

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI SICAKLIK ŞARTLARI ALTINDA MANYETO-
REOLOJİK SIVILI BİR SÖNÜM ELEMANININ DİNAMİK
KARAKTERİZASYONUNUN ELDE EDİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa Ertürk SÖYLEMEZ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Zekeriya PARLAK

Ocak 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

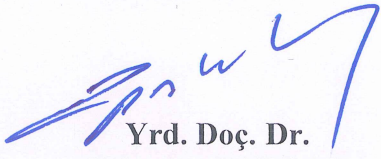
FARKLI SICAKLIK ŞARTLARI ALTINDA MANYETO-
REOLOJİK SIVILI BİR SÖNÜM ELEMANININ DİNAMİK
KARAKTERİZASYONUNUN ELDE EDİLMESİ


YÜKSEK LİSANS TEZİ

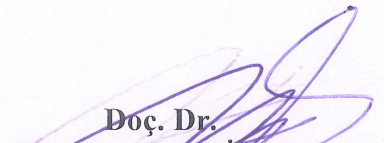
Mustafa Ertürk SÖYLEMEZ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 18.01.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Yrd. Doç. Dr.
Zekeriya PARLAK
Jüri Başkanı


Doç. Dr.
Elif ÖĞÜT
Üye


Doç. Dr.
Hüseyin PEHLİVAN
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Mustafa Ertürk SÖYLEMEZ

18.01.2018

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Zekeriya PARLAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2017-01-06-010) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|---------------------------------------|------|
| TEŞEKKÜR | i |
| İÇİNDEKİLER | ii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ | iv |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | vii |
| TABLOLAR LİSTESİ | xi |
| ÖZET | xii |
| SUMMARY | xiii |

BÖLÜM 1.

| | |
|-------------------------------|---|
| GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Amaç ve Kapsam..... | 1 |
| 1.2. Literatür Çalışması..... | 3 |

BÖLÜM 2.

| | |
|---|----|
| MANYETO-REOLOJİK SIVILAR..... | 14 |
| 2.1. MR, ER VE Ferro Sıvılar..... | 16 |
| 2.1.1. MR sıvılar..... | 18 |
| 2.1.2. Manyeto-Reolojik sıvının akış modelleri..... | 24 |
| 2.1.3. MR sıvı uygulama alanları..... | 27 |

BÖLÜM 3.

| | |
|--------------------|----|
| MR DAMPERLER | 31 |
|--------------------|----|

BÖLÜM 4.

| | |
|--|----|
| MR DAMPERİN SICAKLIĞA BAĞLI DİNAMİK KARAKTERİZASYONU | 36 |
| 4.1. Sıcaklığa Bağlı Bir Bouc-Wen Modeli Geliştirilmesi..... | 37 |

BÖLÜM 5.

| | |
|--|----|
| MR DAMPERİN SAYISAL HESAPLAMALARI..... | 40 |
| 5.1. Manyetik Akı Yoğunluğunun Hesaplanması..... | 40 |
| 5.2. Manyetik Alan Analizi için Çözüm Ağı..... | 44 |
| 5.3. MR Damper İçindeki Akışın Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile Analizi..... | 46 |

BÖLÜM 6.

| | |
|--|----|
| DENEYSEL ÇALIŞMA VE KARŞILAŞTIRMALAR..... | 49 |
| 6.1. İmalat ve Testleri Yapılan MR Sıvılı Damperin Tasarımı..... | 50 |
| 6.2. MR Sıvının Farklı Sıcaklıklarda Karakterizasyonun Belirlenmesi.. | 52 |
| 6.3. Deney Sonuçları ve Modellerin Karşılaştırılması..... | 62 |
| 6.3.1. MR damperin sıcaklığa bağlı dinamik karakterizasyonu için parametrelerin belirlenmesi..... | 62 |
| 6.3.2. Deneysel sonuçla sayısal analiz sonucunun karşılaştırılması..... | 70 |

BÖLÜM 7.

| | |
|---|----|
| SICAKLIK VE BAZI TASARIM PARAMETRELERİNİN DAMPER PERFORMANSINA ETKİSİ..... | 73 |
| 7.1. Deneysel Tasarım ile Belirlenmiş Optimal MR Damperler..... | 75 |
| 7.2. En Yüksek Dinamik Oran için Optimum Tasarım..... | 76 |
| 7.3. En Yüksek Kuvvet için Optimum Tasarım..... | 80 |
| 7.4. Manyetik Alan Analizleri..... | 83 |

BÖLÜM 8.

| | |
|---------------------------|----|
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 94 |
|---------------------------|----|

| | |
|-----------------|----|
| KAYNAKLAR | 97 |
|-----------------|----|

| | |
|----------------|-----|
| ÖZGEÇMİŞ | 102 |
|----------------|-----|

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|---------------|---|
| a | : Strok (m) |
| A_c | : Bobin kesit alanı (m ²) |
| A_g | : Halkasal kanal kesit alanı (m ²) |
| A_{gh} | : Manyetik akımın geri dönüş yaptığı halkasal kesit alanı (m ²) |
| A_k | : Piston kolu kesit alanı (m ²) |
| A_p | : Piston kafası kesit alanı (m ²) |
| A_{RC} | : Piston göbeği dairesel dairesel kesit alanı (m ²) |
| A_w | : Bobin telinin kesit alanı (m ²) |
| B | : Manyetik akı yoğunluğu (T) |
| Bi | : Boyutsuz Bingham sayısı |
| C | : Akış hızı profiline katsayı |
| CFD | : Hesaplamalı akışkanlar dinamiği |
| $c_0\dot{x}$ | : Bouc-Wen modelinde viskoz kuvvet (N) |
| D | : Dinamik aralık |
| DOF | : Serbestlik derecesi |
| e | : Epoksi macun kalınlığı (m) |
| E_t | : Zamana bağlı hata |
| E_x | : Yer değiştirmeye bağlı hata |
| $E_{\dot{x}}$ | : Hıza bağlı hata |
| F | : Toplam damper kuvveti (N) |
| f | : Bouc-Wen modelindeki toplam damper kuvveti (N) |
| F_e | : Testlerde ölçülen kuvvet (N) |
| F_o | : Bir çevrim boyunca ölçülen kuvvetin ortalama değeri (N) |
| F_s | : Sürtünme kuvveti (N) |
| F_{μ} | : Viskoz kuvvet (N) |

| | |
|------------|---|
| F_{τ} | : Manyetik alan kuvveti (N) |
| f_z | : Histerisizlik kuvveti (N) |
| f_{z0} | : Sıfır hızındaki histerisizlik kuvveti (N) |
| g | : Kanal genişliği (m) |
| g_h | : Manyetik akı geri dönüş genişliği (m) |
| H | : Manyetik alan şiddeti (A/m) |
| I | : Akım (A) |
| K | : Herschel-Bulkley modelindeki uyumluluk endeksi |
| k_{0x} | : Bouc-Wen modelindeki akümülatördeki gazdan gelen kuvvet |
| L | : Kanal uzunluğu (m) |
| N | : Herschel-Bulkley modelindeki akış davranış endeksi |
| MSD | : Ortalama kareler sapması |
| P | : Basınç (Pa) |
| ΔP | : Toplam basınç düşüşü (Pa) |
| Q | : Hacimsel debi ($m^3.s^{-1}$) |
| r | : Kanaldaki bir noktanın silindir merkezine göre yarıçapı (m) |
| R | : Piston kafası yarıçapı (m) |
| R_c | : Piston göbeği yarıçapı (m) |
| S | : Karelerin toplamı |
| S/N | : Sinyal/Gürültü oranı |
| t | : Zaman (s) |
| t_k | : Aktif uzunluk (m) |
| u_p | : Piston hızı ($m.s^{-1}$) |
| V | : Varyans |
| W | : Bobin genişliği (m) |
| X | : Yer değiştirme (m) |
| \dot{x} | : Hız ($m.s^{-1}$) |

Greek Sembolleri

| | |
|----------------|-------------------------------------|
| r, θ, z | : Silindirik koordinat eksenleri |
| μ | : Dinamik viskozite (Pa.s) |
| μ_B | : Bingham sıvısı viskozitesi (Pa.s) |
| μ_p | : Plastik viskozite (Pa.s) |

| | |
|--|---|
| ρ | : Yoğunluk (kg.m^{-3}) |
| Ω | : Açısal hız (rad.s^{-1}) |
| Φ | : Manyetik akı (V.s) |
| $\dot{\gamma}$ | : Şekil değiştirme hızı (s^{-1}) |
| τ | : Kayma gerilmesi (Pa) |
| τ_y | : Akma gerilmesi (Pa) |
| $\alpha, \beta, \gamma, A, c_0,$ k_0, n | : Bouc-Wen modelindeki karakteristik parametreler |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1. İncelen veya kalınlaşan akışkanlar τ ile γ ilişkisi | 15 |
| Şekil 2.2. Bingham akışkanlar için τ ile γ ilişkisi | 16 |
| Şekil 2.3. Manyetik alan uygulanmadan önce ve sonrası için parçacık dağılımı.... | 20 |
| Şekil 2.4. MR sıvı valf tipi çalışma | 20 |
| Şekil 2.5. MR sıvı kayma tipi çalışma..... | 21 |
| Şekil 2.6. MR sıvı sıkıştırma tipi çalışma..... | 22 |
| Şekil 2.7. MRF 132-DG'nin akma gerilmesi ile manyetik alan şiddeti değişiminin eğrisi..... | 23 |
| Şekil 2.8. MRF 132-DG'nin manyetik alan şiddeti ile manyetik akı yoğunluğu grafiği..... | 24 |
| Şekil 2.9. MR akışkanın kayma gerilmesi ve hız profili görüntüsü..... | 25 |
| Şekil 2.10. İncelen akışta Herschel-Bulkley modeli..... | 26 |
| Şekil 2.11. Klasik MR damperin kesit görüntüsü..... | 27 |
| Şekil 2.12. Basit MR frenin tasarımı..... | 28 |
| Şekil 2.13. (a) Kampen yakınındaki Eiland köprüsü (Hollanda); (b) 164 metre uzunluğundaki kabloda MR damper..... | 29 |
| Şekil 2.14. Hubble uzay teleskobu..... | 29 |
| Şekil 2.15. MR damperli protez diz ve temel elemanları..... | 30 |
| Şekil 3.1. MR damperin şematik yapısı..... | 31 |
| Şekil 3.2. MR sıvılı damperin piston yapısı..... | 32 |
| Şekil 3.3. Tek tüplü MR damper kesit görüntüsü..... | 33 |
| Şekil 3.4. Çift tüplü MR damper kesit görüntüsü..... | 33 |
| Şekil 3.5. Taban valfinin detaylı kesit görüntüsü..... | 34 |
| Şekil 3.6. Çift uçlu MR damper kesit görüntüsü..... | 35 |
| Şekil 4.1. Bouc-Wen modeli..... | 37 |
| Şekil 5.1. Manyetik alan analizi için yapılması gereken basamaklar..... | 41 |

| | |
|--|----|
| Şekil 5.2. MRF132-DG'nin B-H eğrisi..... | 42 |
| Şekil 5.3. St37 çeliğinin B-H eğrisi..... | 42 |
| Şekil 5.4. Parametrelerin gösterimi..... | 43 |
| Şekil 5.5. Piston kafasının kesit görünümü ve geometrik büyüklükleri..... | 43 |
| Şekil 5.6. MR sıvı ve piston başı içim oluşturulan çözüm ağı..... | 44 |
| Şekil 5.7. Manyetik akı yoğunluğu..... | 45 |
| Şekil 5.8. Manyetik alan döngüsü..... | 45 |
| Şekil 5.9. Akış analizi için gerekli basamaklar..... | 47 |
| Şekil 5.10. ANSYS CFX'de manyetik alan yoğunluğu verilerinin tanımlanmış hali..... | 48 |
| Şekil 6.1. Deneysel test düzeneği..... | 49 |
| Şekil 6.2. Üretimini gerçekleştirdiğimiz MR damper ölçüleri..... | 50 |
| Şekil 6.3. İmalatı gerçekleştirilen MR damper..... | 51 |
| Şekil 6.4. MR damperin kesit görüntüsü..... | 52 |
| Şekil 6.5. Anton Paar test düzeneği..... | 53 |
| Şekil 6.6. Farklı akımlar altında akma gerilmesiyle deformasyon hızının ilişkisi... | 54 |
| Şekil 6.7. 20°C Manyetik akı yoğunluğu ve parametreler arasındaki ilişkiler; a)B- τ , b) B-k, c) B-n..... | 56 |
| Şekil 6.8. 30°C Manyetik akı yoğunluğu ve parametreler arasındaki ilişkiler; a)B- τ , b) B-k, c) B-n..... | 56 |
| Şekil 6.9. 40°C Manyetik akı yoğunluğu ve parametreler arasındaki ilişkiler; a)B- τ , b) B-k, c) B-n..... | 57 |
| Şekil 6.10. 50°C Manyetik akı yoğunluğu ve parametreler arasındaki ilişkiler; a)B- τ , b) B-k, c) B-n..... | 57 |
| Şekil 6.11. 60°C Manyetik akı yoğunluğu ve parametreler arasındaki ilişkiler; a)B- τ , b) B-k, c) B-n..... | 58 |
| Şekil 6.12. 70°C Manyetik akı yoğunluğu ve parametreler arasındaki ilişkiler; a)B- τ , b) B-k, c) B-n..... | 58 |
| Şekil 6.13. Eğriye uygun denklem seçimi..... | 59 |
| Şekil 6.14. Deneysel kuvvet-zaman eğrisi ile denklem eğrisinin uyumu..... | 63 |
| Şekil 6.15. Farklı sıcaklıklar altında c_0 , k_0 , α , γ , β , f_{z0} ve A parametrelerinin değerleri..... | 63 |

| | |
|---|----|
| Şekil 6.16. 20°C sıcaklığında kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafiği..... | 65 |
| Şekil 6.17. 30°C sıcaklığında kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafiği..... | 65 |
| Şekil 6.18. 40°C sıcaklığında kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafiği..... | 66 |
| Şekil 6.19. 50°C sıcaklığında kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafiği..... | 66 |
| Şekil 6.20. 60°C sıcaklığında kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafiği..... | 67 |
| Şekil 6.21. 70°C sıcaklığında kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafiği..... | 67 |
| Şekil 6.22. Deneysel sonuçla akışın sayısal sonucunun kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafiklerinin karşılaştırılması..... | 71 |
| Şekil 7.1. Dinamik aralık analizi için sinyal gürültü oranı grafiksel gösterim..... | 78 |
| Şekil 7.2. Kuvvet değeri analizi için sinyal gürültü oranı grafiksel gösterim..... | 81 |
| Şekil 7.3. Bir numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız..... | 84 |
| Şekil 7.4. İki numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız..... | 85 |
| Şekil 7.5. Üç numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız..... | 86 |
| Şekil 7.6. Dört numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız..... | 87 |
| Şekil 7.7. Beş numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız..... | 88 |
| Şekil 7.8. Altı numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız..... | 89 |
| Şekil 7.9. Yedi numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız..... | 90 |

Şekil 7.10. Sekiz numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız..... 91

Şekil 7.11. Dokuz numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız..... 92

TABLolar LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Tablo 2.1. ER ve MR sıvılarının karşılaştırılması | 17 |
| Tablo 2.2. Ferro ve MR sıvılarının karşılaştırılması..... | 18 |
| Tablo 2.3. MRF 132-DG kodlu MR sıvı özellikleri..... | 22 |
| Tablo 6.1. Farklı sıcaklıklar ve farklı akımlar altında Manyetik akı yoğunlukları... 55 | |
| Tablo 6.2. B- τ_y denklem katsayıları..... | 60 |
| Tablo 6.3. B-k denklem katsayıları..... | 60 |
| Tablo 6.4. B-n denklem katsayıları..... | 61 |
| Tablo 6.5. Herschel-Bulkley interpolasyonunda kullanılan matris örneği..... | 61 |
| Tablo 6.6. Hata analiz sonuçları..... | 69 |
| Tablo 6.7. CFX ile deneysel sonucun hata analizi..... | 71 |
| Tablo 7.1. Değişken parametre ölçüleri ve seviyeleri..... | 75 |
| Tablo 7.2. L9 Ortogonal dizideki parametrelerin sayısal değerleri..... | 76 |
| Tablo 7.3. Dinamik aralık ve S/N oranı değerleri..... | 77 |
| Tablo 7.4. Seviyelere göre sinyal gürültü oranları..... | 78 |
| Tablo 7.5. Optimum seviyeler ve değerler..... | 79 |
| Tablo 7.6. Dinamik aralık için ANOVA analizi..... | 79 |
| Tablo 7.7. En yüksek kuvvet ve S/N oranı değerleri..... | 80 |
| Tablo 7.8. Seviyelere göre sinyal gürültü oranları..... | 81 |
| Tablo 7.9. Optimum seviyeler ve değerler..... | 82 |
| Tablo 7.10. En yüksek kuvvet için ANOVA analizi..... | 82 |

ÖZET

Anahtar kelimeler: Magneto-reolojik darbe sönümleyici, MR darbe sönümleyici, MR cihazlar, MR sıvılar, MR damper, Bouc-Wen modeli

MR damperler sahip oldukları yüksek potansiyelden dolayı gün geçtikçe daha çok bilim insanının ve bilim dalının ilgisini çekmektedir. Otomotiv, inşaat, optik ve biyomedikal gibi alanlar kullanım alanlarının başında gelmektedir.

Bu çalışmada bir MR sönümlenme elemanı tasarlanıp, imal edilip ve aynı akım ve strokta testlere tabi tutulmuştur ve bu testlerde farklı sıcaklıkların etkileri araştırılmıştır. Dinamik davranışları klasik Bouc-Wen temelinde modellenmiştir. Daha sonra bu modelin yedi değişken parametresi sadece sıcaklığa bağlı olacak şekilde ifade edilmiştir. Bu şekilde toplam damper kuvveti denklemi sadece sıcaklığa bağlı olarak analitik bir forma dönüştürülmüştür. Deneysel verilerden elde edilen sonuçlarla modelin sonuçları karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar gözlemlenmiştir. Daha sonra aralarındaki hata oranları hesaplanmıştır.

Ayrıca MR sıvısının farklı sıcaklıklarda davranışları test edilmiş ve buradan elde edilen veriler sayısal analizlerde kullanılmıştır. MR damperin manyetik alan analizleri ve analizlere bağlı olarak modelin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri bir paket programı kullanılarak elde edilmiştir.

Bu çalışmada ayrıca Taguchi deneysel yöntemi kullanılarak dört farklı parametre için üç farklı seviye belirlenmiş ve bu seviyelerin damperin performansına olan etkileri incelenmiştir.

DYNAMIC CHARACTERIZATION OF A MAGNETO-RHEOLOGICAL FLUID DAMPER ELEMENT UNDER DIFFERENT TEMPERATURE CONDITIONS

SUMMARY

Keywords: Magnetorheological shock absorber, MR shock absorber, MR devices, MR fluid, MR damper, Bouc-Wen model

Since MR dampers have a high potential, they are increasingly attracted to the interests of scientists and science. Areas such as automotive, construction, optics and biomedical are at the top of their use.

In this study, an MR damping element was designed, manufactured and subjected to the same current and stroke tests, and the effects of different temperatures were investigated in these tests. Dynamic behaviors are modeled on the basis of classical Bouc-Wen. Then, the seven variable parameters of this model are expressed as only temperature dependent. In this way, the total damper force equation is transformed into an analytical form only depending on the temperature. The results of the model and the results obtained from the experimental data were compared and harmonized results were observed. Then the error rates between them are calculated.

In addition, the behavior of MR fluid at different temperatures was tested and the data obtained from there were used for numerical analysis. Depending on the magnetic field analysis of the MR damper, the model's calculated fluid dynamics (HAD) analysis were obtained using a packet program.

In this study, three different levels were determined for four different parameters using Taguchi experimental method and the effects of these levels on damper performance were examined.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Magneto-Reolojik (MR) sıvılar ilk kez 1940'lı yıllarda keşfedilmesine karşın bu konu üzerinde yapılan ciddi araştırmalar 1990 sonrasında itibaren başlamıştır. MR sıvı ile kullanılabilen cihazlardan biri olan damperler, yarı aktif titreşim kontrollü sistemlerden olup sahip oldukları yüksek titreşim sönümlenme potansiyeli sayesinde son yıllarda gerek bilim insanlarının gerekse teknolojik firmaların ilgilerini ve yatırımlarını üzerlerine çekmeyi başarmışlardır. Yarı aktif titreşim kontrollü sistemler hem aktif titreşim kontrollü sistemlerin hem de pasif kontrollü sistemlerin özelliklerini gösterebilmeleri sayesinde kullanım alanları gittikçe yaygınlaşan bir sistem haline dönüşmüştür. Ancak günümüzde hala daha dinamik karakterizasyonu tam olarak keşfedilememiş ve optimum tasarımına sahip olabilmek için araştırma ve geliştirmeler devam etmektedirler. Optimum tasarımına sahip olabilmek MR damperin performansından maksimum şekilde faydalanmayı sağlayacaktır ve bu da insanoğlunun geçmişten günümüze karşılaştığı birçok problemi aşmasına yardımcı olacaktır. MR damperler günümüzde otomotiv, inşaat, optik, robotik ve biyomedikal alanlarında kullanılmaktadır.

1.1. Amaç ve Kapsam

MR damperlerin histerisizlik denilen doğrusal olmayan hareketleri mevcuttur. Bu histerisizlik davranışı kuvvet-hız grafiklerinde görülmektedir. Bu doğrusal olmayan hareketleri açıklamak için birçok matematiksel model önerilmiş olsa bile çok karmaşık ve pratik olmadıkları için rağbet görmemişlerdir. Bouc-Wen modeli bu önerilen modeller arasında histerisiz davranışı açıklamada en doğru sonuçları veren model olmuştur. Bu histerisiz davranışları doğru bir şekilde modellemek damperin kontrol analizini de hatasız yapabilmek adına oldukça önemli bir olgudur.

Yüksek hız ve akımlarda çalışan bir MR damperde sıcaklığın yükselmesi bu damperin dinamik karakterizasyonunu etkileyecektir ve kontrol edilebilirliğini zorlaştıracaktır. Farklı sıcaklıklar altında MR damperin karmaşık histerisiz davranışlarını modelleyebilmek yeni kontrol algoritmalarının geliştirilmesine de yardımcı olacaktır. Bu çalışmada MR damperin tasarımı yapıldı, üretimi gerçekleştirildi ve bu damper test edilerek dinamik davranışları klasik Bouc-Wen modeli temelinde aynı akım ve strok altında sadece sıcaklığa bağlı olarak yedi değişken parametrelili bir model oluşturuldu.

Yaptığımız çalışmanın temel amaçlarından biri MR damperin optimum geometriye sahip olabilmesi ve kompakt tasarıma sahip bir MR damperden en yüksek performansı elde edebilmektir. Optimum geometriye sahip damperi tespit edebilmemiz için ise en yüksek dinamik orana ve elde edilebilecek en büyük sönümleme kuvvetine sahip damperler elde edilmeye çalışılmıştır.

MR damperin sıcaklığa bağlı optimum tasarımını elde edebilmek için dört farklı parametre için optimum şartlar araştırılmıştır. Bu parametrelerden üçü geometrik büyüklük olmasına karşın diğer seçilen parametre ise sıcaklık olmuştur. Taguchi deneysel tasarım yöntemiyle uygun ortogonal dizi oluşturulmuş olup bu dizideki değerlere uyacak büyüklükte damperlerin sayısal analizleri ticari bir paket program olan ANSYS 17.2 ile gerçekleştirilmiş olup buradan elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Hem manyetik alan analizi hem de akış analizleri (CFD) kullanılarak hem optimum geometriye ulaşılmış hem de seçilen parametrelerin performans üzerindeki etkileri ANOVA (Varyans analizi) ile tespit edilmiştir.

CFD analizlerden elde edilen kuvvet-hız ve kuvvet-yer değiştirme sonuçları deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır ve yapılan karşılaştırma ile sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

1.2. Literatür Çalışması

Weiss ve ark. ileri teknoloji manyeto-reolojik akışkan ile geleneksel bir elektro-reolojik (ER) akışkan için titreşimli reometre teknikleri kullanarak elastik ve viskoz davranışlar arasındaki geçiş alanını incelemişlerdir. ER akışkanların MR sıvılardan sönümlenme özelliğinin daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca MR sıvıların akma öncesi bölgede viskoelastik katılarla ortak özellikler sergilediklerini belirtmişlerdir [1].

Lita ve ark. parçacık çöktürme hızını yavaşlatmanın manyetik parçacıkların morfolojisi ve boyut aralığı ile çeşitli katkı maddelerinin kullanımıyla ilişkili olduğunu söylemişlerdir. Katkı maddelerinin demir parçacıkları ve taşıyıcı madde ile iyi bir uyumluluğu çökme hızını azalttığını ifade etmişlerdir. Gelişmiş bir çökme davranışı olan bir laboratuvar MR sıvısını araştırmışlar ve ticari bir MR sıvısı (MRF-132DG, Lord Co., USA) ile karşılaştırmasını yapmışlardır. Karşılaştırma sonucu laboratuvar MR sıvısının (MRF-LM5) çökme hızı, ticari MR sıvısına göre iki kat daha yavaş olduğunu belirtmişlerdir. Sıfır manyetik alan içindeki örneklerin akış özellikleri Carreau-Yasuda modeli tarafından uyarlarken, manyetik alan içindeki akış davranışları ise yeni geliştirilen bir model tarafından iyi tanımlanmışlardır [2].

Felt ve ark. manyetik süspansiyonların reolojik davranışları üzerine deneyler yapmışlardır. Bu süspansiyonların manyetik alan etkisi yokken newtonian akış sergiledikleri buna karşılık manyetik alan altındayken görünür viskozitesinin üç düzey kadar yükseldiğini ve belirgin bir şekilde Newton tipi olmayan özellikleri sergilediklerini söylemişlerdir. MR sıvısının hacimsel oran, manyetik alan şiddetinin ve parçacık büyüklüğünün MR sıvının akma gerilmesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Hacimsel oran ve parçacık büyüklüğü ile akma gerilmesinin doğrusal bir şekilde büyüdüğünü ancak manyetik alan şiddetiyle akma gerilmesini parabolik olarak büyüdüğünü belirtmişlerdir [3].

Susan-Resiga Manyeto-Reolojik sıvılar için incelen akışkan davranışı sergiledikleri yüksek kayma gerilme değerlerinde Herschel-Bulkley modeli ile çok düşük kayma

gerilmelerinde gösterdikleri newtonian davranışları karıştırarak yeni bir reolojik model sunmuştur. Bu modelin parametreleri yüksek manyetik alan yoğunluğunda akış eğrisindeki kayma gerilmesinin yerel maksimum noktasına ulaştığında ki akma noktasının tanımlanmasına olanak verdiğini belirtmiştir. Önerilen modelin geniş bir dönme hızı ve elektrik akımı yelpazesinde deneysel verilerle tam olarak uyduğunu göstermiştir. Geliştirilen bu modelin en önemli avantajlarından birinin ise pratik uygulamalardaki MR akışını hesaplamak için standart CFD kodlarını kullanabiliyor olması olduğunu belirtmiştir [4].

Dyke S. ve ark. MR damperler için önerilen yarı aktif kontrol algoritmalarını değerlendiren bir çalışma yapmışlardır. Tek bir MR damper kullanarak üç katlı bir yapı modelini kontrol etmişlerdir. Kontrol sistem performanslarının yarı aktif kontrol algoritmalarının seçimine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir ve her yarı aktif kontrol denetleyicinin pasif kontrol denetleyicilere göre daha iyi performans gösterdiklerini söylemişlerdir. Üç katlı modeldeki maksimum ivmelenmeyi en düşük seviyeye merkezi olmayan patlama yöntemiyle ve yine üç katlı modeldeki üçüncü kattaki yer değiştirmeyi ise en aza kırılmış optimum kontrol metoduyla sağlandığı gösterilmiştir. Modüle homojen sürtünme yönteminin de iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir [5].

Jiang W. ve ark. geleneksel karbonil demir bazlı MR sıvıya tel benzeri demirler eklenerek iki şekilli MR sıvı hazırlamışlardır. Bu MR sıvısının reolojik özelliklerini bir reometre yardımıyla ölçmüşlerdir ve ayrıca bu yeni MR sıvısını çökme özelliklerini de incelemişlerdir. Yeni MR sıvısının klasik MR sıvı gibi davranmasına rağmen kayma gerilmesi ve dinamik akma gerilmesinin belirgin şekilde arttığını ve çökme hızının da büyük ölçüde azaldığını ifade etmişlerdir. Gerilmelerdeki bu artışı da tellerin oluşturdukları kompleks ağlara atfedebileceğini söylemişlerdir [6].

Wereley ve Pang MR ve ER damperler için bir sanki statik model geliştirdiler. Damperin analizi için piston kafası alanının halkasal kanala oranı, boyutsuz çekirdek bölge kalınlığı ve Bingham sayısı gibi boyutsuz sayılar tanımladılar. Daha sonra bu tanımlanan sayılara bağlı olan aktif sönümlenme katsayısının pasif sönümlenme

katsayısına olan oranı yardımıyla karakterize etmişlerdir. Damperin performansını damperin akış modu, karışık mod ve kayma modu için incelemişlerdir. Akış modunda sönümlenme katsayısının çekirdek bölge sayısının bir fonksiyonu olduğunu, karışık modunda ise sönümlenme katsayısının alan katsayısının büyük olması durumunda azaldığını ve kayma modunda ise sönümlenme katsayısının sadece bingham sayısına bağlı olduğunu belirtmişlerdir [7].

Ashfak A. ve ark. MR damperin titreşim kontrolünde uygulanması, test edilmesi ve performansını değerlendirmişlerdir. Reolojiyi ve MR sıvıların titreşim kontrolü üzerindeki kullanımını incelemişlerdir. Taşıt süspansiyonu için uygun bir MR damper tasarlamışlardır ve tasarlanan bu damperi imal etmişlerdir. Üretilen bu damperi test edip sonuçları kuvvet-hız ve kuvvet-yer değiştirme grafiklerinde göstermişlerdir. Bu sonuçların ileride yapılacak çalışmalara ilham olacağını ifade etmişlerdir [8].

Volkova ve ark. manyetik delik süspansiyonunun manyetoreolojik davranışı ile yüksek geçirgenliğe sahip manyetik parçacıkların süspansiyonunu karşılaştırmışlardır. Manyetik alan altında partiküllerin duvar yüzeyiyle arasındaki sürtünmesi olan statik akma gerilmesi ve partiküllerin bir arada durma düzenlerinin dinamik akma gerilmesiyle ilişkili olduğunu söylemişlerdir. Duvar ve parçacıklar arasındaki sürtünme kuvvetinin partiküller arasındaki manyetik etkileşimden daha küçük olması durumunda parçacıkların duvar üzerinde kaydığını belirtmişlerdir ve bu durumda ölçülen akma gerilmesinin tahmin edilen akma gerilmesinden farklı olduğunu ifade etmişlerdir [9].

Zhu X. ve ark. Manyeto-Reolojik sıvılı damperler için temel yapı tasarımına ve optimizasyon çalışmalarına değinilmiştir. MR sıvılı damperlerden daha yüksek performans alabilmek için örneğin daha yüksek sönümlenme kuvveti ve daha kısa sürede tepki kuvveti çeşitli yöntemlere değinilmiştir. Daha gelişmiş MR sıvılı damper tasarım sistemleri için yenilikçi yapıların, akıllı malzemelerin kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir [10].

Dimock ve ark. Bingham plastik modelinin MR akışkanları modelleme de kendini kanıtladığını belirtip ancak belirli MR sıvılarının yüksek gerilme hızlarında incelenen davranış sergilediklerini belirtmişlerdir. Ayrıca Bingham plastik modelinin eşdeğer viskoz sönümlenmenin aşırı tahminiyle sonuçlanan bu tür davranışları hesaba katmadığını belirtmişlerdir. Bu makalede incelenen ve kalınlaşan akışlar için Bingham biplastik modelini önermişlerdir. Ayrıca bu model incelenen ve kalınlaşan akışlar ile ilişkili ilave parametreleri hesaba katmak için boyutsal olmayan terimleri ortaya koymışlardır. Bingham plastik ve Bingham biplastik model arasında sinüsoidal bir girdiye karşılık kuvvet karşılaştırılması yapılmış olup eşdeğer viskoz sönümlenme boyutsuz parametrelere göre incelemişlerdir [11].

İmaduddin ve ark. döner manyeto-reolojik damper tasarımlarına genel bir bakış sunarak sürekli açılı döner damper ve kısıtlı açılı döner damper olmak üzere iki kategoride ele almışlardır. Sürekli açılı döner damperlere MR frenler olarak bilinirken kısıtlı açılı döner damperlerin ise kanat tipi MR damperler olduğunu belirterek iki damperin pozitif ve negatif yönleri anlatılmıştır. Döner damperlerin dezavantajlarına yönelik çözümler önermişlerdir [12].

Bullough ve ark. CFD ile ön prototipleminin elektron-hidrolik mühendisliğinde büyük ölçüde yardımcı olacağını göstermişlerdir. Bir ER sıvılı valfin CFD analizini gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırmasını yapmışlardır [13].

Sarkar C. ve ark. yüksek ağırlığa düşük tepki veren hidrolik disk freni yerine manyeto-reolojik sıvılı MR fren önermişlerdir. Tek yüzeyli sıkıştırılabilir film MR freni tasarlamış ve imal etmişlerdir. Hem deneysel hem de teorik olarak bu frenin performansını incelemişlerdir. Bu frene 0 A'den 1.25A'ye kadar akım uygulamışlardır. Teorik hesaplamalara göre yaklaşık olarak 6 tane plakalı sıkıştırılabilir filmin 600 NM düzeyinde bir tork ile frenlenebileceğini belirtmişlerdir [14].

Li ve Du yeni bir manyeto-reolojik (MR) fren tasarlayıp, imal edip ve test etmişlerdir. MR sıvıların reolojik özelliklerini özellikle de dinamik akma

gerilmelerini Bingham plastik modeli temel alınarak deneysel olarak araştırmışlardır. MR frenin performansını özel tasarlanmış test cihazıyla deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Dönme hızının ve manyetik alanın fren performansına olan etkileri için güçlendirme faktörünü getirmişlerdir daha sonra güçlendirme faktörünün dönme hızıyla azaldığını ama manyetik alan ile arttığını belirtmişlerdir [15].

Shiao Y. ve ark. geleneksel MR frenlerden farklı olarak yeni bir MR fren önermişlerdir ve bu önerilen freni simüle etmişlerdir. Daha önceki modellerden farklı olarak yapısal olarak birkaç bobinle çevrili birden çok elektromanyetik kutup tarafından oluşturmuşlardır ayrıca optimum yapıyı elde edebilmek için çeşitli güç kaynakları ve geometrik boyutlar önermişlerdir. Elde edilen bu MR freninin çalışma konsepti simülasyon sonuçlarıyla doğrulamışlardır. Yaptıkları çalışmanın ileride ki çalışmalara birer örnek teşkil edeceğini ifade etmişlerdir [16].

Wang X. manyetik alan etkisi altında bıraktığı MR sıvının bir dikdörtgen kanaldan geçerken ki manyetik akı yoğunluğunu bir gauss metre vasıtasıyla ölçmüştür. Bu dikdörtgen kanal içindeki manyetik alana maruz kalan akışkanın basınç düşümünü ölçerek şekil değiştirme hızını ve duvardaki kayma gerilmesini hesaplamıştır. Ayrıca üç farklı MR sıvısını çeşitli manyetik akı yoğunlukları altında incelemiştir. Statik ve dinamik akma gerilmelerini ve görünür viskozitelerini belirlemiştir [17].

Mohebbi M. ve ark. MR damperin optimum tasarımı için temelde genetik algoritmali (GA) bir yöntem önermişlerdir. MR damperin optimum tasarımı için bir maksimum ivmelenmeyi minimuma düşürmek iki maksimum yer değiştirmeyi minimuma düşürme amaçlı iki farklı kontrolör tasarlamışlardır. MR damperin performansını geliştirmek için önerilen modelin etkinliğini belirlemek için 10 katlı bir yapının her bir katına bir MR damper koymuşlardır ve bu yerleştirilen damperlerin her biri 1000 kN'luk kapasitededir ve maksimum 10 Volt'luk voltaj vermişlerdir. Sayısal simülasyon sonucunda ise önerilen MR damper optimizasyon tasarımı yönteminin yapının tepki süresini azalttığını göstermişlerdir. Sayısal olarak ise maksimum ivmelenmede ve yer değiştirmede değerlerin daha önceleri yaklaşık olarak yüzde 23 ve 51 olduğunu belirterek bu çalışmada ise maksimum ivmelenmede yaklaşık olarak

yüzde 55'lik bir düşüş meydana gelirken maksimum yer değiştirmede ise yaklaşık olarak yüzde 73'lük bir düşüş meydana geldiğini ifade etmişlerdir[18].

Widjaja ve ark. MR akışkanlar ve elektroeolojik (ER) akışkanlar için paralel plaka modelinde yarı kararlı bir kanal akışını matematiksel olarak araştırmışlardır. İncelme veya kalınlaşma koşullarını hesaba katarak ER ve MR sıvıları için Herschel-Bulkley güç yasasını kurucu model olarak kabul etmişlerdir. Bu yaklaşımda çoğunlukla benimsenen Bingham plastik modelini kullanmak yerine ER veya MR akma öncesi davranışının daha esnek bir temsilini elde etmek için Herschel-Bulkley seçmişlerdir [19].

Balamurugan L. ve ark. MR damperlerin analitik karakterizasyonlarını kendi geliştirdikleri yeni bir modifiyeli cebirsel model kullanarak yapmışlardır. Bu yeni modifiyeli cebirsel modelin klasik Bouc-Wen modeline göre daha az hesaplama gerektirdiğini ve bu yüzden daha kullanışlı olduğunu ifade etmişlerdir. Bu modeli engebeli yoldaki araç süspansiyonu için kullanmışlardır ve elde edilen sonuçlara göre kullanılan yarı aktif kontrolörünün tam aktif süspansiyon kontrolörüne göre ufak bozulmalar dışında uyumlu şekilde çalıştığını belirtmişlerdir [20].

Ericksen ve Gordaninejad off-road motosikletinin arka sönümlenme cihazı için yarı aktif, emniyetli, kontrol edilebilir, manyeto-reolojik bir sıvı amortisörünün teorik ve deneysel araştırmalarını sunmuşlardır. Teorik akışkanlar mekaniğine dayalı bir model, kontrol edilebilir sönümlenme kuvveti, MR akışkan özellikleri ve giriş hareketi parametreler olmak üzere geliştirmişlerdir. Değişik elektrik akımı, strok ve frekanslar için teorik ve deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır ve sonuçlar arasında uyum olduğunu ifade etmişlerdir [21].

Ferdaus M. M. ve ark. MR damperlerdeki piston kafasındaki bobinin çalışma esnasında sıcaklığı arttırdığını ve bu artışın MR sıvıdaki viskozitede düşüşe neden olduğunu hem deneysel hem de teorik olarak göstermişlerdir. Aynı deneylerden farklı sonuçların alınmasını da bu sıcaklık etkisinin sebep olduğunu belirtmişlerdir. Bu ısı üretimi probleminin çözümü olarak yeni bir tasarım tekniği tanıtmışlardır. Tanıtılan bu tasarımda elektromıknatısın yerini değiştirmişlerdir [22].

Attia ve ark. partikül viskozitesi elektrik ileten Bingham akışkanın dairesel bir boruda kararsız akışı araştırmışlardır. Akma yönüne dik doğrultuda bir manyetik alan uygulandı ve parçacık fazının yapışkan bir sıvı gibi davrandığı varsaymışlardır. Doğrusal olmayan momentum denklemleri için sonlu farklar kullanan sayısal bir çözüm elde etmişlerdir. Akış indeksi düştükçe veya manyetik alan arttıkça hem sıvı hem de partikül faz için tüm akış parametrelerin azaldığını görmüşlerdir. Ayrıca partikül faz viskozitesinin artırılması cilt sürtünmesini artırır ancak diğer akış parametrelerini azalttığını belirtmişlerdir [23].

Rashid M. M. ve ark. MR damperin tasarımını en uygun şekilde yapabilmek için birden fazla değişken parametreyle sonlu elemanlar simülasyonunu kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Değişken parametreler olarak bobin kademe sayısı, piston çapı, piston şekli ve MR akışkan boşluğunu almışlardır. Toplamda bu değişkenlere bağlı 45 model üretmelerine rağmen en iyi sonuçları veren 17 modeli anlatmışlardır. Optimum bobin kademe sayısını, optimum piston çapını, optimum piston şeklini ve optimum damper boşluk değerlerini sonuçlara göre ifade etmişlerdir. Ayrıca çökme problemi için çeşitli teoriler öne sürüp bu teorileri ANSYS simülasyonu ile doğrulamışlardır [24].

Ellam ve ark. akıllı debriyajın akışla soğutulmasını ölçmek için Bingham plastik akışkanlarının iki levha arasındaki levhalardan biri hareketli diğeri ise hareketsiz iki boyutlu (ortogonal), kararlı ve izotermik davranışını incelemişlerdir. Bu sıvıyı geleneksel bingham plastik akışkanı olarak modelledikleri gibi ısı transferi, elektrik iletimi, sıcaklık ve şekil değiştirme hızını da işin içine katarak CFD paket programı kullanarak da modellemişlerdir. İki yaklaşımın da (klasik analiz ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği) birbirini tamamladığını belirtmişlerdir [25].

Weber F. ve ark. kablolar üzerindeki Manyeto-Reolojik damperler için iki kontrol yaklaşımını incelemişlerdir. Bunlardan biri enerji döngü kontrolü (CEC) ve diğeri ise kontrollü viskoz sönümlemesidir (CVD). Her iki kontrol yasasını hem hibrid simülasyonla hem de tam ölçekli testlerle Sutong (Çin) ve Eiland (Hollanda)

köprülerinde doğrulamışlardır. Yaptıkları testler sonucunda ise ölçülen kablo sönümlemesinin neredeyse genlik ve frekanstan bağımsız olduklarını ifade etmişlerdir. Kuvvet takip etmeyi, parametreleri sadece akımın fonksiyonuna değil aynı zamanda frekansına da uygun olan ters Bingham modeli temelinde ki ileri besleme yöntemiyle ifa etmişlerdir. Çevresel etkilerin en üst düzeyde hissedildiği Russky köprüsünde (Rusya) ise kablo sönümleme sistemi için sıcaklık etkisini göz önüne alarak kuvvet takip etmeyi gerçekleştirmişlerdir [26].

Yasrebi ve ark. MR damperin sonlu elemanlar analizini sunmuşlardır. Sıvı akış analizi ve elektromanyetik analizlerini ayrı ayrı gerçekleştirmişlerdir. Sonlu elemanlar sonuçları ile Tahran üniversitesinde imal edilen MR damperin test sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Karşılaştırılan sonuçların uyumlu olduğunu, tasarım ve kontrol amaçları için kullanılabilirliğini belirtmişlerdir [27].

Kumbhar B. ve ark. MR frenler için ihtiyaçları karşılayabilecek en uygun MR sıvısını üretmek için çeşitli MR sıvılar üretmişlerdir. Sürtünmeyi önlemek için oleik asit ve stabilize edici olarak gres yağı kullanılan çeşitli elektrolitik ve karbonil demir tozlu MR sıvıları sentezlemişlerdir. Taşıyıcı sıvılar olarak ise sentetik yağ, silikon yağ ve ay çiçek yağı üretilen örneklerde kullanmışlardır. MR sıvı örneklerini özelliklerine göre bir tablo oluşturmuşlardır ve bu tabloyu kötü, iyi ve en iyi olacak şekilde ayarlamışlardır. Yapılan sonuçlara göre karbonil demir parçacıklı MR sıvı örneklerinin elektrolitik demir parçacıklı MR sıvılara göre fren uygulamasında daha iyi olduğunu belirtmişlerdir [28].

Attia partikül viskozitesi elektrik ileten Non-Newtonian Bingham akışkanının dairesel bir borudan geçişini hall efektini dikkate alarak incelemiştir. Akma yönüne dik doğrultuda bir manyetik alan uyguladı ve parçacık fazının yapışkan bir sıvı gibi davrandığı varsaymıştır. Doğrusal olmayan denklemler için sonlu farklar kullanan sayısal bir çözüm elde edilmiştir. Akışkan ve parçacık hızlarının manyetik alanla düştüğünü belirtmiştir ve bununla birlikte hall parametresinin hem sıvı hem de partikül fazlarının ortalama hızlarında dolayısıyla akış hızlarında ve duvarın hız gradyanlarında bir artışa sebep olduğunu belirtmiştir [29].

Chen Z. H. ve ark. Linear-Quadratic Gaussian (LQG) kontrol stratejisini köprü kablolarındaki titreşimi azaltmak için kendi kendine algılama yapan MR damperi daha etkin olarak kullanabilmek için geliştirmişlerdir. Eğimli kablo üzerindeki MR damperi farklı kontrol stratejileri tarafından yönlendirilerek sayısal simülasyonu ve deneysel doğrulamasını yapmışlardır [30].

Wang ve Gordaninejad çalışmalarında ER ve MR damperlerin davranışlarını tahmin etmek için Herschel-Bulkley kurucu denklemi ve akışkanlar mekaniği tabanlı bir yaklaşımı birleştirmişlerdir ve böylece ER/MR damperlerinin tasarımı ve geliştirilmesi için doğru bir teorik model önermişlerdir. Geliştirilen bu modelin avantajı ER/MR malzemesinin özelliklerine ve cihazın geometrisine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Elde edilen teorik sonuçlar deneysel çalışmalarla doğrulamışlardır. Önerilen modelin alan kontrollü akışkan damperlerinin doğrusal olmayan davranışlarını etkin bir şekilde tahmin edeceği göstermişlerdir [31].

Wereley N. M. MR veya ER damperlerde sıvının akma sonrası sergilediği incelen veya kalınlaşan davranışlarını damperin sönümleme kapasitesini için analiz etmiştir. Alan değişkenli akma gerilmesi için bir Herchel-Bulkley modeli önermiş ve kayma hızına bağlı olan viskozitenin damperin sönümlemesine etkisini incelemiştir. Temel analiz sonuçlarını daha önceki Bingham plastik sonuçlarıyla tutarlı olarak boyutsuz bir formülasyonda sunmuştur. Sönümleme katsayısının incelen akışkanlar için azaldığını, kalınlaşan akışkanlar için ise arttığını belirtmiştir [32].

Patil Satyajit R. ve ark. iki tekerlekli elektrikli bisiklet için MR frenin sıcaklık analizini yapmışlardır. MR sıvı olarak çalışma sıcaklık aralığı -40 ile 125 derece olan ticari MRF132DG kullanmışlardır. Sonlu elemanlar analizini de gerçekleştirmişlerdir ve burada sıcaklığını 40°C olarak tanımlamışlardır. Analizi gerçek dünyada klasik Hint kentsel koşullarında da gerçekleştirmişlerdir ve sıcaklıktaki artışın yaklaşık olarak 0.5°C olduğunu gözlemlemişlerdir. Önerilen MR frendeki MR sıvısının sıcaklığının fren manevrası esnasından çalışma sıcaklığı aralığında olmasından dolayı güvenli olduğunu ifade etmişlerdir [33].

Ikhouane F. ve ark. farklı sınıflardaki Bouc-Wen modellerinin girdi sınırlarını, çıktı sınırlarını ve fiziksel özellik üretme kabiliyetleri bakımından karakterizasyonlarını sunmuşlardır. Sadece beş sınıfın girdi ve çıktı sınırlarına göre kararlı bir yapıda olduğunu belirtmişlerdir. Kütlenin hızı ve yer değiştirmesinin tüm sınıflar için belli bir aralıkta olduğunu göstermişlerdir ve sınıflar arasında karşılaştırma yapmışlardır. Birinci ve ikinci sınıf için kütlelerin yer değiştirmesinin deneysel gözlemlere uygun olmasına karşın üçüncü ve dördüncü sınıfların sayısal simülasyon sonuçlarının gerçek yapıların davranışlarını açıklamada yetersiz olduğunu ifade etmişlerdir. Termodinamik yasalara ve girdi çıktı sınırlarına uygun olan ve Bouc-Wen modeli tarafından açıklanan birinci sınıfın en uyumlu sınıf olduğunu göstermişlerdir [34].

Karakoç K. ve ark. otomotivler için hidrolik frene alternatif olması amacıyla bir disk tipi manyeto-reolojik fren imal etmişlerdir. Bu MR freni çalışılan yüzey alanı, uygulanan akım yoğunluğu, viskoz tork üretimi, malzeme seçimi ve MR sıvı seçimi kriterlerine göre yapılandırmışlardır. Isı dağılımı ve manyetik döngü için sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmişlerdir. Üretmiş oldukları maksimum torku elde edebilecek optimum tasarıma sahip MR freni bir servo motor ve tork sensöründen oluşan bir aparatla test etmişlerdir. Test sonuçları her ne kadar sonlu eleman simülasyonu ile iyi bir uyum gösterse de istenilen tork üretiminden çok uzakta olduğunu belirtmişlerdir [35].

Moradi Nerbin ve ark. MR damperin davranışlarını karakterize etmek için yeni bir modifiye edilmiş Bouc-Wen modeli geliştirmişlerdir. Bu yeni Bouc-Wen modelinin histerisiz döngüsü içerdiğini ve bu yüzden öncekilere göre küçük hız alanında daha doğru sonuçlar sergilediklerini belirtmişlerdir. MR dampere verilecek akımı ön görmek için yeni bir kontrol stratejisi de önermişlerdir. Önerilen bu stratejiyi yarı aktif süspansiyon sisteminde darbeleri ve rastgele girdi kısıtlamaları içinde simüle etmişlerdir ve bu simülasyon sonuçlarına göre önerilen kontrol yönteminin istenilen yanıtlara daha uygun sonuçlar verdiğini söylemişlerdir [36].

Zhang ve ark. bir MR damperin manyetik tasarımı önermişlerdir ve bu tasarımın yüksek kuvvetlerde en üst düzeyde iyileştirilmesi için manyetik doygunluk seviyesinde sonlu eleman analizini yapmışlardır. Önerilen bu manyetik tasarımın MR damper tasarımı için yeni bir yöntem sunduğunu belirtmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemiyle de manyetik halkanın doyumunu tahmin edebilmişlerdir. Elde edilen bu analiz sonuçlarıyla yaptıkları deneysel sonuçları örtüştürmeyi gerçekleştirebilmişlerdir [37].

Olabi A. G. ve ark. MR sıvı temelinde kontrol düzenlemesine sahip son teknoloji bir aktüatörü incelemişlerdir. Çalışmalar sonucunda hızlı yanıt, elektrik güç girdisiyle mekanik güç çıkışı arasındaki basit ara yüz ve kontrol edilebilirlik gibi eşsiz özellikleri nedeniyle birçok uygulama alanında MR sıvının tercih edildiğini ifade etmişlerdir [38].

Mitrouchev ve ark. MR damper pistonunun ölçüleri bobinden çıkan ısı göz önüne alarak hesaplamışlardır ve damper için en uygun olan boyutlar seçmişlerdir. Seçilen bu boyutlarla en yüksek sönümlenme kuvvetine sahip damper elde etmişlerdir. Bu yüzden robot kolundaki titreşim için kullanılabilirliğini belirtmişlerdir. Elde edilen analitik sonuçları kanıtlamak için deneysel testler yapmışlardır ve sonuçların birbirleriyle örtüştüğünü ifade etmişlerdir. Sistemin daha da geliştirilebilmesi için daha fazla parametrenin örneğin kablonun yarıçapı ve piston ile silindir arasındaki boşluğun incelenmesini önermişlerdir [39].

Lekic ve Kok türbülanslı ve laminar akışların hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) kullanılarak sıkıştırılmış hacimdeki simülasyonları ve bu simülasyonlara bağlı ısı akışını sunmuşlardır. Bu çalışmada değişken parametreler olarak çalışma frekansı ve sıkıştırma oranı kullanmışlardır. Bu simülasyon sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Düşük dönme sayılarından yani laminar akışlarda CFD'nin elde edilen deneysel sonuçlarla iyi bir uyumluluk gösterdiklerini belirtmişlerdir [40].

BÖLÜM 2. MANYETO-REOLOJİK SIVILAR

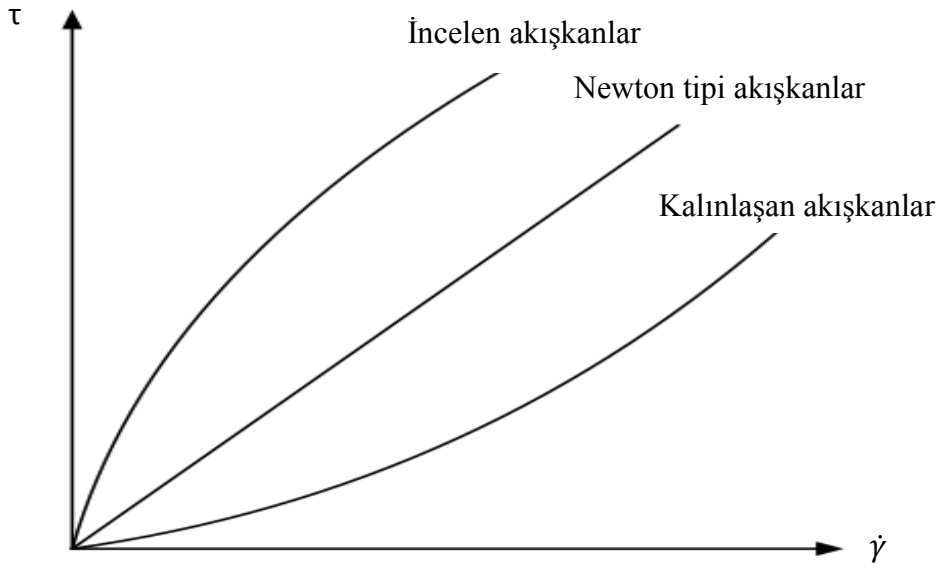
Reoloji, cisimlerin kuvvet, şekil değiştirme ve zaman etkileri altındaki davranışlarını inceleyen bir bilim dalıdır. Manyetoreoloji ise cisme etki eden bir manyetik alan altında cismin akışını ve şekil değiştirme hızını inceleyen reolojinin bir alt dalıdır. Manyetoreolojik sıvılar üzerlerine uygulanan bir manyetik alanla akışkan fazdan yarı katı hale geçen ve geçiş esnasında görünür viskozitelerinde ve akma gerilmelerinde yükseliş meydana gelen sıvılardır. Akışkanları Newton tipi akışkanlar ve Newton tipi olmayan akışkanlar olarak iki ana başlık altında inceleyebiliriz. Newton tipi akışkanlarda kayma gerilmesiyle deformasyon hızı doğru orantılı olarak değişir. Newton tipi akışkanların başlıca örnekleri; su, benzin, yağlar ve hava olarak bilinmektedir.

Bir boyutlu Newton tipi akışkanda kayma gerilmesinin formülü ve şekil değiştirme hızının ilişkisi Denklem 2.1.'de verilmiştir.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

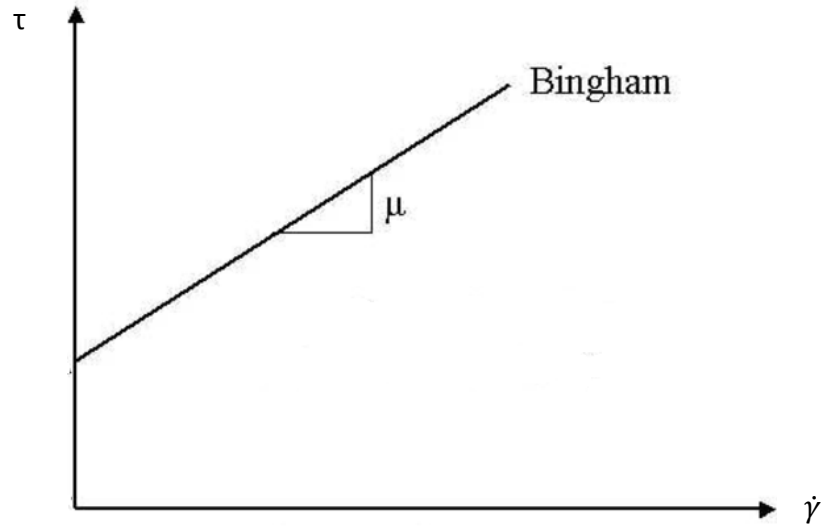
Burada τ kayma gerilmesini, μ akışkanın dinamik viskozitesini ve $\dot{\gamma}$ ise şekil değiştirme hızını vermektedir. Newton tipi akışkanlar için viskozite sabit olup sıcaklık ve basınçla değişiklik göstermektedir. Sıcaklığın viskozite üzerinde yüksek bir etkisi olmasına rağmen basıncın etkisi daha düşüktür. Gazlarda sıcaklığın artması viskozitenin artmasına sebep olurken sıvılarda ise sıcaklık artışıyla beraber viskozite düşüşü gözlemlenir. Newton tipi olmayan akışkanlarda ise kayma gerilmesi ile şekil değiştirme hızı arasındaki oran doğrusal değildir yani viskozitesi sabit olmayan akışkanlardır. τ ile $\dot{\gamma}$ arasındaki eğrinin eğimi ise görünür viskoziteyi gösterir. İncelen, kalınlaşan ve Bingham plastik akışkanlar Newton tipi olmayan akışkanlar grubuna girmektedirler. Görünür viskozitenin şekil değiştirme hızı ile azalış

gösterdiği akışkanlara ise incelen veya sanki plastik akışkanlar denir. Bazı boyalar ve polimer çözeltiler bu tip akışkanlara örnek olarak gösterilebilir. Kalınlaşan (dilatant), incelen (sanki plastikler) ve Newton tipi akışkanlar için şekil değiştirme hızı ve kayma gerilmesi grafiği aşağıdaki gibidir. İncelen veya kalınlaşan akışkanlar τ ile $\dot{\gamma}$ ilişkisinin grafiksel gösterimi Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. İncelen veya kalınlaşan akışkanlar τ ile $\dot{\gamma}$ ilişkisi

Bingham plastik akışkanlar ise sonlu büyüklükteki bir kayma gerilmesine karşı koyup katı gibi davranırlar ancak kayma gerilmesinin akma gerilmesini aştığı durumlarda bir akışkan gibi davranırlar. Akma gerilmesini aştıktan sonra şekil değiştirme hızı ile kayma gerilmesi arasında doğrusal bir ilişki vardır. Diş macunu örnek olarak gösterilebilir.



Şekil 2.2. Bingham akışkanlar için τ ile $\dot{\gamma}$ ilişkisi

2.1. MR, ER ve Ferro sıvılar

Manyetoreolojik ve Elektoreolojik sıvılar akıllı sıvı çeşitleridirler. MR sıvılar üzerlerine bir manyetik alan uygulandığında aktive edilirler ancak ER sıvılar ise üzerlerine bir elektrik alan şiddeti uygulandığında aktive edilirler. Her iki sıvıda da üzerlerine uygulanan etkiyle beraber viskozitelerinde görünür bir yükseliş olmaktadır ve sıvılar yarı katı hal gibi davranırlar. ER sıvıların ilk keşfi 1940'lara dayanmaktadır tıpkı MR sıvılar da olduğu gibi. ER sıvılar taşıyıcı sıvı olarak yalıtkan bir sıvı ve polarize olabilen partiküllerden oluşmuşlardır. Bu partiküllerin boyutları yaklaşık olarak 0.1-100 μm arasındadır. Üzerlerine elektrik alan uygulandığında birkaç milisaniyede zincir yapıya geçerek akışkan özelliklerini değiştirebilmektedirler. Bu etkiye “elektoreolojik etki” denir. ER sıvıların üzerlerine elektrik alan uygulandıktan sonra oluşan maksimum akma gerilmesi 2-5 kPa arasında olmaktadır [38]. Düşük akma gerilmesine sahip olmalarından dolayı MR akışkanla aynı etkiye meydana getirebilmeleri için daha büyük hacimlere ihtiyaçları vardır. ER etki partikül yoğunluğuna göre artış göstermekle beraber ER sıvının sıcaklığına göre azalış göstermektedirler. ER sıvılarda partikül yoğunluğu ile yalıtkan sıvı arasındaki yoğunluk farkı MR sıvılardakilere göre daha düşük olduğundan çökme riski ER sıvılarda daha düşüktür. ER sıvılar MR sıvılara göre daha düşük partikül

yoğunluğuna sahip oldukları için daha düşük viskoziteye sahiptirler. ER sıvılar imalat ve kullanım alanında kirlenmelerden MR sıvılara göre daha çok etkilenirler. ER akışkanlar yaklaşık olarak 2-5 kV değerlerinde çalışırken MR sıvılar ise 10V ve altındaki voltajlarda çalışmaktadırlar ve bu da ER sıvıların daha çok güç tükettiği ve maliyeti arttırdığını göstermektedir.

Tablo 2.1. ER ve MR sıvıların karşılaştırılması[38]

| Özellik | ER sıvılar | MR sıvılar |
|----------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Maksimum akma gerilmesi | 2-5 kpa | 50-100 kpa |
| Güç gereksinimi | 2000-5000 V,1-10 mA | 2-24 V,1-2A |
| Tepki süresi | Birkaç mili saniye | Birkaç mili saniye |
| Maksimum manyetik alan şiddeti,H | 4 kv/mm | 250 kA/m |
| Enerji yoğunluğu | 0.001 J/cm ³ | 0.1 J/cm ³ |
| Kararlılık | Kirlerden etkilenir | Kirlerden etkilenmez |
| Çalışma sıcaklık aralığı | -25 ile +125 C | -40 ile +150 C |

MR sıvılardan daha küçük tanecikli yapıda olan Ferro sıvılar da akıllı sıvı çeşitlerindedir. MR sıvılarda olduğu gibi taşıyıcı sıvı, manyetik malzeme ve ilave katkı maddelerinden oluşmaktadırlar. Ferro sıvılar 1960'lı yıllarda keşfedilmişlerdir. Manyetoreolojik davranışlarının MR sıvılardan farklı olmasının sebebi metal parçacıklarının kalite ve miktarlarıdır. Ferro sıvılardaki demir partiküllerinin boyutları yaklaşık olarak 30 nm'dir. Manyetik alan etkisi altında MR sıvılar yarı katı hale geçerken ferro sıvılar ise yüksek manyetik alan altında bile aynı şekilde sıvı olarak kalmaktadırlar. ER ve MR sıvılarda görüldüğü gibi yüksek akma gerilmeleri Ferro sıvılarda görülmez. Yaklaşık olarak 10 kPA akma gerilmesine sahiptirler.

Tablo 2.2. Ferro ve MR sıvıların karşılaştırılması [38]

| Özellik | Ferro sıvılar | MR sıvılar |
|-------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| Enerji faktörü | <1 | >1 |
| Maksimum akma gerilmesi | 10 kpa | 100 kpa |
| Partikül boyutu | Birkaç nm | Birkaç µm |
| Partikül malzemesi | Demir oksit | Karbonil demir |
| Hacimsel oran | % 10 a kadar | %50 ye kadar |
| Kararlılık | İyi | Orta |
| İşlevsellik | Kontrol edilebilir akışı | Kontrol edilebilir kayma gerilmesi |

Daha iyi sönümlenme, daha küçük hacimde ve optimum şekilde tasarlanabiliyor olması dolayısıyla bu çalışmada MR sıvı kullanılmasına karar verilmiştir.

2.1.1. MR Sıvılar

Manyetoreolojik sıvı etkisi Jacob Rabinow tarafından 1940'lerde US National Bureau of Standarts'da keşfedilmiştir. Yine aynı yıllarda W. Wislow da diğer akıllı sıvı örneklerinden olan elektoreolojik sıvılar üzerine çalışmalar yapmıştır. Günümüzde MR sıvı teknolojisi bazı üniversiteler ve bazı şirketler tarafından geliştirilmekte olup bu şirketlerden bazıları ABD'de (Lord Inc.), Avrupa'da (DEA, BASF, Bayer) Japonya'da (Sigma Inc., Bridgestone Inc.) olmaktadır. MR sıvılar için iki temel yaklaşım mevcuttur. Bunlardan birincisi üzerlerine manyetik alan uygulandığında MR sıvının Newton tipi olmayan akış gibi davranması ikinci yaklaşım ise MR sıvının üzerinde manyetik alan uygulanmıyorken Newton tipi akışkan özelliklerini sergilemesidir. Üzerine herhangi bir manyetik alan uygulanmıyorken viskozitesi sabit yani kayma gerilmesi ile şekil değiştirme hızı arasındaki ilişki doğrusaldır ancak üzerlerine herhangi bir manyetik alan etki ettiğinde ise viskozitesi değişmekte, kayma gerilmesi ile şekil değiştirme hızı arasındaki ilişki doğrusal olmaktan çıkmıştır.

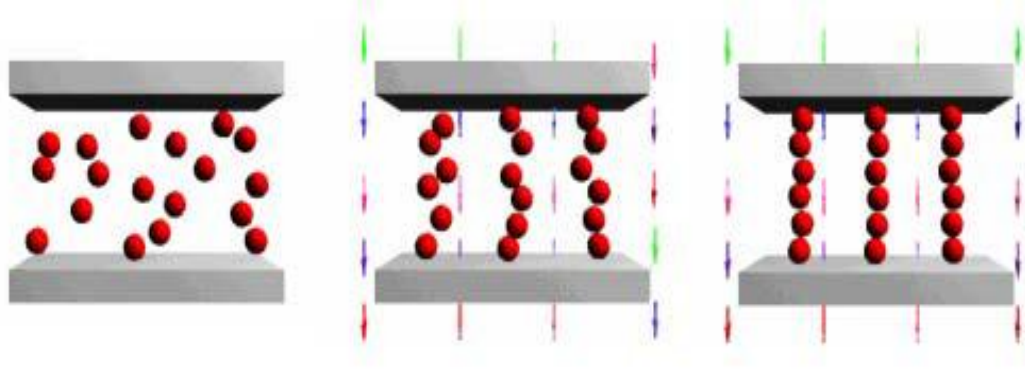
MR sıvılar yapısal olarak taşıyıcı sıvı, katkı maddeleri ve manyetize olabilen demir partiküllerinden ya da demir kobalt alaşımından oluşmaktadırlar. Genel olarak MR sıvılarda taşıyıcı sıvı olarak hidrokarbon-yağ veya silikon-yağ kullanılmaktadır.

Taşıyıcı sıvıların en önemli görevleri demir partiküllerine ve katkı maddelerine uygun ortamı hazırlamaktır. Bunun yanı sıra çökme ve yarı katı halden tekrar sıvı hale geçmekte taşıyıcı sıvının görevlerindedir. Hidrokarbon yağların tercih edilme sebebi hem uzun ömürlü olmaları hem de yağlayıcı özelliklerinin yüksek olmasıdır. Aynı şekilde silikon-yağının tercih edilmesinin sebebi ise kullandıkları parçalarla beraber uyumlu çalışabilmeleri özelliklerinin yüksek olmasıdır.

Katkı maddeleri olarak oleik asit, silika dumanı, stearik asit ve zirkonyum gibi çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Bunların kullanılma sebepleri ise çökmeyi yavaşlatmak, tanecik dağılımını ayarlamak, aşınmayı engellemek, kirleticilere karşı koruma ve viskoziteyi ayarlamak olarak söyleyebiliriz.

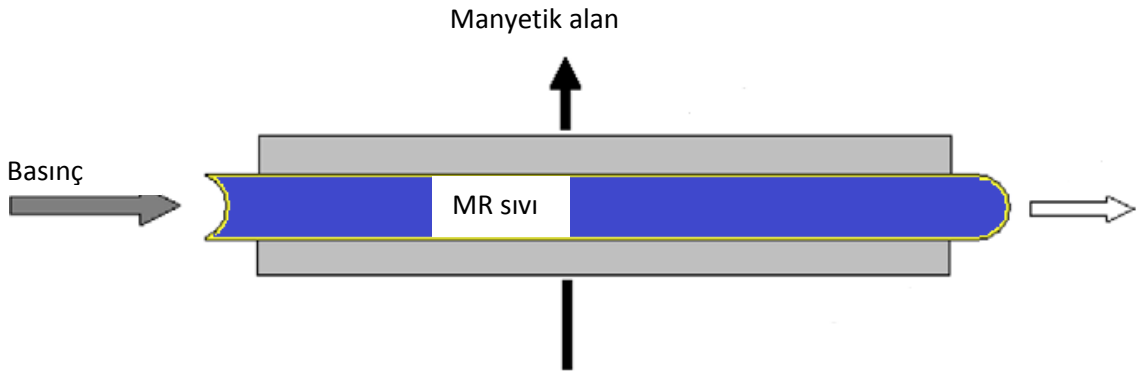
Polarize olabilen metal parçacıklar ise genel olarak karbonil demir, demir tozu ya da demir kobalt alaşımıdır. Bunların tercih edilme sebebi ise yüksek manyetik doygunluğa erişebilmektir. Demir partiküller genel olarak 1-10 μm çaplarında küresel biçimli $\text{Fe}(\text{CO})_5$ (demir penta karbonil) malzemesinden oluşmaktadır. Parçacıkların boyutları ise istenilen performansa göre değişiklik gösterebilmektedir ve akma gerilmesine olan etkisinden ötürü önemli bir parametredir. Bu partiküllerin yoğunlukları yaklaşık olarak 7000-8000 kg/m^3 civarındadır ve sıvının hacimce yarısına kadar miktarda olabilmektedirler.

MR sıvılara herhangi bir manyetik alan tesir etmiyorken akışkan içindeki katı partiküller taşıyıcı sıvının hareketine göre serbestçe dolaşmaktadırlar. Bu akışkanın üzerine manyetik alan uygulanırsa birkaç mili saniye içerisinde sıvı içindeki katı partiküller manyetik akı çizgileri doğrultusunda, akışa dik olacak şekilde bir araya gelerek zincir yapılı sütunlar meydana getirirler. Oluşan bu zincirli yapı akmaya karşı direnç göstererek sıvının akma gerilmesinde 100 kPa'a kadar artışa sebep olurlar. Şekil 2.3.'de gösterildiği üzere MR sıvıya manyetik alan uygulanmıyorken katı partiküllerin rastgele sıvı içerisinde konumlandığını görebiliyoruz. Manyetik alan etki ettikten sonra katı partiküllerinin zincirli yapıya geçiş formatı görülmektedir.



Şekil 2.3. Manyetik alan uygulanmadan önce ve sonrası için parçacık dağılımı

Oluşan bu zincir yapının üzerine bir kuvvet etkirse, kuvvetin büyüklüğüne ve manyetik alanın şiddetine bağlı olarak zincir yapı şekil değiştirir. Akışkanın basınca karşı gösterdiği bu tepki “MR etki” olarak isimlendirilmektedir. MR sıvılar üç farklı tipte çalışmaktadırlar. Bunlardan birincisi Şekil 2.4.’de görülen valf tipi veya akış modu olarak adlandırılan çalışma şeklidir. Bu çalışma tipinde iki sabit plaka arasındaki sıvı üzerine bir basınç uygulanmaktadır ve zincir yapısı akışa bir direnç oluşturur.

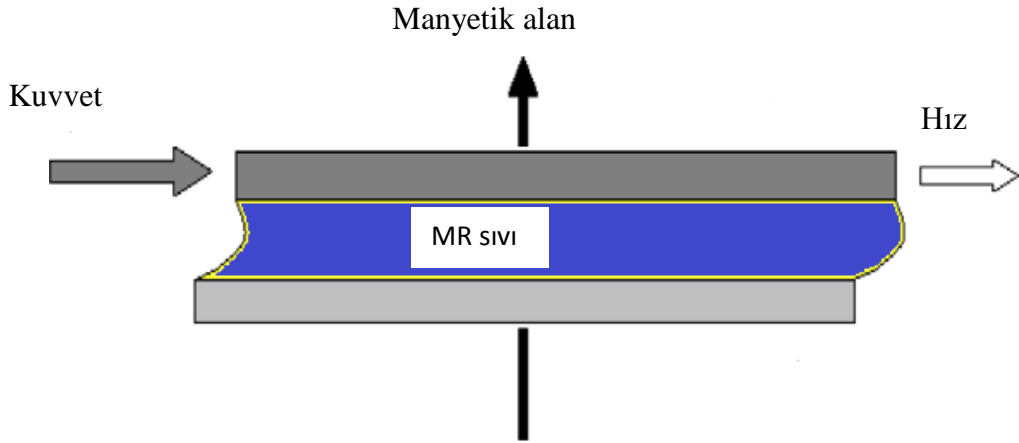


Şekil 2.4. MR sıvı valf tipi çalışma

Bu çalışma tipinde meydana gelen basınç düşümü w genişliğindeki bir kanal içindeki akış için aşağıdaki denklemle hesaplanır.

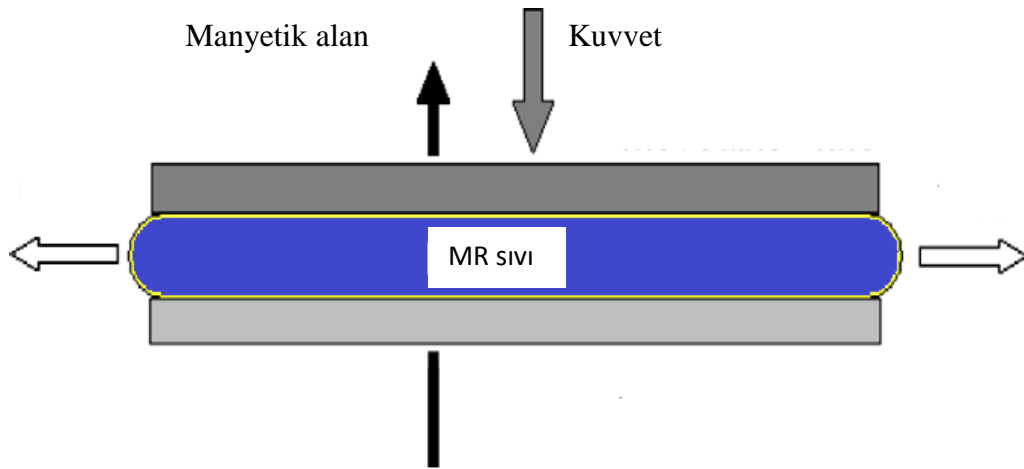
$$\Delta P = \Delta P_{\mu} + \Delta P_{\tau} = \frac{12 \cdot \mu \cdot Q \cdot L}{g^3 \cdot w} + C \frac{L}{g} \tau_y \quad (2.2)$$

Burada ΔP_{μ} viskoz bileşenlerin, ΔP_{τ} ise manyetik alana bağlı bileşenlerin basınç düşümleridir. μ dinamik viskozite, Q debi, L uzunluk, w genişliği, g kanal genişliği, τ_y akma gerilmesi ve f ise ampirik faktördür. Bu çalışma tipinde genel olarak MR damper sistemleri görülmektedir. İkinci çalışma tipi Şekil 2.5.'de görülen kayma tipi olarak adlandırılan çalışma durumudur.



Şekil 2.5. MR sıvı kayma tipi çalışma [38]

Bu çalışma tipinde MR sıvı biri hareketli diğeri hareketsiz olan iki yüzey arasına yerleştirilir. Hareket edebilen yüzeye kuvvet uygulanır. Uygulanan bu kuvvete kayma gerilmesinden dolayı bir tepki kuvveti oluşur. Genellikle MR fren ve kavramalarda görülmektedir. Son çalışma tipi olan sıkıştırma tipi çalıştırma ise Şekil 2.6.'da görülmektedir. Plakaya uygulanan dik kuvvet iki plaka arasındaki MR sıvıya çok küçük hareket kabiliyeti kazandırır ve yüksek kuvvet gerektirmektedir. Yüksek kuvvet ihtiyacı olan sönümleyicilerde kullanılmaktadırlar.



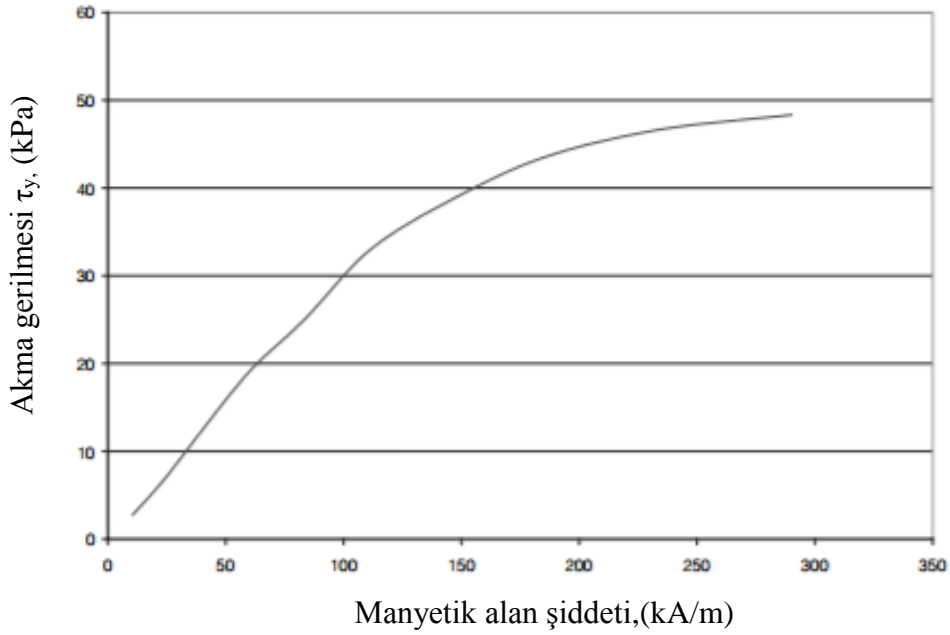
Şekil 2.6. MR sıvı sıkıştırma tipi çalışma [38]

Bu çalışmada kullanılacak olan MR sıvısı Lord firması tarafından üretilen ticari amaçlı olarak kullanılan hidrokarbon esaslı MRF-132DG kodlu Manyeto-Reolojik sıvıdır. Bu MR sıvının genel özellikleri Tablo 2.3.'de verilmiştir.

Tablo 2.3. MRF 132-DG kodlu MR sıvı özellikleri [41]

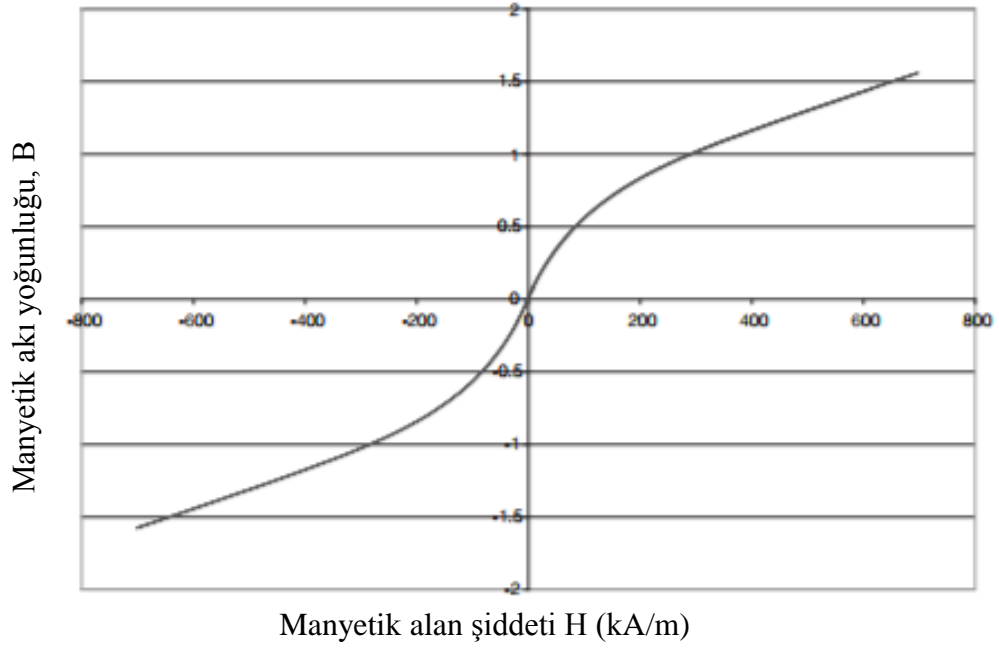
| Özellik | Değer/Sınır |
|--------------------------------|---------------------------|
| Akışkan Temeli | Hidrokarbon |
| Çalışma Sıcaklığı | -40'dan 130 (°C) |
| Yoğunluk | 3090 (kg/m ³) |
| Renk | Koyu gri |
| Partiküllerin kütle oranı | 81,64(%) |
| Termal genişleme katsayısı | |
| 0-50 (°C) | 5.50E-04 |
| 50-100 (°C) | 6.60E-04 |
| 100-150 (°C) | 6.70E-04 |
| Özgül ısı 25 (°C)de | 800 (J/kg K) |
| Isı iletim katsayısı 25 (°C)de | 0,25-1,06 (W/mK) |
| Donma noktası | -150 (°C) |
| Viskozite | 0,09(±0.02) Pa.s |

Üzerine etkiyen manyetik alan ile MR sıvısının özelliklerinin nasıl değiştiğini akma gerilmesi- manyetik alan şiddeti eğrisi grafiği Şekil 2.7.'de gösterilmiştir. Manyetik alan şiddetiyle akma gerilmesi başlangıçta doğrusala yakın artarken daha sonra manyetik alan şiddetinin değerinin yükselmesi akma gerilmesinde görünür bir artışa neden olmamaktadır.



Şekil 2.7. MRF 132-DG'nin akma gerilmesi ile manyetik alan şiddeti değişiminin eğrisi [41]

MR sıvı üzerine etkiyen manyetik akı yoğunluğuna göre manyetik alan şiddeti grafiği Şekil 2.8.'de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere düşük manyetik alan şiddetlerindeki artış manyetik akı yoğunluğunda daha yüksek bir değişime neden olmaktadır yani düşük manyetik alan şiddetlerinde eğimin daha yüksek olduğunu söyleyebiliriz. Buradan düşük manyetik alan şiddetlerinde manyetik akı veriminin daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 2.8. MRF 132-DG'nin manyetik alan şiddeti ile manyetik akı yoğunluğu grafiği [41]

2.1.2. Manyeto-Reolojik Sıvının Akış Modelleri

Manyeto-Reolojik sıvılar manyetik alan etkisi altında değillerken Newton tipi akışkan özellikleri gösterirler ancak manyetik alan etkisi altına girdikleri zaman ise Newton tipi olmayan akışkan özellikleri gösterirler. Bu sıvıları Bingham plastik veya Herschel-Bulkley gibi doğrusal olmayan akış modelleri kullanarak modellenebilmektedirler. Bingham plastik modeli için kayma gerilmesi;

$$\tau = \tau_y(B) + \mu_p \dot{\gamma} \quad |\tau| > \tau_y \quad (2.3)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad |\tau| < \tau_y$$

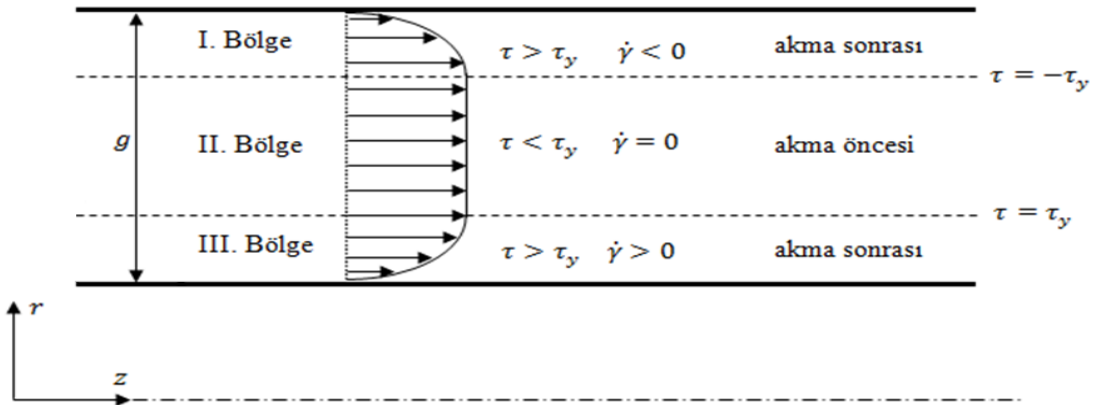
Burada τ kayma gerilmesini, $\tau_y(B)$ manyetik alan altındaki akma gerilmesini, μ_p kayma hızı-kayma gerilmesi eğrisinin eğimi olan manyetik alandan bağımsız plastik viskoziteyi, $\dot{\gamma}$ ise şekil değiştirme hızını ifade etmektedir. Herschel-Bulkley modeli için kayma gerilmesi;

$$\tau = \tau_y(B) + k(\dot{\gamma})^n \quad |\tau| > \tau_y \quad (2.4)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad |\tau| < \tau_y$$

Burada τ , $\tau_y(B)$, $\dot{\gamma}$ terimleri Bingham plastik modelindeki terimlerle aynı olmakla beraber k uyumluluk endeksini ve n ise akış davranış endeksini ifade etmektedirler. Burada n 'nin birden küçük olması durumunda incelen (sanki plastik), n 'nin birden büyük olması durumunda kalınlaşan (dilatant) ve $n = 1$ olması durumunda ise Bingham akışkanı olarak tanımlanır. Bu modelde $k = \mu_p$ ve $n = 1$ olarak tanımlanacak olursa Bingham plastik modelini oluşturduğu görülecektir.

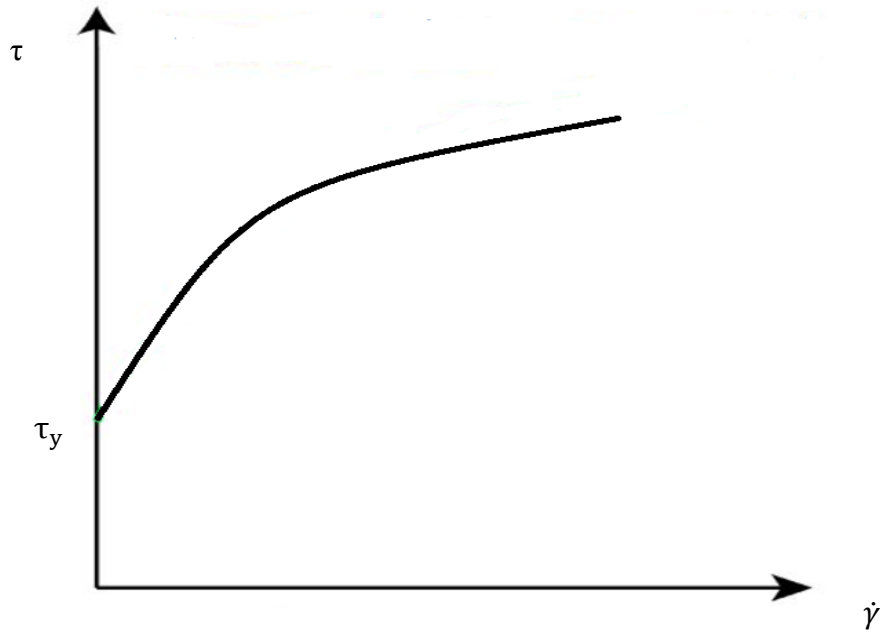
Manyetik alan etkisi altındaki MR sıvının kayma gerilmesi ile hız profili Şekil 2.9.'da görüldüğü gibidir.



Şekil 2.9. MR akışkanın kayma gerilmesi ve hız profili görüntüsü [43]

Şekilden de görüleceği üzere akma öncesi durumda akma gerilmesi kayma gerilmesinden yüksek olduğu için akışkan kayar durumda değil yani katı bir blok gibi aktığı varsayılır. Akma sonrası bölgelerinde ise kayma gerilmesi akma gerilmesinden yüksek olduğu için akışkan kayar durumdadır.

Akışkan modellerinden Bingham plastik modeli yüksek şekil değiştirme hızlarında akma sonrası bölgesinde görünür viskozitenin sabit kaldığını varsaymaktadır. Halbuki sabit viskozite varsayımı incelen veya kalınlaşan akışkanlar için doğru bir model olmamaktadır. MR sıvılar incelen akış davranışı sergilemektedirler bu sebeple Bingham plastik modelini tercih etmek doğru bir yaklaşım olmaz. Bu çalışmada akma sonrası bölgesindeki doğrusal olmayan davranışları daha doğru bir şekilde modelleyen Herschel-Bulkley modeli kullanılmıştır. Şekil 2.10.'da şekil değiştirme hızı ve kayma gerilmesi değişimi Herschel-Bulkley modelinde gösterilmiştir.

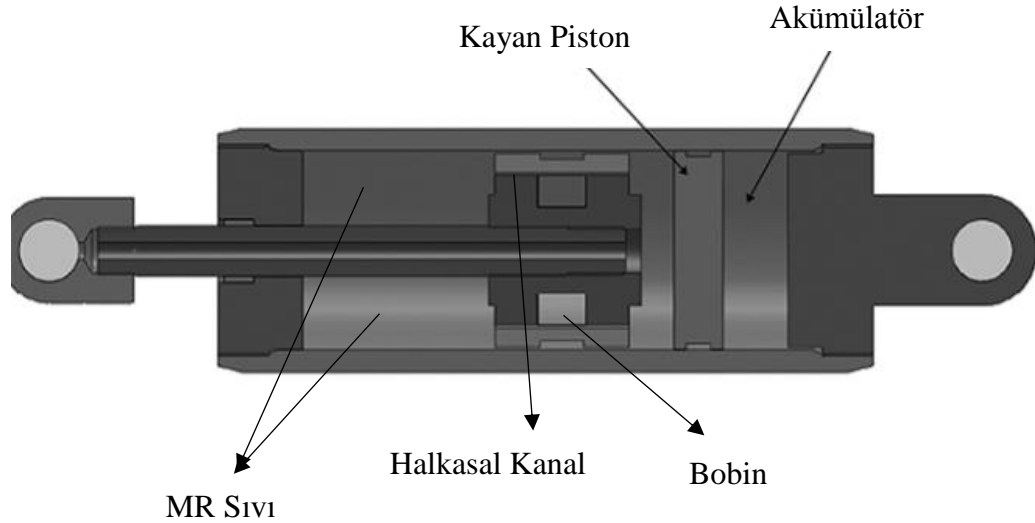


Şekil 2.10. İncelen akışta Herschel-Bulkley modeli

2.1.3. MR Sıvı Uygulama Alanları

Manyeto-Reolojik sıvılı sistemler için oldukça geniş bir uygulama alanı mevcuttur ve hala ilerleyen teknoloji ile kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu sistemlerdeki MR sıvının görevi mekanik sistem ile elektronik kontrol arasındaki uyumu sağlamaktır. MR sıvılı sistemler çoğunlukla otomotiv sektöründe kullanılmakla beraber inşaat, optik, robotik ve biyomedikal gibi pek çok alanda kullanım alanı bulmaktadırlar.

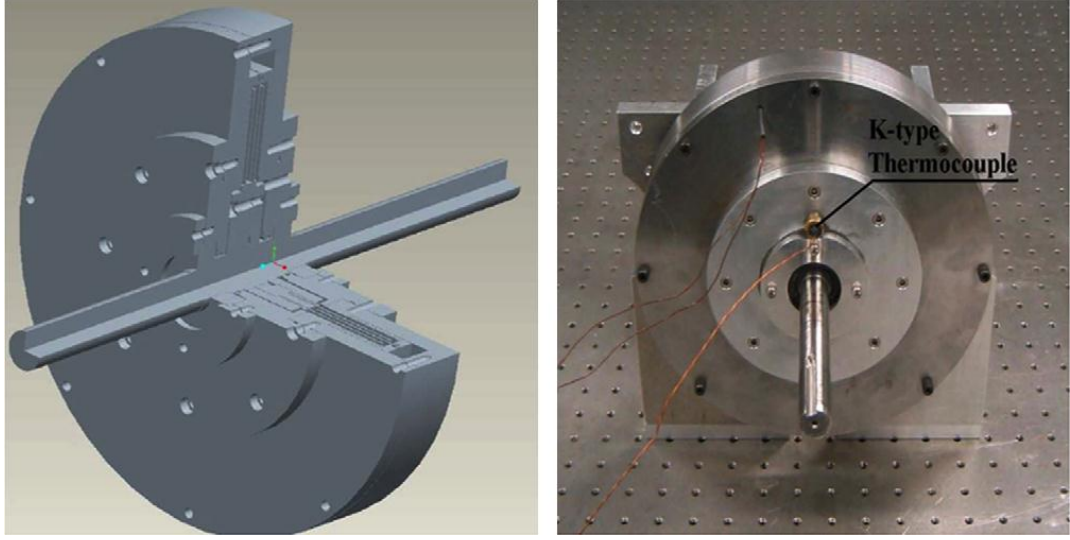
Manyeto-Reolojik sıvılı damperlerde dışardan bir kuvvet ile uyarılan piston MR sıvıyı kanallardan akmaya sürükler. Piston başındaki bobine elektrik akımı verilince kanallardaki akışa dik bir manyetik alan elde edilir. Bu manyetik alan MR sıvının kanallardan geçerken akma gerilmesinin yükselmesine yani viskozitesinin artmasına sebep olur. Viskozitedeki bu değişim kanallardaki basıncı değiştirir ve bu değişimde damperin pistonuna gelen tepki kuvvetini değiştirir. Şekil 2.11.'de klasik MR damperin şekli gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Klasik MR damperin kesit görüntüsü [43]

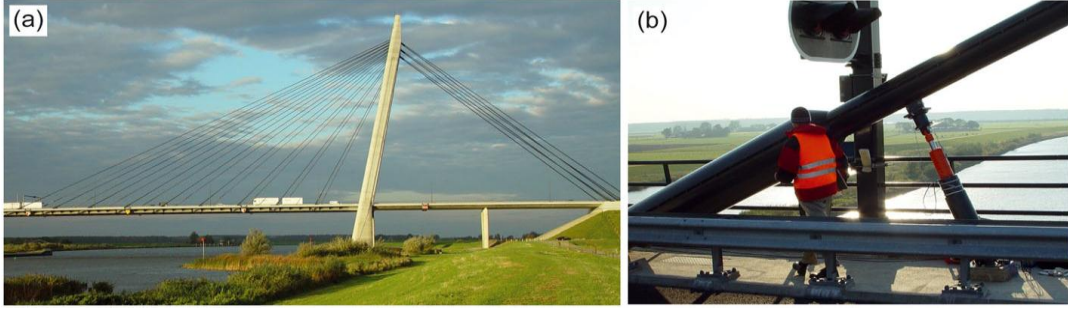
MR sıvılı cihazların otomotiv alanındaki bazı uygulama örnekleri amortisörler, kavramalar, motor takozları ve frenlerdir. Şekil 2.12.'de MR sıvılı frenin şekli görülmektedir. Bu fren çok kısa sürede tepki gösterebilmektedir ve dayanıklı bir

yapıya sahiptir. Düşük güç tüketimi ve kullanıldığı sisteme kolayca montaj edilebilmesi avantajlarından bazılarıdır.



Şekil 2.12. basit MR frenin tasarımı [35]

MR damperin kullanım alanlarından biri olan inşaat sektöründe köprülerde ve yapılarda titreşimi sönümlmek için kullanılmaktadır. Şekil 2.13.'de 2004 yılında Kampen yakınındaki Eiland köprüsünde çekilmiş bir MR damper kullanımına ait örnek mevcuttur. Burada MR sıvılı damperin kullanılmasının amacı kablo sönümlemesini gerçek koşullar altında incelemek ve uzun süreli MR damperin performansını kontrol etmektir. 164 m uzunluğundaki kabloda 5082 kN'luk gerilme olduğu görülmüştür. 3A akım verildiğinde MR damperdeki maksimum kuvvet yaklaşık 45 kN olmuştur ve hiç akım yokken ise 2 kN'luk bir kuvvet gözlemlenmiştir.



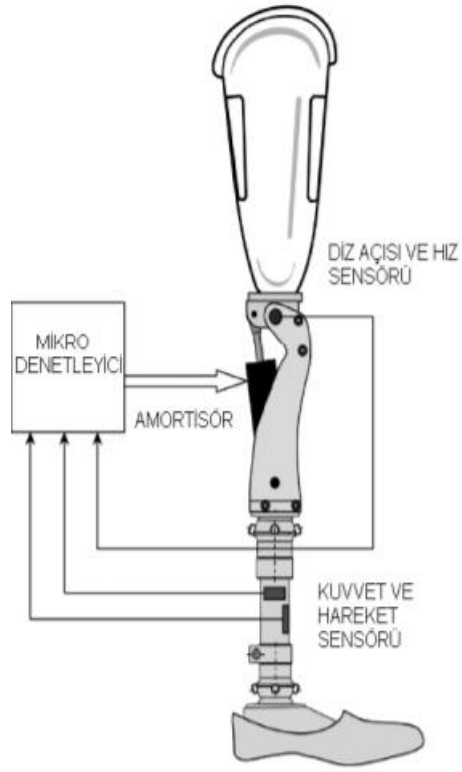
Şekil 2.13. (a) Kampen yakınındaki Eiland köprüsü (Hollanda); (b) 164 metre uzunluğundaki kabloda MR damper. [26]

Optik alanda MR sıvı teleskopların düzeltici lenslerinde kullanılmaya başlanmıştır. Hubble uzay teleskobunda da kullanılmıştır. Şekil 2.14.'de Hubble uzay teleskobunun fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 2.14. Hubble uzay teleskobu

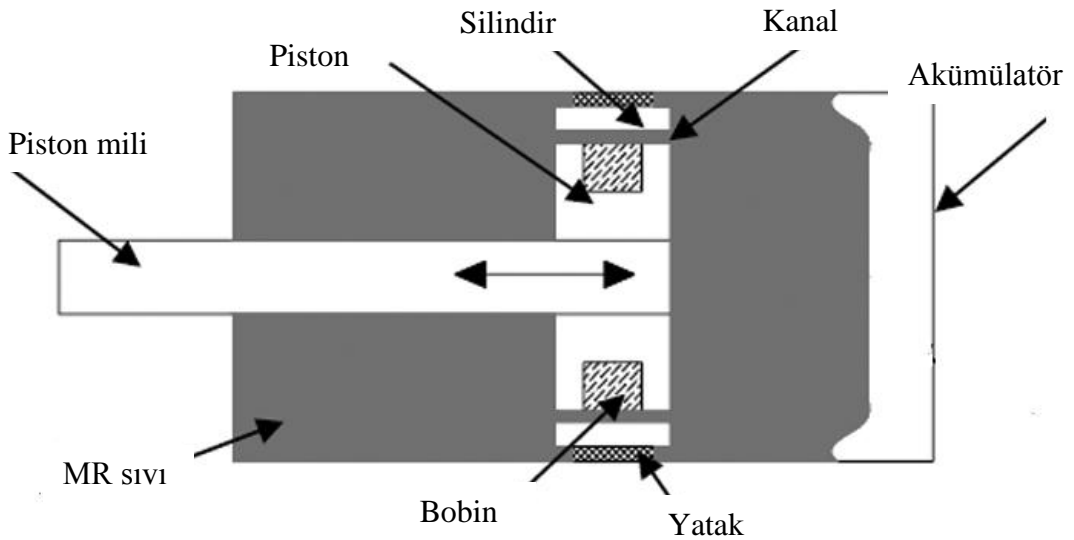
MR sıvılı damperler biyomekanik alanda insan bacak protezlerinde kullanılmaktadırlar. Yürürken veya koşarken bacağın olabildiğince hareket kabiliyetini artırmak için kullanılmaktadır. Şekil 2.15.'de protez diz şekli görülmektedir.



Şekil 2.15. MR damperli protez diz ve temel elemanları [42]

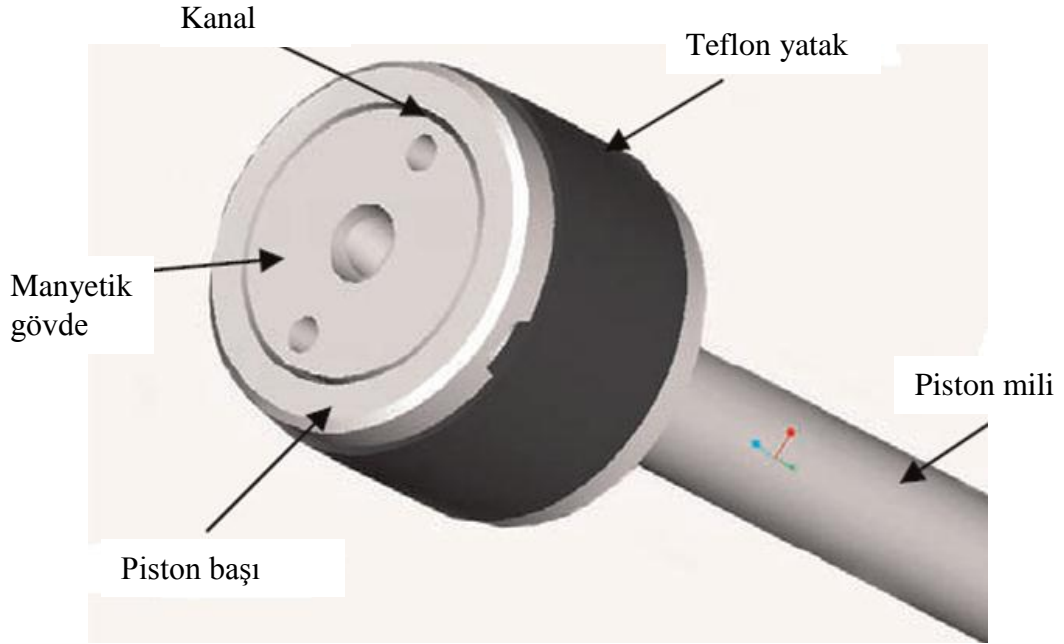
BÖLÜM 3. MR DAMPERLER

Titreşim kontrolüyle ilişkili teknoloji günümüzde oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bunun sonucunda ise bütün yapılarda ve mekanizmalarda daha performanslı ve optimum tasarımı MR damperler istenmektedir. MR damperlerde pistonun uyguladığı kuvvetle yüksek basınca sahip olan MR sıvı pistondaki kanallar vasıtasıyla basıncın daha düşük olduğu tarafa akarlar. Piston kafasındaki bobin aracılığıyla MR sıvı bu kanallardan geçerken üzerine manyetik alan uygulanır. Uygulanan manyetik alan etkisiyle MR sıvı içinde bulunan demir partikülleri kanallardan geçerken akışa dik olacak şekilde zincirli bir yapı oluşturarak akışa karşı direnç oluştururlar. Oluşan bu direnç sebebiyle akışkanın görünür viskozitesinde yükseliş meydana gelir. MR sıvıya uygulanan manyetik alanın artışıyla beraber akışkanın akma gerilmesi de yükselecektir. Şekil 3.1.'de tamamlanmış MR damperin şematik yapısı görülmektedir.



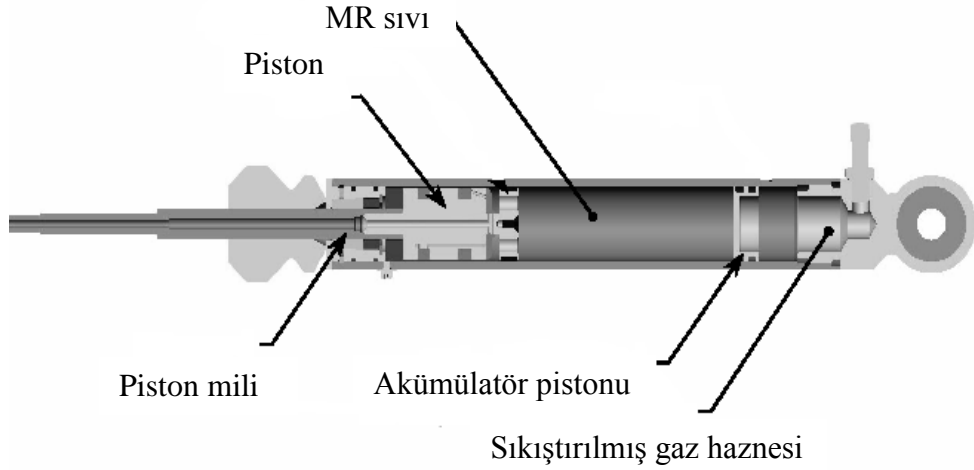
Şekil 3.1. MR damperin şematik yapısı [10]

MR sıvılı damperde piston başında şekilde görüldüğü gibi manyetik alan oluşturan bobin ve MR sıvının aktığı kanallar mevcuttur. Bobin ile MR sıvının temasını engellemek için aralarında yalıtkan bir malzeme kullanılmaktadır. Silindir ile piston kafası yataklanması teflon malzeme ile yapılmaktadır. Şekil 3.2.'de MR sıvılı damperde pistonun görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 3.2. MR sıvılı damperin piston yapısı [10]

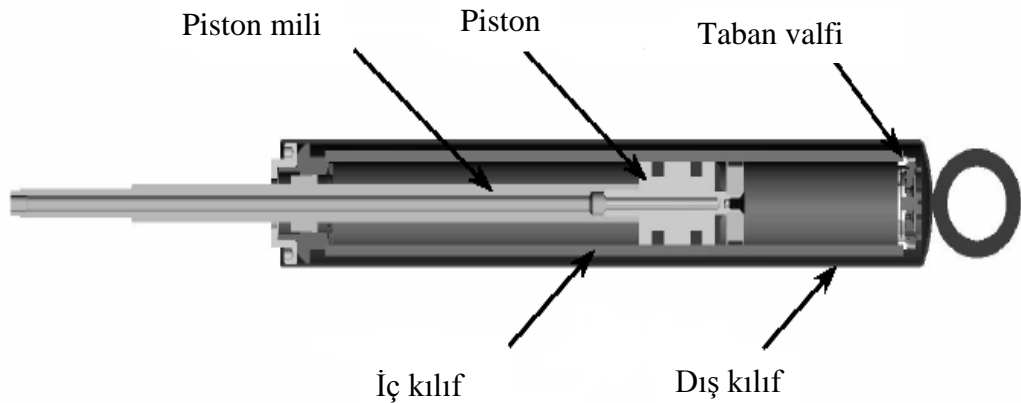
Temelde üç çeşit MR damper tipi bulunmaktadır. Bunlar tek tüplü, çift tüplü ve çift uçlu MR damper olmak üzere ayrılmaktadırlar. En yaygın kullanılan MR damper tipi tek tüplü MR damper olmaktadır. Bunun sebebi ise herhangi bir yönde montaj edilebiliyor olması ve az yer kaplamasıdır. Tek tüplü MR damperde akümülatör rezervi ve MR sıvı için sadece bir hazne bulunmaktadır. Şekil 3.3.'de bir tek tüplü MR damper kesit görüntüsü görülmektedir.



Şekil 3.3. Tek tüplü MR damper kesit görüntüsü [8]

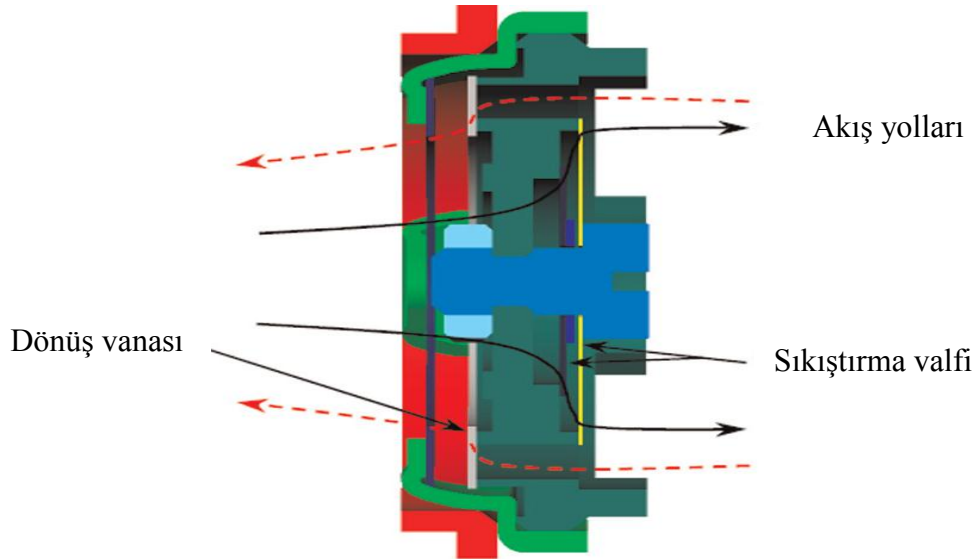
Şekilden de görüldüğü gibi akümülatör pistonu MR sıvıyla gaz haznesi arasında bir bariyer görevi görmektedir. Ayrıca piston milinin içeriye girmesiyle oluşacak MR sıvı hacmindeki değişikliği ayarlayacaktır. Sıkıştırılmış gaz haznesinde genellikle azot gazı bulunmaktadır.

Çift tüplü MR damper tipinde birbiri içine geçmiş iki tüp haznesi bulunmaktadır. MR damper bu yapıda iç ve dış kılıfa sahiptir. Şekil 3.4.'de çift tüplü MR damperin kesit alanı görülmektedir.



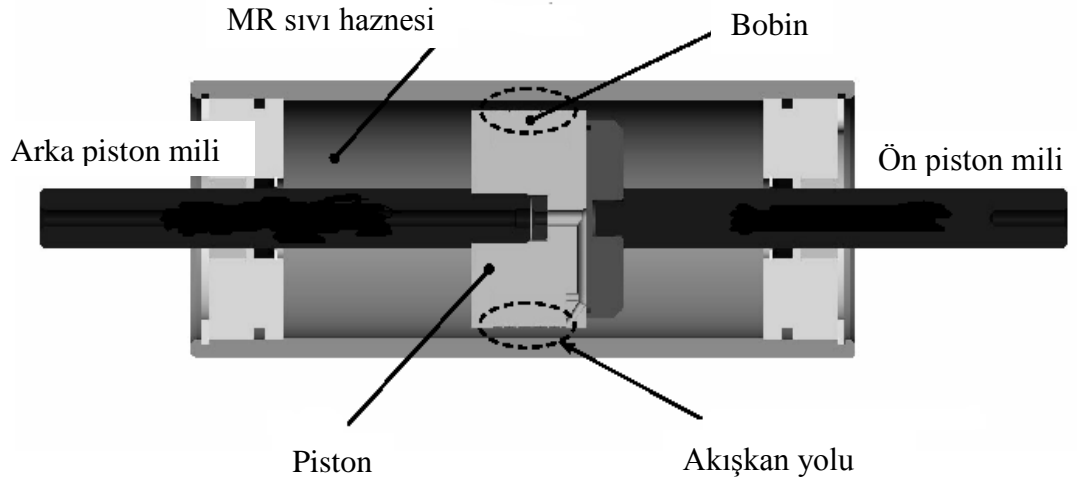
Şekil 3.4. Çift tüplü MR damper kesit görüntüsü [8]

Tek tüplü MR damperde olduğu gibi burada da iç kılıf piston milini aynı şekilde yönlendirir. İç hazne Şekil3.4.'ten de görüldüğü üzere MR sıvıyla doldurulmuştur ki basınç farklarıyla beraber hava boşlukları oluşmasın. Dış tüp tek tüplü MR damperdeki akümülatör mekanizmasının vazifesini görmektedir. İki sıvı haznesindeki akış hareketini kontrol etmek için şekilden de görüldüğü üzere bir taban valfi yerleştirilmiştir. Şekil 3.5.'de taban valfinin kesit görüntüsü görülmektedir. Piston mili MR dampere girdikçe MR sıvı iç hazneden dış hazneye taban valfi yardımıyla akmaktadır. Dış hazneye çıkan MR sıvı hacmi MR dampere giren piston milinin hacmine eşittir. Dış kılıfın MR sıvıdaki ısının çevreye geçişini sağlamak ve MR damperin iç parçalarını darbelere karşı korumak gibi özellikleri de vardır.



Şekil 3.5. Taban valfinin detaylı kesit görüntüsü [10]

Çift uçlu MR damper tipinde ise MR damperin her iki tarafından eşit çapa sahip piston mili çıktığı için bu dampere çift uçlu MR damper tipi denmektedir. Şekil 3.6.'de çift uçlu MR damperin kesit görüntüsü görülmektedir.



Şekil 3.6. Çift uçlu MR damper kesit görüntüsü [8]

Şekilden de görüldüğü üzere bir piston mili MR dampere girerken diğer piston mili çıktığı için hacimce bir değişiklik olmamaktadır. Bu sebeple çift uçlu MR damperlerde akümülatör mekanizmasına ihtiyaç yoktur. Bisiklet uygulamaları, ticari uygulamalar, silah geri tepmelerinde, rüzgarların ve depremlerin sebep oldukları yapıdaki hareketler gibi bir çok alanda çift uçlu MR damperler kullanılmaktadırlar.

BÖLÜM 4. MR DAMPERİN SICAKLIĞA BAĞLI DİNAMİK KARAKTERİZASYONU

MR damperler doğrusal olmayan histerisizlik denilen davranışlar gösterirler. Histerisizlik doğrusal olmayan davranışlar demektir. Genellikle histerisiz davranışı modellemek için matematiksel modeller önerilir ancak önerilen bu modeller pratikte kullanılmak için oldukça karmaşık olabilmektedirler ve bu yüzden mühendisler ve bilim adamları daha kolay ve pratik modellere yönelmektedirler.

MR damperlerin değişken yükler altında hangi yer değiştirme ve hız değerlerinde ne kadarlık bir kuvvet üretebileceğini bilmek mühendisler için önem arz etmektedir. MR damperlerin davranışlarını doğru bir şekilde modellemek uygulamalar için oldukça önemlidir. MR damperler ne kadar doğru bir şekilde modellenirse damperin kontrol edilebilirliği o derece yükselir. Kontrol edilebilirliği yüksek bir MR damper performans olarak da diğer damperlere göre üstünlük kazanır ve kullanım amacına uygun koşul ve şartlarda kullanılır. Kontrol analizlerinde yanlış yapmamak için MR damperlerin doğrusal olmayan davranışlarının hatasız modellenmesi gerekmektedir.

Kullanışlı ve doğru bir model tanımlayabilmek için deneysel verilerden yola çıkarak teorik model parametrelerini tahmin etmek gerekmektedir.

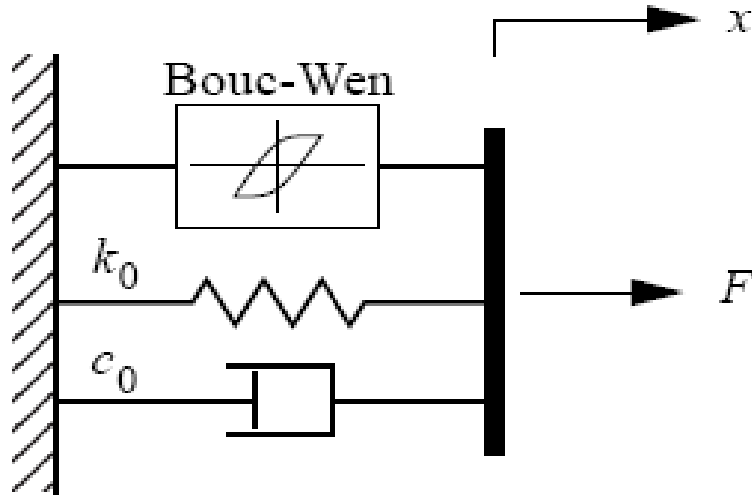
MR sıvılı damperlerin davranışını temel olarak iki kategoride sınıflandırabiliriz. Bunlardan birincisi sanki statik akış modeli ve ikincisi ise dinamik modeldir. Sanki-statik akış modellerinden Bingham plastik modeliyle kuvvet-yer değiştirme karakteristiğini tanımlayabiliyoruz ancak yüksek histerisizlik özellikli olan kuvvet-hız karakterizasyonunu tanımlarken bu model yetersiz kalmaktadır.

Kuvvet-hız karakterizasyonunu tanımlayabilmek için farklı modeller önerilmiştir. Bunlardan Bouc-Wen modeli bu karakterizasyonu doğru bir şekilde tanımladığı için oldukça sık olarak kullanılmaktadır[34]. Bu modeldeki parametreler histerizlik davranışlarının özelliklerini temsil etmektedirler.

Bouc-Wen modeli birinci dereceden bir doğrusal olmayan diferansiyel denklem olup yer değiştirmenin kuvvet ile ilişkisini vermektedir. Bouc-Wen modelindeki kuvvet-yer değiştirme grafiğinin deneysel verilerden gelen sonuçlarla arasındaki fark ne kadar azsa sonuçlarımızın o kadar doğru olduğunu göstermektedir.

4.1. Sıcaklığa Bağlı Bir Bouc-Wen Modeli Geliştirilmesi

Gerçek fiziksel şartların matematiksel olarak ifade edildiği Bouc-Wen modeli Şekil 4.1.'de gösterilmiştir. Bir sönümlenme elemanı, bir yay ve Bouc-Wen histerisizliğin gösterildiği ifadeden oluşmaktadır.



Şekil 4.1. Bouc-Wen modeli

Klasik Bouc-Wen modeli için toplam kuvvet denklemi aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$f = c_0 \dot{x} + k_0 x + \alpha z \quad (4.1)$$

Burada $c_0 \dot{x}$ viskoz kuvveti olmaktadır çünkü akışkanın kendisi sönüm elemanı gibi davranmaktadır, $k_0 x$ yay kuvveti akümülatördeki sıkıştırılmış gazdan kaynaklanıyor ve αz ise histerisiz kuvveti göstermektedir. αz histerisiz kuvvetindeki z birinci dereceden bir diferansiyel denklem olup denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| |z|^{(n-1)} z - \beta \dot{x} |z|^n + Ax \quad (4.2)$$

\dot{z} denklemini klasik Bouc-Wen toplam kuvvet denkleminde yerine yazarsak f kuvveti sıcaklığa bağlı olarak yedi değişkenden etkilenmektedir. Bu değişken parametreler c_0 , k_0 , α , γ , β , n ve A 'dır.

Wong ve ark. (1994) yapmış olduğu çalışmada x ve z 'nin her zaman aynı işaretli olduğunu belirtmişlerdir.

Z. Parlak [43] Denklem 4.2.'deki n katsayısının iki olduğunu varsayarak z denklemini düzenlemiştir. Daha sonra elde ettiği z denklemini Denklem 4.1.'de Bouc-Wen toplam damper kuvveti denkleminde yerine yazarak Denklem 4.3.'yi elde etmiştir. $c_0 \dot{x}$ viskoz kuvvetindeki \dot{x} hız olup $a\omega \cos(\omega t)$ açılımında olmaktadır ve $k_0 x$ lineer kuvvetindeki x yer değiştirme olup $a \sin(\omega t)$ açılımında olmaktadır.

$$f = c_0(a\omega \cos(\omega t)) + k_0(asin(\omega t)) + \alpha \left\{ \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{(\beta+\gamma)}} \tanh \left(\sqrt{A(\beta + \gamma)} (\dot{x} + \frac{1}{\sqrt{A(\beta+\gamma)}} \operatorname{atanh} \left(\frac{\pm fz_0 \sqrt{(\beta+\gamma)}}{\alpha \sqrt{A}} \right) \right) \right\} \quad (4.3)$$

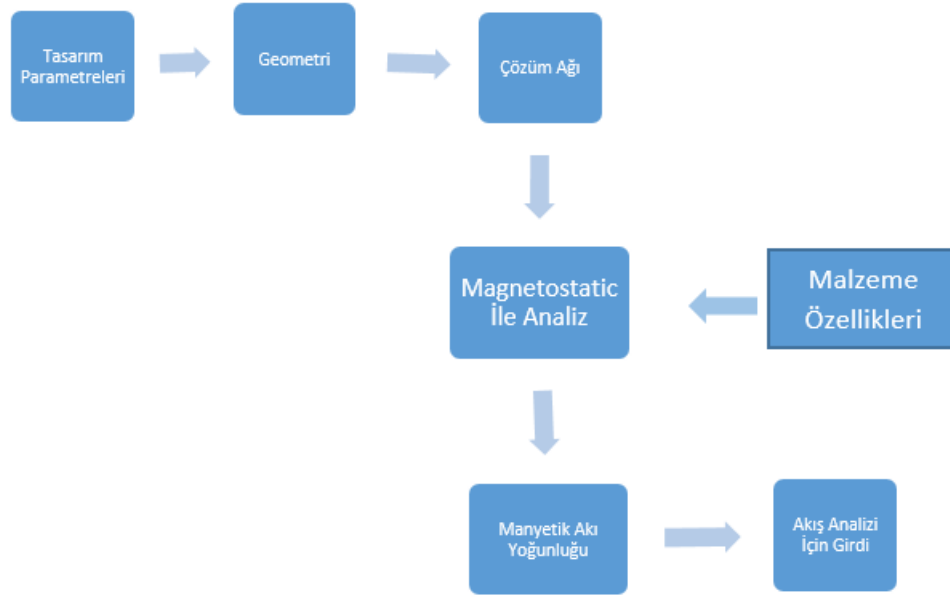
Denklem 4.3.'deki ω açısal hız olup a ise MR damperin yarım stroğu olmaktadır. Denklemden de görüldüğü üzere toplam damper kuvveti analitik bir form olarak gösterilmiştir. Denklem 4.3.'deki 7 değişken parametre c_0 , k_0 , α , γ , β , fz_0 ve A deneysel verilerin yardımıyla bulunabilir.

BÖLÜM 5. MR DAMPERİN SAYISAL HESAPLAMALARI

Sayısal analizler Tablo 7.2.'deki değerleri verilip numaralandırılan MR damperler için gerçekleştirilmiştir.

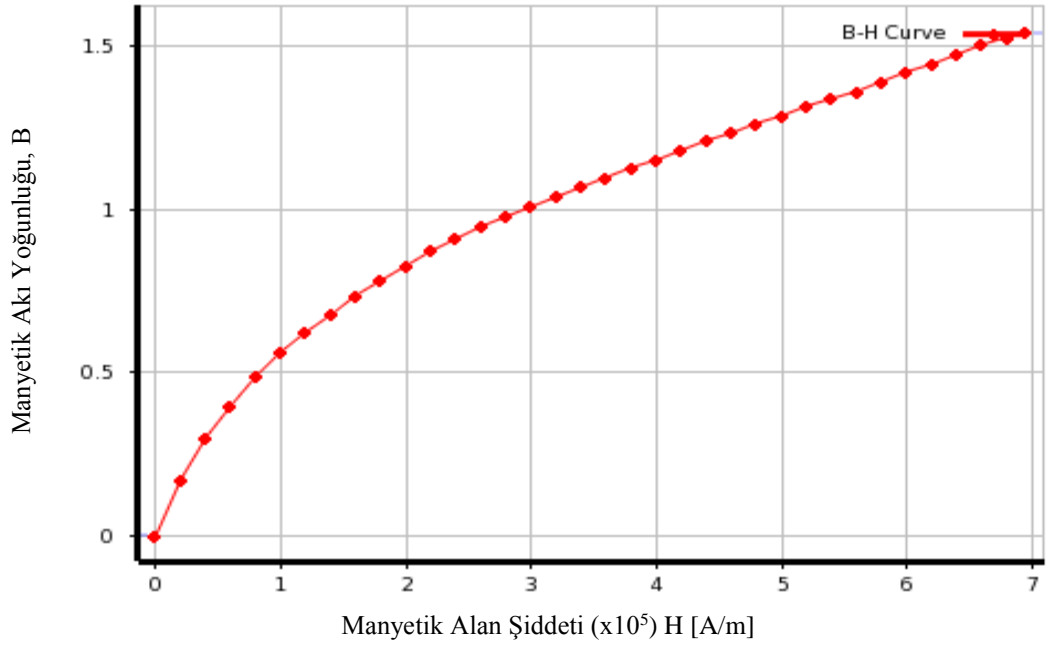
5.1. Manyetik Akı Yoğunluğunun Hesaplanması

Tasarımını yapıp üretimini gerçekleştirdiğimiz MR damperin sayısal analizlerini ANSYS 17.2'nin Magnetostatic aracı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Manyetik alanın etkilediği piston kafası ile beraber tüm akış alanı işleme tabi tutulmuştur. Tam akış modelinin analizi için coupled çözüm yapılmıştır böylece aynı çözüm ağı üzerinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) çözümleri gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde yaparak elde etmiş olduğumuz manyetik akı yoğunluğunun değerlerini CFD de viskozite hesaplamasında kullanılmıştır. MR damper için simülasyonların daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi için MR damper 20°'lik parça olacak şekilde işleme tabi tutulmuştur. Manyetik alan analizini gerçekleştirmek için yapılan adımlar aşağıda şematik olarak gösterilmiştir.

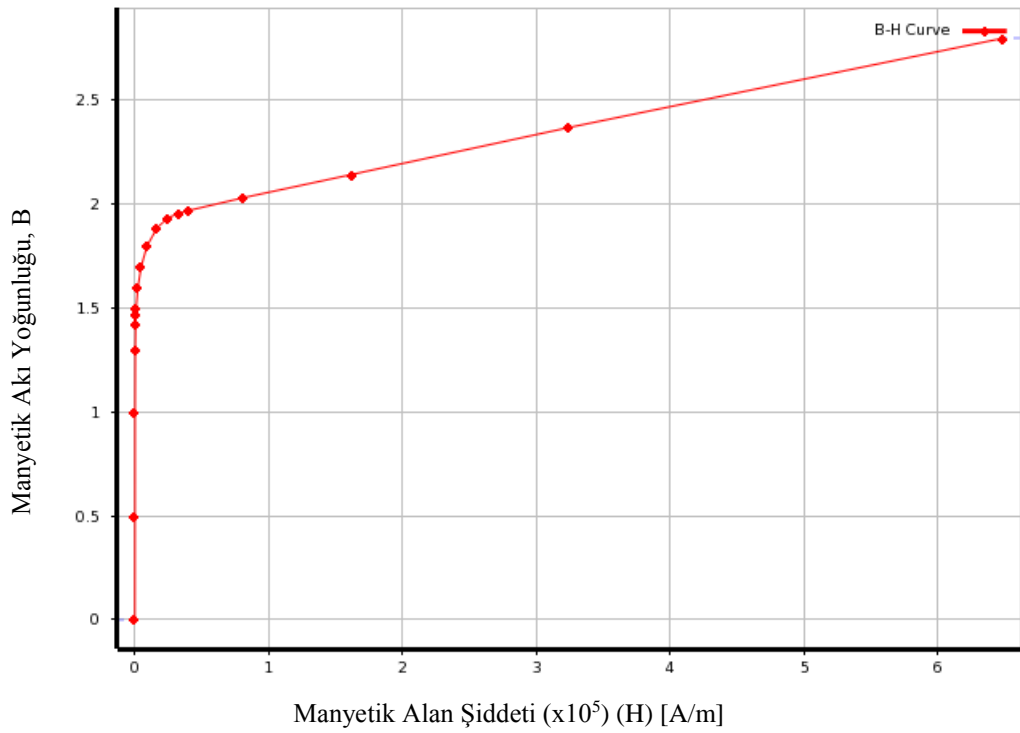


Şekil 5.1. Manyetik alan analizi için yapılması gereken basamaklar

Malzeme özellikleri olarak ANSYS 17.2'ye St37 çeliği ve MR sıvının özellikleri girilmiştir. Ayrıca bobin teli için kullanılan bakırın özellikleri ANSYS 17.2'nin kendi kütüphanesinden çekilmiştir. Malzeme tercihleri yapılırken malzemenin hem termal özellikleri hem de manyetik özellikleri göz önünde bulundurulmuştur. Malzeme özelliklerini tanımlarken malzemenin manyetik özelliklerini belirten manyetik akı yoğunluğu-manyetik alan şiddeti (B-H) eğrileri kullanılmıştır. MR damperler için genellikle manyetik geçirgenliği yüksek olan çelikler tercih edilmektedir. MRF132-DG ve St37 çeliğine ait B-H eğrileri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



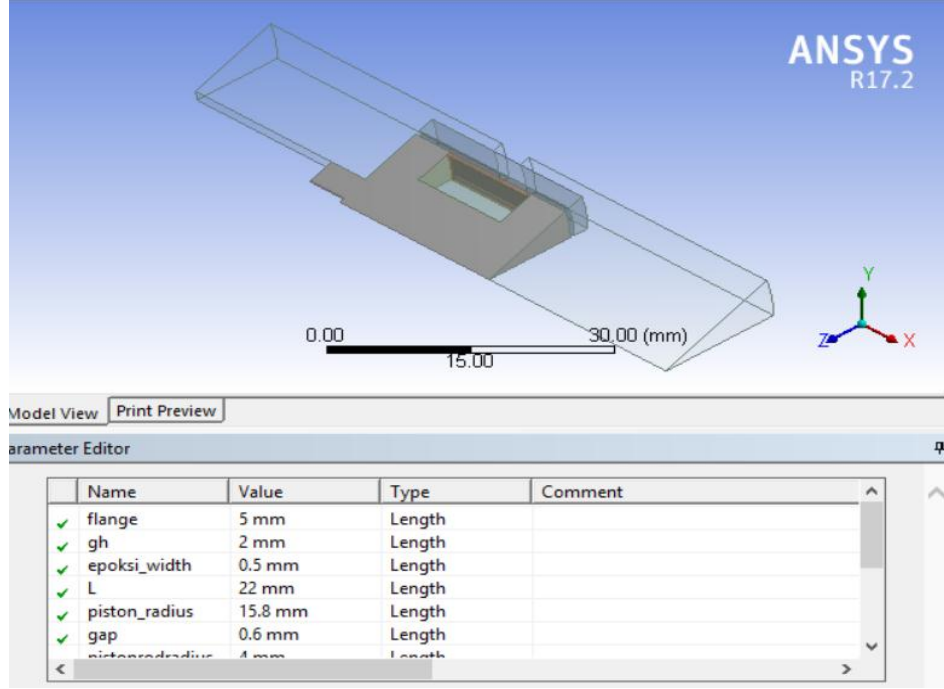
Şekil 5.2. MRF132-DG'nin B-H eğrisi



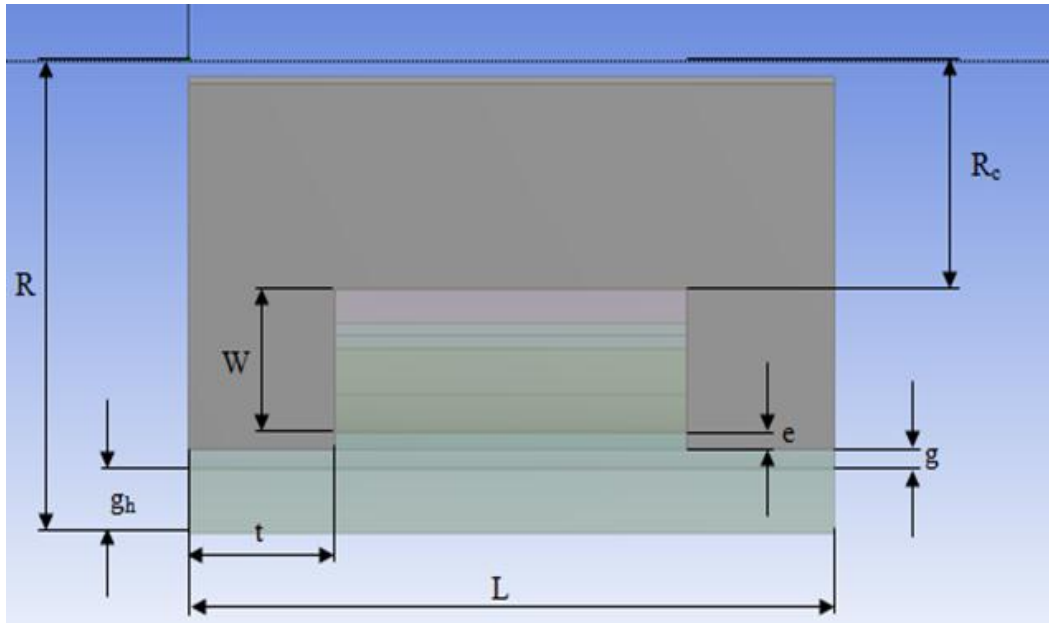
Şekil 5.3. St37 çeliğinin B-H eğrisi

MR damperlerin geometrik modelleri oluştururken, ölçüler ANSYS 17.2 Design Modeller'da parametre tanımlama özelliği kullanılarak oluşturulmuştur. Böylece

parametrelerin kolay bir şekilde değişimi gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde oluşturulan damperin genel gorunu Şekil 5.4.'de ve belirlenen parametrelerin damper üzerindeki gösterimleri Şekil 5.5.'de verilmiştir.



Şekil 5.4. Parametrelerin gösterimi



Şekil 5.5. piston kafasının kesit gorunu ve geometrik büyüklükleri

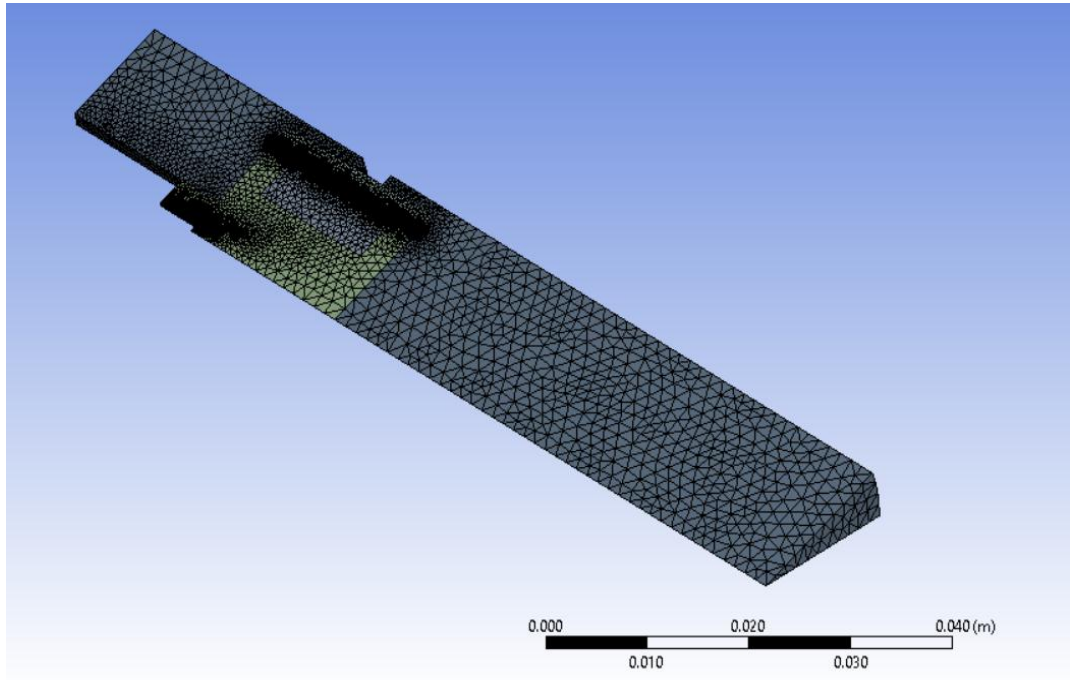
Bu şekilde;

R: Piston başı yarıçapı
 g_h : Manyetik akı geri dönüş genişliği
 w : Bobin genişliği
 t : aktif uzunluk
 L : piston başının uzunluğu
 e : epoksi kalınlığı
 R_c : Çekirdek yarıçapı
 g : kanal genişliği

olarak tanımlanmaktadır.

5.2. Manyetik Alan Analizi İçin Çözüm Ağı

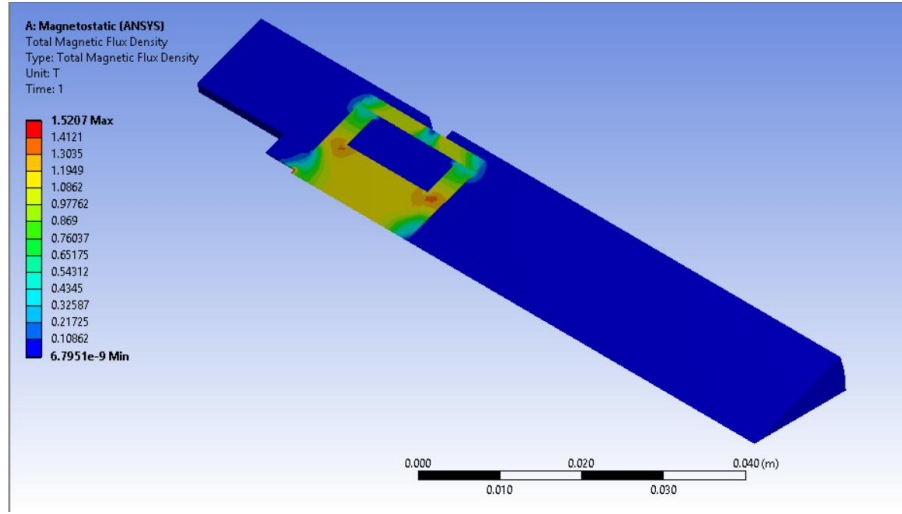
Analizi gerçekleştirilecek olan her damperde boyutsal ölçülere göre farklı sayıda elemana sahip çözüm ağları oluşturulmuştur.



Şekil 5.6. MR sıvı ve piston başı için oluşturulan çözüm ağı

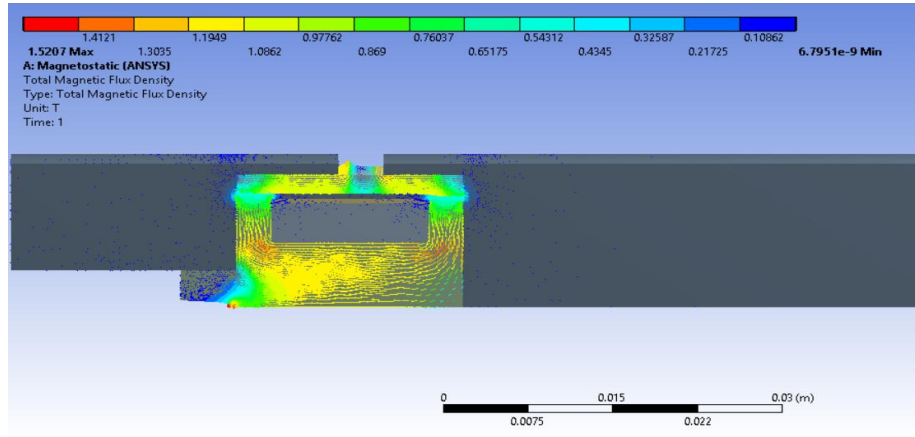
Şekil 5.6.'da gösterilen MR sıvı ve piston başı kesit alanında toplamda 497437 adet element sayısı bulunmaktadır.

Yapılan manyetik alan analiz sonucunda MR sıvılı damperin toplam manyetik akı yoğunluğu cihaz 1 için Şekil 5.7.'de gösterildiği gibi olur.



Şekil 5.7. Manyetik akı yoğunluğu

Şekil 5.7.'deki toplam manyetik akı yoğunluğuna ait manyetik alan döngüsü cihaz 1 için Şekil 5.8.'de gösterilmiştir.

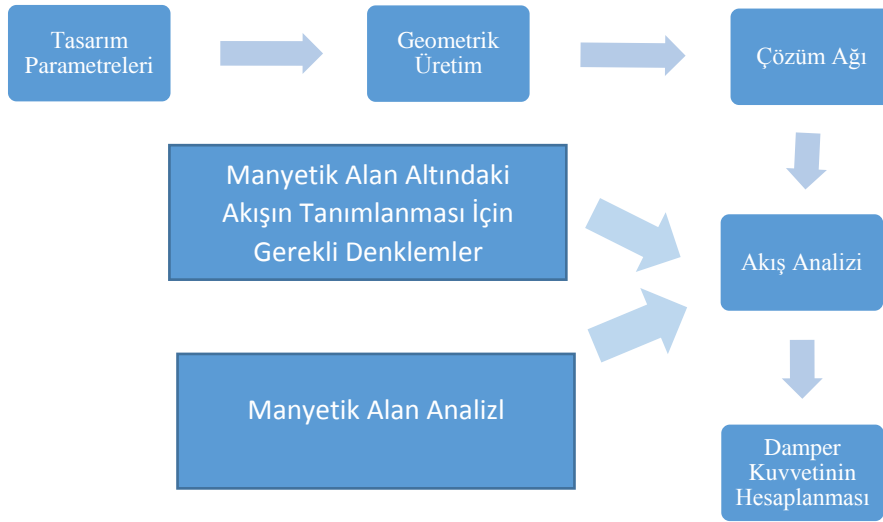


Şekil 5.8. Manyetik alan döngüsü

Şekil 5.8.'den de görüldüğü üzere en yüksek manyetik alan piston kafasının çekirdek bölgesinde oluşmaktadır. Manyetik alan döngüsü istendiği gibi çekirdek, kanal ve manyetik akı geri dönüş (g_h) üzerinden dönmektedir. Böylece yapılmak istenen kanal üzerindeki manyetik akı yoğunluğunu artırmaktır.

5.3. MR Damper İçindeki Akışın Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile Analizi

MR damper içindeki akışın CFD analizi ANSYS 17.2'de CFX aracı ile gerçekleştirilmiştir. Manyetik akı yoğunluğu analizinde olduğu gibi yine daha hızlı hesaplamalar elde edilebilmesi için bütün damper üzerinden sadece 20°'lik bir kesit alan kullanılmıştır. Aynı geometri kullanıldı. Akış analizinden elde edilen sonuçlar F-x ve F-v grafiklerini elde edebilmek için zamana bağlı bir analiz ile hareketli bir çözüm ağı kullanılmıştır. Hareketli çözüm ağı (Dinamik ağı), duvar olarak tanımlanmış yüzeylerin veya bölgelerin zamana bağlı hareketi ile ağıın son durumdaki yapıya göre kendini yeniden düzenlemesi olarak tanımlanabilir. Böylece deneysel sonuçlarla kuvvet-hız ve kuvvet-yer değiştirme karşılaştırmaları yapılabilmektedir. Piston hareketsiz olarak tanımlanmış, silindirin üst yüzeyine deneysel verilere uygun olan bir sinüsoidal hız verilmiştir. Alt yüzeye ise üst yüzey ile uyumlu olarak piston milinin kapladığı ve boşalttığı hacme eşit olacak bir hacim kadar hareket tanımlanmıştır. Özellikle damper kuvvetinin önemli bir kısmının meydana geldiği kanal içinden geçen MR sıvısının Reynolds sayısı 2300'den küçük olduğu için akış tipi olarak laminer seçilmiştir. MR damper içindeki CFD analizini gerçekleştirmek için yapılması gereken adımlar Şekil 5.9.'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Akış analizi için gerekli basamaklar

Manyetik alan analizi yapıldıktan sonra her nokta için x, y ve z koordinatları ve bu koordinatlardaki manyetik akı yoğunlukları CFX'e profil verisi olarak bir .csv dosyası ile aktarılır ve manyetik akı yoğunluğu CFX'de her bir nokta için tanımlanmış olur. Bunun yanı sıra CFX'de çeşitli denklemler, sayısal değerler ve sınır şartları gibi bazı ifadeler tanımlanmıştır. Bu ifadeler yazılırken farklı hız ve stroklarda da çalıştırılabilmesi kolaylaştırılmıştır. Kullanmış olduğumuz maksimum hız ve strok'tan hareketli pistonun açısal frekans hızı elde edilmiştir. Açısal frekans ve hıza bağlı frekans denklemi ve CFX kısmına yazılan bazı denklemler Denklem 5.1., Denklem 5.2. ve Denklem 5.3.'de gösterilmektedir.

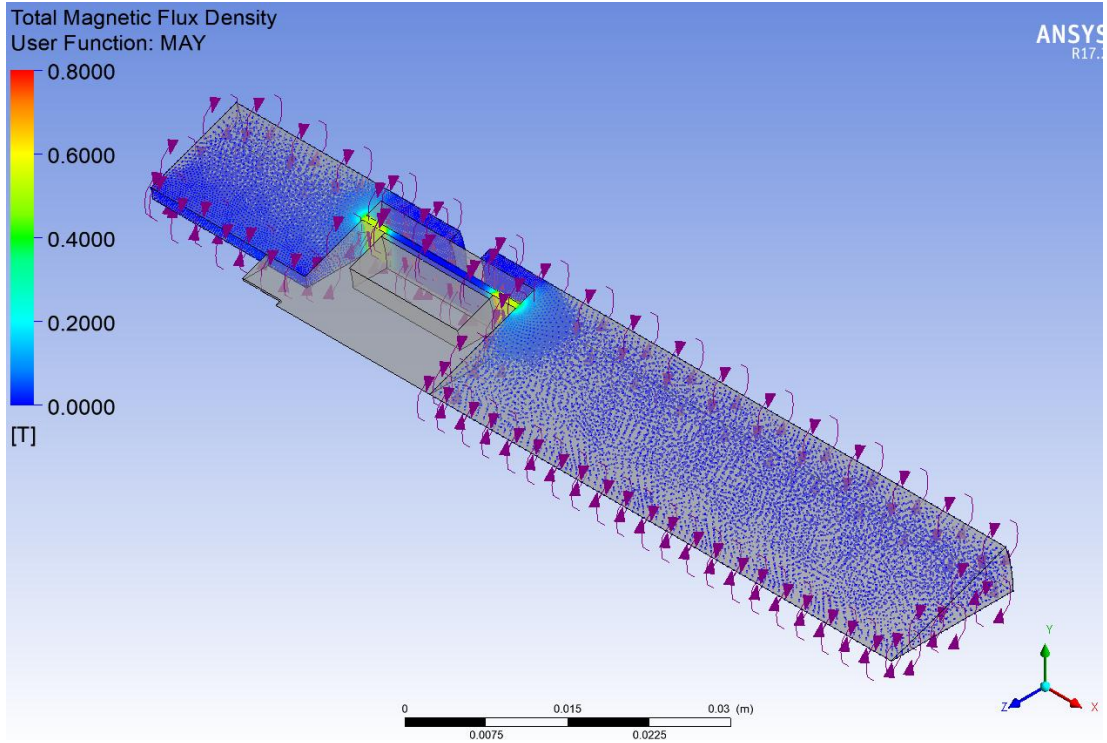
$$\omega = \frac{V_{maks}}{S_{maks}} \quad (5.1)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (5.2)$$

$$v(t) = V_{maks}(\sin(\omega t)) \quad (5.3)$$

Buradan ω açısal frekans, S strok, f frekans ve maksimum hız 0.1m/s olup v (hız) ise herhangi bir t anındaki hızı ifade etmektedir.

Her konum için CFX de tanımlanmış kesit görüntüsü aşağıda gösterildiği gibidir.



Şekil 5.10. ANSYS CFX'de manyetik alan yoğunluğu verilerinin tanımlanmış hali

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMA VE KARŞILAŞTIRMALAR

Tasarımını yaptığımız ve üretimini gerçekleştirdiğimiz MR damper üzerindeki çalışmalarımızı Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Uygulamalı Akışkanlar Mekaniği laboratuvarında bulunmakta olan Roehrig MK-2150 adlı test cihazıyla yapılmıştır. Test sonuçlarını ise yine aynı firmanın yazılımı olan SHOCK adlı program kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 6.1.'de MR damperlerin testlerini gerçekleştirdiğimiz test düzeneği görülmektedir.

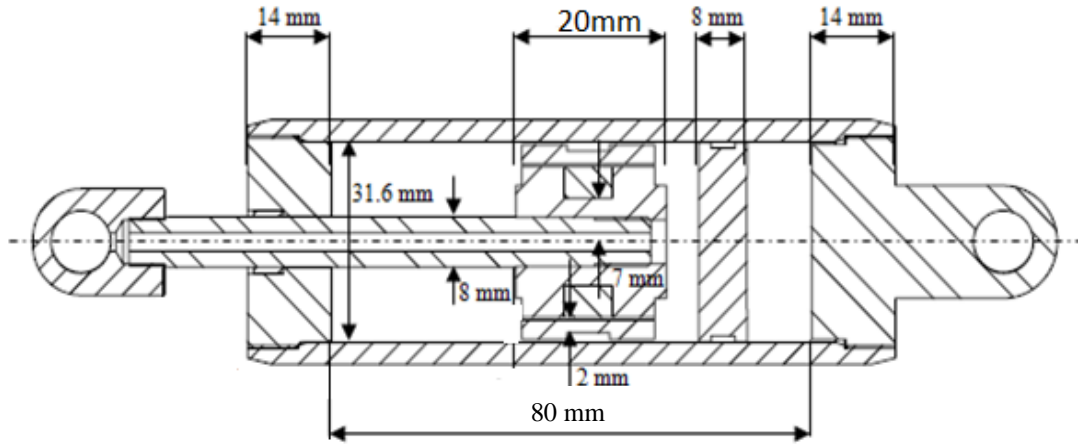


Şekil 6.1. Deneysel test düzeneği

Şekil 6.1.'den de görüldüğü üzere MR dampere akım verebilmemiz için bir güç kaynağı, testi ve sonuçlarını kontrol edeceğimiz bir bilgisayar ve damper test düzeneği bulunmaktadır. Sıcaklık banyosu üzerinden sıcaklıklar ayarlanabilmektedir. 20°C'den 70°C'ye kadar on derecelik artışlarla farklı sıcaklıklar altında damper incelenmiştir. Bu testler sonucunda damperin farklı sıcaklıklar altında kuvvet-hız ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir.

6.1. İmalat ve Testleri Yapılan MR Sıvılı Damperin Tasarımı

Testleri gerçekleştirilen MR damperin şekli ve ölçüleri Şekil 6.2.'de verilmiştir.



Şekil 6.2. Üretimini gerçekleştirdiğimiz MR damper ölçüleri

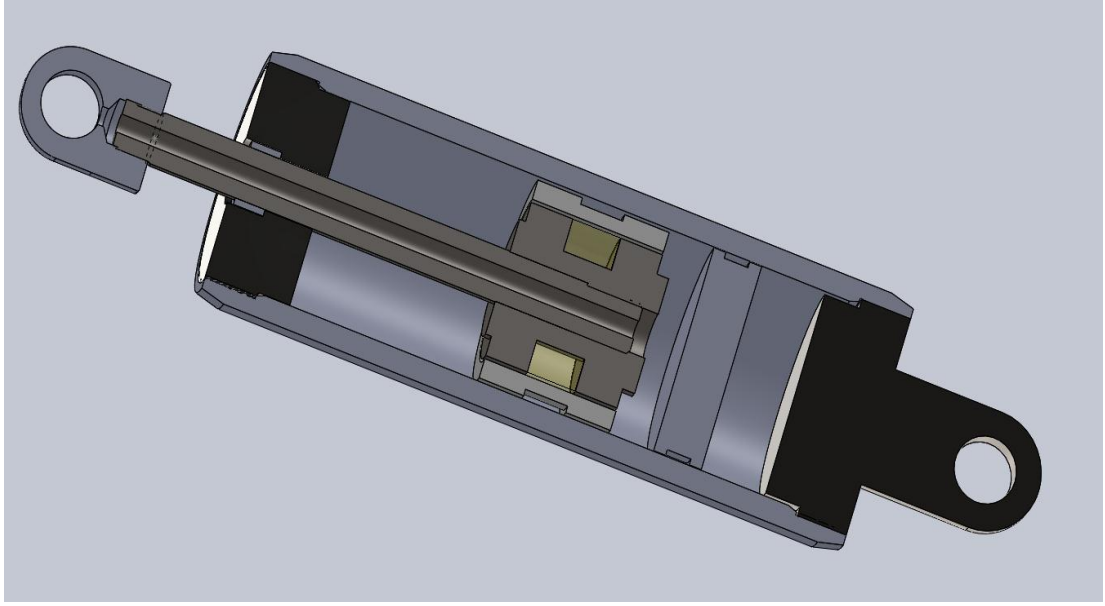
Ayrıca şekil üzerinde belirtilmeyen kanal genişliği ölçüsü 0.4 mm olacak şekilde üretilmiştir. Burada bobin olarak 120 sarımlı ve genişliği 5.1 mm olan bir bobin kullanılmıştır. Daha sonra bu bobinin üzerine akışkanla temasını engellemek üzere epoksi malzemeye kaplanmıştır. İmalatını gerçekleştirdiğimiz MR damperin yedi temel parçası bulunmaktadır. Bu temel bileşenleri piston mili, MR damper silindiri, bobin yüzüğü, piston başı, damper silindirinin alt ve üst kapakları ve akümülatör

kapağı olarak sıralayabiliriz. Kullanılan malzeme olarak piston mili için krom kaplı çelik ve diğer kısımlar için St37 çeliği kullanılmıştır.

MR sıvılı damperin montajını gerçekteştirdikten sonra damperin içerisine yaklaşık 50 mm³ hacminde LORD firması tarafından üretilen ticari bir sıvı olan MRF-132DG ile doldurulmuştur. Ayrıca MR sıvı ekledikten sonra damperlere içerinde hava kalmayacak şekilde basıncı yaklaşık olarak 20 bar olacak şekilde azot gazı basılmıştır. Azot gazı akümülatörün içerisinde bulunan boşluğa basılmış olup piston milinin MR dampere girişi ve çıkışı esnasında oluşacak hacim farklarını gidermek için kullanılmıştır.



şekil 6.3. İmalatı gerçekteştirilen MR damper

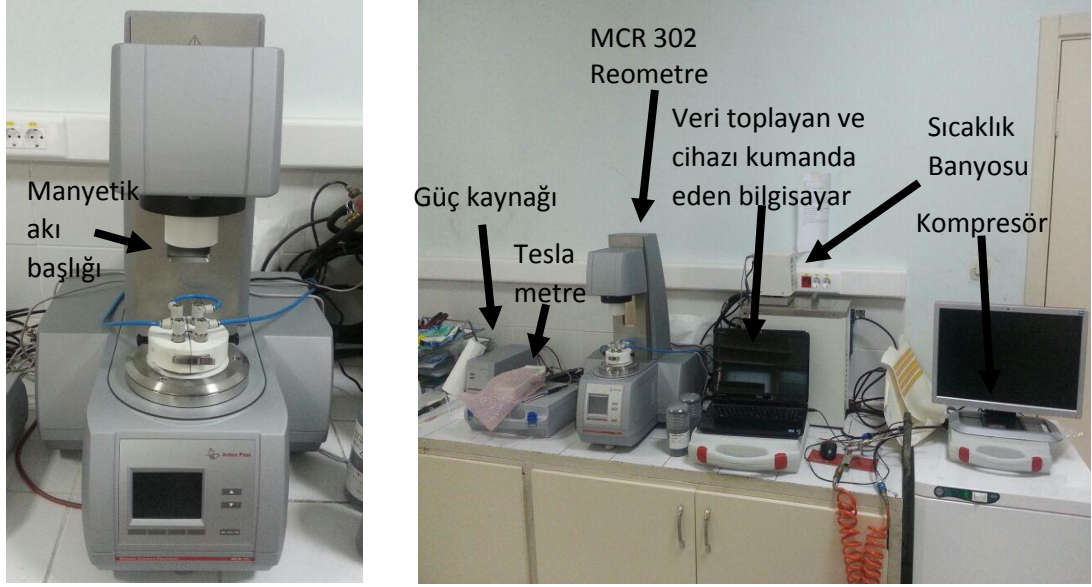


Şekil 6.4. MR damperin kesit görüntüsü

Şekil 6.4.'de deneylerde kullandığımız MR damperin kesit görüntüsü görülmektedir. Bu damperden deneyler sırasında sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Sıcaklık ölçümünü yapabilmek için bir adet k-tip termocouple kablosunu bobinin içinden kablonun geçeceği büyüklükte bir boşluk açarak yaklaşık olarak kanal içinden geçen MR sıvıya deşecek şekilde konumlandırılmıştır. Bobinden çıkan bu kablo piston mili içinden damper dışına çıkarılarak bir DAQ ünitesine bağlanmıştır. Bu DAQ ünitesi ise verileri okuyabileceğimiz bir bilgisayara bağlanmıştır. Böylelikle MR damperden sıcaklık ölçümleri elde edilebilmektedir.

6.2. MR Sıvının Farklı Sıcaklıklarda Karakterizasyonunun Belirlenmesi

MRF-132DG sıvısının farklı sıcaklıklar altında özelliklerinin incelenmesi Anton Paar firmasına ait MCR 302 kodlu Reometrede gerçekleştirilmiştir. Bu test ünitesinde akımı verebilmek güç kaynağı, bu akım sıvı üzerine uyguladığında manyetik akı yoğunluğu ölçümü için Teslametre, MR sıvı testlerini gerçekleştirebilmek için bir Reometre, ortam sıcaklığını ayarlayabilen sıcaklık banyosu, kompresör ve cihazın yazılımını kumanda etmek verileri almak ve anlık sonuçları gözlemlemek için bir adet bilgisayardır. Şekil 6.5.'te test düzeneğı gösterilmiştir.

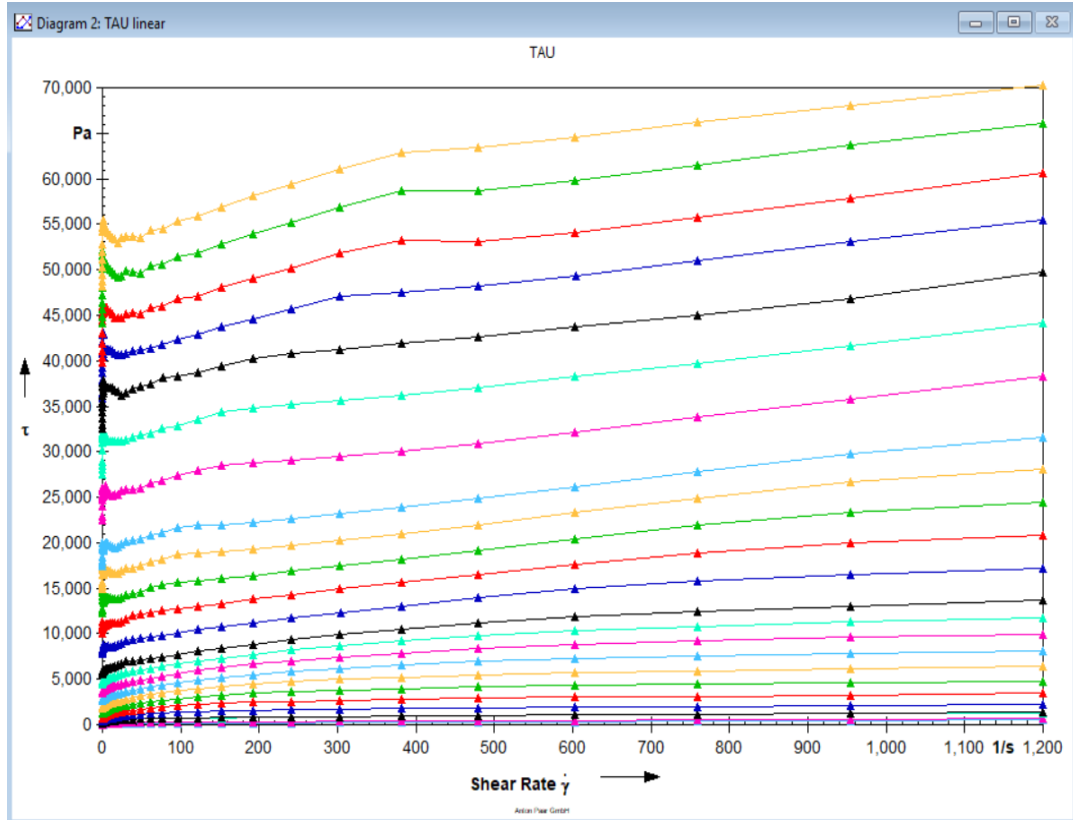


Şekil 6.5. Anton Paar test düzeneği

Anlık verilerin okunmasında ve kumanda edilmesinde yazılım olarak Anton Paar firmasının cihaz için geliştirilmiş olan RHEOPLUS/32 V3.61 paket programı kullanılmaktadır. Bu çalışmada deneyler sıvının sırasıyla 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C ve 70°C sıcaklıklarında test edilmiştir.

Her sıcaklık için MR sıvıya 0 A'den 5 A'e kadar akım uygulanıp ve bu akımlar altında sıvının manyetik alan altında davranışlarını incelenmiştir.

MR sıvıya uygulanan akım değerleri değiştirilerek MR sıvının sergilediği manyetik akı yoğunluğu değişim eğrileri farklı sıcaklıklar için elde edilmiştir. Bu testlerden elde edilen ve farklı akımlarda kayma gerilmesiyle deformasyon hızı arasındaki ilişki Şekil 6.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Farklı akımlar altında akma gerilmesiyle deformasyon hızının ilişkisi

Şekil 6.6.'da görüldüğü gibi uygulanan akımın artmasıyla birlikte meydana gelen gerilme değerleri de beklendiği gibi yükselmektedir. Bu artış düşük $\dot{\gamma}$ exponansiyel yüksek $\dot{\gamma}$ doğrusala yakın bir şekilde gerçekleşmektedir.

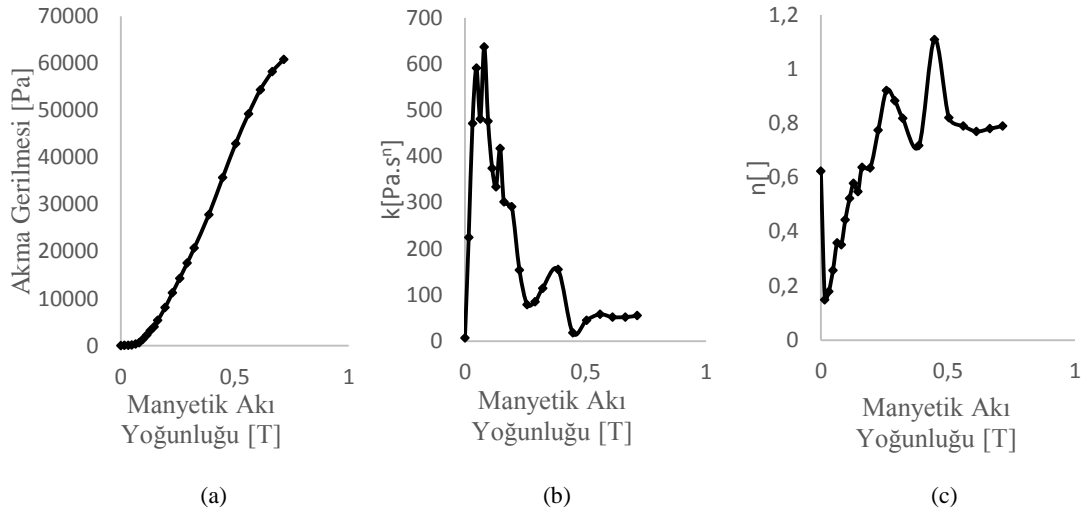
Gerçekleştirilen bu test koşullarında, her sıcaklıkta her bir akım değerine karşılık bir manyetik akı yoğunluğu değeri elde edilmiştir. Tablo 6.1.'de bu ilişkiler verilmiştir.

Tablo 6.1. Farklı sıcaklıklar ve farklı akımlar altında Manyetik akı yoğunlukları

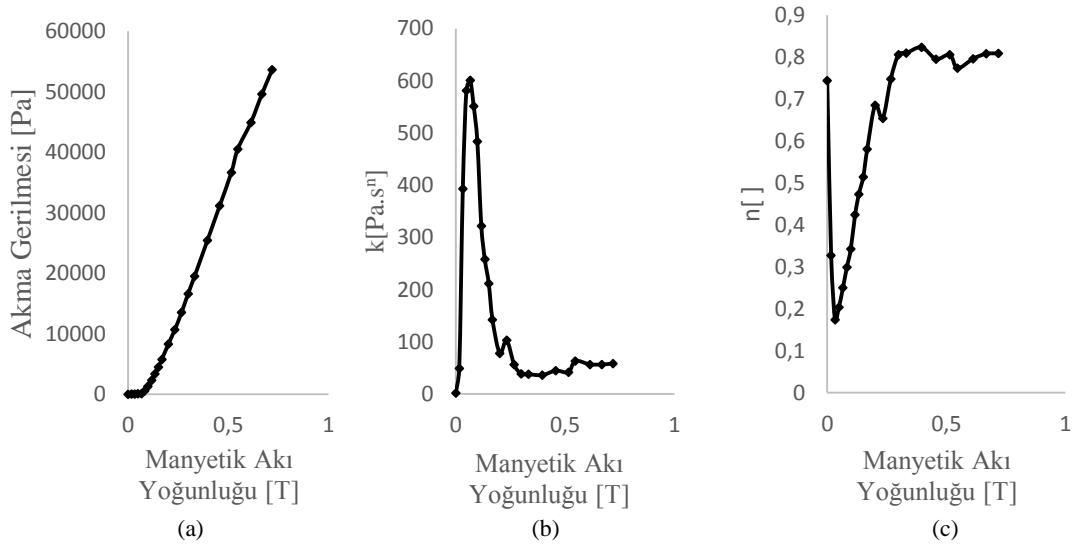
| A | Manyetik akı yoğunluğu | | | | | |
|-----|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 20 °C | 30 °C | 40 °C | 50 °C | 60 °C | 70 °C |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,1 | 0,0156 | 0,0163 | 0,0163 | 0,0111 | 0,0125 | 0,0127 |
| 0,2 | 0,0313 | 0,0325 | 0,032 | 0,0245 | 0,0251 | 0,0256 |
| 0,3 | 0,0475 | 0,0488 | 0,0485 | 0,0375 | 0,0382 | 0,0388 |
| 0,4 | 0,0637 | 0,066 | 0,0654 | 0,0505 | 0,0516 | 0,0521 |
| 0,5 | 0,08 | 0,0823 | 0,0822 | 0,0638 | 0,0648 | 0,0654 |
| 0,6 | 0,096 | 0,0988 | 0,0988 | 0,0771 | 0,0782 | 0,0785 |
| 0,7 | 0,113 | 0,117 | 0,115 | 0,0897 | 0,0915 | 0,0918 |
| 0,8 | 0,129 | 0,133 | 0,133 | 0,103 | 0,105 | 0,105 |
| 0,9 | 0,146 | 0,151 | 0,15 | 0,116 | 0,119 | 0,118 |
| 1 | 0,162 | 0,168 | 0,166 | 0,129 | 0,133 | 0,131 |
| 1,2 | 0,194 | 0,201 | 0,199 | 0,156 | 0,16 | 0,158 |
| 1,4 | 0,226 | 0,233 | 0,232 | 0,181 | 0,185 | 0,184 |
| 1,6 | 0,258 | 0,267 | 0,265 | 0,207 | 0,212 | 0,212 |
| 1,8 | 0,291 | 0,299 | 0,296 | 0,233 | 0,238 | 0,24 |
| 2 | 0,322 | 0,332 | 0,327 | 0,259 | 0,264 | 0,265 |
| 2,4 | 0,386 | 0,396 | 0,391 | 0,311 | 0,315 | 0,317 |
| 2,8 | 0,447 | 0,457 | 0,452 | 0,359 | 0,364 | 0,366 |
| 3,2 | 0,504 | 0,515 | 0,511 | 0,407 | 0,411 | 0,414 |
| 3,6 | 0,56 | 0,547 | 0,566 | 0,454 | 0,457 | 0,461 |
| 4 | 0,612 | 0,613 | 0,615 | 0,495 | 0,499 | 0,502 |
| 4,5 | 0,665 | 0,668 | 0,671 | 0,539 | 0,545 | 0,549 |
| 5 | 0,715 | 0,719 | 0,721 | 0,582 | 0,585 | 0,588 |

Şekil 6.6.'da verilen test verileri kullanılarak, Denklem 2.4.'deki Herschel-Bulkley modelinde yer alan akma gerilmesi (τ_y), k ve n parametrelerinin değerleri her bir akım değeri için elde edilmiştir.

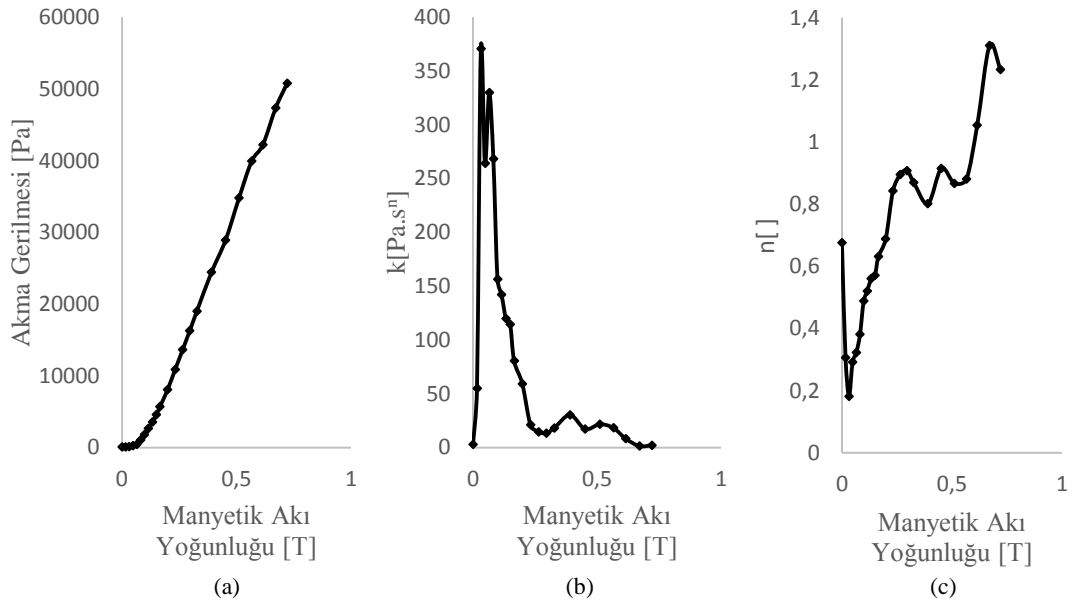
Aynı sıcaklıkta her akım için elde ettiğimiz bu akma gerilmesi, k ve n parametreleri Tablo 6.1.'de verilen manyetik akı yoğunluklarıyla eşleştirilerek, MATLAB paket programının Curve Fitting aracı kullanılarak bu ilişkilere eğri denklemleri uydurulmuştur. Aşağıdaki şekillerde her sıcaklık için ayrı ayrı akma gerilmesi, k ve n parametrelerinin manyetik akı yoğunluğuyla ilişkileri görülmektedir.



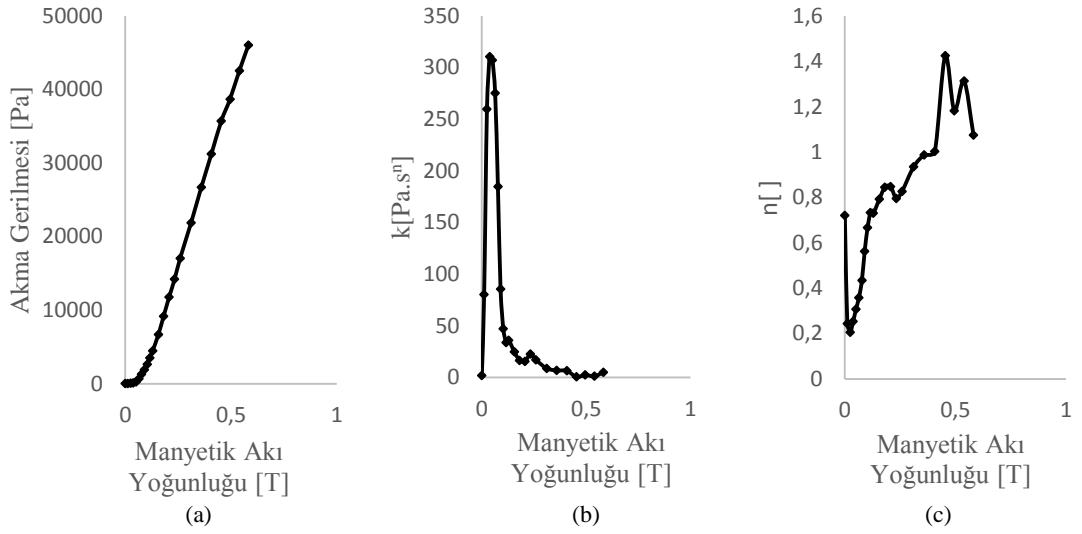
Şekil 6.7. 20°C Manyetik akı yoğunluğu ve parametreler arasındaki ilişkiler; a) B- τ , b) B-k, c) B-n



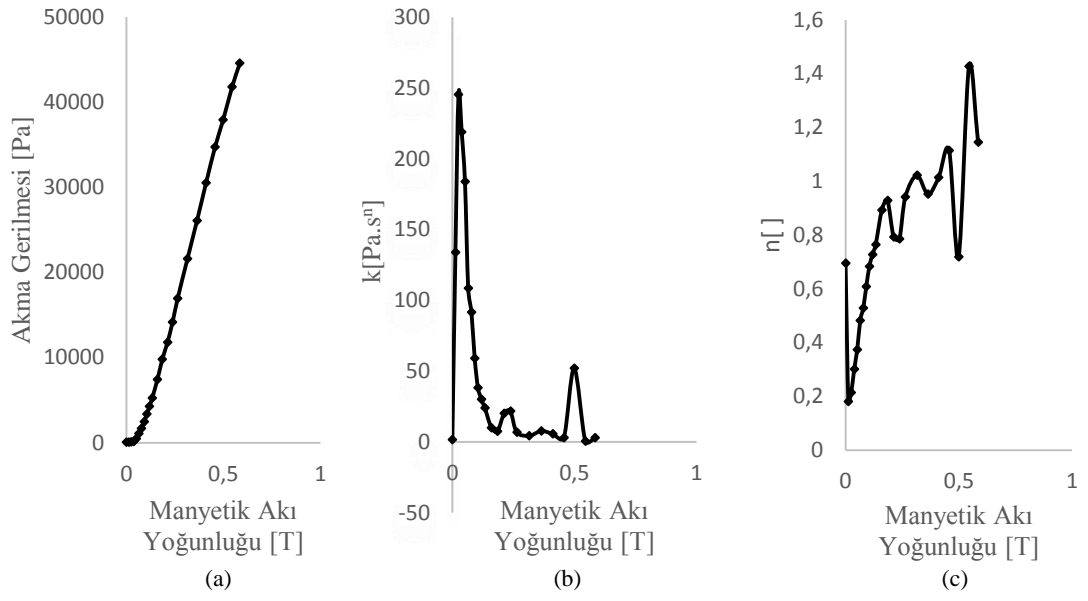
Şekil 6.8. 30°C Manyetik akı yoğunluğu ve parametreler arasındaki ilişkiler; a) B- τ , b) B-k, c) B-n



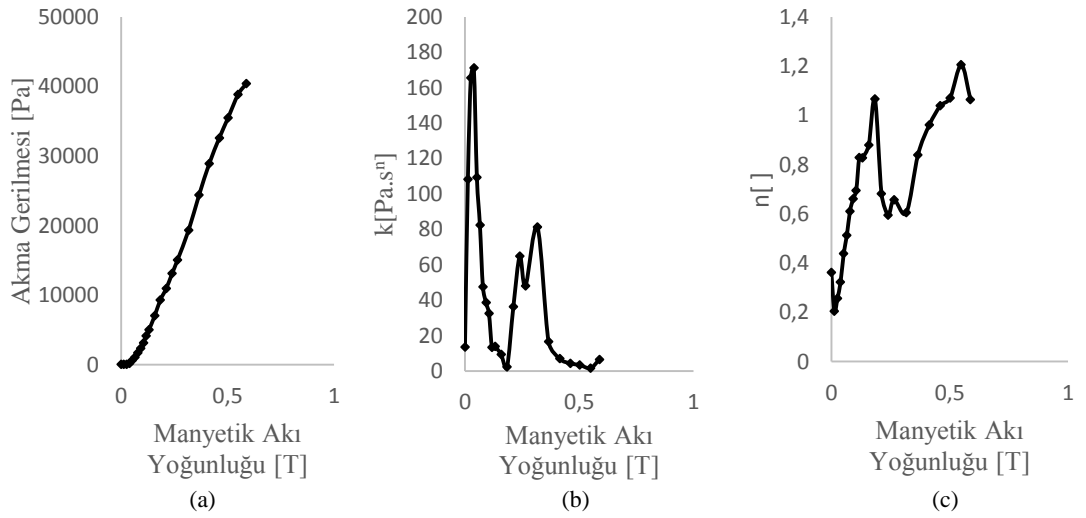
Şekil 6.9. 40°C Manyetik akı yoğunluğu ve parametreler arasındaki ilişkiler; a) B- τ , b) B-k, c) B-n



Şekil 6.10. 50°C Manyetik akı yoğunluğu ve parametreler arasındaki ilişkiler; a) B- τ , b) B-k, c) B-n

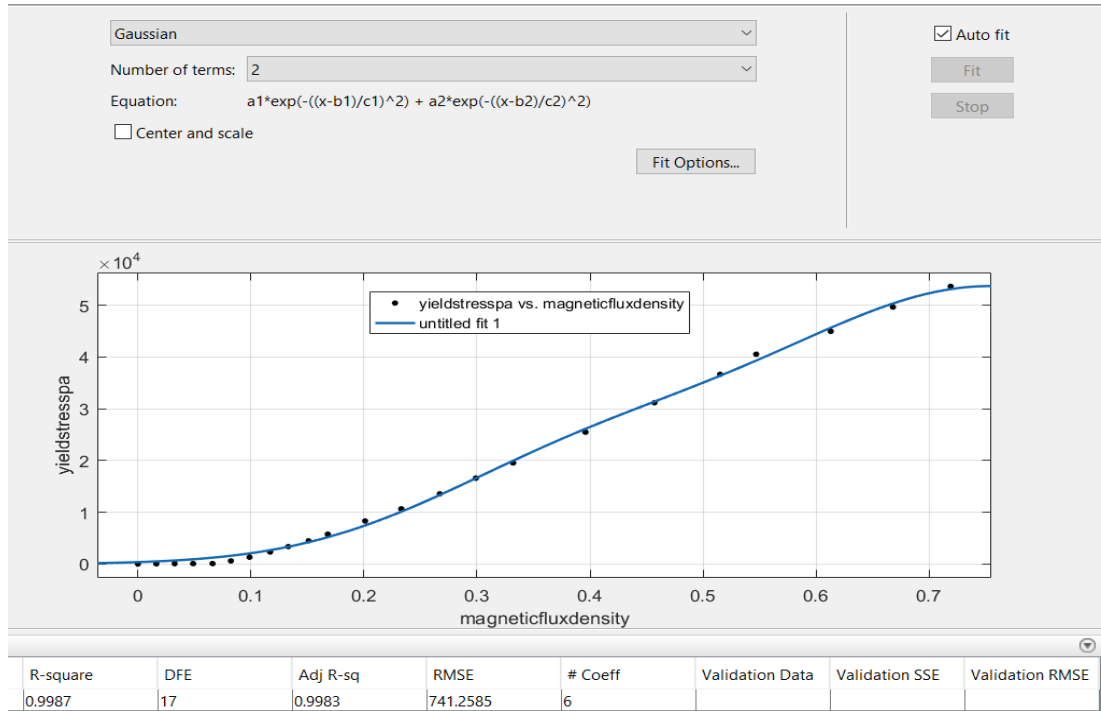


Şekil 6.11. 60°C Manyetik akı yoğunluğu ve parametreler arasındaki ilişkiler; a) B- τ , b) B- k , c) B- n



Şekil 6.12. 70°C Manyetik akı yoğunluğu ve parametreler arasındaki ilişkiler; a) B- τ , b) B- k , c) B- n

MATLAB Curve Fitting aracı kullanılarak uydurulan bu eğrilere uygun denklemler elde edilmiş ve hangi denklemin daha uygun olduğuna R^2 determinasyon katsayısına bakılarak karar verilmiştir. Böylelikle en yüksek kolerasyon katsayısına sahip denklem seçilmiş olup CFX de bu denklemler akışkanın viskozitesini hesaplamak için kullanılmıştır. Şekil 6.13.'de bir adet denklem seçiminin nasıl yapıldığı gösterilmiştir.



Şekil 6.13. Eğriye uygun denklem seçimi

Uygulanan farklı sıcaklıklar altında manyetik akı yoğunluğuyla τ , k ve n parametrelerinin denklemleri aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir.

20°C den 70°C'ye kadar B - τ_y eğrilere uydurulan denklem aynı olup Denklem 6.1.'de verilmiştir. Sıcaklık değişimiyle beraber bu denklemdeki katsayılar değişmektedir. Tablo 6.2.'de bu katsayılar verilmektedir.

$$\tau(B) = a1 * \exp(-((B - b1)/c1)^2) + a2 * \exp(-((B - b2)/c2)^2) \quad (6.1)$$

Tablo 6.2. B- τ_y denklem katsayıları

| | A1 | B1 | C1 | A2 | B2 | C2 |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 20°C | 3.96E+04 | 0.5141 | 0.1882 | 8.28E+03 | 0.2648 | 0.1212 |
| 30°C | -9.10E+07 | 0.5714 | 0.2279 | 9.11E+07 | 0.5714 | 0.2279 |
| 40°C | 7.37E+04 | 0.7143 | 0.0042 | 4.54E+04 | 0.6863 | 0.3643 |
| 50°C | 0.00E+00 | 0.6157 | 0.0035 | 4.40E+04 | 0.5845 | 0.3128 |
| 60°C | 9.37E+03 | 0.5821 | 0.0035 | 4.03E+04 | 0.5582 | 0.2998 |
| 70°C | 3.99E+04 | 0.5943 | 0.2566 | 8.01E+03 | 0.2814 | 0.1533 |

20°C den 70°C'ye kadar B-k eğrilerine uydurulan denklem aynı olup Denklem 6.2.'de verilmiştir. Sıcaklık değişimiyle beraber bu denklemdeki katsayılar değişmektedir. Tablo 6.3.'de bu katsayılar verilmektedir.

$$k(B) = a1 * \exp(-((B - b1)/c1)^2) + a2 * \exp(-((B - b2)/c2)^2) \quad (6.2)$$

Tablo 6.3. B-k denklem katsayıları

| | A1 | B1 | C1 | A2 | B2 | C2 |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 20°C | 3.45E+02 | 0.1488 | 0.0985 | 4.58E+02 | 0.0575 | 0.0429 |
| 30°C | 5.21E+02 | 0.0629 | 0.0383 | 2.45E+02 | 0.1251 | 0.0743 |
| 40°C | 2.63E+02 | 0.0622 | 0.0302 | 1.20E+02 | 0.1250 | 0.0828 |
| 50°C | 1.46E+02 | 0.0280 | 0.0136 | 2.98E+02 | 0.0551 | 0.0325 |
| 60°C | 2.03E+02 | 0.0296 | 0.0207 | 1.04E+02 | 0.0645 | 0.0414 |
| 70°C | 1.67E+02 | 0.0370 | 0.0332 | 7.24E+01 | 0.2871 | 0.0844 |

20°C den 70°C'ye kadar B-n eğrilerine uydurulan denklem aynı olup Denklem 6.3.'de verilmiştir. Sıcaklık değişimiyle beraber bu denklemdeki katsayılar değişmektedir. Tablo 6.4.'de bu katsayılar verilmektedir.

$$n(B) = p1 * B^6 + p2 * B^5 + p3 * B^4 + p4 * B^3 + p5 * B^2 + p6 * B^1 + p7 \quad (6.3)$$

Tablo 6.4. B-n denklem katsayıları

| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 |
|------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|
| 20°C | 25700 | -33790 | 17050 | -4150 | 494.6 | -22.67 | 0.5397 |
| 30°C | 984.8 | -2350 | 2169 | -962.6 | 203.8 | -15.86 | 0.6239 |
| 40°C | 181.7 | -677.6 | 862.7 | -483.1 | 119.2 | -9.404 | 0.5662 |
| 50°C | 5476 | -10360 | 7383 | -2440 | 367.9 | -18.59 | 0.5604 |
| 60°C | 2289 | -4908 | 3904 | -1417 | 228.1 | -10.83 | 0.4844 |
| 70°C | 4874 | -9021 | 6184 | -1894 | 239.9 | -6.246 | 0.3087 |

En yüksek korelasyon katsayılarına sahip olan bu üç denklem seçilip paket programda ifadeler kısmına girilmiştir. Ancak beklenen sonuçlardan çok yüksek sonuçlar elde edilmiştir bu yüzden denklem kullanmak yerine manyetik akı yoğunluğuna bağlı interpolasyon yapılmıştır. İnterpolasyon aralıkları zaten oldukça küçük olduğu için birinci dereceden interpolasyon uygulanmıştır ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. İnterpolasyon işleminde bir bağımsız değişken olan manyetik akı yoğunluğuna ve üç bağımlı değişken olan k, n ve τ_y olacak şekilde yapılmıştır. Ara değerdeki manyetik akı yoğunluğuna gelen k, n ve τ_y değerleri hesaplanmıştır ve CFX'e profil verisi olarak ifadeler kısmına tanımlanmıştır CFX'e aktarılan profil verisinin bir kısmı Tablo 6.5.'de gösterilmiştir.

Tablo 6.5. Herchel-Bulkley interpolasyonunda kullanılan matris örneği

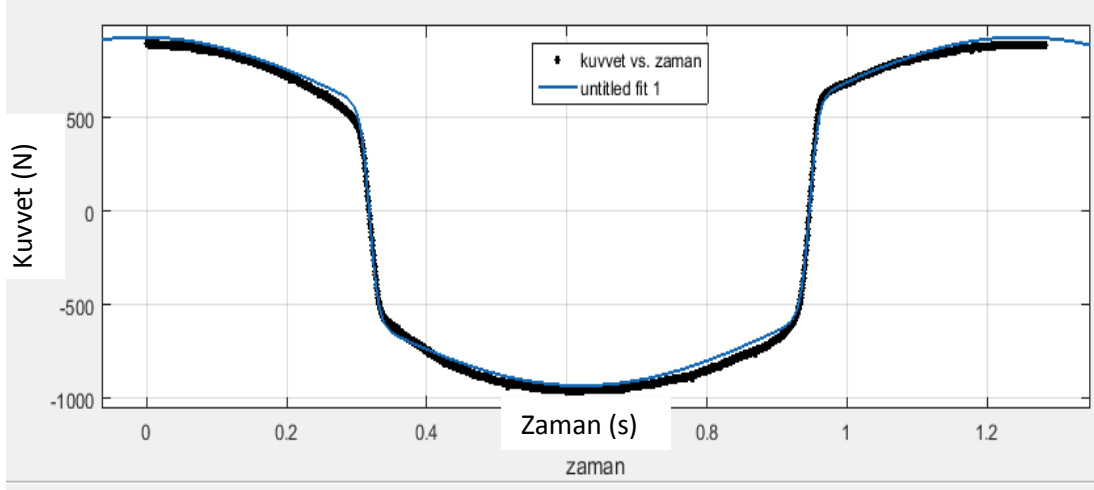
| x [m] | y [m] | z [m] | Manyetik akı yoğunluğu [T] | akma[] | k[] | n[] |
|----------|----------|-----------|----------------------------|----------|----------|----------|
| 6.45E-02 | 2.33E-03 | -1.44E-02 | 2.54E-07 | 13.77544 | 0.18076 | 0.915348 |
| 6.36E-02 | 3.19E-03 | -1.42E-02 | 3.12E-07 | 13.77577 | 0.180776 | 0.915347 |
| 6.33E-02 | 2.20E-03 | -1.47E-02 | 3.41E-07 | 13.77593 | 0.180784 | 0.915347 |
| 6.31E-02 | 2.01E-03 | -1.34E-02 | 3.59E-07 | 13.77604 | 0.180789 | 0.915347 |

Bu şekilde tüm veriler CFX'e MAY ismini verdiğimiz bir değişken olarak aktarılmıştır. Bu MAY değişkeni CFX'e Additional Variable olarak tanımlanmıştır. Böylelikle girilen bu tanımlamalar kullanılarak akışkanın viskozitesi elde edilmiştir. Her bir bağlantı noktasında viskozite değeri hesaplama yapılırken CFX tarafından hesaplanabilmektedir. Böylece kanal bölgesindeki uygulanan manyetik alan ile değişen viskozite değeri damper kuvvetini doğru tahmin etmek için kullanılmıştır.

6.3. Deney Sonuçları ve Modellerin Karşılaştırılması

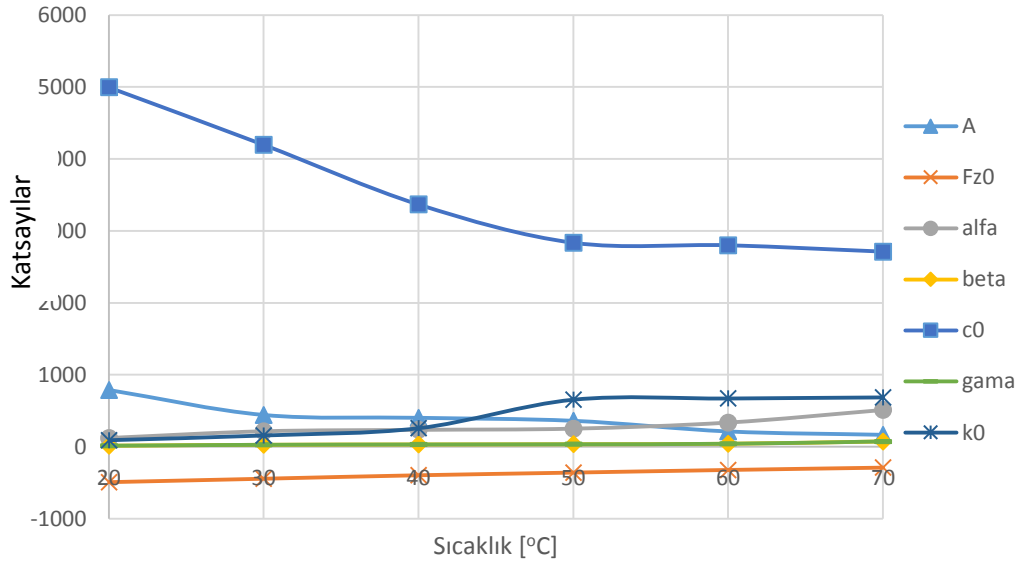
6.3.1. MR damperin sıcaklığa bağlı dinamik karakterizasyonu için parametrelerin belirlenmesi

Bölüm 4'de MR damperin sıcaklığa bağlı dinamik karakterizasyonu için toplam damper kuvveti Denklem 4.3. türetilmişti. Bu denklemde c_0 , k_0 , α , γ , β , fz_0 ve A gibi Bouc-Wen modelinin değişken parametreleri deneysel sonuçlarla elde edilebilir olduğunu belirtmiştik. Daha önce tasarımını yapıp üretimini gerçekleştirdiğimiz MR damperin farklı sıcaklıklar altında gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen sonuçlar kullanılarak bu değişken parametreler elde edilmişlerdir. Parametreleri belirlemek için eğri uydurma yöntemi kullanıldı. Eğri uydurma yöntemi için MATLAB'ın Curve Fitting aracı kullanıldı. Sabit akım ve hareket mesafesinde farklı sıcaklıklar altında deneysel sonuçlardan elde edilen kuvvet zaman eğrisi bu yedi değişken parametrenin tespit edilmesi için kullanıldı. Kuvvet-zaman eğrisini Matlab'a yazdığımız denklemle uyumu aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 6.14. Deneysel kuvvet-zaman eğrisi ile denklem eğrisinin uyumu

Uygulanan sabit 1.0 A akım ve değişken sıcaklık aralığı 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C ve 70°C altında yedi değişken parametrenin değerleri şekil 6.15.'de gösterilmiştir. Uyarılma frekansı 0.79 Hz, piston dönme hızı 5 1/s olup damperin yarım stroğu ise 0.02m'dir.



Şekil 6.15. Farklı sıcaklıklar altında c_0 , k_0 , α , γ , β , fz_0 ve A parametrelerinin değerleri

Grafikten de görüldüğü üzere farklı sıcaklıklar altında beta ve gama parametreleri aynı değerleri almaktadırlar. Sıcaklık artışıyla beraber grafikten de görüldüğü gibi c_0 viskoz kuvvetinin değeri düşmektedir ve bu da beklenen bir sonuçtur.

Şekil 6.15.'den de görüldüğü üzere yedi parametrenin sıcaklık değişikliğiyle üssel bir ilişki içinde olduğunu söyleyebiliriz. Parametrelerinin sıcaklıkla değişimlerini veren denklemler Denklem 6.4.'de gösterilmiştir.

$$c_0(T) = c_{01}(1 + e^{\frac{c_{02}}{T}}) \quad (6.4a)$$

$$k_0(T) = k_{01}e^{-\left(\frac{T-k_{02}}{k_{03}}\right)^2} \quad (6.4b)$$

$$\alpha(T) = \alpha_1 e^{\alpha_2 * T} + \alpha_3 \quad (6.4c)$$

$$\gamma(T) = \gamma_1 e^{\gamma_2 * T} + \gamma_3 \quad (6.4d)$$

$$\beta(T) = \beta_1 e^{\beta_2 * T} + \beta_3 \quad (6.4e)$$

$$A(T) = A_1(1 + e^{-T}) \quad (6.4f)$$

$$f_{z0}(T) = f_{z01} e^{f_{z02} * T} \quad (6.4g)$$

Burada 17 sabit katsayı deneysel sonuçlarla tahmin edilmiştir. Yedi parametrenin (c_0 , k_0 , α , γ , β , fz_0 ve A) uygulanan akım ve buna karşılık gelen determinasyon katsayıları (R^2) bakımından nihai formu Denklem 6.5.'de gösterildiği gibi olacaktır.

$$A(T) = 159,8(1 + e^{-T}) \quad R^2= 0,9392 \quad (6.5a)$$

$$Fz_0(T) = -609,2e^{-0,01057T} \quad R^2= 0,9997 \quad (6.5b)$$

$$\alpha(T) = 9,747e^{0,05196T} + 132,3 \quad R^2=0,9566 \quad (6.5c)$$

$$\beta(T) = 0,4911e^{0,06688T} + 18,85 \quad R^2=0,9432 \quad (6.5d)$$

$$c_0(T) = 1149(1 + e^{24,89/T}) \quad R^2=0,9412 \quad (6.5e)$$

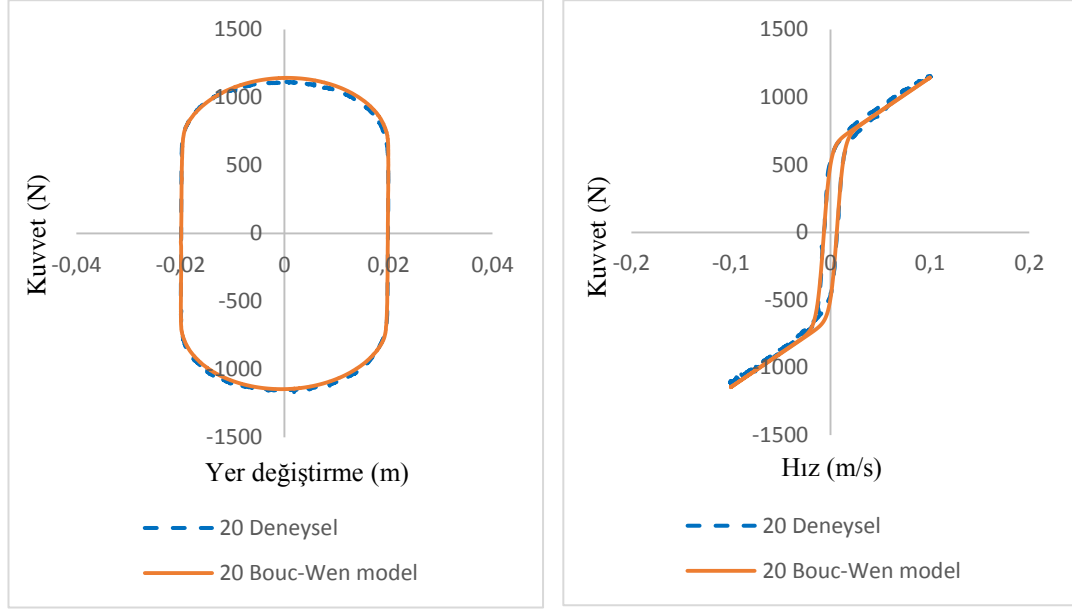
$$\gamma(T) = 0,4911e^{0,06688T} + 18,85 \quad R^2=0,9432 \quad (6.5f)$$

$$k_0(T) = 736,5e^{-\left(\frac{T-62,77}{25,82}\right)} \quad R^2=0,955 \quad (6.5g)$$

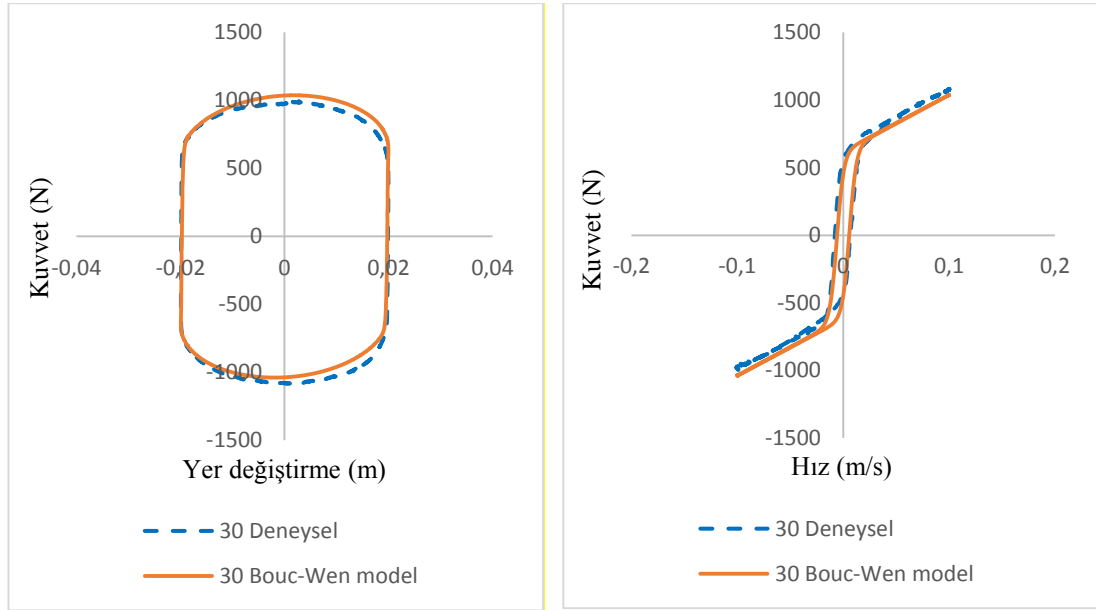
Korelasyon katsayıları farklı sıcaklıklar altında önerilen katsayıların ne kadar doğru temsil ettiğini belirtmektedir.

Farklı sıcaklıklar altında deneysel sonuçlar ile oluşturulan yeni modelin sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6.16.'dan Şekil 6.21.'e kadar gösterilmiştir. Her sıcaklık için

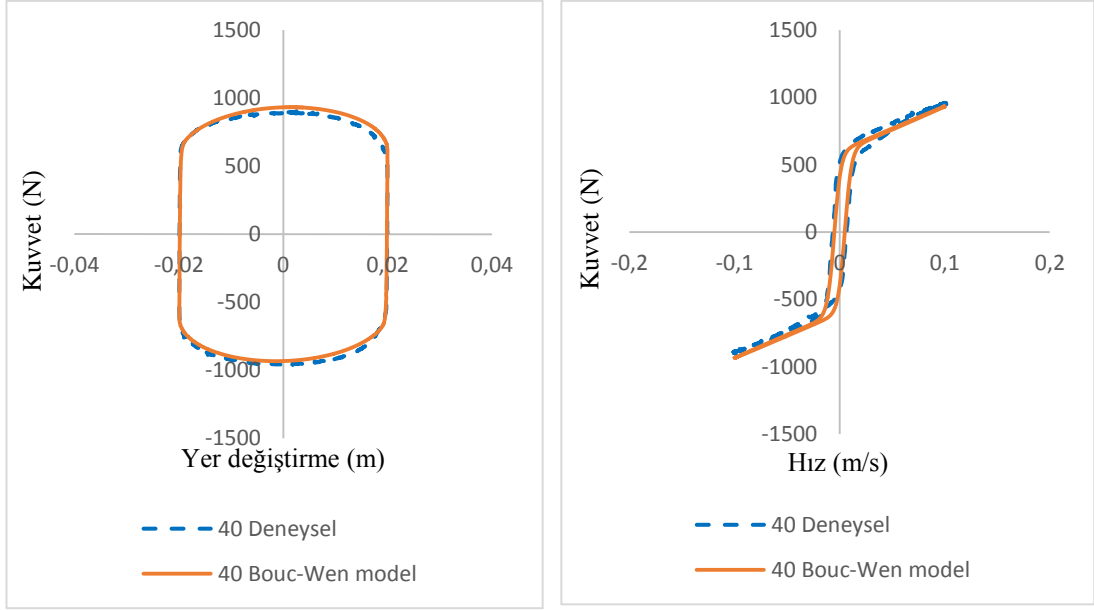
sırasıyla kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız değişimi grafikleri Şekil 6.16.'dan itibaren farklı sıcaklıklar için gsterilmiştir.



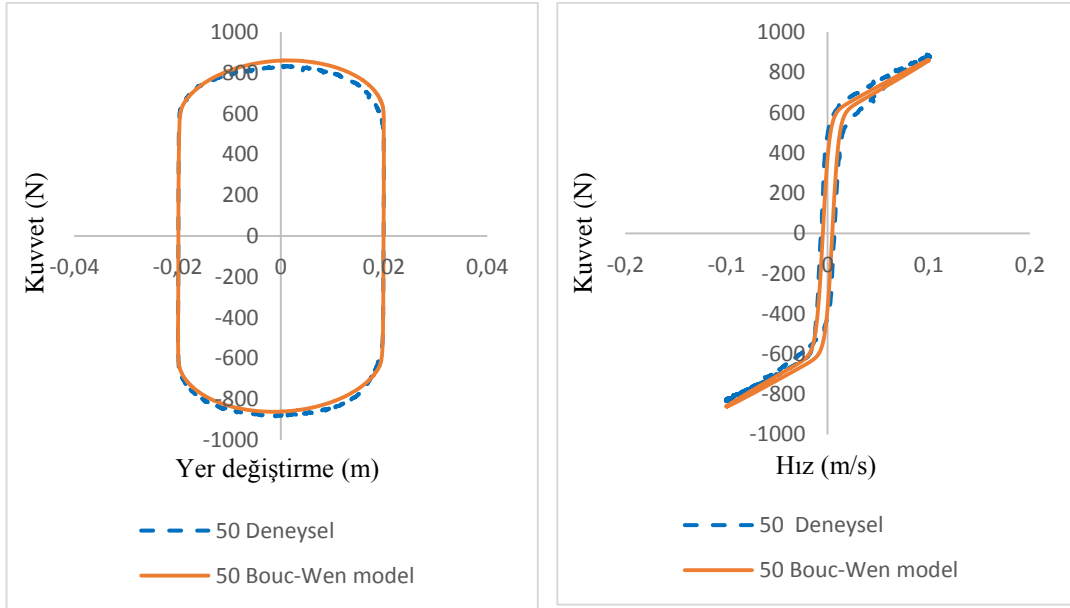
Şekil 6.16. 20°C sıcaklığında kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafiği



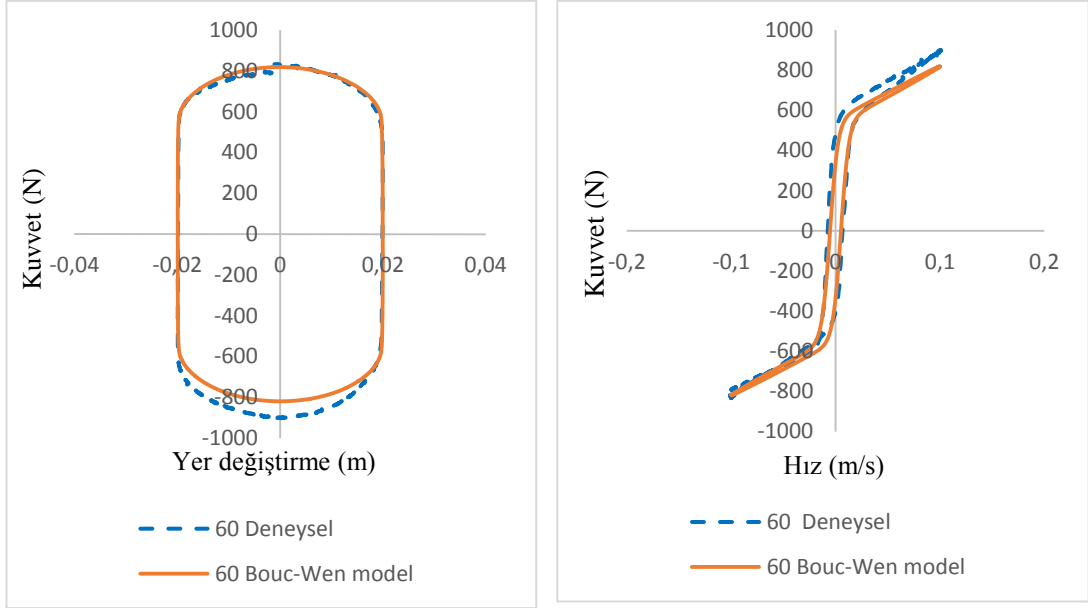
Şekil 6.17. 30°C sıcaklığında kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafiği



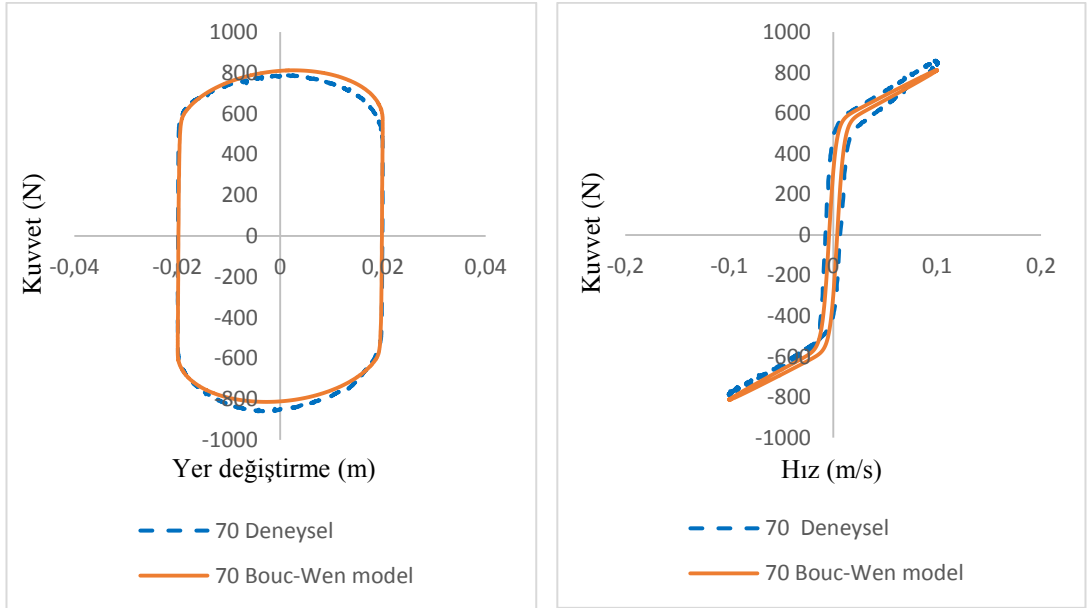
şekil 6.18. 40°C sıcaklığında kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafiği



şekil 6.19. 50°C sıcaklığında kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafiği



Şekil 6.20. 60°C sıcaklığında kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafiği



Şekil 6.21. 70°C sıcaklığında kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafiği

Grafiklerden de görüldüğü üzere hesaplanan kuvvet-yer değiştirme eğrileri ile deneysel kuvvet-yer değiştirme eğrileri arasında uyumluluk bulunmaktadır. Sıcaklık artışıyla beraber kuvvetin azalması da beklenen bir sonuçtur ve şekillerden de

anlaşılmaktadır. Kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız değişimi grafikleri önerilen modelle deneysel model arasında uyum olduğunu göstermektedir.

a. Dinamik model Hata Analizi

Deneysel verilerden elde edilen kuvvet değerleriyle Bouc-Wen modelinden elde edilen kuvvet değerleri arasındaki hata analizi Spencer [44] tarafından önerilmiş olan hata analiz denklemi sayesinde hızın, zamanın ve yer değiştiriminin bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır.

$$E_t = \sqrt{\frac{\int_0^t (F_e - f)^2 dt}{\int_0^t (F_e - F_0)^2 dt}} \quad (6.6a)$$

$$E_x = \sqrt{\frac{\int_0^t (F_e - f)^2 \left| \frac{dx}{dt} \right| dt}{\int_0^t (F_e - F_0)^2 dt}} \quad (6.6b)$$

$$E_{\dot{x}} = \sqrt{\frac{\int_0^t (F_e - f)^2 \left| \frac{d\dot{x}}{dt} \right| dt}{\int_0^t (F_e - F_0)^2 dt}} \quad (6.6c)$$

Bu denklemlerde yer alan f kuvveti denklemlerden elde edilen kuvveti, F_e deneysel sonuçlardan elde edilen kuvveti ve F_0 ise bir damper dōngüsü esnasındaki damperin ortalama kuvvetini temsil etmektedir. Tablo 6.6.'da hata analizlerinin sonuçlarını verilmektedir.

Tablo 6.6. Hata analiz sonuçları

| Sıcaklık(C) | Et (%) | Ex (%) | E \dot{x} (%) |
|-------------|----------|----------|-----------------|
| 20°C | 0,069609 | 0,010028 | 0,047121 |
| 30°C | 0,077654 | 0,020783 | 0,053505 |
| 40°C | 0,058863 | 0,014154 | 0,038038 |
| 50°C | 0,047444 | 0,008953 | 0,02842 |
| 60°C | 0,084197 | 0,031357 | 0,056546 |
| 70°C | 0,063045 | 0,019783 | 0,042498 |

Kuvvetler arasındaki hataların hızın, zamanın ve yer değiştirmenin bir fonksiyonu olarak yazıldığı denklemler sonucunda yukarıdaki Tablo 6.6. oluşmuştur. Tablodan da görüldüğü üzere hata analiz sonuçları yüzde olarak en düşük 0.8 ve en yüksek 8 hata olduğu görülmektedir. En düşük yüzdeler hata oranı zamana bağlı olarak yapılan analiz sonucunda 50°C’de olduğu görülmektedir ve hata oranının sadece yüzde 4.7 olduğu görülmektedir. Aynı şekilde zamana bağlı en yüksek hata oranı 60°C’de görülmektedir. Hata analiz sonuçlarına göre yer değiştirme fonksiyonuna bağlı hata analizinde en düşük hataya yüzde 0.8’lik hata oranıyla 50°C sahip olduğu görülmektedir. Yer değiştirme fonksiyonuna göre hata analiz hem de hız fonksiyonlarına göre hata oranı en düşük olan sıcaklığın 50°C olduğu görülmektedir. Buradan üç değişkene göre de yapılan hata analizlerinde 50°C’nin en düşük hata oranına sahip olduğunu söyleyebiliriz.

Denklem 6.4.’deki sıcaklığa bağlı seri denklemleri dördüncü bölümdeki toplam damper kuvveti yani Denklem 4.3.’de yerine yazılacak olursa sadece sıcaklığa bağlı olan yeni bir damper kuvveti denklemi elde edilmiştir.

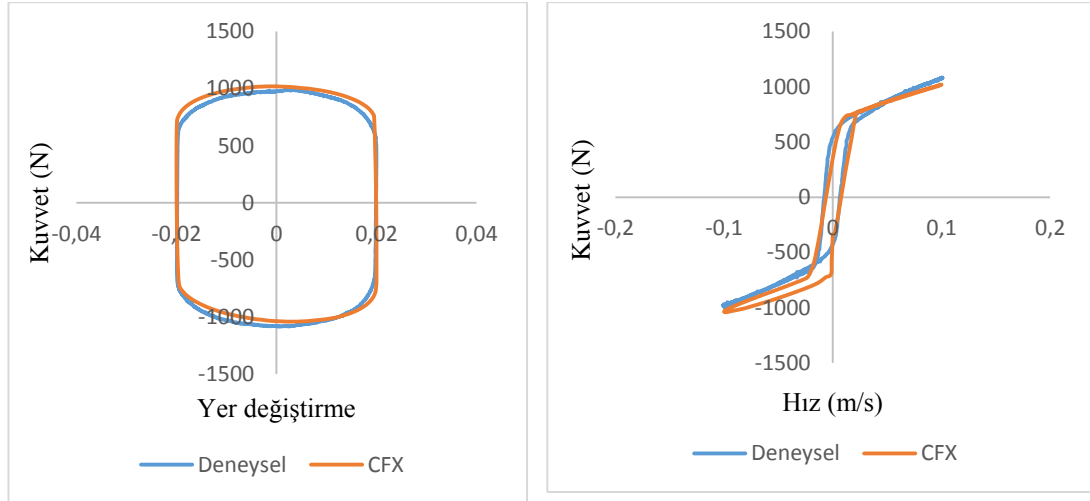
$$\begin{aligned}
f &= c_{01} \left(1 + e^{\frac{c_{02}}{T}}\right) (a\omega \cos(\omega t)) + k_{01} e^{\frac{-(T-k_{02})}{k_{03}}} (a \sin(\omega t)) \\
&+ (\alpha_1 e^{\alpha_2 T} + \alpha_3) \left\{ \frac{\sqrt{A1 * (1 + e^{-T})}}{\sqrt{(\beta1 * e^{\beta2 * T} + \beta3) + \gamma1 * e^{\gamma2 * T} + \gamma3}} \right. \\
&\left. \tanh \left[\sqrt{(A1 * (1 + e^{-T}))((\beta1 * e^{\beta2 * T} + \beta3) + \gamma1 * e^{\gamma2 * T} + \gamma3)} \right] \right. \\
&\left. (a\omega \cos(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{(A1 * (1 + e^{-T}))((\beta1 * e^{\beta2 * T} + \beta3) + \gamma1 * e^{\gamma2 * T} + \gamma3)}} \right. \\
&\left. \operatorname{atanh} \left(\frac{\pm (Fz01 * e^{Fz02 * T}) \sqrt{(\beta1 * e^{\beta2 * T} + \beta3) + \gamma1 * e^{\gamma2 * T} + \gamma3}}{(\alpha1 * e^{\alpha2 * T}) (\sqrt{A1 * (1 + e^{-T})})} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{6.7}$$

Denklem 6.7.'den de görüleceği üzere damper kuvvetini sadece sıcaklığa bağlı olarak basit bir analitik ifade haline getirilmiştir. Bu denklem kontrol algoritmalarının geliştirilmesinde yedi değişkenli karmaşık denkleme göre daha kullanışlı olacaktır.

6.3.2. Deneysel sonuçla sayısal analiz sonucunun karşılaştırılması

Şekil 6.1.'de görülen deney düzeneğinde deneyini gerçekleştirdiğimiz MR damperin ANSYS 17.2'de CFX aracından elde edilen sonuçla karşılaştırılmıştır. Deney düzeneğinde test edilen damperin kanal genişliği 0.4 mm, aktif uzunluk 3 mm, çekirdek yarıçapı 7 mm bunun dışında kalan diğer ölçüler ise Şekil 6.2.'de verilmiştir. Çalışma sıcaklığı olarak ise 30°C uygulanmıştır. Sonuçların

karşılaştırılması olarak hem deneysel çalışmadan hem de CFX den kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafikleri elde edilip uyumluluğu incelenmiştir.



Şekil 6.22. Deneysel sonuçla akışın sayısal sonucunun kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafiklerinin karşılaştırılması

Şekillerden de görüldüğü üzere deneysel sonuçlarla sayısal analiz sonuçlarının uyumlu olduğu gözlenmektedir.

a. HAD sonuçlarının hata analizi

Deneysel verilerden elde edilen kuvvet değerleri ile CFD sayısal analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet değerleri arasındaki hata analizi Spencer [44] tarafından önerilmiş olan Denklem 6.3. (a-b-c) hata analiz denklemleri kullanılarak hızın, zamanın ve yer değiştirmenin bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6.7. CFX ile deneysel sonucun hata analizi

| Et (%) | Ex (%) | E \dot{x} (%) |
|----------|----------|-----------------|
| 0,101968 | 0,029477 | 0,108741 |

Tablo 6.7.'de görüldüğü üzere hıza bağlı hata analizi yüzde 10,8 ile en yüksek değerde olduğu görülmektedir. Daha sonra zamana bağlı hız analizinde hata oranı yüzde 10,1 olmuştur. En düşük hata oranı ise yer değiştirmeye bağlı hata analizinde elde edilmiştir ve yalnızca yüzde 2,9'luk bir hata oranı bulunmaktadır. Bu sonuçlara bakılarak CFD analizimizin deneysel verilerle doğrulandığı görülmektedir.

BÖLÜM 7. SICAKLIK VE BAZI TASARIM PARAMETRELERİNİN DAMPER PERFORMANSINA ETKİSİ

Bu bölümde Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılarak parametrelerin önemini ve bu parametrelerin performanslarının en yüksek olduğu değerlerin seçimi üzerine çalışılmıştır. Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılarak Tablo 7.2.'deki cihazlar tasarlanmış ve ANSYS 17.2'de analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylelikle damperin performansını en üst seviyede tutabilecek şekilde en büyük dinamik aralık ve damper kuvvet değerine erişilecektir.

MR sıvılı damperlerin performanslarını değerlendirebilmek için dinamik oran teriminden faydalanılmaktadır. Dinamik oran kontrol edilebilen kuvvetlerin ve kontrol edilemeyen kuvvetlerin toplamının kontrol edilemeyen kuvvete oranı olarak tanımlanabilen bir boyutsuz parametredir. Kontrol edilebilen kuvvet dampere verdiğimiz akım ile etkisini değiştirebildiğimiz F_{τ} kuvvetidir. Kontrol edilemeyen kuvvetler ise damper içindeki akışkan hızına göre kuvvet üreten F_{μ} ve F_s kuvvetleridir. Denklem 7.1.'de dinamik oran denklemi bulunmaktadır.

$$D = \frac{F_{\mu} + F_{\tau} + F_s}{F_{\mu} + F_s} \quad (7.1)$$

Burada F_{μ} viskoz kuvvetlerin oluşturduğu kuvvet, F_{τ} manyetik alan şiddeti ile MR sıvı tarafından oluşturulan manyetik kuvvet ve F_s ise damper içindeki sürtünme kuvvetleri etkisiyle oluşan kuvvettir. Dinamik oranın büyük olması istenen bir durumdur çünkü oran ne kadar büyük olursa damperin performansı da o kadar yüksek olacaktır. Bu çalışmadaki temel amaç MR damperin performansını

artırmaktır. Denklem 7.2. ve Denklem 7.3.'de ise F_μ ve F_τ kuvvetlerinin nasıl hesaplanacağı belirtilmektedir.

$$F_\mu = u_p(A_p - A_k) \frac{6\mu LA_p}{\pi R_1 g^3} \quad (7.2)$$

$$F_\tau = \left(2.07 + \frac{6\mu Q}{6\mu Q + 0.4\pi R_1 g^2 \tau_y}\right) \frac{2t_k A_p}{g} \tau_y \cdot \text{sgn}(u_p) \quad (7.3)$$

Bu denklemlerde u_p piston hızını, A_p piston kafası kesit alanı, A_k piston kolu kesit alanı, μ dinamik viskozite, L kanal uzunluğu, R_1 kanalın yarıçapı, g kanal genişliği, Q hacimsel debi, τ_y akma gerilmesini ve t_k ise aktif uzunluğu ifade etmektedir.

Optimum kanal genişliğinin seçilmesi dinamik oran için oldukça önemli bir konudur. Çünkü kanal genişliği Denklem 7.2.'den de görüldüğü üzere kontrol edilebilen kuvvetle ters orantılıdır yani kanal genişliği azaldıkça kontrol edilebilen kuvvet artacaktır. Ancak kanal genişliğinin artışı Denklem 7.2.'de görüldüğü üzere kontrol edilemeyen kuvveti de arttıracaktır. Bu yüzden optimum kanal genişliğini yakalamak yüksek dinamik oranı elde edebilmek için gerekmektedir.

MR sıvılı damperin toplam kuvveti kontrol edilebilen kuvvet ile kontrol edilemeyen kuvvetlerin toplamına eşittir. Denklem 7.4.'de ise MR damperin toplam kuvveti gösterilmektedir.

$$F_{\text{Top}} = F_\mu + F_\tau + F_s \quad (7.4)$$

7.1. Deneysel Tasarım ile Belirlenmiş Optimal MR Damperler

Tasarımını yapıp üretimini gerçekleştirdiğimiz MR sıvılı damperle aynı ölçülere sahip sayısal analizi gerçekleştirdiğimiz damperin yanı sıra bazı parametreleri farklı toplamda 9 adet damper için ANSYS 17.2 kullanılarak sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Değişken parametreler olarak kanal genişliği, kutup başı uzunluğu, piston göbeği yarıçapı ve uygulanan sıcaklıklar olmuştur. Diğer ölçüleri sabit olan MR damperin kesit görüntüsü Şekil 6.2.'de gösterilmiştir. Bu değişken parametrelerin tercih edilmesinde akma gerilmesi, manyetik akı yoğunluğu ve toplam damper kuvveti gibi MR damperin özelliklerini etkileyen özellikler seçilmiştir. Bu fiziksel parametrelerin yanında MR damperin çalışma performansını etkileyen ve kontrol edilebilirliği üzerinde yüksek bir etkisi olan sıcaklık değişimleri de göz önüne alınmıştır.

Tablo 7.1. Değişken parametre ölçüleri ve seviyeleri

| Değişken Parametreler | 1. seviye | 2. seviye | 3. seviye |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Kanal genişliği (mm) | 0,6 | 0,8 | 1,0 |
| Aktif uzunluk (mm) | 3 | 5 | 7 |
| Çekirdek yarıçapı (mm) | 7 | 8 | 9 |
| Sıcaklık (°C) | 20 | 40 | 70 |

Değişken ölçüler ve sıcaklıklar için Taguchi deneysel yöntemi kullanılarak değerlendirilmesi uygun görülmüştür böylelikle her seviye için tam faktöriyel analizler gerçekleştirilmesinden doğacak zaman ve güç kaybından tasarruf edilmiştir. En uygun değişken parametre seçimlerinden önce birçok değişken parametre kontrol edilmiştir ve Tablo 7.1.'deki değişken parametrelerin seçilmesine karar verilmiştir. Taguchi deneysel yöntemi kullanılarak dört farklı parametre için uygun olan

ortogonal dizi seçilmiştir. Her bir parametre için 3 farklı seviye olduğundan serbestlik derecesi 2 olup dört farklı parametre için toplamda sekiz farklı serbestlik derecesi olmaktadır. Tablo 7.2.'de dokuz farklı cihaz için uygun ortogonal dizisi ve cihazlara uygulanan parametre seviyelerinin değerleri gösterilmektedir.

Tablo 7.2. L9 Ortogonal dizideki parametrelerin sayısal değerleri

| Damper no | Kanal genişliği (mm) | Aktif uzunluk (mm) | Çekirdek yarıçapı (mm) | Sıcaklık (°C) |
|-----------|----------------------|--------------------|------------------------|---------------|
| 1 | 0,6 | 3 | 7 | 20 |
| 2 | 0,6 | 5 | 8 | 40 |
| 3 | 0,6 | 7 | 9 | 70 |
| 4 | 0,8 | 3 | 8 | 70 |
| 5 | 0,8 | 5 | 9 | 20 |
| 6 | 0,8 | 7 | 7 | 40 |
| 7 | 1,0 | 3 | 9 | 40 |
| 8 | 1,0 | 5 | 7 | 70 |
| 9 | 1,0 | 7 | 8 | 20 |

7.2. En Yüksek Dinamik Oran İçin Optimum Tasarım

Parametrelerin etkinliklerini anlamak için temel hedefimiz en yüksek dinamik aralık değerini elde edebilmektir. Tablo 7.4.'de hesaplanan dinamik aralık değerleri ve bu değerlere göre hesaplanan sinyal gürültü oranları gösterilmiştir. Sinyal gürültü oranı damperin çalışması üzerindeki etkisi kontrol edilemeyen faktörlerin performans karakteristiği üzerindeki etkisini araştırmak için kullanılan bir yöntemdir. Taguchi sinyal gürültü oranını elde edebilmek için üç tane formül göstermiştir. Denklem 7.4.'de sinyal gürültü oranlarının elde edilmiş denklemleri mevcuttur.

| | |
|--------------------|---|
| Karakteristik tipi | S/N oranı |
| En küçük en iyi | $-10 \log\left(\frac{1}{n} \sum y_i^2\right)$ |
| En büyük en iyi | $-10 \log\left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2}\right)$ |
| Hedef değer en iyi | $-10 \log\left(\frac{1}{n} \sum (y_i - y_0)^2\right)$ |

(7.5)

Bu denklemlerdeki parantez içinde belirtilen kısımlar ortalama kareler sapmasıdır. Sapmalar için her zaman en düşük olması istenir. Logaritmik dönüşüm yapılmasının sebebi ise daha geniş bir aralıkta elde edebilmektir. 10 sayısı keyfi olarak seçilmiş olup eksi ile çarpılması ise ortalama kareler sapmasının azalması ile sinyal/gürültü oranının artmasının istenmesidir.

Sinyal gürültü (S/N) oranı için bu çalışmada Taguchi en büyük en iyi yöntemini kullanılmıştır ve sonuçlar Tablo 7.3.'de gösterildiği gibidir.

Tablo 7.3. Dinamik aralık ve S/N oranı değerleri

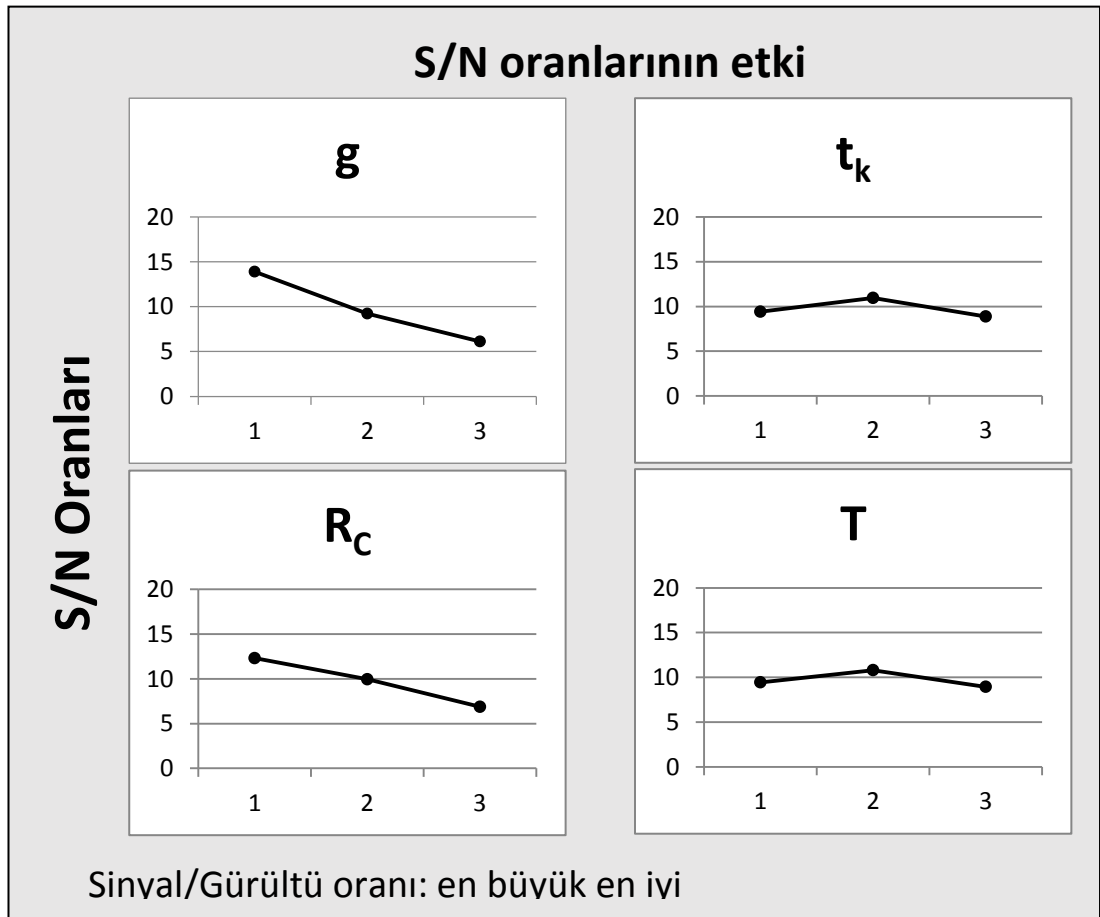
| Damper no | Test | S/N |
|-----------|-------|--------|
| 1 | 6,208 | 15,859 |
| 2 | 6,609 | 16,403 |
| 3 | 2,947 | 9,388 |
| 4 | 2,608 | 8,326 |
| 5 | 2,317 | 7,299 |
| 6 | 3,983 | 12,004 |
| 7 | 1,587 | 4,012 |
| 8 | 2,858 | 9,121 |
| 9 | 1,820 | 5,201 |

Parametrelerin 1, 2 ve 3 numaralı seviyelerde alacağı sinyal gürültü oranları Tablo 7.4.'de verilmiştir.

Tablo 7.4. Seviyelere göre sinyal gürültü oranları

| | 1. seviye | 2. seviye | 3. seviye |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| g | 13,883 | 9,209 | 6,111 |
| t_k | 9,398 | 10,940 | 8,864 |
| R_c | 12,328 | 9,976 | 6,899 |
| T | 9,452 | 10,806 | 8,945 |

Sinyal gürültü oranlarının grafiksel gösterimi ise Şekil 7.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 7.1. Dinamik aralık analizi için sinyal gürültü oranı grafiksel gösterim

Sırasıyla en yüksek oranlara bakılarak bu oranlara karşılık gelen seviyeler seçilecek olursa optimum tasarım ölçüleri bulunabilir. Tablo 7.5.'de sinyal gürültü oranları en yüksek seviyeler ve bu seviyelerdeki değerler gösterilmiştir.

Tablo 7.5. Optimum seviyeler ve değerler

| Parametreler | Seviyeler | Değerler |
|----------------------|-----------|----------|
| g | 1 | 0,6 mm |
| t_k | 2 | 5 mm |
| R_c | 1 | 7 mm |
| T | 2 | 40 (°C) |

a. ANOVA hesaplaması

ANOVA istatistiksel olarak deney sonuçlarından elde edilen ortalama performanslar arasındaki farklılığı ortaya koyan bir araçtır. Varyans analizi toplam çeşitliliği parçalarına ayırmada kullanılan bir matematiksel yöntemdir. Hangi faktörün yüzde olarak ne kadar etkilediğini ve faktörlerin hassasiyetini öğrenmek için ANOVA analizinin kullanılması gereklidir. Tablo 7.6.'da dinamik aralık analizi için ANOVA hesaplama sonuçları görülmektedir.

Tablo 7.6. Dinamik aralık için ANOVA analizi

| | Serbestlik derecesi (DOF) | Karelerinin Toplamı (S) | Varyans (V) | Yüzde (P%) |
|--|---------------------------|-------------------------|-------------|------------|
| Kanal genişliği (g) | 2 | 91,84 | 45,92 | 61,70 |
| Aktif uzunluk (t_k) | 2 | 6,97 | 3,48 | 4,69 |
| Çekirdek yarıçapı (R_c) | 2 | 44,47 | 22,23 | 29,88 |
| Sıcaklık (T) | 2 | 5,55 | 2,77 | 3,73 |
| Hata | 0 | | | |

MR damperin performansı üzerinde en büyük etkiye sahip olan faktör ANOVA analiz sonucuna bakılarak yüzde 61.70'lik oranla kanal genişliği olmaktadır. İkinci sırada yine ANOVA analiz sonuçlarına göre yüzde 29.88'lik oranla çekirdek yarıçapı gelmektedir. Daha sonra sırasıyla MR damperin performansına yüzde 4.69'luk etkiyle aktif uzunluk değişimi ve yüzde 3.73'lük oranla sıcaklık değişimi gelmektedir. Görüldüğü üzere seçtiğimiz parametreler içinde damperin performansına etkisi yüzde olarak en düşük olan faktör sıcaklık değişimi olmuştur.

7.3. En Yüksek Kuvvet İçin Optimum Tasarım

En yüksek kuvveti elde edebilmek için yine Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. En büyük kuvveti elde edebilmek için sinyal gürültü oranında Denklem 7.5.'de gösterilen en büyük en iyi formülü kullanılmıştır. En yüksek kuvvet için sinyal gürültü oranları Tablo 7.7.'de 9 farklı tasarım için de gösterilmiştir. Bu tasarımlardaki cihazlar için sayısal değerler Tablo 7.2.'deki L9 ortogonal dizisinde mevcuttur.

Tablo 7.7. En yüksek kuvvet ve S/N oranı değerleri

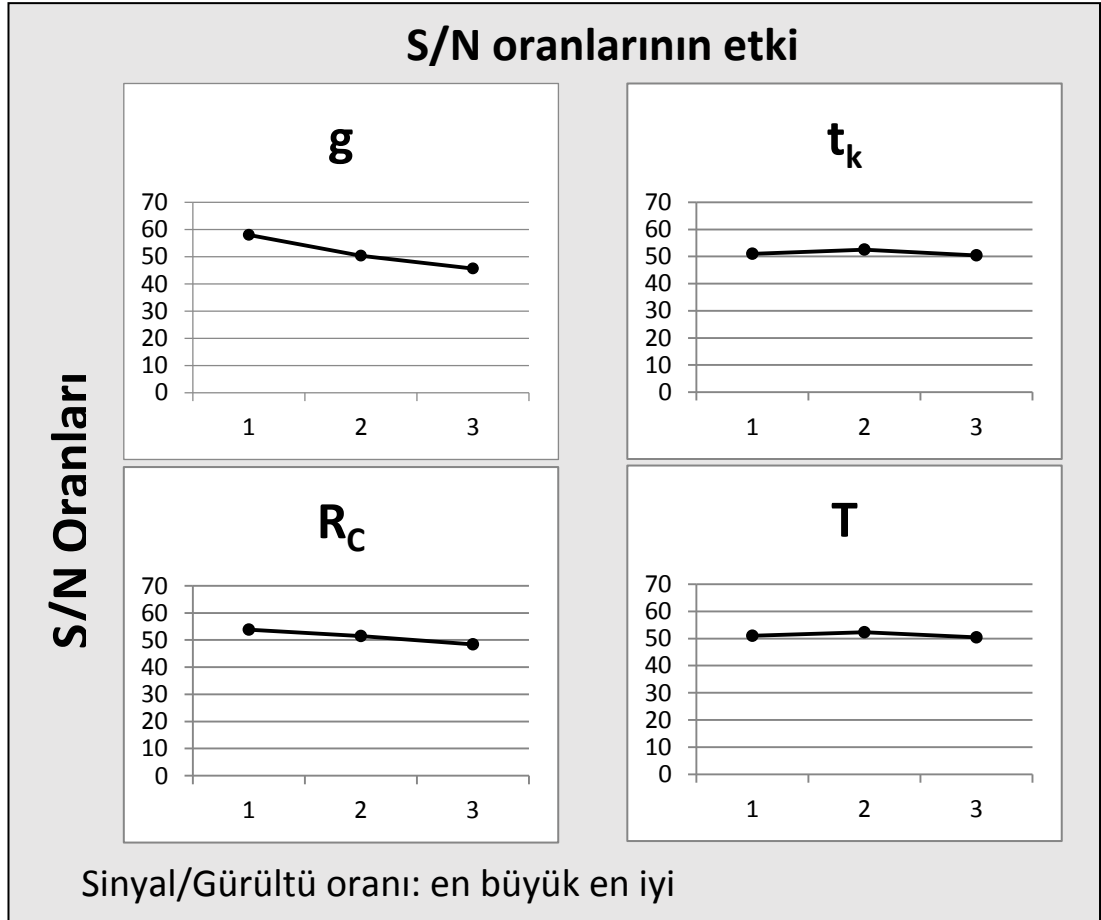
| Damper no | F(N) | S/N |
|-----------|------|--------|
| 1 | 990 | 59,913 |
| 2 | 1054 | 60,457 |
| 3 | 470 | 53,442 |
| 4 | 296 | 49,426 |
| 5 | 263 | 48,399 |
| 6 | 452 | 53,103 |
| 7 | 150 | 43,522 |
| 8 | 270 | 48,627 |
| 9 | 172 | 44,711 |

En yüksek kuvvet için parametrelerin seviyelerine göre aldıkları sinyal gürültü oranları Tablo 7.8.'de verilmiştir.

Tablo 7.8. Seviyelere göre sinyal gürültü oranları

| | 1. seviye | 2. seviye | 3. seviye |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| g | 57,937 | 50,309 | 45,619 |
| t_k | 50,953 | 52,494 | 50,418 |
| R_c | 53,880 | 51,531 | 48,454 |
| T | 51,007 | 52,360 | 50,498 |

Parametrelerin seviyelerine göre sinyal gürültü oranları grafiksel olarak Şekil 7.2.'de verilmiştir.



Şekil 7.2. Kuvvet değeri analizi için sinyal gürültü oranı grafiksel gösterim

Parametrelerin seviyelere göre aldıkları en yüksek sinyal gürültü oranlarını seçecek olursak en yüksek kuvvet için optimum tasarım elde edilmiş olunur. Tablo 7.9.'da optimum seviyeler ve bu seviyelerin aldıkları sayısal değerler bulunmaktadır.

Tablo 7.9. Optimum seviyeler ve değerler

| Parametreler | Seviyeler | Değerler |
|----------------------|------------------|-----------------|
| g | 1 | 0,6 mm |
| t_k | 2 | 5 mm |
| R_c | 1 | 7 mm |
| T | 2 | 40 (°C) |

En yüksek kuvvet için optimum tasarımda Tablo7.9.'dan da görüleceği üzere kanal genişliği 0,6 mm, aktif uzunluk 5 mm, çekirdek yarıçapı 7 mm ve uygun sıcaklık ise 40°C olmuştur.

En yüksek kuvvet için ANOVA hesaplamasını yapacak olursak elde edilen sonuçlar Tablo 7.10.'da verilmiştir.

Tablo 7.10. En yüksek kuvvet için ANOVA analizi

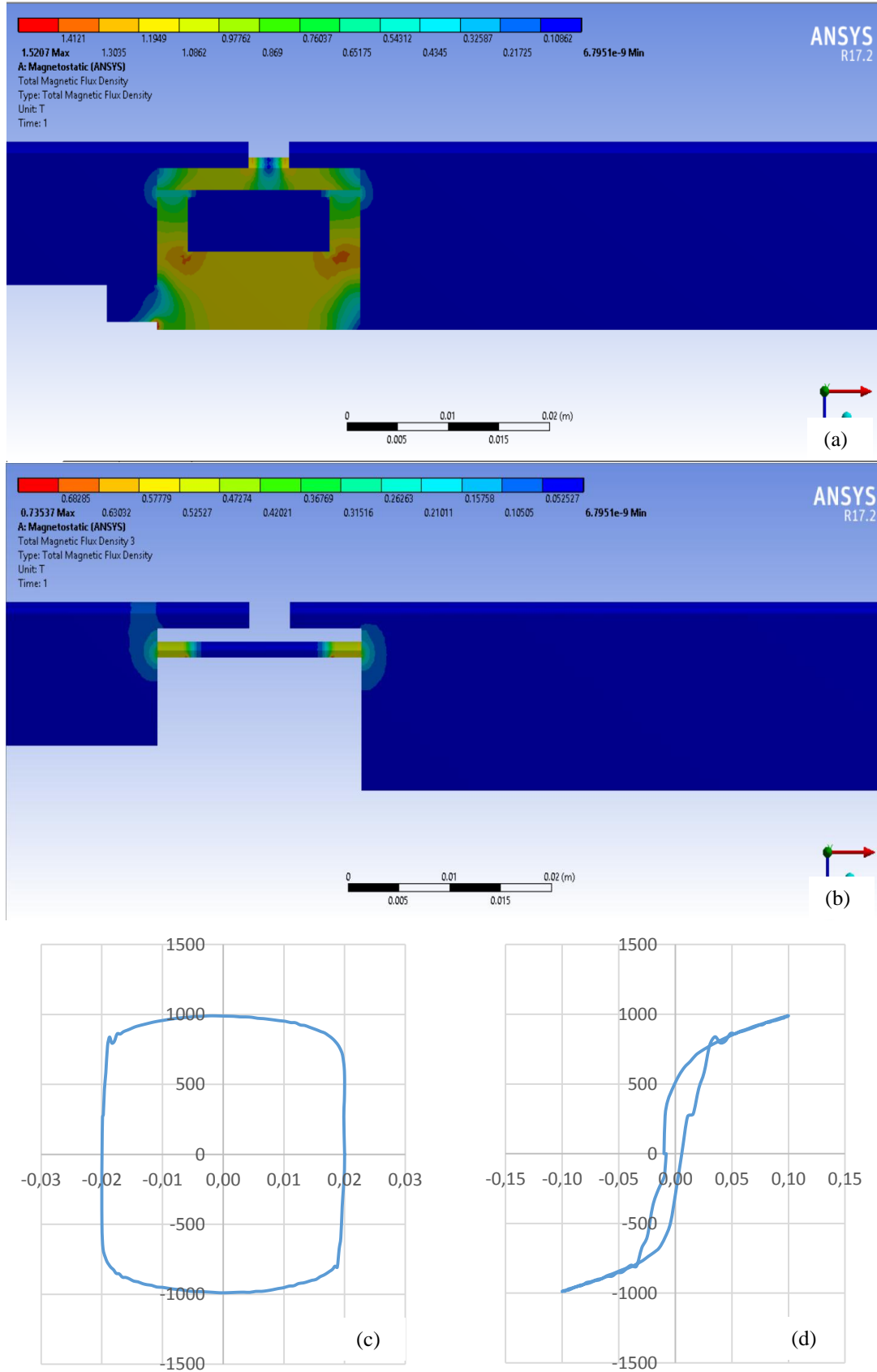
| | Serbestlik derecesi (DOF) | Karelerinin Toplamı (S) | Varyans (V) | Yüzde (P%) |
|--|----------------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|
| Kanal genişliği (g) | 2 | 231,89 | 115,94 | 80,28 |
| Aktif uzunluk (t_k) | 2 | 6,97 | 3,48 | 2,41 |
| Çekirdek yarıçapı (R_c) | 2 | 44,43 | 22,21 | 15,38 |
| Sıcaklık (T) | 2 | 5,55 | 2,77 | 1,92 |
| Hata | 0 | | | |

En yüksek kuvvet için ANOVA hesaplamasının sonuçlarına bakacak olursak damperin performansına etkisi en yüksek olan parametrenin yüzde 80.28'lik oranla kanal genişliği olduğu görülmektedir. Yüzde olarak kanal genişliğinden sonra performansa etkisi en yüksek olan parametrenin çekirdek yarıçapı olduğu görülmektedir ve yüzde olarak bu oranın 15.38 olduğu görülmektedir. Diğer iki parametrenin yani aktif uzunluk ve sıcaklık değişiminin yüzdeler oranlarının birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Aktif uzunluk yüzde 2.41'lik bir etkiye sahipken sıcaklık değişiminin yüzdeler etkisi ise 1.92 olmuştur.

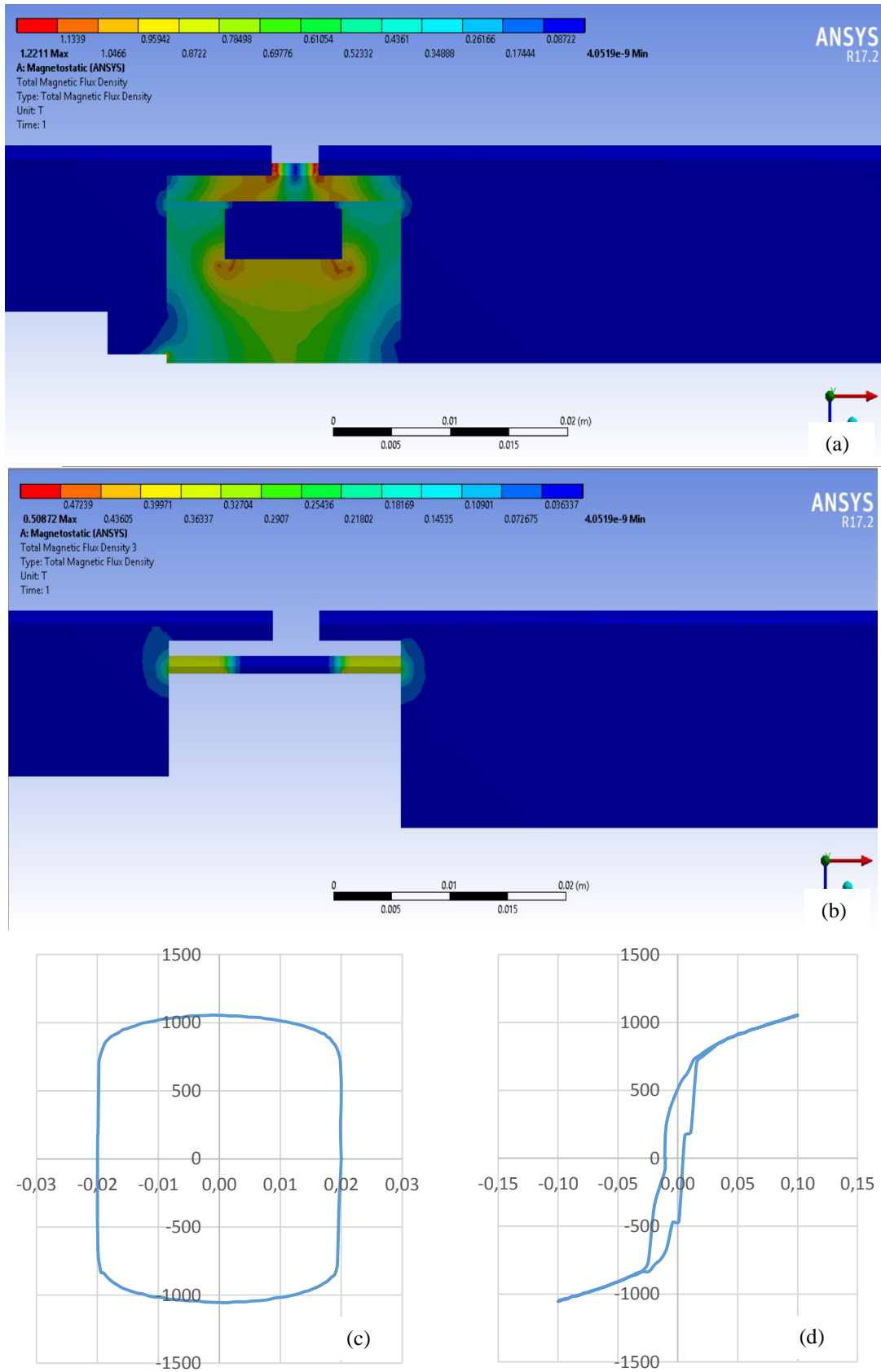
7.4. Manyetik Alan Analizleri

Tablo 7.3.'de gösterilen dokuz adet damperin sayısal analizleri paket program kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda elde edilen manyetik akı yoğunlukları görselleri her analiz için ayrı ayrı gösterilmiştir. Hem pistonda meydana gelen manyetik akı yoğunlukları hem de kanal içinden geçen MR sıvı üzerindeki manyetik akı yoğunluklarının yanı sıra analizi gerçekleştirilen damper için kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafikleri de gösterilmektedir.

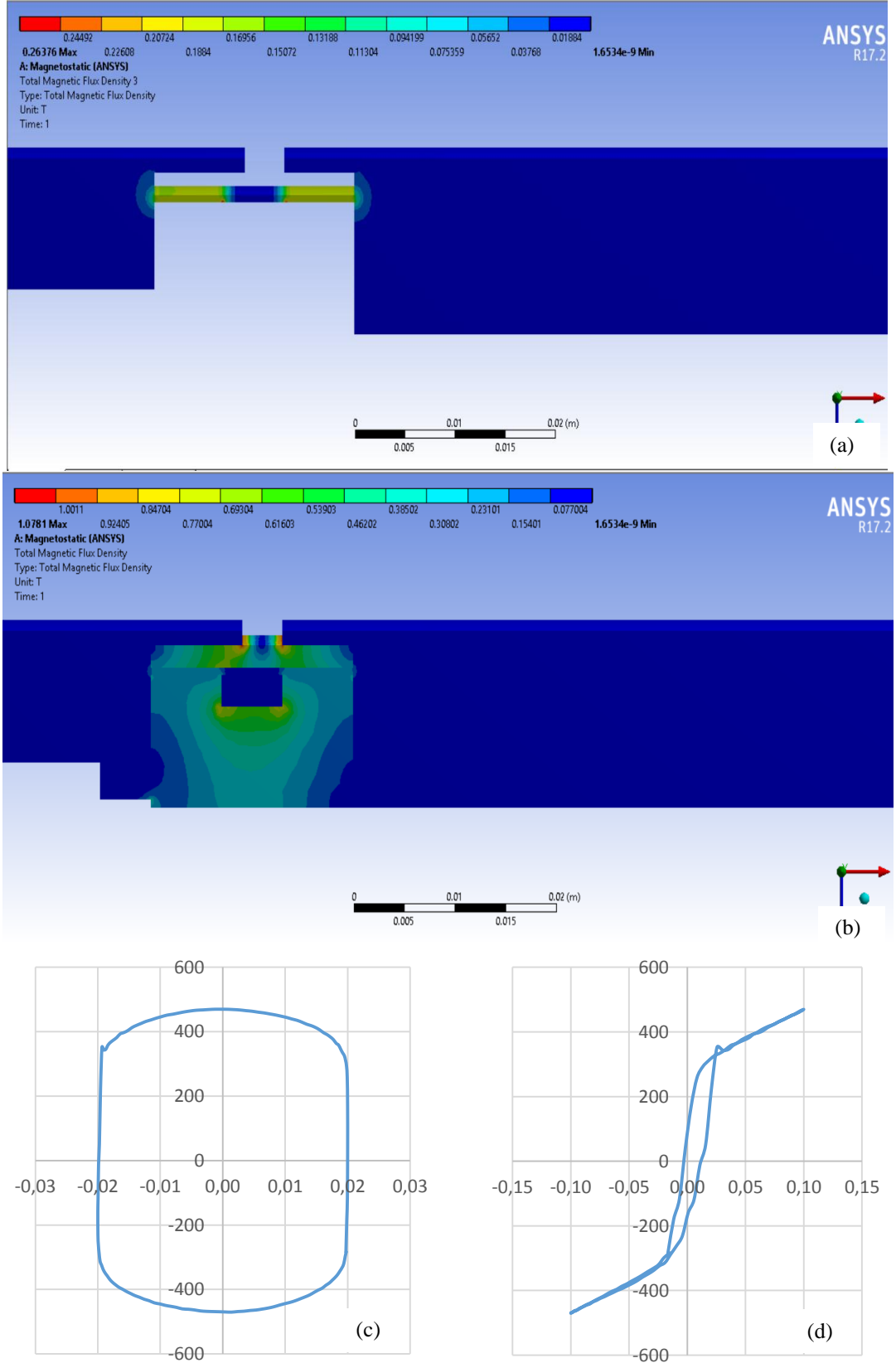
Bir numaralı damper için gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 7.3.'de gösterilmiştir.



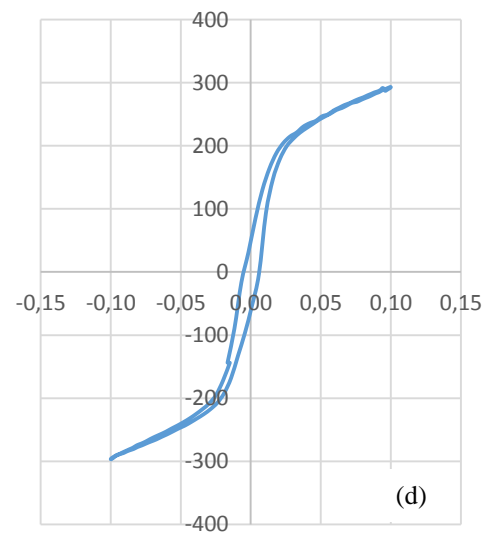
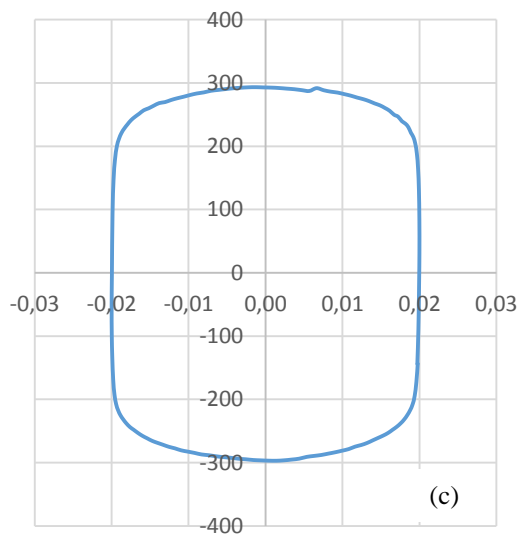
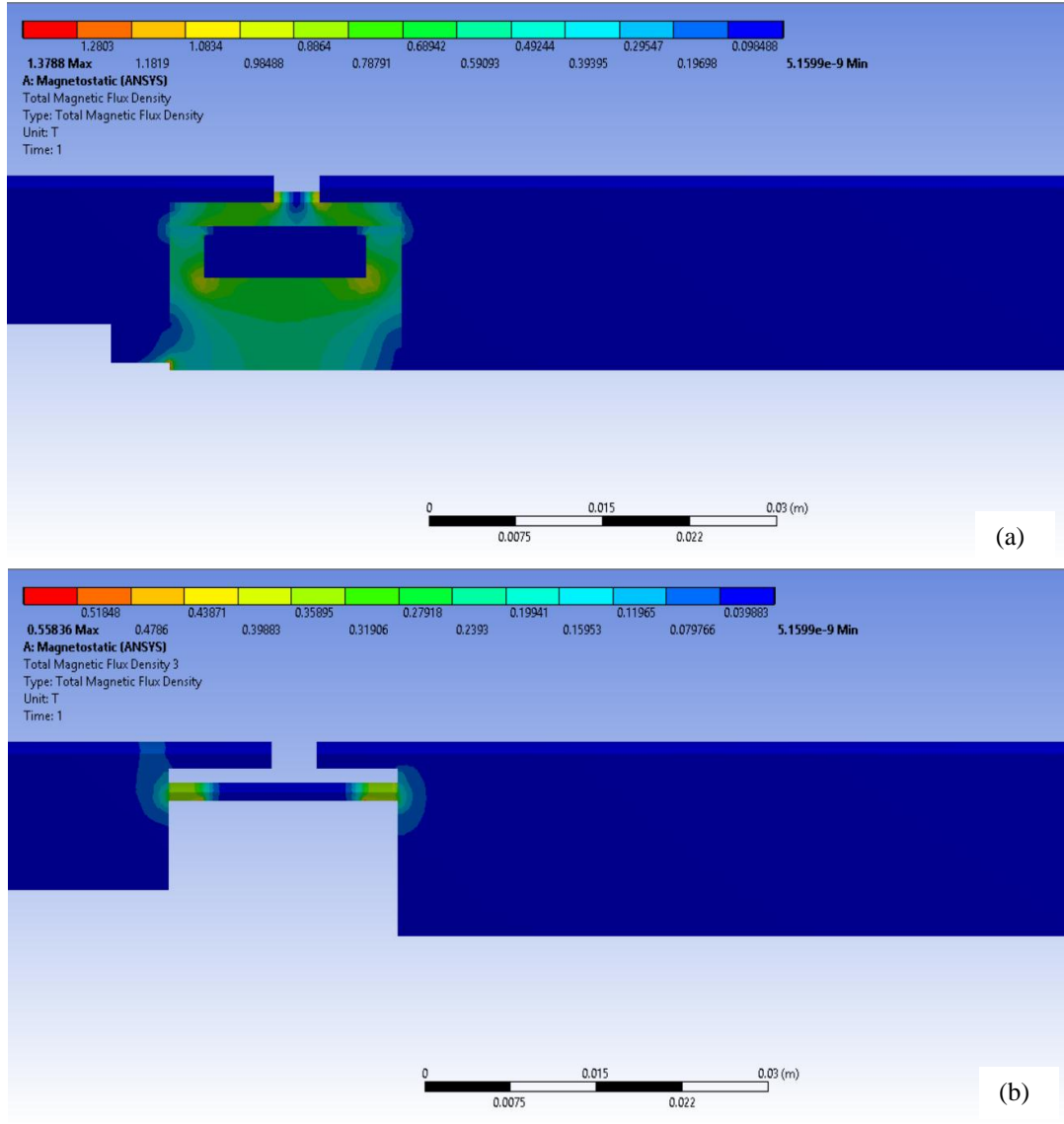
Şekil 7.3. Bir numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız



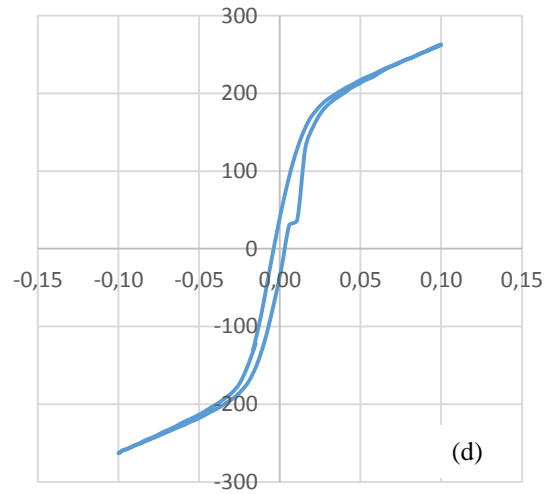
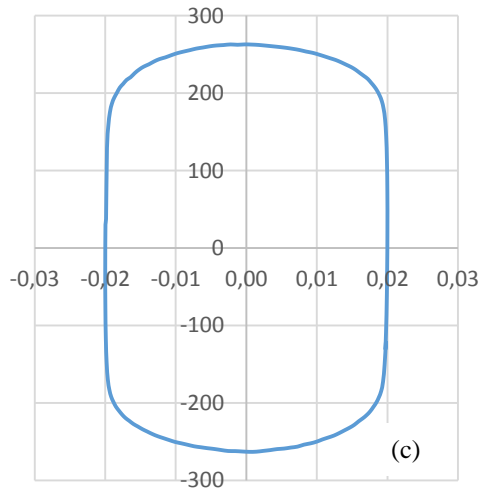
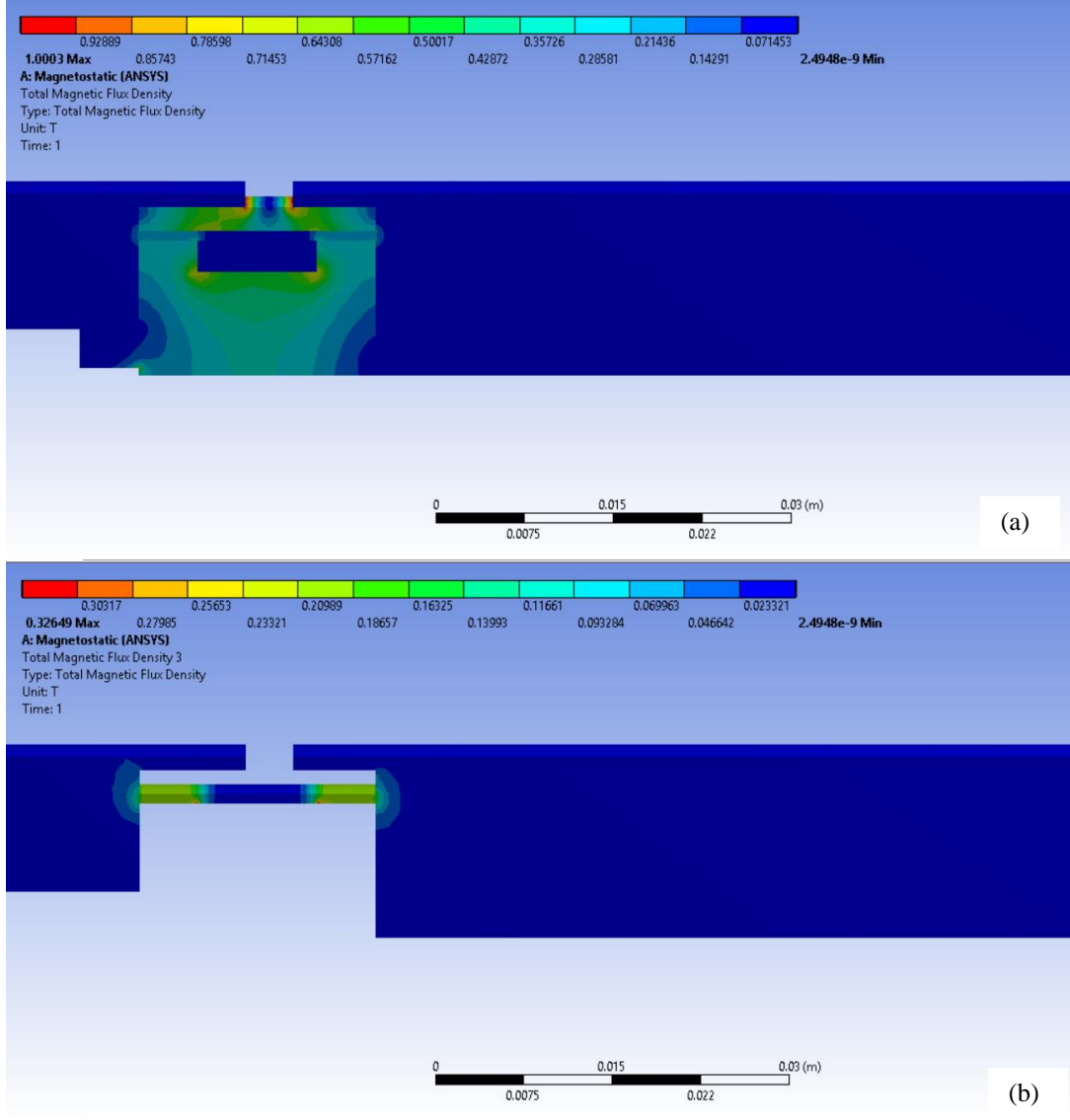
Şekil 7.4. İki numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız



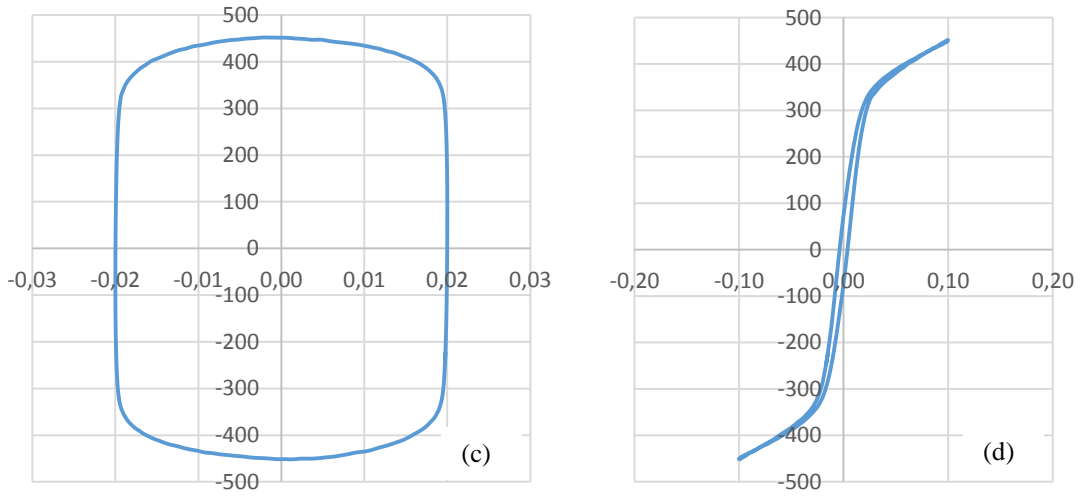
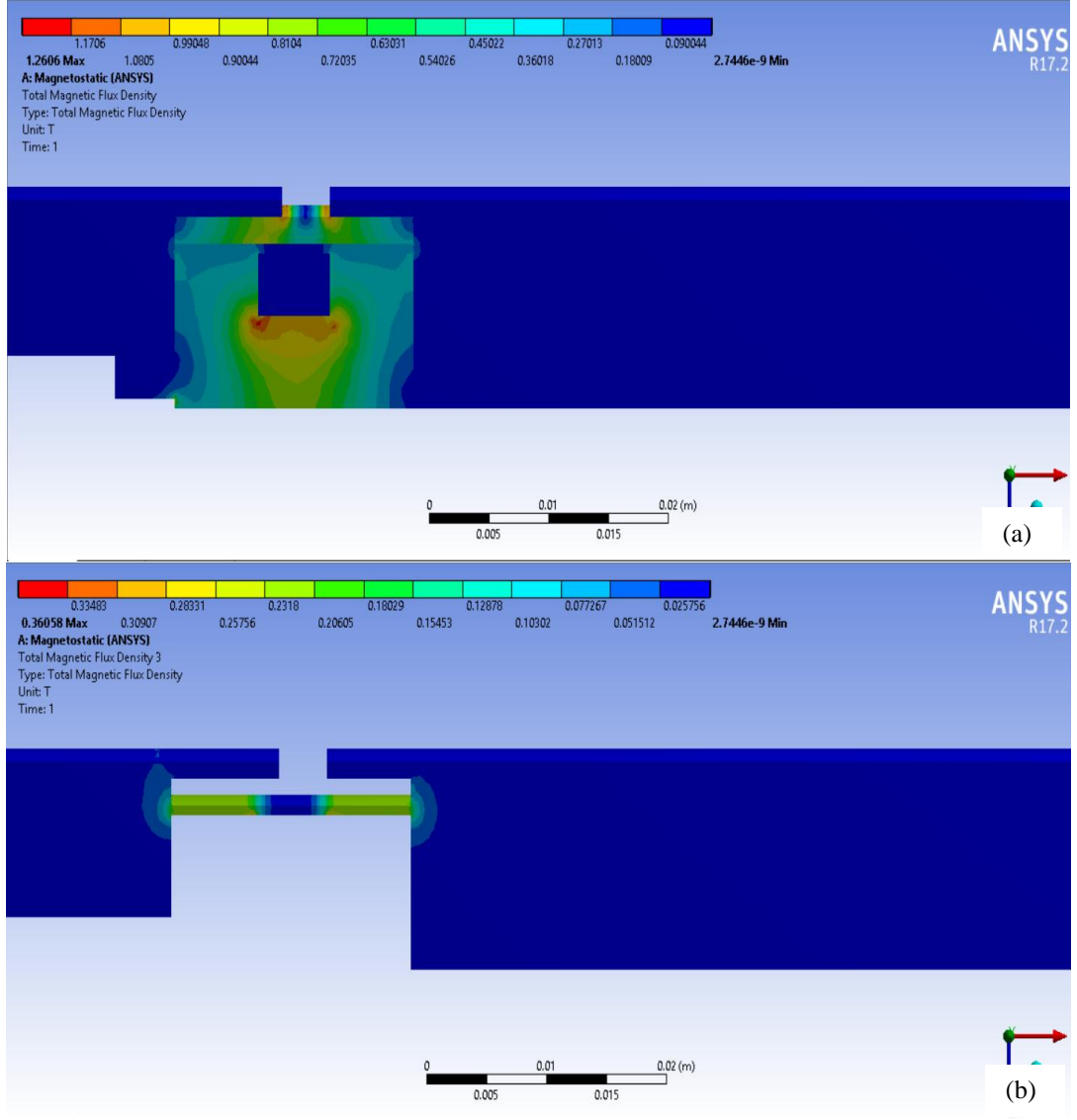
Şekil 7.5. Üç numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız



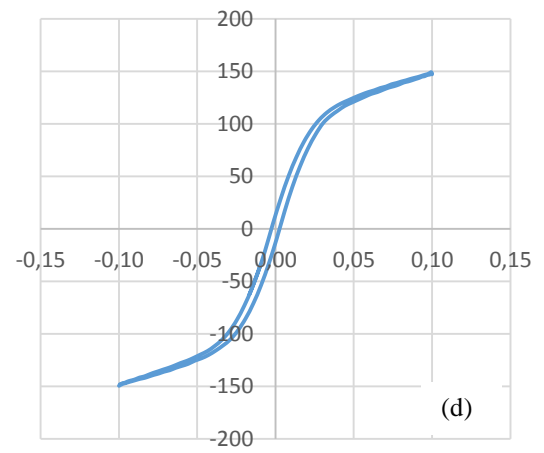
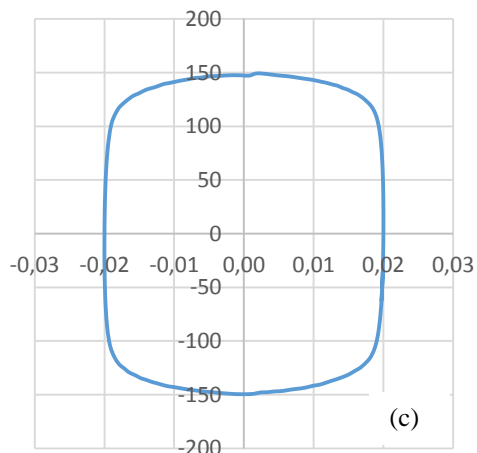
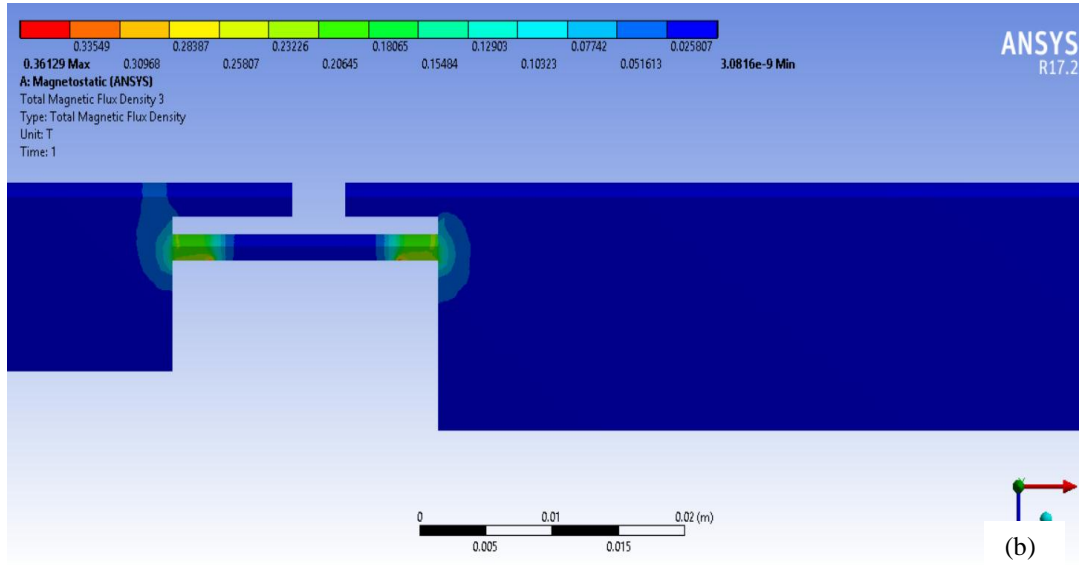
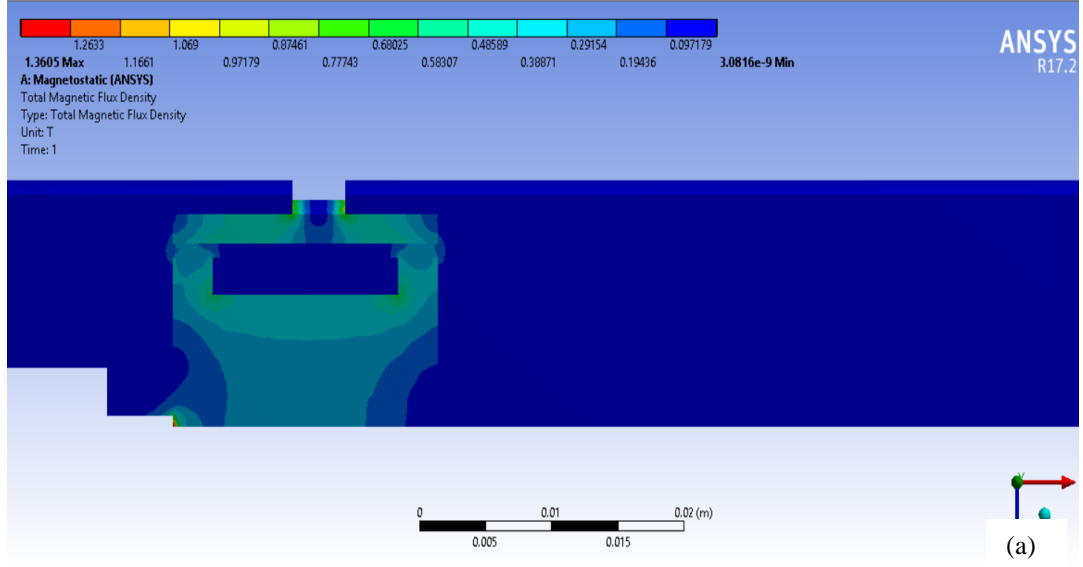
Şekil 7.6. Dört numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız



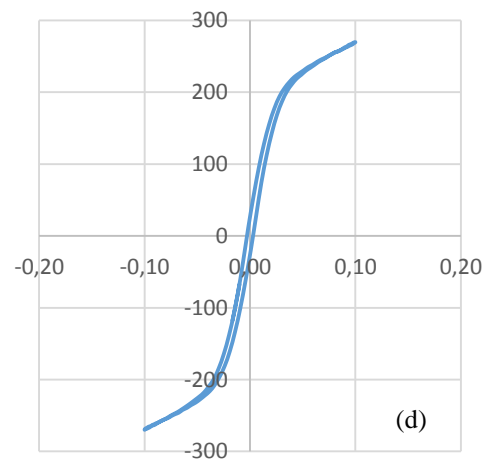
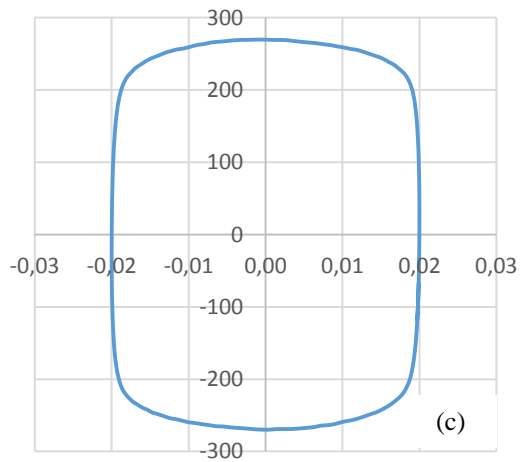
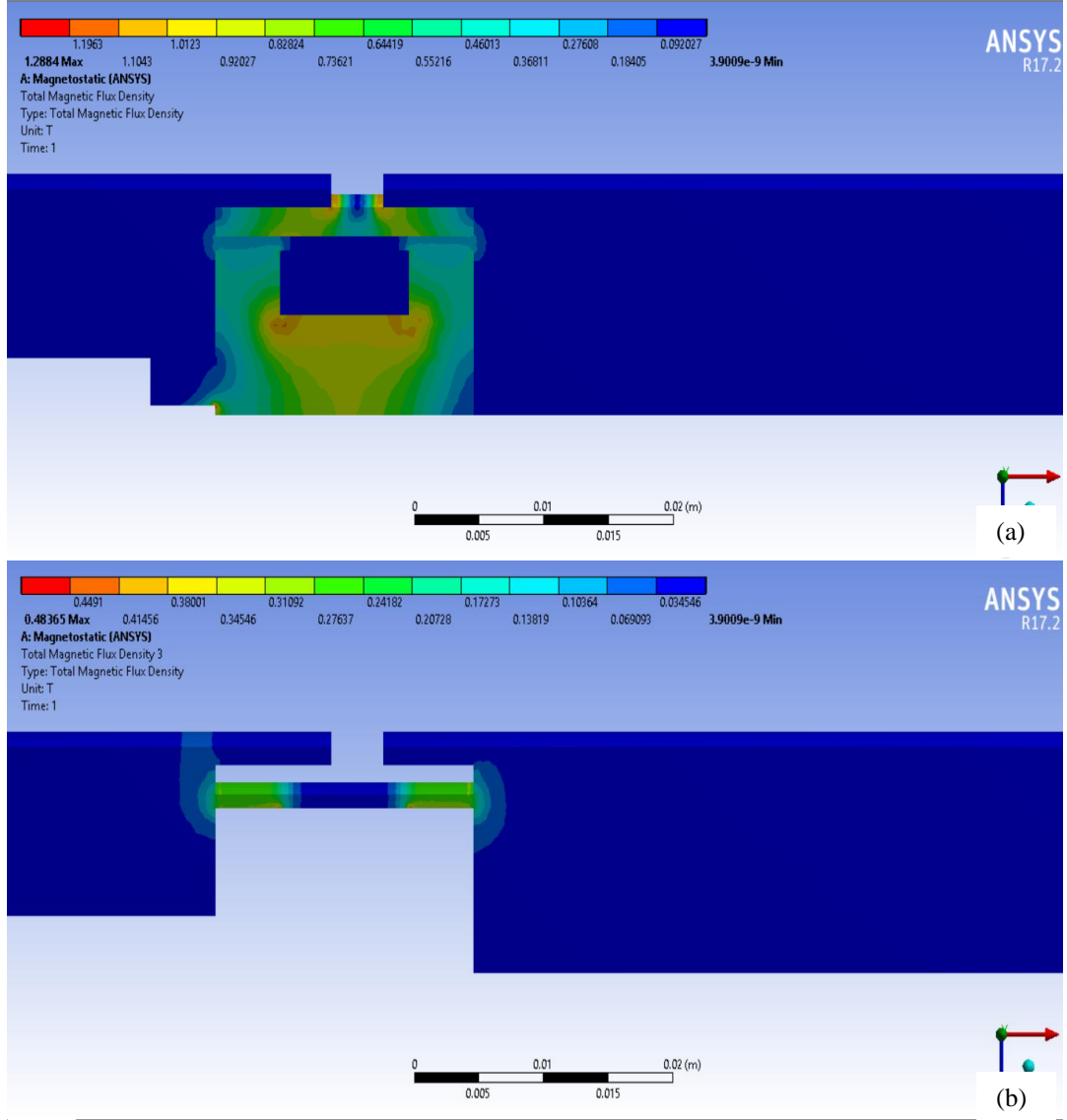
Şekil 7.7. Beş numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız



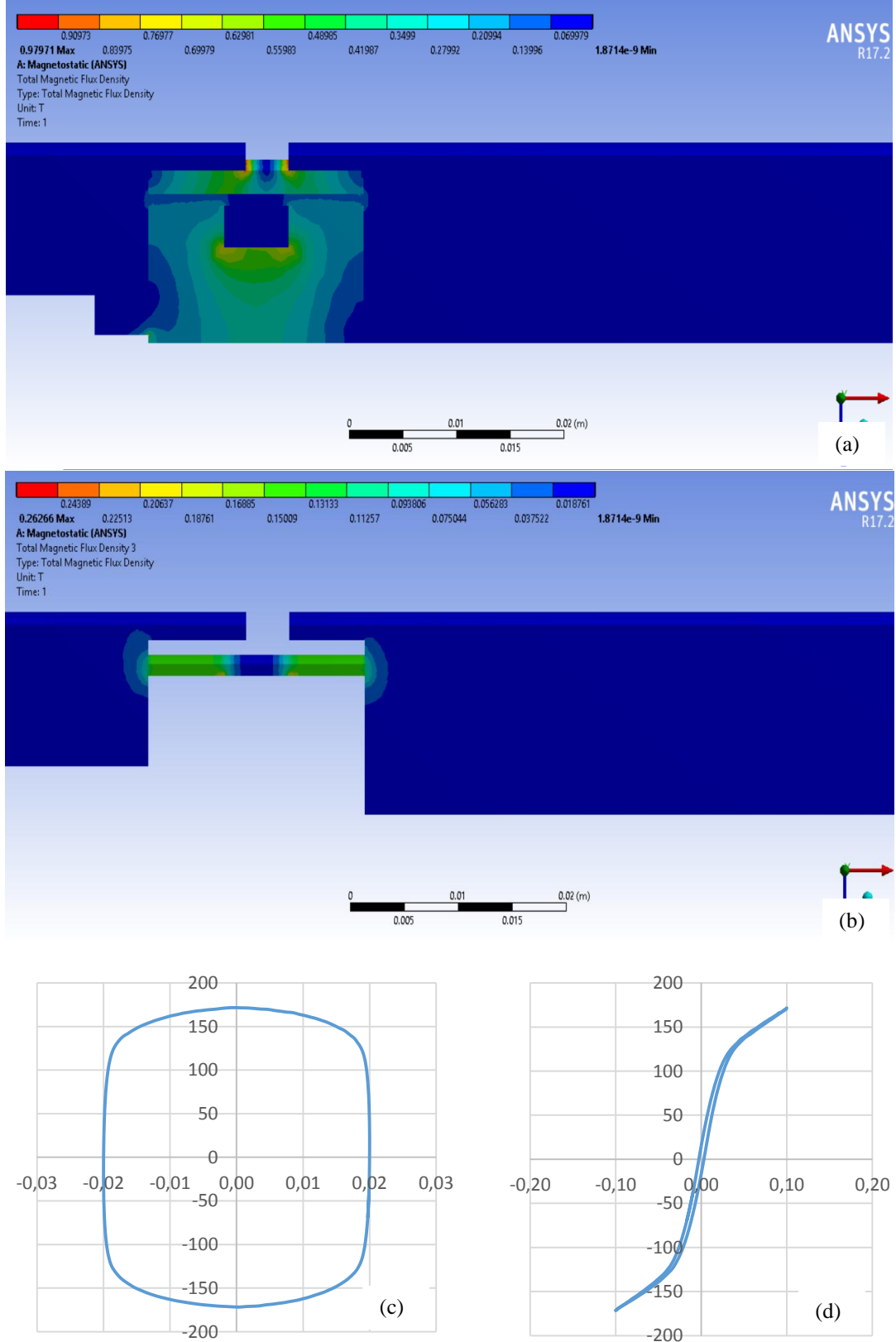
Şekil 7.8. Altı numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız



Şekil 7.9. Yedi numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız



Şekil 7.10. Sekiz numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız



Şekil 7.11. Dokuz numaralı damper için; a) piston başındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, b) kanal içindeki manyetik akı yoğunluğu, c) kuvvet-yer değiştirme, d) kuvvet-hız

Şekil 7.3.'den Şekil 7.11.'e kadar incelendiğinde en yüksek kuvvet değerleri kanal genişliğinin 0.6 mm olduğu damperlerde olmuştur. Bu da beklenen doğal bir sonuçtur. 0.6 mm kanal genişliğine sahip damperler içerisinde ise en yüksek kuvvet değerine 2 numaralı damper sahip olmuştur. 2 numaralı damperin parametrik ölçülerine bakacak olursak aktif uzunluk (t_k) değerinin 5 mm ve çekirdek yarıçapı (R_c) değerinin 8 mm olduğu görülmektedir ve ayrıca uygulanan sıvının sıcaklığı ise 40°C'dir. Bu dört parametrenin ortak etkileriyle beraber en yüksek kuvvet iki numaralı damperde çıkmıştır. En düşük kuvvet değerine sahip damperlerin ise damper 7 ve 9 olduğu görülmektedir. Bu 2 damperin de kanal genişliğinin 1.0 mm yani en yüksek kanal genişliğinde olduğu görülmektedir. Kanal genişliğinin yüksek olması sebebiyle MR sıvıya etki eden manyetik alan dolayısıyla manyetik akı yoğunluğu düşük olmuştur. Düşük manyetik akı yoğunluğunda düşük kuvvet üretimi beklenen bir sonuçtur. Düşük kuvvetlere sahip bu 2 damperden en düşük kuvvete sahip olan damper ise 7 numaralı damper olmuştur. Yedi numaralı damperin diğer değişken parametrelerine bakacak olursak çekirdek yarıçapının 9mm, uygulanan sıcaklığın 40°C ve aktif uzunluğunun en düşük değer olan 3mm olduğu görülmektedir. Buradan manyetik alanın kanal içinden geçen MR sıvıya en düşük mesafe boyunca etki ettiği için düşük kuvvet üretimi olduğu söylenebilir.

BÖLÜM 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

MR sıvılı damperlerin özellikle kuvvet-hız eğrilerinde gözükten histerisizlik davranışlarını sıcaklık etkilerini dikkate alarak yeni bir dinamik model oluşturarak yakalanmıştır. Oluşturulan bu yeni model geliştirilecek olan kontrol uygulamalarında öneme sahip olacaktır.

Bouc-Wen modelindeki yedi değişken parametrelili denklem bazı kabuller ve işlemlerle sadece sıcaklık değişkenine bağılı bir forma dönüştürülmüştür. Bouc-Wen modeli temelinde oluşturulan bu yeni dinamik model sayesinde damperin farklı sıcaklıklarda histerisizlik davranışı modellenmiştir.

Oluşturulan yeni modelin sonuçlarıyla deneysel sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Hem kuvvet-yer değiştirme hem de kuvvet-hız eğrileri karşılaştırılması sonucunda birbirleriyle oldukça uyumlu oldukları gözlenmektedir. Eğriler arasında yapılan hata analizi sonuçlarına göre hata oranları yüzde bir ile yüzde dokuz arasında değişkenlik göstermektedir.

Oluşturulan bu model sayesinde, toplam damper kuvveti sadece sıcaklığa bağılı bir denklem halinde ifade edildi. Böylelikle kuvvet-hız ilişkileri sadece bir parametreye bağılı bir form halinde düzenlendi.

Oluşturulan bu model belirtilen strok ve akım için çalışmaktadır. Farklı strok ve akımlar için daha fazla çalışılma yapılması gerektiği ortadadır.

Yapılan bu çalışmaların temel hedeflerinden biri farklı geometrik parametrelerin damper performansı üzerindeki etkilerini tespit edip uygun ölçülerin seçilmesini gerçekleştirmektir. Bu amaçla en yüksek kuvveti ve en yüksek dinamik aralığı elde

etmeye çalışılmıştır. ANSYS 17.2 ile gerek manyetik alan analizleri gerekse HAD analizleri yapılarak elde edilen değerler optimizasyon çalışmalarında kullanılmıştır.

Taguchi deneysel tasarım yönteminde kanal genişliği, aktif uzunluk, çekirdek yarıçapı ve sıcaklık değişkenler olarak kullanılmıştır. Her bir faktör için üç farklı seviyeli bir deney tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Bu faktörlerin seçilmesinde manyetik akı yoğunluğu, akma gerilmesi, toplam damper kuvveti ve dinamik aralık etkileri göz önüne alınarak karar verilmiştir. Dört farklı parametre ve her parametre içinde üç farklı seviye bulunduğundan L9 ortogonal dizisi oluşturulmuştur.

Taguchi deneysel tasarım yönteminde hedeflenen amaç en yüksek kuvveti ve en yüksek dinamik oranı elde etmek olmuştur. Bu nedenle sinyal gürültü oranlarına bakılmıştır ve en büyük en iyi karakteristik tipi kullanılmıştır.

En yüksek dinamik aralık için Taguchi deneysel tasarım yöntemi sonuçlarında kanal genişliği için 0.6 mm, aktif uzunluk için 5mm, çekirdek yarıçapı için 7mm ve sıcaklık değeri için 40°C olduğu görülmektedir. En yüksek dinamik aralık için ANOVA analiz sonuçlarına bakacak olursak kanal genişliğinin damperin performansını %61,70 oranında etkilediği görülmüştür. Damperin performansına etkisi en az olan parametrenin ise %3,73'lük oranla sıcaklık değişimi olduğu görülmüştür.

En yüksek kuvvet için Taguchi deneysel tasarım yönteminden optimum değerler elde edilmiştir. Bu değerlerin kanal genişliği için 0.6mm, aktif uzunluk için 5mm, çekirdek yarıçapı için 7 mm ve sıcaklık için 40°C olduğu belirlenmiştir. En yüksek kuvvet için ANOVA analiz sonuçlarında kanal genişliğinin damperin performansındaki etkisinin en yüksek olduğu ve bu oran %80,28 olmuştur. Damperin çalışma performansına en düşük etkiyi ise %1,92'lik etkiyle sıcaklık değişimi olmuştur.

Dokuz farklı damper modeli için CFD sayısal analizi için hem pistondaki hem de kanal içindeki toplam manyetik akı yoğunlukları gösterilmiştir.

Taguchi deneysel yöntemiyle parametrelerin performans üzerindeki etkilerini aradığımız bu çalışmada sadece dört faktörün etkileri incelenmiştir. Bu seçilen faktörlerin dışında manyetik alan geri dönüş genişliği, bobin genişliği gibi faktörlerin incelenmesi de damperin performansının araştırılmasına yardımcı olacaktır.

Aynı değişken parametrelerle farklı hız, farklı akım ve stroklar için araştırmalar yapılabilir ve damper performansına olan etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Weiss, Keith D., J. David Carlson, and Donald A. Nixon. "Viscoelastic properties of magneto-and electro-rheological fluids." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 5.6, 772-775, 1994.
- [2] Lita, Marin, Adelina Han, and Daniela Susan-Resiga. "Characterization of sedimentation and high magnetic field flow behavior of some magnetorheological fluids." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 149. No. 1. IOP Publishing, 2009.
- [3] Felt, Donald Wilbur, et al. "Rheology of a magnetorheological fluid." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 7.5, 589-593, 1996.
- [4] Susan-Resiga, Daniela. "A rheological model for magneto-rheological fluids." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 20.8 1001-1010, 2009.
- [5] Dyke, S. J., Spencer, B. F., A comparison of semi-active control strategies for the MR damper. In *Intelligent Information Systems, IIS'97. Proceedings* 580-584, IEEE, 1997.
- [6] Jiang, W., Zhang, Y., Xuan, S., Guo, C., Gong, X. Dimorphic magnetorheological fluid with improved rheological properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 323(24), 3246-3250, 2011.
- [7] Wereley, Norman M., and Li Pang. "Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models." *Smart Materials and Structures* 7.5: 732, 1998.
- [8] Ashfak, A., Saheed, A., Rasheed, K. A., Jaleel, J. A. Design, fabrication and evaluation of MR damper. *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, 1,27-33, 2011.
- [9] Volkova, O., et al. "Magnetorheology of magnetic holes compared to magnetic particles." *Journal of Rheology* 44.1: 91-104, 2000.

- [10] Zhu, Xiaocong, Xingjian Jing, and Li Cheng. "Magnetorheological fluid dampers: a review on structure design and analysis." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 23.8, 839-873, 2012.
- [11] Dimock, Glen A., Jason E. Lindler, and Norman M. Wereley. "Bingham biplastic analysis of shear thinning and thickening in magnetorheological dampers." *PROCEEDINGS-SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING*. International Society for Optical Engineering; 1999, 2000.
- [12] Imaduddin, Fitriani, Saiful Amri Mazlan, and Hairi Zamzuri. "A design and modelling review of rotary magnetorheological damper." *Materials Design* 51, 575-591, 2013.
- [13] Bullough, W. A., et al. "Computational fluid dynamics in the flow of ERF/MRF in control devices and of oil through piezo-hydraulic valves." *Computers structures* 86.3, 266-280, 2008.
- [14] Sarkar, C., Hirani, H., Design of a squeeze film magnetorheological brake considering compression enhanced shear yield stress of magnetorheological fluid. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 412, No. 1, p. 012045). IOP, Publishing 2013.
- [15] Li, W. H., and H. Du. "Design and experimental evaluation of a magnetorheological brake." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 21.7 508-515: 2003.
- [16] Shiao, Yaojung, and Quang-Anh Nguyen. "Torque Enhancement for a New Magnetorheological Brake." *Procedia Engineering* 76, 12-23, 2014.
- [17] Wang, Xiaojie. "Nonlinear behavior of magnetorheological fluids (MR) and MR dampers for vibration control of structural systems." 2361-2361, 2004.
- [18] Mohebbi, M., and A. Bagherkhani. "Optimal design of magneto-rheological dampers." *International Journal of Optimization in Civil Engineering* 4.3, 361-380, 2014.
- [19] Widjaja, Joko, Bijan Samali, and Jianchun Li. "Electrorheological and magnetorheological duct flow in shear-flow mode using Herschel-Bulkley constitutive model." *Journal of engineering mechanics* 129.12, 2003.
- [20] Balamurugan, L., J. Jancirani, and M. A. Eltantawie. "Generalized magnetorheological (MR) damper model and its application in semi-active control of vehicle suspension system." *International Journal of Automotive Technology* 15.3, 419, 2014.

- [21] Ericksen, Everet O., and Faramarz Gordaninejad. "A magneto-rheological fluid shock absorber for an off-road motorcycle." *International Journal of Vehicle Design* 33. 1-3, 139-152, 2003.
- [22] Ferdaus, M. M., Rashid, M. M., Hasan, M. H., Yosuf, H. B. M., Bhuiyan, M. M. I., Alraddadi, A. Temperature effect analysis on magneto-rheological damper's performance. *Journal of Automation and Control Engineering* Vol, 2(4), 2014.
- [23] Attia, Hazem A., and Mohamed ES Ahmed. "Circular pipe MHD flow of a dusty Bingham fluid." *淡江理工學刊* 8.4 257-266: 2005.
- [24] Rashid, M. M., Ferdaus, M. M., Hasan, M. H., Rahman, A. ANSYS finite element design of an energy saving magneto-rheological damper with improved dispersion stability. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(7), 2793-2802, 2015.
- [25] Ellam, D. J., R. J. Atkin, and W. A. Bullough. "Analysis of a smart clutch with cooling flow using two-dimensional Bingham plastic analysis and computational fluid dynamics." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 219.8 639-652: 2005.
- [26] Weber, Felix, and Hans Distl. "Amplitude and frequency independent cable damping of Sutong Bridge and Russky Bridge by magnetorheological dampers." *Structural Control and Health Monitoring* 22.2: 237-254,2015.
- [27] Yasrebi, N., et al. "Magneto-rheological fluid dampers modelling: numerical and experimental." *relation* 1 75, 2006.
- [28] Kumbhar, Bhau K., Satyajit R. Patil, and Suresh M. Sawant. "Synthesis and characterization of magneto-rheological (MR) fluids for MR brake application." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 18.3,432-438,2015.
- [29] Attia, Hazem Ali. "Hall effect on the flow of a dusty Bingham fluid in a circular pipe." *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 30.1:14-21,2006.
- [30] Chen, Z. H., Lam, K. H., Ni, Y. Q. Enhanced damping for bridge cables using a self-sensing MR damper. *Smart Materials and Structures*, 25 (8), 085019,2016.
- [31] Wang, Xiaojie, and Faramarz Gordaninejad. "Flow analysis and modeling of field-controllable, electro-and magneto-rheological fluid dampers." *Journal of Applied Mechanics* 74.1: 13-22 2007.

- [32] Wereley, Norman M. "Nondimensional Herschel—Bulkley analysis of magnetorheological and electrorheological dampers." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 19.3, 257-268, 2008.
- [33] Patil, Satyajit R., Kanhaiya P. Powar, and Suresh M. Sawant. "Thermal analysis of magnetorheological brake for automotive application." *Applied Thermal Engineering* 98, 238-245, 2016.
- [34] Ikhouane, Fayçal, Víctor Mañosa, and José Rodellar. "Dynamic properties of the hysteretic Bouc-Wen model." *Systems control letters* 56.3, 197-205, 2007.
- [35] Karakoc, Kerem, Edward J. Park, and Afzal Suleman. "Design considerations for an automotive magnetorheological brake." *Mechatronics* 18.8: 434-447, 2008.
- [36] Moradi Nerbin, Mohammad, Reza Mojed Gharamaleki, and Mehdi Mirzaei. "Novel optimal control of semi-active suspension considering a hysteresis model for MR damper." *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 39.5:698-705, 2017.
- [37] 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(8-9), 813-818, 2006.
- [38] Olabi, Abdul-Ghani, and Artur Grunwald. "Design and application of magneto-rheological fluid." *Materials design*, 2658-2664, 2007
- [39] Mitrouchev, P., Klevinskis, A., Bucinskas, V., Dragasius, E., Udris, D., Morkvenaite-Vilkonciene, I. Analytical research of damping efficiency and heat generation of magnetorheological damper. *Smart Materials and Structures*, 26(6), 065026, 2017.
- [40] Lekić, U., and J. B. W. Kok. "Heat flows in piston compressors." 5th EURO THERM, 2008.
- [41] T.Data, "MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid," Lord Prod. Sel. Guid. Lord Magnetorheol. Fluids, vol. 54, no. 2, p.11, 2011.
- [42] K. E Akdoğan, A. Yılmaz, A. Sadeghimorad, and İ. Şahin, "Magneto-rheological (MR) Silindir Sönümlü Yarı Etkin Diz Ekleme Tasarımı, 1-4"
- [43] Parlak, Z., Engin, T., Çeşmeci, Ş., & Şahin, İ. Dynamic characterisation of a vehicle magnetorheological shock absorber. *International Journal of Vehicle Design*, 59(2/3), 129-146, 2012.

- [44] Crivellaro, C., & Alves, S. J. Phenomenological model of a magneto-rheological damper for semi-active suspension control design and simulation (No. 2006-01-2520). SAE Technical Paper 2006.
- [45] <http://www.wikizero.org/index.php?q=aHR0cHM6Ly91bi53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvTWFnbmV0b3JoZW9sb2dpY2FsX2ZsdWlk> Erişim Tarihi: 20.09.2017.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Ertürk SÖYLEMEZ, 22.12.1989'da Muş'ta doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Muş'ta tamamladı. 2007 yılında Muş Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2008 yılında başladığı Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2013 yılında bitirdi. 2015 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2015 yılında Muş Alparslan Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı akabinde yüksek lisans eğitimine Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde devam etti. Halen araştırma görevlisi olarak görevine devam etmektedir.