

**MANYETOREOLOJİK (MR) SIVILI YARI-AKTİF BİR
AMORTİSÖRÜN TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI**

Turgay ERGİN

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2013

ANKARA

Turgay ERGİN tarafından hazırlanan “MANYETOREOLOJİK (MR) SIVILI YARI-AKTİF BİR AMORTİSÖRÜN TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK

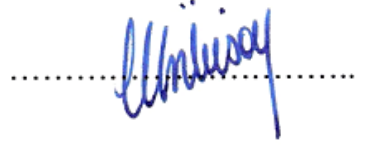
Tez Danışmanı, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makina Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

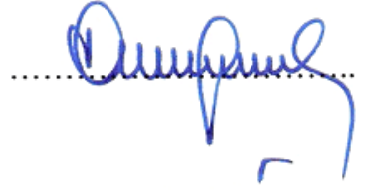
Prof. Dr. Y. Samim ÜNLÜSOY

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, ODTÜ



Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.



Prof. Dr. Halit KARABULUT

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.



Prof. Dr. Halil İbrahim ÜNAL

Kimya Anabilim Dalı, G.Ü.



Prof. Dr. Şefaaddin YÜKSEL

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

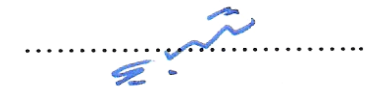


Tez Savunma Tarihi: 17 / 07 / 2013

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Turgay ERGİN

MANYETOREOLOJİK (MR) SIVILI YARI-AKTİF BİR AMORTİSÖRÜN TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI

(Doktora Tezi)

Turgay ERGİN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Temmuz 2013

ÖZET

Manyetoreolojik (MR) sıvılar yarı-aktif sönümleme sistemlerinde kullanılan manyetik alan bağımlı sıvılardır. MR sıvılar genellikle taşıyıcı bir sıvı içerisinde dağılmış manyetik parçacıklardan oluşmaktadır. Bu çalışmada, karbonil demir ve manyetit esaslı beş farklı MR sıvı silikon yağı içerisinde kütsel olarak %25 ve %40 demir konsantrasyonunda hazırlanmıştır. Ayrıca, karbonil demir parçacıklarının çökelmesini azaltmak için katkı maddesi olarak silika dumanı kullanılmıştır. Hazırlanan MR sıvıların çökelme kararlılıkları incelenmiştir. Daha sonra, MR sıvıların yoğunluğu bir piknometre ile ölçülmüştür. MR sıvı üzerindeki manyetik alan etkisi ANSYS/Electromagnetics yazılımında sonlu eleman metodu kullanılarak modellenmiştir. MR sıvıların performans testleri orijinal bir binek araç amortisörünün dış boyutlarına göre tasarlanıp üretilen MR amortisör prototipi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Manyetik parçacık türü, konsantrasyon ve silika dumanı kullanımının MR sıvıların sönümleme performansı, çökelme kararlılığı ve dinamik kuvvet aralığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Akımın arttırılmasıyla, 169,4N'luk en yüksek sönümleme kuvveti %40'lık bir artışla kütsel olarak %40 karbonil demir ve %2 silika dumanı içeren MRF-5'ten elde edilmiştir.

Yarı-aktif süspansiyon sisteminin sönümleme performansını pasif sistem ile karşılaştırmak için MR sıvıların farklı akımlardaki eşdeğer sönümleme

katsayıları hesaplanmıştır. İki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modeli kullanılarak süspansiyon sisteminin matematiksel modeli durum uzayı formunda elde edilmiştir. Daha sonra, bu matematiksel modele göre yarı-aktif ve pasif süspansiyon sistemlerinin simülasyonları MATLAB/Simulink'te oluşturulmuştur. Bu simülasyonlarda basamak, sinüs ve rastgele sinüs yol uyarıları kullanılmıştır. Sonuçlar, her iki sistem için zaman ve frekans alanı ortamında sunulmuştur. Yarı-aktif süspansiyon sisteminin pasif sistemle karşılaştırıldığında, sürüş konfor ve güvenliği açısından kayda değer bir gelişmeye sahip olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 708.3.026

Anahtar Kelimeler : MR amortisör, MR sıvı, yarı-aktif süspansiyon, manyetit, karbonil demir, silika dumanı

Sayfa Adedi : 167

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK

DESIGN AND PROTOTYPE MANUFACTURING OF A SEMI-ACTIVE SHOCK ABSORBER WITH MAGNETORHEOLOGICAL (MR) FLUIDS

(Ph. D. Thesis)

Turgay ERGİN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2013

ABSTRACT

Magnetorheological (MR) fluids are magnetic field dependent fluids used in the semi-active damping systems. MR fluids usually comprise magnetic particles dispersed in a carrier liquid. In this work, carbonyl iron and magnetite based five different MR fluids were prepared with iron concentration of 25 and 40 wt% in silicone oil. Furthermore, fumed silica as an additive was used to reduce sedimentation of the carbonyl iron particles. The sedimentation stability of MR fluids prepared was examined. Then, the density of MR fluids was measured by a picnometer. The effect of magnetic field on MR fluid was modelled using the finite element method in ANSYS/Electromagnetics software. Performance tests of the MR fluids were performed using the prototype of MR damper designed and manufactured according to the external dimensions of the OEM shock absorber for a passenger car. The influences of the magnetic particle type, concentration and usage of fumed silica on damping performance, sedimentation stability and dynamic force range of the MR fluids were studied. Increasing the current, the highest damping force 169,4N with an increment of 40% was obtained from the MRF-5 containing 40 wt% carbonyl iron and 2 wt% fumed silica.

The equivalent damping coefficients of the MR fluids were calculated for different currents to compare the damping performance of the semi-active

suspension system with the passive system. The mathematical model of the suspension system was obtained in state space form using a two degree of freedom quarter car model. Then, the simulations of the semi-active and the passive suspension system were performed in MATLAB/Simulink depending on this mathematical model. In these simulations, step, sinus and random sinus road excitations were used. The results were presented in time and frequency domain for the both suspension systems. It was concluded that the semi-active suspension system has a significant improvement for ride comfort and safety in comparison with the passive system.

Science Code : 708.3.026

Key Words : MR damper, MR fluid, semi-active suspension, magnetite, carbonyl iron, fumed silica

Page Number: 167

Adviser : Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarını benden esirgemeyip beni yönlendiren çok değerli hocam Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK' a, yine bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım kıymetli hocalarım Prof. Dr. Halil İbrahim ÜNAL ve Prof. Dr. Halit KARABULUT' a, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli eşim Derya ERGİN ve oğullarım Yiğitalp ile Tunahan' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tez çalışmama proje desteği veren Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne ve Gazi Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkürlerimi arz ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xix
1. GİRİŞ	1
2. YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	3
3. ÇALIŞMANIN AMACI	14
4. REOLOJİ VE MANYETOREOLOJİK SIVILAR	15
4.1. Reoloji	15
4.2. Alan-Cevaplı Sıvılar	17
4.2.1. Manyetoreolojik sıvılar	18
4.2.2. Manyetoreolojik cihazlar	24
5. MR SIVILI AMORTİSÖRÜN SONLU ELEMANLAR METODU (FEM) İLE STATİK MANYETİK ANALİZİ	28
5.1. Temel Yaklaşım ve Kabuller	30
5.2. Statik Manyetik Analiz İşlem Basamakları	32
5.2.1. Fiziksel çevrenin oluşturulması	32
5.2.2. Modelin oluşturulması, bölge özelliklerinin atanması ve mesh edilmesi	37

Sayfa

5.2.3. Modele sınır şartlarının ve yüklerin uygulanması	39
5.2.4. Çözümün elde edilmesi.....	40
5.2.5. Sonuçların gözden geçirilmesi.....	41
6. MR SIVILI AMORTİSÖRÜN SONLU ELEMEN ANALİZİ SONUÇLARI	49
6.1. Manyetik Akı Yoğunluğu (B_{SUM}).....	49
6.2. Manyetik Alan (H_{SUM})	53
6.3. Manyetik Akı Çizgileri	56
7. TASARLANAN MR AMORTİSÖRÜN İMALATI	57
8. MR SIVI SENTEZİ	61
8.1. Çökelme Kararlılığı	62
8.2. Yoğunluk Ölçümleri	65
9. MR AMORTİSÖRÜN PERFORMANS TESTLERİ VE SONUÇLARI.....	67
10. SICAKLIĞIN MR SIVI PERFORMANSINA ETKİSİ	81
11. EŞDEĞER SÖNÜM KATSAYILARININ BULUNMASI.....	89
12. TAŞIT SÜSPANSİYON SİSTEMİ VE SİMÜLASYONU.....	94
12.1. Süspansiyon Sistemi Çeşitleri.....	94
12.2. Süspansiyon Sisteminin Matematiksel Modeli.....	95
12.3. MR Amortisörlü Yarı-Aktif Süspansiyon Sisteminin Simülasyonu.....	99
12.4. Simülasyon Sonuçları	102
12.4.1. Basamak yol uyarısının zaman alanı cevabı.....	102
12.4.2. Sinüsoidal (harmonik) yol uyarısının zaman alanı cevabı.....	107
12.4.3. Rastgele sinüsoidal yol uyarısının zaman alanı ve frekans cevapları.....	111
13. SONUÇ VE ÖNERİLER	114

Sayfa

KAYNAKLAR	117
EKLER.....	121
EK-1 Statik manyetik analiz sonuçları.....	122
EK-2 MR amortisörün imalat resimleri	135
EK-3 MR sıvılara ait performans grafikleri	141
EK-4 Grafik alanı bulma MATLAB kodu	161
EK-5 İki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modeli MATLAB kodu	162
ÖZGEÇMİŞ	166

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5. 1. Modelde kullanılan malzemelerin bağıl manyetik geçirgenlikleri	35
Çizelge 5. 2. Modelde kullanılan MR sıvının B-H değerleri	36
Çizelge 6. 1. Farklı akım değerlerinde MR sıvı boşluğunda oluşan manyetik akı yoğunluğu değerleri	52
Çizelge 8. 1. MR sıvı sentezinde kullanılan manyetik taneciklerin özellikleri.....	61
Çizelge 8. 2. Sentezlenen MR sıvılar	62
Çizelge 8. 3. MR sıvıların yoğunlukları.....	66
Çizelge 9. 1. Amortisör testlerinde kullanılan hız, akım, uyarı frekansı değerleri	68
Çizelge 9. 2. MR amortisör test parametreleri	68
Çizelge 9. 3. MR sıvıların 0,5m/s hızdaki 0A ve 2A akım değerlerindeki maksimum sönümleme kuvveti değerleri	75
Çizelge 10. 1. MR sıvıların 0,5m/s hız ve 2A akım değeri için farklı sıcaklıklardaki maksimum sönümleme kuvveti ve kuvvet kaybı oranı değerleri	87
Çizelge 11. 1. Farklı akım değerleri için MR sıvılara ait eşdeğer sönüm katsayıları	91
Çizelge 12. 1. Süspansiyon sistemi parametreleri.....	102

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4. 1. Çeşitli akışkan tipleri için kayma gerilimi-kayma hızı ilişkisi	17
Şekil 4. 2. MR sıvıdaki manyetik alana bağlı yapısal değişim	19
Şekil 4. 3. MR sıvının çalışma tipleri.....	20
Şekil 4. 4. MR akışkanda kullanılan demir tozunun görünüşü	22
Şekil 4. 5. Tek silindirli (A) ve çift silindirli (B) MR amortisörlerin yapısı.....	24
Şekil 4. 6. Pasif sönümleyici ile MR sönümleyicinin deneysel kuvvet-hız eğrileri ..	25
Şekil 4. 7. MR fren.....	25
Şekil 4. 8. Yapılarda kullanılan sismik sönümleyici.....	26
Şekil 4. 9. MR sönümleyicinin yapılar üzerindeki yerleşimi.....	26
Şekil 4. 10. MR sönümleyicili protez diz.....	27
Şekil 5. 1. MR amortisör pistonunun iki boyutlu ve eksen simetrik geometrik modeli	28
Şekil 5. 2. Bobin kesiti	29
Şekil 5. 3. MR amortisör modeli boyutları	30
Şekil 5. 4. İki boyutlu "Plane 13" katı elemanı	31
Şekil 5. 5. "Plane 13" elemanının opsiyonları.....	34
Şekil 5. 6. B-H değerlerinin programa tanıtıldığı ekran görüntüsü.....	36
Şekil 5. 7. MR sıvının B-H eğrisi.....	37
Şekil 5. 8. Malzeme numarası seçim ekranı.....	38
Şekil 5. 9. Mesh edilmiş MR amortisör modeli	39
Şekil 5. 10. Akım beslemeli bobin	40
Şekil 5. 11. Bobin etrafındaki akı çizgileri	42
Şekil 5. 12. Manyetik akı yoğunluğunun (B_{SUM}) eleman çözümü.....	43

Şekil	Sayfa
Şekil 5. 13. Manyetik alan yoğunluğunun (H_{SUM}) eleman çözümü	44
Şekil 5. 14. Bobindeki akım yoğunluğunun (J_{SUM}) eleman çözümü	45
Şekil 5. 15. Manyetik akı yoğunluğunun (B_{SUM}) düğüm noktaları çözümü	46
Şekil 5. 16. Manyetik alan yoğunluğunun (H_{SUM}) düğüm noktaları çözümü	47
Şekil 5. 17. Manyetik vektör potansiyelinin (A_z) düğümsel çözümü	48
Şekil 6. 1. MR amortisör modelinin manyetik akı yoğunluğu (2 Amper)	49
Şekil 6. 2. MR sıvı boşluğundaki manyetik akı yoğunluğu (2 Amper)	50
Şekil 6. 3. MR sıvı boşluğundaki manyetik akı yoğunluğu (3-D)	51
Şekil 6. 4. MR sıvı boşluğu boyunca oluşan manyetik akı yoğunluğu	53
Şekil 6. 5. MR amortisör modelinin manyetik alan yoğunluğu (2 Amper)	54
Şekil 6. 6. MR sıvı boşluğundaki manyetik alan yoğunluğu (2 Amper)	55
Şekil 6. 7. MR sıvı boşluğu boyunca oluşan manyetik alan yoğunluğu	55
Şekil 6. 8. Bobin etrafındaki manyetik akı çizgileri	56
Şekil 7. 1. İmalatı planlanan MR amortisör katı modeli	57
Şekil 7. 2. MR amortisörün alt kısmı	58
Şekil 7. 3. MR amortisörün üst kısmı	59
Şekil 8. 1. Bir süspansiyonda meydana gelen çökelmenin şematik gösterimi	63
Şekil 8. 2. %25 demir içerikli MR sıvıların çökelme oranları	63
Şekil 8. 3. %40 demir içerikli MR sıvıların çökelme oranları	64
Şekil 8. 4. Lennard-Jones enerji potansiyeli diyagramı	65
Şekil 9. 1. MRF-1'in 0,5m/s hızda 0-2A akım aralığında sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri	69
Şekil 9. 2. MRF-2'nin 0,5m/s hızda 0-2A akım aralığında sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri	70

Şekil	Sayfa
Şekil 9. 3. MRF-3'ün 0,5m/s hızda 0-2A akım aralığında sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri	71
Şekil 9. 4. MRF-4'ün 0,5m/s hızda 0-2A akım aralığında sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri	72
Şekil 9. 5. MRF-5'in 0,5m/s hızda 0-2A akım aralığında sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri	73
Şekil 9. 6. MR sıvıların 0,5m/s hızda ve 2A akım değerinde sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri	74
Şekil 9. 7. MR sıvıların 0,5m/s hız ve 2A akım değerindeki dinamik kuvvet aralığı değerleri	77
Şekil 9. 8. MR sıvıların dinamik kuvvet aralıkları	78
Şekil 9. 9. MR sıvıların ortalama dinamik kuvvet aralığı değerleri	79
Şekil 9. 10. MR sıvılardan 2A akım değerinde elde edilen maksimum sönümlleme kuvvetlerinin frekansa göre değişimi	79
Şekil 9. 11. MR sıvılardan 0,5m/s hızda elde edilen sönümlleme kuvvetlerinin MR sıvı kanalındaki manyetik akı yoğunluğuna göre değişimi	80
Şekil 10. 1. MRF-1'in 0,5m/s hız ve 2A akım değeri için farklı sıcaklıklardaki performans grafikleri	82
Şekil 10. 2. MRF-2'nin 0,5m/s hız ve 2A akım değeri için farklı sıcaklıklardaki performans grafikleri	83
Şekil 10. 3. MRF-3'ün 0,5m/s hız ve 2A akım değeri için farklı sıcaklıklardaki performans grafikleri	84
Şekil 10. 4. MRF-4'ün 0,5m/s hız ve 2A akım değeri için farklı sıcaklıklardaki performans grafikleri	85
Şekil 10. 5. MRF-5'in 0,5m/s hız ve 2A akım değeri için farklı sıcaklıklardaki performans grafikleri	86
Şekil 10. 6. MR sıvıların 0,5m/s hız ve 2A akım değerindeki kuvvet kaybı oranları	88
Şekil 11. 1. Alanı hesaplanacak sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafiği	90

Şekil	Sayfa
Şekil 11. 2. Yeniden düzenlenen sönümlleme kuvveti-yer değıştirme grafiğı	91
Şekil 11. 3. MR sıvılara ait eşdeğer sönüm katsayılarının akımla değışimi	92
Şekil 11. 4. MR sıvıların sönümledikleri enerji miktarlarının akımla değışimi.....	93
Şekil 12. 1. Süspansiyon sistemi elemanları	94
Şekil 12. 2. Süspansiyon sistemi çeşitleri	95
Şekil 12. 3. Çeyrek taşıt modeli	96
Şekil 12. 4. MR amortisörlü yarı-aktif süspansiyon sisteminin çeyrek taşıt modeli.....	99
Şekil 12. 5. Pasif süspansiyon sisteminin Simulink blok diyagramı.....	100
Şekil 12. 6. Yarı-aktif süspansiyon sisteminin Simulink blok diyagramı.....	100
Şekil 12. 7. Basamak yol uyarısı.....	103
Şekil 12. 8. Taşıt gövde salınımının zamana göre değışimi.....	103
Şekil 12. 9. Taşıt gövde ivmesinin zamana göre değışimi.....	104
Şekil 12. 10. Amortisör sönümlleme kuvvetinin zamana göre değışimi	105
Şekil 12. 11. Süspansiyon salınımının zamana göre değışimi	106
Şekil 12. 12. Tekerlek salınımının zamana göre değışimi	106
Şekil 12. 13. Sinüsoidal yol uyarısı.....	107
Şekil 12. 14. Taşıt gövde salınımının zamana göre değışimi.....	108
Şekil 12. 15. Amortisör sönümlleme kuvvetinin zamana göre değışimi	109
Şekil 12. 16. Taşıt gövde ivmesinin zamana göre değışimi.....	109
Şekil 12. 17. Süspansiyon salınımının zamana göre değışimi	110
Şekil 12. 18. Tekerlek salınımının zamana göre değışimi	111
Şekil 12. 19. Rastgele sinüsoidal yol uyarısı.....	112
Şekil 12. 20. Rastgele sinüsoidal yol uyarısının zaman alanı cevapları.....	112

Şekil	Sayfa
Şekil 12. 21. Süspansiyon salınımının frekans cevabı	113
Şekil 12. 22. Tekerlek salınımının frekans cevabı	113

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 7. 1. MR amortisör prototipi	60
Resim 8. 1. Karıştırıcı uç	62
Resim 8. 2. Piknometre	66
Resim 9. 1. Test düzeneği	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
τ	Kayma gerilimi, Pa
η	Dinamik viskozite, Pa.s
$\dot{\gamma}$	Kayma hızı, 1/s
τ_y	Akma gerilimi, Pa
η_{ap}	Görünür viskozite, Pa.s
n	Fonksiyonel üst
η_p	Plastik viskozite, Pa.s
JS	Akım yoğunluğu, A/m ²
N	Bobin sarım sayısı
A	Bobin kesit alanı, m ²
I	Bobinden geçen akım, A
μ_0	Havanın manyetik geçirgenliği, H/m
μ_r	Bağıl manyetik geçirgenlik
μ	Manyetik geçirgenlik, H/m
B	Manyetik akı yoğunluğu, T
H	Manyetik alan, A/m
A_z	Manyetik vektör potansiyeli
B_{max}	Maksimum manyetik akı yoğunluğu, T
B_{min}	Minimum manyetik akı yoğunluğu, T
B_{ort}	Ortalama manyetik akı yoğunluğu, T
B_{SUM}	Toplam manyetik akı yoğunluğu, T
H_{SUM}	Toplam manyetik alan, A/m
R	Çökeltme oranı, %
a	Temiz sıvı yüksekliği, m

Simgeler	Açıklama
b	Bulanık sıvı yüksekliği, m
d	Yoğunluk, kg/m^3
m	Kütle, kg
V	Hacim, m^3
$F_{\max(20^\circ\text{C})}$	20°C 'deki maksimum sönüm kuvveti, N
$F_{\max(50^\circ\text{C})}$	50°C 'deki maksimum sönüm kuvveti, N
W	Amortisörün bir çevrimde sönümlendiği enerji, J
F_{MR}	MR amortisörün sönümleme kuvveti, N
ω_d	Uyarı frekansı, rad/s
$\dot{x}$	Amortisör piston hızı, m/s
x_0	Uyarı genliği, m
c_{eq}	Eşdeğer sönümleme katsayısı, Ns/m
m_s	Taşıt gövde kütlesi, kg
m_{us}	Tekerlek ve aksın toplam kütlesi, kg
c_s	Süspansiyon sönümleme katsayısı, Ns/m
c_{us}	Tekerlek sönümleme katsayısı, Ns/m
k_s	Süspansiyon yay katsayısı, N/m
k_{us}	Tekerlek yay katsayısı, N/m
x_s	Taşıt gövdesinin yer değiştirme miktarı, m
x_{us}	Tekerleğin yer değiştirme miktarı, m
x_{in}	Yol uyarı genliği, m
$\dot{x}_s$	Taşıt gövdesinin düşey hızı, m/s
$\dot{x}_{us}$	Tekerleğin düşey hızı, m/s
$\ddot{x}_s$	Taşıt gövdesinin düşey ivmesi, m/s^2
$\ddot{x}_{us}$	Tekerleğin düşey ivmesi, m/s^2
F_{m_s}	Taşıt gövdesine etki eden kuvvet, N
$F_{m_{us}}$	Teker-aks toplam kütesine etki eden kuvvet, N
ρ	Kütle oranı
ζ_s	Süspansiyon sönüm oranı
ζ_{us}	Tekerlek sönüm oranı

Simgeler**Açıklama**

ω_s	Süspansiyon doğal frekansı, rad/s
ω_{us}	Tekerlek doğal frekansı, rad/s
F_k	Yay kuvveti, N
F_d	Sönümleme kuvveti, N
$c_{s \min}$	Süspansiyon minimum sönüm katsayısı, Ns/m
$c_{s \max}$	Süspansiyon maksimum sönüm katsayısı, Ns/m

Kısaltmalar**Açıklama**

DC	Doğru Akım
ER	Elektroreolojik
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
FEMM	Manyetik Sonlu Elemanlar Metodu
GUI	Grafiksel Kullanıcı Ara Yüzü
HMMWV	Hareket Kabiliyeti Yüksek Çok Amaçlı Tekerlekli Taşıt
HSIC	İnsansı Akıllı Kontrol
IRDSMRD	Bağıl Yer Değişimi Algılamalı MR Amortisör
KEYOPT	Düğüm Noktası Opsiyonları
KKO	Kuvvet Kaybı Oranı
LQG	Lineer Karesel Gauss Kontrol
LVDT	Lineer Değişkenli Yer Değiştirme Sensörü
MR	Manyetoreolojik
ON/OFF	Aç/Kapa
2D	2 Boyutlu
3D	3 Boyutlu

1. GİRİŞ

Genel olarak taşıtlarda süspansiyon sisteminin performansını belirleyen iki temel kriter mevcuttur. Bunlar sürüş konforu ve sürüş güvenliğidir. Sürüş güvenliğinden ödün vermeden konforun artırılması çalışmaları, pasif sistemlerin yerine aktif sistem olarak nitelendirilen kontrol edilebilir sönüm ve yay elemanlarını gündeme getirmiştir.

Sabit sönüm ve yay katsayılı elemanlara sahip olan pasif sistemler, yapısının basitliği ve maliyetlerinin ucuz olması sebebiyle günümüzde halen yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktif süspansiyon sistemleri ise, sürüş konfor ve güvenliğini maksimum düzeyde sağlamasına rağmen büyük güç gereksinimleri, sistemin karmaşıklığı ve maliyetlerinin yüksek olması gibi dezavantajlara sahiptir.

Yarı-aktif süspansiyon sistemleri büyük güç kaynakları gerektirmeksizin hem pasif hem de aktif sistemlerin avantajlarını bir araya getirebildiği için son 10 yılda kayda değer bir öneme sahip olmuştur. Ancak ilk olarak ortaya çıkışından bu yana 30 yıldan fazla bir zaman geçmiştir [1]. Değişken orifisli sıvılı amortisörler, değişken yay katsayılı sistemler, sürtünme kontrollü sönümleyiciler, elektrik alanı kontrollü ER (elektroreolojik) sıvılı amortisörler ve manyetik alan kontrollü MR (manyetoreolojik) sıvılı amortisörler yarı-aktif titreşim kontrol sistemlerine örnektir. Alan etkili ER ve MR sıvılara “akıllı sıvılar” da denilmektedir.

ER sıvılar sıcaklığa karşı hassastırlar. ER sıvıların akma gerilimi değerleri MR sıvılarınkine oranla çok düşüktür. MR sıvılı amortisörlerde elde edilen sönümleme kuvvetleri çok daha fazladır. Ayrıca MR sıvılar küçük gerilim ve akımlara ihtiyaç duyarken, ER sıvılar çok büyük gerilim ve çok küçük akımlara ihtiyaç duymaktadırlar [2]. Bu nedenlerle MR sıvılı amortisörler yarı-aktif süspansiyon sistemleri için daha uygundurlar.

MR sıvılar, taşıyıcı bir faz içersine belirli bir oranda konulmuş mıknatıslanma özelliği gösteren mikron düzeyindeki katı taneciklerden oluşmaktadır. Bu sıvılar

manyetik alana maruz bırakıldığında reolojik özelliklerinde (elastiklik, plastiklik ve viskozite) milisaniyeler gibi çok kısa sürelerde büyük bir değişim meydana gelmektedir. Viskozitelerinde meydana gelen büyük artışla yarı-katı gibi davranmaya başlarlar. Manyetik alanın sona ermesiyle aynı hızda eski hallerine dönerler. MR sıvılı amortisörlerde bu manyetik alanın kontrolü aslında sönümlleme kuvvetinin kontrolünü sağlamaktadır.

MR sıvılar taşıtlarda süspansiyon sisteminden başka fren, kavrama ve motor takozlarında (motor kulağı) kullanılmaktadır. Ayrıca taşıtların dışında yapılarda ve köprülerde deprem ve rüzgarın sebep olduğu titreşimlerin sönümlenmesinde, sağlık alanında ise kol ve bacak protezleri gibi yapay bağlantılarda kullanılmaktadır.

2. YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

MR sıvıların ilk keşfi 1940'lı yılların sonunda Jacob Rabinow tarafından yapılmıştır. Bu çalışmayı daha sonra Winslow'un ER sıvılarla ilgili çalışması izlemiştir. ER ve MR sıvıların keşfinden sonra 1990'lı yıllara kadar ER sıvılar hakkında çok fazla çalışma yapılmış ve 1990'lı yıllardan sonra MR sıvıların üstün özelliklerinin anlaşılmasıyla araştırmalar bu kez MR sıvılara yönelmiştir [3]. Son 20 yılda MR sönümleyicilerle ilgili yapılmış birçok çalışma mevcuttur.

Spencer ve arkadaşları (1996), MR sönümleyicilerden maksimum düzeyde yararlanmak adına kontrol algoritmaları geliştirmek için, sönümleyicinin lineer olmayan içsel davranışını yeterince karakterize edebilecek modeller oluşturulması gerektiğini vurgulamışlardır. Kontrol edilebilir sıvılı sönümleyiciler için birkaç idealleştirilmiş mekanik model üzerinde durmuşlar ve tipik bir MR sönümleyici davranışını efektif olarak tanımlayabilen yeni bir model sunmuşlardır. Bir prototip sönümleyicinin deneysel sonuçlarıyla karşılaştırma yaparak geliştirdikleri modelin geniş bir çalışma aralığında doğru olduğunu, kontrol tasarımı ve analizi için yeterli olduğunu görmüşlerdir [4].

Li ve arkadaşları (2003), motosikletler için bir manyetoreolojik direksiyon sönümleyicisi tasarlamış, üretmiş ve test etmişlerdir. Mümkün olan birkaç MR valf konfigürasyonunu açıkladıktan sonra önerdikleri sönümleyici tasarımının en iyisi olduğuna karar vermişlerdir. Kullandıkları sönümleyici tasarımının basit takımlarla kolayca sökölüp takılabildiğini, test ve araştırma amaçlı olarak kullanıcı dostu olduğunu belirtmişlerdir. MR valfin boyutlarını sonlu eleman analizi kullanarak kararlaştırmışlardır. Sürekli kayma modunda sönümleyicinin performansını deneysel olarak Instron test makinesinde incelemişlerdir. Test sonuçları, üretilen prototipin istenilen ideal MR sıvılı direksiyon sönümleyicisinin temel gerekliliklerini yerine getirdiğini göstermiştir. MR sönümleyici tasarımlarının ileriki çalışmalarda ticari amaçlı olarak etkin bir biçimde temel olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir [5].

Şahin ve arkadaşları (2005), traktörlerin süspansiyonlarının olmamasından dolayı traktör operatörünün araziden gelen darbe ve titreşimlere maruz kaldığını ifade etmişlerdir. Bu nedenle, traktör koltuklarında kullanılabilecek kontrol edilebilir sönümleme kuvveti sağlayan bir MR sönümleyici tasarlamış, üretmiş ve test etmişlerdir. Sonuçlar, önerilen MR sönümleyicinin traktör koltuğunun yarı-aktif titreşim kontrolü için etkili bir biçimde kullanılabileceğini göstermiştir [6].

Shen ve arkadaşları (2005), Bouc-Wen histerik modelini kullanan bir MR sıvılı sönümleyicinin sönümleme kuvvetini modellemişlerdir. Model parametrelerinin tanımlanması işlemini deneysel verilere göre yapmışlardır. Kullandıkları tek serbestlik dereceli MR sıvılı süspansiyon sisteminin sinüsoidal uyartım altında cevabını elde etmek için lineer olmayan sistem modelini basitleştirmek adına eşdeğer lineerleştirme ve ortalama metotları kullanmışlardır. Bu iki yaklaşık metottan elde ettikleri sonuçları deneylerden ve nümerik simülasyon metodundan elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda yaklaşık metotlarla elde ettikleri sonuçların deneysel ve nümerik sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu görmüşlerdir. Lineer olmayan MR sönümleyici için bu iki yaklaşık metodun uygulanabilir olduğunu ileri sürmüşlerdir [7].

Sassi ve arkadaşları (2005), otomotiv süspansiyonlarının yarı-aktif kontrolü için kullanılabilen, elektromanyetik eksenin sönümleyici düşey eksenine dik olduğu tamamen yeni bir MR sıvılı sönümleyici modeli tasarlayıp, geliştirip, test etmek için teorik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu yeni MR sönümleyici prototipi orijinal pasif sönümleyiciden minimum düzeyde parça değişimi temel alınarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Laboratuvar testlerinden ve nümerik simülasyonlardan elde edilen sonuçlar, 2 amper civarında bir uyarıcı akım için sönümleme kuvvetinin üç kat arttırılabildiğini göstermiştir. Ayrıca yaptıkları nümerik simülasyonlar, harmonik bir uyartım durumunda konfor ve stabilite arasındaki optimum uyumun uyarı frekansına bağlı olduğunu göstermiştir [8].

Rashid ve arkadaşları (2006), MR sönümleyiciyi karakterize ederek süspansiyon sisteminin kontrolünde MR sönümleyicinin etkisini incelemişlerdir. Pasif

sönümleyici ile karşılaştırıldığında, yarı-aktif kontrollü MR sönümleyicinin süspansiyon sistemi için daha uygun olduğunu görmüşlerdir. Hem sürüş konforu hem de iyi bir tutunma için yeni bir yarı-aktif süspansiyon kontrol sistemi önermişlerdir. Yarı-aktif süspansiyon sistemini kontrol etmek için bulanık mantık kontrolcü kullanmışlardır [9].

Zhang ve arkadaşları (2006), bir MR sönümleyicinin manyetik tasarımını yapmışlar ve en yüksek kuvveti elde etmek için sonlu eleman analizi yardımıyla manyetik doyumu incelemişlerdir. Orijinal bir MR sönümleyiciyi yaptıkları manyetik analize göre yeniden boyutlandırarak tasarlamışlardır. Orijinal ve modifiye edilmiş her iki MR sönümleyiciyi deneysel olarak inceleyerek modifiye edilmiş sönümleyicide daha büyük kuvvetler elde edildiğini, dolayısıyla daha fazla enerjinin sönümlendiğini görmüşlerdir [10].

Aydar ve arkadaşları (2007) yaptıkları çalışmada, çamaşır makinesinde kullanılmak üzere küçük bir MR sıvılı sönümleyiciyi teorik olarak analiz edip tasarlamışlar ve prototipini üretmişlerdir. Çamaşır makinesi çok düşük hızlardan çok yüksek hızlara ulaştığından farklı sönümleme kuvvetlerine ihtiyaç olduğunu ve bunun MR sıvılı sönümleyicinin kontrol edilebilirliği sayesinde sağlanabileceğini belirtmişlerdir. Ürettikleri prototip sönümleyicinin karakteristiğini harmonik bir giriş kullanarak elde etmişlerdir. Test sonuçları teorik kestirim değerleriyle iyi bir uyum göstermiştir. Sönümleyici için belirledikleri 150N'luk maksimum kuvvet kriterini, 2,1A'lik aktivasyon akımı kullanarak sağlamışlardır. Teorik olarak 3A'e göre ürettikleri sönümleyicide 2,1A'lik akımla maksimum kuvvet elde ettikleri için, herhangi bir nedenle sönümleme kuvvetinde oluşabilecek azalmanın telafi edilebileceğini belirtmişlerdir [11].

Engin ve arkadaşları (2007), yarı-aktif sönümleme elemanı olarak bir MR sönümleyici geliştirmişlerdir. Sönümleyicinin çalışma davranışlarını sanki-statik akış analizi kullanarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Akış analizini Bingham plastik modeline göre yapmışlar ve analizin Herschel-Bulkley modeline genişletilebileceğini göstermişlerdir. Analiz sonucunda elde ettikleri lineer olmayan denklem sistemini

herhangi bir piston hızına karşılık gelen sönümleme kuvvetini kestirmek için bilgisayar yardımıyla çözmüşlerdir. Teorik sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlar ve aralarında güzel bir uyum olduğunu görmüşlerdir [12].

Nam ve Park (2007), tek taraflı ve çift taraflı olmak üzere iki farklı by-pass tip MR sönümleyiciyi, MR akışkanın Bingham özelliklerine ve manyetik analiz sonuçlarına göre tasarlayıp üretmişlerdir. Manyetik alana bağlı olarak sönümleme kuvveti ve cevap karakteristiklerini deneysel olarak inceledikten sonra, söz konusu iki sönümleyicinin dinamik davranışını tanımlayan sanki-statik durum modellerini formüle etmişlerdir. Sonrasında önerdikleri sönümleyicileri test etmek için kütle düşürme prensibiyle çalışan basit bir tek serbestlik dereceli test makinesi yapmışlar ve pratik bir kontrol algoritması önermişlerdir. Son olarak, darbeye maruz bırakılan sönümleyicilerin kontrol performanslarını incelemek için bir dizi deney ve simülasyonlar yapmışlardır. Deney ve simülasyonların karşılaştırılması sonucunda önerdikleri kontrol algoritmasının başarılı olduğunu ileri sürmüşlerdir [13].

Ahmadian ve Norris (2007) çalışmalarında, darbe kuvvetine karşı MR sıvıların davranışlarını incelemek üzere iki farklı tek silindirli MR sönümleyici tasarlamışlardır. Deneyleri gerçekleştirmek üzere kütle düşürmeli bir test cihazı yapmışlardır. Beş farklı yükseklikten yaklaşık 25kg'lık kütleyi test edilecek MR sönümleyicinin üzerine bırakarak farklı darbe enerjilerinde testleri gerçekleştirmişlerdir. Sönümleyicilerden birinde pistonun her iki tarafında da piston mili mevcut iken diğerinde tek bir piston mili ve içersinde basınçlı gazın olduğu akümülatör mevcuttur. Sönümleyicileri her bir darbe hızında beş farklı akım değeri kullanarak test etmişlerdir. Testler sonucunda iki sönümleyicinin darbe kuvvetlerine karşı farklı kuvvet-strok karakteristikleri sergilediklerini görmüşlerdir. İki taraflı piston miline sahip sönümleyicide maksimum kuvvet darbenin başlangıcına yakın olurken, tek taraflı gaz basınçlı sönümleyicide bunun tam aksine silindirin dibinde bulunan azot gazının sıkışmasından sonra sönümleyici stroğunun sonlarına doğru olmuştur. Bu davranışı açıklamak için azot gazının (akümülatör) teorik modeli oluşturulmuş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca sonuçlar, düşük hızlarda maksimum kuvvet sönümleyiciye uygulanan akıma bağlı olurken, yüksek

darbe hızlarında maksimum kuvvetin sönümleyiciye uygulanan akıma bağlı olmadığını göstermiştir. Bu durum pistonun yüksek hızına uyum sağlayamayan sıvı ataleti ile açıklanmıştır. Bu yüzden, maksimum kuvvet öncelikle sıvının MR valften geçişi esnasında oluşan akış direncinden çok sıvının sıkışmasına bağlanmıştır [14].

Mao ve arkadaşları (2007), yüksek piston hızlarında darbe ve titreşimi azaltmak için akış modunda çift kanallı bir MR sönümleyiciyi tasarlamışlar ve üretmişlerdir. Bingham plastik modele ve Bingham plastik histerik modele göre iki teorik akış modlu MR sönümleyici modeli oluşturmuşlardır. Bunlardan birincisi piston üzerinde bir MR valfe sahip geleneksel MR sönümleyici, ikincisi ise sönümleyicinin her iki tarafında da MR valflerin olduğu çift kanallı MR sönümleyicidir. Bu iki MR sönümleyici tasarımının sönümleme performanslarını nümerik olarak karşılaştırdıktan sonra yüksek hızlarda dinamik aralığı daha iyi olan çift kanallı MR sönümleyiciyi seçmişlerdir. Çift kanallı MR sönümleyiciyi sinüsoidal yükler altında test cihazında test etmişler ve deneysel verileri teorik modellerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Sonuçta, Bingham plastik histerik modelle tahmin edilen sönümlemenin Bingham plastik modelle tahmin edilenden daha hassas olduğunu görmüşlerdir [15].

Yu ve arkadaşları (2008), sürüş konforu ve güvenliğini geliştirmek için kontrol edilebilir yarı-aktif MR sönümleyici tasarlamışlardır. Sönümleyiciyi karışık modda (mixed mode) çalışacak şekilde planlamış ve üretmişlerdir. Sönümleyicinin zaman cevabını deneysel olarak inceleyerek süspansiyon modeliyle birleştirmişlerdir. MR sönümleyicili süspansiyon sisteminin yarım-taşıt dinamik modelini formüle etmişler ve başvurma gibi istenmeyen titreşimleri azaltmak ve zaman gecikmesinin etkilerini en aza indirmek için “İnsansı Akıllı Kontrol” (Human Simulated Intelligent Control, HSIC) adını verdikleri kontrolcüyü geliştirmişlerdir. HSIC’nin etkinliğini bilgisayar simülasyonu ile doğruladıktan sonra, dört adet MR sönümleyici yerleştirilmiş taşıtın yol testlerini yapmışlardır. Ek olarak, önerdikleri HSIC’den elde ettikleri kontrol sonuçlarını geleneksel LQG (Linear Quadratic Gaussian) kontrol sonuçları ile de karşılaştırmışlardır. Tüm bu simülasyon ve yol testleri sonuçları, HSIC’nin düşey yöndeki titreşimleri ve başvurma hareketlerini zayıflattığını göstermiştir [16].

Mazlan ve arkadaşları (2008), sıkıştırma modunda MR sıvıların sıkışma ve gerilme testlerini gerçekleştirmek üzere bir test ekipmanı tasarlamışlardır. Manyetik sonlu eleman metodunu (FEMM) kullanarak MR sıvıdaki manyetik alan dağılımını analiz etmişlerdir. FEMM yazılım paketini kullanarak elde ettikleri simülasyon sonuçlarına göre test ekipmanını üretmiş ve modifiye etmişlerdir. Testlerde Lord firmasının üretmiş olduğu MRF-241ES su esaslı, MRF-132DG ve MRF-122-2ED hidrokarbon esaslı manyetoreolojik sıvıları kullanmışlardır. MR sıvıya uygulanan çeşitli akımların ve seçilen sıvı boşluğu ölçülerinin gerilme-gerinim ilişkisi üzerindeki etkilerini her üç tip MR sıvı için incelemişlerdir. Doğru akım (DC) kullanılarak bir bobin tarafından üretilen manyetik alana dik yönde gerçekleştirilen deneyler sonucunda, uygulanan akımın arttırılmasıyla MR sıvıların basma/çekme gerilmelerinin arttığını görmüşlerdir [17].

Nguyen ve Choi (2009), sonlu eleman analizini temel alarak belirli bir hacmi geçmeyecek şekilde bir MR amortisörün optimum tasarımını yapmışlardır. Optimizasyon problemi amortisörün geometrik ölçülerini tanımlamaktadır. MR amortisörün Bingham model tabanlı sanki-statik modelinin elde edilmesinden sonra MR amortisörün manyetik devresini çözümlmek için hem analitik hem de sonlu eleman metotları ortaya konmuştur. MR amortisörün ilk geometrik ölçülerini sabit manyetik akı yoğunluğunun kabulü ile belirlemişlerdir. Optimize edilmiş amortisörlerin titreşim sönümlleme performansını incelemek için MR amortisörlü çeyrek taşıt modeli oluşturulmuş ve sky-hook kontrolcü tarafından kontrol edilmiştir. Optimize edilmiş MR amortisörlerin sinüsoidal ve darbe şeklindeki yol profillerinde başlangıçtaki optimize edilmemiş amortisörlerden daha iyi titreşim sönümlleme performansı gösterdiği görülmüştür. Çalışmada elde edilen sonuçlar, MR amortisörün optimizasyonunun, süspansiyon sisteminin titreşim kontrol performansını geliştirmede çok faydalı ve verimli bir yol olduğunu göstermiştir [18].

D. H. Wang ve T. Wang (2009) çalışmalarında, MR amortisörlerin kontrol edilebilir sönümlleme karakteristiklerini tam anlamıyla kullanabilmek için, MR amortisörlerin yarı-aktif kontrolünde, aktif sistemlerin kontrolünde olduğu gibi ekstra sensörlere ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. Bu ekstra sensörlerin sistemin maliyetlerini

arttırdığından, sistemi karmaşık hale getirdiğinden, sistemde ekstra yer kapladığından ve sistemin güvenilirliğini azalttığından bahsetmişlerdir. Bu olumsuzlukların üstesinden gelmek için “Kendiliğinden Bağlı Yer Değişimi Algılamalı MR Amortisör” (Integrated Relative Displacement Self-Sensing MR Damper) adını verdikleri bir amortisör geliştirmişlerdir. Burada bağlı yer değişimini algılayan sensör MR amortisörün içerisinde yer almakta ve elektromanyetik indüksiyona dayalı çalışmaktadır. IRDSMRD’nin sönümleme ve yer değişimi algılama performanslarını sonlu eleman metodu (FEM) kullanarak modellemişler ve analiz etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, geliştirdikleri MR amortisörde büyük bir kontrol edilebilir sönümleme oranı ve iyi bir bağlı yer değişimi algılama performansı elde ettiklerini vurgulamışlardır [19].

Nguyen ve Choi (2009), bir yolcu taşıtının MR amortisörünün sonlu elemanlar çözümüne dayalı optimum tasarım prosedürünü oluşturmuşlar ve Ansys parametrik tasarım dilini kullanarak belirli bir hacimde sınırlandırılmış optimizasyon işlemini gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon problemi MR amortisörde kullanılan valfin boyutlarını tanımlamaktadır. Bingham modele göre MR amortisörün sönümleme kuvveti ve dinamik aralığını elde ettikten sonra, sönümleme kuvveti, dinamik aralık ve indüktif zaman sabiti oranlarının lineer bir kombinasyonu ve bunların ağırlık faktörü referans değerleriyle, hedeflenen bir fonksiyon önermişlerdir. Referans değerleri, manyetik akı yoğunluğunu sabit kabul ederek belirlemişlerdir. Tasarım amacına bağlı farklı ağırlık faktörü değerleri ile amortisörün optimum çözümlerini elde etmiş ve sunmuşlardır. Ayrıca, optimize edilmiş amortisörlerin performanslarını farklı uygulama akımlarında incelemeleri, akma gerilmesi kuvveti ve indüktif zaman sabitinin optimum eğilimlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır [20].

Li ve arkadaşları (2003), sonlu eleman analizi kullanarak, yüksek verimli bir MR valfin optimize edilmiş tasarımını sunmuşlardır. Valfteki manyetik akı yoğunluğunun analitik sonuçları, manyetik akı doyumunda bobin mili çapının, aktif bobin çekirdeği uzunluğunun ve akı geri dönüş yolu kalınlığının etkili olabileceğini göstermiştir. Hem manyetik doyumu engellemek hem de valf ağırlığını minimize etmek amacıyla, sonlu eleman analizi kullanarak valf boyutlarını en uygun şekilde belirlemişlerdir.

Ayrıca, MR valf performansını tahmin etmek için bu analizi tipik Bingham plastik analiz ile birleştirmişlerdir [21].

Benetti ve Dragoni (2006), çok diskli MR fren veya kavramanın non-lineer manyetik analizini COMSOL/Multiphysics programıyla gerçekleştirmişlerdir. Basit altı diskli bir yapı ile düşük akım ve güçlerde 100Nm'den daha büyük bir direnç torkunun ya da iletim torkunun elde edilebileceğini göstermişlerdir. Örnek olarak sundukları döner MR fren tasarımında kullanılan eşitlik ve modeller, çok plakalı MR kavrama için de uygulanabilmektedir [22].

Nam ve Park (2009) çalışmalarında, MR amortisör için bir elektromanyetik tasarım metodu sunmuşlardır. MR amortisörün performansını geliştirmek için manyetik alanın MR sıvı üzerine etkin bir biçimde uygulanması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu amaçla, iki etkin yaklaşım önermişlerdir. Bunlardan birincisinin, MR amortisörün statik karakteristiğini geliştirmek için bobin çekirdeği üzerindeki gereksiz hacimleri çıkartarak manyetik akı yolunu kısaltmak olduğunu, diğerinin ise dinamik ve histerik karakteristikleri geliştirmek için manyetik akının geçtiği bobin kesit alanını küçülterek devrenin manyetik direnci arttırmak olduğunu belirtmişlerdir. Bu önerdikleri iki tasarım yaklaşımına göre ve geleneksel yaklaşımlara göre iki farklı MR amortisör üretmişlerdir. Yaptıkları analiz ve test sonuçlarına göre kendilerinin elektromanyetik olarak tasarladıkları MR amortisörün performansının geleneksel amortisörden daha iyi olduğunu görmüşlerdir. Bu nedenle, önerdikleri elektromanyetik tasarım metodunun, MR amortisör uygulamaları için temel oluşturacağını ileri sürmüşlerdir [23].

Abu-Ein ve arkadaşları (2010), MR sıvıların otomobil süspansiyon sistemlerinde kullanımının verimliliğini göstermek için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sistem kritik veya aşırı sönümlü olmadığı sürece, sönüm oranını sistem karakteristiklerinin ve davranışının bir göstergesi olarak düşünmüşlerdir. En iyi karakteristiklerin sönüm oranı yaklaşık 0,7 civarında iken olduğunu belirtmişlerdir. Amortisörleri yol tutuşu bakımından değerlendirmişler ve en kötü yol tutuşun akımın sıfır olduğu durumda, en iyi yol tutuşun ise akımın maksimum olduğu durumda elde

edildiğini göstermişlerdir. MR sıvılı amortisöre uygulanan akımın artırılmasıyla amortisör verimliliğinin arttığı sonucuna varmışlardır [24].

Yao ve arkadaşları (2002) çalışmalarında, akış modunda çalışan bir MR amortisör tasarlamışlar ve bu amortisörün performans testlerini yapmışlardır. MR amortisörün performansını karakterize etmek için matematiksel bir model olan Bouc-Wen modelini kullanmışlardır. MATLAB'taki optimizasyon metodunu ve MR amortisörün deneysel sonuçlarını kullanarak modelin katsayılarını belirlemişlerdir. MR amortisör modelinin de içersinde olduğu çeyrek taşıt modelini oluşturmuşlar ve süspansiyonun titreşimini kontrol etmek için yarı-aktif kontrol stratejisini kullanmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda, manyetik alan altında MR amortisörün çok geniş bir sönümlleme kuvveti aralığına sahip olduğunu, elektrik akımıyla birlikte sönümlleme katsayısının arttığını, fakat uyartım genliğiyle birlikte düştüğünü görmüşlerdir. Uygulanan elektrik akımı belli bir değere ulaştığında MR amortisörün manyetik doyuma ulaşacağını vurgulamışlardır. Ayrıca elektrik akımı altında MR amortisörün viskoz bir amortisör gibi davranmadığını, ancak MR amortisörün özelliğinin Bouc-Wen modeli ile tanımlanabildiğini belirtmişlerdir. MR amortisörlü çeyrek taşıt simülasyonu sonuçlarına göre, yarı-aktif kontrol kullanarak yaylanan kütlenin ivme cevabı ile süspansiyon ve tekerlek salınımını taşıt gövdesi rezonans değeri civarında etkin bir şekilde kontrol ettiklerini ileri sürmüşlerdir [25].

Dogruer ve arkadaşları (2008), hareket kabiliyeti yüksek çok amaçlı tekerlekli bir taşıt (High-Mobility Multi-Purpose Wheeled Vehicle, HMMWV) için yeni bir MR sıvılı amortisör tasarlamış, geliştirmiş ve test etmişlerdir. Kontrol edilebilirliği sağlamak için yeni amortisörü tasarlariken, taşıtın orijinal amortisörünün geometrik ölçülerine sadık kalmışlardır. MR sıvılı amortisörün davranışını simüle etmek için Bingham Plastik modelini kullanmışlar ve manyetik alan dağılımını üç boyutlu elektromanyetik sonlu eleman analizi kullanarak elde etmişlerdir. Amortisörün açma-kapama (genişleme-sıkışma) fazları arasında viskoz kuvvet karakteristiklerinin asimetrik olması için amortisör pistonu üzerine şimler (ince ayar plakaları) eklemişlerdir. Yani, bu şimler sayesinde açma fazında, kapama fazı kuvvetinin iki katı bir kuvvet elde etmişlerdir. Ayrıca, amortisör kuvvetinin MR kısmının bu

şimlerden etkilenmediğini belirtmişlerdir. MR sıvılı yeni amortisörün güç tüketiminin 31,5 W olduğunu ve teorik hesaplar ile deneysel sonuçların iyi bir uyum içinde olduğunu ileri sürmüşlerdir [26].

Yang ve arkadaşları (2002), yapılarıdaki titreşimlerin yarı-aktif kontrolünde kullanılacak gerçek boyutlarda olan 20 tonluk bir MR sönümleyici tasarlamışlar ve üretmişlerdir. Tasarım amaçlarını gerçekleştirmek üzere, eksen simetrik ve paralel plakalı olmak üzere iki farklı model oluşturmuşlardır. Bu modellerden elde ettikleri sonuçları kuvvet-hız ilişkisi bakımından deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar ve sonuçların uyum içerisinde olduğunu görmüşlerdir. MR sönümleyicinin dinamik performansını belirleyebilmek için Bouc-Wen histerik model tabanlı bir mekanik model geliştirmişlerdir. Dinamik cevap süresinin MR sönümleyici performansı üzerinde etkili olduğunu belirtmişler ve akım sürücünün sabit voltajlı bir güç kaynağına oranla cevap süresinin düşürülmesinde etkili olduğunu ileri sürmüşlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda, paralel bağlı bobinleri bulunan MR sönümleyicinin cevap süresinin seri bağlı bobinleri bulunan MR sönümleyiciye göre daha hızlı olduğunu görmüşlerdir [27].

Lam ve arkadaşları (2010), bir piezoelektrik kuvvet sensörünü ve bir de LVDT (Linear Variable Differential Transformer) yer değişimi sensörünü bir MR amortisör üzerine entegre ederek, sönümleme kuvvetini ve amortisör pistonunun yer değişimini algılayabilen yeni bir MR amortisör oluşturmuşlardır. Bu MR amortisörün algılama ve sönümleme performanslarını farklı akımlar için çeşitli deneylerle incelemişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda, MR amortisörün güvenilir yer değişimi-kuvvet algılaması ve kontrol edilebilir sönümleme kuvvetleri sağladığını görmüşlerdir. Titreşimlerin azaltılmasında, bu yeni MR amortisörün gerçek zamanlı olarak kapalı çevrim geri-besleme kontrol uygulamaları için güvenilirlik ve kolaylık gibi avantajlara sahip olduğunu vurgulamışlardır [28].

Nguyen ve arkadaşları (2009) çalışmalarında, sonlu eleman analizine dayalı olarak bir MR amortisörün optimum tasarımını sunmuşlardır. MR amortisörü belirli bir hacimde sınırlandırıp optimizasyon problemiyle amortisörün geometrik boyutlarını

belirlemişlerdir. Tüm bunları yaparken sönümleme kuvvetini, dinamik aralığı ve zaman sabitini göz önünde bulundurmuşlardır. MR amortisörün tasarımını şekillendirdikten sonra, amortisörün Bingham modele dayalı sanki-statik modelini oluşturmuşlardır. Amortisörün ilk geometrik boyutlarını sabit bir manyetik akı yoğunluğu kabulü ile belirlemişlerdir. Bu ilk tasarım ile optimum tasarım arasında sönümleme kuvveti ve zaman sabitine göre karşılaştırma yaptıklarında, uygulanan herhangi bir akımda bu değerlerin iyileştiğini görmüşlerdir. Ayrıca optimize edilmiş amortisörün güç tüketiminin kayda değer bir biçimde düştüğünü belirtmişlerdir [29].

Butz ve Von Stryk (2002) çalışmalarında, ER ve MR sıvıların temel özelliklerini incelemişlerdir. Bunun yanında, ER ve MR sıvılı amortisörler için belli başlı matematiksel modelleri açıklamışlardır. Matlab/Simulink programı ile çeyrek taşıt modeli üzerinde pasif bir MR amortisörün farklı matematiksel modellerini kullanarak simülasyonlar yapmışlardır. Yoldan gelen farklı uyarılar için bu matematiksel modellerden elde edilen simülasyon sonuçlarını karşılaştırmışlardır. ER ve MR sıvılı amortisörlerin dinamik davranışlarını sayısal simülasyonlar ile hassas bir şekilde ortaya koyabilmek için matematiksel modellerin geliştirilmesine halen ihtiyaç olduğunu vurgulamışlardır [30].

3. ÇALIŞMANIN AMACI

Taşıtlarda güvenli ve konforlu bir sürüşün temini için süspansiyon sistemi görevini en iyi şekilde yerine getirmelidir. Süspansiyon sistemi, başta fren ve direksiyon sistemi olmak üzere taşıt üzerindeki birçok sistem ve parçayı doğrudan ya da dolaylı olarak etkilemektedir. Aktif süspansiyon sistemleri, sürüş konfor ve güvenliğini maksimum düzeyde sağlamasına rağmen büyük güç gereksinimleri, sistemin karmaşıklığı ve maliyetlerinin yüksek olması gibi dezavantajlara sahiptir. Pasif süspansiyon sistemlerinin ise; ucuz, dayanıklı ve basit bir yapıya sahip olmasına rağmen sürüş konfor ve güvenliğinin sağlanmasında yetersizlikleri söz konusudur. Bu nedenlerden dolayı, konfor ve güvenliği optimum düzeyde sağlayıp, sistemin maliyetlerini düşürebilmek için, kontrol edilebilir sönüm elemanlarından oluşan yarı-aktif süspansiyon sistemlerinin kullanılması kaçınılmazdır.

Yapılmış çalışmalara bakıldığında, araştırmaların MR sıvının karakterizasyonu, sistemin teorik modellenmesi ve kontrol sistemi tasarımları üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Daha verimli bir şekilde çalışacak, farklı sönümleyici tasarımı çalışmaları halen yaygın bir şekilde devam etmektedir.

MR sıvının performansı, kullanılacağı cihaz tasarımı, maruz kalacağı koşullar, kullanım süresi ve sıklığı gibi birçok faktöre bağlıdır. Bir uygulamada başarılı görülen MR sıvı bir başka cihaz için uygun olmayabilir. Örneğin olası bir depreme kadar statik olarak bekleyen bir sismik MR sönümleyici ile her gün defalarca kez viskozite değişiminin gerçekleştiği bir otomobil MR amortisörünün özellikleri birbirinden farklı olmak durumundadır.

Bu çalışmada, MR sıvılı amortisör prototipi geliştirilmiş ve bu prototip amortisörde farklı özelliklerdeki MR sıvılar denenmiştir. MR amortisörün boyutlandırılması işlemleri manyetik analizlere göre yapılmıştır. Geliştirilen MR amortisörün testleri, sentezlenen her bir MR sıvı için laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. MR sıvılı amortisörlere sahip yarı-aktif süspansiyon sistemli bir taşıtın, sürüş konfor ve güvenliğini optimize etmek çalışmanın amacını oluşturmaktadır.

4. REOLOJİ VE MANYETOREOLOJİK SIVILAR

4.1. Reoloji

Reoloji, maddelerin akış ve deformasyon özelliklerini inceleyen bilim dalıdır. Kayma gerilimi sonucu maddelerin deformasyonunu inceler. Akışkanlar genel olarak iki ana başlık altında incelenebilir. Bunlar, Newton tipi (Newtonian) ve Newton tipi olmayan (Non-Newtonian) akışkanlardır.

Newton tipi akışkanlarda, kayma gerilimi ve kayma (deformasyon) hızı arasındaki ilişki lineerdir. Bu ilişki Eş. 4.1’de verilmiştir [31].

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (4.1)$$

Burada, “ τ ” kayma gerilimi, “ η ” akışkanın dinamik viskozitesi ve “ $\dot{\gamma}$ ” kayma hızıdır. Newton tipi akışkanlar için viskozite sabittir, zamandan ve uygulanan kayma geriliminden bağımsızdır. Newton tipi akışkanların viskozitesi gerçek bir termodinamik özellik olup sadece sıcaklık ve basınç ile değişmektedir.

Genel olarak Newton tipi akışkanların viskoziteleri basınç ile çok az artmaktadır. Sıcaklığın artması ise, gazlarda viskozitenin artmasına, sıvılarda azalmasına sebep olmaktadır [32].

Newton tipi akışkanların dışında kalan tüm akışkanlar Newton tipi olmayan akışkanlardır. Newton tipi olmayan akışkanlar için, kayma gerilimi ve kayma hızı arasındaki ilişki lineer değildir. Newton tipi olmayan akışkanlar üç ana gruba ayrılırlar. Bunlar;

- Zamandan bağımsız akışkanlar
- Zaman bağımlı akışkanlar
- Elastoviskoz akışkanlardır.

Reolojik sıvılar zamandan bağımsız akışkanlar sınıfında yer almaktadır. Zamandan bağımsız akışkanlar için geçerli olan ilişki Eş. 4.2’de verilmiştir.

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma}^n \quad (4.2)$$

Burada, “ τ_y ” akma gerilimini ve “ n ” ise kayma gerilimi ile kayma hızı arasındaki fonksiyonel ilişkiyi tarif etmektedir. Zamandan bağımsız akışkanlarda görünür viskoziteyi tanımlayan ifade Eş. 4.3’de verilmiştir.

$$\eta_{ap} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}^n} = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}^n} + \eta \quad (4.3)$$

Zamandan bağımsız akışkanlar üç farklı akışkan tipine ayrılır [31]. Bunlar;

- Bingham akışkanlar
- Pseudoplastik akışkanlar
- Dilatant akışkanlardır.

Bingham akışkanlar, küçük ve sonlu büyüklükteki kayma gerilimine karşı koyarak katı gibi davranan, fakat kayma geriliminin akma gerilimini aşması halinde sürekli şekil değiştirerek viskoz bir akışkan gibi akmaya başlayan akışkanlardır. Bu tip akışkanlar, kritik kayma değerinden sonra Newton tipi akışkan gibi davranır ve kayma gerilimi ile kayma hızı arasında lineer bir ilişki vardır. Bingham akışkanların reolojik durum denklemi Eş. 4.4’de verilmiştir. Bu eşitlik, kayma geriliminin akma geriliminden büyük olduğu durumlar için geçerlidir ($\tau > \tau_y$).

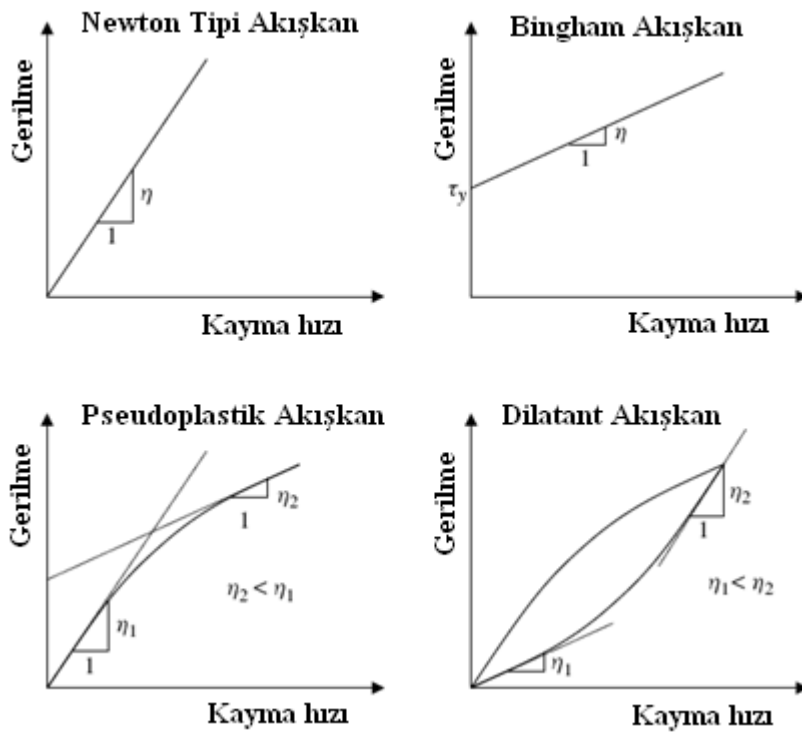
$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad (4.4)$$

Pseudoplastik ve dilatant akışkanların akma gerilimi değerleri sıfırdır ($\tau_y=0$). Kayma gerilimi ile kayma hızı arasındaki ilişki lineer değildir. Bu ilişkiyi gösteren eğrinin eğimi akışkanın görünür viskozitesini vermektedir. Görünür viskozitenin kayma hızı ile azalması durumundaki akışkanlara pseudoplastik akışkan, artması durumundaki akışkanlara ise dilatant akışkan denir. Pseudoplastik akışkanlar “kayma-incelmesi”

özelliği gösterirken, dilatant akışkanlar “kayma-kalınlaşması” özelliği gösterirler. Bu her iki tip akışkan için Eş. 4.5 geçerlidir. Pseudoplastik akışkanlarda $n < 1$ iken, dilatant akışkanlarda $n > 1$ şartı geçerlidir. Burada “ n ” kayma gerilimi ile kayma hızı arasındaki fonksiyonel ilişkiyi tarif eden sabittir [31].

$$\tau = \eta \dot{\gamma}^n \quad (4.5)$$

Newton ve Newton tipi olmayan çeşitli akışkanların kayma hızı ile kayma gerilimi arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4. 1. Çeşitli akışkan tipleri için kayma gerilimi-kayma hızı ilişkisi

4.2. Alan-Cevaplı Sıvılar

Genel olarak, alan-cevaplı sıvılar üç temel grupta incelenir. Bunlar; elektoreolojik (ER) sıvılar, manyetoreolojik (MR) sıvılar ve ferro sıvılardır. Alan-cevaplı sıvılar dışarıdan bir elektrik alanına veya manyetik alana maruz kaldıklarında, reolojik özelliklerinde ani değişimler meydana gelmektedir.

Ferro sıvılar, manyetik sıvılar olarak bilinmektedirler. Demir oksit, manganez-çinko ferritleri, demir ve kobalt gibi çok küçük (5-10nm) manyetik taneciklerin sulu ya da susuz kolloidal süspansiyonlarıdır. Ferro sıvıların viskoziteleri manyetik alan altında iki katına çıkabilir. Buna karşın, ferro sıvılar akma gerilimine sahip değildir ($\tau_y=0$). Ferro sıvılar döner sızdırmazlık elemanlarında, manyetik yataklarda ve motor sönümleyicilerinde kullanılmaktadırlar. Ferro sıvılar kolloidal manyetik taneciklerden oluştuğu için MR sıvılardan daha kararlıdır [33].

Elektroreolojik sıvıların ilk olarak keşfi 1949 yılında Winslow tarafından yapılmıştır. ER sıvılar, elektrik alan altında polarize olabilen aktif taneciklerin yalıtkan bir sıvı içerisinde dağılımıyla oluşan süspansiyonlardır. ER sıvılarda kullanılan tanecikler ortalama 0,1-100 μ m boyutlarındadır [31, 34]. ER sıvılara elektrik alanı uygulandığında tanecikler kutuplaşarak aralarında dipol etkileşimi meydana gelir ve elektrik alan yönünde zincir yapı oluşur. Böylece birkaç milisaniye içerisinde ER sıvının akış özelliklerinde ani değişimler meydana gelir. Buna “elektroreolojik etki” denir.

ER sıvılara elektrik alanı uygulanması sonucu oluşan maksimum akma gerilimi (τ_y) 2-5 kPa arasındadır. ER sıvılara uygulanabilecek maksimum elektrik alanı, oluşan yapının bozulmasıyla sınırlıdır (≈ 5 kV/mm). Bu yapının bozulma sınırı sıvının dielektrik özellikleri ile ilgilidir [31]. Sıvı içerisindeki tanecik (aktif madde) konsantrasyonu ve uygulanan elektrik alanı arttıkça viskozite (ER etki) artmaktadır. Fakat sıcaklığın artması sonucu oluşan ER etki tam tersine azalmaktadır [35].

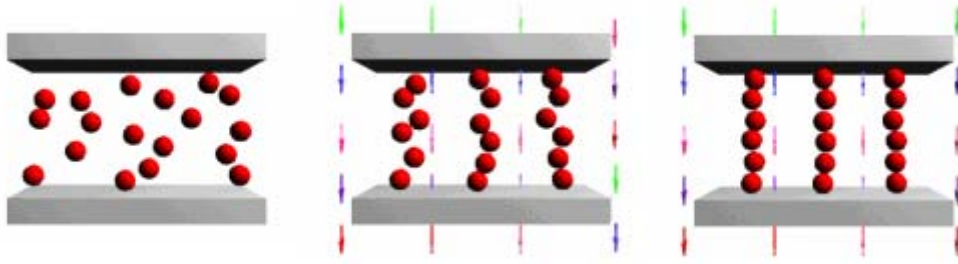
4.2.1. Manyetoreolojik sıvılar

Manyetoreoloji, manyetik alan etkisine maruz bırakılmış malzemelerin akma ve deformasyon özelliklerini incelemektedir.

MR sıvılar; silikon, hidrokarbon veya su gibi taşıyıcı bir sıvı içerisinde, 1-10 μ m çaplarında, manyetize olabilen parçacıklardan ve çeşitli katkı maddelerinden oluşan karışımlardır. MR sıvı üzerine bir manyetik alanın uygulanması durumunda birkaç

milisaniye (10-20ms) içinde sıvının akma gerilimi 100kPa'a kadar çıkabilmektedir. MR sıvıların çalışma sıcaklığı aralığı, taşıyıcı sıvının özelliklerine bağlı olarak -40°C ile 150°C arasındadır [2].

MR akışkanlar, manyetik alanın uygulanmadığı durumda Newton akış özellikleri gösterir. Bu durumda manyetik tanecikler taşıyıcı sıvı içerisinde rastgele dağılmış haldedirler. Manyetik alanın uygulanmasıyla manyetik tanecikler polarize olarak manyetik alan yönünde düzgün çizgiler halinde yeniden konumlanırlar (Şekil 4.2). Bu milisaniyelerle ifade edilebilen süre içerisinde akışkanın viskozitesi 10^5 - 10^6 kat kadar artarak akışkan adeta yarı katı bir hal almaktadır. Manyetik alanın kesilmesiyle sıvı aynı hızla eski haline dönmektedir. MR sıvının manyetik alan altındaki davranışı Bingham plastik modeline uymaktadır [3].

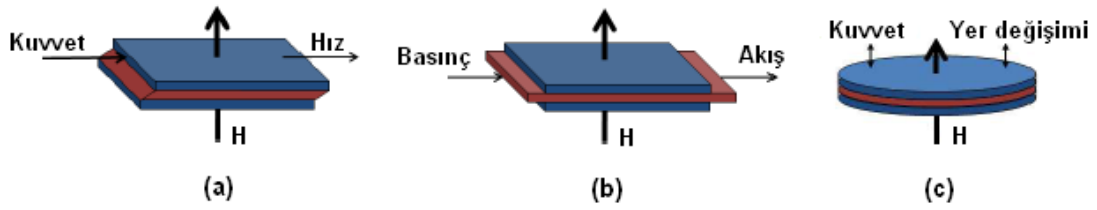


Şekil 4. 2. MR sıvıdaki manyetik alana bağlı yapısal değişim

Manyetik alan uygulandığında manyetik parçacıkların oluşturduğu zincir yapı üzerine bir basınç uygulanırsa, basıncın ve manyetik alanın büyüklüğüne bağlı olarak, zincir yapı şekil değiştirmektedir. MR sıvının uygulanan basınca gösterdiği bu tepki “MR etki” olarak adlandırılmaktadır [36].

MR sıvılar Şekil 4.3'te görüldüğü gibi üç farklı tipte çalışabilmektedir. Şekil 4.3.a'daki çalışma tipinde sıvıyı sınırlandıran plakalardan birine bir kuvvet uygulanır. MR etki, kayma gerilmesinden dolayı plakanın hareketine karşı koyacak şekilde bir tepki kuvveti oluşturur. Bu çalışma şekli “kayma tipi” olarak isimlendirilmiştir. Bu tip çalışma genellikle MR fren ve kavramalarda görülmektedir. İkinci çalışma şeklinde ise, sıvı üzerine bir basınç uygulandığında, zincir yapı sıvı akışına engel olmaya çalışacaktır (Şekil 4.3.b). “Valf tipi” ya da “akış tipi” çalışma

olarak adlandırılan bu çalışma şekli genelde MR amortisörlerde görülür. Şekil 4.3.c’de görülen çalışma tipinde ise, sınırlandırma plakalarına dik olarak kuvvet uygulanması durumunda, zincir yapıda küçük bir hareket meydana gelir. Bu çalışma şekli “sıkıştırma tipi” çalışma olarak adlandırılır. Bu tip çalışma şekli küçük hareket ve büyük kuvvet gerektiren sönümleyicilerde kullanılmaktadır.



Şekil 4. 3. MR sıvının çalışma tipleri

MR sıvıları kolloidal ferro sıvılar ile karıştırmamak gerekir. Ferro sıvılar içersindeki parçacıklar MR sıvılarda kullanılan parçacıklardan 1000 kat daha küçüktür. Bu nedenle, ferro sıvılarda MR sıvılarda olduğu gibi büyük akma gerilimi değerleri (~100kPa) elde edilememektedir.

MR sıvılar, Newton tipi olmayan zamandan bağımsız Bingham akışkanlar grubundadır. Bingham plastik modeli MR sıvının alan-bağımlı temel özelliklerini tanımlamada oldukça etkindir. Bu modele göre MR sıvıdaki toplam gerilim Eş. 4.6 ile verilmektedir [37].

$$\tau = \tau_y(H) + \eta_p \dot{\gamma} \quad (4.6)$$

Burada, “ $\tau_y(H)$ ” manyetik alan (H) altındaki akma gerilimini, “ η_p ” kayma gerilimi-kayma hızı eğrisinin eğimi olarak tanımlanan manyetik alandan bağımsız plastik viskoziteyi ve “ $\dot{\gamma}$ ” ise yine kayma hızını ifade etmektedir.

Tipik bir MR sıvı üç temel kısımdan meydana gelmektedir. Bunlar; polarize olabilen manyetik parçacıklar, taşıyıcı bir sıvı ve katkı maddeleridir. Sadece taşıyıcı sıvı ve

manyetik partiküllerden oluşan MR etkiye sahip MR sıvı oluşturmak mümkündür. Fakat bu MR sıvı kararlı ve uzun ömürlü olmayacaktır.

Taşıyıcı sıvı

Taşıyıcı sıvı, MR akışkan içersindeki manyetik taneciklere ve katkı maddelerine akışkan bir ortam sağlamaktadır. En çok kullanılan taşıyıcı sıvılar hidrokarbon yağlardır. Uzun ömürlü ve yağlayıcı özellikleri yüksektir. Bunlar; mineral yağlar, sentetik yağlar veya her ikisinin karışımı şeklinde olabilir.

Yaygın olarak kullanılan diğer taşıyıcı sıvılar ise, silikon yağı ve sudur. Silikon yağları lastik conta ve diyafram gibi parçalarla uyumlu çalışabilmektedir. Fakat, viskozite artışına ve sakızlaşmaya eğilimlidir. Su esaslı MR sıvılar, herhangi bir partikül yoğunluğu için, manyetik alan varlığında en yüksek akma gerilimi değerine sahipken, manyetik alan yokluğunda en düşük viskozite değerine sahiptirler. Suyun yüksek buhar basıncından dolayı sıvı kaybı olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle su esaslı MR sıvılar, sızdırmazlığın çok iyi olduğu cihazlarda kullanılmalıdır.

MR akışkanların hazırlanmasında kullanılan taşıyıcı sıvının kaynama noktası yüksek olmalıdır. Reaktif ve zehirleyici olmamalıdır. MR akışkanın çökme tekrar karışma özelliği ve kararlılığını sağlamak da taşıyıcı sıvının görevidir. MR akışkanın kullanıldığı cihazlarda çalışma sıcaklığını belirleyen en önemli faktör taşıyıcı sıvı viskozitesinin sıcaklığa bağlı değişimidir.

Manyetik parçacıklar

Demir çok tercih edilen bir manyetik parçacık türüdür. Bunun sebeplerinden biri demirin yüksek manyetik doygunluğa ($\sim 2,1T$) sahip olmasıdır. Manyetik doygunluk maddenin doğasından kaynaklanan bir özelliktir. Diğer bir önemli özellik ise, maddeye uygulanan manyetik alanın geri döndürülmesine maddenin göstermiş olduğu dirençtir. Bu dirence koersivite denir. Manyetik alanın uygulanmasına son

verildiğinde MR akışkanın en kısa sürede eski haline dönmesi istendiği için koersivitenin de düşük olması istenir. Demir taneciklerinin koersivitesi düşüktür [3]. MR akışkanlarda kullanılan demir tozunun görünüşü Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4. 4. MR akışkanda kullanılan demir tozunun görünüşü [38]

En yaygın olarak kullanılan manyetik parçacık karbonil demirdir. Düşük koersivite, yüksek manyetik doyum ve kimyasal olarak yüksek saflık derecesine sahip olmasından dolayı çok fazla tercih edilmektedir [33, 39, 40, 41]. Karbonil demir, demir pentakarbonilden ısıyla ayrıştırma yoluyla elde edilen demir partiküllerine verilen genel bir isimdir. Karbonil demir tozlarının fiziksel özellikleri oldukça iyidir. Karbonil demir, 1-10µm aralığında iyi bir partikül boyutuna ve küresel güzel bir şekle sahiptir. Kullanılan diğer demir formları ise, su ile veya elektrolitik olarak atomize edilmiş saf demirdir. Genelde demir partiküllerinin hacimsel olarak karışım oranları %20 ile %50 arasındadır. Kütlesel olarak ise bu oran %40 ile %90 arasındadır. İdeal karışım oranının seçimi bir denge olayıdır. Manyetik alan varlığında, oluşacak maksimum akma gerilimi değerleri karışım yüzdesiyle orantılı olarak değişmektedir. Manyetik alan yokluğunda ise, karışım oranı arttıkça MR sıvısının viskozitesi hızlı bir şekilde artacaktır [37].

Manyetik tanecik olarak manyetit (Fe_3O_4) gibi demir oksitler de oldukça yaygın kullanılmaktadır [42]. Nikel ve kobalt gibi manyetik özellikli diğer maddeler de tercih edilmektedir.

Katkı maddeleri

MR sıvılar çeşitli sınırlılıklara sahiptir. Bu nedenle MR akışkanlar hazırlanırken manyetik parçacıklar ve taşıyıcı sıvının yanında bazı katkı maddeleri de kullanılmaktadır. MR sıvılardaki başlıca olumsuzluklar;

- Manyetik taneciklerin çökmesi (dağılım)
- Kirleticilere karşı hassasiyet (kararlılık)
- Manyetik doyum (~2 Tesla)
- Sıcaklık artışına karşı hassasiyet
- Topaklanma
- Oksitlenme
- Aşınma

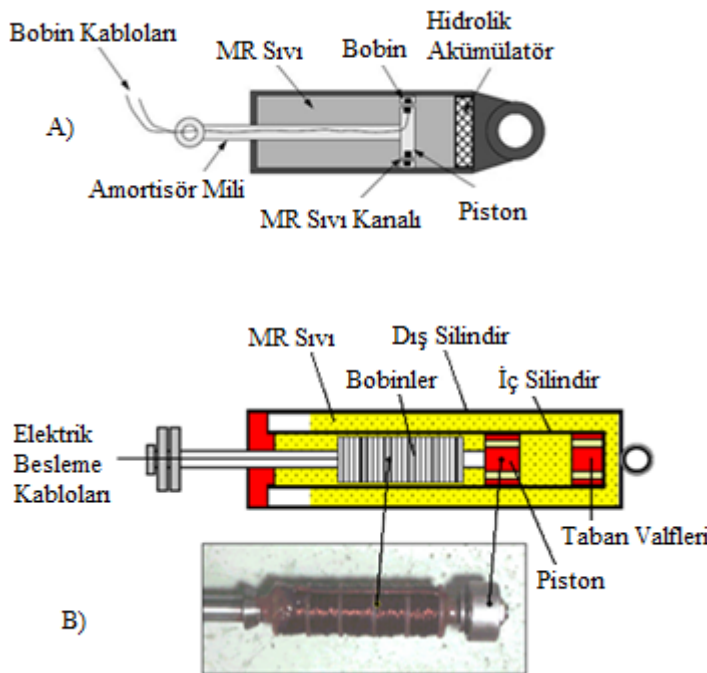
şeklinde sıralanabilir.

Taşıyıcı sıvı ve manyetik parçacıklar arasındaki yoğunluk farkından dolayı çökme olmaktadır. Çökme istenen bir durum değildir. Çökme sonucu manyetik parçacıklar arasındaki mesafeler kısalmaktadır. MR akışkanın çökmeye karşı kararlı olması için manyetik parçacıklar arasındaki mesafelerin belirli bir büyüklükte olması istenmektedir. Bunun yanında demir tozlarının aşındırma ve oksitlenip yüzeylerde korozyona sebep olması gibi olumsuzlukları da mevcuttur. Tüm bunların önüne geçebilmek için MR akışkanlara çeşitli katkı maddeleri katılmaktadır. Katkı maddelerinin taşıyıcı sıvı ile karıştırılmasıyla adeta bir ağ yapı oluşturulmakta ve böylece taşıyıcı sıvı ile manyetik parçacıklar arasındaki yoğunluk farkı bir ölçüde dengelenmektedir. Katkı maddeleri viskoziteyi düzenlemek ve topaklanmayı engellemek için de kullanılmaktadır. Silika dumanı, zirkonyum ve oleik asit katkı maddeleri olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır [3, 39, 41, 43]. Ayrıca, yüzey aktif maddelerin kullanımıyla topaklanmanın önüne geçilmiş olur ve daha iyi bir sıvı dağılımı sağlanır.

4.2.2. Manyetoreolojik cihazlar

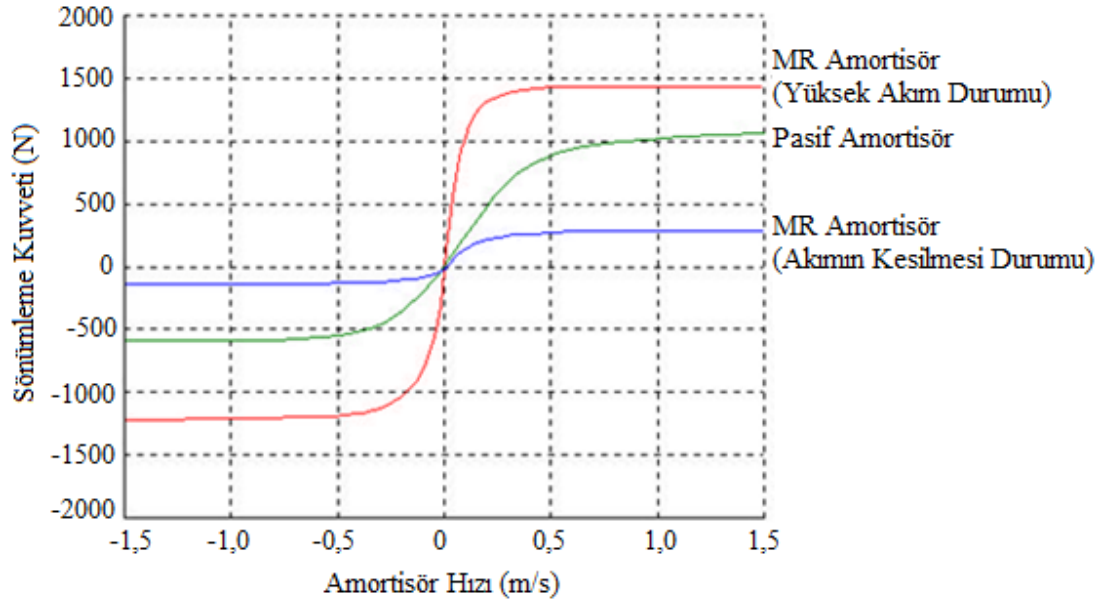
MR sıvılar kullanılarak mekanik sistemler zaman geçikmesi olmadan hızlı bir şekilde kontrol edilebilmektedir. MR sıvı mekanik sistem ile elektronik kontrol arasındaki koordinasyonu sağlamaktadır. MR sıvılar daha çok otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Amortisör, fren, kavrama ve motor takozu (motor kulağı) MR sıvıların otomotiv alanındaki uygulamalarına örnek teşkil eder. Ayrıca inşaat, sağlık ve robotik gibi daha birçok alanda başarıyla uygulanmaktadır.

MR sıvılar, taşıtların süspansiyon sistemlerinde amortisörlerdeki tipik hidrolik sıvısının yerini almaktadır. MR teknolojisi, kullanılan sensörler sayesinde aracın ve yolun durumuna göre bir kontrol sistemi vasıtasıyla sönümleme kuvvetini saniyede yüzlerce kez değiştirebilme imkanı sunmaktadır. Bu durum, yol tutuş ve sürüş konforu açısından çok önemlidir. Burada sönümleme kuvvetinin değişimine yol açan, amortisör içersindeki bobine uygulanan akımın değiştirilmesidir. Akımın değiştirilmesiyle MR sıvının viskozitesi değişmektedir. Şekil 4.5'te tek silindirli (A) ve çift silindirli (B) MR amortisörler görülmektedir.



Şekil 4. 5. Tek silindirli (A) ve çift silindirli (B) MR amortisörlerin yapısı

Geleneksel pasif bir amortisörde herhangi bir hızda amortisör hızla orantılı olarak bir kuvvet üretirken, MR amortisörde akımın kesilmesi ile yüksek akım durumu arasında sürekli değişken bir sönümleme kuvveti üretilecektir. Şekil 4.6'da pasif bir amortisör ile MR amortisörün karakteristik kuvvet-hız eğrileri görülmektedir.



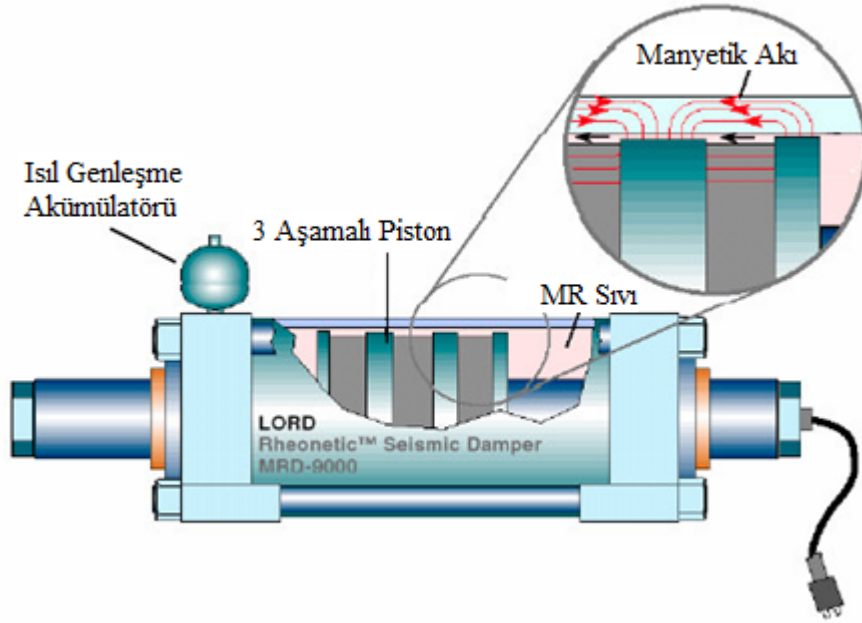
Şekil 4. 6. Pasif amortisör ile MR amortisörün karakteristik kuvvet-hız eğrileri

MR sıvıların otomotiv alanındaki diğer bir kullanımı frenlerdir. Şekil 4.7'de Lord firması tarafından üretilmiş olan bir fren görülmektedir. Bu cihazın çok hızlı tepkime zamanı (10-30 ms), düşük güç tüketimi ve yüksek kontrol edilebilirlik gibi önemli özellikleri mevcuttur. Diğer avantajları ise sisteme kolay entegre olması, dayanıklı bir yapıya ve uzun ömre sahip olmasıdır [38].

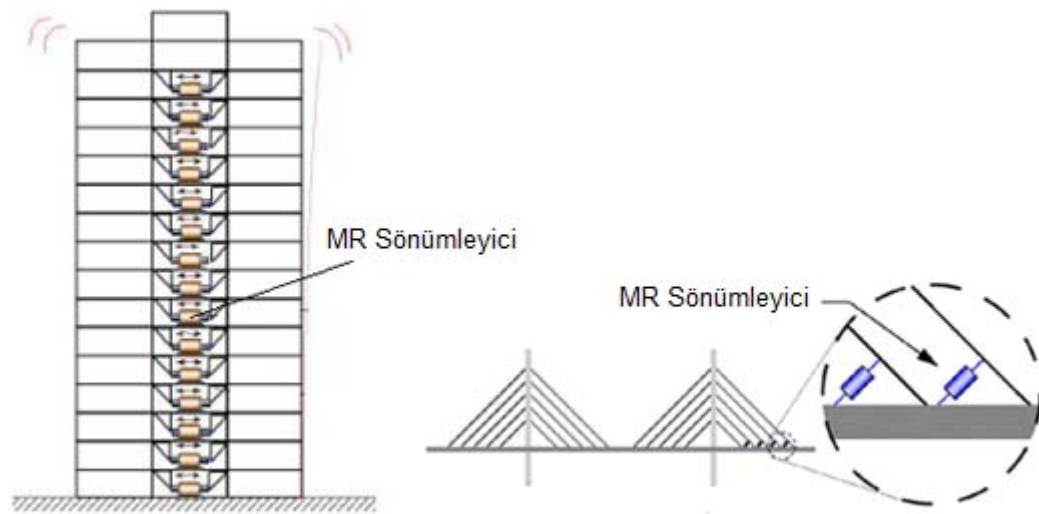


Şekil 4. 7. MR fren

MR sönümleyiciler sismik hareketlerin veya rüzgarın yapılar üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla bina ve köprülerde de kullanılmaktadır. Şekil 4.8’de yapılarda kullanılan MR sönümleyici görülmektedir. Şekil 4.9’da ise MR sönümleyicinin yapılar üzerindeki yerleşimi gösterilmiştir.

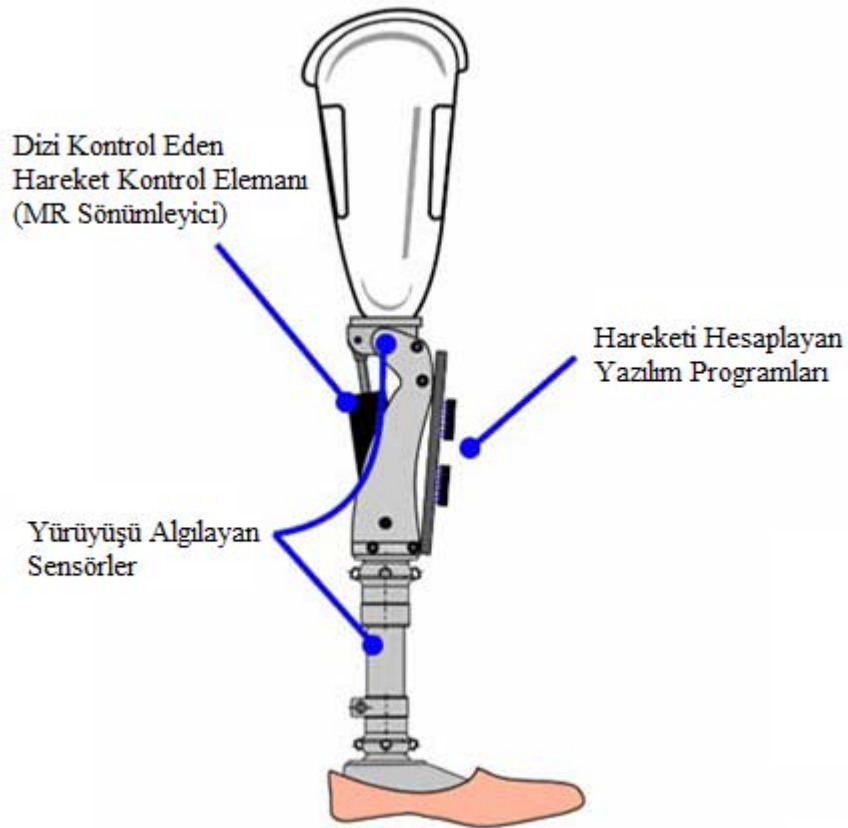


Şekil 4. 8. Yapılarda kullanılan sismik sönümleyici [2]



Şekil 4. 9. MR sönümleyicinin yapılar üzerindeki yerleşimi

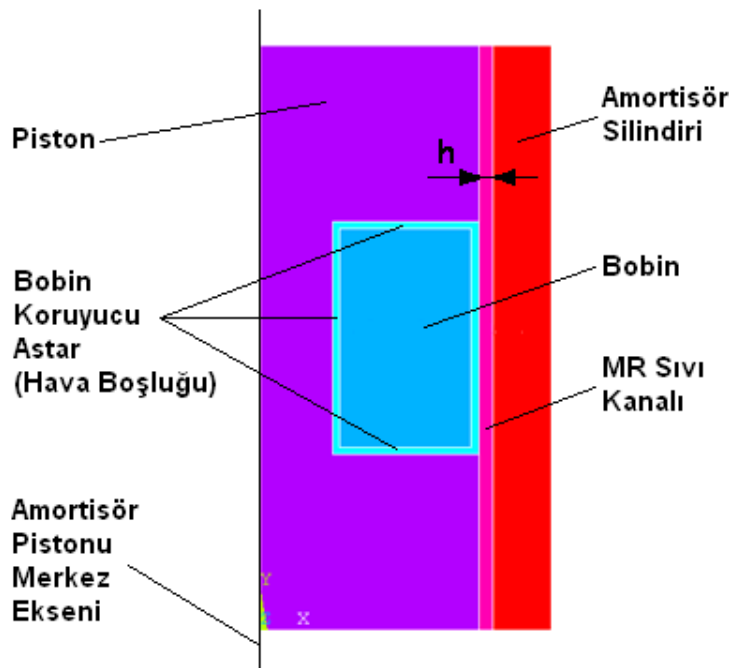
Sağlık alanında ise MR sıvılar protez eklemlerde kullanılmaktadır. Şekil 4.10'da MR sönümleyicili protez diz görülmektedir. Sensörler ve kontrol sistemi ile donatılan bu cihaz değişik hareketlere uyum sağlayabilmektedir. Bacağı olmayan bir kişiye doğal bir yürüyüş hareketi veya merdiven inip çıkma hareketi sağlayabilmektedir.



Şekil 4. 10. MR sönümleyicili protez diz [3]

5. MR SIVİLİ AMORTİSÖRÜN SONLU ELEMANLAR METODU (FEM) İLE STATİK MANYETİK ANALİZİ

Bu bölümde, M1 sınıfı¹ bir binek taşıtın orijinal arka amortisörünün dış boyutlarına sadık kalınarak iç yapısı tamamen değiştirilmiş ve ANSYS 12.0 / Emag (Electromagnetics) analiz programında statik manyetik analizi yapılmıştır. Amortisörün iç yapısı MR amortisör olarak yeniden tasarlanmıştır. Şekil 5.1’de MR amortisör pistonunun Ansys/Emag programında oluşturulmuş iki boyutlu geometrik modeli görülmektedir. MR sıvı boşluğu mesafesi (h) 0,5mm, 0,75mm, 1mm ve 1,25mm olan dört amortisör modeli ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu kısımda verilen tüm şekiller 1mm MR sıvı boşluğuna sahip modele aittir.

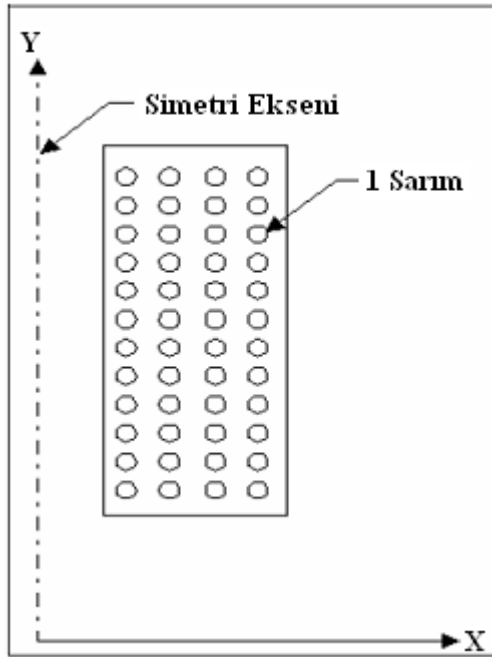


Şekil 5. 1. MR amortisör pistonunun iki boyutlu ve eksen simetrik geometrik modeli

Statik manyetik analiz; daimi bir mıknatıs, hareket eden bir iletken, uygulanan bir gerilim, akım veya dış alan tarafından üretilen manyetik alanları hesaplamak için kullanılmaktadır [44].

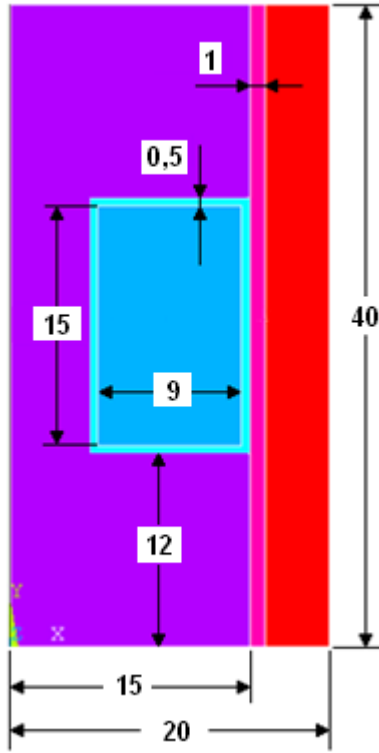
¹ M1 Sınıfı Araç: Sürücü dışında en fazla sekiz kişilik oturma yeri olan, yolcu taşımaya yönelik, en az dört tekerleği bulunan motorlu araçlardır [45].

MR amortisör iki boyutlu (2-D) ve eksen simetrik olarak analiz edilmelidir. Eksen simetrik veya düzlemsel geometrileri üç boyut (3-D) yerine iki boyutlu olarak analiz etmek, hem modeli oluşturmada kolaylık sağlamakta hem de çözümün daha kısa sürede tamamlanmasını sağlamaktadır. MR amortisörün statik manyetik analizi ile seçilen herhangi bir akımda, amortisör pistonu, MR sıvı ve amortisör silindiri içindeki manyetik akı yoğunluğu ile manyetik alan yoğunluğu belirlenebilmektedir.



Şekil 5. 2. Bobin kesiti

Modelde yer alan amortisör pistonu, MR sıvı boşluğu ve amortisör silindiri bobin etrafında bulunan ve manyetik devreyi tamamlayan durağan elemanlardır. Bobin, MR sıvıdaki manyetik parçacıkları indüklemek için gerekli olan manyetik alanı oluşturmak için kullanılmaktadır. Bobin 702 adet sarımdan oluşmaktadır. Şekil 5.2’de bobin sarımları gösterilmiştir. Bobinden geçen akım değiştirildiğinde oluşan manyetik alanın şiddeti de değişeceğinden MR sıvının viskozitesi değişecektir. Bu da amortisörün sönümlleme kuvvetinin anlık olarak değiştirilebildiği anlamına gelmektedir. MR amortisör modeli boyutlarının birimi milimetre olarak alınmıştır. MR amortisör modelinin boyutları Şekil 5.3’te verilmiştir.



Şekil 5. 3. MR amortisör modeli boyutları

5.1. Temel Yaklaşım ve Kabuller

Bu analizde, Ansys 12.0 / Mechanical APDL (Ansys Programme Design Language) ile çalışılmıştır. Ansys’te ayrıca Workbench kısmı da tercih edilebilmektedir.

Analizi basitleştirmek için modelin çevresindeki amortisör silindiri ve amortisör pistonunun kaçak akısı, malzemede yeterince bir manyetik doyum meydana gelmediğinden dolayı ihmal edilmiştir. Modelin etrafında kaçak akının olmadığı kabulü, manyetik akının yüzey etrafında yüzeye paralel olarak akacağı anlamına gelmektedir. Bu nedenle model etrafındaki sınır şartları “paralel akı” (flux parallel) olarak uygulanmaktadır. Bu sınır şartı bobin etrafında oluşan manyetik akının modellenebilmesi için gereklidir.

Ansys’te statik bir doğru akım (DC) oluşturmak için Eş. 5.1’de görüldüğü gibi akım yoğunluğu şeklinde ifade edilen bir parametreye ihtiyaç vardır.

$$JS = \frac{NI}{A} \quad (5.1)$$

Burada,

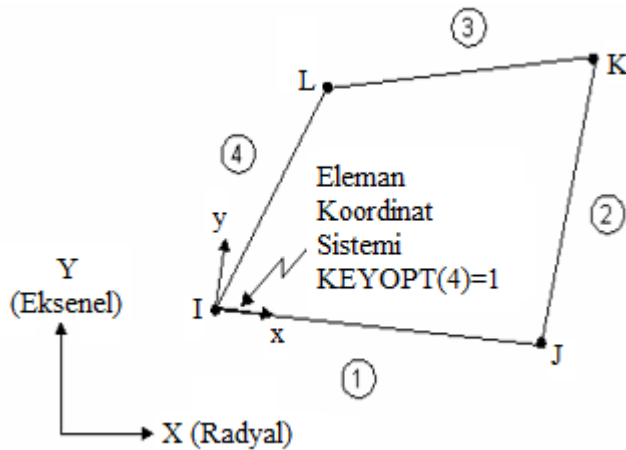
JS: Akım yoğunluğu (A/m²)

N: Bobindeki iletkenin sarım sayısı

I: Bobinden geçen akım (Amper)

A: Bobin kesitinin alanı (m²) şeklinde ifade edilmektedir.

Ansys'te MR amortisörün statik manyetik analizini gerçekleştirmek için kullanılabilecek çeşitli eleman tipleri mevcuttur. Bunlardan bizim analizimiz için en uygun olan iki elemandan biri "Plane 13" ve diğeri ise "Plane 53" tür. Bu elemanların her ikisi de iki boyutlu katı elemanlardır. "Plane 13" dört adet düğüm noktasına sahip iken "Plane 53" sekiz adet düğüm noktasına sahiptir. Bu çalışmada "Plane 13" elemanı kullanılmıştır. Bunun sebebi, bu elemanın non-lineer birleşik alan problemlerinde rahatlıkla kullanılabilmesidir. Şekil 5.4'te "Plane 13" elemanı görülmektedir.



Şekil 5. 4. İki boyutlu "Plane 13" katı elemanı

Modelde kullanılan elemanlar global X-Y düzleminde, pozitif bölgede yer almalıdır. Simetri eksenli bir analiz için simetri eksenini Y eksenine olmalıdır. Modelde kullanılan elemanlar sadece manyetik ve elektrik alan kabiliyetlerine sahip olmalıdır [44].

5.2. Statik Manyetik Analiz İşlem Basamakları

Statik manyetik analiz işlemi beş adımda tamamlanmaktadır.

1. Fiziksel çevrenin oluşturulması
2. Modelin oluşturulması, modeldeki her bir bölgeye fiziksel özelliklerin atanması ve modelin mesh edilmesi
3. Modele sınır şartlarının ve yüklerin uygulanması
4. Çözümün elde edilmesi
5. Sonuçların gözden geçirilmesi

5.2.1. Fiziksel çevrenin oluşturulması

Fiziksel çevrenin oluşturulabilmesi için aşağıdaki adımların uygulanması gerekmektedir.

1. GUI (Grafiksel Kullanıcı Arayüzü) tercihlerinin ayarlanması
2. Analiz başlığının belirlenmesi
3. Eleman tipinin ve opsiyonlarının belirlenmesi
4. Modelde kullanılan birim sisteminin belirlenmesi
5. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi

GUI tercihlerinin ayarlanması

Ansys'te “Main Menu → Preferences” kısmı seçilip ekrana gelen diyalog kutusundaki elektromanyetik analiz tipleri listesinden “Magnetic-Nodal” seçilmelidir. Ansys GUI, kullanılacak analiz tipine göre elemanları filtrelediği için, herhangi bir şey yapmadan önce analiz tipinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu seçim işleminden sonra, ileriki bölümlerde anlatılacak olan eleman tipinin belirlenmesi aşamasında, iki boyutlu statik manyetik analizde ihtiyaç duyulacak elemanlar program tarafından otomatik olarak sunulacaktır.

Analiz başlığının belirlenmesi

Analiz başlığı verilirken çözümünü gerçekleştirilecek olan problemle ilgili olmasına dikkat edilmelidir. Bu çalışmada başlık “MR Amortisör Statik Manyetik Analizi” şeklinde verilmiştir.

Analize başlık vermek için,

“Utility Menu → File → Change Title” kullanılabilir.

Eleman tipinin ve opsiyonlarının belirlenmesi

Modelin bütün bölgelerinde “Plane 13” elemanı kullanılmıştır. Birçok eleman tipi, elemanın karakteristik özelliklerini belirlemede kullanılan ve KEYOPT (düğüm noktası opsiyonu) olarak bilinen opsiyonlara sahiptir. “Plane 13” elemanının KEYOPT’ları aşağıda verilmiştir.

KEYOPT(1): Elemanın serbestlik derecesini belirler.

KEYOPY(2): Elemanın ekstra biçimlerinin kullanılıp kullanılmayacağını belirler.

KEYOPT(3): Düzlem veya eksen simetrisi opsiyonlarını belirler.

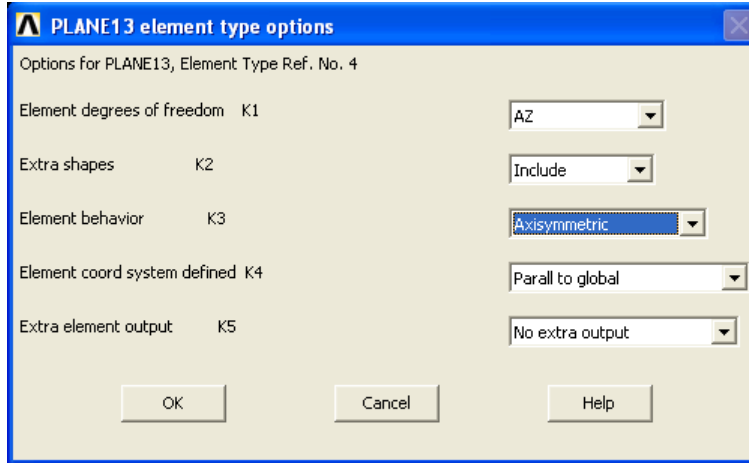
KEYOPT(4): Elemanın koordinat sistemini belirler.

KEYOPT(5): Elemanın ekstra eleman çıkışı kullanıp kullanmayacağını belirler.

Modelde kullanılacak eleman tipini ve opsiyonlarını seçmek için,

“Main Menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete” yolu kullanılmaktadır.

“Plane 13” elemanı seçildikten sonra bu elemanın “Options” seçeneği seçildiği takdirde Şekil 5.5’te görülen ve “Plane 13” elemanının KEYOPT’larının bulunduğu diyalog kutusu ekrana gelmektedir. Şekil 6.5’te görüldüğü gibi KEYOPT’lar seçilmiş olmalıdır.



Şekil 5. 5. “Plane 13” elemanın opsiyonları

Modelde kullanılan birim sisteminin belirlenmesi

Ansys programında varsayılan birim sistemi metredir. Birim sistemi değiştirilmek istenirse aşağıdaki yol takip edilmelidir.

Main Menu → Preprocessor → Material Props → Electromag Units

Hava boşluğunun manyetik geçirgenliği program tarafından otomatik olarak aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m (MKS Birim Sisteminde)}$$

Malzeme özelliklerinin belirlenmesi

MR amortisör modelindeki her bir malzemenin bağıl manyetik geçirgenlik (μ_r) değeri kullanılmıştır. Çizelge 5.1’de modelde kullanılan malzemelerin bağıl manyetik geçirgenlik değerleri verilmiştir. Bağıl manyetik geçirgenlik Eş. 5.2’de görüldüğü gibi ifade edilmektedir.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (5.2)$$

Burada,

μ_r : Bağlı manyetik geçirgenlik

μ : Manyetik geçirgenlik (H/m)

μ_0 : Havanın manyetik geçirgenliği (Mutlak geçirgenlik, H/m) olarak ifade edilir.

Çizelge 5. 1. Modelde kullanılan malzemelerin bağlı manyetik geçirgenlikleri

Malzeme Adı	Kullanım Yeri	Bağlı Manyetik Geçirgenliği (μ_r)
İzole Bant ve Hava Boşluğu	Bobin Korumucusu	1
Düşük Karbonlu Çelik	Amortisör Pistonu	1000
Düşük Karbonlu Çelik	Amortisör Silindiri	900
Bakır Tel	Bobin	1
MR Sıvısı	Amortisör Sıvısı	B-H eğrisi

Herhangi bir malzemenin bağlı manyetik geçirgenlik değeri tanımlanırken aşağıdaki yol takip edilmektedir.

Main Menu → Preprocessor → Material Props → Material Models → Electromagnetics → Relative Permeability → Constant

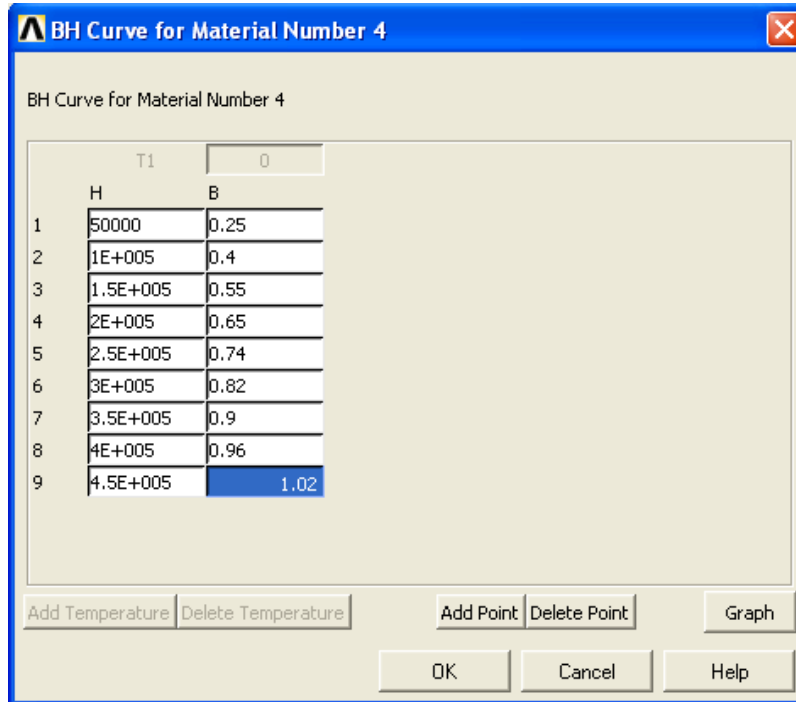
Ayrıca, MR akışkanlı uygulamalarda B-H eğrisi ile malzeme özellikleri tanımlanabilmektedir. Burada “B” manyetik akı yoğunluğunu (Tesla, T) ve “H” ise manyetik alanı (Amper/Metre, A/m) ifade etmektedir. Manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan arasındaki ilişki Eş. 5.3’de verilmiştir. Çizelge 5.2’de ise modelde kullanılan MR sıvının B-H değerleri verilmiştir.

$$B=\mu H \quad (5.3)$$

Çizelge 5. 2. Modelde kullanılan MR sıvının B-H değerleri

Manyetik Akı Yoğunluğu, B (Tesla)	Manyetik Alan, H (A/m)
0,25	50 000
0,4	100 000
0,55	150 000
0,65	200 000
0,74	250 000
0,82	300 000
0,9	350 000
0,96	400 000
1,02	450 000

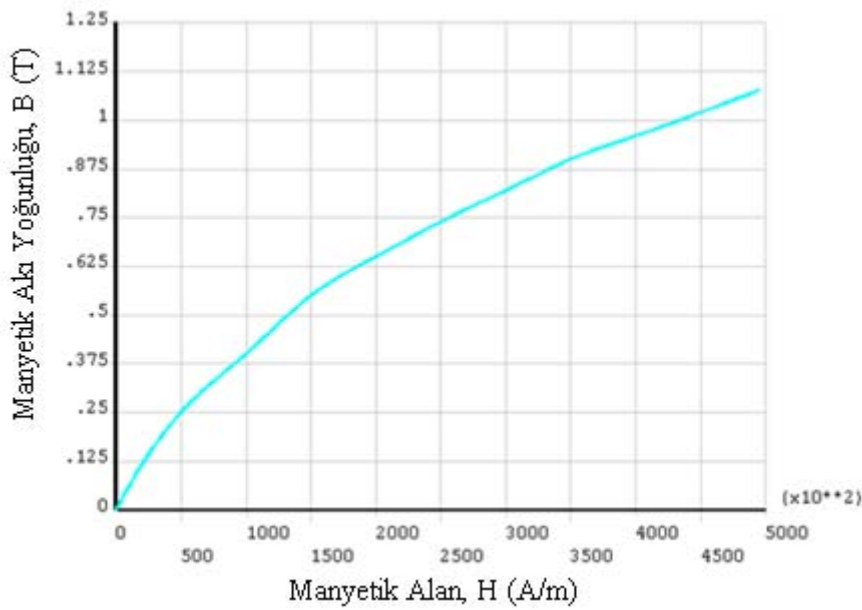
Bu değerler, Lord Corporation firması tarafından üretilen ve ticari olarak sağlanabilen “MRF-122EG” MR sıvısına aittir. Şekil 5.6’da B-H değerlerinin tablo halinde programa tanıtıldığı ekran görüntüsü görülmektedir.



Şekil 5. 6. B-H değerlerinin programa tanıtıldığı ekran görüntüsü

Bu değerlere göre Ansys programında oluşturulmuş B-H eğrisi şekil 5.7’de görülmektedir. B-H eğrisi ile malzeme özelliklerini tanımlayabilmek için aşağıdaki yol takip edilmelidir.

Main Menu → Preprocessor → Material Props → Material Models → Electromagnetics → BH Curve



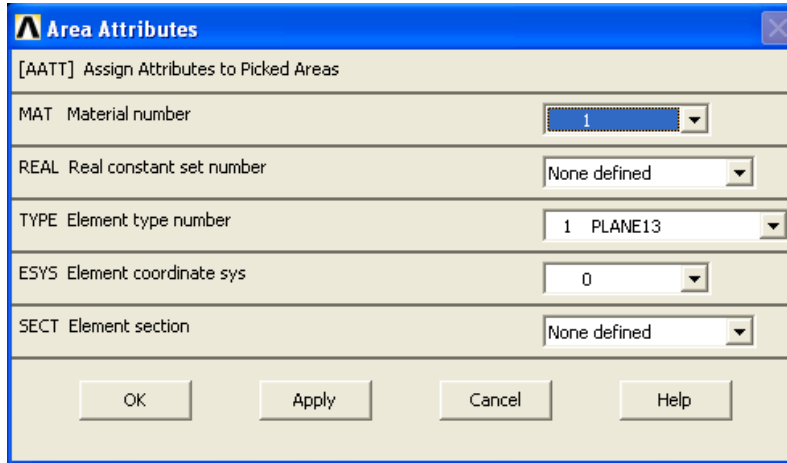
şekil 5. 7. MR sıvının B-H eğrisi

5.2.2. Modelin oluşturulması, bölge özelliklerinin atanması ve mesh edilmesi

MR amortisörün tüm alanları dikdörtgenlerden oluşmuştur. “Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Rectangle” ile bütün alanlar birer birer oluşturulmuştur. Daha sonra benzer alanlar oluşmasını diye “Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Overlap” yolu izlenerek alanlar st üste çakıştırılmıştır.

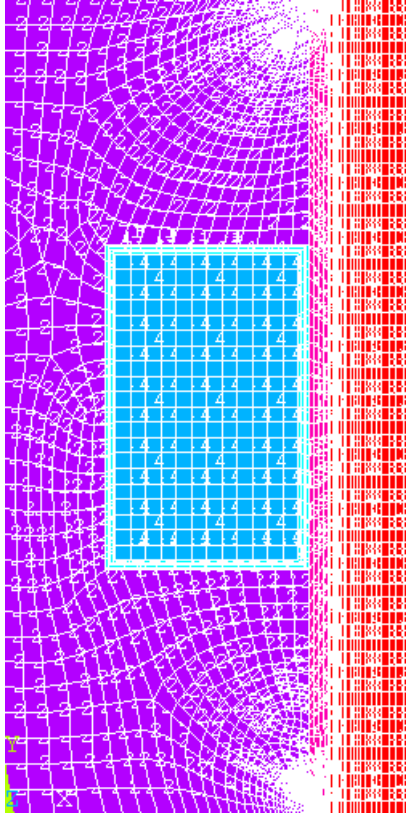
Oluşturulmuş olan alanlara malzeme özelliklerinin atanması için “Main Menü → Preprocessor → Meshing → Mesh Attributes → Picked Areas” ile malzeme özelliklerinin atanacağı alanın veya alanların seçimi yapılmaktadır. “OK” ile onay

verildikten sonra ekrana gelen diyalog kutusundan, daha önceden özellikleri belirlenmiş olan malzeme numarası seçilip onaylandığında söz konusu alana malzeme özellikleri atanmış olacaktır. Malzeme numarasının seçildiği ekran görüntüsü Şekil 5.8’de görülmektedir. Diğer bütün alanlar için aynı işlemler tekrar edilmelidir.



Şekil 5. 8. Malzeme numarası seçim ekranı

Tüm alanların malzeme özellikleri atandıktan sonra “Main Menü → Preprocessor → Meshing → Mesh → Areas → Free” ile tüm alanlar seçilip mesh edilmelidir. Mesh boyutu değeri en küçük (en iyi) olan “1” seçilmelidir. Şekil 5.9’da MR amortisör modelinin mesh edilmiş hali görülmektedir.



Şekil 5. 9. Mesh edilmiş MR amortisör modeli

5.2.3. Modele sınır şartlarının ve yüklerin uygulanması

Sınır şartları ve yükleri hem katı modele hem de sonlu eleman modeline uygulanabilmektedir. Ansys programı, çözüm esnasında katı modele uygulanan sınır şartlarını ve yükleri otomatik olarak sonlu eleman modeline transfer etmektedir.

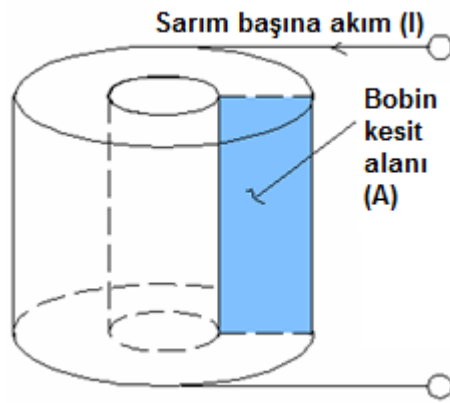
Modelde sınır şartı olarak manyetik vektör potansiyeli ($A_z=0$) sıfır seçilmelidir. Böylece manyetik akı yüzeye paralel olarak akacaktır. Paralel-akı sınır şartı için aşağıdaki yol izlenmeli ve modeli çevreleyen tüm çizgiler seçilmelidir.

Main Menu → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Magnetic → Boundary → Vektör-Poten → Flux Par'l → On Lines

Modelde, bobin alanına akım yoğunluğu uygulanmıştır. Modelde kullanılan akım beslemeli bobin Şekil 5.10’da görülmektedir. Aşağıdaki değerler Eş. 5.1’de yerlerine konularak akım yoğunluğu hesaplanmıştır.

$$N= 702, \quad I= 2A, \quad A= 0,000135 \text{ m}^2 \text{ (Bakır tel çapı= 0,4mm)}$$

$$J_s = \frac{NI}{A} = \frac{702 \cdot 2}{0,000135} = 10\,400\,000 \text{ A/m}^2$$



Şekil 5. 10. Akım beslemeli bobin

Bu hesaplanan değeri modele uyartım yükü olarak uygulamak için aşağıdaki sıra takip edilmelidir.

Main Menu → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Magnetic → Excitation → Curr Density → On Areas

5.2.4. Çözümün elde edilmesi

Analizin çözümünü yapabilmek için öncelikle analiz tipinin ve denklem çözücü tipinin belirlenmesi gerekmektedir. Öncelikle analiz tipini belirlemek için “Main Menu → Solution → Analysis Type → New Analysis” yolu takip edilerek ekrana gelen diyalog kutusundan “Static” seçilmelidir.

Ansysis'te aşağıdaki denklem çözücüler mevcuttur.

- Sparse çözücü
- Frontal çözücü
- Jacobi Eşlenik Gradyanı (JCG) çözücü
- Tamamlanmamış Cholesky Eşlenik Gradyanı (ICCG) çözücü
- Ön şartlı Eşlenik Gradyanı (PCG) çözücü

Denklem çözücü tipini seçmek için “Main Menu → Solution → Analysis Type → Analysis Options” yolu kullanılmaktadır. Bu statik manyetik analizde Jacobi Eşlenik Gradyanı çözücü kullanılmıştır.

Artık çözüm opsiyonları belirlenip çözüme başlanabilecektir. Non-lineer bir analiz için çözüm iki aşamadan oluşmaktadır.

1. Her biri bir denge iterasyonuna sahip 3 ile 5 arasındaki alt adıma yükler yayılır.
2. Beş ile on arasında denge iterasyonuna sahip bir alt adımla çözüm hesaplanır.

Aşağıdaki yol izlenerek iki adımlı çözüm sırası belirlenebilmektedir.

Main Menu → Solution → Solve → Electromagnet → Static Analysis → Opt&Solv

5.2.5. Sonuçların gözden geçirilmesi

Ansysis, statik manyetik bir analiz için aşağıdaki sonuçları otomatik olarak verebilmektedir.

Birincil Veri:

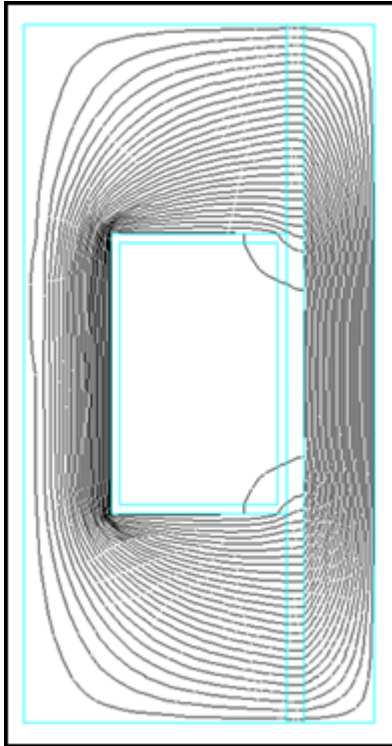
- Düşümsel manyetik serbestlik derecesi (Az, CURR)

Türetilmiş Veri:

- Düğümsel manyetik akı yoğunluğu (BX, BY, BSUM)
- Düğümsel manyetik alan yoğunluğu (HX, HY, HSUM)
- Düğümsel manyetik kuvvetler (F_{MAGX} , F_{MAGY} , F_{MAGSUM})
- Düğümsel tepki akımı segmentleri (CSGZ)
- Eleman kaynak akım yoğunluğu (JSZ)
- Birim hacimdeki ısı (Joule, JHEAT) vb.

Akı  izgileri

Akı çizgileri, manyetik vektör potansiyeli (A_z)  izgilerini göstermektedir. Bobin etrafında oluşan akı çizgilerini görmek için “Utility Menu → Plot → Results → Flux Lines” yolu izlenebilir. şekil 5.11’de akı çizgileri görülmektedir.



şekil 5. 11. Bobin etrafındaki akı çizgileri

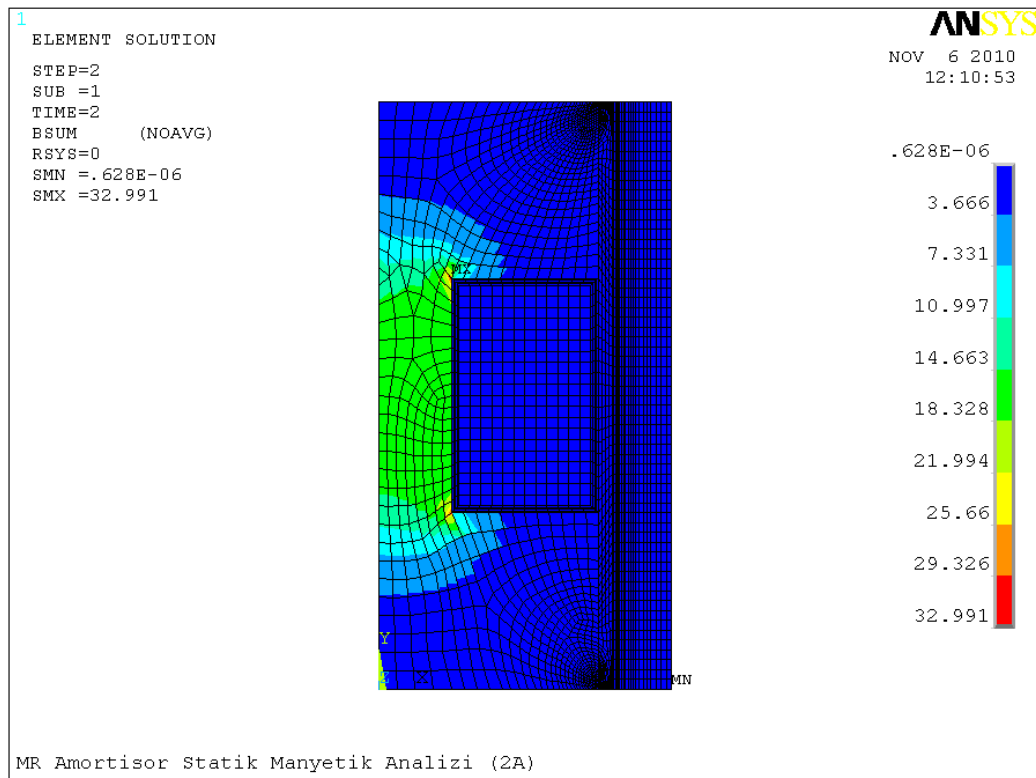
Eşyükselti eğri görüntüleri

Bu yöntem ile manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan yoğunluğu ve toplam akım yoğunluğu gibi sonuçlar çizdirilebilmektedir. Eleman ve düğüm noktası çözümleri olmak üzere iki farklı tipte sonuç göstermektedir.

Eleman çözümü

Bobin etrafındaki manyetik akı yoğunluğunu eleman çözümü ile elde etmek için aşağıdaki yol izlenmelidir. Şekil 5.12’de manyetik akı yoğunluğunun eleman çözümü görülmektedir.

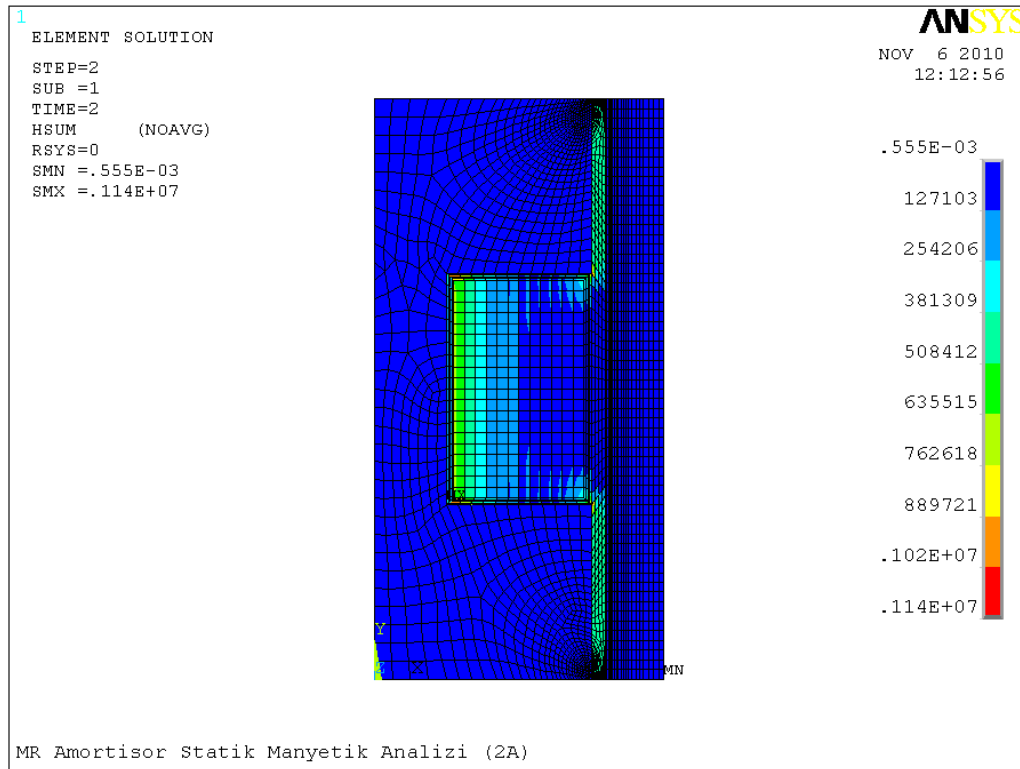
Main Menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Element Solution → Magnetic Flux Density → Magnetic Flux Density Vector Sum



Şekil 5. 12. Manyetik akı yoğunluğunun (B_{SUM}) eleman çözümü

Bobin etrafındaki manyetik alan yoğunluğunun eleman çözümünü elde etmek için aşağıdaki yol izlenmelidir. Şekil 5.13'te bobin etrafındaki manyetik alan yoğunluğunun eleman çözümü görülmektedir.

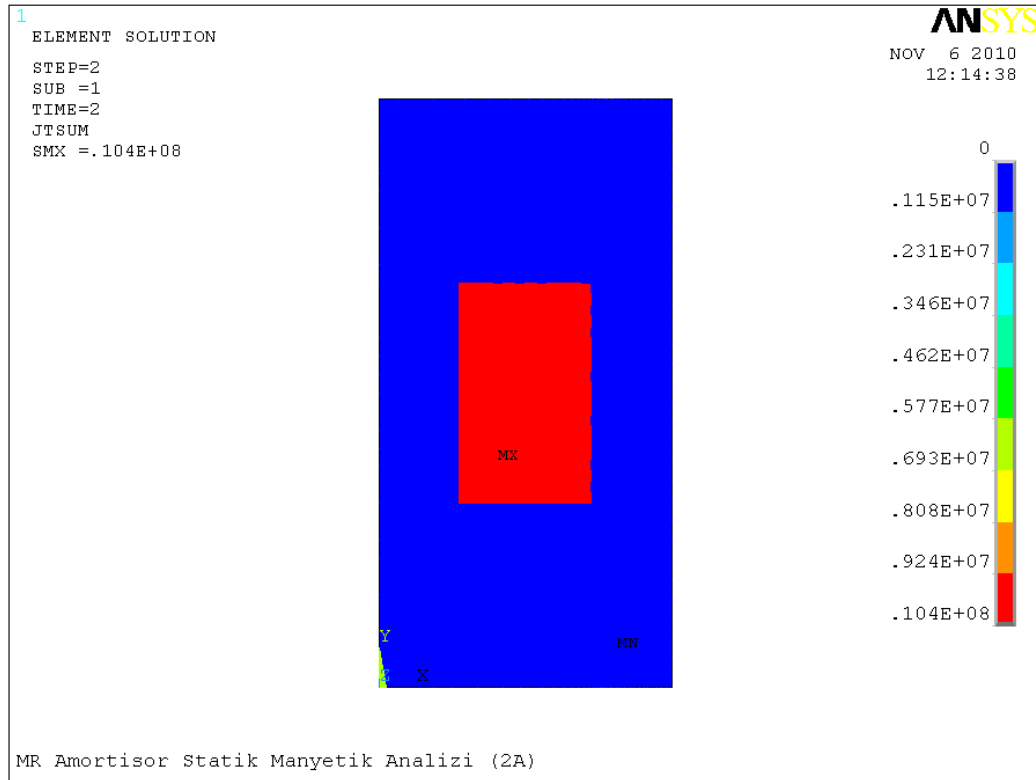
Main Menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Element Solution → Magnetic Field Intensity → Magnetic Field Intensity Vector Sum



Şekil 5. 13. Manyetik alan yoğunluğunun (H_{SUM}) eleman çözümü

Bobine uygulanmış olan akım yoğunluğunu eleman çözümü şeklinde görmek için aşağıdaki sıra izlenmelidir. Şekil 5.14'te bobindeki akım yoğunluğunun eleman çözümü gösterilmiştir.

Main Menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Element Solution → Current Density → Total Current Density Vector Sum

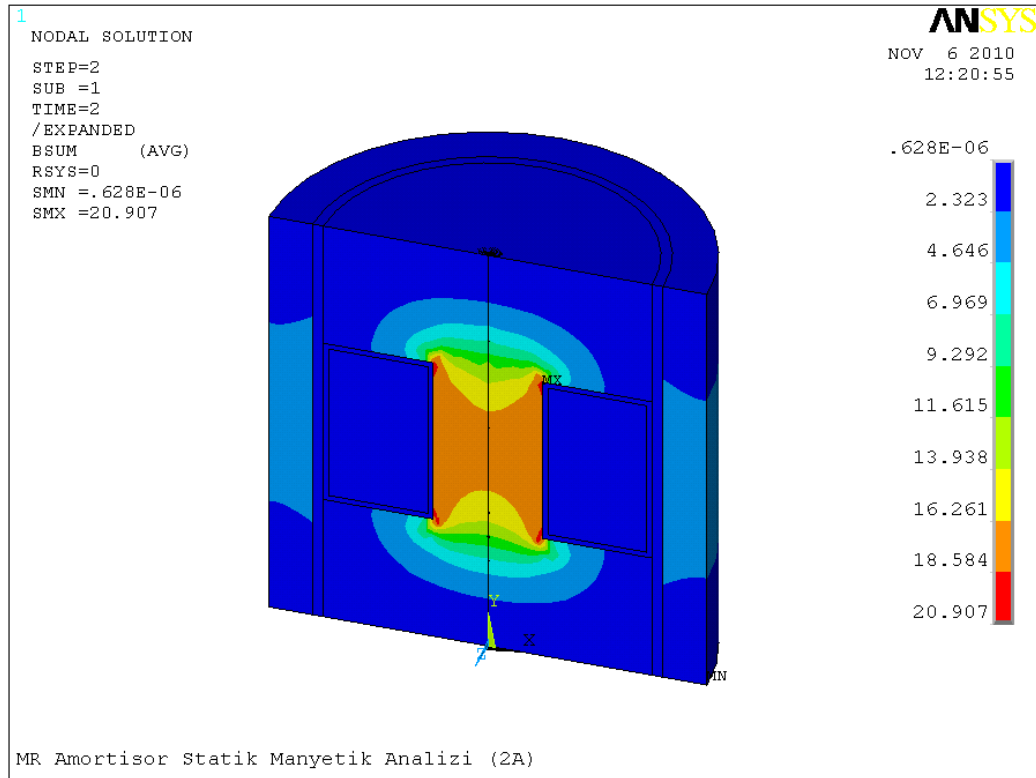


Şekil 5. 14. Bobindeki akım yoğunluğunun (J_{SUM}) eleman çözümü

Düğüm noktaları çözümü

Modelin hacimsel olarak sonuçlarını görmek için düğümsel çözüm kullanılmaktadır. Bu çözümde, elemanın her bir düğüm noktasındaki değeri kullanılmaktadır. Aşağıdaki yol takip edilerek düğüm noktaları çözümü ile manyetik akı yoğunluğu elde edilebilmektedir. Şekil 5.15'te manyetik akı yoğunluğunun (B_{SUM}) düğüm noktaları çözümü görülmektedir.

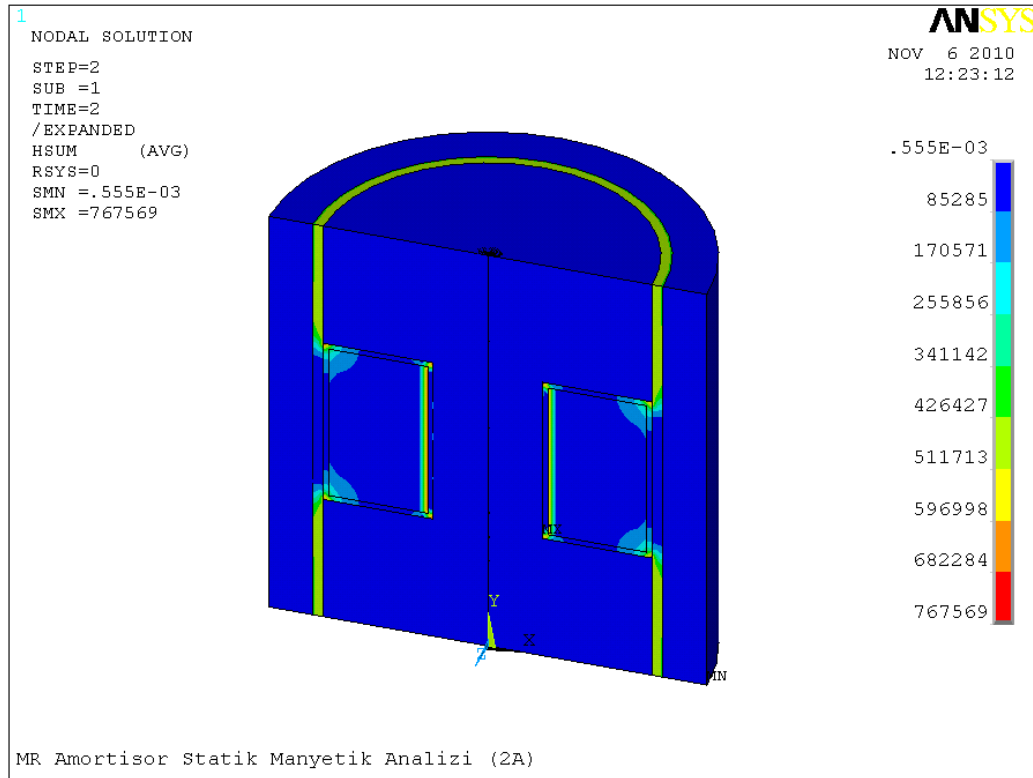
Main Menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal Solution
→ Magnetic Flux Density → Magnetic Flux Density Vector Sum



Şekil 5. 15. Manyetik akı yoğunluğunun (B_{SUM}) düğüm noktaları çözümü

Manyetik alan yoğunluğunun düğüm noktaları çözümünü elde etmek için aşağıdaki yol izlenmelidir. Şekil 5.16'da manyetik alan yoğunluğunun düğüm noktaları çözümü görülmektedir.

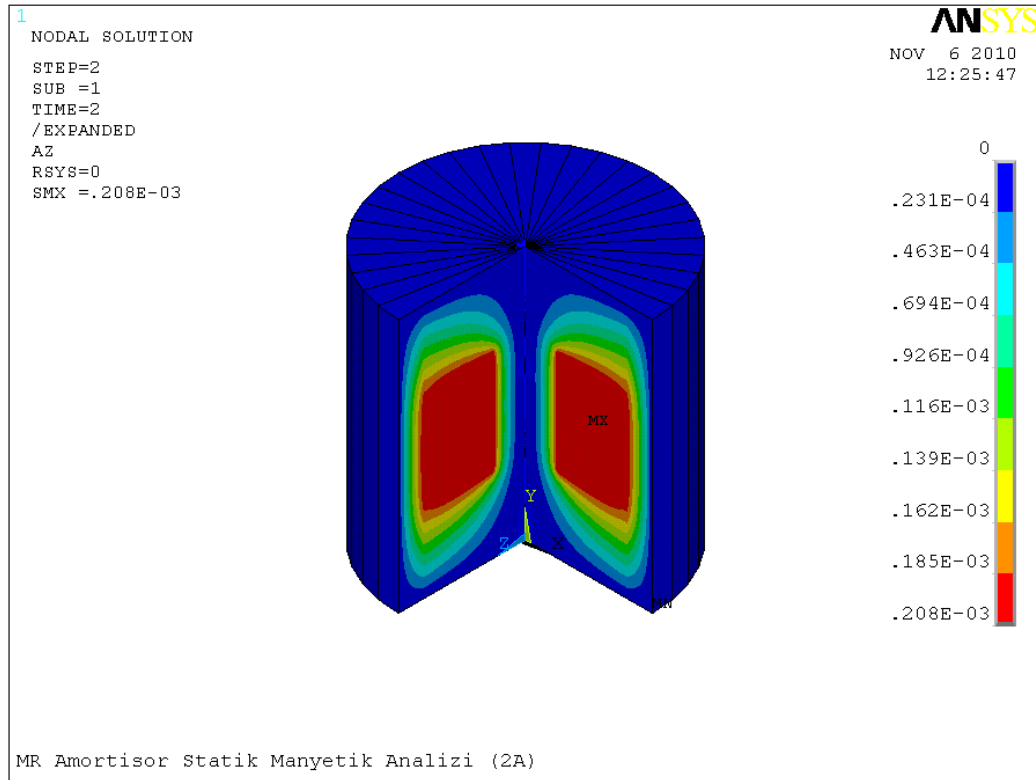
Main Menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal Solution → Magnetic Field Intensity → Magnetic Field Intensity Vector Sum



Şekil 5. 16. Manyetik alan yoğunluğunun (H_{SUM}) düğüm noktaları çözümü

Manyetik vektör potansiyeli (A_z), manyetik akı çizgilerinin eşyükselti eğri gösterimidir. Şekil 5.17’de manyetik vektör potansiyelinin düğümsel çözümü gösterilmiştir. Manyetik vektör potansiyelini elde etmek için aşağıdaki sıra takip edilmelidir.

Main Menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal Solution
→ DOF Solution → Z-Component of Magnetic Vector Potential



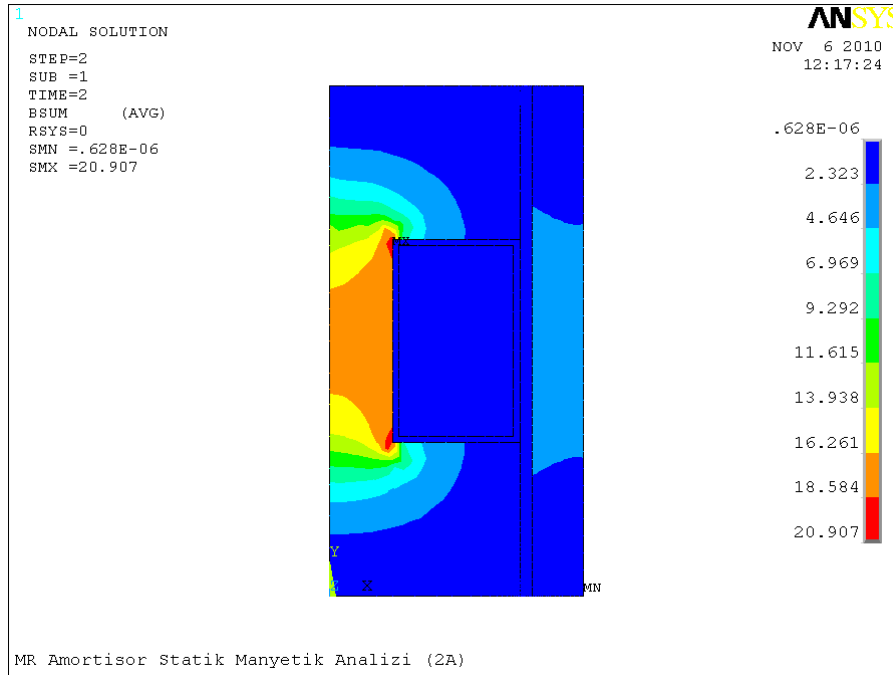
Şekil 5. 17. Manyetik vektör potansiyelinin (Az) düğümsel çözümü

6. MR SIVILI AMORTİSÖRÜN SONLU ELEMAN ANALİZİ SONUÇLARI

Sonlu elemanlar metodu ile tanımlanan MR amortisör modelinin manyetik analiz sonuçları bu bölümde verilecektir. Daha önceden Şekil 5.1’de gösterildiği gibi MR amortisör modeli; iç ve dış amortisör pistonu, amortisör silindiri, MR sıvı boşluğu, bobin koruyucu astarı (Modelde hava boşluğu olarak kabul edilmiştir.) ve bobin olmak üzere altı farklı alandan oluşmaktadır. Modelde MR amortisör bobinine 0-2A arasında akımlar uygulanmıştır. Bu çalışmada, şekil ile gösterilen tüm sonuçlar 1mm’lik MR sıvı boşluğuna sahip modelin bobinine 2A akım uygulandığı durumdaki sonuçlardır. MR sıvı boşluğu 0,5mm, 0,75mm ve 1,25mm olan modellere ait görsel sonuçlar ekler kısmında verilmiştir.

6.1. Manyetik Akı Yoğunluğu (B_{SUM})

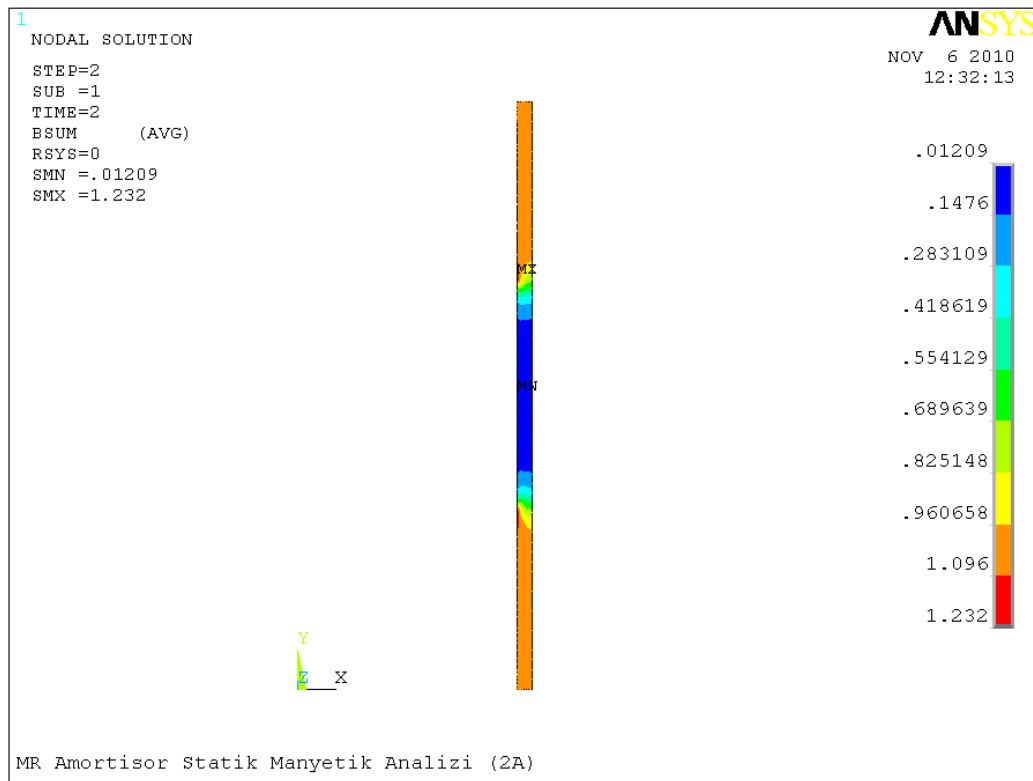
Bobine uygulanan akımın artırılmasıyla MR amortisör modelinin manyetik akı yoğunluğu artmaktadır. Şekil 6.1’de modelin manyetik akı yoğunluğu gösterilmiştir.



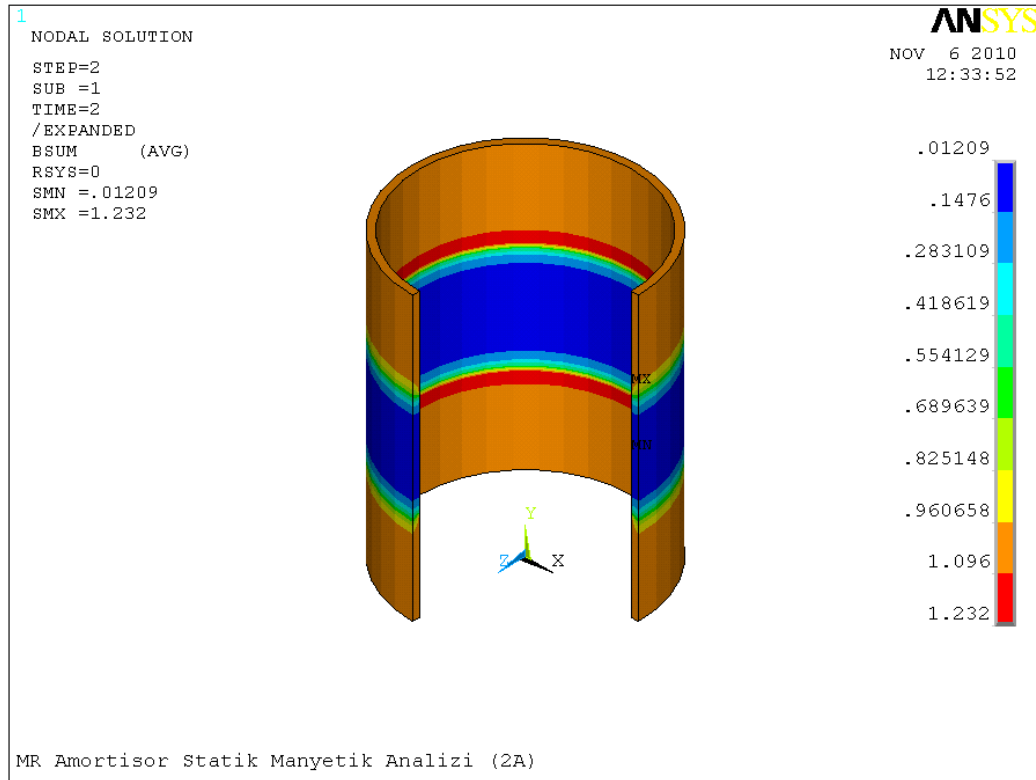
Şekil 6. 1. MR amortisör modelinin manyetik akı yoğunluğu (2 Amper)

Her dört modelde de MR sıvı boşluğu mesafesi dışındaki tüm amortisör boyutları ve bobin sarım sayısı sabit kalmış, sadece bobine uygulanan akım 0-2A arasında değiştirilmiştir.

MR sıvı boşluğunda manyetik doyumun gerçekleşip gerçekleşmediği önemlidir. Akım artmaya devam ederken, manyetik akı yoğunluğu da artmaya devam etmelidir. Oysaki manyetik doyum gerçekleştiğinde akım artsa da manyetik akı yoğunluğu artmayacaktır. Bu nedenle, daha fazla sönümleme kuvveti elde edip edemeyeceğimiz manyetik doyuma bağlıdır. Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te MR sıvı boşluğundaki manyetik akı yoğunluğu gösterilmiştir.



Şekil 6. 2. MR sıvı boşluğundaki manyetik akı yoğunluğu (2 Amper)



Şekil 6. 3. MR sıvı boşluğundaki manyetik akı yoğunluğu (3-D)

MR sıvıdaki manyetik doyumun 1T değerinde gerçekleştiği kabul edilmiştir. Şekil 5.7'deki MR sıvının B-H eğrisi incelendiğinde yaklaşık 1T değerinden sonra manyetik akı yoğunluğu değerindeki artış miktarı oldukça azalmıştır.

Çizelge 6.1'de her dört model için, bobine uygulanan farklı akım değerlerinde MR sıvıda oluşan manyetik akı yoğunluğunun maksimum ve ortalama değerleri verilmiştir. Manyetik akı yoğunluğunun ortalama değerleri Eş. 6.1'e göre hesaplanmıştır.

$$B_{ort} = \frac{B_{max} + B_{min}}{2} \quad (6.1)$$

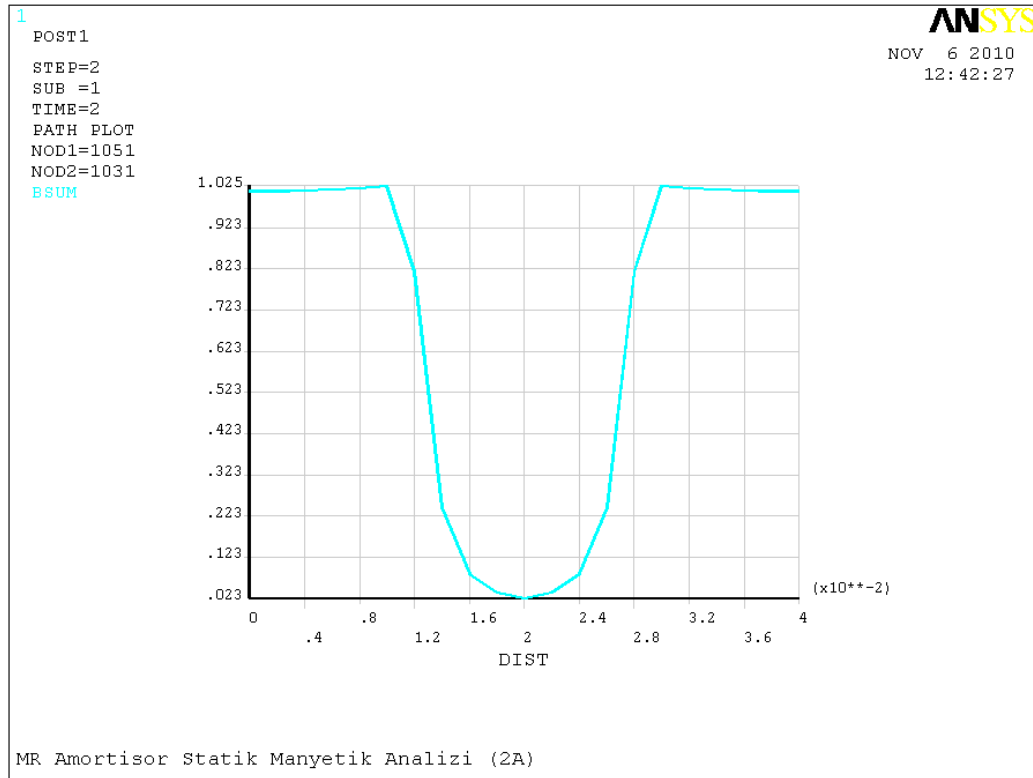
B_{max} değeri küçük bir bölgedeki maksimum manyetik akı yoğunluğunu ifade ettiğinden dolayı MR sıvıdaki manyetik doyumu B_{ort} değerlerine göre değerlendirmek daha anlamlı olacaktır. B_{ort} değeri aktif kutup bölgelerindeki MR sıvının manyetik akı yoğunluğu değerlerinin ortalamasıdır.

Model 1’de MR sıvı boşluğundaki manyetik doyum ortalama değerlere göre 1,2A akım değerinde gerçekleşirken, model 2’de 1,6A akım değerinde gerçekleşmiştir. Model 3’te doyum 2A değerinde meydana gelmiştir. Model 4’te ise 0-2A aralığında doyum gerçekleşmemiştir. Bu da 0-2A aralığında manyetik akı yoğunluğundan maksimum düzeyde faydalanamayacağımız anlamına gelmektedir. Görüldüğü üzere MR sıvı boşluğu mesafesi arttıkça manyetik doyum daha yüksek akım değerlerinde meydana gelmektedir. Model 3 en avantajlı ve uygun görünen modeldir.

Çizelge 6. 1. Farklı akım değerlerinde MR sıvı boşluğunda oluşan manyetik akı yoğunluğu değerleri

Bobin Akımı, I (A)	Model 1 (h=0,5mm)		Model 2 (h=0,75mm)		Model 3 (h=1mm)		Model 4 (h=1,25mm)	
	B _{max} (Tesla)	B _{ort} (Tesla)	B _{max} (Tesla)	B _{ort} (Tesla)	B _{max} (Tesla)	B _{ort} (Tesla)	B _{max} (Tesla)	B _{ort} (Tesla)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,2	0,27	0,23	0,23	0,19	0,21	0,17	0,28	0,14
0,4	0,49	0,43	0,42	0,35	0,38	0,31	0,49	0,25
0,6	0,67	0,63	0,57	0,50	0,52	0,44	0,67	0,37
0,8	0,83	0,78	0,70	0,65	0,64	0,54	0,81	0,49
1,0	0,97	0,92	0,81	0,76	0,75	0,63	0,94	0,58
1,2	1,10	1,04	0,93	0,85	0,85	0,71	1,05	0,65
1,4	1,23	1,16	1,04	0,92	0,95	0,79	1,16	0,71
1,6	1,35	1,28	1,15	1,02	1,05	0,87	1,27	0,78
1,8	1,48	1,40	1,25	1,10	1,14	0,95	1,37	0,84
2,0	1,60	1,51	1,35	1,20	1,23	1,03	1,47	0,90

MR sıvı boşluğunda oluşan manyetik akı yoğunluğu değerlerine bakıldığında her dört model için, maksimum değerlerin (B_{max}) aktif kutup bölgelerinin bobine en yakın olan kısımlarında olduğu görülmektedir. Bobinden uzaklaştıkça manyetik akı yoğunluğu değerleri düşmektedir. En küçük değerlerin (B_{min}) ise aktif iki kutup arasındaki aktif olmayan bölgenin tam ortasında olduğu görülmektedir. Şekil 6.4’te MR sıvı boşluğu boyunca oluşan manyetik akı yoğunluğunun değişimi grafik olarak verilmiştir.



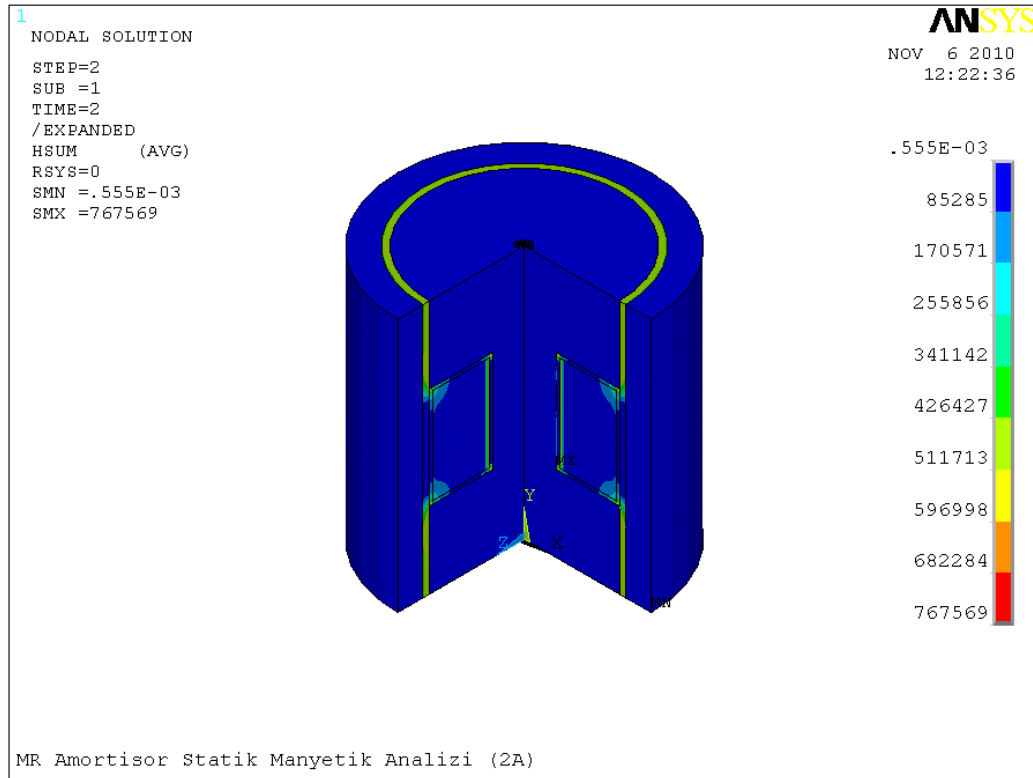
Şekil 6. 4. MR sıvı boşluğu boyunca oluşan manyetik akı yoğunluğu

6.2. Manyetik Alan (H_{SUM})

Daha önce verilmiş olan Eş. 5.3'ten de anlaşılacağı üzere manyetik alan, MR amortisör modelinde kullanılan malzemelerin manyetik geçirgenliği ve manyetik akı yoğunluğu ile ilişkilidir. Eş. 5.3 hatırlanacak olursa;

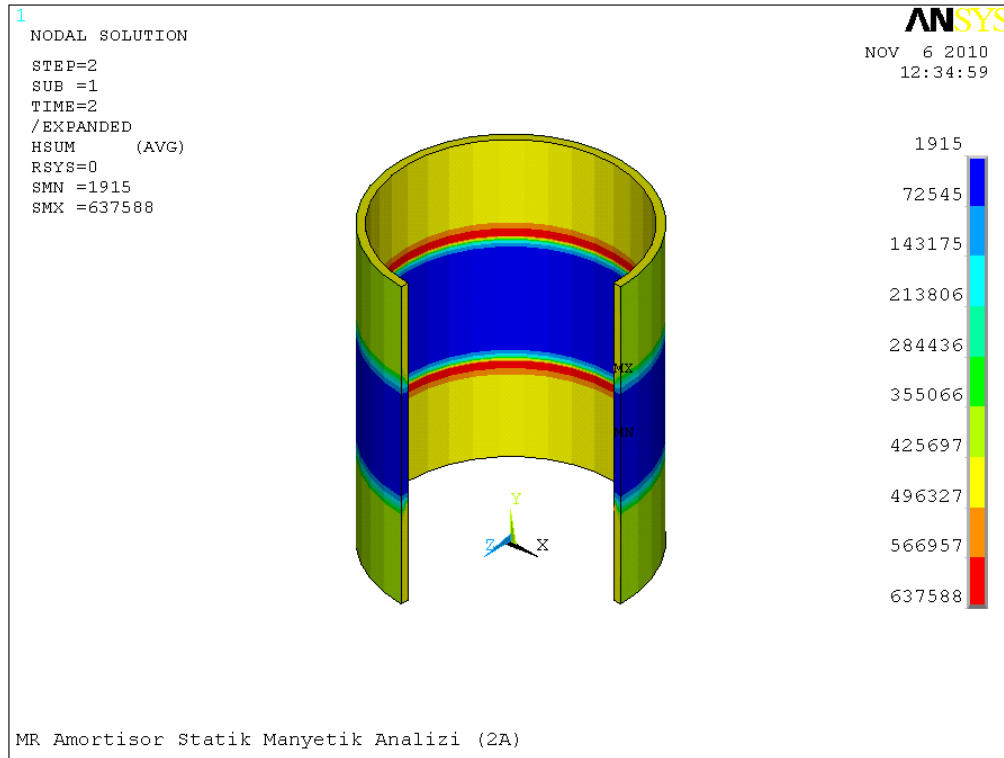
$$B=\mu H$$

şeklinde verilmişti. Manyetik geçirgenlikleri yüksek olan malzemelerin kullanımıyla elde edilen manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan daha büyük olacaktır. Şekil 6.5'te modeldeki manyetik alan yoğunluğu görülmektedir.

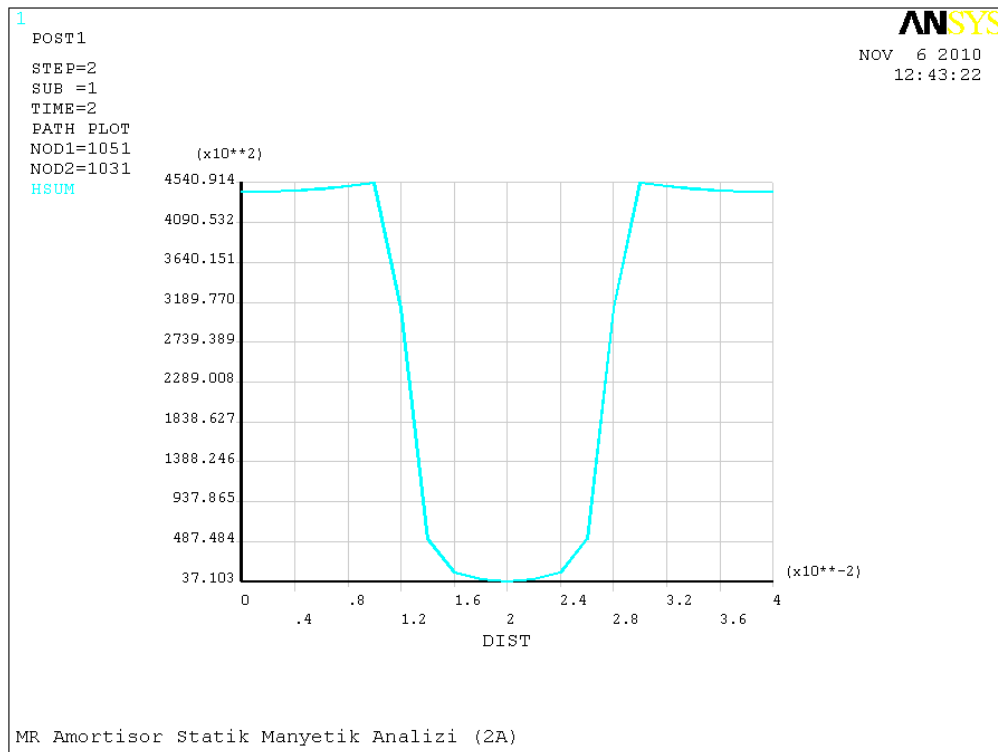


Şekil 6. 5. MR amortisör modelinin manyetik alan yoğunluğu (2 Amper)

MR sıvı boşluğundaki manyetik alan, bobinden uzaklaştıkça azalmaktadır. Şekil 6.6'da MR sıvı boşluğundaki manyetik alan yoğunluğu görülmektedir. Şekil 6.7'de ise manyetik alan yoğunluğu grafik olarak gösterilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere en yüksek manyetik alan 10mm ve 30mm'lik mesafeler civarında meydana gelmiştir. Bu kısımlar aktif kutup bölgelerinin bobine en yakın olan kısımlarıdır. Manyetik alanın en düşük olduğu nokta ise 20mm mesafesidir. Yani iki aktif kutup bölgesinin arasındaki kısmın tam orta noktasıdır.



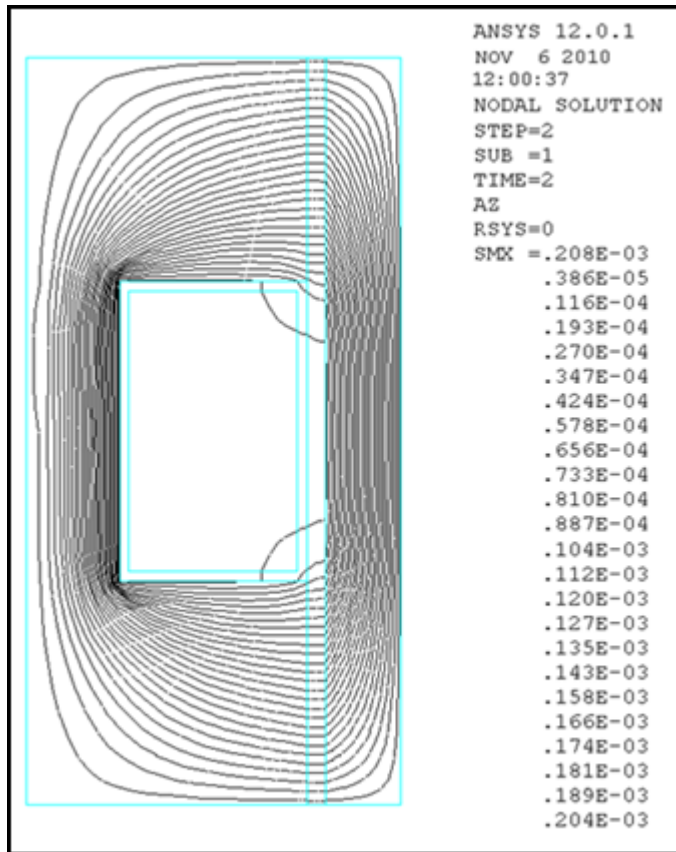
Şekil 6. 6. MR sıvı boşluğundaki manyetik alan yoğunluğu (2 Amper)



Şekil 6. 7. MR sıvı boşluğu boyunca oluşan manyetik alan yoğunluğu

6.3. Manyetik Akı Çizgileri

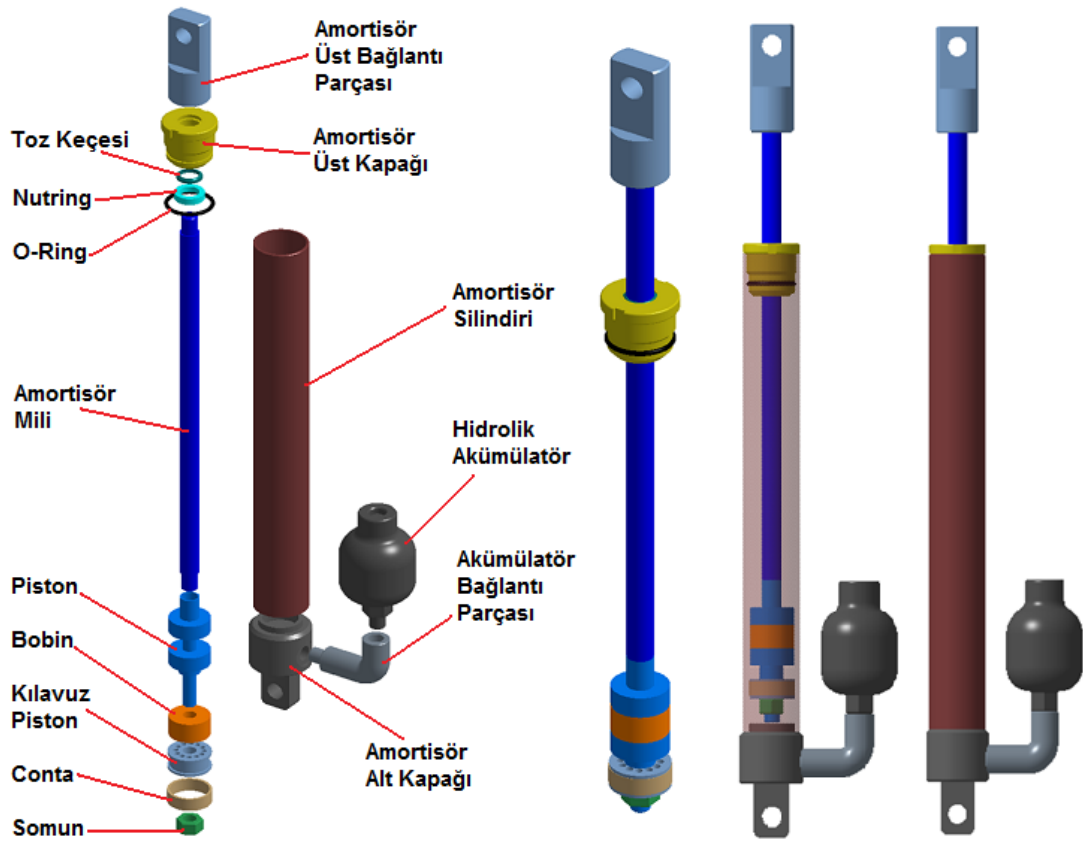
Modelde sınır şartı “Paralel Akı” olarak belirlendiğinden dolayı, manyetik akı çizgileri Şekil 6.8’de görüldüğü gibi yüzeye paralel akmaktadır. Manyetik akı çizgilerinin MR sıvı boşluğundan geçişine dikkat edildiğinde sapmaların ve bu alanda yoğunlaşmanın olduğu görülmektedir. Bu olay, MR sıvının etkisini açık olarak göstermektedir. Ancak, manyetik akı çizgilerinin bu yoğunluğu, MR sıvının manyetik doyuma ulaşmasından sonra daha fazla artmayacaktır.



Şekil 6. 8. Bobin etrafındaki manyetik akı çizgileri

7. TASARLANAN MR AMORTİSÖRÜN İMALATI

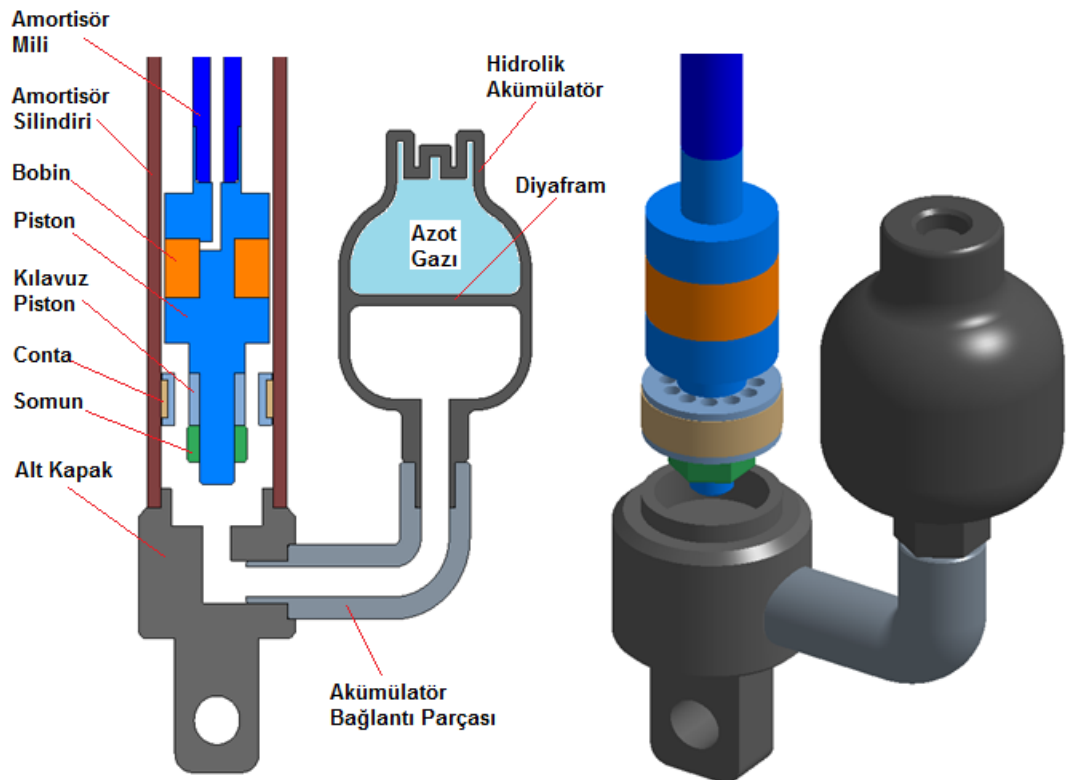
Yapılan statik manyetik analizler sonucunda, en iyi sonuçlar model 3'te elde edilmiştir. Model 3'te MR sıvı boşluğundaki manyetik doyum 2A akım değerinde gerçekleşmiştir. Amortisör pistonunun aktif kutup bölgelerinde istenen manyetik alan ve manyetik akı yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Şekil 7.1'de imal edilmesi planlanan MR amortisörün Catia programında çizilmiş katı modeli verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere MR amortisör 15 parçadan meydana gelmektedir.



Şekil 7. 1. İmalatı planlanan MR amortisör katı modeli

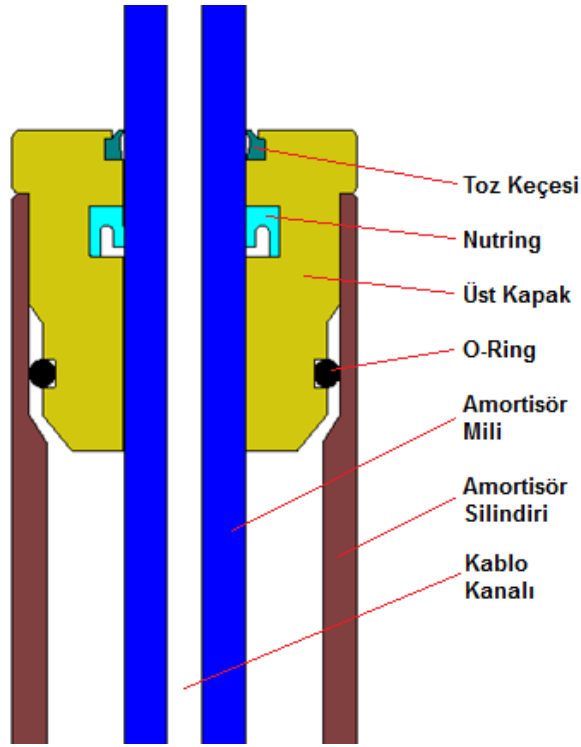
MR sıvı boşluğu mesafesi (h), yapılan statik manyetik analizler neticesinde model 3 seçildiğinden dolayı 1mm olarak tasarlanmıştır. MR amortisör pistonu, manyetik geçirgenliği yüksek olan düşük karbonlu çelikten imal edilmiştir. Kılavuz pistonun malzemesi ise manyetik alandan etkilenmemesi için alüminyum olarak seçilmiştir. Manyetik alanı oluşturacak olan bobin 702 adet sarımdan oluşmaktadır. Bobinde

kullanılan emayeli bakır tel çapı 0,4mm'dir. Bobin direnci $3,3\Omega$ 'dur. Amortisör pistonu üzerinde herhangi bir sızdırmazlık ve sürtünme elemanı bulunmamaktadır. Pistonun amortisör silindiri içersinde merkezlenmesi kılavuz piston kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sürtünme elemanı olan conta da kılavuz piston üzerine yerleştirilmiştir. Ayrıca, kılavuz piston üzerine 30° açıyla 12 adet 4mm çapında delik açılarak MR sıvı geçişine izin verilmiştir. Böylece, asıl direnç kuvveti 1mm'lik MR sıvı kanalında oluşmaktadır. Amortisörün sıkışma hareketi esnasında, amortisör milinin amortisör silindiri içersine girmesinden dolayı oluşan hacim küçülmesini tolere etmek amacıyla 0,05lt'lik diyaframlı tip hidrolik akümülatör kullanılmıştır. Hidrolik akümülatörde kuru azot gazı kullanılmaktadır. Hidrolik akümülatörün ön basınç değeri 10bar'dır. Şekil 7.2'de MR amortisörün alt kısmında yer alan elemanlar görülmektedir. Tasarlanan MR amortisörün imalat ve detay resimleri ekler kısmında verilmiştir. Hazır parçaların (toz keçesi, nutring, o-ring, hidrolik akümülatör, akümülatör bağlantı parçası ve somun) detay resimleri verilmemiştir.



Şekil 7. 2. MR amortisörün alt kısmı

Amortisör silindiri olarak, St52 standardında 32/40mm’lik içi honlanmış çelik boru kullanılmıştır. Amortisör alt kapağı amortisör silindirine kaynak ile birleştirilirken üst kapak ise vida ile birleştirilmiştir. Amortisör üst kapağında statik sızdırmazlık elemanı olarak o-ring, dinamik sızdırmazlık elemanı olarak ise nutring ve toz keçesi yer almaktadır. Amortisör mili olarak 14mm çapında sertleştirilmiş krom kaplı mil kullanılmıştır. Amortisör miline, merkezinden boydan boya olacak şekilde 4mm’lik bir delik açılarak bobini besleyen elektrik kablolarının geçişine izin verilmiştir. Şekil 7.3’te MR amortisörün üst kısmında yer alan elemanlar görülmektedir.



Şekil 7. 3. MR amortisörün üst kısmı

İmalatı yapılan ve hazır olarak temin edilen tüm bu parçaların montajı ile MR amortisör prototipi üretilmiştir. Resim 7.1’de imalatı yapılan MR amortisör prototipi görülmektedir. MR amortisör prototipi 180mm strok değerine sahiptir.



Resim 7. 1. MR amortisör prototipi

8. MR SIVI SENTEZİ

Bu çalışmada, tasarlanıp üretilen MR sıvılı amortisör prototipinde kullanılmak üzere manyetoreolojik sıvılar sentezlenmiştir. MR sıvı sentezinde manyetik malzeme olarak toz haldeki demir tanecikleri kullanılmıştır. Taşıyıcı faz olarak silikon yağı ve katkı maddesi olarak ise silika dumanı tercih edilmiştir. Taşıyıcı sıvının seçiminde kaynama noktası, buhar basıncı, çalışma sıcaklığı ve donma noktası önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle silikon yağı tercih edilmiştir. Kullanılan tüm kimyasal malzemeler Sigma-Aldrich firmasından sağlanmıştır.

MR sıvı sentezinde manyetik parçacık olarak kullanılan karbonil demir tanecikleri demir penta karbonilden ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) ayrıştırılmış demir tozlarıdır. Çizelge 8.1’de demir taneciklerinin özellikleri görülmektedir.

Çizelge 8. 1. MR sıvı sentezinde kullanılan manyetik taneciklerin özellikleri

Tanecik Adı	Tanecik Boyutu (μm)	Demir İçeriği (m/m, %)	Yoğunluğu (kg/m^3)
Manyetit, Fe_3O_4	<5	98	5170
Karbonil demir, Fe	4,5-5,2	≥ 97	7860

Sentez işleminde kullanılan silikon yağının yoğunluğu 1000kg/m^3 , viskozitesi 10mPa.s (25°C) ve rengi şeffaftır. Silika dumanının yoğunluğu $35,24\text{kg/m}^3$, tanecik boyutu $0,007\mu\text{m}$ ve rengi beyazdır. Tüm bu kimyasal malzemeler kütleli (m/m, %) olarak çeşitli oranlarda kullanılarak beş farklı MR sıvı sentezlenmiştir. Sentezlenen MR sıvılar Çizelge 8.2’de görüldüğü gibi çeşitli kodlarla isimlendirilmiştir.

MR sıvılar hazırlanırken, belirli kütleli oranlara göre malzemeler hassas terazi ile tartılarak miktarlar belirlenmiştir. Malzemelerin tartılması 25°C ortam sıcaklığında yapılmıştır. Malzemeler yine aynı ortamda önce elle karıştırılmış sonra Resim 8.1’de görülen karıştırıcı uç kullanılarak, 2 saat süreyle homojen bir karışım elde edinceye kadar bir karıştırıcı vasıtasıyla 620 1/dk ’da karıştırılmıştır.

Çizelge 8. 2. Sentezlenen MR sıvılar

MR Sıvı Kodu	Tanecik Tipi	Tanecik Oranı (m/m, %)	Silikon Yağı Oranı (m/m, %)	Silika Oranı (m/m, %)
MRF-1	Manyetit	25	75	-
MRF-2	Karbonil demir	25	75	-
MRF-3	Karbonil demir	25	74	1
MRF-4	Manyetit	40	60	-
MRF-5	Karbonil demir	40	58	2



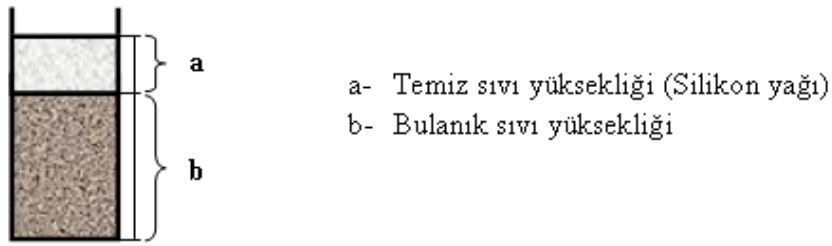
Resim 8. 1. Karıştırıcı uç

8.1. Çökelme Kararlılığı

Hazırlanan MR sıvılar silindirik cam tüplere (uzunluk 250mm, çap 30mm) doldurularak çökelme kararlılıklarına bakılmıştır. Burada kullanılan ölçüm tüplerinin taban kısımları düzdür. MR sıvı numuneleri 25°C sıcaklıkta 5 gün bekletilmiştir. Ölçüm işlemleri her bir MR sıvı numunesi için üç kez tekrarlanmıştır.

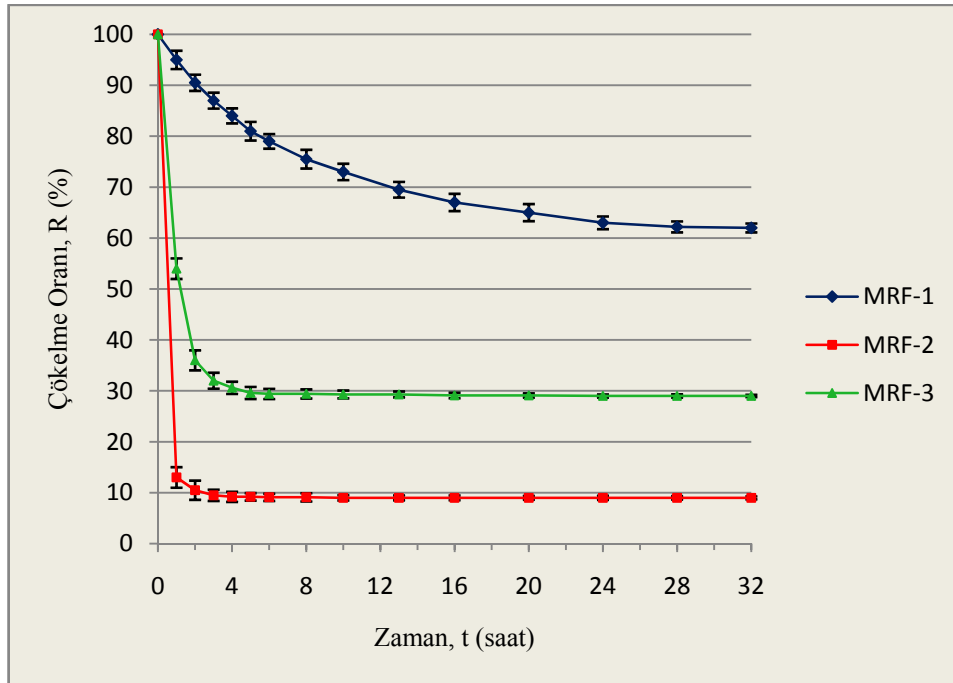
MR sıvıların çökelme oranları (R, %) Eş. 8.1'den yararlanılarak hesaplanmıştır. Bir süspansiyonda meydana gelen çökelme şematik olarak Şekil 8.1'de gösterilmiştir.

$$R = \frac{b}{(a+b)} \times 100 \quad (8.1)$$

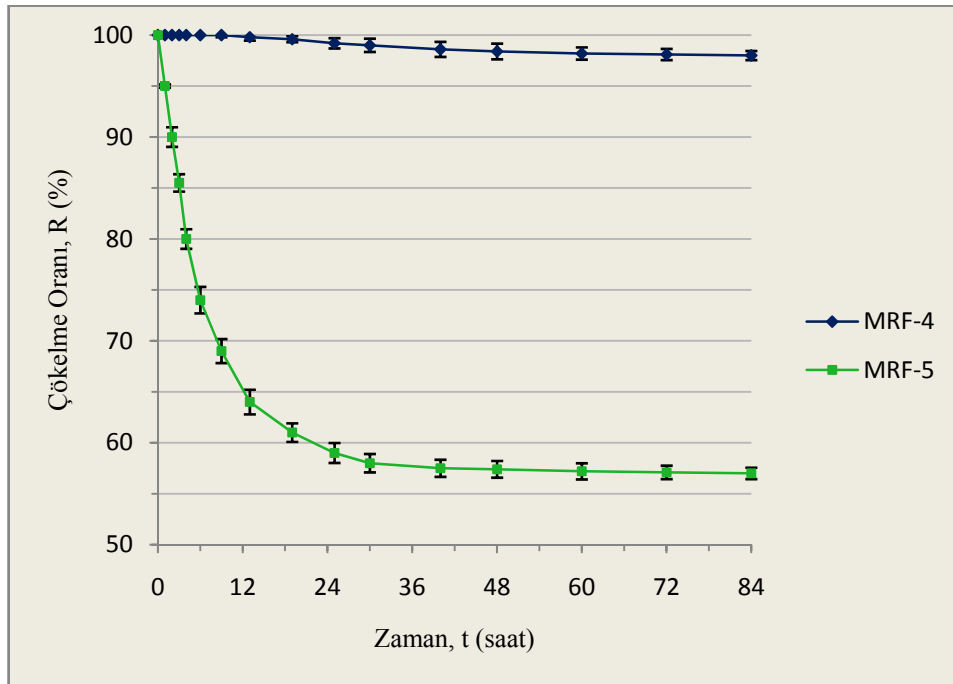


Şekil 8. 1. Bir süspansiyonda meydana gelen çökelmenin şematik gösterimi

Hazırlanan MR sıvıların zamana bağlı çökelme oranları Şekil 8.2 ve Şekil 8.3'teki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 8. 2. %25 demir içerikli MR sıvıların çökelme oranları

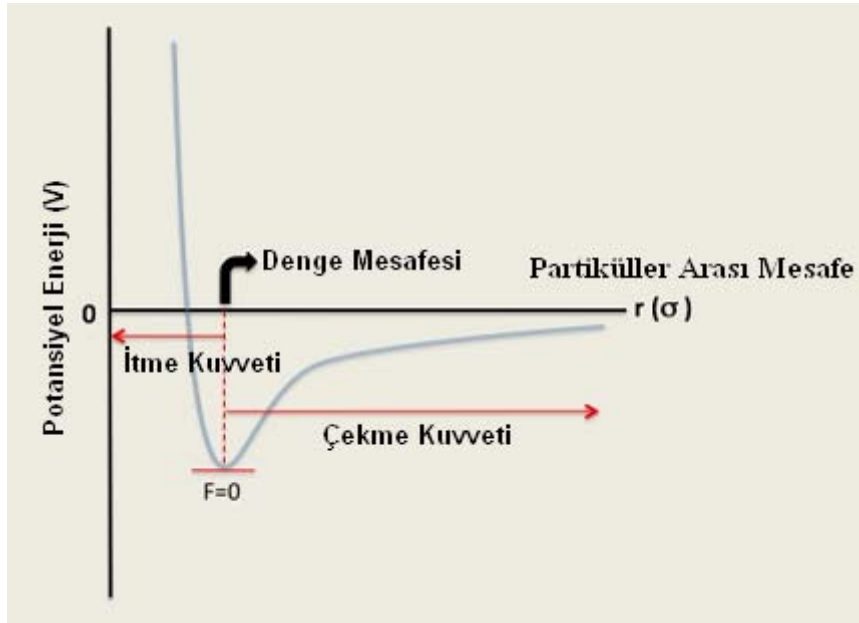


Şekil 8.3. %40 demir içerikli MR sıvılarının çökelme oranları

Şekil 8.2'deki grafikte %25 demir içerikli MR sıvılarının çökelme oranları verilmiştir. Görüldüğü gibi %25 manyetit içeren MRF-1, %25 derişime sahip sıvılar içersinde en iyi çökelme kararlılığına sahiptir. MRF-2 ve MRF-3 derişim olarak aynı oranda karbonil demir içerseler de, MRF-3 içersine katkı maddesi olarak eklenen %1 silika dumanı MRF-3'ün çökelme kararlılığını MRF-2'ye göre büyük oranda arttırmıştır.

Şekil 8.3'teki grafikte ise %40 demir içerikli MR sıvılarının çökelme oranları verilmiştir. MRF-4 çok iyi bir çökelme kararlılığına sahiptir. MRF-1 ile karşılaştırıldığında çökelme kararlılığının daha fazla olduğu görülmektedir. Benzer ilişki MRF-3 ile MRF-5 arasında da vardır. MRF-5'in çökelme kararlılığı MRF-3'e göre daha yüksektir. MR sıvılar içersindeki demir tozu derişiminin artması çökelme kararlılıklarını arttırmıştır. Bunun sebebi, Şekil 8.4'te görülen Lennard-Jones enerji potansiyeli diyagramıyla açıklanabilir [46]. Demir tozu derişiminin artmasıyla demir partikülleri arasındaki mesafe kısalmıştır. Bu mesafenin kısılmasıyla demir partikülleri arasındaki çekme kuvvetleri zayıflayarak yerini itme kuvvetlerine bırakmıştır. Bu söz konusu mesafe azalmaya devam ettikçe itme kuvvetleri hızla artacaktır. Bu da, sıvı içersindeki demir partiküllerini birbirinden uzak tutarak daha

iyi bir dağılım ve dolayısıyla da daha iyi bir çökelme kararlılığı sağlayacaktır. Tanecik tipleri yönünden bakıldığında ise, aynı derişime sahip iki farklı tanecik tipinin kullanıldığı MRF-1 ve MRF-2 arasında çökelme kararlılığı açısından çok büyük bir fark oluşmuştur. Bunun sebebi ise karbonil demirin yoğunluğunun manyetite göre daha fazla oluşudur.



Şekil 8. 4. Lennard-Jones enerji potansiyeli diyagramı

8.2. Yoğunluk Ölçümleri

MR sıvı numunelerinin yoğunlukları, kütle ve hacimleri belirlenerek hesaplanmıştır. Bu amaçla, 50cm³ sabit ve kalibreli bir hacme sahip piknometre kullanılmıştır. Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan piknometre Resim 8.2’de görülmektedir. Yoğunluk ölçümleri 25°C sıcaklıktaki ortamda yapılmıştır. Piknometre önce boş olarak hassas terazi ile tartılmış ve tara kütlesi kaydedilmiştir. Daha sonra MR sıvı piknometreye ağzına kadar doldurularak taşıma kapağı üzerine kapatılmıştır. Taşan sıvılar dikkatlice temizlenerek MR sıvı dolu piknometre dolu halde tartılmıştır. Dolu haldeki kütleden tara kütlesi çıkartılarak MR sıvının gerçek kütlesi bulunmuştur.



Resim 8. 2. Piknometre

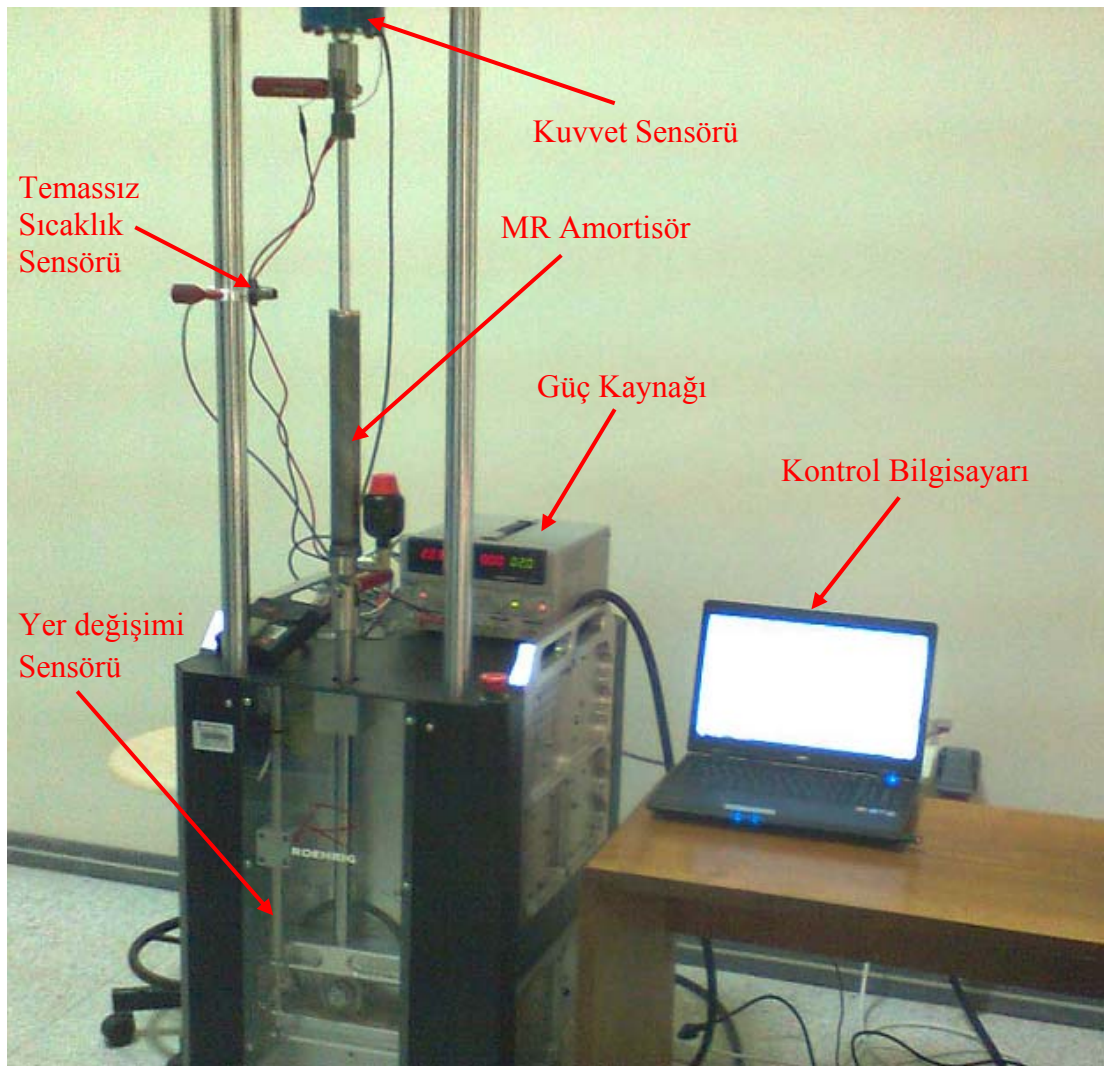
Yoğunluk formülü ($d=m/v$) kullanılarak MR sıvının kütlesi sabit 50cm^3 'lük hacme bölünerek MR sıvı numunelerinin yoğunlukları hesaplanmıştır. Çizelge 8.3'te MR sıvıların yoğunluk değerleri verilmiştir.

Çizelge 8. 3. MR sıvıların yoğunlukları

MR Sıvı	Yoğunluk (kg/m^3)
MRF-1	1180
MRF-2	1240
MRF-3	1230
MRF-4	1420
MRF-5	1510

9. MR AMORTİSÖRÜN PERFORMANS TESTLERİ VE SONUÇLARI

İmalatı yapılan MR amortisör prototipi performans testleri öncesinde kararlı çalışma şeklini alması için düşük hızlardan başlayarak yüksek hızlara doğru alıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu sayede birbirine sürtünerek çalışan parça ve yatakların uyumlu ve düzgün bir şekilde çalışması sağlanmıştır. Testler Resim 9.1’de görülen test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir.



Resim 9. 1. Test düzeneği

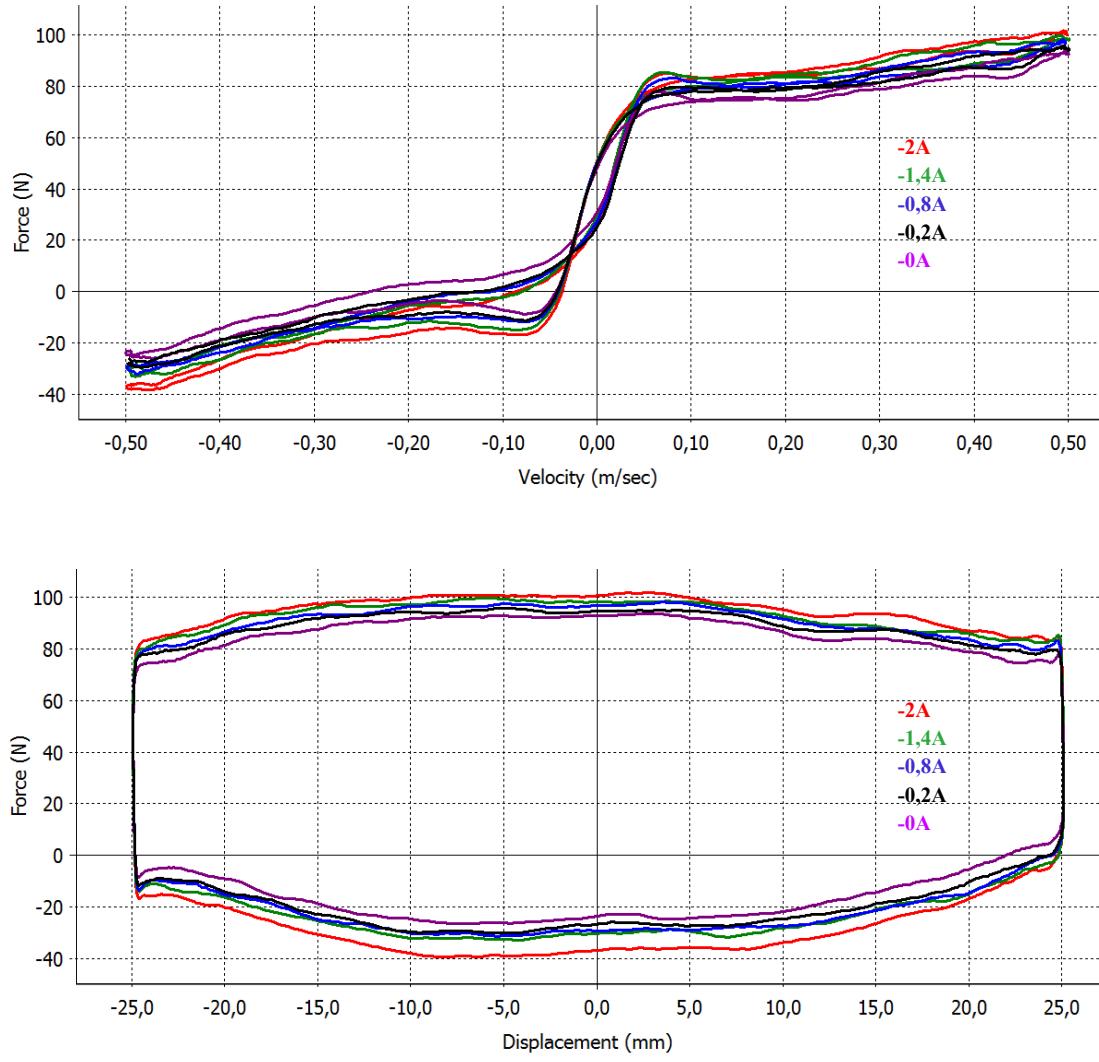
Testlerde $\pm 25\text{mm}$ genliğe sahip sinüs dalga şeklinde uyarı sinyali kullanılmıştır. Test ortamı sıcaklığı 20°C 'dir. Test işlemlerinde verilerin toplanmasından önce amortisör 10s süreyle $0,2\text{m/s}$ hızda çalıştırılarak sürekli durum şartları sağlanmıştır. Hazırlanan MR sıvılar MR amortisöre doldurularak test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde Çizelge 9.1'de görülen hız, akım ve giriş frekansı değerleri kullanılmıştır. Her bir amortisör piston hızı ve giriş frekansı değerinde 0-2A aralığında beş farklı akım değeri için performans testleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 9.2'de test parametreleri verilmiştir. Testler sonucunda her bir MR sıvı için MR amortisörün dinamik davranışını gösteren sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değişimi grafikleri elde edilmiştir. Şekil 9.1, 9.2, 9.3, 9.4 ve 9.5'te $0,5\text{m/s}$ hızda ve farklı akım değerleri için MR sıvılara ait sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Diğer hızlarda elde edilen grafikler ise ekler kısmında sunulmuştur.

Çizelge 9. 1. Amortisör testlerinde kullanılan hız, akım, uyarı frekansı değerleri

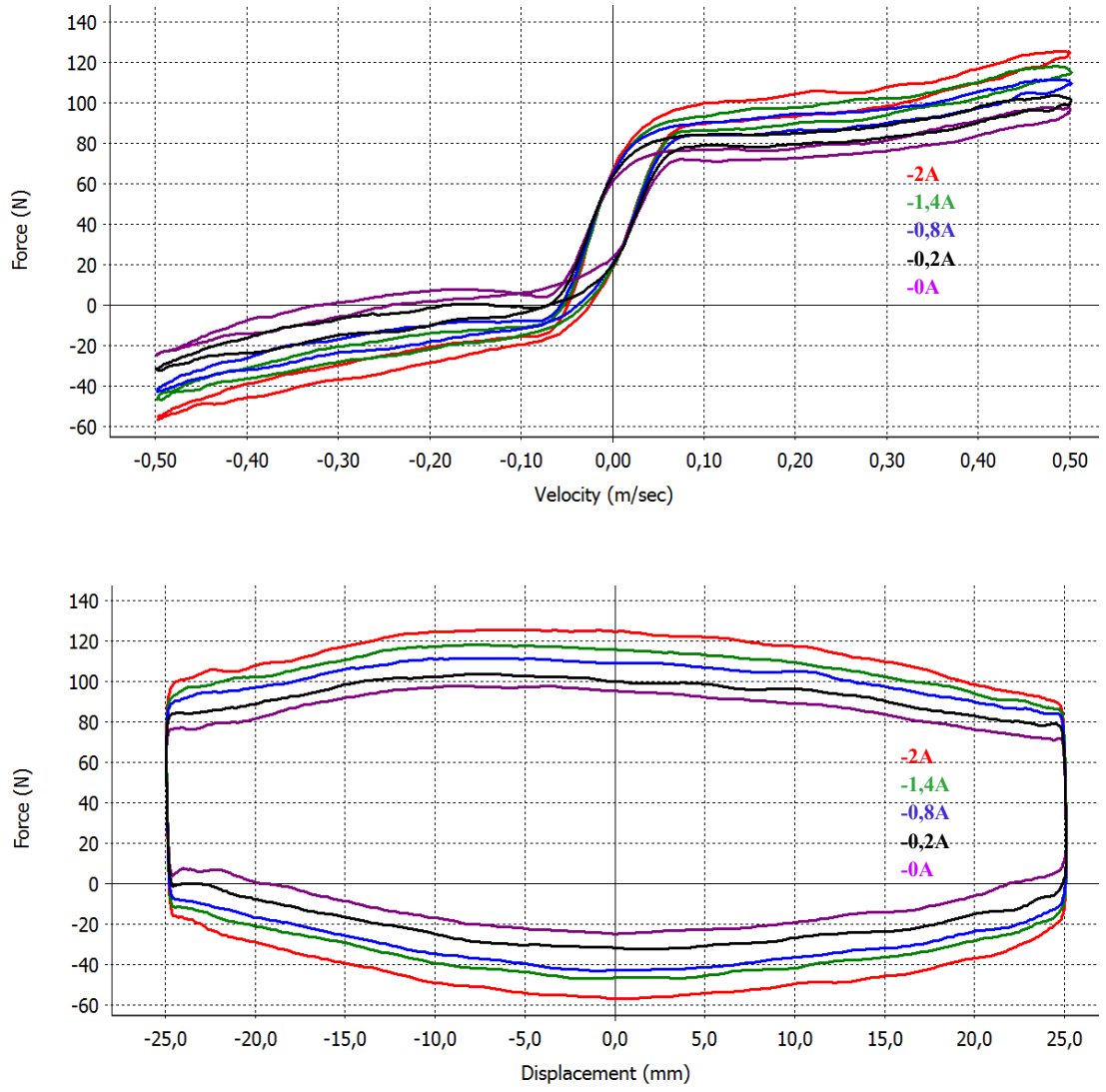
Amortisör Piston Hızı (m/s)	Bobin Akımı (A)	Uyarı Frekansı (Hz)
0,1	0	0,63
0,2	0,2	1,27
0,3	0,8	1,90
0,4	1,4	2,53
0,5	2	3,17

Çizelge 9. 2. MR amortisör test parametreleri

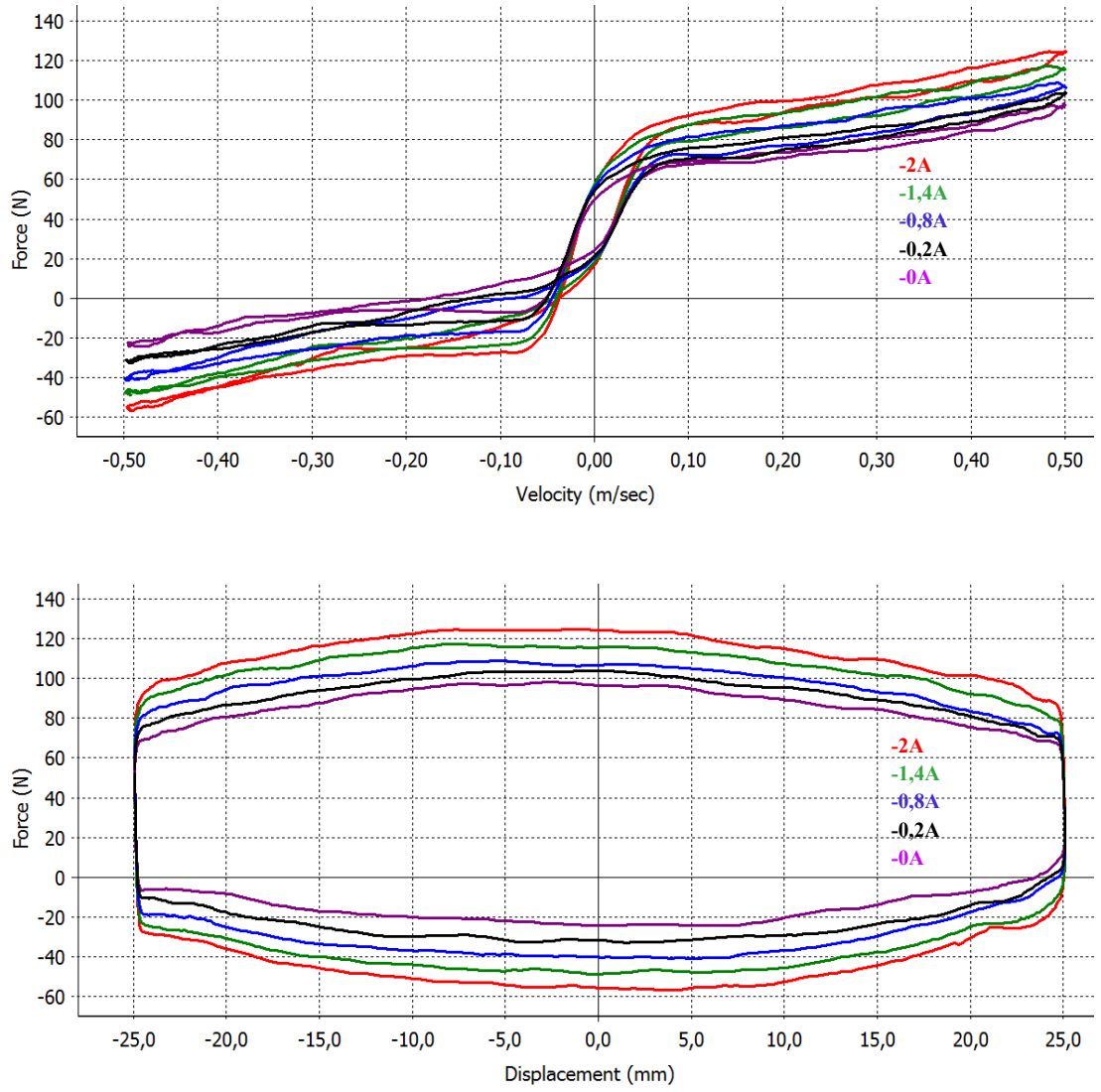
Parametre	Değer
Ortam Sıcaklığı	20°C
Test Genliği	$\pm 25\text{mm}$
Uyarı Sinyali	Sinüs Dalga
Boşta Çalışma Hızı	$0,2\text{m/s}$
Boşta Çalışma Süresi	10s



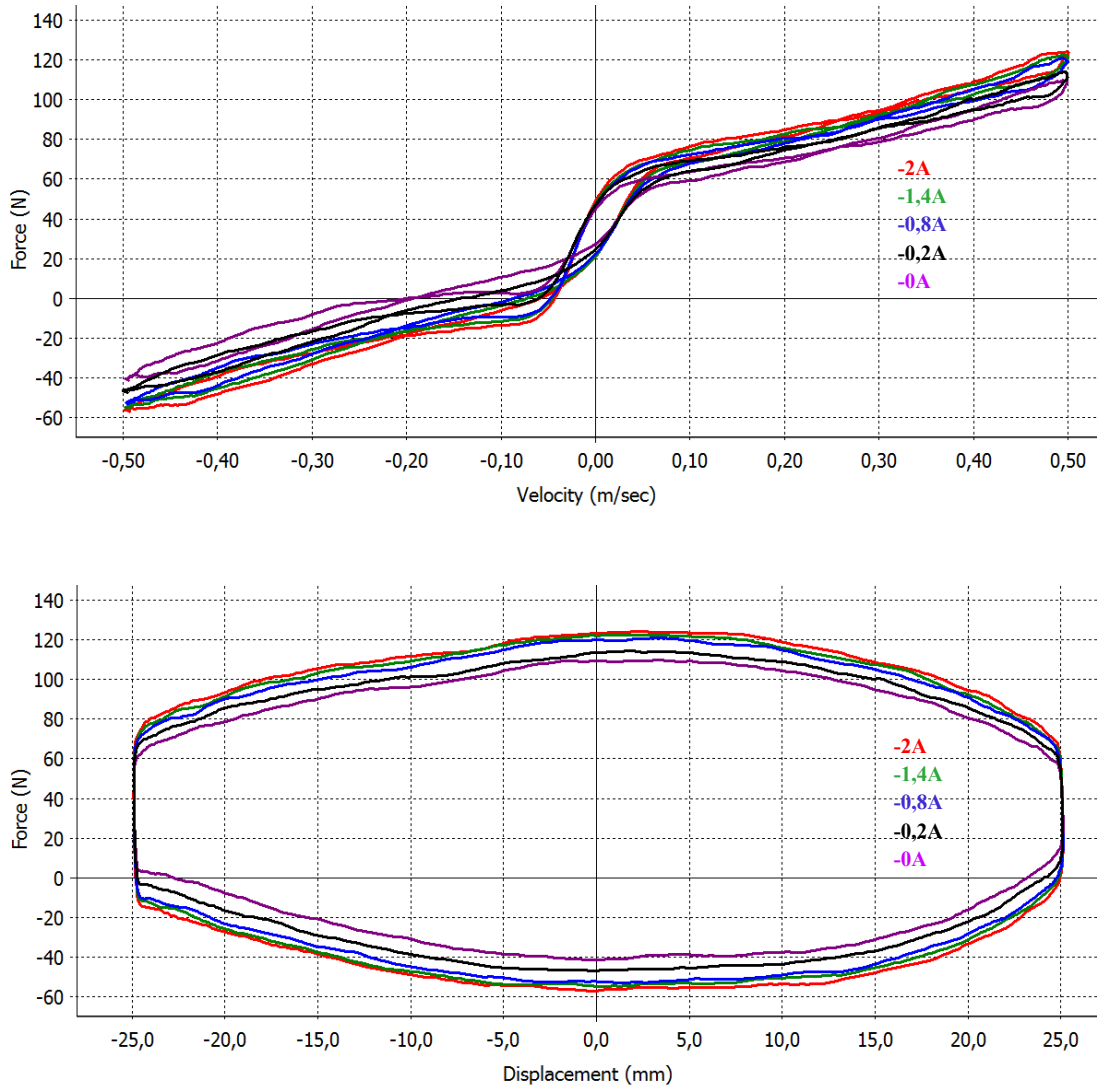
Şekil 9. 1. MRF-1'in 0,5m/s hızda 0-2A akım aralığında sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri



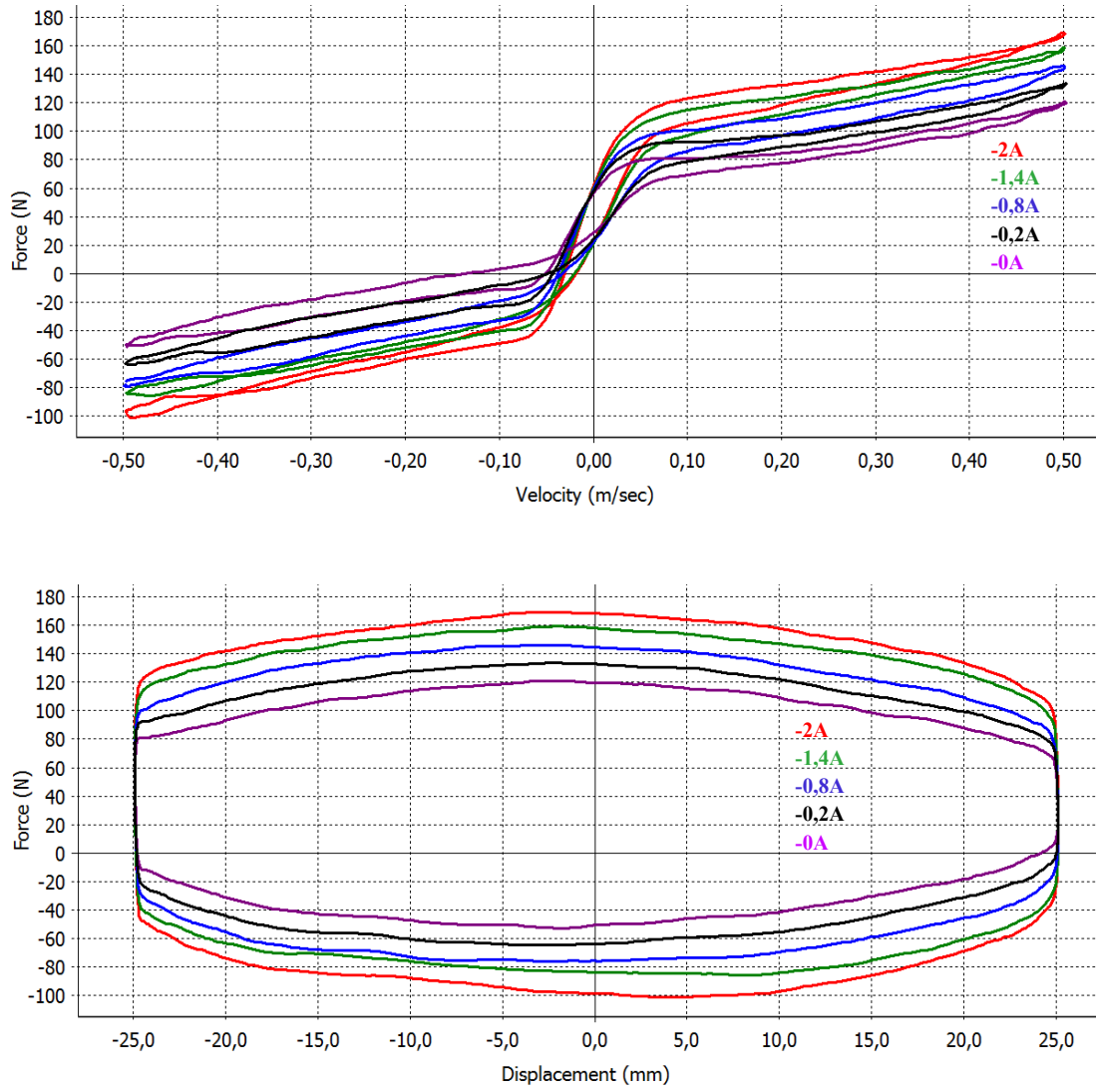
Şekil 9. 2. MRF-2'nin 0,5m/s hızda 0-2A akım aralığında sönümleme kuvveti-hız ve sönümleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri



Şekil 9. 3. MRF-3'ün 0,5m/s hızda 0-2A akım aralığında sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

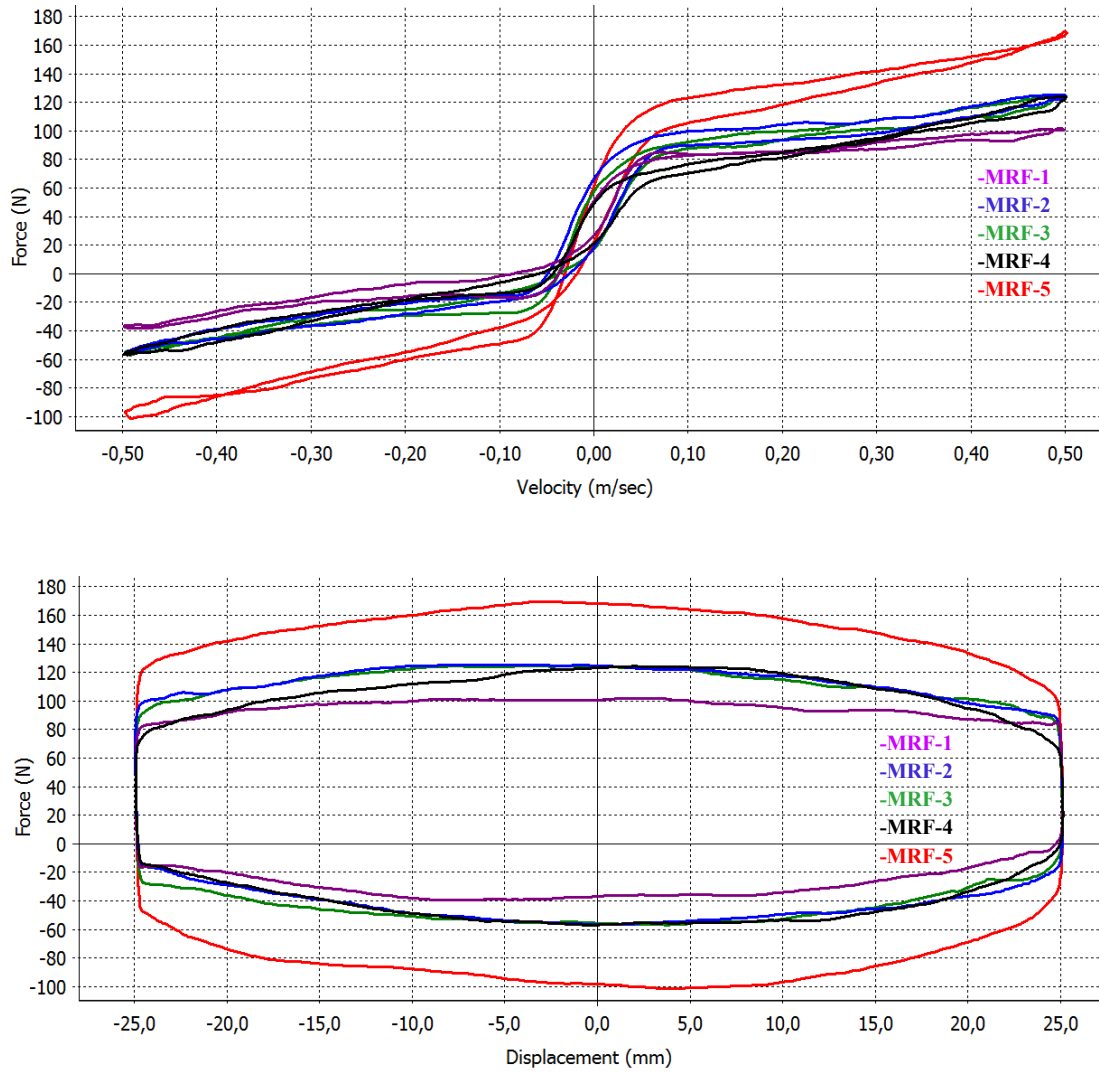


Şekil 9. 4. MRF-4'ün 0,5m/s hızda 0-2A akım aralığında sönümleme kuvveti-hız ve sönümleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri



Şekil 9. 5. MRF-5'in 0,5m/s hızda 0-2A akım aralığında sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değıştirme grafikleri

Hazırlanan MR sıvıların 0,5m/s hızda ve 2A akım değerinde elde edilen sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değıştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 9.6’da verilmiştir.



Şekil 9. 6. MR sıvıların 0,5m/s hızda ve 2A akım değerinde sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değıştirme grafikleri

MR sıvıların 0,5m/s hızdaki performans grafiklerine göre 0A ve 2A akım değerlerindeki maksimum sönümlleme kuvveti ve dinamik kuvvet aralığı değerleri Çizelge 9.3'te verilmiştir.

Çizelge 9. 3. MR sıvıların 0,5m/s hızdaki 0A ve 2A akım değerlerindeki maksimum sönümlleme kuvveti değerleri

MR Sıvı	Akım (A)	Kapanma Stroğu		Açılma Stroğu	
		Maksimum Sönümlleme Kuvveti (N)	Dinamik Kuvvet Aralığı (N)	Maksimum Sönümlleme Kuvveti (N)	Dinamik Kuvvet Aralığı (N)
MRF-1	0	93,70	8,13	-26,81	-12,88
	2	101,83		-39,69	
MRF-2	0	98,26	27,18	-24,67	-32,02
	2	125,44		-56,69	
MRF-3	0	98,29	26,82	-25,73	-31,60
	2	125,11		-57,33	
MRF-4	0	110,18	14,87	-41,49	-15,67
	2	125,05		-57,16	
MRF-5	0	120,88	48,50	-52,89	-48,50
	2	169,38		-101,39	

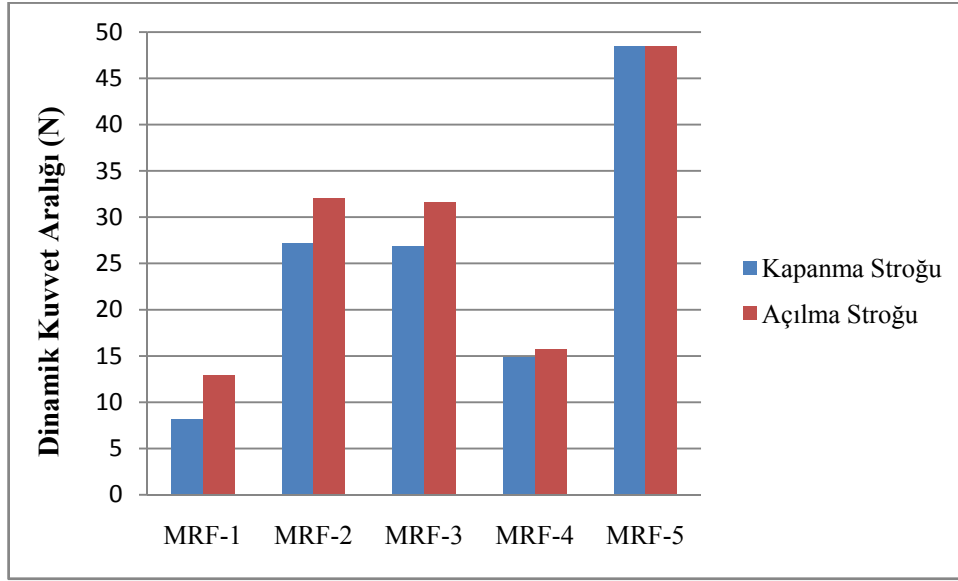
MR sıvılara ait performans grafiklerinden ve Çizelge 9.3'ten görüldüğü üzere, akım arttıkça elde edilen sönümlleme kuvveti ve dolayısıyla absorbe edilen enerji miktarı artmıştır. Bu sonuç hazırlanan tüm MR sıvı örnekleri ve her hız kademesi için geçerlidir. En büyük sönümlleme kuvveti MRF-5'te 2A akım değerinde elde edilmiştir. Bu değerler, amortisörün kapanma stroğunda 169,38N ve açılma stroğunda ise eksi (-) değer olarak görünen 101,39N'dur. Aynı şartlardaki en düşük değerler ise, 101,83N ve -39,69N ile MRF-1'de elde edilmiştir. Aktif madde olarak karbonil demir kullanılmasıyla elde edilen MR sıvılardan manyetit kullanılanlara oranla daha fazla sönümlleme kuvveti elde edilmiştir. %25 konsantrasyonda

hazırlanan MRF-1 ve MRF-2 karşılaştırıldığında, MRF-2'den kapanma stroğunda %23,2 ve açılma stroğunda ise %42,8 daha fazla sönümlleme kuvveti elde edilmiştir.

MR sıvılarda derişimin artmasıyla elde edilen sönümlleme kuvvetlerinde artış meydana gelmiştir. MRF-1 ve MRF-4'e bakıldığında, MRF-1'in kapanma ve açılma stroğunda maksimum sönümlleme kuvveti değerleri 101,83N ve -39,69N iken MRF-4'te bu değerler 125,05N ve -57,16N'dur. Kapanma ve açılma stroğunda sırasıyla %22,8 ve %44 artış söz konusudur. Aynı şekilde MRF-3'te maksimum sönümlleme kuvvetleri kapanma ve açılma stroğu için sırasıyla 125,11N ve -57,33N iken MRF-5'te bu değerler sırasıyla 169,38N ve -101,39N'dur. Artış miktarları ise sırasıyla %35,4 ve %76,8 olarak gerçekleşmiştir.

MR sıvılara çökelmeyi önleyici katkı maddesi olarak silika dumanı katılması, elde edilen maksimum sönümlleme kuvveti değerlerine pek katkı sağlamamış fakat dinamik kuvvet aralığı değerlerini bir miktar arttırmıştır. MRF-2 ve MRF-3 incelendiğinde, MRF-2 sırasıyla kapanma ve açılma stroğunda 125,44N ve -56,69N sönümlleme kuvveti değerlerine sahip iken, MRF-3'te bu değerler sırasıyla 125,11N ve -57,33N'dur.

MR sıvılarda, akım verilmediği durumda minimum sönümlleme kuvvetleri elde edilirken, en yüksek akım değeri olan 2A akım değerinde maksimum sönümlleme kuvvetleri elde edilmektedir. Maksimum ve minimum sönümlleme kuvvetleri arasındaki kuvvet farkı dinamik kuvvet aralığını vermektedir. Dinamik kuvvet aralığı değeri, kontrol edilebilen kuvvet miktarı anlamına gelmektedir. Bu nedenle, bu değerin yüksek olması istenmektedir. Şekil 9.7'de 0,5m/s hızda 2A akım değerinde amortisörün açılma ve kapanma stroğu için MR sıvılardan elde edilen dinamik kuvvet aralığı değerleri grafik olarak verilmiştir.

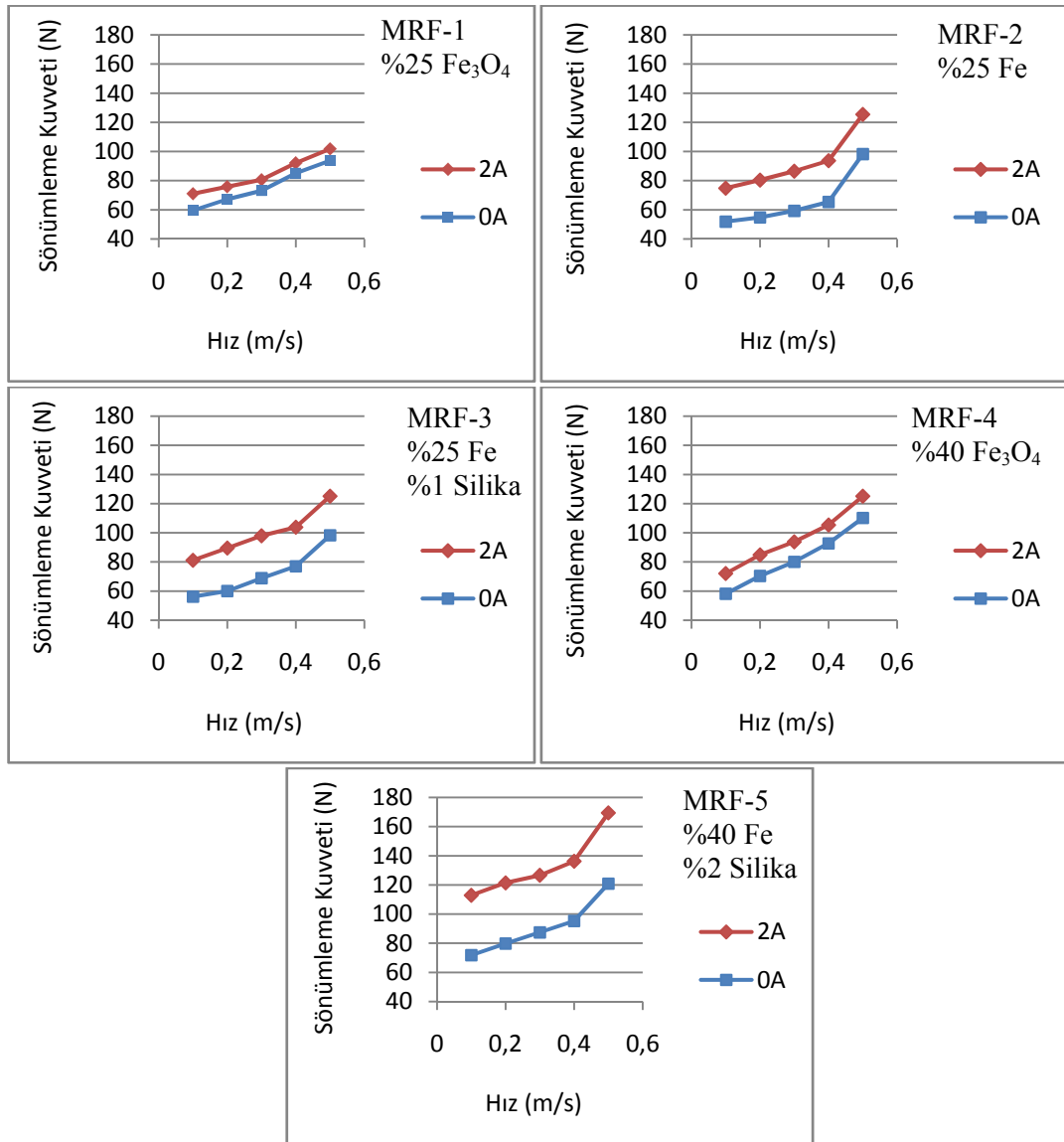


Şekil 9. 7. MR sıvıların 0,5m/s hız ve 2A akım değerindeki dinamik kuvvet aralığı değerleri

Dinamik kuvvet aralığı değerlerine bakıldığında, en yüksek değer 48N olarak MRF-5'in iken en düşük değer ise 8N olarak MRF-1'in değeridir. Karbonil demir ile hazırlanan MR sıvıların dinamik kuvvet aralığı değerleri manyetit ile hazırlananlara oranla daha yüksektir. Silika dumanı ilavesi bu değerlerin yaklaşık %5 civarında yükselmesini sağlamıştır. Bunun sebebi, silika dumanı ilavesi ile daha homojen bir karışım elde edilip çöken manyetik parçacık oranının azalmasıyla daha güçlü bir MR etkinin oluşmasıdır.

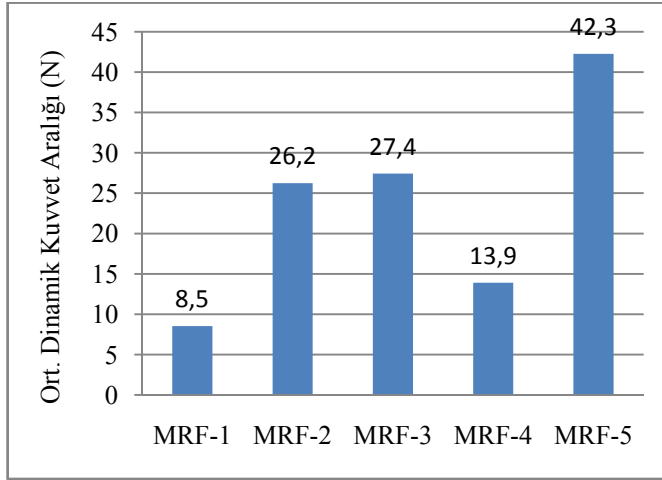
Şekil 9.8'de farklı hızlarda MR sıvılara ait dinamik kuvvet aralığı grafikleri verilmiştir. Şekil 9.9'da ise farklı hızlardaki bu değerlerin ortalaması alınarak sütun grafiğiyle gösterilmiştir.

Şekil 9.8'de görüldüğü üzere, hız arttıkça tüm MR sıvılar için geçerli olarak iki eğri arasındaki alan daralmaktadır. Bu alanın daralması, dinamik kuvvet aralığının azalması anlamına gelmektedir.



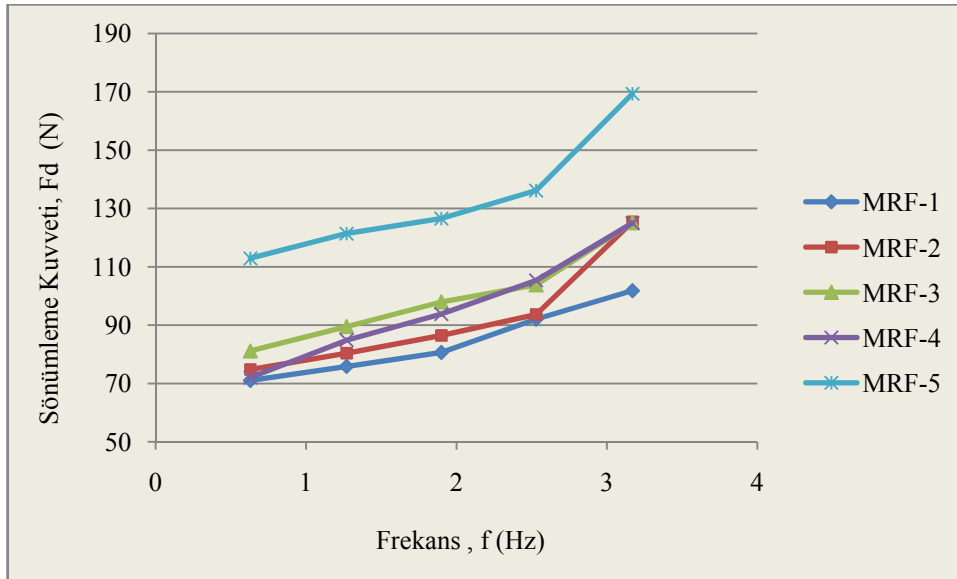
Şekil 9. 8. MR sıvıların dinamik kuvvet aralıkları

Şekil 9.9'a bakıldığında, %25 karbonil demir içeriğiyle hazırlanan MRF-2 ve MRF-3'ün ortalama dinamik kuvvet aralıkları 26-27 N civarında iken, %40 manyetit içeriğiyle hazırlanan MRF-4'te bu değer yaklaşık 14 N'dur. MRF-4'e göre daha düşük manyetik parçacık konsantrasyonuna sahip olmalarına rağmen MRF-2 ve MRF-3, daha büyük dinamik kuvvet aralığı değerlerine sahiptirler.



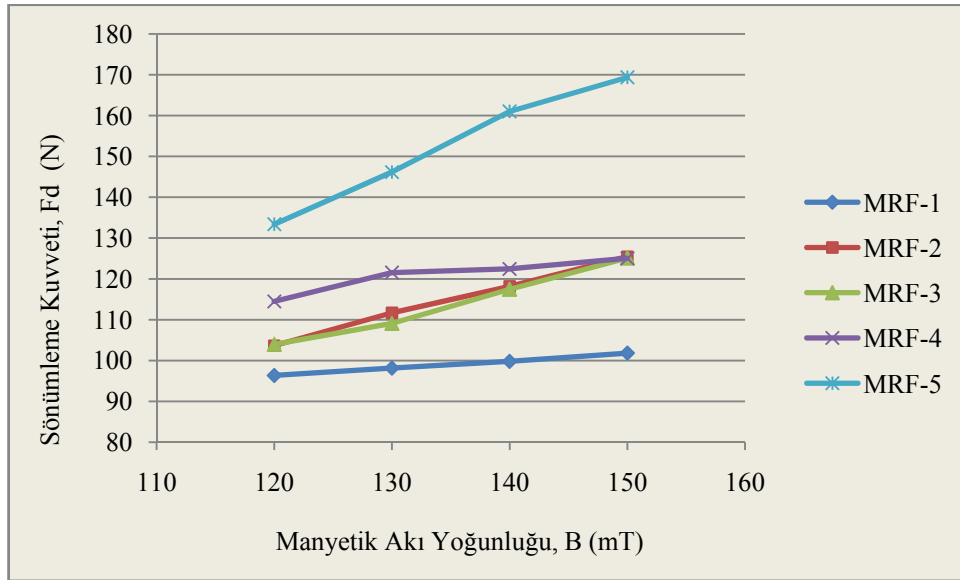
Şekil 9. 9. MR sıvıların ortalama dinamik kuvvet aralığı değerleri

Şekil 9.10’da 2A akım değerinde MR sıvılardan elde edilen maksimum sönümlleme kuvveti değerlerinin frekansa göre değişimi grafik olarak verilmiştir. Frekans arttıkça tüm MR sıvıların sönümlleme kuvveti değerleri artmıştır. Özellikle 2,5Hz frekans değerinden sonraki artış miktarı daha fazla olmuştur.



Şekil 9. 10. MR sıvılardan 2A akım değerinde elde edilen maksimum sönümlleme kuvvetlerinin frekansa göre değişimi

Şekil 9.11’de MR sıvı kanalındaki manyetik akı yoğunluğuna göre 0,5m/s hızda MR sıvılardan elde edilen sönümlleme kuvvetlerinin değişimi grafik olarak gösterilmiştir. Karbonil demir ile hazırlanan MRF-2, MRF-3 ve MRF-5’te MR sıvı kanalındaki manyetik akı yoğunluğunun artmasıyla sönümlleme kuvvetlerinde meydana gelen artış miktarları, manyetit ile hazırlanan MRF1 ve MRF-4’ten çok daha fazladır. Özellikle %40 manyetit derişim oranıyla hazırlanmış olan MRF-4’te 130mT manyetik akı yoğunluğu değerinden sonra sönümlleme kuvvetindeki artış oldukça yavaşlamış ve 150mT değerinde MRF-2 ve MRF-3 ile yaklaşık olarak aynı sönümlleme kuvveti değerlerini vermektedir.



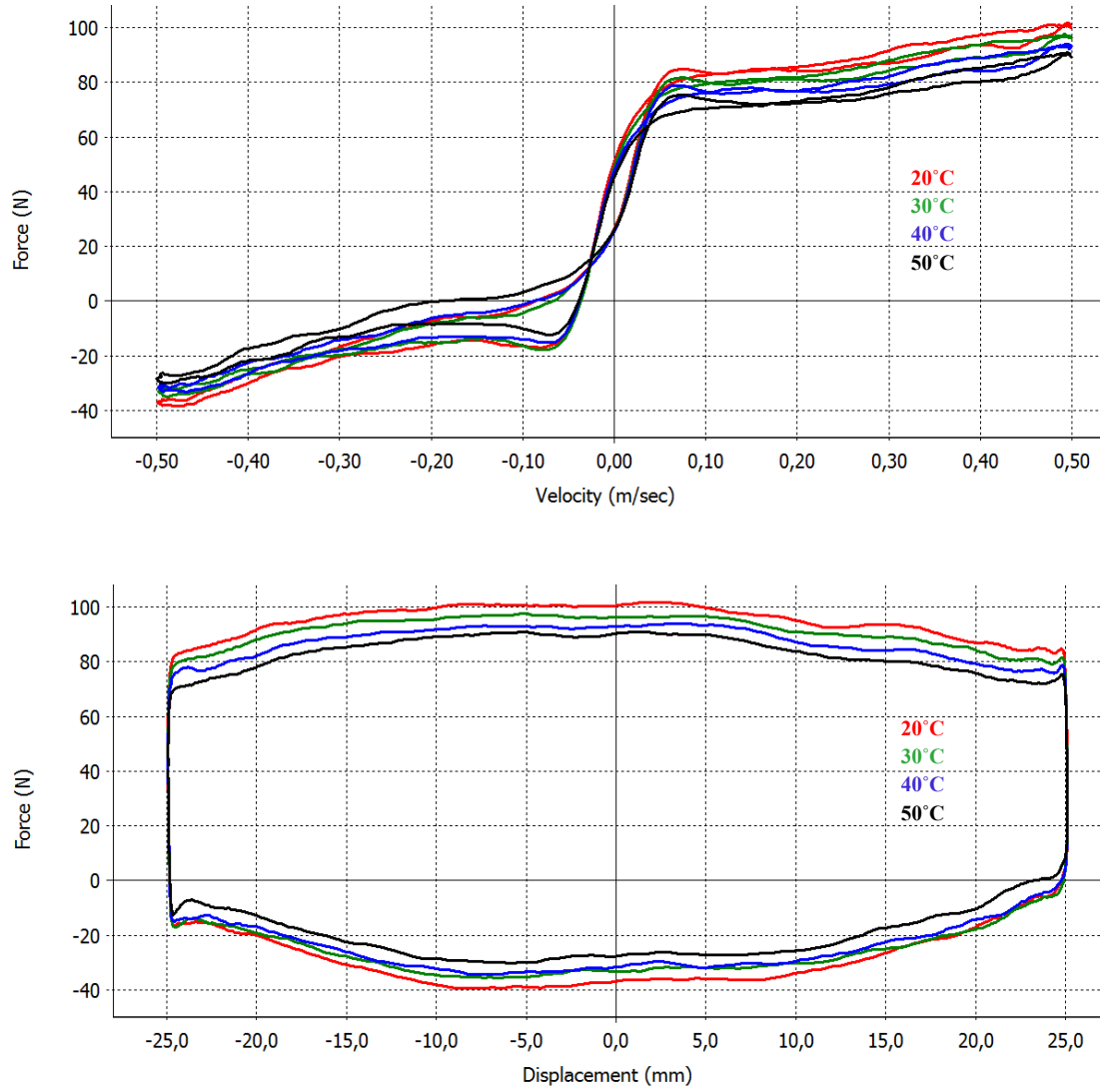
Şekil 9. 11. MR sıvılardan 0,5m/s hızda elde edilen sönümlleme kuvvetlerinin MR sıvı kanalındaki manyetik akı yoğunluğuna göre değişimi

10. SICAKLIĞIN MR SIVI PERFORMANSINA ETKİSİ

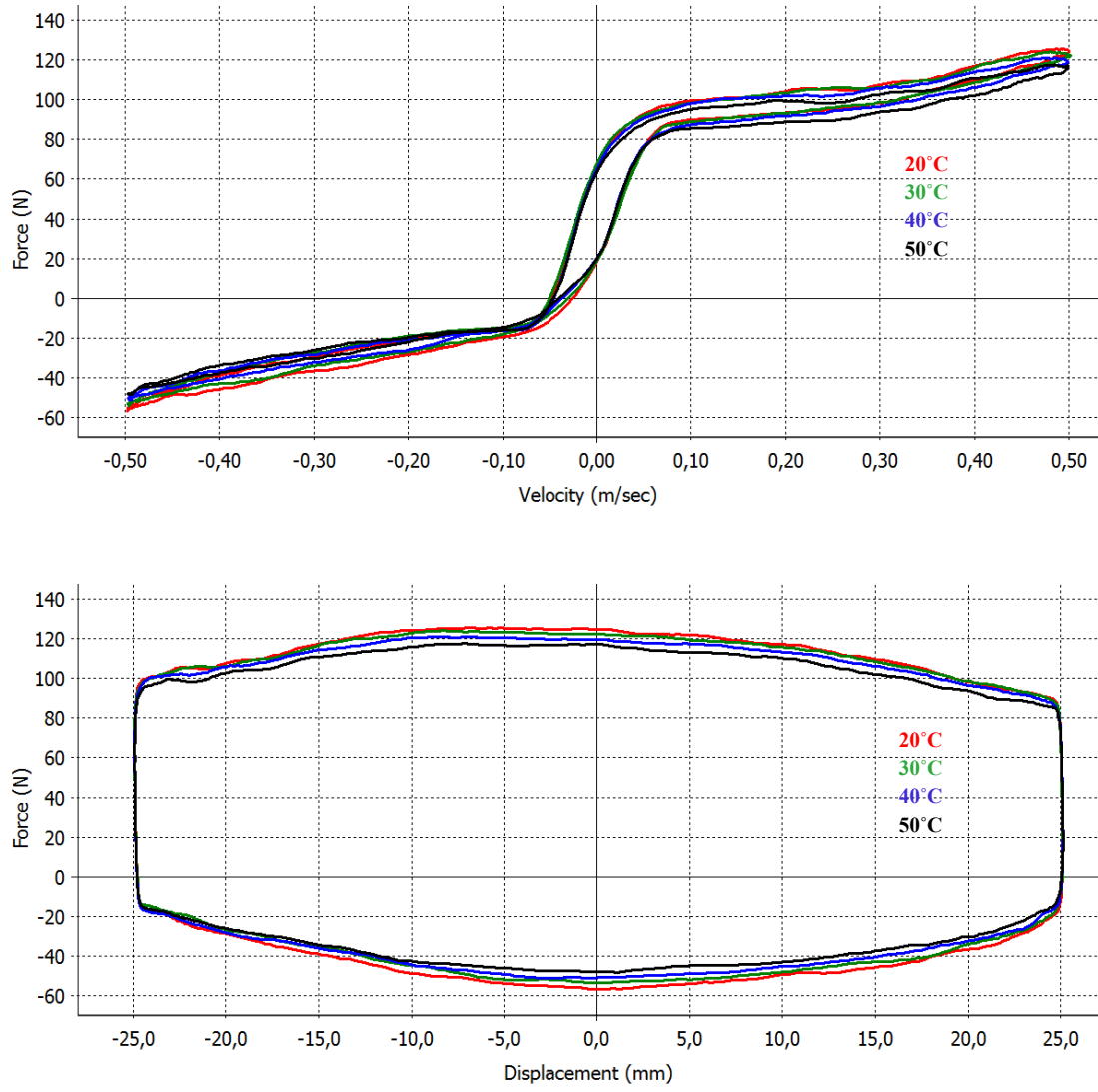
Bilindiği üzere, amortisörler araç hareket halindeyken sürekli olarak açma kapama hareketi yapmaktadır. Özellikle de yol şartları bozuk olduğunda bu hareketlerin genlikleri ve sıklığı çok daha fazla artmaktadır. Bu durumda amortisörler daha fazla enerjiyi ısıya çevirerek absorbe etmek zorunda kalacaktır. Böylece, amortisör içersindeki sıvı gittikçe ısınacak ve amortisör daha yüksek sıcaklıklar altında çalışmaya başlayacaktır.

Sıcaklığın artması sıvılarda viskozitenin düşmesine sebep olmaktadır. Amortisör sıvısının viskozitesinin düşmesiyle elde edilecek sönümleme kuvvetlerinde azalma meydana gelecektir. Bu da, yoldan gelen titreşim enerjisinin yeterince absorbe edilemeyerek, taşıt konfor ve güvenliğinin sağlanamaması anlamına gelmektedir.

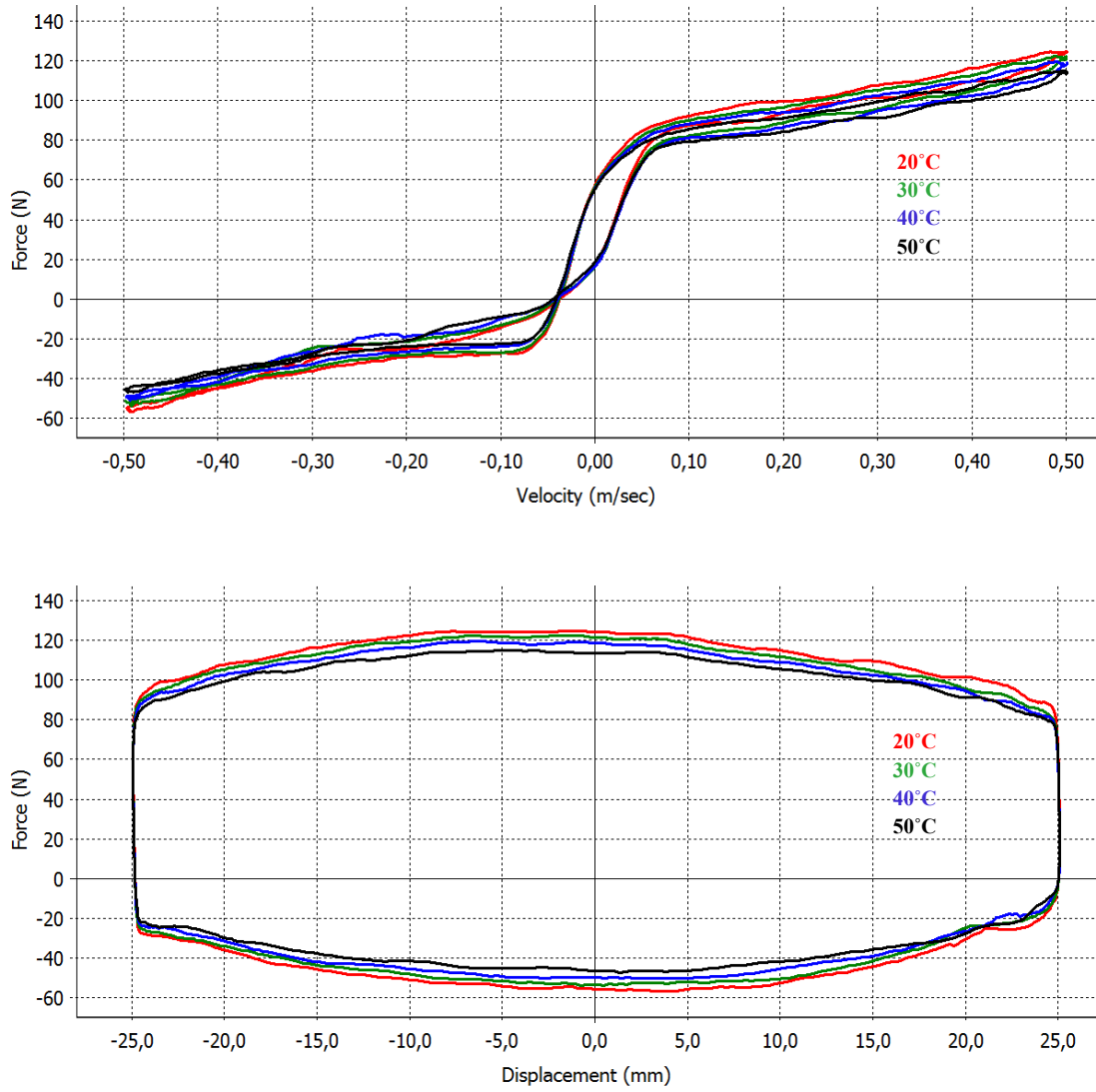
Bu nedenle, sıcaklığın MR amortisörde kullanılan MR sıvılar üzerindeki etkilerini görmek amacıyla, farklı sıcaklıklarda MR amortisörün performans testleri tekrarlanmıştır. Sentezlenen 5 farklı MR sıvı için, 4 farklı sıcaklık (20, 30, 40, 50°C) değerinde performans testleri gerçekleştirilmiştir. Testler 0,5m/s hızda ve 2A akım değerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir MR sıvı için performans testlerinin sonuçları Şekil 10.1 ile Şekil 10.5 arasında verilmiştir.



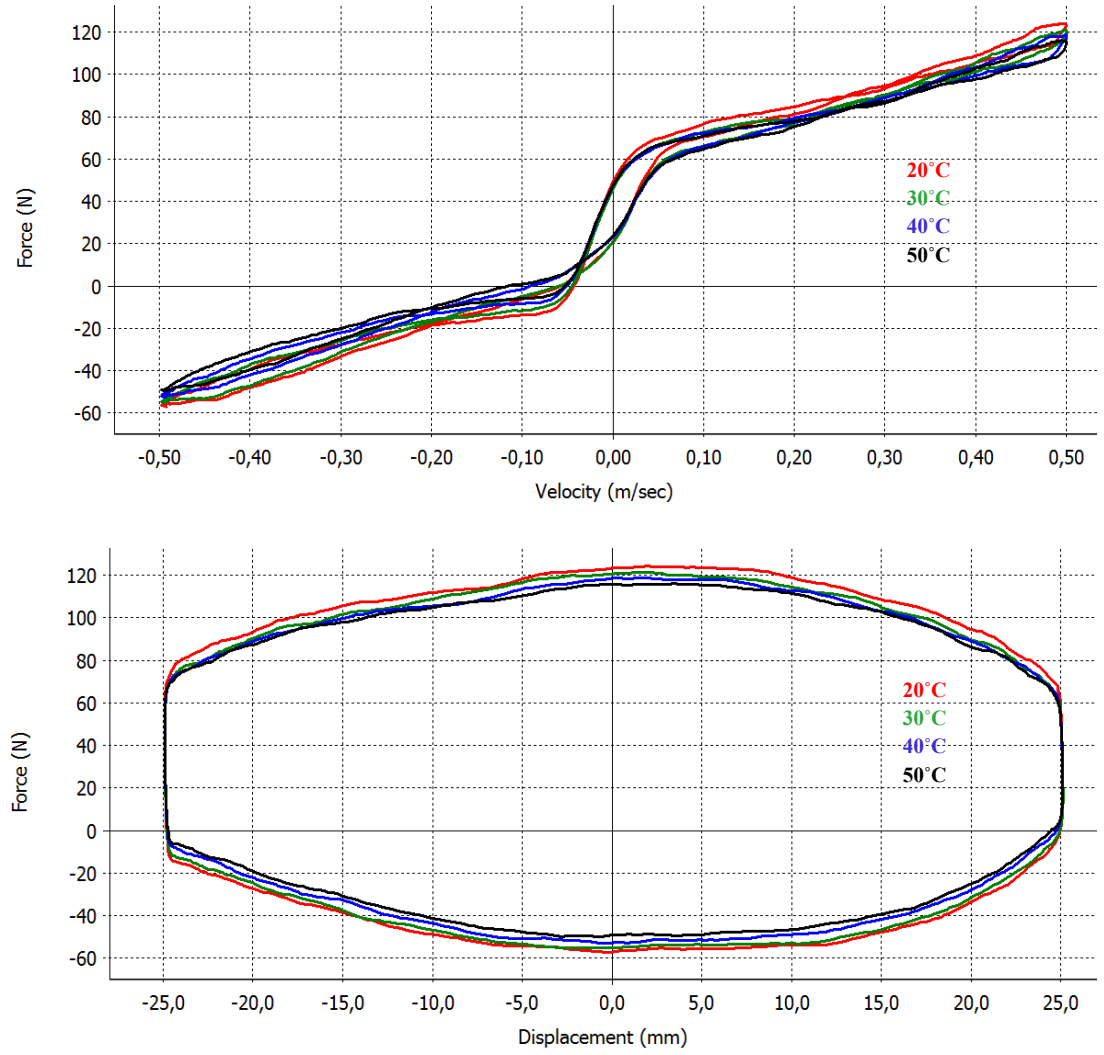
Şekil 10. 1. MRF-1'in 0,5m/s hız ve 2A akım değeri için farklı sıcaklıklardaki performans grafikleri



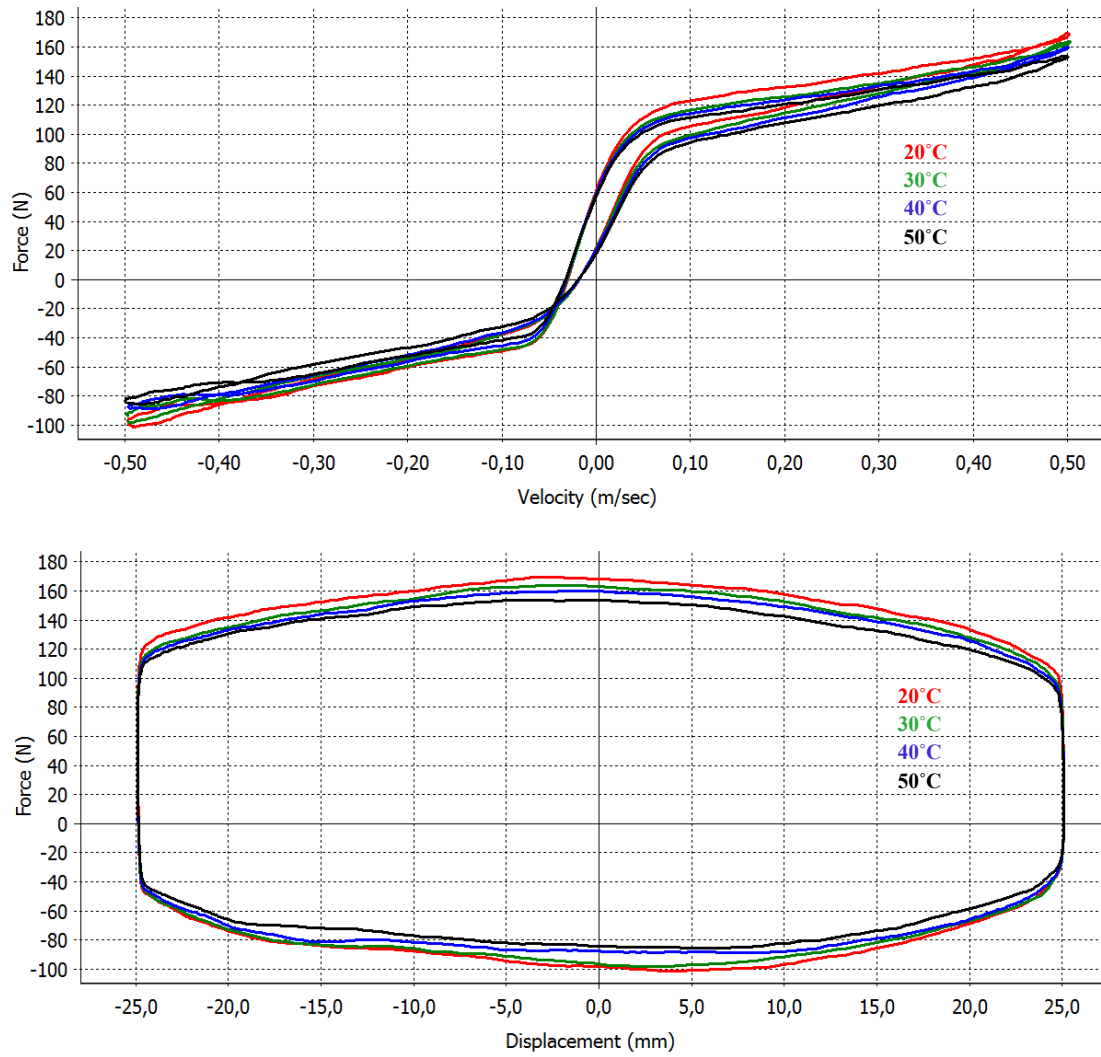
Şekil 10. 2. MRF-2'nin 0,5m/s hız ve 2A akım değeri için farklı sıcaklıklardaki performans grafikleri



Şekil 10. 3. MRF-3'ün 0,5m/s hız ve 2A akım değeri için farklı sıcaklıklardaki performans grafikleri



Şekil 10. 4. MRF-4'ün 0,5m/s hız ve 2A akım değeri için farklı sıcaklıklardaki performans grafikleri



Şekil 10. 5. MRF-5'in 0,5m/s hız ve 2A akım değeri için farklı sıcaklıklardaki performans grafikleri

Çizelge 10.1'de MR sıvılara ait 0,5m/s hız ve 2A akım değeri için farklı sıcaklıklardaki maksimum sönümleme kuvveti ve kuvvet kaybı oranı değerleri verilmiştir. Burada, kuvvet kaybı oranı amortisörün hem kapanma stroğu için hem de açılma stroğu için hesaplanarak verilmiştir. Kuvvet kaybı oranları hesaplanırken Eş. 10.1 kullanılmıştır.

$$KKO (\%) = \frac{F_{\max(20^{\circ}\text{C})} - F_{\max(50^{\circ}\text{C})}}{F_{\max(20^{\circ}\text{C})}} \quad (10.1)$$

Burada;

KKO: Kuvvet kaybı oranı (%)

$F_{\max(20^{\circ}\text{C})}$: 20°C 'deki maksimum sönümleme kuvveti (N)

$F_{\max(50^{\circ}\text{C})}$: 50°C 'deki maksimum sönümleme kuvveti (N)

Çizelge 10. 1. MR sıvıların 0,5m/s hız ve 2A akım değeri için farklı sıcaklıklardaki maksimum sönümleme kuvveti ve kuvvet kaybı oranı değerleri

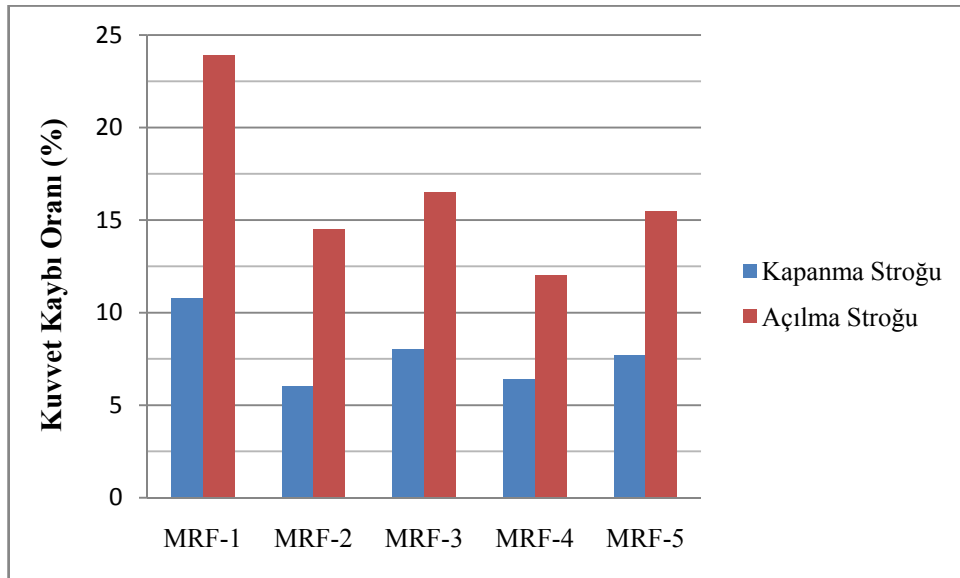
MR Sıvı	Sıcaklık (°C)	Maksimum Sönümleme Kuvveti (N)		Kuvvet Kaybı Oranı (%)	
		Kapanma Stroğu	Açılma Stroğu	Kapanma Stroğu	Açılma Stroğu
MRF-1	20	101,83	-39,69	10,8	23,9
	30	97,56	-35,68		
	40	94,37	-34,41		
	50	90,86	-30,20		
MRF-2	20	125,44	-56,69	6	14,5
	30	124,10	-54,52		
	40	121,02	-51,19		
	50	117,91	-48,44		
MRF-3	20	125,11	-57,33	8	16,5
	30	122,61	-53,90		
	40	119,57	-51,94		
	50	115,11	-47,88		
MRF-4	20	125,05	-57,16	6,4	12
	30	121,39	-55,59		
	40	118,96	-52,94		
	50	117,07	-50,30		
MRF-5	20	169,38	-101,39	7,7	15,5
	30	164,02	-98,32		
	40	160,20	-90,66		
	50	156,37	-85,67		

Şekil 10.6'da 0,5m/s hız ve 2A akım değerinde MR sıvılara ait kuvvet kaybı oranları amortisörün hem açılma hem de kapanma stroğu için sütun grafiğiyle verilmiştir.

Test sonuçlarına bakıldığında, sıcaklık arttıkça tüm MR sıvıların sönümleme kuvvetlerinde azalma meydana gelmiştir. En fazla kuvvet kaybı MRF-3'te, en az kuvvet kaybı ise MRF-4'te gerçekleşmiştir. Derişimin artması kuvvet kaybını

azaltırken, katkı maddesi olarak silika dumanı ilavesi kuvvet kaybını arttırmıştır. Tanecik tipi bakımından ise, karbonil demirdeki kuvvet kaybı manyetite oranla daha düşük olmuştur.

Ayrıca, Şekil 10.6'daki grafiğe bakıldığında MR amortisörün açılma stroğundaki kuvvet kaybı oranlarının kapanma stroğundakilere oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, MR amortisörde kullanılan hidrolik akümülatördeki azot gazının artan sıcaklıkla birlikte genleşme etkisidir.



Şekil 10. 6. MR sıvıların 0,5m/s hız ve 2A akım değerindeki kuvvet kaybı oranları

11. EŞDEĞER SÖNÜM KATSAYILARININ BULUNMASI

MR amortisörün sönümleme performansının bir göstergesi olan eşdeğer sönüm katsayılarının (c_{eq}) farklı sıvı türü ve farklı akım değerleri için karşılaştırılabilmesi amacıyla bulunması gerekmektedir. Eşdeğer sönüm katsayısı hesaplanırken öncelikle, sinüsoidal uyarı altında çalışan MR amortisörün tam bir çevrimde sönümlendiği (yuttuğu) enerji miktarı bulunmalıdır. Amortisör tarafından bir çevrimde yutulan enerji miktarı histerik çevrimin kapalı alanının integrali şeklinde verilebilir [47, 48].

$$W = \oint F_{MR} dx = \int_0^{2\pi/\omega_d} F_{MR} \dot{x} dt = \int_0^{2\pi/\omega_d} c_{eq} (\dot{x})^2 dt \quad (11.1)$$

Eş. 11.1’de “ W ” MR amortisörün bir çevrimde sönümlendiği enerji miktarını, “ F_{MR} ” MR amortisörün sönümleme kuvvetini, “ ω_d ” sinüsoidal uyarı frekansını, “ $\dot{x}$ ” ise MR amortisörün piston hızını göstermektedir.

Sinüsoidal uyarıyı verecek olursak;

$$x = X_0 \sin \omega_d t \quad (11.2)$$

$$\dot{x} = \omega_d X_0 \cos \omega_d t \quad (11.3)$$

şeklinde verilebilir. Burada “ X_0 ” uyarı genliğini ve “ ω_d ” ise uyarı frekansını ifade etmektedir.

Eş. 11.3 Eş. 11.1’de yerine yazılırsa;

$$W = \int_0^{2\pi/\omega_d} c_{eq} (\omega_d X_0 \cos \omega_d t)^2 dt$$

$$W = c_{eq} \omega_d^2 X_0^2 \int_0^{2\pi/\omega_d} \cos^2 \omega_d t dt = c_{eq} \pi \omega_d X_0^2 \quad (11.4)$$

şeklinde Eş. 11.4 bulunmuş olur.

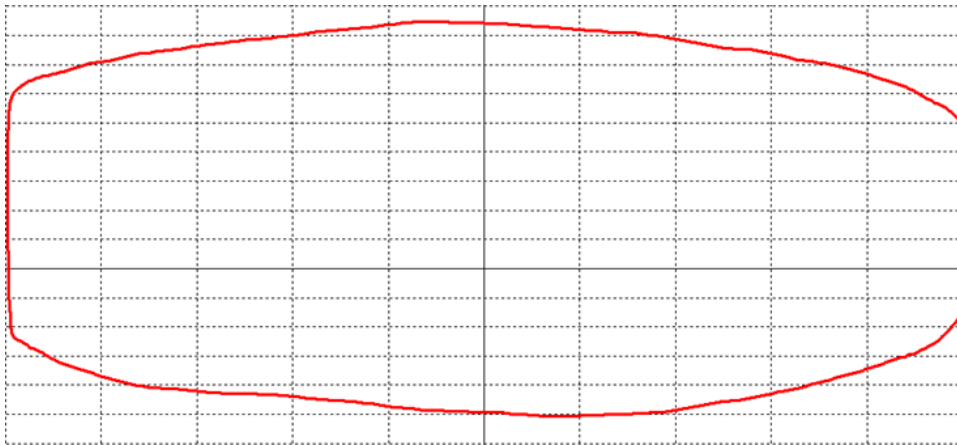
Eşdeğer sönüm katsayısı Eş. 11.4'ten çekilirse;

$$c_{eq} = \frac{W}{\pi \omega_d X_0^2} \quad (11.5)$$

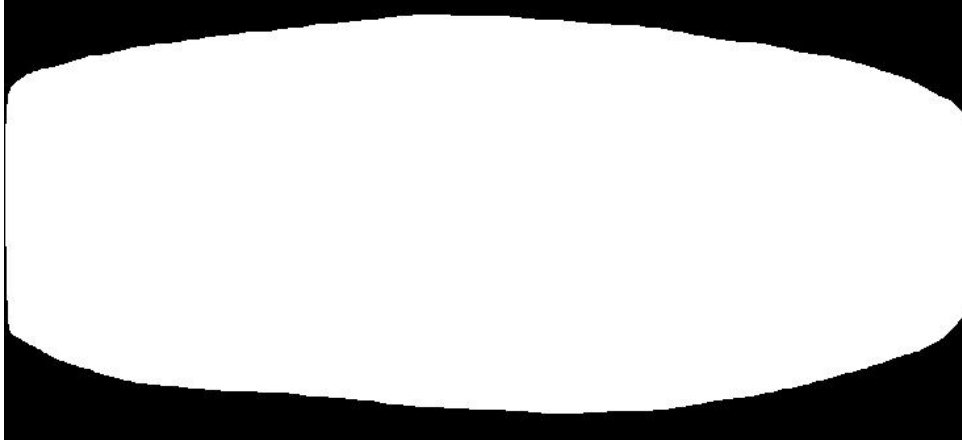
ifadesi elde edilmiş olur.

MR amortisöre ait, sentezlenen her bir MR sıvı ve farklı akım değerleri için elde edilen performans grafikleri 9. bölümde verilmişti. Sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafiklerindeki kapalı alanlar bir tam çevrimde sönümlenen enerji miktarını (W) vermektedir. Yani, bir çevrimde amortisörün yaptığı işi vermektedir.

Eşdeğer sönüm katsayılarının hesaplanabilmesi için öncelikle bu alanların bulunması gerekmektedir. Bu nedenle, örnek olarak Şekil 11.1'de görülen sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafiklerinden biri Şekil 11.2'de görüldüğü gibi siyah ve beyaz alanlardan oluşacak şekilde yeniden düzenlenmiştir. Düzenlenen bu grafikler MATLAB programında yazılan bir görüntü işleme kodu yardımıyla programa okutularak siyah ve beyaz alanlar yüzdelik oran olarak bulunmuştur. Dikdörtgenin toplam alanı bilindiğinden dolayı beyaz ile gösterilen çevrim alanı bulunan bu oran yardımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 11. 1. Alanı hesaplanacak sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafiği



Şekil 11. 2. Yeniden düzenlenen sönümleme kuvveti-yer değiştirme grafiği

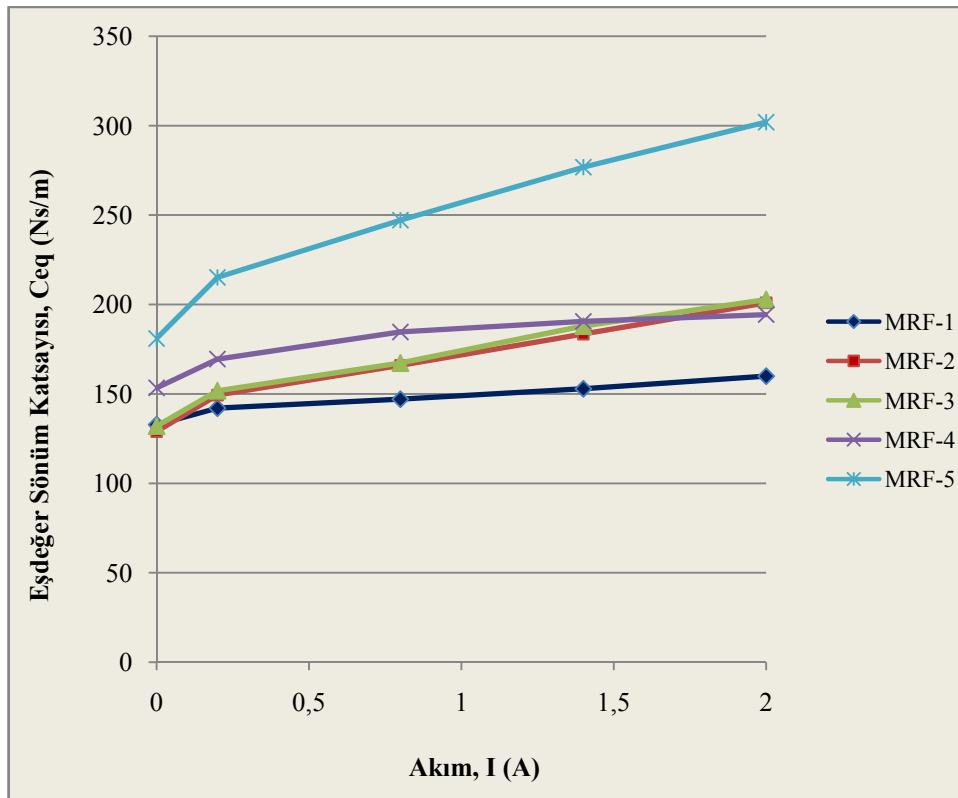
Eş. 11.5'e bakıldığında uyarı frekansı (ω_d) ve uyarı genliği (X_0) de bilindiğinden dolayı eşdeğer sönüm katsayıları her bir MR sıvı ve akım değeri için hesaplanabilmektedir. Çizelge 11.1'de beş farklı akım değeri için MR sıvılara ait eşdeğer sönüm katsayıları verilmiştir. Uyarı frekansı 3,17Hz ve uyarı genliği ise 25mm olarak seçilmiştir.

Çizelge 11. 1. Farklı akım değerleri için MR sıvılara ait eşdeğer sönüm katsayıları

MR Sıvı	Akım (A)	Eşdeğer Sönüm Katsayısı (Ns/m)	MR Sıvı	Akım (A)	Eşdeğer Sönüm Katsayısı (Ns/m)
MRF-1	0	132,8	MRF-4	0	153,4
	0,2	142,1		0,2	169,5
	0,8	147,1		0,8	184,7
	1,4	152,9		1,4	190,6
	2	160		2	194,4
MRF-2	0	129	MRF-5	0	181
	0,2	149,4		0,2	215,2
	0,8	166		0,8	247,2
	1,4	183,5		1,4	276,8
	2	201		2	302
MRF-3	0	132			
	0,2	151,8			
	0,8	167,3			
	1,4	188			
	2	202,8			

Şekil 11.3'te MR sıvılara ait farklı akım değerlerindeki eşdeğer sönüm katsayılarının değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere, tüm MR sıvılara 0,2A'lık ilk akımın uygulandığı noktaya kadar olan eşdeğer sönüm katsayısı artışları yüksek iken akım artmaya devam ettikçe artış hızı düşmektedir. En yüksek sönüm katsayıları MRF-5'te elde edilirken, en düşük sönüm katsayıları ise MRF-1'de elde edilmiştir.

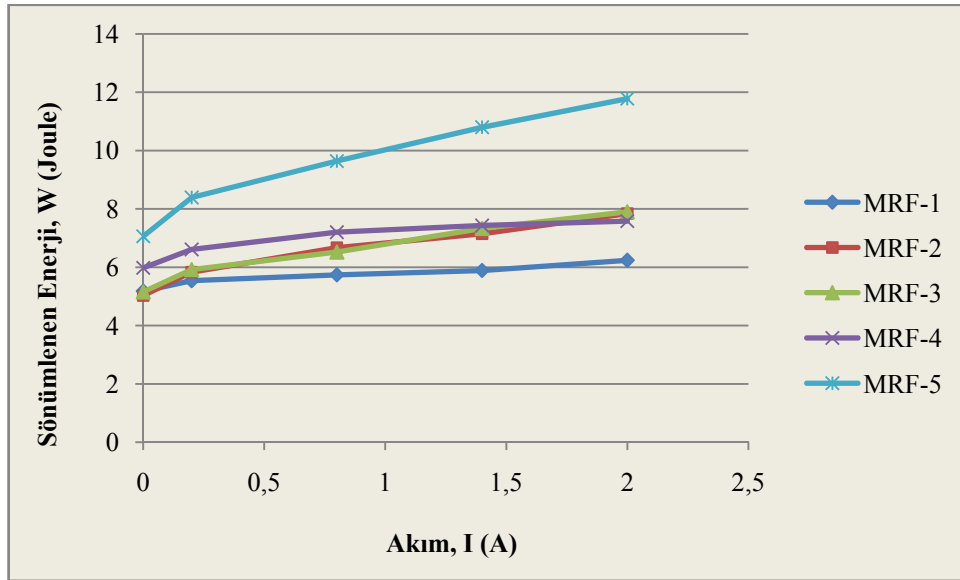
%40 manyetit ile hazırlanan MRF-4 yaklaşık 1,7A akım değerine kadar %25 karbonil demir içeriğiyle hazırlanan MRF-2 ve MRF-3'ten daha büyük eşdeğer sönüm katsayılarına sahip iken, 1,7A değerinden sonra daha küçük eşdeğer sönüm katsayısı değerlerine sahiptir. Bunun sebebi, MRF-4'ün manyetik doyuma daha çabuk gitmesidir. MRF-2 ve MRF-3 aynı karbonil demir içeriğine (%25) sahip olmalarına rağmen MRF-3'e %1 oranında katılan silika dumanı MRF-3'ün tüm akım değerlerinde MRF-2'ye göre biraz daha büyük eşdeğer sönüm katsayısı değerlerine sahip olmasına neden olmuştur.



Şekil 11. 3. MR sıvılara ait eşdeğer sönüm katsayılarının akımla değişimi

Şekil 11.4'te ise farklı akım değerlerinde MR sıvıların tam bir çevrimde sönümledikleri enerji miktarlarının değişimi grafik olarak gösterilmiştir.

Grafikten görüldüğü üzere, MR amortisör bobinine uygulanan akım arttıkça tüm MR sıvıların bir çevrim boyunca sönümledikleri enerji miktarları artmıştır. En çok enerjiyi MRF-5 sönümlerken, MRF-1 en az enerji sönümleyen MR sıvıdır. MRF-2 ve MRF-3 tüm akım değerlerinde yaklaşık olarak aynı miktarda enerji sönümlemektedir. MRF-4 ise 1,7A akım değerine kadar MRF-2 ve MRF-3'ten daha fazla enerji sönümlerken, bu akım değerinden sonra daha az enerji sönümlemektedir.

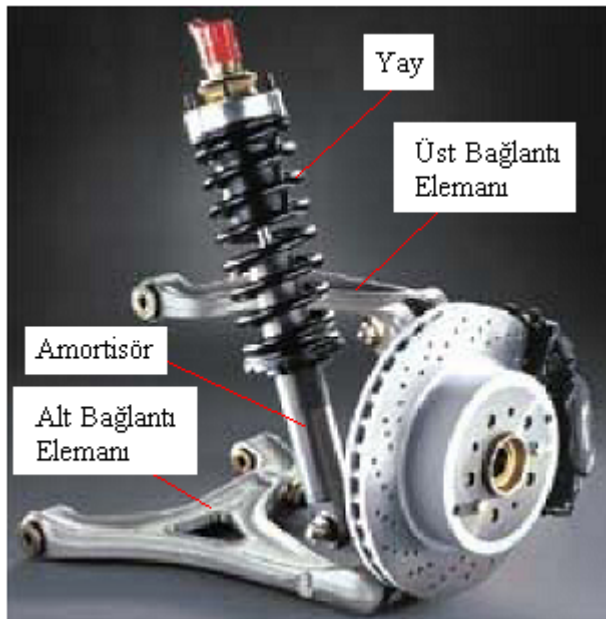


Şekil 11. 4. MR sıvıların sönümledikleri enerji miktarlarının akımla değişimi

12. TAŞIT SÜSPANSİYON SİSTEMİ VE SİMÜLASYONU

Taşıt seyir halinde iken yol pürüzlülüğünün neden olduğu zorlayıcı kuvvetlerden dolayı titreşim yapmaktadır. Ayrıca, dönen motor parçalarının dengesizliği, balanssız lastikler ve rüzgar diğer titreşim kaynaklarıdır. Süspansiyon sistemi bu istenmeyen titreşimleri sönümleyerek taşıtın konfor ve güvenliğini sağlamalıdır.

Süspansiyon sistemi temel olarak yay, amortisör ve bunları tekerleğe ve taşıtın gövdesine bağlayan bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Yay taşıtın statik yükünü taşıırken amortisör ise titreşim enerjisini sönümlemektedir. Şekil 12.1’de yaygın olarak kullanılan tipik bir süspansiyon sisteminin elemanları görülmektedir.

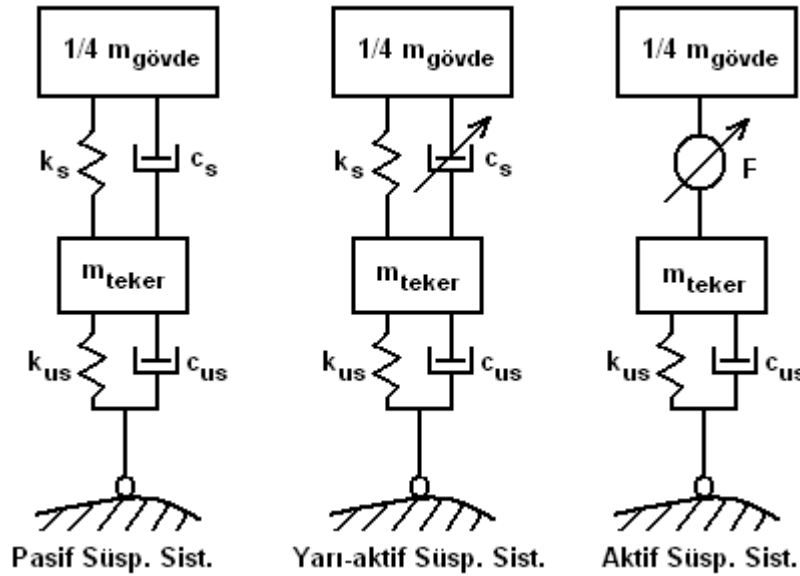


Şekil 12. 1. Süspansiyon sistemi elemanları

12.1. Süspansiyon Sistemi Çeşitleri

Süspansiyon sistemleri pasif, aktif ve yarı-aktif olmak üzere üç grupta incelenir. Pasif süspansiyon sistemlerinde yay ve amortisörün sönüm katsayıları sabittir. Herhangi bir süspansiyon hızı ve genliğinde yay ile amortisör tek bir kuvvet üretir. Aktif süspansiyon sistemlerinde ise süspansiyon hızı ve genliğinden bağımsız olarak

belirli bir aralıkta kuvvet üretilmektedir. Yay ve/veya amortisör sönüm katsayıları değişkendir. Bu nedenle, sürüş konfor ve güvenliği aynı anda optimum düzeyde sağlanabilmektedir. Fakat, pasif ve yarı-aktif süspansiyon sistemlerine göre aktif süspansiyon sistemleri çok daha karmaşık ve maliyetlidir. Yarı-aktif süspansiyon sistemlerinde sadece amortisörün sönüm katsayısı değişkendir. Yani, herhangi bir süspansiyon hızı için belirli bir aralıkta kuvvet üretilmektedir. Bu nedenle, sürüş konfor ve güvenliği açısından aktif süspansiyon sistemine yakın bir performans sergileyebilmektedir. Şekil 12.2’de süspansiyon sistemi çeşitleri çeyrek taşıt modeli üzerinden gösterilmiştir.

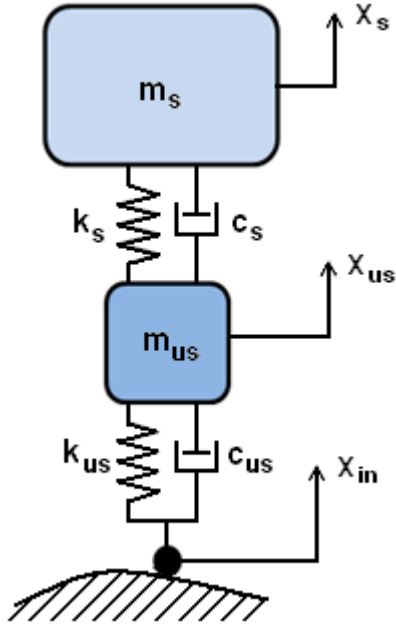


Şekil 12. 2. Süspansiyon sistemi çeşitleri

12.2. Süspansiyon Sisteminin Matematiksel Modeli

Süspansiyon sisteminin matematiksel modeli oluşturulurken oldukça kullanışlı olan çeyrek taşıt modeli kullanılmıştır. Sistemin hareket denklemleri bu fiziksel model üzerinden çıkarılmıştır. Şekil 12.3’te iki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modeli gösterilmiştir. Modelde “ m_s ” taşıt gövde kütlesinin dörtte birini (yaylanan kütle), “ m_{us} ” tekerlek ve aksın toplam kütlesini (yaylanmayan kütle), “ c_s ” süspansiyon sönüm katsayısını, “ c_{us} ” tekerlek sönüm katsayısını, “ k_s ” süspansiyon yay katsayısını

ve “ k_{us} ” ise tekerlek yay katsayısını ifade etmektedir. Model üzerindeki konumlara baktığımızda ise; “ x_s ” taşıt gövdesinin yer değiştirme miktarını, “ x_{us} ” tekerleğin yer değiştirme miktarını ve “ x_{in} ” yol pürüzlülüğünün neden olduğu yer değiştirme miktarını göstermektedir.



Şekil 12. 3. Çeyrek taşıt modeli

Modelde bulunan kütlelere Newton’un ikinci hareket kanunu uygulanırsa, sistemin birinci ve ikinci hareket denklemi sırasıyla Eş. 12.2 ve Eş. 12.4’te görüldüğü gibi elde edilmiş olur.

$$\sum F_{m_s} = m_s \ddot{x}_s \quad (12.1)$$

$$c_s(\dot{x}_{us} - \dot{x}_s) + k_s(x_{us} - x_s) = m_s \ddot{x}_s$$

$$m_s \ddot{x}_s + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_{us}) + k_s(x_s - x_{us}) = 0 \quad (12.2)$$

$$\sum F_{m_{us}} = m_{us} \ddot{x}_{us} \quad (12.3)$$

$$\begin{aligned}
c_{us}(\dot{x}_{in} - \dot{x}_{us}) - c_s(\dot{x}_{us} - \dot{x}_s) + k_{us}(x_{in} - x_{us}) - k_s(x_{us} - x_s) &= m_{us}\ddot{x}_{us} \\
m_{us}\ddot{x}_{us} + c_s(\dot{x}_{us} - \dot{x}_s) + k_s(x_{us} - x_s) + c_{us}(\dot{x}_{us} - \dot{x}_{in}) \\
+ k_{us}(x_{us} - x_{in}) &= 0
\end{aligned} \tag{12.4}$$

Değişken dönüşümü yapılırsa durum değişkenleri;

$$x_1 = x_s \quad x_2 = x_{us} \quad x_3 = \dot{x}_s \quad x_4 = \dot{x}_{us}$$

şeklinde yazılabilir. Durum değişkenlerinin türevleri ise;

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_s \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_{us} \quad \dot{x}_3 = \ddot{x}_s \quad \dot{x}_4 = \ddot{x}_{us}$$

şeklinde olur.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} \\ \frac{k_s}{m_{us}} & -\frac{k_s + k_{us}}{m_{us}} & \frac{c_s}{m_{us}} & -\frac{c_s + c_{us}}{m_{us}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{k_{us}}{m_{us}} & \frac{c_{us}}{m_{us}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{in} \\ \dot{x}_{in} \end{bmatrix} \tag{12.5}$$

Asıl durum değişkenleri yerine yazılırsa, süspansiyon sisteminin hareket denklemlerinin çeyrek taşıt modeli için durum uzayı formundaki gösterilişi Eş. 12.6'daki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_{us} \\ \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_{us} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} \\ \frac{k_s}{m_{us}} & -\frac{k_s + k_{us}}{m_{us}} & \frac{c_s}{m_{us}} & -\frac{c_s + c_{us}}{m_{us}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ x_{us} \\ \dot{x}_s \\ \dot{x}_{us} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{k_{us}}{m_{us}} & \frac{c_{us}}{m_{us}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{in} \\ \dot{x}_{in} \end{bmatrix} \tag{12.6}$$

Hareket denklemlerini yine durum uzayı formunda farklı düzenleme ile Eş. 12.7'deki gibi yazabiliriz.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_{us} - x_{in} \\ \dot{x}_{us} \\ x_s - x_{us} \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_{us}}{m_{us}} & -\frac{(c_s + c_{us})}{m_{us}} & \frac{k_s}{m_{us}} & \frac{c_s}{m_{us}} \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{c_s}{m_s} & -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{us} - x_{in} \\ \dot{x}_{us} \\ x_s - x_{us} \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} -1 \\ \frac{c_{us}}{m_{us}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{x}_{in} \end{aligned} \quad (12.7)$$

Sistemin kütle oranı (ρ), tekerlek ve süspansiyonun sönüm oranları (ζ_{us} , ζ_s) ile doğal frekansları (ω_{us} , ω_s) Eş. 12.8, Eş. 12.9 ve Eş. 12.10'da verilmiştir. Bu ifadeler kullanılarak Eş. 12.7 tekrar yazılırsa Eş. 12.11 elde edilmiş olur.

$$\rho = \frac{m_s}{m_{us}} \quad (12.8)$$

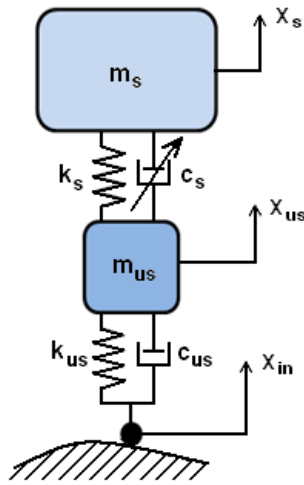
$$\zeta_{us} = \frac{c_{us} + c_s}{2m_{us}\omega_{us}} \quad , \quad \zeta_s = \frac{c_s}{2m_s\omega_s} \quad (12.9)$$

$$\omega_{us} = \sqrt{\frac{k_{us} + k_s}{m_{us}}} \quad , \quad \omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} \quad (12.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_{us} - x_{in} \\ \dot{x}_{us} \\ x_s - x_{us} \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\omega_{us}^2 + \rho\omega_s^2 & -2\zeta_{us}\omega_{us} & \rho\omega_s^2 & 2\rho\zeta_s\omega_s \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 2\zeta_s\omega_s & -\omega_s^2 & -2\zeta_s\omega_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{us} - x_{in} \\ \dot{x}_{us} \\ x_s - x_{us} \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} -1 \\ 2(\zeta_{us}\omega_{us} - \rho\zeta_s\omega_s) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{x}_{in} \end{aligned} \quad (12.11)$$

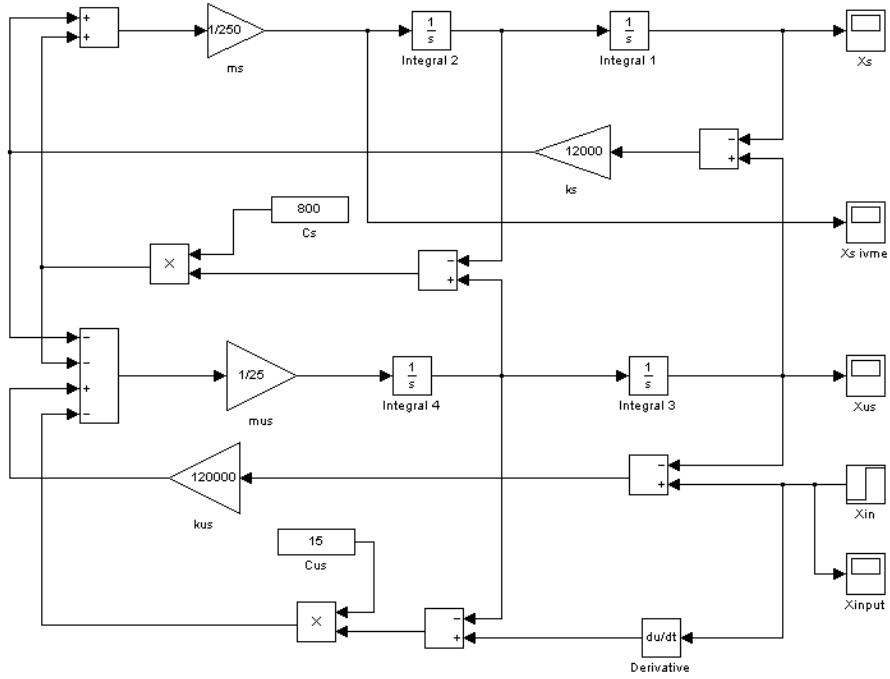
12.3. MR Amortisörlü Yarı-Aktif Süspansiyon Sisteminin Simülasyonu

Süspansiyon sisteminde MR amortisörün kullanılmasıyla süspansiyon sönümleme katsayısı değiştirilebilir hale gelmiştir. Bu değişim, MR amortisörün bobinine uygulanan akımın değiştirilmesiyle mümkündür. Şekil 12.4'te MR amortisörlü yarı-aktif bir süspansiyon sisteminin iki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modeli verilmiştir.

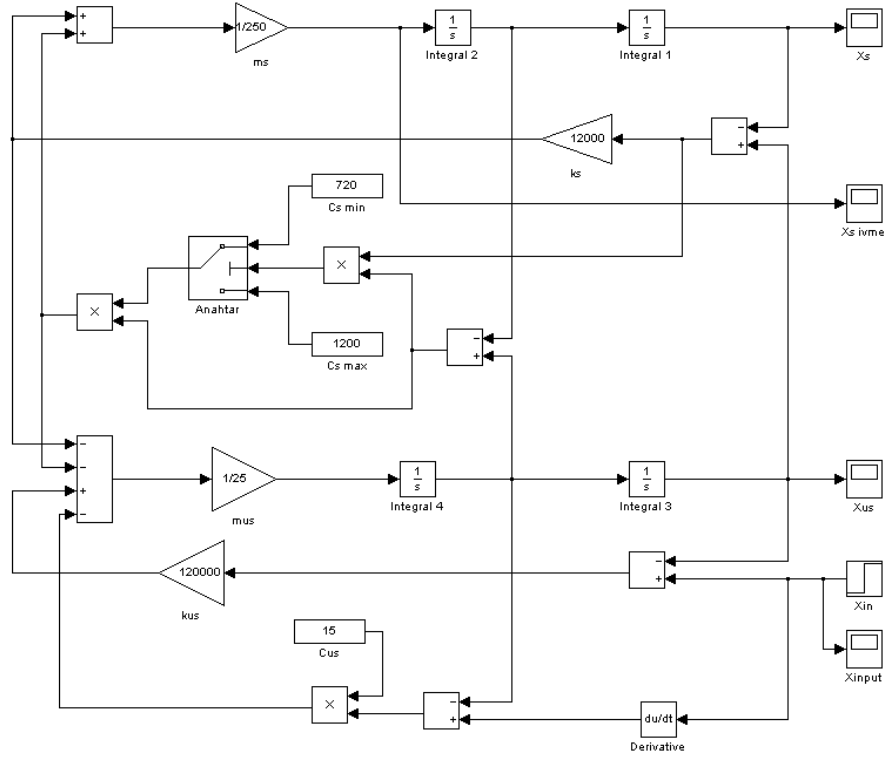


Şekil 12. 4. MR amortisörlü yarı-aktif süspansiyon sisteminin çeyrek taşıt modeli

Simülasyona başlarken öncelikle matematiksel model kısmında verilen hareket denklemlerine göre MATLAB/Simulink programında pasif ve yarı-aktif süspansiyon sistemlerinin simülasyon modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller Şekil 12.5 ve Şekil 12.6'da verilmiştir. Oluşturulan bu modellere farklı şekildeki yol uyarıları (x_{in}) uygulanarak yarı-aktif (kontrollü) ve pasif (kontROLSÜZ) süspansiyon sistemleri için sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yarı-aktif süspansiyon sisteminde kullanılan sönüm katsayıları MRF-5'e ait olan ve önceki bölümde performans eğrilerine göre hesaplanmış sönüm katsayılarının dört katı alınarak belirlenmiş değerlerdir. Sönüm katsayılarının dört katının alınmasının sebebi, MR sıvı sentezinde kullanılan taşıyıcı sıvı viskozitesinin düşük olmasından sönüm katsayılarının düşük çıkmasıdır. Bu nedenle, MRF-5'e ait sönüm katsayıları (c_{min} , c_{max}) aynı oranda arttırılarak simülasyonlarda kullanılmıştır. Pasif süspansiyon sisteminde ise bir aracın orijinal arka amortisörünün sönüm katsayısı olan 800Ns/m değeri kullanılmıştır.



Şekil 12. 5. Pasif süspansiyon sisteminin Simulink blok diyagramı



Şekil 12. 6. Yarı-aktif süspansiyon sisteminin Simulink blok diyagramı

Yarı-aktif süspansiyon sisteminde kullanışlı ve basit oluşundan dolayı ON/OFF (aç/kapa) kontrol sistemi kullanılmıştır. Yani model maksimum (sert) ve minimum (yumuşak) olmak üzere iki farklı sönüm katsayısı üzerinde çalışmaktadır.

Yarı-aktif süspansiyon sisteminde kullanılan kontrolcünün amacı taşıt gövdesine etkiyen süspansiyon kuvvetini minimuma indirmektir. Çünkü taşıt gövdesine etkiyen bu kuvvetler gövdenin ivmelenmesine yol açmaktadır. Eş. 12.12’de bu açıkça görülmektedir.

$$m_s \ddot{x}_s = F_k + F_d \quad (12.12)$$

Burada “ F_k ” ve “ F_d ” sırasıyla yay ve sönümleme kuvvetleridir. Bu kuvvetler Eş. 12.13’teki gibi ifade edilebilirler.

$$F_k = k_s(x_s - x_{us})$$

$$F_d = c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_{us}) \quad (12.13)$$

Burada yay katsayısı sabit olduğundan bağıl hız $(\dot{x}_s - \dot{x}_{us})$ ve bağıl yer değiştirmenin $(x_s - x_{us})$ yönlerine göre gövdeye etkiyen süspansiyon kuvvetlerini azaltmak için sadece sönüm katsayısını değiştirebiliriz. Eş. 12.14’de bu durumu ifade eden ON/OFF kontrol şekli gösterilmiştir.

$$c_s(t) = \begin{cases} c_{s \min}, & (x_s - x_{us})(\dot{x}_s - \dot{x}_{us}) \geq 0 \\ c_{s \max}, & (x_s - x_{us})(\dot{x}_s - \dot{x}_{us}) < 0 \end{cases} \quad (12.14)$$

Bu ifadede $(x_s - x_{us})(\dot{x}_s - \dot{x}_{us}) \geq 0$ olduğu zaman yay ve sönüm kuvvetleri aynı yönde olacağından sönüm katsayısı minimum seçilir. $(x_s - x_{us})(\dot{x}_s - \dot{x}_{us}) < 0$ şartı sağlandığında ise yay ve sönüm kuvveti zıt yönlü olup sönüm katsayısının maksimum değeri seçilir.

Simülasyonda kullanılan süspansiyon sistemi parametreleri Çizelge 12.1’de verilmiştir.

Çizelge 12. 1. Süspansiyon sistemi parametreleri

Parametre	Değer
Taşıt gövde kütlesi (m_s)	250kg
Tekerlek kütlesi (m_{us})	25kg
Süspansiyon yay katsayısı (k_s)	12000N/m
Tekerlek yay katsayısı (k_{us})	120000N/m
Süspansiyon sönüm katsayısı (c_s) [Pasif/Yarı-aktif (min-max)]	800/720-1200Ns/m
Tekerlek sönüm katsayısı (c_{us})	15Ns/m

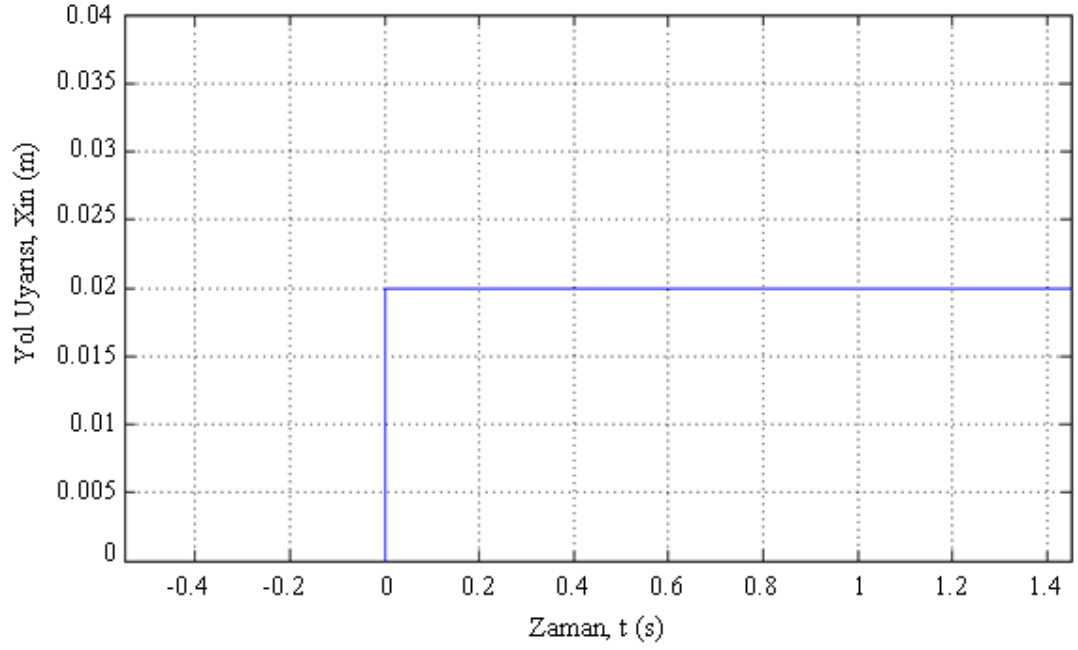
12.4. Simülasyon Sonuçları

Pasif ve yarı-aktif süspansiyon sistemlerinin simülasyonlarında, sistemlerin zaman alanı ve frekans cevapları elde edilirken giriş uyarısı olarak farklı yol uyarıtısı şekilleri kullanılmıştır.

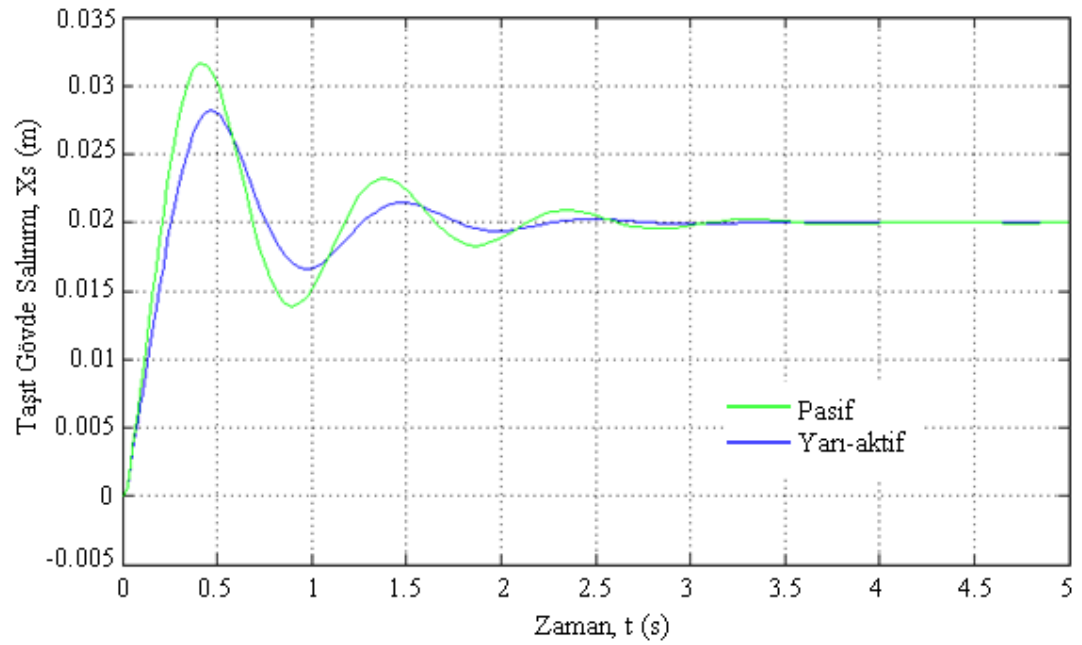
12.4.1. Basamak yol uyarısının zaman alanı cevabı

Pasif ve yarı-aktif süspansiyon sistemlerinin Simulink blok diyagramları kullanılarak basamak yol uyarısının cevapları elde edilmiştir. Basamak yol uyarı genliği değeri 0,02m olarak seçilmiştir. Şekil 12.7’de basamak yol uyarısı görülmektedir.

Şekil 12.8’de zamana göre taşıt gövde salınımının değişimi pasif (kontROLSÜZ) ve yarı-aktif (kontrollü) süspansiyon sistemleri için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Görüldüğü gibi ON/OFF kontrolün uygulandığı yarı-aktif süspansiyonun gövde salınım miktarı pasif süspansiyona oranla oldukça azalmıştır. Yarı-aktif süspansiyon sistemi titreşimleri daha kısa sürede ve etkin bir biçimde sönümlemektedir. Gövde salınım miktarının azalması sürüş güvenliğini pozitif yönde etkilemektedir.



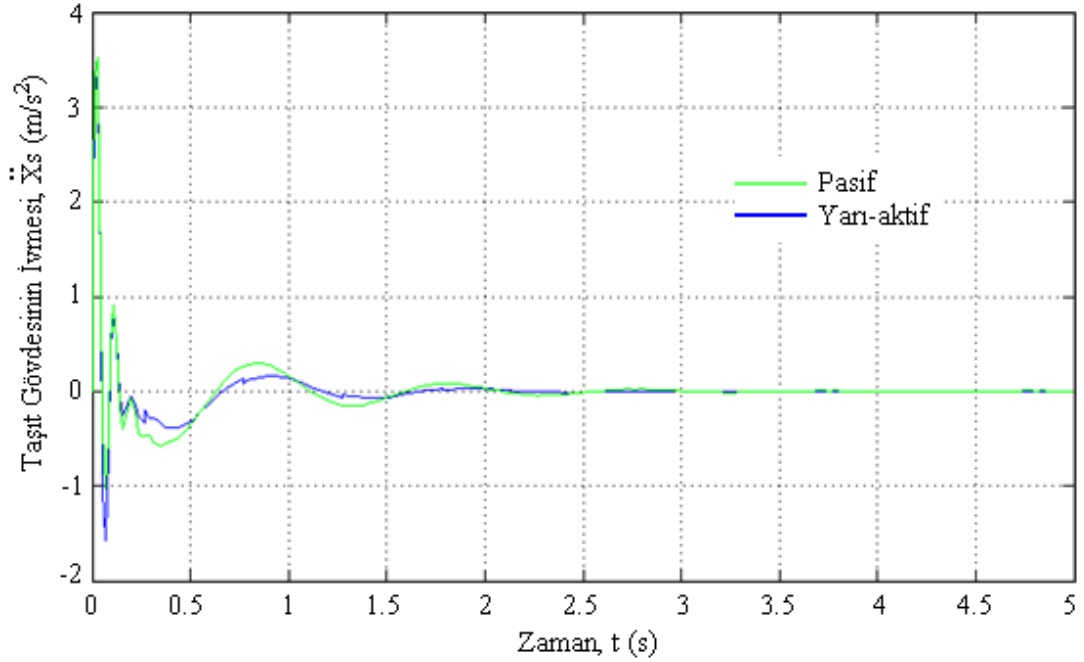
Şekil 12. 7. Basamak yol uyarısı



Şekil 12. 8. Taşıt gövde salınımının zamana göre değişimi

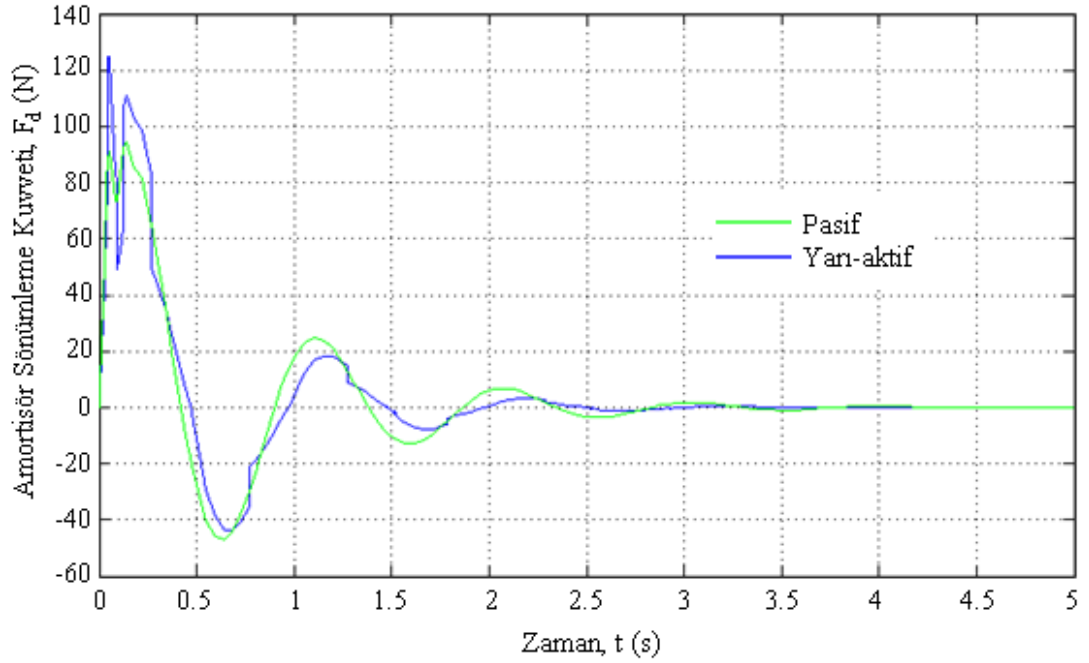
Şekil 12.9'da taşıt gövde ivmesinin zamana göre değişimi gösterilmiştir. İlk 0,5s içerisinde her iki süspansiyon sistemi için de ani ivme değişimleri meydana gelmiş ve sonrasında kontrollü olan yarı-aktif süspansiyon sisteminin taşıt gövde ivmelenmesi

pasif sistemden daha az olacak şekilde gerçekleşmiştir. Bu durumda, yarı-aktif süspansiyon sisteminin sürüş konforunu arttırdığı söylenebilir.



Şekil 12. 9. Taşıt gövde ivmesinin zamana göre değişimi

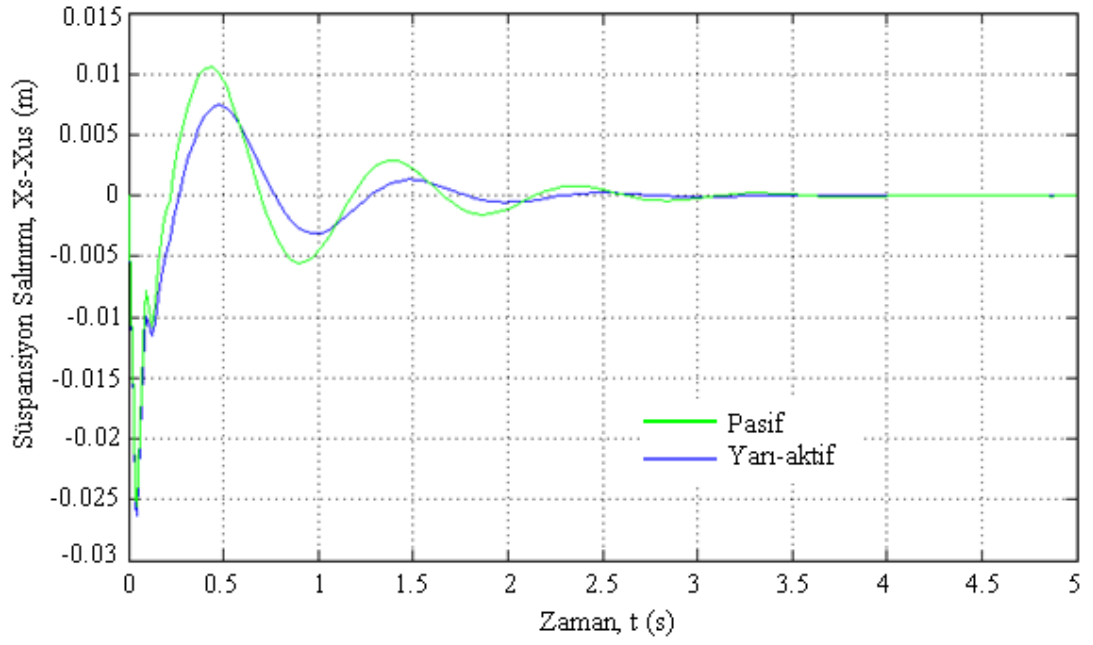
Şekil 12.10'da amortisör sönümleme kuvvetinin zamana bağlı değişimi verilmiştir. Bu grafikten yarı-aktif sistemin titreşimi azaltmak için sürekli sönümleme kuvvetini değiştirerek müdahalelerde bulunduğu açıkça görülmektedir. Özellikle darbenin ilk olarak geldiği 0,5s içersinde sönümleme kuvvetinde ani dalgalanmalar meydana gelmiştir. Titreşim kontrol altına alındıktan sonra 0,5s'den itibaren yarı-aktif süspansiyon sisteminin pasif süspansiyon sisteminden daha az miktarda sönümleme kuvveti ürettiği görülmektedir. Pasif sistemin sönüm kuvveti değişim eğrisine bakıldığında ise, sistem sabit bir sönüm katsayısına sahip olduğundan sönümleme kuvvetinde ani değişimler meydana gelmemektedir.



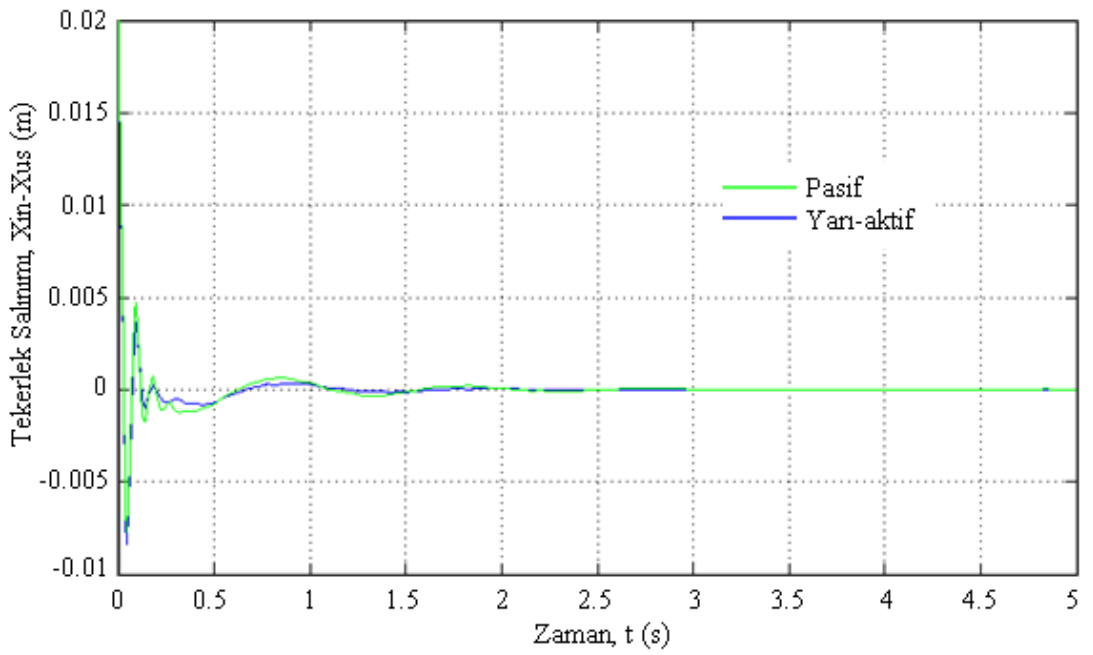
Şekil 12. 10. Amortisör sönümlleme kuvvetinin zamana göre değişimi

Şekil 12.11'e bakıldığında, pasif ve yarı-aktif sistemlerin süspansiyon salınımları karşılaştırılmıştır. Süspansiyon salınım değeri aslında amortisör stroğunu ifade etmektedir. Grafikten görüldüğü üzere yarı-aktif sistemin süspansiyon salınımı pasif sisteme göre daha azdır. Özellikle ilk 1,5s içerisinde pasif ve yarı-aktif sistemin süspansiyon salınımı değerleri arasındaki farklar oldukça büyüktür.

Şekil 12.12'de ise tekerlek salınımları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hem pasif hem de yarı-aktif süspansiyon sistemi için ilk 1s içerisinde tekerlek salınımları sönümlenmiştir. Fakat bu 1s'lik zaman dilimi içerisinde pasif sistemin tekerlek salınım değerleri yarı-aktif sisteme göre daha büyüktür. Yani pasif süspansiyon sisteminin tekerleği daha büyük salınımlarla titreşim yapmaktadır. Bu da yol tutuşu ve dolayısıyla sürüş güvenliği açısından arzu edilen bir durum değildir.



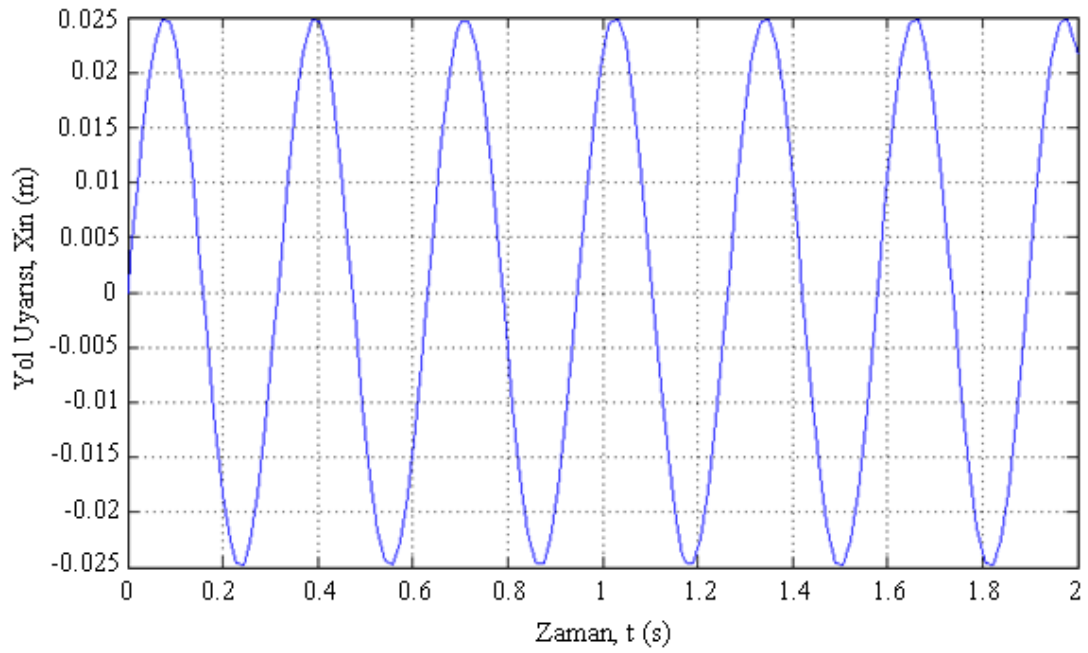
Şekil 12. 11. Süspansiyon salınımının zamana göre değişimi



Şekil 12. 12. Tekerlek salınımının zamana göre değişimi

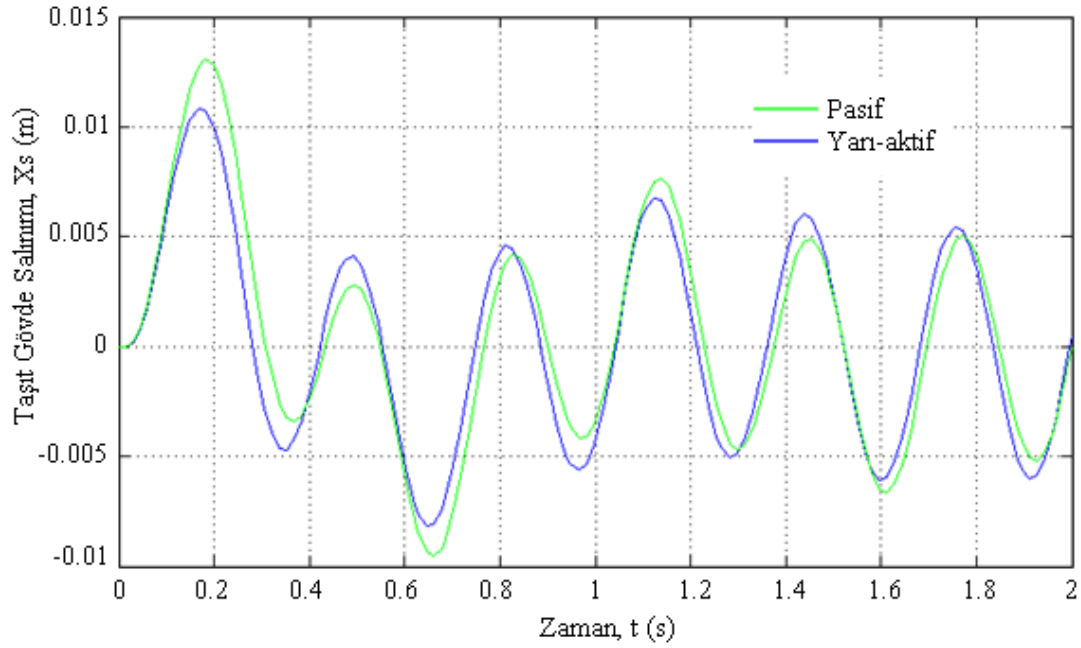
12.4.2. Sinüsoidal (harmonik) yol uyarısının zaman alanı cevabı

Sinüs fonksiyonu şeklindeki yol uyarısı oluşturulurken uyarı genliği değeri 0,025m ve uyarı frekansı ise 19,9rad/s (3,17Hz) olarak seçilmiştir. Şekil 12.13'te sinüs yol uyarısı görülmektedir.



Şekil 12. 13. Sinüsoidal yol uyarısı

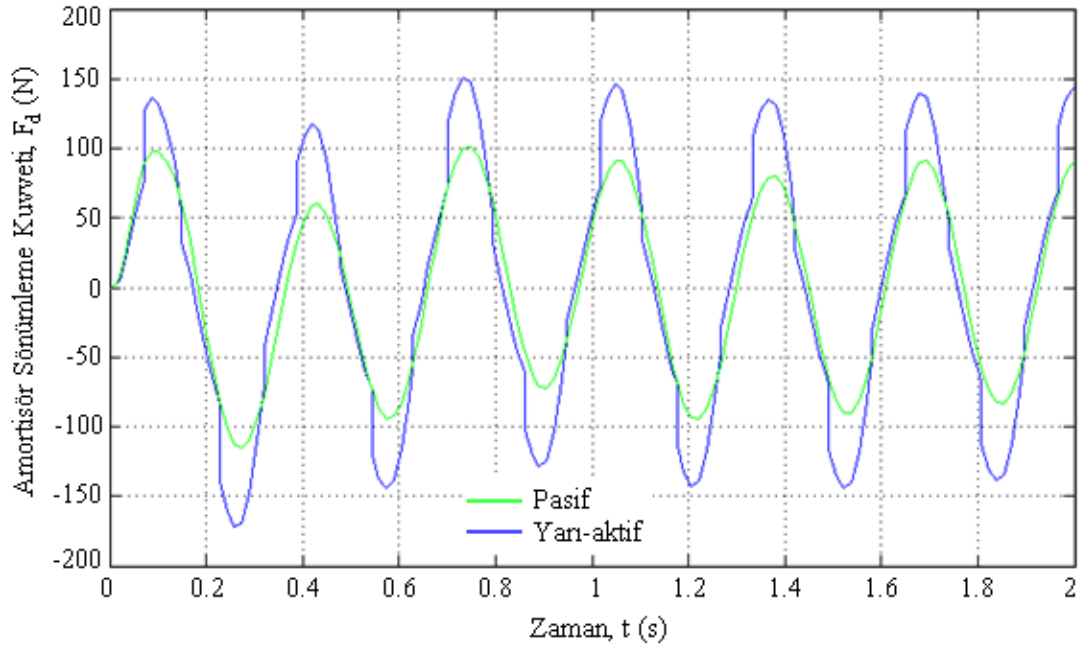
Şekil 12.14'te taşıt gövde salınımının pasif sistem ve yarı-aktif sistem için zamana göre değişimi karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Yarı-aktif süspansiyon sisteminin gövde salınımı pasif süspansiyon sistemine oranla daha azdır. Bu nedenle, yarı-aktif sistem taşıt gövde titreşimlerini daha çabuk sönümlene eğilimindedir. Bu durum sürüş güvenliğini olumlu yönde etkilemektedir. Ayrıca, süspansiyon salınımı değeri amortisör stroğunu aşacak kadar yüksek olursa, amortisörün tam açma ve kapanma stroklarında vurma şeklinde darbeler hissedilebilir.



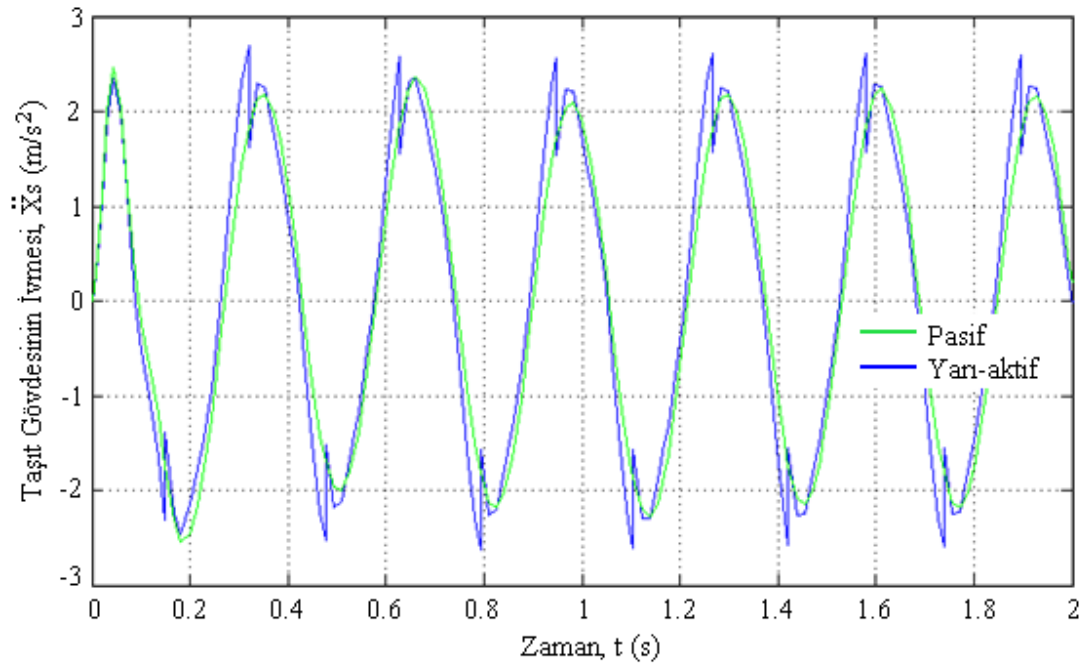
Şekil 12. 14. Taşıt gövde salınımının zamana göre değişimi

Şekil 12.15'te amortisör sönümleme kuvvetinin zamana bağlı değişimi her iki sistem için verilmiştir. Basamak yol uyarısı cevabında olduğu gibi, yarı-aktif sistemin titreşimi azaltmak için sürekli sönümleme kuvvetini değiştirerek müdahalelerde bulunduğu açıkça görülmektedir. Pasif sistemin sönüm kuvveti değişim eğrisinde ani değişimler meydana gelmemiştir. Çünkü sistem sabit sönüm katsayısına sahiptir. Pasif süspansiyon sisteminin ürettiği sönümleme kuvveti değerleri 100N'un altında kalırken yarı-aktif süspansiyon sistemi 150N civarında sönümleme kuvvetleri üretmektedir.

Şekil 12.16'da ise taşıt gövde ivmesinin zamana bağlı değişimi her iki sistem için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Pasif ve yarı-aktif süspansiyon sistemlerinin taşıt gövde ivmesi değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Küçük farklarla yarı-aktif sistemin ivme değerleri pasif sisteme oranla daha fazladır. Bunun sebebi, yarı-aktif sistemin titreşimleri daha çabuk sönümlemek için daha fazla sönümleme kuvveti üretmesidir. Yarı-aktif süspansiyon sisteminin pasif sisteme oranla sürüş güvenliğini arttırmak için sürüş konforunu bir miktar azalttığı söylenebilir.



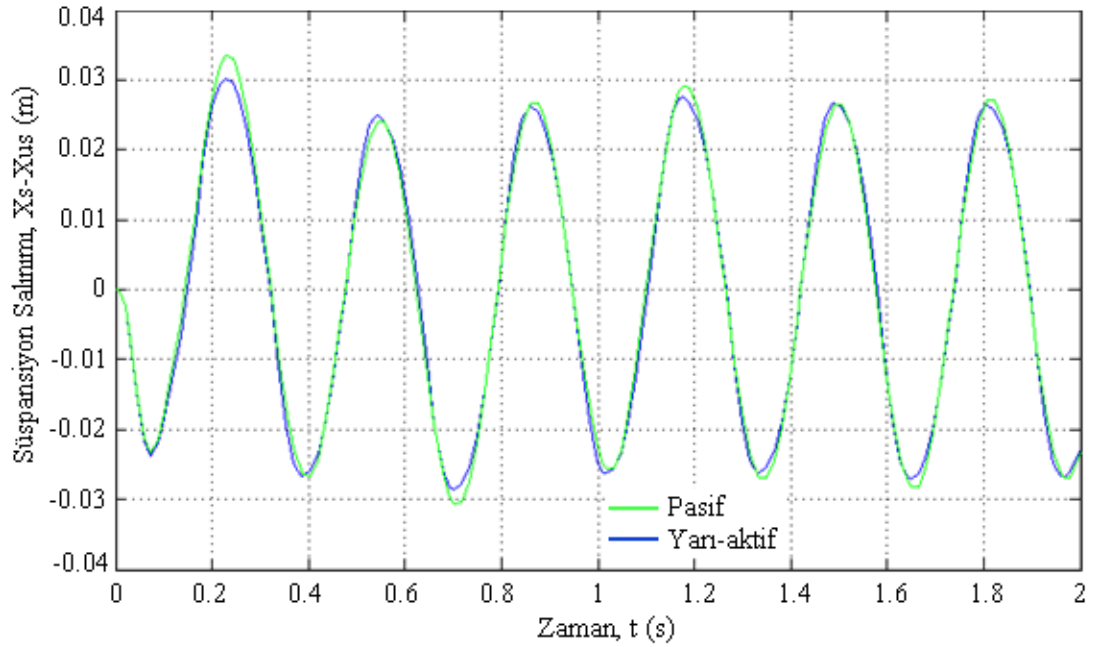
Şekil 12. 15. Amortisör sönümleme kuvvetinin zamana göre değişimi



Şekil 12. 16. Taşıt gövde ivmesinin zamana göre değişimi

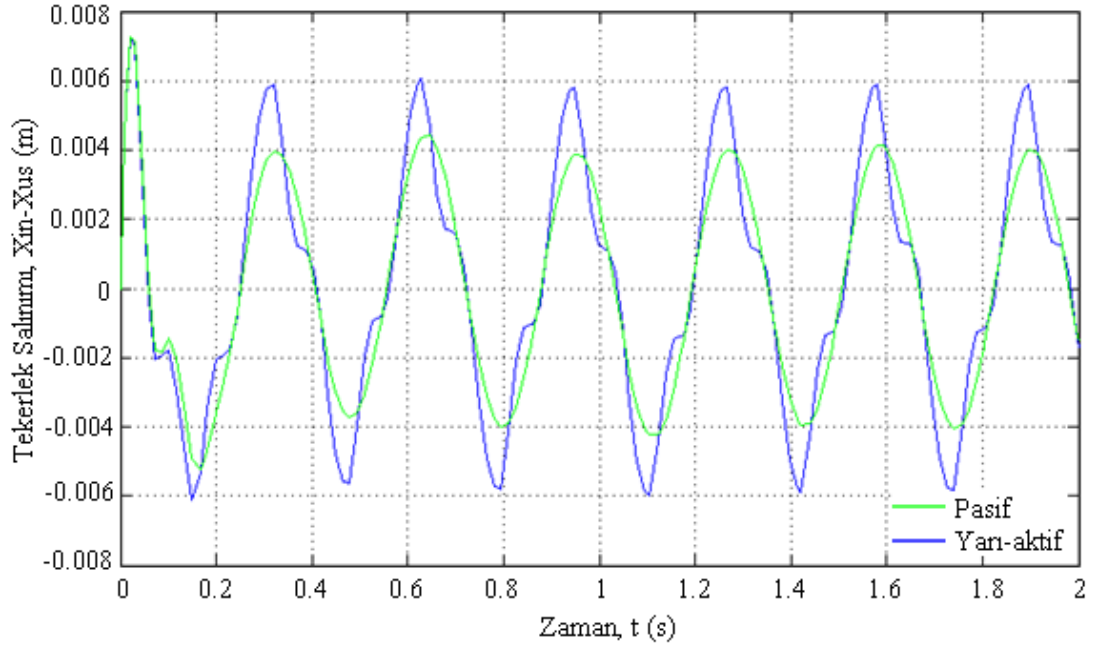
Şekil 12.17’de süspansiyon salınımının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Yarı-aktif süspansiyon sisteminin süspansiyon salınımının pasif sistemden daha az olduğu

görülmektedir. Yani, amortisör stroğunun daha az değiştiği anlamına gelmektedir. Bu durum, taşıt gövdesine iletilecek daha az titreşim anlamına gelmektedir.



Şekil 12. 17. Süspansiyon salınıminin zamana göre değişimi

Şekil 12.18’de ise tekerlek salınıminin zamana bağlı değişimi verilmiştir. Pasif süspansiyon sisteminin tekerlek salınıminin yarı-aktif süspansiyon sisteminin tekerlek salınımlarından çok küçük bir farkla daha az olduğu görülmektedir. Pozitif ve negatif olmak üzere her iki yönde de 2mm’lik bir tekerlek salınımı farkı oluşmuştur. Yarı-aktif süspansiyon sisteminin bu tekerlek salınımı farkı sürüş güvenliği açısından olumsuzluk oluşturabilecek boyutta değildir.

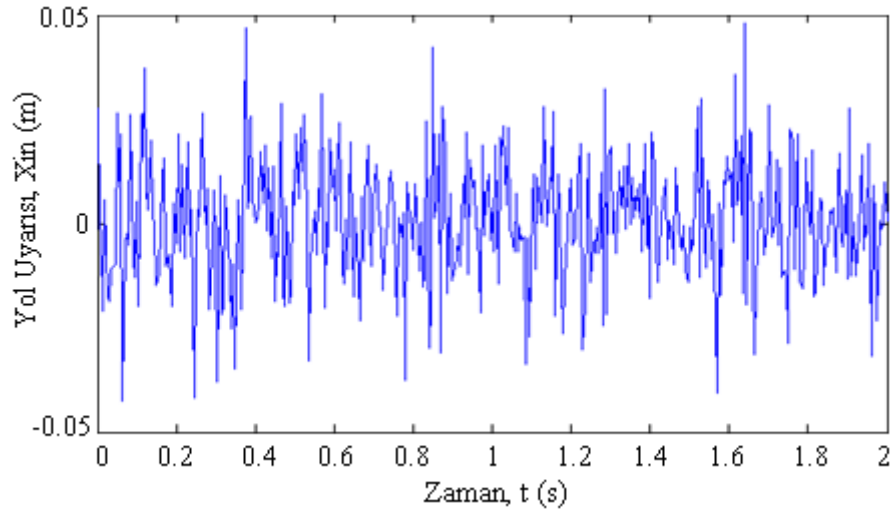


Şekil 12. 18. Tekerlek salınımının zamana göre değişimi

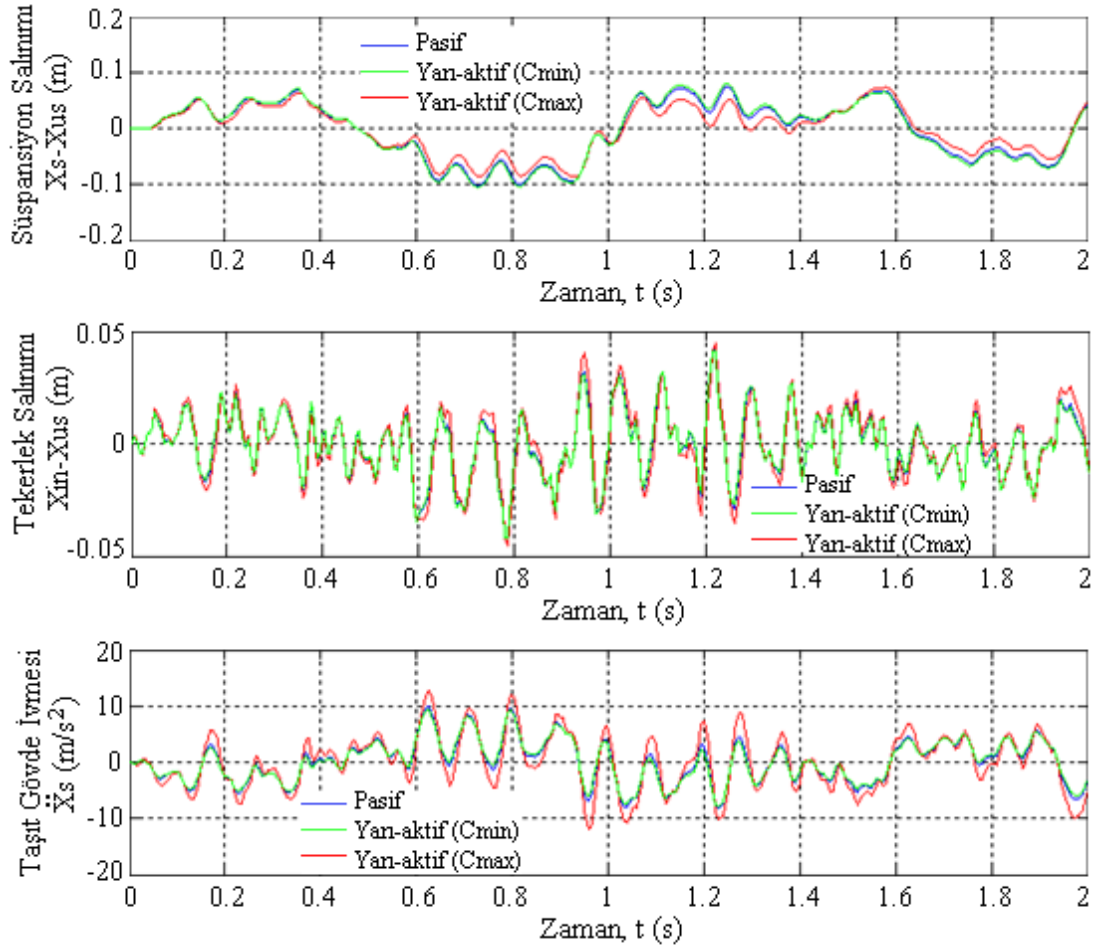
12.4.3. Rastgele sinüsoidal yol uyarısının zaman alanı ve frekans cevapları

Rastgele sinüsoidal yol uyarısının zaman alanı ve frekans cevaplarını pasif ve yarı-aktif süspansiyon sistemleri için elde edebilmek amacıyla Matlab programında kod yazılmıştır. Sistemin Matlab kodu yazılırken daha önceden matematiksel model kısmında verilen hareket denklemlerinden yararlanılmıştır. Yazılan Matlab kodu ekler kısmında verilmiştir. Matlab programında oluşturulan rastgele sinüsoidal yol uyarısı Şekil 12.19’da gösterilmiştir.

Şekil 12.20’de pasif ve yarı-aktif sistemin zaman alanı cevapları görülmektedir. Zaman alanı cevabı olarak süspansiyon salınımı, tekerlek salınımı ve taşıt gövdesinin ivmesi her iki sistem için de verilmiştir. Yarı-aktif süspansiyon sisteminin sönümleme katsayısı minimum (c_{min}) olarak seçildiğinde tekerlek salınımı ve taşıt gövde ivmesi değerleri pasif sisteme göre daha düşük çıkmaktadır. Yarı-aktif sistemin sönümleme katsayısı maksimum (c_{max}) olarak seçildiğinde ise, süspansiyon salınımı değerleri pasif sisteme göre daha düşük olmaktadır. Bu nedenle, yarı-aktif süspansiyon sistemi pasif sisteme göre sürüş konfor ve güvenliğini arttırmaktadır.

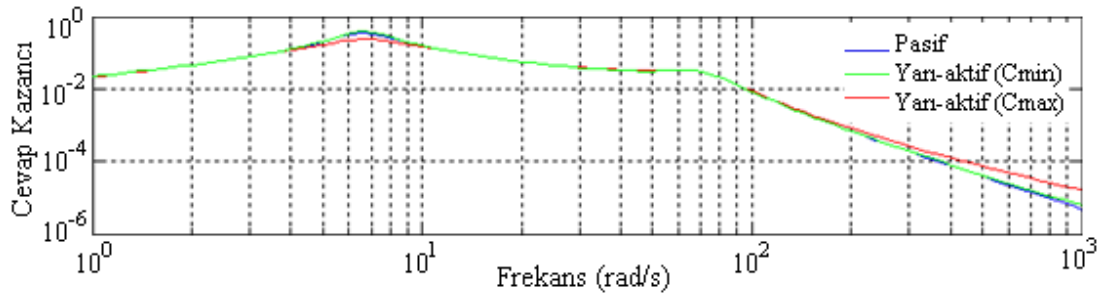


Şekil 12. 19. Rastgele sinüsoidal yol uyarısı



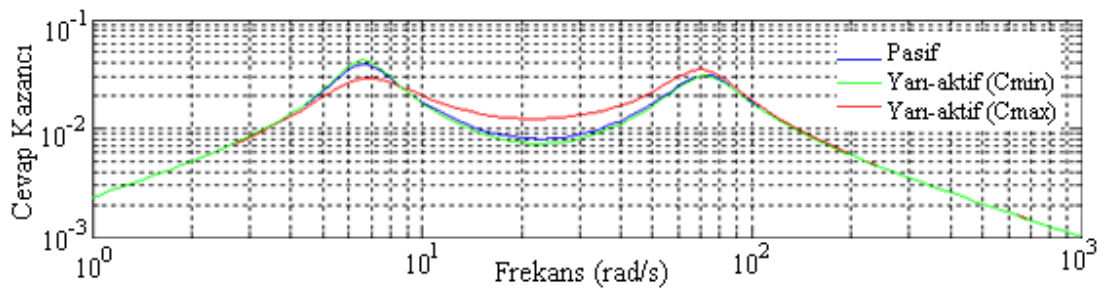
Şekil 12. 20. Rastgele sinüsoidal yol uyarısının zaman alanı cevapları

Şekil 12.21’de pasif ve yarı-aktif sistemin süspansiyon salınımlarının frekans cevabı gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, rezonans frekansının birincisi 6,6rad/s (1Hz) ve ikincisi ise 70rad/s (11,1Hz) frekans değerlerinde gerçekleşmiştir. Yarı-aktif sistemin rezonans frekansı pik (tepe) değerleri minimum sönümleme katsayısının (c_{min}) kullanımıyla pasif sisteme oranla bir miktar azalmış durumdadır.



Şekil 12. 21. Süspansiyon salınımlarının frekans cevabı

Şekil 12.22’de ise tekerlek salınımlarının frekans cevabı yine her iki sistem için verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, rezonans frekansı değerleri yay katsayısı ve kütle değişmediğinden doğal olarak değişmemiştir. Bunun yanında, yarı-aktif sistemin rezonans frekansı pik değerleri 6,6rad/s (1Hz) civarında maksimum sönüm katsayısı ve 70rad/s (11,1Hz) civarında ise minimum sönüm katsayısının seçimi ile pasif sisteme göre oldukça azalmaktadır.



Şekil 12. 22. Tekerlek salınımlarının frekans cevabı

13. SONUÇ VE ÖNERİLER

MR amortisör prototipi tasarlanırken yapılan statik manyetik analizlerde, MR sıvı kanalı genişliğinin ve amortisörde kullanılan malzemelerin bağıl manyetik geçirgenlik değerlerinin güçlü bir MR etkinin oluşmasında oldukça önemli yer tuttuğu gözlenmiştir. MR sıvı kanalı daraldıkça ve kullanılan malzemelerin bağıl manyetik geçirgenlik değerleri arttıkça MR etki artmakta ve dolayısıyla elde edilen sönümlleme kuvvetleri yükselmektedir.

Sentezlenen MR sıvıların performans testlerinde tüm test hızlarında geçerli olacak şekilde, akım arttıkça elde edilen sönümlleme kuvvetleri dolayısıyla absorbe edilen enerji miktarları artmıştır. Benzer şekilde; MR sıvılar içersindeki manyetik parçacık konsantrasyonu arttırıldığında MR sıvıların sönümlleme kuvvetleri, dinamik kuvvet aralıkları ve çökelme kararlılıkları artmıştır. Buna karşılık, amortisör hızı arttırıldığında ise tüm MR sıvıların dinamik kuvvet aralığı değerleri azalmaktadır.

Manyetik parçacık olarak karbonil demirin kullanıldığı MR sıvılardan manyetit ile hazırlanan MR sıvılara göre daha büyük sönümlleme kuvvetleri elde edilmiştir. Ayrıca, karbonil demir ile hazırlanan MR sıvıların dinamik kuvvet aralığı değerleri manyetit ile hazırlananlara oranla çok daha yüksektir. Ortalama dinamik kuvvet aralığı değerlerine bakıldığında, karbonil demir ile hazırlanan MR sıvıların dinamik kuvvet aralığı değerleri manyetit içerikli MR sıvıların dinamik kuvvet aralığı değerlerinin üç katına eşittir.

Bunun yanında, manyetit esaslı MR sıvıların çökelme kararlılıkları karbonil demir esaslı MR sıvılara oranla daha yüksektir. Tanecik tipi açısından bakıldığında, manyetit ve karbonil demir ile hazırlanan MR sıvıların çökelme oranları arasında yaklaşık %50 fark meydana gelmiştir. Konsantrasyon açısından ise, her iki tanecik tipi için de çökelme oranları arasında yaklaşık %30'luk bir fark oluşmuştur. Karbonil demir esaslı MR sıvılara eklenen silika dumanı, çökelme kararlılığını büyük oranda arttırmıştır. Silika dumanı ilavesiyle çökelme oranları arasında olumlu yönde

%20'lik bir fark meydana gelmiştir. Ayrıca, dinamik kuvvet aralığı değerlerini küçük de olsa pozitif yönde etkilemiştir.

Sıcaklığın MR sıvı performansı üzerindeki etkisine bakıldığında ise, sıcaklık artışıyla birlikte tüm MR sıvıların sönümleme kuvvetlerinde azalma meydana gelmiştir. Manyetik tanecik tipi açısından, karbonil demirdeki kuvvet kaybı manyetite oranla daha düşüktür. Derişimin artması kuvvet kaybını azaltırken, katkı maddesi olarak silika dumanı ilavesi kuvvet kaybını arttırmıştır.

MR sıvıların eşdeğer sönümleme katsayılarına bakıldığında, en hızlı artışın akımın ilk uygulandığı 0,2A akım değerinde gerçekleştiği görülmektedir. Tüm sentezlenen MR sıvılar için, akım arttıkça sönümleme katsayıları artmakta fakat bu artışın hızı giderek yavaşlamaktadır. Bunun nedeni, akım artışıyla birlikte MR sıvının manyetik doyuma yaklaşmasıdır.

Pasif ve MR sıvılı amortisörün kullanıldığı yarı-aktif süspansiyon sistemlerinin titreşim sönümleme performanslarını karşılaştırmak için 12. Bölümde verilen matematiksel modele göre her iki sistemin MATLAB Simulink'te çeyrek taşıt modelleri oluşturulmuştur. Ayrıca, sistemlerin frekans cevaplarını elde edebilmek amacıyla MATLAB kodlarıyla çeyrek taşıt modeli oluşturulmuştur. Tüm sentezlenen MR sıvılar içerisinde optimum özelliklere sahip MR sıvı MRF-5 olduğundan simülasyon işlemlerinde MRF-5'in maksimum ve minimum sönüm katsayıları esas alınmıştır.

Oluşturulan bu teorik modellere farklı yol uyarıları verilerek her iki sistem için sistem cevapları karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir. Basamak, sinüsoidal ve rastgele sinüsoidal yol uyarıları için, ON/OFF kontrol sisteminin kullanıldığı yarı-aktif süspansiyon sisteminin zaman alanı cevapları pasif süspansiyon sistemine göre daha iyi titreşim sönüm performansına sahiptir. Yarı-aktif süspansiyon sisteminin taşıt gövde salınımı, gövde ivmesi, süspansiyon ve tekerlek salınımı değerleri pasif sisteme oranla daha düşük çıkmıştır. Bu da, yarı-aktif sistemin sürüş konfor ve güvenliğini iyileştirdiği anlamına gelmektedir.

Süspansiyon ve tekerlek salınımlarının frekans cevaplarına bakıldığında yine yarı-aktif süspansiyon sisteminin performansının pasif sisteme göre daha iyi olduğu görülmüştür. Yarı-aktif süspansiyon sisteminin 1Hz ve 11,1Hz frekans değerlerindeki rezonans frekansı pik değerlerinin pasif sisteme oranla daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum, bu iki kritik frekans değerinde taşıt gövdesini ve tekerleği etkileyen titreşim miktarının daha az olması demektir.

İleriki çalışmalarda MR sıvı kanalındaki MR etkiyi daha da güçlendirmek adına amortisör piston ve silindiri imalatında kullanılan malzemelerin, bağıl manyetik geçirgenlik değeri daha yüksek olanlardan seçilmesinin önemli olduğu düşünülmektedir. MR sıvılardan daha büyük sönümleme kuvvetleri elde edebilmek için MR sıvı sentezi işleminde daha yüksek viskoziteli taşıyıcı sıvılar ve daha yüksek konsantrasyonda manyetik tanecik içeren MR sıvılar denenmelidir. Manyetik tanecik tipi olarak karbonil demir süspansiyon sistemi uygulamaları için daha uygun görünmektedir. Ayrıca, performans testleri farklı test genlikleri için de yapılabilir.

MR sıvılı yarı-aktif amortisörlerin taşıt süspansiyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılabilmesi için, düşük maliyetli MR sıvıların sentezi ve daha az sayıda sensör ile çalışan kontrol sistemi tasarımları gibi konuların araştırılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Ercan, Y., "Theoretical analysis and evaluation of an optimally controlled full-car vehicle model with a variable-damping semi-active vehicle suspension forced by measured road inputs", *11th Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, IOP Publishing*, 149: 1-4 (2009).
2. İnternet : Lord Corporation "Representative controllable fluid properties" <http://www.lord.com/Portals/0/MR/MRvsER.pdf> (2010).
3. Uzun, H. E., "Manyetoreolojik akışkanların sentezi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniv. Fen Bilimleri Enst.*, İstanbul, 1-14 (2008).
4. Spencer, B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K., Carlson, J. D., "Phenomenological model of a magnetorheological damper", *Journal of Engineering Mechanics*, 123 (3): 230-238 (1997).
5. Li, W. H., Du, H., Guo, N. Q., "Design and testing of an MR steering damper for motorcycles", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22: 288-294 (2003).
6. Şahin, İ., Morgül, İ. K., Engin, T., "Design and testing of a magnetorheological (MR) damper for tractor seat", *9th International Research/Expert Conference, Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, Antalya, 1093-1096, (2005).
7. Shen, Y., Golnaraghi, M. F., Heppler, G. R., "Analytical and experimental study of the response of a suspension system with a magnetorheological damper", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16: 135-147 (2005).
8. Sassi, S., Cherif, K., Mezghani, L., Thomas, M., Kotrane, A., "An innovative magnetorheological damper for automotive suspension: from design to experimental characterization", *Smart Materials and Structures*, 14: 811-822 (2005).
9. Rashid, M. M., Hussain, M. A., Rahim, N. A., "Application of magnetorheological damper for car suspension control", *Journal of Applied Sciences*, 6 (4): 933-938 (2006).
10. Zhang, H. H., Liao, C. R., Chen, W. M., Huang, S. L., "A magnetic design method of MR fluid dampers and FEM analysis on magnetic saturation", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 17: 813-818 (2006).
11. Aydar, G., Evrensel, C. A., Gordaninejad, F., Fuchs, A., "A low force magnetorheological (MR) fluid damper: design, fabrication and characterization", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18: 1155-1160 (2007).

12. Engin, T., Çeşmeci, Ş., Şahin, İ., Parlak, Z., “Manyeto-reolojik damper (sönümleyici) davranışının sanki-statik akış modeli ile kestirimi”, **16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi**, Kayseri, 475-480, (2007).
13. Nam, Y. J., Park, M. K., “Performance evaluation of two different bypass-type MR shock dampers”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18: 707-717 (2007).
14. Ahmadian, M., Norris, J. A., “Experimental analysis of magnetorheological dampers when subjected to impact and shock loading”, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 13: 1978-1985 (2008).
15. Mao, M., Hu, W., Choi, Y. T., Wereley, N. M., “A magnetorheological damper with bifold valves for shock and vibration mitigation”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18: 1227-1232 (2007).
16. Yu, M., Dong, X. M., Choi, S. B., Liao, C. R., “Human simulated intelligent control of vehicle suspension system with MR dampers”, *Journal of Sound and Vibration*, 319: 753-767 (2009).
17. Mazlan, S. A., Issa, A., Chowdhury, H. A., Olabi, A. G., “Magnetic circuit design for the squeeze mode experiments on magnetorheological fluids”, *Materials and Design*, 30: 1985-1993 (2009).
18. Nguyen, Q. H., Choi, S. B., “Optimal design of MR shock absorber and application to vehicle suspension”, *Smart Materials and Structures*, 18: 1-11 (2009).
19. Wang, D. H., Wang, T., “Principle, design and modeling of an integrated relative displacement self-sensing magnetorheological damper based on electromagnetic induction”, *Smart Materials and Structures*, 18: 1-20 (2009).
20. Nguyen, Q. H., Choi, S. B., “Optimal design of a vehicle magnetorheological damper considering the damping force and dynamic range”, *Smart Materials and Structures*, 18: 1-10 (2009).
21. Li, W. H., Du, H., Guo, N. Q., “Finite element analysis and simulation evaluation of a magnetorheological valve”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21: 438-445 (2003).
22. Benetti, M., Dragoni, E., “Nonlinear magnetic analysis of multi-plate magnetorheological brakes and clutches”, *COMSOL Users Conference*, Milano, 1-5, (2006).
23. Nam, Y. J., Park, M. K., “Electromagnetic design of a magnetorheological damper”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20: 181-191 (2009).

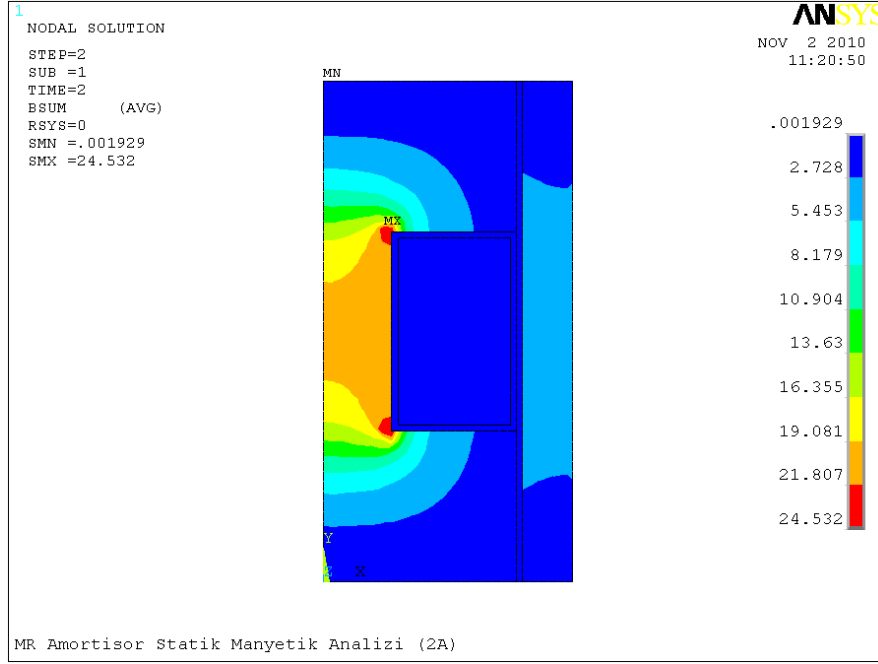
24. Abu-Ein, S. Q., Fayyad, S. M., Momani, W., Al-Alawin, A., Momani, M., "Experimental investigation of using MR-fluids in automobiles suspension systems", *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2 (2): 159-163 (2010).
25. Yao, G. Z., Yap, F. F., Chen, G., Li, W. H., Yeo, S. H., "MR damper and its application for semi-active control of vehicle suspension system", *Mechatronics*, 12: 963-973 (2002).
26. Dogruer, U., Gordaninejad, F., Evrensel, C. A., "A new magneto-rheological fluid damper for high-mobility multi-purpose wheeled vehicle (HMMWV)", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 19: 641-650 (2008).
27. Yang, G., Spencer, B. F., Carlson, J. D., Sain, M. K., "Large-scale MR fluid dampers: modeling, and dynamic performance considerations", *Engineering Structures*, 24 (3): 309-323 (2002).
28. Lam, K. H., Chen, Z. H., Ni, Y. Q., Chan, H. L. W., "A magnetorheological damper capable of force and displacement sensing", *Sensors and Actuators A: Physical*, 158: 51-59 (2010).
29. Nguyen, Q. H., Choi, S. B., Kim, K. S., "Geometric optimal design of MR damper considering damping force, control energy and time constant", *Journal of Physics: Conference Series (11th Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions)*, 149: 1-4 (2009).
30. Butz, T., Von Stryk, O., "Modelling and simulation of electro- and magnetorheological fluid dampers", *Z. Angew. Math. Mech.*, 82 (1): 3-20 (2002).
31. Pons, J. L., "Emerging Actuator Technologies-A Micromechatronic Approach", *John Wiley & Sons Ltd.*, England, 205-243 (2005).
32. Schramm, G., "A Practical Approach to Rheology and Rheometry", *Gebrueder HAAKE GmbH*, Germany, 11-30 (2000).
33. Genç, S., "Synthesis and properties of magnetorheological (MR) fluids", Doktora Tezi, *University of Pittsburgh*, USA, 1-10 (2002).
34. Park, J. H., Park, O. O., "Electrorheology and magnetorheology", *Korea-Australia Rheology Journal*, 13 (1): 13-17 (2001).
35. Ünal, H. İ., Ağırbaş, O., Yılmaz, H., "Electrorheological properties of poly(Li-2-hydroxyethyl methacrylate) suspensions", *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 274: 77-84 (2006).

36. Şahin, İ., Engin, T., Morgül, Ö. K., “Manyeto-reolojik damper davranışına kutup başı geometrisi etkisinin deneysel incelenmesi”, *4th International Advanced Technologies Symposium*, Konya, 779-783 (2005).
37. Schwartz, M., “Smart Materials”, *CRC Press*, USA, Chp-17 (2009).
38. Özsoy, K., “Manyeto-reolojik malzemelere ait matematiksel bir model ve manyeto-reolojik cihazlar”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniv. Fen Bilimleri Enst.*, Isparta, 1-3, 31-43 (2008).
39. Kciuk, M., Kciuk, S., Turczyn, R., “Magnetorheological characterization of carbonyl iron based suspension”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 33 (2): 135-141 (2009).
40. Genç, S., Phulé, P. P., “Rheological properties of magnetorheological fluids”, *Smart Materials and Structures*, 11: 140-146 (2002).
41. Shen, R., Shafrir, S. N., Miao, C., Wang, M., Lambropoulos, J. C., Jacobs, S. D., Yang, H., “Synthesis and corrosion study of zirconia-coated carbonyl iron particles”, *Journal of Colloid and Interface Science*, 342: 49-56 (2010).
42. Hong, M. K., Park, B. J., Choi, H. J., “Preparation and physical characterization of polyacrylamide coated magnetite particles”, *Physica Status Solidi (a)*, 204 (12): 4182-4185 (2007).
43. Dang, A., Ooi, L., Fales, J., Stroeve, P., “Yield stress measurements of magnetorheological fluids in tubes”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 39: 2269-2274 (2000).
44. İnternet: Ansys Inc. “Two-dimensional Static Magnetic Analysis”
http://mostreal.sk/html/guide_55/g-ele/GELE2.htm (2013).
45. 5/12/2003 tarih ve 25307 sayılı Resmi Gazete, “Motorlu Araçlar ve Römorkları Tip Onayı Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik”, 98/14/AT, EK II, (2003).
46. İnternet: University of California “Lennard-Jones Potential”
http://chemwiki.ucdavis.edu/Physical_Chemistry/Quantum_Mechanics/Intermolecular_Forces/Lennard-Jones_Potential (2012).
47. Li, W. H., Yao, G. Z., Chen, G., Yeo, S. H., Yap, F. F., “Testing and steady state modeling of a linear MR damper under sinusoidal loading”, *Smart Materials and Structures*, 9: 95-102 (2000).
48. Liao, W. H., Lai, C. Y., “Harmonic analysis of a magnetorheological damper for vibration control”, *Smart Materials and Structures*, 11: 288-296 (2002).

EKLER

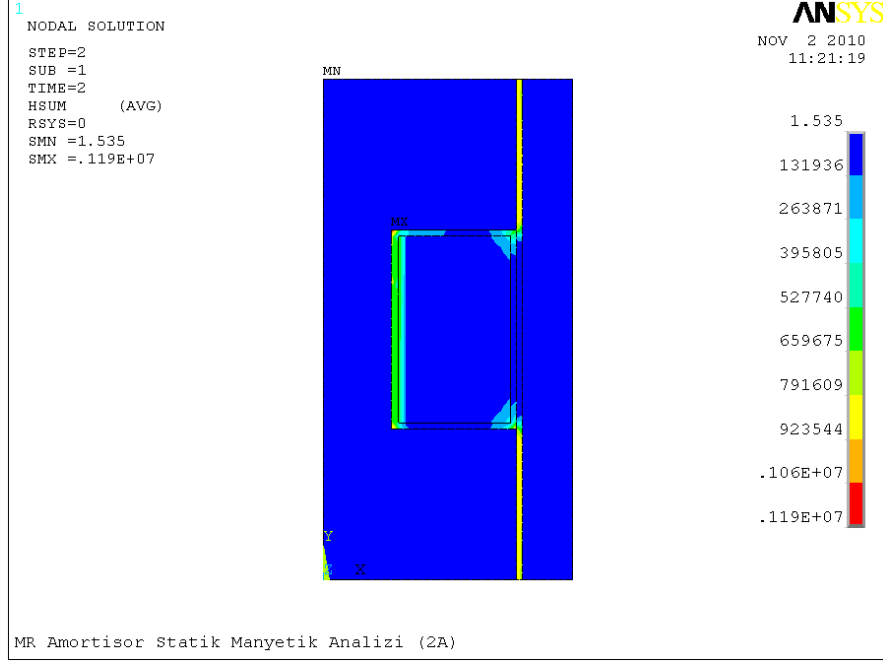
EK-1 Statik manyetik analiz sonuçları

Model 1'e Ait Sonuçlar

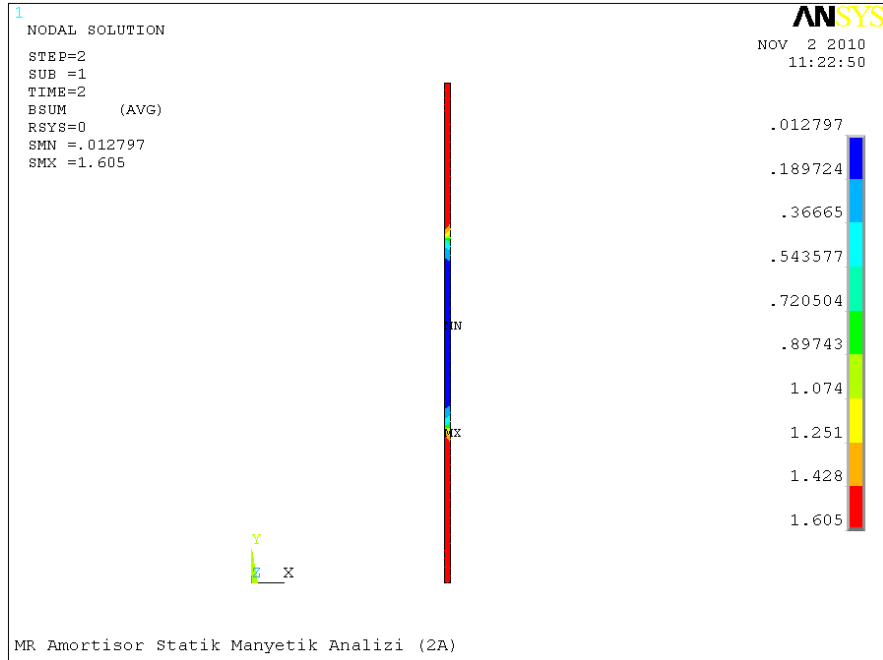


Şekil 1.1. MR amortisörde manyetik akı yoğunluğu (2A)

EK-1 (Devam) Statik manyetik analiz sonuçları

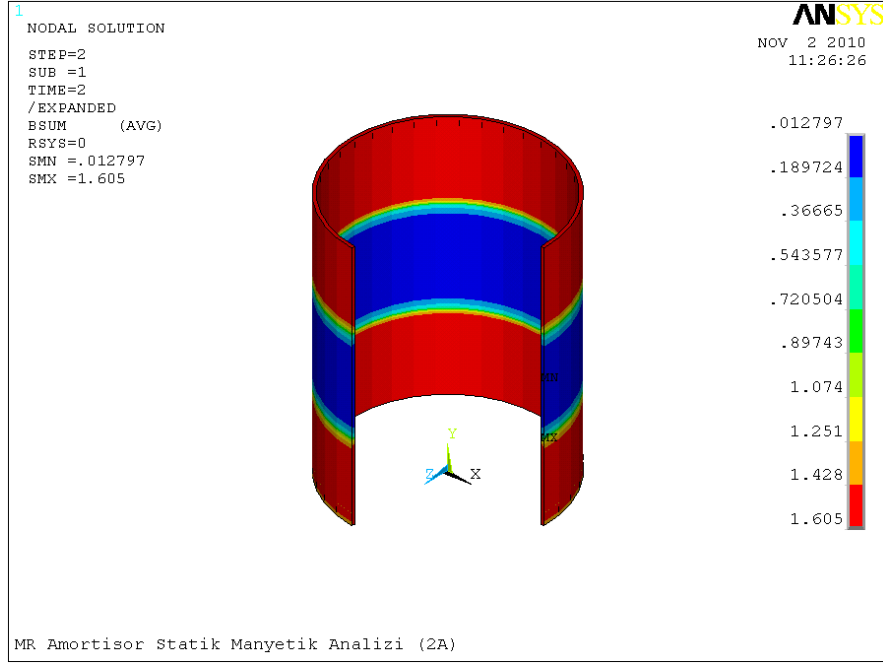


Şekil 1.2. MR amortisörde manyetik alan yoğunluğu (2A)

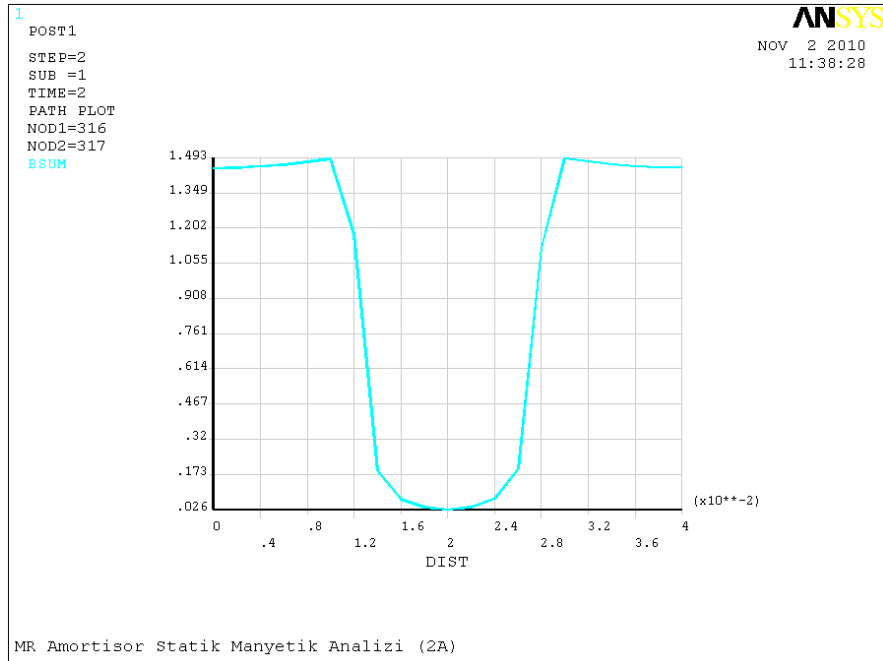


Şekil 1.3. MR sıvıda manyetik akı yoğunluğu (2A)

EK-1 (Devam) Statik manyetik analiz sonuçları

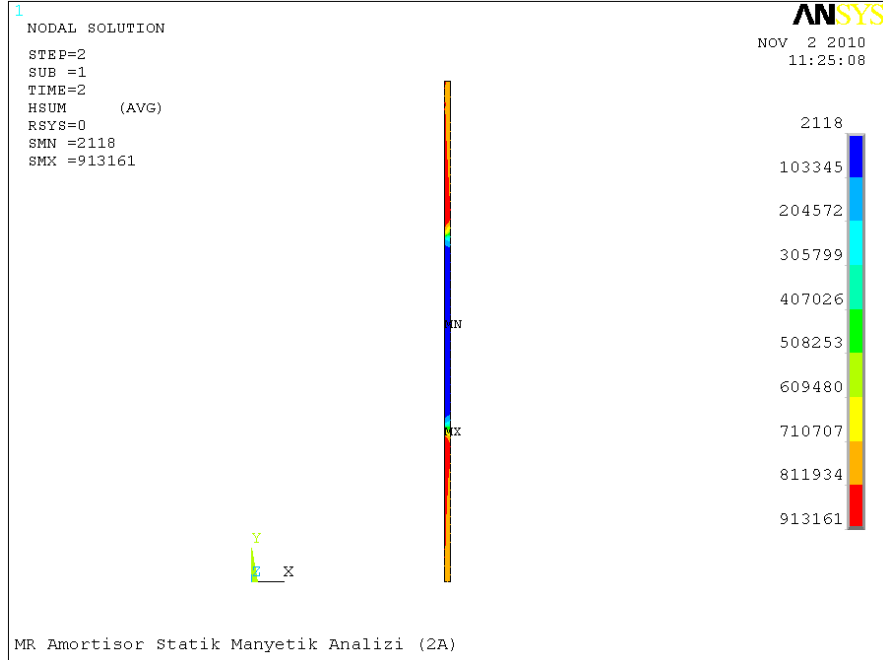


Şekil 1.4. MR sıvıda manyetik akı yoğunluğu (3D), (2A)

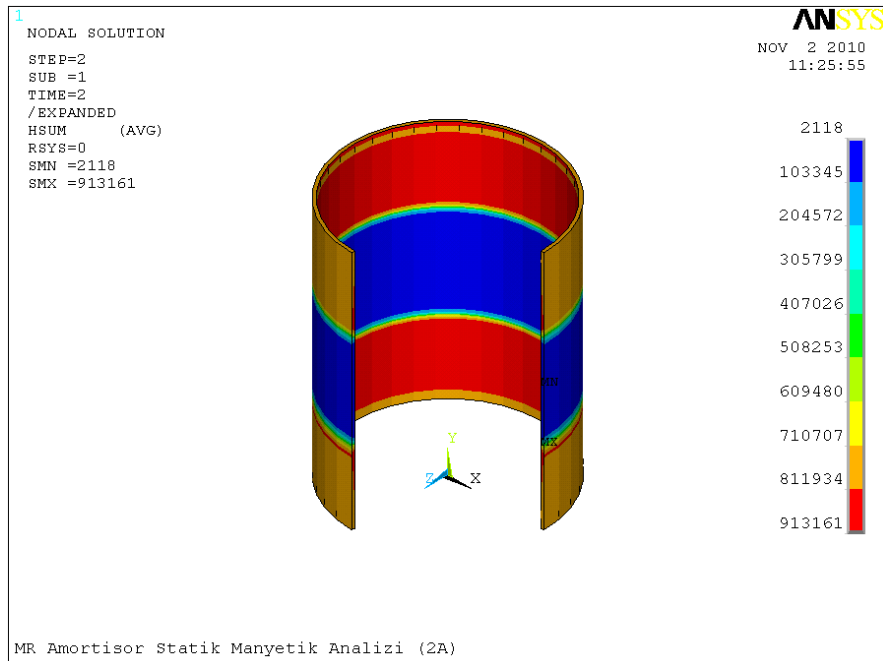


Şekil 1.5. MR sıvıda manyetik akı yoğunluğu grafiği (2A)

EK-1 (Devam) Statik manyetik analiz sonuçları

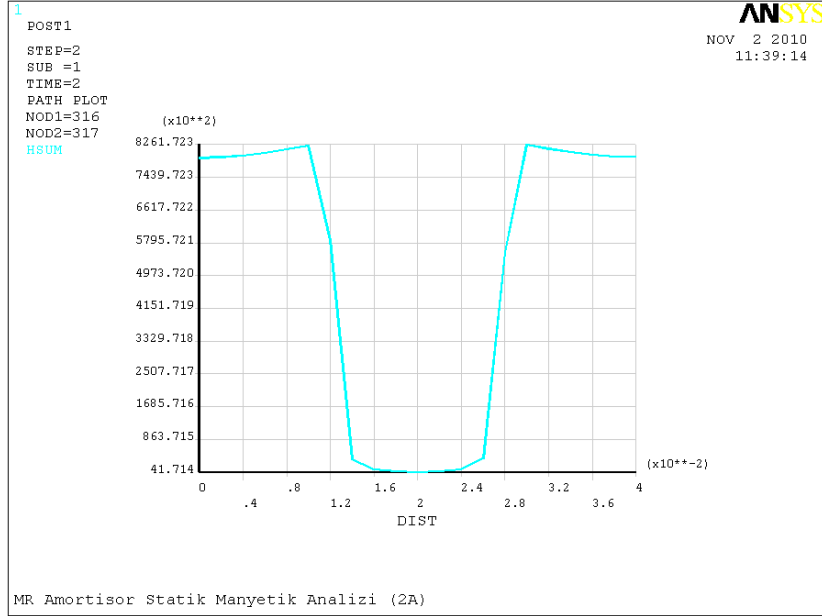


Şekil 1.6. MR sıvıda manyetik alan yoğunluğu (2A)



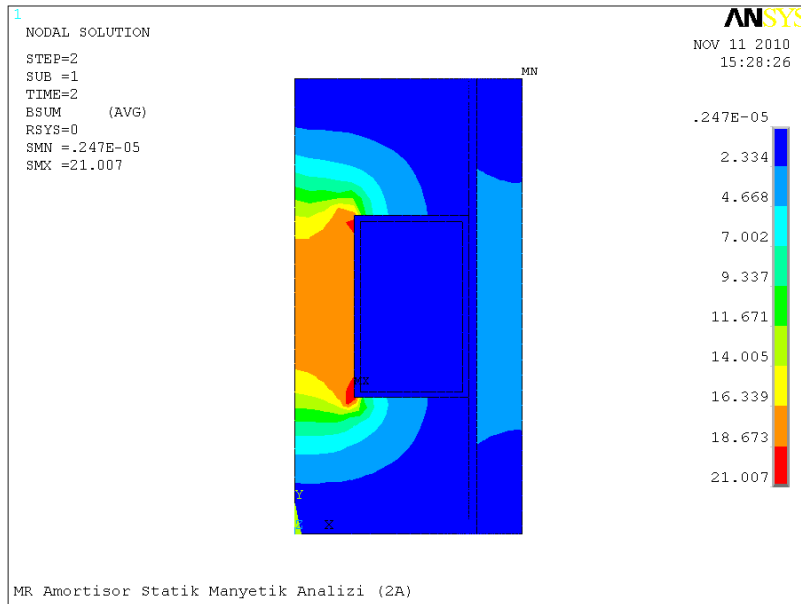
Şekil 1.7. MR sıvıda manyetik alan yoğunluğu (3D), (2A)

EK-1 (Devam) Statik manyetik analiz sonuçları



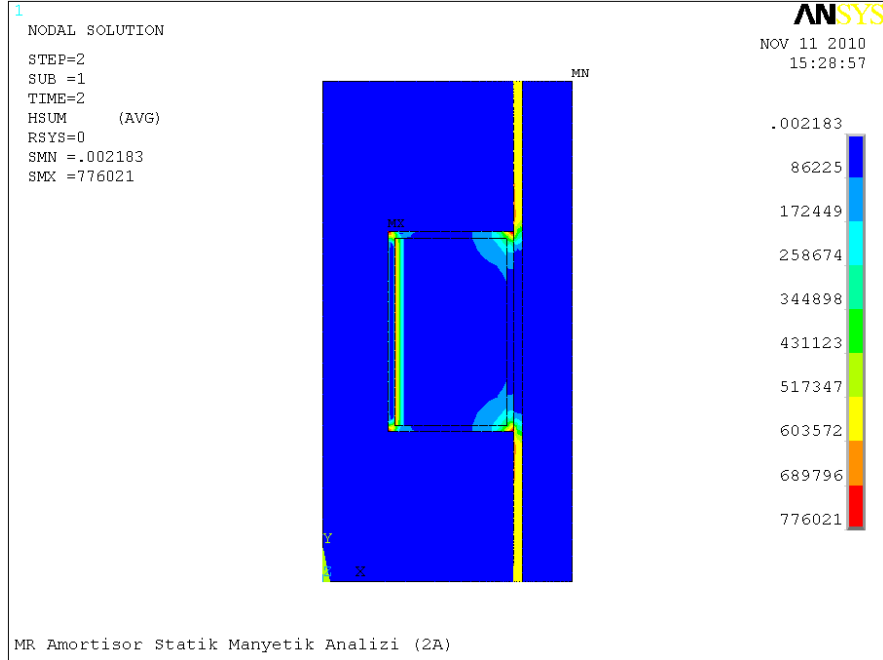
Şekil 1.8. MR sıvıda manyetik alan yoğunluğu grafiği (2A)

Model 2'ye Ait Sonuçlar

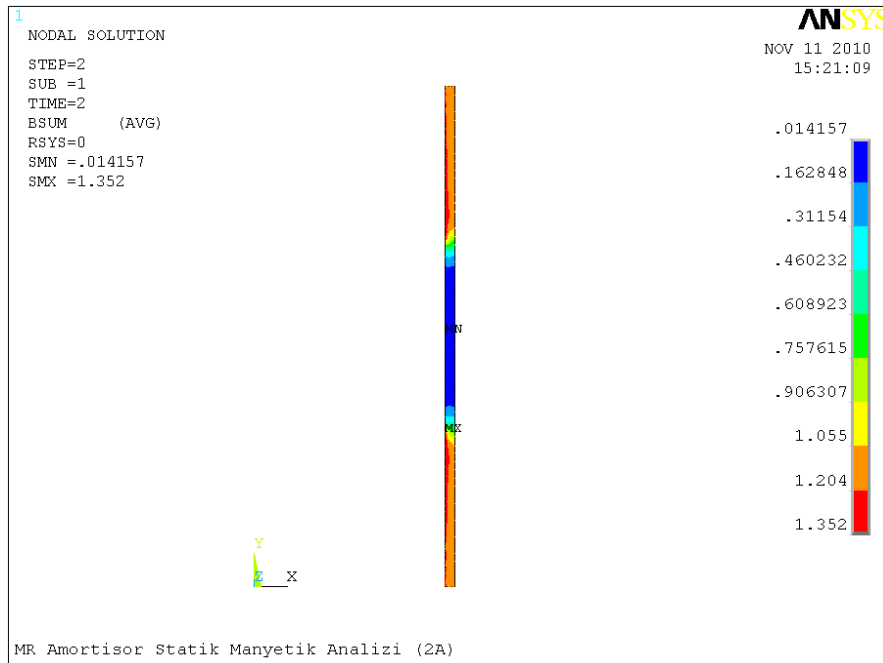


Şekil 1.9. MR amortisörde manyetik akı yoğunluğu (2A)

EK-1 (Devam) Statik manyetik analiz sonuçları

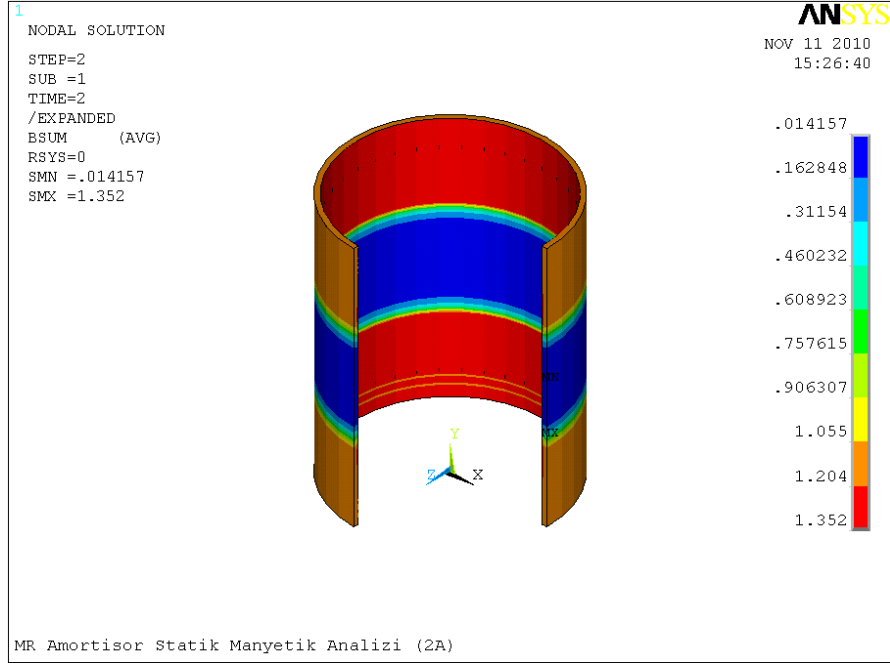


Şekil 1.10. MR amortisörde manyetik alan yoğunluğu (2A)

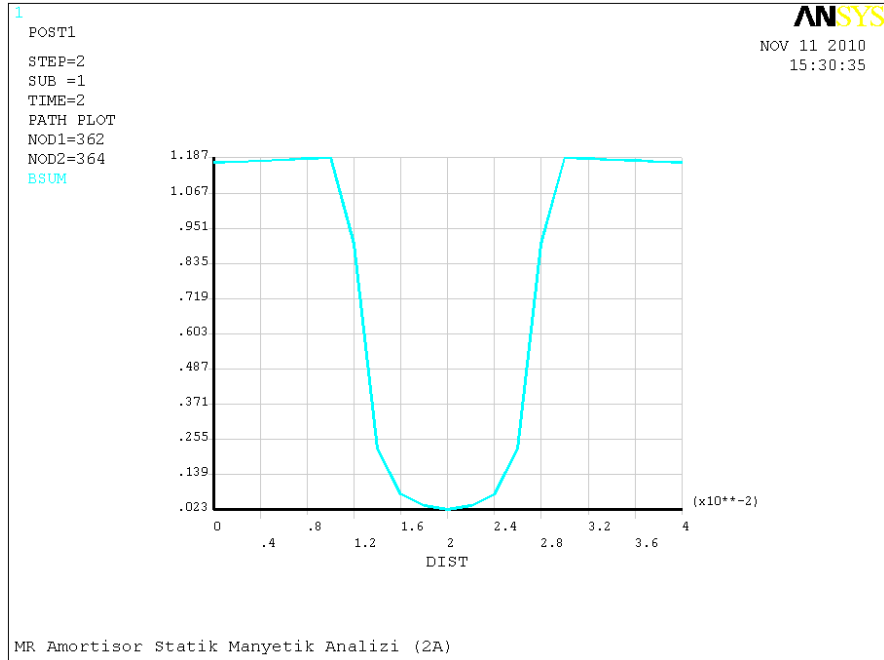


Şekil 1.11. MR sıvıda manyetik akı yoğunluğu (2A)

EK-1 (Devam) Statik manyetik analiz sonuçları

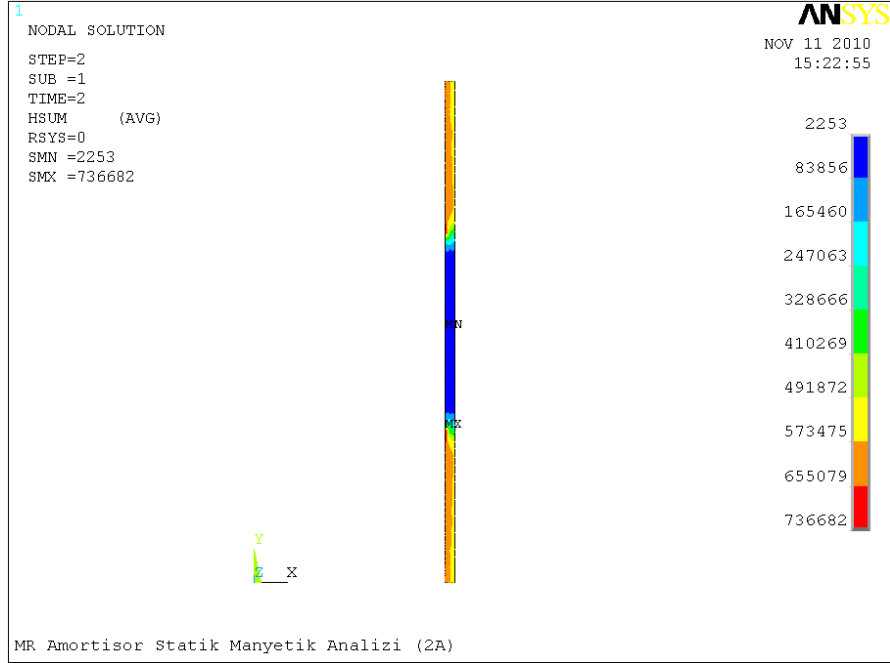


Şekil 1.12. MR sıvıda manyetik akı yoğunluğu (3D), (2A)

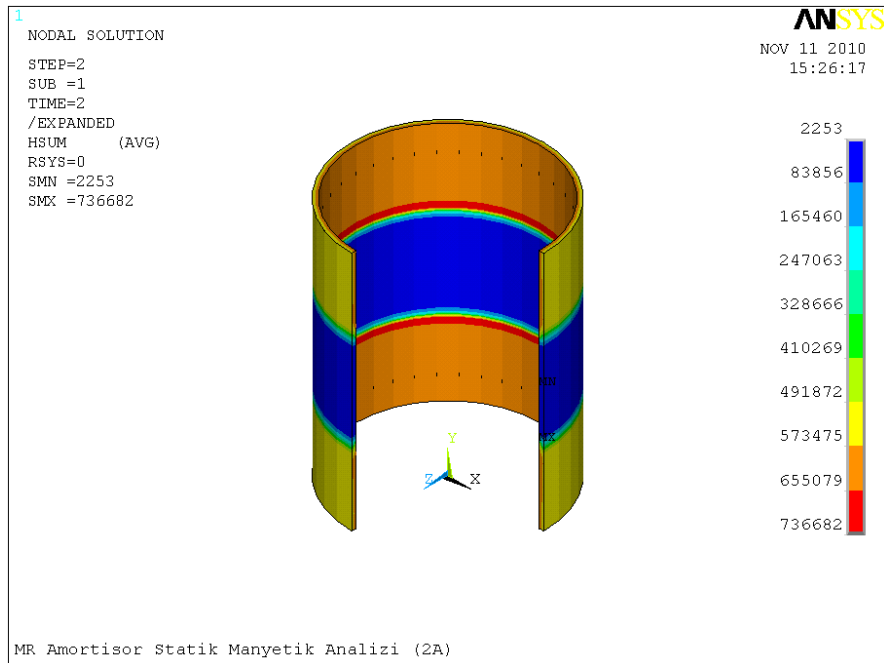


Şekil 1.13. MR sıvıda manyetik akı yoğunluğu grafiği (2A)

EK-1 (Devam) Statik manyetik analiz sonuçları

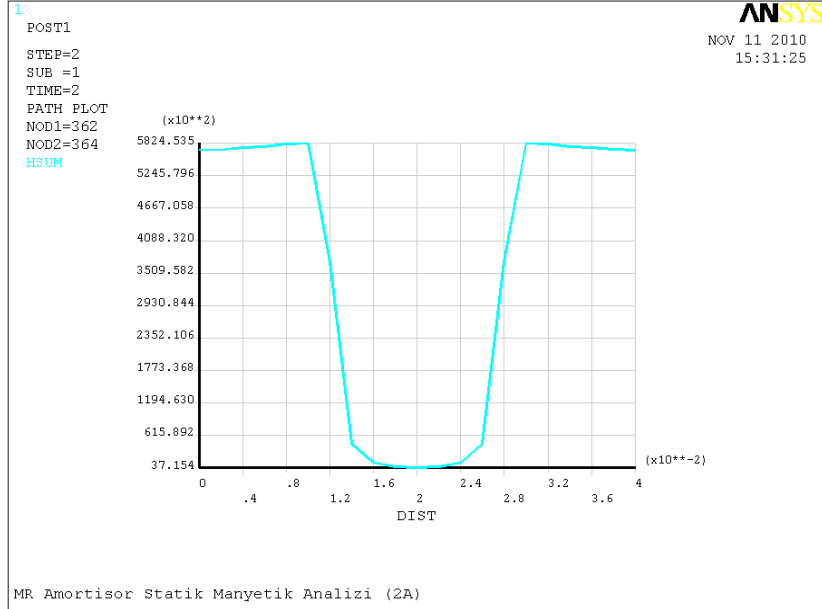


Şekil 1.14. MR sıvıda manyetik alan yoğunluğu (2A)



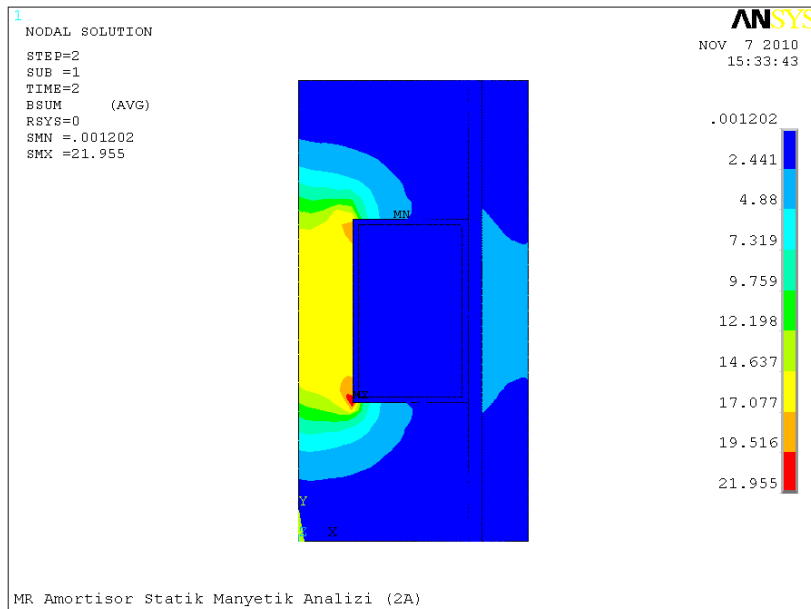
Şekil 1.15. MR sıvıda manyetik alan yoğunluğu (3D), (2A)

EK-1 (Devam) Statik manyetik analiz sonuçları



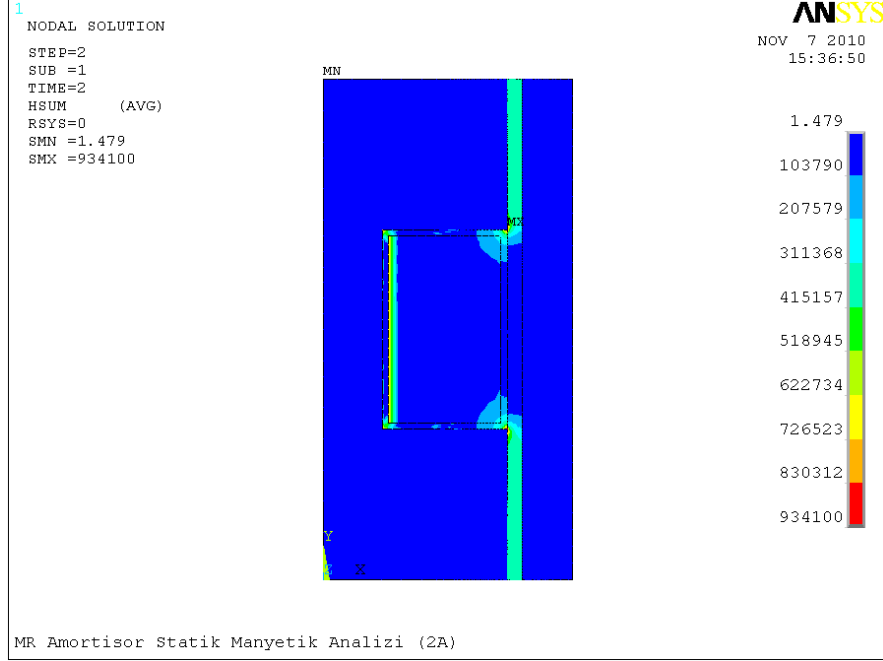
Şekil 1.16. MR sıvıda manyetik alan yoğunluğu grafiği (2A)

Model 4'e Ait Sonuçlar

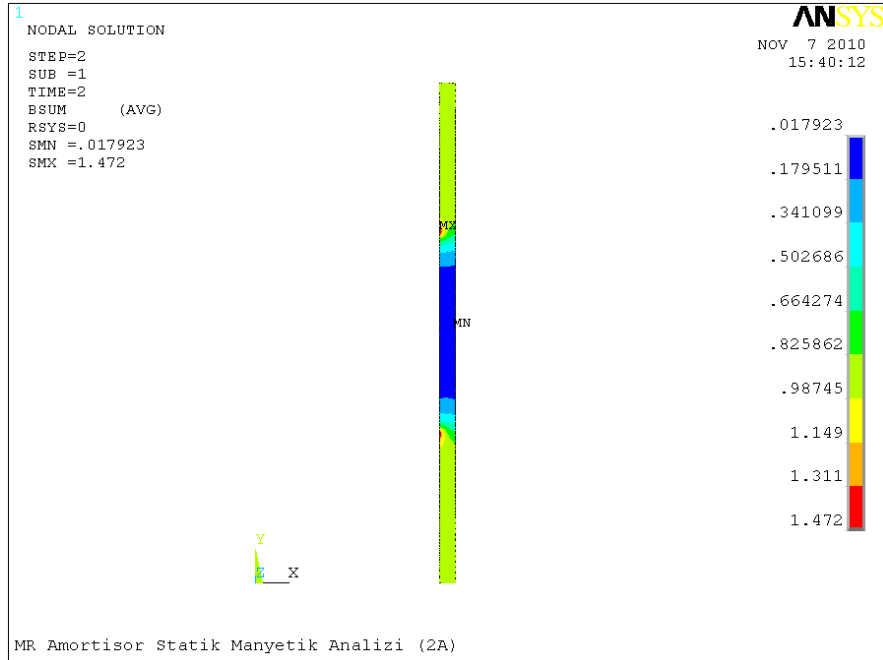


Şekil 1.17. MR amortisörde manyetik akı yoğunluğu (2A)

EK-1 (Devam) Statik manyetik analiz sonuçları

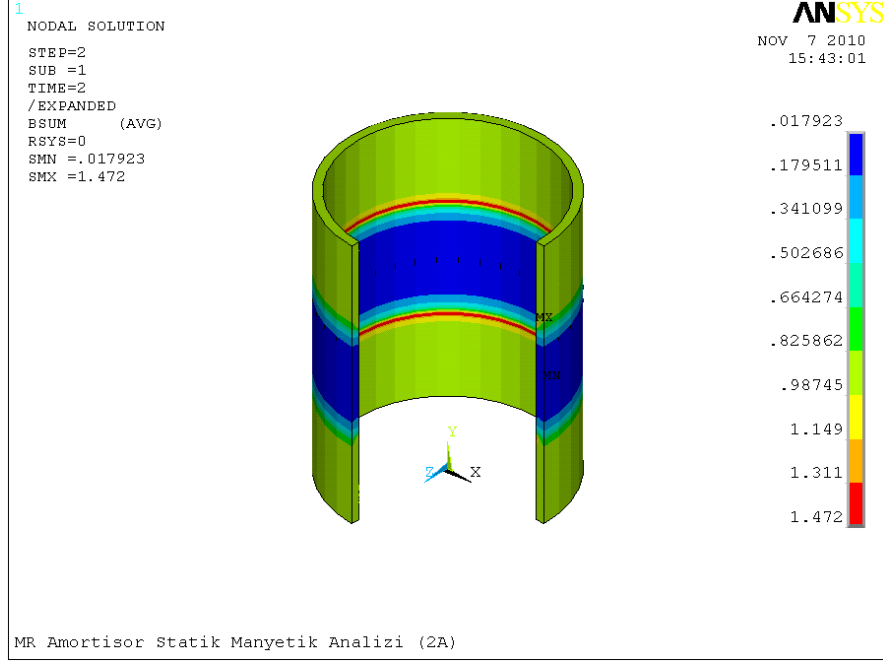


Şekil 1.18. MR amortisörde manyetik alan yoğunluğu (2A)

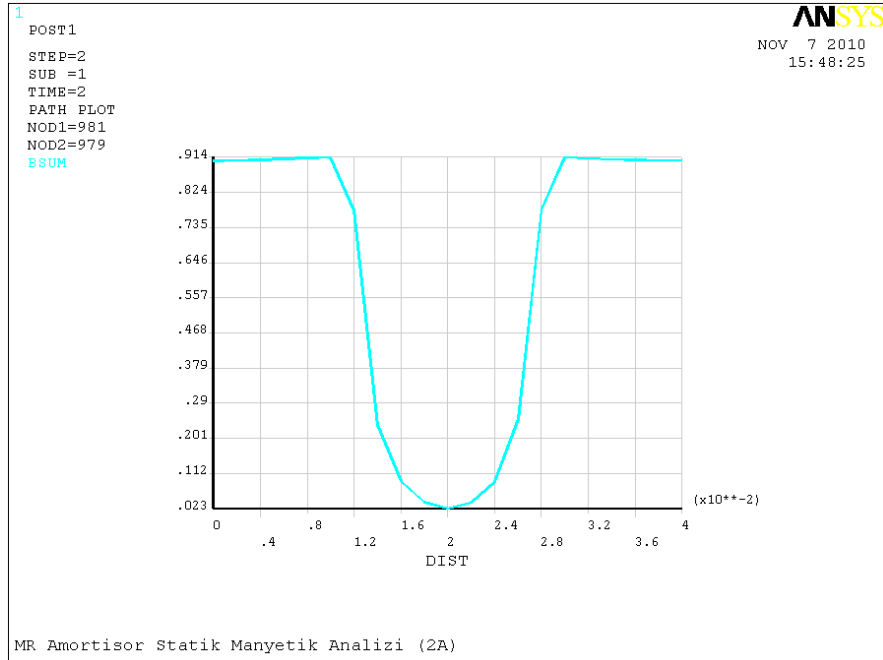


Şekil 1.19. MR sıvıda manyetik akı yoğunluğu (2A)

EK-1 (Devam) Statik manyetik analiz sonuçları

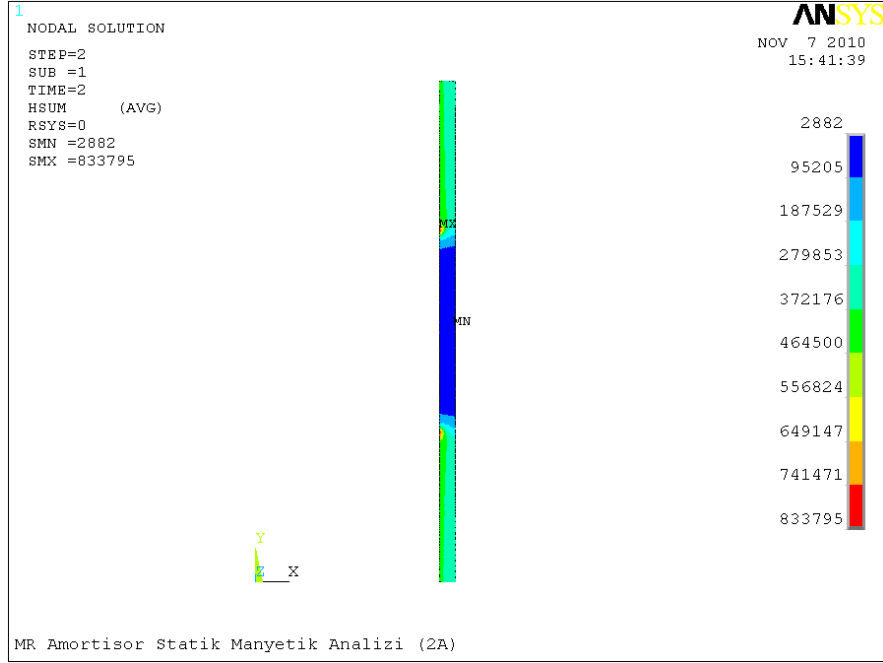


Şekil 1.20. MR sıvıda manyetik akı yoğunluğu (3D), (2A)

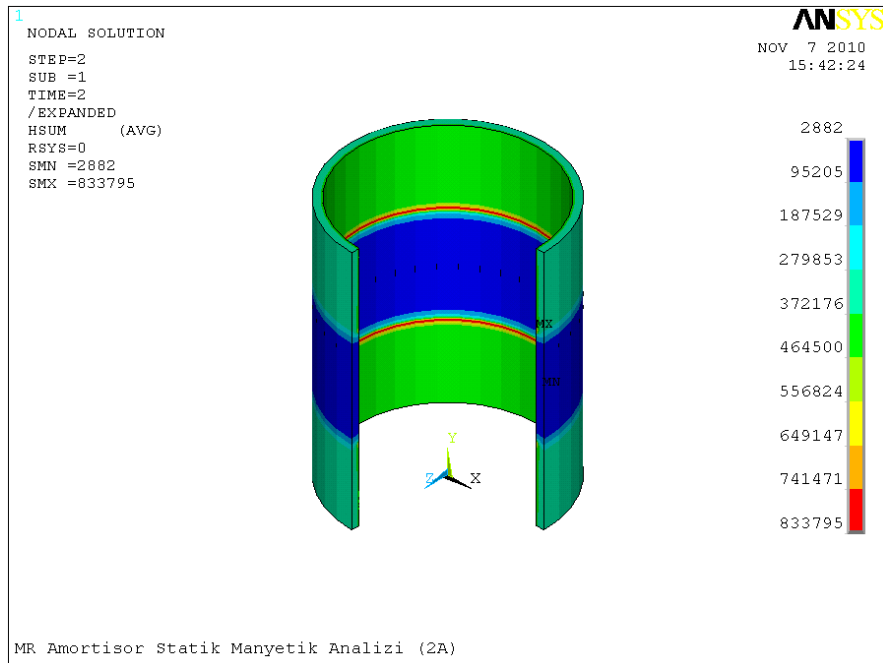


Şekil 1.21. MR sıvıda manyetik akı yoğunluğu grafiği (2A)

EK-1 (Devam) Statik manyetik analiz sonuçları

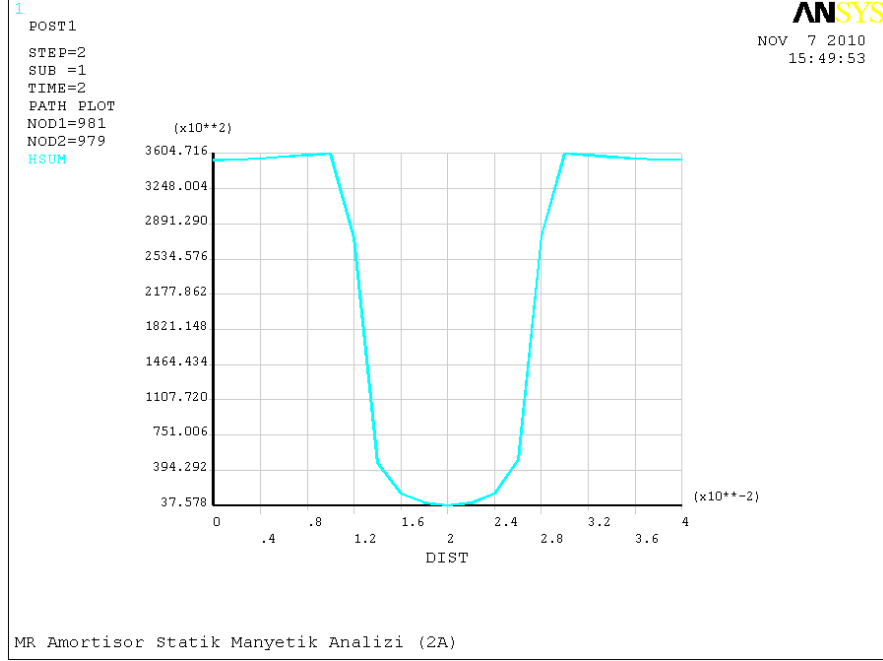


Şekil 1.22. MR sıvıda manyetik alan yoğunluğu (2A)



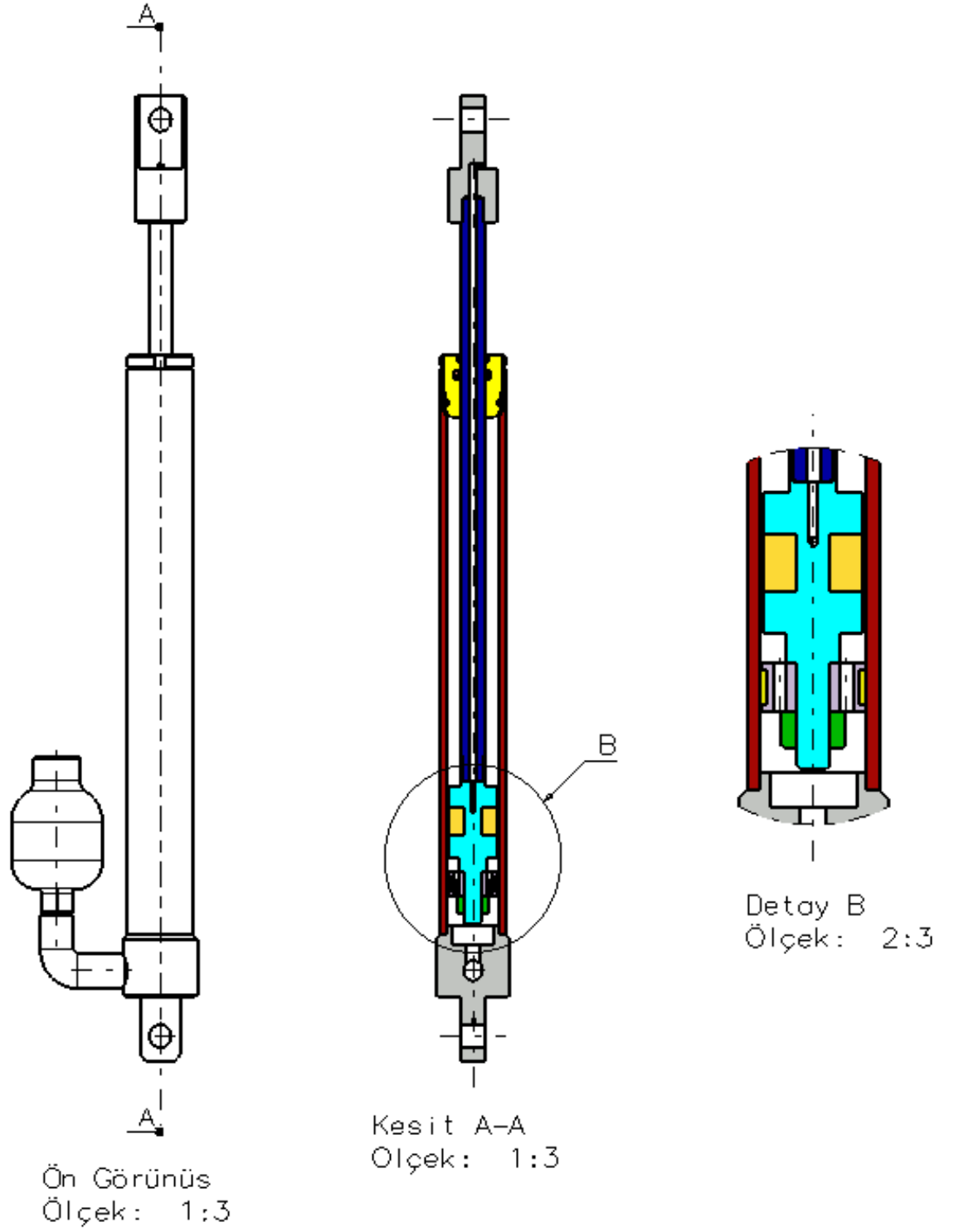
Şekil 1.23. MR sıvıda manyetik alan yoğunluğu (3D), (2A)

EK-1 (Devam) Statik manyetik analiz sonuçları



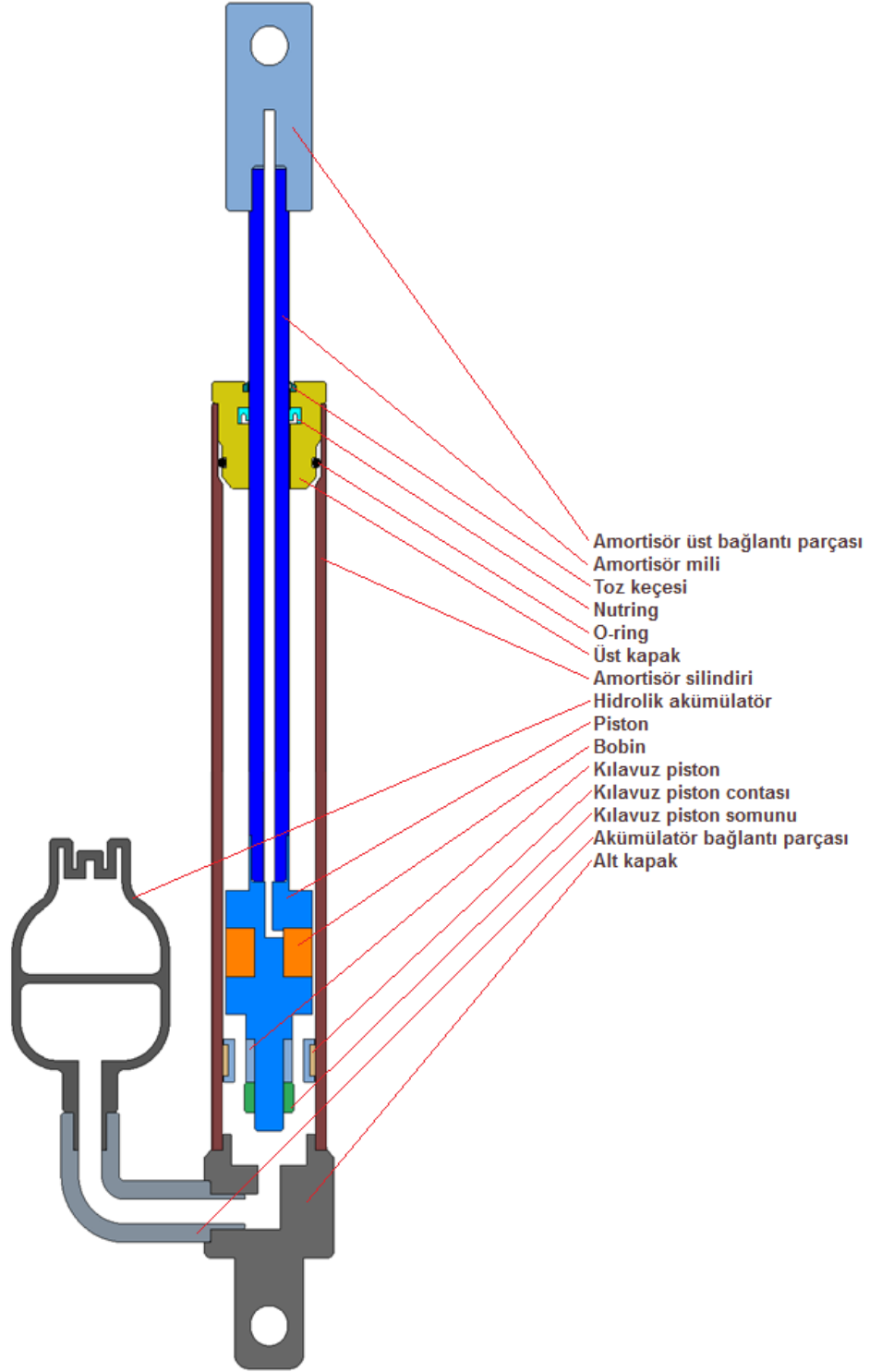
Şekil 1.24. MR sıvıda manyetik alan yoğunluğu grafiği (2A)

EK-2 MR amortisörün imalat resimleri



Şekil 2.1. MR Amortisörün Komple Resmi

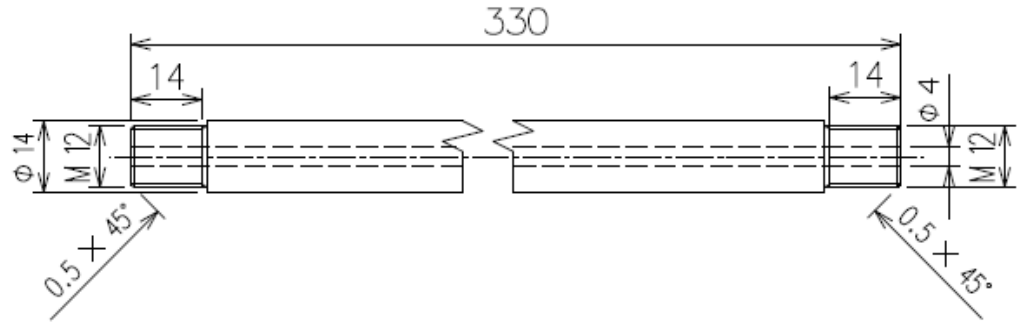
EK-2 (Devam) MR amortisörün imalat resimleri



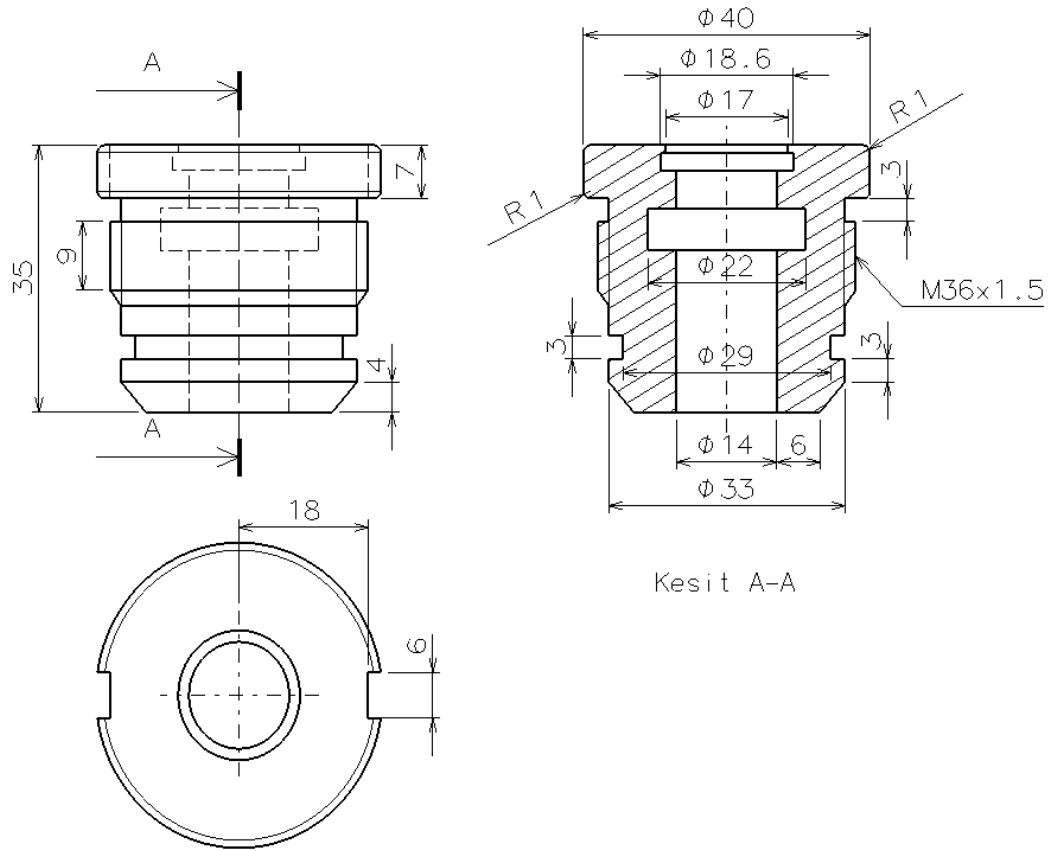
Şekil 2.2. MR Amortisörün Montaj Resmi

EK-2 (Devam) MR amortisörün imalat resimleri

MR Amortisörün Detay Resimleri

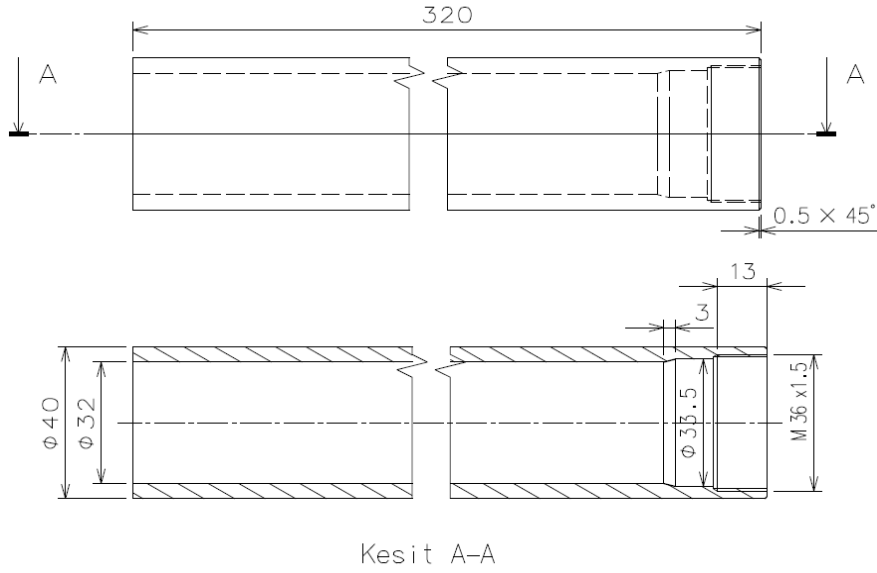


Şekil 2.3. Amortisör Mili

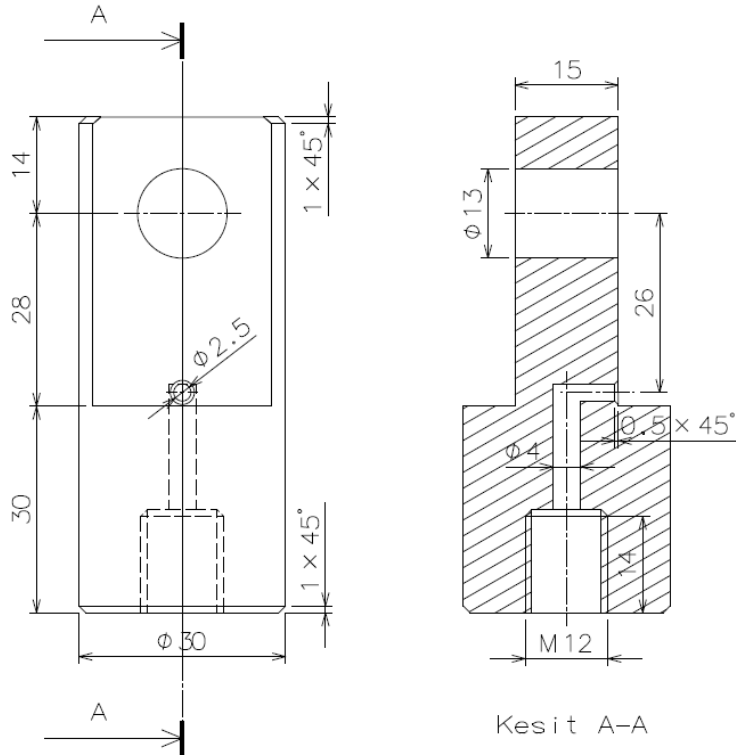


Şekil 2.4. Üst Kapak

EK-2 (Devam) MR amortisörün imalat resimleri

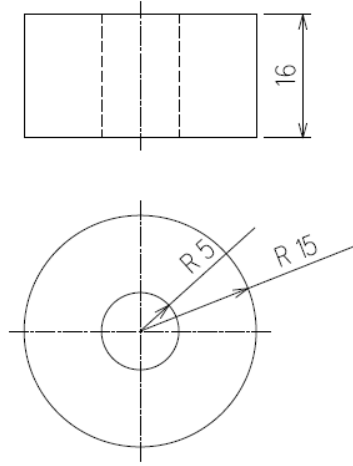


Şekil 2.5. Amortisör Silindiri

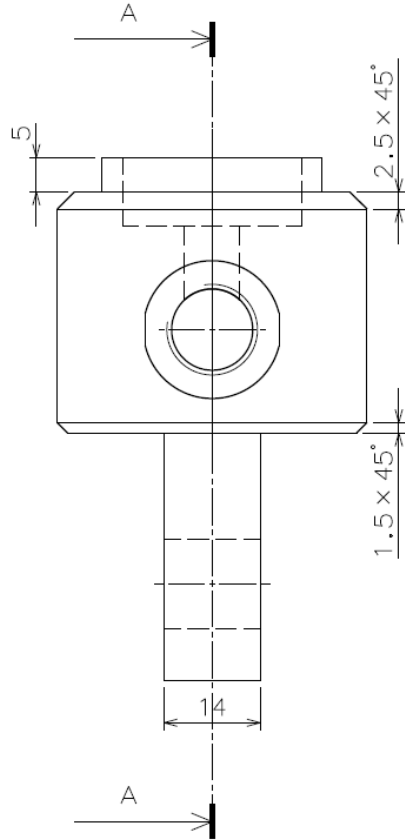


Şekil 2.6. Amortisör Üst Bağlama Parçası

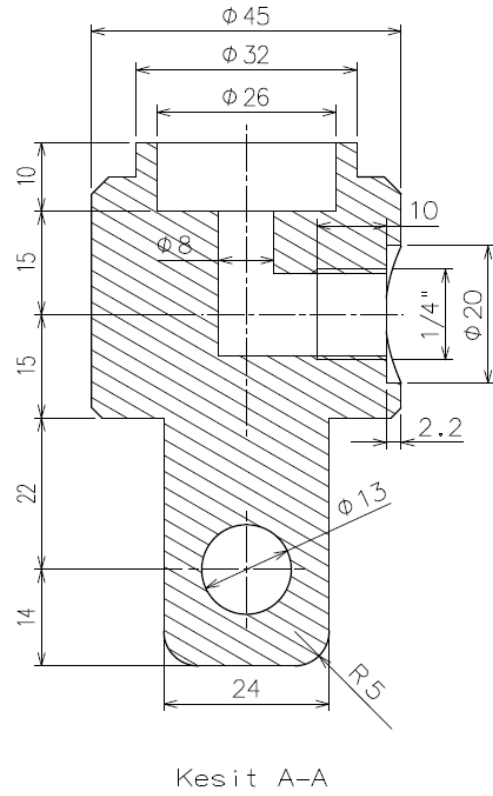
EK-2 (Devam) MR amortisörün imalat resimleri



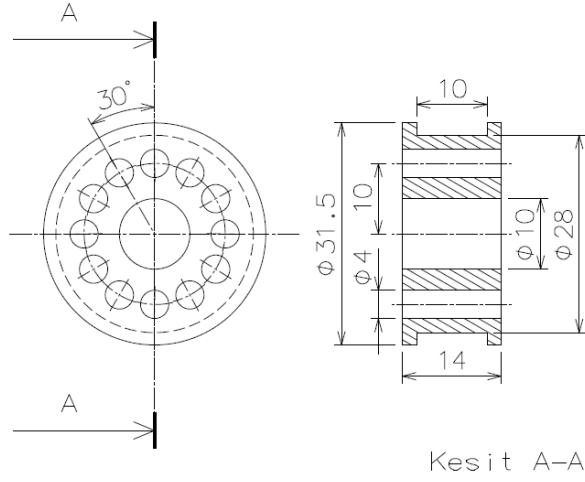
Şekil 2.7. Bobin



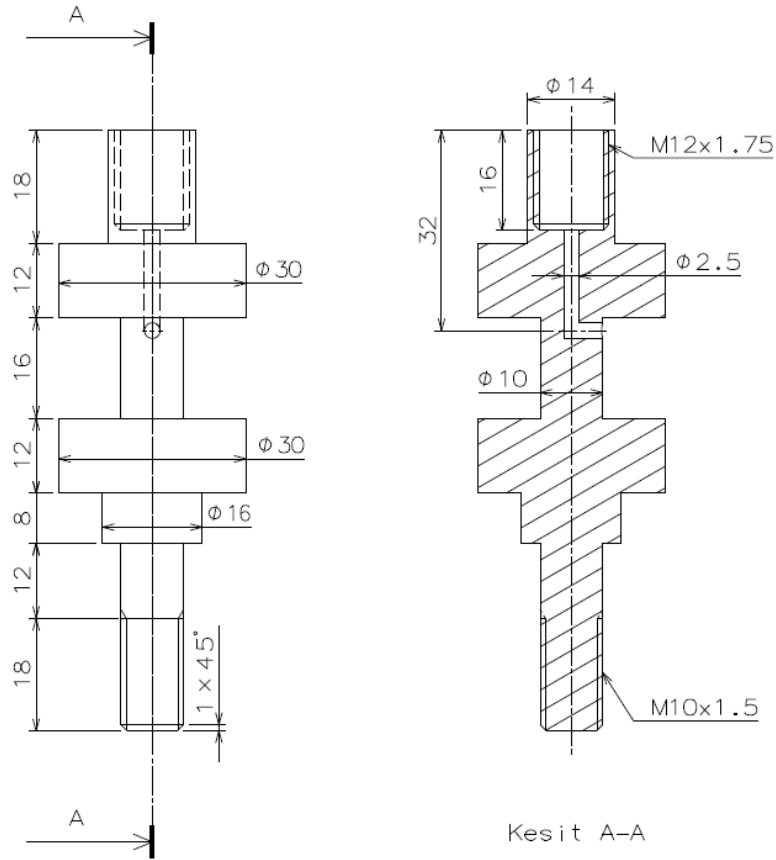
Şekil 2.8. Alt Kapak



EK-2 (Devam) MR amortisörün imalat resimleri

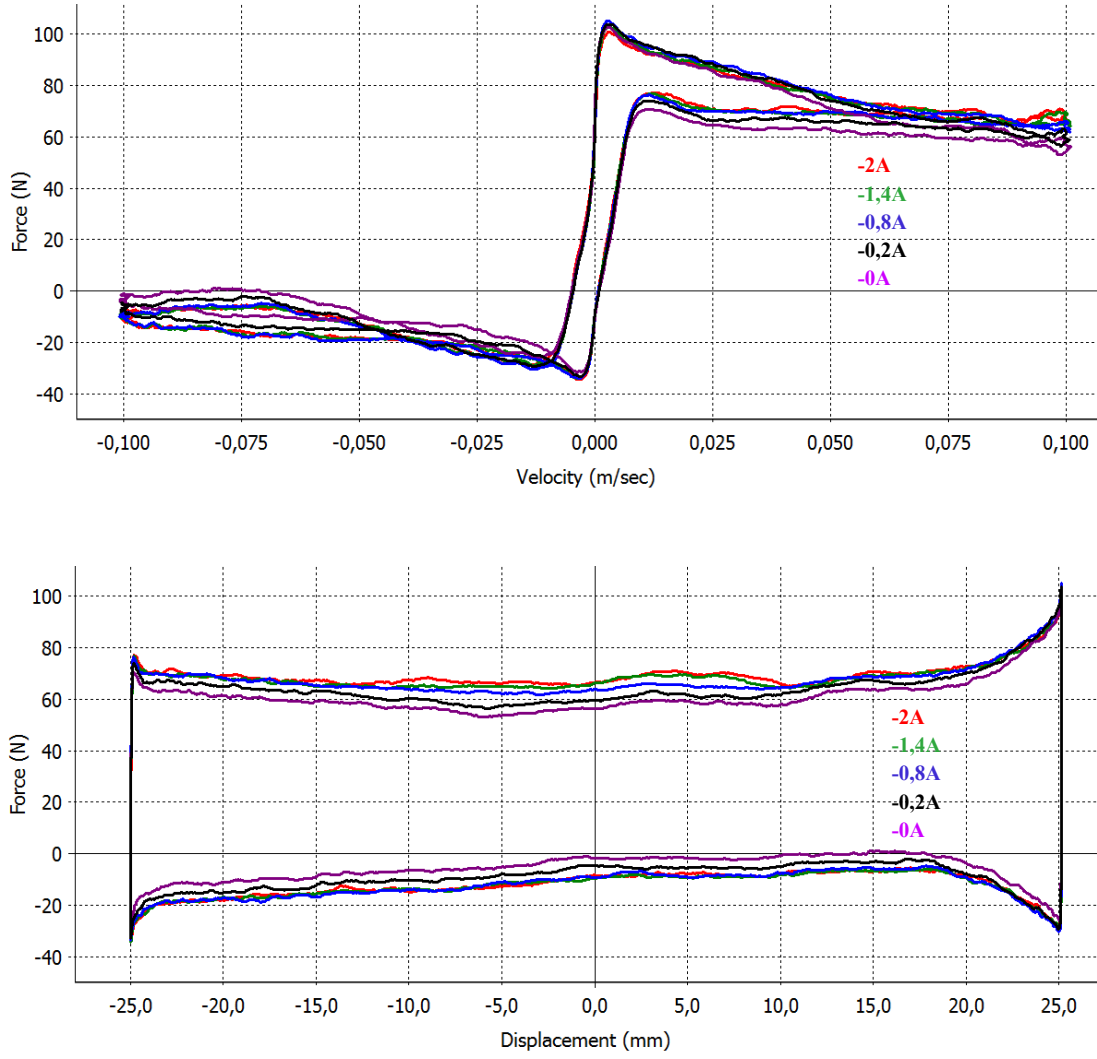


Şekil 2.9. Kılavuz Piston



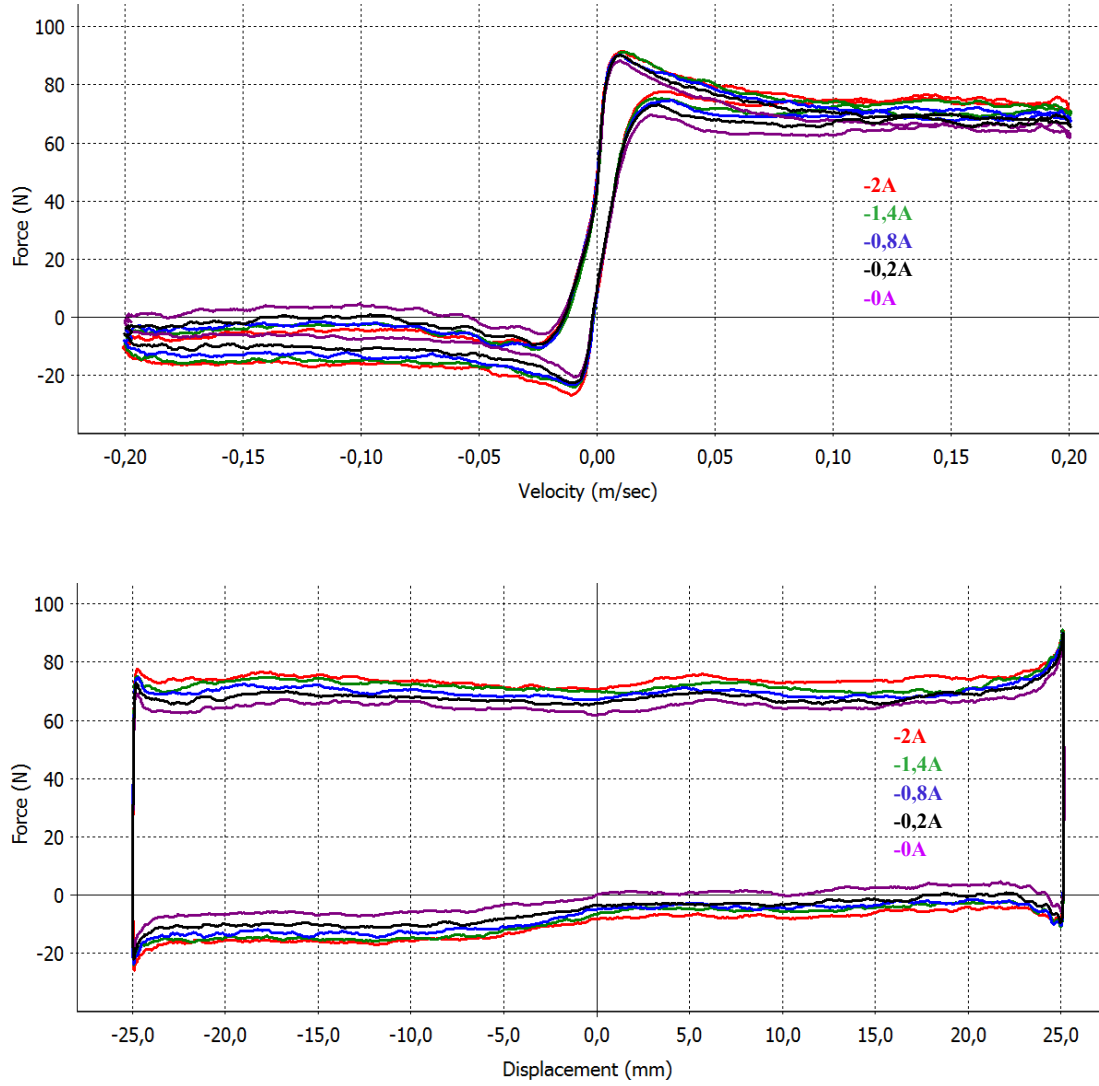
Şekil 2.10. Piston

EK-3 MR sıvılara ait performans grafikleri



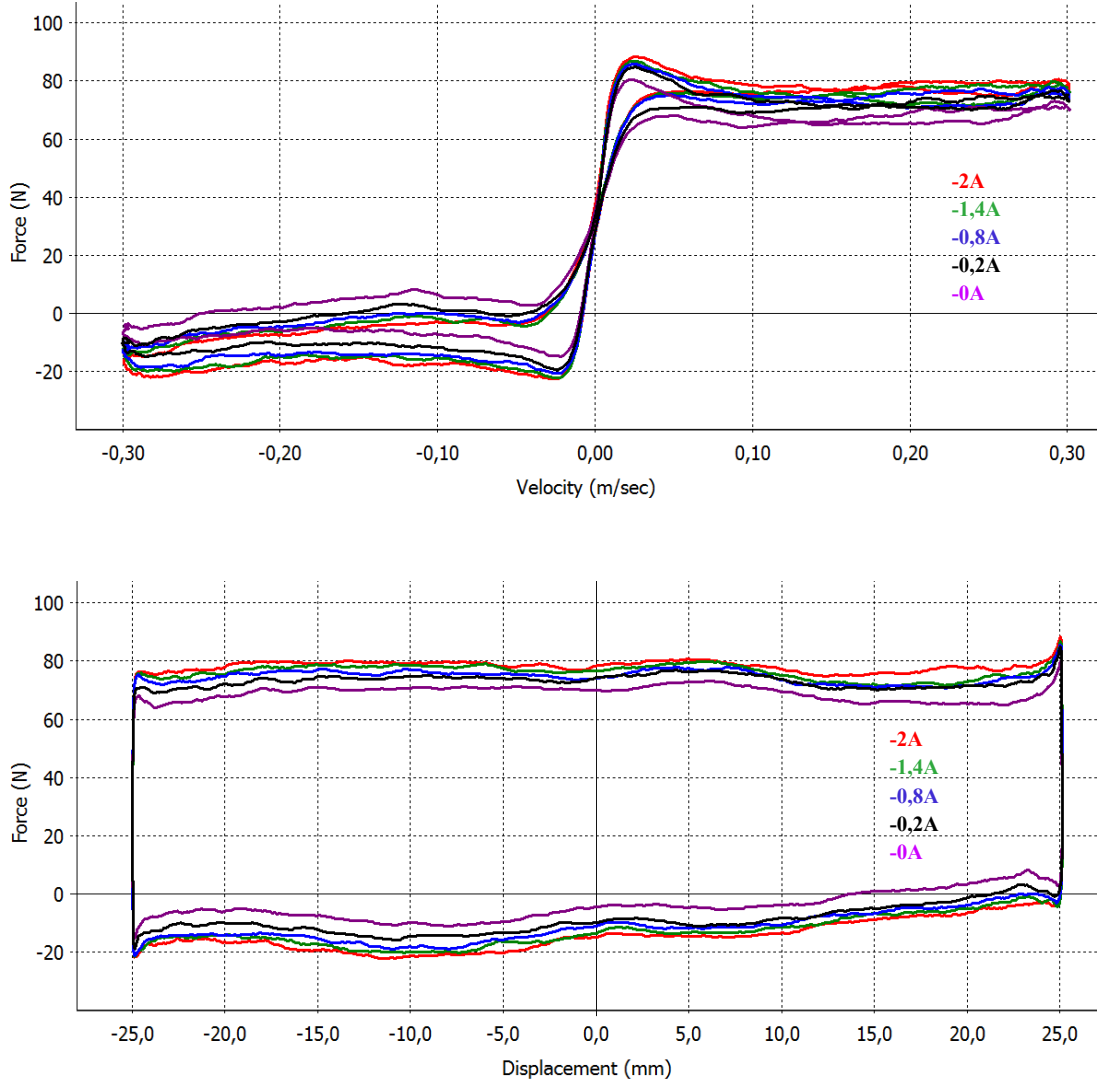
Şekil 3.1. MRF-1'in 0,1m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



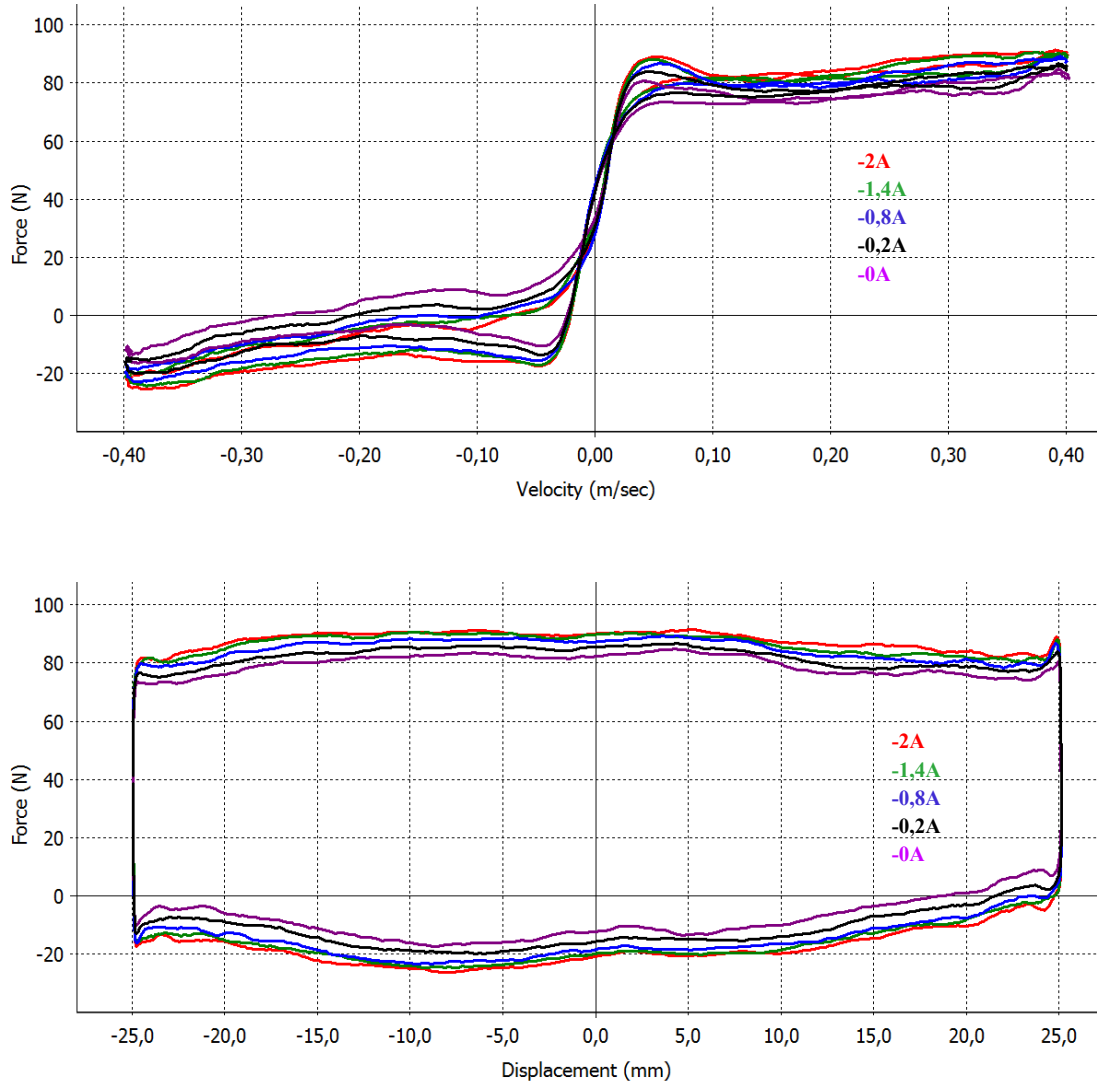
Şekil 3.2. MRF-1'in 0,2m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



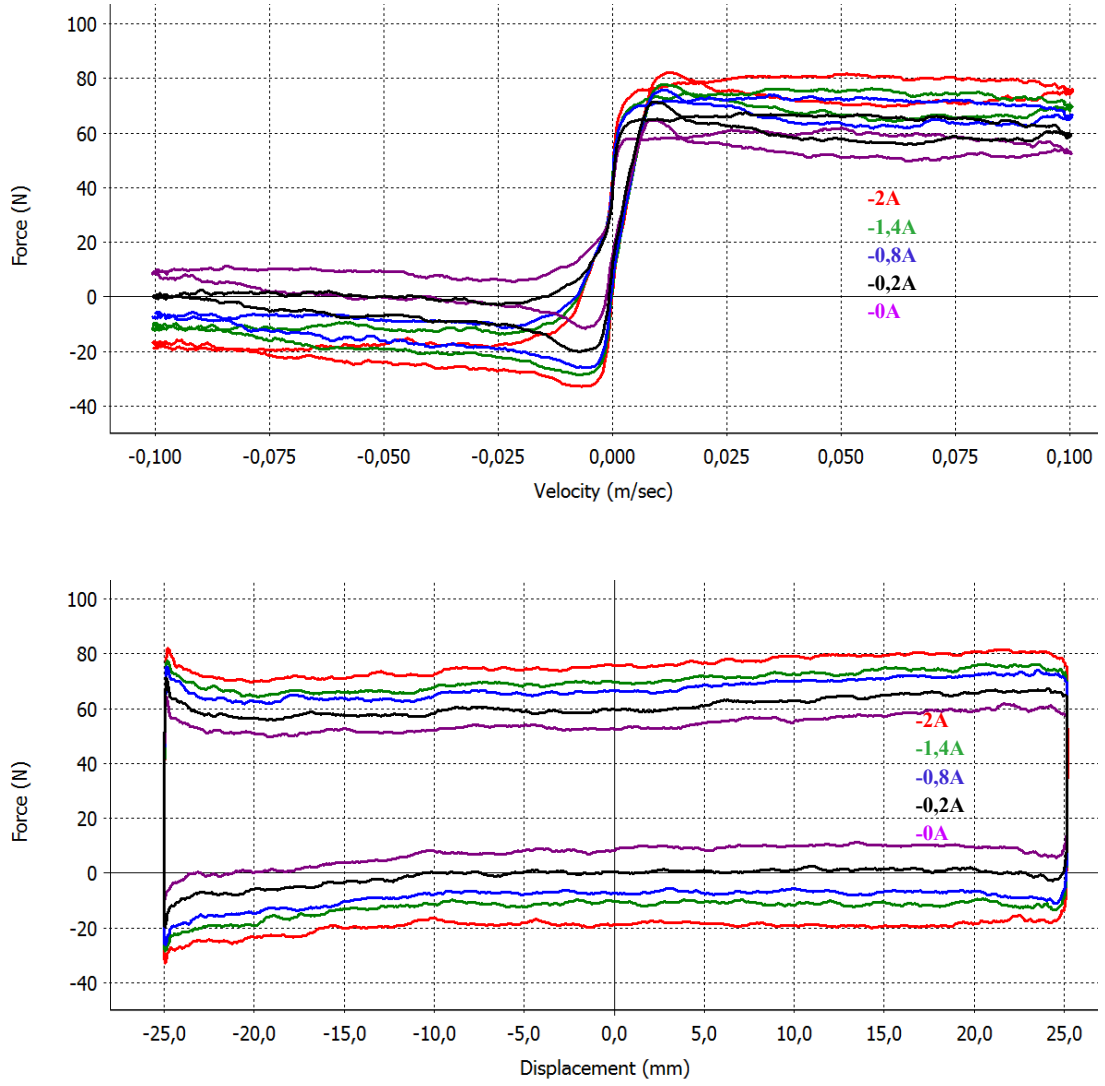
Şekil 3.3. MRF-1'in 0,3m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



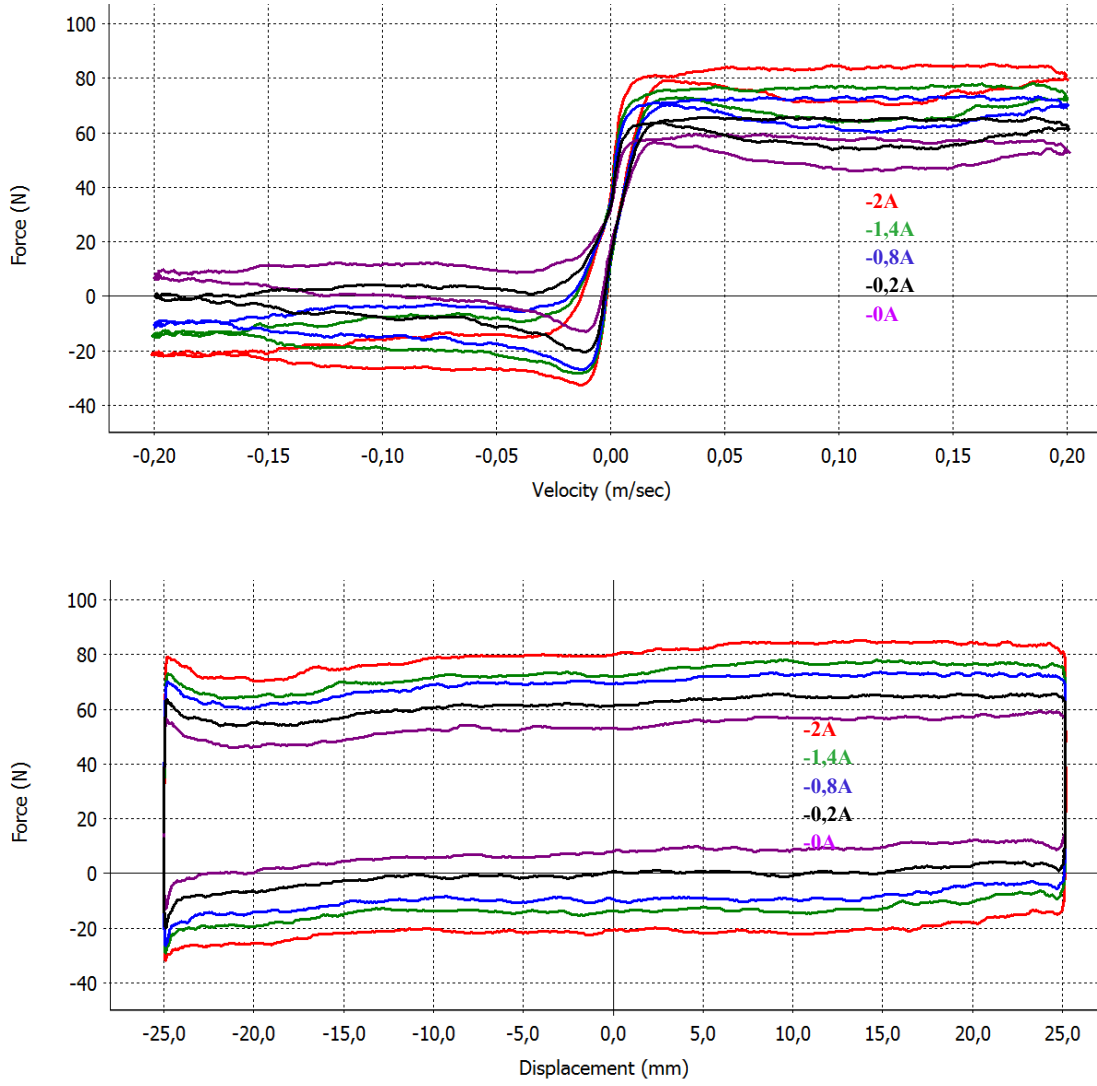
Şekil 3.4. MRF-1'in 0,4m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



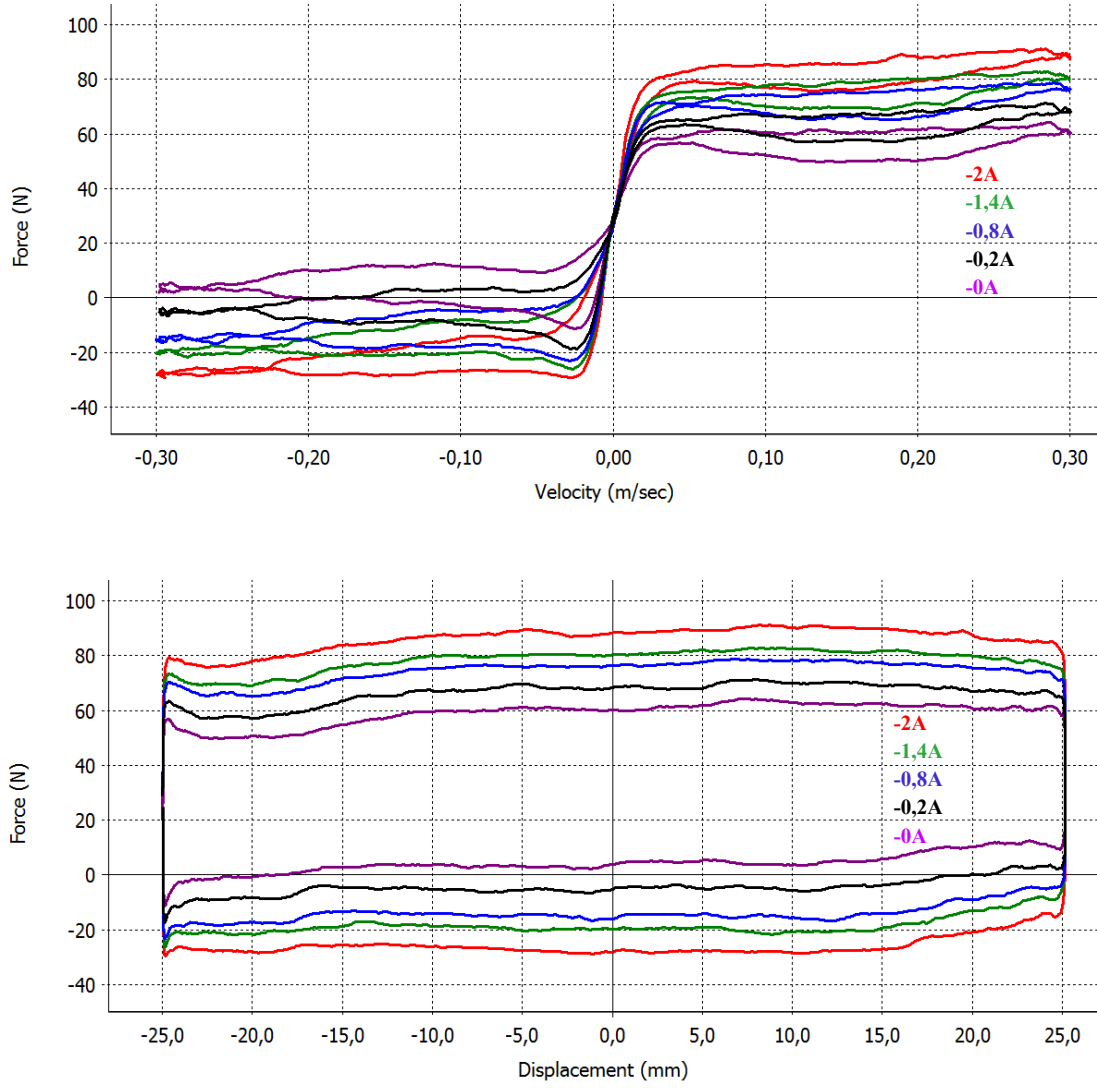
Şekil 3.5. MRF-2'nin 0,1m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümlleme kuvveti-
hız ve sönümlleme kuvveti-yer değıştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



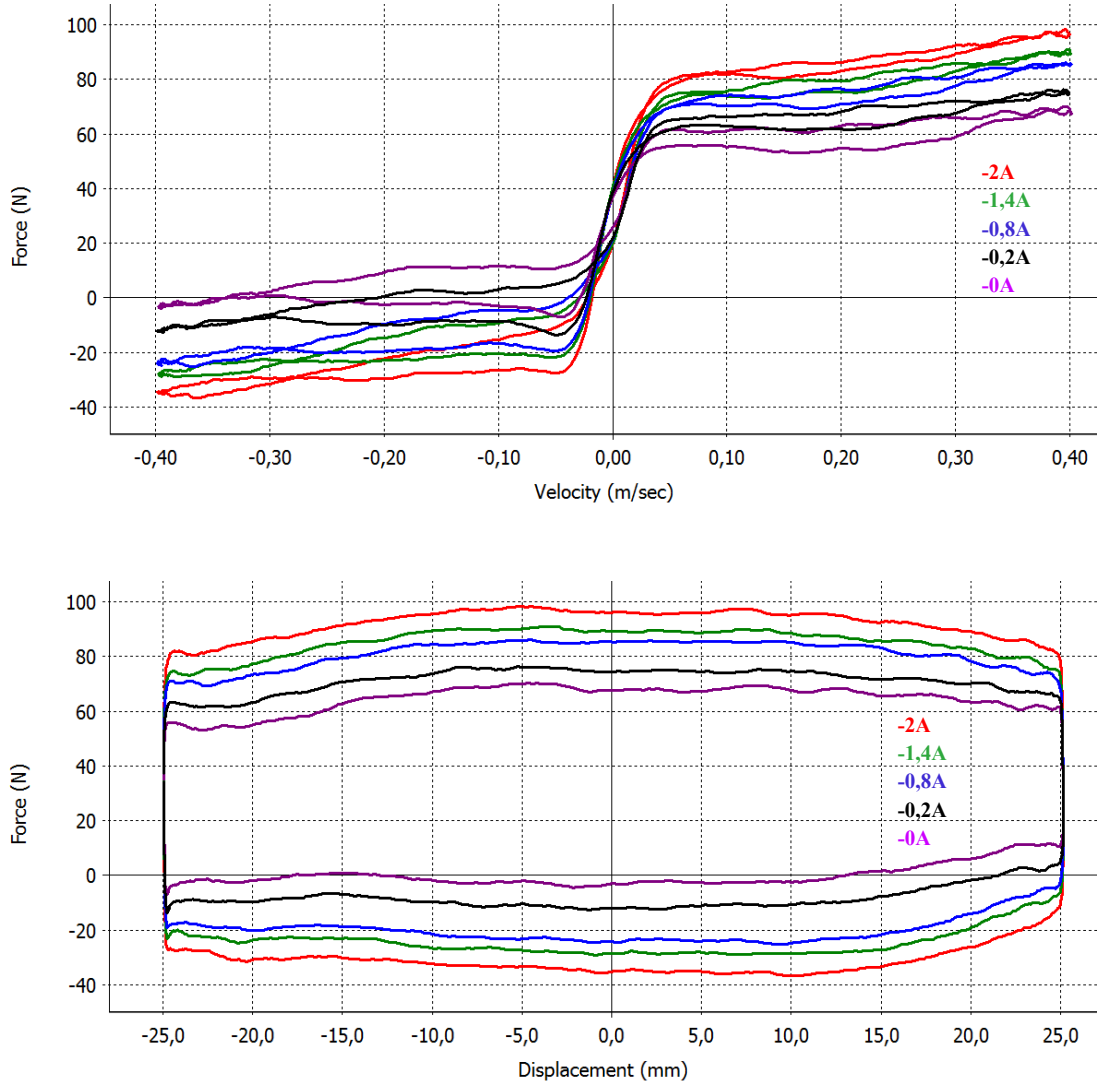
Şekil 3.6. MRF-2'nin 0,2m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümlleme kuvveti-
hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



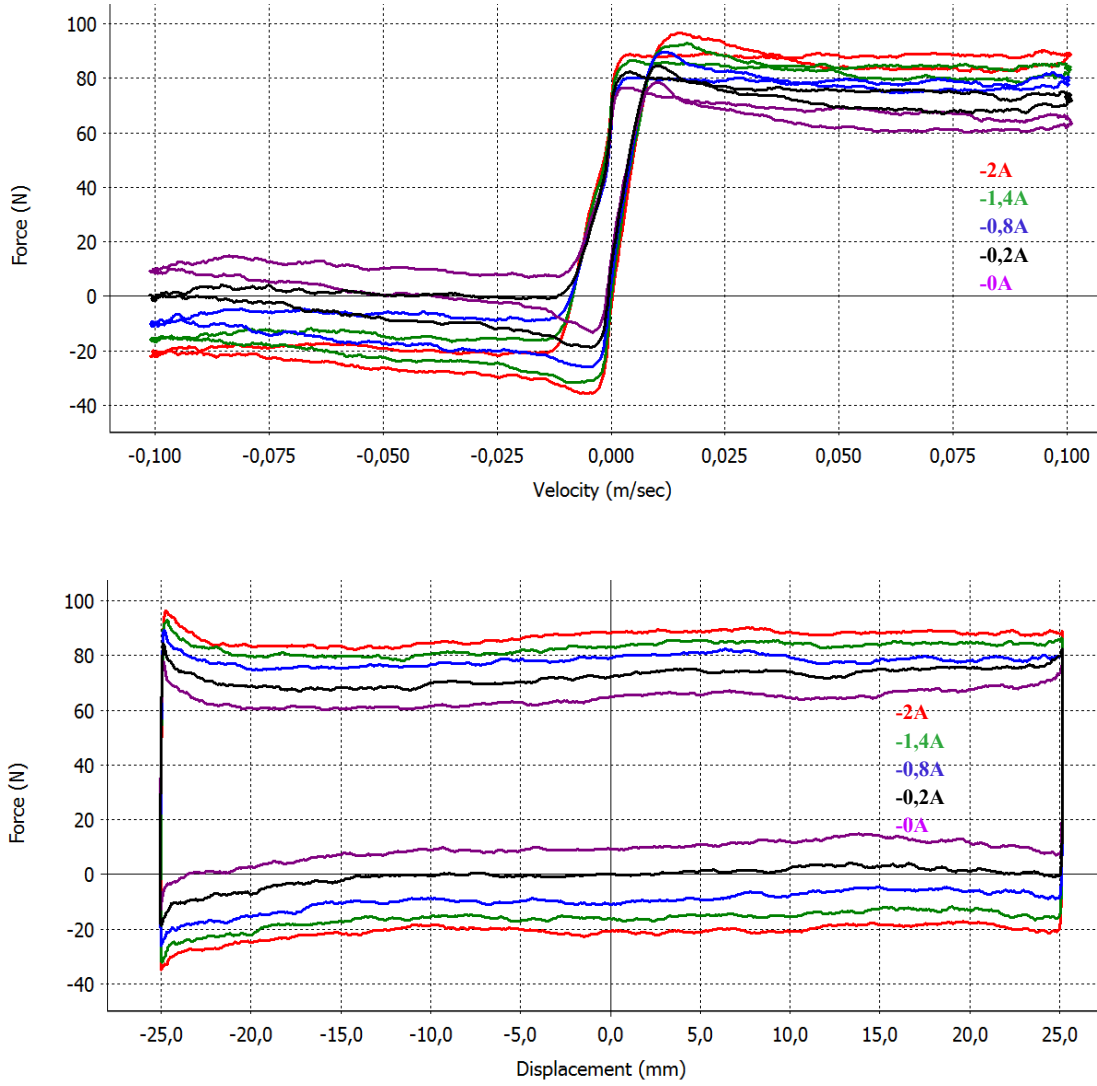
Şekil 3.7. MRF-2'nin 0,3m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değıştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



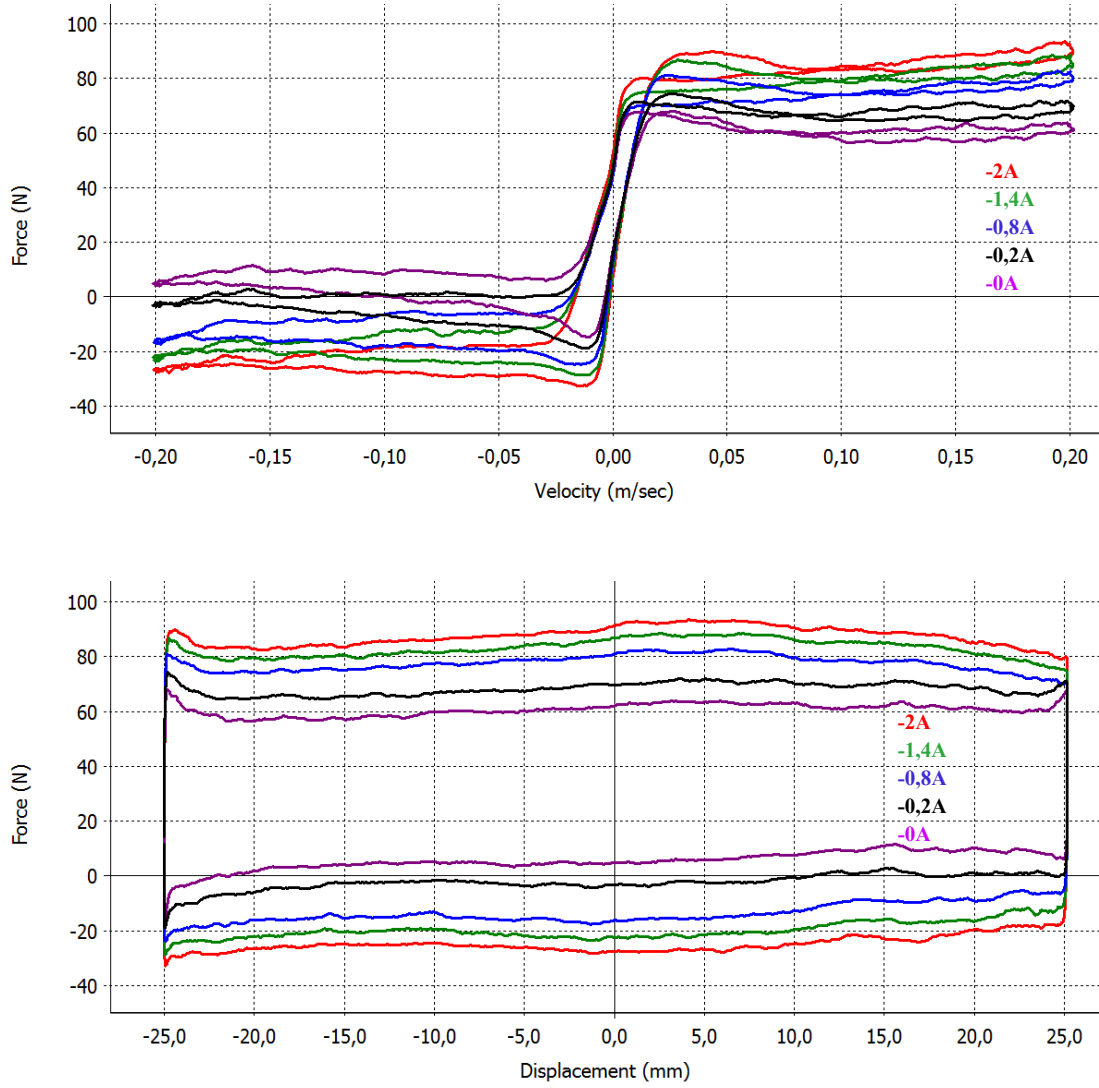
Şekil 3.8. MRF-2'nin 0,4m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümlleme kuvveti-
hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



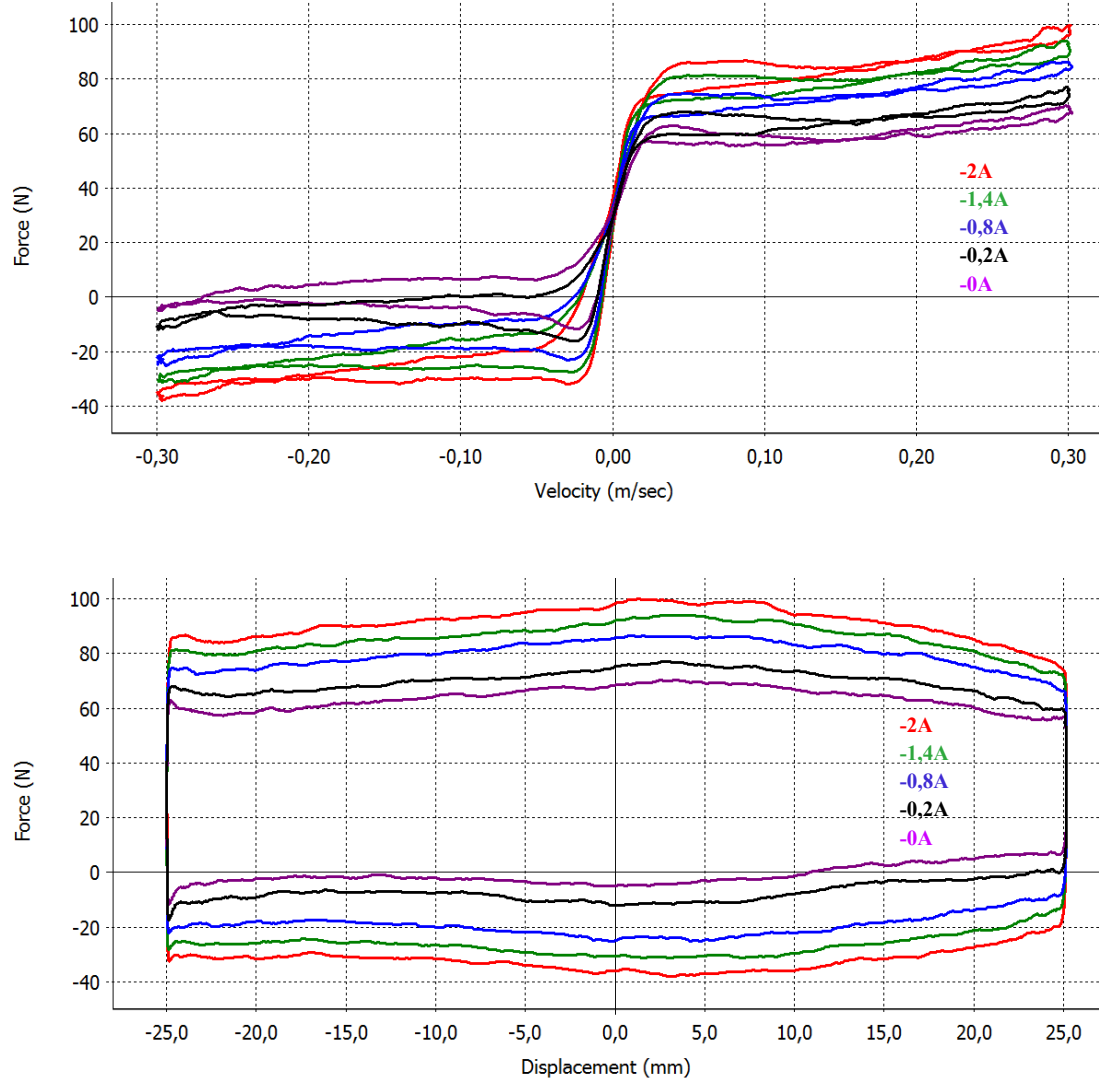
Şekil 3.9. MRF-3'ün 0,1m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümlleme kuvveti-
hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



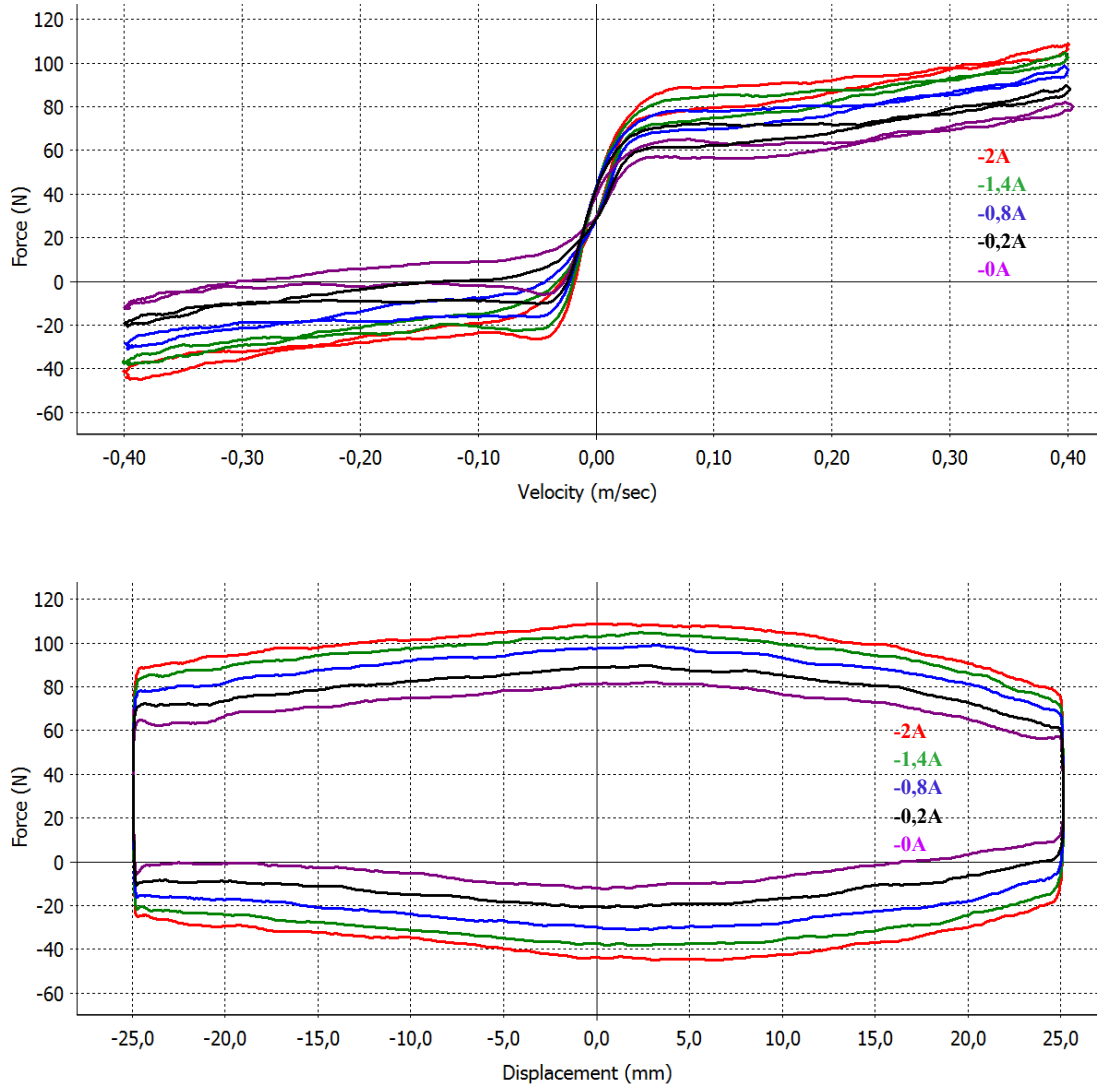
Şekil 3.10. MRF-3'ün 0,2m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümlleme kuvveti-hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



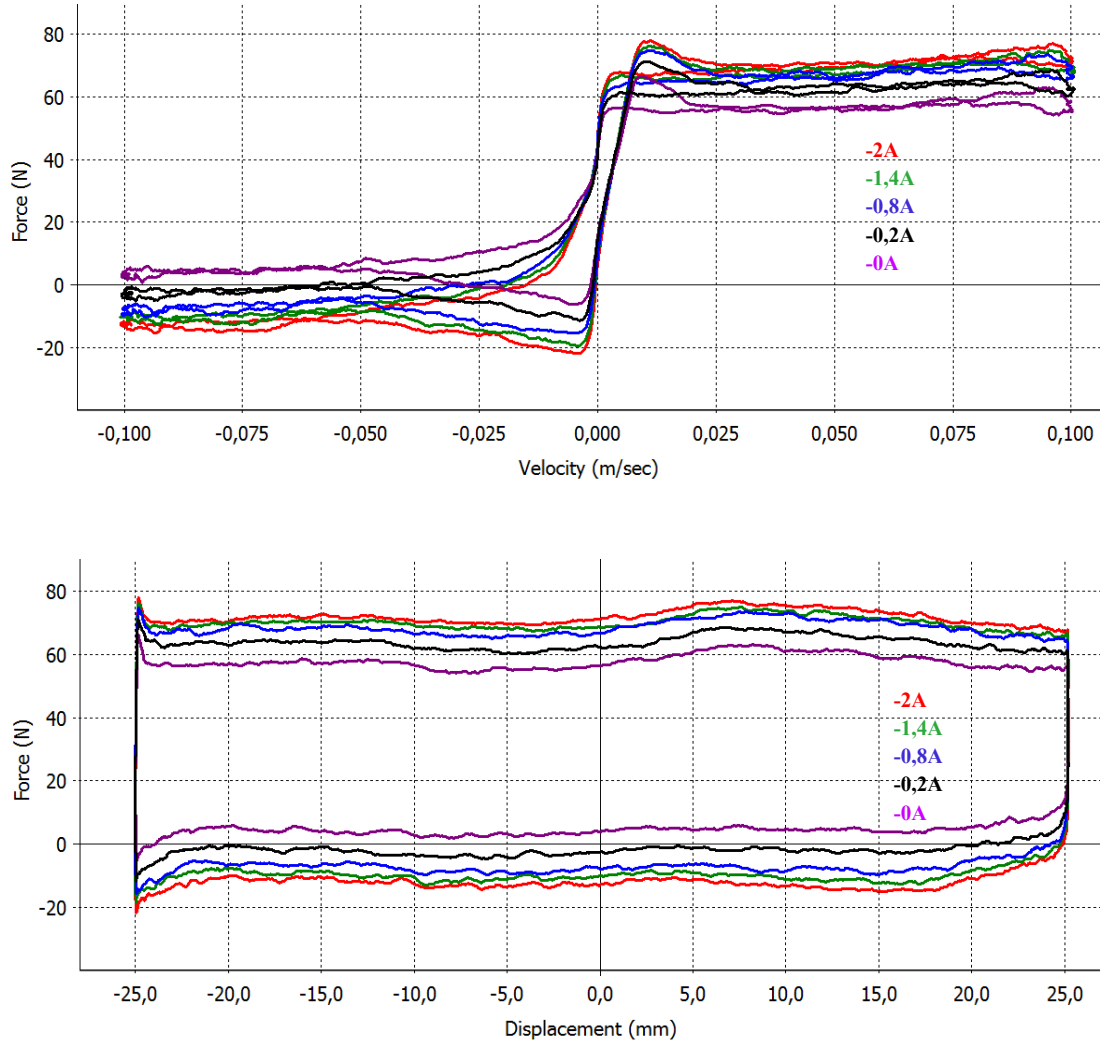
Şekil 3.11. MRF-3'ün 0,3m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümlleme kuvveti-
hız ve sönümlleme kuvveti-yer değıştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



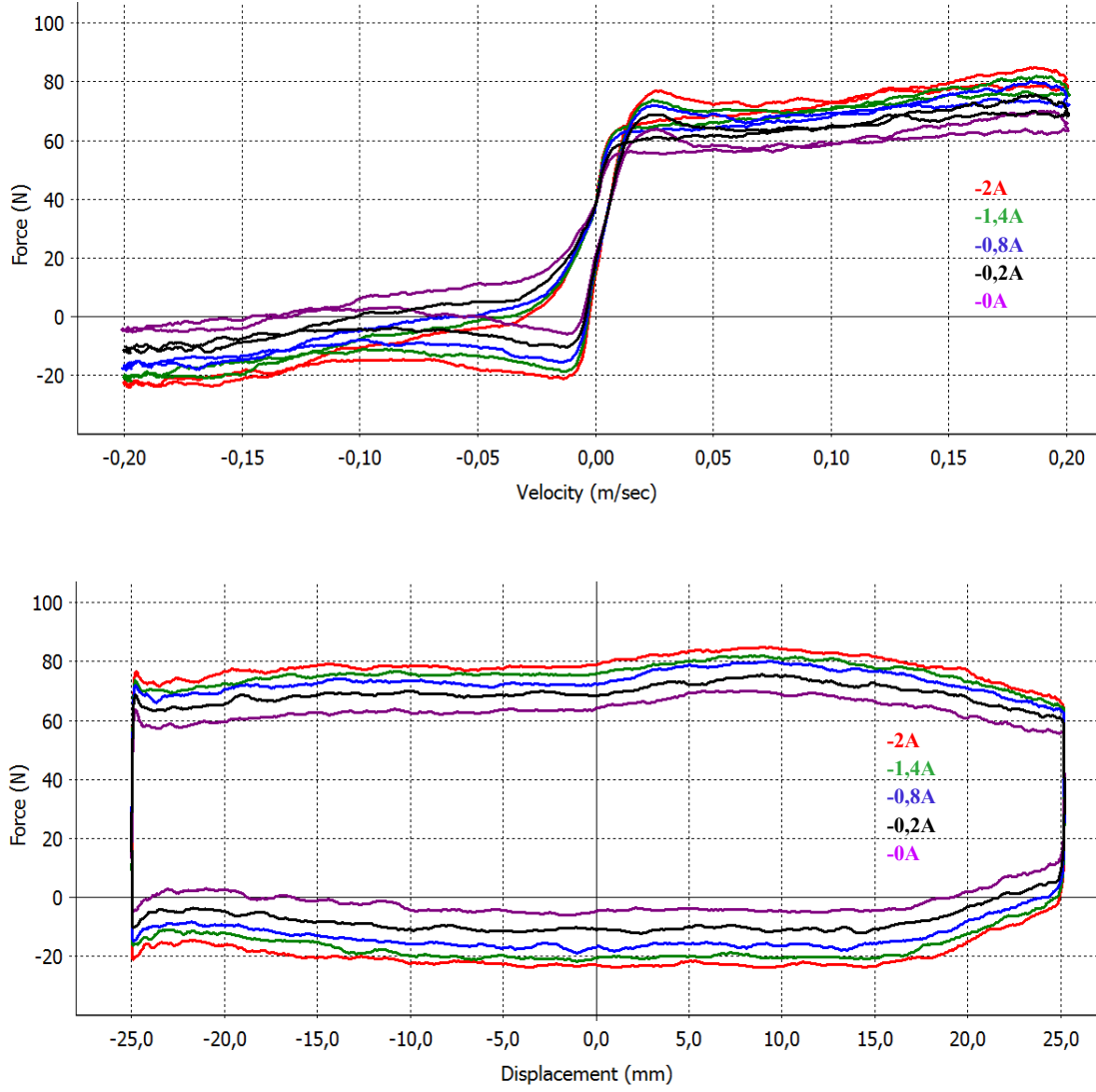
Şekil 3.12. MRF-3'ün 0,4m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümlleme kuvveti-
hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



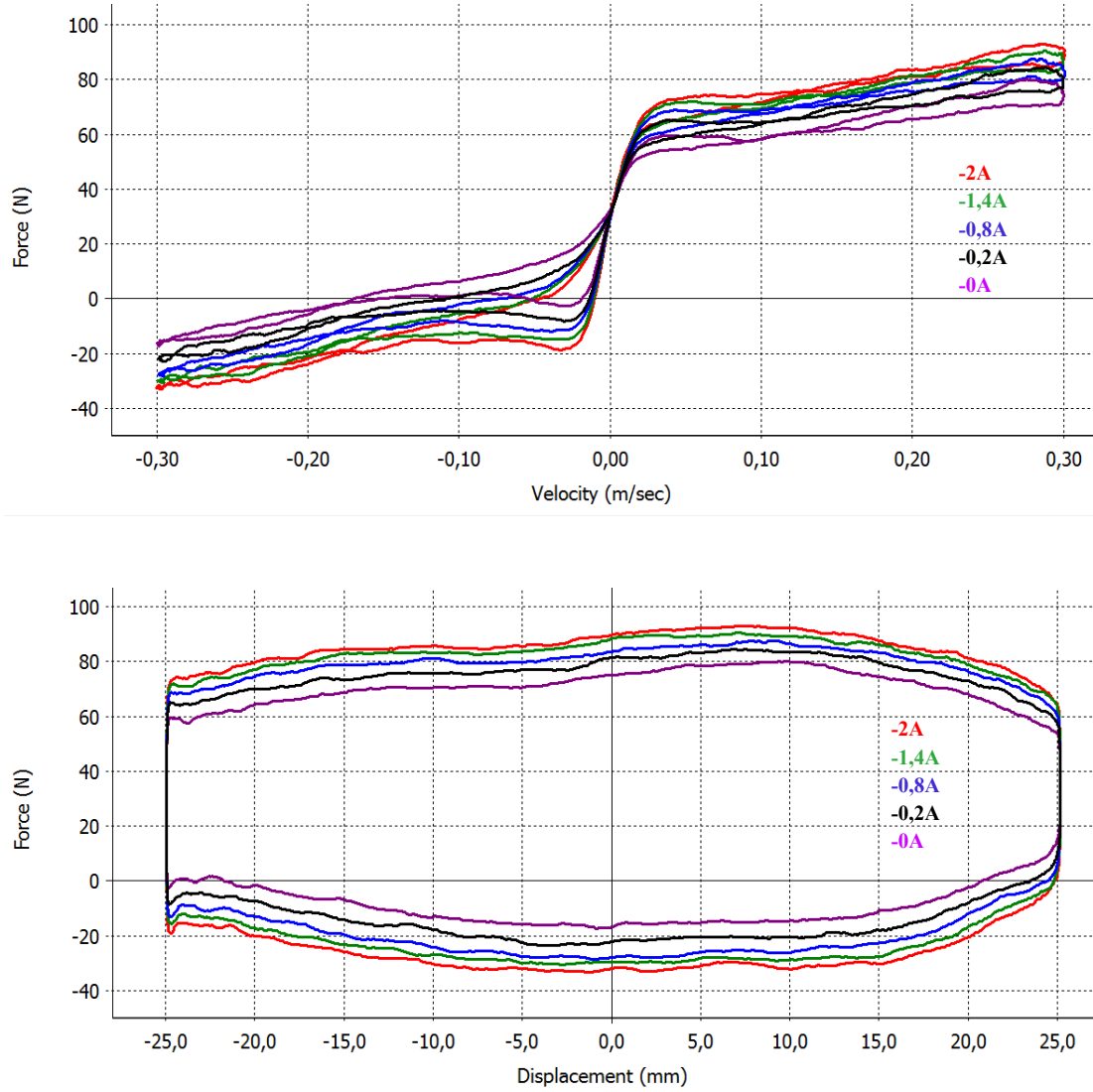
Şekil 3.13. MRF-4'ün 0,1m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümleme kuvveti-
hız ve sönümleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



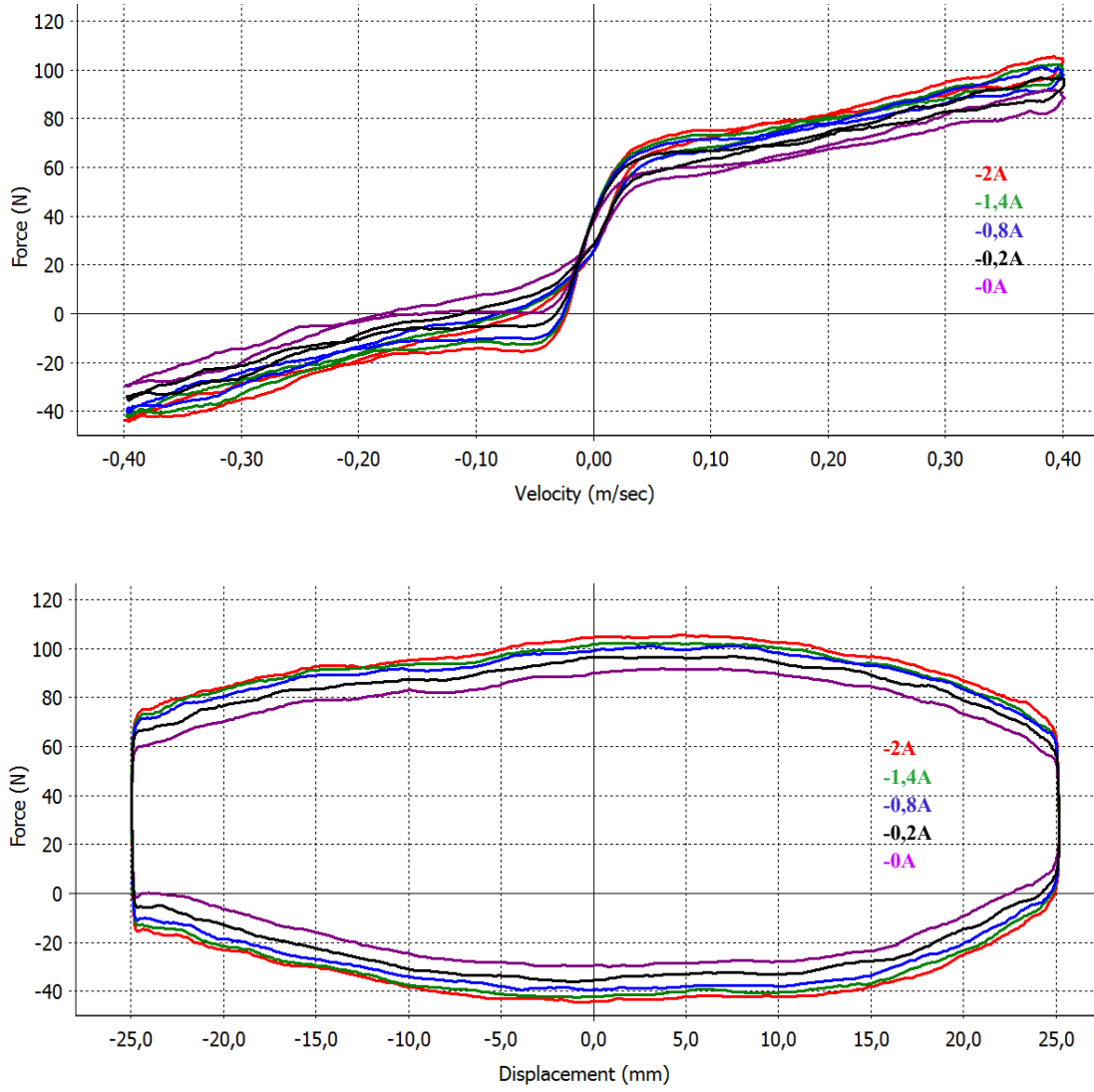
Şekil 3.14. MRF-4'ün 0,2m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümleme kuvveti-
hız ve sönümleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



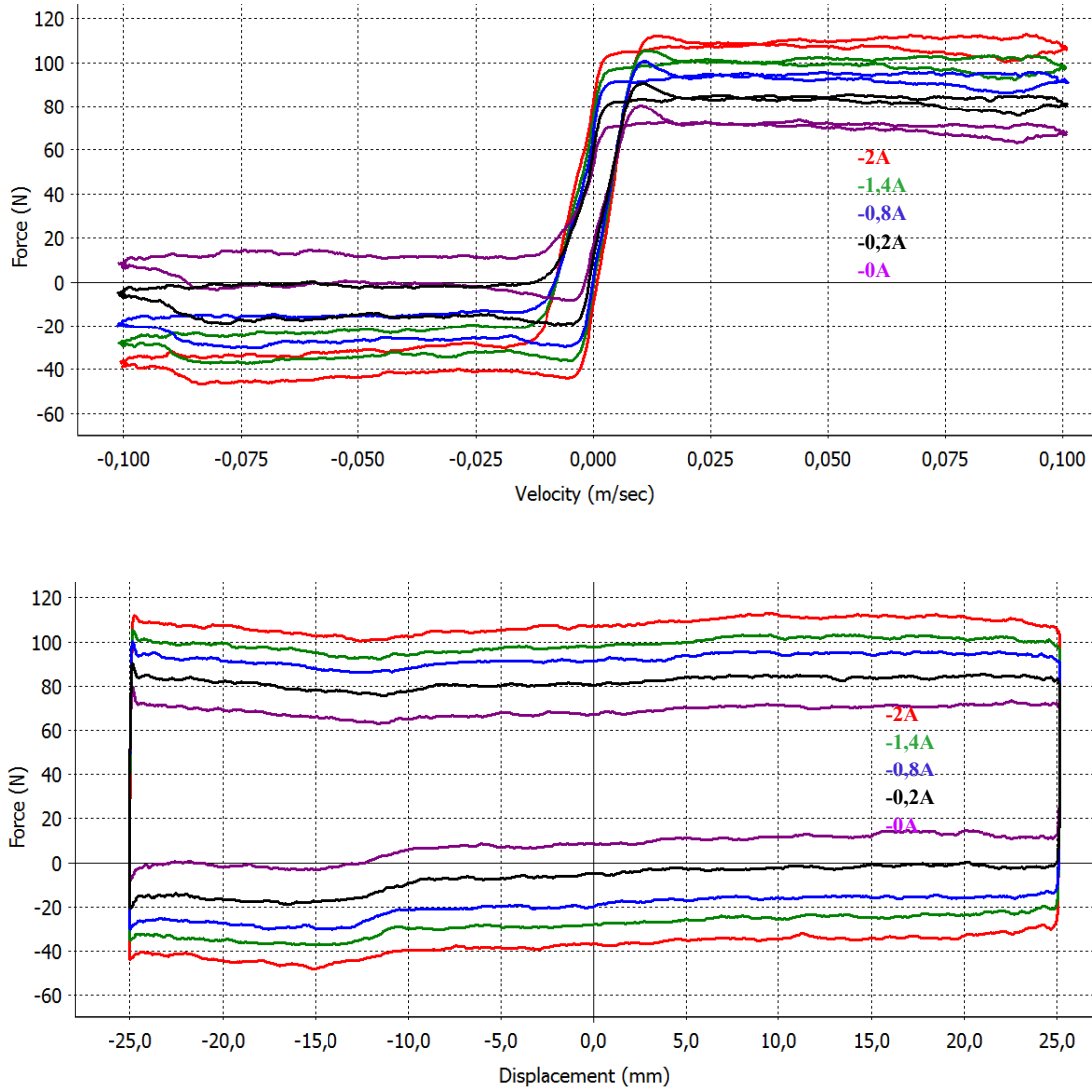
Şekil 3.15. MRF-4'ün 0,3m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümlleme kuvveti-
hız ve sönümlleme kuvveti-yer değıştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



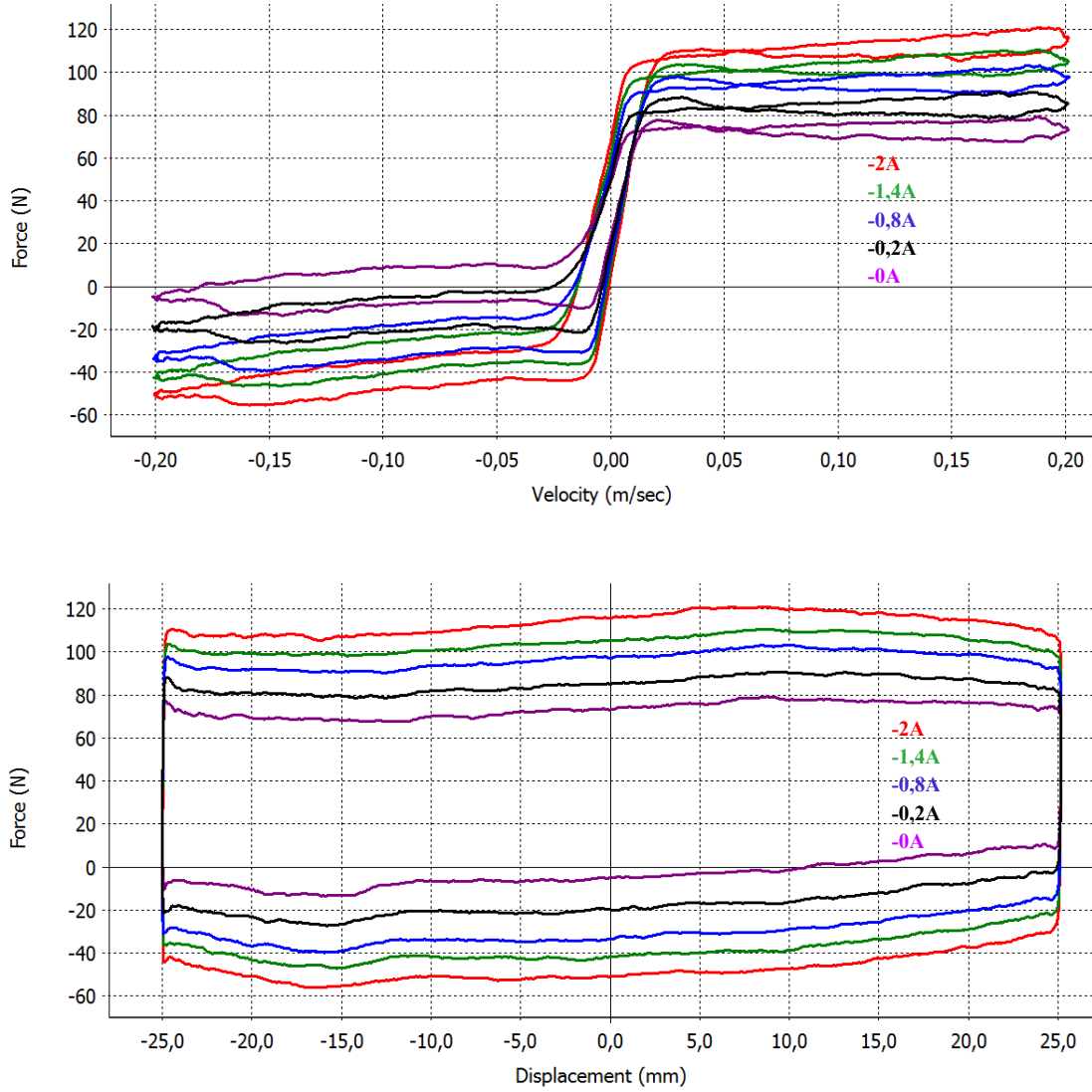
Şekil 3.16. MRF-4'ün 0,4m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümleme kuvveti-
hız ve sönümleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



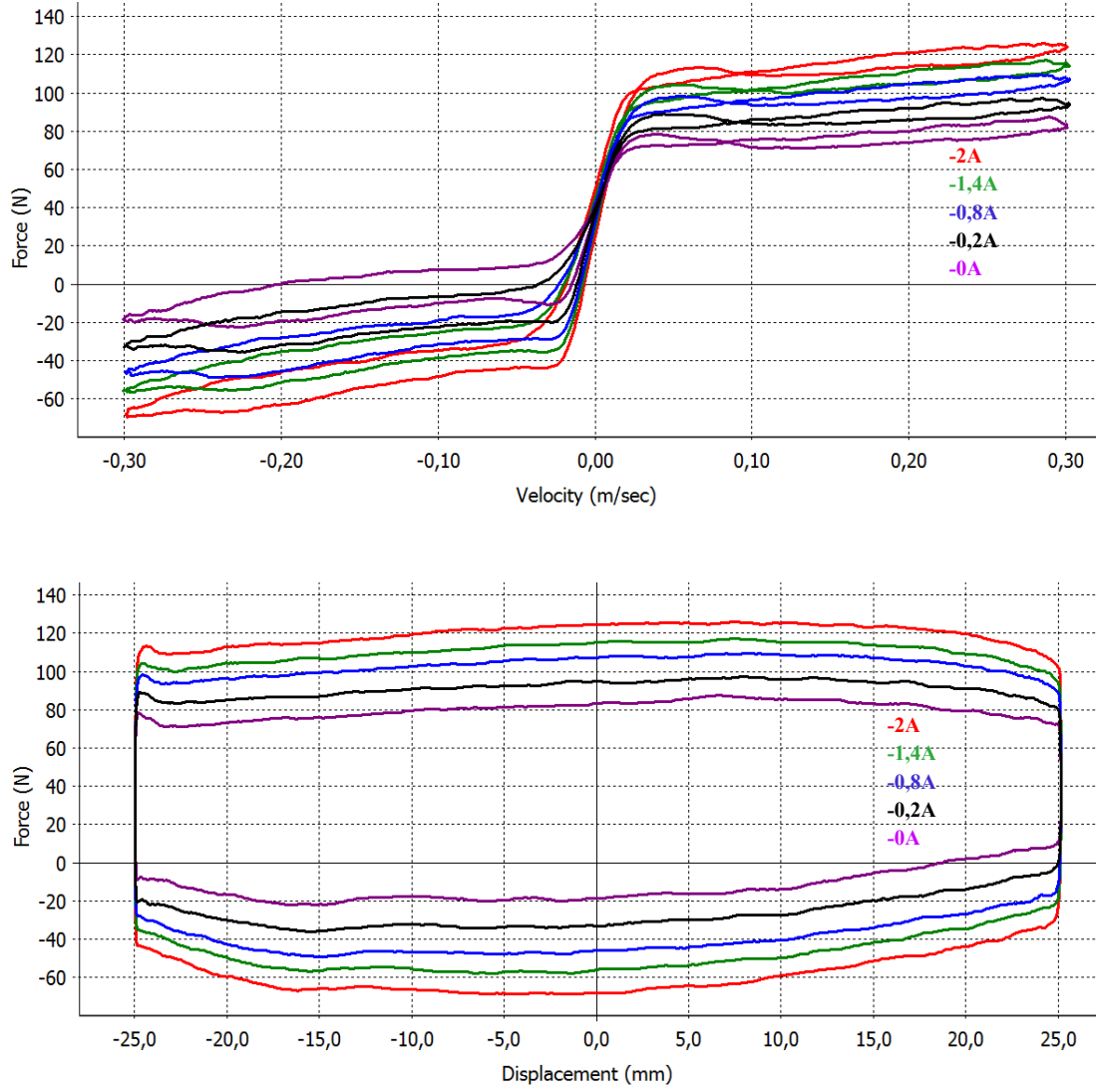
Şekil 3.17. MRF-5'in 0,1m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümlleme kuvveti-
hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



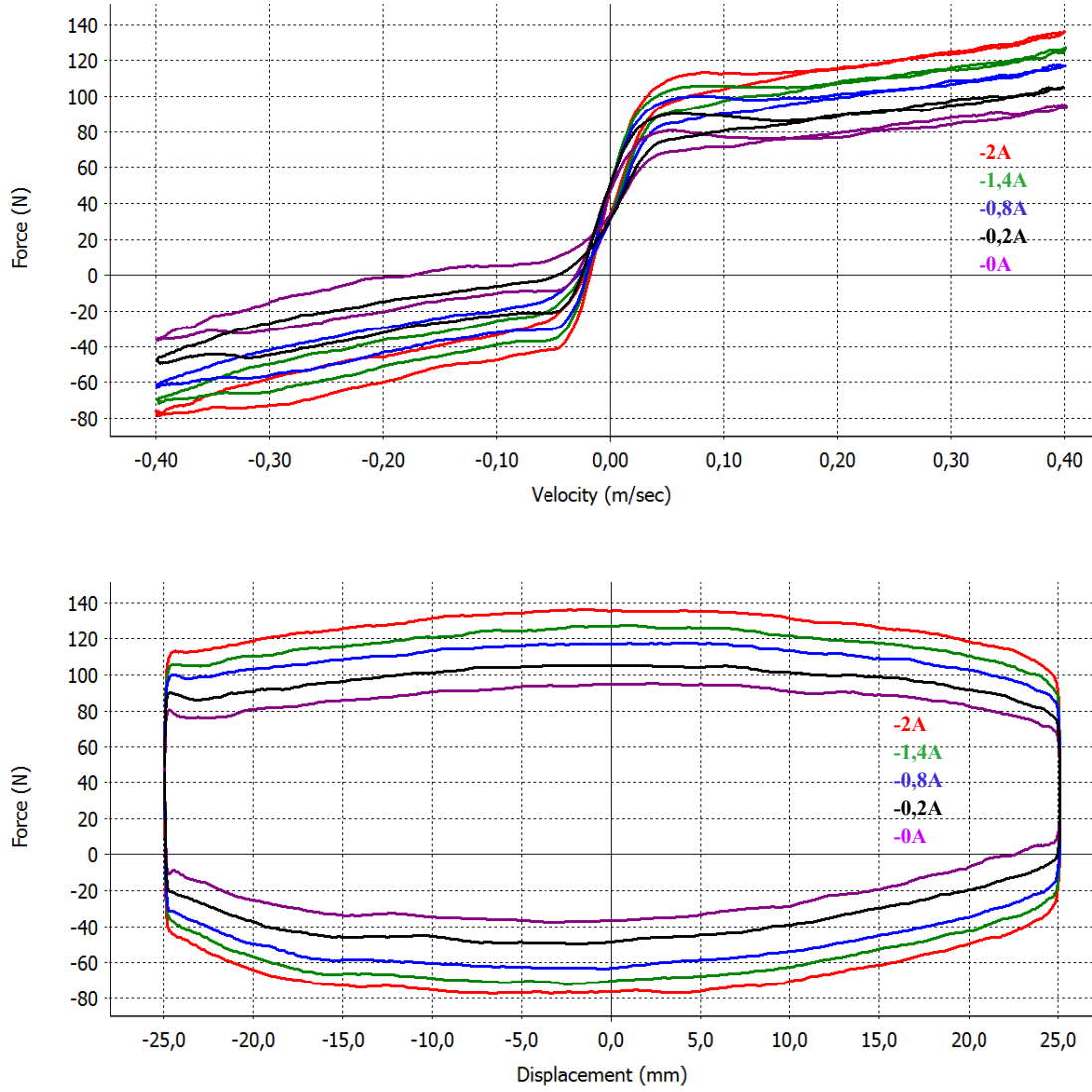
Şekil 3.18. MRF-5'in 0,2m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümlleme kuvveti-
hız ve sönümlleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



Şekil 3.19. MRF-5'in 0,3m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümleme kuvveti-
hız ve sönümleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-3 (Devam) MR sıvılara ait performans grafikleri



Şekil 3.20. MRF-5'in 0,4m/s hız ve farklı akım değerlerindeki sönümleme kuvveti-
hız ve sönümleme kuvveti-yer değiştirme grafikleri

EK-4 Grafik alanı bulma MATLAB kodu

```
clear all
close all
clc

I = imread('D:\\Turgay\\Grafik Alanlari\\mrf52a.jpg');
J = rgb2gray(I);
[m,n]= size(J);

black = 0;
white = 0;

for i=1:m
    for j=1:n
        if J(i,j)>60
            white = white +1;
        else
            black = black + 1;
        end
    end
end

figure
imshow(J);

B = black/(white+black)*100;
W = white/(white+black)*100;
T = B+W
```

EK-5 İki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modeli MATLAB kodu

```

ms=input('Taşıtın tek tekerleğine etkiyen kütleyi giriniz=');
mus=input('Tekerlek kütlesini giriniz=');
ks=input('Süspansiyon yay katsayısını giriniz=');
kus=input('Tekerlek yay katsayısını giriniz=');
cs=input('Pasif süsp. sönüm katsayısını giriniz=');
css=input('MR amortisörün max. sönüm katsayısını giriniz=');
csss= input('MR amortisörün min. sönüm katsayısını giriniz=');
cus=input('Tekerlek sönüm katsayısını giriniz=');
w1=sqrt((kus+ks)/mus); %Tekerlek doğal frekansı
w2=sqrt(ks/ms); %Süspansiyon doğal frekansı
z1=(cus+cs)/(2*mus*w1); %Tekerlek sönüm oranı
z2=cs/(2*ms*w2); %Pasif süspansiyon sönüm oranı
z3=css/(2*ms*w2); %Yarı-aktif süsp. Max. sönüm oranı
z4=csss/(2*ms*w2); %Yarı-aktif süsp. Min. sönüm oranı
rho=ms/mus; %Kütle oranı
%Sistemin matris formunda denklemleri
A=[0 1 0 0; -w1^2+rho*w2^2 -2*z1*w1 rho*w2^2 2*z2*w2*rho; 0 -1 0 1;
0 2*z2*w2 -w2^2 -2*z2*w2];
K=[0 1 0 0; -w1^2+rho*w2^2 -2*z1*w1 rho*w2^2 2*z3*w2*rho; 0 -1 0 1;
0 2*z3*w2 -w2^2 -2*z3*w2];
L=[0 1 0 0; -w1^2+rho*w2^2 -2*z1*w1 rho*w2^2 2*z4*w2*rho; 0 -1 0 1;
0 2*z4*w2 -w2^2 -2*z4*w2];
B=[0 rho 0 -1]';
G=[-1 2*(z1*w1-rho*z2*w2) 0 0]';
H=[-1 2*(z1*w1-rho*z3*w2) 0 0]';
J=[-1 2*(z1*w1-rho*z4*w2) 0 0]';
%İlgilendiğimiz sistem çıkışları
C1=[1 0 0 0]; D1=0.0;
[num1, den1]=ss2tf(A,G,C1,D1,1); %Tekerlek salınımı (pasif)
C2=[0 0 1 0]; D2=0.0;
[num2, den2]=ss2tf(A,G,C2,D2,1); %Süspansiyon salınımı (pasif)
C3=A(4,:); D3=0.0;
[num3, den3]=ss2tf(A,G,C3,D3,1); %Gövde ivmesi (pasif)
E1=[1 0 0 0]; F1=0.0;
[num4, den4]=ss2tf(K,H,E1,F1,1); %Tekerlek salınımı (yarı-aktif, cmax)
E2=[0 0 1 0]; F2=0.0;

```

EK-5 (Devam) İki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modeli MATLAB kodu

```
[num5, den5]=ss2tf(K,H,E2,F2,1); Süsp. salınımı (yarı-aktif,cmax)
E3=K(4,:); F3=0.0;
[num6, den6]=ss2tf(K,H,E3,F3,1); %Gövde ivmesi (yarı-aktif,cmax)
M1=[1 0 0 0]; N1=0.0;
[num7, den7]=ss2tf(L,J,M1,N1,1); %Tekerlek salınımı (yarı-aktif,cmin)
M2=[0 0 1 0]; N2=0.0;
[num8, den8]=ss2tf(L,J,M2,N2,1); Süsp. salınımı (yarı-aktif,cmin)
M3=L(4,:); N3=0.0;
[num9, den9]=ss2tf(L,J,M3,N3,1); %Gövde ivmesi (yarı-aktif,cmin)
t=0:0.005:2; %zaman aralığı
Amp=2e-2; %yol uyarı genliği
Vel=20; %yol uyarısı hızı
sigma=sqrt(2.*pi*Amp*Vel);
w=sigma*randn(size(t)); %Zamana yayılmış toplam yol uyarısı
%İlgilendiğimiz cevaplar
y1=lsim(num1,den1,w,t);
y2=lsim(num2,den2,w,t);
y3=lsim(num3,den3,w,t);
y4=lsim(num4,den4,w,t);
y5=lsim(num5,den5,w,t);
y6=lsim(num6,den6,w,t);
y7=lsim(num7,den7,w,t);
y8=lsim(num8,den8,w,t);
y9=lsim(num9,den9,w,t);
secim=input('Zaman analizi için 1, frekans analizi için 2 yi
tuşlayın=');
%Sistemin zaman alanı cevabı
if secim==1;
subplot(3,1,1), plot(t,y1,'b')
hold on
subplot(3,1,1), plot(t,y4,'r')
hold on
subplot(3,1,1), plot(t,y7,'g')
xlabel('Zaman, t(s)')
ylabel('Tekerlek salinimi, (m)')
grid
```


EK-5 (Devam) İki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modeli MATLAB kodu

```

subplot(3,1,2), plot(t,y2,'b')
hold on
subplot(3,1,2), plot(t,y5,'r')
hold on
subplot(3,1,2), plot(t,y8,'g')
xlabel('Zaman, t(s)')
ylabel('Süspansiyon salınımı, (m)')
grid
subplot(3,1,3), plot(t,y3,'b')
hold on
subplot(3,1,3), plot(t,y6,'r')
hold on
subplot(3,1,3), plot(t,y9,'g')
xlabel('Zaman, t(s)')
ylabel('Yaylanan kütlenin ivmesi, (m/s^2)')
grid
hold off
%Sistemin frekans alanı cevabı
elseif secim==2;
freq=logspace(0,3,100); %Frekans ekseni
[mag1, phase1]=bode(num1,den1,freq);
[mag4, phase4]=bode(num4,den4,freq);
[mag7, phase7]=bode(num7,den7,freq);
subplot(3,1,1), loglog(freq,mag1,'b'); %Logaritmik artışlı eksen
hold on
subplot(3,1,1), loglog(freq,mag4, 'r');
hold on
subplot(3,1,1), loglog(freq,mag7, 'g');
title('Sistemin Frekans Cevabı');
xlabel('Frekans, (rad/s)');
ylabel('Tekerlek salınımı'); grid;
[mag2, phase2]=bode(num2,den2,freq);
[mag5, phase5]=bode(num5,den5,freq);
[mag8, phase8]=bode(num8,den8,freq);
subplot(3,1,2), loglog(freq,mag2,'b');
hold on

```

EK-5 (Devam) İki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modeli MATLAB kodu

```

subplot(3,1,2), loglog(freq,mag5,'r');
hold on
subplot(3,1,2), loglog(freq,mag8,'g');
xlabel('Frekans, (rad/s)');
ylabel('Süspansiyon salinimi'); grid;
[mag3, phase3]=bode(num3,den3,freq);
[mag6, phase6]=bode(num6,den6,freq);
[mag9, phase9]=bode(num9,den9,freq);
subplot(3,1,3), loglog(freq,mag3,'b');
hold on
subplot(3,1,3), loglog(freq,mag6,'r');
hold on
subplot(3,1,3), loglog(freq,mag9,'g');
xlabel('Frekans, (rad/s)');
ylabel('Taşıt gövdesinin ivmesi'); grid;
hold off
else
    disp('Yanlış seçim yaptınız!');
end

```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERGİN, Turgay
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 1981 Edirne
 Medeni hali : Evli (2 çocuk)
 Telefon : 0 (312) 297 62 08
 Faks : 0 (312) 297 62 06
 e-mail : tergin@hacettepe.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Eğitimi A.B.D.	2006
Lisans	Gazi Üniversitesi / Mak. Eğit. / Otomotiv	2003
Lise	İstanbul Ortaköy And. Denizcilik M. L.	1999

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2003-2006	Gazi Üniv. / Atatürk M.Y.O.	Öğr. Gör.
2006-	Hacettepe Üniv. / Makina Müh.	Uzman

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Science Citation Index (SCI) Kapsamındaki Dergilerde Yayımlanmış Makaleler

1. Saridemir, S., **Ergin, T.**, “Performance and exhaust emissions of a spark ignition engine with methanol blended gasoline fuels”, *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 29 (2): 1343-1354, (2012).

2. Koyuncu, K., Unal, H. İ., Gumus, O. Y., Erol O., Sari B., **Ergin, T.**, “Electrokinetic and electrorheological properties of poly(vinyl chloride)/polyindole conducting composites”, *Polymers for Advanced Technologies*, 23 (11): 1464-1472, (2012).

Projeler

1. Altıparmak, D., **Ergin, T.**, “Manyetoreolojik (MR) sıvılı yarı-aktif bir süspansiyon sisteminin tasarımı ve prototip imalatı”, *Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri*, 07/2010-29, 2012, Ankara (Araştırmacı).

Hobiler

Yüzme, Kitap okuma, Futbol, Seyahat