

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR MANYETO-REOLOJİK DAMPERİN MANYETİK  
ALAN SİMÜLASYONU, AKIŞ ANALİZİ VE  
DENEYLERLE KARŞILAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mak. Müh. Şevki ÇEŞMECİ**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ**  
**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Tahsin ENGİN**

**Temmuz 2007**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR MANYETO-REOLOJİK DAMPERİN MANYETİK  
ALAN SİMÜLASYONU, AKIŞ ANALİZİ VE  
DENEYLERLE KARŞILAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mak. Müh. Şevki ÇEŞMECİ**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ**

**Bu tez 11 / 07 /2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.**

**Yrd. Doç. Dr.  
Tahsin ENGİN  
Jüri Başkanı**

**Yrd. Doç. Dr.  
Adnan TOPUZ  
Üye**

**Yrd. Doç. Dr.  
Ömer K. MORGÜL  
Üye**

## TEŞEKKÜR

Bu alıŐma sırasında bana ilgi ve alakayla danıŐmanlık eden, bilgilerini paylaŐan aynı zamanda Manyeto-Reolojik (MR) sıvılar ve uygulamaları konusunda ülkemizdeki ilk araŐtırmacılardan olan Yrd. Doç. Dr. Tahsin ENGİN'e en içten teŐekkürlerimi sunarım.

Yine MR damperler konusunda derin bilgi sahibi olan Dr. İsmail ŞAHİN'e damperin tasarım sürecindeki, testlerinin gerçekleŐtirilmesinde ve yorumlanmasındaki değerli katkılarından ötürü teŐekkürlerimi sunarım.

Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon BaŐkanlıėı'na yüksek lisans tez çalıŐmalarım boyunca sağlamış olduğu maddi katkılardan dolayı teşekkür ederim. Ayrıca, yüksek lisans çalıŐmalarım boyunca baŐarılarımı takdir eden ve beni maddi olarak destekleyen TÜBİTAK–Münir Birsel Lisans st Bursları Vakfı'na teŐekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Bu yüksek lisans çalıŐması yürütücülüğünü danıŐman hocam Yrd. Doç. Dr. Tahsin ENGİN'in yaptığı ve konusu “Yeni nesil yarı-aktif bir süspansiyon sistemin tasarımı, imalatı ve optimizasyonu” olan 140M157 nolu TÜBİTAK araştırma projesinin bir parçasıdır. Dolayısıyla, her türlü maddi imkanları sağlayan TÜBİTAK'a teŐekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ .....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY .....	xiii

### BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
1.1. Amaç .....	2
1.2. Kapsam.....	2
1.3. Literatür.....	3

### BÖLÜM 2.

MR SIVILAR VE UYGULAMALARI.....	6
2.1. MR Sıvılar ve Çalışma Mekanizmaları.....	6
2.2. MR Sıvı Uygulamaları .....	12
2.3. MR Damperler ve Çalışma Prensipleri .....	14
2.4. MR Damperin Avantajları.....	15

### BÖLÜM 3.

MR DAMPER TASARIMI.....	17
3.1. Genelde Kullanılan Cihaz Geometrileri.....	18
3.2. Etkin Sıvı Hacmi ve Cihazın En-boy Oranı .....	19
3.3. Tasarımda Dikkat Edilmesi Gereken Diğer Hususlar .....	20

3.4. MR Valf Tasarımı .....	21
3.5. Manyetik Devre Tasarımı .....	22
3.6. Elektromanyetik Analiz .....	25
3.7. Damperin Boyutlandırılması .....	32
BÖLÜM 4.	
MR DAMPER İÇERİSİNDEKİ AKIŞIN TEORİK ANALİZİ .....	33
4.1. Eksenel Simetrik Akış Modeli .....	34
4.2. Debinin Hesabı .....	40
4.3. Viskoz Etkilerin Hesaba Katılması .....	43
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMA .....	50
5.1. Deney Ünitesi ve Test Damperi .....	50
5.2. Deneysel Çalışma ve Deney Sonuçlarının Yorumlanması .....	53
5.3. Deney ve Teorinin Karşılaştırılması .....	59
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	63
KAYNAKLAR .....	65
ÖZGEÇMİŞ .....	68

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$A$	:Kayma kutup alanı (m <sup>2</sup> )
$A_{\zeta}$	:Geometrik kutup alanı (m <sup>2</sup> )
$A_{\text{mil}}$	:Mil alanı (m <sup>2</sup> )
$A_p$	:Piston alanı (m <sup>2</sup> )
$A_s$	:Etkin kutup alanı (m <sup>2</sup> )
$a$	:Pistonun merkezinden çekirdek akışının başlangıcına olan radyal mesafe (m)
$b$	:Pistonun merkezinden çekirdek akışının bitimine olan radyal mesafe (m)
$c$	:Sabit
$D$	:Dinamik oran
$D_{\text{kanal, iç}}$	:Dairesel kanalın iç çapı (m)
$D_{\text{kanal, dış}}$	:Dairesel kanalın dış çapı (m)
$D_{\text{mil}}$	:Mil çapı (m)
$D_{\text{piston}}$	:Piston çapı (m)
$D_{\text{silindir}}$	:Silindirin iç çapı (m)
$D_1, D_2, D_3$	:İntegral sabiti
$E$	:Elektrik alan şiddeti (kV/m)
$ER$	:Elektro-Reolojik
$B$	:Manyetik akı yoğunluğu (Tesla)
$F$	:Kuvvet (N)
$F_{\text{açılma}}$	:Damperin açılma durumunda geliştirdiği kuvvet (N)
$F_{\text{kapanma}}$	:Damperin kapanma durumunda geliştirdiği kuvvet (N)
$F_{\text{KEK}}$	:Kontrol edilemeyen kuvvet (N)
$F_{\text{sürtünme}}$	:Sürtünme kuvveti (N)
$F_T$	:Toplam kuvvet (N)
$F_{\mu}$	:Viskoz kuvvet (N)

$g$	:Dairesel kanalın yüksekliği (m)
$G$	:Kompleks malzeme modülü
$H$	:Manyetik alan şiddeti (kA/m)
$I$	:Akım (A)
$K$	:Sabit
$k$	:Sabit
$L$	:Dairesel kanalın uzunluğu (m)
$L_{\text{damper}}$	:Piston açık konudayken damperin toplam boyu (m)
$L_{\text{etkin}}$	:Etkin kutup uzunluğu (m)
$L_{\text{etkin olmayan}}$	:Etkin olmayan kutup uzunluğu (m)
$L_{\text{kutup}}$	:Damperin kutup başının uzunluğu (m)
$MR$	:Manyeto–Reolojik
$NI$	:Sarım sayısı
$n$	:Sabit
$P$	:Basınç (Pa)
$Q$	:Hacimsel debi (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{\text{çekirdek}}$	:Çekirdek bölgesinden geçen hacimsel debi (m <sup>3</sup> /s)
$Q_p$	:Pistonun hareketiyle kanaldan geçen hacimsel debi (m <sup>3</sup> /s)
$r$	:Pistonun merkezinden olan yarıçap (m)
$R_1$	:Pistonun merkezinden dairesel kanalın başlangıcına olan radyal mesafe (m)
$R_2$	:Pistonun merkezinden dairesel kanalın bitimine olan radyal mesafe (m)
$S$	:Strok (m)
$u$	: $x$ -yönündeki akışkan hızı
$V$	:Voltaj (V)
$V_p$	:Piston hızı (m/s)
$W_m$	:Kontrol edilebilen mekanik güç yitimi (W)
$w$	:Hareketli veya sabit kutuplar arasındaki kanalın genişliği (m)
$\mu$	:Plastik viskozite (Pa · s)
$\lambda$	:Dinamik çalışma oranı
$\dot{\gamma}$	:Şekil değiştirme hızı (1/s)
$\phi$	:Manyetik akı (Wb)

$\theta$	:Koordinat eksenini
$\tau$	:Kayma gerilmesi (Pa)
$\tau_y$	:Akma gerilmesi (Pa)
$\forall$	:Minimum etkin sıvı hacmi (m <sup>3</sup> )
$\Delta P$	:Dairesel kanalda meydana gelen basınç düşüşü (Pa)
$\Delta P_\mu$	:Dairesel kanalda viskoz etkilerden kaynaklanan basınç düşüşü (Pa)
$\Delta P_\tau$	:Dairesel kanalda manyetik alana bağımlı akma gerilmesinden kaynaklanan basınç düşüşü (Pa)



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. İçerisinde hacimsel olarak % 2 oranında 50 µm çapında demir parçacıkları bulunan silikon yağ esaslı MR sıvısı: (a) Manyetik alan uygulanmadan önce, (b) Manyetik alan uygulandıktan sonra. ....	7
Şekil 2.2. MR sıvısının manyetik alan altındaki davranışı: (a) Parçacıklar rast gele dağılı halde, (b) MR etkinin oluşumu ve (c) Zincir biçimli halkanın şekil değişimine uğraması. ....	8
Şekil 2.3. MR sıvısının çalışma tipleri: (a) Kayma tipi, (b) Valf tipi ve (c) Sıkıştırma tipi. ....	8
Şekil 2.4. MRF-122-ED'nin manyetik alan şiddeti ( $H$ ) –akma gerilmesi ( $\tau_y$ ) grafiği [13] .....	9
Şekil 2.5. MRF-122-ED'nin şekil değiştirme hızı ( $\dot{\gamma}$ )–akma gerilmesi ( $\tau$ ) grafiği [13].....	9
Şekil 2.6. MRF-122-ED'nin manyetik alan şiddeti ( $H$ )–manyetik akı yoğunluğu ( $B$ ) grafiği [13] .....	10
Şekil 2.7. MRF-132-AD'nin şekil değiştirme hızına bağlı viskozite değişimi grafiği [13].....	11
Şekil 2.8. LORD firması tarafından ticari olarak üretilen 20 ton'luk büyük ölçekli bir MR damperin şematik görünüşü [13] .....	13
Şekil 2.9. LORD firması tarafından ticari olarak üretilen bir MR frenin şematik görünüşü [13] .....	13
Şekil 2.10. MR damper tipleri: 1–Manyetik alanının olduğu kısım, 2–Akümülatör, 3–Yan geçiş kanalı (by-pass kanalı) .....	14
Şekil 2.11. Tasarlanan MR damperin basitleştirilmiş kesit görünüşü.....	14
Şekil 3.1. Kontrol edilebilir sıvılı cihazların temel çalışma tipleri: (a) Akışın basınç farkıyla gerçekleştiği tip ve (b) Doğrudan kaymalı tip .....	18

Şekil 3.2. Dairesel kanallı MR valf geometrisi ve beklenen performans grafiği .....	22
Şekil 3.3. Temel bir manyetik devre: (a) Sarım geometrisi ve (b) Manyetik alanın saçaklanması .....	24
Şekil 3.4. Piston üzerine açılan çevresel kanallar .....	25
Şekil 3.5. MAXWELL SV yazılımının çözüm prosedürü .....	26
Şekil 3.6. MAXWELL SV'a aktarılmak üzere çizilen kayar pistonlu damper geometrisi ve kısımları .....	27
Şekil 3.7. 64 Amper-tur'da damperin kutup başında oluşan manyetik akı yoğunluğu.....	28
Şekil 3.8. 134 Amper-tur'da damperin kutup başında oluşan manyetik akı yoğunluğu.....	29
Şekil 3.9. 201 Amper-tur'da damperin kutup başında oluşan manyetik akı yoğunluğu.....	29
Şekil 3.10. 268 Amper-tur'da damperin kutup başında oluşan manyetik akı yoğunluğu.....	30
Şekil 3.11. 335 Amper-tur'da damperin kutup başında oluşan manyetik akı yoğunluğu.....	30
Şekil 3.12. 503 Amper-tur'da damperin kutup başında oluşan manyetik akı yoğunluğu.....	31
Şekil 3.13. Tasarlanan MR damperin akım ( $I$ )–akma gerilmesi ( $\tau_y$ ) ilişkisi .....	32
Şekil 4.1. MR damperin piston kafası ve akış kanalının genel görünümü.....	33
Şekil 4.2. Akış kanalında tipik Bingham plastik profili ve kayma gerilmesi dağılımı.....	37
Şekil 4.3. $dx$ uzunluğundaki diferansiyel akış elemanı .....	39
Şekil 4.4. Manyetik alan simülasyonu sonucunda damperin kutup başında oluşan manyetik akı yoğunluğu grafiği üzerinde etkin ve etkin olmayan kutup bölgeleri.....	43
Şekil 4.5. Dairesel kanalda tam gelişmiş laminar akışa ait hız profili .....	44

Şekil 4.6. $r$ yarıçapındaki, $dr$ kalınlığındaki ve $dx$ uzunluğundaki halka şeklindeki diferansiyel akış elemanı ve serbest cisim diyagramı.....	45
Şekil 5.1. MR Damper test düzeneği .....	50
Şekil 5.2. Güç kaynağı (GWInstek PPE3223) .....	51
Şekil 5.3. MR damper alıştırma ünitesi.....	52
Şekil 5.4. Damperin 0.05 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–hız grafiği .....	54
Şekil 5.5. Damperin 0.05 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–yerdeğiştirme grafiği .....	54
Şekil 5.6. Damperin 0.1 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–hız grafiği .....	55
Şekil 5.7. Damperin 0.1 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–yerdeğiştirme grafiği .....	55
Şekil 5.8. Damperin 0.15 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–hız grafiği .....	56
Şekil 5.9. Damperin 0.15 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–yerdeğiştirme grafiği .....	56
Şekil 5.10. Damperin 0.05 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–hız grafiği .....	57
Şekil 5.11. Damperin 0.05 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–yerdeğiştirme grafiği .....	57
Şekil 5.12. Damperin çeşitli hız kademelerinde akıma bağlı tepki kuvveti grafiği .....	58
Şekil 5.13. Damperin akıma karşı duyarlılık grafiği.....	59
Şekil 5.14. MR Damperin teorik ve deneysel verilerinin 0–2 A ve 0.2 m/s hız için karşılaştırılması ( $F-V$ ).....	60
Şekil 5.15. MR Damperin teorik ve deneysel verilerinin 0–2 A ve 0.2 m/s hız için karşılaştırılması ( $F-X$ ).....	60

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. LORD firması tarafından ticari olarak üretilen MRF–122–ED kodlu MR sıvının genel özellikleri [13] .....	7
Tablo 2.2. MR ve ER sıvıların karşılaştırılması [23] .....	16
Tablo 3.1. Manyetik devre tasarımı sonucunda belirlenen parametre değerleri.....	24
Tablo 3.2. Manyetik alan simülasyonu sonucunda uygulanan akıma göre elde edilen akma gerilmesi değerleri.....	31
Tablo 3.3. Damperin tasarım parametreleri ve değerleri .....	32
Tablo 5.1. 0.2 m/s'lik maksimum piston hızında, çeşitli akım değerleri için elde edilen dinamik çalışma oranları.....	53
Tablo 5.2. Damperin çeşitli hız kademelerindeki akıma bağlı tepki kuvveti değerleri.....	58

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Manyeto–reolojik (MR) sıvılar ve damperler, Bingham plastik modeli

Bu çalışmada, manyeto–reolojik (MR) sıvılar ve MR sıvılı damperler hakkında bilgi verildikten sonra, bir MR damperin bilgisayar ortamında elektromanyetik analizi gerçekleştirilmiş ve çalışma davranışı sanki–statik akış analizi kullanılmak suretiyle kestirilmiştir.

MR akışkanlar özel bir taşıyıcı sıvı ile bu sıvı içerisinde bulunan mikron–boyutlu demir parçacıklarından oluşmaktadır. Manyetik alana maruz kaldıklarında bu sıvılar Newton tipi olmayan akışkan davranışı sergiler ve manyetik alan etkisi altındaki bu davranışları, kayma gerilmesinin  $\tau = \tau_y + \mu\dot{\gamma}$  şeklinde tanımlandığı Bingham plastik modeli veya kayma gerilmesinin  $\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n$  alındığı Herschel–Bulkley bünye modeli ile uygun biçimde tarif edilebilir. Burada  $\tau_y$  akışkanın akma gerilmesini,  $\dot{\gamma}$  şekil değiştirme hızını,  $K$  ve  $n$  ise sabitleri göstermektedir. Bu çalışmada akış analizi Bingham plastik modeline göre yapılmış ve analizin doğruca Herschel–Bulkley modeline genişletilebileceği gösterilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen doğrusal olmayan denklem sistemi herhangi bir piston hızına karşılık gelen sönümleme kuvvetini kestirmek üzere bilgisayar yardımıyla çözülmüştür.

İmalatı yapılan damper, yataklarının birbirine alışması ve temas halinde olan mekanik parçalarında meydana gelen kuru sürtünmenin kararlı hale getirilmesi için belirli bir süre damper alıştırmaya ünitesinde çalıştırılmıştır. Ardından, damperin testleri farklı akım ve hız kademelerinde; sırasıyla 0 ila 2 A ve 0 ila 2 m/s aralığında olmak üzere standart bir test ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Son olarak, teorik değerler deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve aralarında iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

# **ELECTROMAGNETICAL AND FLOW ANALYSIS OF A MAGNETO–RHEOLOGICAL FLUID DAMPER, AND COMPARISON OF RESULTS WITH EXPERIMENTS**

## **SUMMARY**

Keywords: Magneto–rheological fluids and dampers, Bingham plastic model

In the present study, after introducing the magneto–rheological (MR) fluids and MR fluid dampers, electromagnetic analysis of an MR damper is done in computer environment and its operational behavior is predicted by using quasi–static flow analysis.

Magneto–rheological fluids are suspensions consisting of a special carrier liquid in which micron–sized iron particles exist. These fluids act like a non–Newtonian fluid when they are subjected to a magnetic field, and their behavior under the magnetic field can be properly described by either Bingham plastic model, for which the shearing stress is defined as  $\tau = \tau_y + \mu\dot{\gamma}$ , or Herschel–Bulkley constitutive model with  $\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n$ , where  $\tau_y$  is the yield stress of the fluid,  $\dot{\gamma}$  is the deformation rate, and  $K$  and  $n$  are the fluid indexes. In this study, the flow analysis is done based on Bingham plastic model and it is shown that this analysis can be straightforwardly extended to Herschel–Bulkley model. The resulting non–linear system of equations is then solved in order to predict the damping force of the damper corresponding to any piston velocity.

The protoyped damper is operated for a period of time in order to reduce the seal drag between contacting mechanical components of the damper to a setady–state level on an operating unit. Then the tests of the damper are conducted at different current and velocity stages ranging from 0 to 2 A and 0 to 2 m/s, respectively on a standart test unit. Finally, theoretical results are compared with the experimental values and it is observed that there is a good agreement between the results.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Yarı-aktif titreşim kontrol sistemleri, fazla bir güç gereksinimine gerek duymadan hem aktif hem de pasif kontrol sistemlerinin özelliklerini taşımalarından ötürü son onbeş yıl içerisinde önemli bir ilgi odağı haline gelmiştir. Manyeto-reolojik (MR) sıvılarının keşfi 1940'lara dayanmakla birlikte [1,2] bu konudaki araştırmaların çoğu genellikle 1990 ve sonrasında gerçekleşmiştir. Günümüzde MR akışkanların kavrama, fren, kilitleme, servo-valf, titreşim sönümleme (süspansiyon), şok emme sistemlerinde kullanımına yönelik yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bunda şüphesiz bu sistemlerin hem aktif hem de pasif kontrol sistemi özelliklerini bir arada bulundurması önemli rol oynamaktadır. MR süspansiyon sistemlerine yönelik çalışmalar önemli ölçüde otomotiv endüstrisine [3,4,7] uzay çalışmaları [5,8] ile köprü ve yapıların deprem sarsıntılarından korunmasına [6,9,10,11] yönelmiş durumda olup hızla gelişmektedir. Bu durum, mekatronik bilim dalı içerisinde son yıllarda önemli araştırmaların yapıldığı Mikro-Elektro-Mekanik-Sistemler (MEMS) alanında da kendisini göstermeye başlamıştır [12].

Son 10 yılda yurtdışında hem akademik olarak hem de uygulama olarak büyük bir gelişme gösteren yarı-aktif süspansiyon sistemleri halen gelişme safhasındadır. Değişken kesitli sıvı damperleri, değişken direngenlikli sistemler, sürtünme kontrollü izolatörler ve manyetik alan kontrollü sıvıların kullanıldığı MR sistemler akla gelebilecek yarı-aktif titreşim kontrolü sağlayan sistemlerdir. Yapılacak olan çalışma MR damperler hakkındadır.

MR damperler konusunda, nakil araçlarını ve inşaat mühendisliği uygulamalarını içerisine alacak şekilde onlarca çalışma halen devam etmektedir. Ülkemizin yol şartları göz önüne alındığında, seyir güvenliği ve seyir konforunun yanında, araçlarda ve yollarda meydana gelen zararlar her yıl ülkemize milyonlarca dolar zarar getirmektedir. Benzer şekilde ülkemizde de sık sık meydana gelen, maddi ve

manevi büyük kayıplara sebep olan depremlerin zararlarını en aza indirmek konusunda süspansiyon sistemi kullanımı çalışmaları özellikle Amerika ve Japonya'da yoğun bir şekilde yürütülmektedir.

Bunun yanında MR damperler, engebeli arazi şartlarında çalışan tarım araçlarından askeri araçlara, uçakların iniş takımlarından çamaşır makinalarına ve hatta protez bacaklara kadar genişleyen uygulamalarıyla oldukça ilgi çekici bir konudur.

Tüm bunlar dikkate alındığında, MR damperlerin incelenmesi ve teknolojisinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle, ülkemizdeki yol şartları gelişmesini tamamlamış ülkelere oranla çok bozuktur. Dolayısıyla gerek yollarda seyreden araçların, gerekse sürücülerin sürüş konforunu sağlamada yüksek kontrol kabiliyeti olan MR damperler büyük kolaylık getirecektir.

### **1.1. Amaç**

Çalışmanın amacı genel olarak, tasarım parametresi olarak belirtilen sönüm kuvveti aralığı dikkate alınarak, yapılacak olan elektromanyetik ve akış analizleri sonuçlarına göre bir MR damperin geometrik tasarımının gerçekleştirilmesidir. Ardından, akış analizi sonucunda elde edilen herhangi bir piston hızına karşılık gelen sönüm kuvveti değerlerinin test değerleri ile karşılaştırılıp aralarındaki uyumun incelenmesi ve çıkan sonuçların yorumlanması amaçlanmıştır.

Bu çalışma, yurt dışında en öncelikli konular arasında yerini alan MR damperler konusunda yurt içinde yapılan özgün bir çalışma olması bakımından önemlidir. Yapılan çalışma AR-GE ve teknoloji geliştirme niteliğinde olup hem ulusal hem de uluslararası düzeyde gelecekteki MR damper uygulamalarına ışık tutacaktır.

### **1.2. Kapsam**

Bu çalışmada, özellikle arazi şartlarında çalıştırılan kara taşıtlarının koltuklarına yönelik MR damper uygulaması ele alınmıştır. Bir damper içerisindeki akış analitik



olarak incelenmiş ve damperin karakteristiği sanki–statik akış modeli ile kestirilmiştir. İmalatı yapılan bu damperin testleri laboratuvar şartlarında standart bir test ünitesinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

En genel anlamda, Bingham veya Herschel–Bulkley modelleri temelinde geliştirilen MR damper modeli ile MR sıvılı damperin herhangi bir hız değerine karşılık gelen sönümlenme kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu hesaplama için uygulanan akımın şiddetine göre farklılık gösteren MR sıvının akma gerilmesi değerlerine, ticari manyetik alan simülasyonu kodu olan Ansoft firmasına ait MAXWELL SV’de yapılan elektromanyetik analiz sonucunda elde edilen manyetik alan yoğunluğu değerlerinden ulaşılmıştır. Bunun için MR sıvının manyetik karakteristiğini gösteren ve üretici firma LORD’tan [13] temin edilen Manyetik Alan Yoğunluğu ( $B$ )–Manyetik Alan Şiddeti ( $H$ ) ve Akma Gerilmesi ( $\tau_y$ )–Manyetik Alan Şiddeti ( $H$ ) eğrileri kullanılmıştır. Analizlerde damperin kutup başı gibi geometrik özelliklerinin manyetik alan ve dolayısıyla akış üzerindeki etkisi incelenmiş ve tasarım parametrelerinden biri olan sönüm kuvveti aralığı için optimum damper geometrisi elde edilmeye çalışılmıştır. MR ve ER damperlerin analizinde sıkça kullanılan ve gün geçtikçe güvenilirliğini kanıtlayan, sanki–statik akış modeli ile damperin kutup başı üzerine açılan dairesel ince kanaldan (0.4 ~ 0.5 mm) olan viskoz akış için matematiksel denklemler kurulmuş ve doğrusal olmayan denklem sistemleri halinde ortaya çıkan bu denklemler sayısal çözüm algoritmaları ve bilgisayar yardımıyla çözülerek, damperin herhangi bir piston hızına ve konumuna karşılık gelen sönüm kuvvetleri hesaplanmıştır.

### 1.3. Literatür

MR sıvılı damperler konusu son on yılda hem akademik hem de endüstriyel alanda büyük bir ilgi odağı haline gelmiştir. Bu konuda yapılan çalışmaların sayısı her geçen gün artmaktadır. Burada yapılan çalışmanın kapsamına uygun olarak daha önceden yapılan çalışmalar hakkında bir literatür taraması yapılmıştır.

WANG X. vd. [14] MR ve ER sıvılı damperlerin davranışlarının kestirimi için Herschel–Bulkley denklemi temelinde teorik bir model geliştirmişlerdir. Boru ve paralel plakalar arasından akan akışkanın analizinde basınç düşüşünü hesaplamak için basit kapalı ifadeler türetmişlerdir. MR ve ER damperlerinin dinamik davranışlarını da göz önüne alarak, akışkanın sıkıştırılabilirliğinin etkisini de incelemişlerdir. Kurulan modelin bir MR damperin dinamik davranışlarını kestirmek için yeterli olduğu sonucuna varmışlardır.

PANG, L. vd. [15], doğrusal stroklu bir MR damperin, 2 Hz’lik sinüzoideal uyarı altında histerisiz davranışını karakterize etmişlerdir. Doğrusal olmayan Bingham plastik model, doğrusal olmayan biviskoz model, doğrusal olmayan histerisiz biviskoz model ve doğrusal olmayan viskoelastik–plastik model olmak üzere dört farklı model kullanarak sistemin davranışını incelemişlerdir.

WERELEY, N. M. vd. [16] yarı–aktif Elektro–reolojik (ER) ve MR akışkanlı damperleri yaklaşık paralel plakalar modelleri yardımıyla akış analizini gerçekleştirmişlerdir.

KAMATHI G. M. vd. [17] sanki–static Bingham plastik modellerini kullanarak Elektro–reolojik akışkanlı damperler içerisindeki akışı analiz etmişlerdir. Dampere kuvvet uygulandığında iç ve dış kutuplar arasındaki ince halkadan geçen akışın idealleştirilmiş kayma akışı mekanizması ile uygun şekilde kestirilebileceğini ve halka kesitteki akışın I. akış, boru akışı ve II. akış bölgeleri olmak üç bölgeye ayrılarak sızmanın akma gerilmesinin fonksiyonu şeklinde modellenebileceğini göstermişlerdir.

DIMOCK GLEN A. vd. [18] MR sıvılarda görülen yüksek kayma gerilmeleri esnasındaki görünür viskozite değişimini (incelme ve kalınlaşma etkisini) incelemişlerdir.

CHOI S. B. vd. [19] Bingham MR akışkanın Bingham plastik bünye denklemine göre, Bingham sayısı, boyutsuz sönümlenme kuvveti, dinamik aralık ve geometrik oran olmak dört boyutsuz tasarım parametresi tanımlamışlardır. Her bir parametrenin

tasarım karakteristiklerini inceledikten sonra, bir MR damperin adım adım tasarım sürecini modellemişlerdir. Daha sonra bir yay ve MR damperden oluşan tek serbestlik dereceli titreşim modelini kullanarak önerilen tasarım metodunu örneklemiştir.

ERICKSEN, E vd. [20] nano büyüklükte parçacıklı MR sıvıların elde edilme zorluğundan, bu sıvının akış davranışının simülasyonunu yapmışlardır. Akış simülasyonu için sonlu eleman analizini kullanmışlar; simülasyon değerlerini deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Bingham, Herschel–Bulkley ve Bi–Bingham olmak üzere üç akış modeli kullanmışlar; özellikle nano büyüklükte parçacıklı MR sıvılar için Bingham modelinin uygun olmadığını, Herschel–Bulkley modelinin daha iyi bir seçim olduğunu göstermişlerdir.

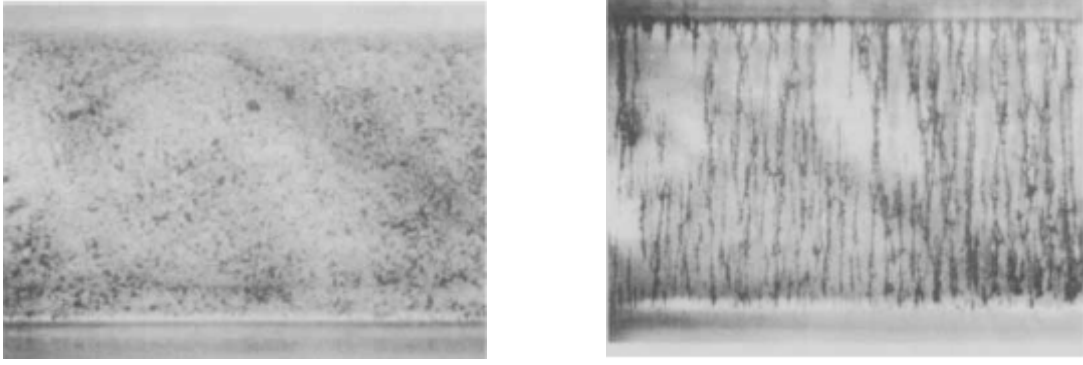
CHOOI W. W. ve OYADIJI S. O [25], analitik akış denklemlerini kullanarak bir MR damperin çalışma davranışını modellemişlerdir. Piston üzerine açılan dairesel kanaldan olan akışı paralel plakalar yaklaştırımı ve Herschel–Bulkley bünye denklemleri ile modellemişlerdir. Aynı zamanda, dairesel kanaldan olan akışın FEMLAB<sup>TM</sup> yazılımını kullanarak bilgisayar ortamında simülasyonunu gerçekleştirmişler ve elde ettikleri teorik ve sayısal sonuçları karşılaştırmalı olarak vermişlerdir. Bu çalışmada ayrıca, çift valfli MR damper için analitik çözümlerin yanında akışkanın sıkıştırılabilirlik etkisi de dikkate alınarak, MR damper için genel bir matematiksel model öne sürülmüş; modelin fiziksel parametreleri Matlab<sup>TM</sup>/Simulink<sup>TM</sup>,de yer alan optimizasyon araçlarıyla tanımlanmış ve model deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

## BÖLÜM 2. MR SIVILAR VE UYGULAMALARI

Reoloji, en genel anlamda, sıra dışı davranış sergileyen akışkanların akışlarını incelemektedir. Örneğin, yağ ve su normal olarak akarken, mayonez, çikolata ve ekmeğin hamuru daha karmaşık ve alışık olunmayan bir biçimde akar. Manyeto–reoloji (MR) ise manyetik alana maruz kalan akışkanların davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. Görünür viskoziteleri manyetik alan etkisi altında değişen sıvılara manyeto–reolojik sıvılar denir.

### 2.1. MR Sıvılar ve Çalışma Mekanizmaları

MR sıvılar, silikon–yağ veya hidrokarbon–yağ gibi özel bir taşıyıcı sıvı içerisinde, genellikle 1–10 µm çaplarında, küresel biçimli, manyetize olabilen Fe(CO)<sub>5</sub> (demir–penta–karbonil) parçacıklarından oluşmaktadır. LORD firması tarafından ticari olarak üretilen MR sıvılardan MRF–132–ED kodlu MR sıvının genel özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir. MR sıvı üzerine bir manyetik alan uygulandığında, bu parçacıklar manyetik akı çizgileri doğrultusunda dizilerek zincir yapı oluştururlar (Şekil 2.1) ve bunun sonucunda birkaç milisaniye içerisinde sıvının akma gerilmesi 100 kPa’a kadar çıkabilmektedir. Zincir yapının oluşumu Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Şekil 2.2a’da parçacıklar taşıyıcı sıvı içerisinde rast gele halde dağılı bulunmaktadır. Uygun tarzda bir manyetik alan oluşturulduğunda, bu parçacıklar manyetik akı çizgileri doğrultusunda dizilirler (Şekil 2.2b). Bu zincir yapının üzerine bir kuvvet uygulandığında, uygulanan kuvvetin ve manyetik alanın şiddetine göre zincir yapı şekil değiştirir. İşte bu mekanizma “MR etki” olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.2c).



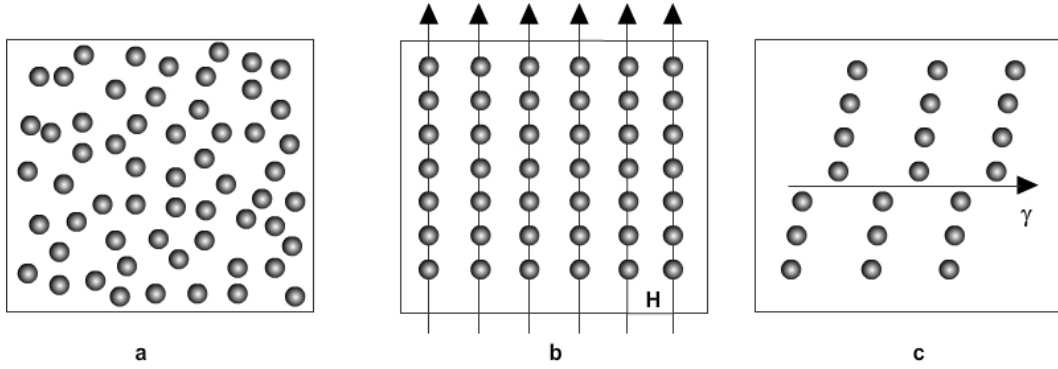
(a)

(b)

Şekil 2.1. İçerisinde hacimsel olarak % 2 oranında 50 µm çapında demir parçacıkları bulunan silikon yağ esaslı MR sıvı: (a) Manyetik alan uygulanmadan önce, (b) Manyetik alan uygulandıktan sonra

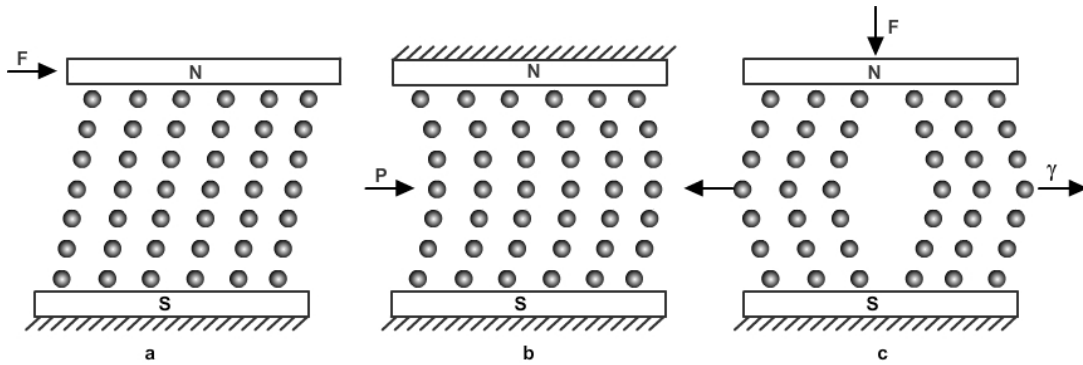
Tablo 2.1. LORD firması tarafından ticari olarak üretilen MRF-122-2ED kodlu MR sıvının genel özellikleri [13]

Özellikler	Değer/limitler
Taşıyıcı sıvı	Hidrokarbon
Çalışma sıcaklığı	-40 °C ila 130 °C arası
Yoğunluk aralığı	2.32 ila 2.44 g/cm <sup>3</sup>
Renk	Koyu gri
Ağırlıkça katı yüzdesi	% 72
Isıl genleşme katsayısı (hesaplanan değerleri)	°C başına birim hacim
0 ila 50 °C	$0.65 \times 10^{-3}$
50 ila 100 °C	$0.71 \times 10^{-3}$
100 ila 150 °C	$0.79 \times 10^{-3}$
Özgül ısı (25 °C'de)	0.94 J/g · °C
Isıl iletkenlik (25 °C'de)	0.21–0.81 W/m · °C
Damlama noktası	>150 °C
Viskozite 40 °C'de 800 1/s ila 500 1/s arasındaki eğim için hesaplanan değeri	0.07 (±0.02) Pa · s



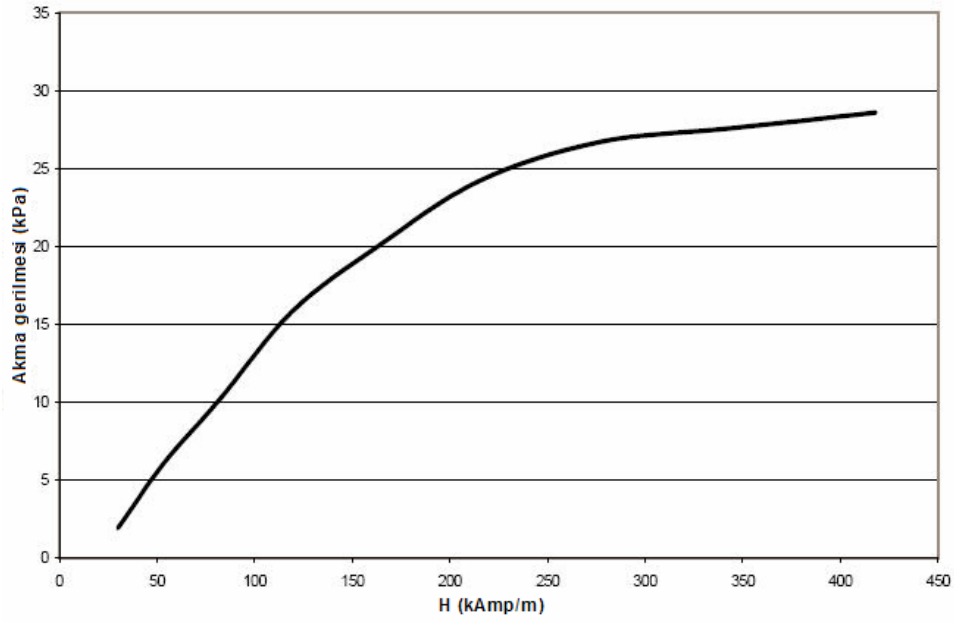
Şekil 2.2. MR sıvının manyetik alan altındaki davranışı: (a) Parçacıklar rast gele dağılı halde, (b) MR etkinin oluşumu ve (c) Zincir biçimli halkanın şekil değişimine uğraması [21]

MR sıvılar Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, üç farklı tipte çalıştırılabilmektedir. İlk çalışma tipinde sıvıyı sınırlayan plakalardan birine bir kuvvet uygulanır. MR etki, kayma gerilmesinden dolayı, sıvı plakanın hareketine karşı koyacak şekilde bir tepki kuvveti oluşturur ve bu kayma tipi çalışma olarak adlandırılır (Şekil 2.3a). Bu tür çalışma genellikle MR fren ve kavramalarda görülür. Eğer sıvı üzerine bir basınç uygulanacak olursa, zincir yapı sıvı akışına engel olmaya çalışır. Valf tipi çalışma olarak adlandırılan bu tip sistemler ise genelde MR damperlerde görülmektedir (Şekil 2.3b). Sınırlandırma plakalarına dik kuvvet uygulanması durumunda ise zincir yapıda küçük hareket kabiliyeti görülür ve bu, sıkıştırma tipi çalıştırma olarak adlandırılır (Şekil 2.3c).

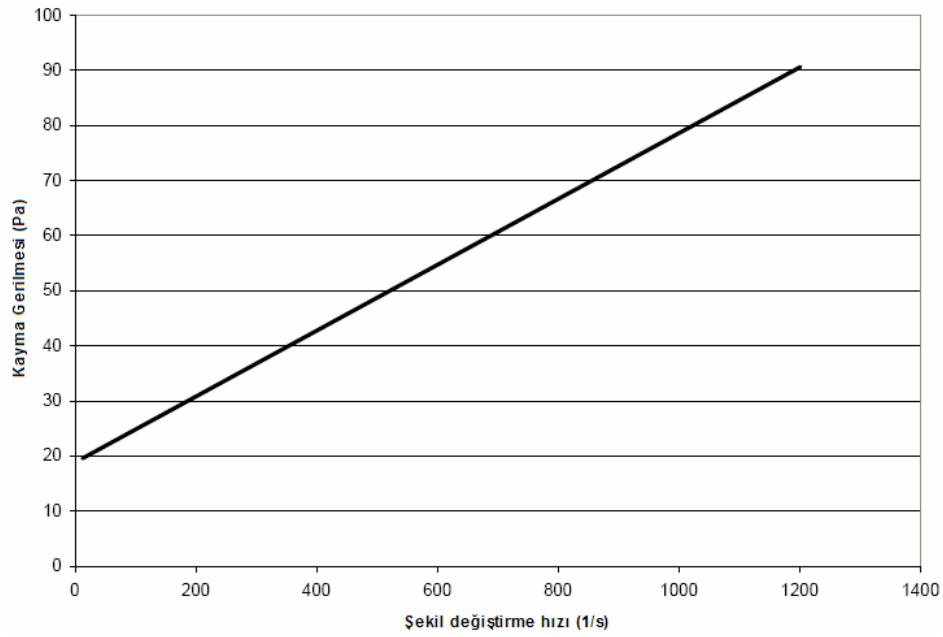


Şekil 2.3. MR sıvının çalışma tipleri: (a) Kayma tipi, (b) Valf tipi ve (c) Sıkıştırma tipi [21]

MR sıvının özellikleri, üzerine uygulanan manyetik alan ile doğrudan ilişkili olduğu için, çeşitli testlerle bu ilişkiler grafiksel olarak çıkarılmıştır. Bu çalışmada kullanılacak olan hidrokarbon esaslı MRF-122-ED sıvısına ait manyetik alan/akma gerilmesi (Şekil 2.4) ile şekil değiştirme hızı/kayma gerilmesi (Şekil 2.5) grafikleri aşağıda verilmiştir.



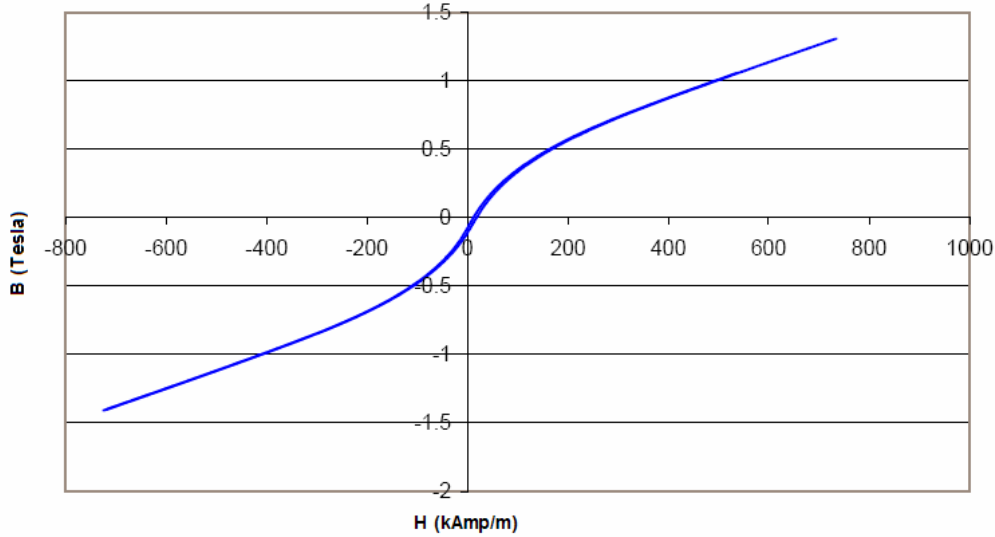
Şekil 2.4. MRF-122-ED'nin manyetik alan şiddeti ( $H$ )–akma gerilmesi grafiği ( $\tau_y$ ) [13]



Şekil 2.5. MRF-122-ED'nin şekil değiştirme hızı ( $\dot{\gamma}$ )–kayma gerilmesi grafiği ( $\tau$ ) [13]

Bir başka önemli özellik ise, MR sıvıdaki manyetik alan şiddeti ile manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişkidir. Şekil 2.6'da bu duruma ait grafik verilmiştir. Dikkat edilirse küçük manyetik alan şiddetinde eğim daha fazladır. Bir başka ifade ile yaklaşık 100 kA/m'lik manyetik alan şiddetine kadar oluşturulan manyetik akı

verimi yüksektir. Ancak manyetik alan şiddeti arttıkça, bu enerji ile oluşturulabilen manyetik akı yoğunluğu aynı oranda artmamaktadır.



Şekil 2.6. MRF-122-2ED'nin manyetik alan şiddeti ( $H$ )–manyetik akı yoğunluğu ( $B$ ) grafiği [13]

MR sıvılar elektro-reolojik (ER) sıvılar ile benzer yapıda olmakla birlikte, ER sıvılardan 20–50 kat daha güçlüdür. MR sıvılar ayrıca, doğrudan düşük gerilimli güç kaynaklarından beslenebilmektedir. Kirleticiler ile yüksek ve düşük sıcaklıklara karşı da çok daha az duyarlıdır. MR sıvı teknolojisi, geleneksel elektro–mekanik ürünlere göre daha esnek kontrol yetenekleri ile çok daha az karmaşık ve daha güvenli tasarım imkanı sunmaktadır.

MR sıvılar basınç altında da çalışabilmektedir. Sismik damper uygulamalarında statik basınç 17 MPa'a kadar çıkabilmektedir. Silikon esaslı olanlar 344 MPa gibi çok yüksek basınç gerektiren uygulamalarda kullanılabilir. Ancak, bu basınçlarda etkin hacim yüzdesini belirleyen hacimsel sıkıştırılabilirlik dikkate alınmalıdır. 172 MPa'da Silikon esaslı MR sıvılar % 10 oranında sıkışırken, Hidrokarbon esaslı olanlar bunun yarısı oranında sıkışmaktadır.

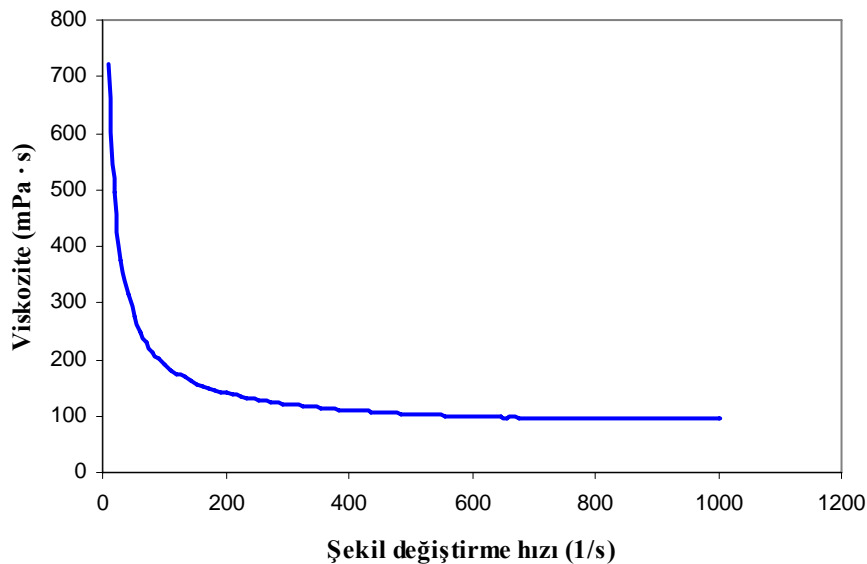
MR sıvıların çalışma sıcaklığı aralığı sıvının tipine göre farklılık göstermektedir. Yağ ve Silikon esaslı sıvılar tipik olarak -40 °C ila 150 °C arasında çalışabilmektedir. Su esaslı olanlar için çalışma sıcaklığı aralığı 0 °C ila 70 °C arasında değişmektedir. Uygulama gereği kaçınılmaz olması durumunda donma noktasının altında çalışabilen



su esaslı sıvılar üretilebilmektedir. Ancak bu gibi durumlarda suyun buharlaşmasını engellemek için sıvı dış ortamdan tamamen yalıtılmalıdır

MR sıvıların yoğunlukları sıvının tipine göre değişmektedir. MR sıvılar Silikon, yağ ve su esaslı olmak üzere farklı taşıyıcı sıvılardan, farklı şekilde üretilmektedir. Bunun yanında demir içerikleri de sıvıdan sıvıya değişiklik gösterebilmektedir. Bu da sıvının yoğunluğunu önemli ölçüde etkilemektedir. LORD firmasının standart ürünü olan yağ esaslı MR sıvının yoğunluğu  $3 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Sıvıların yoğunlukları genel olarak  $2 \text{ g/cm}^3$ 'ten  $4 \text{ g/cm}^3$ 'e kadar değişmektedir.

MR sıvının viskozitesi taşıyıcı sıvının viskozitesi, parçacıkların hacimsel oranı, katkı maddelerinin tipi ve miktarı ile viskozitenin ölçüldüğü şekil değiştirme hızı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Sıvıdaki katkı maddeleri düşük şekil değiştirme hızlarında, şekil değiştirme hızının daha da azalmasıyla viskozitenin hızla artmasına neden olarak viskozite üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Tüm MR sıvılar incelen akışkan karakteri sergilemektedir. Bu da şekil değiştirme hızı arttıkça bu sıvıların görünür viskozitelerinin azalacağı anlamına gelmektedir. Bu azalma şekil değiştirme hızı kararlı bir değere ulaşıncaya kadar devam eder.



Şekil 2.7. MRF-132-AD'nin şekil değiştirme hızına bağlı viskozite değişimi grafiği [13]

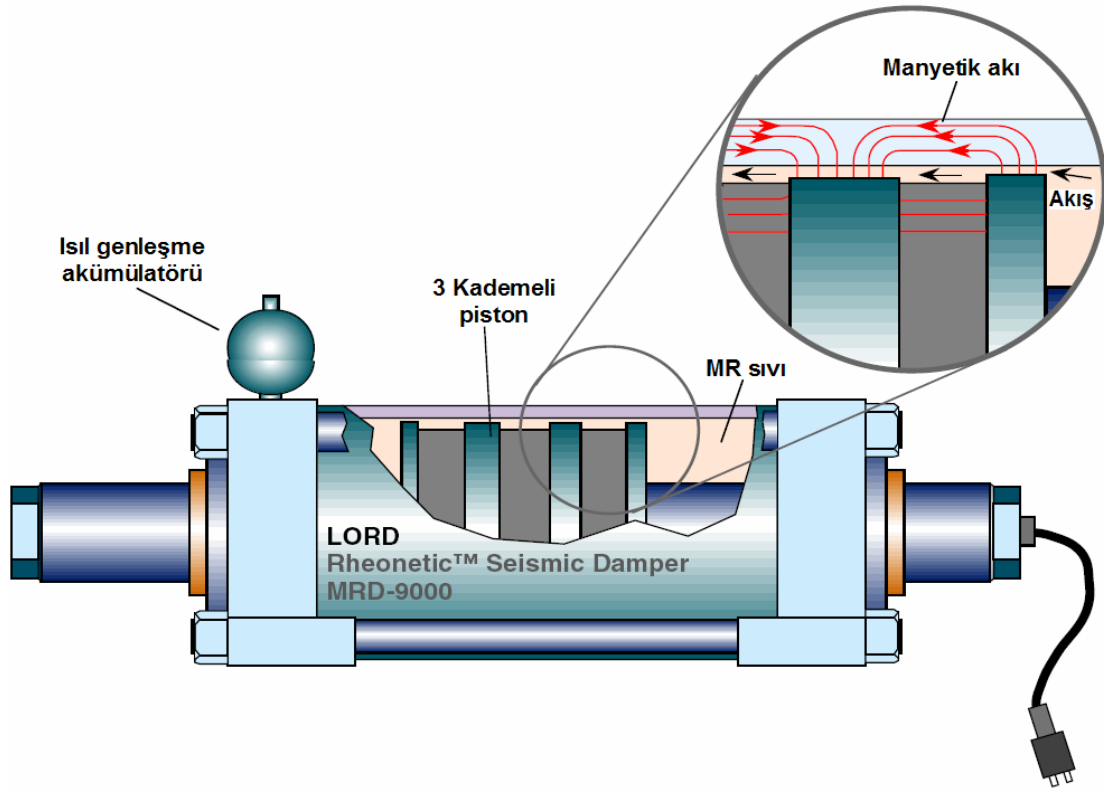
MR sıvılar içerdiği özel eklenti ve karışımlara rağmen hala bir miktar aşındırıcı özelliğe sahiptirler. Bu nedenle cihaz tasarımında bu etki dikkate alınmalıdır. MR

sıvı ile direk temasta olan keçe ve yataklar, çoğunlukla kritik aşınma bölgeleridir. Özellikle doğrusal hareket yapan sistemlerde bu aşınma etkisi çok daha fazla artmaktadır.

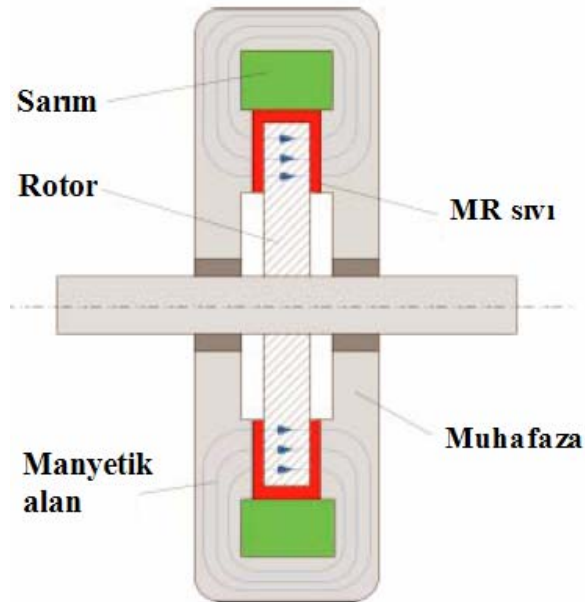
MR sıvılarda karşılaşılan diğer bir sorun ise zamanla yerçekimi etkisinin oluşturduğu çökelmedir. MR sıvıda, bulunduğu ortamda uzun süre hareket ettirilmediği takdirde MR sıvı cinsine göre bir çökelme görülmektedir. Bunun sonucunda yoğunluğu fazla olan demir molekülleri tabanda, diğer eklentilerde üstte birikmektedir. Örneğin, LORD firması tarafından yapılan laboratuvar gözlemlerinde MRF-122-ED kodlu sıvı için, 25 °C'de 6 aylık bir bekleme sonunda, 1 litrelik bir muhafaza kabında sıvı yüzeyinde yaklaşık % 20'lik açık renkte bir katman oluştuğu bildirilmektedir [13]. Dolayısı ile kullanımdan önce bu sıvıların, muhafaza kaplarında çok iyi çalkalanarak kullanıma hazır hale getirilmeleri gerekmektedir.

## 2.2. MR Sıvı Uygulamaları

MR sıvılar yaygın olarak damper uygulamalarında kullanılmaktadır. MR sıvılı damperler kısaca MR damper olarak adlandırılırlar ve araçlarda, genellikle otomobil süspansiyonları, kamyon koltukları ve yarış aracı süspansiyonlarında titreşim engelleyecisi olarak kullanılırlar. Bunların dışında, bina ve köprü gibi yapılarda rüzgar ve depremlerin neden olduğu hareketleri azaltmak üzere de kullanılmaktadırlar. Şekil 2.8'de LORD firması tarafından ticari olarak üretilen büyük ölçekli bir sismik damperin şematik görünüşü verilmiştir [13]. MR sıvıların bir başka uygulama alanı ise kavramalar, frenler ve tahrik mekanizmalarıdır. Şekil 2.9'da LORD firması tarafından ticari olarak üretilen MRB-2107-3 kodlu MR frenin şematik görünüşü verilmiştir [13]. Tüm bunlardan farklı olarak MR sıvılar, uçakların iniş takımlarından çamaşır makinalarına kadar genişleyen bir yelpazede kendilerine uygulama alanı bulabilmektedir.



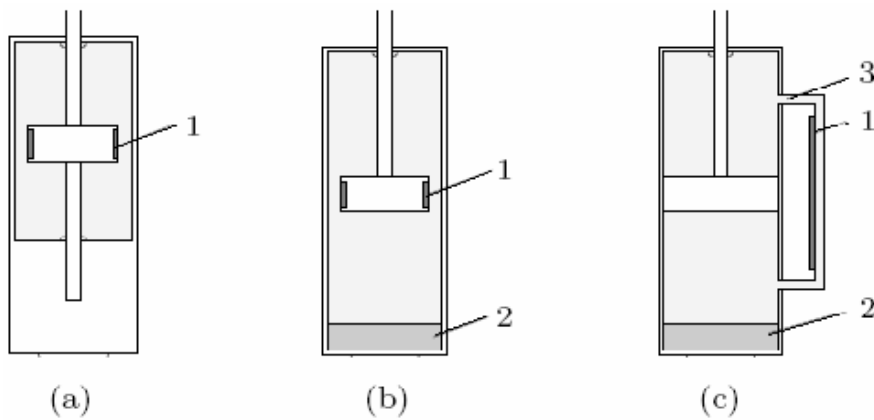
Şekil 2.8. LORD firması tarafından ticari olarak üretilen 20 ton'luk büyük ölçekli bir MR damperin şematik görünüşü [13]



Şekil 2.9. LORD firması tarafından ticari olarak üretilen bir MR frenin şematik görünüşü [13]

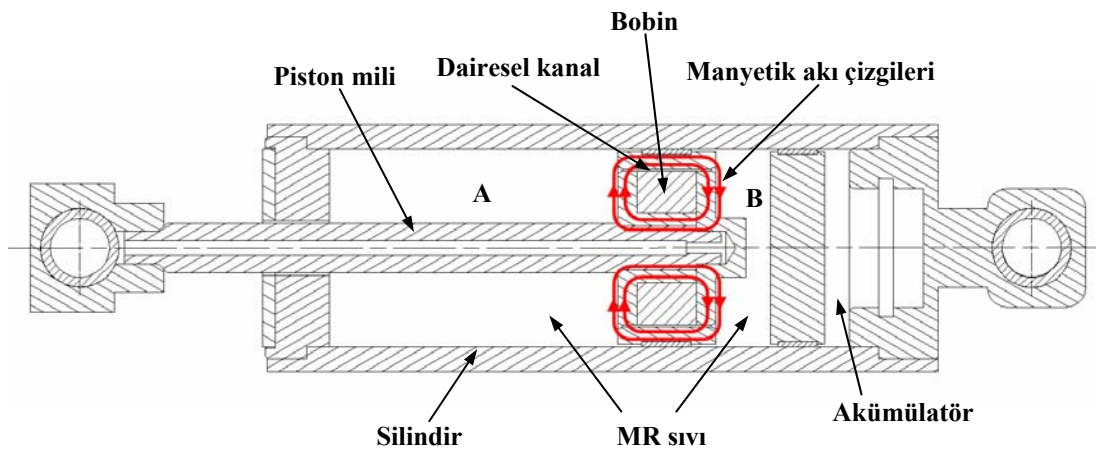
### 2.3. MR Damperler ve Çalışma Prensipleri

MR damperlerin mevcut tasarımlarında, genel olarak bir silindir ve bu silindiri iki odacığa ayıran bir piston bulunmaktadır. Odacıklar arası sıvı geçişi, manyetik alanın uygulandığı bir kanaldan yapılırsa, manyetik alanın uygulanması ile MR sıvının görünür viskozitesi artacağından sıvı geçişi zorlaşacak, dolayısıyla akıma bağlı bir tepki kuvveti oluşturulmuş olacaktır. Şekil 2.10'da bu iki odacık arasındaki sıvı geçişinin tipine göre, üç tip MR damper konstrüksiyonu gösterilmektedir.



Şekil 2.10. MR damper tipleri: 1–Manyetik alanın oluştuğu kısım, 2–Akümülatör, 3–Yan geçiş kanalı (by-pass kanalı)

Şekil 2.11'de ise bu çalışmada tasarlanan MR damperin basitleştirilmiş kesit görünüşü verilmiştir.



Şekil 2.11. Tasarlanan MR damperin basitleştirilmiş kesit görünüşü

Damper tek milli ve akümülatörlüdür. Şekil 2.10'da gösterilen damperlerden (b) tipine uymaktadır. Silindir ortasına yataklanmış olan mil sağa ve sola hareket edebilmektedir. A ve B ile gösterilen kısımlarda MR sıvı bulunmaktadır. Mil hareket ettikçe, bir taraftaki sıvı piston kafası ile silindir arasındaki dairesel kanaldan diğer tarafa doğru geçer. Manyetik akı çizgileri akış yönüne dik gelecek şekilde manyetik alan uygulanması durumunda, MR sıvı zincir yapı oluşturarak akışa direnç gösterir ve sönümlenme kuvveti oluşturur. Bu, MR damperlerin çalışma prensibinin temelini oluşturmaktadır.

### 2.3. MR Damperlerin Avantajları

Genel olarak, MR ve ER olmak üzere iki tip kontrol edilebilir sıvı bulunmaktadır. MR sıvıların en önemli avantajı, sıvıda oluşturulabilen yüksek manyetik enerji yoğunluğundan kaynaklanan yüksek dinamik akma gerilmeleridir. MR sıvılardaki enerji yoğunluğu demir parçacıklarının manyetik doygunluğu ile sınırlıdır. Tipik bir demir esaslı MR sıvının maksimum enerji yoğunluğu  $0.1 \text{ J/cm}^3$ 'tür. ER sıvıların enerji yoğunluğu ise dielektrik kırılma ile sınırlıdır ve  $0.001 \text{ J/cm}^3$ 'tür. Bu, MR sıvıların akma gerilmelerinin ER sıvılardan daha fazla olmasının başlıca nedenidir. Bununla birlikte her iki sıvı tipinin de viskozitesi hemen hemen aynıdır. ER sıvılarda elde edilen akma gerilmesi 2–5 kPa dolaylarında iken, MR sıvılarda bu değer 100 kPa'lara kadar çıkabilmektedir. MR sıvıların bu özelliği küçük boyutlarda, geniş dinamik akma gerilmesi aralığına sahip cihazlar tasarlamaya olanak tanımaktadır. Literatürde kontrol edilebilir sıvılı cihazlardaki minimum etkin sıvı hacminin plastik viskozite ile doğru; maksimum akma gerilmesinin karesi ile ters orantılı olduğu belirtilmektedir. Aynı mekanik performansı elde etmek üzere MR cihazlarla ER cihazlar karşılaştırıldığında, MR cihazlarda gerekli olan minimum etkin sıvı hacmi ER cihazlardakinin yarısı kadardır. Bu da şüphesiz MR cihazın boyutunun ER cihaza oranla çok daha küçük olacağı anlamına gelmektedir.

MR sıvılar akma gerilmelerinde çok az bir değişimle  $-40$  ila  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  aralığında çalışabilmektedir. Bu, manyetik polarizasyonun sıcaklıktan pek etkilenmediği gerçeğiyle açıklanabilir. Bunların yanında, MR sıvılar imalat, montaj ve kullanım sırasında yaygın olarak karşılaşılan kirleticilere karşı da duyarsızdır. Üstelik, manyetik polarizasyon yüzey–aktif maddelerden ve eklentilerden etkilenmediğinden,

MR sıvılarda parçacıkların çökmesini engellemek ve parçacık/taşıyıcı sıvı oranını belirli bir düzeyde kararlı halde tutmak daha kolaydır. Bunun yanında, yine elektro-kimya, manyetik polarizasyon mekanizmasını etkilemediğinden, MR sıvılara kararlılığı, sızdırmazlık elemanlarının ve yataklama elemanlarının ömrünü arttırmak üzere aşınmayı önleyici, yağlayıcı özellikte katkı maddeleri eklenebilmektedir. Şüphesiz bu, büyük bir avantajdır.

Uygulama açısından bakıldığında, MR ve ER cihazların güç gereksinimleri hemen hemen aynı olsa da, sadece MR cihazlar yaygın düşük voltajlı güç kaynakları ile kolaylıkla beslenebilmektedir. MR cihazlar için 1–2 A'lık çıktı alınabilecek düşük voltajlı, akım sürücülü güç kaynakları yeterli iken, ER cihazlar için yüksek voltajlı güç kaynaklarına gereksinim duyulmaktadır (genellikle 2000–5000 V). Bu durum ER cihazların özellikle deprem uygulamalarında büyük zorlukları beraberinde getirmektedir. Dahası, bu denli yüksek voltaj insan sağlığı açısından da büyük bir tehlike arz etmektedir. Tablo 2.2'de MR ve ER sıvıların bazı önemli özellikleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Tablo 2.2. MR ve ER sıvıların özelliklerinin karşılaştırılması [23]

Özellik	MR sıvılar	ER sıvılar
Maksimum akma gerilmesi, $\tau_y$	50–100 kPa	2–5 kPa
Maksimum manyetik, $H$ / Elektrik alan şiddeti, $E$	~250 kA/m	~4 kV/mm
Görünür plastik viskozite, $\mu$	0.1–10 Pa·s	0.1–1 Pa·s
Çalışma sıcaklığı aralığı	-40–150 °C	10–90 °C
Kararlılık	Çoğu kirlere etkilenmez	Kirlere etkilenir
Yoğunluk	3–4 g/cm <sup>3</sup>	1–2 g/cm <sup>3</sup>
$\mu / \tau_y^2$	10 <sup>-11</sup> –10 <sup>-10</sup> s/Pa	10 <sup>-8</sup> –10 <sup>-7</sup> s/Pa
Maksimum enerji yoğunluğu	0.1 J/cm <sup>3</sup>	0.001 J/cm <sup>3</sup>
Güç gereksinimi (tipik olarak)	2–50 V, 1–2 A	2000–5000 V, 1–10 mA

### BÖLÜM 3. MR DAMPER TASARIMI

Bu bölümde bir MR damperin tasarım aşamaları hakkında genel bir bilgi verildikten sonra, damperin elektromanyetik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma şartlarının belirlenmesi, çalışma şartları ve sınırlamalarına göre uygun strok ve sönüm kuvveti aralığının belirlenmesi, damper geometrisinin belirlenmesi, belirlenen damper geometrisine göre akış, manyetik alan ve mukavemet analizlerinin yapılması, yapılan analiz sonuçlarına göre damperin boyutlandırılması, ilk prototipin imalatı, testlerin gerçekleştirilmesi, test sonuçlarının yorumlanması ve doğrulama genel olarak bir MR damperin tasarım aşamalarını oluşturmaktadır.

MR damperlerde oluşan tepki kuvveti, MR sıvı içinde asılı halde bulunan demir parçacıklarının, uygulanan manyetik alan sonucunda manyetik akı çizgileri doğrultusunda dizilerek bir zincir yapı oluşturmaları ve böylece akışa karşı bir direnç göstermelerinden kaynaklanır. Manyetik alanın şiddetine bağlı olarak oluşan bu mikro yapıyı yenmek için gerekli mekanik enerji de artacak ya da azalacaktır. Manyetik alan bulunmadığında, MR sıvılar Newton tipi akış davranışı sergiler. Kontrol edilebilen MR sıvı davranışı genellikle değişken akma gerilmeli Bingham plastik modeli ile temsil edilir:

$$\tau = \tau_y(H) + \mu \frac{du}{dr}, \quad \tau < \tau_y \quad (3.1)$$

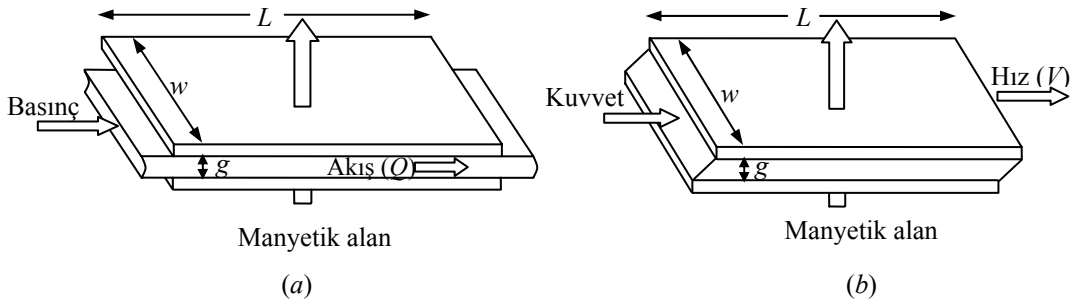
Bu ifadede  $\tau$  kayma gerilmesini,  $\tau_y$  akma gerilmesini,  $H$  uygulanan manyetik alanın şiddetini ve  $\mu$  akışkanın manyetik alandan bağımsız olan plastik viskozitesini göstermektedir. Plastik viskozitenin değeri, akışkanın, kayma gerilmesi ( $\tau$ )–şekil değiştirme hızı ( $du/dr$ ) değişiminin eğiminden hesaplanır. Akma gerilmesi değerinin altında (şekil değiştirmenin  $10^{-3}$  olduğu bölgelerde), sıvı viskoelastik olarak davranmaktadır:

$$\tau = G \frac{du}{dr}, \quad \tau < \tau_y \quad (3.2)$$

Burada  $G$  kompleks malzeme modülüdür. Literatürde kompleks modülün de manyetik alana bağlı olduğu belirtilmektedir. Gerçek MR sıvı davranışı Bingham plastik modelinden önemli farklılıklar göstermektedir. Belki de bu farklılıkların en önemlisi, MR sıvının manyetik alan uygulanması durumunda Newton tipi olmayan akış özelliği sergilemesidir. Bununla birlikte, uygun biçimde kullanıldığında Denklem 1, MR sıvılı sistemlerin tasarımı için oldukça faydalıdır.

### 3.1. Genelde Kullanılan Cihaz Geometrileri

MR sıvı teknolojisini kullanan çoğu cihaz, sabit kutuplu (akışın basınç farkıyla gerçekleştiği tip) ya da bağlı hareketli kutuplu (doğrudan kaymalı tip) olmak üzere sınıflandırılabilir. Bu iki tipe ait diyagramlar Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kontrol edilebilir sıvılı cihazların temel çalışma tipleri: (a) Akışın basınç farkıyla gerçekleştiği tip ve (b) Doğrudan kaymalı tip

Denklem 1’e uygun olarak, akışın basınç farkı ile gerçekleştirildiği çalışma tipinde basınç düşüşü, viskoz etkilerden kaynaklanan basınç düşüşü  $\Delta P_\mu$  ve uygulanan manyetik alana bağımlı akma gerilmesinden kaynaklanan basınç düşüşü  $\Delta P_\tau$ ’nin bir toplamı olarak kabul edilmektedir. Toplam basınç düşüşü,

$$\Delta P = \Delta P_\mu + \Delta P_\tau = \frac{12\mu QL}{g^3 w} + \frac{c\tau_y L}{g} \quad (3.3)$$

ile verilebilir. Burada  $L$ ,  $w$  ve  $g$  sırasıyla sabit kutuplar arasındaki kanalın uzunluğu, genişliği ve yüksekliği,  $Q$  hacimsel debi,  $\mu$  manyetik alan uygulanmadığı durumdaki sıvının viskozitesi,  $\tau_y$  ise manyetik alanın etkisiyle sıvıda gelişen akma gerilmesidir. Denklemdeki  $c$  parametresinin değeri, minimum değeri 2’den



( $\Delta P_\tau/\Delta P_\mu < 1$  için), maksimum değeri olan 3 ( $\Delta P_\tau/\Delta P_\mu > 100$  için) arasında değişir.

Benzer biçimde, doğrudan kaymalı çalışma tipinde gelişen kuvvet ise,

$$F = F_\mu + F_\tau = \frac{\mu VA}{g} + \tau_y A \quad (3.4)$$

olup burada  $V$  bağlı kutup hızı ve  $A = Lw$  olmak üzere kayma (kutup) alanıdır.

### 3.2. Etkin Sıvı Hacmi ve Cihazın En-boy Oranı

Denklem 3.3 ve 3.4 kontrol edilebilir sıvılı cihazların tasarımında oldukça kullanışlıdır. Ancak, bazı parametrelerin önemini tam olarak ortaya koymamaktadır. Bu nedenle minimum etkin sıvı hacmi  $\nabla$  kavramı ortaya atılmıştır. Bu, manyetik alanın etkisinde kalan sıvının hacmidir ve istenen MR etki bu hacim yoluyla sağlanır. Denklem 3.3 ve 3.4 üzerinde bir takım cebirsel işlemler yapılarak,

$$\nabla = k \left( \frac{\mu}{\tau_y^2} \right) \lambda W_m \quad (3.5)$$

ifadesi elde edilebilir. Bu ifadede  $k$  bir sabittir ve  $\nabla = Lwg$ , gerekli kontrol edilebilir güç seviyesi  $W_m$ 'de istenen kontrol oranı  $\lambda$ 'ya ulaşmak için gerekli etkin sıvı hacmidir. Akışın basınç farkıyla gerçekleştiği durum için  $k = 12/c^2$ ,  $\lambda = \Delta P_\tau/\Delta P_\mu$  ve  $W_m = Q\Delta P_\tau$ 'dir. Doğrudan kaymalı tip durumunda ise;  $k = 1$ ,  $\lambda = F_\tau/F_\mu$  ve  $W_m = F_\tau V$ 'dir. Her iki durumda da minimum etkin sıvı hacminin, MR sıvının malzeme özelliklerinin bir fonksiyonu olan  $\mu/\tau_y^2$ , istenen kontrol oranı ya da dinamik çalışma aralığı  $\lambda$  ve kontrol edilen mekanik güç yitimi  $W_m$  olmak üzere üç terimin çarpımıyla orantılı olduğuna dikkat ediniz. Denklem 3.5 her iki geometri için de  $\nabla = Lwg$  olduğu dikkate alınarak aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$wg^2 = \frac{12}{c} \left( \frac{\mu}{\tau_y} \right) \lambda Q \quad (\text{akışın basınç farkıyla gerçekleştiği tip}) \quad (3.6)$$

$$g = \left( \frac{\mu}{\tau_y} \right) \lambda V \quad (\text{doğrudan kaymalı tip}) \quad (3.7)$$

### 3.3. Tasarımda Dikkat Edilmesi Gereken Diğer Hususlar

Yukarıdaki denklemler MR sıvının özellikleri hakkında bilgi sahibi olmayı gerektirmektedir.  $\mu$  ve  $\tau_y$  üretici firma tarafından sağlanan MR sıvı teknik bilgilerinden, sırasıyla şekil değiştirme hızının ( $du/dr \cong V/g$  ya da  $du/dr \cong Q/wg^2$ ) ve manyetik akı yoğunluğunun fonksiyonu olarak bulunabilir. Bunun yanında, bu özellikler (özellikle viskozite) sıcaklığın bir fonksiyonu olabilir. Bu, tasarımcının önceden cihazın hangi şartlarda çalıştırılacağını bilmesini ve dolayısıyla yukarıdaki denklemlerde uygun sıvı özelliklerini kullanmasını gerektirir. Örneğin, MR sıvı kaymada önemli miktarda incelme özelliği gösterir. Bu da, artan şekil değiştirme hızıyla viskozitenin azaldığı anlamına gelmektedir. Bu yüzden, tasarımcı şekil değiştirme hızı  $du/dr$ 'ye, dolayısıyla aslında cihazda beklenen ortalama (ya da maksimum) hız  $V$ 'ye veya debi  $Q$ 'ya karşılık gelen uygun viskozite değeri  $\mu$ 'yü kullanarak gerekli etkin sıvı hacmini hesaplamalıdır.

MR cihazlar, MR sıvı, manyetik doygunluğa (en azından yaklaşık olarak) ulaşacak şekilde tasarlanır. Ancak bu şart altında sıvı maksimum akma gerilmesi  $\tau_y$ 'i oluşturacaktır. Bununla birlikte, yukarıdaki denklemlerde kullanılacak olan  $\tau_y$ , beklenen çalışma şartını sağlayacak şekilde MR sıvı teknik bilgilerinden seçilmelidir. Dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta da, cihazların dinamik çalışma aralığının MR sıvının viskoz özelliklerini içerdiğidir (yani,  $\tau_y$  ve  $\mu$ ). Gerçekte, dinamik çalışma aralığı kuru sürtünme veya yatak sürtünmesi gibi cihazın diğer özelliklerinin güçlü bir fonksiyonu olabilir. Sonuç olarak, tasarımcı yukarıdaki denklemlere dayanarak dinamik çalışma aralığını 20 olarak hesapladığını düşünse de, sürtünme ve diğer bozucu etkiler bu aralığı oldukça değiştirebilir.

### 3.4. MR Valf Tasarımı

Dairesel kanallı yaygın bir MR valf geometrisi Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Çoğu valf uygulamalarında  $W_m$  ve  $du/dr$  belirtilir. Bu örnekte aşağıdakilerin verildiğini kabul edelim:

$$W_m = 30 \text{ W (örneğin, } \Delta P_\tau = 2 \text{ MPa ve } Q_{\text{maks}} = 15 \text{ cm}^3/\text{s)}$$

$$du/dr = 20 \text{ (örneğin, } \Delta P_\mu = 0.1 \text{ MPa)}$$

$$d = 25 \text{ mm}$$

Bunların dışında, manyetik devrenin MR sıvıyı manyetik doygunluğa ulaştıracak şekilde tasarlandığını ve  $Q_{\text{maks}}$ ’ta oluşacak şekil değiştirme hızının yaklaşık olarak bilindiğini kabul edelim. Bu bilgiler doğrultusunda, MR sıvının teknik bilgilerinden, sıvıya ait uygun parametreler seçilir. Bu örnek için aşağıdaki parametrelerin seçildiğini kabul edelim:

$$\tau_y = 50 \text{ kPa ve } \mu = 0.25 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

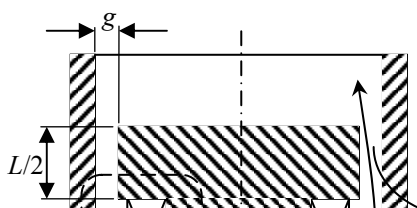
Bundan sonraki hedef, yukarıda belirtilen şartları karşılamak üzere kanalın uzunluğu  $L$  ve yüksekliği  $g$ ’nin belirlenmesidir. Eğer kanal yüksekliği çaptan çok küçükse ( $g/d \ll 1$ ), bu durumda genişlik  $w = \pi d$  şeklinde ele alınabilir. Denklem 3.3’teki  $c$  parametresi 2.5 olarak alınırsa, etkin sıvı hacmi  $\nabla \approx \pi dgL$  Denklem 3.5’ten aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

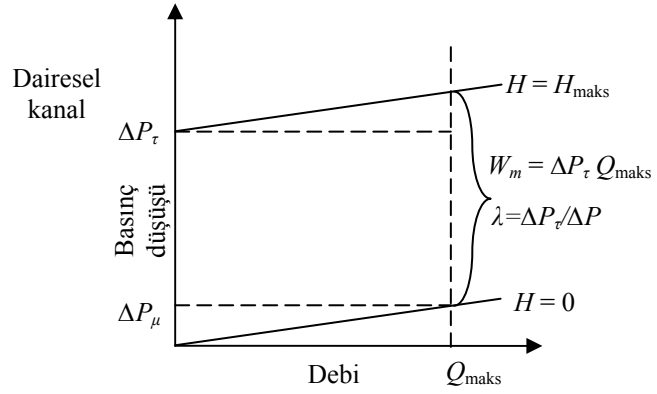
$$\nabla = 1.9(0.25 \text{ Pa} \cdot \text{s}) / (50000 \text{ Pa})^2 (20)(30 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}) = 0.12 \times 10^{-6} \text{ m}^3 = 0.12 \text{ cm}^3$$

Bu durumda  $L$  ve  $g$  Denklem 3.6 ve 3.5’ten, sırasıyla,

$$L = 4.9 \text{ mm ve } g = 0.3 \text{ mm}$$

olarak bulunur. Buradaki analizde sarıma komşu akış bölgesindeki viskoz direnç hesaba katılmamıştır. Bu durum, Denklem 3.3’teki viskoz bileşen  $\Delta P_\mu$ ’deki  $L$  uzunluğuna uygun bir değer verilerek hesaba katılabilir. Bu basit analiz, içinde MR valf bulunan bir MR cihazı boyutlandırma oldukça kullanışlıdır. Daha detaylı analiz için, manyetik devre tasarımı ile akış geometrisi tasarımı arasında hesaplar dögüsel olarak tekrarlanmalıdır.





Şekil 3.2. Dairesel kanallı MR valf geometrisi ve beklenen performans grafiği

### 3.5. Manyetik Devre Tasarımı

Amaçlar:

- Manyetik akıyı, etkin manyetik sıvı (örneğin, MR valfte dairesel kanal boşluğundaki sıvı) bölgesine doğru yönlendirmek ve odaklamak üzere etkin bir manyetik devre tasarlamak.
- Çelikteki ve etkin olmayan diğer sıvı bölgelerindeki enerji kaybını en düşük seviyeye indirerek, etkin manyetik sıvıda manyetik alan enerjisini en yüksek seviyeye çıkarmak.
- Çelikteki manyetik alan şiddeti  $H$ 'yi en düşük seviyede tutmak üzere, manyetik devredeki toplam çelik miktarını da en aza indirmeye çalışarak gerekli en-kesit alanını belirlemek.

Göz önüne alınması gereken faktörler:

- Çeliğin ve sıvının doğrusal olmayan manyetik özellikleri
- Manyetik akının saçaklanması
- Sınırlardaki ve birleşim noktalarındaki muhtemel kayıplar
- Voltaj, akım ve/veya endüktanstaki sınırlamalar
- Girdap akımları

Çelik türü:

- Yüksek manyetik geçirgenlik ve doyuma sahip düşük karbonlu çelik kullanılmalıdır.

- İdeal olarak, çeliğin karbon içeriği % 0.15'ten daha düşük olmalıdır.
- AISI-12L14, AISI-1008, AISI-1010 ve AISI-1018 çelik tipleri uygundur.

Manyetik Sonlu elemanlar analizi:

Manyetik tasarımın tam bir optimizasyonu, sadece doğrusal olmayan malzeme özelliklerini ele alabilen bir manyetik sonlu eleman yazılımı ile gerçekleştirilebilir.

Tipik tasarım süreci:

1. İstenen akma gerilmesini ( $\tau$ ) elde etmek için MR sıvıdaki çalışma noktasının, yani  $H_s, B_s$  değerlerinin belirlenmesi.

Toplam manyetik akı,  $\phi = B_s A'_s$  olup burada  $A'_s$  saçaklanmadan dolayı etkin kutup alanıdır.

2. Manyetik akı sürekliliği denkleminde yararlanılarak manyetik devre boyunca olan manyetik akı yoğunluğu  $B$  'nin belirlenmesi.

$$\phi_{\text{sıvı}} = \phi_{\text{çelik 1}} = \phi_{\text{çelik 2}} = \dots$$

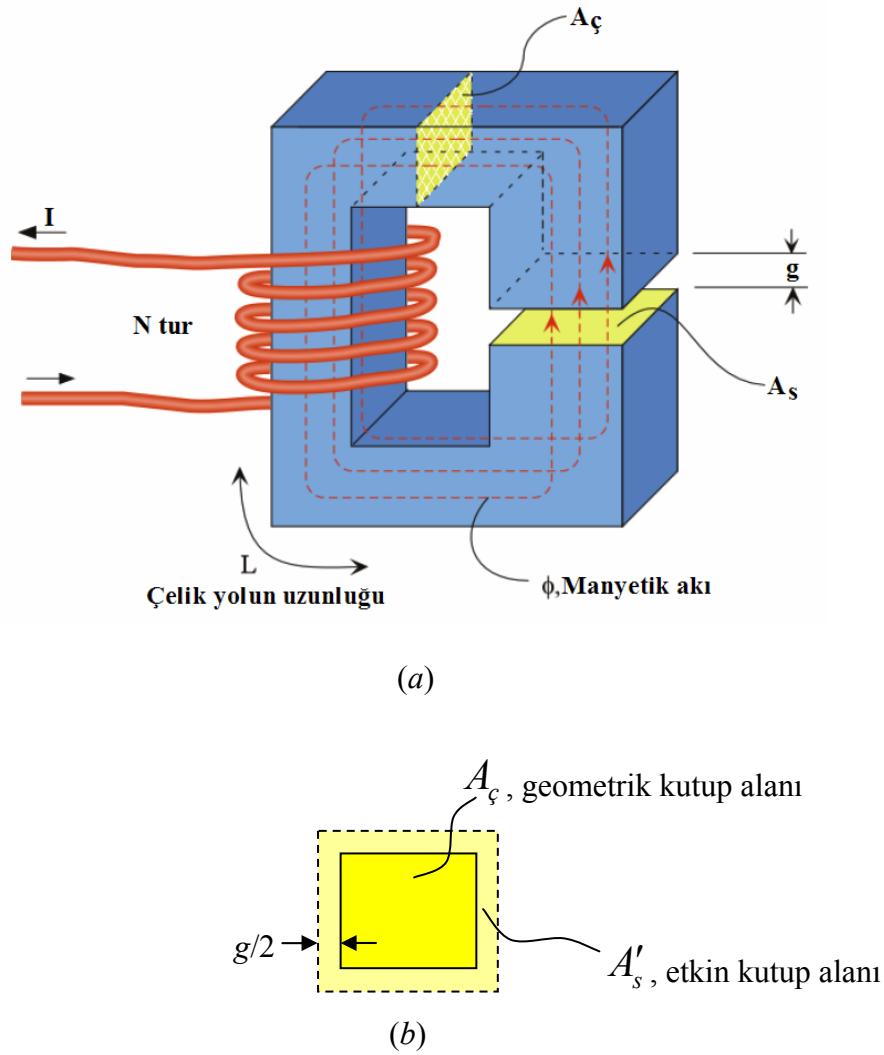
3. Çelikteki çalışma noktasının belirlenmesi (Devre boyunca en-kesit alanının değişmesi durumunda bu çalışma noktası da değişecektir).

$$B = \phi_{\text{çelik}} / A_{\text{ç}} = B_s A'_s / A_{\text{ç}}$$

Çeliğe ait  $BH$  eğrisinden  $H_{\text{ç}}$  'nin belirlenmesi.

4. Kirchoff'un manyetik devre yasasından yararlanmak suretiyle gerekli amper-tur'un ( $NI$ ) belirlenmesi.

$$NI = \int H dl, \quad NI = \sum H_i L_i \quad \text{veya} \quad NI = \sum H_s g + H_{\text{ç}} L$$



Şekil 3.3. Temel bir manyetik devre: (a) Sarım geometrisi ve (b) Manyetik alanın saçaklanması

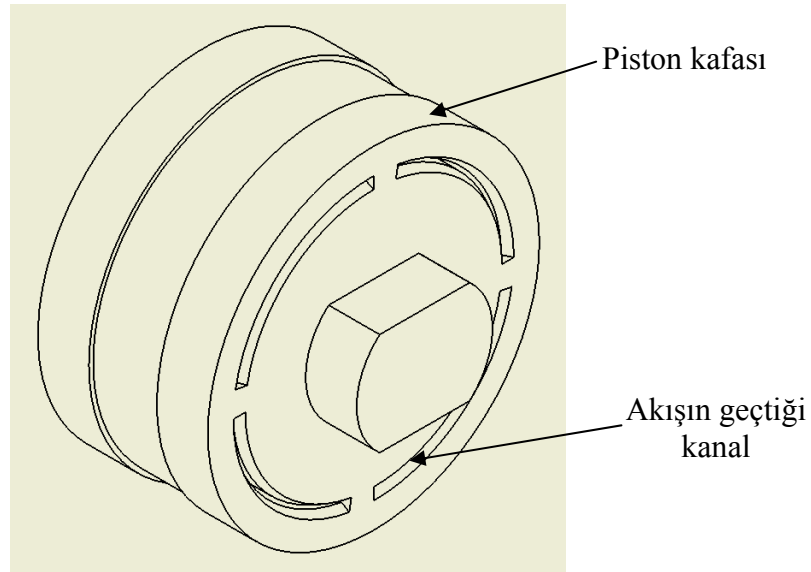
Manyetik devre tasarımı sonucunda hesaplanan parametreler değerleri ile birlikte Tablo3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Manyetik devre tasarımı sonucunda belirlenen parametre değerleri

Parametre	Değeri	Birimi
Maksimum verilen güç	5.8	W
Çalışma akımı şiddeti	1	A
Sarım sayısı	335	tur
Bobin telinin direnci	5.8	ohm
Bobin telinin çapı	0.35	mm
Bobin sayısı	1	adet
Bobinin iç çapı	16	mm
Bobinin genişliği	10	mm

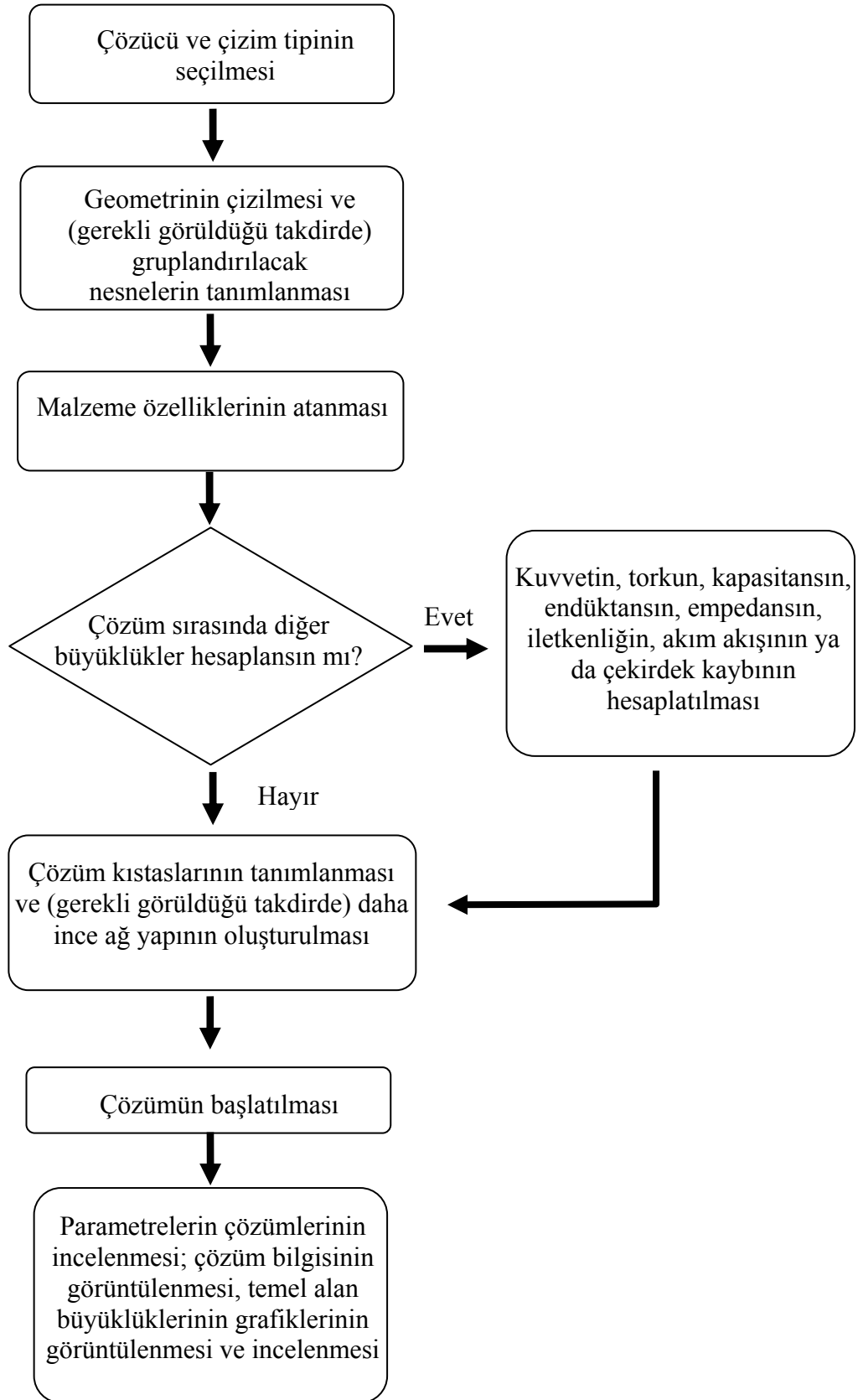
### 3.6. Elektromanyetik Analiz

Akışın piston üzerinde her bir dördüde  $80^\circ$  açı yapacak ve 0.4 mm kalınlığında olacak şekilde açılan çevresel kanallardan olduğu tasarımın manyetik alan analizleri Ansoft firmasına ait MAXWELL SV yazılımı kullanılarak yapılmıştır [24] (Şekil 3.4).



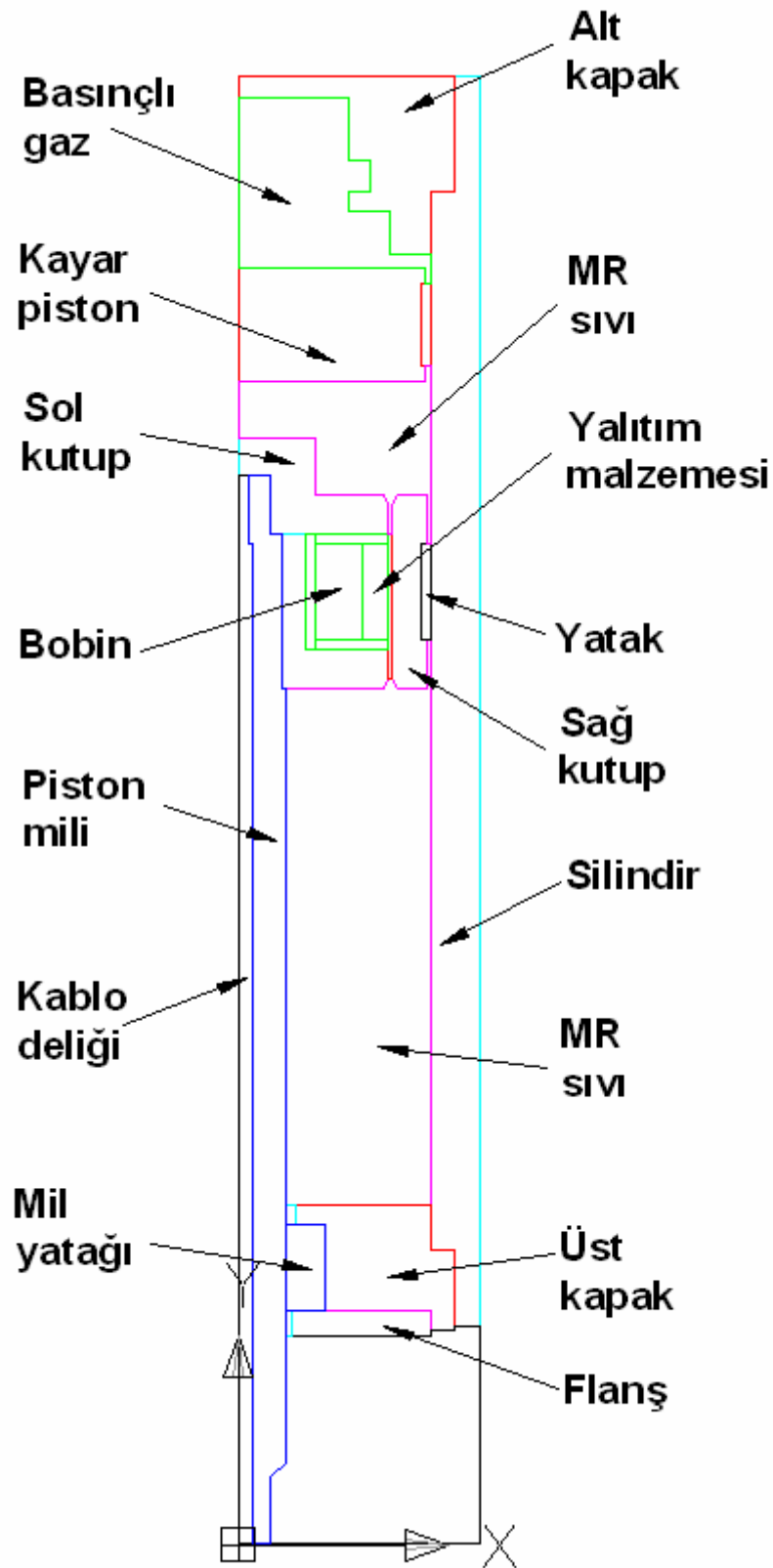
Şekil 3.4. Piston üzerine açılan çevresel kanallar

Yapılan analizler MAXWELL SV yazılımının çözüm algoritması ile birlikte bu kısımda ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Şekil 3.5'teki diyagramda gösterildiği gibi MAXWELL SV'da analizin ikinci aşamasını geometrinin çizilmesi oluşturmaktadır. Her ne kadar yazılım kullanıcıya kendi bünyesinde çizim yapabilme olanağı sunuyor olsa da karmaşık geometrilerin çizimi için bu yol kullanışlı olmaktan çıkmaktadır. Bu durumda, geometri ayrı bir çizim programında çizilerek MAXWELL SV'a çağrılmalıdır. Yapılan analizde geometriler, ayrı bir CAD programında çizildikten sonra MAXWELL SV'a alınmıştır. Şekil 3.6'da analiz için oluşturulan damper geometrisi kısımları ile birlikte gösterilmiştir. Daha sonra, malzeme tanımlamaları aşamasında ise listede olmayan MRF-122-2ED kodlu MR sıvının tanımlaması yapılmıştır. Bunun için gerekli olan Manyetik akı yoğunluğu ( $B$ )–Manyetik alan şiddeti ( $H$ ) değerleri, üretici firma olan LORD'dan temin edilerek MR sıvının doğrusal olmayan manyetik özellikleri programa tanıtılmıştır (bkz. Şekil 2.6).



Şekil 3.5. MAXWELL SV yazılımının çözüm prosedürü

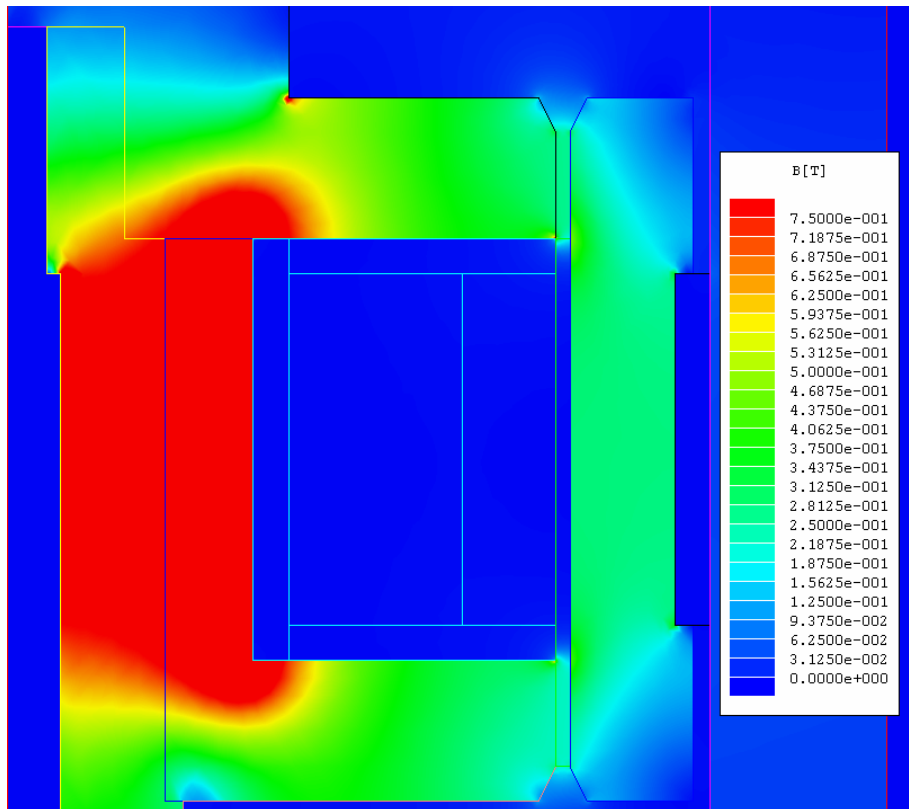




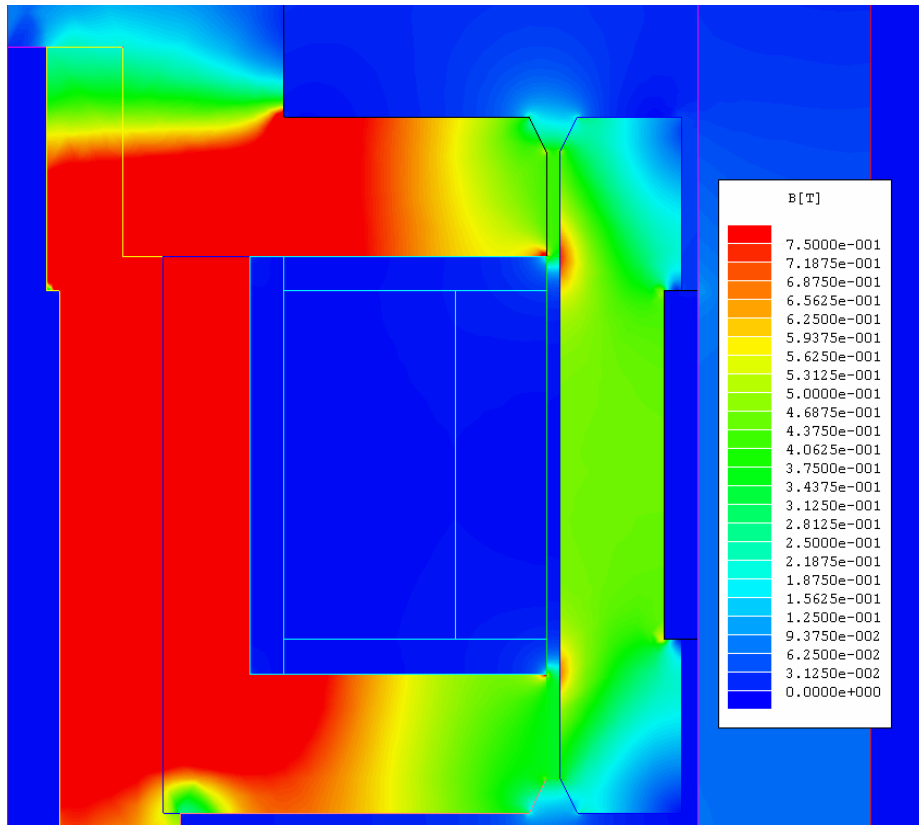
Şekil 3.6. MAXWELL SV'a aktarılmak üzere çizilen kayar pistonlu damper geometrisi ve kısımları

Analizler 335 tur'luk bobin için 0 ila 2 A arasında farklı akım değerlerine ait manyetik alan kaynağı girilerek gerçekleştirilmiştir. Örneğin, 1 A için 335 Amper-tur'luk, 0.5 A için 167.5 Amper-tur'luk manyetik alan kaynakları girilmiştir.

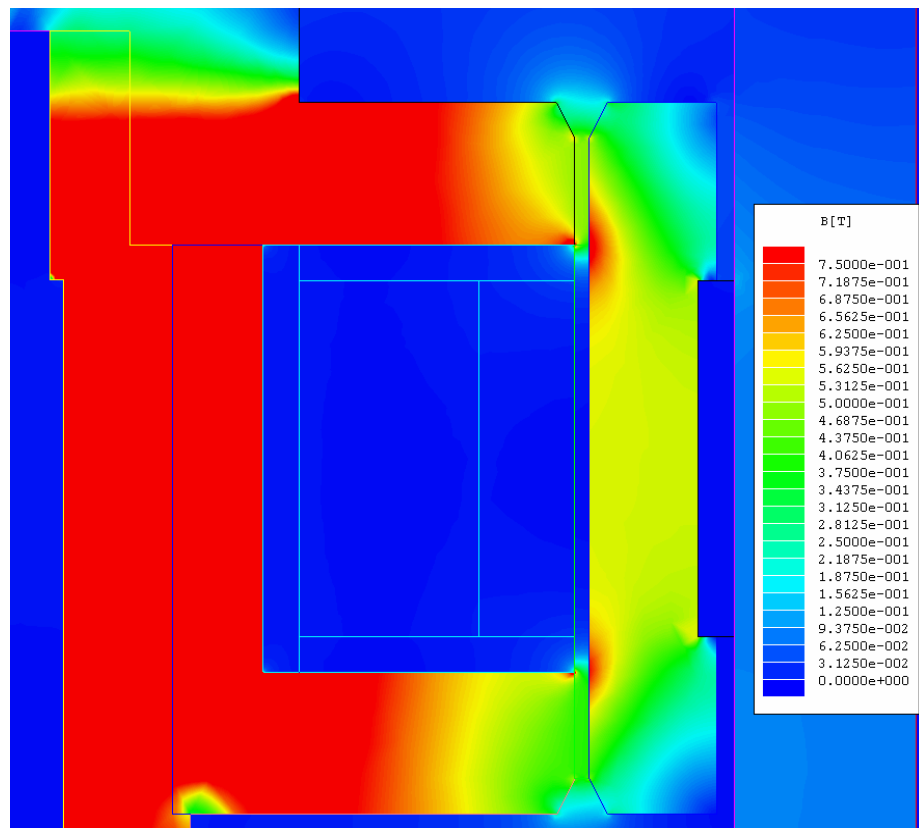
Şekil 2.5'ten görüleceği gibi manyetik akı yoğunluğu manyetik alan şiddeti ile 0.5 Tesla değerine kadar doğrusal olarak değişmektedir. Bu nedenle bu aralık çalışma aralığı olarak belirlenmiştir. Yapılan manyetik alan analizleri sonucunda incelenen parametrelerin, Şekil 3.7–3.12'te de gösterildiği gibi bu sarım değerinde istenen aralıkta olduğu görülmüştür.



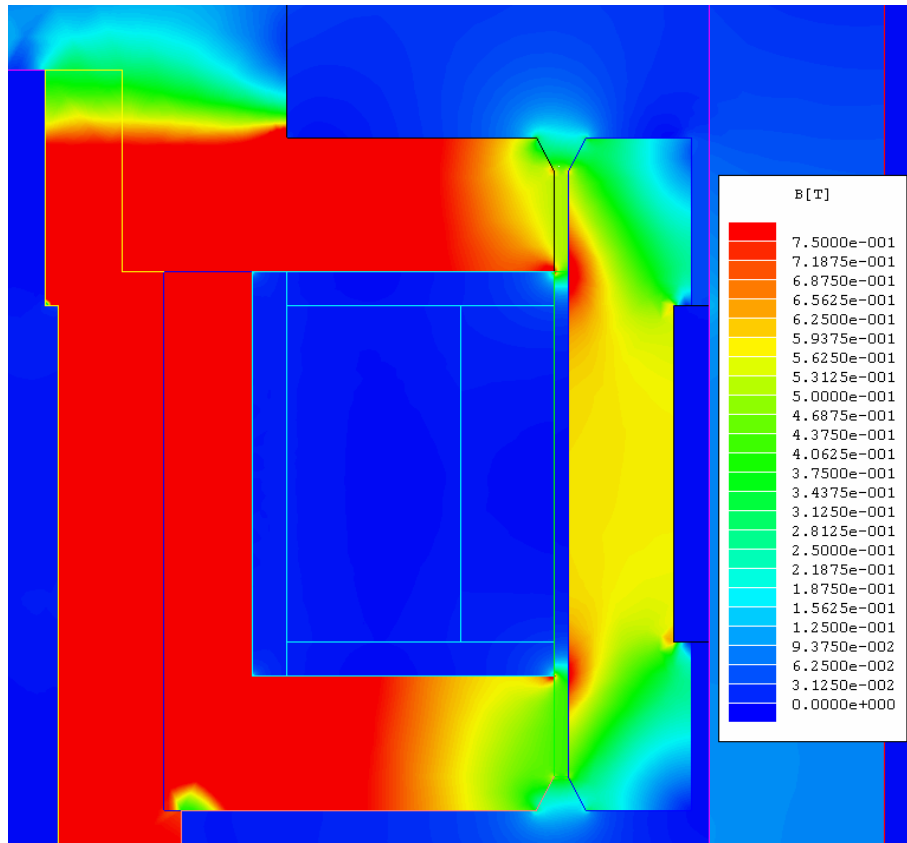
Şekil 3.7. 64 Amper–tur'da damperin kutup başında oluşan manyetik akı yoğunluğu



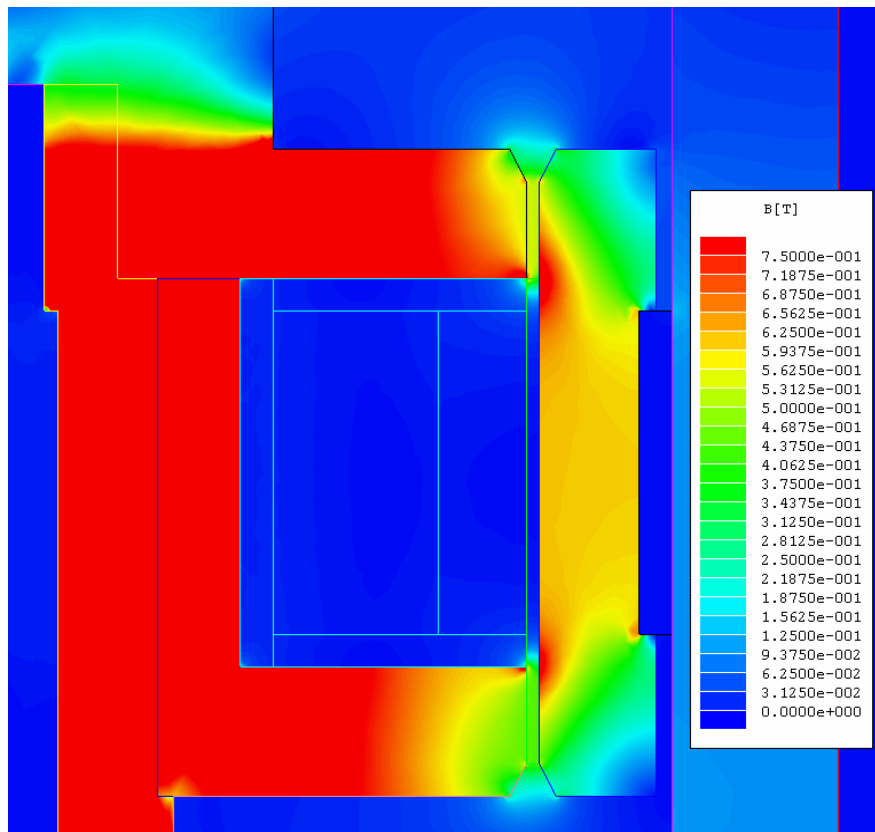
Şekil 3.8. 134 Amper-tur'da damperin kutup başında oluşan manyetik akı yoğunluğu



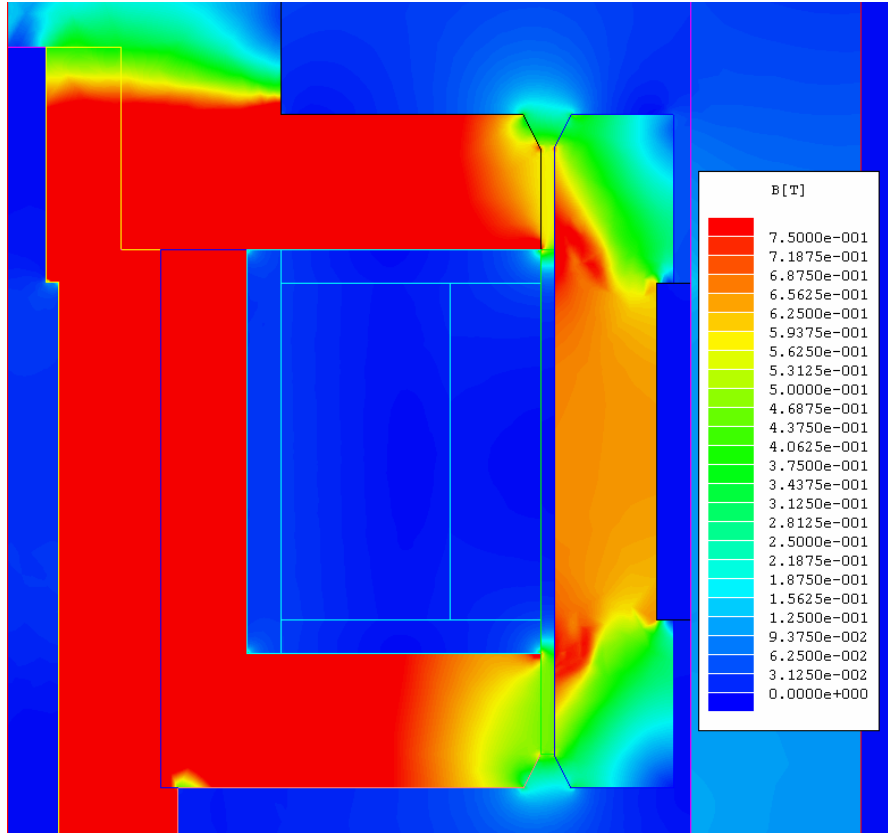
Şekil 3.9. 201 Amper-tur'da damperin kutup başında oluşan manyetik akı yoğunluğu



Şekil 3.10. 268 Amper-tur'da damperin kutup başında oluşan manyetik akı yoğunluğu



Şekil 3.11. 335 Amper-tur'da damperin kutup başında oluşan manyetik akı yoğunluğu

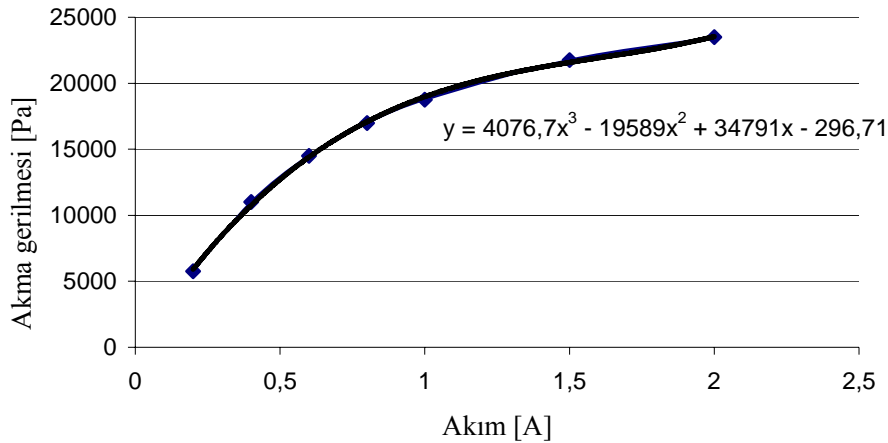


Şekil 3.12. 503 Amper-tur'da damperin kutup başında oluşan manyetik akı yoğunluğu

Manyetik alan simülasyonlarına ait sonuçlar toplu halde Tablo 3.2'de sunulmuştur. Uygulanan akıma bağlı olarak akışkanın akma gerilmesi değişimi ise Şekil 3.13'te verilmiştir. Artan akım değerine bağlı olarak akışkanın kayma gerilmesinin hızla arttığı gözlenmektedir. Bu da MR damperler için eşsiz bir kontrol edilebilirlik sağlamaktadır. Akma gerilmesinde meydana gelen artışın önce yüksek sonra gittikçe azalan bir eğilim gösterdiğine dikkat ediniz.

Tablo 3.2. Manyetik alan simülasyonu sonucunda uygulanan akıma göre elde edilen akma gerilmesi değerleri

$I$ [A]	$\tau_y$ [Pa]
0.2	~5750
0.4	~11000
0.6	~14500
0.8	~17000
1.0	~18750
1.5	~21750
2.0	~23500



Şekil 3.13. Tasarlanan MR damperin akım ( $I$ )–akma gerilmesi ( $\tau_y$ ) ilişkisi

### 3.7. Damperin Boyutlandırılması

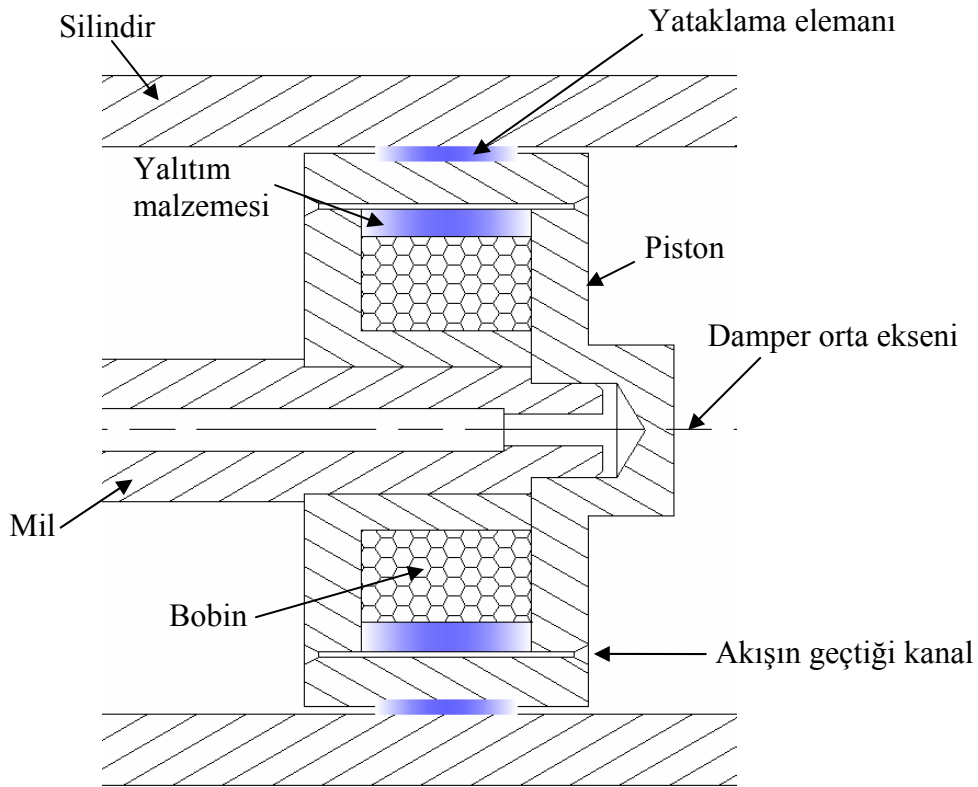
Bu bölümde bahsedilen tüm hesaplama kriterlerinin yanında damper içerisindeki akış sanki–statik akış analizi (bkz. Bölüm 4) ile incelenerek hesaplamalar elektromanyetik analiz ve akış analizi arasında döngüsel olarak tekrarlanmıştır. Tüm bu hesaplamaların yanında damperin süspansiyon sisteminde yerleştirileceği konum da geometrik bir kısıtlama olarak göz önüne alınarak damper boyutlandırılmıştır. Hesaplanan tasarım parametreleri ile damperin geometrik boyutları Tablo 3.3’te toplu halde verilmiştir.

Tablo 3.3. Damperin tasarım parametreleri ve değerleri

Parametre	Değeri	Birimi
Sönüm kuvvet aralığı, $F$	200–2000	N
Çalışma akımı aralığı, $I$	0–2	A
Akma gerilmesi aralığı, $\tau_y$	5750–23500	Pa
Plastik viskozite değeri, $\mu$	0.07	Pa · s
Piston hızı aralığı, $V$	0–0.2	m/s
Piston çapı, $D_{\text{piston}}$	0.039	m
Mil çapı, $D_{\text{mil}}$	0.010	m
Strok, $S$	0.055	m
Silindirin iç çapı, $D_{\text{silindir, iç}}$	0.040	m
Dairesel kanalın yüksekliği, $g$	0.0004	m
Dairesel kanalın uzunluğu, $L$	0.020	m
Etkin kutup uzunluğu, $L_{\text{etkin}}$	0.008	m
Dairesel kanalın dış çapı, $D_{\text{kanal, dış}}$	0.032	m
Dairesel kanalın iç çapı, $D_{\text{kanal, iç}}$	0.03102	m
Piston açık konumdayken damperin toplam boyu, $L_{\text{damper}}$	0.270	m

## BÖLÜM 4. MR DAMPER İÇERİSİNDEKİ AKIŞIN TEORİK ANALİZİ

MR dampere ait pistonun hareketi esnasında Şekil 4.1’de gösterildiği gibi, akışkan (MR sıvı) piston kafasında çevresel olarak açılan dar kanaldan geçmektedir. Klasik tasarımlarda bu boşluğun doğrudan piston ile silindir arasında bırakıldığı görülür. Ancak bu durum genellikle merkezleme, yani üniform boşluk dağılımı problemlerini beraberinde getirmektedir.



Şekil 4.1. MR damperin piston kafası ve akış kanalının genel görünümü

Sanki–statik analizde üç temel kabul yapılmıştır:

- I. Belirli bir anda pistonun hızı sabittir.
- II. MR sıvısı, verilen boşlukta tam gelişmiş olarak akmaktadır.
- III. MR sıvısının davranışı basit Bingham plastik modeliyle tarif edilmiştir.

Bingham sıvı davranışı şu şekilde ifade edilmektedir:

$$|\tau| > |\tau_y| \Rightarrow \tau = \tau_y(H) \operatorname{sgn}\left(\frac{du}{dr}\right) + \mu \frac{du}{dr} \quad (4.1)$$

$$|\tau| < |\tau_y| \Rightarrow \frac{du}{dr} = 0 \quad (4.2)$$

Bu ifadelerde  $\tau$  kayma gerilmesini,  $\tau_y$  akma gerilmesini,  $H$  uygulanan manyetik alanın şiddetini ve  $\mu$  sıvının manyetik alandan bağımsız olan plastik viskozitesini göstermektedir. Plastik viskozitenin değeri, akışkanın kayma gerilmesi ( $\tau$ )–şekil değiştirme hızı ( $du/dr$ ) değişiminin eğiminden hesaplanmaktadır. Bu değer üretici firmanın sağlamış olduğu teknik dokümanlardan okunabilmektedir.

Bu araştırmada MR damperin kuvvet–hız davranışını kestirmek amacıyla Navier–Stokes denkleminin dayalı sanki–statik bir aksenal simetrik model geliştirilmiştir. Elde edilen modelin sayısal çözümünden basınç gradyeni hesaplanabilmektedir.

#### 4.1. Aksenal Simetrik Akış Modeli

Kabuller:

1. Akış daimi ve sıkıştırılmazdır. Yani, zamana bağlı terimlerin hepsi sıfırdır.
2. Akış tam gelişmiş ve laminardır.
3. Akış aksenal simetriktir. Yani,  $u_\theta = 0$  ve  $\theta$  'ya göre olan kısmi türevlerin hepsi sıfırdır.



4.  $x$ -yönünde, basınç  $x$  ile doğrusal olarak değişecek şekilde sabit bir basınç gradyeni,  $\frac{dP}{dx}$  uygulanmaktadır.
5. Yerçekimi etkisi ihmal edilmektedir.
6. Akış sadece  $x$ -yönündedir; yani hızın  $r$ -bileşeni  $u_r = 0$ 'dır ve  $r$ 'ye göre olan kısmi türevlerin hepsi sıfırdır.

Bu kabuller altında, silindirik koordinatlarda süreklilik ve Navier–Stokes denklemleri yazılarak gerekli sadeleştirmeler yapılırsa:

Sıkıştırılamaz akış için süreklilik denklemi:

$$\underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial(r u_r)}{\partial r}}_{\text{kabul 6}} + \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial(r u_\theta)}{\partial \theta}}_{\text{kabul 3}} + \frac{\partial(u_x)}{\partial x} = 0 \rightarrow \frac{\partial(u_x)}{\partial x} = 0 \quad (4.3)$$

Denklem 4.3 bize  $u$ 'nun  $z$ 'ye bağlı bir fonksiyon olmadığını ifade etmektedir. Başka bir ifadeyle,  $x$  boyunca orijini nereye yerleştireceğimizin bir önemi yoktur.  $u$  her yerde aynıdır. Bu sonuç akışın tam gelişmiş olduğunu dolayısıyla herhangi bir  $x$  konumuna özel bir durumun olmadığını ifade eden kabul 2'den de çıkarılabilir. Böylece,  $u$  zamanın ve  $\theta$ 'nın fonksiyonu olmadığından sadece  $r$ 'nin fonksiyonu olduğu sonucuna varırız.

$$u = u(r) \quad (4.4)$$

Sıkıştırılamaz Navier–Stokes denkleminin  $r$ -bileşeni:

$$\begin{aligned} & \rho \left( \underbrace{\frac{\partial u_r}{\partial t}}_{\text{kabul 1}} + u_r \underbrace{\frac{\partial u_r}{\partial r}}_{\text{kabul 6}} + \frac{u_\theta}{r} \underbrace{\frac{\partial u_r}{\partial \theta}}_{\text{kabul 3}} - \underbrace{\frac{u_\theta^2}{r}}_{\text{kabul 3}} + u_x \underbrace{\frac{\partial u_r}{\partial x}}_{\text{süreklilik}} \right) \\ &= - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial r}}_{\text{kabul 5}} + \underbrace{\rho g_r}_{\text{kabul 5}} + \mu \left[ \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right)}_{\text{kabul 6}} - \underbrace{\frac{u_r}{r^2}}_{\text{kabul 6}} + \underbrace{\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2}}_{\text{kabul 3}} - \underbrace{\frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}}_{\text{kabul 3}} + \underbrace{\frac{\partial^2 u_r}{\partial x^2}}_{\text{süreklilik}} \right] \quad (4.5) \end{aligned}$$

Sıkıştırılmaz Navier–Stokes denkleminin  $\theta$ -bileşeni:

$$\begin{aligned}
 & \rho \left( \underbrace{\frac{\partial u_\theta}{\partial t}}_{\text{kabul 1}} + \underbrace{u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r}}_{\text{kabul 6}} + \underbrace{\frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}}_{\text{kabul 3}} - \underbrace{\frac{u_r u_\theta}{r}}_{\text{kabul 3}} + \underbrace{u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial x}}_{\text{kabul 3}} \right) \\
 &= -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \underbrace{\rho g_\theta}_{\text{kabul 5}} + \mu \left[ \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right)}_{\text{kabul 6}} - \underbrace{\frac{u_\theta}{r^2}}_{\text{kabul 3}} + \underbrace{\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2}}_{\text{kabul 3}} - \underbrace{\frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta}}_{\text{kabul 3}} + \underbrace{\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial x^2}}_{\text{kabul 3}} \right] \quad (4.6) \\
 &\rightarrow -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} = 0
 \end{aligned}$$

Sıkıştırılmaz Navier–Stokes denkleminin  $x$ -bileşeni:

$$\begin{aligned}
 & \rho \left( \underbrace{\frac{\partial u_x}{\partial t}}_{\text{kabul 1}} + \underbrace{u_r \frac{\partial u_x}{\partial r}}_{\text{kabul 6}} + \underbrace{\frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_x}{\partial \theta}}_{\text{kabul 3}} + \underbrace{u_x \frac{\partial u_x}{\partial z}}_{\text{süreklilik}} \right) \\
 &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \underbrace{\rho g_x}_{\text{kabul 1}} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) + \underbrace{\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_x}{\partial \theta^2}}_{\text{kabul 3}} - \underbrace{\frac{1}{r^2} \frac{\partial u_x}{\partial \theta}}_{\text{kabul 3}} + \underbrace{\frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2}}_{\text{süreklilik}} \right] \quad (4.7)
 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) \quad (4.8)$$

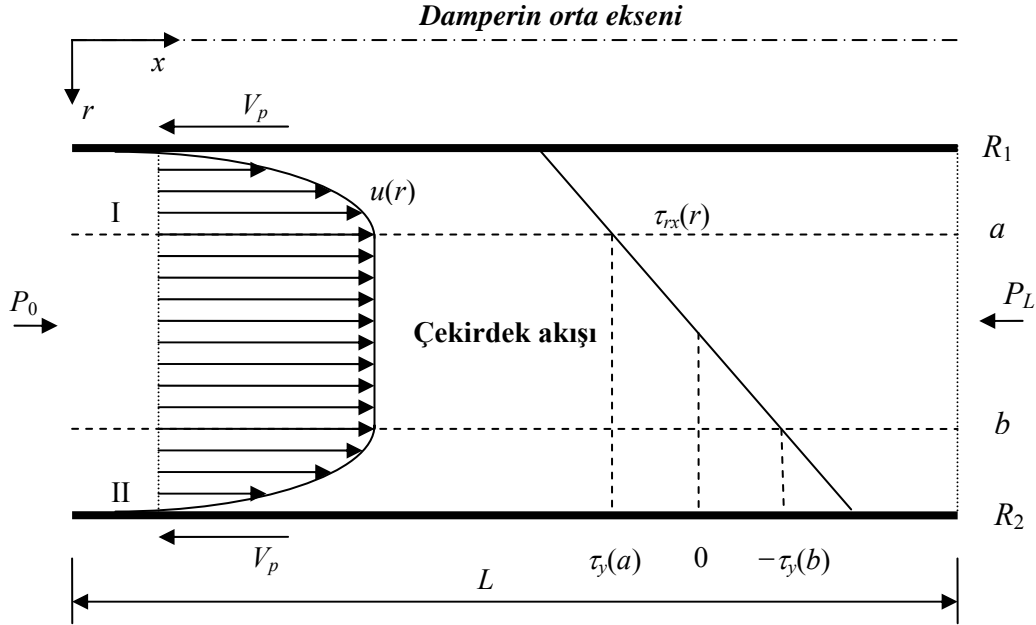
Laminer akışta kayma gerilmesinin  $\tau_{rx} = -\mu \frac{\partial u_x}{\partial r}$  olduğu dikkate alınırsa, silindirik koordinatlarda Navier–Stokes denklemi,

$$\frac{d(\tau_{rx} \cdot r)}{dr} = \frac{dP}{dx} r \quad (4.9)$$

ifadesine indirgenir. Buradan,

$$\tau_{rx} \cdot r = \frac{dP}{dx} \frac{r^2}{2} + D_1 \rightarrow \tau_{rx} = \frac{1}{2} \frac{dP}{dx} r + \frac{D_1}{r} \quad (4.10)$$

ifade elde edilir. Burada  $D_1$  keyfi integral sabiti olup sınır koşullarından belirlenecektir. Şekil 4.2'de dairesel bir halka kesitteki tipik Bingham akışkanı hız profili ve kayma gerilmesi dağılımı görülmektedir.



Şekil 4.2. Akış kanalında tipik Bingham plastik profili ve kayma gerilmesi dağılımı

Şekilde gösterilen I ve II bölgelerinde, kayma gerilmesi akma gerilmesini aşmış durumdadır, dolayısıyla kayma akışı vardır. Çekirdek bölgesinde ise akma gerilmesi kayma gerilmesinden daha büyüktür ve kayma şeklinde bir akış söz konusu değildir. Dolayısıyla çekirdek bölge içerisinde herhangi bir hız gradyanı bulunmamakta, akışkan tıpkı bir katı blok gibi akmaktadır.

Bingham plastik modeli I bölgesinde kayma gerilmesini,

$$\tau_{rx}(r) = \tau_y + \mu \frac{du(r)}{dr} \quad (4.11)$$

olarak vermektedir ( $du/dr > 0$ , dolayısıyla  $\text{sgn}(du/dr) = 1$ ).

Denklem 4.11 Denklem 4.10'da yerine koyulursa;

$$\tau_y + \mu \frac{du(r)}{dr} = \frac{1}{2} \frac{dP}{dx} r + \frac{D_1}{r} \quad (4.12)$$

$$\frac{du(r)}{dr} = \frac{P'}{2\mu} r + \frac{D_1}{\mu} \frac{1}{r} - \frac{\tau_y}{\mu} \quad (4.13)$$

$$u(r) = \frac{P'}{4\mu} r^2 + \frac{D_1}{\mu} \ln(r) - \frac{\tau_y}{\mu} r + D_2 \quad (4.14)$$

Burada  $\frac{dP}{dx} = P'$  alınmıştır.  $r = R_1$  için  $u = -V_p$  olduğundan

$$u(r) = -\frac{P'}{4\mu} (R_1^2 - r^2) + \frac{D_1}{\mu} \ln\left(\frac{r}{R_1}\right) - \frac{\tau_y}{\mu} (r - R_1) - V_p; \quad R_1 \leq r \leq a \quad (4.15)$$

sonucu elde edilir. Bingham plastik modeli II bölgesinde kayma gerilmesini,

$$\tau_{rx}(r) = -\tau_y + \mu \frac{du(r)}{dr} \quad (4.16)$$

olarak vermektedir ( $du/dr < 0$ , dolayısıyla  $\text{sgn}(du/dr) = -1$ ).

Denklem 4.16 Denklem 4.10'da yerine yazılır ve benzer işlemler yapılırsa,

$$u(r) = \frac{P'}{4\mu} r^2 + \frac{D_1}{\mu} \ln(r) + \frac{\tau_y}{\mu} r + D_3 \quad (4.17)$$

elde edilir. Diğer taraftan  $r = R_2$  için  $u = -V_p$  olduğundan,

$$u(r) = -\frac{P'}{4\mu} (R_2^2 - r^2) + \frac{D_1}{\mu} \ln\left(\frac{r}{R_2}\right) - \frac{\tau_y}{\mu} (R_2 - r) - V_p; \quad b \leq r \leq R_2 \quad (4.18)$$

sonucuna varılır.

Çekirdek akışı bölgesinde ise, Şekil 4.2'den de açıkça görüldüğü gibi  $u(r = a) = u(r = b)$  yazılabilir. Buna göre;

$$\begin{aligned} -\frac{P'}{4\mu}(R_1^2 - a^2) + \frac{D_1}{\mu} \ln\left(\frac{a}{R_1}\right) - \frac{\tau_y}{\mu}(a - R_1) - V_p = \\ -\frac{P'}{4\mu}(R_2^2 - r^2) + \frac{D_1}{\mu} \ln\left(\frac{r}{R_2}\right) - \frac{\tau_y}{\mu}(R_2 - r) - V_p \end{aligned} \quad (4.19)$$

veya

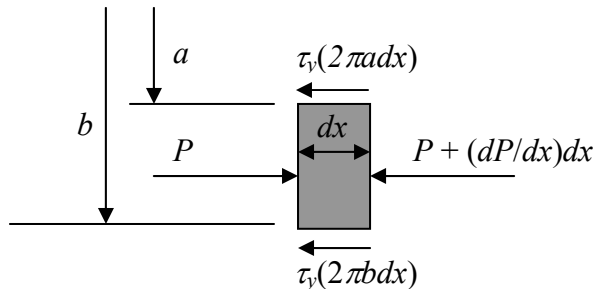
$$P' = \frac{4}{R_1^2 - R_2^2 + b^2 - a^2} \left[ D_1 \ln\left(\frac{a R_2}{b R_1}\right) + \tau_y (R_1 + R_2 - a - b) \right] \quad (4.20)$$

olarak basınç gradyeni elde edilmiş olur. Akıştaki kayma gerilmesi için,

$\tau_{rx}(r = a) = \tau_y$  ve  $\tau_{rx}(r = b) = -\tau_y$  yazılabilir. Buna göre;

$$\frac{P'}{2}a + \frac{D_1}{a} = -\frac{P'}{2}b - \frac{D_1}{b} \text{ veya}$$

$$D_1 \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) = -\frac{P'}{2}(a + b) \Rightarrow D_1 = -\frac{P'ab}{2} \text{ olarak elde edilir.}$$



Şekil 4.3.  $dx$  uzunluğundaki diferansiyel akış elemanı

Öte yandan çekirdek akışı bölgesinde yüksekliği  $b - a$  olan  $dx$  uzunluğunda bir diferansiyel eleman seçip Newton'un 2. yasası uygulanırsa (ivme = 0),

$$\frac{dP}{dx} \pi(b^2 - a^2)dx + 2\pi\tau_y(b + a)dx = 0 \text{ veya} \quad (4.21)$$

$$\frac{dP}{dx} = P' = -\frac{2\tau_y}{b-a} \quad (4.22)$$

elde edilir. Bu ifade yukarıda bulunan  $D_1$  denkleminde yerine yazılırsa,

$$D_1 = -\frac{ab}{2} \left( -\frac{2\tau_y}{b-a} \right) = \frac{ab\tau_y}{b-a} \quad (4.23)$$

elde edilir.

## 4.2. Debinin Hesabı

Halka kesitteki akış 3 ayrı bölümden oluştuğu için her bir bölgedeki debinin ayrı ayrı ele alınması gerekir. Her üç bölgedeki hız profilleri bilinmektedir:

$$u(r) = \begin{cases} u(r) = -\frac{P'}{4\mu}(R_1^2 - r^2) + \frac{D_1}{\mu} \ln\left(\frac{r}{R_1}\right) - \frac{\tau_y}{\mu}(r - R_1) - V_p & R_1 \leq r \leq a \\ u(r) = -\frac{P'}{4\mu}(R_2^2 - b^2) + \frac{D_1}{\mu} \ln\left(\frac{b}{R_2}\right) - \frac{\tau_y}{\mu}(R_2 - b) - V_p & a \leq r \leq b \\ u(r) = -\frac{P'}{4\mu}(R_2^2 - r^2) + \frac{D_1}{\mu} \ln\left(\frac{r}{R_2}\right) - \frac{\tau_y}{\mu}(R_2 - r) - V_p & b \leq r \leq R_2 \end{cases} \quad (4.24)$$

O halde toplam debi;

$$\begin{aligned} Q &= 2\pi \int_{R_1}^a \left[ -\frac{P'}{4\mu}(R_1^2 - r^2) + \frac{D_1}{\mu} \ln\left(\frac{r}{R_1}\right) - \frac{\tau_y}{\mu}(r - R_1) - V_p \right] r dr \\ &+ 2\pi \int_a^b \left[ -\frac{P'}{4\mu}(R_2^2 - b^2) + \frac{D_1}{\mu} \ln\left(\frac{b}{R_2}\right) - \frac{\tau_y}{\mu}(R_2 - b) - V_p \right] r dr \\ &+ 2\pi \int_b^{R_2} \left[ -\frac{P'}{4\mu}(R_2^2 - r^2) + \frac{D_1}{\mu} \ln\left(\frac{r}{R_2}\right) - \frac{\tau_y}{\mu}(R_2 - r) - V_p \right] r dr \end{aligned} \quad (4.25)$$

olacaktır.

$$Q_1 = \frac{\pi}{24\mu} \left[ 12R_1^2 D_1 + 3R_1^4 P' + 24R_1^2 V_p \mu - 8R_1^3 \tau_y + 3P' a^4 - 6P' R_1^2 a^2 + 24D_1 a^2 \ln\left(\frac{a}{R_1}\right) - 12D_1 a^2 - 16\tau_y a^3 + 24a^2 \tau_y R_1 - 24V_p a^2 \mu \right] \quad (4.25)$$

$$Q_{\text{çekirdek}} = \frac{\pi(a^2 - b^2)}{4\mu} \left[ P'R_2^2 - P'b^2 - 4D_1 \ln\left(\frac{b}{R_2}\right) + 4\tau_y R_2 - 4\tau_y b + 4V_p \mu \right] \quad (4.26)$$

$$Q_{II} = -\frac{\pi}{24\mu} \left[ \begin{array}{l} 3P'b^4 - 6PR_2^2b^2 + 24D_1b^2 \ln\left(\frac{b}{R_2}\right) - 12D_1b^2 + 16\tau_y b^3 - 24b^2\tau_y R_2 \\ -24V_p b^2\mu + 3R_2^4P' + 8R_2^3\tau_y + 24R_2^2V_p\mu + 12R_2^2D_1 \end{array} \right] \quad (4.27)$$

$$Q(a,b) = \frac{\pi}{24\mu} \left[ \begin{array}{l} -3R_2^4P' - 8R_2^3\tau_y - 12R_2^2D_1 - 24R_2^2V_p\mu - 6P'R_1^2a^2 + 24a^2\tau_y R_1 \\ -24D_1a^2 \ln\left(\frac{b}{R_2}\right) + 24\tau_y R_2a^2 - 24\tau_y ba^2 + 24D_1a^2 \ln\left(\frac{a}{R_1}\right) - 12D_1a^2 \\ + 24R_1^2V_p\mu + 6P'R_2^2a^2 - 6P'a^2b^2 + 3P'a^4 - 16\tau_y a^3 + 3P'b^4 + 12D_1b^2 + 8\tau_y b^3 \\ - 8R_1^3\tau_y + 12R_1^2D_1 + 3R_1^4P' \end{array} \right] \quad (4.28)$$

olarak toplam debi bulunmuş olur. Öte yandan pistonun hareketiyle kanaldan geçen hacimsel debi,

$$Q_p = (A_p - A_{mil})V_p \quad (4.29)$$

olduğundan çözümü yapılacak denklemlerden biri,

$$F_1(a,b) = Q(a,b) - Q_p = 0 \quad (4.30)$$

olacaktır. Diğer denklem ise Denklem 4.20 ve 4.22'nin eşitlenmesiyle elde edilir:

$$\frac{4}{R_1^2 - R_2^2 + b^2 - a^2} \left[ D_1 \ln\left(\frac{a R_2}{b R_1}\right) + \tau_y (R_1 + R_2 - a - b) \right] = -\frac{2\tau_y}{b - a} \quad (4.31)$$

veya

$$F_2(a,b) = \frac{4}{R_1^2 - R_2^2 + b^2 - a^2} \left[ D_1 \ln\left(\frac{a R_2}{b R_1}\right) + \tau_y (R_1 + R_2 - a - b) \right] + \frac{2\tau_y}{b - a} = 0 \quad (4.32)$$

Denklem 4.30 ve 4.32'nin çözümünden  $a$  ve  $b$  değerleri sayısal olarak hesaplanır. Doğrusal olmayan bu iki denklemin çözümü Newton–Raphson metodu ile Matlab'da bir program yazılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem özet olarak şu şekilde çözüm yapmaktadır:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial a} & \frac{\partial F_1}{\partial b} \\ \frac{\partial F_2}{\partial a} & \frac{\partial F_2}{\partial b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{\text{tahmin}} - a_{\text{gerçek}} \\ b_{\text{tahmin}} - b_{\text{gerçek}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(a_{\text{geçici}}, b_{\text{geçici}}) \\ F_2(a_{\text{geçici}}, b_{\text{geçici}}) \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Bu sistemde iterasyonu başlatmak için  $a$  ve  $b$  yerine geçici tahminler yapılır. Bu tahminlerin uygun yapılması, çözüme gitmek için gerekli iterasyon sayısını azaltır. Uygun yapılmaması halinde ise çözümün fiziksel olarak mümkün olmamasının yanı sıra yakınsama sağlanamaması problemiyle de karşılaşılabilir. Ancak buradaki problemde  $R_1 < a < b < R_2$  olması nedeniyle ilk tahminleri yapmak kolay olmuştur.

Tahmin edilen değerler dikkate alındığında yukarıdaki denklem sisteminden  $a_{\text{gerçek}}$  ve  $b_{\text{gerçek}}$  değerleri hesaplanır. Elde edilen bu değerler bir sonraki iterasyon adımında tahmin değerleri olarak alınarak işlem tekrarlanır. Bu işleme  $\Delta a = |a_{\text{tahmin}} - a_{\text{gerçek}}| \approx 0$  ve  $\Delta b = |b_{\text{tahmin}} - b_{\text{gerçek}}| \approx 0$  oluncaya kadar devam edilir. Son iterasyondan elde edilen değerler aranan  $a$  ve  $b$  değerleridir. Bu değerler çekirdek akışın nerede başlayıp nerede sonlandığını göstermektedir. Daha sonra Denklem 4.22'den,

$$\frac{dP}{dx} = P' = -\frac{2\tau_y}{b-a}$$

gerçekleşen basınç düşüşü hesaplanır.

$$\Delta P = P_{x=L} - P_{x=0} = -P' L_{\text{etkin}} \quad (4.34)$$

olacaktır. Bu ifadede  $L_{\text{etkin}}$  etkin kutup uzunluğudur. Damper tarafından geliştirilen kuvvet damperin kapanma ve açılma durumları için farklılık gösterir ve

$$F_{\text{açılma}} = \Delta P (A_p - A_{\text{mil}}) + F_{\text{sürtünme}} \quad (4.35)$$

$$F_{\text{kapanma}} = \Delta P A_p + F_{\text{sürtünme}} \quad (4.36)$$

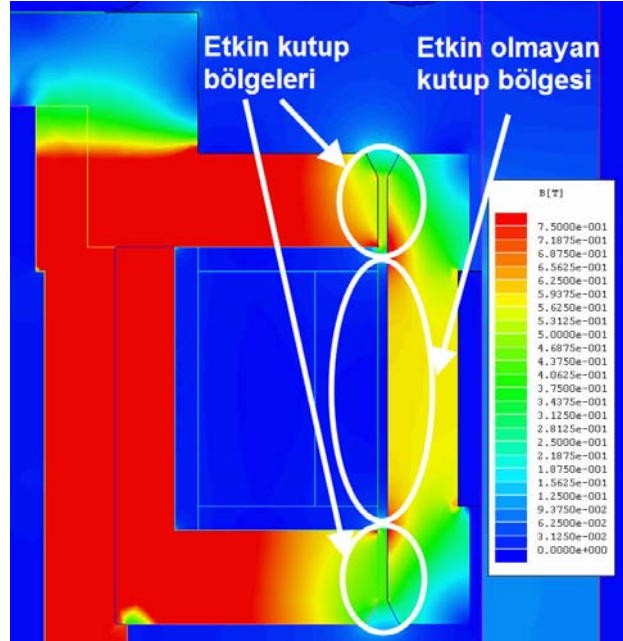


ifadeleri ile verilir.

### 4.3. Viskoz Etkilerin Hesaba Katılması

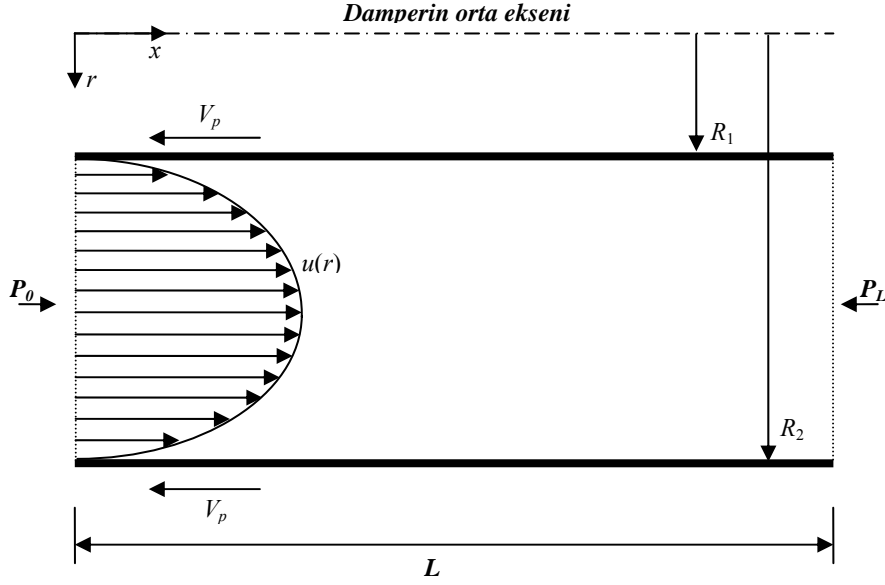
Piston üzerindeki dairesel kanalda meydana gelen toplam basınç düşüşü  $\Delta P$ , viskoz etkilerden kaynaklanan basınç düşüşü  $\Delta P_{\mu}$  ile manyetik alana bağımlı akma gerilmesinden kaynaklanan basınç düşüşü  $\Delta P_r$ 'nin toplamından oluşmaktadır. Dolayısıyla damper tarafından geliştirilen toplam kuvvet ancak bu iki basınç düşüşünün ayrı ayrı ele alınmasıyla doğru biçimde hesaplanabilir. Yukarıdaki hesaplamalar tüm kanal boyunca manyetik alanın etkin olduğu göz önüne alınarak yapılmıştır. Ancak manyetik alan tüm dairesel kanal boyunca etkin değildir. Özellikle sarıma komşu bölgelerde manyetik alan oluşmamakta ve bu bölgelerde sadece viskoz etkilerden dolayı basınç düşüşü gerçekleşmektedir.

Şekil 4.4'te daha açıklayıcı olması bakımından, manyetik alan simülasyonu sonucunda damperin kutup başında oluşan manyetik akı yoğunluğu grafiği üzerinde etkin ve etkin olmayan kutup bölgeleri gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Manyetik alan simülasyonu sonucunda damperin kutup başında oluşan manyetik akı yoğunluğu grafiği üzerinde etkin ve etkin olmayan kutup bölgeleri

Dolayısıyla, manyetik alanın etkin olmadığı bölgeler için hesaplamalar ayrı olarak ele alınmıştır.  $\tau_y = 0$  durumu için dairesel kanaldaki hız profili Şekil 4.5'teki gibidir.

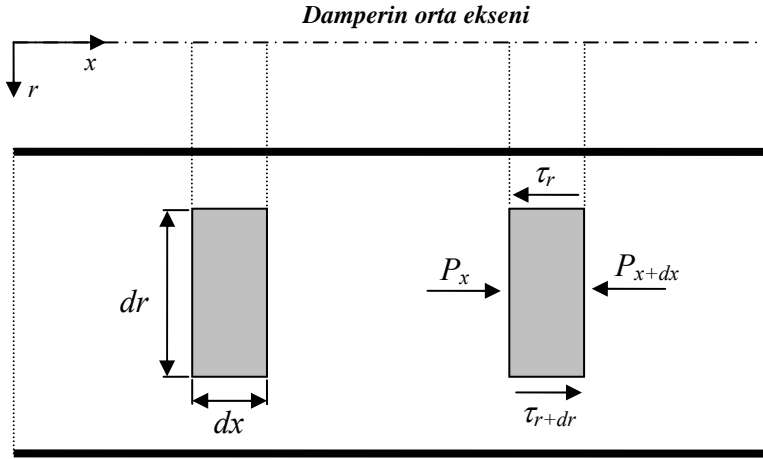


Şekil 4.5. Dairesel kanalda tam gelişmiş laminar akışa ait hız profili

Kabuller:

- 1- Akış daimi ve sıkıştırılamazdır.
- 2- Akış tam gelişmiş ve laminardır. Bu, her akışkan parçacığının akım çizgisi boyunca sabit aksenal hızla hareket ettiği ve hız profili  $u(r)$ 'nin akış yönünde değişmediği anlamına gelir.
- 3- Akış  $x$ -yönünde tek-boyutludur. Bu, radyal yönde herhangi bir hareketin sözkonusu olmadığı ve dolayısıyla akışa dik hız bileşenlerinin her yerde sıfır olduğu anlamına gelir.
- 4- Dairesel kanal boyunca yerçekimi etkileri ihmal edilmektedir.

Bu kabuller altında, Şekil 4.6’da gösterilen  $r$  yarıçapında,  $dr$  kalınlığında,  $dx$  uzunluğu olan ve boru ile aynı eksen üzerinde olan halka şeklindeki bir diferansiyel hacim elemanını göz önüne alalım. Hacim elemanı üzerine sadece basınç ve viskoz kuvvetler etmektedir. Dolayısıyla basınç ve kayma kuvvetleri birbirini dengelemelidir.



Şekil 4.6.  $r$  yarıçapındaki,  $dr$  kalınlığındaki ve  $dx$  uzunluğundaki halka şeklindeki diferansiyel akış elemanı ve serbest cisim diyagramı

Bu akışkan elemanı üzerine Newton'un ikinci hareket yasası uygulanırsa;

$$(2\pi r dr P)_x - (2\pi r dr P)_{x+dx} + (2\pi r dx \tau)_r - (2\pi r dx \tau)_{r+dr} = 0 \quad (4.37)$$

sonucu elde edilir. Bu denklem yatay boruda tam gelişmiş akışta viskoz ve basınç kuvvetlerinin birbirini dengelediğini göstermektedir. Denklemin her iki yanını  $2\pi r dx$  ile bölünerek tekrar düzenlenirse,

$$r \frac{P_{x+dx} - P_x}{dx} + \frac{(r\tau)_{r+dr} - (r\tau)_r}{dr} = 0 \quad (4.38)$$

elde edilir.  $dr$  ve  $dx \rightarrow 0$  limitleri alınırsa,

$$r \frac{dP}{dx} + \frac{d(r\tau)}{dr} = 0 \quad (4.39)$$

sonucuna varılır. Denklemin  $r$ 'ye göre integrali alınırsa,

$$-\tau = \frac{1}{2} \frac{dP}{dx} r + \frac{D_1}{r} \quad (4.40)$$

elde edilir.  $\tau = -\mu \frac{du}{dr}$  olmak üzere Denklem 4.40'ta yerine konursa,

$$\tau = \frac{1}{2} \frac{dP}{dx} r + \frac{D_1}{r} = \mu \frac{du}{dr} \quad (4.41)$$

ifadesi elde edilir. Denklem düzenlenerek  $r$ 'ye göre integrali alınırsa,

$$\frac{du}{dr} = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} r + \frac{D_1}{\mu r} \quad (4.42)$$

ve

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dx} r^2 + \frac{D_1}{\mu} \ln r + D_2 \quad (4.43)$$

sonuçları elde edilir.

$$r = R_1 \text{ 'de } u = -V_p$$

$$r = R_2 \text{ 'de } u = -V_p$$

sınır şartları uygulanırsa,

$$-V_p = \frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dx} R_1^2 + \frac{D_1}{\mu} \ln R_1 + D_2 \quad (4.44)$$

$$-V_p = \frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dx} R_2^2 + \frac{D_1}{\mu} \ln R_2 + D_2 \quad (4.45)$$

ifadelerine ulaşılır. Denklem 4.44 ve 4.45'ten  $D_1$  ve  $D_2$  çekilirse,

$$D_1 = \frac{dP}{dx} \frac{(R_1^2 - R_2^2)}{4 \ln \frac{R_2}{R_1}} \quad \text{ve} \quad D_2 = -V_p - \frac{dP}{dx} \frac{R_1^2}{4\mu} - \frac{dP}{dx} \frac{(R_1^2 - R_2^2) \ln R_1}{4\mu \ln \frac{R_2}{R_1}}$$

şeklinde elde edilir.  $D_1$  ve  $D_2$ , Denklem 4.43'te yerine konursa ve denklem yeniden düzenlenirse,

$$u(r) = -\frac{1}{4\mu \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \left( -\frac{dP}{dx} r^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) - \frac{dP}{dx} \ln r R_1^2 + \frac{dP}{dx} \ln r R_2^2 + 4\mu V_p \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right. \\ \left. + \frac{dP}{dx} R_1^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) + \frac{dP}{dx} \ln R_1 R_1^2 - \frac{dP}{dx} \ln R_1 R_2^2 \right) \quad (4.46)$$

bulunur. Hız profili denklemi elde edildiğine göre buradan debi ifadesine geçilebilir. Dairesel kanaldan geçen toplam debi,

$$Q = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} u(r) r dr \quad (4.47)$$

ile verilmektedir. Denklem 4.46 Denklem 4.47'de yerine konur ve integral alınırsa,

$$Q = \frac{\pi}{8\mu \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \left( -2 \frac{dP}{dx} R_1^2 R_2^2 + \frac{dP}{dx} R_1^4 + \frac{dP}{dx} R_1^4 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) + 8\mu V_p R_1^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right. \\ \left. + \frac{dP}{dx} R_2^4 + \frac{dP}{dx} R_2^4 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) + 2 \frac{dP}{dx} R_1^2 R_2^2 \ln R_2 + 2 \frac{dP}{dx} R_2^4 \ln R_1 - 8\mu V_p R_2^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right. \\ \left. - 2 \frac{dP}{dx} R_2^4 \ln R_2 - 2 \frac{dP}{dx} R_2^2 R_1^2 \ln R_1 - 2 \frac{dP}{dx} R_2^2 R_1^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right) \quad (4.48)$$

ifadesi elde edilir. Kanaldan geçen toplam debinin  $Q_p = V_p (A_p - A_{mil})$  olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla,  $Q - Q_p = 0$  olmalıdır. Buna göre,

$$\frac{\pi}{8\mu \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \left( -2 \frac{dP}{dx} R_1^2 R_2^2 + \frac{dP}{dx} R_1^4 + \frac{dP}{dx} R_1^4 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) + 8\mu V_p R_1^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right. \\ \left. + \frac{dP}{dx} R_2^4 + \frac{dP}{dx} R_2^4 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) + 2 \frac{dP}{dx} R_1^2 R_2^2 \ln R_2 + 2 \frac{dP}{dx} R_2^4 \ln R_1 - 8\mu V_p R_2^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right. \\ \left. - 2 \frac{dP}{dx} R_2^4 \ln R_2 - 2 \frac{dP}{dx} R_2^2 R_1^2 \ln R_1 - 2 \frac{dP}{dx} R_2^2 R_1^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right) - V_p (A_p - A_{mil}) = 0 \quad (4.49)$$

elde edilir. Buradan  $\frac{dP}{dx}$  çekilirse,

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dx} = & - \left( 8\mu V_p A_p \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) - 8\mu V_p A_{mil} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) - 8\pi\mu V_p R_1^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right. \\ & \left. + 8\pi\mu V_p R_2^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right) / \left( 2\pi R_1^2 R_2^2 - \pi R_1^4 - \pi R_1^4 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) - \pi R_2^4 - \pi R_2^4 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right. \\ & \left. - 2\pi R_1^2 R_2^2 \ln R_2 - 2\pi R_2^4 \ln R_1 + 2\pi R_2^4 \ln R_2 + 2\pi R_1^2 R_2^2 \ln R_1 + 2\pi R_1^2 R_2^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \right) \end{aligned} \quad (4.50)$$

olarak elde edilir. Daha önceden, damperin kapanma ve açılma durumlarında geliştireceği kuvvetler arasında bir miktar fark olacağından bahsedilmişti. Dampere akım uygulanmadığı durumda kanal boyunca meydana gelen basınç düşüşü sadece viskoz sürtünmelerden kaynaklanacaktır. Bu durumda, yani  $\tau_y = 0$  durumunda damperde oluşan sönüm kuvveti,

$$F_{açılma} = -\frac{dP}{dx} (A_p - A_{mil}) L_{kutup} \quad (4.51)$$

$$F_{kapanma} = -\frac{dP}{dx} A_p L_{kutup} \quad (4.52)$$

olarak her iki durum için ayrı ayrı hesaplanabilir. Yine, dampere akım uygulandığı durumda da manyetik alanın etkin olmadığı bölgelerde (özellikle sarıma komşu bölgelerde) basınç düşüşünün, manyetik alanın etkisinden ziyade viskoz etkilerden kaynaklandığından bahsedilmişti. Bu durum, yukarıdaki ifadeler yardımıyla etkin olmayan kutup uzunluğu  $L_{etkin olmayan} = L_{kutup} - L_{etkin}$  alınmak suretiyle uygun biçimde hesaplamalara dahil edilebilir.

Pistonun tahriki test makinasında sinüs dalgası şeklinde olmaktadır. Bu yüzden herhangi bir  $t$  anında pistonun orta konuma göre konumu ve hızı bilinmektedir. Belirli bir konumdaki piston hızı değerine göre damper kuvveti  $F$  hesaplanabilir. Mevcut test makinası sürtünme kuvvetini de ölçebilmektedir. Bu sayede damperin bir tam periyot boyunca  $F-X$  ve  $F-V$  grafikleri elde edilebilmektedir. Bu eğriler bir

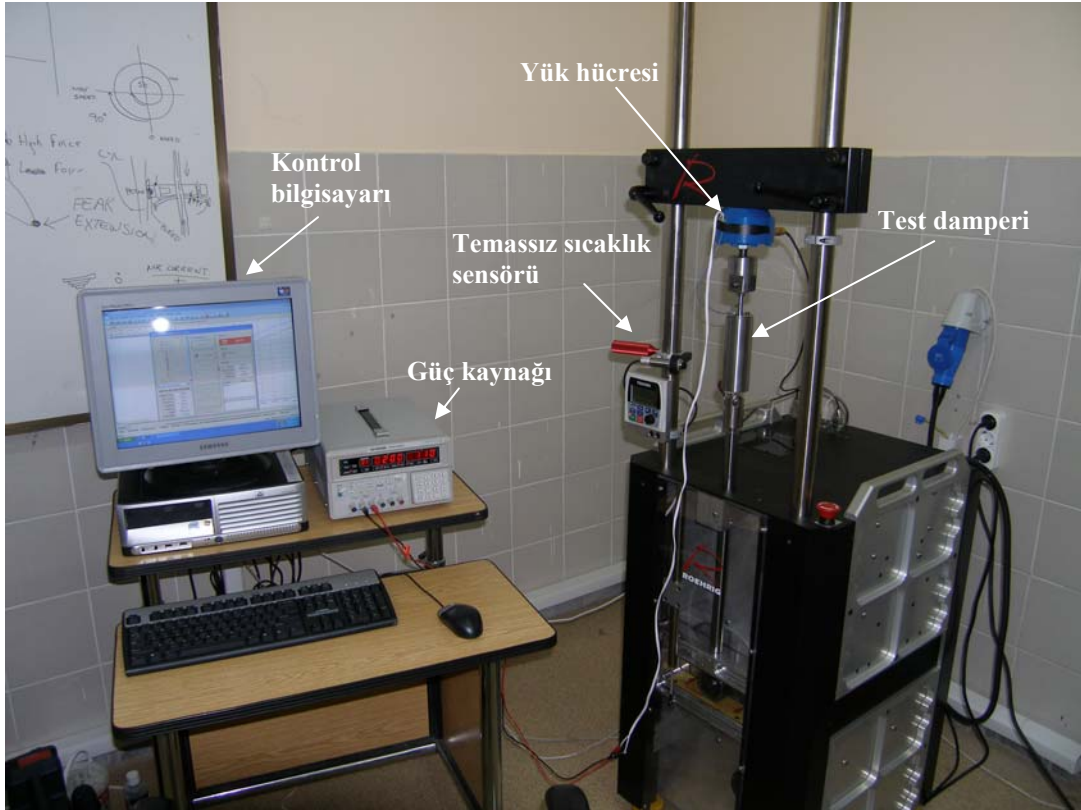
anlamda damperin performans eğrileri olup farklı damper tasarımlarını karşılaştırmada kullanılmaktadır.

Sürtünme kuvveti, ağırlıklı olarak piston ile silindir arasındaki temas düzleminde ortaya çıkmaktadır ve mevcut test ünitesinde doğrudan ölçülebilmektedir. Bunun için 30 adet ölçüm yapılmış ve ortalama 112 N bulunmuştur (standart sapma 2.1'dir, bkz. Bölüm 5). Burada verilen analiz, Herchel–Bulkley bünye denklemi kullanılarak da yapılabilir. Bu denklem akışkana ait kayma gerilmesinin şekil değiştirme hızıyla doğrusal olmayan davranışını temsil edebildiğinden (akışkanın incilmesi veya kalınlaşması) daha kesin sonuçlar vermekle birlikte, analizi ve elde edilen denklemleri oldukça karmaşık bir hale getirmektedir. Basitliği nedeniyle burada Bingham modeli tercih edilmiştir. Ancak  $\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n$  almak suretiyle aynı analiz tekrarlanabilir.

## BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 5.1. DeneY Ünitisi ve Test Damperi

MR damperin kuvvet-hız ve kuvvet-yerdeğiştirme davranışını belirleyebilmek amacı ile krank-biyel mekanizması mantığı ile çalışan “Roehrig MK-2150” test ünitesi kullanılmıştır (Şekil 5.1). Test cihazı SHOCK™ Test Kontrol ve Damper Analiz yazılımını ile tamamen bilgisayar ile kontrol edilebilmektedir. Altı adet standart stroğa sahip olan test cihazı, 0.05 ile 6 Hz frekanslarında, stroğa bağlı hız değerleri elde edebilmektedir. 22000 N’luk yük hücreğine sahip olan test ünitesi aynı zamanda cihaz üzerindeki anlık sıcaklık değişimini temassız sıcaklık sensörü ile ölçerek kaydedebilmektedir.



Şekil 5.1. MR damper test düzeneği



Test cihazı, yazılım sayesinde kuvvet–hız, kuvvet–yerdeğiştirme, kuvvet–zaman, sürtünme kuvveti ve akümülatör gaz kuvvetlerini her bir test için ayrı ayrı veya bütünleşik olarak ölçebilmektedir. Akım kaynağı olarak dijital kontrollü programlanabilir “Goodwill PPE 3223” güç kaynağı kullanılmıştır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Güç kaynağı (GWInstek PPE3223)

MR damperlerde temel olarak üç ayrı kuvvetten söz edilebilir. İlki, sıvı sürtünmesinden kaynaklanan viskoz kuvvet ( $F_{\mu}$ ) ve ikincisi sürtünme kuvvetidir ( $F_s$ ). Bu iki kuvvet; sistemin tasarımına, MR sıvının tipine ve pistonu uygulanan hıza göre daima belirli bir tepki kuvveti üretir ve bunlar sonradan kontrol edilemez. Bu nedenle bu iki kuvvetin toplamına kontrol edilemeyen kuvvet ( $F_{KEK}$ ) denilmektedir. Üçüncü kuvvet ise manyetik alan yardımı ile MR sıvının akma gerilmesi ile üretilen MR kuvvet olup, tasarımda belirlenen aralıklarda istenen tepki kuvvetini oluşturmaktadır. Testlerde manyetik alan uygulandığında ölçülebilen bu üç kuvvetin toplamına toplam kuvvet ( $F_T$ ) denir. MR damperlerin bir performans göstergesi olarak toplam üretilen kuvvetin, kontrol edilemeyen kuvvetlere oranı dinamik çalışma oranı olarak tarif edilir ve

$$D = \frac{F_T}{F_{KEK}} = 1 + \frac{F_r}{F_{\mu} + F_s} \quad (5.1)$$

şeklinde verilir. MR damperlerde dinamik oranın mümkün olduğunca yüksek olması istenir. Bunu sağlamak için de, viskoz kuvvet  $F_{\mu}$  ve sürtünme kuvveti  $F_s$ 'nin

mümkün olduğunca düşük tutulmasına çalışılır. Montajı yapılan damperler, yataklarının birbirine alışması ve temas halinde olan mekanik parçalarda meydana gelen kuru sürtünmenin kararlı hale getirilmesi için testlerden önce belirli bir süre değişken hızlarda ve kurslarda Şekil 5.3'te gösterilen MR damper alıştırmaya ünitesinde çalıştırılmıştır. Alıştırma ünitesi pnömatik esastır ve 4–7 bar arasındaki basınçlı havayla kararlı olarak çalışabilmektedir. Pnömatik sistem şekilde de görüldüğü gibi bir piston, iki anahtar, iki hava kontrollü valf, bir hava şartlandırıcı ve bir kompresörden oluşmaktadır.



Şekil 5.3. MR damper alıştırmaya ünitesi

Bu çalışmada arazi taşıtlarına yönelik olarak klasik traktör koltuğu için tasarlanan bir MR damper incelenmiştir. İncelenen damper Şekil 1'de test ünitesine bağlı halde gösterilmektedir. MR damper; tek milli, akümülatörlü olarak tasarlanmış olup kursu (stroğu) 55 mm'dir. MR damperin piston etkin kutup uzunluğu 8 mm, toplam piston uzunluğu ise 20 mm olup, dairesel kanalın yüksekliği 0.40 mm'dir. Kullanılan MR sıvının manyetik alan şiddetine bağlı akma gerilmesi grafiği Şekil 2.4'te verilmiştir [13]. MR sıvının viskozitesi ise üretici firma tarafından  $(0.07 \pm 0.02)$  Pa · s olarak

verilmiştir. Şekil 2.5'ten görüldüğü gibi 250 kA/m manyetik alan şiddetine kadar sıvının akma gerilmesi hızla artmakta, ardından manyetik doyum gerçekleşmektedir. Bu noktadan sonra manyetik alan şiddeti ne kadar arttırılırsa arttırılsın, akma gerilmesinde önemli bir artış görülmez. Bu durum bir kapasite sınırlayıcıdır.

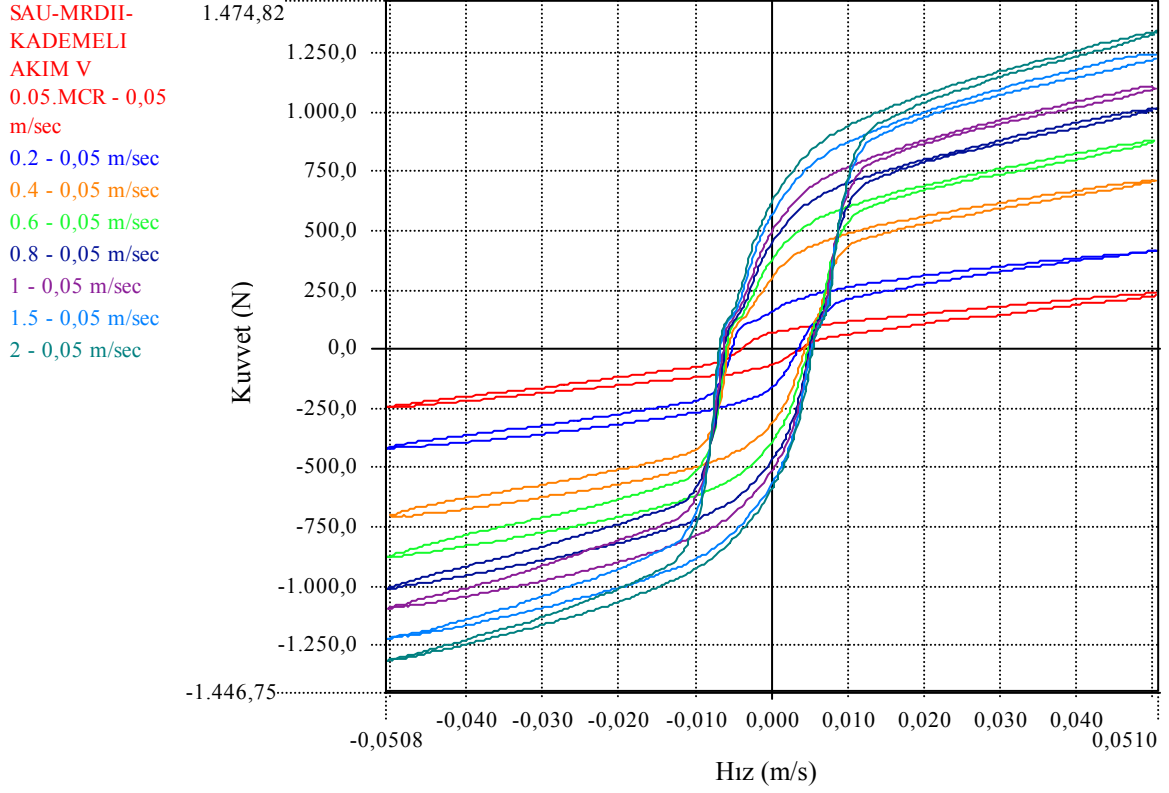
## 5.2. Deneysel Çalışma ve Deney Sonuçlarının Yorumlanması

İmal edilen MR damper 0 A'den 2 A'ye kadar 0–0.2–0.4–0.6–0.8–1–1.5–2 A değerlerinde 0.05–0.1–0.15–0.2 m/s hızlarda ve 25 mm kurs boyunda test edilmiştir. Test grafikleri kuvvet–zaman ve kuvvet–yerdeğiştirme döngüleri şeklinde Şekil 5.4–5.11'de verilmiştir.

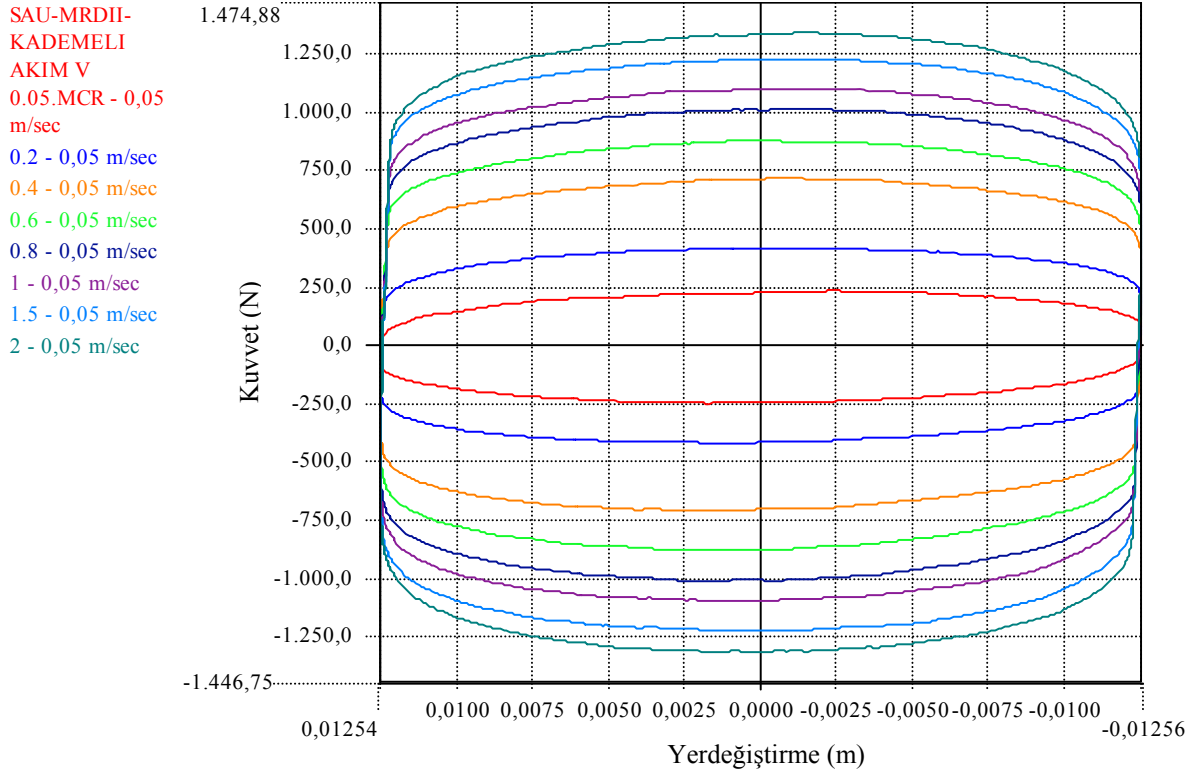
Test grafikleri incelendiğinde en düşük tepki kuvvetinin 0 A akımda meydana geldiği görülür. Bu halde oluşan sönüm kuvveti sadece viskoz sürtünmelerden kaynaklanmaktadır. Kuvvet–hız ve kuvvet–yerdeğiştirme grafiklerinden, akımsız ve akımlı haldeki tepki kuvvetleri arasındaki fark açıkça görülebilmektedir. Akımın uygulanmaya başlanması ile birlikte, tepki kuvvetinde önce hızlı, ardında gittikçe yavaşlayan bir artış görülmektedir. Akımsız durum aynı zamanda kontrol edilemeyen kuvvete eşit olduğu için, referans (veya minimum) sönümleme kuvvetini oluşturmaktadır. Bu değer 784 N olarak ölçülmüştür. Damperdeki kuru sürtünme 112 N ve gaz basıncı 8 bar olarak ölçülmüştür. Tablo 5.1'de hız ve akımlara göre oluşan dinamik oranlar verilmiştir.

Tablo 5.1. 0.2 m/s'lik maksimum piston hızında, çeşitli akım değerleri için elde edilen dinamik çalışma oranları

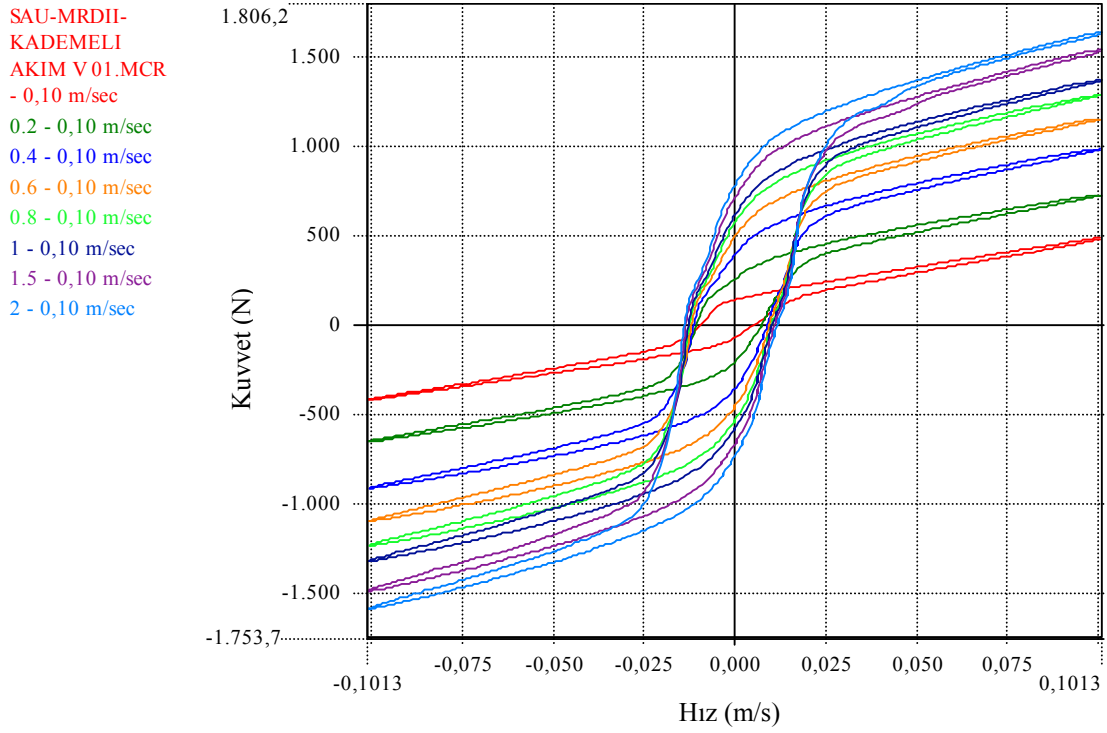
Akım ( $I$ )	0.2 A	0.4 A	0.6 A	0.8 A	1 A
Dinamik Oran ( $D$ )	1.28	1.62	1.88	2.08	2.21



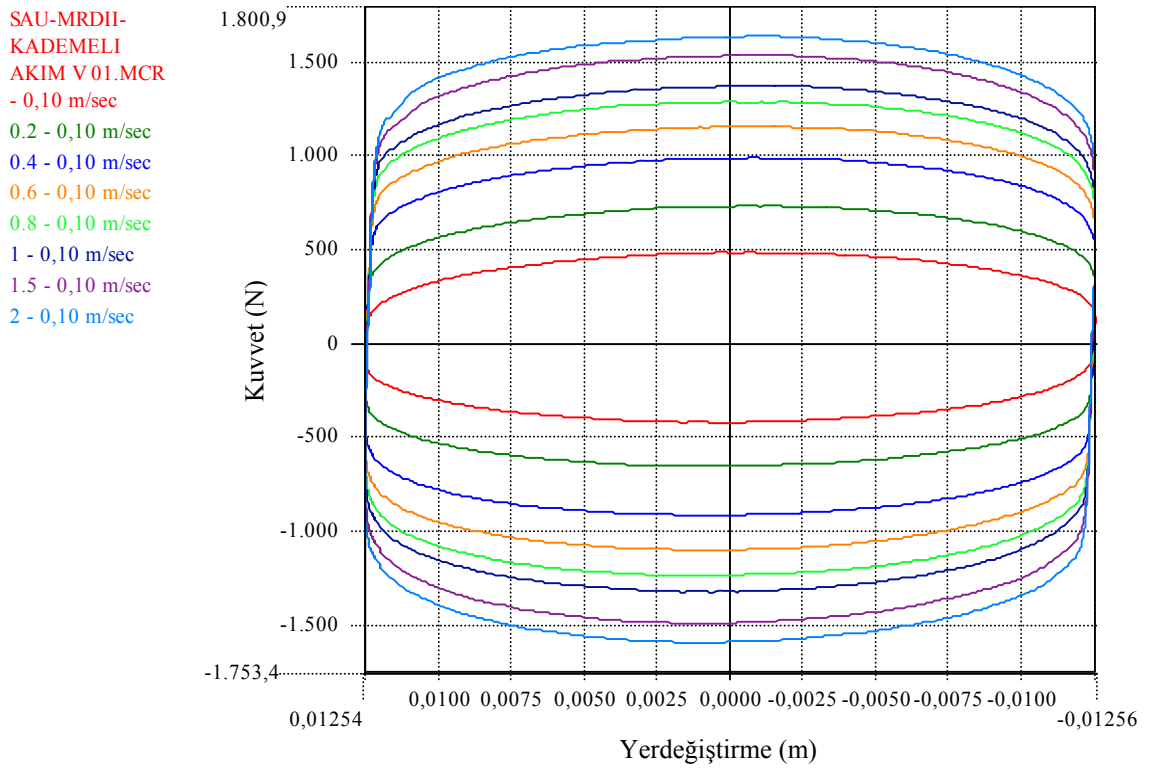
Şekil 5.4. Damperin 0.05 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–hız grafiği



Şekil 5.5. Damperin 0.05 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–yerdeğiştirme grafiği

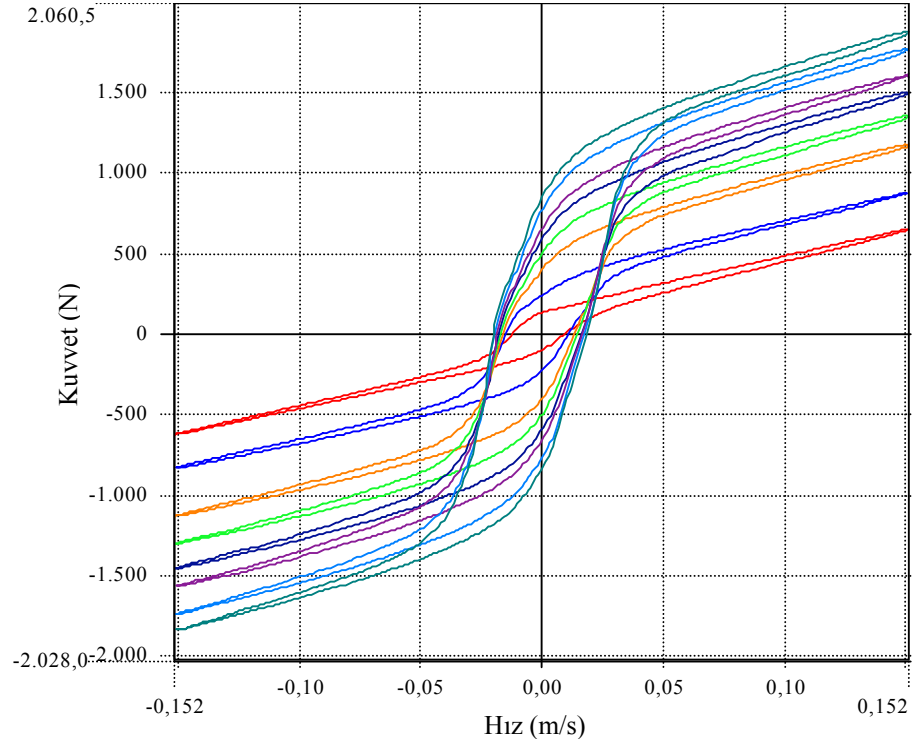


Şekil 5.6. Damperin 0.1 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–hız grafiği



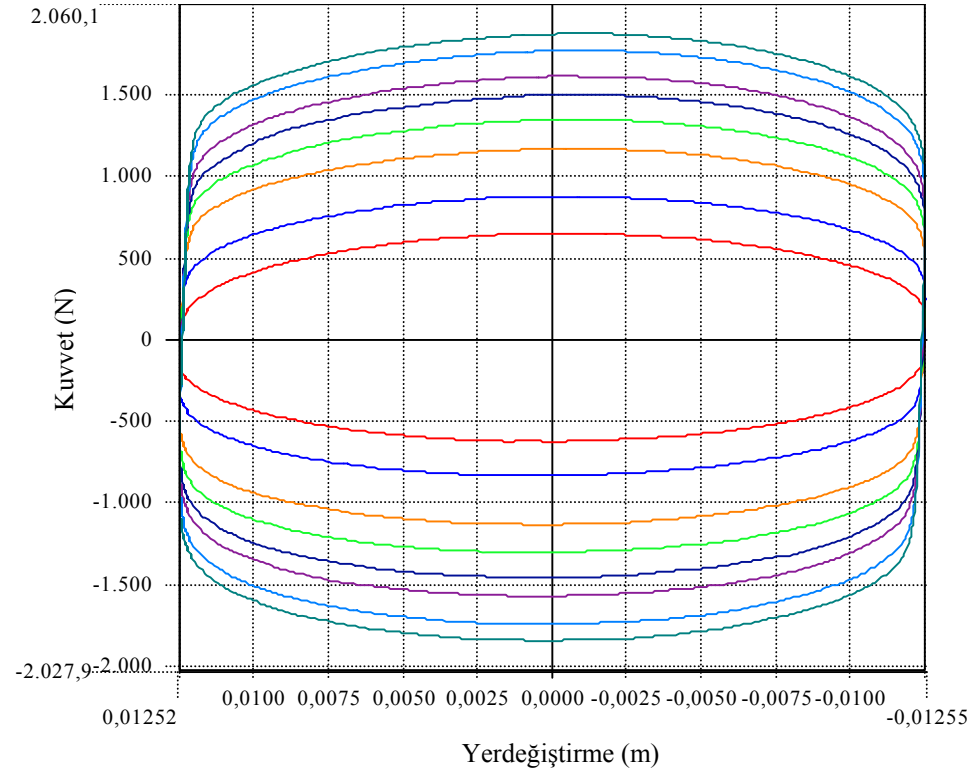
Şekil 5.7. Damperin 0.1 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–yerdeğiştirme grafiği

SAU-MRDII-  
KADEMELI  
AKIM V  
0.15.MCR - 0,15  
m/sec  
0.2 - 0,15 m/sec  
0.4 - 0,15 m/sec  
0.6 - 0,15 m/sec  
0.8 - 0,15 m/sec  
1 - 0,15 m/sec  
1.5 - 0,15 m/sec  
2 - 0,15 m/sec



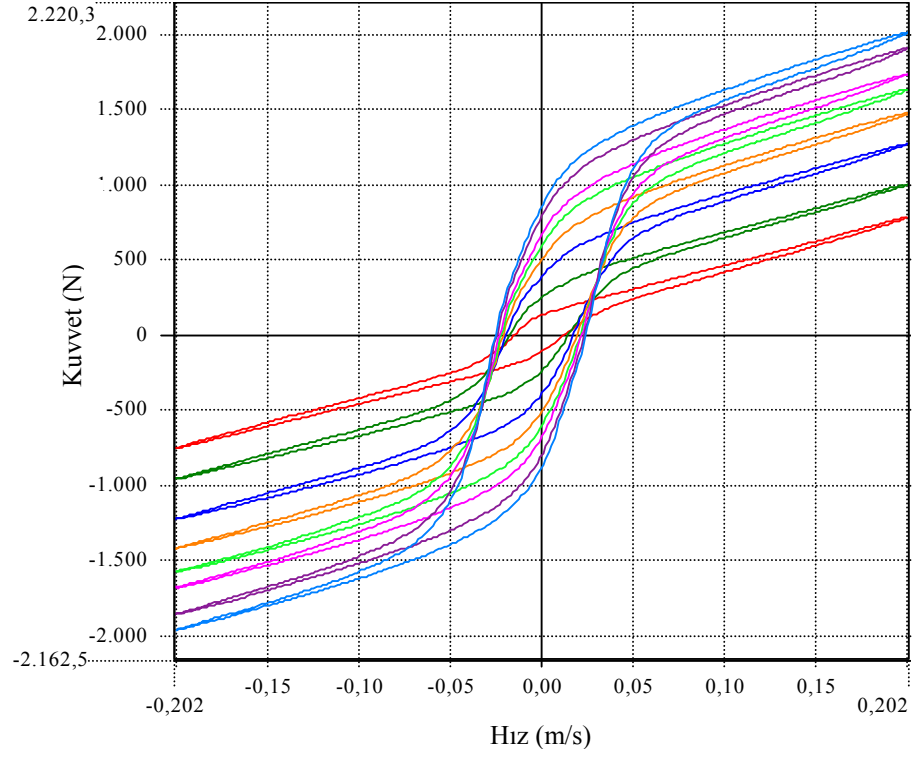
Şekil 5.8. Damperin 0.15 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–hız grafiği

SAU-MRDII-  
KADEMELI  
AKIM V  
0.15.MCR - 0,15  
m/sec  
0.2 - 0,15 m/sec  
0.4 - 0,15 m/sec  
0.6 - 0,15 m/sec  
0.8 - 0,15 m/sec  
1 - 0,15 m/sec  
1.5 - 0,15 m/sec  
2 - 0,15 m/sec



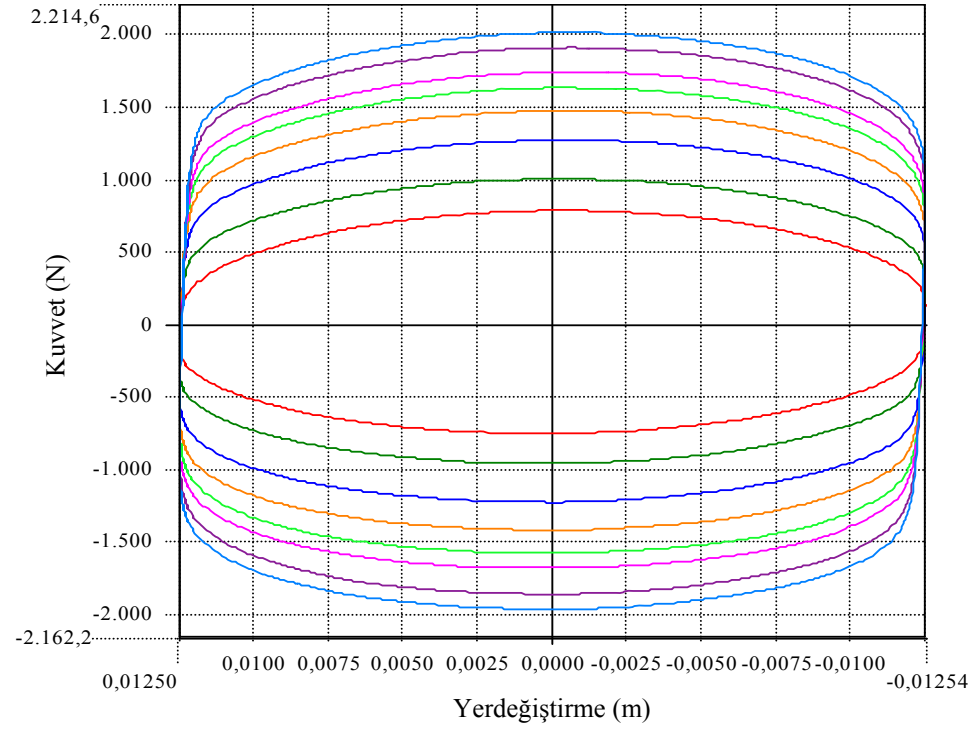
Şekil 5.9. Damperin 0.15 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–yerdeğiştirme grafiği

SAU-MRDII-  
KADEMELI  
AKIM V 0.2.MCR  
- 0,20 m/sec  
0.2 - 0,20 m/sec  
0.4 - 0,20 m/sec  
0.6 - 0,20 m/sec  
0.8 - 0,20 m/sec  
1 - 0,20 m/sec  
1.5 - 0,20 m/sec  
2 - 0,20 m/sec



Şekil 5.10. Damperin 0.2 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–hız grafiği

SAU-MRDII-  
KADEMELI  
AKIM V 0.2.MCR  
- 0,20 m/sec  
0.2 - 0,20 m/sec  
0.4 - 0,20 m/sec  
0.6 - 0,20 m/sec  
0.8 - 0,20 m/sec  
1 - 0,20 m/sec  
1.5 - 0,20 m/sec  
2 - 0,20 m/sec



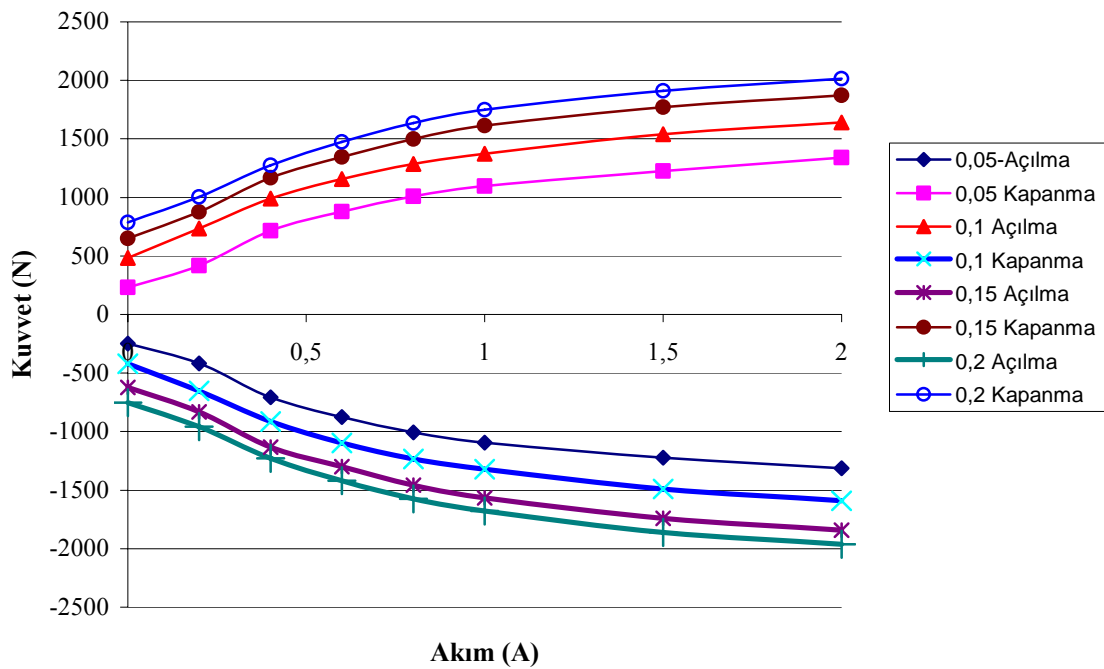
Şekil 5.11. Damperin 0.2 m/s hızda ve 0–2 A aralığında kuvvet–yerdeğiştirme grafiği



Şekil 5.4–5.11’deki grafiklerden elde edilen maksimum ve minimum tepki kuvvetleri Tablo 5.2’de verilmiştir. Aynı zamanda Tablo 5.2’deki verilerin grafik gösterimi Şekil 5.12’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Damperin çeşitli hız kademelerindeki akıma bağlı tepki kuvveti değerleri

Piston Hızı (m/s)	0.05		0.1		0.15		0.2	
Akım (A)	Açılma	Kapanma	Açılma	Kapanma	Açılma	Kapanma	Açılma	Kapanma
0	-248	232	-419	483	-622	649	-752	787
0.2	-418	417	-651	733	-832	876	-957	1004
0.4	-706	716	-913	990	-1132	1169	-1227	1274
0,6	-877	878	-1098	1157	-1298	1346	-1420	1474
0.8	-1006	1011	-1234	1286	-1458	1499	-1575	1634
1	-1094	1098	-1320	1373	-1567	1613	-1679	1750
1.5	-1222	1226	-1490	1540	-1742	1772	-1860	1910
2	-1312	1340	-1592	1639	-1842	1873	-1963	2014

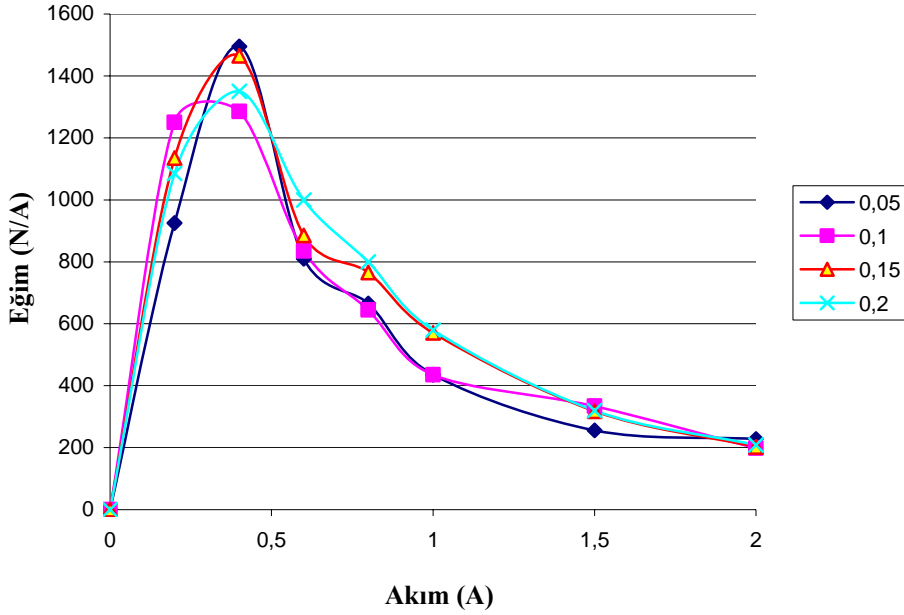


Şekil 5.12. Damperin çeşitli hız kademelerinde akıma bağlı tepki kuvveti grafiği

Damperin tepki kuvveti aralığı 232–2014 N arasındadır. Grafiklerin incelenmesinden sıkışma ve gevşeme grafiklerinin hemen hemen simetrik olduğu söylenebilir. Ancak bu grafikte tam olarak görülmeyen akıma karşı duyarlılığı görmek için yine Tablo



5.2 kullanılarak her bir akım aralığındaki eğimler hesaplanarak Şekil 5.13'te damperin akıma karşı duyarlılığını gösteren bir grafik çizdirilmiştir.

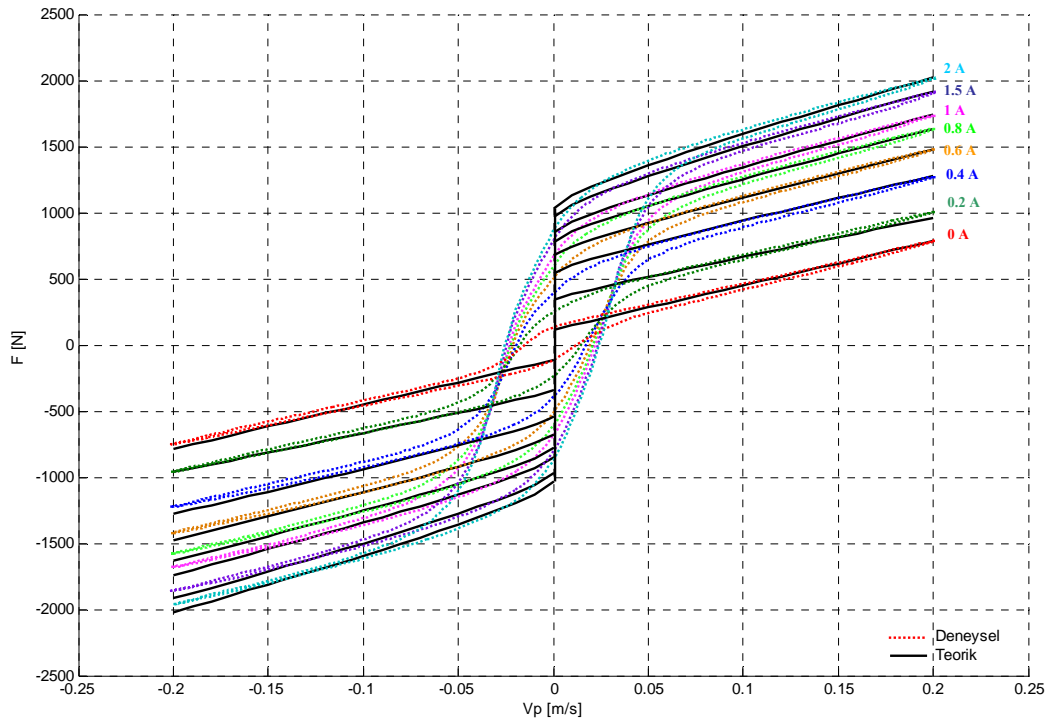


Şekil 5.13. Damperin akıma karşı duyarlılık grafiği

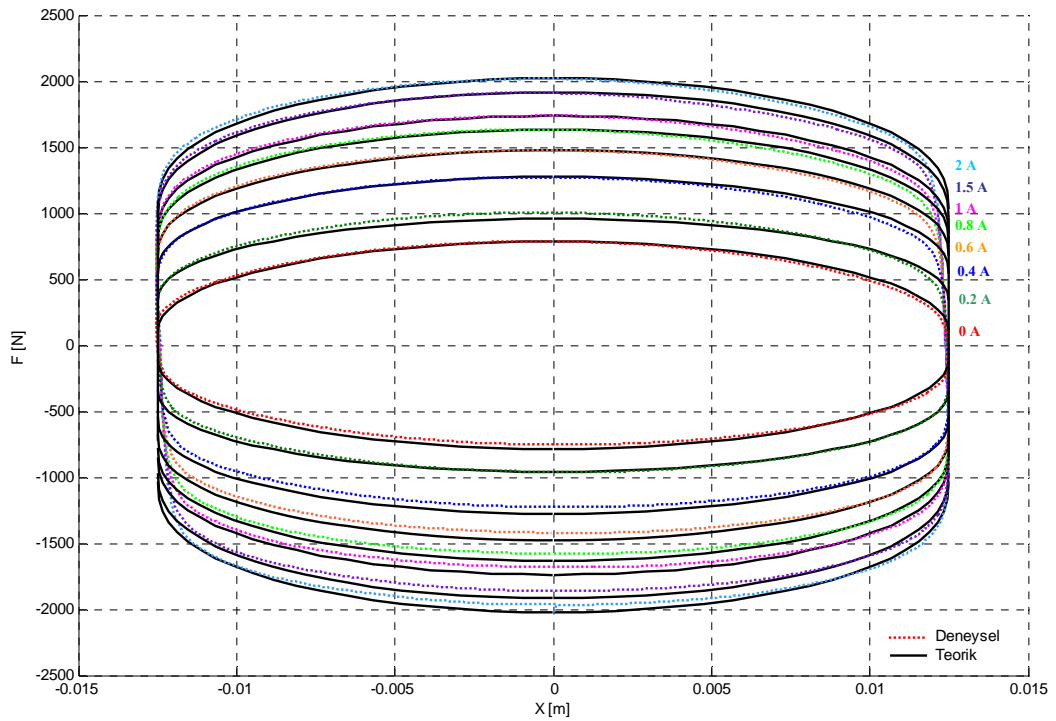
Şekil 5.13'ten MR damperin, yaklaşık olarak 0.3–0.6 A aralığında akıma karşı en fazla duyarlı olduğu söylenebilir. Akım değeri arttıkça manyetik doyum sebebi ile kazanç oldukça düşmektedir. Bir başka ifade ile 0.4 A'de gösterilen duyarlılık, 2 A'de yaklaşık % 86 oranında azalmaktadır. Uygulanan akımın 0.5 A'in üzerine çıkarılması manyetik doyumun yanında ısınmaya da neden olacaktır. Dolayısıyla, düşük akımlarda çalışmanın performans açısından daha uygun olacağı açıktır.

### 5.3. Deney ve Teorinin Karşılaştırılması

Bu kısımda, sanki–statik akış analizinden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 5.14 ve 5.15'te temsili olarak 0.2 m/s'lik hız için 0–0.2–0.4–0.6–0.8–1–1.5–2 A akımlarına karşılık gelen teorik ve deneysel veriler karşılaştırma amacıyla aynı grafik üzerinde çizdirilmiştir.



Şekil 5.14. MR damperin teorik ve deneysel verilerinin 0–2 A ve 0.2 m/s hız için karşılaştırılması ( $F-V$ )



Şekil 5.15. MR damperin teorik ve deneysel verilerinin 0–2 A ve 0.2 m/s hız için karşılaştırılması ( $F-X$ )

Grafikler dikkatle incelendiğinde hem  $F-V$  hem de  $F-X$  grafiklerinde kuvvet değerlerinin kapanma ve açılma durumlarında tam simetrik olmadığı görülür. Diğer bir ifadeyle, kuvvet değerleri her iki grafikte de yatay eksene göre simetrik değildir. Bu farklılık, damperin kapanma durumunda kendisini gösteren akümülatördeki gaz kuvvetinin etkisinden kaynaklanmaktadır. Akümülatördeki gaz kuvvetinin etkisi yüksek sönüm kuvvetlerinde ihmal edilebilecek kadar az olsa da düşük sönüm kuvvetlerinde dikkate alınabilir.

Gaz kuvveti, akümülatördeki gazın izotermal hal değişimine uğradığını kabul ederek,  $P_1V_1 = P_2V_2$  bağıntısı ile uygun biçimde hesaba katılabilir. Pistonun herhangi bir andaki konumu bilindiğinden,

$$P_2 = \frac{P_1V_1}{V_2} \quad (5.2)$$

$$P(t) = \frac{P_1V_1}{A_{\text{kayar piston}} (0.0125 \cos(16t + \pi))} \quad (5.3)$$

ifadesi yardımıyla herhangi bir anda akümülatördeki gaz basıncı hesaplanabilir. Buradan,

$$\Delta P = P_{t=t_{\text{son}}} - P_{t=t_{\text{ilk}}} \quad (5.4)$$

ifadesi ile herhangi bir anda akümülatördeki gaz basıncında meydana gelen artış bulunabilir. Buna göre, akümülatördeki gaz basıncında meydana gelen artışın damperin geliştireceği kuvvete etkisi,

$$F_{\text{akümülatör}} = \Delta P A_p \quad (5.5)$$

ifadesi ile uygun biçimde hesaplamalara dahil edilebilir.

Bunun yanında  $F-X$  grafiği incelendiğinde, damperin yön değiştirdiği noktalarda kuvvetin de yatay eksen simetri ekseni olmak üzere simetrik olarak; yani düşey bir çizgi üzerinde yön değiştirmesi beklenmektedir. Ancak, görüldüğü üzere bu yön değişimi tam düşey bir çizgi üzerinde gerçekleşmemektedir. Bunun da yine

akümülatördeki gaz kuvveti etkisinin bir sonucu olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.

Bunların yanı sıra hızın yön değiştirdiği geçiş bölgelerindeki histerisiz olgusu da göz ardı edilirse, teorik verilerle test verilerinin çok iyi bir uyum içerisinde olduğu görölmektedir. Karşılaştırmalar diğer hız kademeleri için de yapılmış olup onlarda da benzer eğilimler gözlemlenmiştir.

## BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yarı-aktif bir sönümlenme elemanı olarak bir MR damper geliştirilmiştir. Bu damper esas itibariyle traktör koltukları için olsa da, verilen yaklaşım genel amaçlıdır. Geliştirilen damperin tasarımı, öngörülen yükleme koşulları ve çalışma şartları dikkate alınarak yapılmış ve hassas tezgahlarda imal edilmiştir. Yapılan testler, başlangıçta hedeflenen dinamik çalışma oranının büyük bir yaklaşıklıkla tutturulduğunu göstermektedir. İstenen bir çalışma durumuna göre MR sıvıya ait akma gerilmesinin tespiti büyük önem arz etmektedir. Zira bu değer pek çok yan faktörden etkilenmektedir. Örneğin hedeflenen kanal geometrisi imalatla tam olarak tutturulmazsa, hedeflenen akma gerilmesine ulaşılması zordur.

Akma gerilmesinin kestirimi için ANSOFT SV yazılımı kullanılmış ve iki-boyutlu analiz yapılmıştır. Üç-boyutlu daha kapsamlı bir analizin yapılması, akma gerilmesinin daha kesin bir şekilde ortaya konulmasına yardımcı olacaktır.

Ayrıca Bingham plastik modelinde dikkate alınamayan akışkan incelmeleri veya kalınlaşması da (shear-thickening, shear-thinning), yapılan analitik kestirimi etkiliyor olabilir. Bu nedenle akışkan indekslerinin deneysel olarak bir reometre ile ölçülmesi ve Herschel-Bulkley bünye denkleminin model olarak alınmasının, yapılan analizin doğruluğunu arttıracakları düşünülmektedir.

Buradaki analizde damper içerisinde basınçlı gazın etkisi hesaba katılmamıştır. Bundan sonraki çalışmalarda akümülatördeki basınçlı gazın etkisi de hesaba katılarak damperin sıkışma ve gevşeme durumlarındaki davranış farklılığı dikkate alınabilir.

Tüm bunların yanında, bir MR damperin davranışında histerisiz önemli rol oynamaktadır ve burada ele alınan sanki-statik akış analizinde bu olgu dikkate alınmamıştır. Bu olgu sistemin davranışını temsil eden dinamik modeller ile tanımlanabilir ve sistemin davranışı daha gerçekçi bir şekilde tahmin edilebilir.

Bununla birlikte burada yapılan akış analizi ile; damper içindeki MR sıvının kanal boşluğundan geçişi esnasında herhangi bir hıza karşılık gelen tepki kuvvetlerini, pratikte yeterli sayılabilecek bir yaklaşıklıkla kestirebildiği görülmektedir.

Bundan sonraki hedef olarak damperin içerisindeki akışın hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonunun gerçekleştirilmesi düşünülmektedir. Bunun yanında damperin, elektromanyetik analiz ve akış analizinde etkin rol oynayan geometrik parametrelerin tam bir optimizasyonu gerçekleştirilecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] WINSLOW, W. M., Method and means for translating electrical impulses into mechanical force, US Patent No: 2,417,850.
- [2] RABINOW, J., The magnetic fluid clutch, AIEE Transactions, Vol. 67, 1308–1315, 1948.
- [3] CHOI, S. B., LEE, H. S., HONG, S. R., and CHEONG, C.C., Control and response characteristics of a magnetorheological fluid damper for passenger vehicles, Smart Structures and Integrated Systems, Proc. of the SPIE Conference on Smart Materials and Structures, Ed. By Norman M. Wereley, Vol. 3985, pp. 438–443, 2000.
- [4] GORDANINEJAD, F. and KELSO, S. P., Fail-safe magnetorheological fluid dampers for off-highway, high-payload vehicles, J. of Intelligent Material System and Structures, Vol. 11, No.5 395–406, 2001.
- [5] KAMATH, G. M., WERELEY, N. M., and JOLLY, M. R., Characterization of magnetorheological helicopter lag dampers, J. Of the American Helicopter Society, 44 (3) 234–248, 1999.
- [6] GORDANINEJAD, F., SAIIDI, M., HANSEN, B. C., and CHANG, F. K., Magnetorheological fluid dampers for control of bridges, Proc. of the 2nd World Conference on Structural Control, Ed. By Kobori et al., Wiley, 991–1000, Kyoto–Japan, 1998.
- [7] CARLSON, J. D., CATANZARITA, D. M., STCLAIR, K. A., Commercial magnetorheological fluid devices, Int. J. Of Modern Physics B 10: (23–24) 2857–2865, 1996.
- [8] MARATHE, S., GANDHI, F., and WANG, K. W., Helicopter blade response and aeromechanical stability with a magnetorheological fluid based lag damper, J. Of Intelligent Material and Structures, 9 (4) 272–282, 1998.
- [9] NAGARAJAIAH, S., SAHASRABUDHE, S., and IYER, R., Seismic response of sliding isolated bridges with MR dampers, Proc. Of the 2000 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No: 00CH36334), 4437–4441, 2000.

- [10] DYKE, S. J., SPENCER, B. F., SAIN, M. K., and CALSON, J. D., Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction, *Smart Materials & Structures* 5 (5) 565–575, 1996.
- [11] SYMANS M. D. and CONSTANTINOU, M. C., Experimental testing and analytical modeling of semi-active fluid dampers for seismic protection, *J. of Intelligent Material Systems and Structures* 8 (8) 644–657, 1997.
- [12] ENGIN, T., DOĞRUER U., EVRENSEL, C., HEAVIN, S., and GORDANINEJAD F., Effects of Surface Roughness on Flow Characteristics of Laminar Bingham Plastics Flow in Microtubes, *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol 126, pp. 880–883, 2004.
- [13] Lord Corporation web sitesi, [www.lord.com](http://www.lord.com), 2007.
- [14] WANG X., GORDANINEJAD F., Flow Analysis and Modeling of Field-Controllable, Electro- and Magneto-Rheological Fluids Dampers, *JOURNAL OF APPLIED MECHANICS-TRANSACTIONS OF THE ASME* 74 (1): 13–22 JAN 2007.
- [15] PANG, L. , KAMATH, G. M., and WERELEY N. M., Analysis and Testing of A Linear Stroke Magneto Rheological Damper, *AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Forum*, AIAA 98–2040. Vol. CP9803., Part 4, pp.2481–2856, Long Beach CA., April 1998.
- [16] WERELEY, N. M. and PANG, L., Nondimensional Analysis of Semi-Active Electrorheological and Magnetorheological Dampers Using Approximate Parallel Plate Models, *Smart Mater. Struct.* 7, pp. 732–743, 1998.
- [17] KAMATHI G. M., HURT M. K., and WERELEY, N. M., Analysis and Testing of Bingham Plastic Behavior in Semi-active Electrorheological Fluid Dampers, *Smart Mater. Struct.* 5, pp. 576–590, 1996.
- [18] DIMOCK GLEN A., LINDLER J. E., and WERELEY N. M., Bingham Biplastic of Shear Thinning and Thickening in Magneto Rheological Dampers, 7th Int. Symp. On Smart Str. and Mat., CA., SPIE. 5–9 March 2000.
- [19] HONG S. R., CHOI S. B., CHOI Y. T., and WERELEY N. M., Non-dimensional Analysis and Design of Magnetorheological Damper, *Journal of Sound and Vibration* 288 (2005) 847–863.
- [20] ERICKSEN, E. O. and GORDANINEJAD, F., A Magneto-Rheological Fluid Shock Absorber for an Off-Road Motorcycle, *International J. Vehicle Design*, Vol. 33, Nos. 1/2/3/, pp. 138–152, 2003.



- [21] ŞAHİN İ., Manyeto–Reolojik Damperli Yarı–aktif Bir Süspansiyon Sistemi Tasarımı ve Traktör Koltuğu Uygulaması, Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi, 2005.
- [22] CARLSON, J. D., and WEISS, K. D., A Growing Attraction to Magnetic Fluids, *Machine Design*, Aug. 8, pp. 61–66, 1994.
- [23] YANG, G., Large-Scale Magneto Rheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control, PhD Thesis, Univ. of Nevada, USA, 2002.
- [24] Ansoft Corporation, [www.ansoft.com](http://www.ansoft.com), 2007.
- [25] CHOOI W. W. and OYADIJI S. O., Design, Modelling and Testing of Magnetorheological (MR) Dampers Using Analytical Flow Solutions, *Computer and Structures*, 2007.

## **ÖZGEÇMİŞ**

23.10.1982'de Aydın-Söke'de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Söke'de tamamladıktan sonra 2000 yılında T.C. Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde öğrenim görmeye hak kazandı. 2004 yılında mezun olduktan sonra bir süre ELKON A.Ş.'de Ar-Ge ve Proje bölümünde çalıştı. 2005 yılında T.C. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 23.12.2005 tarihinde aynı enstitüde Araştırma Görevlisi unvanıyla çalışmaya başladı. Halen yüksek lisans öğrenimine ve görevine devam etmektedir.