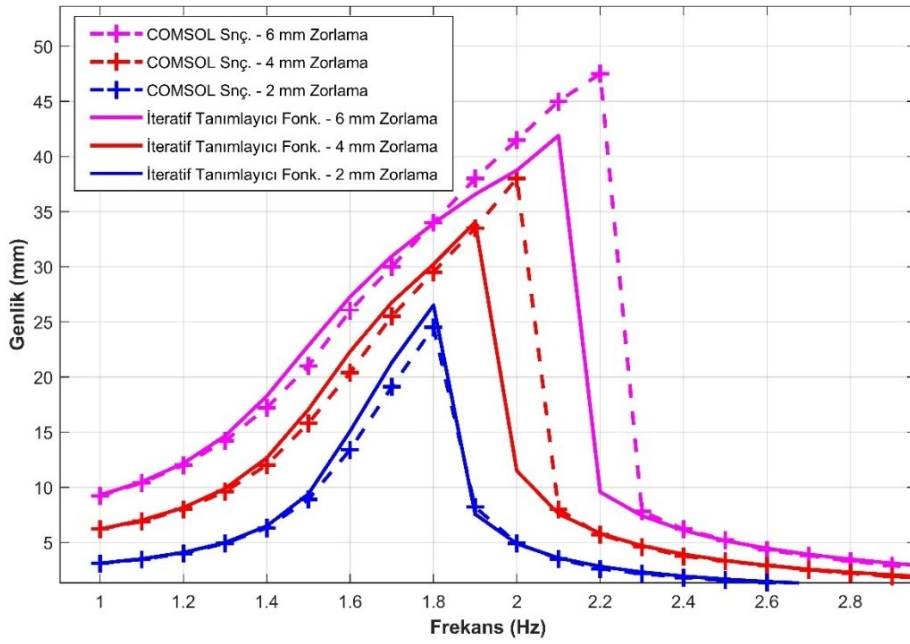
$$F_T(x) = a_1 \cdot \left( e^{-\left(\frac{L-x-b_1}{c_1}\right)^2} - e^{-\left(\frac{L+x-b_1}{c_1}\right)^2} \right) + a_2 \cdot \left( e^{-\left(\frac{L-x-b_2}{c_2}\right)^2} - e^{-\left(\frac{L+x-b_2}{c_2}\right)^2} \right) \quad (2.24)$$

Burada, eğri uydurma sonucunda katsayılar;  $a_1 = 2.23 \times 10^{39}$ ,  $b_1 = -1.071$ ,  $c_1 = 0.116$ ,  $a_2 = 4.89 \times 10^{25}$ ,  $b_2 = -1888$ ,  $c_2 = 0.254$  girildi. Bir önceki çözümlerle benzer bir geometri oluşturulduktan sonra çözüm modülü seçildi. Bu analiz için Çoklu Cisim Dinamiği (Multibody Dynamics) modülü yeterlidir. Bu modül altında, hareketli kütle ve bir kenardaki zorlama verilen mıknatıs arasında yay ve sönümleyici ataması yapıldı. Esneme altındaki yay kuvvetinin tanımlanması için Denklem (2.24) kullanıldı. Sönüm katsayısı için  $c = 0.5$  N.m/s girildi. Zorlama genliği verilen mıknatıslara destek olarak rijit, alüminyum bağlantı parçaları oluşturuldu. Bu bağlantı parçalarının alt yüzeylerine sinüs zorlama verildi. Hareketli kütlenin alt yüzeyinde dikey eksendeki yerdeğişimi sıfır atandı. Tüm sistemin geometri ekranına dik kalınlığı 40 mm girildi. Son olarak malzemesi UNS A95005 olan sönümleyicinin tanımlanan parametreler sonucunda kütlesine bakıldı ve toplam kütle 1.08 kg olacak şekilde ek kütle üzerine eklendi. Kullanılan Çoklu Cisim Dinamiği modülü, alt tanımlamaları ve geometri Resim 2.8'de verilmiştir.



Resim 2.8 : Çoklu Cisim Dinamiği modülü, geometri ve tanımlanan yay noktaları.

Model Tamamen Birleşik (Fully Coupled) olarak, 0.05 s zaman aralıklarıyla, 1-3 Hz zorlama frekansı aralığında, 2-4-6 mm zorlama genlikleri için dinamik olarak çözdürüldü. Bu frekans aralığında ve kütle değerinde yüksek genlik beklenmektedir ve ilerleyen bölümlerde deneysel olarak bu frekans aralığında ve zorlama genliklerinde çalışılması planlanmaktadır. Her bir frekans çözümünün yatışkın durum genliği kaydedildi ve Şekil 2.11’de iteratif tanımlayıcı fonksiyon yöntemiyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.11 : Tanımlanan yay fonksiyonuyla COMSOL nümerik analiz sonuçları ve tanımlayıcı fonksiyonlar çözümünün karşılaştırılması. Sistemde;  $L = 65 \text{ mm}$ ,  $M_s = 1.0 \text{ kg}$ ,  $c_s = 0.5 \text{ N.s/m}$ ,  $a = 0$ .

İki çözüm düşük zorlama genliği için yakın değerler vermektedir. Fakat 4 mm ve 6 mm zorlama genlikleri için atlama frekanslarında 0.1 Hz fark vardır. Atlama frekansı dışındaki bu fark dışında, bu zorlama genliklerinde de genel olarak yakın sonuçlar elde edildi.

Bir sonraki bölümde bu sonuçlar yapılan deneylerden elde edilen verilerle karşılaştırılacaktır. Ardından bu veriler kullanılarak iki serbestlik dereceli sistem için uygun parametreler aranacaktır.

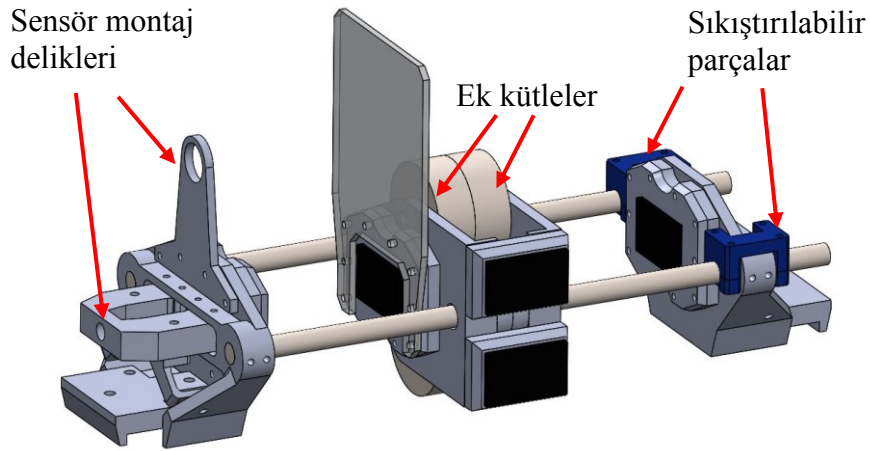


### 3. DENEY DÜZENEĞİ VE DENEY METODU

Bölüm 2’de analitik ve sayısal benzetimler elde edilen sonuçları deneysel olarak teyit etmek üzere, üzerine mıknatısların takılabileceği bir sistem tasarlandı. Bu tasarımda aranan en önemli özelliklerden biri mıknatıslar arası uzaklığın geniş bir aralıkta rahatlıkla ayarlanabilir olmasıdır. Ayrıca hareketli kısmın kütlelerinin mümkün olduğunca ayarlanabilir olmasına dikkat edildi

Ölçüm yapılacak sistem değişkenleri olarak, zorlama yüzeyi ve hareketli kütle arasındaki uzaklık ve hareketli kütle dinamiğinden sabit mıknatısların olduğu yüzeylere etkileyen kuvvet belirlendi.

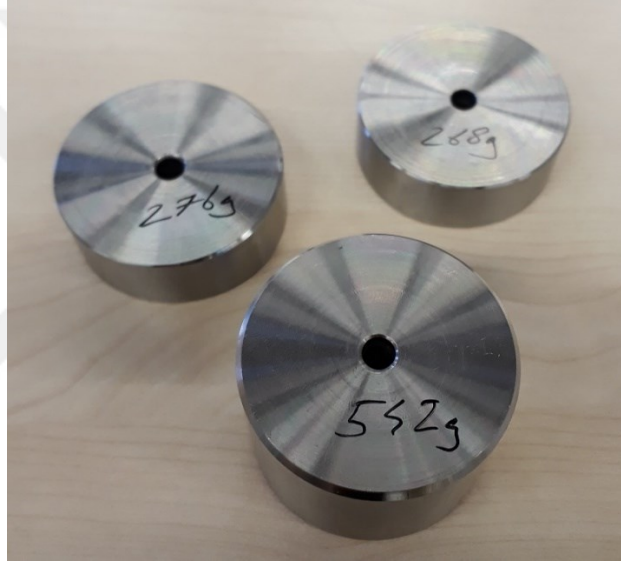
Sistem güçlü manyetik alan içinde olacağı için, bu manyetik alanın bozulmaması için tasarlanan parçaların manyetik olmaması gerekmektedir. Bu amaca en uygun üretim tekniği üç boyutlu baskı olarak seçildi. Üç boyutlu baskıda kullanılan PLA malzemesi hem yeterli rijitliğinden ötürü sistemde güç kaybına yol açmayacak, hem de manyetik özellik taşımadığı için manyetik alana etki yapmayacaktır. Yine aynı nedenle, manyetik alana en yakın montaj bölgeleri pirinç vidalarla monte edildi ve hareketli kütlelerin üzerinde hareket ettiği miller ile eklenebilecek ek kütleler paslanmaz çelikten üretildi. Tasarlanan sistem Resim 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1 : Tasarlanan doğrusal olmayan manyetik sönümleyici sistemi.

Burada siyah renkli parçalar mıknatıslardır. Açık gri renkte olan mil ve eklenebilir kütleler paslanmaz çelik, saydam gri ise pleksiglastır. Mavi ve diğer renkteki tüm parçalar PLA'dır.

Hareketli kütlede, direngenlik kuvvetini veren mıknatıslara ek olarak, hareket eksenine dik 2 adet mıknatıs daha görülmektedir. Bu iki mıknatısın amacı sisteme sonradan Eddy akımı sönümü eklenebilmesidir. Bu kısmın ortasında dört adet 50 mm çapında, 18 mm kalınlığında paslanmaz çelik parçalar takılabilir bölmeler tasarlandı. Bu ek kütlelerin her birinin 250 g olması hedeflendi. Daha sonra bir adet 50 mm x 36 mm, iki adet 50 mm x 18 mm paslanmaz çelik, ortalarında M6 montaj deliği olacak şekilde üretildi. Kütlelerin gerçek ağırlıklarıyla beraber resmi Resim 3.2'de verilmiştir.



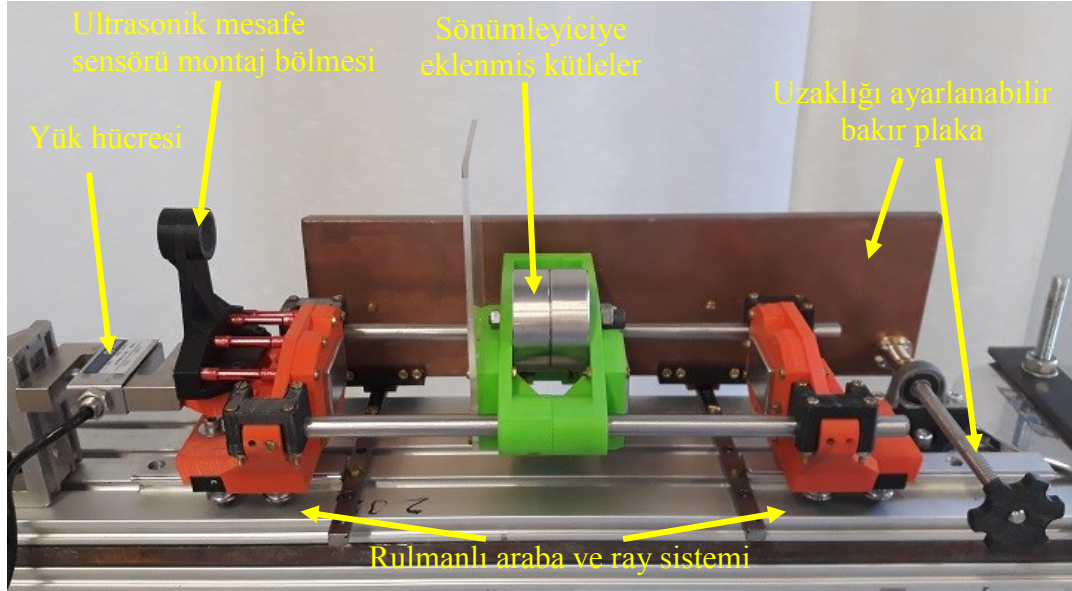
Resim 3.2 : Üretilen 3 adet takılıp çıkarılabilir, paslanmaz çelik kütle.

Üretilen bu eklenebilir kütleler ile tasarlanan titreşim sönümleyicinin kütlesi yaklaşık 375 g ile 1600 g arasında değiştirilebilmektedir. Sönümleyicinin üzerinde kaydığı miller 10 mm çapında paslanmaz çelikten üretildi ve sönümleyici iki adet LM10UU doğrusal rulmanla bu millerde yataklandı. LM10UU seri rulmanlar, katalog çapları civarında +1 mm toleransında olmaktadır. Bu sayede sönümleyici üzerindeki kuru sürtünme minimuma indirildi. Sönümleyici üzerine, bir önceki bölümde uygulandığı gibi, UM 18-11116 ultrasonik sensörünün uzaklık ölçebileceği, ölçü alanı 90 mm x 90 mm olan pleksiglas plaka takıldı.

Resim 3.1'nin sol kısmında kalan bölme, sabit olarak UM 18-11116 ultrasonik sensörü ile H3-C3-50kg-3b yük hücresinin montajlanabileceği şekilde tasarlandı. Yük hücresinin yük verisi verebilmesi için üzerinde gerinim olmalıdır. Bu sebepten dolayı, sistemin sabit mıknatısları içeren parçaları LFR-50/5 rulmanlı arabalar üzerine sabitlendi. Bu arabalar ise hareket edebilecekleri şekilde 4 mm çapındaki sigma raylarla yatakları.

Resim 3.1'nin sağ kısmında kalan mıknatıslı kısım ise, dört adet vidayla paslanmaz çelik mile sıkıştırılmıştır ve iki adet PLA parçayla mil üzerinde sabitlenmiştir. Bu parçalar gevşetilir, mıknatıslı parça kaydırılarak mıknatıslar arası uzaklık rahatlıkla değiştirilebilmektedir.

Tüm sistem üretilip, 15 mm x 120 mm yüzey kaplama alüminyum profile monte edildikten sonra, ayarlanabilir Eddy akım sönümü sağlamak için profil kanallarına dik ekseninde iki adet MGNR09R ray monte edildi. Raylara arabaları geçirildikten sonra bu arabalar üzerine üç boyutlu basımla PLA parçalar üretilip takıldı. PLA parçalar üzerine, titreşim sönümleyicinin tüm hareket aralığını kaplayacak şekilde 350 mm x 100 mm x 10 mm bakır plaka takıldı. Bakır plaka bir köşesinden 5 mm vida adımıyla vidalı mile yataklanarak, titreşim sönümleyicinin monte edildiği sigma profile sabitlendi. Sönümleyici sistemi bütün haliyle Resim 3.3'te verilmiştir.

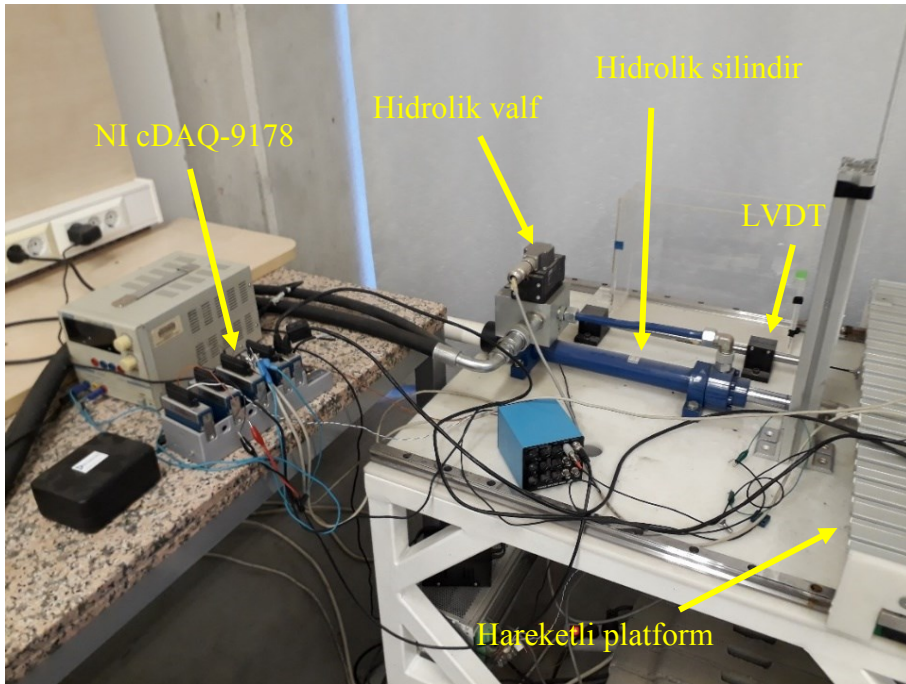


Resim 3.3 : Tamamıyla monte edilmiş manyetik titreşim sönümleyici sistemi.

Deney düzeneğine zorlama girdisi vermek üzere daha önce benzer çalışmalarda kullanılan hidrolik eyleyici sistemi kullanılmıştır [37]. Özet olarak sistem; elektrikli yağ pompası, hidrolik eyleyici, hareket platformu, servo valf, kontrol kartı ve LVDT sensörden oluşmaktadır. Hareket platformu, hidrolik eyleyici ve LVDT ağır beton bloklarla sabitlenmiş iskelet yapı üzerinde yer almaktadır. Hareket platformu hidrolik eyleyiciye monte edilmiştir ve iki adet HIWIN HGR30R ray üzerine yataklanmış alüminyum yüzey kaplama profillerden oluşmaktadır.

Sistemi çalıştırmak için önce hidrolik yağ pompasına güç verilir. Daha sonra seçilen bilgisayar arayüzünden ve bilgisayara bağlı girdi/çıkı modülü aracılığıyla zorlama sinyali kontrol kartına iletilir. Kontrol kartına iletilen zorlama sinyali, LVDT'den konum geri beslemesi olarak kontrol kartına geri beslenir. Kontrolcü servo valfi açıp kapatarak hidrolik eyleyiciyi tanımlanan zorlama sinyalinde eyleme geçirir.

Deney düzeneğine takılacak sensörlerden veri almak için National Instruments firmasının cDAQ-9178 isimli modül şasesi kullanılmıştır. Bu şase üzerinde sekiz adet modül takma yeri vardır. Kullanılacak sensör tipine ve sayısına göre gerekli modüller şaseye takılır ve LabVIEW programıyla USB protokolü üzerinden şaseyle iletişim kurulur. Eyleyici ve veri alma düzeneğinin genel görüntüsü Resim 3.4'te verilmiştir. Kullanılan modüllerin model isimleri ve özellikleri ise Çizelge 3.1'de verilmiştir.

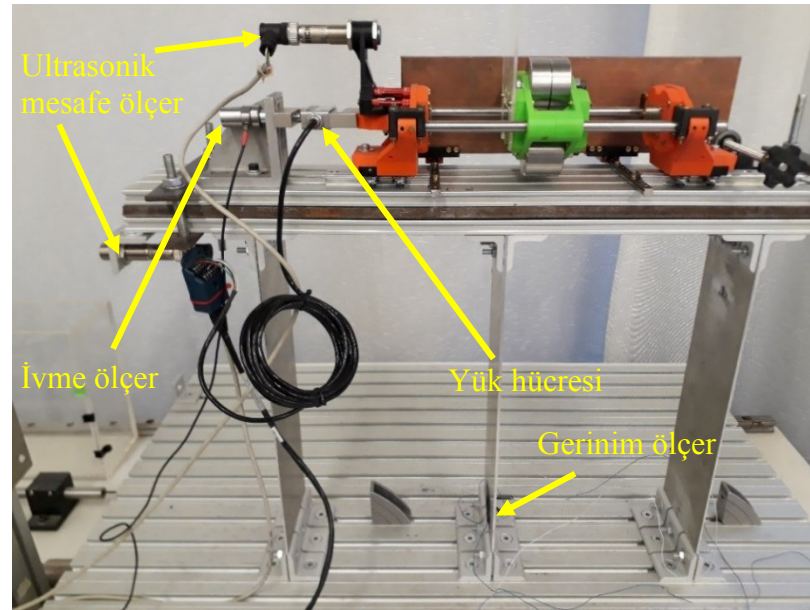


Resim 3.4 : Eyleyici ve veri alma düzeneği.

Çizelge 3.1 : Kullanılan veri işleme modülleri ve özellikleri.

Model	İşlev	Kanal Sayısı	Veri Hızı	Analog Çözünürlük	Sinyal Türü	Çalışma Aralığı
NI 9263	Analog çıktı	4	100 ks/s/Kanal	16 bit	Voltaj	$\pm 10$ V
NI 9221	Analog girdi	8	800 kS/s	12 bit	Voltaj	$\pm 60$ V
NI 9203	Analog girdi	8	200 kS/s	16 bit	Akım	$\pm 20$ mA
NI 9237	Köprü analog girdi	4	50 ks/s/Kanal	-	Voltaj	$\pm 25$ mV/V

Sensör yerleşimi ve seçimi için önce ölçülmesi gereken değişkenler belirlendi. Bu doğrultuda; titreşim sönümleyici ile birincil yapının arasında oluşan kuvvet için ZEMIC H3-C3-50kg-3b model yük hücresi, birincil yapının ataletini ölçmek üzere bir adet MMF-KD 41 model ivmeölçer, sönümleyicinin birincil yapıya olan uzaklığını ve birincil yapının zemine göre olan uzaklığını ölçmek için iki adet SENSICK firmasının UM 18-11116 model ultrasonik mesafe sensörü ve birincil yapıyı zemine bağlayan alüminyum plakada oluşan gerinimi ölçmek için Tokyo Sokki Kenkyujo firmasının FLA-5-11 model gerinim ölçer kullanıldı. Bu sensörlerin yerleştirilmesi Resim 3.5'te verilmiştir. Sensörler bağlı olduğu National Instruments modülleri, örnekleme hızı ve alınan örnek büyüklüğü ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Resim 3.5 : Deney düzeneği üzerinde sensör yerleşimi.

Çizelge 3.2 : Kullanılan sensörler, bağlandıkları modül ve örnekleme bilgileri.

<b>Sensör/Eyleyici</b>	<b>Bağlı Olduğu Modül</b>	<b>Örnek Sayısı</b>	<b>Örnekleme Hızı</b>
Ultrasonik Mesafe Ölçer	NI 9203	10 Örnek	200 Hz
İvme Ölçer, LVDT	NI 9221	10 Örnek	200 Hz
Yük Hücresi	NI 9949, NI 9237	100 Örnek	2000 Hz
Gerinim Ölçer	NI 9949, NI 9237	100 Örnek	2000 Hz
Hidrolik Eyleyici	NI 9263	580 Örnek	10 Hz

Bu düzenek ile yapılan tek serbestlik dereceli manyetik titreşim sönümleyici deneyleri detaylı olarak Bölüm 4’de anlatılacaktır. Bölüm 5’de ise manyetik titreşim sönümleyici ve birincil bina modeli arasındaki etkileşim üzerine yapılan deneyler açıklanacaktır.

#### **4. TEK SERBESTLİK DERECELİ DOĞRUSAL OLMAYAN SÖNÜMLEYİCİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Bu bölümde tek serbestlik dereceli manyetik doğrusal olmayan titreşim sönümleyici üzerinde yapılan deneyler anlatılacaktır. Bu deneylerin amacı titreşim sönümleyicinin davranışını pratikte kavramak ve yapılan analitik ve sayısal çalışmaların doğruluğunu teyit etmektir.

Deneyleerin yapıılışında ilk olarak manyetik titreşim sönümleyiciyi, hidrolik eyleyiciye bağılı hareketli platforma monte edildi. Ardından, sisteme farklı genliklerde, 0.1 Hz aralıklarla ileri ve geri frekans taraması yapıldı. Taramalar sonucunda yük ölçerden toplam kuvvet verisi ve ultrasonik mesafe algılayıcı aracılığıyla da genlik olarak hareketli kütleinin sabit mıknatıslara konumu, yani Denklem (2.5a)'daki  $Z$  değışkeni ölçülmüştür.

##### **4.1 Farklı Mıknatıs Arası Mesafeler için Manyetik Titreşim Sönümleyicinin Yanıtının İncelenmesi**

Yapılan sayısal ve analitik benzetimlerin gerçek sistemi ne kadar iyi temsil ettiğini görmek amacıyla 4 farklı mıknatıs arası uzaklık için 3 farklı girdi genliğinde sistemin cevabı incelendi. Titreşim sönümleyicinin kütlesi 1 kg olacak şekilde ayarlandı. Eddy akım sönümü veren bakır plaka mümkün olan en uzak mesafeye çekildi. Böylece sistemdeki sürtünme en az seviyeye indirildi.

Deney yapılan mıknatıs mesafeleri, bu mesafelere denk gelen kuvvet eğrisinin katsayıları, sisteme verilen sinüs girdi genlikleri ve deney yapılan frekans aralığı Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Deney durumları, kuvvet eğrileri ve deney koşulları.

Deney Durumu	Mıknatıs Mesafesi $L$ (mm)	$cs_5$	$cs_3$	$k$	Girdi (mm)	Frekans Aralığı (Hz)
1	60.0	11.84E7	5.465E4	159.6	2-4-6	0.8-3.2
2	65.0	7.838E7	2.330E4	120.2	2-4-6	0.8-3.2
3	70.0	5.009E7	1.415E4	88.95	2-4-6	0.8-3.2
4	75.0	3.225E7	0.835E4	68.42	2-4-6	0.8-3.2

### Durum 1: $L = 60.0$ mm

Bu durumda sistem direngenliği diğer durumlara göre en yüksek seviyededir. Eğer sistemin kuvvet eğrisinin doğrusal olan katsayısından düşük genlikler için doğal frekans hesaplanacak olursa Denklem (4.1a-b)'deki gibi hesaplanabilir. Bu değer sistemin rezonans tepesinin gözüktüğü minimum frekans değeri olacaktır. Girdi genliği arttırıkça atlama noktasındaki girdi değeri ile birlikte atlamanın gözüktüğü frekans da artacaktır.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M_s}} = 12.63 \text{ rad/s}, \quad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = 2.00 \text{ Hz} \quad (4.1a-b)$$

Yapılan deney sonucunda girdi genlikleri için çeşitli frekanslardaki yatışkın durum genliği ve bu genlikte yük ölçerde okunan yük değeri kuvvet olarak Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'de verilmiştir. Şekil 4.1'de ise her girdi genliği için sonuçların grafiği verilmiştir. Çizelgede geri tarama için elde edilen sonuçlar belirtilen girdi değerinde atlama gerçekleştikten sonra girilecektir. Atlama öncesi ileri tarama ve geri tarama sonuçları birbirine çok yakındır. Oluşabilecek küçük farklar veri işleme kısmında filtreleme aşamalarından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden atlama öncesi geri tarama sonuçları ileri tarama sonuçlarıyla aynı varsayılmıştır.



Çizelge 4.2 : 2 mm girdi genliği için Durum 1 ileri ve geri tarama sonuçları.

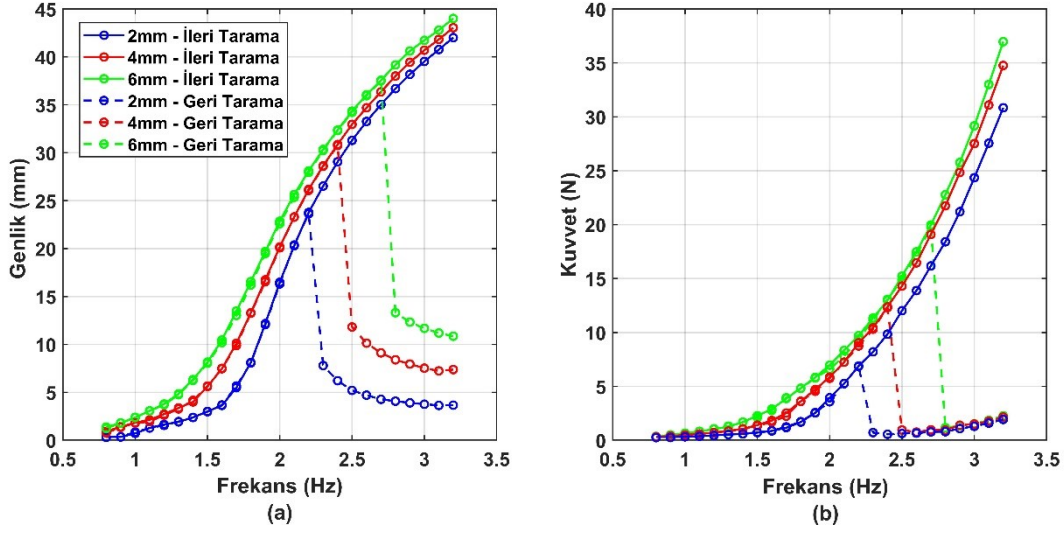
Frekans (Hz)	İleri Tarama		Geri Tarama	
	Genlik (mm)	Kuvvet (N)	Genlik (mm)	Kuvvet (N)
0.8	0.3	0.25	-	-
1.6	3.7	0.89	-	-
2.2	23.6	6.84	-	-
2.3	26.5	8.21	7.8	0.71
2.4	29.0	9.84	6.2	0.55
2.5	31.3	12.02	5.2	0.62
2.7	35.0	16.17	4.3	0.77
2.8	36.7	18.41	4.0	0.79
3.2	42.0	30.83	3.6	1.93

Çizelge 4.3 : 4 mm girdi genliği için Durum 1 ileri ve geri tarama sonuçları.

Frekans (Hz)	İleri Tarama		Geri Tarama	
	Genlik (mm)	Kuvvet (N)	Genlik (mm)	Kuvvet (N)
0.8	0.9	0.32	-	-
1.6	7.5	1.83	-	-
2.2	26.1	9.04	-	-
2.3	28.6	10.43	-	-
2.4	30.8	12.37	-	-
2.5	33.0	14.30	11.8	0.95
2.7	36.4	19.09	9.1	0.96
2.8	38.0	21.75	8.4	0.94
3.2	43.0	34.76	7.2	2.15

Çizelge 4.4 : 6 mm girdi genliği için Durum 1 ileri ve geri tarama sonuçları.

Frekans (Hz)	İleri Tarama		Geri Tarama	
	Genlik (mm)	Kuvvet (N)	Genlik (mm)	Kuvvet (N)
0.8	1.4	0.34	-	-
1.6	10.5	2.89	-	-
2.2	28.1	9.70	-	-
2.3	30.3	11.33	-	-
2.4	32.4	12.98	-	-
2.5	34.3	15.22	-	-
2.7	37.6	19.96	-	-
2.8	39.2	22.77	13.3	1.16
3.2	44.0	36.96	10.9	2.27



Şekil 4.1 : Deney durumu 1 için (a) yatışkın durum konum genlikleri (b) yatışkın durum kuvvet genlikleri.

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere girdi genliği düştükçe sistem Denklem (4.1b)’de doğrusal olarak hesaplanan doğal frekans değerinde rezonansa yaklaşmaktadır. Ve beklenildiği üzere girdi genliği arttıkça sistem daha yüksek genliklerde atlama yapmaktadır. Girdi genliği deneyde kullanılan genliklerin üstüne çıktığında aynı frekans artışı beklenilebilir.

İleri frekans taramasında sistem genliği giderek artmaktadır. Düşük frekanslarda farklı girdiler için sistem konum cevapları arasındaki görece yüksek olan fark frekans arttıkça azalmaktadır. Bu frekans taraması için kuvvet eğrilerine bakıldığında artan genlikle kuvvet de artmaktadır. 4 mm ve 6 mm girdi genliklerinin atlama frekanslarında 0.3 Hz fark vardır fakat bu iki girdi genliği için kuvvet değerleri arasındaki fark çok azdır. Kuvvet değerinin girdi genliği ile orantılı artmaması, aksine iki kuvvet eğrisi arasındaki farkın çok düşük olması sisteme bir kısıt olarak yansımaktadır. 2 mm girdide sistem cevabı diğer iki genlik değerlerine yaklaşıyor olsa da kuvvet değerinde diğer girdi genliklerine göre görece geride kalmaktadır.

Geri frekans taramasında tüm girdi genliklerinde atlama frekanslarında sistem ileri taramayla aynı sonuç vermektedir. Girdi genliği arttıkça atlama öncesi ve sonrası sistem genlikleri arasındaki fark da artmaktadır. Bu ani atlayış kuvvet eğrisinde de gözlemlenebilir. Örneğin 2mm girdi genliği için atlama öncesi ve sonrası kuvvet farkları yaklaşık 6 N iken 6mm girdi genliği için aynı kuvvet farkı 19 N’dir. Bu durum

gösteriyor ki sistem belli bir frekans değerinde ne kadar yüksek girdi genliğinde atlama yaparsa, atlama öncesine oranla kuvvet değeri o kadar fazla olacaktır.

Ayrıca, geri tarama için atlama sonrası kuvvet değerlerinin girdi genliğinden bağımsız olduğu söylenilebilir. Bu bölgede konum genlikleri giderek düşmekte iken kuvvet değerlerinde küçük bir artış gözlenmiştir. Bunun sebebi yükselen frekans değerleriyle birlikte sistemin yük hücresine bağlı fakat hareketli olmayan elemanlarının ataletlerinin artmasıdır.

### **Durum 2: $L = 65.0$ mm**

Bu durumda sistemin direngenliği bir önceki duruma göre biraz daha yumuşatılmıştır. Aynı doğrusal yaklaşımla sistemin en düşük doğal frekansı Denklem (4.2a-b)'de hesaplanmıştır.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M_s}} = 10.96 \text{ rad/s}, \quad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = 1.74 \text{ Hz} \quad (4.2a-b)$$

Bu durum için yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar girdi genliklerine göre Çizelge 4.5, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de verilmiştir. Tüm sonuçlar Şekil 4.2'de grafik üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 : 2 mm girdi genliği için Durum 2 ileri ve geri tarama sonuçları.

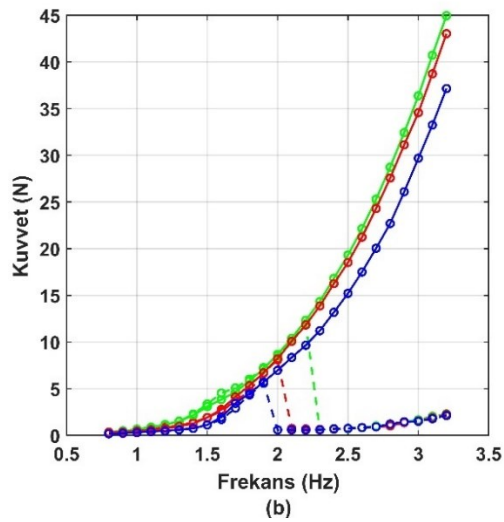
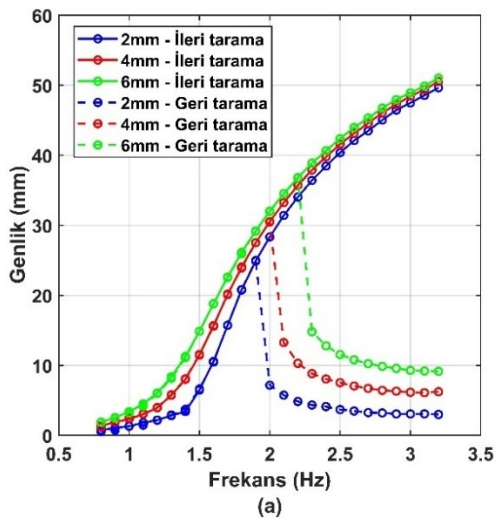
Frekans (Hz)	İleri Tarama		Geri Tarama	
	Genlik (mm)	Kuvvet (N)	Genlik (mm)	Kuvvet (N)
0.8	0.6	0.27	-	-
1.6	10.5	1.71	-	-
1.9	24.9	5.59	-	-
2.0	28.3	6.98	7.2	0.59
2.1	31.4	8.35	5.8	0.59
2.2	34.0	9.66	4.8	0.57
2.3	36.4	11.21	4.3	0.59
3.2	49.6	37.15	3.0	2.13

Çizelge 4.6 : 4 mm girdi genliği için Durum 2 ileri ve geri tarama sonuçları.

Frekans (Hz)	İleri Tarama		Geri Tarama	
	Genlik (mm)	Kuvvet (N)	Genlik (mm)	Kuvvet (N)
0.8	1.2	0.33	-	-
1.6	15.6	2.79	-	-
1.9	27.5	6.71	-	-
2.0	30.5	8.21	-	-
2.1	33.3	10.08	13.3	0.74
2.2	35.7	11.83	10.3	0.69
2.3	37.9	13.87	8.8	0.65
3.2	50.6	43.03	6.2	2.25

Çizelge 4.7 : 6 mm girdi genliği için Durum 2 ileri ve geri tarama sonuçları.

Frekans (Hz)	İleri Tarama		Geri Tarama	
	Genlik (mm)	Kuvvet (N)	Genlik (mm)	Kuvvet (N)
0.8	1.8	0.35	-	-
1.6	18.8	3.84	-	-
1.9	29.2	7.14	-	-
2.0	32.0	8.68	-	-
2.1	34.5	10.40	-	-
2.2	36.8	12.33	-	-
2.3	38.9	14.35	14.8	0.61
3.2	51.0	44.95	9.2	2.31



Şekil 4.2 : Deney durumu 2 için (a) yatışkın durum konum genlikleri (b) yatışkın durum kuvvet genlikleri.

Durum 2’de de Şekil 4.2’de görüldüğü üzere sisteme verilen girdi genliği azaldıkça sistem doğrusal olarak Denklem (4.2b)’de hesaplanan doğal frekansına yaklaşmaktadır. Mıknatıslar arası mesafe arttığı ve sistem direngenliği düştüğü için girdilerin atlama frekansları düşmüştür. Öte yandan hareketli kütlenin hareket edebileceği mesafe arttığı için yatışkın durum genliklerinde artma olmuştur. Bu durumda hareketli kütlenin Durum 1’e kıyasla daha fazla kinetik enerjiyle titreştiği görülmektedir. Kinetik enerjideki bu artış ölçülen kuvvet değerlerinin artmasını sağlamıştır. Fakat atlama frekansları düştüğü için titreşim sönümleyicinin bu girdi değerlerine denk gelen atlama frekanslarında uyguladığı kuvvet değerleri düşmüştür. Durum 1 ile aynı frekans değerlerinde atlama yapması için sisteme daha yüksek genlikli zorlama uygulanmalıdır.

Kuvvet grafiğine ve değerlerine bakıldığında ise Durum 1 ile benzer ilişkiler görülmektedir. 4 mm ve 6 mm zorlamalardaki kuvvet değerleri birbirine yakındır ve 2 mm girdideki kuvvet değerleri diğer iki zorlama genliğine kıyasla küçük kalmaktadır. Atlama frekansları düştüğü için atlama öncesi ve sonrasındaki kuvvet farkları da küçülmüştür. Sistemin bu zorlama genliklerinde, atlama frekanslarında performansı Durum 1’ye kıyasla düşük olsa da ileri tarama da sistem yüksek frekanslarda kıyasla çok daha yüksek kuvvet değerlerine sahip olabilmektedir.

Her girdide geri tarama da beliren atlama frekansları arasındaki farkın düştüğü de gözlenmektedir. Durum 1’de 2 mm ve 4 mm girdileri arasındaki 0.2 Hz olan fark Durum 2’de 0.1 Hz değerine, 4 mm ve 6 mm arasındaki 0.3 Hz fark ise 0.2 Hz’e düşmüştür.

### **Durum 3: $L = 70.0$ mm**

Durum 3’de mıknatıslar arası mesafe sistemin en az direngen olduğu duruma yakındır. Sistemin doğrusal direngenlik katsayısı yaklaşık olarak Durum 1’deki değerinin yarısıdır. Bu durum için rezonans görülebilecek minimum frekans değeri Denklem (4.3a-b)’de verilmiştir.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M_s}} = 9.43 \text{ rad/s}, \quad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = 1.50 \text{ Hz} \quad (4.3a-b)$$

Bu durum için alınan kuvvet ve girdi genliği ölçümleri sırasıyla Çizelge 4.8, Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da verilmiştir. Tüm sonuçların genlik ve kuvvet grafikleri ise Şekil 4.3'te yer almaktadır.

Çizelge 4.8 : 2 mm girdi genliği için Durum 3 ileri ve geri tarama sonuçları.

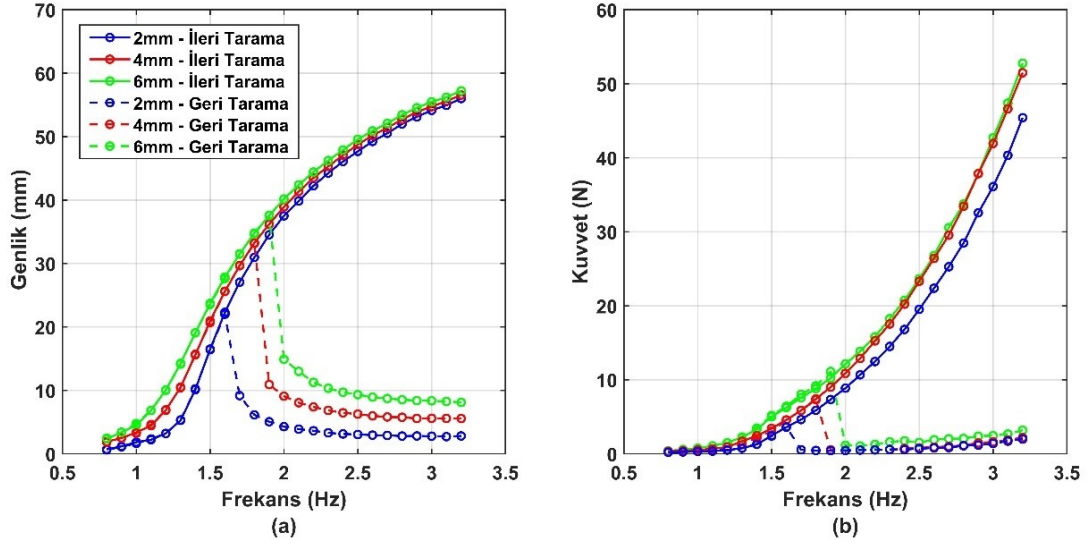
Frekans (Hz)	İleri Tarama		Geri Tarama	
	Genlik (mm)	Kuvvet (N)	Genlik (mm)	Kuvvet (N)
0.8	0.6	0.21	-	-
1.6	22.3	3.60	-	-
1.7	27	4.63	9.2	0.55
1.8	31	5.88	6.1	0.46
1.9	34.5	7.34	5.1	0.44
2	37.5	8.88	4.3	0.45
3.2	56	45.41	2.82	2.00

Çizelge 4.9 : 4 mm girdi genliği için Durum 3 ileri ve geri tarama sonuçları.

Frekans (Hz)	İleri Tarama		Geri Tarama	
	Genlik (mm)	Kuvvet (N)	Genlik (mm)	Kuvvet (N)
0.8	1.8	0.34	-	-
1.6	25.6	4.58	-	-
1.7	29.7	5.85	-	-
1.8	33.2	7.42	-	-
1.9	36.2	9.01	10.9	0.53
2	38.9	10.87	9	0.47
3.2	56.6	51.49	5.6	2.20

Çizelge 4.10 : 6 mm girdi genliği için Durum 3 ileri ve geri tarama sonuçları.

Frekans (Hz)	İleri Tarama		Geri Tarama	
	Genlik (mm)	Kuvvet (N)	Genlik (mm)	Kuvvet (N)
0.8	2.5	0.42	-	-
1.6	27.6	6.41	-	-
1.7	31.5	8.04	-	-
1.8	34.7	9.18	-	-
1.9	37.6	11.12	-	-
2	40.2	12.14	14.9	1.17
3.2	57.2	52.77	8.1	3.18



Şekil 4.3 : Deney durumu 3 için (a) yatışkın durum konum genlikleri (b) yatışkın durum kuvvet genlikleri.

Sonuçlarda görüldüğü üzere sistemin doğal frekansı diğer iki duruma göre düşmüştür. Bu durumdan dolayı seçilen genlikler arasından 2 mm zorlamada sistemin cevabı Denklem (4.3b)'de hesaplanan doğal frekansına daha yakındır. Şekil 4.3'de de görülebileceği gibi bu zorlama seviyesinde cevaptaki atlama diğer iki duruma kıyasla belirgin değildir. 4 mm ve 6 mm genliğindeki zorlamalarda ise sistem cevabındaki atlama hala net olarak görülebilmektedir.

Atlama frekansları diğer iki duruma göre gerilediği için bu frekanslarda sistemin yatışkın durum kuvvet genliği düşmeye devam etmiştir. Fakat artan mıknatıs arası mesafe ile sistemin erişebildiği maksimum kinetik enerji seviyesi daha artmış ve bu durumdan dolayı yüksek frekanslarda daha yüksek kuvvet değerleri gözlenmiştir. 4 mm ve 6 mm için birbirine yakın olan kuvvet eğrisi 3.2 Hz frekansında 50 N kuvveti geçmektedir.

#### Durum 4: $L = 75.0$ mm

Durum 4'de sistem en düşük direngenliğindedir. Bu durum için hesaplanan rezonans görülebilecek minimum frekans değeri Denklem (4.4a-b)'de verilmiştir.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M_s}} = 8.27 \text{ rad/s}, \quad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = 1.32 \text{ Hz} \quad (4.4a-b)$$

Önemli frekans değerlerinde ölçülen genlik ve kuvvet değerleri, sistemin zorlandığı genlikler için Çizelge 4.11, Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13’de görülebilir. Önceki durumlarda verildiği gibi tüm cevaplar Şekil 4.4’de grafik üzerinde verilmiştir.

Çizelge 4.11 : 2 mm girdi genliği için Durum 4 ileri ve geri tarama sonuçları.

Frekans (Hz)	İleri Tarama		Geri Tarama	
	Genlik (mm)	Kuvvet (N)	Genlik (mm)	Kuvvet (N)
0.8	1.0	0.13	-	-
1.4	22.2	2.34	-	-
1.5	27.4	3.44	8.5	0.37
1.6	32.4	4.69	5.9	0.31
1.7	36.3	6.06	4.7	0.34
1.8	39.8	7.68	4.2	0.34
3.2	2.7	1.98	2.7	1.98

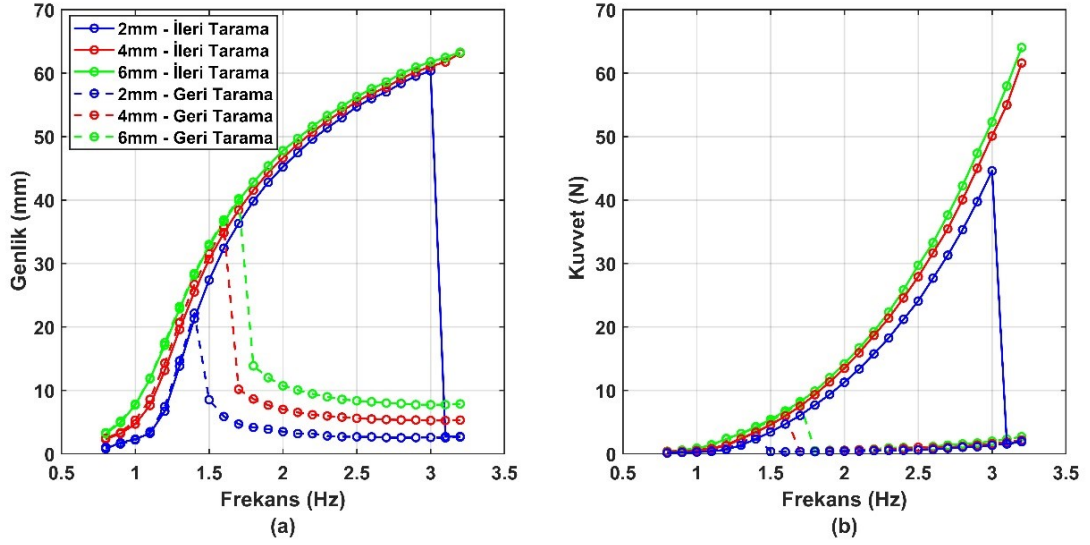
Çizelge 4.12 : 4 mm girdi genliği için Durum 4 ileri ve geri tarama sonuçları.

Frekans (Hz)	İleri Tarama		Geri Tarama	
	Genlik (mm)	Kuvvet (N)	Genlik (mm)	Kuvvet (N)
0.8	2.3	0.27	-	-
1.4	25.5	3.39	-	-
1.5	30.7	4.54	-	-
1.6	34.9	5.96	-	-
1.7	38.4	7.49	10.2	0.37
1.8	41.6	9.32	8.7	0.39
3.2	63.2	61.61	5.3	2.19

Çizelge 4.13 : 6 mm girdi genliği için Durum 4 ileri ve geri tarama sonuçları.

Frekans (Hz)	İleri Tarama		Geri Tarama	
	Genlik (mm)	Kuvvet (N)	Genlik (mm)	Kuvvet (N)
0.8	3.3	0.31	-	-
1.4	28.4	4.27	-	-
1.5	33.0	5.40	-	-
1.6	36.9	6.75	-	-
1.7	40.2	8.21	-	-
1.8	42.8	9.88	13.9	0.45
3.2	63.3	64.06	7.9	2.00





Şekil 4.4 : Deney durumu 4 için (a) yatışkın durum konum genlikleri (b) yatışkın durum kuvvet genlikleri.

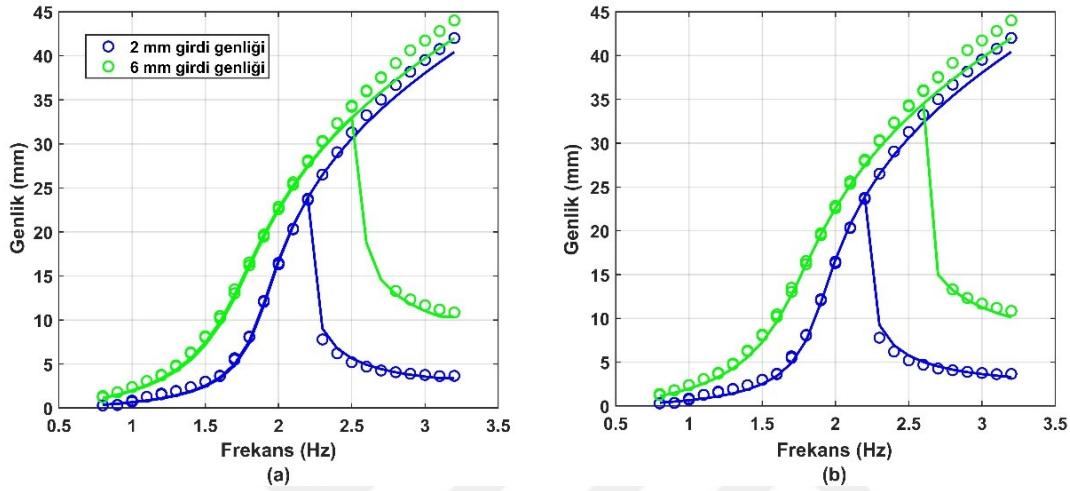
Deney durumu 4, Şekil 4.4’de de görülebileceği gibi dört durum arasından en düşük doğal frekansa sahiptir. 2 mm zorlama genliğinde sistemdeki atlama çok zayıftır ve sistem doğrusal benzetime yakın davranmaktadır. Bu frekansta ve zorlamada sistem Denklem (4.4b)’de hesaplanan minimum doğal frekansına önceki durumlardan daha yakındır. Fakat 2mm zorlamayla yapılan ileri frekans taramasında sistem 3.0 Hz yanıtında düşük genlikli çözümüne düşmektedir. 4 mm ve 6 mm genlikteki zorlamalar ise önceki durumlara benzer şekilde, ileri frekans taramasında tüm frekanslar için yüksek genlik çözümüne yakınsamışlardır.

Bu durumda mıknatıslar arası mesafe en yüksek halinde olduğu için sistemin ulaşabileceği kinetik enerji de en yüksek seviyededir. Dolayısıyla kuvvet grafiğinde atlama sonrası yüksek kuvvet değerleri görülmektedir. Sistem 4 mm ve 6 mm zorlamalar için önceki durumlara benzer şekilde yakın kuvvet değerleri göstermektedir ve bu genlikler için ulaşılan maksimum kuvvet değeri 60 N’un üstündedir. Öte yandan atlama frekansları düştüğü için, düşük frekanslarda çok daha düşük kuvvet değerlerinde sistem zıplayabilmektedir.

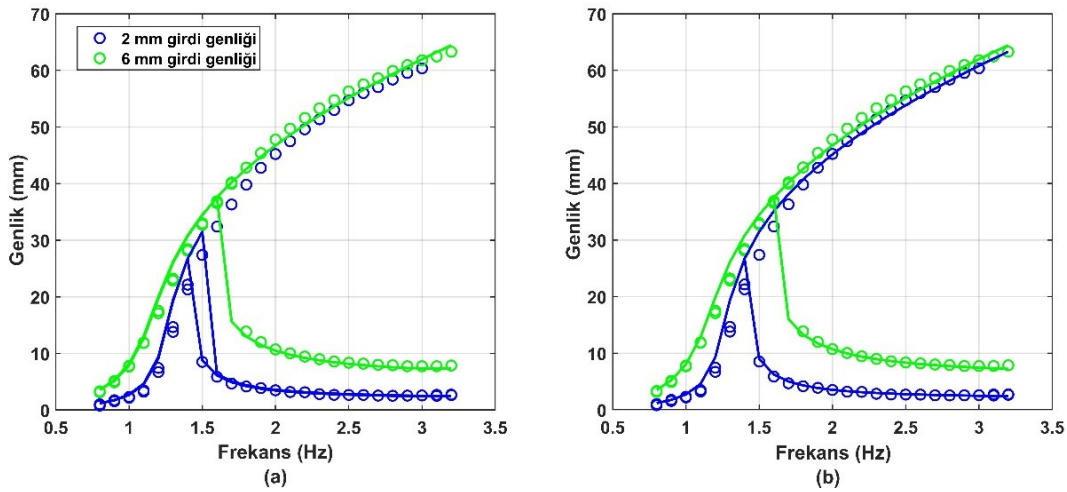
Yapılan bu deney sonucunda görülmektedir ki mıknatıslar arası mesafe arttıkça manyetik titreşim sönümleyicinin düşük genliklerde performansı düşmektedir. Ama bu düşüşe zıt olarak yüksek genlikler için performansı artmaktadır. Bu performans artışı deney sonucunda elde edilen kuvvet değerlerinde daha net görülebilmektedir. Örneğin 2.7 Hz, 6 mm zorlama için alınan kuvvet değerleri Durum 4’de Durum

1'dekinin iki katına yakındır. Fakat Durum 1'de alınan değer atlama frekansına daha yakın iken Durum 4'de atlama frekansına olan uzaklık çok daha fazladır.

Durum 1 ve Durum 4'de elde edilen sonuçlar Bölüm 2'de açıklanan tanımlayıcı fonksiyon ve kapalı form çözüm yöntemlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldı. Karşılaştırılmalı sonuçlar grafik üzerinde Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.5 : Durum 1 için deneysel sonuçlarla analitik çözümlerin karşılaştırılması. (a) Tanımlayıcı fonksiyon iterasyonları, (b) Kapalı form analitik çözümü. “o” deneysel sonuçlar, “-” analitik çözümler.



Şekil 4.6 : Durum 4 için deneysel sonuçlarla analitik çözümlerin karşılaştırılması. (a) Tanımlayıcı fonksiyon iterasyonları, (b) Kapalı form analitik çözümü. “o” deneysel sonuçlar, “-” analitik çözümler.

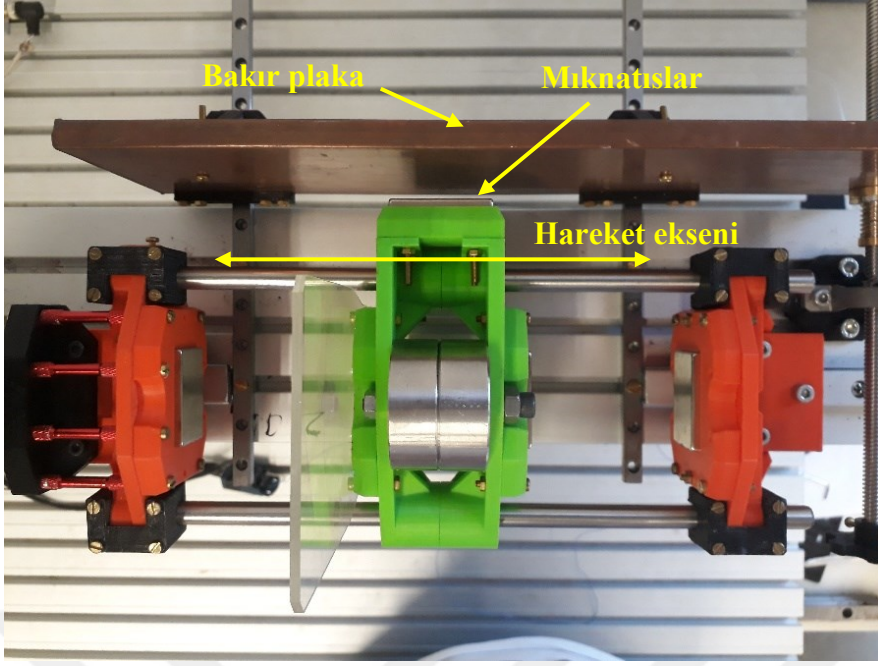
Şekil 4.5'de Deneysel Durumu 1 için elde edilen analitik sonuçlar deneysel sonuçlarla atlama frekansına kadar düşük hatada tutarlıdır. Atlama frekansının üstte kalan frekanslar için hata düşmektedir. Bunun sebebi beşinci derece polinom olarak

modellenen kuvvet eğrisinin mıknatısların tüm kuvvet değerleri için yapılmamış olmasıdır. Bölüm 2’de bahsedildiği üzere tüm kuvvet eğrisinin % 80’i kullanılmıştır. Bu yüzden beşinci derece polinom eğri uydurması yakın mıknatıslar arası mesafede gerçek eğriden sapmaktadır ve atlama frekansı yukarısında hata payı artmaktadır. Zorlama genliğine bağlı atlama frekansının konumu maksimum 0.2 Hz farkla doğru bulunmuştur. 2 mm zorlama genliğinde deneysel sonuçlar ile analitik çözümler aynı frekansta atlama vermektedir. Buna karşılık, 6 mm zorlama genliği için tanımlayıcı fonksiyon ileri ve geri iterasyonları ile deneysel sonuçlarda görülen atlama frekansı arasında 0.2 Hz fark vardır. Aynı fark kapalı form analitik çözüm için 0.1 Hz’dir.

Durum 4, Durum 1’e kıyasla daha fazla doğrusal olmayan özellik taşımaktadır. Bu sebeple Şekil 4.6’da görülebileceği gibi analitik tahminlerin atlama öncesi frekanslarda Durum 1’e kıyasla hata payları artmıştır. Bu artışın bir başka sebebi ise analitik benzetimlerde kuru sürtünmenin sıfır kabul edilmesidir. Bu durum özellikle sürtünmenin etkin kuvvet varsayılacağı 2 mm zorlama frekansında net olarak gözükmektedir. 6 mm zorlama genliği için analitik çözümler ile deneysel sonuçlar atlama genlikleri için çok yakın değer verirken iki değer arasındaki fark 2 mm zorlama genliği için artmaktadır. Bu frekanslardaki hata paylarının artmasına karşılık, atlama frekansı yukarısında kalan frekanslar için ise hata payı azalmıştır. Atlama frekanslarında ise tanımlayıcı fonksiyon iterasyonları ve kapalı form analitik çözümleri aynı yanıtları vermektedir. Bu yanıtlarda 2 mm zorlama genliği için atlama frekansı deneysel sonuçlarla aynıdır, 6 mm zorlama genliği için ise 0.1 Hz fark vardır. Ek olarak, Bölüm 2’de kısaca bahsedildiği üzere tanımlayıcı fonksiyon iterasyonları ile ileri tarama çözümünde sistemin yüksek genlikli çözümlerini elde edilememiştir. Bu problem iterasyon basamak aralıkları düşürülerek çözülebilir.

#### **4.2 Farklı Mıknatıs-Bakır Plaka Arası Mesafeler için Eddy Akımı Sönümünün İncelenmesi ve Viskoz Sürtünme Katsayısının Elde Edilmesi**

Bu deneyler, titreşim sönümleyici üzerinde bulunan, hareket eksenine dik eksende yerleştirilen mıknatıslarla bakır plaka arasındaki bağıl hızdan doğan Eddy akımı sönümünün mıknatıslar ve bakır plaka arasındaki uzaklığa göre nasıl değiştiğini görmek, bu sönümün sistemin dinamiğini nasıl etkilediğini görmek ve bu sönümü viskoz sönüm olarak modelleyip, sönüm katsayısı elde etmek amacıyla yapılmıştır.

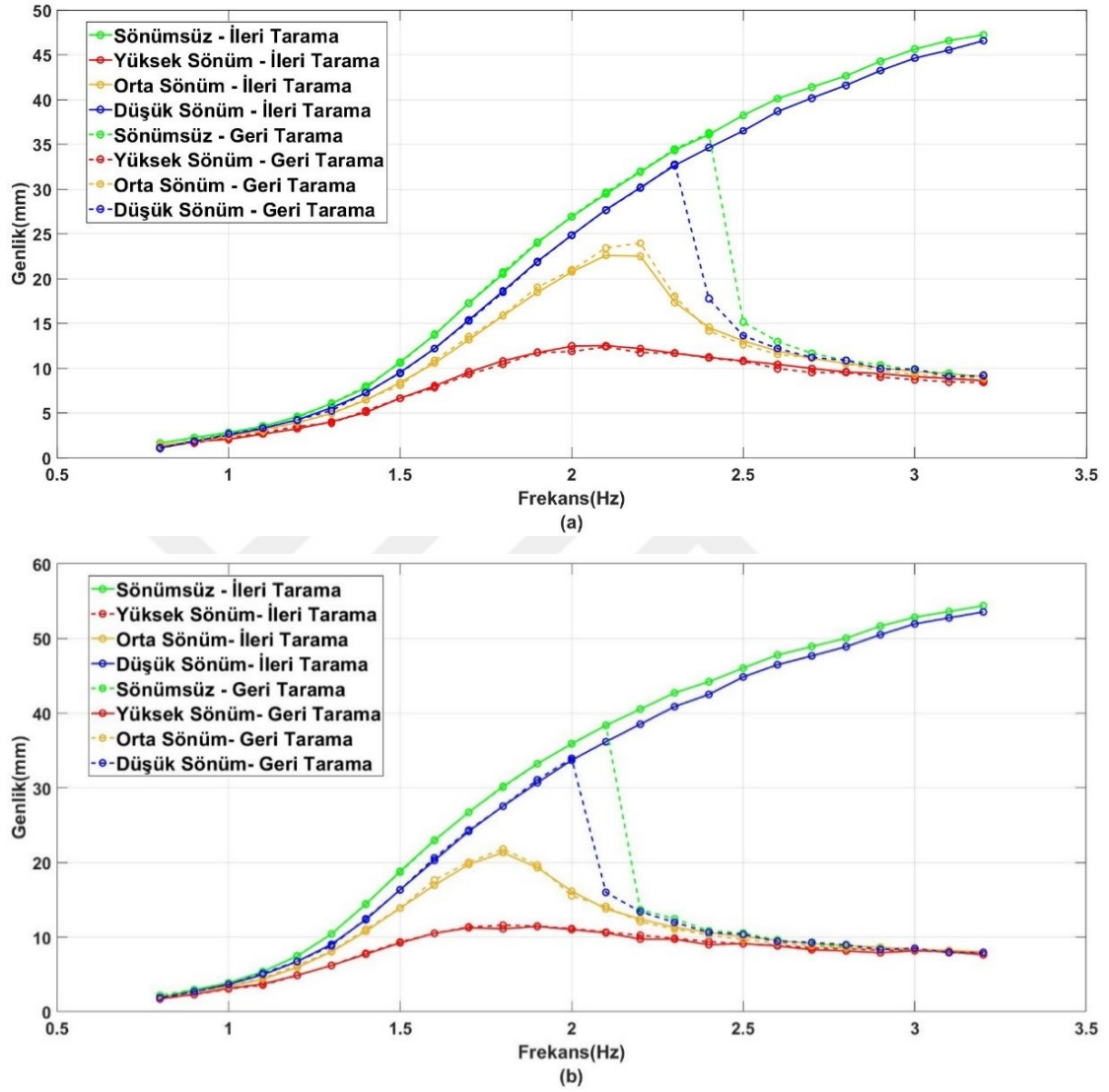


Resim 4.1 : Bakır plaka, hareket ekseni ve bu eksene dik yerleştirilen mıknatıslar.

Titreşim sönümleyicinin kütlesi 1 kg olarak ayarlanmıştır. Bu değer bir önceki deneyde seçilen kütle değeri ile aynıdır. Daha sonra sistemde üç kademe sönüm oluşturacak üç adet bakır plaka-mıknatıs arası uzaklık seçildi. Bu üç kademe yüksek, orta ve düşük sönümü temsil etmektedir. Yüksek sönüm için mesafe 4 mm, orta sönüm için mesafe 7 mm, düşük sönüm için mesafe 10 mm olarak kararlaştırıldı. Direngelik veren mıknatıslar arası uzaklık ise bir önceki deneyden farklı olarak 62.5 mm ve 67.5 mm seçildi. Her iki durum için de zorlama genliği 6 mm olan, 0.8-3.2 Hz arası frekanslarda sinüs verildi.

Alınan veriler Şekil 4.7'de grafiğe çizdirilmiştir. Şekil 4.7'de elde edilen sonuçlara göre sönüm seviyesi iki ayrı sistemde de benzer sonuçlar vermektedir. Düşük sönüm seviyesinde sistem cevabında atlama mevcuttur. İleri frekans taramasında görülen genliklerde maksimum 2.5 mm düşüş gözlenmiştir. Bunun yanında sistemin bu zorlama genliğindeki atlama frekansı 0.1 Hz düşmüştür. Orta sönüm seviyesinde ise iki sistemde de atlama durumu kaybolmuştur. İleri ve geri frekans taraması yaklaşık aynı sonucu vermektedir. Görülen küçük farkların sinyal işleme kısmındaki hatalardan bazlı olduğu varsayılp, bu farklar ihmal edilmiştir. Sistem cevabında atlama görülmemesine rağmen sistemin minimum doğal frekans değeri civarında rezonans tepesi görülmektedir. Yüksek sönümlü sistemde ise bu rezonans tepesi en düşük halini

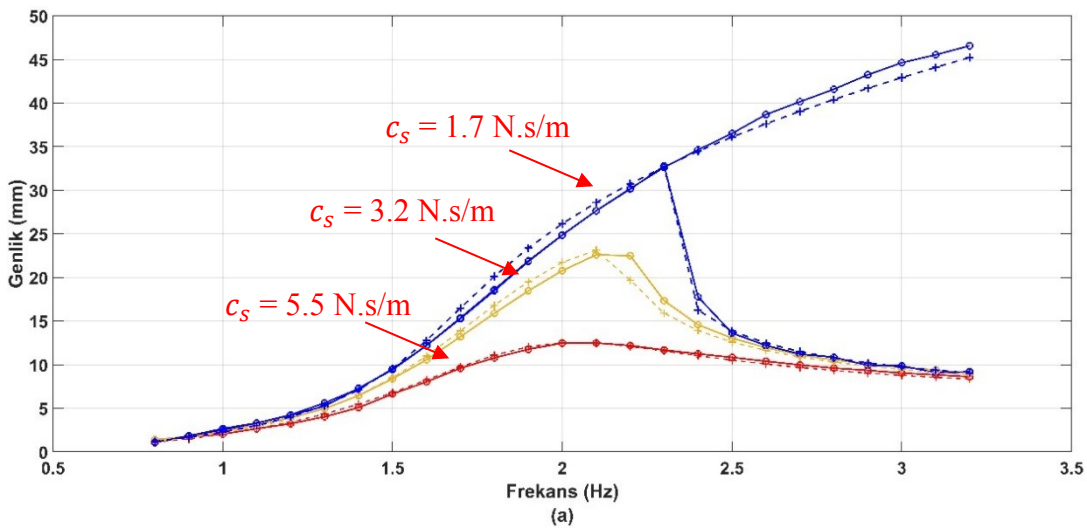
almaktadır. Sönüm seviyesi arttıkça sistem zorlanan genlikle doğrusal direngenliğe sahip sisteme benzer davranışlar göstermektedir. Bakır plaka Eddy akımı oluşturan mıknatıslara daha fazla yaklaştırılırsa belli genlikler için sistem aşırı sönümlü hale getirilebilir ve bu genlikler için sistemin hareketi kısıtlandırılabilir.



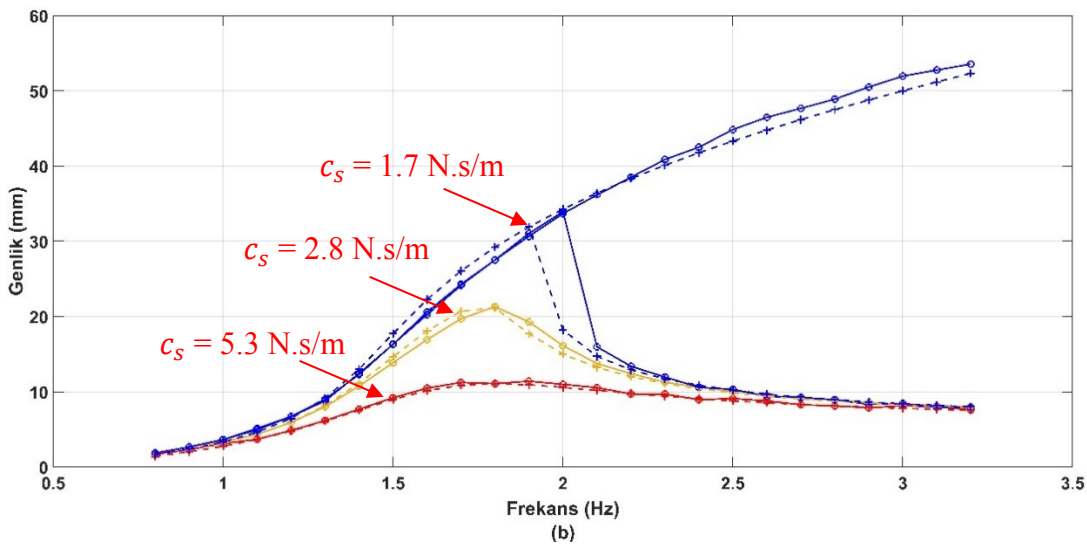
Şekil 4.7 : Sönüm kademeleri için 6 mm zorlama genliğinde elde edilen veriler. Her iki sistem için  $M_s = 1$  kg, (a) mıknatıslar arası mesafe  $L = 62.5$  mm, (b) mıknatıslar arası mesafe  $L = 67.5$  mm.

Sönüm deney sonuçları elde edildikten sonra analitik çözümler vasıtasıyla bu sönüm seviyelerini en iyi şekilde tanımlayacak viskoz sönüm katsayısı  $c_s$  değerleri aranmıştır. Bu sönüm değerleri analitik çözümlerin tahminlerinin iyileştirilmesi ve sayısal analizlerin çözüm sürelerinin kısaltıp elde edilen çözümlerin belli bir değere yakınsaması için önemlidir. Doğrusal olmayan titreşim sönümleyicinin dinamik

cevabı zorlama genliğine veya monte edildiği birincil yapının cevabına göre değişmektedir. Genliğe olan bu bağlılık, sönümsüz sistemde yarı periyodik vurulara (beats) sebep olur. Titreşim sönümleyici birincil yapıdan aldığı enerjisi sistem dışına atabilmelidir ve bunu sağlayan tek sistem elemanı viskoz sönümle benzetimi yapılan Eddy akımı sönümleyicidir. Bu bağlamda, deney sistemi ile aynı parametrelere sahip analitik benzetimi yapılmış sistemi elde edilen sönümlü sistem deney verilerine en çok yaklaştıran  $c_s$  değerleri Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Bu çözümler alınırken sıfır abul edilen kuru sürtünme katsayısı  $a$ 'nın değeri, atlama frekansı öncesinde hatayı en düşük seviyesine indirecek şekilde  $a = 0.05$  N.m alınmıştır.



Şekil 4.8 :  $L = 62.5$  mm için deney verileri üzerine oturtulan sönümlü analitik çözümler. 'o' deneysel veriler, '+' analitik çözümler.



Şekil 4.9 :  $L = 67.5$  mm için deney verileri üzerine oturtulan sönümlü analitik çözümler. 'o' deneysel veriler, '+' analitik çözümler.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da görülebileceği gibi analitik elde edilen sönümlenmiş çözümlerin sönüm katsayıları birbirine yakındır. Şekil 4.9’da düşük seviye sönüm için deneysel sonuçlarla analitik çözümün atlama frekansı arasında 0.1 Hz hata vardır. Orta sönüm seviyesinde ise rezonans tepesi civarında iki sonuç arasındaki hata payı artmaktadır. Bu hatanın en büyük olduğu frekans ilk durum için 2.2 Hz değerindedir ve hata oranı % 12 civarındadır. Yüksek sönüm seviyesinde ise en düşük hata oranları görülmüştür. Bulunan bu sönüm katsayılarının ortalaması alınarak bakır plaka-mıknatıslar arası uzaklık için genelleme yapılmıştır. Buna göre kullanılacak sönüm katsayıları Çizelge 4.14’de verilmiştir.

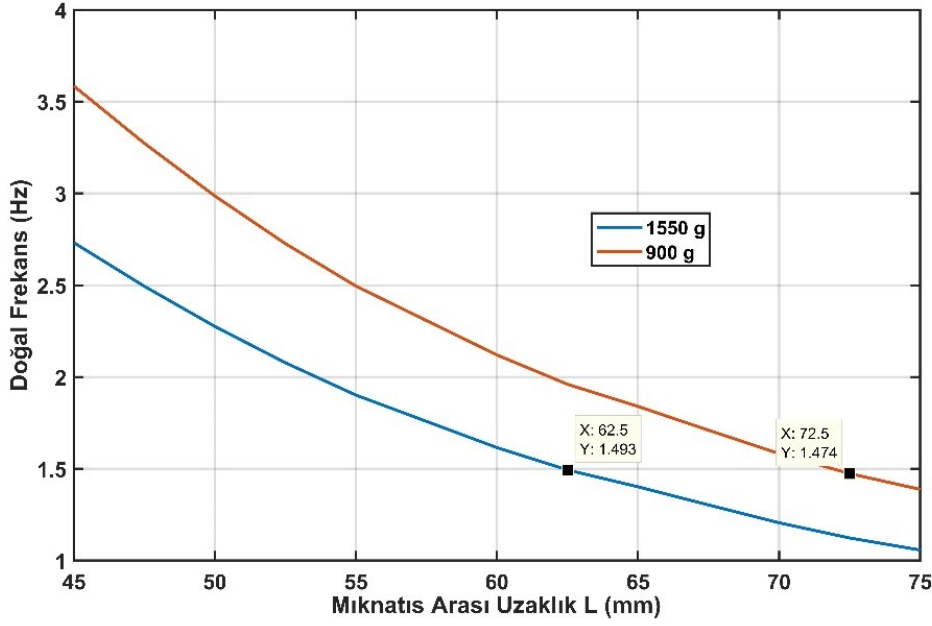
Çizelge 4.14 : Sönüm seviyelerine göre analitik ve sayısal benzetimlerde kullanılan sönüm katsayısı.

Sönüm Seviyesi	Mıknatıs-Bakır plaka arası mesafe	$c_s$
Yüksek	4 mm	5.4 N.s/m
Orta	7 mm	3.0 N.s/m
Düşük	10 mm	1.7 N.s/m

### 4.3 Farklı Kütle Değerleri için Aynı Doğal Frekansa Ayarlanmış Sönümleyicinin Davranışının İncelenmesi

Farklı kütle değerlerinin manyetik titreşim sönümleyicinin performansını nasıl etkilediği incelemek amacıyla aynı doğal frekans seviyesine ayarlanmış iki farklı kütlede manyetik titreşim sönümleyicinin genlik ve kuvvet değerleri kaydedilmiştir. İlk kütle seviyesi için sistemden bir Eddy akım sönümleyici mıknatıs çıkarılmış ve iki adet ek kütle takılmıştır. Bu durumda sistemin kütlesi 900 g olarak ölçülmüştür. İkinci durumda, ilk durumdan farklı olarak ek kütlelerin hepsi sönümleyici üzerine takılmıştır ve bu durumdaki ağırlığı 1550 g olarak ölçülmüştür.

Daha sonra analitik çözümler vasıtasıyla farklı mıknatıs arası mesafeler için bu iki kütle değerine denk gelen doğal frekans değerleri grafikte çizdirilmiştir. Bu grafik Şekil 4.10’da verilmiştir.



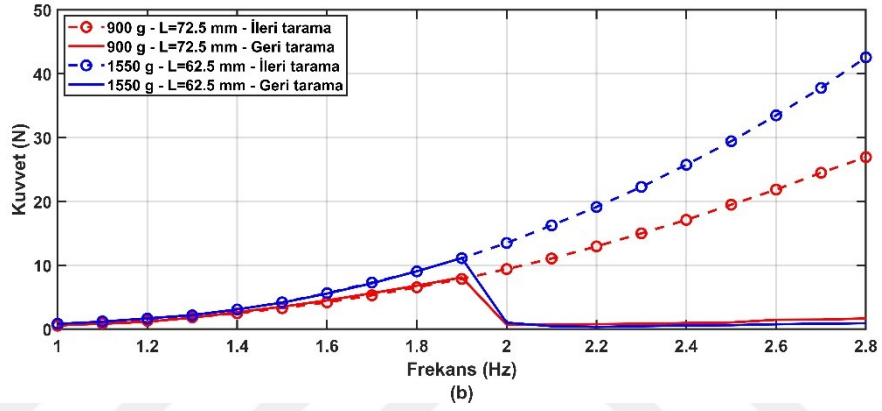
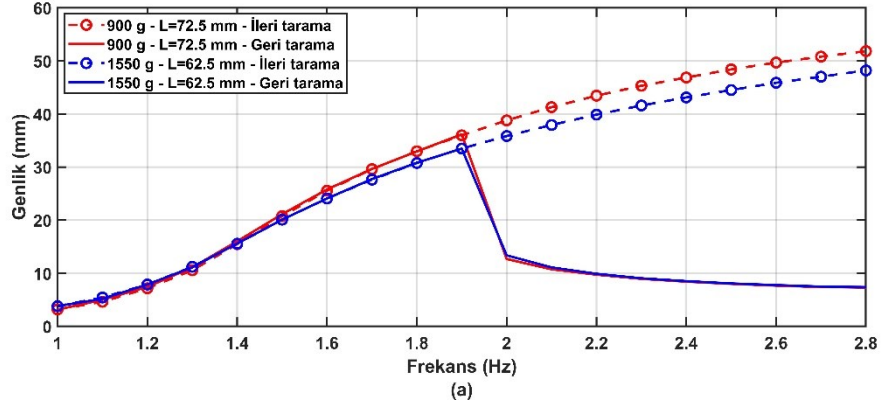
Şekil 4.10 : 900 g ve 1550 g için farklı mıknatıs arası mesafelere denk gelen doğal frekans değerleri.

Şekil 4.10’da görüldüğü gibi, titreşim sönümleyici bu iki kütle değerinde  $L = 62.5$  mm ve  $L = 72.5$  mm değerlerinde yaklaşık olarak aynı doğal frekansa sahiptir. Bu iki uzaklık değeri için manyetik titreşim sönümleyici 1.0-2.8 Hz frekans aralığında, 5 mm zorlama genliğinde ileri ve geri frekans taraması yapıldı elde edilen sonuçlar Şekil 4.11’de verilmiştir.

Şekil 4.11’de görülmektedir ki analitik çözümlerde öngörüldüğü gibi aynı frekans değerinde atlama yapmaktadır. Genlik değerleri birbirine yakındır ve 900 g ağırlındaki titreşim sönümleyici 1550 g ağırlında olana göre daha yüksek genlik değerlerine sahiptir. Kütle miktarının titreşim sönümleyiciye etkisi en belirgin olarak kuvvet grafiğinde görülmektedir. Atlama frekansı ve öncesine kuvvet değerleri arasındaki fark atlama frekansından sonraki değerlere kıyasla azdır. Bu fark atlama frekansından yüksek frekanslara gidildikçe artmaktadır.

Kuvvet değerleri daha iyi yorum yapılabilmesi amacıyla, ileri frekans taraması için Çizelge 4.15’de tablo halinde verilmiştir. Atlama frekansı ve sonraki frekans değerleri kalın yazı formatında belirtilmiştir. Ayrıca tabloda 1550 g ağırlığında elde edilen kuvvet değerlerinin 900 g ağırlığında elde edilen kuvvet değerlerine oranı verilmiştir.





Şekil 4.11 : 900 g ve 1550 g için 5 mm zorlama genliğinde frekans taraması (a) genlik sonuçları (b) kuvvet sonuçları.

Çizelge 4.15 : 900 g ve 1550 g için 5 mm zorlama genliğinde kuvvet değerleri

Frekans (Hz)	900 g kuvvet değerleri (N)	1550 g kuvvet değerleri (N)	Kuvvet artış oranı
1.3	1.84	2.16	1.17
1.6	4.19	5.62	1.34
<b>1.9</b>	7.85	11.10	1.41
<b>2.2</b>	12.95	19.12	1.48
<b>2.5</b>	19.48	29.42	1.51
<b>2.8</b>	26.93	42.56	1.58

Çizelge 4.15’de verilen kuvvet değerlerine göre atlama frekansı olan 1.9 Hz değerinde 900 g ağırlığındaki sistem için yük hücresine uygulanan kuvvet genliği 7.85 N’dur. Titreşim sönümleyicinin kütlesi 1550 g’a yükseltildiğinde ise yük hücresi maksimum 11.10 N göstermektedir. Kütle miktarı yaklaşık 1.72 katına çıkarılmıştır, fakat iki kütle seviyesi için kuvvet farkı yaklaşık 3 N’dur ve 900 g ağırlığındaki sisteme kıyasla artan

kuvvet oranı 1.41'dir. Buna karşılık 2.8 Hz değerinde ise eklenen kütle sayesinde kuvvet seviyesinde yaklaşık 16 N fark gözlenmiştir, bu artış 1.58 artış oranına denk gelmektedir. Bu kuvvet değerlerinde hareketli olmayan bileşenlerin ataletleri ihmal edilmiştir, çünkü hareketsiz bileşenler iki sistem için de aynıdır, dolayısıyla artan frekanstan dolayı yük hücrelerine uygulanan atalet kuvveti miktarı da aynıdır.

Sonuçları madde olarak özetlemek gerekirse;

- Titreşim sönümleyici düşük genlikler için birincil yapıya minimum doğal frekans değerinde ayarlanacak olursa, eklenen kütle düşük bir performans artışı sağlayacaktır.
- Eğer birincil yapı üzerinde yüksek genliklerde zorlama bekleniyorsa titreşim sönümleyicinin doğrusal direngelik teriminden hesaplanan doğal frekansının birincil yapının doğal frekansından düşük bir frekans değerine ayarlanması gerekir.
- Böylece yapının doğal frekansı manyetik titreşim sönümleyicinin atlama yaptığı bölgede kalacaktır ve bu durumda eklenen kütle, yüksek genlikte atlama yapma sonucunda düşük kütle oranına göre daha iyi performans verecektir.

## **5. YAPIYA ENTEGRE EDİLEN MANYETİK TİTREŞİM SÖNÜMLEYİCİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

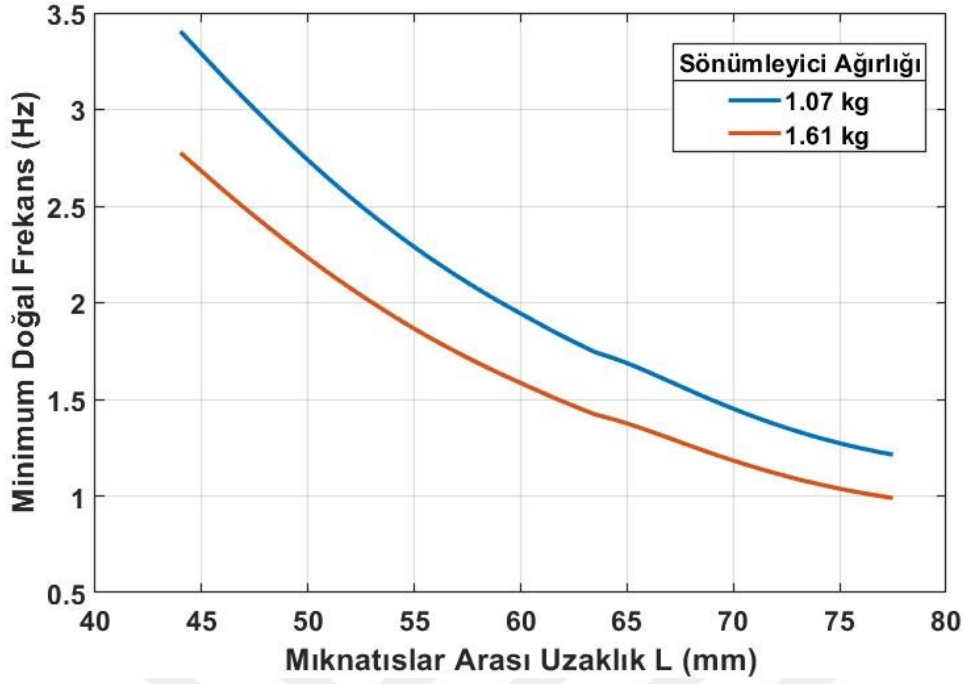
Bu bölümde bir önceki bölümlerde incelenen manyetik titreşim sönümleyici birincil bina modeli üzerine sabitlenmiştir. İki tip bina modeli üzerinde deneyler yapılmıştır. İlk bina modeli yaklaşık 23 kg ağırlığındadır ve doğal frekansı 2.7 Hz'dir. İkinci bina modeli ise yaklaşık 18 kg ağırlığındadır ve doğal frekansı 3.0 Hz'dir.

İlk kısımda, iki farklı ağırlık değerine sahip manyetik titreşim sönümleyicinin kuvvet eğrisinin doğrusal bileşeninden hesaplanan minimum doğal frekansı 23 kg ağırlığındaki birincil binanın doğal frekansına, yani 2.7 Hz'e ayarlanacaktır. Daha sonra, manyetik titreşim sönümleyicinin bir ağırlık değeri için iki farklı sönüm seviyesinde birincil binanın sinüs girdi cevabı, yapının doğal frekansı etrafındaki belli bir frekans aralığında incelenecektir. Akabinde, 2.7 Hz doğal frekansındaki bina için ayarlanan titreşim sönümleyici doğal frekansı 3.0 Hz olan bina modeli üzerine sabitlenip aynı deneyler tekrarlanacaktır.

İkinci kısımda ise, ilk kısımda sinüs girdi yanıtı incelenen kütle oranları ve sönüm seviyelerinde birincil yapıya iki farklı deprem girdisi uygulanacaktır. Bu deprem sinyalleri hem düşük hem de yüksek genlikte sisteme girdi olarak verilecektir. İlk kısımdaki gibi, 2.7 Hz doğal frekansı için yapılan bu deneyler daha sonra 3.0 Hz doğal frekansındaki yapı için tekrarlanacaktır.

### **5.1 Minimum Doğal Frekansı Birincil Binanın Doğal Frekansına Ayarlanan Manyetik Titreşim Sönümleyicinin Sinüs Girdisi için Deneysel İncelenmesi**

Bu kısımda birincil bina modeli ile etkileşimi incelenecek manyetik titreşim sönümleyici için iki farklı kütle değeri seçilmiştir. İlk kütle değeri 1.07 kg ikinci kütle değeri ise 1.61 kg'dır. Ardından bu iki farklı kütle değeri için farklı mıknatıs arası uzaklıklara denk minimum doğal frekanslar MATLAB programı yardımıyla 0.5 mm aralıklarla çizdirilmiştir. Çizdirilen bu grafikler Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 : Farklı mıknatıslar arası uzaklık için seçilen kütle değerlerindeki minimum doğal frekanslar.

Manyetik titreşim sönümleyicinin doğal frekans ayarlaması Şekil 5.1 yardımıyla yapılmıştır. Sönümlenmek istenen birincil binanın doğal frekansı 2.7 Hz'dir. Titreşim sönümleyicinin minimum doğal frekansının aynı değerde olması için, 1.61 kg ağırlığında mıknatıslar arası mesafe 45 mm, 1.07 kg ağırlındaki titreşim sönümleyici için ise aynı mesafe 50.5 mm olarak ayarlanmıştır.

İlk deney grubunda birincil binanın kütlesi 23 kg, doğal frekansı 2.7 Hz'dir. 1.07 kg ve 1.61 kg'a ayarlanan manyetik titreşim sönümleyicinin yapının kütlesine oranı yaklaşık olarak 0.05 ve 0.07'dir. Durum 1'de sönümleyici ağırlığı 1.07 kg'dır. Eddy akımı sönümü, Durum 1.a'da orta sönüm seviyesine, Durum 1.b'de ise yüksek sönüm seviyesine ayarlanmıştır. Aynı işlemler Durum 2'de titreşim sönümleyici kütlesi 1.61 kg iken tekrar edilmiştir. Tüm deney durumlarda sinüs zorlamanın genliği 1 mm'dir ve 2.0-3.5 Hz arasında ölçüm alınmıştır.

Titreşim sönümleyici olmayan sistem için, 1 mm sinüs zorlama altında, 2.0-3.5 Hz aralığında alınan yatışkın durum ölçümleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Rezonans frekanslarında sistem cevabı yüksek genliklere ulaştığı için deney durdurulmuş ve deneyin durdurulduğu andaki değerler verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Sönümleyici olmayan, 2.7 Hz doğal frekanslı sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.

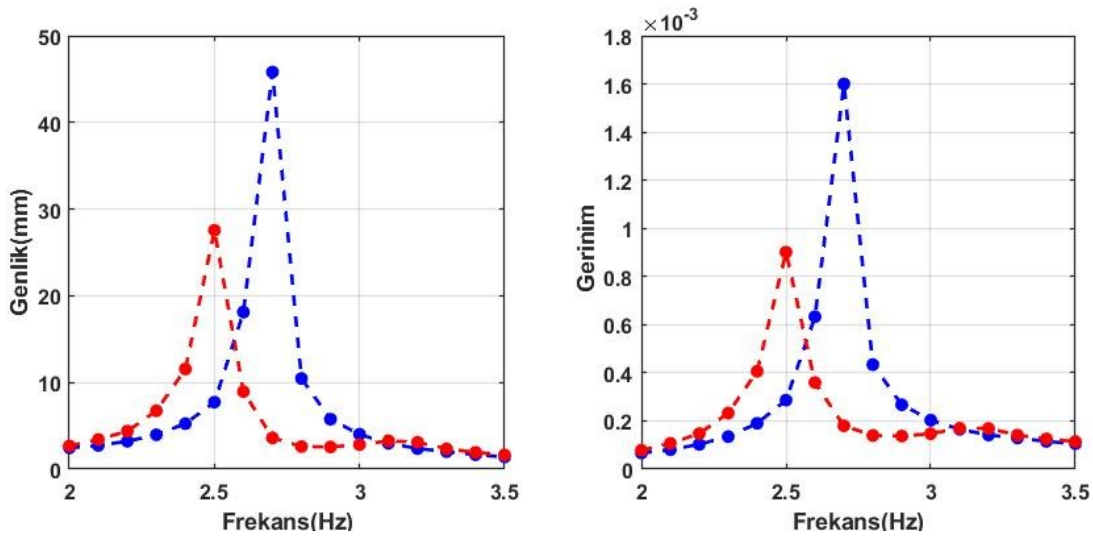
Frekans (Hz)	Yer Değişirme (mm)	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Gerinim
2.0	2.4	0.15	6.7E-05
2.4	5.3	0.68	1.9E-04
2.5	7.7	1.13	2.9E-04
2.6	18.1	2.94	6.3E-04
2.7 @ 7s	45.8	8.04	1.6E-03
2.8	10.5	2.18	4.3E-04
2.9	5.8	1.31	2.7E-04
3.0	4.0	1.03	1.4E-04
3.2	2.4	0.75	1.4E-04
3.5	1.4	0.53	1.1E-04

Durum 1.a:

0.05 kütle oranında, orta sönüm seviyesine sahip manetik titreşim sönümleyici için alınan deneysel ölçümler Çizelge 5.2’de verilmiştir. Şekil 5.2’de ise titreşim sönümleyici olmayan sistem ile titreşim sönümleyici olan sistemin yer değiştirme ve gerinim grafikleri deney yapılan frekanslar için verilmiştir.

Çizelge 5.2 : 0.05 kütle oranında, orta sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.

Frekans (Hz)	Yer Değişirme (mm)	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Gerinim	Yük Hücresi (N)
2.0	2.7	0.15	7.8E-05	1.6
2.4	11.5	1.38	4.1E-04	11.4
2.5	27.6	3.89	9.0E-04	27.4
2.6	8.9	1.53	3.6E-04	12.1
2.7	3.6	0.69	1.8E-04	6.9
2.8	2.6	0.54	1.4E-04	5.7
2.9	2.6	0.59	1.4E-04	5.6
3.0	2.8	0.70	1.5E-04	5.5
3.2	3.1	1.02	1.7E-04	2.3
3.5	1.6	0.63	1.1E-04	0.6



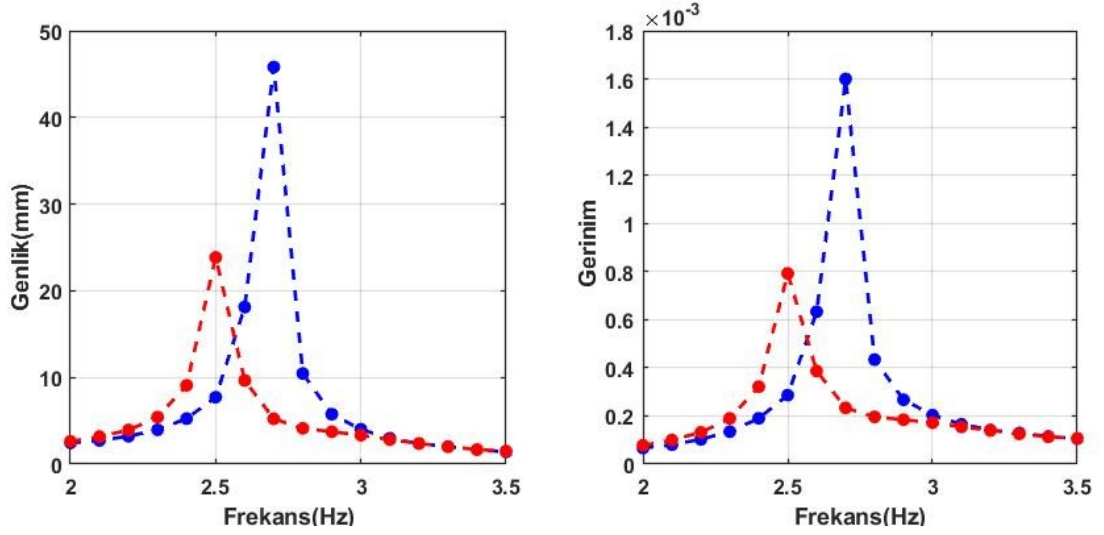
Şekil 5.2 : Kırmızı eğri: 0.05 kütle oranında, orta sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.

Durum 1.b:

Bu durumda manyetik titreşim sönümleyici üzerindeki Eddy akımı sönümleyici yüksek sönüm seviyesine ayarlanmıştır. Diğer tüm deney parametreleri aynıdır. Deney sonuçları Çizelge 5.3’de verilmiştir. Titreşim sönümleyici olmayan sistem yanıtı ile bu durumda titreşim sönümleyicili sistemden elde edilen yanıtlar Şekil 5.3’de çizdirilmiştir.

Çizelge 5.3 : 0.05 kütle oranında, yüksek sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.

Frekans (Hz)	Yer Değiştirme (mm)	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Gerinim	Yük Hücresi (N)
2.0	2.6	0.27	7.8E-05	1.3
2.4	9.1	1.10	3.2E-04	7.8
2.5	23.9	3.43	7.9E-04	22.6
2.6	9.7	1.62	3.9E-04	10.8
2.7	5.2	0.94	2.3E-04	6.0
2.8	4.1	0.85	2.0E-04	4.6
2.9	3.7	0.86	1.8E-04	3.7
3.0	3.3	0.77	1.7E-04	2.9
3.2	2.4	0.68	1.4E-04	1.2
3.5	1.5	0.58	1.1E-04	0.6



Şekil 5.3 : Kırmızı eğri: 0.05 kütle oranında, yüksek sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.

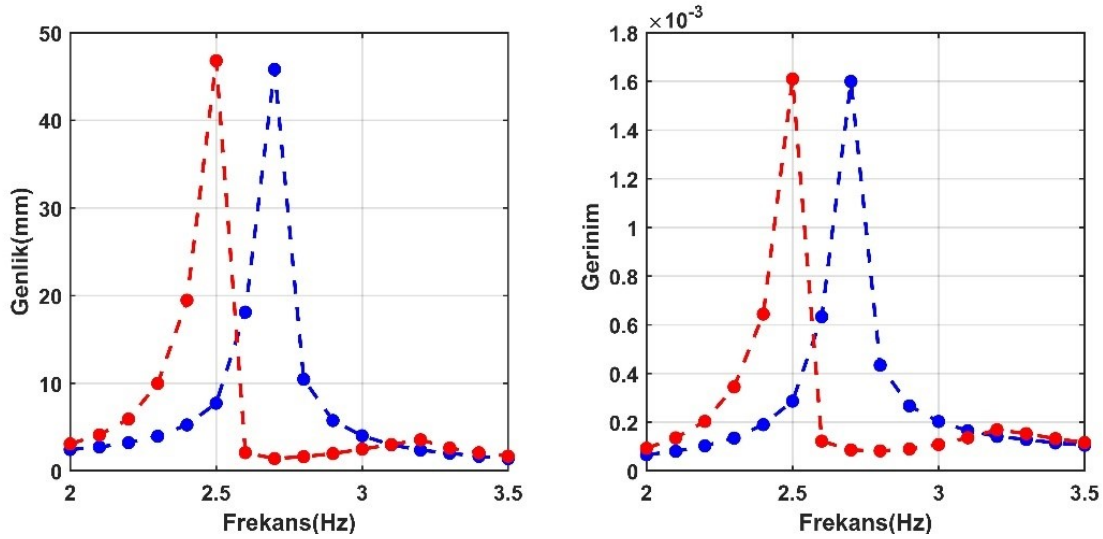
Durum 1'e genel olarak bakıldığında sönümsüz sistemin yanıtı doğal frekans etrafında iyileştirilmiştir. Bu iyileştirmeye karşılık 2.5 Hz değerinde sönümlü sistemin rezonansı gözlenmiştir ve bu frekans değerinin altındaki frekanslarda yanıtlar az oranda kötüleşmiştir. Durum 1.b'de artırılan sönüm seviyesi manyetik titreşim sönümleyicinin davranışını genel olarak değiştirmemiştir; sönümlü sistemde gözlenen rezonans davranışı aynı frekans değerindedir ve rezonans frekansındaki yer değiştirme genliği yaklaşık olarak 4 mm düşmüştür. Durum 1.a'da, 3.2 Hz frekansında sönümlü sistem titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı sönümsüz sistemden küçük bir miktar daha fazladır. Durum 1.b'de ise titreşim sönümleyici içeren sistemde bu artış görülmemiştir, sönümsüz sistemle aynı yanıtlar elde edilmiştir.

Durum 2.a:

Durum 2.a'da titreşim sönümleyici kütle oranı 0.07, Eddy akımı sönümü ise orta seviyededir. Bu durum için elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.4'de verilmiştir. Şekil 5.4'de ise sönümleyici olmayan yapı ile titreşim sönümleyicili yapının yer değiştirme ve gerinim yanıtları grafik üzerinde verilmiştir.

Çizelge 5.4 : 0.07 kütle oranında, orta sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.

Frekans (Hz)	Yer Değiştirme (mm)	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Gerinim	Yük Hücresi (N)
2.0	3.1	0.20	9.3E-05	2.5
2.4	19.5	2.39	6.4E-04	25.5
2.5 @ 10s	46.8	10.16	1.6E-03	60.4
2.6	2.1	0.36	1.2E-04	7.3
2.7	1.4	0.27	8.6E-05	6.1
2.8	1.6	0.34	8.2E-05	6.1
2.9	2.0	0.44	9.0E-05	6.8
3.0	2.5	0.64	1.1E-04	7.8
3.2	3.6	1.19	1.7E-04	9.7
3.5	1.7	0.74	1.2E-04	0.6



Şekil 5.4 : Kırmızı eğri: 0.07 kütle oranında, orta sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.

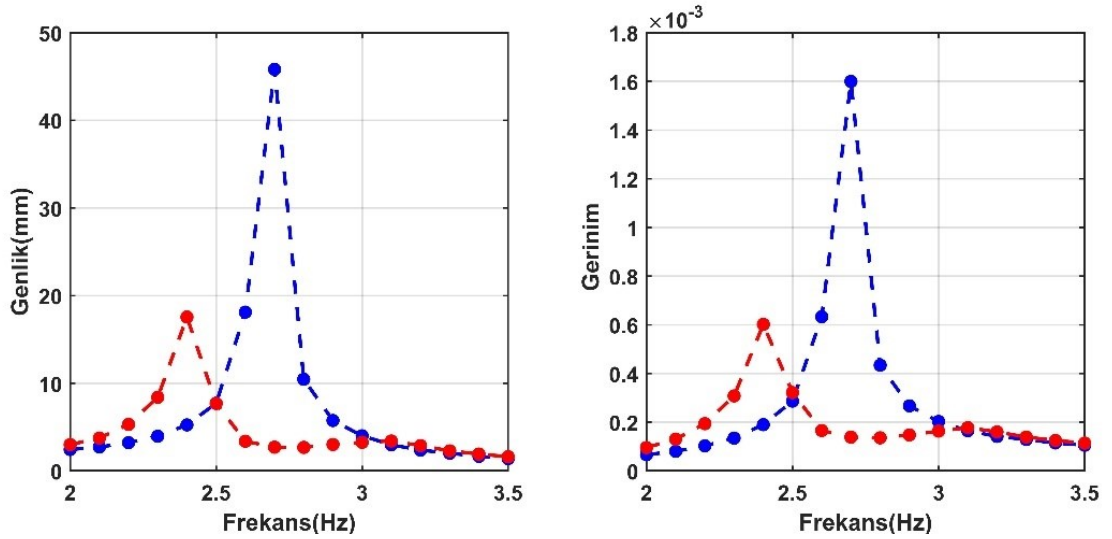
Durum 2.b:

Bu durumda manyetik titreşim sönümleyicinin kütle oranının 0.07 olduğu durumda Eddy akım sönümü yüksek seviyeye ayarlanmıştır. Diğer deney parametreleri değiştirilmemiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.5'de verilmiştir. Titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı ile sönümsüz sistemin yanıtı Şekil 5.5'de çizdirilmiştir.



Çizelge 5.5 : 0.07 kütle oranında, yüksek sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.

Frekans (Hz)	Yer Değiştirme (mm)	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Gerinim	Yük Hücresi (N)
2.0	3.0	0.19	9.6E-05	2.3
2.4	17.6	2.11	6.0E-04	22.5
2.5	7.7	1.10	3.2E-04	13.0
2.6	3.4	0.54	1.7E-04	7.2
2.7	2.7	0.49	1.4E-04	6.0
2.8	2.7	0.55	1.4E-04	5.6
2.9	3.0	0.67	1.5E-04	5.6
3.0	3.3	0.84	1.6E-04	5.1
3.2	2.9	0.95	1.6E-04	2.6
3.5	1.6	0.73	1.1E-04	0.6



Şekil 5.5 : Kırmızı eğri: 0.07 kütle oranında, yüksek sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.

Durum 2.a'da artan kütle oranı sönümsüz sistemin rezonans frekansı cevabında sistemi iyileştirse de 2.5 Hz frekansında şiddetli bir rezonans yanıtı gözlenmiştir. Bu durumdan sonra Durum 2.b'de artırılan sönüm seviyesi sonucunda 2.5 Hz frekansındaki rezonans tepesi iyileştirilmiştir ve titreşim sönümleyici içeren sistem için 2.4 Hz frekansında daha düşük yanıtı rezonans oluşmuştur. Bu rezonans değerinde titreşim sönümleyicili sistemin kat ivmesi 2.11 m/s<sup>2</sup>'dir. Sönümsüz sistemin doğal frekansında ise aynı kat ivmesi, rezonansın 7. saniyesinde 8.04 m/s<sup>2</sup> olarak ölçülmüştür.

İkinci deney grubunda ise birincil binanın kütlesi 18 kg, doğal frekansı 3.0 Hz'dir. 1.07 kg ve 1.61 kg olan titreşim sönümleyici kütlelerinin birincil binanın kütlesine olan oranları yaklaşık olarak sırasıyla 0.06 ve 0.09'dur. Bu deney grubunda, önceki durumlardaki manyetik titreşim sönümleyici kurulumları bozulmadan birincil bina modeline monte edilecektir. Yani, manyetik titreşim sönümleyicinin minimum doğal frekansı 2.7 Hz'dir ve birincil binanın 3.0 Hz olan doğal frekansının altındadır. Durum 3.a'da 0.06 kütle oranında ve orta sönüm seviyesindeki titreşim sönümleyici için, Durum 3.b'de ise kütle oranı korunarak yüksek sönüm seviyesi için deneyler yapılacaktır. Aynı işlemler Durum 4.a ve Durum 4.b'de 0.09 kütle oranındaki titreşim sönümleyici için tekrarlanacaktır. Sinüs girdi genliği 1 mm'dir. Ölçümler 2.5-3.5 Hz arasında yapılmıştır.

Sönümsüz sistemin 1 mm genlikli sinüs zorlama için, 2.5-3.5 Hz frekans aralığındaki yanıtı Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6 : Sönümleyici olmayan, 3.0 Hz doğal frekanslı sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.

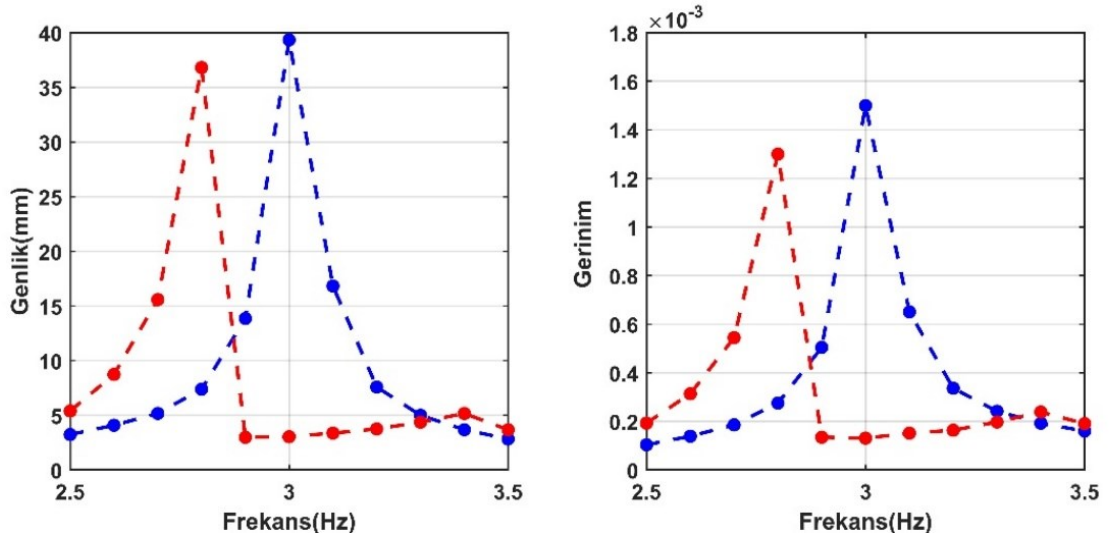
Frekans (Hz)	Yer Değiştirme (mm)	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Gerinim
2.5	3.2	0.49	1.04E-04
2.6	4.1	0.70	1.39E-04
2.7	5.2	0.98	1.86E-04
2.8	7.4	1.53	2.76E-04
2.9	13.9	3.20	5.05E-04
3.0 @ 4.7s	39.3	9.95	1.50E-03
3.1	16.8	4.70	6.51E-04
3.2	7.6	2.38	3.37E-04
3.5	2.8	1.13	1.60E-04

Durum 3.a:

0.06 sönümleyici kütle oranı için, orta sönüm seviyesinde alınan sonuçlar Çizelge 5.7'de verilmiştir. Birincil binanın doğal frekansı sonrasında sistemde yatışkın yarı periyodik yanıtlar gözlenmiştir. Bu yanıtlar için genliklerin ortalaması alınmıştır. Sönümsüz sistemin ve sönümlü sistemin yer değiştirme ve gerinim yanıtları Şekil 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.7 : 0.06 kütle oranında, orta sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.

Frekans (Hz)	Yer Değiştirme (mm)	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Gerinim	Yük Hücresi (N)
2.5	5.4	0.74	1.93E-04	6.5
2.6	8.7	1.42	3.14E-04	11.4
2.7	15.6	2.84	5.45E-04	20.7
2.8 @ 9.4s	36.8	7.32	1.30E-03	42.9
2.9	3.0	0.67	1.35E-04	6.4
3.0	3.0	0.77	1.31E-04	6.0
3.1	3.4	0.93	1.52E-04	6.2
3.2	3.8	1.14	1.64E-04	6.4
3.5	3.7	1.52	1.91E-04	0.8



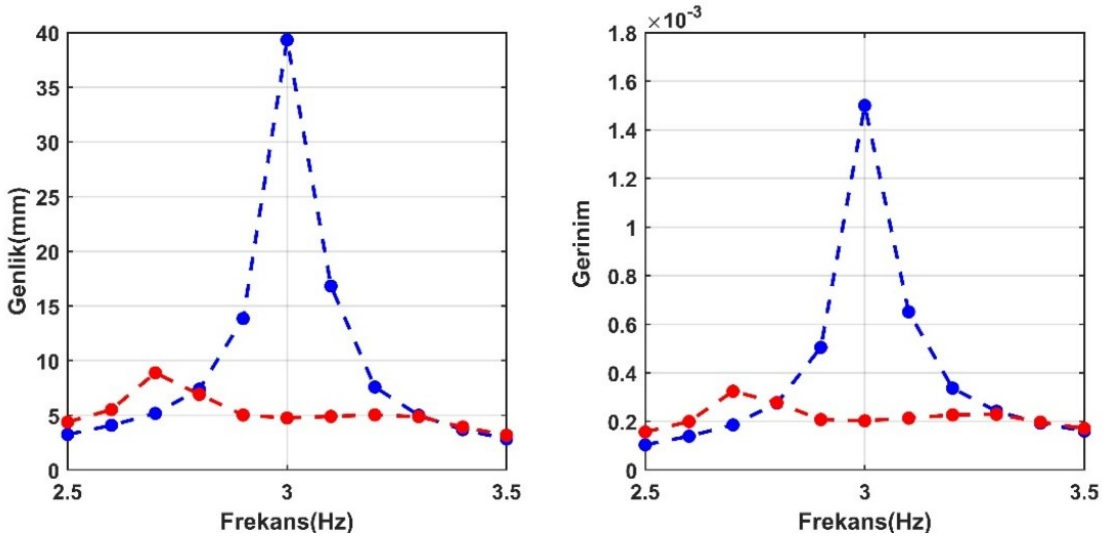
Şekil 5.6 : Kırmızı eğri: 0.06 kütle oranında, orta sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.

Durum 3.b:

Bu durumda 0.06 kütle oranına sahip manyetik titreşim sönümleyici üzerindeki Eddy akımı sönümleyici yüksek sönüm seviyesine ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.8’de verilmiştir. Manyetik titreşim sönümleyici olan sistem ile sönümleyici olmayan sistemin yanıtları Şekil 5.7’de çizdirilmiştir.

Çizelge 5.8 : 0.06 kütle oranında, yüksek sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.

Frekans (Hz)	Yer Değiştirme (mm)	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Gerinim	Yük Hücresi (N)
2.5	4.4	0.61	1.57E-04	4.1
2.6	5.5	0.91	2.00E-04	6.0
2.7	8.9	1.66	3.24E-04	11.2
2.8	6.9	1.58	2.77E-04	9.6
2.9	5.0	1.15	2.08E-04	6.5
3.0	4.8	1.26	2.03E-04	5.6
3.1	4.9	1.44	2.14E-04	5.2
3.2	5.0	1.69	2.27E-04	4.4
3.5	3.2	1.29	1.71E-04	0.9



Şekil 5.7 : Kırmızı eğri: 0.06 kütle oranında, yüksek sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.

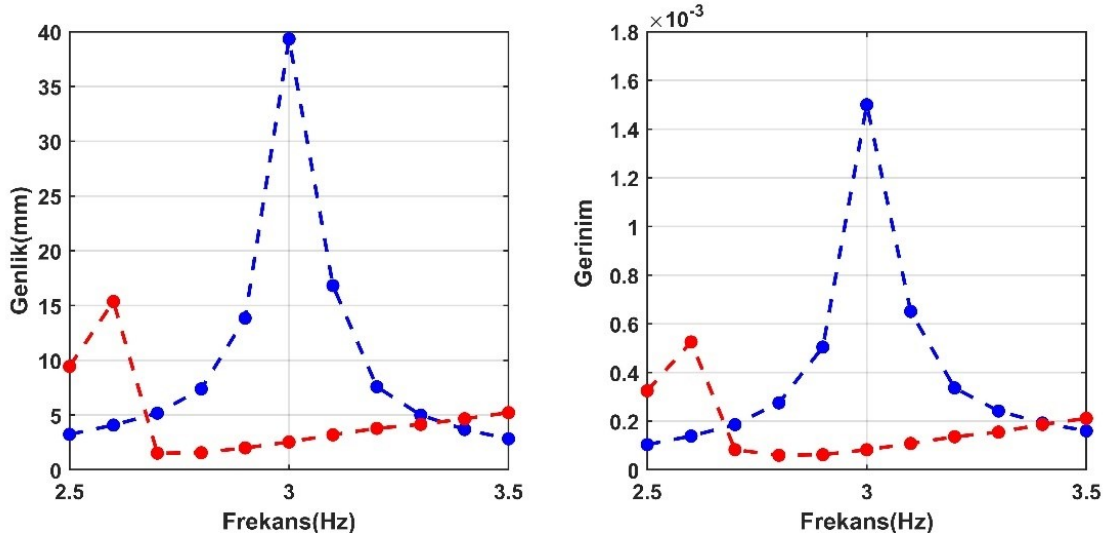
Durum 3.a'da manyetik titreşim sönümleyici binanın doğal frekansına ayarlanmamasına rağmen Durum 2'dekine benzer şekilde sönümlü yanıt elde edilmiştir. 3.0 Hz ve civarında sistemin yanıtı düşürülmüş fakat 2.8 Hz'de rezonans yanıtı gözlenmiştir. Durum 3.b'de ise artırılan sönüm seviyesinin etkili olduğu söylenebilir. Durum 3.a'da, 2.8 Hz'de gözlenen rezonans tepesi iyileştirilmiştir. Şekil 5.72'de, 2.4 Hz frekansında yüksek sönümlü sistemin rezonansı gözükmemektedir fakat şiddeti sönümsüz sisteme yakın seviyededir.

Durum 4.a:

Durum 4’de manyetik titreşim sönümleyicinin kütlesi 1.61 kg’a yükseltilmiştir. Titreşim sönümleyicinin sönümsüz sisteme olan kütle oranı 0.09’dur. Durum 4.a’da Eddy akımı sönümleyici orta sönüm seviyesine alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.9’da verilmiştir ve sönümlü sistem ile sönümsüz sistemin yer değiştirme ve gerinim yanıtları Şekil 5.8’de çizdirilmiştir.

Çizelge 5.9 : 0.09 kütle oranında, orta sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.

Frekans (Hz)	Yer Değişirme (mm)	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Gerinim	Yük Hücresi (N)
2.5	9.4	1.35	3.25E-04	16.5
2.6	15.4	2.46	5.26E-04	27.0
2.7	1.5	0.28	8.30E-05	6.5
2.8	1.6	0.32	6.01E-05	5.3
2.9	2.0	0.41	6.27E-05	5.2
3.0	2.5	0.69	8.29E-05	5.4
3.1	3.2	0.94	1.09E-04	6.5
3.2	3.8	1.24	1.36E-04	7.6
3.5	5.2	1.98	2.12E-04	12.3



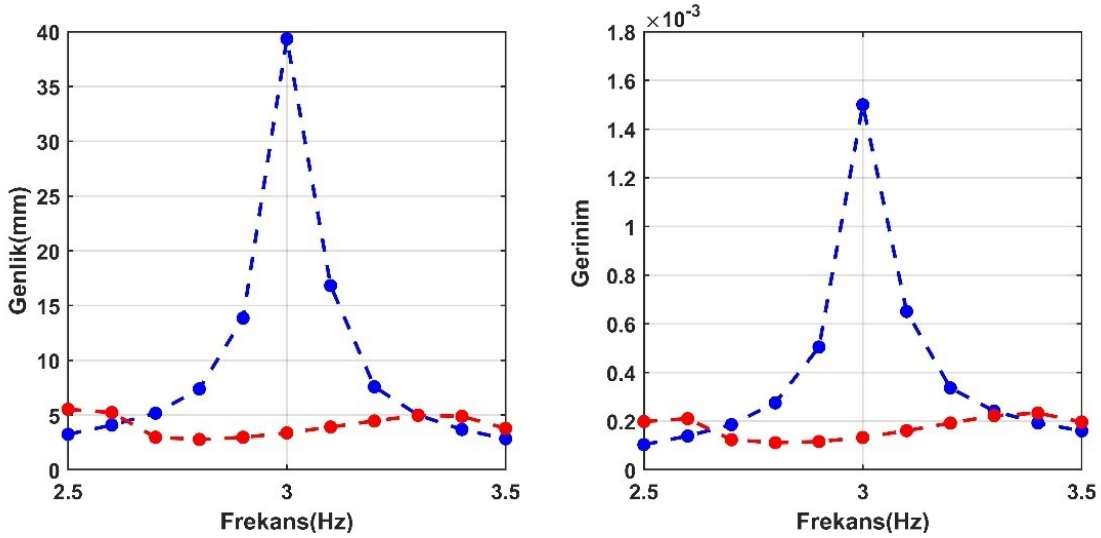
Şekil 5.8 : Kırmızı eğri: 0.09 kütle oranında, orta sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.

Durum 4.b:

Bu durumda Durum 4.a'dan farklı olarak Eddy akım titreşim sönümleyici yüksek sönüm seviyesine getirilmiştir. Deneysel sonuçlar Çizelge 5.10'da verilmiştir. Şekil 5.9'da ise titreşim sönümleyici olmayan sistem ve titreşim sönümleyici olan sistemin yer değiştirme ve gerinim yanıtları grafik olarak verilmiştir.

Çizelge 5.10 : 0.09 kütle oranında, orta sönümlü titreşim sönümleyici olan sistem için 1.0 mm sinüs zorlama altında alınan deneysel ölçümler.

Frekans (Hz)	Yer Değişirme (mm)	İvme (m/s <sup>2</sup> )	Gerinim	Yük Hücresi (N)
2.5	5.5	0.75	1.99E-04	9.5
2.6	5.2	0.84	2.11E-04	10.4
2.7	3.0	0.57	1.24E-04	6.3
2.8	2.8	0.64	1.12E-04	5.3
2.9	3.0	0.70	1.16E-04	5.0
3.0	3.4	0.87	1.33E-04	5.1
3.1	3.9	1.14	1.61E-04	5.7
3.2	4.5	1.44	1.92E-04	6.0
3.5	3.8	1.55	1.97E-04	1.3



Şekil 5.9 : Kırmızı eğri: 0.09 kütle oranında, yüksek sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı. Mavi eğri: sönümsüz sistem yanıtı.

Durum 4.a ve Durum 4.b'de, manyetik titreşim sönümleyici geniş frekans aralığında sistem yanıtını iyileştirmiştir. Durum 4.a'da sönümleyicili sistemin 2.6 Hz frekansında rezonansı gözlenmiştir. Ayrıca, 2.8 Hz'den 3.5 Hz frekans değerine gidildikçe titreşim

sönümleyici içeren sistemin yanıtı artmıştır. Özellikle Durum 4.a'da titreşim sönümleyicili sistemin 3.5 Hz'de yer değiştirme yanıtı sönümsüz sistemin yaklaşık iki katıdır. Bunun birlikte ivme ve gerinim değerleri de artmıştır. Fakat daha sonra arttırılan sönüm sayesinde Durum 4.a'daki titreşim sönümleyici içeren sistemin rezonansı en düşük değerine indirgenmiş ve 3.5 Hz frekansındaki yanıt artışı iyileştirilmiştir.

Durum 1 ve Durum 2'de manyetik titreşim sönümleyicinin minimum doğal frekansının birincil yapıyla aynı frekansa ayarlanması, bu doğal frekans değerinde ve sonrasında etkili bir iyileştirme göstermiştir. Fakat bu durumlarda her deney sistemi için sönümlü sistemle rezonans mevcuttur. Durum 2.a için sönümleyicili sistemin rezonansı sönümsüz sistemin rezonansından daha şiddetlidir. Sönümün arttırılması her iki kütle değeri için de sönümlü sistem rezonans yanıtlarını azaltmıştır.

Durum 3 ve Durum 4'de ise manyetik titreşim sönümleyicinin minimum doğal frekansı birincil yapının doğal frekansının altında kalmaktadır. Bölüm 4'de incelenen manyetik titreşim sönümleyicinin genlik duyarlılığı sayesinde, önceki durumlardaki manyetik titreşim sönümleyici kurulumları özel bir ayar gerektirmeden sistem yanıtını iyileştirmiştir. Bu deney durumlarında sönümün arttırılması Durum 1 ve Durum 2'ye kıyasla sönümlü sistemin performansını daha etkili şekilde arttırmıştır. Yüksek sönüm seviyesinde orta sönüm seviyelerinde görülen sönümlü sistem rezonansındaki yanıtlarda % 60-80 arasında iyileşme görülmüştür.

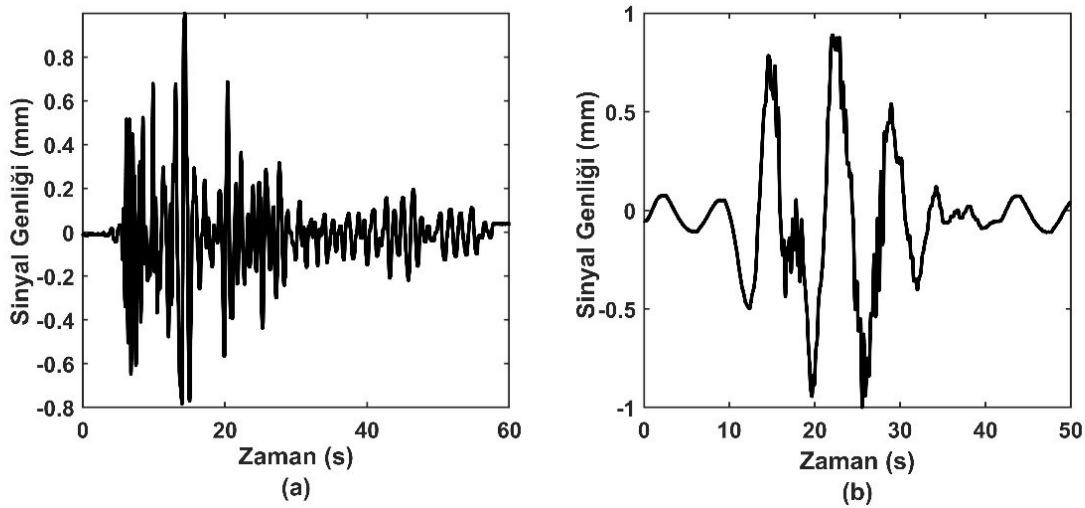
Bu dört durumda yapılan deneyler manyetik titreşim sönümleyicinin doğal frekansının, sönümlenmek istenen binanın doğal frekansının altında ayarlanması gerektiğini göstermektedir. Böylece sistemde daha geniş bir sönüm aralığı elde edilecektir ve farklı doğal frekansa sahip benzer yapılarda da benzer yanıtlar görülecektir.

## **5.2 Minimum Doğal Frekansı Birincil Binanın Doğal Frekansına Ayarlanan Manyetik Titreşim Sönümleyicinin Deprem Girdisi için Deneysel İncelenmesi**

Bu bölümde önceki bölümdeki birincil bina modelleri ve manyetik titreşim sönümleyici kurulumları için sisteme iki farklı deprem girdisi verilip sistemin yanıtı incelenecektir. Bu deprem sinyallerinden ilki Ferndale, California'da 2014 yılında

gerçekleşmiştir ve 58 s uzunluğundadır. İkinci deprem sinyali ise Düzce’de 1999 yılında gerçekleşen depreme aittir. Bu deprem ise yaklaşık 50 s uzunluğundadır. İlk depremin baskın frekansı 0.67 Hz, ikinci depremin baskın frekansı ise 0.14’dür. İlk deprem sinyali içerisinde 2.47 Hz ve 2.67 Hz frekanslarında bileşenler bulunmaktadır. İkinci deprem sinyalinde ise diğer baskın frekanslar 2.50 Hz ve 2.90 Hz’dir.

Bu deprem sinyalleri maksimum genlik değerlerinde normalize edilmişlerdir. Birinci deprem sinyali 580 örnek sayısında 10 Hz ile örneklenmiştir. İkinci deprem sinyali ise 5000 örnek sayısında 100 Hz ile örneklenmiştir. Bu deprem sinyalleri Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.10 : Kullanılan deprem sinyalleri (a) Birinci deprem sinyali: 2014 Ferndale Depremi, (b) İkinci deprem sinyali: 1999 Düzce Depremi.

Normalize edilmiş bu deprem sinyalleri deprem başına iki farklı katsayı ile çarpılıp düşük ve yüksek girdili deprem sinyalleri oluşturulmuştur. Böylece birinci deprem sinyali için düşük girdi 6 mm, yüksek girdi ise 12 mm olarak ayarlanmıştır. İkinci deprem sinyali için oluşturulan düşük ve yüksek girdi genliği ise, Düzce depreminin ölçeklenmemiş genliğinin 1/4'ü ve 1/2'si olan 13.15 mm ve 26.30 mm'dir.

Deneyde manyetik titreşim sönümleyicisistem kurulumları bir önceki sinüs girdi deneylerinde olan kurulumlarla aynıdır. Bu titreşim sönümleyici kurulumları için iki deney sinyali için sensörlerden toplanan yer değiştirme, gerinim, ivme değerleri kaydedilmiştir. Kaydedilen bu değerleri için, birinci deprem sinyalinin 4. ve 60.



saniyeleri arasında, ikinci deprem sinyalinin ise 15. ve 60. saniyeleri arasında RMS ve maksimum seviyeleri hesaplanmıştır.

Durum 1:

Bu durumda yapının doğal frekansı 2.7 Hz'e ayarlanmıştır. Kullanılan manyetik titreşim sönümleyici kurulumlarında, sönümleyicinin yapının kütesine olan oranı 0.05 ve 0.07'dir. Sisteme Durum 1.a'da birinci deprem sinyali, Durum 1.b'de ise ikinci deprem sinyali uygulanmıştır.

Durum 1.a:

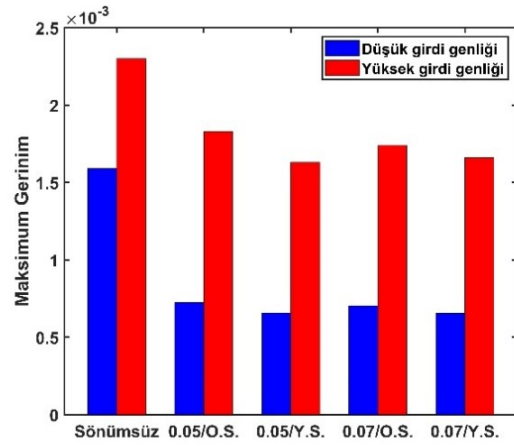
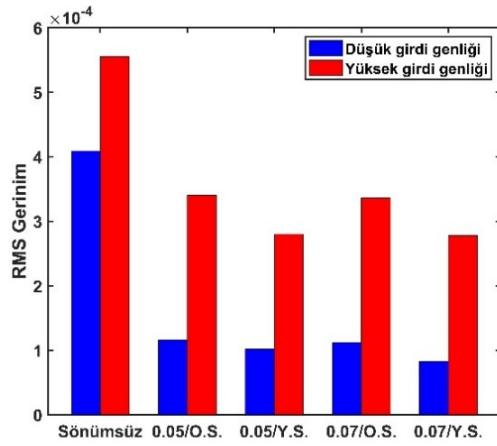
Düşük ve yüksek girdide birinci deprem sinyali uygulanan sistem için farklı kütle oranlarında elde edilen RMS ve maksimum sonuçlar orta sönüm seviyesi için Çizelge 5.11'de, yüksek sönüm seviyesi için ise Çizelge 5.12'de verilmiştir. Şekil 5.11'de bina modelinin gerinim, Şekil 5.12'de ivme ve Şekil 5.13'de ise yer değiştirme verilerinin RMS ve maksimum değerleri farklı kütle oranları, sönüm seviyeleri ve farklı deprem sinyali seviyeleri için verilmiştir. Tüm şekillerde 'O.S.' kısaltması orta sönüm seviyesini, 'Y.S.' kısaltması ise yüksek sönüm seviyesini ifade etmektedir.

Çizelge 5.11 : Durum 1.a için orta sönüm seviyesinde sistemin birinci deprem sinyaline yanıtı.

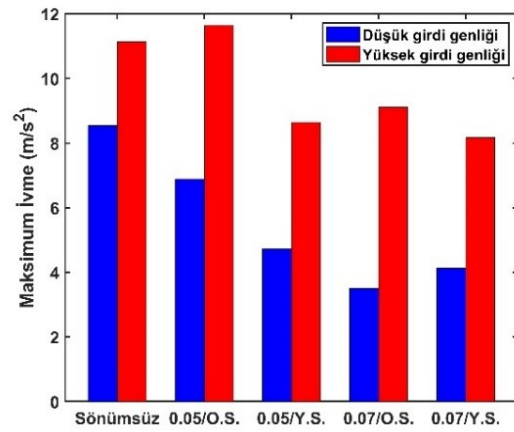
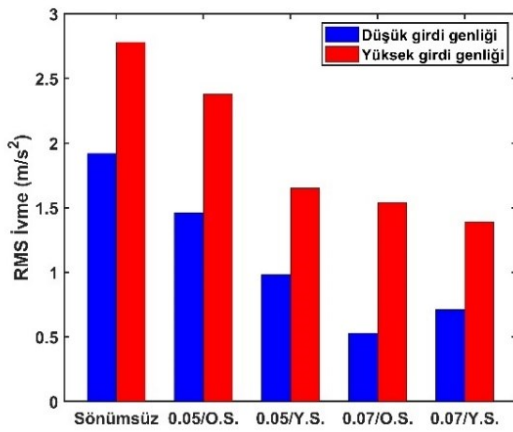
Kütle Oranı	Maksimum Girdi Genliği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
-	6	4.09E-04	1.59E-03	1.92	8.54	10.33	38.30
-	12	5.55E-04	2.30E-03	2.78	11.14	15.61	59.11
0.05	6	1.16E-04	7.26E-04	1.46	6.88	3.12	18.77
0.05	12	3.40E-04	1.83E-03	2.38	11.64	10.28	49.23
0.07	6	1.12E-04	7.04E-04	0.53	3.50	3.01	18.57
0.07	12	3.36E-04	1.74E-03	1.54	9.11	10.35	47.92

Çizelge 5.12 : Durum 1.a için yüksek sönüm seviyesinde sistemin birinci deprem sinyaline yanıtı.

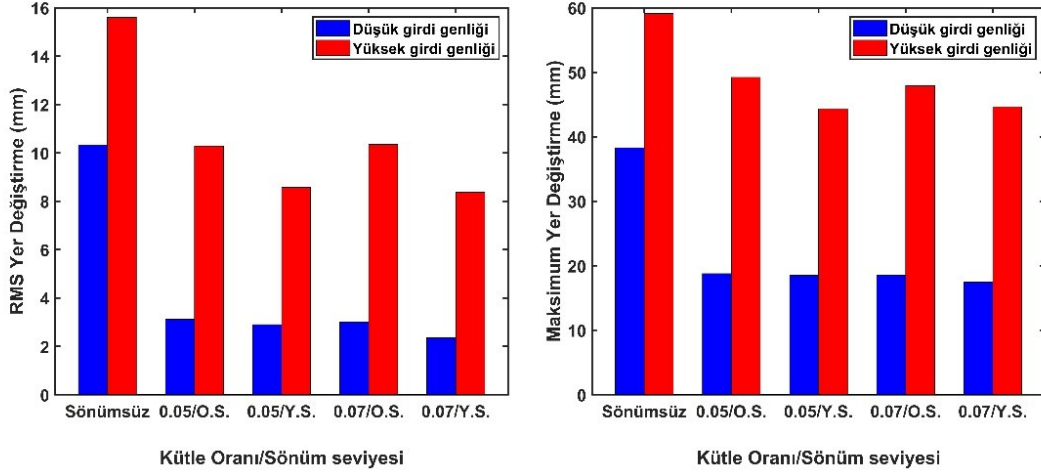
Kütle Oranı	Maksimum Girdi Genliği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
-	6	4.09E-04	1.59E-03	1.92	8.54	10.33	38.30
-	12	5.55E-04	2.30E-03	2.78	11.14	15.61	59.11
0.05	6	1.02E-04	6.57E-04	0.98	4.72	2.90	18.53
0.05	12	2.80E-04	1.63E-03	1.65	8.64	8.58	44.33
0.07	6	0.82E-04	6.54E-04	0.71	4.13	2.35	17.43
0.07	12	2.78E-04	1.66E-03	1.39	8.17	8.38	44.66



Şekil 5.11 : Durum 1.a için birinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum gerinim seviyeleri.



Şekil 5.12 : Durum 1.a için birinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum ivme seviyeleri.



Şekil 5.13 : Durum 1.a için birinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum yer değiştirme seviyeleri.

Durum 1.b :

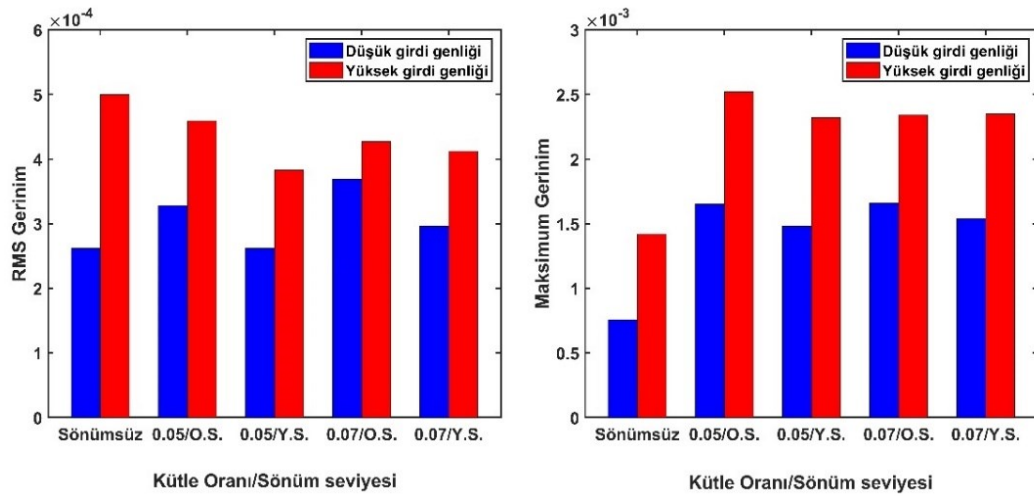
Bu durumda sisteme düşük ve yüksek girdi genlikli ikinci deprem sinyali uygulanmıştır. Farklı kütle oranlarında orta sönüm seviyesinde elde edilen sonuçlar Çizelge 5.13’de, yüksek sönüm seviyesinde elde edilen sonuçlar ise Çizelge 5.14’de verilmiştir. Şekil 5.14’de deney sonucunda elde edilen gerinim değerlerinin, Şekil 5.15’de ivme değerlerinin ve Şekil 5.16’da yer değiştirme değerleri, girdi seviyelerine göre çizdirilmiştir.

Çizelge 5.13 : Durum 1.b için orta sönüm seviyesinde sistemin ikinci deprem sinyaline yanıtı.

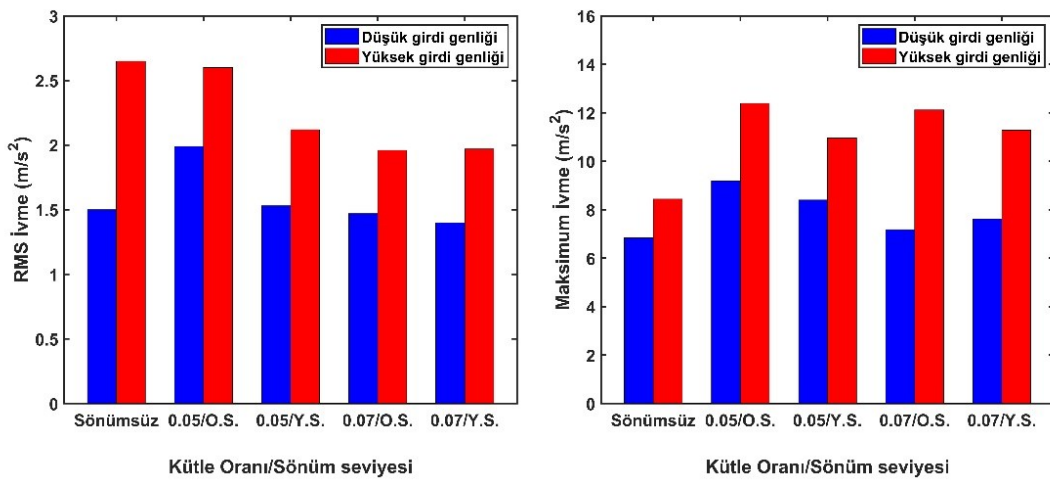
Kütle Oranı	Maksimum Girdi Genliği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
-	13.15	2.62E-04	7.56E-04	1.50	6.84	8.01	26.53
-	26.30	5.00E-04	1.42E-03	2.65	8.44	16.41	53.93
0.05	13.15	3.28E-04	1.65E-03	1.99	9.19	10.60	50.93
0.05	26.30	4.59E-04	2.52E-03	2.60	12.39	16.98	77.08
0.07	13.15	3.69E-04	1.66E-03	1.47	7.18	11.02	48.11
0.07	26.30	4.27E-04	2.34E-03	1.96	12.12	15.80	71.48

Çizelge 5.14 : Durum 1.b için yüksek sönüm seviyesinde sistemin ikinci deprem sinyaline yanıtı.

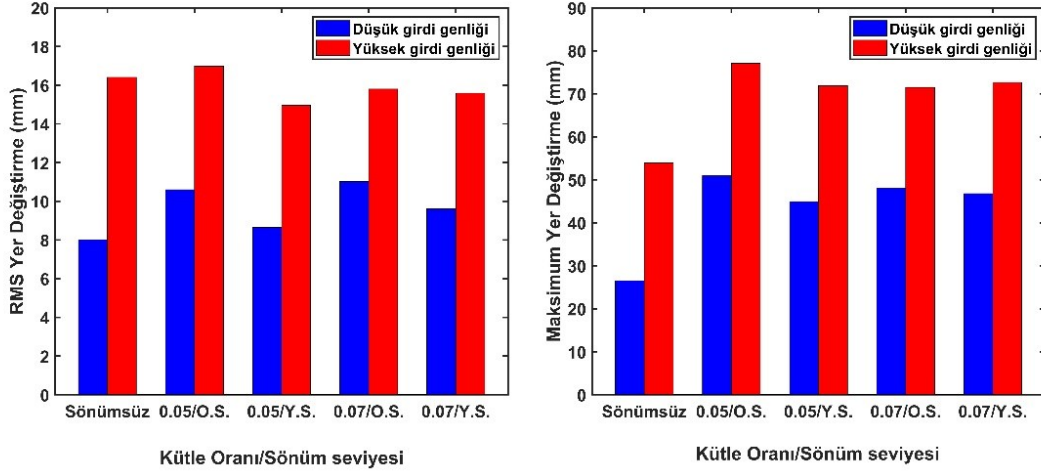
Kütle Oranı	Maksimum Girdi Genliği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
-	13.15	2.62E-04	7.56E-04	1.50	6.84	8.01	26.53
-	26.30	5.00E-04	1.42E-03	2.65	8.44	16.41	53.93
0.05	13.15	2.62E-04	1.48E-03	1.53	8.40	8.65	44.95
0.05	26.30	3.83E-04	2.32E-03	2.12	10.96	14.96	71.86
0.07	13.15	2.96E-04	1.54E-03	1.40	7.62	9.61	46.80
0.07	26.30	4.12E-04	2.35E-03	1.97	11.28	15.59	72.63



Şekil 5.14 : Durum 1.b için ikinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum gerinim seviyeleri.



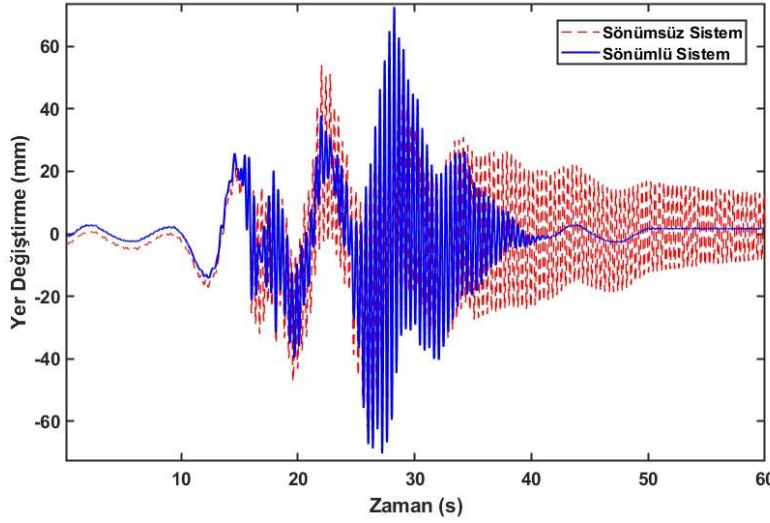
Şekil 5.15 : Durum 1.b için ikinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum ivme seviyeleri.



Şekil 5.16 : Durum 1.b için ikinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum yer değiştirme seviyeleri.

Durum 1.a'da birinci deprem sinyali uygulanarak elde edilen tüm sonuçlar için sistem performansında iyileşme gözlenmiştir. Gerinim ve yer değiştirme iyileştirmelerinin düşük girdi genliğinde her sistem için benzer olduğu söylenebilir. İvme değerlerinde ise en iyi iyileştirme 0.07 kütle oranına sahip, orta seviye sönüme ayarlanan manyetik sönümleyicide elde edilmiştir. Yüksek girdi genliğinde ise tüm verilerde sönüm seviyesine göre farklılık gösteren iyileşmeler kaydedilmiştir. Farklı kütle oranları sistemin gerinim ve yer değiştirme yanıtında çok fark yaratmamıştır. Buna karşılık alınan ivme değerlerinde titreşim sönümleyicinin kütle oranı arttıkça sistem yanıtındaki iyileşme de artmıştır.

Durum 1.b'de sisteme uygulanan ikinci deprem sinyalinde ise sistem yanıtları eklenen titreşim sönümleyici ile kötüleşmiştir ve doğrusal olarak ayarlanan manyetik titreşim sönümleyiciyle sistem cevabı iyileştirilememiştir. Bu girdi sinyalinde kullanılan genlikler birinci deprem sinyaline göre daha büyüktür. Ve sönümlenmiş sistemin doğal frekansında baskın olan sinyal frekansları birinci sinyale kıyasla daha uzun süre uygulanmaktadır. Bu sebepten dolayı tüm sistemin dinamiği erken sonlansa da, incelenen süre aralığında sistemin performansı düşmüştür. Şekil 5.17'de diğer sistemlere kıyasla RMS değerlerinde iyileşme görülen, titreşim sönümleyicinin kütle oranının birincil yapının kütle oranının 0.07 olduğu, yüksek sönüm seviyesindeki titreşim sönümleyici içeren sistem ile sönümsüz sistemin yüksek genlikli ikinci deprem sinyali için yer değiştirme yanıtı verilmiştir.



Şekil 5.17 : Yüksek girdi genlikli ikinci deprem sinyali için, 0.07 kütle oranında, yüksek sönüm seviyesinde sistem ile sönümsüz sistemin yanıtı.

Şekil 5.17’de görüldüğü gibi deprem başlangıcında ve bitiminde sistem yanıtında iyileştirmeler mevcuttur, fakat depremin yaklaşık olarak 25-30 sn aralığında baskın frekans sönümlü sistemin doğal frekansındadır ve sönümsüz sistemden daha şiddetli rezonans görülmektedir.

Durum 2:

Bu durumda birincil yapının kütlesi yaklaşık olarak 18 kg’dır ve doğal frekansı 3.0 Hz olarak ayarlanmıştır. Durum 1’de kullanılan manyetik titreşim sönümleyici kurulumları değiştirilmeden kullanılmıştır. Bu bina modeli için manyetik titreşim sönümleyicinin kütlesinin bina modelinin kütlesine oranları sırasıyla 0.06 ve 0.09’dur. Sisteme Durum 2.a’da birinci deprem sinyali, Durum 2.b’de ise ikinci deprem sinyali uygulanmıştır.

Durum 2.a:

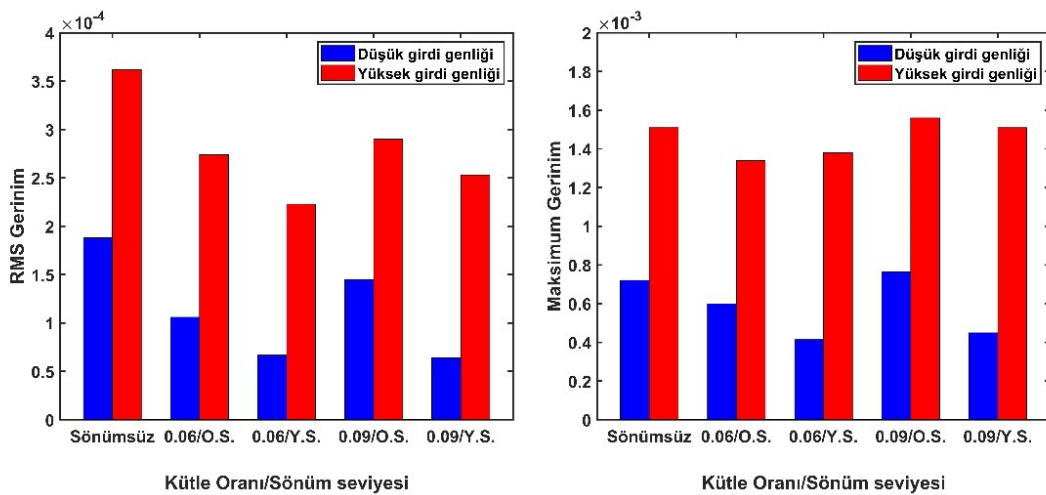
3.0 Hz doğal frekansındaki binaya düşük ve yüksek girdi genliğinde birinci deprem sinyali verilmiştir. Elde edilen RMS ve maksimum değerler, orta sönüm seviyesi için Çizelge 5.15’de, yüksek sönüm seviyesi için ise Çizelge 5.16’da verilmiştir. Farklı kütle oranları ve sönüm seviyeleri için elde edilen RMS ve maksimum genlik, ivme ve yer değiştirme sonuçları Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.15 : Durum 2.a için orta sönüm seviyesinde sistemin birinci deprem sinyaline yanıtı.

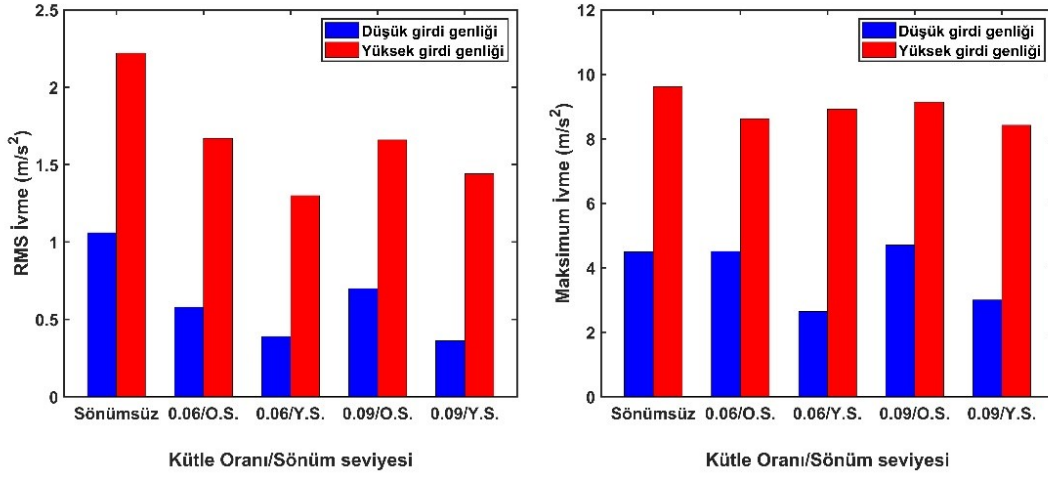
Kütle Oranı	Maksimum Girdi Genliği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
-	6	1.88E-04	7.21E-04	1.06	4.49	4.32	19.21
-	12	3.62E-04	1.51E-03	2.22	9.62	9.11	43.24
0.06	6	1.06E-04	6.00E-04	0.58	4.51	3.01	17.48
0.06	12	2.74E-04	1.34E-03	1.67	8.62	8.40	45.74
0.09	6	1.45E-04	7.65E-04	0.70	4.70	4.03	19.44
0.09	12	2.90E-04	1.56E-03	1.66	9.14	8.98	47.31

Çizelge 5.16 : Durum 2.a için yüksek sönüm seviyesinde sistemin birinci deprem sinyaline yanıtı.

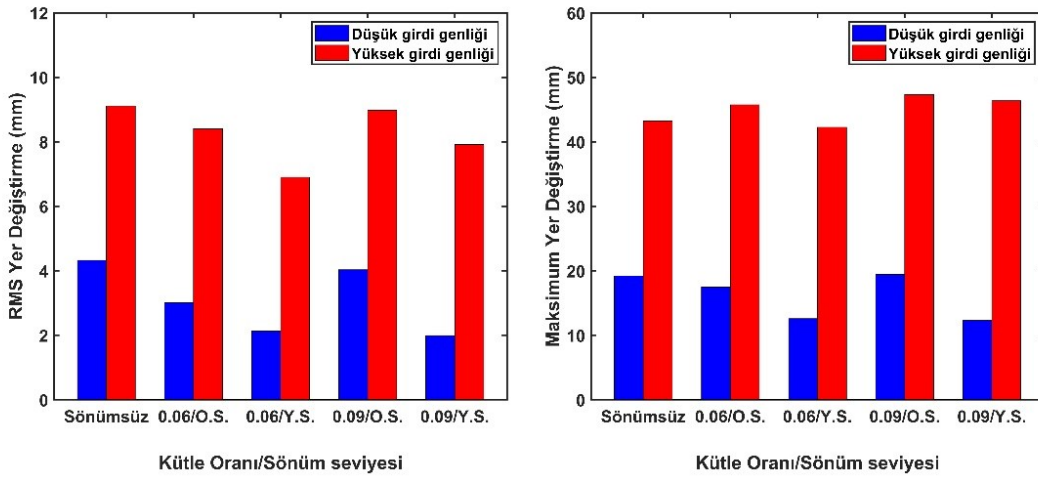
Kütle Oranı	Maksimum Girdi Genliği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
-	6	1.88E-04	7.21E-04	1.06	4.49	4.32	19.21
-	12	3.62E-04	1.51E-03	2.22	9.62	9.11	43.24
0.06	6	6.67E-05	4.14E-04	0.39	2.64	2.13	12.58
0.06	12	2.23E-04	1.38E-03	1.30	8.92	6.90	42.25
0.09	6	6.41E-05	4.49E-04	0.36	3.00	1.99	12.28
0.09	12	2.53E-04	1.51E-03	1.44	8.42	7.91	46.37



Şekil 5.18 : Durum 2.a için birinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum gerinim seviyeleri.



Şekil 5.19 : Durum 2.a için birinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum ivme seviyeleri.



Şekil 5.20 : Durum 2.a için birinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum yer değiştirme seviyeleri.

Durum 2.b:

Bu durumda 3.0 Hz rezonans frekansına sahip bina modeline ikinci deprem sinyali uygulanmıştır. Orta sönüm seviyesine ayarlanmış sönümleyici için elde edilen sonuçların RMS ve maksimum değerleri Çizelge 5.17'de verilmiştir. Aynı değerler yüksek sönüm değeri için ise Çizelge 5.18'de verilmiştir. Önceki durumlara benzer şekilde elde edilen RMS ve maksimum gerinim, ivme, yer değiştirme verileri Şekil 5.21, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'de çizdirilmiştir.

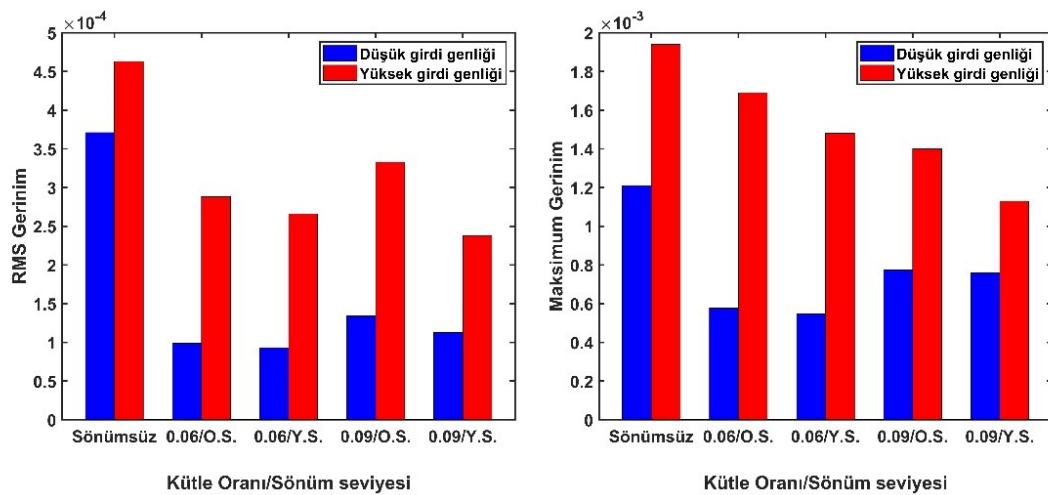


Çizelge 5.17 : Durum 2.b için orta sönüm seviyesinde sistemin ikinci deprem sinyaline yanıtı.

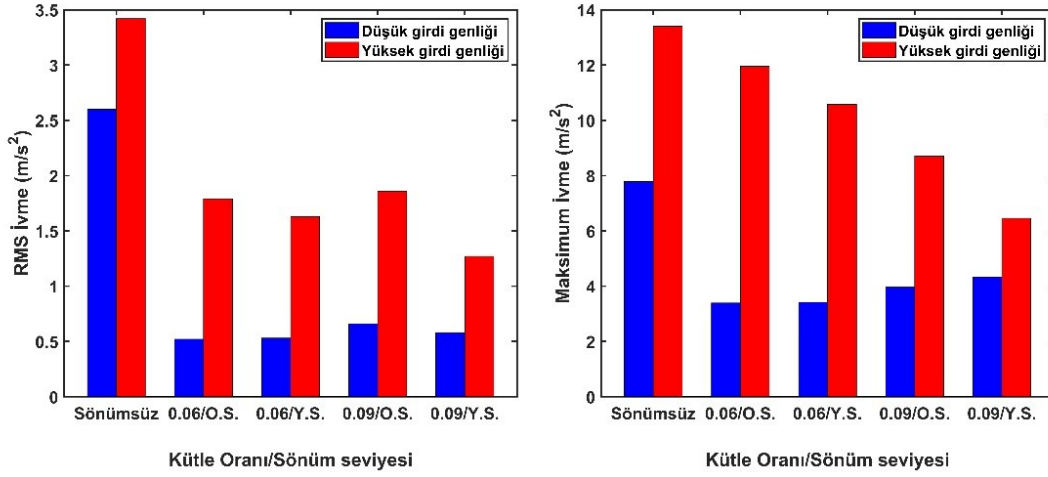
Kütle Oranı	Maksimum Girdi Genliği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
-	6	3.71E-04	1.21E-03	2.60	7.79	11.15	35.65
-	12	4.63E-04	1.94E-03	3.42	13.41	16.39	56.84
0.06	6	9.88E-05	5.77E-04	0.52	3.39	5.06	20.02
0.06	12	2.88E-04	1.69E-03	1.79	11.95	12.16	41.54
0.09	6	1.34E-04	7.74E-04	0.66	3.96	5.68	25.55
0.09	12	3.33E-04	1.40E-03	1.86	8.71	13.00	51.00

Çizelge 5.18 : Durum 2.b için yüksek sönüm seviyesinde sistemin ikinci deprem sinyaline yanıtı.

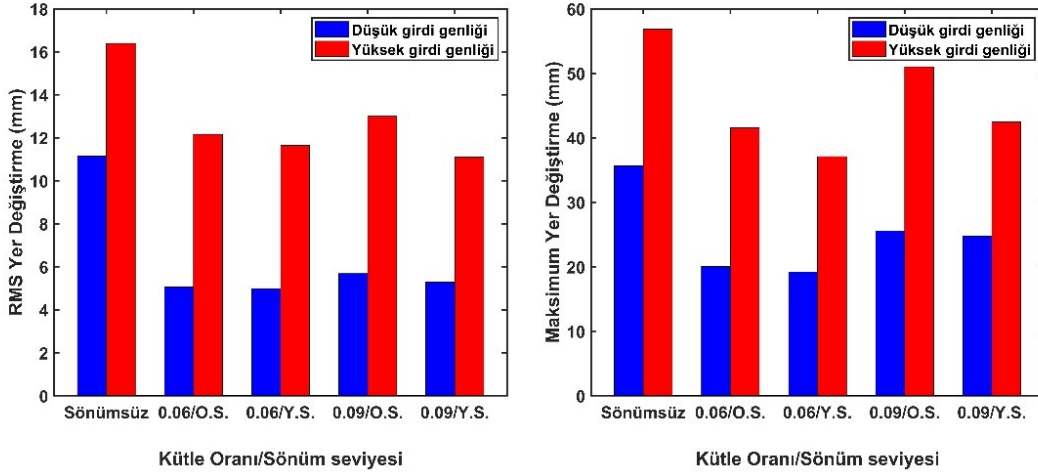
Kütle Oranı	Maksimum Girdi Genliği (mm)	RMS Gerinim	Maksimum Gerinim	RMS İvme (m/s <sup>2</sup> )	Maksimum İvme (m/s <sup>2</sup> )	RMS Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
-	6	3.71E-04	1.21E-03	2.60	7.79	11.15	35.65
-	12	4.63E-04	1.94E-03	3.42	13.41	16.39	56.84
0.06	6	9.32E-05	5.47E-04	0.53	3.42	4.98	19.19
0.06	12	2.66E-04	1.48E-03	1.63	10.58	11.65	37.09
0.09	6	1.13E-04	7.59E-04	0.58	4.33	5.29	24.76
0.09	12	2.38E-04	1.13E-03	1.27	6.46	11.10	42.48



Şekil 5.21 : Durum 2.b için ikinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum gerinim seviyeleri.



Şekil 5.22 : Durum 2.b için ikinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum ivme seviyeleri.

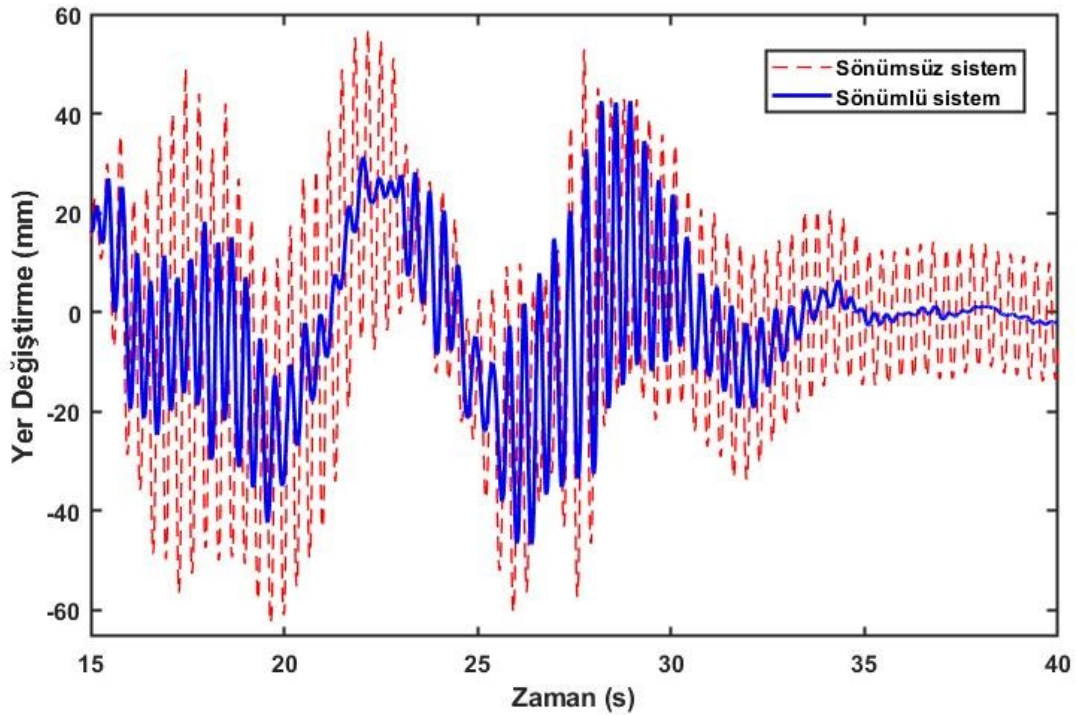


Şekil 5.23 : Durum 2.b için ikinci deprem sinyalinde RMS ve maksimum yer değiştirme seviyeleri.

Durum 2'de iki deprem girdisi için de etkili iyileştirmeler elde edilmiştir. Durum 2.a'ya bakıldığında, birinci deprem girdisi uygulanan yapıda, iki girdi seviyesi için en etkili sönüm 0.06 kütle oranında, yüksek sönüm seviyesinde elde edilmiştir. Bu kurumlardan sonra kütle değerini arttırmak performansı düşürmüştür. Özellikle 0.09 kütle oranında, orta sönüm seviyesinde manyetik titreşim sönümleyici kurulumları arasındaki en düşük iyileştirme performansı gözlenmiştir. Bu kurulumda RMS gerinim değerleri düşerken maksimum gerinim değerleri sönümsüz sisteme kıyasla artmıştır.

Durum 2.b'de ise sönümsüz sistemin yanıtında elde edilen değerler Durum 1'de sönümsüz sistemin yanıtında elde edilen değerlerden büyüktür. Fakat, manyetik

titreşim sönümleyicinin minimum doğal frekansının birincil yapının doğal frekansının altına ayarlanması ile Durum 1'e kıyasla daha iyi iyileştirme performansı gözlenmiştir. Düşük girdi genliğinde manyetik titreşim sönümleyici kurulumları benzer iyileştirmeler göstermektedir. Özellikle sönüm seviyesinin artırılması bu girdi genliğinde çok az fark yaratmıştır. Kütle oranı 0.06 olan titreşim sönümleyici kurulumları düşük girdi genliğinde kütle oranı 0.09 olan kurulumlara kıyasla sistem yanıtını daha etkili iyileştirmişlerdir. Kütle oranının artırılması yüksek girdi genliğinde etkisini göstermiştir. Maksimum gerinme ve maksimum ivme değerleri yüksek girdi genliği için kütle oranı ve sönüm seviyesi arttıkça azalmaktadır. 0.09 kütle oranında ve yüksek sönüm seviyesinde yüksek girdi genliği için RMS ve maksimum ivme değerlerinde % 50'den fazla iyileştirme görülmüştür. Bu durumdaki manyetik titreşim sönümleyici içeren sistemin yanıtı ve manyetik titreşim sönümleyici içermeyen sönümsüz sistemin yanıtı Şekil 5.24'de 15-40 s aralığında çizdirilmiştir. Bu zaman aralığında sönümleyici olmayan birinci yapının yanıtı en şiddetli durumundadır.



Şekil 5.24 : Yüksek genlikli ikinci deprem sinyalinde sönümsüz sistem ve sönümlü sistemin 15-40 s aralığında yanıtı. Manyetik titreşim sönümleyici kütle oranı 0.09, sönüm seviyesi yüksektir.

Şekil 5.24’de görüldüğü gibi depremin başlangıcında manyetik titreşim sönümleyici sayesinde yer değiştirme genlikleri etkili ve hızlı bir şekilde iyileştirilmiştir. Deprem girdisinin en şiddetli bölümünde ise iyileştirmeler minimum seviyede olmasına rağmen deprem bitiminde sistem dinamiği yaklaşık 3 saniye içinde sağlık seviyelere indirgenmiştir. Bu kısımda sönümsüz sistem ise yüksek genlikte hareketine devam etmektedir.



## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada doğrusal olmayan manyetik titreşim sönümleyicilerin performansı incelenmiştir. İki mıknatısın birbirine etkideği itki kuvveti eğrisi deneysel metotlarla elde edilmiştir. Daha sonra, direngenliğini bu itki kuvvetinden alan ve Eddy akımları sönümü vasıtasıyla üzerindeki kinetik enerjiyi soğurabilen manyetik titreşim sönümleyici üç boyutlu baskı yöntemi yardımıyla üretilmiştir.

Bölüm 2’de manyetik titreşim sönümleyicinin dinamik davranışını anlamak ve etkili olduğu frekans aralıklarını görmek amacıyla analitik ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Bölüm 2.1’den elde edilen mıknatıs itki kuvveti eğrisi kullanılarak Bölüm 2.2’de tanımlayıcı fonksiyonlar yardımıyla sönümleyicinin kinetik denklemleri iki farklı yöntemle çözdürülmüştür. Bölüm 2.3’de ise COMSOL programında sayısal analizler yapılmıştır. Bu analizlerde mıknatıs itki kuvveti ilk olarak Maxwell Gerilim Tensörü aracılığıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan bu kuvvetin deneysel olarak elde edilen itki kuvvetiyle yakın mesafelerde düşük hata miktarlarıyla tutarlı olduğu görülmüştür. Yapılan analizler neticesinde, modelin düşük genlikli sinüs zorlamalarda analitik çözümlerle uyumlu olduğu görülmüştür. COMSOL programında itki kuvvetini tanımlayan fonksiyon girildiğinde ise yüksek genlikli sinüs zorlamalarda da aynı uyum gözlenmiştir.

Yapılan analitik ve sayısal çalışmalardan sonra, üretilen sönümleyici ve kullanılan deney sisteminin ayrıntıları Bölüm 3’de anlatılmıştır. Bölüm 4’de ise üretilen manyetik titreşim sönümleyici deneysel olarak incelenmiştir. İlk olarak Bölüm 4.1’de mıknatıslar arası uzaklık kademeli olarak değiştirilmiştir. Bu farklı uzaklıklara denk gelen itki kuvvetini tanımlayan eğriler not edilmiştir. Bu kuvvet eğrisinin doğrusal kısmından hesaplanan doğal frekans değeri hesaplanmıştır. Farklı genliklerde, ileri ve geri frekans taraması sonucunda alınan verilerde belli bir zorlama genliğinin üstünde genlik ve kuvvet değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Deneylerde ileri frekans taramasında frekans arttıkça sistemin yatışkın durum genliği ve kuvveti de

artmaktadır. Ayrıca sistemin zorlandığı girdi genliği düştükçe, sistemin atlama frekansının hesaplanan doğal frekansa yaklaştığı görülmüştür. Girdi genliği arttıkça atlama frekansı bu doğal frekansın üstüne kaymaktadır. Bu deneylerden sonra analitik çözümlerle elde edilen sonuçlar ve deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Mıknatıslar arası mesafenin 60 mm olduğu durum için analitik çözümler deneysel sonuçlarla hemen hemen birebir uyuşmaktadır. Düşük zorlama genliğinde atlama frekansları birebir uyarken, atlama frekansındaki maksimum hata 0.1 Hz olarak yüksek zorlama genliğinde gözlenmiştir. Mıknatıslar arası mesafenin 75 mm olduğu durumda ise analitik çözümlerle deneysel veriler arasındaki hata en büyük durumundadır. Fakat bu artan hata oranına rağmen analitik çözümler ile deneysel veriler çok farklı değildir. Bölümün izleyen kısmında, analitik çözümleri iyileştirmek amacıyla Bölüm 4.2’de Eddy akım sönümünün sistemin davranışını nasıl etkilediğine bakılmıştır. Sönümleyici üzerindeki bakır plaka kademeli olarak sönüm mıknatıslarına yaklaştırılmıştır ve belli bir zorlama genliğinde ileri ve geri frekans taraması tekrarlanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlarla analitik çözümlerin uyumlu olduğu sönüm katsayıları belirlenmiştir. Bölüm 4.3’de ise manyetik titreşim sönümleyicinin kütlesi 2 farklı değere ayarlanmıştır ve mıknatıslar arası mesafe bu iki kütle değerinde aynı doğal frekans değeri verecek şekilde ayarlanmıştır. Yapılan ileri ve geri frekans taraması sonucunda artan kütlenin atlama frekansında uygulanan kuvveti küçük miktarda arttırdığı görülmüştür. Kütle yaklaşık olarak % 70 arttırılmış iken, atlama frekansında kuvvet % 17 artmıştır. Kuvvet miktarındaki bu oranın ileri frekans taramasında yüksek frekanslarda giderek arttığı görülmüştür.

Bölüm 5’de iki farklı sönümleyici değeri belirlenmiştir ve sönümleyici iki farklı yapı modeline entegre edilmiştir. Bu yapılardan birinin doğal frekansı 2.7 Hz diğeri ise 3.0 Hz’dir. MATLAB programında analitik çözümlerle, sönümleyici için belirlenen bu iki kütle değerinde titreşim sönümleyicinin mıknatıslar arası mesafe ile doğal frekansının değişme miktarına bakılmıştır. Bu değişim grafikleri yardımıyla titreşim sönümleyicinin doğal frekansı iki kütle değeri için de 2.7 Hz’e ayarlanmıştır. Bölüm 5.1’de titreşim sönümleyici entegre edilen iki farklı yapıya sinüs zorlama uygulanmıştır ve sönüm performansı incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda yapı ve titreşim sönümleyicinin doğal frekansı 2.7 Hz iken her durum için rezonans tepesi gözlenmiştir. Bu rezonans tepesinin gözlendiği frekans değeri Durum 2.b’de 2.4 Hz

iken diğ er durumların hepsinde 2.5 Hz'dir. Rezonansdaki sönümlü sistemin yanıtı sönümsüz sistemin rezonansına göre daha az ş iddetlidir ve elde edilen rezonans verileri her durum için yaklaşık % 50 daha kü çüktür. Bu konuda tek istisna Durum 2.a'daki sistemdir. Bu durumda sönümlü sistemin rezonansı sönümsüz sistemden daha ş iddetli olmuştur ve sistem yatış kın duruma gelmeden deney sonlandırılmış tır. Deneyde ş iddetli rezonans gözlemlendikten sonra bir sonraki frekans değ erinde yapı yanıtında atlama gözlenmiştir ve sistem yanıtı en düşük seviyesine yaklaş mıştır. Deneylerde 3.0 Hz'den sonra sönümlü sistemin yanıtları sönümsüz sistemden bir miktar artmıştır. Bu artış özellikle orta sönüm seviyesindeki durumlar için daha belirgindir. Görülen bu artış iki serbestlik dereceli sistemlerde görülen ikinci rezonans tepesi olarak yorumlanabilir. Sönüm seviyesi arttıkça bu artış azalmaktadır ve sönümsüz sistem yanıtlarına yakın yanıtlar görülmüştür.

Durum 3 ve Durum 4'de titreş im sönümleyici 3.0 Hz doç al frekanslı yapıya entegre edilmiştir. Manyetik titreş im sönümleyicinin doç al frekansı 2.7 Hz'dir. Bu deneylerde Durum 3.a'da önceki durumlara benzer şekilde sönümsüz sistemin rezonans frekansı yakınında, 2.8 Hz'de sönümlü sistemin rezonansına girilmiştir ve deney durdurulmuştur. Bir sonraki durumda sönüm seviyesi arttırıldığında bu rezonansın ş iddeti ciddi oranda düş ürlü müştür ve yatış kın cevap gözlenebilmiştir. Bu durumda gözlenen rezonans yanıtları sönümsüz sistemin rezonans yanıtından yaklaşık olarak % 85 daha iyidir. Sönümsüz sistemin rezonansının gözlemlendiğ i frekanslarda ise geniş bir frekans aralığ ında yanıt iyileş mesi görülmüştür. Durum 4.a'da artan kü tle oranıyla beraber sönümlü sistemin rezonans frekansı sönüm sistemin rezonans frekansında daha da uzaklaş mıştır ve 2.6 Hz'de gözlenmiştir. Fakat bu rezonansın ş iddeti yüksek değ ildir ve sistem yatış kın yanıtı ulaş abilmiştir. Bu frekans değ erinden hemen sonraki frekans değ erinde sönümlü sistem atlama yapmıştır ve durumdaki en düşük yer değ iştirme yanıtı görülmüştür. Görülen bu atlama sayesinde sönümlenen frekans aralığ ı genişlemiştir; sönümsüz sistemin 2.7 Hz ve 3.2 Hz arasındaki yanıtları iyileştirilmiştir. Fakat taranan frekans aralığ ının son değ erlerine doç ru sönümlü sistemin yanıtı yüks elmiştir ve sönümsüz sistemden daha yüksek değ erler görülmüştür. Bu yanıt artışı tarama yapılmayan frekanslar ikinci bir tepenin olduğ unu göstermektedir. Durum 4.b de ise Eddy akım sönüm seviyesi arttırılmış ve sönümlenen

sistemin belirgin bir rezonans tepesi görülmemiştir. Bir önceki duruma benzer şekilde 2.7-3.2 Hz arasında sistem iyileştirilmiştir.

Bölüm 5.2’de bir önceki bölümde sinüs zorlama verilen yapılara iki farklı deprem girdisi düşük ve yüksek genlik seviyelerinde uygulanmıştır. Uygulanan bu iki depremin ikinci ve üçüncü baskın frekansları birbirine benzerdir ve yapıların doğal frekanslarına yakındır. İlk olarak titreşim sönümleyici ve yapının 2.7 Hz olduğu sistemin yanıtlarına bakılmıştır. Birinci deprem sinyali uygulanan Durum 1.a’da her titreşim sönümleyici biçimi için sistem cevabında iyileşme görülmüştür. Tek istisna 0.05 kütle oranında, orta sönüm seviyesindeki yüksek deprem girdisi uygulanan sistemde maksimum ivme değeridir. Bu değer sönümsüz sistemin yaklaşık olarak % 5 üstündedir. İvme değerlerinde en iyi iyileşme 0.07 kütle oranında, orta sönüm seviyesinde düşük deprem girdi uygulanan sistemde görülmüştür. Bu durumda sönümsüz sistemin RMS ve maksimum ivmesi yaklaşık olarak % 70 ve % 60 azaltılmıştır. Aynı durumda yüksek girdi genlikli deprem sinyali için iyileştirme % 50 seviyesindedir. Durum 1.b’de ikinci deprem sinyali uygulandığında ise titreşim sönümleyici entegre edilmiş sistemin sönümsüz sistemden genel olarak daha kötü performans verdiği görülmüştür. Düşük genlikli deprem girdisinde RMS değerler ya artmıştır ya da sönümsüz sistemle benzer değer almıştır. Maksimum gerinim değerleri iki deprem seviyesi için de sönümsüz sistemin yaklaşık iki katıdır. Buna karşılık yüksek genlikli deprem girdisi için RMS ivme ve gerinim değerlerinde %20 civarında iyileşme görülmüştür. Titreşim sönümleyicili sistem yanıtındaki kötüleşmelerin sebebi manyetik titreşim sönümleyicinin minimum doğal frekansının yapı modelinin doğal frekansıyla aynı değere ayarlanmış olmasıdır. Ayarlama bu şekilde yapıldığında Bölüm 5.1’de yapılan sinüs deneylerinde de görüldüğü gibi her titreşim sönümleyicili sistem kurulumunda 2.4 Hz ve 2.5 Hz frekanslarında rezonans davranışı mevcuttur ve sönüm seviyesi arttırılsa bile rezonans şiddeti yüksektir. Ayrıca Şekil 5.17’deki zaman yanıtlarında da görülebileceği gibi ikinci deprem sinyalinin 25. ve 30. saniyelerinde depremin bu rezonans frekanslarında uzun süre gerçekleşmesi sonucu titreşim sönümleyicili sistemin sönümleyicisiz sisteme göre yanıtı artmıştır. RMS değerlerinde görülen küçük orandaki iyileşmenin sebebi ise deprem bitiminde titreşim sönümleyicili sistemin yanıtının titreşim sönümleyici olmayan sistem yanıtına kıyasla çok daha hızlı sönümlenmesidir



Bir sonraki durumda aynı deprem girdileri sönümleyicinin 2.7 Hz ayarında olduğu, yapının doğal frekansının 3.0 Hz olduğu sisteme uygulanmıştır. Durum 2.a'da birinci deprem sinyali düşük genlikte uygulandığında RMS değerlerin hepsinde iyileşme görülmüştür. Bu iyileşmeler arasında en iyileri 0.06 ve 0.09 kütle oranında, yüksek sönümlü seviyedeki sistemlerde benzer performansda gözlenmiştir ve iyileşme oranı yaklaşık % 60'dır. Bu iki sistemde maksimum değerler düşük genlikli deprem girdisi için yaklaşık % 50 iyileşmiştir. Buna karşılık yüksek genlikli deprem girdisinde RMS değerler iyileşirken maksimum değerler sönümsüz sistemin maksimum değerlerine yakındır. Aynı sisteme Durum 2.b'de ikinci deprem sinyali uygulandığında ise her sönümleyici kurulumu için sönümsüz sistem cevabı iyileştirilmiştir. Düşük genlikli deprem girdisinde RMS değerlerindeki iyileşme dört sönümleyici kurulumu için benzerdir. 0.06 kütle oranındaki kurulumların iyileştirme performansı 0.09 kütle oranındaki sisteme kıyasla daha iyidir. En iyi performans 0.06 kütle oranında, orta sönüm seviyesindeki sistemde görülmüştür; RMS ivme ve gerinim iyileşmeleri %80'e yakındır. Yüksek genlikli deprem girdisinde ise benzer şekilde her sistem kurulumunda iyileştirme görülürken bunlardan en iyisi manyetik titreşim sönümleyicinin 0.09 kütle oranında ve yüksek sönüm seviyesinde olduğu sistem olmuştur. Bu kurulumda RMS gerinim değeri yaklaşık % 50 iyileştirilirken RMS ivme değeri yaklaşık olarak % 60 iyileştirilmiştir. Maksimum gerinim ve ivme değerlerinde ise kütle oranı ve sönüm seviyesi arttıkça iyileşme seviyesinin de arttığı görülmüştür. Bu duruma zıt şekilde düşük genlikli deprem için maksimum ivme ve gerinim iyileşmelerinin performansı düşmektedir. Ancak bu performans düşüşünün en kötü olduğu durumda bile hem düşük genlikli hem de yüksek genlikli deprem girdisinde sönümlü sistem sönümsüz sisteme oranla maksimum gerinim değerinde yaklaşık %40, maksimum ivme değerlerinde ise yaklaşık %50 iyileşme kaydedilmiştir. Bu performans değiş tokuşu dikkate alındığında yüksek genlikli deprem girdisi yanıtları daha da iyileştirilebilir gözükmektedir. Fakat bu durumda düşük genlikli deprem girdisi daha da kötüleşecektir. Bu durum manyetik titreşim sönümleyicinin doğal frekansının daha küçük seviyelere düşürülmesiyle mümkündür. Bu sayede, Bölüm 4'de yapılan deneyler neticesinde de görülebileceği gibi, daha yüksek genlikteki atlama frekansına ayarlanan titreşim sönümleyici daha yüksek zorlamalar altında daha yüksek kuvvet değerlerinde çalışacaktır. Ama bu atlama frekansında, düşük zorlama

genliklerinde manyetik titreşim sönümleyicinin yanıtı çok küçük olacağından sönüm performansı düşecektir.

Çalışmanın sonunda görülmüştür ki, manyetik titreşim sönümleyicilerde kütle oranını arttırmak doğrusal titreşim sönümleyicilerin aksine performansı arttırmayabilir. Kütle oranını arttırmak küçük girdi genliğindeki zorlamalarda performans kaybına sebep olabilir. Bunun yanında, arttırılan kütle oranı sayesinde yüksek girdi genliğinde oluşan yanıtlar iyileştirilebilir. Ayrıca, doğrusal titreşim sönümleyicilerin ayarlanmasından farklı şekilde, manyetik titreşim sönümleyicinin minimum doğal frekansının yapının doğal frekansıyla aynı değere ayarlanması sönümleyicinin iyileştirme potansiyelini düşürmektedir. Manyetik titreşim sönümleyiciler, pasif bir titreşim sönümleyici olmasına rağmen sistem yanıtını sönümsüz sistem yanıtından daha kötü yapabilir. Bunun yanında atlama frekanslarına göre birincil yapının doğal frekansına göre ayarlanan manyetik titreşim sönümleyici geniş frekans spektrumunda sönüm sağlayabilir, yüksek genlikli deprem gibi rastgele girdilere karşı sistem yanıtlarını etkili bir şekilde iyileştirebilir.

Fakat manyetik titreşim sönümleyicinin uygulanacağı yapının büyüklüğüne göre bazı pratik zorluklar ortaya çıkabilir. Bu zorluklardan bir tanesi kullanılması gereken mıknatıs sayısıdır. Örneğin, ortalama bir apartman katında  $1 \text{ m}^2$  taban alanı yaklaşık  $1350 \text{ kg}$ 'dır [38]. Bu durumda  $500 \text{ m}^2$  taban alanı olan 4 katlı bir apartmanın toplam kütlesi yaklaşık olarak 2700 ton olacaktır. Bölüm 5.1'deki sinüs testlerinde görüldüğü üzere  $1 \text{ kg}$  sönümleyici kütlesiyle, %5 kütle oranında yapıya uygulanan kuvvet yaklaşık  $11 \text{ N}$  olarak ölçülmüştür. Bu kuvvet bir çift N42 sınıfı,  $10 \text{ cm}^3$  hacminde ve yaklaşık  $80 \text{ g}$  ağırlığındaki mıknatıslardan elde edilmiştir. Ayrıca, Bölüm 2.1'de yapılan mıknatıslar arası mesafeye göre itki kuvveti hesaplanması deneyinde görülmüştür ki mıknatıs sayısı 2 katına çıkarıldığında itki kuvveti de yaklaşık 2 katına çıkmaktadır. Bu deneyler sonucunda doğrusal bir varsayım yapılırsa, 2700 ton ağırlığındaki yapıda %5 kütle oranında, yani 135 ton sönümleyici kütlesi için  $1485 \text{ kN}$  kuvvet ölçülmesi beklenecektir. Aynı varsayımla, itki kuvvetinin elde edildiği mıknatıs çiftinin bir tarafının yaklaşık 10.8 ton olması gerekmektedir. Sönümleyici iki çift mıknatıstan oluştuğundan, varsayılan sönümleyici için yaklaşık 44 ton mıknatıs gerekecektir. Bu kütle değeri N52 gibi daha yüksek sınıf mıknatıslar kullanılarak düşürülebilir. Ama bu miktarda mıknatıs, sönümleyicinin uygulanabilirliği açısından

birçok teknik zorluk ortaya çıkarabilir. Çekim gücü yüksek, çok sayıda mıknatısın yerleştirilmesi zor ve tehlikeli bir işlem olabilir. Gereken mıknatıs miktarını düşürmek için sönümleyici daha düşük kütle oranlarında incelenmeli ve uygulanmalıdır. Bir başka çözüm ise mıknatısların başka bir direngenlik elemanı ile birlikte kullanılması olabilir.

Öte yandan, doğal frekansının mıknatıslar arası mesafeye olan hassasiyeti sayesinde, manyetik titreşim sönümleyici daha küçük ölçekli ve farklı büyüklüklerdeki sistemlerde alternatif bir iyileştirme yöntemi olarak uygulanabilir.





## KAYNAKLAR

- [1] **Frahm, H.**, “Device for damping vibrations of bodies,” *U.S. Pat.*, no. 989958, 1911.
- [2] **Vakakis, A. F.**, “Inducing Passive Nonlinear Energy Sinks in Vibrating Systems,” *J. Vib. Acoust.*, vol. 123, no. 3, p. 324, 2001.
- [3] **AL-Shudeifat, M. A.**, “Asymmetric Magnet-Based Nonlinear Energy Sink,” *J. Comput. Nonlinear Dyn.*, vol. 10, no. 1, p. 014502, 2014.
- [4] **Bourquin, F., Caruso, G., Peigney, M., Siegert, D.**, “Magnetically tuned mass dampers for optimal vibration damping of large structures,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 8, 2014.
- [5] **Ebrahimi, B., Khamesee, M. B., Golnaraghi, F.**, “A novel eddy current damper: Theory and experiment,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 7, 2009.
- [6] **Larose, G. L., Larsen, A., Svensson, E.**, “Modelling of tuned mass dampers for wind-tunnel tests on a full-bridge aeroelastic model,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 54–55, no. C, pp. 427–437, 1995.
- [7] **Conti, E., Grillaud, G., Jacob, J., Cohen, N.**, “Wind effects on the Normandie cable-stayed bridge: Comparison between full aeroelastic model tests and quasi-steady analytical approach,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 65, no. 1–3, pp. 189–201, 1996.
- [8] **Den Hartog, J. P.**, *Mechanical Vibrations*. Dover Publications, Inc., 1956.
- [9] **Ozer, M. B., Royston, T. J.**, “Extending Den Hartog’s Vibration Absorber Technique to Multi-Degree-of-Freedom Systems,” *J. Vib. Acoust.*, vol. 127, no. 4, p. 341, 2005.
- [10] **Kareem, A., Kijewski, T., Tamura, Y.**, “Mitigation of Motion of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications,” *Wind Struct.*, no. 2(3), pp. 201–251, 2007.
- [11] **Collette, F.S.**, “A combined tuned absorber and pendulum impact damper under random excitation,” *J. Sound Vib.*, vol. 216, no. 2, pp. 199–213, 1998.
- [12] **Farid, M., Gendelman, O. V.**, “Tuned pendulum as nonlinear energy sink for broad energy range,” *JVC/Journal Vib. Control*, vol. 23, no. 3, pp. 373–388, 2017.
- [13] **Alışverişçi, G. F., Bayıroğlu, H. ve ark.**, “a Nonlinear Electromechanical Pendulum Arm With a Nonlinear Energy Sink Control (Nes) Approach,” *J. Theor. Appl. Mech.*, vol. 54, no. 3, pp. 975–986, 2016.

- [14] **Kwok, K. C. S., Samali, B.**, “Performance of tuned mass dampers under wind loads,” *Eng. Struct.*, vol. 17, no. 9, pp. 655–667, 1995.
- [15] **Sun, L. M., Fujino, Y., Pacheco, B. M., Chaiseri, P.**, “Modelling of tuned liquid damper (TLD),” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 43, no. 1–3, pp. 1883–1894, 1992.
- [16] **Jin, Q., Li, X., Sun, N., Zhou, J., Guan, J.**, “Experimental and numerical study on tuned liquid dampers for controlling earthquake response of jacket offshore platform,” *Mar. Struct.*, vol. 20, no. 4, pp. 238–254, 2007.
- [17] **Gao, H., Kwok, K. C. S., Samali, B.**, “Optimization of tuned liquid column dampers,” *Eng. Struct.*, vol. 19, no. 6, pp. 476–486, 1997.
- [18] **Hitchcock, P. A., Kwok, K. C. S., Watkins, R. D., Samali, B.**, “Characteristics of liquid column vibration absorbers (LCVA) - II,” *Eng. Struct.*, vol. 19, no. 2, pp. 135–144, 1997.
- [19] **Chang, C. C., Hsu, C. T.**, “Control performance of liquid column vibration absorbers,” *Eng. Struct.*, vol. 20, no. 7, pp. 580–586, 1998.
- [20] **Gourdon, E., Alexander, N. A., Taylor, C. A., Lamarque, C. H., Pernot, S.**, “Nonlinear energy pumping under transient forcing with strongly nonlinear coupling: Theoretical and experimental results,” *J. Sound Vib.*, vol. 300, no. 3–5, pp. 522–551, 2007.
- [21] **Gendelman, O. V.**, “Transition of energy to a nonlinear localized mode in a highly asymmetric system of two oscillators,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 25, no. 1–3, pp. 237–253, 2001.
- [22] **Gendelman, O., Manevitch, L. I., Vakakis, A. F., M’Closkey, R.**, “Energy Pumping in Nonlinear Mechanical Oscillators: Part I—Dynamics of the Underlying Hamiltonian Systems,” *J. Appl. Mech.*, vol. 68, no. 1, p. 34, 2001.
- [23] **Vakakis, A. F., Gendelman, O.**, “Energy Pumping in Nonlinear Mechanical Oscillators: Part II—Resonance Capture,” *J. Appl. Mech.*, vol. 68, no. 1, p. 42, 2001.
- [24] **Sayyad, F., Gadhane, N.**, “Variable stiffness type magnetic vibration absorber to control the vibration of beam structure,” *J. Vib. Control*, vol. 20, no. 13, pp. 1960–1966, 2014.
- [25] **Wang, J., Wierschem, N., Spencer, B. F., Lu, X.**, “Experimental study of track nonlinear energy sinks for dynamic response reduction,” *Eng. Struct.*, vol. 94, 2015.
- [26] **Yamakawa, I., Takeda, S., Kojima, H.**, “Behavior of a new type dynamic vibration absorber consisting of three permanent magnets,” *Bull. JSME*, vol. 20, no. 146, pp. 947–954, 1977.
- [27] **Igarasi, S., Shibukawa, K., Nakatani, S.**, “Study on dynamic vibration absorber using permanent magnet,” *Bull. Fac. Eng. Hokkaido Univ.*, vol. 156, no. 28–29, 1991.

- [28] **Igarasi, S., Shibukawa, K.**, “Study on a Magnetic Dynamic Vibration Absorber with Adjustable Natural Frequency,” *Bull. Fac. Eng. Hokkaido Univ.*, vol. 165, pp. 41–52, 1993.
- [29] **Benacchio, S., Malher, A., Boisson, J., Touzé, C.**, “Design of a magnetic vibration absorber with tunable stiffnesses,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 85, no. 2, pp. 893–911, 2016.
- [30] **Özer, M. B., Özgüven, H. N., Royston, T.J.**, “Identification of structural non-linearities using describing functions and the Sherman-Morrison method,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 23, no. 1, pp. 30–44, 2009.
- [31] **Özgüven, H. N., Tanrıku, Ö., Kuran, B.**, “Forced harmonic response analysis of nonlinear structures using describing functions,” *AIAA J.*, vol. 31, no. 7, pp. 1313–1320, 1993.
- [32] **Özgüven, H. N., Özer, M. B.**, “A new method for localization and identification of non-linearities in structures,” *Proc. ESDA 2002 Sixth Bienn. Conf. Eng. Syst. Des. Anal. ASME, Istanbul, Turkey, July 8–11, 2002.*
- [33] **Özgüven, H. N., Budak, E.**, “Iterative receptance method for determining harmonic response of structures with symmetrical non-linearities,” *Mech. Syst. Signal Process.* 7(1), pp. 75–87, 1993.
- [34] **Özgüven, H. N., Budak, E.**, “A dynamic analysis method for the harmonically excited non-linear structures, Structural Vibration and Acoustics,” *ASME 18*, pp. 23–29, 1989.
- [35] **Gelb, A., Vander Velde, W.E.**, “Sinusoïdal-input describing function (DF),” *Mult. Descr. Funct. non-linear Syst. Des.*, 1968.
- [36] **Özer, M. B.**, “Closed form solutions of weakly nonlinear multi-degree of freedom systems with single nonlinear element,” *J. Sound Vib.*, vol. 344, pp. 345–362, 2015.
- [37] **Tosun, U.**, Çalkalanan Titreşim Sönümleyicilerin Performansının Deneysel Yöntemlerle İncelenmesi(*Yüksek lisans tezi*), 2016.
- [38] **Çınar, Y.** (Mimar), Kişisel görüşme, ERA Architecture Consulting Co. Ltd, İstanbul, Türkiye, 2018.





# ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Eren Can Ergül  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 08/01/1993, Ankara  
**E-posta** : rncnergul@gmail.com

## ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, TOBB ETÜ, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2018, TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans

## MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2015-2018	TOBB ETÜ	Eğitim Asistanı

## YABANCI DİL:

- İngilizce
- Fransızca (Sınırlı Çalışma Yetkinliği)

## TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Ergül, E.**, Ozer, M. B., 2016, A New Type of Magnetic Vibration Absorber, International Conference on Mechatronics Systems and Control Engineering 2017, February 2-4, Kayseri, Turkey