

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEPREME YÖNELİK OLARAK YARI-AKTİF  
KONTROLLÜ MANYETİK DAMPER TASARIMI VE  
UYGULAMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**Muaz KEMERLİ**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ**  
**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tahsin ENGİN**

**Mart 2020**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEPREME YÖNELİK OLARAK YARI-AKTİF  
KONTROLLÜ MANYETİK DAMPER TASARIMI VE  
UYGULAMASI

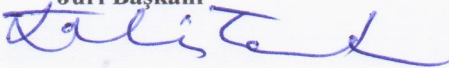
DOKTORA TEZİ

Muaz KEMERLİ

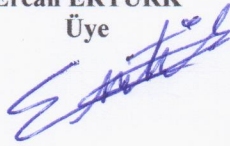
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 05 / 03 / 2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.  
Tahsin ENGİN  
Jüri Başkanı



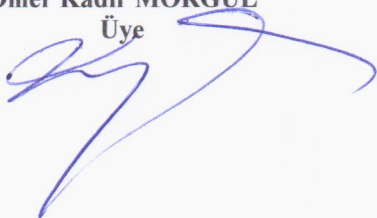
Prof. Dr.  
Ercan ERTÜRK  
Üye



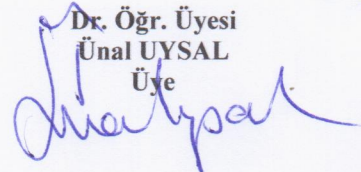
Prof. Dr.  
Alper A. ÖZALP  
Üye



Dr. Öğr. Üyesi  
Ömer Kadir MORGÜL  
Üye

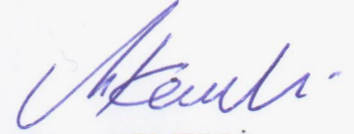


Dr. Öğr. Üyesi  
Ünal UYSAL  
Üye



## BEYAN

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



Muaz KEMERLİ

05.03.2020

## TEŞEKKÜR

Yapılan tezin tüm aŐamalarında çalışmaları değerlendiren ve tüm desteğini sağlayarak bu tezin nihayete ermesine vesile olan değerli hocam Prof. Dr. Tahsin ENGİN'e teŐekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalıŐmam boyunca benden desteklerimi esirgemeyen değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Zekeriya PARLAK ve Dr. Öğr. Üyesi İsmail ŞAHİN'e teŐekkürü bir borç bilirim.

ÇalıŐtığımız proje kapsamında tezime farklı disiplinlerden katlı sağlayan Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR, Dr. Öğr. Üyesi Gürsoy TURAN, Dr. Öğr. Üyesi Seval GENÇ'e ve projedeki mesai arkadaşlarım ArŐ. Gör. Özge ŞAHİN ve Dr. Öğr. Üyesi Nurettin Gökhan ADAR'a teşekkür ederim.

Çalışmanın olgunlaŐmasında büyük emekleri olan SANLAB firmasına ve hususan Sayın Berkay VOLKANER ve BeŐir TAYFUR'a teŐekkürlerimi sunarken, çalıŐmaya 115M363 no'lu proje kapsamında maddi açıdan destek sağlayan TÜBİTAK'a Őükranlarımı ifade etmek isterim.

Ve en önemlisi, bu süreçte bana gösterdiği destek için sevgili hayat arkadaşım İlknur Fatma KEMERLİ'ye ve biricik kızım Meryem Suna'ya çok teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ÖZET .....	xv
SUMMARY .....	xvi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
1.1. Tezin Kapsamı .....	4
1.2. Motivasyon.....	5
BÖLÜM 2.	
MR DAMPER VE YAPILARDA KULLANIMI.....	6
2.1. MR Sıvılar ve MR Etki .....	6
2.2. MR Damper.....	8
2.2.1. Tek milli MR damper.....	10
2.2.2. Çift milli MR damper.....	11
2.2.3. Dönel MR damper.....	11
2.3. MR Damperin Kullanım Alanları .....	12
2.4. Yapılarda MR Damper ile Kontrol .....	14
2.5. Disiplinlerarası Yapı .....	16
BÖLÜM 3.	
LİTERATÜR TARAMASI.....	18

## BÖLÜM 4.

MR DAMPERİN ANALİTİK OLARAK MODELLENMESİ .....	28
4.1. Manyetik Alanın Modellenmesi.....	28
4.2. Akış Fiziğinin Modellenmesi.....	31
4.2.1. Akış modunda dikdörtgen kanal yaklaşımı ile modelleme .....	36
4.2.1.1. Akış modunda dikdörtgen kanal yaklaşımının MR etki olmadan uygulanması.....	37
4.2.1.2. Akış modunda dikdörtgen kanal yaklaşımının MR etki altında Bingham modeline göre uygulanması.....	38
4.2.1.3. Akış modunda dikdörtgen kanal yaklaşımının MR etki altında Herschel-Bulkley modeline göre uygulanması .....	40
4.2.2. Akış modunda eksenel simetri yaklaşımı ile modelleme .....	42
4.2.2.1. Akış modunda eksenel simetri yaklaşımının MR etki olmadan uygulanması.....	42
4.2.2.2. Akış modunda eksenel simetri yaklaşımının MR etki altında Bingham modeline göre uygulanması.....	43
4.2.3. Karma modda dikdörtgen kanal yaklaşımı ile modelleme.....	45
4.2.3.1. Karma modda dikdörtgen kanal yaklaşımının MR etki olmadan uygulanması.....	46
4.2.3.2. Karma modda dikdörtgen kanal yaklaşımının MR etki altında Bingham modeline göre uygulanması.....	47
4.2.3.3. Karma modda dikdörtgen kanal yaklaşımının MR etki altında Herschel-Bulkley modeline göre uygulanması .....	49
4.2.4. Karma modda eksenel simetri yaklaşımı ile modelleme.....	49
4.2.4.1. Karma modda eksenel simetri yaklaşımının MR etki olmadan uygulanması.....	50
4.2.4.2. Karma modda eksenel simetri yaklaşımının MR etki altında Bingham modeline göre uygulanması.....	51
4.3. Çözümlerin Uygulanması .....	52
4.3.1. Verilen bir hız için piston kuvvetinin bulunması.....	52
4.3.2. Verilen bir kuvvet için piston hızının bulunması.....	53

## BÖLÜM 5.

MR DAMPERİN SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ .....	54
5.1. Referans MR Damperin Manyetik Alanının Sayısal Olarak Modellenmesi.....	55
5.2. Referans MR Damper İçerisindeki Akışın Sayısal Olarak Modellenmesi	57
5.3. Mevcut Reolojik Model Yaklaşımları.....	60
5.3.1. Bingham üniform manyetik alan yaklaşımı .....	61
5.3.2. Bingham eşlenik hücre yaklaşımı .....	63
5.4. Reometre Ölçümleri .....	67
5.4.1. Paralel plaka başlığı ölçümleri .....	69
5.4.2. Çift-boşluk başlığı .....	70
5.4.3. Başlıkların kıyaslanması .....	71
5.5. Yeni Reolojik Yaklaşımlar.....	74
5.5.1. Herschel-Bulkley için eğri uydurma yaklaşımı.....	74
5.5.2. Herschel-Bulkley (HB) interpolasyon yaklaşımı .....	75
5.5.3. Viskozite interpolasyonu yaklaşımı .....	77
5.5.4. Kayma gerilmesi interpolasyonu yaklaşımı .....	79
5.6. Yeni Yaklaşımların Kıyaslanması .....	79

## BÖLÜM 6.

UYGULAMA İÇİN YENİ BİR MR DAMPERİN PARAMETRİK TASARIMI VE OPTİMİZASYONU.....	89
6.1. MR Damperin Parametrik Modelinin Oluşturulması.....	89
6.2. MR Damper Geometrisinin Optimizasyonu .....	90
6.3. MR Damperin Üretilmesi.....	91
6.4. Test Düzeneği .....	92
6.5. Test Sonuçları .....	93
6.6. Sayısal Modelin Doğrulanması.....	95

## BÖLÜM 7.

MR DAMPERİN DİNAMİK MODELLERİ.....	110
7.1. Parametrik Modeller .....	110

7.1.1. Bouc-Wen modeli .....	110
7.1.2. Düzenlenmiş Bouc-Wen modeli .....	111
7.1.3. Düzenlenmiş Dahl modeli .....	112
7.1.4. LuGre modeli .....	113
7.1.5. Cebirsel model .....	113
7.2. Parametrik Olmayan Modeller .....	114
7.2.1. Bulanık mantık modelleri .....	114
7.2.2. Yapay sinir ağları modelleri .....	115
7.3. Parametrik Dinamik Modellerin Kıyaslanması .....	117

## BÖLÜM 8.

MR DAMPERİN KONTROL ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ .....	120
8.1. Kontrol Algoritmalarının Yapısı .....	120
8.2. Uygulanan Kontrol Algoritmaları .....	122
8.2.1. Kayma kipli kontrol .....	122
8.2.2. PID kontrol .....	123
8.2.3. Enerji tabanlı kontrol .....	124
8.3. Kontrolcü Arayüzünün Geliştirilmesi .....	124

## BÖLÜM 9.

### MODEL BİNA ÜZERİNDE MR DAMPER İLE KONTROL

UYGULAMALARI .....	129
9.1. Yapı Modellerinin Geliştirilmesi .....	129
9.1.1. Tasarım süreci .....	129
9.1.2. Üretim süreci .....	130
9.2. Test Sisteminin Oluşturulması .....	131
9.3. Deney Tasarımı .....	135
9.4. Değerlendirme Kriterlerinin Belirlenmesi .....	136
9.5. Bina Testleri .....	137
9.5.1. 5 Katlı bina testleri .....	138
9.5.2. 6 Katlı bina testleri .....	139
9.5.3. 7 Katlı bina testleri .....	140



9.5.4. 8 Katlı bina testleri .....	141
9.6. Tüm Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	143

## BÖLÜM 10.

SONUÇ VE ÖNERİLER .....	145
-------------------------	-----

KAYNAKLAR .....	147
-----------------	-----

EKLER .....	159
-------------	-----

ÖZGEÇMİŞ .....	174
----------------	-----



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Türkiye deprem risk haritası [1] .....	1
Şekil 1.2. Bina performans seviyeleri [4].....	3
Şekil 2.1. MR sıvının içerisindeki demir tozlarının MR etki olmadığında (solda) ve MR etki altında (sağda) gösterdiği davranış [11].....	7
Şekil 2.2. MR sıvının kullanım şekilleri [12].....	8
Şekil 2.3. MR damperin iç yapısı [11] .....	9
Şekil 2.4. Tek milli MR damper (a) Tek silindirli (b) Çift silindirli [14] .....	10
Şekil 2.5. Çift milli MR damper[16].....	11
Şekil 2.6. Disk tipi bir dönel MR damperin kesit görüntüsü [17].....	12
Şekil 2.7. Audi tarafından 2006 yılında TT ve R8 modellerinin süspansiyonu için üretilen MR damper[24].....	13
Şekil 2.8. Sönümleme çeşitleri, (yukarıdan aşağıya doğru) sönümsüz durum, pasif sönümleme, aktif sönümleme, yarı-aktif sönümleme [7] .....	15
Şekil 2.9. MR Damperin yapılarda uygulanmasına ilişkin disiplinlerarası çalışma yapısı .....	17
Şekil 3.1. MR Damper ve kontrol araştırmalarına ilişkin dönemler .....	18
Şekil 4.1. Tek bobinli bir MR damperin manyetik alan analizi .....	29
Şekil 4.2. Doğrusal MR damperin çalışma şekilleri (a) Kayma modu (b) Akış modu (c) Karma mod [48].....	31
Şekil 4.3. MR damperin akış modu için geometrik büyüklükleri .....	36
Şekil 4.4. Bingham akışkanı için Kartezyen koordinatlarda akış modunda akış bölgeleri .....	38
Şekil 4.5. Bingham akışkanı için silindirik koordinatlarda akış modundaki akış bölgeleri .....	43
Şekil 4.6. MR damperin karma mod için geometrik büyüklükleri .....	46

Şekil 4.7. Bingham akışkanı için Kartezyen koordinatlarda karma modda akış bölgeleri .....	48
Şekil 5.1. MR damperin manyetik alan analiz modeli .....	56
Şekil 5.2. MR damperin içerisindeki manyetik akı yoğunluğunun sonlu elemanlar analizi ile elde edilmesi.....	57
Şekil 5.3. Referans MR damperin HAD geometrisi .....	57
Şekil 5.4. HAD analizi için oluşturulan ağ yapısı.....	59
Şekil 5.5. Ağ bağımsızlığının elde edilmesi.....	60
Şekil 5.6. Referans MR damperin üniform Bingham akışkanı olarak modellenmesi	62
Şekil 5.7. Referans MR damperin üniform manyetik alan yaklaşımı ile elde edilmiş kuvvet-yerdeğiştirme sonuçlarının deneysel veriler ile karşılaştırılması..	62
Şekil 5.8. Referans MR damperin üniform manyetik alan yaklaşımı ile elde edilmiş kuvvet-hız sonuçlarının deneysel veriler ile karşılaştırılması.....	63
Şekil 5.9. Manyetik akı vektörlerinin MR sıvı bölgesi üzerindeki görünümü.....	64
Şekil 5.10. Manyetik akı yoğunluğunun FLUENT'e aktarılmış hali.....	64
Şekil 5.11. Referans MR damperin eşlenik ve üniform manyetik alan yaklaşımı ile elde edilmiş kuvvet-yerdeğiştirme sonuçlarının deneysel veriler ile kıyaslanması.....	65
Şekil 5.12. Referans MR damperin eşlenik ve üniform manyetik alan yaklaşımı ile elde edilmiş kuvvet-hız sonuçlarının deneysel veriler ile kıyaslanması ...	65
Şekil 5.13. Referans MR damper için kanal bölgesinde maksimum hız anında görünür viskozite konturları.....	66
Şekil 5.14. Maksimum hızda manyetik akı altında ve akım olmadığı durum için akış profilleri .....	67
Şekil 5.15. Reometre cihazı (solda), reometrenin yardımcı parçaları (sağda).....	68
Şekil 5.16. Paralel plaka başlığı (solda), çift-boşluk başlık (sağda) .....	69
Şekil 5.17. MRF132DG MR sıvısının paralel plaka başlığı kullanılarak farklı akım değerlerinde elde edilmiş kayma hızı-kayma gerilmesi sonuçları.....	70
Şekil 5.18. MRF132DG MR sıvısının çift-boşluk başlık kullanılarak farklı akım değerlerinde elde edilmiş kayma hızı-kayma gerilmesi sonuçları.....	70
Şekil 5.19. MRF132DG sıvısının farklı başlıklar ile ölçülen akma gerilmelerinin katalog verileri ve matematiksel model ile kıyaslanması .....	71

Şekil 5.20. MRF132DG sıvısının farklı başlıklar ile 0 A akım altında ölçülen kayma gerilmelerinin katalog verileri ile kıyaslanması.....	72
Şekil 5.21. Paralel plaka başlığı ve çift-boşluk başlığı ile yapılan ölçüm verilerinin kullanıldığı HAD analizlerinin kuvvet-yerdeğiştirme sonuçlarının referans MR damper deneyleri ile kıyaslanması.....	73
Şekil 5.22. Paralel plaka başlığı ve çift-boşluk başlık ile yapılan ölçüm verilerinin kullanıldığı HAD analizlerinin kuvvet-hız sonuçlarının referans MR damper deneyleri ile kıyaslanması.....	73
Şekil 5.23. HB interpolasyon yaklaşımının akış şeması .....	75
Şekil 5.24. HB interpolasyonu yaklaşımında kullanılan matris.....	76
Şekil 5.25. Viskozite interpolasyonu için kullanılan matris .....	77
Şekil 5.26. Viskozite interpolasyonu yaklaşımının akış şeması .....	78
Şekil 5.27. Önerilen yaklaşımlar ile yapılan HAD analizlerinin kuvvet-yerdeğiştirme sonuçlarının kıyaslanması .....	81
Şekil 5.28. Önerilen yaklaşımlar ile yapılan HAD analizlerinin kuvvet-hız sonuçlarının kıyaslanması.....	82
Şekil 5.29. 1 A akım altında maksimum hız durumunda farklı HAD yaklaşımları ve analitik çözümlerden elde edilen akış profillerinin kıyaslanması.....	85
Şekil 5.30. 1 A akım altında maksimum hız durumunda aktif bölgedeki viskozite konturları, yukarıdan aşağıya doğru viskozite interpolasyonu, HB interpolasyonu ve kayma gerilmesi interpolasyonu yaklaşımı .....	86
Şekil 5.31. 0 A akım altında maksimum hız durumunda HAD yaklaşımları ile elde edilen akış profilleri .....	87
Şekil 5.32. 0 A akım altında maksimum hız durumunda kayma gerilmesi interpolasyonu yaklaşımı için görünür viskozite konturları. ....	87
Şekil 5.33. 0 A akım altında maksimum hız durumunda HB interpolasyonu yaklaşımı için görünür viskozite konturları .....	88
Şekil 6.1. Tasarlanan MR damperin kesit görünüşü .....	89
Şekil 6.2. MR damperin geometrik parametreleri.....	90
Şekil 6.3. Üretilen MR damper .....	92
Şekil 6.4. MR damper performans test düzeneği .....	93

Şekil 6.5. Üretilen MR damperin farklı akımlar altında kuvvet-yerdeğiştirme grafiği .....	94
Şekil 6.6. Üretilen MR damperin farklı akımlar altında kuvvet-hız grafiği.....	95
Şekil 6.7. Üretilen MR damperin ağ bağımsızlığının elde edilmesi .....	96
Şekil 6.8. 0 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-yerdeğiştirme grafiği ....	97
Şekil 6.9. 0 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-hız grafiği .....	97
Şekil 6.10. 0,5 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-yerdeğiştirme grafiği	98
Şekil 6.11. 0,5 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-hız grafiği .....	98
Şekil 6.12. 1 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-yerdeğiştirme grafiği ..	99
Şekil 6.13. 1 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-hız grafiği .....	99
Şekil 6.14. 1,5 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-yerdeğiştirme grafiği ....	100
Şekil 6.15. 1,5 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-hız grafiği .....	100
Şekil 6.16. 2 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-yerdeğiştirme grafiği	101
Şekil 6.17. 2 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-hız grafiği .....	101
Şekil 6.18. Üretilen MR damperin 0 A akım altında ve maksimum hız durumunda HAD analizi ve analitik modeller ile aktif bölgede elde edilen akış profili .....	102
Şekil 6.19. Üretilen MR damperin 0,5 A akım altında ve maksimum hız durumunda HAD analizi ve analitik modeller ile aktif bölgede elde edilen akış profili .....	103
Şekil 6.20. Üretilen MR damperin 1 A akım altında ve maksimum hız durumunda HAD analizi ve analitik modeller ile aktif bölgede elde edilen akış profili .....	103
Şekil 6.21. Üretilen MR damperin 1,5 A akım altında ve maksimum hız durumunda HAD analizi ve analitik modeller ile aktif bölgede elde edilen akış profili .....	104
Şekil 6.22. Üretilen MR damperin 2 A akım altında ve maksimum hız durumunda HAD analizi ve analitik modeller ile aktif bölgede elde edilen akış profili .....	104
Şekil 6.23. Tüm akımlar için analitik modeller ve HAD modelinden elde edilen maksimum kuvvetlerin deneysel veriler ile kıyaslanması .....	107

Şekil 6.24. HAD analizi ile 0 A akım altında ve maksimum hız durumunda elde edilen viskozite konturları.....	108
Şekil 6.25. HAD analizi ile 1 A akım altında ve maksimum hız durumunda aktif bölgede elde edilen viskozite konturları .....	109
Şekil 7.1. Bouc-Wen modeli [62] .....	111
Şekil 7.2. Düzenlenmiş Bouc-Wen modeli[62] .....	111
Şekil 7.3. Düzenlenmiş Dahl modeli[63].....	112
Şekil 7.4. Yapay sinir ağları modelindeki katmanların şematik gösterimi .....	116
Şekil 7.5. Yapay sinir ağları modelindeki bir nöron üzerindeki değerin hesaplanması .....	116
Şekil 7.6. Farklı parametrik dinamik modeller den elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme sonuçlarının deneysel veriler ile kıyaslanması.....	118
Şekil 7.7. Farklı parametrik dinamik modellerden elde edilen kuvvet-hız sonuçlarının deneysel veriler ile kıyaslanması.....	118
Şekil 8.1. Kontrol algoritmalarının akış şeması .....	120
Şekil 8.2. Ters MR damper modeline ait yapay sinir ağı şeması.....	121
Şekil 8.3. Kontrolcüler ve ayarlar sekmesi .....	125
Şekil 8.4. MR damper akım tipi sekmesi .....	126
Şekil 8.5. Grafikler sekmesi, Yer Değişimleri alt sekmesi .....	127
Şekil 8.6. Grafikler sekmesi, MR Damper, Yer İvmeölçeri alt sekmesi.....	128
Şekil 9.1. Referans alınan beş katlı betonarme binaya ait görseller.....	129
Şekil 9.2. Yapı modelinin sonlu elemanlar modeli .....	130
Şekil 9.3. Ölçeklendirilmiş çelik yapı modelleri, 5 katlı (solda), 6 katlı (ortada), 7 katlı (sağda).....	131
Şekil 9.4. SMotion 3000 hareket platformu .....	132
Şekil 9.5. İvmeölçerler, tek eksenli ivmeölçer (solda), Veri bağlantısı (ortada), üç eksenli ivmeölçer (sağda).....	133
Şekil 9.6. (a) DAQ şasesi ve DAQ kartları, (b) yük hücresi, (c) pozisyon ölçer ve (d) termoçift .....	133
Şekil 9.7. MR damperin yerleşim şekli.....	134
Şekil 9.8. Test düzeneğinin blok diyagramı.....	135

Şekil 9.9. Deneyleerde kullanılan depremlerin ivme-zaman grafikleri, El-Centro (solda), Kocaeli (sağda) .....	136
Şekil 9.10. 5 katlı model binanın üç farklı kontrol algoritmasına göre görelî yer değiştirmeleri .....	138
Şekil 9.11. 6 katlı model binanın üç farklı kontrol algoritmasına göre görelî yer değiştirmeleri .....	139
Şekil 9.12. 7 katlı model binanın üç farklı kontrol algoritmasına göre görelî yer değiştirmeleri .....	141
Şekil 9.13. 8 katlı model binanın üç farklı kontrol algoritmasına göre görelî yer değiştirmeleri .....	142



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1 Türkiye’de son 100 yılda meydana gelen büyük depremler [2,3] .....	2
Tablo 4.1. Manyetik alan analizindeki geometrik büyüklüklerin MR damper ölçülerine göre karşılıkları .....	30
Tablo 5.1. MR damperin hareket değerleri .....	58
Tablo 5.2. Önerilen yaklaşımlar ile yapılan HAD analizlerinin hata değerlerinin kıyaslanması.....	83
Tablo 6.1. Sabit tutulan parametreler .....	90
Tablo 6.2. Değişken tutulan parametreler .....	90
Tablo 6.3. Optimizasyon sonuçlarının, sayısal analiz sonuçları ile doğrulanması ...	91
Tablo 6.4. MR damper performans deney tasarımı.....	93
Tablo 6.5. MR damperin her bir 0.5 A akım artırımına karşılık kuvvet artış oranları .....	95
Tablo 6.6. Üretilen MR damperin 1 A akım altında deneysel ve sayısal sonuçlarının kıyaslanması.....	96
Tablo 6.7. Aktif bölgede ölçülen farklı manyetik akı yoğunluğu ve karşılık gelen Herschel-Bulkley katsayıları.....	102
Tablo 6.8. Dikdörtgen kanal yaklaşımının üretilen MR damper için Bingham modeline göre uygulanmasına ait sonuçlar .....	105
Tablo 6.9. Eksenel simetrik yaklaşımın üretilen MR damper için Bingham modeline göre uygulanmasına ait sonuçlar .....	105
Tablo 6.10. Dikdörtgen kanal yaklaşımının üretilen MR damper için Herschel-Bulkley modeline göre uygulanmasına ait sonuçlar .....	106
Tablo 6.11. HAD ile MR damperin modellenmesine ait sonuçlar ve deneysel verilere göre hata değerleri .....	106
Tablo 6.12. Tüm akımlar için analitik modeller ve HAD modelinden elde edilen maksimum kuvvetlerin kıyaslanması.....	107



Tablo 7.1. Farklı parametrik dinamik modellerden elde edilen sonuçların deneysel verilere göre hata değerleri .....	119
Tablo 9.1. Deney sonucu elde edilen bina frekansları .....	130
Tablo 9.2. SANLAB SMotion 3000'e ait özellikler .....	132
Tablo 9.3. Deneylerde uygulanan deprem ivmelerinin ölçekleri .....	135
Tablo 9.4. 5 Katlı model binanın sarsma testleri sonucunda elde edilen değerlendirme kriterleri.....	139
Tablo 9.5. 6 Katlı model binanın sarsma testleri sonucunda elde edilen değerlendirme kriterleri.....	140
Tablo 9.6. 7 Katlı model binanın sarsma testleri sonucunda elde edilen değerlendirme kriterleri.....	141
Tablo 9.7. 8 Katlı model binanın sarsma testleri sonucunda elde edilen değerlendirme kriterleri.....	142
Tablo 9.8. Tüm bina ve kontrolcülerin El-Centro depremi altında $J_3$ katsayı değerleri .....	143
Tablo 9.9. Tüm bina ve kontrolcülerin Kocaeli depremi altında $J_3$ katsayı değerleri .....	144

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Deprem, yapı güvenliği, MR damper, MR sıvı, manyeto-reolojik damper, optimizasyon, HAD, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, kontrol sistemleri, PID, enerji tabanlı kontrol, kayma kipli kontrol, yapay sinir ağları

Manyetoreolojik (MR) damperler son yirmi yıldır tüm dünyada otomotiv, biyomedikal, inşaat ve savunma sanayi gibi çeşitli alanlarda pratik olarak kullanılmakta ve bu alanlarda yapılan araştırmalar halen güncelliğini korumaktadır. Bu alanların başında ise titreşim altındaki yapıların MR damper ile kontrolü gelmektedir. Bu çalışmada, MR damper kullanılarak betonarme binalardaki sismik titreşimlerinin sönümlenmesi farklı çelik yapı modelleri kullanılarak incelenmiştir.

Çalışmada öncelikle MR damper içerisindeki akış ve manyetik alana ilişkin analitik modeller ortaya konulmuş, ardından bir referans MR damper dikkate alınarak farklı HAD yaklaşımları incelenmiş ve literatürdeki HAD yaklaşımlarının MR damperin modellenmesinde yetersiz olduğu gösterilmiştir. Daha sonra, reometre yardımıyla MR sıvının reolojik özellikleri belirenmiş ve bu veriler ışığında yeni bir HAD yaklaşımı ortaya konularak sonuçlar referans MR damper ile doğrulanmıştır. Geliştirilen yaklaşım kullanılarak, yapı modellerine uygun ölçekte bir MR damper tasarlanmış, optimize edilmiş ve üretilmiştir. Ayrıca, geliştirilen HAD yaklaşımı üretilen MR damperin test sonuçları ile bir kez daha doğrulanmıştır.

Üretilen MR damper için literatürdeki parametrik dinamik modeller incelenmiş ve bir yapay sinir ağları dinamik modeli geliştirilmiştir. Yapı modellerinin MR damper ile kontrol edilebilmesi için iki tanesi geliştirilen yapay sinir ağları modeli ile çalışan toplam üç adet kontrol algoritması kullanılmıştır.

Türkiye yapı stoğunun büyük çoğunluğu 5-8 katlı betonarme binalardan oluşmaktadır. Bu yapıların periyod özellikleri dikkate alınarak, dört farklı çelik yapı modeli tasarlanmıştır. Yapı modelleri bir sarsma tablasına yerleştirilerek El-Centro ve Kocaeli deprem ivmeleri altında MR damper ile yarı-aktif olarak kontrol edilmiştir. Ayrıca ticari bir MR damper kullanılarak deneyler tekrarlanmıştır.

Çalışma sonucunda yapı modellerinin kontrolcüsüz duruma göre taban kesme kuvvetleri indekslerinde %50'ye varan bir iyileşme sağlandığı ve üretilen MR damperin ilgili indekslerde ticari bir MR dampere göre %23 daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

# DESIGN OF A SEMI-ACTIVE CONTROLLED MAGNETIC DAMPER FOR SEISMIC MITIGATION OF BUILDINGS

## SUMMARY

Keywords: earthquake, earthquake-resistant structure, MR damper, MR fluid, Optimization, CFD, computational fluid dynamics, control, PID, energy based control, sliding mode control, neural network

Magnetorheologic (MR) dampers are widely used around the world in various areas such as civil engineering, biomedical applications, automotive and defense industry, and it remains as an active research area. The control of structures via MR dampers under excitation is a leading topic in this area. In this study, the damping of concrete buildings via MR dampers under seismic excitation was investigated by using different steel building models.

The analytical models for the flow and magnetic field inside the MR damper were examined. Different CFD approaches were investigated by considering a reference MR damper, and it was shown that the existing rheological approaches in the literature are not capable of modeling MR dampers. Rheological properties of MR fluid were defined by using a rheometer, and a new CFD approach was developed based on these data. The developed approach was then implemented for the design and optimization of the MR damper that was manufactured consistent to the scale of the building models.

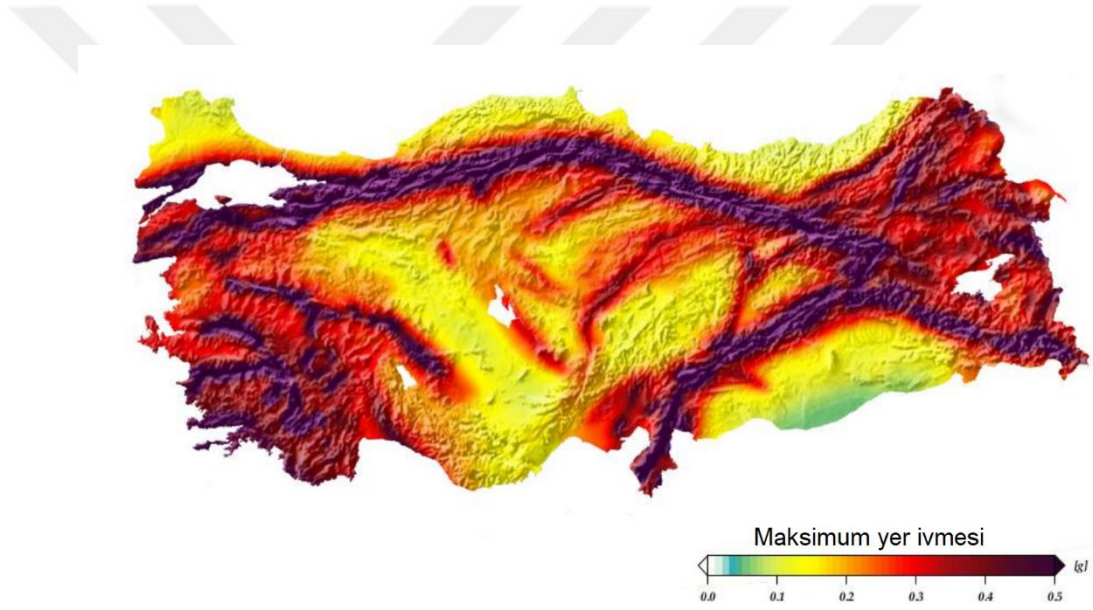
Different parametric dynamic models of the manufactured MR damper were investigated, and a non-parametric artificial neural network dynamic model was developed. In order to control the model buildings, three control algorithms were developed as two of them were based on the developed artificial neural network model.

The building stock of Turkey consists of 5-8 storey reinforced-concrete structures. Four different steel building models were designed by considering their period parameters. Building models were semi-actively controlled by the MR damper on a shaking table under the earthquake acceleration records of El-Centro and Kocaeli. Experiments were re-conducted by using a commercial MR damper.

The study shows that the base shear force indexes can decrease up to 50% regarding the passive-off condition and the manufactured MR damper has 23% better performance compared to a commercial MR damper.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsanlık var olduğundan beri doğal afetler insan hayatını etkileyen önemli olaylar olagelmıştır. Doğal afetlerin neden olduğu can ve mal kayıpları kimi zaman engellenemez iken, çoğu zaman bu kayıplar belirli önlemler ile engellenebilmektedir. Ülkemiz özelinde ise bu tip doğal afetlerin en yıkıcı olanı depremlerdir.



Şekil 1.1. Türkiye deprem risk haritası [1]

Türkiye, önemli deprem kuşaklarının kesiştiği yüksek riske sahip bir bölgede bulunmaktadır. Şekil 1.1.'de bu deprem kuşaklarına ilişkin risk haritası sunulmuştur. Buna göre kuzeyde Kuzey Anadolu Fay Hattı, güneyde Güney Anadolu Fay Hattı ve batıda Batı Anadolu Fay Hattı olmak üzere ülkenin neredeyse tamamı bu kuşaklar ile çevrelenmiştir. Tarihte birçok yıkıcı deprem bu hatlar üzerinde gerçekleşmiş ve önemli can ve mal kayıplarına neden olmuştur. Bu depremlerin en büyüğü 27 Aralık 1939'da Erzincan'da gerçekleşen deprem olmuştur. Buna yakın bir deprem ise anıları hala hafızalarda taze olan ve en büyük maddi kaybın yaşandığı deprem olarak kayıtlara

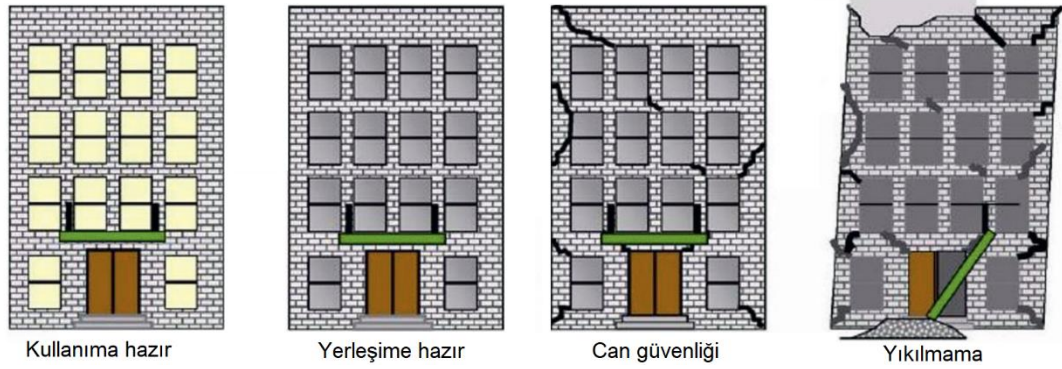
geçen 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremidir. Türkiye’de meydana gelen büyük depremler can ve mal kayıpları ile beraber Tablo 1.1.’de verilmiştir.

Tablo 1.1 Türkiye’de son 100 yılda meydana gelen büyük depremler [2,3]

Tarih	Saat	Yer	Şiddet	Büyük­lü k	Can kayıbı	Yıkılan/Hasar gören bina
26.12.1939	23:57	Erzincan	X-XI	7,9	32.968	116.720
26.11.1943	22:20	Ladik, Samsun	IX-X	7,2	4.000	40.000
19.08.1966	12:22	Muş, Varto	IX	6,9	2.396	20.007
24.11.1976	12:22	Van, Muradiye	IX	7,5	3.840	9.232
17.08.1999	03:02	Kocaeli, Gölcük	X	7,5	18.373	213.843

Tablo 1.1. incelendiğinde depremlerin Türkiye’nin çok farklı bölgelerinde yıkıcı olabildiği anlaşılmakta, özellikle Kocaeli depremi dikkate alındığında can kayıplarının birçoğunun standartlara uyulmadan imar edilen binaların deprem titreşimleri altında yıkılmasından kaynaklandığı görülmektedir. Türkiye’deki nüfusun hızlı bir şekilde kentleştiği dikkate alındığında, gelecekte olabilecek depremlerin şehirlerdeki yüksek katlı binalar için bir risk faktörü oluşturduğu açıktır. İstanbul ve çevresi başta olmak üzere tüm Türkiye’de standartlara uygun olmayan bu binaların yeniden yıkılıp depreme uygun hale getirilmesi ise ülke için ciddi bir ekonomik yük­tür. Bunun yerine, daha hızlı uygulanabilecek ve deprem anında binaların yıkılmasını engelleyecek akıllı sistemlerin kullanılması, binaların daha hızlı bir biçimde güvenli hale getirilmesini sağlayacaktır. Böyle bir dönüşümün gerçekleştirilmesi Türkiye için çok önemli bir gündem maddesi olmalıdır.

Yapıların taşıyıcı sistemi içerisinde yarı-aktif olarak kontrol edilebilen manyetoreolojik (MR) damperlerin kullanılması, deprem anında binalarda güvenliği artıracak çözümlerden biridir. Bu damperler sayesinde deprem anındaki yıkıcı titreşimlerin binaya olan etkileri azaltılarak Şekil 1.2.’de gösterilen bina performans seviyesi, can güvenliği (life safety) seviyesinden deprem sonrası yerleşime hazır (immediate occupancy) seviyesine getirilebilir [4].



Şekil 1.2. Bina performans seviyeleri [4]

Böyle bir çözümün uygulanabileceği, deprem riski açısından kritik olan bölgeler araştırılacak olursa, depremler neticesinde büyük mal ve can kayıpları yaşanan Sakarya ili ve çevresinin öne çıktığı görülmektedir. Şekil 1.1.'deki deprem risk haritasına göre Marmara Bölgesi'nde Sakarya, Kocaeli, Yalova, Bursa ve İstanbul gibi yoğun nüfusa sahip illerin yüksek risk altında olduğu net bir şekilde görülmektedir. Bu bölgeler Türkiye nüfusunun dörtte birini oluşturmaktadır. Bölgenin sismik hareketliliği de dikkate alındığında yaklaşık her 30 yılda bir gerçekleşmesi öngörülen yakın şiddetteki depremlere karşı önlemler alınması elzemdir. Aynı fay hattı üzerinde bulunan İstanbul için bilim insanları özellikle 17 Ağustos Gölcük depremi sonrası yaşanabilecek yıkıcı bir depreme karşı uyarılarda bulunmuşlardır. En son yapılan uyarı 27 Eylül 2019 tarihinde Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nün resmi açıklaması olarak kayıtlara geçmiştir [5]. Bu açıklamada, beklenen Marmara Depremi'nin büyüklüğünün 7'nin üzerinde olacağı belirtilmiş ve sona yaklaşıldığı hatırlatılmıştır. İstanbul'un nüfus yoğunluğu ve hızlı kentleşme sonucu standartlara uygun olmadan inşa edilen binalar dikkate alındığında bu bölgede ciddi önlemler alınması gerektiği görülmektedir. Yapılan çalışma, bu bağlamda uygulamaya dönük olarak ilgili coğrafyada yaygın olarak kullanılan yapı modellerini ele almakta ve deprem etkilerinin azaltılması için izlenecek yöntemlere ışık tutmaktadır.

## 1.1. Tezin Kapsamı

Yapılar, deprem ivmesi etkisiyle oluşan atalet kuvvetlerine, geometrik özellikleri ve malzeme karakteristiklerine bağlı olan bir sönüm ve yapı elemanlarının rijitlikleri ile karşı koyar. İnşaat mühendisleri, sismik hareket sonucunda oluşacak etkileri azaltmak için yapıları standartlara uygun inşa etmenin yanı sıra bu etkileri sönümlemek amacı ile yapı elemanlarının dışında birtakım ek sönümleme sistemleri kullanabilir. Bu yöntemler genel olarak sismik yalıtım başlığı altında toplanmaktadır. Sismik yalıtım ise temelde üç farklı kontrol yöntemi ile gerçekleştirilebilir. Bunlar; aktif kontrol, yarı-aktif kontrol ve pasif kontroldür.

Pasif kontrol; önceden belirlenmiş, sönümü sabit ve kontrol edilmeyen bir elemanın titreşim altındaki bir yapıya uygulanmasıdır. Taban izolatörü, buna örnek olarak sunulabilecek en tipik pasif kontrol elemanıdır. Bu elemanlar yapıların çeşitli yerlerine uygulanarak enerji sönümleyebilmektedir. Taban izolatörleri son 30 yıldan beri değişik formlarda geliştirilmekte ve gerçek yapılara uygulanmaktadır [6]. Ülkemizde ise pasif kontrole yönelik olarak maalesef az sayıda uygulama mevcuttur.

Aktif kontrol, pasif kontrolün aksine yapıya gelen titreşimlerin gerçek zamanlı olarak işlenerek yapının ihtiyaç duyduğu kuvvetin belirlenmesi ve bu kuvvetin yapıya bir aktüatör vasıtasıyla uygulanması demektir. Böylece dışardan bir enerji verilerek yapının dengede kalması sağlanır. Aktif kontrol yüksek enerjili bir kaynağa ihtiyaç duyar. Ayrıca, oldukça pahalıdır ve bakımı zordur. Pasif kontrol ise daha ekonomik olmasına rağmen, aktif kontrol gibi gelen etkiye karşı kendini uyarılma kabiliyeti olmadığı için sismik yalıtıma dinamik bir katkıda bulunamaz [7].

Yarı aktif kontrol ise hem aktif kontrolün gücünü, hem de pasif kontrolün ekonomikliğini bir arada bulundurur. Bu kontrol tipinde, dışarıdan yüksek enerjili bir kaynağa ihtiyaç duyulmaz. Buna karşılık aktif kontrole benzer biçimde, gelen titreşimle göre anlık olarak sistemin sönümü değiştirilebilir. Yarı-aktif kontrol yöntemleri, özellikle sismik kontrol ile ilgili olarak önem kazanan bir araştırma

alanıdır. Japonya’da, yarı-aktif sismik yalıtımın gerçek yapılarda birçok uygulaması bulunmaktadır [8]. MR damper ise yarı-aktif sismik kontrolün en tipik örneğidir.

Bu tez kapsamında bir MR damper vasıtasıyla hem ekonomik, hem de efektif bir kontrol yöntemi olan yarı-aktif kontrol, ülkemiz yapı stoğunu temsil eden 5-8 katlı model binalarda uygulanacaktır. Tez çalışmasında özellikle İstanbul ve çevresi ile Sakarya dikkate alınmış ve bu bölgelerde en çok kullanılan 5-8 katlı betonarme yapılara uygun bir çalışma yapılmıştır. Türkiye’deki nüfusun dörtte birinden fazlasının bu çevrede yaşadığı dikkate alınır, çalışmanın ülkemiz adına önemli bir boşluğu dolduracağı görülmektedir.

## **1.2. Motivasyon**

MR damperlerin yapılarda uygulaması uzun yıllardan beri araştırılmakta ve bu konuda ciddi sayıda araştırma makalesi bulunmaktadır. Yapılan bu araştırmalar pratiğe dönük olarak meyvelerini vermiş ve az da olsa dünyanın çeşitli yerlerinde pratik uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, gelecekte MR damperlerin binalarda yaygın olarak kullanımına bir hazırlık niteliğindedir. Ülkemiz özelinde bu tür çalışmaların az olması, yapılan çalışmayı önemli kılan başka bir husustur. Hâlbuki deprem kuşağında bulunan ülkemizde bu konudaki çalışmaların çok önceden başlaması gerektiği takdir edilebilir.

MR damperler sismik titreşimlerin sönümlenmesi dışında da birçok alanlarda kullanılabilir. Ülkemiz açısından önemi dikkate alındığında, bu alanların başında savunma sanayi gelmektedir. Tez kapsamında geliştirilen model ve yaklaşımlar tüm bu alanlara da ışık tutabilecek niteliktedir. Bu anlamda yapılan çalışma gerek depreme ilişkin ortaya konulan çözümler açısından, gerekse MR damperlerin ve Newton tipi olmayan sıvıların modellenmesi açısından önemli katkıları haizdir.



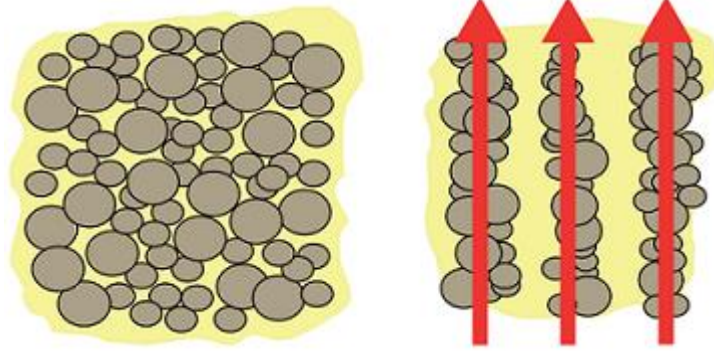
## **BÖLÜM 2. MR DAMPER VE YAPILARDA KULLANIMI**

### **2.1. MR Sıvılar ve MR Etki**

MR sıvısının keşfedilmesi 1940'lı yılların sonlarında elektoreolojik (ER) sıvısının keşfine dayanmaktadır [9]. ER sıvısının keşfedilmesinden sonra uzun yıllar MR sıvı yerine, oldukça benzer bir karakteristiğe sahip olan ER sıvılar araştırılmıştır. Bu iki sıvının çalışma prensibi oldukça benzerdir. Aralarındaki fark, MR sıvının manyetik alan ile ER sıvının ise elektrik alanı ile aktif hale gelmesidir. Bu nedenle MR sıvı çalışmalarında çoğunlukla ER sıvı ile ilgili yapılan çalışmalardan yararlanılmıştır. 2000 yılından sonra ise MR sıvıların ER sıvılar üzerindeki üstünlüğü genel olarak kabul görmüş [10] ve bu tarihten sonraki çalışmalarda çoğunlukla MR sıvılar ele alınmıştır.

MR sıvı, silikon yağı gibi bir baz akışkan ile içerisine katılan mikron ölçekteki demir tozlarının karışımından oluşur. Buna ek olarak MR sıvıdaki demir tozlarının çökmesini veya topaklaşmasını engellemek için çeşitli yüzey aktif maddeler (surfactant) ve kimyasallar ilave edilmektedir. ER sıvılarda ise manyetik aktif partiküller yerine elektrik alanı ile aktif hale gelen partiküller kullanılmaktadır.

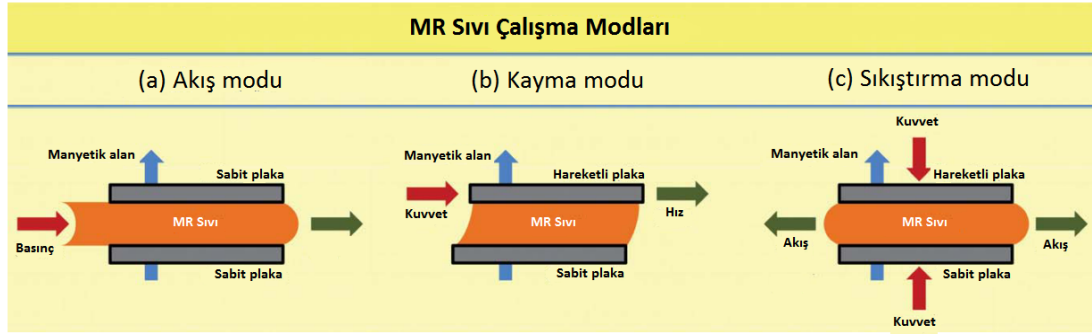
MR sıvının en önemli özelliği bir manyetik alan uygulandığında içerisindeki demir tozlarının, uygulanan manyetik alan çizgisi boyunca sıralanarak zincire benzer bir yapı oluşturmalarıdır. Bu olaya MR etki adı verilir. Bu sayede akışkan, manyetik alana dik yönde daha zor hareket etmekte ve akışkanın görünür viskozitesi artmış olmaktadır. Başka bir deyişle, akışkan sanki katı gibi davranarak akmaya direnç göstermektedir. Akışkanın MR etki altında oluşturduğu zincir benzeri yapı Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. MR sıvının içerisindeki demir tozlarının MR etki olmadığında (solda) ve MR etki altında (sağda) gösterdiği davranış [11]

Manyetik akı yoğunluğunun artışına karşılık olarak MR sıvının görünür viskozitesi belirli bir manyetik akı yoğunluğuna kadar artış göstermekte ve sonrasında sabit kalmaktadır. Bu durum, akışkanın manyetik alana doyması olarak ifade edilmektedir. Bir diğer husus ise MR sıvının manyetik akı yoğunluğu değişimine cevap verme hızıdır. MR sıvının MR etki altında görünür viskozitesini değiştirmesi milisaniyeler içerisinde gerçekleşmektedir. Hem manyetik alan değişimine çabuk cevap verebilmesi, hem de uygulanan akımlarda farklı görünür viskozite değerlerini sağlayabilmesi ile MR sıvı, çok çeşitli tasarımların gerçekleştirilmesinin önünü açmış ve bu sayede yarı-aktif olarak kontrol edilebilen çok farklı tipte sönümleyiciler tasarlanmıştır.

MR sıvının üç farklı kullanım şekli vardır. Bunlar kayma modu (shear mode), sıkıştırma modu (squeeze mode) ve akış modudur (flow mode). Bu kullanım şekilleri çeşitli cihazlarda bir veya birkaç modun bileşimi karma mod (mixed mode) biçiminde de uygulanabilmektedir [12]. Bunun dışında son yıllarda daralma modu (pinch mode) şeklinde bir çalışma modu daha önerilmiş, fakat literatürde ciddi bir karşılık görmemiştir [13].

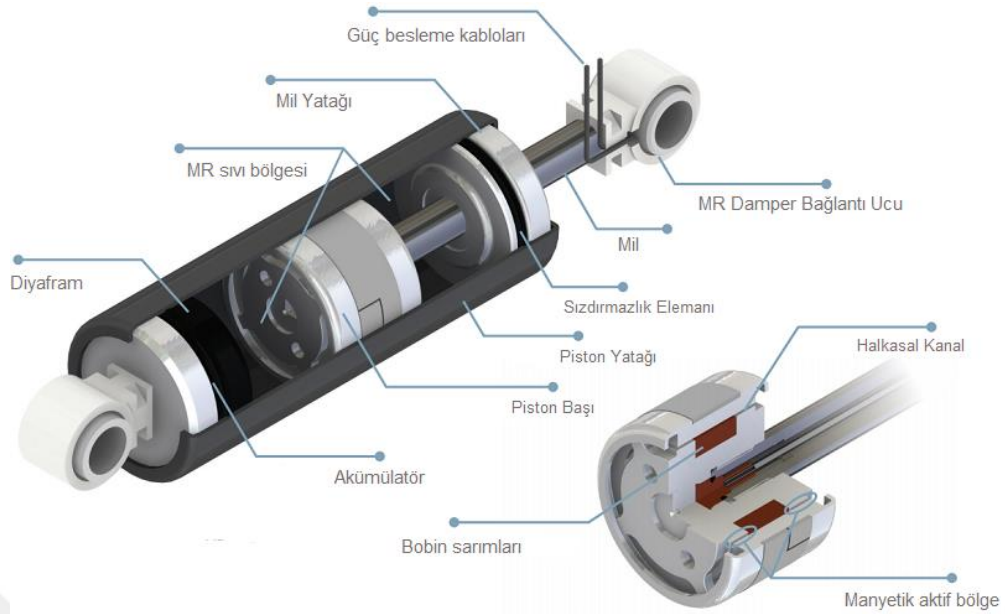


Şekil 2.2.MR sıvının kullanım şekilleri [12]

MR damperler genellikle akış modunda çalışır. Fakat doğrusal MR damperlerde yüzeylerin hareketinden dolayı kayma modu az da olsa etkin olabilmektedir. Bu durumda, MR damperin karma modda çalıştığı kabul edilir. Bunun dışında sıkıştırma modu veya sadece kayma modunda çalışan MR damperler de mevcuttur. Bu tip MR damperler genellikle özel araştırma konusu olarak ele alınmaktadır.

## 2.2. MR Damper

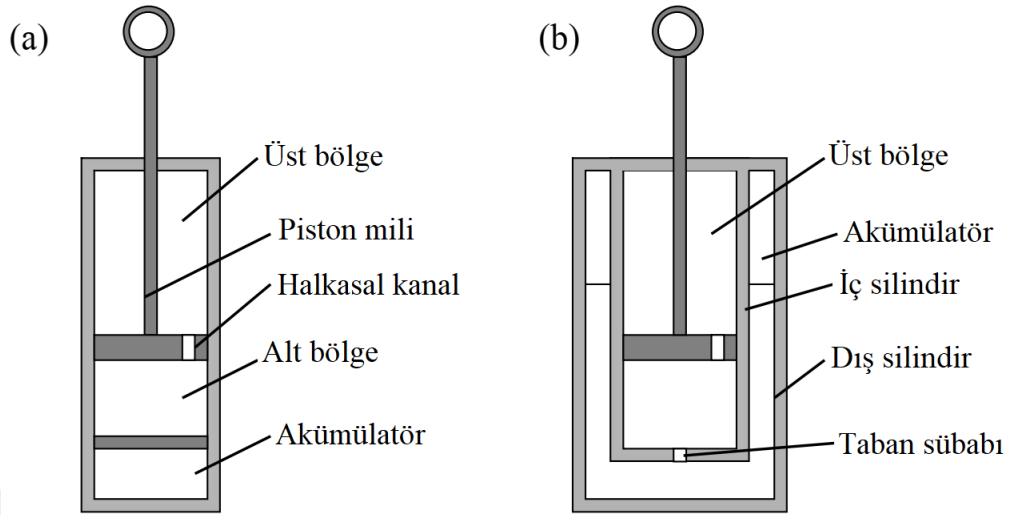
MR sıvının kuvvet sönmekle amacıyla kullanıldığı mekanizmalara MR damper denilir. Şekil 2.3.'te tek milli doğrusal bir MR damperin iç yapısı görülmektedir. Buradaki yapı, tıpkı klasik bir damperin yapısıdır. Buna göre, hareket eden piston başı içerisindeki halkasal kanaldan geçmeye zorlanan akışkan bir direnç kuvveti üretir. Bunu gerçekleştirmek için pistonun hareket edeceği bir piston yatağı, sızdırmazlık elemanının içinden geçen ve dışarı ile bağlantıyı sağlayan bir mil, iki bölme arasındaki hacim farkını kompanse eden bir akümülatör ve hacim değişikliğini sağlayan bir diyafram bulunur.



Şekil 2.3. MR damperin iç yapısı [11]

MR damperin iç kısmı ise yağ yerine MR sıvı ile doludur. MR damperin klasik damperlerden farkı, piston başının içerisinde saklıdır. Burada bakır tel ile sarılmış bir bobin mevcuttur. Bu bobinden çıkan güç besleme kabloları, dışarıdaki bir güç kaynağına bağlıdır. Doğru akım verildiğinde bobinden geçen elektrik akımını, etrafında bir manyetik alan oluşturur. Böylece, manyetik alan altında halkasal kanaldan geçen MR sıvı verilen akıma bağlı olarak aktif hale geçer ve MR sıvıdaki demir tozları akışın kanaldan geçmesini engelleyecek şekilde akış yönüne dik, zincir benzeri bir yapı oluşturur. Bu yapının akışa gösterdiği direnç, akım şiddetiyle artan manyetik akı yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Başka bir deyişle MR damperin sönümü, verilen akıma bağlı olarak anlık şekilde değiştirilebilir. MR sıvının tepki süresi milisaniyeler mertebesindedir. Bu sayede gerçek zamanlı olarak sönüm miktarının kontrol edilebildiği dinamik bir sönümlenme gerçekleştirilir. MR damperler yaygın olarak doğrusal formda imal edildiği için, bundan sonra aksi belirtilmedikçe MR damper denildiğinde doğrusal MR damper kastedilmiş olacaktır.

### 2.2.1. Tek milli MR damper

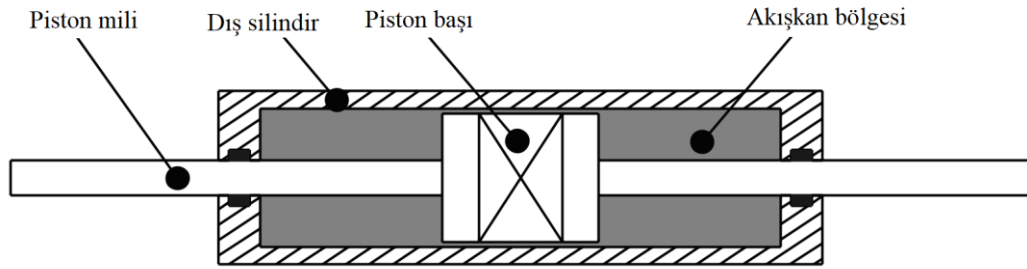


Şekil 2.4. Tek milli MR damper (a) Tek silindirli (b) Çift silindirli [14]

Şekil 2.4.'te gösterilen tek milli MR damper, piston başının tek taraflı olarak mile bağlı olduğu MR damperdir. Bu tip MR damperler en yaygın kullanıma sahiptir. MR sıvı bölmeler arasından geçerken, bölmelerden birisinde mil bulunduğu için iki bölmenin birim uzunluk başına olan sıvı hacmi birbirinden farklı olur. Bu nedenle klasik damperlerde olduğu gibi alt kısımda gaz doldurulmuş bir akümülatör bulunması gerekmektedir. Aksi takdirde sıkışan sıvı silindirin dış çeperlerinden sızar veya dış silindiri patlatır. Ayrıca akümülatör sayesinde hem MR sıvı belirli bir basınç altında tutularak kavitasyon önlenmekte hem de çalışma sonrasında MR damperin ilk pozisyonuna gelmesi sağlanmış olmaktadır.

Tek milli MR damperler Şekil 2.4(b).’de gösterildiği gibi çift silindirli olarak da imal edilebilir. Bu durumda alt kısımdaki akümülatör vazifesini iç ve dış silindir arasında doldurulmuş olan basınçlı gaz sağlar. Bu tip MR damperlerde, MR sıvının ikinci bölmeye geçmesini sağlayan bir taban sübabı bulunur. Çift silindirli MR damperler, daha düşük gaz basıncıyla çalışabilir fakat daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Ayrıca ısının tahliye edilmesi konusunda başarısızdırlar [15].

### 2.2.2. Çift milli MR damper

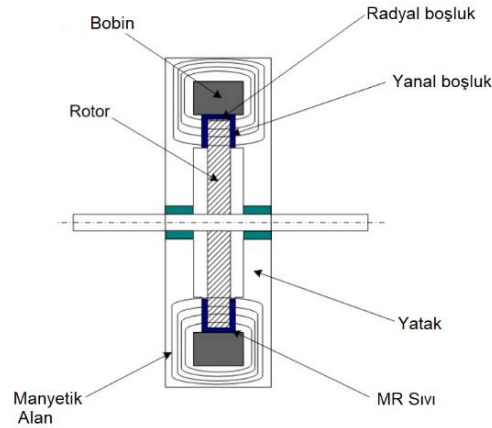


Şekil 2.5. Çift milli MR damper[16]

Şekil 2.5.'te gösterilen çift milli MR damperler, piston başının her iki uçtan da mil ile bağlı olduğu MR damperlerdir. Bu tasarımda her iki bölmede de mil olduğundan, bölmelerin hacimler eşittir ve bir akümülatöre ihtiyaç duyulmaz. Bununla beraber, kavitasyonu önlemek ve termal genişmeyi sağlayabilmek için düşük gaz basınçları ile akışkan basınç altında tutulur. Bu tip MR damperler ateşli silahlarda geri tepmenin önlenmesinde veya şok ve darbe yüklemeleri gibi ani yüklerin söz konusu olduğu durumlarda kullanılır [15].

### 2.2.3. Dönel MR damper

Dönel MR damperler, doğrusal yükler yerine açısız yükleri yani momenti sönmleyen damperlerdir. Genel olarak dairesel bir disk şeklindedir ve sönmlemeyi dairesel bir alanda yapar. Disk tipi bir dönel MR dampere ilişkin yapının kesit görünüşü Şekil 2.6.'da gösterilmiştir [17]. Burada MR sıvı, içeride dönen rotor ile dış yatak arasına doldurulmuştur. Rotor MR sıvı içerisinde döner ve rotoru halka şeklinde saran bobine akım verildiğinde bir manyetik alan oluşur. Bu manyetik alan MR sıvıyı aktif hale getirerek dönüşü yavaşlatır veya durdurur. Buradaki manyetik alan, bobinin sarım şekline bağlı olarak yanal boşluk veya radyal boşluk üzerinden geçecek şekilde oluşturulabilir. Yanal boşluk üzerinde MR etki sağlanırsa, dönel MR damper disk tipi olarak sınıflandırılır. Eğer MR etki radyal boşlukta sağlanır ise bu durumda daha geniş bir silindire ihtiyaç duyulduğundan dolayı MR damper tambur (drum) tipi olarak sınıflandırılır. Bunun dışında her iki tipin de kullanıldığı hibrit tip veya MR sıvının bir kanal içerisinde geçtiği kısıtlı açılı dönel damperler mevcuttur [18].



Şekil 2.6. Disk tipi bir dönel MR damperin kesit görüntüsü [17]

Dönel MR damper, frenler veya kavrama elemanları gibi dönen cisimlerin durdurulması veya güç aktarılması için uygulanabilir ve gördükleri vazifeye istinaden MR fren veya MR kavrama elemanı olarak da isimlendirilir. Kısıtlı açılı dönel MR damperler ise belirli bir kısıt içerisinde dönüş hareketi yaparlar. Buna karşılık daha yüksek kuvvetleri sönmölemek mümkündür. Bu nedenle genellikle açısız yöndeki titreşimlerin sönmölenmesinde kullanılır [18].

### 2.3. MR Damperin Kullanım Alanları

MR damperler sağladıkları özel kontrol imkanlarından dolayı çok geniş alanlardaki mühendislik uygulamalarında kullanılmaya elverişlidir. Bu alanların başında otomotiv endüstrisi gelmektedir. Araçlarda, tekerlek üzerindeki titreşimlerin sönmölenmesi konusunda yapılmış birçok akademik çalışma vardır. 2001 yılında Delphi Corp. tarafından MR damperlerin otomobillerde kullanılmasına ilişkin bir sistem geliştirilmiş ve daha sonra bu sistem LORD firması ve BWI grubu tarafından "MagneRide" ismiyle tescillenerek otomobillerde uygulanmaya başlanmıştır. Chevrolet firması, bu sistemi araçlarında opsiyonel olarak sunmuştur. Bunun dışında Acura, Audi, Buick, Cadillac, Ferrari gibi firmalar spor otomobillerinde bu sistemi kullanmaya başlamışlardır. 2006 yılında Audi firması tarafından TT ve R8 model araçların süspansiyonunda kullanılan bir MR dampere ilişkin görsel Şekil 2.7.'de verilmiştir. 2007 yılında BMW firması da otomobillerinde MR damper kullanmıştır.

2010 yılında Porsche firması motor aktarma organlarında dönel MR damper kullanmıştır [19]. Otomobil organlarındaki dönel titreşimlerin sönümlenmesi için de benzer şekilde kısıtlı açılı dönel damperler kullanılmaktadır[20]. Ayrıca MR damperler kamyon veya arazi taşıtları gibi araçlarda koltuk süspansiyonu için de kullanılabilir [21]. Bir çeşit dönel MR damper olan MR frenler ise otomotiv sektörü için önerilmiş fakat elde edilen tork, otomobiller için düşük seviyelerde kalmıştır. Bu nedenle konu halen araştırma aşamasındadır [22]. Dönel MR damperler, kavrama elemanı olarak otomobil şanzımanlarında da kullanılmaktadır. Bu şekilde kullanılan dönel MR damperlerin birçoğu elektrik akımına dahi ihtiyaç duymadan, mıknatıslar yardımı ile bu işlevi görebilmektedir [23].



Şekil 2.7. Audi tarafından 2006 yılında TT ve R8 modellerinin süspansiyonu için üretilen MR damper[24]

MR damperlerin kullanıldığı bir başka önemli alan bina veya köprüler gibi yapıların titreşim kontrolüdür. Bu alanda çok sayıda akademik çalışma mevcuttur. 2001 yılında bir MR damper ilk kez gerçek bir binada uygulanmış [25] ve ardından köprülerde uygulanmaya başlanmıştır [26]. Pratikte yapılan uygulamalar az sayıda olsa da bu konu halen yoğun bir araştırma alanı olarak varlığını korumaktadır.

Son yıllarda ortaya çıkan başka bir konu ise sanal gerçeklik uygulamalarında MR mekanizmaların kullanılmasıdır. Özellikle makine-insan etkileşimini sağlamak adına bu konu oldukça önemli hale gelmiştir. Bu alanda yapılan en temel çalışmalardan birisi MR eldivenlerdir. Bu eldivenler oldukça küçük dairesel MR frenlerden oluşmaktadır. Bu MR frenlerin ağırlıkları 100 gram mertebelerindedir [27].



Medikal sektörü de MR damperlerin önem kazanmaya başladığı başka bir alandır. Bu alanların başında protez kol ve bacaklar gelmektedir. 2001 yılında ilk kez ticari bir protez bacak başarıyla üretilmiş ve uygulanmıştır [28]. Ayrıca Parkinson gibi vücut titreşimlerinin kontrol edilemediği hastalıklar için, titreşim kontrolünü sağlamak adına MR damperlerin kullanılması önerilmektedir [29].

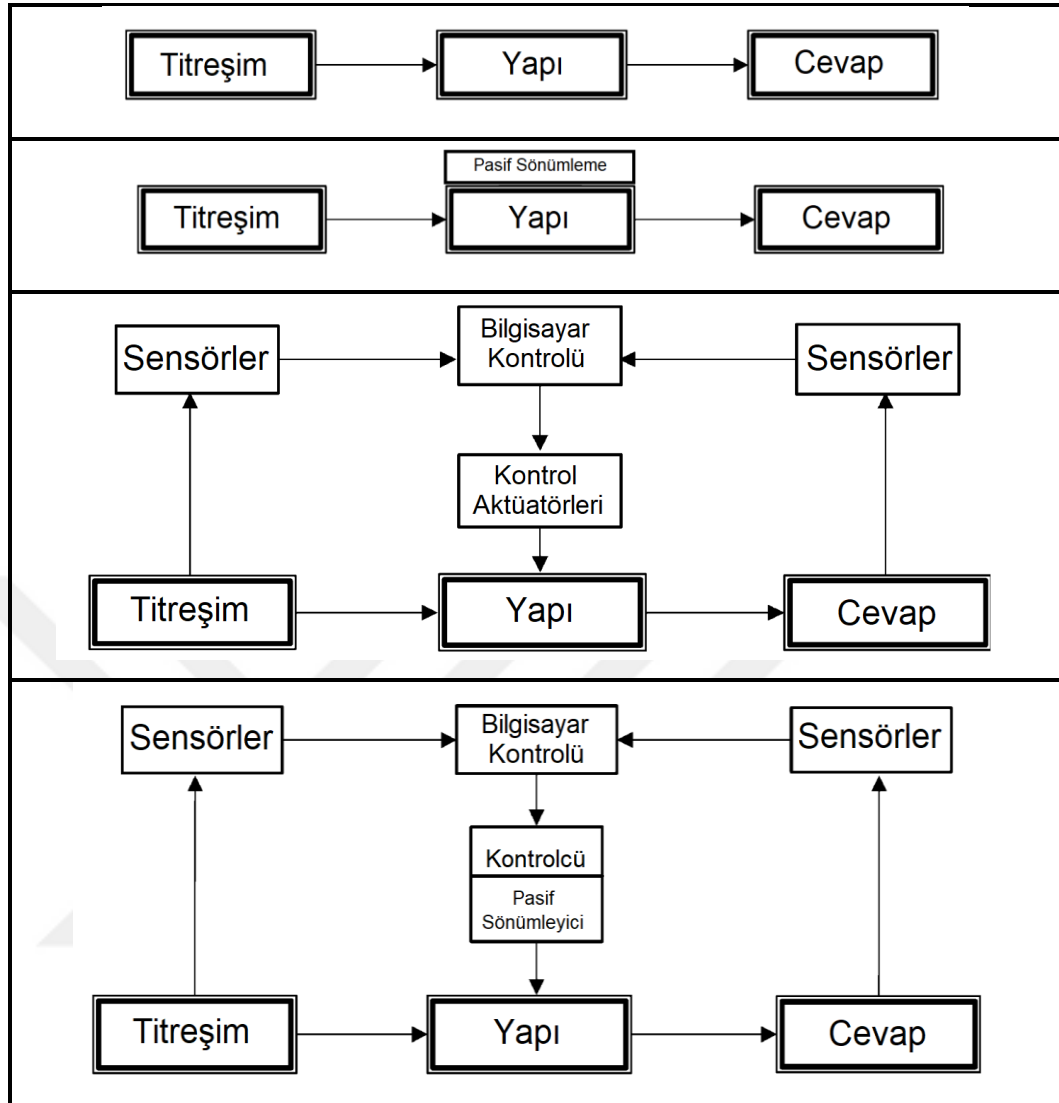
Savunma sanayi, MR damperlerin kullanıldığı bir diğer alandır. Ateşli silahlardaki geri tepmenin önlenmesi için ani darbe yüklemesine uygun MR damperler tasarlanmaktadır. Bu MR damperler; küçük bir tüfekten, büyük obüs bataryalarına kadar çeşitli silahlarda uygulanabilmektedir [30,31]. Arazi koşullarında çalışan askeri araçlardaki titreşim sönümlenmesi de MR damperler ile yapılabilmektedir [32].

Son yıllarda gündeme gelen bir başka bir kullanım şekli, rüzgar türbinlerinin zeminle bağlantısının sağlandığı plakanın dengesinin sağlanması için MR damperlerin kullanılmasıdır [33]. Bunun dışında çamaşır makinelerinde titreşim sönümlenmesi [34], helikopter kanatları [35] veya çeşitli havacılık uygulamaları [36] olmak üzere birçok çeşitli alanda araştırmalar mevcuttur.

#### **2.4. Yapılarda MR Damper ile Kontrol**

MR damperin yapılarda kullanımı ilk olarak 1996 yılında önerilmiş [37] ve bu yıllardan itibaren yapıların MR damper ile kontrolü, oldukça popüler bir araştırma alanı olmuştur. Köprüler veya binalar için rüzgar veya sismik titreşimlere yönelik birçok kontrol algoritması uygulanmış veya deneysel olarak çalışılmıştır.

MR damperin yapılarda kullanımının anlaşılması için öncelikle yarı-aktif sönümlenme kavramı ele alınmalıdır. Yapılarda kullanılan sönümlenme, üç ana başlık altında toplanabilir. Bunlar (1) pasif sönümlenme, (2) aktif sönümlenme ve (3) yarı-aktif sönümlenmedir. Bunlara ilaveten sönümlenmenin olmadığı durum da dikkate alınarak dört farklı sönümlenme işlemine ilişkin şema Şekil 2.8.'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Sönümlenme çeşitleri, (yukarıdan aşağıya doğru) sönümsüz durum, pasif sönümlenme, aktif sönümlenme, yarı-aktif sönümlenme [7]

Pasif sönümlenme kısaca, yapılarıdaki titreşimleri herhangi bir geri bildirim almadan sönümleyen elemanlar ile gerçekleştirilir. Böyle bir sönümlenme için herhangi bir dış enerji kaynağına ihtiyaç duyulmaz. Dolayısıyla yapının toplam enerjisi artırılmaz. Uygulaması nispeten basittir ve ucuz elemanlar ile bu tip bir sönümlenme gerçekleştirilebilir. Metalik sönümleyiciler, sürtünme tipi sönümleyiciler ve viskoelastik sönümleyiciler pasif sönümlenme sistemlere örnek olarak verilebilir. Ayrıca ayarlı kütle sönümleyicileri ve ayarlı sıvı sönümleyicileri (TLD, Tuned Liquid Dampers) de bu grubun içerisinde sayılabilir [38]. Bu tip sönümleyicilerin bir kısmı sismik hareket sonrasında kalıcı hasar görebilir ve bu yüzden değiştirilmesi

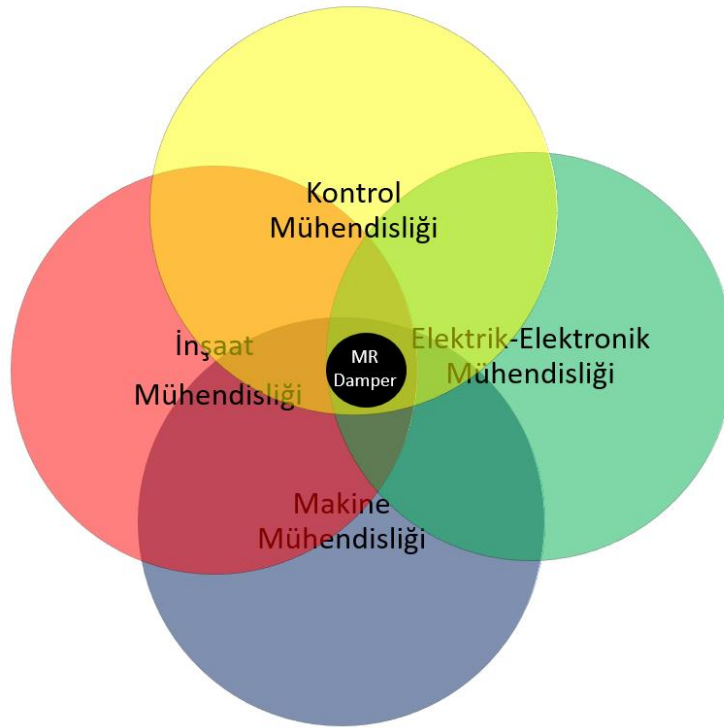
gerekebilir. Pasif sönümleme günümüzde hala oldukça yaygın bir şekilde yapılarda kullanılmaktadır.

Aktif sönümleme ise pasif sönümlemenin tam aksine harici bir güç kaynağı kullanarak sisteme bir kuvvet uygulamak anlamına gelir. Bu sayede sistemin enerjisi artırılıp azaltılabilir. Burada aktif sönümlemenin nasıl çalışacağına yapı üzerindeki sensörlerden yapının ilgili katı veya konumu için alınan ivme ve yerdeğiştirme gibi verilerin işlenmesi ile karar verilir. Bu tip bir sönümleme için akış şeması Şekil 2.8.'de yukarıdan üçüncü sırada verilmiştir.

Yarı-aktif sönümleme ise hem aktif sönümlemenin kendini adapte edebilme özelliği hem de pasif sönümlemenin güvenilirliğini birleştiren bir sönümleme türüdür. Burada, titreşimin sönümlenmesi için herhangi bir mekanik güç iletimine ihtiyaç yoktur. Öte yandan sönüm miktarı yapıdan gelen sinyaller dikkate alınarak anlık olarak değiştirilebilir. Böylece titreşim dinamik olarak kontrol altında tutulur. Yarı-aktif sönümlemenin yapılardaki en temel uygulaması değişken-ağız sönümleyicilerdir. Değişken-ağız sönümleyicilerde akışkanın geçtiği kanal çapı değiştirilerek sönüm ayarlanabilir. Günümüzde ise akışkanın manyetik olarak kontrol edildiği MR damperler buna bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Yarı-aktif bir sönümlemeye ilişkin akış şeması Şekil 2.8.'de en alt sırada verilmiştir.

## 2.5. Disiplinlerarası Yapı

Şekil 2.9.'da gösterildiği gibi MR sıvı ile çalışan mekanizmalar ve MR damperler, birden çok disiplinin bir araya gelerek çalışmasını zorunlu kılar. Özellikle MR damperler ile yapıların kontrol edildiği bu çalışmada bu husus daha net bir şekilde görülebilir.

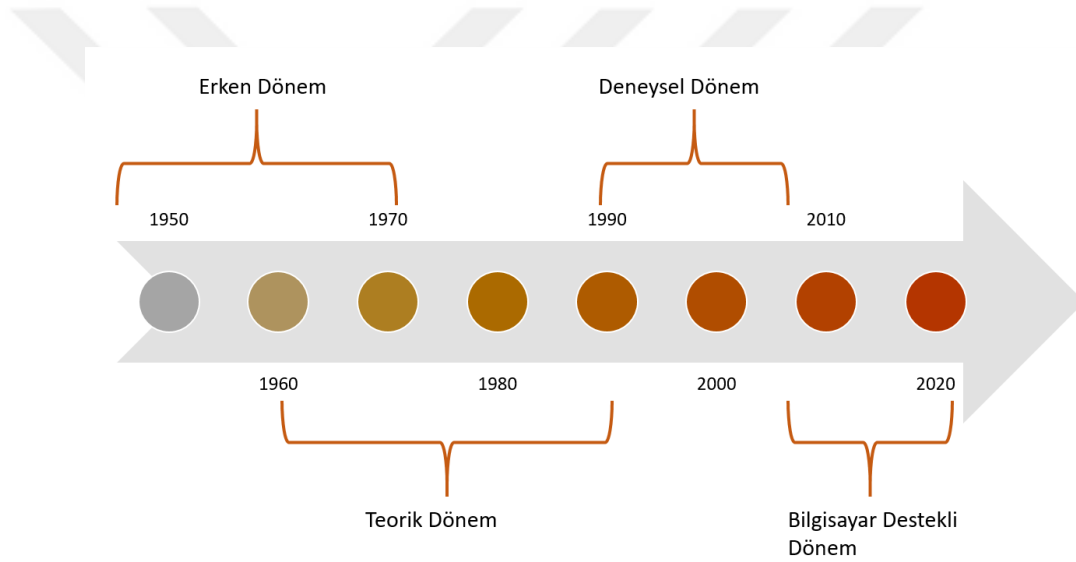


Şekil 2.9. MR Damperin yapılarda uygulanmasına ilişkin disiplinlerarası çalışma yapısı

MR damper içerisindeki akışın analizi ve MR damperin tasarımı için Makine Mühendisliği, MR damper içerisindeki elektromanyetik yapının tasarımı ve kontrol uygulamalarındaki donanımların tesisi için Elektrik-Elektronik Mühendisliği, MR damperin dinamik modelinin ortaya konulması ve akım ile kontrol edilebilmesi için Kontrol Mühendisliği ve yapıların kontrol edilmesi adına gereken teorik ve deneysel altyapının kurulabilmesi için İnşaat Mühendisliği bilgisine ihtiyaç vardır.

## BÖLÜM 3. LİTERATÜR TARAMASI

MR ve ER sıvılar, 1940'lı yılların sonlarında keşfedilmelerinin ardından bu sıvılarla beraber çalışan mekanizmaların tasarlanmasıyla bilim dünyasında önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu kapsamda yapılan araştırmaları geçmişten günümüze doğru incelemek adına kısaca dört aşamadan bahsedilebilir.



Şekil 3.1. MR Damper ve kontrol araştırmalarına ilişkin dönemler

Şekil 3.1.'de gösterilen şekilde bu aşamalar; MR sıvı ve mekanizmaların keşfedildiği erken dönem (1948-1970), MR sıvı için uygulanabilecek birbirinden bağımsız teorik akış veya kontrol modellerinin geliştirildiği teorik dönem (1960-1990), MR sıvı ile çalışan cihazların üretildiği ve teorik modeller ile doğrulandığı deneysel dönem (1990-2005) ve ilerleyen bilgisayar teknolojisi ile geliştirilen sayısal modellerin ve ağırlıklı olarak parametrik olmayan dinamik model ve kontrolcülerin geliştirildiği bilgisayar destekli dönem (2005'den bugüne) şeklinde sıralanabilir.

MR sıvıların keşfedilmesine ilişkin ilk çalışma, 1947 yılında W. M. Winslow tarafından yapılmıştır. Winslow, MR sıvılara benzer karakteristik gösteren ve daha sonra yerini MR sıvıya bırakmış olan ER sıvıları keşfetmiş ve ilk çalışmasını 1947 yılında gerçekleştirmiştir. Çalışmasında bir baz yağa nişasta, taş veya kireç gibi maddeler ilave edildiğinde elektrik akımı altında zincire benzeyen yapılar oluştuğunu gözlemlemiştir. Bu ilkeyi kullanarak elektrik akımını mekanik kuvvete dönüştüren bir mekanizma tasarlamış ve bununla ilgili bir patent almıştır [9]. 1948 yılında J.B. Rabinow aynı ilkeyi kullanarak bir kavrama elemanı tasarlamıştır [39].

1949 yılında ise yine Winslow araştırmaları neticesinde genişlettiği çalışmasında, içine ferromanyetik katı malzeme katılan yağların elektrik alanı altında görünür viskozitesinin değiştiğini ispatlayarak bunu bilim dünyasına ilan etmiştir [40]. 1951 yılında ise Rabinow önermiş olduğu kavrama elemanını daha da geliştirerek bir tork ve kuvvet aktarım cihazı tasarlamıştır [41].

Buraya kadar teorik olarak ortaya atılan bu fikirler uzun bir süre sessizliğini korumuştur. Çünkü henüz bilgisayarların kullanılmadığı bu dönemde, eldeki teorik modelleri pratiğe dönüştürecek akış modelleri mevcut değildir. Ayrıca bu dönemde MR/ER sıvı üretimini ve bunların kullanılacağı mekanizmalardaki sızdırmazlığı sağlayacak teknoloji henüz yeterli seviyede değildir.

1960'lardan itibaren MR sıvı çalışmalarından bağımsız olarak Newton tipi olmayan farklı akış tipleri için teorik modeller yoğun olarak çalışılmıştır. Bunlardan en öne çıkanı Phillips'in 1969 yılında gerçekleştirdiği doktora tezi çalışmasıdır [42]. Bu çalışmada değişken akma gerilmesine sahip Newton tipi olmayan akışkanların kare kesitlerdeki veya iç içe geçmiş silindir gibi MR damperin geometrik yapısının modellenmesinde kullanılacak geometrilerdeki akışlarının hareketli veya hareketsiz duvarlar için analitik çözümleri yapılmıştır.

1974 yılında yarı-aktif sönümlenme ile ilgili olarak ilk önerilen kontrol algoritması Skyhook olmuştur [43]. Buradaki yarı-aktif sönümleyiciler henüz kısma vanası ile kontrol edilen yarı-aktif sönümleyiciler olsa da MR damperlerde kullanılacak

yaklaşımın temelleri atılmıştır. Bundan sonraki deneysel dönemde yapılan çalışmalar bu tip teorik çalışmalar üzerine temellendirilmiştir.

1990'lı yıllar, MR damperlerin hem akademik hem de ticari anlamda ortaya çıkararak geniş çevrelerde heyecanla karşılandığı bir dönemdir. MR sıvılar için kontrol sistemlerinin irdelendiği ilk çalışma ise 1993 yılında gerçekleştirilmiştir [44]. Buradaki kontrol yaklaşımı, o yıllarda MR dampere göre üstün olduğu düşünülen ER damperler için önerilmiştir. Carlson'un 1994 yılında yayınladığı makalenin başlığı "MR sıvıya karşı büyüyen ilgi" şeklindedir [45]. Bu yıllardan itibaren 2000 yılına kadar MR damperler ile ilgili birçok temel çalışma ortaya konulmuştur. Fakat yayınların çeşitliliği arttığı için bu yayınları üç ana başlık altında toplamak uygun olur. Bunlar; (1) analitik model (2) dinamik model ve (3) yapılarıdaki kontrol ve uygulamaya dönük çalışmalar olarak sınıflandırılabilir.

Analitik modellere ilişkin çalışmalarda genellikle silindirik boşluk arasından veya dikdörtgen kesit içerisinde Newton tipi olmayan bir MR sıvının davranışı modellenmiştir. Bu çalışmaların başını hiç şüphesiz Amerikalı araştırmacı Wereley çekmektedir. Wereley ve Kamath 1996 yılında yaptıkları çalışmada Bingham modeli temelinde MR dampere uygun bir analitik model ortaya koymuş [46] ve bir sene sonra buna ilişkin dinamik modeli geliştirmişlerdir [47]. Burada dikkat çeken husus, halen çalışmaların ER damper üzerinden yürütülmesidir. Çünkü o yıllarda henüz MR sıvının ER sıvıya olan üstünlüğü ortaya konulmamıştır. Fakat ER sıvılar için önerilen tüm modeller MR sıvılar için de uygulanabilir. 2000 yılına kadar, Wereley tarafından ortaya konulan analitik modelin boyutsuzlaştırılmış formu [48] ve Herschel-Bulkley gibi akış modellerine dayanan daha gelişmiş analitik modeller [49] ortaya konulmuştur. Bingham modelinin MR sıvıyı modellemedeki yetersizliğine alternatif olarak özel olarak önerilen düzeltilmiş Bingham modelleri de bu çalışmalar arasındadır [50]. Buraya kadar yapılan çalışmalar genel olarak 1970'li yıllarda ortaya konan akış modellerinin MR damperlerde uygulanması için gerekli olan modelleme yöntemlerini içermektedir ve tartışmasız bir şekilde analitik MR damper modellerinin temelini oluşturmaktadır.

2000’li yılların ardından analitik modellere ilişkin temel çalışmalar azalarak devam etmiştir. Bunlara örnek olarak 2001 yılında Gavin’in homojen olmayan manyetik alanı düzeltmek için ortaya koyduğu hiperbolik fonksiyonlar ve katsayıları [51] ve yine Wereley’in Herschel-Bulkley modeli ile MR damper performanslarını değerlendirdiği çalışmalar verilebilir [52]. 2000’li yıllarda, elde edilen bu analitik yaklaşımların MR damper performansını artırmaya yönelik olarak kullanılması konusu önem kazanmıştır. Analitik model üzerinden yeni tasarımların [53] veya optimizasyon çalışmalarının gerçekleştiği çalışmalar [10] bu yıllarda ortaya konulmuştur. Bu alanda Nguyen’in de önemli katkıları olmuştur. Yaptığı çalışmalarda sınırlı hacim için yüksek dinamik oranı veren optimum MR damper tasarımlarını araştırmıştır [54,55]. Farklı tipteki MR damperler için hem Bingham hem de Herschel-Bulkley modelleri 2008 yılında yine Wereley tarafından incelenmiştir [56]. Boyutsuzlaştırılmış Herschel-Bulkley analitik modelleri de bu yıllarda Wereley tarafından araştırılmıştır [57]. 2009 yılında, MR damper için daimi olmayan akışa yönelik analitik model Nguyen tarafından önerilmiş ve bir dinamik modele dönüştürülmüştür [58]. Optimizasyon çalışmalarında deneysel yöntemler de kullanılmıştır. Bu tip optimizasyon çalışmalarına 2009 yılında, Parlak ve Engin’in Taguchi temelli optimizasyon çalışması örnek olarak verilebilir [59]. Bu yıllardan sonra gelişen bilgisayar teknolojisi ile beraber artık analitik modeller yerine ağırlıklı olarak sayısal modeller çalışma konusu olmuştur.

MR damperlerin modellenmesi için bir diğer önemli konu hiç şüphesiz kontrol cevabını verebilecek nitelikteki dinamik modellerdir. Parametrik dinamik modeller ile ilgili yapılan ilk çalışmalar, analitik modeller ile beraber ortaya konan viskoelastik-plastik modeller olmuştur [60]. Bingham modeli veya ikili-viskoz model gibi modeller de buna benzer bir şekilde analitik ifadelerden türetilen ve basit bir sönüm katsayısına dayanan dinamik modellerdir [61]. Bu modeller oldukça basittir ve histerezis etkiyi modelleyemezler. Bu anlamda literatürdeki devrim niteliğindeki çalışma Spencer’in 1996’da Bouc-Wen modelini MR damperlere uygulaması ve bu modeli iyileştirmesi olmuştur [62]. Bu model düzenlenmiş Bouc-Wen modeli olarak literatüre girmiş ve günümüze kadar yüzlerce MR damper kontrolcüsünde esas alınmıştır.



Bouc-Wen modelleri dışında histerezis modelleme yeteneğine sahip olan ve literatürde MR damper için kabul gören bir başka parametrik model sürtünme temelli Dahl modelidir [63]. Dahl modelinin geliştirilmiş ve detaylı hali Ikhouane'nin çalışmasında bulunabilir [64]. Yine literatürde karşılaşılan sürtünme dinamiği esaslı LuGre modeli Jimenez tarafından MR damper ile bir yapı kontrolü örneğinde kullanılmış [65] ve daha sonra detaylandırılarak MR damperler için önerilmiştir [66]. Yakın dönemde önerilen bir başka dinamik model de 2006 yılında Kwok'un çalıştığı hiperbolik tanjant fonksiyon temelli modeldir [67]. Bu model diferansiyel denklemler yerine MR damper davranışını cebirsel denklemler ile temsil etmektedir. Günümüzde parametrik olmayan modellerin gelişen bilgisayar teknolojisi ile güçlenmesinin ardından parametrik modeller arasında sadece Bouc-Wen modeli gibi genel kabul görmüş modeller varlığını koruyabilmiştir.

Parametrik olmayan dinamik modeller temel olarak gelişmiş bir bilgisayar teknolojisine ihtiyaç duyduğundan dolayı ortaya çıkma ve gelişme süreçleri daha yakın geçmişe dayanmaktadır. Parametrik olmayan modellerden birisi olan yapay sinir ağları modelleri MR damperler için 1990'ların sonlarında çalışılmaya başlanmıştır [68]. Bir diğer parametrik olmayan modelleme yöntemi olan bulanık mantık modelleri de yapay sinir ağları ile beraber çalışan ANFIS algoritmasının MR damperlere uygulanması ile ortaya çıkmıştır [69]. Yapay sinir ağlarının ters damper modeli için uygulaması 2002 yılında gerçekleştirilmiş [70] ve farklı uygulamalarda kullanılmıştır [71]. Radial basis fonksiyonları da parametrik olmayan modellere uygulanmıştır [72]. 2005 yılında parametrik olmayan modellerin parametrik modellere olan üstünlüğü ortaya konulmuş [73] ve bu yıllardan sonraki çalışmalarda çok sayıda parametrik olmayan model MR damperler için uygulanmıştır. Önemli yapay sinir ağları uygulamalarına [74–76] ve bulanık mantık uygulamalarına [77,78] ilgili çalışmalar örnek olarak verilebilir.

MR damperler yardımıyla yapılardaki kontrol uygulamalarına dönük çalışmalar da oldukça fazladır. Bu çalışmaların ekser kısmını bilgisayar simülasyonları oluştururken gerçek zamanlı deneysel kontrol çalışmalarına da literatürde rastlanılabilir. Bu alanda yapılan ilk çalışmalar, Amerikalı araştırmacı Spencer'ın büyük katkılarıyla

ilerlemiştir. 1996 yılında Dyke ile beraber yaptıkları çalışmada ilk kez MR damperlerin sismik titreşimlere karşı yapı modellerine uygulanmasını önermişlerdir [37]. Bu devrim niteliğindeki çalışma, yapılarda MR damper kullanımı ile ilgili en temel çalışmadır. Bahsi geçen çalışmada, geliştirilen Bouc-Wen modelini ilk kez bir simülasyonda popüler bir deprem verisi olan El-Centro deprem ivmesi altında uygulanmış ve bu çalışma büyük ilgi görmüştür. Kontrolcü olarak Clipped-optimal algoritması kullanılmıştır. Bundan bir yıl sonra Spencer, çalışmasında sismik uygulamalarda kullanılabilecek 20 ton kapasiteli bir MR damper üretmiş ve bu MR dampere ait deneysel veriler kullanılarak bir simülasyon çalışması gerçekleştirmiştir [79]. Ardından 1998 yılında Dyke ve Spencer bu kez yaptıkları simülasyonu bir yapı modeli ile deneysel olarak uygulamışlardır [80]. Bu temel çalışmaların ardından MR damperlerin yapı kontrolünde kullanımı ile ilgili birçok akademik çalışmanın önü açılmıştır.

1999 yılına gelindiğinde yapı kontrolünde çoklu MR damper kullanımı irdelenmeye başlanmıştır [81]. Bazı çalışmalarda ise birden fazla veri girişli, çoklu MR damper uygulamaları (MIMO) gerçekleştirilmiştir [82]. 2000'li yılların başlarında kontrolcü olarak Decentralized Bang Bang, Lyapunov, Maksimum enerji yitimi, Modulated Homogeneous Friction, LQR, LQG [83–86] gibi çeşitli kontrol algoritmaları uygulanmaya başlanmıştır.

Bu dönemde popüler olmaya başlayan bir diğer kontrol algoritması bulanık mantık temelli algoritmalar [77,87,88]. İlerleyen dönemlerde bulanık mantık temelli algoritmalar genetik algoritmalar ile geliştirilerek de uygulanmıştır [89,90]. Bulanık mantık algoritmalarının Clipped-Optimal gibi kontrol algoritmaları ile kıyaslanmasına ilişkin çalışmalar da mevcuttur [91]. Bulanık mantık algoritmalarına benzer şekilde öne çıkan bir başka parametrik olmayan kontrol yöntemi de yapay sinir ağları yöntemidir. Bu yöntemle ters damper veya ileri damper modelleri kullanılarak yapay sinir ağları ile yapı kontrolü gerçekleştirilmektedir [92].

Yapısal kontrolün pratik olarak uygulanabilmesi için MR damperlerin büyük ölçekli olarak üretilmesi gerektirmektedir. Fakat ölçeğin büyük olması, yapısal bazı

farklılıkları da beraberinde getirir. Bu nedenle, üretilmiş büyük ölçekli MR damperlerin verileri kullanılarak yapılara uygulanabilmesi için birtakım simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu konuda yapılan ilk çalışma Spencer tarafından üretilen 20 ton kapasiteli MR damperin incelendiği çalışmadır [79]. Bu çalışmada bir model MR damper ile model bina üzerindeki testler yapılmış ve daha sonra MR damper gerçek boyutlarda üretilerek bir aktüatör vasıtasıyla, düzenli titreşimler altında uygulamaya dönük testler gerçekleştirilmiştir. Bu MR damper, 2002 yılında Yang ve Spencer tarafından analitik olarak incelenmiş ve bir aktüatör ile uygulanan rastgele titreşim verisi altında deneysel olarak kontrol edilmiştir [93]. Yapılan bu çalışmalardan sonra simülasyonlar için geliştirilen algoritmalarda büyük ölçekli MR damperler dikkate alınmaya başlanmıştır [94].

Büyük ölçekli MR damperler ile beraber gerçek zamanlı hibrit testlerden de (Real Time Hybrid Simulation/Testing, RTHS-RTHT) bahsetmek gereklidir. Büyük ölçekli MR damperler ile yapılan deneysel çalışmalar ilk başlarda aktüatörler yardımıyla ve düzenli titreşimler etkisi altında yapılmaktaydı. Fakat MR damperin yapı ile olan etkileşimine ilişkin herhangi bir sonuç elde edilememekteydi. Bu nedenle RTHT yöntemi, yapı ile MR damper arasındaki etkileşimi modelleyebilmek adına geliştirilmiştir. Bu yöntemde kısaca deprem titreşimi etkisi altında bir bina modelinin simülasyonu anlık olarak çözülür ve bir aktüatör vasıtasıyla simülasyonda gerçek zamanlı olarak binadan MR dampere gelmesi gereken kuvvet, MR damperin üzerine uygulanır. Gelen yüke karşılık MR damperin verdiği cevap ise tekrar simülasyona aktarılır. Böylece gerçek zamanlı olarak bina ile MR damper arasındaki etkileşim kurulmuş olur. Bu metot ile yapılan ilk önemli çalışma 2009 yılında Clipped-Optimal kontrol algoritması ile gerçekleştirilmiştir [95]. 2010 yılında ise RTHT kullanılarak yeni bir kontrol algoritması önerilmiştir [96]. Bundan sonra RTHT'nin kullanıldığı çok sayıda çalışma yapılmıştır. 2013 yılında, simülasyon ve RTHT yöntemlerinin farklı kontrol algoritmaları kullanılarak kıyaslandığı çalışma, bu çalışmalara iyi bir örnektir [97]. Ayrıca MR damperlerin dinamik modellerinin RTHT yardımıyla doğrulandığı çalışmalar da mevcuttur [98].

MR damperlerin gerçek yapılarda uygulandığı çalışmalar oldukça azdır. Fakat yapılarda MR damper haricindeki yarı-aktif veya pasif sönümleyicilerin oldukça yaygın olarak kullanıldığını hatırlatmak gereklidir. Yarı-aktif sönümleyiciler; değişken-ağız sönümleyiciler veya aktif aktüatörler ve ayarlı kütle sönümleyicilerin hibrit kullanımı gibi çok çeşitli formlarda uygulanabilmektedir. Yarı-aktif kontrolcülerin kullanıldığı ilk bina 1990 yılında yapılan Japonya'daki Kajima Teknik Araştırma Enstitüsü binasıdır. 3 katlı ve 12 m uzunluğundaki bu binada her katta dörder adet olmak üzere 12 adet değişken-ağız sönümleyici kullanılmıştır. Uygulanan sistemin etkinliği, binanın 1993 yılında gerçek bir deprem etkisine maruz kalması ile kanıtlanmıştır [25]. Bir diğer gerçek uygulama 1998 yılında ABD'deki I-35 otoyolu üzerindeki Walnut Creek Köprüsü'nde yapılmıştır [25]. 1999 yılında ise 20 m uzunluğunda 5 katlı Kajima Shizuoka Binası'nda değişken-ağız sönümleyiciye sahip gelişmiş bir yarı aktif sönümleme sistemi uygulanmıştır [7]. Bu tarihten sonra özellikle Japonya'da yarı aktif değişken-ağız sönümleyicilerin binalarda kullanımında bir patlama yaşanmıştır. 2004 yılında yaklaşık 800 adet binada bu sistemler kullanılıyor haldedir. Bu binaların arasında 54 katlı ve 356 adet sönümleyiciye sahip Mori Gökdeleni, 38 katlı ve 88 adet sönümleyiciye sahip Siodome Gökdeleni ve 31 katlı ve 72 adet sönümleyiciye sahip Niigata projesi gibi boyları 240 m'ye kadar ulaşan yüksek yapılar da mevcuttur [25].

Gerçek MR damper ile yapılan ilk bina kontrolü uygulaması Sanwa-Tekki Corp. Tarafından 2001 yılında gerçekleştirilmiştir. 30 ton kapasitesindeki MR damper Tokyo Ulusal Bilim ve İnovasyon Müzesi binası için uygulanmıştır. Yine 2003 yılında Japonya'da dört katlı bir binada pasif taban izolatörleriyle beraber 40 ton kapasitesinde MR damper ile hibrit kontrol gerçekleştirilmiştir [25].

MR damperin yapılarda gerçek zamanlı olarak kullanılmasına ilişkin bir diğer önemli çalışma alanı da köprülerdeki titreşimin engellenmesi ile ilgilidir. Bu uygulamalar ilk olarak 2000'li yılların başlarında gündeme gelmiş [99] ve 2004 yılında Çin'deki Dongting Gölü Köprüsü'nde uygulanmıştır. Bu uygulamada köprüdeki 156 adet kablo için 312 adet MR damper köprü titreşimlerinin sönümlenmesi için kullanılmıştır [26]. Bir başka uygulama da 2007 yılında Çin'deki Yellow River Otoyolu Köprüsü'nde

gerçekleştirilmiştir. Yapımı 2004'te tamamlanan köprüdeki titreşimlerin çok fazla olması nedeniyle 2005 yılında 20 adet kablo için ikişer adet olmak üzere toplam 40 adet MR damper yerleştirilerek köprünün titreşim kontrolü gerçekleştirilmiştir [100].

Son yıllarda MR damperler ile ilgili ilgi çeken çalışma alanlarından birisi de enerji üreten MR damperlerdir. Özellikle afetler sırasında elektrik kesintileri yoğun olarak gerçekleştiğinden dolayı bu konu sismik uygulamalarda kullanılacak MR damperler için önem arz etmektedir. Bu alanda, MR damperin enerji üreterek kendisini besleyebildiği ilk çalışma 2005 yılında yapılmıştır [101]. Bu MR damper, sismik titreşimlerin sönümlendiği bir simülasyonda kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Sönümlenen kuvvet büyüdükçe elde edilen güç de arttığından dolayı yüksek kuvvetleri sönümlemek için yüksek akım üretilebilmektedir. 2009'da Choi ve Wereley kendi kendine akım besleyen MR damperler ile ilgili parametrik bir çalışma gerçekleştirmiş ve üretilen enerji ile kontrol algoritması olmadan, doğrudan MR damperi beslemenin mümkün olduğu ifade edilmiştir [102]. Bundan bir yıl sonra Sapinski, MR damper ile aynı yüke maruz kalacak şekilde paralel bağlanmış bir jeneratör yardımıyla MR dampere enerji beslemeyi başararak ilk deneysel uygulamayı ortaya koymuştur [103]. 2012 yılında, enerji üretimini MR damper dışında değil de MR damper gövdesi içerisinde gerçekleştiren ve bu enerjiyi kullanarak aynı zamanda hız ve yerdeğişimi ölçümünü yapan bir MR damper fiilen üretilmiştir [104]. 2014 yılında ise Sapinski tarafından tek bir MR damper gövdesi içerisinde kendi kendine enerji üreten ve bu enerji ile kendi kendini doğru akım ile besleyebilen bir MR damper üretilmiştir [105]. Daha sonraki çalışmalarda ise önerilen bu tasarımların iyileştirmesi ele alınmıştır [106].

Gelişen bilgisayar teknolojisinin yardımıyla MR damper modellemesinde öne çıkan bir başka alan sayısal modellerdir. HAD modelleri ile ilgili 2000'li yılların başlarında teorik bazı öneriler ortaya atılmıştır [107]. Bunu takiben geliştirilen ilk HAD modellerine, 2004 yılında bir MR damperin manyetik alan analizi ile beraber akış alanının çözüldüğü HAD analizi örnek verilebilir. Bu çalışmada Herschel-Bulkley akış modeli kullanılmış ve akışkana ait sabit katsayılar elde edilerek manyetik alan verileri HAD analizine aktarılmış ve ticari bir HAD yazılımı olan CFX kullanılmıştır [108].

Bu yıllarda MR sıvının sıcaklığa bağılı davranışının da HAD analizlerinde kullanılabilceğı öngörölmüştür [109]. 2008 yılında dikdörtgen kanal ve aksene simetrik modellere ilişkin farklı çözümler MATLAB kullanılarak yazılan kodlar yardımıyla gerçekleştirilmiş ve literatürdeki analitik modeller ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir [110]. Aynı dönemlerde MR sıvısı için katı partikülleri dikkate alan iki akışkanlı modeller de ortaya konulmuş fakat literatürde karşılık bulmamıştır [111]. 2012 yılında Parlak ve Engin yaptıkları çalışmalarda manyetik alan verilerini HAD yazılımında kullanarak yaptıkları çözümün deneysel veriler ile uyumunu göstermiş ve ardından başka bir çalışmada HAD yardımıyla MR damper tasarımı için optimizasyon çalışması yapmışlardır [112,113]. 2013 ve sonrasında ise çoklu-fizik HAD çözümleri COMSOL veya CFX gibi ticari yazılımlar ile gerçekleştirilmiş ve deneysel veriler ile doğrulanmıştır [114–116]. Son yıllarda yapılan çalışmalar ise özellikle farklı tipteki MR damperlerin HAD analizleri [117,118] ve histerezis yapıyı da içeren modeller üzerine yoğunlaşmaktadır [119,120].

## BÖLÜM 4. MR DAMPERİN ANALİTİK OLARAK MODELLENMESİ

MR damperlerin analitik olarak modellenebilmesi için iki farklı fiziksel yapının modellenmesi gerekmektedir. Bunlardan ilki MR sıvı üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun tespit edilmesidir. Bunun için elektrik akımı ve manyetik alan arasındaki bağıntıyı veren Kirchoff Yasası ve manyetik akımın korunumu ilkesi esas alınmıştır.

Modellenmesi gereken ikinci fiziksel yapı, MR sıvının kanal içerisindeki akışıdır. Bunun için ise Newton tipi ve Newton tipi olmayan akışkanlarda kütle ve momentumun korunumu ilkesi kullanılarak kanal boyunca oluşan akış profilleri ortaya çıkarılmış ve basınç düşüşü tespit edilmiştir. Kanal bölgesi dışındaki akışlar ise analizde dikkate alınmamıştır.

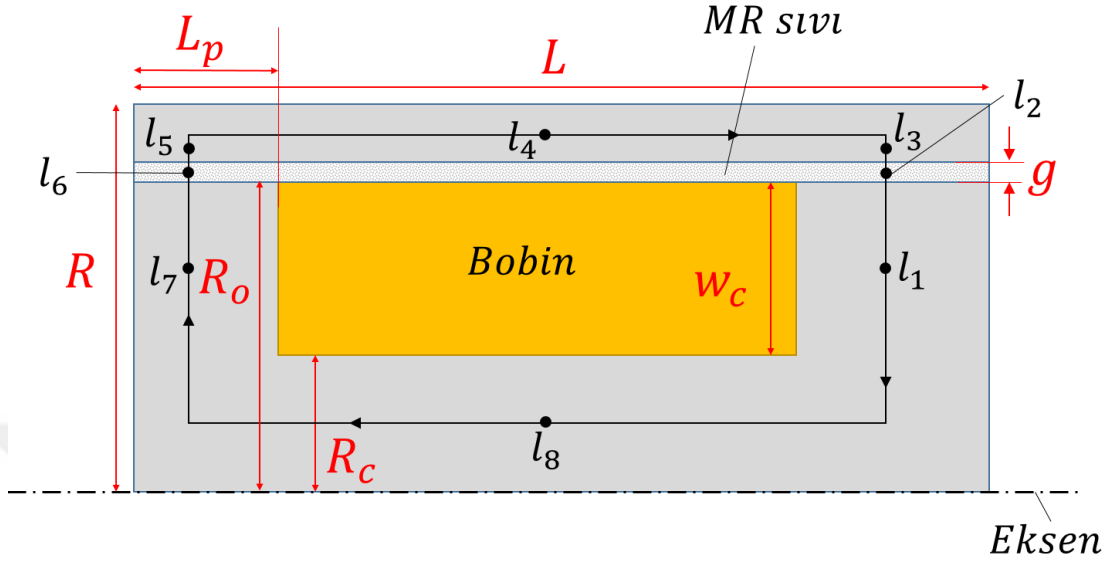
### 4.1. Manyetik Alanın Modellenmesi

MR damperler, piston içerisine veya yakınına yerleştirilmiş bir bobin vasıtasıyla ve doğru akım gönderilerek kendi içerisinde bir manyetik alan oluştururlar. Kirchoff Yasası'na göre, aşağıdaki denklem uyarınca manyetik akının geçtiği yol boyunca taşınan manyetik alan şiddeti, toplam sarım sayısı ile akımın çarpımına eşit olmalıdır.

$$\sum H_k l_k = N_c I \quad (4.1)$$

Denklemdaki  $H_k$  ilgili yol boyunca manyetik alan şiddetini,  $l_k$  yolun uzunluğunu,  $N_c$  sarım sayısını ve  $I$  uygulanan akım şiddetini gösterir. Manyetik alan korunum yasalarına göre; manyetik akı, aşağıda verilen manyetik akı yoğunluğu  $B_k$  ile dik olarak içerisinden geçtiği alan  $A_k$ 'ya göre aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\Phi = B_k A_k \quad (4.2)$$



Şekil 4.1. Tek bobinli bir MR damperin manyetik alan analizi

Şekil 4.1.'deki yapı göz önüne alınır ve  $A_k$ 'nin k bağlantısının orta noktasındaki alan ve  $B_k$ 'nin bu noktadaki manyetik akı yoğunluğu olduğu kabul edilirse yukarıdaki ifadeler aşağıdaki şekilde daha açık hale getirilebilir:

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 + H_5 l_5 + H_6 l_6 + H_7 l_7 + H_8 l_8 = N_c I \quad (4.3)$$

$$\Phi = B_1 A_1 = B_2 A_2 = B_3 A_3 = B_4 A_4 = B_5 A_5 = B_6 A_6 = B_7 A_7 = B_8 A_8 \quad (4.4)$$

Bu ifadelerdeki uzunluk ve alanların MR damperin pistonu üzerindeki temel büyüklüklere göre karşılıkları Tablo 4.1.'de verilmiştir.



Tablo 4.1. Manyetik alan analizindeki geometrik büyüklüklerin MR damper ölçülerine göre karşılıkları

Değişken	Değer	Değişken	Değer
$l_1 = l_7$	$\frac{R_c}{2} + w_c$	$R_1$	$\frac{3}{4}R_c + w_c$
$l_2 = l_6$	$g$	$R_d$	$R_c + w_c + \frac{g}{2}$
$l_3 = l_5$	$\frac{t_h}{2}$	$R_3$	$R - \frac{3t_h}{4}$
$l_4 = l_8$	$L - L_p$	$R_4$	$R - \frac{t_h}{2}$
$A_1 = A_7$	$2\pi R_1 L_p$	$A_3 = A_5$	$2\pi R_3 L_p$
$A_2 = A_6$	$2\pi R_D L_p$	$A_4$	$\pi(R^2 - R_4^2)$
$A_8$	$\pi R_c^2$		

$B$  ve  $H$  arasındaki ilişki manyetik geçirgenlik denilen maddenin özgül bir özelliği ile olan bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı  $\mu_k$  orantılıdır. Buna göre herhangi bir  $k$  bağlantısı için manyetik akı yoğunluğu;

$$B_k = \mu_0 \mu_k H_k \quad (4.5)$$

şeklinde yazılabilir.  $\mu_0$  boşluğun geçirgenliğini ifade eder. İfadeler Denklem (4.1)'de yerine konulursa herhangi bir  $k$  bağlantısı için manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti aşağıdaki ifadelerden bulunabilir:

$$B_k = \frac{\mu_0 N_c I}{\frac{l_k}{\mu_k} + \sum_{i=1, i \neq k}^8 \frac{l_i A_k}{\mu_i A_i}} \quad (4.6)$$

$$H_k = \frac{N_c I}{l_k + \sum_{i=1, i \neq k}^8 \frac{\mu_k A_k}{\mu_i A_i} l_i} \quad (4.7)$$

Bu ifadeler MR sıvının üzerindeki bağlantı olan  $l_2$  veya  $l_6$  için düzenlenirse;

$$B_{2(MR)} = \frac{\mu_0 N_c I}{2 \frac{g}{\mu_{mr}} + \frac{2l_1 A_2}{\mu A_1} + \frac{2l_3 A_2}{\mu A_3} + \frac{l_4 A_2}{\mu A_4} + \frac{l_8 A_2}{\mu A_8}} \quad (4.8)$$

$$H_{2(MR)} = \frac{N_c I}{2g + \frac{2l_1 \mu_{mr} A_2}{\mu A_1} + \frac{2l_3 \mu_{mr} A_2}{\mu A_3} + \frac{l_4 \mu_{mr} A_2}{\mu A_4} + \frac{l_8 \mu_{mr} A_2}{\mu A_8}} \quad (4.9)$$

olarak elde edilir. MR sıvının manyetik geçirgenliği, MR damper gövdesinde kullanılan çeliğe göre çok küçük olduğundan Denklem (4.9)'da  $2g$  dışında paydadaki tüm terimler ihmal edilebilir. Bu durumda MR sıvı üzerindeki manyetik alan şiddeti yaklaşık olarak;

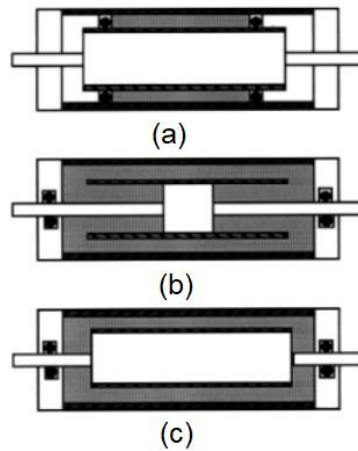
$$H_{2(MR)} \approx \frac{N_c I}{2g} \quad (4.10)$$

şeklinde ifade edilebilir [121].

#### 4.2. Akış Fiziğinin Modellenmesi

MR damper içerisindeki akış modellenirken akışkanın geçtiği halkasal kanal esas alınmaktadır. Bunun dışında kalan bölgeler, kuvvet veya basınç düşüşü gibi önemli çıktılar üzerinde ciddi bir etkiye sahip olmadığından ihmal edilmektedir.

Kanal içerisindeki akış, duvar hareketleri ve MR damperin çalışma şekline göre değişiklik arz etmektedir. Bu nedenle doğrusal MR damperlerdeki çalışma şekilleri üç farklı mod altında gruplandırılmıştır [48]. Bu modlar Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Doğrusal MR damperin çalışma şekilleri (a) Kayma modu (b) Akış modu (c) Karma mod [48]

Buna göre kayma modunda MR sıvı, belirli bir hacimde hapsedilir ve sadece kayma etkisine uğrar. Bu tip akışlar literatürde Couette akışı olarak isimlendirilir [122]. Kayma modu çok özel durumlar dışında MR damperlerde kullanılmaz. Akış modunda ise kayma etkisi tamamen yok edilerek akışkanın basınç etkisiyle sabit iki duvar arasından akması sağlanır. Basınç gradyeni ile gerçekleşen bu tip akışlar literatürde Pouiseulle akışı [122] olarak bilinir. Bu çalışma şekli MR damperlerde sıklıkla tercih edilir. Karma mod ise akış modunda çalışan bir MR damperdeki kanal akışında, sınırlarından birisinin de hareket ettiğini ifade eder. Sınırların birinin hareketinden dolayı küçük bir kayma etkisi oluşur. Bu durum, akış ve kayma modunun bir süperpozisyonu olarak yorumlanır ve karma mod olarak isimlendirilir. Bir başka deyişle karma mod, Pouiseulle ve Couette akışının bir bileşimidir. Bu tez çalışmasında, kayma modu pratikte uygulanmadığından dolayı akış modu ve karma mod incelenmiştir.

MR damper kanalı içerisindeki akışın matematiksel olarak iki şekilde modellenmesi mümkündür. Bunlardan ilki, kanal içerisindeki akışın iki sonsuz paralel plaka arasındaki akış şeklinde modellenmesidir. Yani halka şeklindeki boşluk, silindirin çevresi genişliğinde ve kanal yüksekliğinde bir dikdörtgen kesite dönüştürülür. Bu tip bir çözüm Kartezyen koordinatlarda yapılır. İkincisi modelleme şekli ise kanalı iç içe geçmiş iki silindirin arasındaki bir boşluk olarak modellemektir. Bu durumda akış, halkasal kanalın merkezi etrafında eksenel simetrik olarak kabul edilir. Bu modelleme, önceki yaklaşıma göre daha gerçekçidir. Fakat bu modellemede silindirik koordinatlarda çözüm yapıldığı için daha karmaşık denklemler ortaya çıkar. Bu tip akışlar veya iki boyutlu eksenel simetrik akış olarak bilinir.

Dikdörtgen kanal çözümünde kanal genişliğinin silindir çapına göre çok küçük olması durumunda eksenel simetrik çözüme göre  $g/R_o < 0,4$  için hata oranı % 3'e ve  $g/R_o < 0,2$  için hata oranı % 0,5'e kadar düşmektedir [123]. MR damperler için  $g/R_o$  oranı 0,2 değerinin çok altındadır ve dikdörtgen kanal modelinin, eksenel simetrik modele göre çok küçük bir fark ile neredeyse aynı sonucu verdiği söylenebilir.

Yukarıda ifade edilen analitik modeller hem akış modu hem de karma mod için uygulanabilir. Karma mod için üst ve alt sınırlar arasında asimetrik bir yapı oluşur ve bu nedenle matematiksel ifadeler biraz daha karmaşık hale gelir.

Bahsedilen analitik modellerin tamamı, momentumun korunumunu diferansiyel formda ifade eden Cauchy denkleminde dayanmaktadır. Akışkanlar mekaniğinin de temellerini oluşturan momentumun korunumu denklemi, Kartezyen koordinatlarda aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned}
 x \text{ yönünde } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{1}{\rho} \left( -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + g_x \\
 y \text{ yönünde } \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} &= \frac{1}{\rho} \left( -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) + g_y \\
 z \text{ yönünde } \frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} &= \frac{1}{\rho} \left( -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + g_z
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Silindirik koordinatlarda ise denklem aşağıdaki şekildedir:

$$\begin{aligned}
 r \text{ yönünde } \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} \\
 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r\rho} \frac{\partial(r\tau_{rr})}{\partial r} + \frac{1}{r\rho} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r\rho} + g_r \\
 \theta \text{ yönünde } \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} - \frac{u_r u_\theta}{r} \\
 &= -\frac{1}{r\rho} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{1}{r\rho} \frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2\rho} \frac{\partial(r^2\tau_{r\theta})}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} + g_\theta \\
 z \text{ yönünde } \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \\
 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{1}{r\rho} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{1}{r\rho} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + g_z
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Kartezyen ve silindirik koordinatlarda iç içe geçmiş iki silindir için aşağıdaki kabuller yapılarak denklemler sadeleşir:

1. Akış tek yönde akmaktadır. Akış Kartezyen koordinatlarda sadece x yönünde silindirik koordinatlarda sadece z yönündedir.

2. Akış tam gelişmiştir. Kartezyen koordinatlarda  $\frac{\partial u}{\partial x}$ , silindirik koordinatlarda  $\frac{\partial u_z}{\partial z}$  sıfırdır. Benzer şekilde Kartezyen koordinatlarda  $\frac{\partial \tau}{\partial x}$  ve silindirik koordinatlarda  $\frac{\partial \tau}{\partial z}$  sıfırdır.
3. Levhalar Kartezyen koordinatlarda  $x$  yönünde, silindirik koordinatlarda  $z$  yönünde sonsuzdur.
4. Akış daimidir.
5. Akış sıkıştırılmaz ve laminerdir.
6. Yerçekimi ihmal edilmiştir.
7. Basınç gradyeni Kartezyen koordinatlarda  $x$  yönünde, silindirik koordinatlarda  $z$  yönünde sabittir.
8. Akış alanı iki boyutludur. Kartezyen koordinatlarda  $z$  yönünde tüm bileşenler ve  $z$ 'ye göre tüm türevler, silindirik koordinatlarda  $\theta$  yönünde tüm bileşenler ve  $\theta$ 'ya bağlı tüm türevler sıfırdır.

Bu kabuller uygulandığında momentum denklemleri için Kartezyen koordinatlarda  $y$  ve  $z$  yönünde, silindirik koordinatlarda ise  $\theta$  ve  $r$  yönündeki tüm ifadeler sıfır olur. Geriye kalan denklemler ise yukarıda verilen kabullere göre aşağıdaki şekilde sadeleştirilir. Kartezyen koordinatlarda  $x$  momentum denklemi aşağıdaki şekilde sadeleştirilir;

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \left( -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + g_x \quad (4.13)$$

Kabul 4    Kabul 2    Kabul 1    Kabul 1    Kabul 2    Kabul 8    Kabul 6

Basınç gradyeni sonlu farklar ile ifade edilir ve türevin tek değişkene bağlı olduğu dikkate alınırsa denklem aşağıdaki hale gelir.

$$\frac{d\tau_{xy}}{dy} = \frac{\Delta P}{L} \quad (4.14)$$

Silindirik koordinatlarda ise  $z$  momentum denklemi aşağıdaki şekilde sadeleştirilir:

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{1}{r\rho} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{1}{r\rho} \frac{\partial (r\tau_{rz})}{\partial r} + g_z \quad (4.15)$$

Kabul 4    Kabul 1    Kabul 1    Kabul 2    Kabul 2    Kabul 8    Kabul 6

Basınç gradyeni sonlu farklar ile ifade edilir ve türevin tek değişkene bağlı olduğu dikkate alınırsa denklem aşağıdaki hale gelir:

$$\frac{d\tau_{rz}}{dr} + \frac{\tau_{rz}}{r} = \frac{\Delta P}{L} \quad (4.16)$$

Denklemler Bingham plastik modeli veya Herschel-Bulkley modeli ile iki farklı şekilde analiz edilebilir. Kayma gerilmesi için Bingham plastik kabulü yapılırsa kayma gerilmesi Kartezyen koordinatlarda;

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \tau_0 \operatorname{sgn}\left(\frac{du}{dy}\right) + \mu \frac{du}{dy} & |\tau_{xy}| > \tau_0 \\ \frac{du}{dy} &= 0 & |\tau_{xy}| < \tau_0 \end{aligned} \quad (4.17)$$

veya silindirik koordinatlarda;

$$\begin{aligned} \tau_{rz} &= \tau_0 \operatorname{sgn}\left(\frac{du_z}{dr}\right) + \mu \frac{du_z}{dr} & |\tau_{rz}| > \tau_0 \\ \frac{du_z}{dr} &= 0 & |\tau_{rz}| < \tau_0 \end{aligned} \quad (4.18)$$

şeklinde ifade edilir.

Eğer Herschel-Bulkley akışkanı kabulü yapılırsa bu durumda kayma gerilmesi Kartezyen koordinatlarda;

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \tau_0 \operatorname{sgn}\left(\frac{du}{dy}\right) + K \left(\frac{du}{dy}\right)^n & |\tau_{xy}| > \tau_0 \\ \frac{du}{dy} &= 0 & |\tau_{xy}| < \tau_0 \end{aligned} \quad (4.19)$$

veya silindirik koordinatlarda;

$$\begin{aligned} \tau_{rz} &= \tau_0 \operatorname{sgn}\left(\frac{du_z}{dr}\right) + K \left(\frac{du_z}{dr}\right)^n & |\tau_{rz}| > \tau_0 \\ \frac{du_z}{dr} &= 0 & |\tau_{rz}| < \tau_0 \end{aligned} \quad (4.20)$$

olarak ifade edilir.  $\tau_0$  her iki model için akma gerilmesini,  $K$  Herschel-Bulkley modeli için uyum faktörünü ve  $n$  akış indeksini eder. Newton tipi akış kabulü için Kartezyen koordinatlarda kayma gerilmesinin;

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy} \quad (4.21)$$

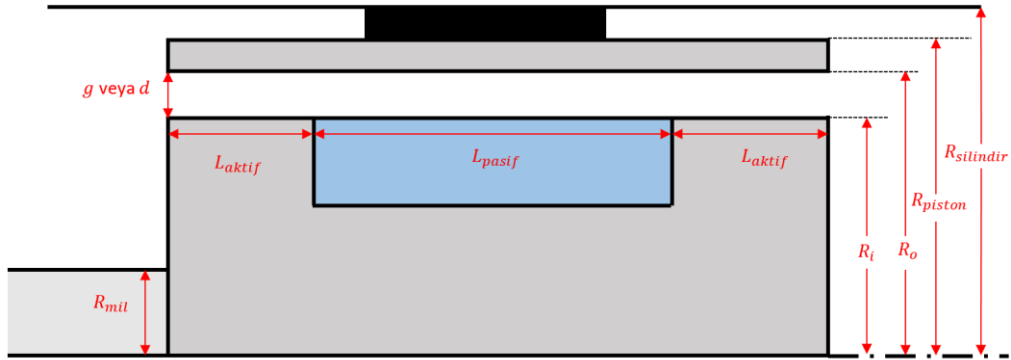
veya silindirik koordinatlarda kayma gerilmesinin;

$$\tau_{rz} = \mu \frac{du_z}{dr} \quad (4.22)$$

olduğu bilinmektedir [122].

#### 4.2.1. Akış modunda dikdörtgen kanal yaklaşımı ile modelleme

Dikdörtgen kanal yaklaşımı için öncelikle Newton tipi akış kabulüne göre MR etkinin olmadığı durum incelenecek, daha sonra ise MR etkinin olduğu durum Bingham ve Herschel-Bulkley modellerine göre incelenecektir.



Şekil 4.3. MR damperin akış modu için geometrik büyüklükleri

Şekil 4.3.'te akış modu için MR damperin şematik görüntüsü verilmiştir. Buradaki MR damperin pistonunun içerisinde halkasal şekilde açılmış bir kanal mevcuttur. Dikdörtgen kanal yaklaşımında kanal genişliği  $g$  yerine dikdörtgen kanallar için kullanılan  $d$  ifadesi tercih edilmiştir.

#### 4.2.1.1. Akış modunda dikdörtgen kanal yaklaşımının MR etki olmadan uygulanması

Denklem 4.14 integre edildiğinde Denklem 4.21'deki Newton tipi akış kabulüne göre MR etki olmadığı durum için aşağıdaki akış profili ifadesi bulunur:

$$u(y) = \frac{\Delta P}{2\mu L} y^2 + Cy + D \quad (4.23)$$

Sınır şartları  $y = 0$  için  $u = 0$  ve  $y = d$  için  $u = 0$  uygulanırsa denklem aşağıdaki hale gelir:

$$u(y) = \frac{\Delta P}{2\mu L} (y^2 - dy) \quad (4.24)$$

Aynı denklem kullanılarak akışkan debisi;

$$Q = b \int_0^d u(y) dy = -b \frac{\Delta P d^3}{12\mu L} \quad (4.25)$$

olarak bulunabilir. Bu durumda basınç düşüşü;

$$\Delta P = \frac{-12Q\mu L}{bd^3} \quad (4.26)$$

olur. İki boşluk arasındaki debi farkı akümülatörle kompanse edildiği için piston hızı  $v_p$ 'nin silindire göre bağıl hızı  $v_{p,b}$  aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$v_{p,b} = v_p \frac{\pi R_{silindir}^2}{\pi(R_{silindir}^2 - R_{mil}^2)} \quad (4.27)$$

Akışkanın debisi, pistonun silindire göre olan bağıl hızı  $v_{p,b}$  ve silindir alanı  $A_s$ 'ye göre aşağıdaki şekilde de ifade edilir:

$$Q = A_s v_{p,b} \quad (4.28)$$

$A_p$  piston alanı olarak kabul edilirse basınç düşüşü;

$$\Delta P = -F/A_p \quad (4.29)$$

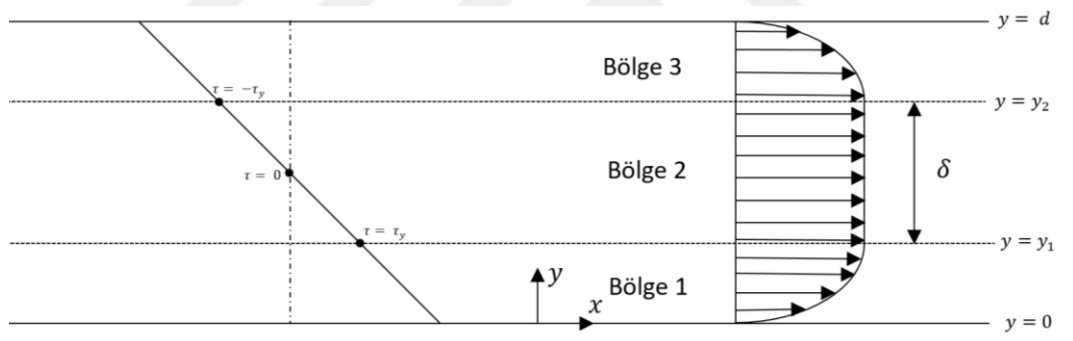


olduğuna göre paralel plaka için Newton tipi akış ve akış modundaki sönüm katsayısı Denklem 4.28 ve Denklem 4.29, Denklem 4.26'da yerine konularak ve dikdörtgen kanal kesitinin genişliği  $b$  olmak üzere  $A_d = bd$  kabul edilerek aşağıdaki şekilde bulunur:

$$C_{akış\ modu} = \frac{F}{v_p} = \frac{-\Delta P A_p}{v_p} = \frac{12\mu L A_p A_s v_{p,b}}{A_d d^2 v_p} \quad (4.30)$$

#### 4.2.1.2. Akış modunda dikdörtgen kanal yaklaşımının MR etki altında Bingham modeline göre uygulanması

Manyetik alan uygulandığında oluşan akış profili Bingham plastik modeline göre analiz etmek için akış profilini  bölgeye ayırmak gerekmektedir.



Şekil 4.4. Bingham akışkanı için Kartezyen koordinatlarda akış modunda akış bölgeleri

Şekil 4.4.'te gösterilen Bölge 1 ve 3 akışkanının, akma gerilmesinden daha yüksek bir kayma gerilmesine sahip olduğu bölgelerdir. Ortadaki Bölge 2'de ise akışkanının kayma gerilmesi akma gerilmesinin altındadır ve akışkan hızı sabittir. Bu bölgenin kalınlığı, çekirdek kalınlığı ( $\delta$ ) olarak ifade edilir. Çekirdek bölgede hızın konuma göre türevi sıfır olduğu için hız sabit olmalıdır.

Bölge 1 için Denklem 4.17, Denklem 4.14'te yerine yazılır ve türev ifadeleri düzenlenirse Denklem 4.23'e ulaşılabilir. Bu denklem,  $y = 0$  için  $u = 0$  ve  $y = y_1$  için  $\frac{du}{dy} = 0$  sınır şartlarında integre edilirse hız profili;

$$u_1(y) = \frac{\Delta P}{2\mu L} (y^2 - 2y_1 y) \quad (4.31)$$

olarak bulunur.

Bölge 2 için Denklem 4.14'ün integrali alınarak tüm bölgeler için kayma gerilmesi denklemini bulunur:

$$\tau_{xy,1,2,3}(y) = \frac{\Delta P}{L} y + C \quad (4.32)$$

Denklem 4.32,  $\tau_{xy}(y_1) = \tau_0$  ve  $\tau_{xy}(y_2) = -\tau_0$  sınır şartlarıyla Bölge 2'nin üst ve alt sınırında uygulanırsa kayma gerilmesi aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\tau_{xy}(y) = \frac{\Delta P}{2L} (2y - y_2 - y_1) \quad (4.33)$$

Denklem, iki sınır şartına karşılık tek bir bilinmeyen sabit içerdiğinden bu eşitlikten ayrıca çekirdek kalınlığı  $\delta$  aşağıdaki formda elde edilebilir:

$$y_2 - y_1 = \delta = \frac{-2\tau_0 L}{\Delta P} \quad (4.34)$$

Hız değeri ise Bölge 1 için tanımlanan  $u_1(y_1) = u_2$  eşitliğinden bulunabilir. Çünkü Bölge 2 için hız sabittir ve  $y$ 'ye bağlı değildir. Bu durumda Bölge 2'deki hız;

$$u_2 = \frac{-\Delta P}{2\mu L} y_1^2 \quad (4.35)$$

olarak bulunur.

Bölge 3 incelendiğinde, Bölge 1 ile aynı profile sahip olması gerektiği görülebilir. Bölge 1'e benzer şekilde Denklem 4.23'e, Bölge 3'teki  $y = d$  için  $u = 0$  ve  $y = y_2$  için  $\frac{du}{dy} = 0$  sınır şartları uygulanırsa hız profili;

$$u_3(y) = \frac{\Delta P}{2\mu L} [y^2 - d^2 + 2y_2(d - y)] \quad (4.36)$$

olarak bulunur. Çekirdek kalınlığı  $y_2 - y_1 = \delta$  ifadesi dikkate alınarak tüm hız ifadeleri akış kesitinde integre edilirse debi değerleri;

$$Q_1 = b \int_0^{y_1} u_1(y) dy = \frac{b\Delta P}{2\mu L} \left( \frac{-2y_1^3}{3} \right) \quad (4.37)$$

$$Q_2 = b \int_{y_1}^{y_2} u_2(y) dy = \frac{-b\Delta P}{2\mu L} y_1^2 \delta \quad (4.38)$$

$$Q_3 = b \int_{y_2}^d u_3(y) dy = \frac{b\Delta P}{2\mu L} \left[ \frac{2y_2^3 - 2d^3}{3} + 2dy_2(d - y_2) \right] \quad (4.39)$$

olarak bulunur. Ayrıca  $u_1(y_1) = u_3(y_2)$  eşitliği dikkate alınırsa;

$$y_1 + y_2 = d \quad (4.40)$$

ifadesi ile  $y_1$  ile  $y_2$  arasındaki ilişki bulunabilir.

#### 4.2.1.3. Akış modunda dikdörtgen kanal yaklaşımının MR etki altında Herschel-Bulkley modeline göre uygulanması

Herschel-Bulkley modeli için akış denklemi, Denklem 4.19'un Denklem 4.14'te yerine konulması ile elde edilir. Buna göre hız profili;

$$u(y) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{KL}{\Delta P} y + \frac{C}{K} \right)^{\frac{n+1}{n}} + D \quad (4.41)$$

olarak ifade edilir. Sonraki ifadelerde basınç gradyeni  $\Delta P$  negatif olduğu için her zaman başında eksi olacak şekilde yazılarak parantez içindeki ifade pozitif olarak yazılmalıdır. Çünkü negatif bir ifadenin  $1/n$ 'inci kuvveti o ifadeyi tanımsız yapar. Herschel-Bulkley modeli için de akış yine Şekil 4.4.'te olduğu gibi üç bölgeye bölünerek analiz edilmelidir.

Bölge 1’de  $y = 0$  için  $u = 0$  ve  $y = y_1$  için  $\frac{du}{dy} = 0$  sınır şartları uygulanırsa integral sabitleri elde edilerek denklem aşağıdaki hale gelir:

$$u_1(y) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{-\Delta P}{KL} \right)^{\frac{1}{n}} \left( -(y_1 - y)^{\frac{n+1}{n}} + y_1^{\frac{n+1}{n}} \right) \quad (4.42)$$

Bölge 2 için Denklem 4.19, Denklem 4.14’teki yerine konularak ve tek integral alınarak tüm bölgeler için kayma gerilmesi ifadesi elde edilir. Bu ifade Bingham akışkanı için elde edilen Denklem 4.32 ile aynıdır. Bingham akışkanı için  $n = 1$  uygulanırsa Denklem 4.33 elde edilir. Çekirdek kalınlığı da benzer şekilde Denklem 4.34 ile aynı olur. Hız profili ise benzer şekilde Bölge 1 için tanımlanan  $u_1(y_1) = u_2$  eşitliğinden bulunabilir. Çünkü Bölge 2 için hız sabittir ve  $y$ ’ye bağlı değildir. Bu durumda Bölge 2 için hız;

$$u_2 = \frac{n}{(n+1)} \left( \frac{-\Delta P}{KL} \right)^{\frac{1}{n}} y_1^{\frac{n+1}{n}} \quad (4.43)$$

olur.

Bölge 3 simetriden dolayı Bölge 1 ile aynı olmalıdır. Sınır şartları  $y = d$  için  $u = 0$  ve  $y = y_2$  için  $\frac{du}{dy} = 0$  uygulandığında hız profili;

$$u_3(y) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{-\Delta P}{KL} \right)^{\frac{1}{n}} \left[ -(y - y_2)^{\frac{n+1}{n}} + (d - y_2)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (4.44)$$

olarak bulunur. Tüm hız ifadeleri akışın geçtiği kesitte integre edilirse;

$$Q_1 = b \int_0^{y_1} u_1(y) dy = \frac{bn}{n+1} \left( \frac{-\Delta P}{KL} \right)^{1/n} \left( \frac{-ny_1^{\frac{2n+1}{n}}}{2n+1} + y_1^{\frac{2n+1}{n}} \right) \quad (4.45)$$

$$Q_2 = b \int_{y_1}^{y_2} u_2(y) dy = \frac{bn}{n+1} \left( \frac{-\Delta P}{KL} \right)^{1/n} y_1^{\frac{n+1}{n}} (y_2 - y_1) \quad (4.46)$$

$$Q_3 = b \int_{y_2}^d u_3(y) dy = \frac{bn}{n+1} \left( \frac{-\Delta P}{KL} \right)^{1/n} \left[ -\frac{n(d-y_2)^{\frac{2n+1}{n}}}{2n+1} + (d-y_2)^{\frac{2n+1}{n}} \right] \quad (4.47)$$

şeklinde debi ifadeleri bulunabilir. Son olarak  $u_1(y_1) = u_3(y_2)$  eşitliği dikkate alınır;

$$y_1 + y_2 = d \quad (4.48)$$

elde edilir.

#### 4.2.2. Akış modunda aksel simetri yaklaşımı ile modelleme

Eksenel simetri yaklaşımı için öncelikle Newton tipi akış kabulüne göre MR etkinin olmadığı durum incelenecek, daha sonra ise Bingham akışkanı için MR etki altındaki durum incelenecektir.

##### 4.2.2.1. Akış modunda aksel simetri yaklaşımının MR etki olmadan uygulanması

Bu modelin uygulanması için öncelikle silindirik koordinatlarda bulunan Denklem 4.16 integre edilmelidir. İntegral için Denklem 4.22’de verilen Newton tipi akış kabulü kullanılır ve boşluk boyunca akış profili aşağıdaki şekilde bulunur:

$$u_z(r) = \frac{\Delta P}{4\mu L} r^2 + C \ln r + D \quad (4.49)$$

Sınır şartları  $r = R_i$  için  $u = 0$  ve  $r = R_o$  için  $u = 0$  uygulanırsa denklem aşağıdaki hale gelir:

$$u_z(r) = \frac{\Delta P}{4\mu L} \left[ r^2 + \frac{(R_o^2 - R_i^2)}{\ln(R_o/R_i)} \ln(R_o/r) - R_o^2 \right] \quad (4.50)$$

Bu denklem kullanılarak akışkan debisi;

$$Q = 2\pi \int_{R_i}^{R_o} u(r)rdr = \frac{\Delta P \pi R_o^4}{8\mu L} \left\{ \left( \frac{R_i}{R_o} \right)^4 + \frac{[1 - (R_i/R_o)^2]^2}{\ln(R_o/R_i)} - 1 \right\} \quad (4.51)$$

şeklinde bulunur [46]. Buradan basınç düşüşü ifadesi çekilirse;

$$\Delta P = \frac{8\mu L \dot{\gamma}}{\pi R_o^4} \left\{ \left( \frac{R_i}{R_o} \right)^4 + \frac{[1 - (R_i/R_o)^2]^2}{\ln(R_o/R_i)} - 1 \right\}^{-1} \quad (4.52)$$

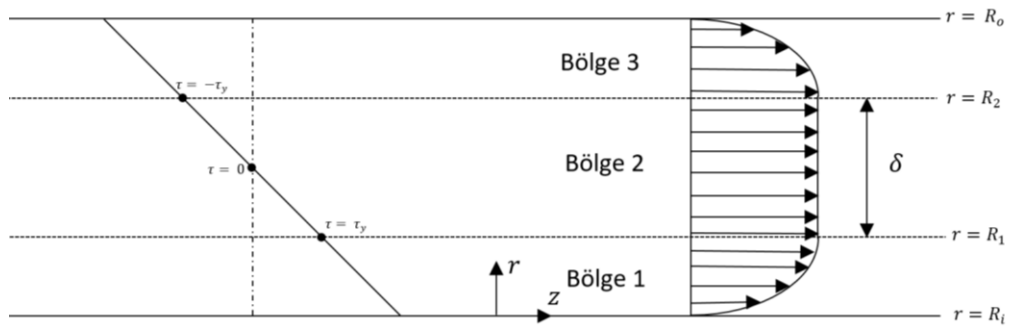
olarak bulunabilir. Denklem 4.28 ve Denklem 4.29 uygulanırsa;

$$C_{akış\ modu} = \frac{F}{v_p} = \frac{8\pi\mu L v_{p,b} A_s}{\pi R_o^4 v_p} \left\{ \left( \frac{R_i}{R_o} \right)^4 + \frac{[1 - (R_i/R_o)^2]^2}{\ln(R_o/R_i)} - 1 \right\}^{-1} \quad (4.53)$$

olarak elde edilmektedir.

#### 4.2.2.2. Akış modunda aksenal simetri yaklaşımının MR etki altında Bingham modeline göre uygulanması

Akımın uygulandığı durum için hız profili, Bingham plastik modeline göre üç bölge kullanılarak bulunur.



Şekil 4.5. Bingham akışkanı için silindirik koordinatlarda akış modundaki akış bölgeleri

Şekil 4.5. incelendiğinde Bingham akışkanı için verilen üç adet bölgenin Kartezyen koordinatlarda belirtilen bölgeler ile oldukça benzer olduğu görülür. Bölge 1 için Denklem 4.18, Denklem 4.16'daki yerine yazılır ve integre edilirse aşağıdaki denklem elde edilir:

$$u(r) = \frac{\Delta P}{4\mu L} r^2 - \frac{\tau_0}{\mu} r + C \ln r + D \quad (4.54)$$

Bu denklem  $y = 0$  için  $u = 0$  ve  $y = y_1$  için  $\frac{du}{dy} = 0$  sınır şartlarında integre edilirse hız profili;

$$u_1(r) = \frac{\Delta P}{4\mu L} \left[ r^2 - R_i^2 - 2R_1^2 \ln\left(\frac{r}{R_i}\right) \right] - \frac{\tau_0}{\mu} \left[ r - R_i - R_1 \ln\left(\frac{r}{R_i}\right) \right] \quad (4.55)$$

olarak bulunur.

Bölge 2 için Denklem 4.16 düzenlenerek integre edilirse aşağıdaki denkleme ulaşılır:

$$\tau_{rz}(r) = \frac{\Delta P r}{2L} + \frac{C}{r} \quad (4.56)$$

Yukarıdaki denklem için  $\tau_{rz}(R_1) = \tau_0$  ve  $\tau_{rz}(R_2) = -\tau_0$  sınır şartları Bölge 2'nin üst ve alt sınırları için uygulanabilir. Bu durumda kayma gerilmesi tüm bölgeler için;

$$\tau_{rz}(r) = \frac{\Delta P}{2L} \left( r - \frac{R_1^2}{r} \right) + \frac{\tau_0 R_1}{r} \quad (4.57)$$

şeklinde elde edilir. Denklem (4.57, iki sınır şartı için tek bir bilinmeyen sabit içerdiğinden ayrıca bu eşitlikten çekirdek kalınlığı  $\delta$  aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$R_2 - R_1 = \delta = \frac{-2L\tau_y}{\Delta P} \quad (4.58)$$

Hız değeri ise Bölge 1 için tanımlanan  $u_1(R_1) = u_2$  eşitliğinden bulunabilir. Çünkü Bölge 2 için hız sabittir ve  $y$ 'ye bağlı değildir. Bu durumda Bölge 2 için hız;

$$u_2 = \frac{\Delta P}{4\mu L} \left[ R_1^2 (1 - 2\ln(R_1/R_i)) - R_i^2 \right] - \frac{\tau_0}{\mu} \left[ R_1 (1 - \ln(R_1/R_i)) - R_i \right] \quad (4.59)$$

olarak bulunur. Bölge 3, Bölge 1'e benzer bir profile sahiptir. Denklem 4.49 Bölge 3'te  $r = R_o$  için  $u = 0$  ve  $r = R_2$  için  $\frac{dr}{dz} = 0$  sınır şartlarında uygulanırsa hız profili;

$$u_3(r) = \frac{\Delta P}{4\mu L} [r^2 - R_o^2 - 2R_2^2 \ln(r/R_o)] + \frac{\tau_0}{\mu} [r - R_o - R_2 \ln(r/R_o)] \quad (4.60)$$

olarak elde edilir.

Ayrıca  $u_1(R_1) = u_3(R_2)$  eşitliği dikkate alındığında  $R_1$  ve  $R_2$  arasındaki ilişkiyi veren ve çekirdek kalınlığı  $\delta$ 'nın bulunabilmesi için gerekli olan aşağıdaki kapalı denklem elde edilir:

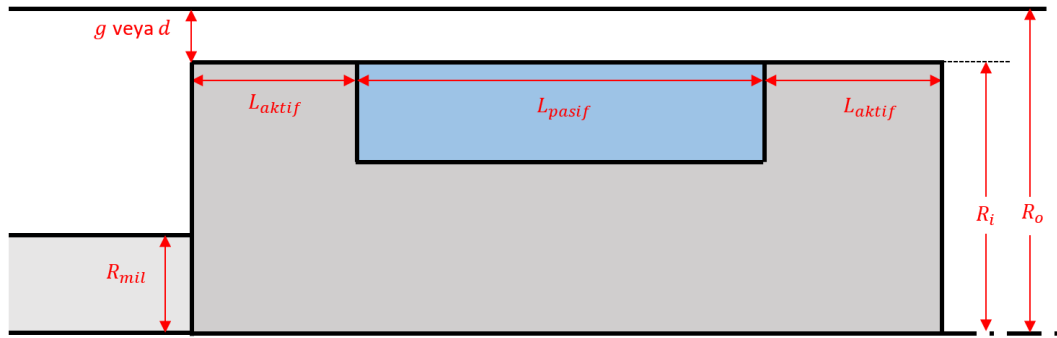
$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{4\mu L} [R_1^2 (1 - 2\ln(R_1/R_i)) - R_i^2] - \frac{\tau_0}{\mu} \left[ R_1 \left( 1 - \ln\left(\frac{R_1}{R_i}\right) \right) - R_i \right] \\ = \frac{\Delta P}{4\mu L} [R_2^2 (1 - 2\ln(R_2/R_o)) - R_o^2] \\ - \frac{\tau_0}{\mu} \left[ R_2 \left( 1 - \ln\left(\frac{R_2}{R_o}\right) \right) - R_o \right] \end{aligned} \quad (4.61)$$

Bu denklem iteratif olarak çözülebilir.

### 4.2.3. Karma modda dikdörtgen kanal yaklaşımı ile modelleme

Karma modda çalışan bir MR damperin sınırlarından birisi hareket ettiği için kayma modu ve akış modunun bileşiminden oluşan bir durum olan karma mod ortaya çıkmaktadır. Bu durumda alt sınırın piston hızı ile hareket etmesinden dolayı ilave denklemlere ihtiyaç duyulur.





Şekil 4.6. MR damperin karma mod için geometrik büyüklükleri

Şekil 4.6.'da gösterilen dikdörtgen kanal yaklaşımı ile karma modun modellenmesi, akış modunun modellenmesi ile oldukça benzerdir. Farklı olarak sadece, piston başının hareketinden dolayı alt sınır şartı hareketli hale gelir. Bu nedenle MR etkinin olduğu Newton tipi olmayan akışta Bölge 1'in veya MR etkinin olmadığı Newton tipi akışta tüm akış profilinin alt sınır şartına bağlı ifadeleri yeniden düzenlenmelidir.

#### 4.2.3.1. Karma modda dikdörtgen kanal yaklaşımının MR etki olmadan uygulanması

Manyetik akı olmadığında MR sıvı Newton tipi kabul edilirse ve Denklem 4.23'te  $y = 0$  için  $u = -v_p$  ve  $y = d$  için  $u = 0$  sınır şartları uygulanırsa;

$$u(y) = \frac{\Delta P}{2\mu L} (y^2 - dy) - v_p \left(1 - \frac{y}{d}\right) \quad (4.62)$$

olarak elde edilir. Buradaki birinci terim akış modundaki ifade ile aynıdır. İkinci terim ise kayma moduna ait olan terimdir. Dolayısıyla elde edilen hız profili akış modu ve kayma moduna ait hız profillerinin üst üste bindirilmesinden (süperpozisyon) ibarettir.

Bu durumda akışkan debisi;

$$Q = b \int_0^d u(y) dy = -b \frac{\Delta P d^3}{12\mu L} - \frac{bv_p d}{2} \quad (4.63)$$

olur. Denklemden toplam debinin, akış modundaki debi ile pistonun hareketi sonucunda kaymaya uğrayan debinin farkı olduğu açıkça görülebilir. Buradaki basınç farkı ifadesi yalnız bırakılırsa;

$$\Delta P = \frac{-12\mu L}{bd^3} \left( \dot{v} + \frac{bv_p d}{2} \right) \quad (4.64)$$

olarak elde edilir. Denklem 4.28 ve Denklem 4.29, Denklem 4.64'te yerine konulursa sönüm katsayısı;

$$C_{karma\ mod} = \frac{F}{v_p} = \frac{-\Delta P A_p}{v_p} = \frac{12\mu L A_p v_{p,b} A_s}{A_d d^2 v_p} \left( 1 + \frac{A_d v_p}{2A_s v_{p,b}} \right) \quad (4.65)$$

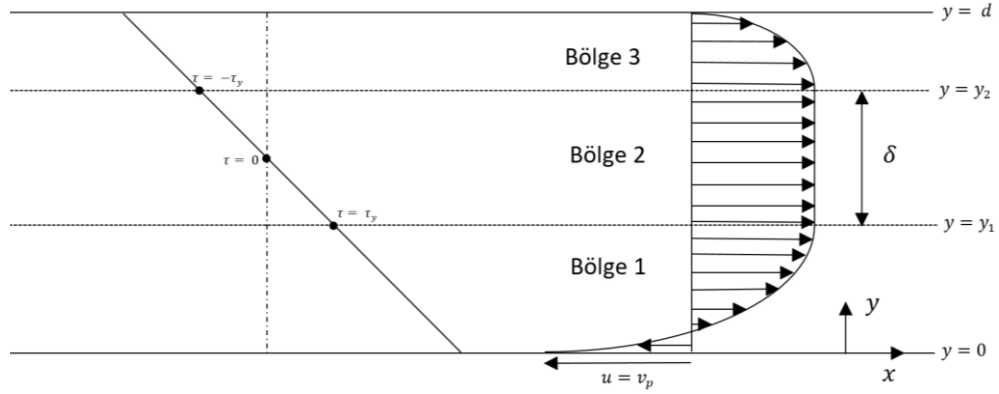
olarak bulunur. Akış modu için kullanılan sönüm katsayısı  $C_{akış\ modu}$  yerine konulursa;

$$C_{karma\ mod} = C_{akış\ modu} \left( 1 + \frac{A_d v_p}{2A_s v_{p,b}} \right) \quad (4.66)$$

elde edilir. Buna göre MR etki olmadığı durumda karma mod için sönüm katsayısının akış modundan daha büyük olduğu açıkça görülmektedir. Bu fark, kanal genişliğinin piston başı yarıçapına oranının artması ile büyümektedir [48]. Ayrıca mil çapının büyümesi ile bağlı hız azalacağından sönüm katsayısı büyür.

#### 4.2.3.2. Karma modda dikdörtgen kanal yaklaşımının MR etki altında Bingham modeline göre uygulanması

Paralel plaka modelinin Bingham modeline göre MR etki altındaki akış profili Şekil 4.7.'de verilmiştir. Alt sınır  $v_p$  hızıyla hareket ederken Bölge 3 akış modu ile aynı sınır şartlarını taşıdığından akış modundaki Bölge 3 ile aynı denkleme sahiptir. Dolayısıyla çözüm elde etmek için Bölge 1 ve Bölge 2 için denklemlerin yeniden tanımlanması yeterlidir.



Şekil 4.7. Bingham akışkanı için Kartezyen koordinatlarda karma modda akış bölgeleri

Bölge 1 için Denklem 4.17, Denklem 4.14'teki yerine yazılır ve  $y = 0$  için  $u = v_p$  olduğu dikkate alınrsa hız profili aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$u_1(y) = \frac{\Delta P}{2\mu L} (y^2 - 2y_1y) - v_p \quad (4.67)$$

Dikkat edilirse akış modundan farklı olarak sadece  $v_p$  ifadesi vardır. Bunun nedeni alt sınırın bu hızda hareket etmesidir. Bunun neticesinde Bölge 1 ile Bölge 3 arasındaki simetri bozulmaktadır.

Bölge 2 için Denklem 4.33 ve Denklem 4.34'teki işlem basamakları uygulanırsa çekirdek kalınlığı akış modu ile aynı matematiksel denklemi verir. Hız değeri ise, Bölge 1 için tanımlanan  $u_1(y_1) = u_2$  eşitliğinden bulunabilir. Böylece;

$$u_2 = \frac{-\Delta P}{2\mu L} y_1^2 - v_p \quad (4.68)$$

bulunur. Bölge 3'teki akış profili daha önce de belirtildiği gibi akış modundaki profil ile aynıdır ve Denklem 4.36'da ifade edilmiştir.  $u_1(y_1) = u_3(y_2)$  eşitliği kullanılarak  $y_1, y_2$  cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$y_1 = \sqrt{(d - y_2)^2 - \frac{2\mu L v_p}{\Delta P}} \quad (4.69)$$

#### 4.2.3.3. Karma modda dikdörtgen kanal yaklaşımının MR etki altında Herschel-Bulkley modeline göre uygulanması

Herschel-Bulkley modeli için benzer şekilde hız profili, Denklem 4.41'de  $y = 0$  için  $u = -v_p$  ve  $y = y_1$  için  $\frac{du}{dy} = 0$  sınır şartları uygulanarak bulunur:

$$u_1(y) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{-\Delta P}{KL} \right)^{\frac{1}{n}} \left( -(y_1 - y)^{\frac{n+1}{n}} + y_1^{\frac{n+1}{n}} \right) - v_p \quad (4.70)$$

Denklem 4.33 ve Denklem 4.34'teki işlem basamakları uygulanırsa Bölge 2 için çekirdek kalınlığı ifadesinin akış modundaki ile aynı olduğu görülür. Hız değeri ise Bölge 1 için tanımlanan  $u_1(y_1) = u_2$  eşitliğinden bulunabilir. Böylece;

$$u_2 = \frac{n}{(n+1)} \left( \frac{-\Delta P}{KL} \right)^{\frac{1}{n}} y_1^{\frac{n+1}{n}} - v_p \quad (4.71)$$

olarak elde edilir. Bölge 3 için hız profili akış modundaki profil ile aynı denkleme sahiptir ve Denklem 4.44 ile aynıdır.  $u_1(y_1) = u_3(y_2)$  eşitliği kullanılırsa  $y_1, y_2$  cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$y_1 = \left[ (d - y_2)^{\frac{n+1}{n}} + \frac{v_p(n+1)}{n} \left( \frac{-\Delta P}{KL} \right)^{\frac{-1}{n}} \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (4.72)$$

#### 4.2.4. Karma modda eksenel simetri yaklaşımı ile modelleme

Karma mod için eksenel simetri yaklaşımı ile modelleme, dikdörtgen kanal yaklaşımına benzer şekilde ilgili işlem basamakları uygulanarak bulunur.

#### 4.2.4.1. Karma modda aksenal simetri yaklaşımının MR etki olmadan uygulanması

Eksenel simetrik durum için en genel ifade Denklem 4.49'da ifade edilmişti. Karma mod için sınır şartları olan  $r = R_i$  için  $u = -v_p$  ve  $r = R_o$  için  $u = 0$  uygulanırsa akış profili;

$$u_z(r) = \frac{\Delta P}{4\mu L} \left[ r^2 + \frac{(R_o^2 - R_i^2)}{\ln(R_o/R_i)} \ln(R_o/r) - R_o^2 \right] - v_p \frac{\ln\left(\frac{R_o}{r}\right)}{\ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)} \quad (4.73)$$

olarak elde edilir. Dikdörtgen kanal yaklaşımına benzer şekilde birinci terimin akış modu ile aynı olduğu, ikinci terimin ise kayma moduna ait bileşen olduğu görülebilir. İlgili denklem integre edilirse debi ifadesi bulunabilir:

$$\begin{aligned} Q &= 2\pi \int_{R_i}^{R_o} u(r) r dr \\ &= \frac{\pi \Delta P R_o^4}{8\mu L} \left\{ \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^4 + \frac{[1 - (R_i/R_o)^2]^2}{\ln(R_o/R_i)} - 1 \right\} \\ &\quad + \frac{v_p \pi R_o^2}{2} \left\{ 2 \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^2 - \frac{[1 - (R_i/R_o)^2]}{\ln(R_o/R_i)} \right\} \end{aligned} \quad (4.74)$$

Benzer şekilde birinci terim akış modundaki ile aynıdır. İkinci terim ise debiyi pistonun hızı oranında azaltmaktadır. Basınç düşüşü bu ifadeden çekilerek aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\Delta P = \frac{Q - \frac{v_p \pi R_o^2}{2} \left\{ 2 \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^2 - \frac{[1 - (R_i/R_o)^2]}{\ln(R_o/R_i)} \right\}}{\frac{\pi R_o^4}{8\mu L} \left\{ \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^4 + \frac{[1 - (R_i/R_o)^2]^2}{\ln(R_o/R_i)} - 1 \right\}} \quad (4.75)$$

Sönüm katsayısı ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$C_{karma\ mod} = \frac{F}{v_p} = \frac{-\Delta P A_{piston}}{v_p} \quad (4.76)$$

#### 4.2.4.2. Karma modda aksenal simetri yaklaşımının MR etki altında Bingham modeline göre uygulanması

Karma mod için Bölge 1 ve Bölge 2'nin yukarıdaki çözümlerde olduğu gibi akış modundan farklı olarak yeniden hesaplanması gerekir. Denklem 4.54  $y = 0$  için  $u = -v_p$  ve  $y = y_1$  için  $\frac{du}{dy} = 0$  sınır şartları için integre edilirse Bölge 1'e ait hız profili;

$$u_1(r) = \frac{\Delta P}{4\mu L} \left[ r^2 - R_o^2 - 2R_1^2 \ln\left(\frac{r}{R_i}\right) \right] - \frac{\tau_0}{\mu} \left[ r - R_i - R_1 \ln\left(\frac{r}{R_i}\right) \right] - v_p \quad (4.77)$$

olarak elde edilir.

Bölge 2 için Denklem 4.33 ve Denklem 4.34'teki işlem basamakları uygulanırsa çekirdek kalınlığı akış modundaki ile aynı bulunur. Hız değeri ise Bölge 1 için tanımlanan  $u_1(R_1) = u_2$  eşitliğinden bulunabilir. Böylece çekirdek bölgedeki hız;

$$u_2 = \frac{\Delta P}{4\mu L} \left[ R_1^2 (1 - 2\ln(R_1/R_i)) - R_o^2 \right] - \frac{\tau_0}{\mu} \left[ R_1 \left( 1 - \ln\left(\frac{R_1}{R_o}\right) \right) - R_o \right] - v_p \quad (4.78)$$

olarak bulunur. Bölge 3'teki akış profili de benzer şekilde akış modundaki ile aynıdır.  $u_1(R_1) = u_3(R_2)$  eşitliği ise iteratif olarak çözülebilen aşağıdaki kapalı denklemi netice verir:

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta P}{4\mu L} \left[ R_1^2 (1 - 2\ln(R_1/R_i)) - R_i^2 \right] - \frac{\tau_0}{\mu} \left[ R_1 \left( 1 - \ln\left(\frac{R_1}{R_i}\right) \right) - R_i \right] - v_p \\ & = \frac{\Delta P}{4\mu L} \left[ R_2^2 (1 - 2\ln(R_2/R_o)) - R_o^2 \right] \\ & - \frac{\tau_0}{\mu} \left[ R_2 \left( 1 - \ln\left(\frac{R_2}{R_o}\right) \right) - R_o \right] \end{aligned} \quad (4.79)$$

### 4.3. Çözümlerin Uygulanması

Eğer MR dampere ait geometrik büyüklükler biliniyorsa elde edilen analitik ifadeler kullanılarak iki farklı büyüklük tespit edilebilir. Bunlardan birincisi, piston hızı için kanal boyunca basınç düşüşünü ve dolayısıyla pistonun gösterdiği direnç kuvvetini bulmaktır. İkincisi ise istenilen kuvveti sağlamak için gerekli piston hızının bulunmasıdır.

#### 4.3.1. Verilen bir hız için piston kuvvetinin bulunması

Bu işlemin gerçekleşmesi temelde beş aşamadan oluşmaktadır;

1. Piston hızı bilindiği için yer değiştiren akışkan miktarı, dolayısıyla kanal içinden geçen debi,  $Q = v_p(A_s - A_{mil})$  ifadesinden bulunabilir.
2. Çekirdek kalınlığı boyunca hız sabit olduğu için Kartezyen koordinatlarda  $u_1(y_1) = u_3(y_2)$  veya silindirik koordinatlarda  $u_1(R_1) = u_3(R_2)$  olmalıdır. Böylece  $y_1$  ile  $y_2$  veya  $R_1$  ile  $R_2$  arasındaki ilişkiyi veren bir denklem elde edilir.
3. Çekirdek kalınlığı  $\delta$  ile  $\Delta P_{aktif}$  arasında  $\delta = \frac{-2L\tau_0}{\Delta P_{aktif}}$  ilişkisi vardır. Bu ilişki kullanılırsa akımın geçtiği bölgedeki basınç düşüşü çekirdek kalınlığına bağlı olarak elde edilir.
4. Her üç bölgedeki debiler,  $\Delta P_{aktif}$ 'e bağlı olarak hız profillerinin kanal boyunca integre edilmesi ile bulunur. Üç bölgedeki toplam debi birinci maddede elde edilen debiye eşit olmalıdır.
5. Yukarıdaki dört adet denklem kullanılarak dört adet değişken olan  $Q$ ,  $\Delta P_{aktif}$ ,  $y_1$  ve  $y_2$  (veya  $R_1$  ve  $R_2$ ) iteratif olarak çözülür.
6. Benzer şekilde akımın geçmediği bölgede Newton tipi akış kabulü ile debiden faydalanarak  $\Delta P_{pasif}$  elde edilir.
7. Kanal boyunca oluşan basınç düşüşleri  $\Delta P_{aktif}$  ve  $\Delta P_{pasif}$  toplanırsa toplam basınç düşüşü ve bu ifadenin piston alanı  $A_p$  ile çarpılması ile toplam kuvvet elde edilir.

Bu aşamalar yukarıda incelenen tüm çözüm yöntemleri için uygulanabilir. BÖLÜM 5'te referans MR damper için akış modunda ve BÖLÜM 6'da üretilecek MR damper için karma modda; dikdörtgen kanal, aksenal simetrik Bingham ve dikdörtgen kanal Herschel-Bulkley modellerine göre verilen bir piston hızı için oluşan kuvvet hesaplanacak ve akış profilleri ortaya konulacaktır.

#### 4.3.2. Verilen bir kuvvet için piston hızının bulunması

Bir başka uygulanabilecek çözüm yöntemi ise önceden bilinen bir kuvvet değeri için gereken piston hızının bulunmasıdır. Bu kez işlemler tersinden yapılarak sonuca ulaşılır. Fakat toplam basınç düşüşü ifadesinden hızı elde etmek matematiksel olarak biraz daha karmaşıktır. İşlem basamakları aşağıdaki gibidir.

1. İstenilen toplam kuvvet, piston alanı olan  $A_p$ 'ye bölünerek toplam basınç düşüşü ifadesi elde edilir. Bu basınç düşüşü  $\Delta P_{aktif}$  ve  $\Delta P_{pasif}$ 'in toplamına eşittir.
2.  $\Delta P_{pasif}$  ifadesi debiye dolayısıyla  $v_p$ 'ye bağlı olarak yazılır.
3.  $\Delta P_{aktif}$  ifadesi  $\delta = \frac{-2L\tau_0}{\Delta P_{aktif}}$  ilişkisi kullanılarak  $\delta$ 'ya bağlı olarak yazılır.
4. Toplam debi  $Q = v_p(A_s - A_{mil})$  ifadesine göre  $v_p$ 'nin bir fonksiyonudur.
5. Çekirdek kalınlığı boyunca hız sabit olduğu için Kartezyen koordinatlarda  $u_1(y_1) = u_3(y_2)$  veya silindirik koordinatlarda  $u_1(R_1) = u_3(R_2)$  olmalıdır. Böylece  $y_1$  ile  $y_2$  veya  $R_1$  ile  $R_2$  arasındaki ilişkiyi veren bir denklem elde edilir.
6. Her üç bölgedeki debiler,  $\Delta P_{aktif}$ 'ye bağlı olarak hız profillerinin kanal boyunca integre edilmesi ile bulunur. Üç bölgedeki toplam debi dördüncü maddedeki  $v_p$ 'ye bağlı olan debiye eşit olmalıdır.
7. Yukarıdaki altı adet denklem kullanılarak altı adet bilinmeyen olan  $\Delta P_{aktif}$ ,  $\Delta P_{pasif}$ ,  $v_p$ ,  $Q$ ,  $y_1$  ve  $y_2$  (veya  $R_1$  ve  $R_2$ ) iteratif olarak bulunur.

Bu aşamalar yukarıda incelenen tüm çözüm yöntemleri için uygulanabilir.



## **BÖLÜM 5. MR DAMPERİN SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ**

Sayısal modelleme yöntemleri, bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle beraber analitik ve deneysel yöntemlere bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) temel olarak Akışkanlar Mekaniği'ndeki diferansiyel denklem ifadelerinin ayrıklaştırılarak bir akış bölgesi için sonlu hacimler veya sonlu farklar ile çözüm yapılmasına verilen isimdir. Günümüzde bu anlamda araştırma amaçlı veya ticari olarak kullanılan birçok yazılım mevcuttur. Bu yazılımlar sayesinde birçok mühendislik tasarımı, simülasyon ortamında test edilebilmekte ve araştırmacılar büyük maliyetlerden kurtulmuş olmaktadır.

MR damperlerin sayısal olarak modellenmesi 2000'li yıllardan sonra gündeme gelmiş, bu yönde yapılabilecek modellemelere ilişkin öneriler 2004 yılında ortaya atılmış ve ilk analizler gerçekleştirilmiştir [108]. O günden bu yana, MR damperin modellendiği birçok HAD analizi araştırmalarda kullanılmıştır. Bu konudaki detaylı bilgi BÖLÜM 3'te sunulmuştur.

MR damper için sayısal model oluştururken iki önemli problem ile karşılaşılır. Bunlardan birincisi, akışkanın görünür viskozitesini etkileyen manyetik alan çözümünün nasıl yapılacağıdır. Manyetik alanın sayısal çözümü için piyasada çok sayıda ticari sonlu elemanlar yazılımı mevcuttur. Bu yazılımlardaki analizler neticesinde elde edilen sonuçlar doğrudan çoklu-fizik bir HAD yazılımı ile HAD analizinde çözülebilir veya çıkan manyetik alan haritası herhangi bir HAD yazılımına aktarılabilir. Bu çözümlerin her birinin avantaj ve dezavantajları detaylı olarak irdelenecektir.

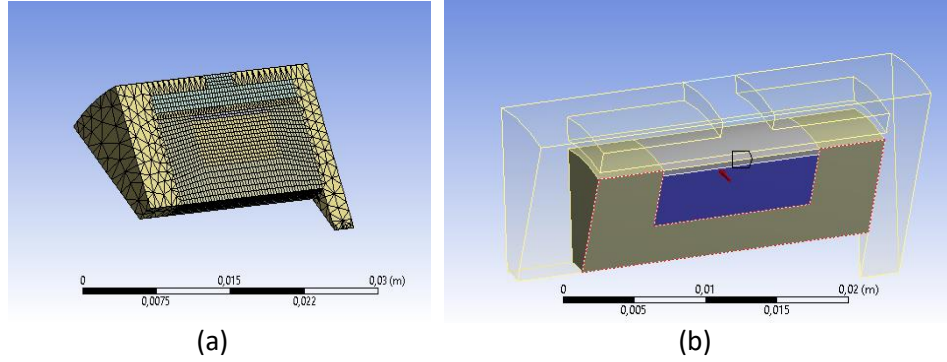
İkinci problem ise akışkanın görünür viskozitesi ile manyetik alan arasındaki ilişkinin nasıl tesis edileceğidir. Bu problemin çözümü için basit bir Bingham akışkanı yaklaşımından, hücre hücre görünür viskozitenin hesaplandığı karmaşık algoritmalara kadar çok çeşitli yaklaşımlar uygulanabilir.

Çoklu-fizik yazılımlar manyetik alan ile akış analizi arasında oldukça pratik bir ilişki tesis etmesine rağmen, bu yazılımlara karmaşık algoritmalar ile eklentiler yapmak oldukça zordur. Buna karşılık, müdahale edilebilen yazılımlar genellikle hızlı ve pratik çözümler sunamamaktadır.

Bu bölümde, öncelikle manyetik alan modellemesi ve HAD çözümü için kullanılan geometrik model kısaca ele alınacaktır. Ardından, HAD çözümleri ile ilgili olarak literatürdeki mevcut yöntemler irdelenecek ve bu çalışma kapsamında yeni geliştirilen viskozite yaklaşımları önerilecektir. Tüm bu yaklaşımlar irdelenirken sonuçların başarısını değerlendirmek ve doğrulama yapabilmek adına deneysel verileri bulunan bir MR damper referans olarak kabul edilmiştir [124].

### **5.1. Referans MR Damperin Manyetik Alanının Sayısal Olarak Modellenmesi**

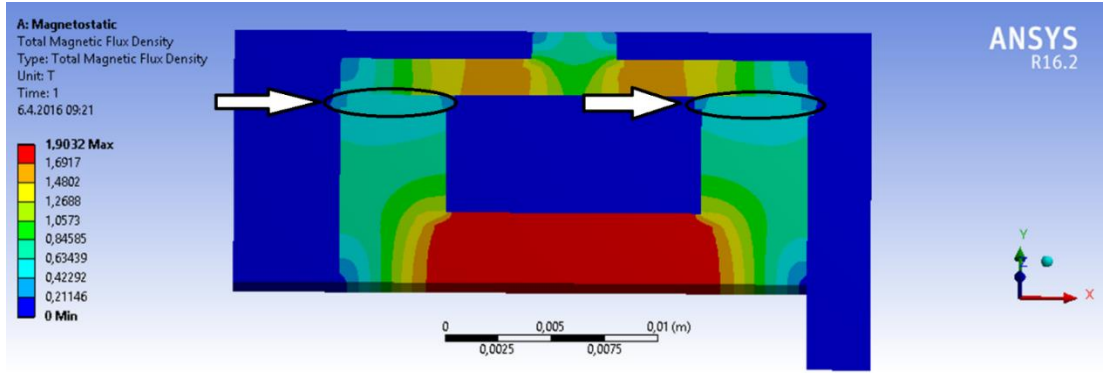
MR sıvının en önemli karakteristik özelliği farklı manyetik akı yoğunlukları altında farklı görünür viskozite değerleri göstermesidir. Dolayısıyla, bir MR sıvının akış analizinin yapılabilmesi için öncelikle üzerine gelen manyetik akı yoğunluğunun bilinmesi gereklidir. Referans MR damper için LORD markasına ait MRF132DG kodlu MR sıvı kullanılmıştır ve bu sıvıya ait katalog verileri kullanılarak manyetik alan analizleri gerçekleştirilmiştir.



(a) Şekil 5.1. MR damperin manyetik alan analiz modeli

MR sıvıya uygulanan manyetik alan, doğru akım ile elde edilir. Dolayısıyla sayısal modelleme için dinamik bir manyetik alan analizine ihtiyaç yoktur. Bu tip problemler düşük frekans analizleri için kullanılan dinamik olmayan ticari sonlu elemanlar yazılımları ile analiz edilebilir [10]. Tez kapsamında, manyetik alan analizleri için ANSYS Magnetostatic isimli yazılım kullanılmıştır. MR damper modeli üç boyutlu olarak oluşturulmuş fakat hesaplama süresinin kısaltmak adına ekstenel simetri kabulü ile 25°'lik bir dilimin analizi yapılmıştır. Bobinin içerisinde 220 sarım olduğu kabul edilmiştir. 1 A akım altında gerçekleştirilen analizler, dilim yüzeyindeki veriler kullanılarak iki boyutlu akış alanı ile eşleştirilmiştir. Manyetik alan modeline ilişkin görsel Şekil 5.1.'de gösterilmiştir. Şekil 5.1(a).’da çözüm ağı yapısı, Şekil 5.1(b).’de ise mavi renk bobini ve gri renk piston başını göstermek üzere MR dampere ait geometrik yapı verilmiştir.

Manyetik alan analizine ait sonuçlar Şekil 5.2.’de gösterilmiştir. Buradaki en önemli bölge, manyetik alanın akış hacminden geçtiği işaretli bölgelerdir. Burası, aktif bölge olarak adlandırılır. Aktif bölgedeki maksimum manyetik akı yoğunluğu 0,49754 T olarak, ortalama manyetik akı yoğunluğu ise 0,45322 T olarak hesaplanmıştır.

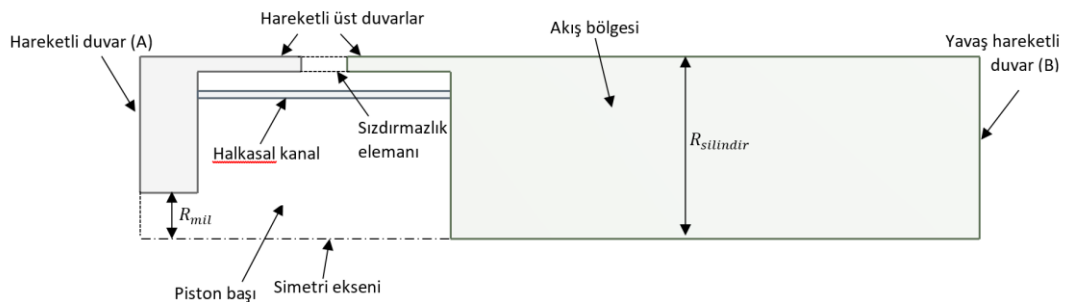


Şekil 5.2. MR damperin içerisindeki manyetik akı yoğunluğunun sonlu elemanlar analizi ile elde edilmesi

Yapılan analiz neticesinde manyetik akı yoğunluğu hücresel olarak elde edilmektedir. Bu veriler, daha sonra her bir hücredeki görünür viskozitenin bulunması için kullanılmıştır.

## 5.2. Referans MR Damper İçerisindeki Akışın Sayısal Olarak Modellenmesi

Tez kapsamında modellemenin yapılabilmesi için FLUENT isimli yazılım kullanılmıştır. Referans çalışmada [124] kullanılan HAD çözümündeki üç boyutlu geometri yerine aksel simetrik, iki boyutlu bir model tercih edilerek hesaplama süresi kısaltılmış ve ağ yapısı, daha kolay bir çözüm sağlamak adına yapılandırılmıştır. Çalışmada kullanılan MR damper geometrisi Şekil 5.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Referans MR damperin HAD geometrisi

MR damperin içerisindeki MR sıvı, piston başının hareketi ile gösterilen halka şeklindeki kanaldan geçmeye zorlanmakta, böylece piston duvarları üzerinde bir sönüm kuvveti oluşmaktadır. Geliştirilen modelde, piston kafasının hareket ettirilmesi

yerine sağ ve soldaki duvarlar ile üst duvar hareketli hale getirilmiş ve piston hareketi, bağıl hareket olarak modellenmiştir. Modele dikkatli bakıldığında, sol bölmede mil belirli bir hacim kapladığı için birim uzunluk başına sağ ve sol bölmenin hacimlerinin eşit olmadığı görülür. Akışkanın sıkıştırılmaz olduğu kabul edildiğinde, piston hareketinin modellenmesi için hareket eden duvarların hareket hızlarının birbirinden farklı olması gerekmektedir. Pratikte bu durum milin olmadığı tarafta hacimleri dengeleyen bir akümülatör konularak sağlanır. Buna göre duvar hızları arasındaki ilişki;

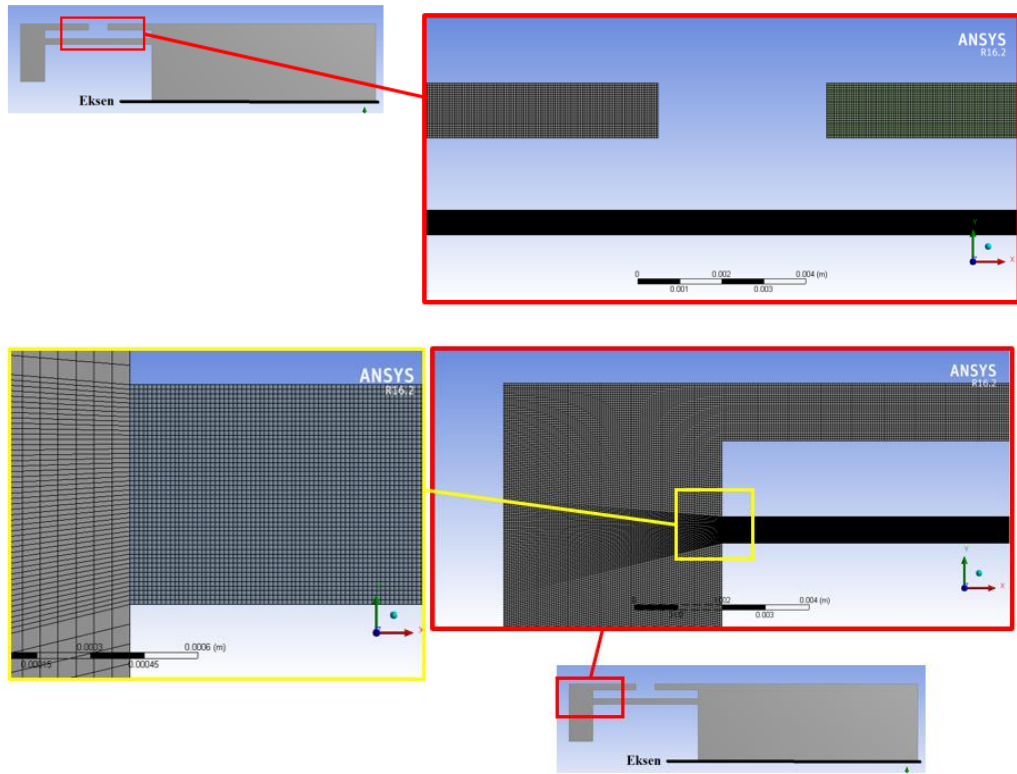
$$v_{duvar,B} = v_{duvar,A} \cdot (R_{silindir} - R_{mil})^2 / R_{silindir}^2 \quad (5.1)$$

şeklinde ifade edilir. Buradaki  $v$ , hızı;  $R$ , yarıçapı; A ve B indisleri ise sırasıyla mil ile eşit hızda hareket eden ve akümülatörden dolayı daha yavaş hareket eden duvarları göstermektedir. Model, verilen eksene göre eksenal simetriktr.

Tablo 5.1. MR damperin hareket değerleri

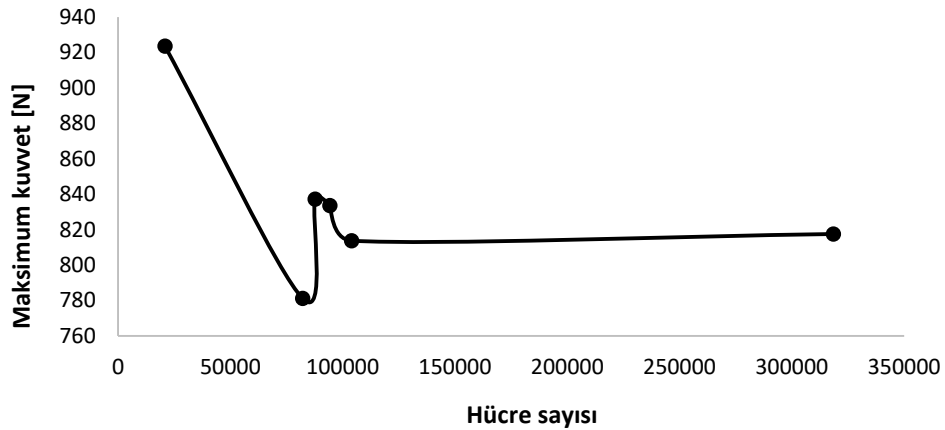
Konum [m]	$0,0075 \cos(\omega t)$
Hız [m/s]	$-0,05 \sin(\omega t)$
$\omega$ [rad/s]	6,667
Zaman adımı [s]	0,001
Toplam süre ( $2\pi/\omega$ ) [s]	0,942

HAD modelindeki duvarının hareketine ait değerler Tablo 5.1.'de verilmiştir. Hareket, düzgün sinüzoidal bir hareket olarak tanımlanmıştır. Bu hareket, FLUENT yazılımına C tabanında yazılmış bir kullanıcı tanımlı fonksiyon (UDF) ile aktarılmıştır ve ilgili kod Ek.A'da verilmiştir. Zaman adımları, analizdeki ıraksama sorunlarından kaçınabilecek kadar küçük ve hesaplama süresini gereksiz yere artırmayacak kadar büyük seçilmiştir. Daha önce yapılan referans çalışmadaki [124] deneysel verileri kullanmak adına, yerdeğiştirme ve hız değerleri bu çalışma ile aynı seçilmiştir.



Şekil 5.4. HAD analizi için oluşturulan ağ yapısı

Kullanılan çözüm ağı Şekil 5.4.'te gösterilmiştir. Çözüm ağında tamamen dörtgen (quadrilateral) hücreler kullanılmıştır. Geometrinin iki boyutlu olması ve yapılandırılmaya müsait olması neticesinde oldukça yüksek bir ağ kalitesi elde edilebilmiştir. Dörtgenlik kalitesi (orthogonal quality) minimum 0,96758 değerinde iken çarpıklık değerleri maksimum 0,1492'dir. Çözüm ağındaki eleman kalitesi ortalama 0,97179 değerindedir. MR damperdeki basınç düşüşünün en baskın olduğu kanal bölgesinde, daha yoğun bir çözüm ağı tercih edilmiş ve bu bölgede 0,025 mm en ve boya sahip hücreler ile ağ bağımsızlığı sağlanmıştır. Elde edilen ağ bağımsızlığına ait grafik Şekil 5.5.'te gösterilmiştir. Geometrideki hücre ve düğüm sayıları dörtgenlikten dolayı birbirinde yakın değerlerdedir ve 104.000 mertebesindedir.



Şekil 5.5. Ağ bağımsızlığının elde edilmesi

MR sıvı akışının modellenmesinin önündeki en önemli engel, akışkanın manyetik akı altında reolojik özelliklerinin değişmesi, dolayısıyla farklı bölgelerde farklı görünür viskozitelere sahip bir akışkan gibi davranmasıdır. Ayrıca, akışkanın Newton tipi olmayan bir akışkan olması da viskozitenin kayma hızına bağlı olarak değişmesine sebep olmaktadır. Günümüzdeki HAD yazılımları ise standart olarak sabit viskoziteye sahip yani Newton tipi akışkanlar için tasarlanmıştır. Bu nedenle, Newton tipi olmayan ve farklı manyetik akılarda farklı görünür viskozitelere sahip bir akışkan ile analiz yapabilmek için ilave yazılım veya yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü ancak bu şekilde, akışkanın görünür viskozitesi hem kayma hızına hem de manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak ifade edilebilir. Bu kapsamda önce literatürde karşılaşılan yaklaşımlar detaylı olarak ele alınacaktır, ardından geliştirilen yeni yaklaşımlar sunulacaktır.

### 5.3. Mevcut Reolojik Model Yaklaşımları

MR sıvı, MR etki olmadığında Newton tipi bir akışkana yakın davranış gösterirken, manyetik alan altında Newton tipi olmayan davranış göstermeye başlar. Bu Newton tipi olmayan davranışın en tipik özelliği, belirli bir akma gerilmesine sahip olmasıdır. Dolayısıyla yapılacak en temel basitleştirme, akışkanı sıfır akım altında sabit viskoziteye sahip Newton tipi bir akışkan olarak kabul edip, manyetik akı altında

belirli bir akma gerilmesine sahip olan bir Bingham plastik akışkanı kabul etmektir. Bingham modeline göre akışkanın kayma gerilmesi aşağıdaki formülden bulunabilir.

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (5.2)$$

Formüldeki  $\tau$  kayma gerilmesini,  $\tau_0$  akma gerilmesini,  $\mu$  viskoziteyi,  $\dot{\gamma}$  ise kayma hızını ifade etmektedir. Akışkanın viskozitesi, MR sıvı üreticilerinin kataloglarında Newton tipi akış için sabit değerlerde verilmektedir. Akma gerilmesi ise uygulanan manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Bir başka deyişle  $\tau_0$ , manyetik akı yoğunluğunun bir fonksiyonudur.  $\tau_0$ 'ın bulunması için ölçümler yardımıyla elde edilen bazı analitik formüller kullanılabilir gibi [125], üretici firmaların kataloglarında verilen grafiklere de başvurulabilir [126].

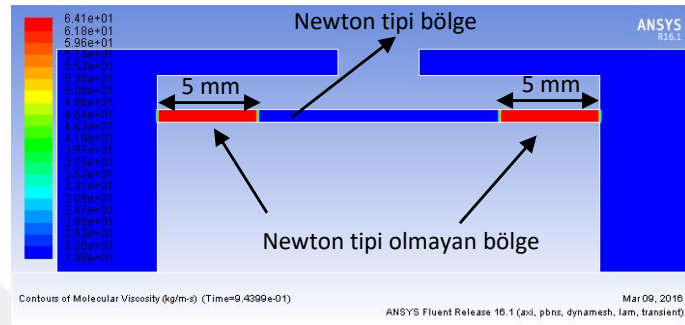
MR sıvı için reolojik model tespit edildikten sonra bir diğer problem, manyetik akı yoğunluğunun viskozite ile nasıl ilişkilendirileceğidir. Bu ilişki, sabit bir ortalama manyetik akı yoğunluğu değerine göre kurulabileceği gibi, her hücre için ayrı ayrı ilişkilendirme yapılarak eşlenik bir çözüm ile de tesis edilebilir. Bu çözümlere ilişkin literatürdeki çalışmalar ve referans MR damper üzerindeki uygulamalar, takip eden alt bölümlerde ele alınacaktır.

### 5.3.1. Bingham üniform manyetik alan yaklaşımı

Literatürde en çok kullanılan ve en basit yaklaşım, aktif bölgenin üniform bir manyetik akı yoğunluğuna sahip olduğunun kabul edilmesidir. Manyetik akı yoğunluğu, aktif bölgedeki ortalama değer dikkate alınarak seçilebilir. Böylece aktif bölgedeki ilgili manyetik akı yoğunluğuna karşılık gelen akma gerilmesi bulunarak Bingham plastik modeline göre modelleme yapılır. Bunun dışında kalan bölgeler ise Newton tipi akışkan olarak kabul edilir. Bu tip çözümlere, MR damperlerin üniform manyetik akı kabulü ile yapılmış kayma modundaki analizleri [113,127], sıkıştırma modundaki analizleri [128,129] veya MR sıvının akıllı kaymalı yatak gibi mekanizmalardaki analizlerine [130,131] ilişkin çalışmalar örnek olarak gösterilebilir.

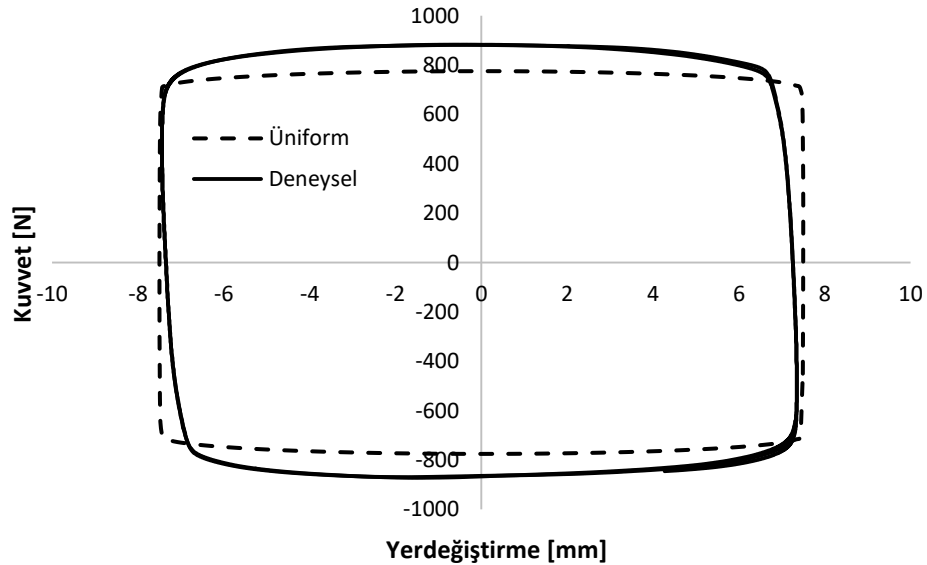


Bu yaklaşım, referans MR damper için bir HAD analizinde uygulanarak deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Bunun için manyetik akının geçmiş olduğu 5 mm uzunluğundaki aktif bölgedeki ortalama manyetik akı değeri tespit edilmiş ve bu bölgeler Newton tipi olmayan akışkan için Bingham plastik modeli ile modellenmiştir. İlgili model Şekil 5.6.'da gösterilmiştir.

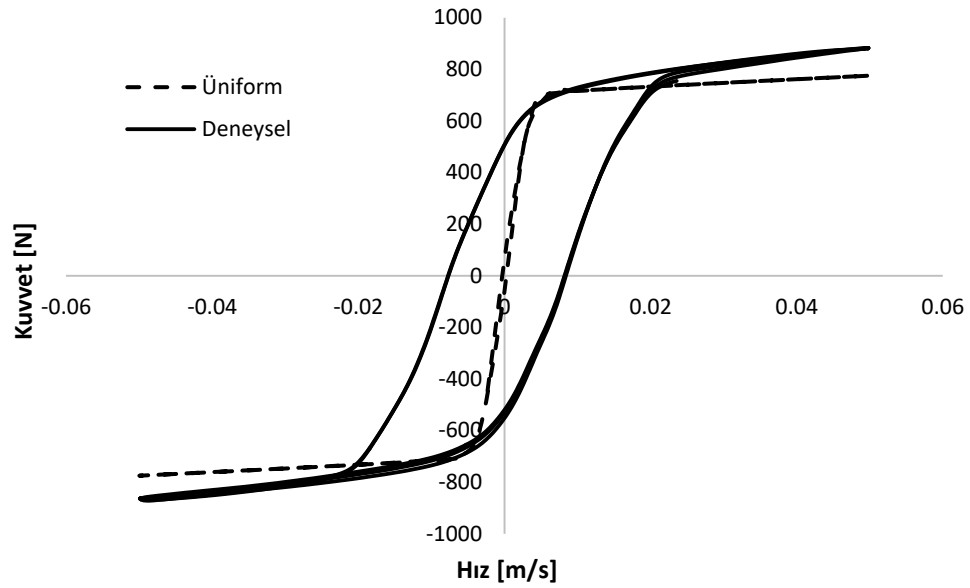


Şekil 5.6. Referans MR damperin üniform Bingham akışkanı olarak modellenmesi

Analize ait sonuçlar Şekil 5.7. ve Şekil 5.8.'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde deneysel veriler ve sayısal çözüm arasında kabul edilebilir bir yakınlık olduğu görülmüştür. Maksimum kuvvet için deneysel sonuç ile %11,64 fark görülmektedir.



Şekil 5.7. Referans MR damperin üniform manyetik alan yaklaşımı ile elde edilmiş kuvvet-yerdeğiştirme sonuçlarının deneysel veriler ile karşılaştırılması



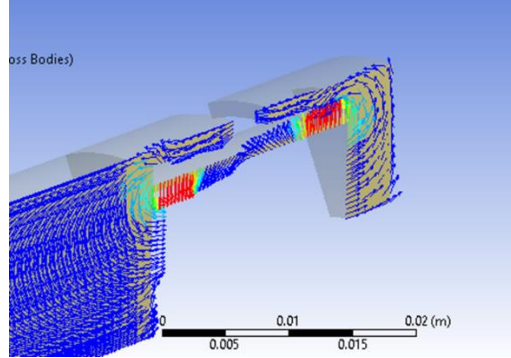
Şekil 5.8. Referans MR damperin üniform manyetik alan yaklaşımı ile elde edilmiş kuvvet-hız sonuçlarının deneysel veriler ile karşılaştırılması

### 5.3.2. Bingham eşlenik hücre yaklaşımı

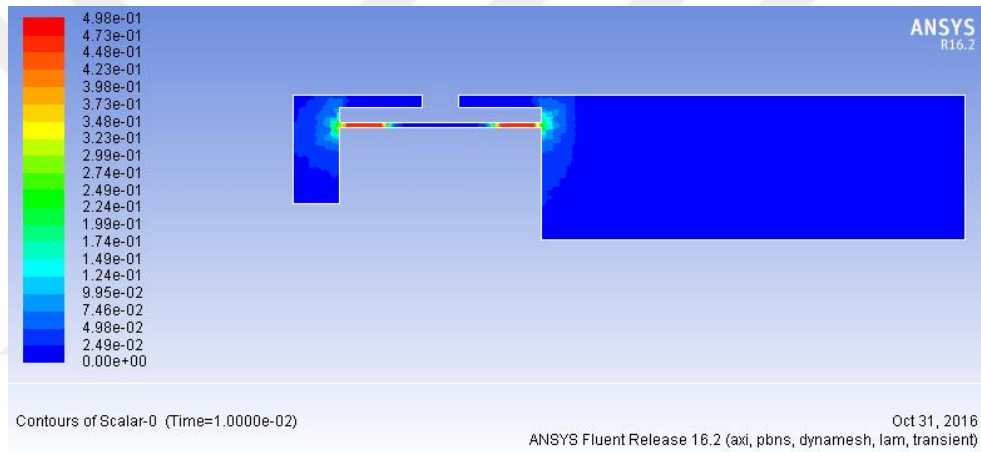
Eşlenik hücre yaklaşımı, manyetik akı yoğunluğu ile akışkanın görünür viskozitesi arasındaki ilişkiyi her hücre için tek tek hesaplar. Bu yaklaşım ile yapılan çözümlerde de bir önceki yaklaşıma benzer şekilde Bingham plastik modeli yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna karşılık bu yaklaşım daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Eğer hücrelerin tek tek eşlenik olmasını sağlayacak çoklu-fizik (multiphysics) analiz yapabilen bir yazılım mevcutsa bu tip bir yaklaşım daha kolay bir şekilde uygulanabilir. İlgili yaklaşıma, MR damperler [114,115], MR kaymalı yataklar [132], [133] ve MR frenler [134] ile yapılmış çalışmalar örnek olarak gösterilebilir.

Bu yaklaşım, tez kapsamında referans MR damper için bir HAD analizinde uygulanmıştır. Kullanılan FLUENT yazılımının çoklu fizik analizi özelliği olmadığı için manyetik akı yoğunluğunun aktarılması profil dosyaları yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Manyetik alan analizleri üç boyutlu ve eksenel simetrik olarak yapıldığı için, veriler iki boyutlu akış analizine aktarılırken simetri yüzeylerindeki değerler kullanılmıştır. Manyetik akı yoğunluğu değerleri, bir kullanıcı tanımlı büyüklük (UDS) olarak FLUENT yazılımında tanımlanmıştır. Manyetik alan analizi

sonucunda elde edilen manyetik akı vektörleri Şekil 5.9.'da ve HAD analizi için FLUENT'e aktarılmış olan verilerin kontur görüntüsü Şekil 5.10.'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Manyetik akı vektörlerinin MR sıvı bölgesi üzerindeki görünümü



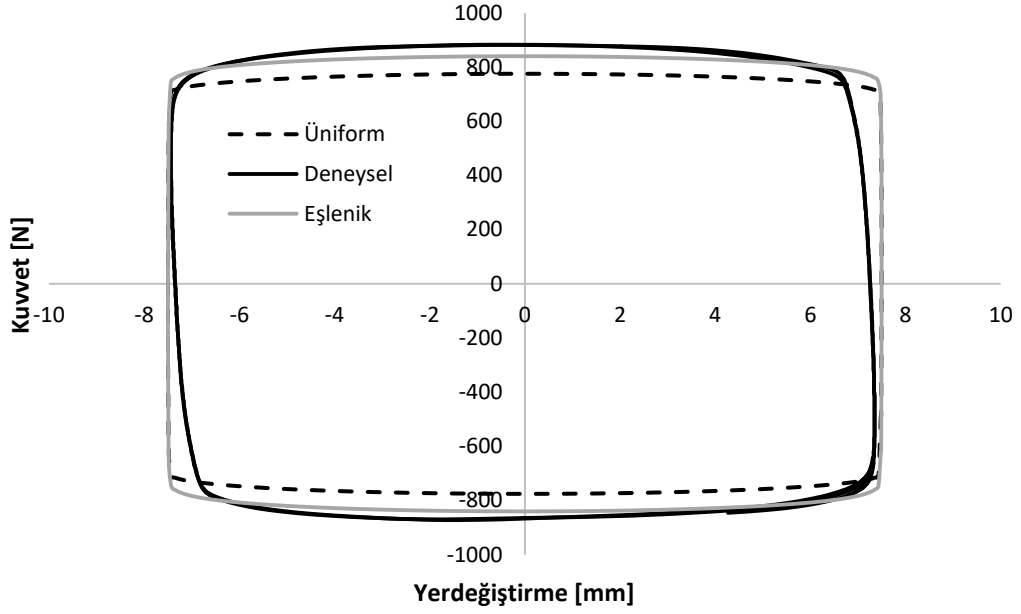
Şekil 5.10. Manyetik akı yoğunluğunun FLUENT'e aktarılmış hali

MR damperin piston kafası hareket etmediğinden dolayı manyetik akı yoğunluğu verileri HAD analizinde, sabit koordinatlarda tanımlanabilmektedir. Akma gerilmesinin her bir hücrede hesaplanabilmesi için MRF132DG için geliştirilen aşağıdaki formül kullanılmıştır [113]:

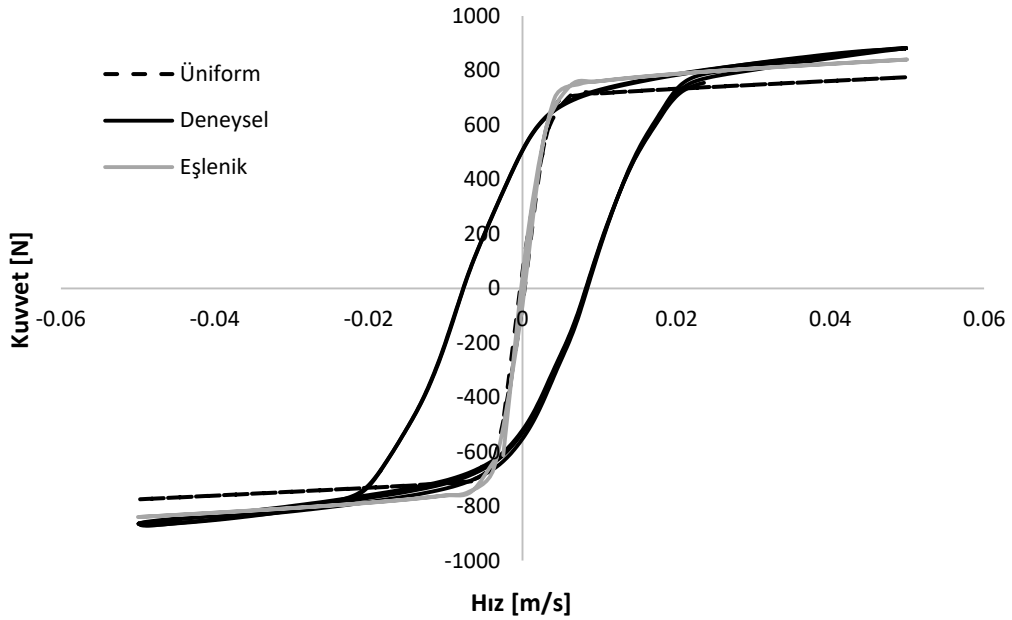
$$\tau_0 = 51,962 B^4 - 176,51 B^3 + 158,79 B^2 + 13,708 B + 0,1442 \quad (5.3)$$

İlgili denklemin her bir hücrede uygulanabilmesi için FLUENT yazılımına uygulanabilen, C tabanında yazılmış bir kullanıcı tanımlı kod (UDF) geliştirilmiştir. Bu kod Ek.A'da sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, bir önceki yaklaşım de dikkate

alınarak deneysel veriler ile kıyaslanmıştır. Sonuçlar Şekil 5.11. ve Şekil 5.12.'te verilmiştir.

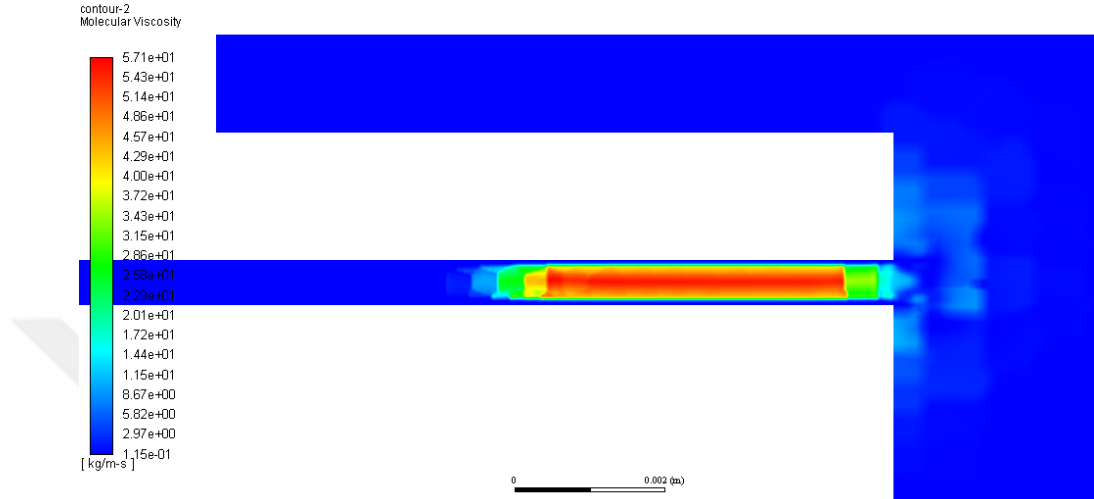


Şekil 5.11. Referans MR damperin eşlenik ve üniform manyetik alan yaklaşımı ile elde edilmiş kuvvet-yerdeğiştirme sonuçlarının deneysel veriler ile kıyaslanması



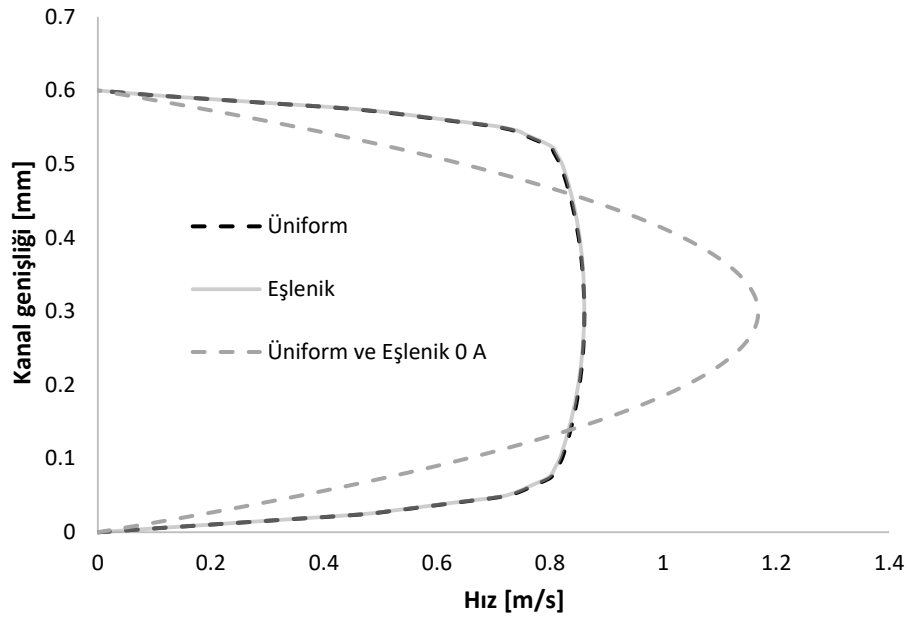
Şekil 5.12. Referans MR damperin eşlenik ve üniform manyetik alan yaklaşımı ile elde edilmiş kuvvet-hız sonuçlarının deneysel veriler ile kıyaslanması

Değerler incelendiğinde maksimum hız için deneysel verilere göre maksimum kuvvette % 4,25 hata olduğu görülmektedir. Hata oranının üniform yaklaşıma göre daha da azaldığı net olarak görülmektedir. Bu durum çözümde eşlenik yaklaşımın kullanılması ile daha gerçekçi çözümler elde edildiğini ispat etmektedir.



Şekil 5.13. Referans MR damper için kanal bölgesinde maksimum hız anında görünür viskozite konturları

Şekil 5.13.'te kanal bölgesindeki maksimum hız durumunda kanal içerisindeki görünür viskozite konturları verilmiştir. Şekilde, akışkanın görünür viskozitesinin aktif bölgedeki artışı net olarak görülmektedir. Maksimum hızda, duvar kenarlarında görünür viskozitenin düşüşü ve sabit viskoziteli bir çekirdek bölgesinin oluştuğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.14. Maksimum hızda manyetik akı altında ve akım olmadığı durum için akış profilleri

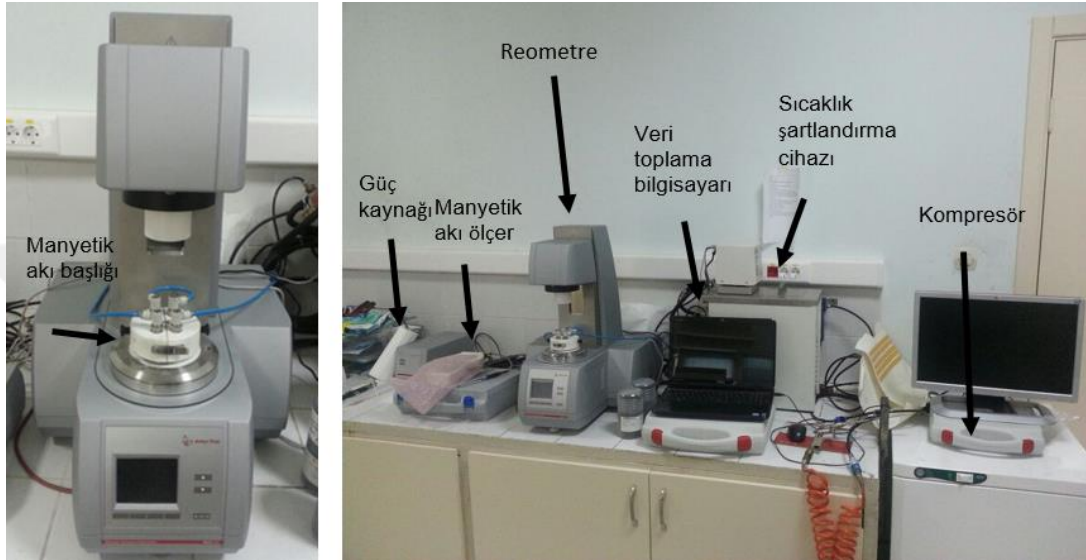
Şekil 5.14. incelendiğinde MR etki altında akış profilinde bir çekirdek bölgesi oluştuğu net bir şekilde görülmektedir. Her iki yaklaşım için de bu profillerin nerdeyse birbiri ile üst üste çakıştığı görülmektedir.

Yukarıda bahsedilen bu iki yaklaşım ile maksimum kuvvetlerde deney sonuçlarına göre hata oranı % 5 seviyelerine kadar inebilmektedir. Bu oran HAD analizlerinin temsil kabiliyetinin daha da iyileştirilebileceğini göstermektedir. Bunun yanı sıra zikredilen yaklaşımlar MR sıvının reolojik özellikleri üzerine belirli kabuller yapılarak oluşturulduğu için, gerçek değerlere ilişkin yeni modellerin daha etkin bir sonuç vermesi beklenmektedir. Bunun için MR sıvının reometre ile detaylı ölçümleri yapılacak ve uygulanabilecek yeni yaklaşımlar aranacaktır.

#### 5.4. Reometre Ölçümleri

MR sıvının karakterizasyonunun yeniden ortaya konulabilmesi için kullanılan MR sıvının detaylı bir analizine ihtiyaç duyulduğu anlaşılmıştır. Bunun için Sakarya Üniversitesi Laboratuvarı'nda bulunan Anton-Paar MCR302 marka reometre kullanılmıştır. Cihaz, ölçüm başlığının bir kompresör yardımıyla pnömatik olarak

döndürülmesi ile çalışmaktadır. Bu cihaz hem test için sıcaklığı şartlandırabilmekte, hem de MR sıvılar için farklı akım değerlerinde testler yapabilmektedir. Reometre akım başlığı, bir güç kaynağı vasıtasıyla MR sıvı üzerine 0 A ile 5 A arasında akım gönderebilmektedir. Bu akıma karşılık gelen manyetik akı yoğunluğu da yine cihaz tarafından ölçülebilmektedir. Reometreye ait görsel Şekil 5.15.'te sunulmuştur.



Şekil 5.15. Reometre cihazı (solda), reometrenin yardımcı parçaları (sağda)

Ölçüm yapabilmek için reometreye ait iki farklı ölçüm başlığı kullanılabilir. Bunlar paralel plaka (parallel plate) ile çift-boşluk (twin-gap) ölçüm başlıklarıdır. Paralel plaka, özellikle Bingham tipi akışkanlar için akma gerilmelerini hassas bir şekilde ölçmek üzere tasarlanmış bir başlıktır. Çift-boşluk başlık ise daha yüksek dönüş hızlarına yani daha yüksek kayma hızlarına uygun olarak tasarlanmıştır. Başlıklara ilişkin görseller Şekil 5.16.'da verilmiştir.



Şekil 5.16. Paralel plaka başlığı (solda), çift-boşluk başlık (sağda)

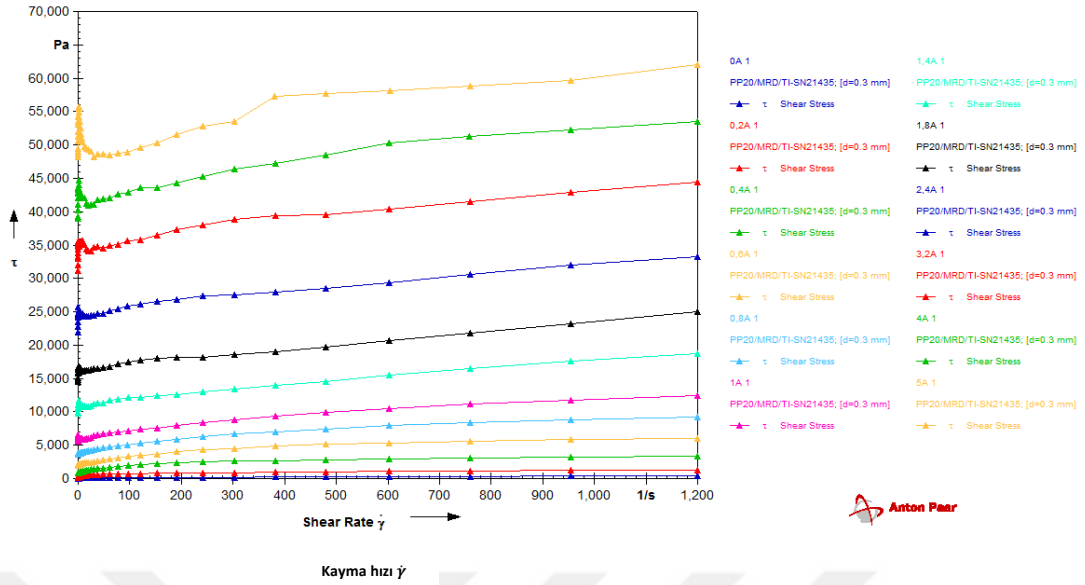
Her iki başlık ile de MR sıvı ölçümleri yapılmış ve farklı başlıklardan alınan sonuçlar değerlendirilerek kullanılacak ölçüm başlığı seçilmiştir.

#### 5.4.1. Paralel plaka başlığı ölçümleri

Paralel plaka başlık ile MRF132DG MR sıvısının 40°C'de akım taraması şeklinde gerçekleştirilen ölçümüne ilişkin sonuçlar

Şekil 5.17.'de verilmiştir. Ölçümler sınır değer olan  $1200 \text{ s}^{-1}$  kayma hızına karşılık gelen devir sayısına kadar yapılmıştır. Paralel plaka başlığının MR sıvısının akma değerlerini hassas bir şekilde ölçtüğü görülmektedir. Belirli bir akım değerinin üzerinde ise kayma hızı ile kayma gerilmesi arasındaki ilişkinin belirsiz hale gelmektedir. Bu durum, ölçüm hassasiyetinin kaybolduğu şeklinde yorumlanabilir.

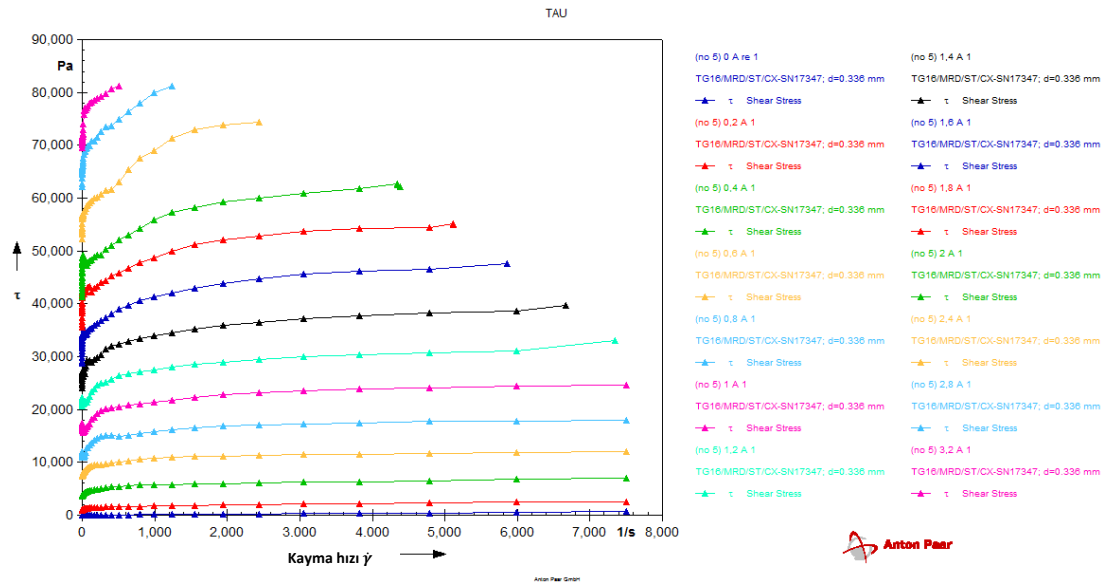




Şekil 5.17. MRF132DG MR sıvının paralel plaka başlığı kullanılarak farklı akım değerlerinde elde edilmiş kayma hızı-kayma gerilmesi sonuçları

#### 5.4.2. Çift-boşluk başlığı

Çift-boşluk başlık ile MRF132DG MR sıvısının 40°C'de farklı akımlar için gerçekleştirilen ölçümüne ilişkin sonuçlar Şekil 5.18.'de verilmiştir. Başlığın sınır değeri olan 7500 s<sup>-1</sup> kayma hızına karşılık gelen devir sayısına kadar ölçümler gerçekleştirilmiştir.

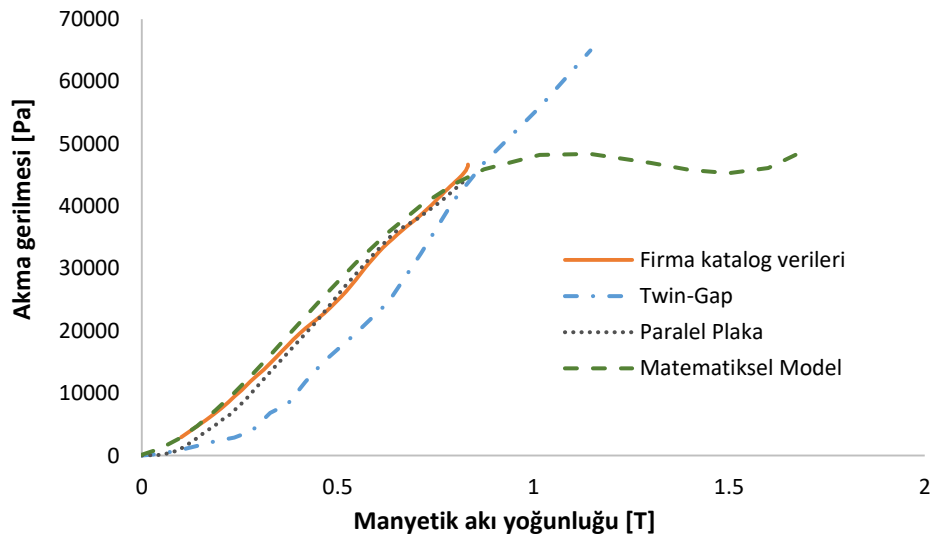


Şekil 5.18. MRF132DG MR sıvının çift-boşluk başlık kullanılarak farklı akım değerlerinde elde edilmiş kayma hızı-kayma gerilmesi sonuçları

Yüksek akım değerlerinde ölçümler ancak belirli bir kayma hızına kadar gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni ölçüm başlığı üzerine gelen momentin yüksek akımlarda, cihazın limit değeri olan 200 mNm'ye ulaşmasıdır. Çift-boşluk başlığı, akma bölgesini paralel plakalı başlık kadar hassas tahmin edememektedir. Buna karşılık, altı kat daha yüksek kayma hızlarında çalışabilmektedir. Hangi başlığa ait verilerin kullanılmasının daha avantajlı olacağını anlamak için önce ölçümler katalog verileri ile karşılaştırılmış, ardından iki başlığın verileri ile yapılan HAD analizleri kıyaslanmıştır.

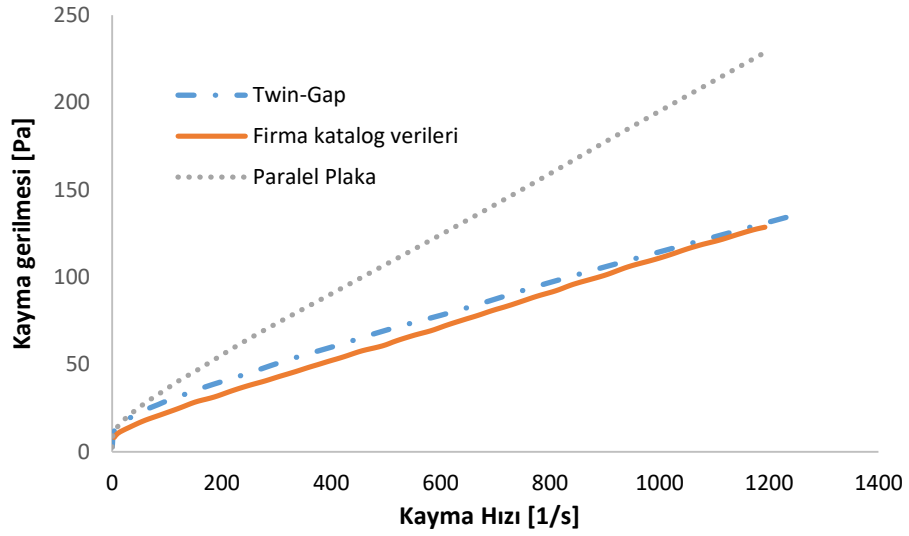
### 5.4.3. Başlıkların kıyaslanması

Yapılan ölçümlerin kıyaslanabilmesi için manyetik akı yoğunluğuna göre elde edilen akma gerilmeleri Şekil 5.19.'da verilmiştir.



Şekil 5.19. MRF132DG sıvısının farklı başlıklar ile ölçülen akma gerilmelerinin katalog verileri ve matematiksel model ile kıyaslanması

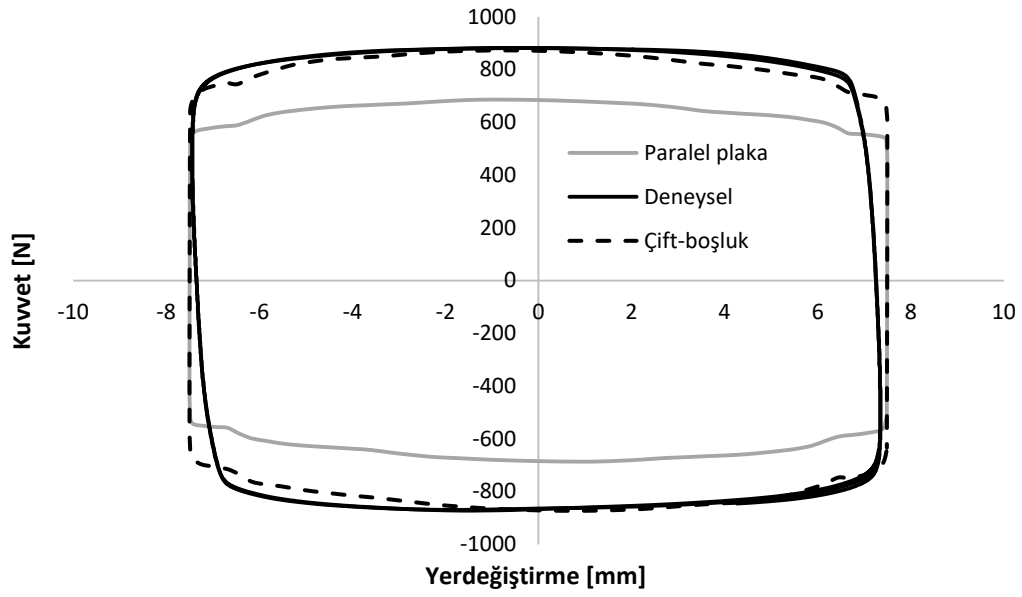
Firma katalog verileri olarak LORD firmasına ait MRF132DG kataloğundaki veriler dikkate alınmıştır [126]. Matematiksel model ise Denklem (5.3'te verilen akma gerilmesi formülüne göre hesaplanmıştır. Sonuçlara göre, çift-boşluk başlık ile elde edilen akma gerilmeleri gerçek değerlerden sapma göstermektedir. Paralel plaka başlığı ise katalog verileri ile tam uyum içerisinde.



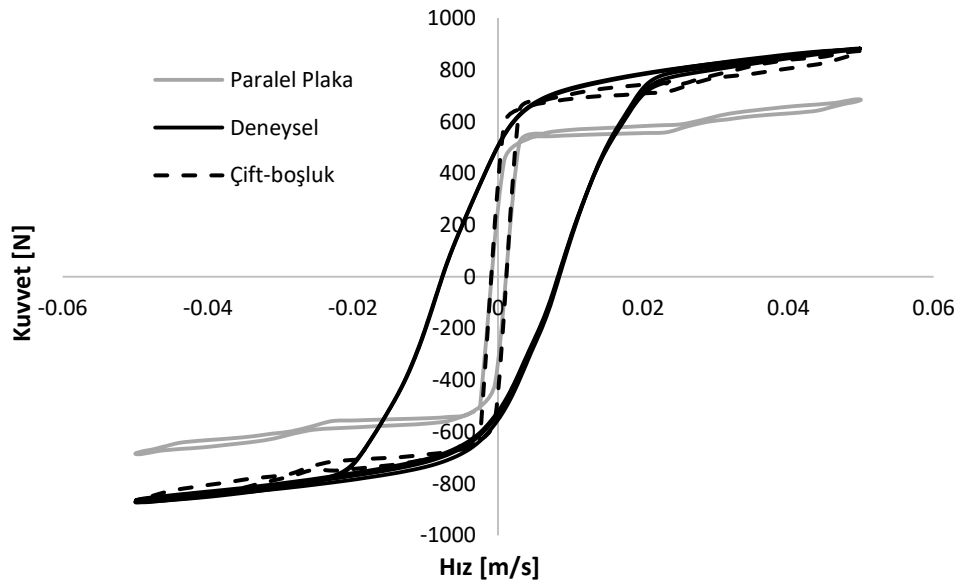
Şekil 5.20. MRF132DG sıvısının farklı başlıklar ile 0 A akım altında ölçülen kayma gerilmelerinin katalog verileri ile kıyaslanması

Şekil 5.20.'de ise MR etki olmadığı durum için kayma hızı ve kayma gerilmeleri arasındaki ilişki kıyaslanmaktadır. Bu sonuçlara göre çift-boşluk başlık ile elde edilen veriler katalog verileri ile neredeyse örtüşmektedir. Akma gerilmesinin hassas bir şekilde ölçen paralel plaka başlığı ise kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisini yakalama konusunda başarısızdır.

Bununla beraber HAD simülasyonlarında MR damperin kayma hızının  $5000 \text{ s}^{-1}$  mertebelerine çıktığı görülmektedir. Paralel plaka başlığının kayma hızı ise  $1200 \text{ s}^{-1}$ 'e kadar çıkabilmektedir. Dolayısıyla daha yüksek değerlerin simülasyona aktarılabilmesi için verilerin ekstrapolasyon ile genişletilmesi gerekir.



Şekil 5.21. Paralel plaka başlığı ve çift-boşluk başlığı ile yapılan ölçüm verilerinin kullanıldığı HAD analizlerinin kuvvet-yerdeğiştirme sonuçlarının referans MR damper deneyleri ile kıyaslanması



Şekil 5.22. Paralel plaka başlığı ve çift-boşluk başlık ile yapılan ölçüm verilerinin kullanıldığı HAD analizlerinin kuvvet-hız sonuçlarının referans MR damper deneyleri ile kıyaslanması

Şekil 5.21. ve Şekil 5.22.'de iki farklı tip başlığın daha sonra kullanılacak kayma gerilmesi yaklaşımı ile yapılan HAD analizlerine ait kuvvet-yerdeğiştirme ve kuvvet-hız sonuçları görülmektedir. Sonuçlara göre paralel plakanın deney sonuçlarını temsil etmedeki başarısızlığı açıkça görülmektedir. Bunun en temel nedeni verilerin

ekstrapolasyon ile genişletilmesinden dolayı büyük sapmaların oluşması ve başlığın kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisini tespit etmedeki yetersizliğidir. Buna karşılık çift-boşluk başlığı her ne kadar akma gerilmesi konusunda güçlü olmasa da deneysel verilere yakın sonuçları sağlayabilmektedir. Çift-boşluk başlık ile yapılan ölçümler kullanıldığında HAD analizleri ile deney verileri arasında uyumlu sonuçlar elde edildiğinden kullanılan yeni yaklaşımlarda çift-boşluk başlığa ait ölçüm değerleri dikkate alınmıştır.

### 5.5. Yeni Reolojik Yaklaşımlar

Literatürde önerilen mevcut yaklaşımları daha iyi hale getirmek için kullanılan reometre ölçümlerini dikkate alan daha gelişmiş yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlarda genel olarak Herschel-Bulkley modeli kullanılmıştır. Herschel-Bulkley modelinde viskozite aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\mu = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k\dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (5.4)$$

Denklemdaki  $\mu$  viskoziteyi,  $\tau_0$  akma gerilmesini,  $\dot{\gamma}$  kayma hızını,  $k$  uyum faktörünü ve  $n$  akış indeksini göstermektedir. Herschel-Bulkley modelinin yanı sıra herhangi bir akış modeli kullanmadan oluşturulan bazı yaklaşımlar da aşağıda incelenecektir.

#### 5.5.1. Herschel-Bulkley için eğri uydurma yaklaşımı

Herschel-Bulkley modelinin uygulanması için yapılabilecek ilk yaklaşım, modele ilişkin katsayıların eğri uydurma yöntemi ile manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak ifade edilmesidir.

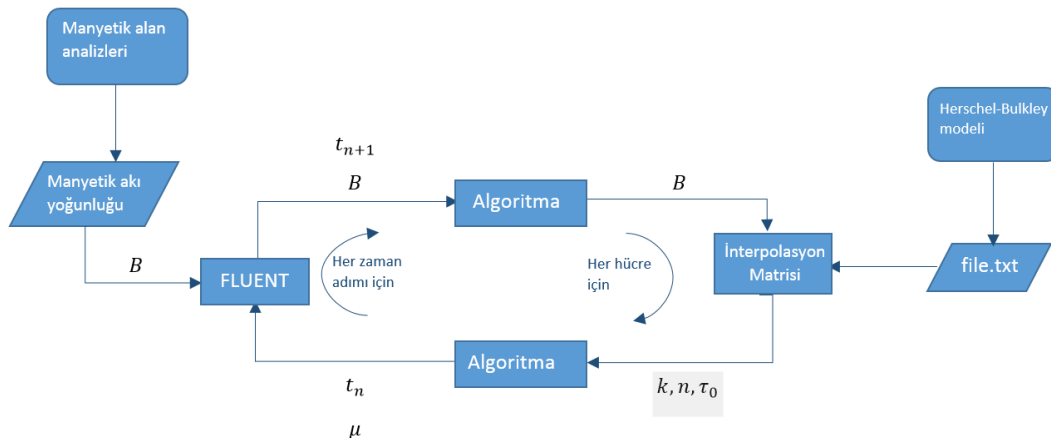
Akma gerilmesi genel olarak manyetik akı yoğunluğu ile beraber doğrusala yakın bir ilişkiye sahiptir. Bu ilişki ikinci derece bir polinom ile temsil edilebilir. Diğer değişkenler olan  $n$  ve  $k$  ise manyetik akı yoğunluğu ile beraber doğrusal olmayan bir şekilde değişmektedir. Bu ilişkilerin doğru tesis edilebilmesi için manyetik akı yoğunluğu ile  $n$  arasında bir Fourier denklemine göre eğri uydurulmuştur.  $k$  için ise

net bir ilişki bulunamadığı için  $k^n$  ile manyetik akı yoğunluğu arasında bir ilişki oluşturulmuş ve değerler tekrardan  $k$ 'ya dönüştürülmüştür.

Bu yaklaşım kullanılarak her bir hücrede hesaplanan manyetik akı yoğunluğuna göre  $k$ ,  $n$  ve  $\tau_0$  katsayıları hesaplanmakta ve bu katsayılara göre görünür viskozite değeri elde edilmektedir. Kullanılan eğri uydurma yöntemine ilişkin UDF kodu Ek.A'da detaylı olarak sunulmuştur.

### 5.5.2. Herschel-Bulkley (HB) interpolasyon yaklaşımı

HAD analizi için kullanılan regresyon yöntemine iyi bir alternatif, ara değerlerin interpolasyon ile bulunmasıdır. İnterpolasyonda ara değerler bulunurken, doğrusal yöntemler uygulanabileceği gibi ikinci ve üçüncü dereceden polinomlar da kullanılabilir. Fakat yüksek dereceli interpolasyonlar hem daha fazla veriye ihtiyaç duymakta, hem de iraksama hatalarına neden olmaktadır. Özellikle düşük akma gerilmelerinde sık aralıklar ile veri alındığı ve yüksek kayma gerilmelerinde denklemlerin nispeten doğrusal hale geldiği dikkate alınır, birinci dereceden bir interpolasyonun yeterli olacağı gözükmektedir.



Şekil 5.23. HB interpolasyon yaklaşımının akış şeması

Şekil 5.23.'te interpolasyon işlemine ait akış şeması görülmektedir. Bu şemaya göre yapılan manyetik alan analizlerinden elde edilen manyetik akı yoğunluğu haritası FLUENT'e bir "profile" dosyası olarak aktarılır. Diğer taraftan Herschel-Bulkley

katsayıları bir “.txt” dosyasında 4 sütun ve satırlardan oluşan bir matris haline getirilir. Bu matrise ait görsel Şekil 5.24.’te verilmiştir. Buna göre ilk üç sütun bağımlı değişkenler olan  $k$ ,  $n$  ve  $\tau_0$ ’ı, dördüncü sütun ise buna karşılık gelen manyetik akı yoğunluğunu ifade eder.

Bağımlı değişkenler  
( $k, n, \tau_0$ )

Bağımsız değişken ( $B$ , manyetik akı yoğunluğu)

	B	C	D	F
	yield stress (pa)	k	n	B
0	8.3947	0.5209	0.85056	0
1	47.723	11.281	0.45525	0.018
2	45.02	137.66	0.21279	0.036
3	154.21	260.12	0.20101	0.055
4	540.59	241.81	0.28806	0.075
5	860.02	355.05	0.28246	0.093
6	1,586.60	291.95	0.33346	0.112
7	2,326.60	204.43	0.42441	0.131
8	3,182.70	199.66	0.44804	0.149
9	4,093.50	139.82	0.51489	0.168
1	4,905.50	158.05	0.50668	0.188
1	5,840.80	153.76	0.51728	0.207
2	6,526.50	206.59	0.49613	0.224
4	8,840.60	179.92	0.53123	0.263
6	11,475	125.55	0.59062	0.3
8	14,036	114.55	0.61045	0.337
2	16,655	104.8	0.62827	0.375
4	21,609	152.75	0.58682	0.448
8	26,796	141.1	0.60872	0.514
2	31,674	103.03	0.66424	0.583
6	35,812	72.543	0.72041	0.645
4	37,943	30,059	0,85996	0,703

Şekil 5.24. HB interpolasyonu yaklaşımında kullanılan matris

Ara değerlerin bulunması lineer interpolasyon ile yapılmış ve kullanılan denklem, koordinat şeması ile beraber aşağıda verilmiştir:

$x_n$	$y_n$
$x$	$y$
$x_{n+1}$	$y_{n+1}$

$$x = x_n + \frac{y - y_n}{y_{n+1} - y_n} (x_{n+1} - x_n) \quad (5.5)$$

Buna göre bilinen bir manyetik akı yoğunluğu için (Denklemdaki  $y$  karşılığında) Herschel-Bulkley denklemindeki  $k$ ,  $n$  ve  $\tau_0$  (Denklemda  $x$  karşılığında) bulunabilir.

Bu işlemi yapmak için Şekil 5.23.'deki akış diyagramına göre önce dosyadaki değerler “scan” komutu ile C tabanlı kod içerisinde aktararak interpolasyon matrisi oluşturulur ve ilgili interpolasyon denklemi bu matriste uygulanarak son görünür viskozite değeri elde edilir. Her bir zaman adımı için kayma hızı değiştiğinden bu değerler her zaman adımı için yeniden hesaplanır ve bu işlem her bir hücre için ayrı olarak gerçekleştirilir. Kullanılan UDF kodu Ek.A'da paylaşılmıştır.

### 5.5.3. Viskozite interpolasyonu yaklaşımı

Bir diğer interpolasyon yöntemi ise görünür viskozitenin doğrudan reometre verilerinden alınmasıdır. Çünkü uygulanan Herschel-Bulkley modeli netice itibariyle var olan kayma hızını, ilgili manyetik akı yoğunluğuna göre görünür viskoziteye dönüştüren bir denklemdir. Böyle bir ara denklem yerine doğrudan görünür viskozite değerleri reometre verilerinden okunabilir. Bunun için reometre ölçümleri sonucunda elde edilen görünür viskozite değerleri Şekil 5.25.'te gösterildiği gibi bir matris haline getirilmiştir.

Manyetik akı yoğunluğu

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
0.00000	0.09990	0.12570	0.15810	0.19880	0.25000	0.31440	0.39530	0.49710	0.62510	0.78660	17.8000
0.00000	85.90000	71.83000	62.74000	55.62000	48.74000	41.20000	33.59000	27.11000	22.13000	17.8000	17.8000
0.01800	359.00000	300.80000	249.50000	207.60000	173.30000	144.60000	120.60000	100.60000	84.59000	70.9800	70.9800
0.03600	1323.00000	1068.00000	872.70000	709.30000	578.70000	471.90000	384.80000	315.40000	258.10000	211.4000	211.4000
0.05500	3457.00000	2772.00000	2243.00000	1810.00000	1462.00000	1182.00000	951.40000	765.90000	620.50000	500.9000	500.9000
0.07500	7156.00000	5750.00000	4652.00000	3749.00000	3012.00000	2416.00000	1930.00000	1543.00000	1233.00000	986.2000	986.2000
0.09300	11360.00000	9036.00000	7214.00000	5786.00000	4621.00000	3703.00000	2973.00000	2380.00000	1905.00000	1531.0000	1531.0000
0.11200	18020.00000	14430.00000	11500.00000	9186.00000	7332.00000	5874.00000	4705.00000	3760.00000	3014.00000	2413.0000	2413.0000
0.13100	24230.00000	19560.00000	15670.00000	12490.00000	10010.00000	8016.00000	6412.00000	5143.00000	4100.00000	3284.0000	3284.0000
0.14900	31870.00000	25580.00000	21260.00000	17150.00000	13760.00000	11010.00000	8771.00000	7001.00000	5575.00000	4433.0000	4433.0000
0.16800	39980.00000	33300.00000	27000.00000	21600.00000	17280.00000	13780.00000	11010.00000	8770.00000	6974.00000	5511.0000	5511.0000
0.18800	49160.00000	40670.00000	32770.00000	25410.00000	20040.00000	15880.00000	12660.00000	10100.00000	8087.00000	6445.0000	6445.0000
0.20700	57650.00000	46210.00000	38180.00000	30750.00000	24700.00000	19690.00000	15650.00000	11930.00000	9457.00000	7584.0000	7584.0000

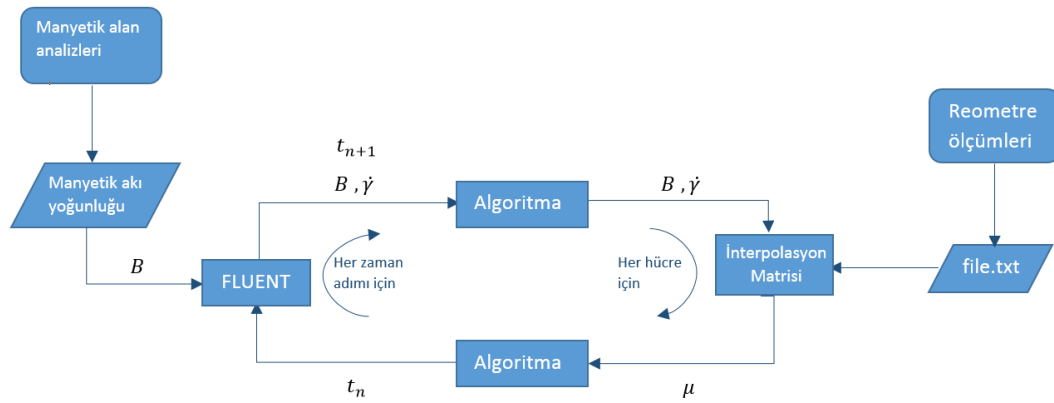
Kayma hızı

Viskozite değerleri

Şekil 5.25. Viskozite interpolasyonu için kullanılan matris

Bu matris kullanılarak, bir önceki interpolasyona benzer şekilde bir akış şeması oluşturulmuş ve Şekil 5.26.'da gösterilmiştir. Bir önceki interpolasyon yaklaşımından farklı olarak bu kez bir viskozite interpolasyonu matrisi kullanılmıştır. Dolayısıyla kayma hızı matris için bir girdi değeri haline gelmiş ve görünür viskozite, buna bağlı olarak hesaplanmıştır.





Şekil 5.26. Viskozite interpolasyonu yaklaşımının akış şeması

Bu işlemde de interpolasyon matrisi bir “.txt” dosyası yardımıyla kodun içerisine aktarılmış ve ara değerleri bulmak için aşağıdaki iki boyutlu interpolasyon denklemini kullanılmıştır:

	$x_1$	$x$	$x_2$
$y_1$	$Q_{11}$		$Q_{12}$
$y$		$P$	
$y_2$	$Q_{21}$		$Q_{22}$

$$P = \frac{(x_2 - x)(y_2 - y)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} Q_{11} + \frac{(x - x_1)(y_2 - y)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} Q_{21} + \frac{(x_2 - x)(y - y_1)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} Q_{12} + \frac{(x - x_1)(y - y_1)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} Q_{22} \quad (5.6)$$

Bu denklemdaki  $x$  değerleri kayma hızına,  $y$  değerleri ise manyetik akı yoğunluğuna karşılık gelmektedir.  $Q$  değerleri ise görünür viskoziteyi temsil etmektedir. Buna göre herhangi bir manyetik akı yoğunluğu ve kayma hızı için ara değerdeki görünür viskozite değeri kolaylıkla bulunabilir.

Viskozite değerleri çok düşük kayma hızları için çok büyük değerler aldığından dolayı viskoziteyi belirli bir üst limitte sınırlayan ifadeler kullanıcı tanımlı koda ilave edilmiştir. Çünkü çok büyük değerler sayısal çözümde iraksama hatalarını da beraberinde getirmektedir. İlgili kod Ek.A’da paylaşılmıştır.

#### 5.5.4. Kayma gerilmesi interpolasyonu yaklaşımı

Görünür viskozite değerini doğrudan bulmak yerine kayma gerilmesi üzerinden görünür viskoziteye ulaşmanın, viskozite interpolasyonu yaklaşımındaki problemlerin üstesinden gelebilmek için daha pratik bir yol olacağı düşünülmüştür. Bu sayede aşırı büyük sayısal yığılmaların da önüne geçilebilir.

Bunun için matris bu kez, görünür viskozite değerleri yerine kayma gerilmesi değerleri kullanılarak oluşturulmuş ve tüm işlemler görünür viskozite değeri yerine kayma gerilmesi değeri için gerçekleştirilmiştir. Kayma gerilmesi aşağıda verilen kısa bir işlem ile görünür viskoziteye dönüştürülebilir:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (5.7)$$

Bu yaklaşımda da çok düşük kayma hızlarında oluşan aşırı büyük görünür viskozite değerlerini engellemek adına kod içerisine eklenen kayma hızı alt limit faktörleri belirlenmiştir. Bu limit genellikle 1 düzeyinde tutulmuştur. İlgili kod Ek.A'da sunulmuştur.

#### 5.6. Yeni Yaklaşımların Kıyaslanması

Yaklaşımların kıyaslanması için elde edilen kuvvet verilerinin aşağıda verilen karekök ortalama hata (RMSE) değerleri dikkate alınmıştır:

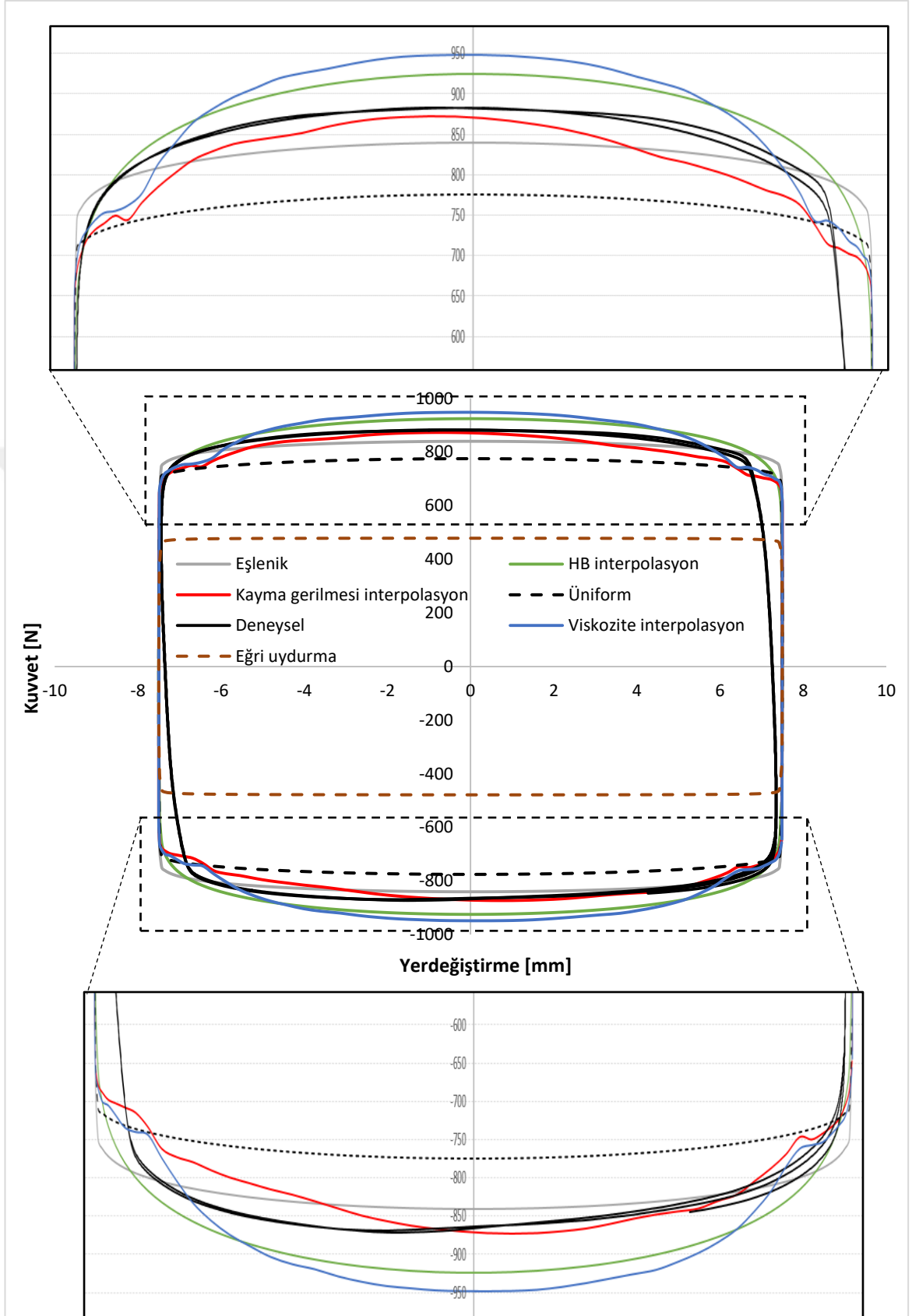
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (F_{deneyse} - F_{HAD})^2}{n}} \quad (5.8)$$

Buradaki  $n$  veri sayısını ifade etmektedir. Ayrıca histerezis bölgesinin dışında, yerdeğiştirmenin 6 mm'den büyük olduğu kısımlar ihmal edilerek ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

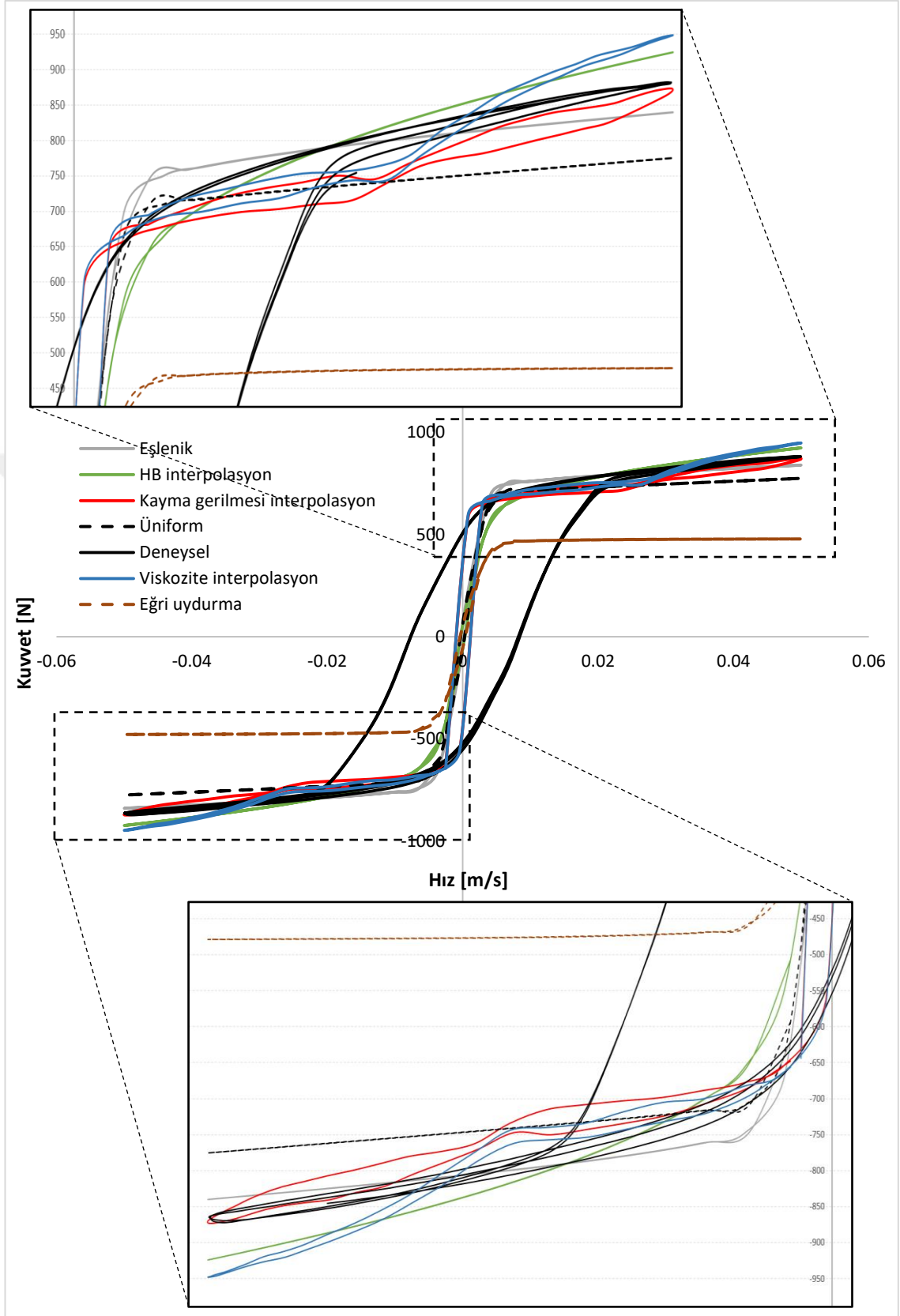
$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{F_{deneysel} - F_{HAD}}{F_{deneysel}} \right|}{n} \quad (5.9)$$

Yapılan analizler neticesinde elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme ve kuvvet-hız grafikleri Şekil 5.27. ve Şekil 5.28.'de verilmiştir. Analizlere ait hata değerleri RMSE, MAPE ve maksimum kuvvetlerdeki hatalar Tablo 5.2.'de verilmiştir.





Şekil 5.27. Önerilen yaklaşımlar ile yapılan HAD analizlerinin kuvvet-yerdeğiştirme sonuçlarının kıyaslanması



Şekil 5.28. Önerilen yaklaşımlar ile yapılan HAD analizlerinin kuvvet-hız sonuçlarının kıyaslanması

Tablo 5.2. Önerilen yaklaşımlar ile yapılan HAD analizlerinin hata değerlerinin kıyaslanması

Yaklaşım / Analitik model	Maksimum kuvvet hata [%]	Minimum kuvvet hata [%]	Ortalama maksimu m kuvvet hata [%]	Maksimum basınç düşüşü [Mpa]	RMSE	MAPE[%]
Üniform	12,15	11,12	11,64	0,996	212,19	10,40
Eşlenik	4,80	3,69	4,25	1,051	212,15	2,98
Eğri uydurma	45,76	45,12	45,44	0,562	355,72	44,04
HB interpolasyon	4,75	5,97	5,35	1,168	190,04	4,90
Viskozite interpolasyon	7,44	8,70	8,07	1,192	209,54	6,00
Kayma gerilmesi interpolasyon	1,07	0,07	0,57	1,093	203,05	2,34
Analitik dikdörtgen kanal	2,75	1,60	2,17	1,085	-	-
Analitik eksenel simetrik	2,86	1,72	2,29	1,083	-	-
Analitik dikdörtgen kanal HB	4,29	5,51	4,90	1,169	-	-

Şekil 5.27. ve Şekil 5.28. incelendiğinde en başarılı sonucun kayma gerilmesi interpolasyonu ile elde edildiği görülmektedir. Bunun ardından HB interpolasyonu ve eşlenik yaklaşım gelmektedir. Viskozite interpolasyonu yaklaşımı da bu iki yaklaşıma yakın sonuçlar vermektedir. Üniform yaklaşımın başarısı daha önce öngörüldüğü gibi eşlenik yaklaşım ve diğerlerinin gerisinde kalmaktadır. Eğri uydurma yaklaşımının ise başarısız olduğu gözükmemektedir. Tüm yaklaşımlarda, akışkan sıkıştırılamaz kabul edildiği için deneysel verilerde ortaya çıkan histerezis yapı oluşmamaktadır.

Tablo 5.2. incelendiğinde, ortalama maksimum kuvvet için en iyi sonucu kayma gerilmesi interpolasyonu yaklaşımının verdiği görülmektedir. Bunun ardından eşlenik yaklaşım ve HB interpolasyon yaklaşımı gelmektedir. Viskozite interpolasyonu ise maksimum kuvveti yaklaşık % 8 hata ile tahmin etmektedir. Şekil 5.27. ve Şekil 5.28.'deki sonuçlara benzer şekilde üniform yaklaşım ve eğri uydurma yaklaşımı başarısız görünmektedir. Analitik çözümler ise maksimum kuvveti deney verilerine yakın bir şekilde tahmin edebilmektedir. Fakat analitik çözümlerin sadece kanal kesitindeki viskoz etkilerden kaynaklanan basınç düşüşünü dikkate aldığı, dolayısıyla diğer bölgelerdeki etkileri ihmal ettiği unutulmamalıdır.

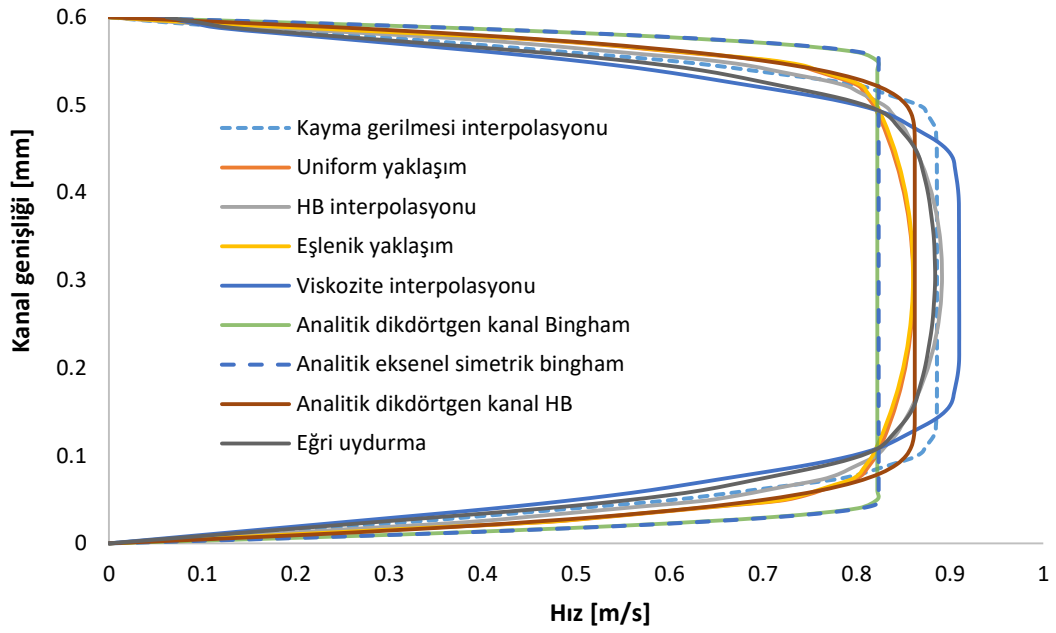
RMSE hataları göz önüne alındığına ise en iyi sonucu HB interpolasyonu yaklaşımı sağlamaktadır. Bu sonuç, HB yaklaşımının tüm çevrim boyunca sağladığı başarıyı

göstermektedir. Kayma gerilmesi interpolasyonu da tüm çevrim boyunca olan veriler dikkate alındığında en başarılı yaklaşımlar arasındadır. Bunun ardından viskozite interpolasyonu yaklaşımı gelmektedir. Eşlenik yaklaşım ise RMSE sonuçlarına göre üniform yaklaşım kadar başarısız görünmektedir. Eğri uydurma yaklaşımı ise yine en son sırada gelmektedir.

MAPE sonuçlarına bakıldığında en başarılı yaklaşım, kayma gerilmesi interpolasyonu yaklaşımıdır. Bunun ardından eşlenik model gelmektedir. Diğer modeller ise ortalama maksimum kuvvetteki hata sıralamasında benzer şekilde devam etmektedir.

Eşlenik model bazen HB interpolasyonu yaklaşımı ve viskozite interpolasyonu yaklaşımından daha başarılı gözükse de, bu model dördüncü dereceden bir polinom ile oluşturulmuştur ve bu yaklaşımın uygulanması için ilgili polinomun doğru bir şekilde tahmin edilmesine ihtiyaç vardır. Diğer iki yaklaşım ise doğrudan reometre verilerini kullanabilmektedir.

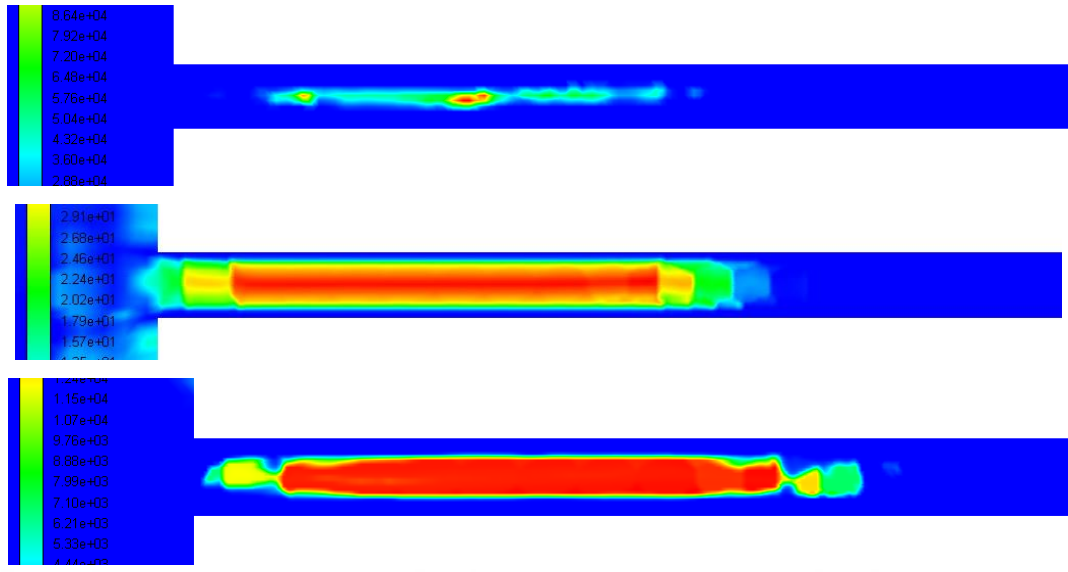
Tüm sonuçlar dikkate alındığında en başarılı yaklaşımın açık bir şekilde kayma gerilmesi interpolasyonu yaklaşımı olduğu görülmektedir. Bunun ardından ise HB interpolasyonu ve viskozite interpolasyonu alternatif olarak önerilebilecek yaklaşımlar arasında sayılabilir.



Şekil 5.29. 1 A akım altında maksimum hız durumunda farklı HAD yaklaşımları ve analitik çözümlerden elde edilen akış profillerinin kıyaslanması

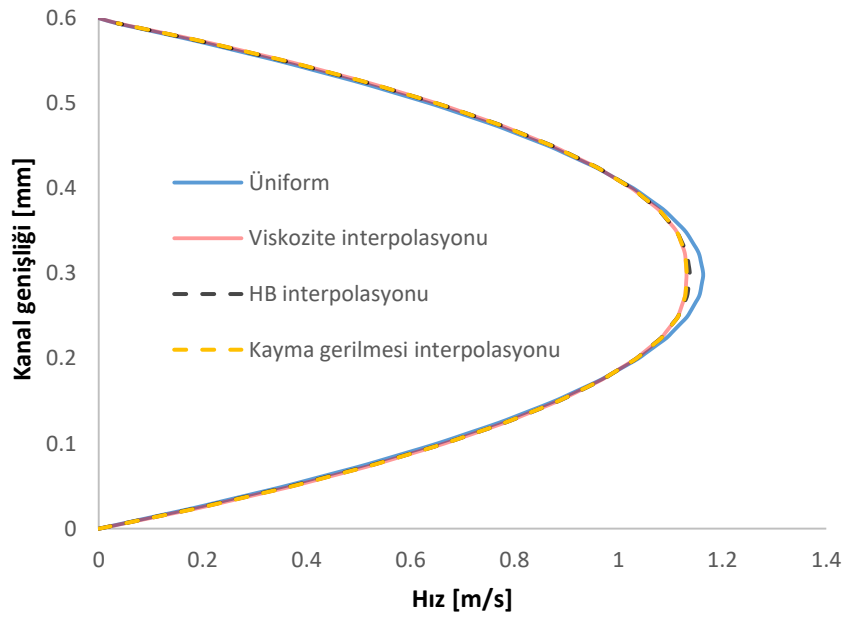
Şekil 5.29.'da tüm yaklaşımların kanal kesitindeki maksimum hız anındaki akış profilleri analitik çözümdeki akış profilleri ile karşılaştırılmıştır. Analitik HB modeli için, 1 A akıma karşılık gelen manyetik akı yoğunluğundaki katsayılar interpolasyon yapılarak  $k = 7,8$ ,  $n = 0,3$ , ve  $\tau_0 = 16885,54$  Pa şeklinde bulunmuştur. Şekil 5.29.'daki akış profilleri incelendiğinde tüm yaklaşımların Bingham modeline göre daha küçük bir çekirdek bölgeye sahip olduğu görülmektedir. Tüm yaklaşımlar çekirdek bölgenin gerçek fiziksel yapısını uyumlu bir şekilde, daha yumuşak geçişlerle ortaya koymaktadır. Bu yaklaşımlar arasında en küçük çekirdek bölgeyi viskozite interpolasyonu yaklaşımı göstermektedir. Deneysel veriler ile en uyumlu olan kayma gerilmesi interpolasyonu yaklaşımında ise çekirdek bölgesi diğer HAD yaklaşımlarına göre daha küttür. Fakat çekirdek kalınlığı, analitik modellerden daha küçüktür. Akış profili deneysel olarak elde edilmediği için deney sonuçları ile en uyumlu olan kayma gerilmesi yaklaşımı, gerçekte oluşan profil hakkında fikir edinilmesini sağlamaktadır.





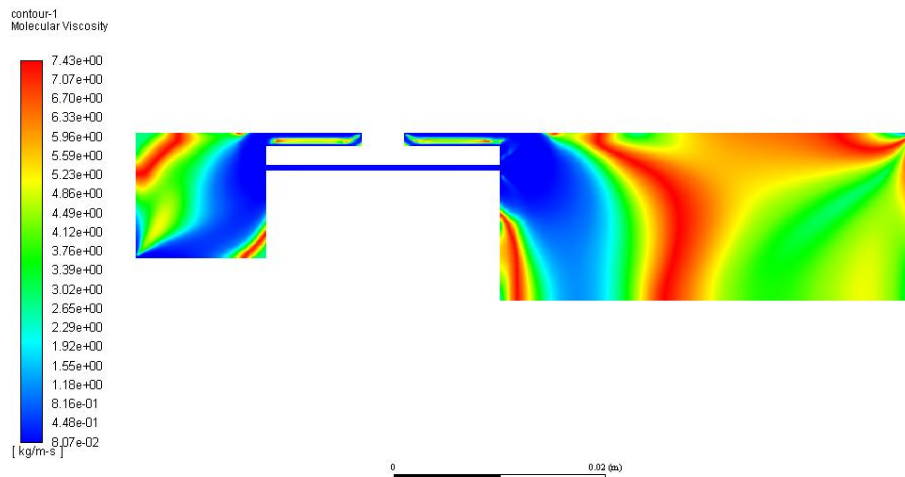
Şekil 5.30. 1 A akım altında maksimum hız durumunda aktif bölgedeki viskozite konturları, yukarıdan aşağıya doğru viskozite interpolasyonu, HB interpolasyonu ve kayma gerilmesi interpolasyonu yaklaşımı

Şekil 5.30.'da 1 A akım altında ve maksimum hız durumunda yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla viskozite interpolasyonu, HB interpolasyonu ve kayma gerilmesi interpolasyonu yaklaşımları için aktif bölgedeki viskozite konturları gösterilmiştir. Her üç konturda da aktif bölgedeki çekirdek akışının gelişimi ve tam gelişmiş hali net olarak görülmektedir. Kayma gerilmesi interpolasyonunda, elde edilen akış profiline uygun olarak çekirdek bölgesi ile dış bölge, belirgin bir viskozite farkıyla ayrılmaktadır. Bu ayrılma bölgesi, HB interpolasyonunda biraz daha az belirgin iken viskozite interpolasyonunda tamamen belirsiz hale gelmektedir.



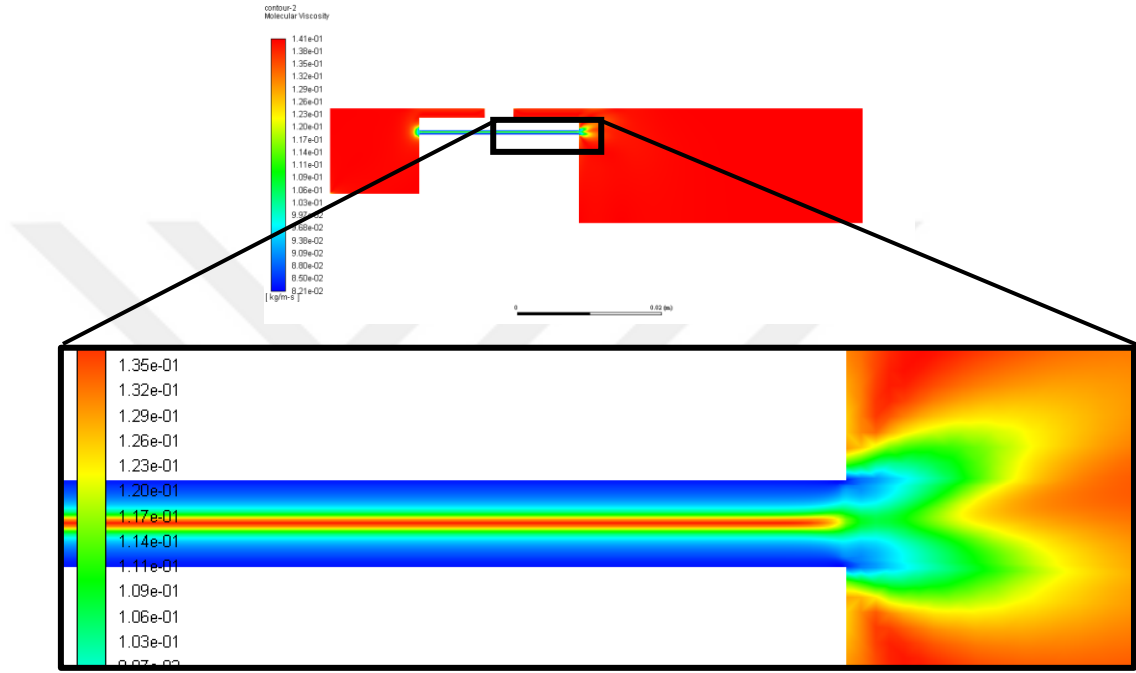
Şekil 5.31. 0 A akım altında maksimum hız durumunda HAD yaklaşımları ile elde edilen akış profilleri

Şekil 5.31.'de 0 A akım altında maksimum hız anındaki akış profilleri verilmiştir. Şekildeki üniform yaklaşım sonucu elde edilen profil, bilinen parabolik laminer akış profili ile aynıdır. Bu nedenle analitik profillerin ayrıca yeniden verilmesine ihtiyaç duyulmamıştır. Kullanılan HAD yaklaşımlarının, 0 A akım altında bile laminer parabolik profilden ayrılarak akışkanın Newton tipi olmayan özelliklerini temsil ettiği görülmektedir. 0 A akım, için verilen her üç HAD yaklaşımı da yaklaşık olarak aynı profili netice vermektedir.



Şekil 5.32. 0 A akım altında maksimum hız durumunda kayma gerilmesi interpolasyonu yaklaşımı için görünür viskozite konturları.

Şekil 5.32.'de en başarılı sonucu veren kayma gerilmesi interpolasyonu yaklaşımının akım olmadığı durumdaki viskozite konturları verilmiştir. Bu durumda en yüksek viskozite, akışkanın durgun olduğu bölgelerde oluşmalıdır. HAD sonuçlarında da bu öngörüye uygun olarak akışkanın geçtiği kanal kesiti ve akışın devam ettiği bölgelerde akışkanın viskozitesi azalmakta; buna karşılık durgun bölgelerde akışkanın viskozitesi artmaktadır.



Şekil 5.33. 0 A akım altında maksimum hız durumunda HB interpolasyonu yaklaşımı için görünür viskozite konturları

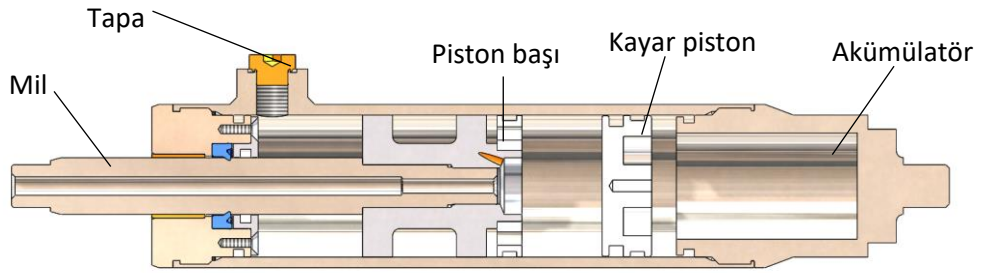
Buna benzer olarak HB interpolasyonu yaklaşımının 0 A akım altında maksimum hız anındaki viskozite konturlarının verildiği Şekil 5.33. incelendiğinde de kanal bölgesinde akışkanın hızla aktığı bölgedeki viskozite düşüşü bariz bir şekilde görülmektedir.

Tüm bu sonuçlar ışığında, kayma gerilmesi interpolasyonu yaklaşımının en başarılı yaklaşım olduğu açıkça gözükmemektedir. Bu nedenle ilerleyen bölümlerde, üretilecek yeni MR damper için yapılacak HAD analizlerinde bu yaklaşım kullanılacaktır.

## BÖLÜM 6. UYGULAMA İÇİN YENİ BİR MR DAMPERİN PARAMETRİK TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Literatür incelendiğinde sismik titreşimlerin sönümlenmesine yönelik uygulamalarda genellikle çift milli MR damperlerin kullanıldığı görülürken, tek milli MR damperlerin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur [15]. Tez kapsamında üretilen bina modellerinin sismik titreşimler karşısında ihtiyaç duyduğu sönüm kuvveti, tasarlanan MR damperin akümülatör kuvvetinden çok daha büyük olduğundan çalışmada tek milli MR damper kullanılmıştır.

MR damperin parametrik modelinin oluşturulması için MR damperin strok ve kuvvet değerleri uygulanacak bina modeline uygun olarak seçilmiştir. Var olan ticari MR damper modelleri de incelenerek öncelikle bir MR damper geometrisi oluşturulmuştur. Tasarlanan MR dampere ait kesit görünüşü Şekil 6.1.'de verilmiştir.

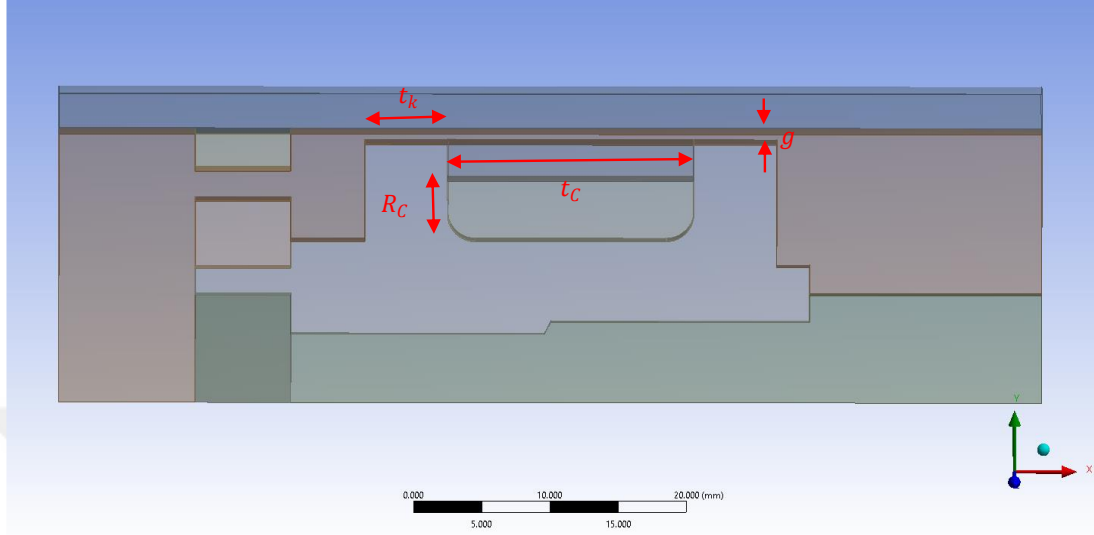


Şekil 6.1. Tasarlanan MR damperin kesit görünüşü

### 6.1. MR Damperin Parametrik Modelinin Oluşturulması

Parametrik olarak tasarlanan MR damperin görünümü Şekil 6.2.'de sunulmuştur. Tek milli MR damper için iki adet parametre seçilmiştir. Bunlar aktif uzunluk ve kanal genişliğidir. Analizler, makaranın toplam uzunluğu sabit tutularak 1 A akım altında

gerçekleştirilmiştir. MR dampere ait sabit ve değişken parametreler Tablo 6.1. ve Tablo 6.2.'de verilmiştir.



Şekil 6.2. MR damperin geometrik parametreleri

Tablo 6.1. Sabit tutulan parametreler

Parametre	Değer
Bobin genişliği ( $R_C$ )	4,5 mm
Bobin uzunluğu ( $t_c$ )	18 mm
Tel çapı ( $D_w$ )	0,5 mm
Akım ( $I$ )	1 A
Sarım sayısı ( $N_C$ )	200
Kaynak iletken alanı	$3,927 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

Tablo 6.2. Değişken tutulan parametreler

Parametre	Aralık
Aktif bölge uzunluğu ( $t_k$ )	5 – 8,5 mm
Kanal genişliği ( $g$ )	0,5 – 1,2 mm

## 6.2. MR Damper Geometrisinin Optimizasyonu

Optimizasyon çalışması, ANSYS Response Surface Optimization aracı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda önce bir cevap yüzeyi (response surface) oluşturulmuş ve bu cevap yüzeyi kullanılarak istenen optimum değeri sağlayan aday noktalar tespit edilmiştir. Cevap yüzeyi oluşturulurken tasarım noktaları (design

points) Merkezi Bileşik Tasarım (Central Composite Design) kullanılarak belirlenmiş ve tasarım noktaları yüzey merkezli (Face-Centered) olarak sık aralıklar (enhanced) ile oluşturulmuştur. Toplamda 17 adet tasarım noktası belirlenmiş ve cevap yüzeyi oluşturmak için ikinci mertebe polinomlar kullanılmıştır. Sismik uygulamalarda yapının serbest halde kaldığı durumda MR damper kuvvetini en aza düşürmek istenilen bir özelliktir. Bu özellik MR damperin akım altındaki kuvveti ile akımın olmadığı durumdaki kuvvetinin oranını ( $F/F_{\mu}$ ) veren dinamik oran ile ifade edilir. Bu nedenle daha bir yüksek dinamik oran elde edebilmek için düşük viskoziteli MRF122EG sıvısı kullanılmıştır. Ayrıca ilgili HAD analizlerinin gerçekleştirilmesi için MRF132EG sıvısının çift-boşluk başlık ile reometre ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapının ihtiyaç duyduğu maksimum kuvvet, sürtünme kuvvetlerinin 50 N olduğu tahmin edilerek 700 N olarak belirlenmiş ve bu kuvveti elde edebilecek maksimum dinamik orana sahip geometri elde edilmeye çalışılmıştır. İkinci bir optimizasyon çalışmasında da aynı hedefler 500 N kuvvetli MR damper için sağlanmıştır. Optimizasyonda elde edilen sonuçlar matematiksel algoritma ile tespit edildiği için yeniden yapılan HAD analizleri ile bu değerler doğrulanmıştır ve sonuçlar Tablo 6.3.'te verilmiştir.

Tablo 6.3. Optimizasyon sonuçlarının, sayısal analiz sonuçları ile doğrulanması

Parametreler	Aday nokta (700 N)		Aday Nokta (500 N)	
	Optimizasyon	Analiz	Optimizasyon	Analiz
Aktif uzunluk ( $t_k$ )	6,087 mm	6,087 mm	6,9163 mm	6,9163 mm
Boşluk (g)	0,797 mm	0,797 mm	1,037 mm	1,037 mm
Manyetik akı yoğunluğu (B)	0,57991 T	0,57178 T	0,51912 T	0,52737 T
Manyetik akı altında kuvvet (F)	704,58 N	706,96 N	503,63 N	498,78 N
Sıfır akım kuvveti ( $F_{\mu}$ )	61,3 N	61,81 N	57,43 N	57,43 N
Dinamik oran ( $F/F_{\mu}$ )	11,494	11,438	8,769	8,685

Analizler sonucunda oluşturulan cevap yüzeyinin sık tasarım noktalı yapısından dolayı elde edilen sonucun yeniden yapılan HAD analizi sonuçları ile oldukça yakın olduğu görülmektedir.

### 6.3. MR Damperin Üretilmesi

MR damperin üretilmesi için gerekli olan birçok parça silindirik yani ekstenel simetriye sahip olduğu için torna tezgahında imal edilmiştir. İmalat esnasında parçaların yüzey

toleranslarına dikkat edilmiştir. Piston kafası düşük karbonlu çelik (St37/2), dış silindir ise H8 toleranslı honlu borudan (St52) imal edilmiştir. Manyetik akının geçmesinin istenmediği iki aktif bölgenin arasında kalan bölgede epoksi kullanılmış, kayar pistonda ise alüminyum kullanılmıştır.



Şekil 6.3. Üretilen MR damper

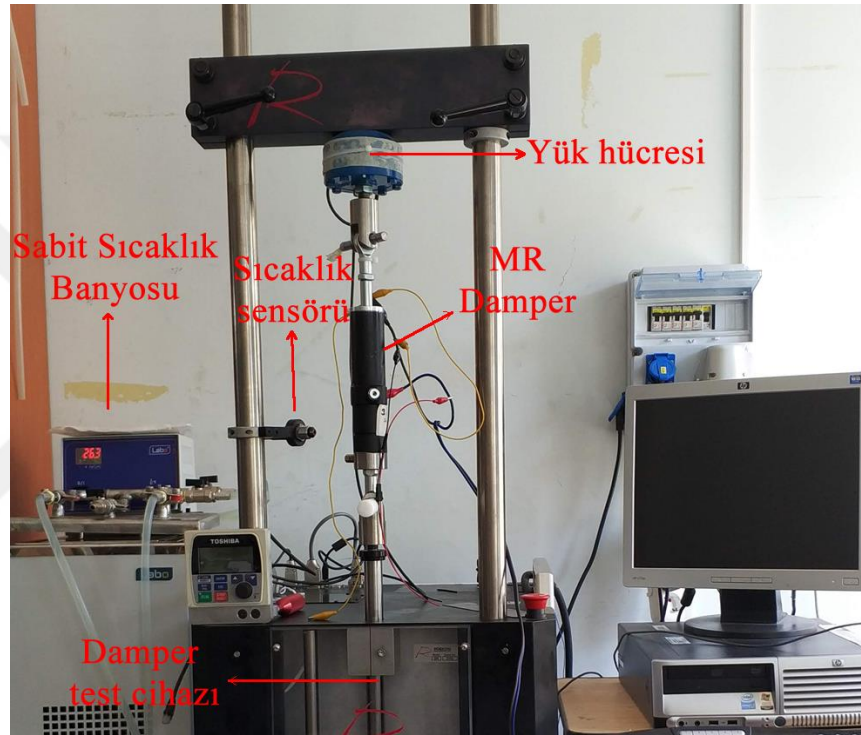
Bobin sarma makinesi yardımıyla piston başının içindeki makara yuvasına 200 tur bobin sarılmış ve üzerinde kalan boşluk epoksi ile doldurularak kurumasını müteakiben tıraşlanmıştır. Poliüretan malzemeden üretilen boğaz keçeleri kullanılmış ve böylece oldukça düşük sürtünme kuvvetleri elde edilmiştir. Üretilen MR damper Şekil 6.3.'te gösterilmiştir. Piston başının köşe kısımlarındaki sivrilikleri azaltmak için 2 mm'lik pahlar kırılmıştır.

MR sıvı dolumu yapılmadan önce 15 dakika karıştırılmış ve 15 dakika dinlenmeye bırakılmıştır. MR damper çalıştırılmadan önce akümülatör kısmı 15 Bar basınçta azot gazı ile doldurulmuştur.

#### 6.4. Test Düzeneği

MR damperin performans testlerini gerçekleştirmek için oluşturulan deney düzeneği Şekil 6.4.'te gösterilmiştir. Deneyde, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Uygulamalı Akışkanlar Mekaniği laboratuvarındaki Roehrig MK-2150 test cihazı kullanılmıştır. Verilerin toplanması SHOCK 6.3 yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve dijital kontrollü GWinstek PPE 3223 markalı DC güç kaynağı ile akım beslemesi yapılmıştır. MR damperin sıcaklığını sabit tutmak amacıyla bir sıcak su banyosu kullanılmış ve

temassız sıcaklık ölçer içe sıcaklık kontrol altında tutulmuştur. 22 kN kapasiteli yük hücresi ile kuvvet ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yer değişiminin ölçülmesi için LVDT sensörler kullanılmıştır. Dört farklı hız ve dört farklı sıcaklık değeri için testler yapılmıştır. Bu testler 13 farklı akım değeri için tekrarlanmış ve toplamda 208 adet test yapılmıştır. Testlere ilişkin değerler Tablo 6.4.'te verilmiştir. Testler sonucunda keçelerden kaynaklanan sürtünme kuvveti 53 N olarak bulunmuştur. Akümülatörün olduğu taraftaki gaz kuvveti ise 60 N olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.4. MR damper performans test düzeneği

Tablo 6.4. MR damper performans deney tasarımı

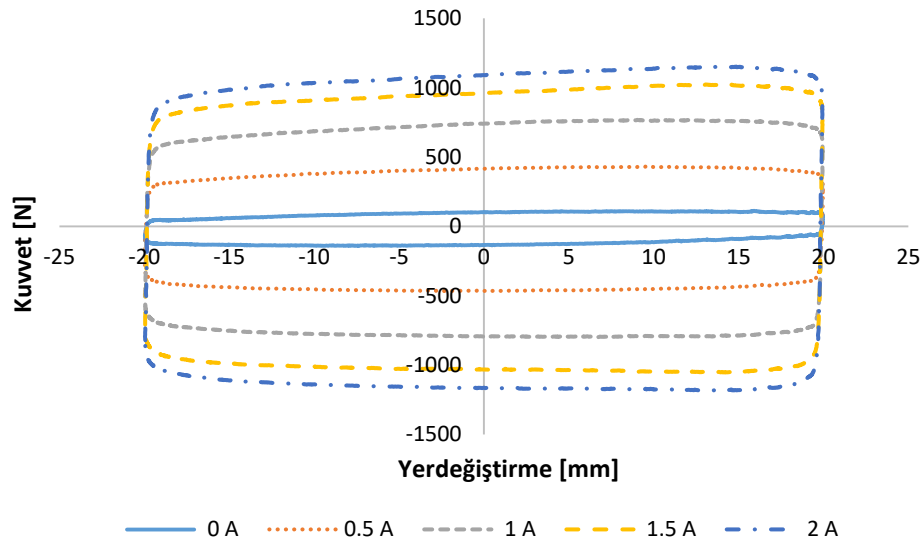
Parametre	Değerler
Hız [m/s]	0,05-0,1-0,15-0,2
Sıcaklık [°C]	10-25-40-55
Akım [A]	0-0,1-0,2-0,3-0,4-0,5-0,6-0,7-0,8-0,9-1-1,5-2

## 6.5. Test Sonuçları

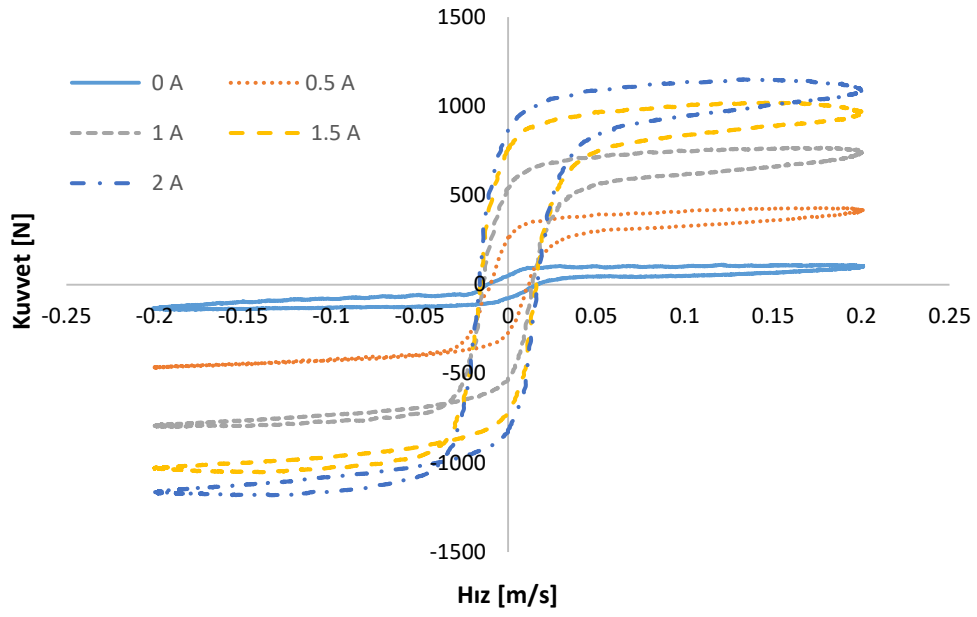
Üretilen MR damperin farklı akımlar altında 40°C'de ve 20 mm strok ve 0,2 m/s hız altında testleri Şekil 6.5. ve Şekil 6.6.'da gösterilmiştir. Elde edilecek veriler ilerleyen



bölümlerde MR damperin yapay sinir ağları ile eğitiminde kullanılacağından dolayı daha geniş bir bölgede veri elde etmek için testler, HAD analizlerinden daha yüksek hızlarda gerçekleştirilmiştir. Bu performans testlerine göre 2 A akım altında MR damperden elde edilen maksimum kuvvet 1182 N olarak ölçülmüştür. Tablo 6.5.'te MR damperin 0 A'den 2 A akıma kadar her bir 0.5 A artış seviyesi için elde edilen kuvvetlerdeki artış verilmiştir. 2 A için, sıvının manyetik olarak doyuma ulaştığı açık bir şekilde görülmektedir. Bu nedenle kontrol uygulamalarında 2 A değerinin üzerine çıkılmasına gerek görülmemiştir. Ayrıca bu test verileri, ticari bir ürün olan LORD RD-8041-1 MR damperi ile kıyaslanmıştır.



Şekil 6.5. Üretilen MR damperin farklı akımlar altında kuvvet-yerdeğiştirme grafiği



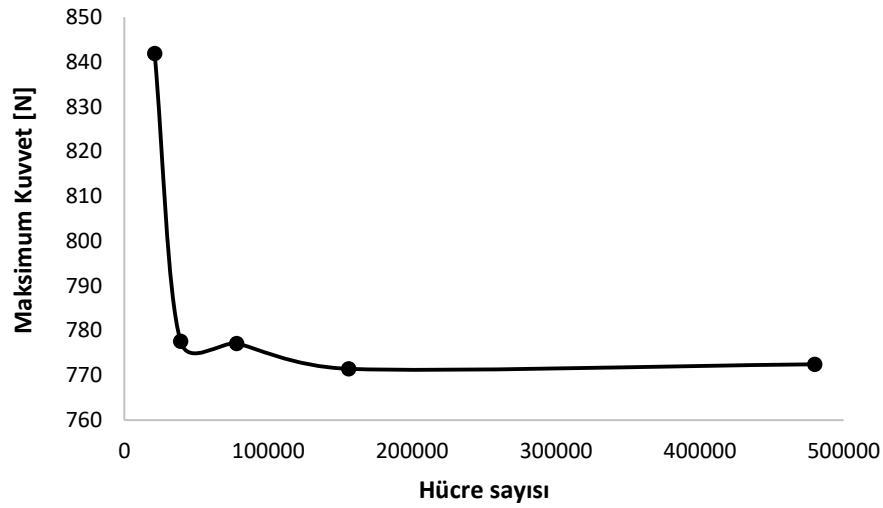
Şekil 6.6. Üretilen MR damperin farklı akımlar altında kuvvet-hız grafiği

Tablo 6.5. MR damperin her bir 0.5 A akım artırımına karşılık kuvvet artış oranları

Akım	Üretilen MR damper	LORD RD-8041-1
0,5 A	401,7%	272,4%
1 A	80,6%	75,0%
1,5 A	31,1%	31,7%
2 A	13,3%	12,2%

## 6.6. Sayısal Modelin Doğrulanması

Sayısal modelin doğrulanması için üretilen MR dampere ilişkin HAD analizi farklı çözüm ağı yoğunluklarında tekrar edilerek ağ bağımsızlığı elde edilmiştir. Şekil 6.7.'de ağ bağımsızlığına ilişkin sonuçlar sunulmuştur.



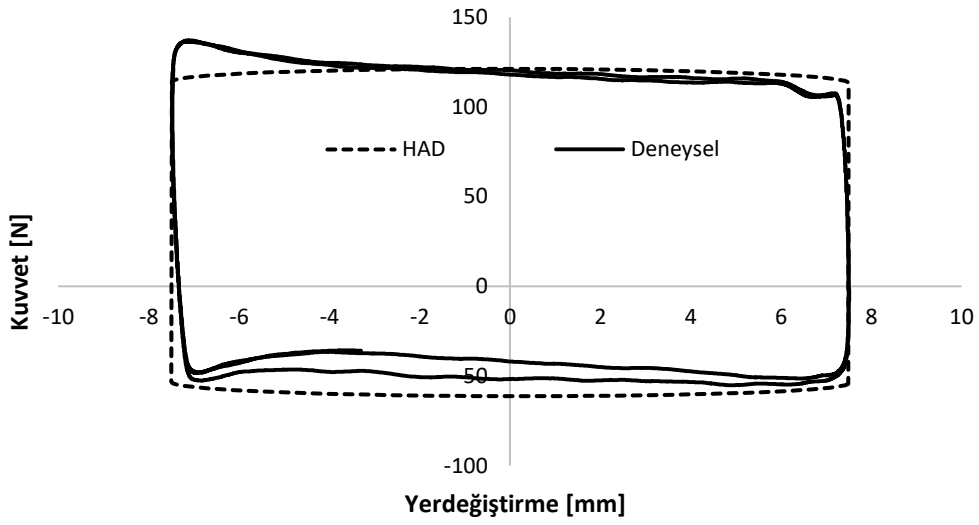
Şekil 6.7. Üretilen MR damperin ağ bağımsızlığının elde edilmesi

Buna göre 156.297 adet hücre ve 160.224 adet düğüme sahip bir çözüm ağı için ağ bağımsızlığı elde edilmektedir. Bu çözüm ağında, kanal bölgesinde 40 adet 0,015 mm hücre ve dış bölgede 0,2 mm genişliğe sahip hücreler kullanılmıştır. Optimizasyon için kullanılan 1 A akıma ait HAD analizlerinin sonuçları deneysel sonuçlar ile beraber Tablo 6.6.'da verilmiştir.

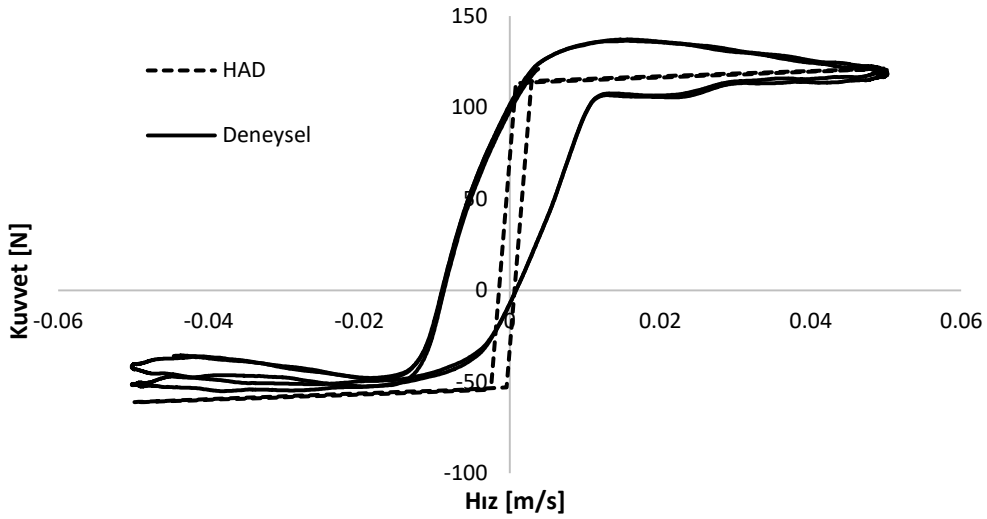
Tablo 6.6. Üretilen MR damperin 1 A akım altında deneysel ve sayısal sonuçlarının kıyaslanması

Parametre	HAD	Deneysel
Aktif uzunluk ( $t_k$ )	6 mm	6 mm
Boşluk (g)	0,8 mm	0,8 mm
Maksimum manyetik akı yoğunluğu ( $B$ )	0,54523 T	-
Maksimum kuvvet ( $F$ )	711,450 N	652,59 N
Sıfır akım kuvveti ( $F_\mu$ )	61,218 N	55,19 N
Dinamik oran ( $F/F_\mu$ )	11,621	11,824

Bu sonuçlara göre HAD ile elde edilen maksimum kuvvette belirli miktarda sapma olmasına rağmen dinamik oran yakın bir şekilde tahmin edilmiştir. Optimizasyon çalışmasında dinamik oranın önemi hatırlanırsa, optimizasyonun başarılı olduğu söylenebilir.

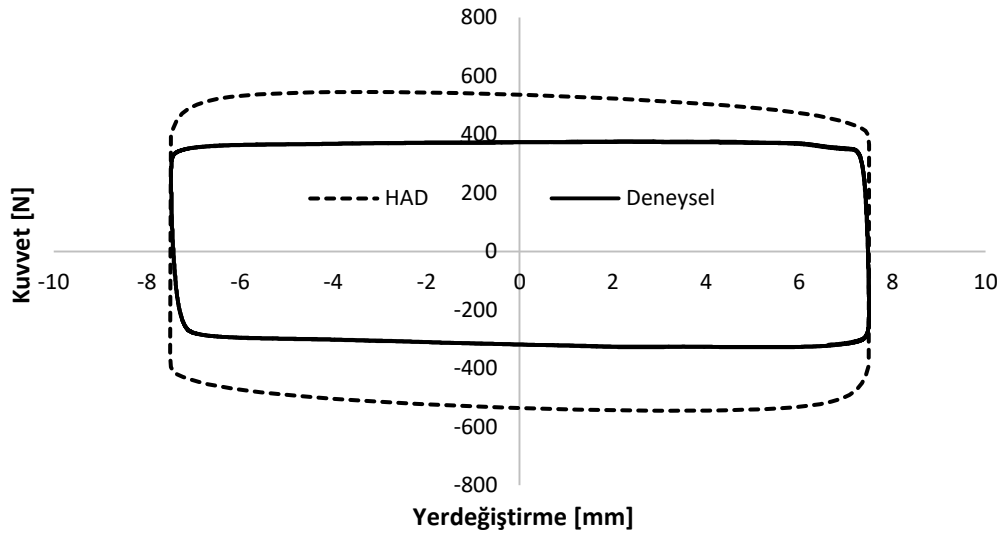


Şekil 6.8. 0 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-yerdeğiştirme grafiği

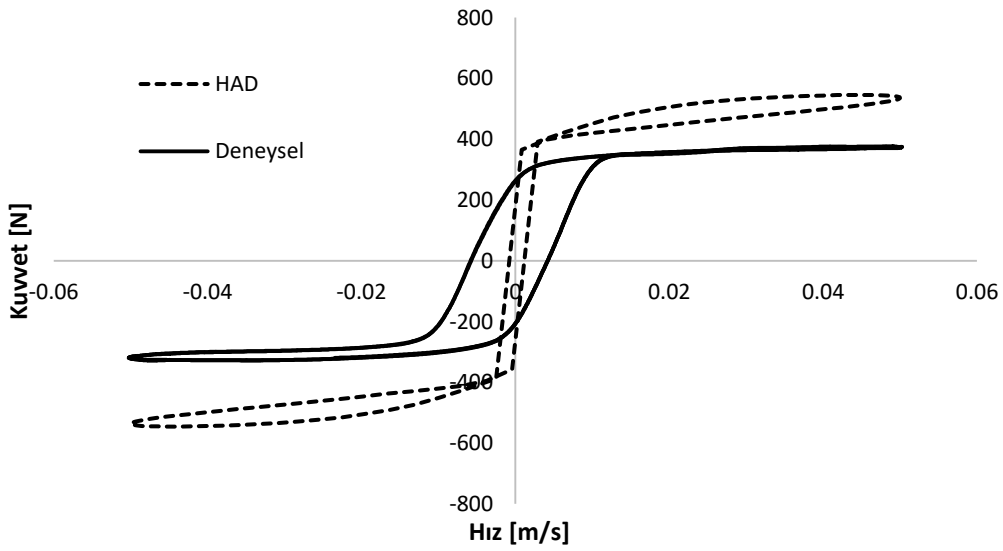


Şekil 6.9. 0 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-hız grafiği

Şekil 6.8. ve Şekil 6.9. incelendiğinde akımın olmadığı durumda MR damper hareketinin HAD analizi ile başarılı bir şekilde deneysel verilerle uyum sağladığı görülmektedir. Bunun en önemli sebebi, akımın olmadığı durumda gaz kuvveti ve sürtünme kuvvetinin baskın olması ve bu değerlerin HAD sonuçlarına ilave edilerek hesaplanmasıdır.

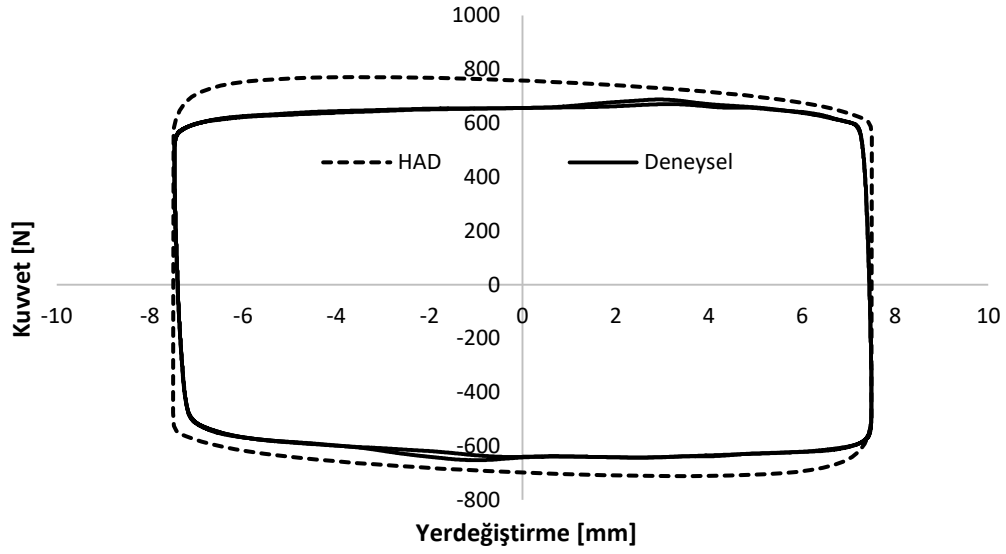


Şekil 6.10. 0,5 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-yerdeğiştirme grafiği

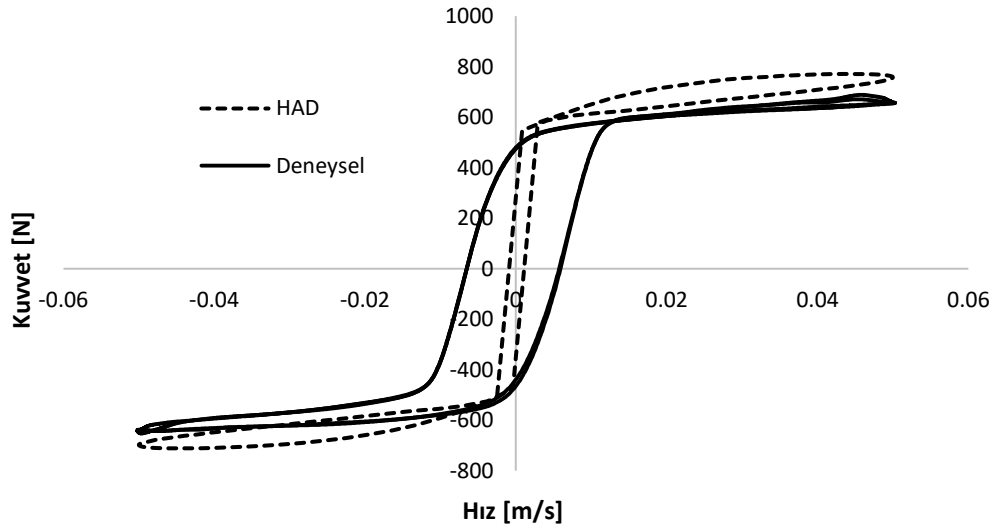


Şekil 6.11. 0,5 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-hız grafiği

Şekil 6.10. ve Şekil 6.11. incelendiğinde 0.5 A akım altında sonuçlarda ciddi bir sapma gözlenmektedir. Bu durum düşük manyetik akı yoğunlukları için HAD modelinin başarısının düştüğünü göstermektedir.

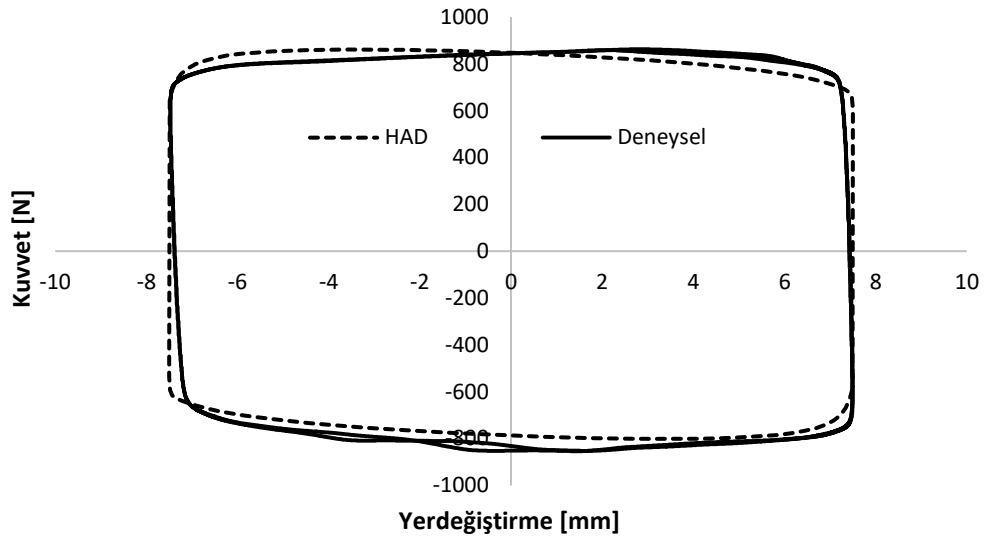


Şekil 6.12. 1 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-yerdeğiştirme grafiği

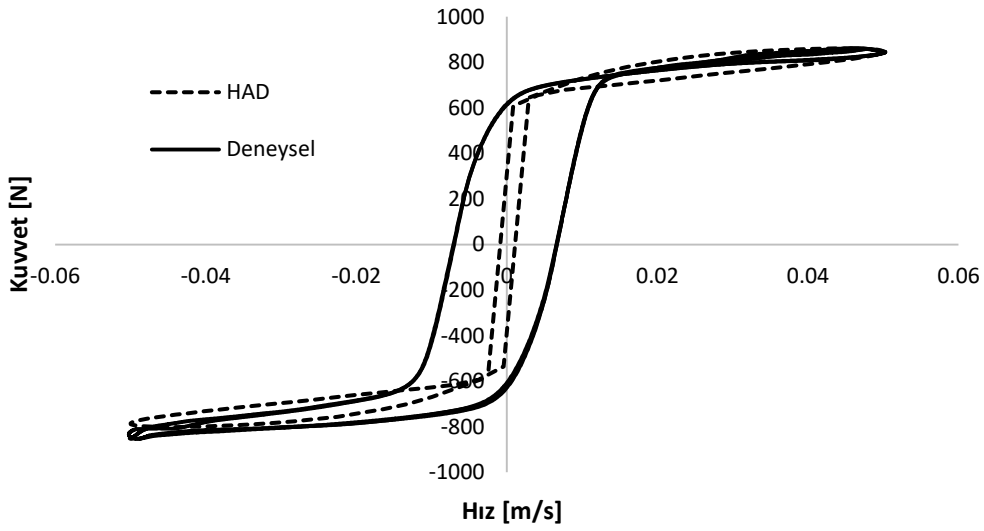


Şekil 6.13. 1 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-hız grafiği

Şekil 6.12. ve Şekil 6.13.'te ise 1 A akım altında HAD sonuçlarının deneysel veriler ile büyük ölçüde uyduğu görülmektedir. Optimizasyon çalışmasının 1 A akım değerlerine göre yapıldığı hatırlanırsa, analizin MR damperin tasarımı için başarılı bir sonuç verdiği söylenebilir.

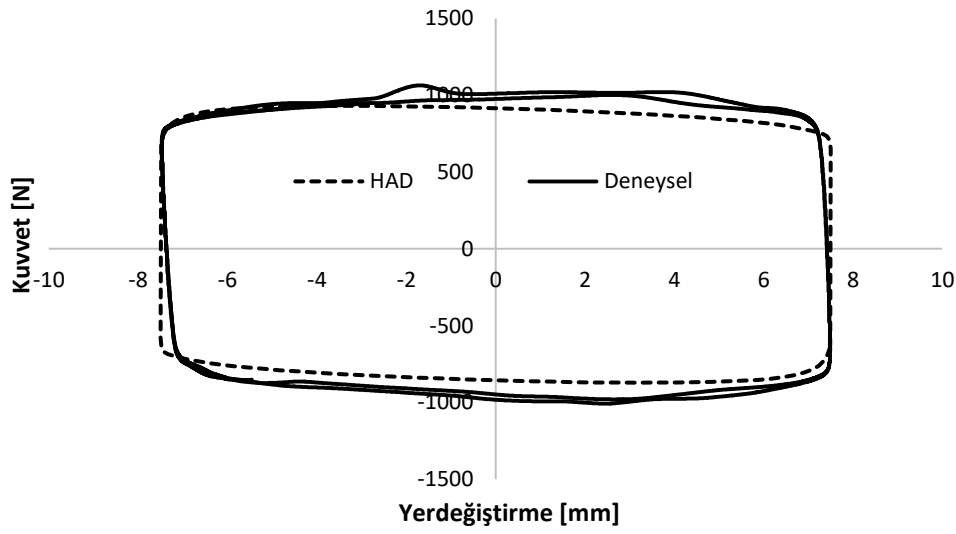


Şekil 6.14. 1,5 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-yerdeğiştirme grafiği

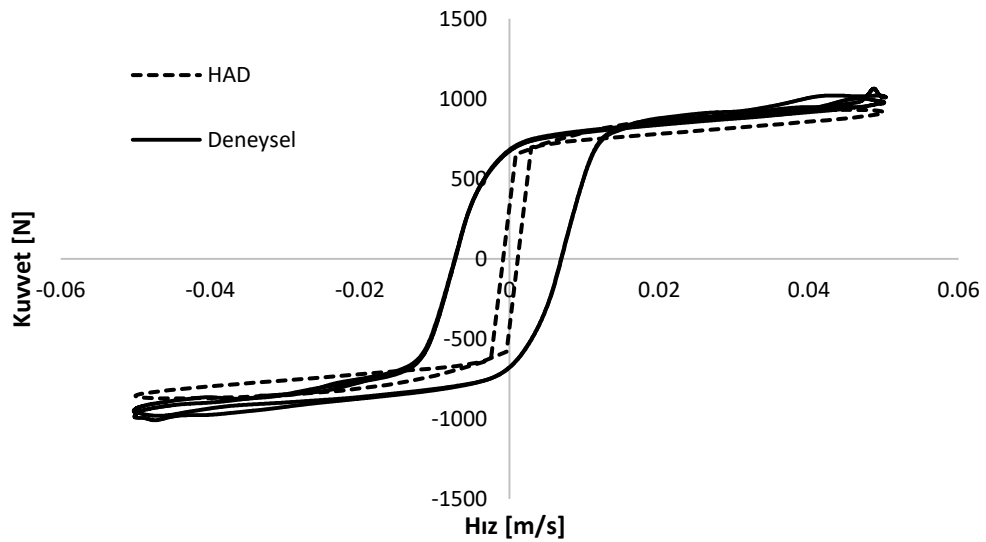


Şekil 6.15. 1,5 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-hız grafiği

Şekil 6.14. ve Şekil 6.15., 1,5 A akım değeri için HAD sonuçlarının deneysel veriler ile birebir örtüştüğünü göstermektedir. Bu durum kullanılan modelin sadece belirli bir akımda değil, geniş bir akım aralığı boyunca başarılı olduğunun bir ispatıdır.



Şekil 6.16. 2 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-yerdeğiştirme grafiği



Şekil 6.17. 2 A akım altında üretilen MR damperin kuvvet-hız grafiği

Şekil 6.16. ve Şekil 6.17. incelendiğinde 2 A akım değerinde MR sıvının manyetik alana doyması beklenmektedir. Buna paralel olarak, oluşan kuvvet değerlerinde ciddi bir artış olmadığı görülmektedir. Genel olarak HAD modeli, burada da başarılı bir şekilde deneysel verileri tahmin edebilmektedir.

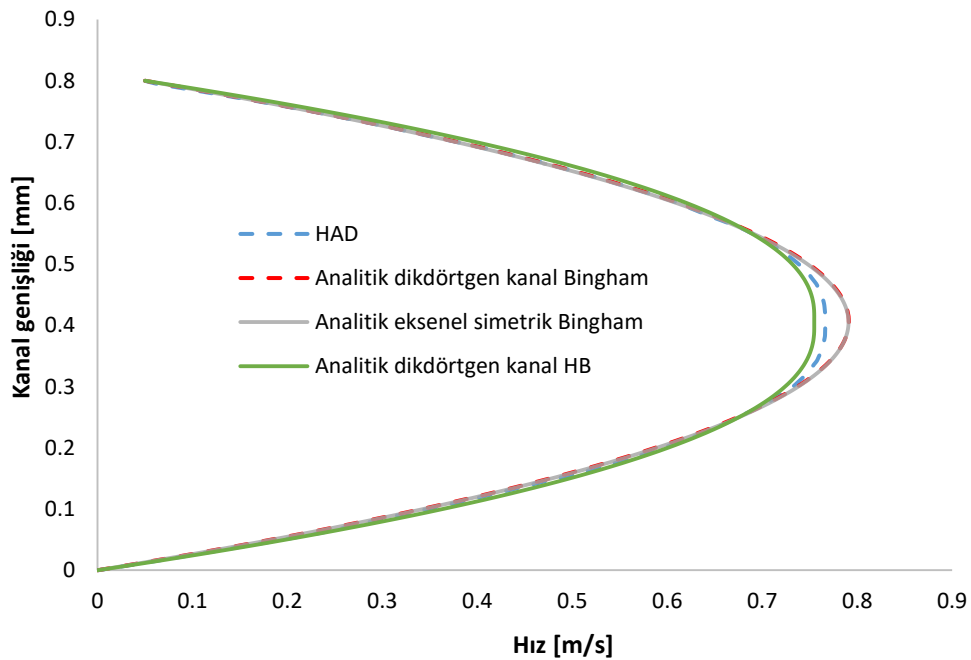
HAD analizleri sonucunda elde edilen bir başka önemli çıktı ise aktif bölge boyunca kanaldaki akış profilleridir. Bu profilleri analitik yaklaşımlar ile kıyaslamak adına



Bingham modeli ile dikdörtgen kanal yaklaşımı ve eksenel simetri yaklaşımını içeren iki analitik çözüm ve dikdörtgen kanal yaklaşımı ile Herschel-Bulkley modelini kullanan üçüncü bir analitik çözüm yapılmıştır. Herschel-Bulkley modeli için her bir akıma karşılık gelen kanaldaki maksimum manyetik akı yoğunluğu hesaplanmış ve sıvının ölçüm değerleri kullanılarak bu manyetik akı yoğunluğuna karşılık gelen Herschel-Bulkley katsayıları elde edilmiştir. Bu katsayılar Tablo 6.7.'de verilmiştir.

Tablo 6.7. Aktif bölgede ölçülen farklı manyetik akı yoğunluğu ve karşılık gelen Herschel-Bulkley katsayıları

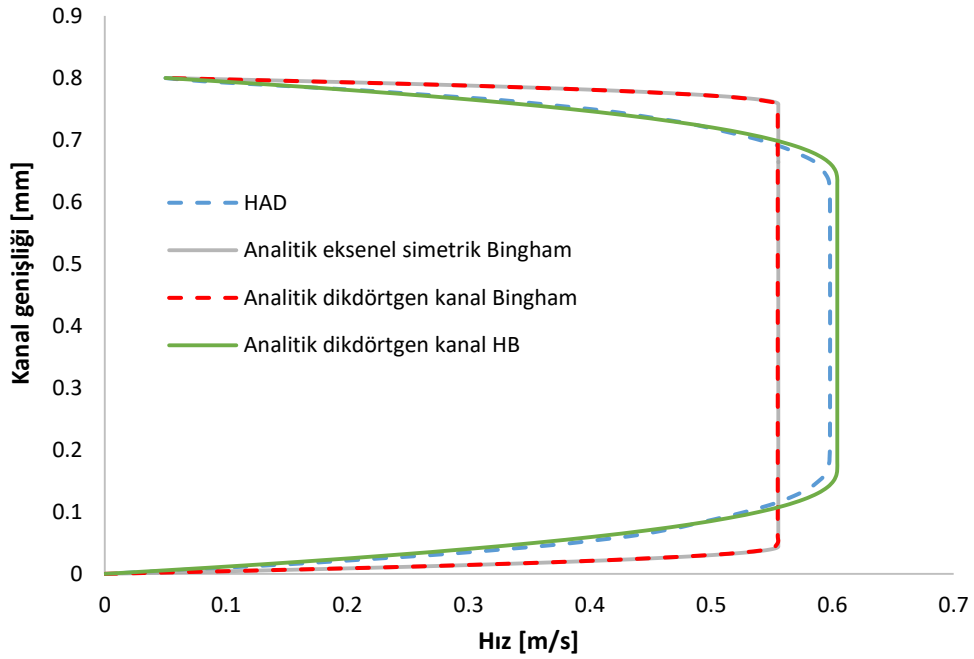
Akım [A]	B [T]	$\tau_0$ [Pa]	k	n
0	0	2,0766	0,108	0,7952
0,5	0,4409	8367,1	19,07	0,6357
1	0,5452	10765,3	56,56	0,5225
1,5	0,5793	11414,1	105,22	0,4649
2	0,5970	11701,6	124,42	0,4475



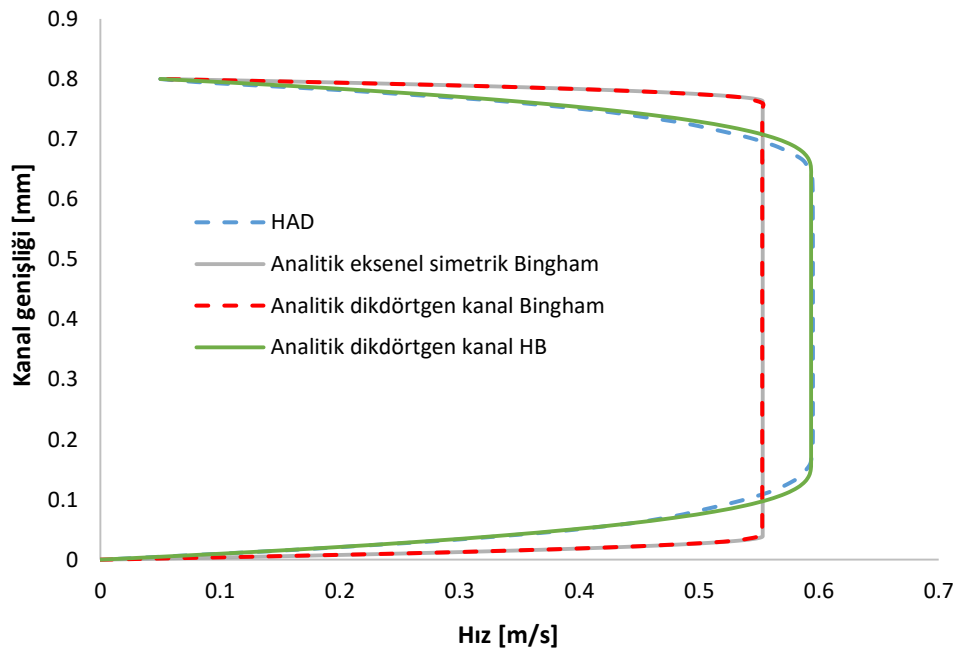
Şekil 6.18. Üretilen MR damperin 0 A akım altında ve maksimum hız durumunda HAD analizi ve analitik modeller ile aktif bölgede elde edilen akış profili

Şekil 6.18.'de akımın olmadığı durum için maksimum hız anındaki akış profilleri verilmiştir. Bingham modeli, akım olmadığı durumda Newton tipi bir akış profilini netice verdiği için iki adet analitik model neredeyse tam olarak örtüşür ve Newton tipi laminer akıştaki tipik parabolik profili meydana getirir. Herschel-Bulkley modeli ise akım olmadığı durum için kullanılsa dahi Newton tipi olmayan bir akışkan kabulü

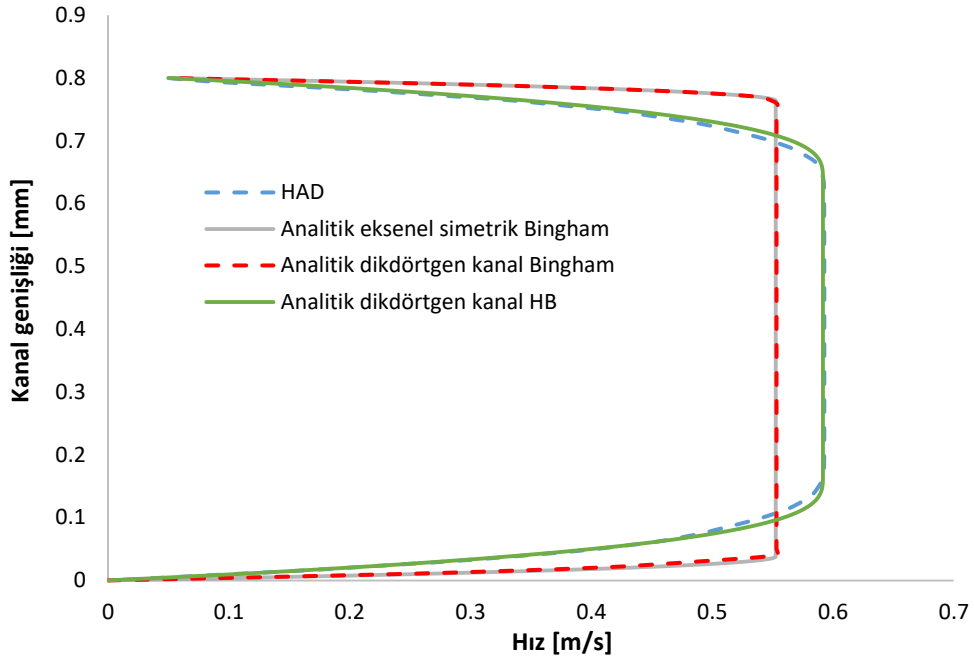
yapılır ve daha küt bir profil ortaya çıkar. Kullanılan HAD modeli de kayma gerilmesini temel aldığı için benzer şekilde Newton tipi olmayan bir akışkan kabulü yapılmış olur ve daha küt bir profili netice verir.



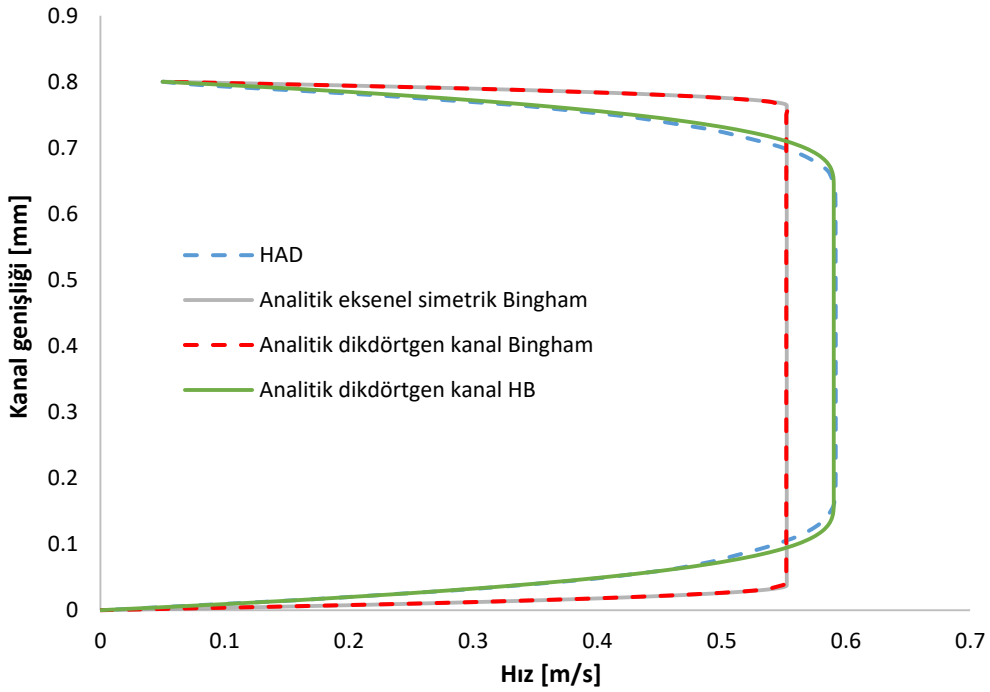
Şekil 6.19. Üretilen MR damperin 0,5 A akım altında ve maksimum hız durumunda HAD analizi ve analitik modeller ile aktif bölgede elde edilen akış profili



Şekil 6.20. Üretilen MR damperin 1 A akım altında ve maksimum hız durumunda HAD analizi ve analitik modeller ile aktif bölgede elde edilen akış profili



Şekil 6.21. Üretilen MR damperin 1,5 A akım altında ve maksimum hız durumunda HAD analizi ve analitik modeller ile aktif bölgede elde edilen akış profili



Şekil 6.22. Üretilen MR damperin 2 A akım altında ve maksimum hız durumunda HAD analizi ve analitik modeller ile aktif bölgede elde edilen akış profili

Şekil 6.19., Şekil 6.20., Şekil 6.21. ve Şekil 6.22. sırasıyla 0,5 A, 1 A, 1,5 A ve 2 A akım değerlerinde maksimum hız anında elde edilen akış profillerini göstermektedir. Dikdörtgen kanal ve eksenel simetri yaklaşımına göre Bingham modeli sonlu bir çekirdek kalınlığı olan ve daha keskin hatlara sahip bir profili netice vermektedir. Kanal genişliği, MR damperin çapına göre oldukça küçük olduğu için dikdörtgen kanal yaklaşımı eksenel simetrik model ile neredeyse birebir örtüşmektedir. Buna karşılık, Herschel-Bulkley modelinde daha küçük çekirdek kalınlığına sahip bir profil oluşmaktadır. Kullanılan HAD modelinde ise Herschel-Bulkley modeline yakın bir profil oluşmaktadır. Kullanılan HAD modelinde, sadece akışkanın ölçüm sonuçları kullanılarak elde edilen hücresel görünür viskozite değerlerinin kullandığı unutulmamalıdır. Buna rağmen muntazam bir çekirdek akışı oluşmuştur. Fakat oluşan bu çekirdek akışı analitik modellerde olduğu gibi konuma göre tamamen sabit bir hıza sahip değildir. Oluşan bu akış profili sadece akışkanın ölçüm değerleri kullanılarak geliştirilen bir yaklaşım ile elde edildiği için gerçek akış profilinin yapısı hakkında önemli ipuçları taşımaktadır.

Tablo 6.8. Dikdörtgen kanal yaklaşımının üretilen MR damper için Bingham modeline göre uygulanmasına ait sonuçlar

Dikdörtgen kanal Bingham	$y_1 [mm]$	$y_2 [mm]$	$\delta [mm]$	$\bar{\delta}$	Maksimum kuvvet [N]	Maksimum basınç düşüşü [kPa]
0 A	-	-	-	-	68,83	13,674
0.5 A	0,04460	0,75750	0,71290	0,8911	496,33	382,80
1 A	0,03945	0,76235	0,72287	0,9036	613,29	483,80
1.5 A	0,03838	0,76340	0,72501	0,9063	644,82	511,03
2 A	0,03790	0,76383	0,72591	0,9074	658,78	523,07

Tablo 6.9. Eksenel simetrik yaklaşımın üretilen MR damper için Bingham modeline göre uygulanmasına ait sonuçlar

Eksenel simetrik Bingham	$r_1 [mm]$	$r_2 [mm]$	$\delta [mm]$	$\bar{\delta}$	Maksimum kuvvet [N]	Maksimum basınç düşüşü [kPa]
0 A	-	-	-	-	68,825	13,665
0.5 A	19,24418	19,95781	0,71362	0,8920	495,89	382,43
1 A	19,23913	19,96264	0,72350	0,9044	612,80	483,37
1.5 A	19,23804	19,96368	0,72564	0,9071	644,31	510,59
2 A	19,23759	19,96412	0,72653	0,9082	658,26	522,63

Tablo 6.10. Dikdörtgen kanal yaklaşımının üretilen MR damper için Herschel-Bulkley modeline göre uygulanmasına ait sonuçlar

Dikdörtgen kanal HB	$y_1$ [mm]	$y_2$ [mm]	$\delta$ [mm]	$\bar{\delta}$	Maksimum kuvvet [N]	Maksimum basınç düşüşü [kPa]
0 A	0,39612	0,41572	0,01960	0,0244	65,311	10,63
0.5 A	0,17211	0,63357	0,46147	0,5768	733,34	587,45
1 A	0,18114	0,62418	0,44304	0,5538	889,33	722,15
1.5 A	0,16617	0,63842	0,47226	0,5903	957,10	780,66
2 A	0,16550	0,63897	0,47347	0,5918	977,29	798,1

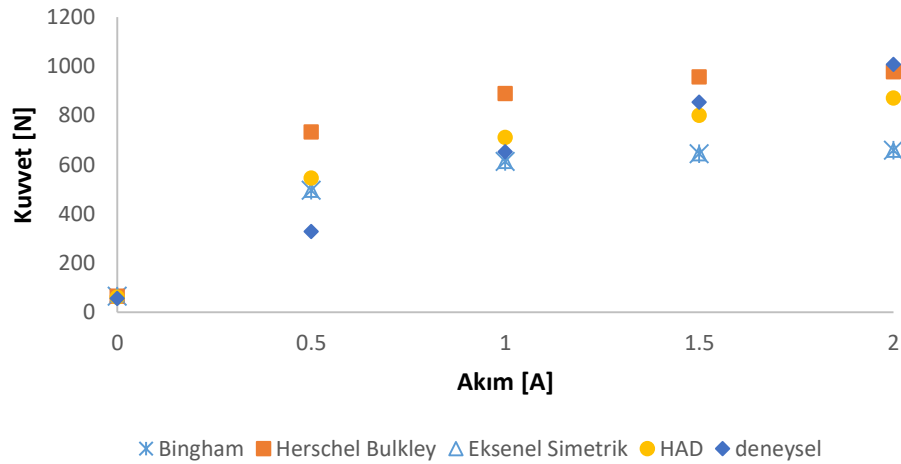
Tablo 6.8., Tablo 6.9. ve Tablo 6.10. sırasıyla dikdörtgen kanal ve eksenel simetri yaklaşımı ile Bingham modelinin ve dikdörtgen kanal yaklaşımı ile Herschel-Bulkley modelinin maksimum hız anındaki analitik sonuçlarını göstermektedir. Bingham modelinin kullanıldığı dikdörtgen kanal ve eksenel simetrik yaklaşımları neredeyse aynı sonuçları vermektedir. Buna karşılık Herschel-Bulkley modelinde daha küçük çekirdek kalınlıkları ve daha büyük kuvvetler ve basınç düşüşleri öngörülmektedir.

Tablo 6.11. HAD ile MR damperin modellenmesine ait sonuçlar ve deneysel verilere göre hata değerleri

	Maksimum kuvvet hata*[%]	Minimum kuvvet hata*[%]	Ortalama maksimum kuvvet hata*[%]	Maksimum basınç düşüşü [kPa]	RMSE	MAPE [%]
0 A	11,60	10,92	11,26	8,31	22,43	10,91
0.5 A	60,90	66,06	63,48	490,68	214,78	62,19
1 A	12,07	9,02	10,55	654,46	168,66	11,98
1.5 A	0,16	6,19	3,18	744,66	195,88	3,82
2 A	12,51	13,57	13,04	815,59	228,58	7,26

\*Hata değeri deney verileri için  $\pm 9 N$ 'dur.

Tablo 6.11.'de ise HAD modeli için elde edilen değerler, doğrudan deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Buna göre en büyük hata 0,5 A akım altında görülmektedir. Buna karşılık diğer akım değerlerinde maksimum kuvvet için hata yaklaşık olarak % 12 mertebesinde. Ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) değerlerine göre ise hata yaklaşık olarak %10 seviyelerindedir. Buna karşılık, özellikle yüksek akım değerlerinde hata %4 seviyelerine kadar azalmaktadır. Karekök ortalama hata değerlerinde ise 0 A dikkate alınmaz ise en düşük hata 1 A akım değerinde sağlanmıştır.



Şekil 6.23. Tüm akımlar için analitik modeller ve HAD modelinden elde edilen maksimum kuvvetlerin deneysel veriler ile kıyaslanması

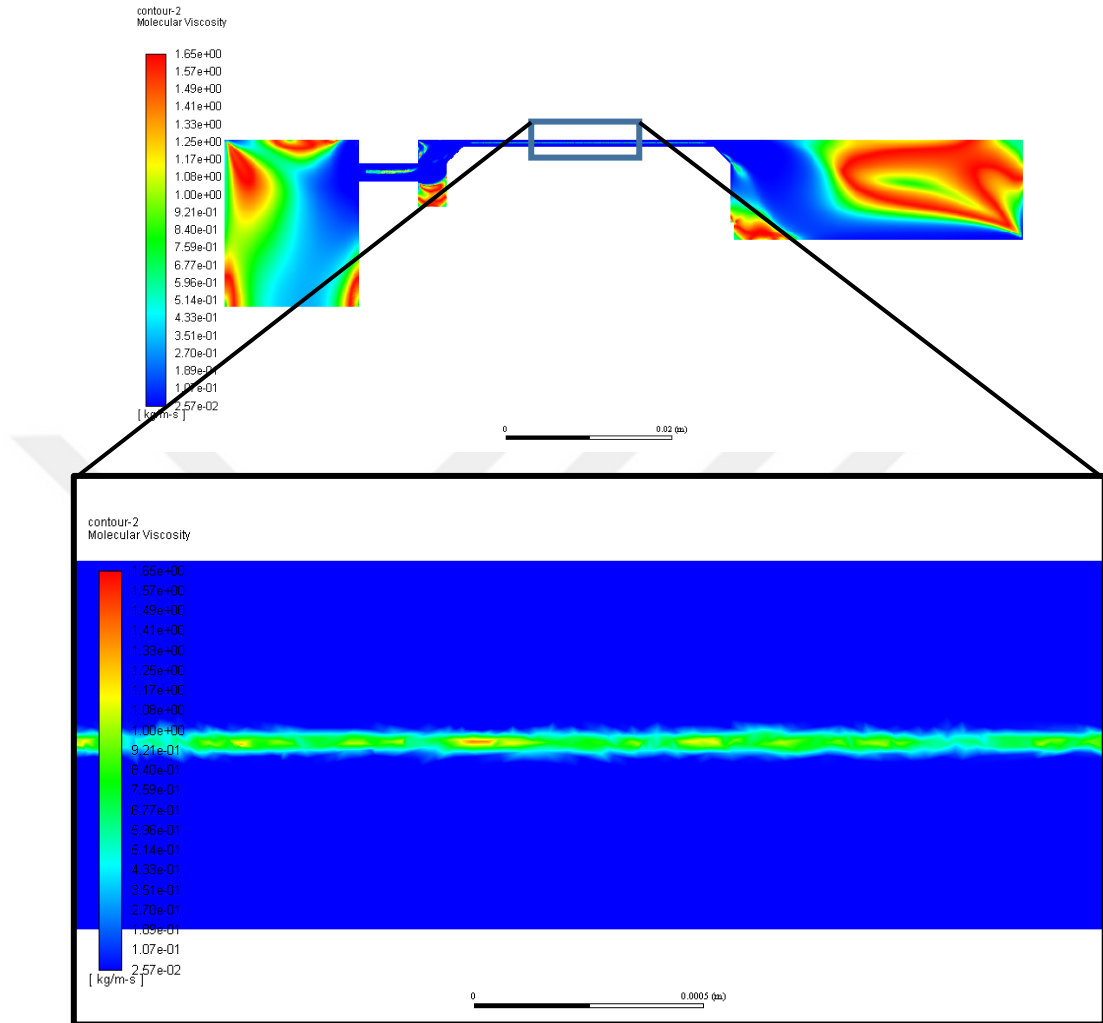
Şekil 6.23.'de analitik sonuçlar ve HAD sonuçlarından elde edilen maksimum kuvvetler deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. 0,5 A akım değeri dışında HAD modelinin en başarılı sonucu verdiği görülmektedir. Bingham modelleri düşük akımlarda daha başarılı iken, Herschel-Bulkley modeli yüksek akımlarda daha başarılıdır. Bingham modelleri daha çabuk doyma davranışı gösterdiği için deneysel verilerden sapmaktadır. Herschel-Bulkley modeli ise daha geç doyma davranışı göstererek yüksek akımlarda deneysel verilere yaklaşmakta, fakat genel sonuçlar dikkate alındığında daha yüksek bir hataya sahiptir. HAD modeli; hem doyma davranışı doğru modelleyebilmekte, hem de analitik modellere göre daha az sapma göstermektedir.

Tablo 6.12. Tüm akımlar için analitik modeller ve HAD modelinden elde edilen maksimum kuvvetlerin kıyaslanması

	RMSE	MAPE [%]
HAD	120,15	21,15
Dikdörtgen Kanal	197,79	28,19
HB	215,22	38,59
Eksenel Simetrik	198,03	28,20

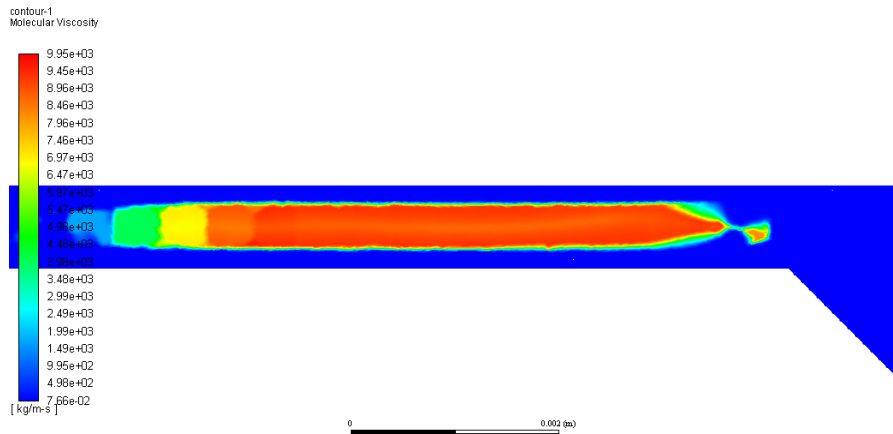
Tablo 6.12.'de tüm akımlar için deney sonuçlarına göre RMSE ve MAPE değerleri verilmiştir. Buna göre en başarılı sonuç HAD analizleri ile elde edilmiştir. En büyük sapmayı ise Herschel- Bulkley modeli göstermektedir. İki adet Bingham modeli ise

neredeşye birbiriyle aynı sonucu vermekte ve HAD modelinden sonra ikinci sırayı almaktadır.



Şekil 6.24. HAD analizi ile 0 A akım altında ve maksimum hız durumunda elde edilen viskozite konturları

Şekil 6.24.'te akımın olmadığı durum için MR damper içerisindeki viskozite konturları gösterilmiştir. Buna göre, akış hızının artması ile viskozitesinin düştüğü alan mavi renk ile net bir şekilde görülmektedir. Kanal içerisinde ise çok küçük bir çekirdek akış bölgesi oluştuğu görülmektedir. Verilen kontur görünümü, kullanılan HAD yaklaşımının klasik Newton tipi laminer akıştan farklı bir çözüm gerçekleştirildiğini göstermektedir.



Şekil 6.25. HAD analizi ile 1 A akım altında ve maksimum hız durumunda aktif bölgede elde edilen viskozite konturları

Şekil 6.25.'te ise 1 A akım altında aktif bölgedeki viskozite konturları verilmiştir. Burada ise çekirdek bölgenin, aktif bölgenin giriş ve çıkışlarındaki gelişimi ve tam gelişmiş hali net olarak görülmektedir.

Sonuçlar genel olarak kullanılan HAD modelinin başarılı bir şekilde deneysel verilere yaklaştığını göstermektedir. Bu sonuçlar, fiziksel olarak MR damper içerisinde oluşan akış ile ilgili değerli bilgileri içermektedir. Ayrıca üretilen MR damper, tasarlandığı büyüklükteki kuvveti sağlayabilmektedir. Bunu yaparken ticari bir MR damper olan LORD-RD-8041-1'den daha düşük sürtünme kuvvetleri ve daha yüksek dinamik oranlara ulaşarak, ticari emsallerinden daha başarılı bir sonuç ortaya koymaktadır.



## BÖLÜM 7. MR DAMPERİN DİNAMİK MODELLERİ

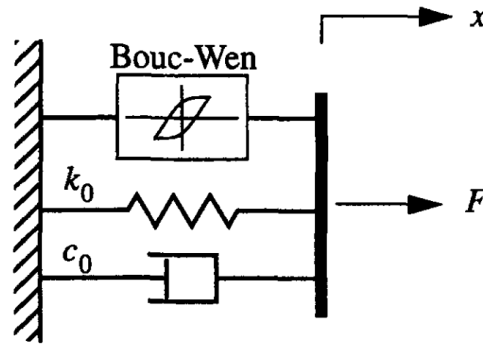
### 7.1. Parametrik Modeller

Dinamik modeller MR damperler için büyük bir öneme sahiptir [135]. Çünkü herhangi bir MR damperin kontrol edilebilmesi için, hız, yerdeğiştirme ve akım gibi girdiler altında nasıl davrandığını tahmin eden ve gerçek zamanda çalışabilecek kadar hızlı modellere ihtiyaç duyulur. İşte bu ihtiyaca binaen 1990'lü yıllardan günümüze birçok dinamik model geliştirilmiştir. Bu konuda önerilmiş ilk modeller Bingham modeli ve ikili-viskoz model gibi ilkel modellerdir. Bu ilkel modeller, belirli bir kuvvet değerinden sonra akma davranışı gösteren sistemlerin özelliklerini taşırlar. Bu davranış, MR sıvının akmaya karşı gösterdiği davranıştır ve MR damperlerin farklı hızlardaki kuvvet cevabına benzerlik arz eder. Fakat bu modeller MR damperin daha karmaşık ve histerezis içeren davranışını modellemekte başarısızdır. Bu nedene ilerleyen yıllarda histerezis özelliğini temsil edebilen modeller öne çıkmıştır. Bu modellerin başlıca olanları bu bölümde incelenecektir.

#### 7.1.1. Bouc-Wen modeli

MR damperin histerezis davranışını temsil edebilen ilk model Bouc-Wen modelidir. Bu model ilk olarak Bouc [136] ve Wen [137]'in iki ayrı çalışmasında histerezis içeren sistemler için önerilmiştir. Bu modele göre MR damperin kuvvet cevabı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$F(t) = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + \alpha z \quad (7.1)$$



Şekil 7.1. Bouc-Wen modeli [62]

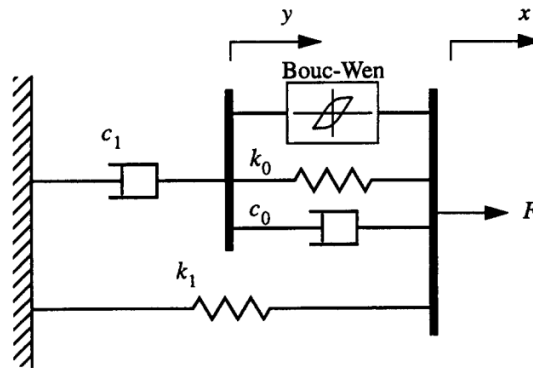
Modele ilişkin şema Şekil 7.1.'de verilmiştir. Burada  $k_0$  yay katsayısı ve  $c_0$  sönümleme katsayısını göstermektedir. Bouc-Wen bileşeni  $\alpha z$  ifadesi ile temsil edilir.  $z$  aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x}|z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + A\dot{x} \quad (7.2)$$

$A$ ,  $n$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  sabit katsayılardır.

### 7.1.2. Düzenlenmiş Bouc-Wen modeli

Düzenlenmiş Bouc-Wen modeli, klasik Bouc-Wen modelinin MR damperler için özelleştirilmiş halidir. Oldukça geniş bir girdi aralığında çalışabilen bu model ilk olarak 1996'da Spencer tarafından geliştirilmiş ve MR damperler ile ilgili yüzlerce çalışmada kullanılmıştır [62]. Modele ilişkin şema Şekil 7.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.2. Düzenlenmiş Bouc-Wen modeli [62]

Bu modele göre iki adet yay ve iki adet sönüm katsayısı vardır. Kuvvet en genel şekilde aşağıdaki formüle göre hesaplanır:

$$F(t) = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (7.3)$$

Buradaki  $\dot{y}$  değeri aşağıdaki formülden hesaplanır:

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} [\alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y)] \quad (7.4)$$

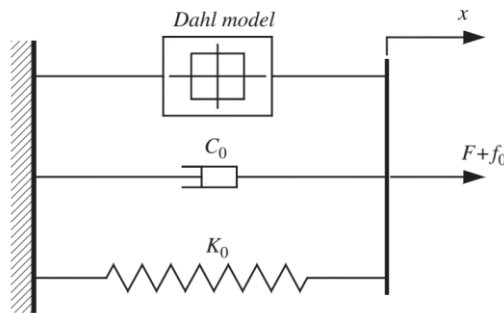
Histerezis bileşeni  $z$  ise aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| z |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (7.5)$$

$A$ ,  $n$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  sabit katsayılarıdır.

### 7.1.3. Düzenlenmiş Dahl modeli

Dahl modeli sürtünme içeren sistemlerin kontrolü için geliştirilmiş bir modeldir. Bu modelin MR damperler için düzenlenmiş modeli 2002 yılında Zhou ve Qu tarafından geliştirilmiştir[138]. Modele ilişkin şema Şekil 7.3.'te verilmiştir.



Şekil 7.3. Düzenlenmiş Dahl modeli[63]

Bu modele göre MR damperin kuvvet cevabı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$F(t) = k_0 x + c_0 \dot{x} + \alpha z - f_0 \quad (7.6)$$

$k_0$  ve  $c_0$  sırasıyla yay ve sönüm katsayılarıdır. Histerezis bileşeni  $z$  aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\dot{z} = \frac{\sigma}{f_c} (\dot{x} - |\dot{x}|z) \quad (7.7)$$

Buradaki  $f_c$ ,  $\alpha$  ve  $\sigma$  sabit katsayılarıdır.

#### 7.1.4. LuGre modeli

LuGre modeli bir sürtünme modelidir. Dahl modeline benzer şekilde bu model 2005 yılında MR damper için önerilmiştir [66]. Modele göre MR damper kuvveti aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$F(t) = \beta z + \gamma \dot{x} + \delta x + \varepsilon \dot{z} + f_0 \quad (7.8)$$

$\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\varepsilon$  ve  $f_0$  sabitlerdir.  $\dot{z}$  ise aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\dot{z} = \dot{x} - \alpha |\dot{x}|z \quad (7.9)$$

#### 7.1.5. Cebirsel model

Cebirsel MR damper modelleri diferansiyel denklem içermeyen daha basit formdaki tek denklemlilerdir. Bunlardan öne çıkan modeller Kwok tarafından önerilen hiperbolik tanjant modeli [67] ve Guo tarafından önerilmiş olan cebirsel modeldir [139]. Guo tarafından önerilen model aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$F(t) = f_0 + c_b \dot{x} + \frac{2}{\pi} f_y \tan^{-1}\{k[\dot{x} - \dot{x}_0 \operatorname{sgn}(\dot{x})]\} \quad (7.10)$$

Buradaki  $f_0$  gaz kuvvetini temsil etmektedir ve  $c_b$ ,  $f_y$ ,  $k$  ve  $\dot{x}_0$  sabitlerdir. Bu modele ilişkin olarak başka bir çalışmada, modelde küçük bir değişiklik yapılarak atalet

kuvvetlerinin de dikkate alınabileceği öngörülmüştür. Model, düzenlenmiş cebirsel model ismiyle önerilmiş [140] ve denklem aşağıdaki hale getirilmiştir:

$$F(t) = f_0 + c_b \dot{x} + \frac{2}{\pi} f_y \tan^{-1}\{k[\dot{x} - \dot{x}_0 \operatorname{sgn}(\ddot{x})]\} + m\ddot{x} \quad (7.11)$$

Buradaki  $m$  ifadesi kütleyi temsil eden bir sabittir.

## 7.2. Parametrik Olmayan Modeller

Parametrik olmayan modeller MR damperin yerdeğiştirme, hız ve akım gibi girdi değerlerine karşılık olarak herhangi bir parametreye ihtiyaç duymadan cevap veren modellerdir. Bu tip modellere deney verilerinin eğitimleri ile elde edilebilen yapay sinir ağları veya bulanık mantık gibi modeller örnek olarak verilebilir. Bu modeller, parametrik modellere göre oldukça karmaşık olduklarından gelişmiş bilgisayar teknolojisine ihtiyaç duyarlar. Bundan dolayı parametrik modellere göre daha yeni ve aktif bir çalışma konusu olarak halen gelişmekte olan bir alandır. Bununla beraber, bu modeller herhangi bir özel denkleme dayalı değildir. Bu nedenle uygulanması için sistem hakkında daha az bir ön bilgiye ihtiyaç duyarlar. Parametrik modeller, özellikle sistemdeki belirsizlikler yüksek ve non-lineerlik mevcutsa, sistem karmaşıklığının artması ile yetersiz hale gelebilmektedir. Bu durumda parametrik olmayan modeller iyi bir alternatiftir.

### 7.2.1. Bulanık mantık modelleri

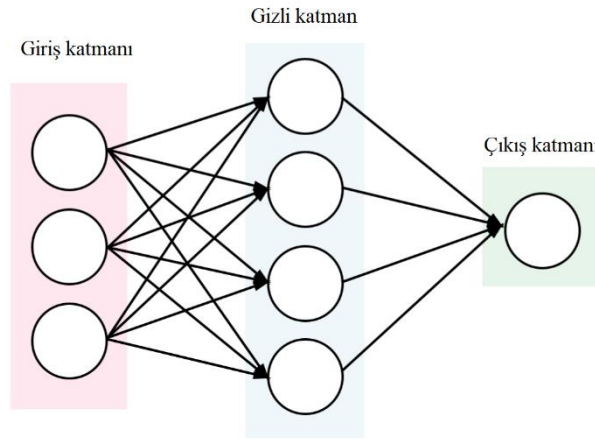
Bulanık mantık ilk olarak 1965 yılında Lotfi A. Zadeh'in çalışması ile bilim dünyasına sunulmuş [141] ve gelişen bilgisayar teknolojisi ile beraber günümüzde birçok ticari uygulamada kullanılır hale gelmiştir. Bulanık mantığın en temel özelliği klasik mantıktaki ikili sistem yerine 1 ile 0 arasında tüm değerleri de dikkate alan dereceli bir mantık yapısını işletmesidir. Bunu gerçekleştirmek için temel olarak üç aşama uygulanır. Bunlar bulanıklaştırma, çıkarım sisteminde kuralların yürütülmesi ve durulaştırma aşamalarıdır. Bulanıklaştırma aşaması, veri setlerinin dereceli yapıya dönüştürülmesini içerir. Çıkarım sisteminde kuralların yürütülmesi aşamasında, kural

tabanındaki bilgiler kullanılarak gelen veriler işlenir. Böylece bulanık bir çıkış sinyali oluşturulur. Durulaştırma aşamasında ise bu sinyal durulaştırılır ve gerçeğe karşılık gelen değere dönüştürülür.

Bulanık mantığın öne çıkan özelliği, özellikle yapısal titreşimlerin sönümlenmesi gibi durumlarda ortaya çıkan lineer olmayan etkileri ve belirsizlikleri daha efektif ve kolay bir şekilde dikkate almasıdır. Buna karşılık diğer parametrik olmayan yöntemlerdeki gibi kontrolcünün eğitimi söz konusu değildir. Ayarlanması (tuning) için belirli yöntemler yoktur ve profesyonel bir uzmana ihtiyaç duyar. Farklı şartlara adaptasyonu ise zordur [142].

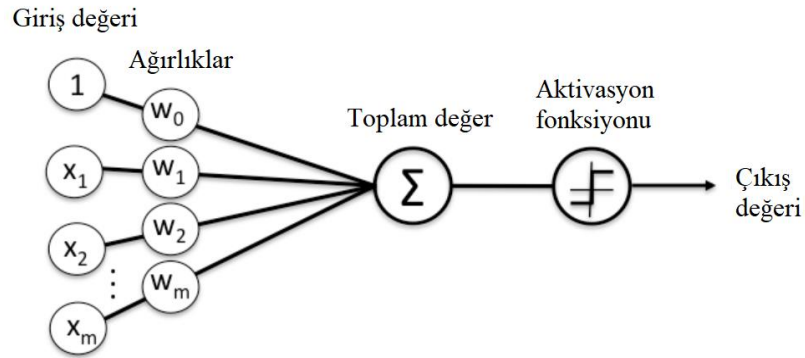
### **7.2.2. Yapay sinir ağları modelleri**

Yapay sinir ağları modeli, insan beynindeki ağ yapısından ilham alarak oluşturulmuş parametrik olmayan bir kontrol modelidir. Bu model, insan beynindeki nöronlara benzer şekilde, birim elemanlara sahiptir. İlk kez 1943 yılında bir matematikçi olan Pitts ile bir nöro-fizyolojist olan McCulloch'un yaptıkları çalışma ile ortaya atılmış ve elektrik devreleri için basit bir yapay sinir ağı modeli olarak geliştirilmiştir [143]. 2000 yılına kadar genellikle teorik ve akademik araştırmaların konusu olan yapay sinir ağları, gelişen bilgisayar teknolojisi ile beraber hızlı bir şekilde günlük hayata girmiştir. Günümüzde ise finans sektöründen medikal teşhis tanı yöntemlerine, yüz tanıma sistemlerinden veri madenciliğine kadar birçok karmaşık alanda kullanılmaktadır.



Şekil 7.4. Yapay sinir ağı modelindeki katmanların şematik gösterimi

Şekil 7.4.'te yapay sinir ağı modelinin katmanları gösterilmiştir. Buna göre, kontrol için belirlenmiş bir giriş, bir çıkış ve bir veya birden fazla gizli katman bulunmaktadır. Her bir katmanda belirli sayıda nöron bulunmaktadır. Nöronlar 1 ile 0 arasında değerler taşır ve her bir nöron diğer nöronlarla kanallar vasıtası ile bağlanır. Bu kanallar belirli büyüklüklerde ağırlıklar ile ifade edilir ve ara katmanlardaki her bir nöron için bir sapma değeri belirlenir.



Şekil 7.5. Yapay sinir ağı modelindeki bir nöron üzerindeki değerlerin hesaplanması

Şekil 7.5.'te bir nöronun üzerindeki toplam değer nasıl hesaplandığı görülmektedir. Buna göre toplam değer  $\sum_{i=0}^m x_i w_i + B$  olarak ifade edilir. Buradaki  $w_i$  herbir kanalın ağırlığını,  $x_i$  herbir nöronun büyüklüğünü ve  $B$ , toplamın hesaplandığı nörondaki sapma değerini gösterir. Toplam değer daha sonra sigmoid fonksiyonu gibi bir aktivasyon fonksiyonundan geçerek 0 ile 1 arasında bir değer alır.

Yapay sinir ağlarının en temel özelliği deney setleri ile eğitilebilir olmasıdır. Ayrıca parametrik modellerde olduğu gibi herhangi bir matematiksel modele ihtiyaç yoktur. Lineer olmayan sistemler kolayca modellenilebilir ve veri setleri ile kolayca eğitilebilir. Bunun için çeşitli eğitim algoritmaları kullanılabilir [142]. Çok sayıda ve birbiri ile bağlanmış bu nöronlar sayesinde kendi kendine öğrenme yeteneğine sahip güçlü bir kontrol algoritması ortaya çıkar [74].

Buna karşılık değişen sistemler için yeniden eğitim yapılması gerekir ve eğitim verilerinin zaman zaman yakınsamama problemleri olabilir. Fakat bu sayılan dezavantajlar, avantajlarının yanında oldukça azdır. Bu nedenle tez kapsamında MR damperin besleme akımının belirlenmesinde yapay sinir ağları modeli tercih edilmiştir.

### 7.3. Parametrik Dinamik Modellerin Kıyaslanması

Parametrik dinamik modellerin deney sonuçları ile kıyaslanması için üretilen MR damperin kuvvet-zaman grafikleri dikkate alınarak model katsayıları belirlenmiştir. Model katsayıları belirlenirken 0.05 m/s maksimum hız ve 15 mm strok aralığındaki deneysel veriler kullanılmıştır. Bu değerler atalet kuvvetlerinin etkisinin az olduğu sanki-statik bir duruma daha yakındır. Parametrik modellere ait SIMULINK şemaları Ek.B’de verilmiştir. Belirlenen katsayılara göre modellerin başarılarını kıyaslamak adına  $E_t$ ,  $E_x$  ve  $E_{\dot{x}}$  olmak üzere üç adet hata kriteri dikkate alınmıştır [62].

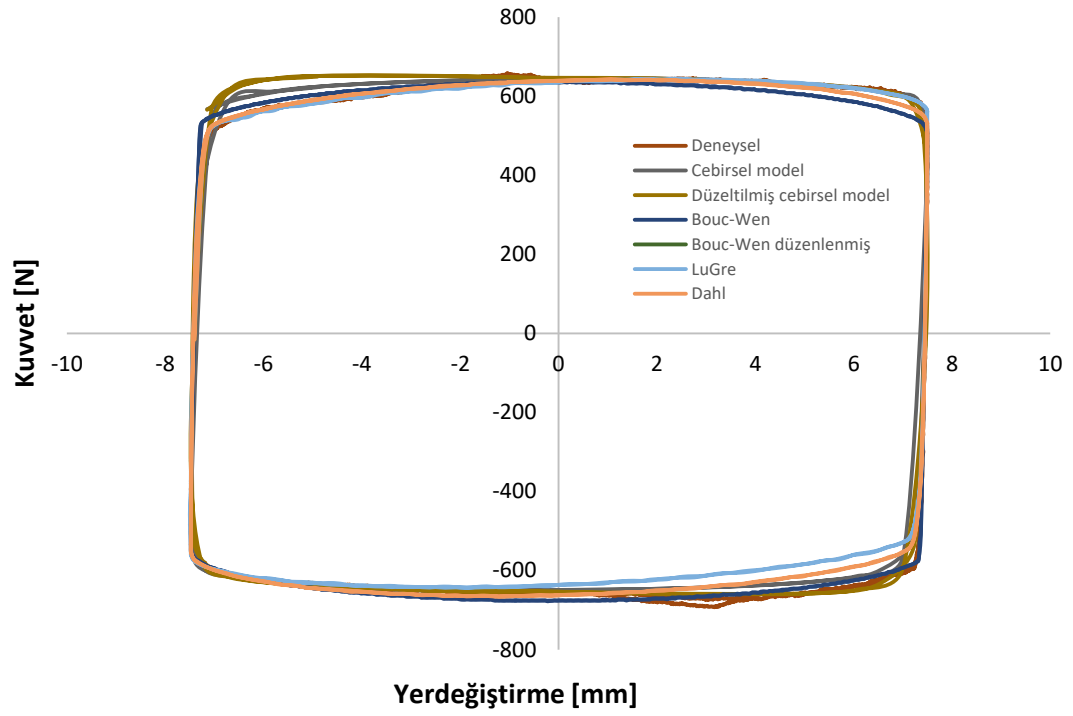
$$E_t = \sqrt{\frac{\int_0^T (F_{deney} - F_{tahmin})^2 dt}{\int_0^T (F_{deney} - \mu_F)^2 dt}} \quad (7.12)$$

$$E_x = \sqrt{\frac{\int_0^T (F_{deney} - F_{tahmin})^2 \left| \frac{dx}{dt} \right| dt}{\int_0^T (F_{deney} - \mu_F)^2 dt}} \quad (7.13)$$

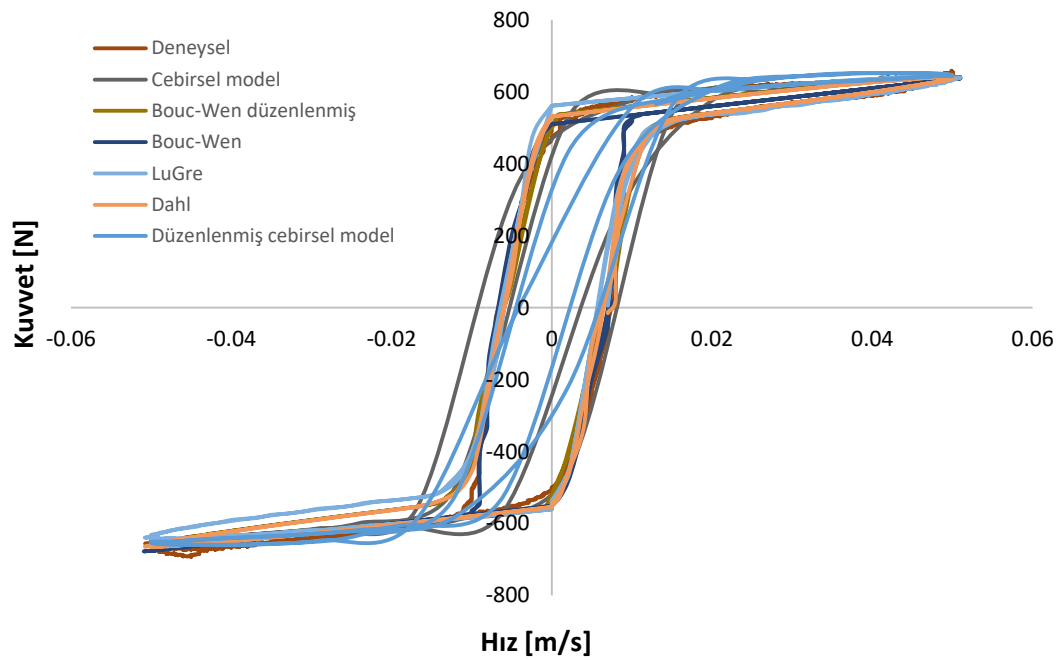
$$E_{\dot{x}} = \sqrt{\frac{\int_0^T (F_{deney} - F_{tahmin})^2 \left| \frac{d\dot{x}}{dt} \right| dt}{\int_0^T (F_{deney} - \mu_F)^2 dt}} \quad (7.14)$$



Denklemdaki  $\mu_F$  ölçülen kuvvetin ortalama değerini temsil etmektedir.



Şekil 7.6. Farklı parametrik dinamik modellerden elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme sonuçlarının deneysel veriler ile kıyaslanması



Şekil 7.7. Farklı parametrik dinamik modellerden elde edilen kuvvet-hız sonuçlarının deneysel veriler ile kıyaslanması

Tablo 7.1. Farklı parametrik dinamik modellerden elde edilen sonuçların deneysel verilere göre hata değerleri

	$E_t$	$E_x$	$E_{\dot{x}}$
Bouc-Wen	0,04318	0,00591	0,00305
Bouc-Wen düzenlenmiş	0,04440	0,00633	0,02608
LuGre	0,06185	0,00953	0,03570
Düzenlenmiş Dahl	0,04376	0,00617	0,02517
Cebirsel	0,04944	0,00667	0,02645
Düzenlenmiş cebirsel model	0,09493	0,00957	0,05382

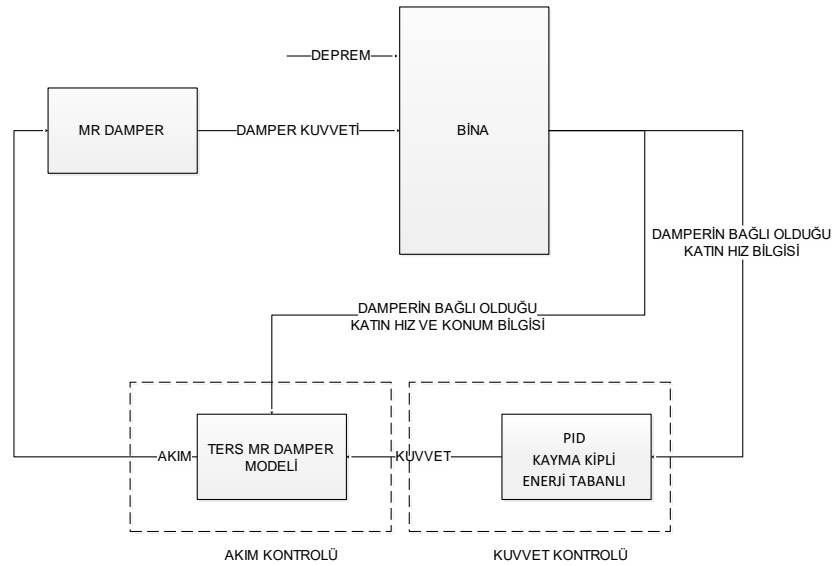
Şekil 7.6. incelendiğinde LuGre ve Dahl modeli dışındaki modellerin deneysel veriler ile uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 7.7. incelendiğinde ise düzenlenmiş cebirsel model ve LuGre modeli dışındaki modellerin başarılı olduğu görülmektedir. Bu iki model özellikle histerezis etkiyi modellemede başarısızdır. Tablo 7.1.'deki sonuçlar incelendiğinde en başarılı modelin Bouc-Wen modeli olduğu görülmektedir. Böylece literatürde sıkça görülen bu modelin, üretilen MR damper için belirlenmiş dinamik modellerde de başarılı olduğu bir kez daha net bir şekilde görülmüştür. Bouc-Wen modelinin ardından ise düzenlenmiş Dahl modeli gelmektedir. Bununla birlikte, kullanımı daha kolay olan cebirsel model de düzenlenmiş Bouc-Wen modeline oldukça yakın bir başarı göstermektedir. Buna karşılık LuGre modelinin başarısı diğer modellere göre düşüktür. Düzenlenmiş cebirsel model ise sanki-statik duruma yakın olan bu deney verileri için başarısız gözükmektedir. Bunun sebebi düşük hızlarda, önerilen modelde dikkate alınan atalet kuvvetlerinin etkisinin oldukça belirsiz olmasıdır.

Genel olarak parametrik dinamik modeller MR damperin davranışını ilgili akım altında yaklaşık olarak hesaplayabilmektedirler. Fakat gerçek bina uygulamalarında geniş bir aralıktaki akımlar da dikkate alındığı için daha yüksek bir uyumu sağlamak amacıyla bu çalışmada parametrik olmayan yapay sinir ağları modelinden yararlanılmıştır.

## BÖLÜM 8. MR DAMPERİN KONTROL ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ

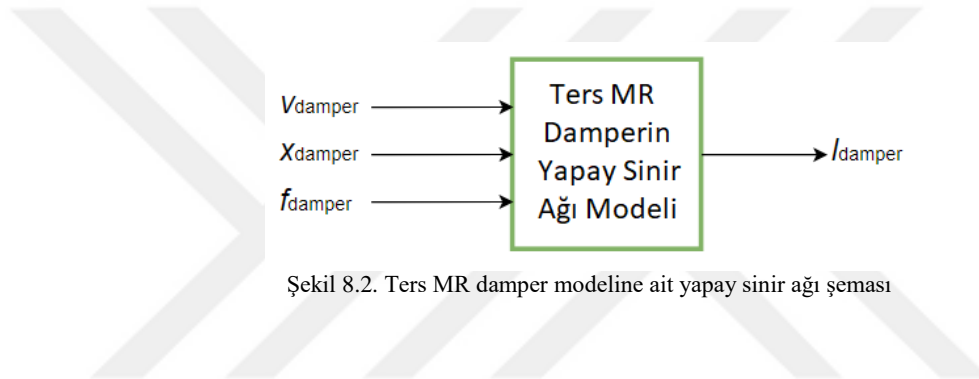
### 8.1. Kontrol Algoritmalarının Yapısı

MR damperin bir kontrol uygulamasında kullanılabilmesi için, MR damperin dinamik modelinin yanında; bu dinamik modelin, sisteme hangi kuvvet değerini sağlaması gerektiğini belirleyen bir kontrol algoritması gereklidir. Bu çalışma için konuşacak olursak, yapıya uygulanacak sönümün miktarını belirleyecek bir algoritmaya ihtiyaç duyulur. Bunun için yapının her bir katında bulunan sensörlerden alınan yerdeğiştirme, hız ve ivme verileri toplanarak kontrol için gerekli olan kuvvete karar veren algoritmalar geliştirilmiştir. Bu kuvvet belirlendikten sonra, dinamik model kullanılarak gerekli olan akım kolayca hesaplanarak MR damper beslenebilir. Bu çalışmada dinamik model olarak yapay sinir ağları modeli kullanılmıştır.



Şekil 8.1. Kontrol algoritmalarının akış şeması

Şekil 8.1.'de kontrol sürecinin akış şeması sunulmuştur. Bu akış şemasına göre model binaya sarsma tablasından gelen titreşim model binayı hareket ettirmekte ve bu hareket sonucunda model binanın katlarında oluşan yerdeğiştirme ve hız verileri sensörler vasıtasıyla anlık olarak ölçülür. Bu veriler kontrol algoritmasından geçer ve titreşimin sönümlenmesi için gereken kuvvet hesaplanır. Bu kuvvet değeri MR damperin hız ve konum değerleri dikkate alınarak ve yapay sinir ağları modelindeki ters MR damper dinamik modeli kullanılarak karşılık gelen akım değerine dönüştürülür. Bu akım, MR damperi besler ve böylece yapıdaki kontrol sağlanır. Kontrol sonucu yapıda oluşan çıktı değerler, sensörler vasıtasıyla yeniden kontrol algoritmasını besler. Bahsedilen döngü milisaniyeler içerisinde gerçekleşir.



Şekil 8.2.'de kontrol algoritmasında hesaplanan kuvvet değerinin yapay sinir ağları tabanındaki dinamik model ile MR dampere beslenen akıma nasıl dönüştürüldüğü gösterilmektedir. Buna göre istenen kuvvete karşılık gelen akım, MR damperin o andaki hızı ve yerdeğiştirmesi dikkate alınarak belirlenir. Girişteki üç parametre, yapay sinir ağları modelinin giriş katmanına aktarılan büyüklükleri göstermektedir. MR dampere iletilen akım ise modelin çıkış katmanını oluşturur. Modelin eğitimi Levenberg–Marquardt algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Eğitim verisi olarak Kısım 6.5. 'teki üretilen MR dampere ait test sonuçları kullanılmıştır. Modelde 3 adet gizli katman, 10 adet giriş nöronu ve 10'ar adet gizli katman nöronu kullanılmıştır. Hesaplamalar önce MATLAB ile gerçekleştirilmiş ardından QT ve Visual Studio yazılımı ile kontrolcü arayüzüne aktarılmıştır.

## 8.2. Uygulanan Kontrol Algoritmaları

Yapı modelini sismik sarsıntılara karşı korumak adına üç farklı kontrol algoritması uygulanmıştır. Bunlar literatürde yapılar için oldukça sık görülen kayma kipli kontrol, endüstride olarak oldukça yaygın olarak kullanılan PID kontrol ve bina enerjisini dikkate alana enerji tabanlı kontroldür.

### 8.2.1. Kayma kipli kontrol

Kayma kipli kontrol, sistem cevabını süreksiz bir kontrol sinyali ile belirlediği bir kayma düzlemi üzerinde tutmaya çalışarak kontrol gerçekleştirir. Kontrolcü, MR damperin bağlı bulunduğu kattaki yerdeğiştirme ve hız verileri ile beslenir. Kayma yüzeyi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\sigma = \alpha e + \beta \dot{e} \quad (8.1)$$

$e$  sistem hatasını temsil eder ve  $e = x_{ref} - x_1$  olarak ifade edilir.  $x_1$  ölçülen katın yerdeğiştirmesini ve  $x_{ref}$  referans yerdeğiştirmesini ifade eder.  $x_{ref}$ 'in hatayı minimuma düşürmek için sıfır olması gerektiğinden  $e = -x_1$  olmalıdır. Genel denklem ise aşağıdaki gibidir:

$$\dot{\sigma} + \lambda \sigma + \mu \text{sign}(\sigma) = 0 \quad (8.2)$$

$\lambda$  Lyapunov kararlılığından gelen pozitif değeri,  $\dot{\sigma}$  kayma yüzeyindeki değişimi ve  $\mu$  signum fonksiyonunu temsil etmektedir. Kayma yüzeyindeki değişim aşağıdaki şekilde açılabilir:

$$\dot{\sigma} = GB(u^{eq} - u) \quad (8.3)$$

$G = [\alpha \ \beta]$  şeklinde pozisyon ve hız için kontrolcü katsayılarını göstermektedir.  $B$  model dinamikleri vektörüdür.  $u^{eq}$  ise MR damper kuvvetinin bir önceki adımdaki değeridir. Denklem (8.3, Denklem (8.2'de yerine konulursa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$GB(u^{eq} - u) + (\lambda\sigma + \mu\text{sign}(\sigma)) = 0 \quad (8.4)$$

Denklem (8.4'teki kontrol ifadesi yalnız bırakılıp süreksiz zaman için yeniden düzenlenirse aşağıdaki ifade bulunur:

$$u[k] = u[k - 1] + (GB)^{-1}(\lambda\sigma + \mu\text{sign}(\sigma)) \quad (8.5)$$

Buradaki  $k$  örnekleme zamanını  $u$  ise MR damper kuvvetini temsil etmektedir. Böylece kontrol için dört adet ayarlanabilir parametre ortaya çıkar. Bunlar  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$  ve  $\mu$  katsayılarıdır.

### 8.2.2. PID kontrol

PID kontrol, kontrol algoritmaları arasında hem ticari hem de akademik anlamda en çok kullanılan kontrol algoritmalarından birisidir. PID kontrol en genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$u = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (8.6)$$

İfadedeki  $e$  hatayı  $K_p$  oransal katsayısını,  $K_i$  integral katsayısını,  $K_d$  türev katsayısını ve  $u$  kontrol büyüklüğünü ifade etmektedir. Kontrolcü, MR damperin bağlı olduğu kattaki hız değerini dikkate almakta ve kontrol, bu hızın sıfıra eşit olması esasına göre gerçekleşmektedir. Bu durumda hata değeri aşağıdaki şekilde olur:

$$e = v_{ref} - v_1 \quad (8.7)$$

Denklemdaki  $v_{ref}$  birinci kat için istenen referans hızını,  $v_1$  ise birinci katın hızını ifade etmektedir. Kontrolcünün ihtiyaç duyduğu hız değeri  $v_{ref} = 0$  olduğu, yani MR damperin bağlı olduğu birinci katın hızını sıfıra indirmek olduğu için  $e = -v_1$  olur. Bu durumda kontrol büyüklüğü  $u = f_{damper}$  olarak yeniden düzenlenirse;

$$f_{damper} = - \left[ K_p v_1 + K_i \int_0^t v_1 dt + K_d \frac{dv_1}{dt} \right] \quad (8.8)$$

ifadesi elde edilmektedir. Birinci kata ait pozisyon değerleri, bu kata bağlı olan pozisyon ölçerler ile ölçülmekte ve ilgili hız ve ivme değerleri bu ifadelerin türevinin alınmasıyla elde edilmektedir.

### 8.2.3. Enerji tabanlı kontrol

Sismik titreşim altındaki yapılarda, kinetik enerjilerin dikkate alındığı başka bir kontrol algoritması enerji tabanlı kontroldür. Buradaki hedef, yapıdaki enerjiyi minimum hale getirmektir. Bunun için, binanın katlarından alınan pozisyon verileri işlenerek anlık hız değerleri kullanılmıştır. Pozisyon ölçer olmayan katlar için ise hız bilgileri lineer interpolasyon ile elde edilmiştir. Model binanın toplam kinetik enerjisi aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$E_{top} = \sum_{i=1}^5 \left( \frac{1}{2} m_i v_i(t)^2 \right) \quad (8.9)$$

Toplam enerjinin sıfıra gitmesi için  $E_{top} \rightarrow 0$  olmalıdır. MR damper kuvveti aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$f_{damper} = K E_{top} \quad (8.10)$$

Buradaki  $K$  kontrolcü katsayısını temsil etmektedir.

### 8.3. Kontrolcü Arayüzünün Geliştirilmesi

MR damperin kontrol edilebilmesi ve verilerin toplanarak yeniden değerlendirilebilmesi için bir kontrol arayüzüne ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için SANLAB şirketinin geliştirmiş olduğu MR Damper Kontrol Sistemi yazılımı kullanılmıştır. Arayüz, hem MR damper verilerini kullanarak ters MR damper modeli için yapay sinir ağları yapısını oluşturmakta, hem kontrolcü katsayılarını ayarlamakta

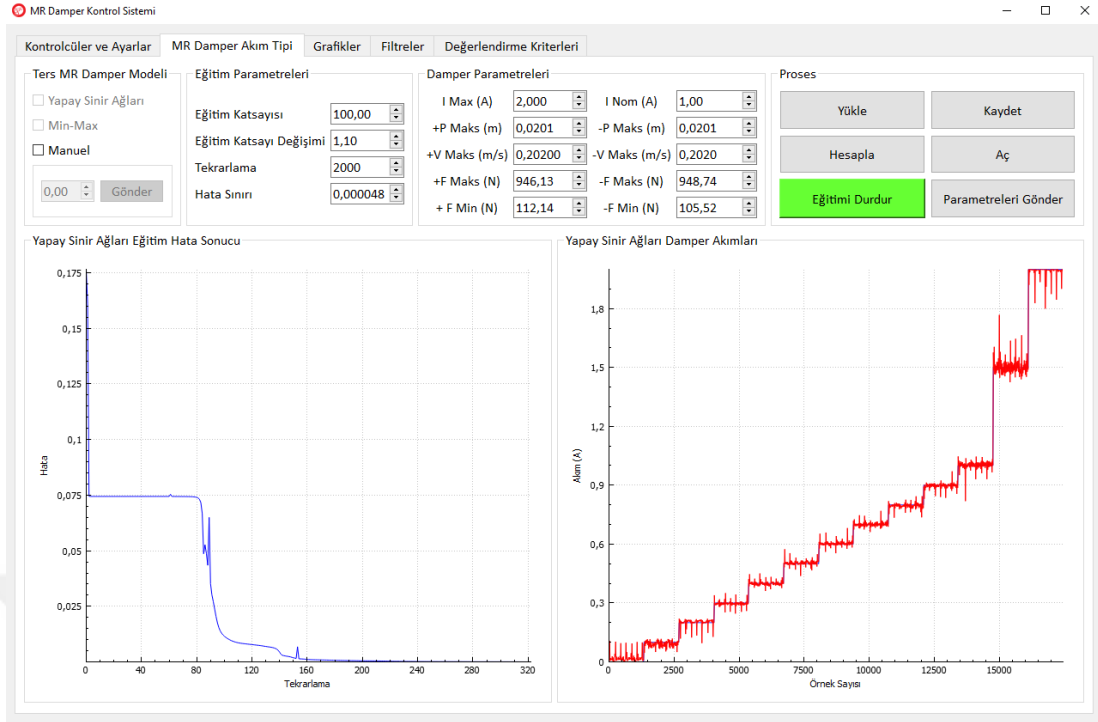
hem de gelen verileri kaydederek değerlendirmektedir. Arayüze ait sekmeler aşağıdaki şekildedir.

- Kontrolcüler ve ayarlar
- MR damper akım tipi
- Grafikler
- Filtreler
- Değerlendirme kriterleri

Şekil 8.3. Kontrolcüler ve ayarlar sekmesi

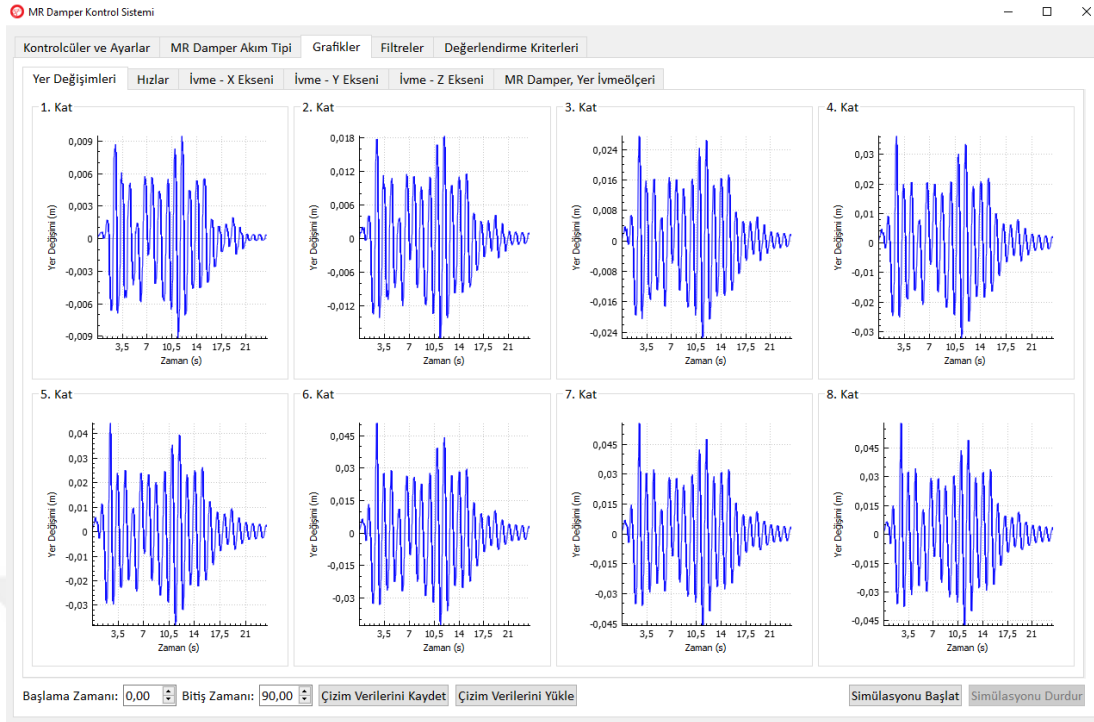
Şekil 8.3.'te gösterilen Kontrolcüler ve Ayarlar sekmesi kullanılarak 4 adet farklı kontrolcüye ait katsayılar yazılıma girilebilmektedir. Tez kapsamında bu kontrolcülerden model tabanlı kontrol dışındaki üçü kullanılmıştır.





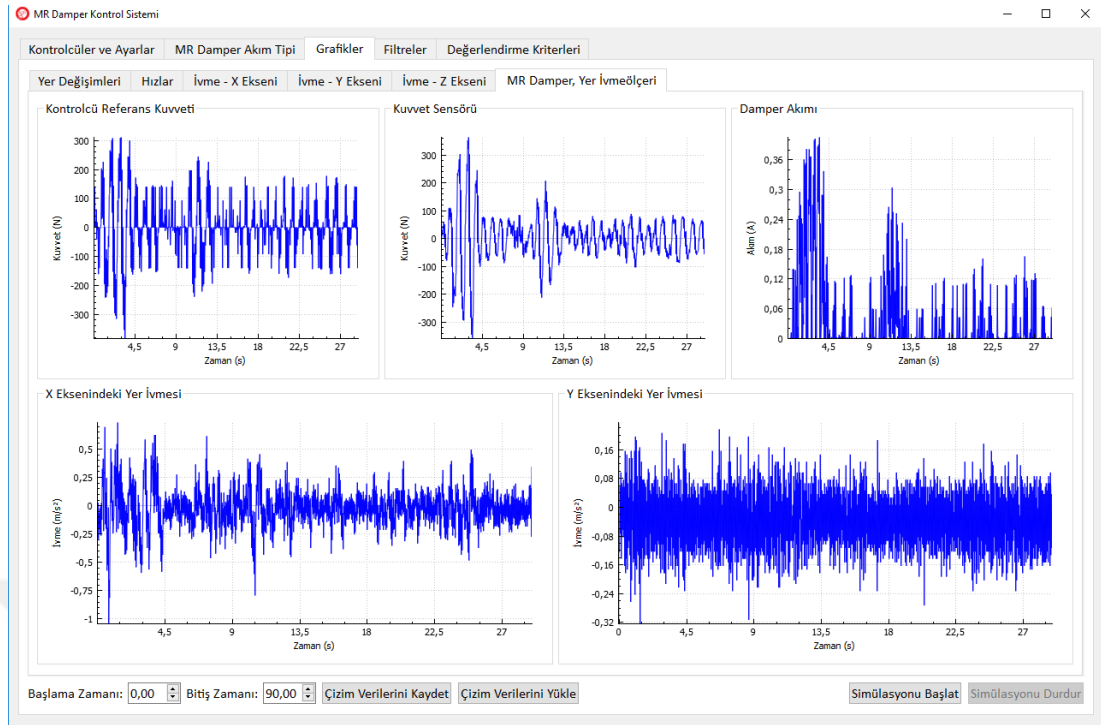
Şekil 8.4. MR damper akım tipi sekmesi

Şekil 8.4.'te gösterilen MR damper akım tipi sekmesi, MR dampere ait performans test verilerinin yapay sinir ağları tabanındaki dinamik modelin eğitimi için kullanıldığı sekmedir. Eğitimin katsayısı, tekrarlama (iterasyon) sayısı ve eğitimin durdurulacağı hata kriterleri bu sekmeden ayarlanmaktadır. Uzun tekrarlı eğitimler sonucunda büyük hatalar oluşabilirken; düşük tekrarlı eğitimlerde doğru cevap üretilememe durumu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle eğitimlerin deneme yanılma yöntemi ile optimum seviyede tutulabilmesi için bu ayarların önemi büyüktür. Ayrıca, bu sekmeden akım değeri manuel olarak seçilebilmektedir.



Şekil 8.5. Grafikler sekmesi, Yer Değişimleri alt sekmesi

Şekil 8.5.'te grafikler sekmesi görülmektedir. Bu sekmeden tüm katlara ait yer değiştirme, hız ve ivme verileri okunabilmektedir. Pozisyon ve hız verileri, pozisyon ölçerdeki verilerin işlenmesi ile elde edilmektedir. Ara katlar için ise ara değerler interpolasyon ile hesaplanır. İvme verileri ise doğrudan ivmeölçerden elde edilir. Arayüzde tüm verilerin kaydı yapılabilmekte veya kaydı yapılmış olan veriler izlenebilmektedir.



Şekil 8.6. Grafikler sekmesi, MR Damper, Yer İvmeölçeri alt sekmesi

Şekil 8.6.'da gösterilen alt sekmeden kontrolcünün belirlediği referans kuvvet ve kuvvet sensöründen ölçülen kuvvet kaydedilmektedir. Ayrıca kuvveti oluşturan akım büyüklüğü de anlık olarak takip edilebilmektedir.

Filtreler sekmesinden ivme veya yer değişimi verilerinin Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) veya Bant Geçiren Filtre Fonksiyonları, düşük geçiren (low pass), yüksek geçiren (High Pass), bant geçiren (Band Pass) veya bant durduran (Band Stop) filtreler ile uygulanabilmektedir. Değerlendirme Kriterleri sekmesinde, Kısım 9.4. 'te detaylı olarak anlatılan 6 adet karşılaştırma indeksi değeri hesaplanmaktadır.

## BÖLÜM 9. MODEL BİNA ÜZERİNDE MR DAMPER İLE KONTROL UYGULAMALARI

### 9.1. Yapı Modellerinin Geliştirilmesi

MR damperin sismik titreşimlere karşı ne kadar başarılı olduğunu ölçmek için öncelikle MR dampere uygun olarak yapı modellerinin belirlenmesi gereklidir. Bunun için önce yapı modeline ait tasarım yapılmış, ardından bu modellerin üretimi gerçekleştirilmiştir.

#### 9.1.1. Tasarım süreci

Yapı modellerinin tasarlanabilmesi için öncelikle dinamik olarak referans alınacak bir betonarme yapıya ihtiyaç vardır. Ölçüm verileri bulunan beş katlı bir betonarme bina bu çalışmada referans alınmıştır [144]. Referans alınan yapıya ait görseller Şekil 9.1.'de sunulmuştur.



Şekil 9.1. Referans alınan beş katlı betonarme binaya ait görseller

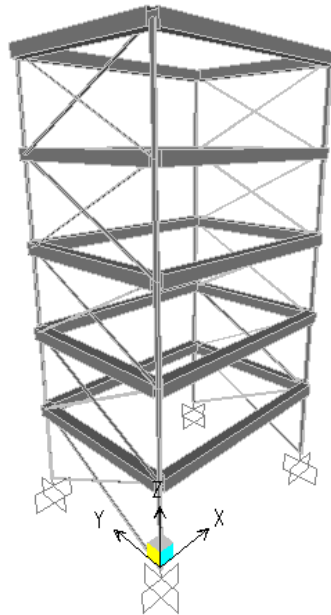
Aynı binanın karkas durumu için deneyler sonucunda elde edilmiş periyod ve doğal frekanslar ise Tablo 9.1.'de verilmiştir.

Tablo 9.1. Deney sonucu elde edilen bina frekansları

Mod	Frekans (Hz)	Periyod (s)
1	1.712	0.58
2	1.954	0.51
3	3.177	0.31
4	5.635	0.17

### 9.1.2. Üretim süreci

Tez kapsamında 5-8 katlı olmak üzere dört adet yapı modeli üretilmiştir. Bunun için öncelikle referans alınan betonarme yapının frekans değerlerine uygun, 5 katlı bir yapı modeli tasarlanmıştır. Bu modele ait çizim, Şekil 9.2.'de gösterilmiştir. MR damper yapının birinci katına yerleştirileceği için bu bölgedeki hız, yerdeğiştirme ve kesme kuvvetleri dikkate alınarak MR damperin strok değeri 50 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca optimizasyon ile tasarlanan MR damperin 1 A akım altında oluşturması gereken kuvvet, binanın ağırlığı ve maksimum yükler ve belirsizlikler dikkate alınarak 700 N olarak belirlenmiştir.



Şekil 9.2. Yapı modelinin sonlu elemanlar modeli

Yapı modellerinin kolonları  $6\text{ mm} \times 15\text{ mm}$  ebatlarında yüksek mukavemetli çelikten imal edilmiştir. İlgili çeliğin akma dayanımı  $750\text{ MPa}$ 'dır. 5 katlı çelik yapı, gerçek betonarme yapı frekans değerleri dikkate alınarak tasarlanmış ve diğer üç yapı modeli (6-8 katlı binalar) 5 katlı test modelinin geometri ve malzeme özellikleri korunarak ve kat sayısı artırılarak oluşturulmuştur. Katlarda kullanılan döşeme malzemesi  $15\text{ mm}$  kalınlığında St37 çeliğidir. İlgili frekans değerlerinin sağlanabilmesi için katlara  $13,2\text{ kg}$  ağırlık ilave edilmiştir. Bu ağırlıklar eklenirken ivmeölçerlerin ağırlıkları da dikkate alınmıştır. Deprem ivmeleri, yapı modeline tek eksenli (x yönü) olarak uygulandığı için diğer yöndeki (y yönü) hareket çapraz elemanlar ile engellenmiştir. 5-7 katlı çelik yapı modellerinin üretim sonrası görüntüleri Şekil 9.3.'te verilmiştir.



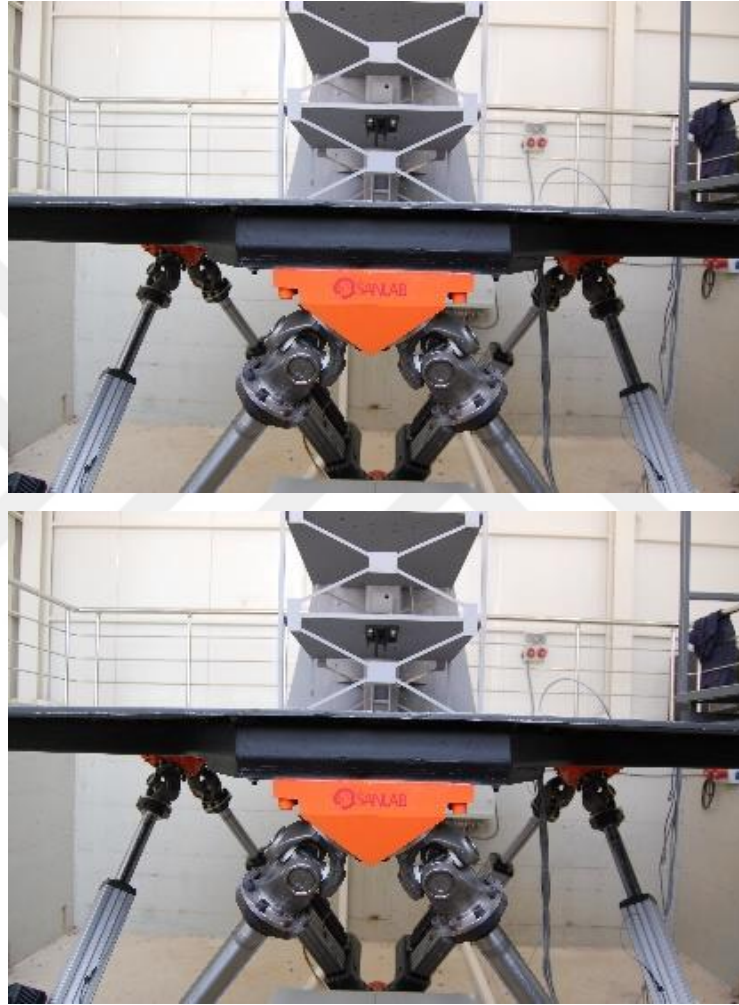
Şekil 9.3. Ölçeklendirilmiş çelik yapı modelleri, 5 katlı (solda), 6 katlı (ortada), 7 katlı (sağda)

## 9.2. Test Sisteminin Oluşturulması

Üretilen yapı modellerinin testlerinin yapılması için SANLAB SMotion 3000 markalı  $30\text{ kN}$  kapasiteli altı eksenli hareket platformu kullanılmıştır. Platform eni ve boyu  $2,5\text{ m}$ 'dir. Platforma ait özellikler Tablo 9.2.'de ve platforma ait görseller Şekil 9.4.'te verilmiştir.

Tablo 9.2. SANLAB SMotion 3000'e ait özellikler

	Pozisyon / Dönme	Hız / Açısal Hız	İvme / Açısal İvme
İleri / Geri (Surge)	$\pm 0,34$ m	$\pm 0,7$ m/s	$\pm 6$ m/s <sup>2</sup>
Yukarı / Aşağı (Sway)	$\pm 0,33$ m	$\pm 0,7$ m/s	$\pm 6$ m/s <sup>2</sup>
Sağ / Sol (Heave)	$\pm 0,34$ m	$\pm 0,55$ m/s	$\pm 8$ m/s <sup>2</sup>
Yatma (Roll)	$\pm 18^\circ$	$\pm 33^\circ/s$	$\pm 220^\circ/s^2$
Yunuslama (Pitch)	$\pm 18^\circ$	$\pm 34^\circ/s$	$\pm 220^\circ/s^2$
Dönme (Yaw)	$\pm 24^\circ$	$\pm 33^\circ/s$	$\pm 300^\circ/s^2$



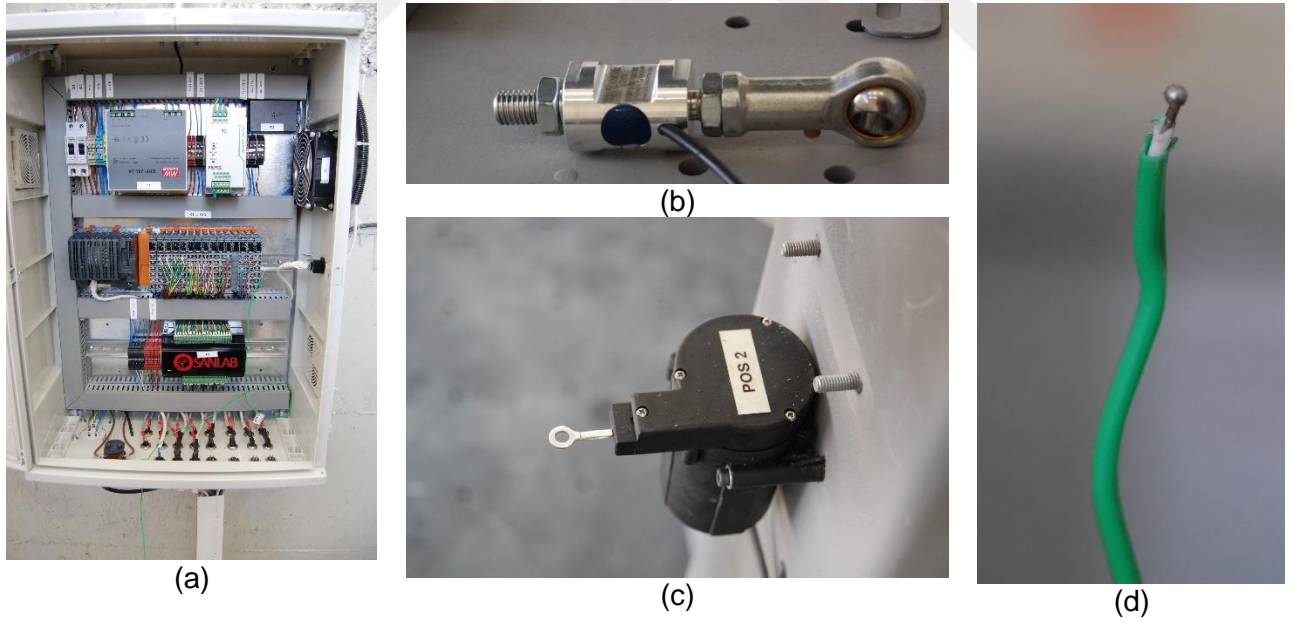
Şekil 9.4. SMotion 3000 hareket platformu

Pozisyon verilerini almak için 4 adet UniMeasure marka  $77 \mu\text{m}$  hassasiyete sahip 500 mm mesafe ölçebilen ipli pozisyon ölçer kullanılmıştır. Pozisyon ölçerler ara değerleri alabilmek için simetrik aralıklarla yerleştirilmiştir. İvme kayıtlarının alınabilmesi için  $\pm 3g$  aralığında 2400 mV/g hassasiyetle veri alabilen 4 adet SenseBox 7021 tek eksenli ve 4 adet SenseBox 7023 üç eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçerler her bir katın merkezine yerleştirilmiştir. Ayrıca MR damper üzerine gelen kuvvetler  $\pm 2$  kN

aralığında çalışabilen MeSysteme marka KM30z model yük hücresi yardımıyla kayda alınmıştır. Sıcaklık verileri MR damper üzerindeki k-tipi bir termoçift ile izlenmiş, MR dampere akım göndermek ve verileri toplamak amacıyla NI marka cDAQ-9184 kodlu kompakt DAQ şasesi üzerine yerleştirilmiş dört adet NI marka 9239 kodlu,  $\pm 10$  V aralığında çalışan dört kanallı voltaj giriş modülü kullanılmıştır. Kullanılan tüm ekipmanlara ilişkin görseller Şekil 9.5. ve Şekil 9.6.'da verilmiştir.



Şekil 9.5. İvmeölçerler, tek eksenli ivmeölçer (solda), Veri bağlantısı (ortada), üç eksenli ivmeölçer (sağda)

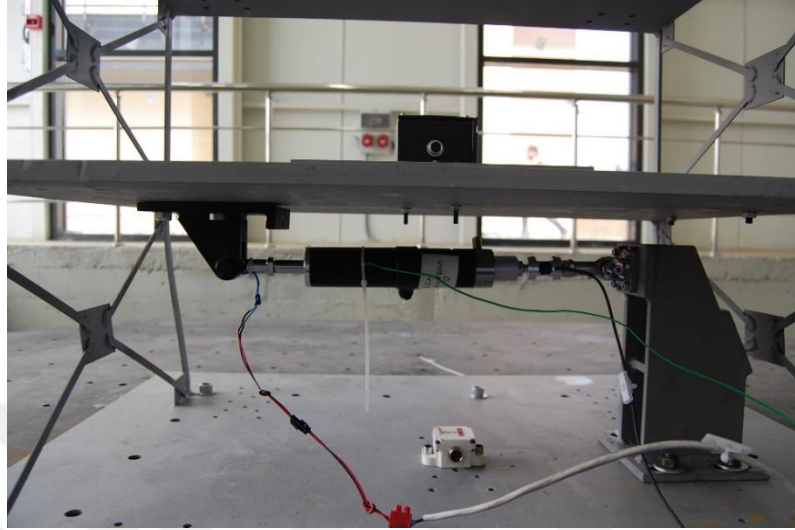


Şekil 9.6. (a) DAQ şasesi ve DAQ kartları, (b) yük hücresi, (c) pozisyon ölçer ve (d) termoçift

Sismik titreşimlerin sönümlenmesi için kullanılan MR damper birinci kata yatay olarak yerleştirilmiştir. MR damperin yerleştirilmiş hali Şekil 9.7.'de gösterilmiştir.

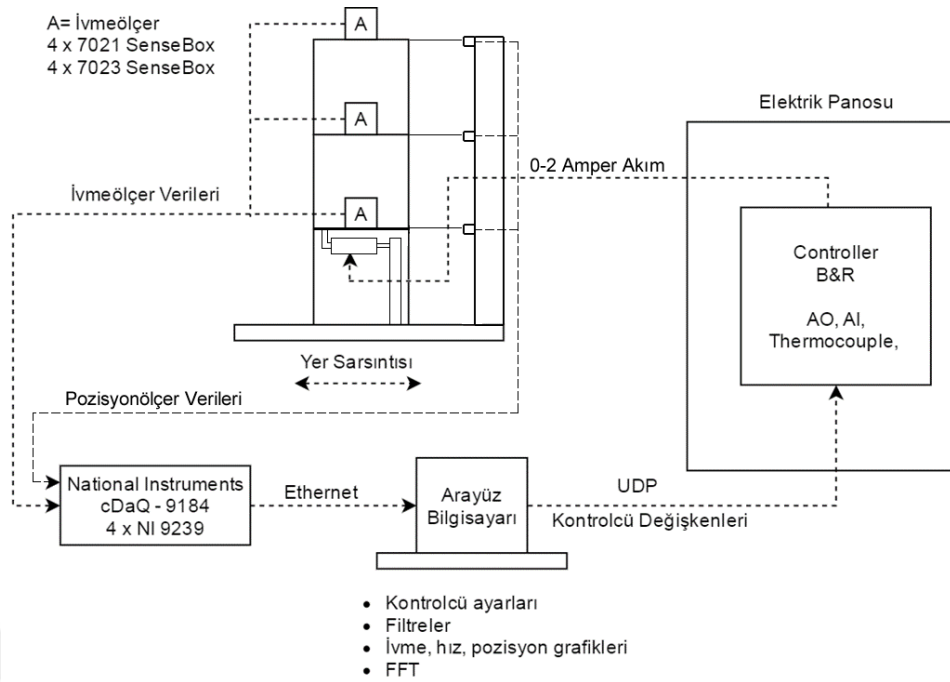


Çelik yapı modelleri vinç yardımıyla sarsma tablasına yerleştirmiş ve altı adet somun bağlantısı ile zemine sabitlenmiştir.



Şekil 9.7. MR damperin yerleşim şekli

Testlerin yapılmasında kullanılan ekipmanların düzeni Şekil 9.8.'deki blok diyagramda gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi testler sarsma tablasının hareketi ile başlamaktadır. Hareket neticesinde katlarda oluşan ivmeler ivmeölçer yardımıyla, pozisyon verileri ise pozisyon ölçerler yardımıyla kaydedilmektedir. Bu veriler bir veri toplama (DAQ) kartı ile toplanarak, arayüz bilgisayarına aktarılmakta ve burada SANLAB MR Damper Kontrol Sistemi yazılımında işlenmektedir. Kullanılan kontrolcüye göre MR dampere gönderilecek akım miktarı belirlenmekte ve bu bilgi elektrik panosuna iletilmektedir. Belirlenen akım DC olarak MR damperi beslemekte ve binayı dengede tutmaya çalışmaktadır. Bu süreç milisaniyeler içinde gerçekleşmekte ve binanın kontrolü anlık olarak sağlanmaktadır.



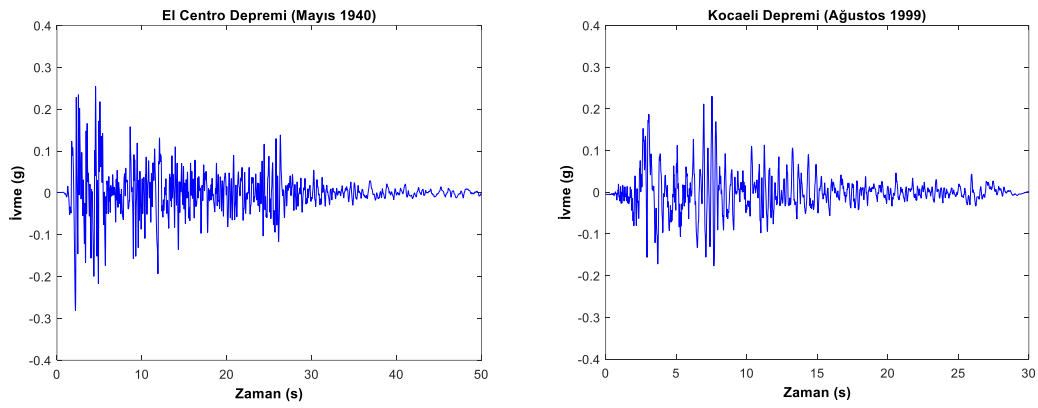
Şekil 9.8. Test düzeneğinin blok diyagramı

### 9.3. Deney Tasarımı

Testlerin gerçekleştirilebilmesi için iki farklı deprem kaydı kullanılmıştır. Bunlardan birincisi 18 Mayıs 1940 yılında El-Centro istasyonunda kaydedilen depremin kuzey-güney kayıtları diğeri ise 17 Ağustos 1999 yılında Kocaeli Yarımca-Petkim istasyonunda kaydedilen depremin doğu-batı bileşenidir. Deprem ivme genlikleri test yapılarının davranışının lineer elastik bölgede kalmasını sağlamak amacıyla belirli ölçekler ile küçültülmüştür. İlgili ölçeklendirilmiş büyüklükler Tablo 9.3.'te ve ivme-zaman grafikleri Şekil 9.9.'da verilmiştir.

Tablo 9.3. Deneylerde uygulanan deprem ivmelerinin ölçekleri

Kullanılan Deprem Kayıtları	Ölçek			
	5 katlı çelik model	6 katlı çelik model	7 katlı çelik model	8 katlı çelik model
El-Centro-1940	1,0	0,7	0,4	0,3
Kocaeli-1999	0,5	0,4	0,4	0,4



Şekil 9.9. Deneylerde kullanılan depremlerin ivme-zaman grafikleri, El-Centro (solda), Kocaeli (sağda)

Üretilen MR damper ve ticari bir MR damper kullanılarak, dört farklı bina ve iki farklı deprem verisi ile kayma kipli, PID ve enerji tabanlı kontrol olmak üzere üç farklı kontrol algoritması ve kontrolcüsüz durum için toplamda 64 adet test yapılmıştır.

#### 9.4. Değerlendirme Kriterlerinin Belirlenmesi

Sarsma tablası testleri yapılırken en önemli hususlardan birisi bu testler neticesinde MR damperin ve kontrolcülerin başarısının hangi kritere göre değerlendirileceğidir. Bunun için literatürde deprem etkisi altında test edilen yapıların gerek simülasyon gerekse deneysel durumu için kullanılan kabul görmüş değerlendirme kriterleri kullanılmıştır [145]. Bu kriterler yapısal tepkileri içeren katsayılardan oluşmakta ve çalışmalarda genellikle önem sırasına göre bu katsayıların ilk 6'sı kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan değerlendirme kriterleri aşağıda belirtilmiştir.

$$\begin{aligned}
J_1 &= \max \left[ \frac{\max_{t,i} \frac{|d_i(t)|}{h_i}}{\delta^{max}} \right] & J_4 &= \max \left[ \frac{\max_i \frac{\|d_i(t)\|}{h_i}}{\|\delta^{max}\|} \right] \\
J_2 &= \max \left[ \frac{\max_{t,i} |\ddot{x}_{ai}(t)|}{\ddot{x}_a^{max}} \right] & J_5 &= \max \left[ \frac{\max_i \|\ddot{x}_{ai}(t)\|}{\|\ddot{x}_a^{max}\|} \right] \\
J_3 &= \left[ \frac{\max |k_i \cdot x_i(t)|}{|F_b^{max}|} \right] & J_6 &= \left[ \frac{\|\max |k_i \cdot x_i(t)|\|}{\|F_b^{max}\|} \right]
\end{aligned} \tag{9.1}$$

Buna göre  $J_1$  ve  $J_4$  görelî kat yerdeğiştirmesini, göre  $J_2$  ve  $J_5$  kat ivmelerini ve  $J_3$  ve  $J_6$  taban kesme kuvvetlerini göstermektedir. Denklemlerdeki  $d_i$ , katlararası görelî yerdeğiştirmeyi;  $\ddot{x}_{ai}$ , her kat için ivmeyi;  $h_i$ , kat yüksekliğini;  $\delta$ , kontrolcüsüz durum için  $d_i/h_i$ 'yi;  $k_i$ , rijitlik katsayısını;  $F_b^{max}$ , kontrolcüsüz durum için  $k_i \cdot x_i$ 'yi ifade etmektedir. İlk üç katsayı olan  $J_1$ ,  $J_2$  ve  $J_3$  ilgili değerlerin maksimumları arasındaki oranın maksimum olduğu katın değerini ifade etmektedir. Diğer üç katsayı olan  $J_4$ ,  $J_5$  ve  $J_6$  ise kontrol edilmiş değerlerin karelerinin toplamının karekökünün, aynı katlardaki kontrol edilmemiş değerlerin karelerinin toplamının kareköküne oranının maksimum olduğu katın değerlerini vermektedir.

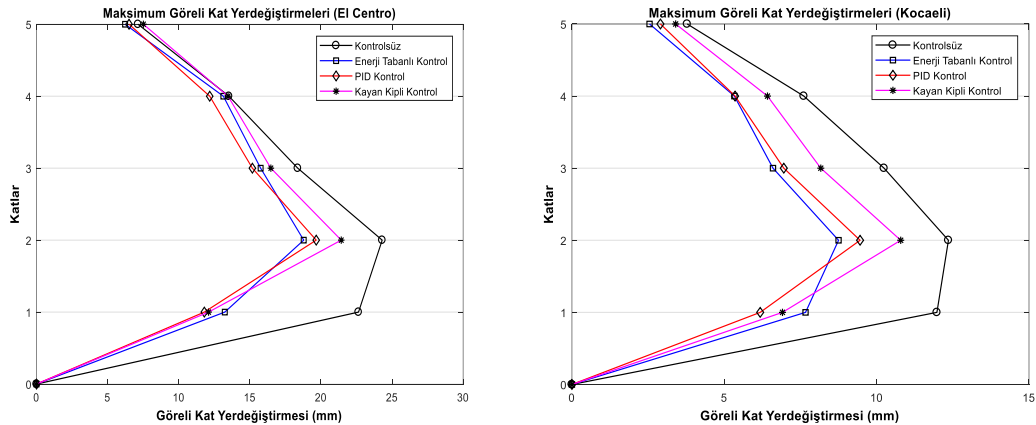
## 9.5. Bina Testleri

Yapılan testlerde üç farklı kontrol algoritması kullanılmıştır. Bu üç kontrolcü ile elde edilen sonuçlarının kıyaslanması adına her durum için bir de kontrolcüsüz test yapılmıştır. Sönümlemenin başarısını kıyaslamak için MR damperin tamamen sökülmesi yerine yapı modellerine bağlı olduğu ancak akım ile beslenmediği durum referans alınmıştır. Böylece kontrolcünün devrede olmasının önemi ortaya çıkmaktadır. MR damper, yapıya bağlı olup akım uygulamadığı zaman pasif kontrol elemanı gibi (passive-off) davranmaktadır. Akma sınırına yakın şekilde tasarlanan yapı modellerinin bu şekilde akım uygulanmadığı durumda dahi kalıcı deformasyona karşı ciddi oranda korunduğu görülmüştür.

Kontrolcü başarısını ölçmek için kullanılan bir başka referans, MR dampere sabit akım beslendiği (passive-on) durumdur. Bu durumda MR damper sabit bir akım ile beslenir fakat kontrol edilmez. Tez kapsamında yapılan testlerde passive-on kontrolün birinci katı oldukça rijit hale getirdiği gözlenmiştir. Bu durum, passive-on kontrolü passive-off'dan daha başarısız hale getirmektedir. Ayrıca bu durumda binada kalıcı deformasyon oluşma riski büyüktür. Bu nedenle, binada oluşabilecek deformasyonlardan kaçınmak ve daha zor bir referans koşulunu tercih ederek MR damperin başarısını gözler önüne sermek adına passive-off koşulu referans olarak tercih edilmiştir.

### 9.5.1. 5 Katlı bina testleri

Şekil 9.10.'da her bir kontrolcü için her hattaki katlar arası yer değişimi yani görelî yerdeğiştirme verilmiştir. Buna göre, 5 katlı bina için El-Centro deprem verisi altında enerji tabanlı kontrol ve PID kontrolün en başarılı sonucu verdiği görülmektedir. Kocaeli depreminde de bu iki algoritmanın öne çıktığı anlaşılmaktadır. Buna karşılık enerji tabanlı kontrolün PID ve kayma kipli kontrole göre etkisinin birinci katta %20 oranında daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 9.10. 5 katlı model binanın üç farklı kontrol algoritmasına göre görelî yer değiştirmeleri

Tablo 9.4. incelendiğinde üretilen MR damperin ticari MR damperden daha başarılı olduğu görülmektedir. Ticari MR damper yapıya gelen eş değer deprem yükünün

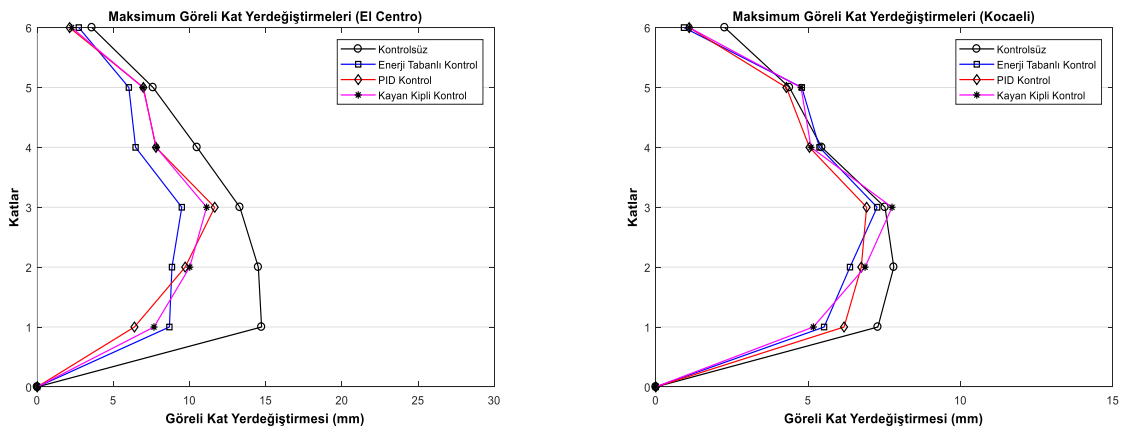
azaltılmasını temsil eden  $J_3$  indeksini kontrolcüsüz duruma göre %25 ile %40 arasında azaltırken, üretilen MR damper %36 ile %48 arasında bir azalma sağlamaktadır. Kontrol algoritmaları ele alındığında  $J_3$  ve  $J_6$  indekslerinde benzer şekilde PID ve enerji tabanlı kontrolün öne çıktığı görülmektedir.

Tablo 9.4. 5 Katlı model binanın sarsma testleri sonucunda elde edilen değerlendirme kriterleri

Lord Damper	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi						
	Kontrol Algoritması	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$
Kontrolcüsüz	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Enerji Tabanlı	1,0201	1,5400	0,7548	0,7743	0,9190	0,6808	0,7826	1,1794	0,7581	0,7795	0,8964	0,6710	0,6710
PID	0,9267	1,3409	0,6502	0,7577	0,7976	0,5149	0,8472	0,9365	0,6866	0,8322	0,8758	0,6445	0,6445
Kayma kipli	0,9732	1,0169	0,5974	0,7930	0,8728	0,4981	0,8803	0,9422	0,6336	0,8723	0,8916	0,6095	0,6095
Üretilen MR Damper	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi						
	Kontrol Algoritması	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$
Kontrolcüsüz	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Enerji Tabanlı	1,0129	1,0670	0,5846	0,5739	0,6909	0,4319	0,7113	0,9212	0,6400	0,6357	0,7850	0,4953	0,4953
PID	0,9151	1,0622	0,5212	0,5775	0,7465	0,3640	0,7659	0,9902	0,5158	0,6712	0,7399	0,4440	0,4440
Kayma kipli	1,0318	1,1523	0,5345	0,6311	0,8368	0,4356	0,8714	1,6015	0,5768	0,7247	1,1535	0,5286	0,5286

### 9.5.2. 6 Katlı bina testleri

Şekil 9.11. incelendiğinde El-Centro deprem verilerinde enerji tabanlı kontrolün görelî yerdeğıştirmelerini en düşük hale getirdiğı görülmektedir. Kocaeli depremi için ise tüm algoritmalar birbirine yakın sonuçlar vermektedir.



Şekil 9.11. 6 katlı model binanın üç farklı kontrol algoritmasına göre görelî yer değıştirmeleri

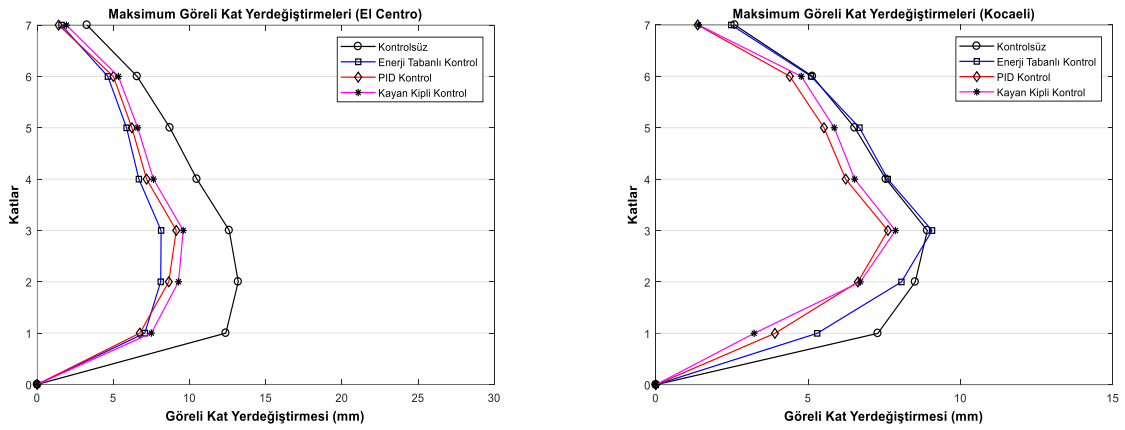
Tablo 9.5.'e bakıldığında El-Centro depremi için  $J_3$  indeksinde PID kontrol ile %50'ye varan bir iyileşme göze çarpmaktadır. Bu sonuç, kontrol algoritmaları ile testlerde elde edilen en iyi sonuçtur. Fakat PID kontrol, Kocaeli depreminde aynı indekste en kötü sonucu vermektedir. Bu durum kontrol algoritmalarının başarılarının deprem verilerine göre ciddi oranda değiştiğini gözler önüne sermektedir.

Tablo 9.5. 6 Katlı model binanın sarsma testleri sonucunda elde edilen değerlendirme kriterleri

Lord MR Damper	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi						
	Kontrol Algoritması	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$
Kontrolcüsüz	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Enerji Tabanlı	1,0255	1,2347	0,7694	0,8700	0,9883	0,6708	0,9898	1,1395	0,8292	0,9397	0,9592	0,8169	
PID	0,9499	1,1369	0,7752	0,9195	0,9563	0,7057	1,0556	1,4418	0,8114	0,9732	0,9745	0,8218	
Kayma kipli	1,0410	1,2845	0,6260	1,0053	0,9732	0,5923	1,0498	1,1220	0,9110	0,9797	0,9822	0,9257	
Üretilen MR Damper	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi						
Kontrol Algoritması	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	
Kontrolcüsüz	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
Enerji Tabanlı	0,9523	1,1757	0,6695	0,6928	0,7998	0,5227	1,0910	1,1234	0,7578	0,8658	0,9225	0,7135	
PID	0,9320	1,1056	0,5034	0,7914	0,7526	0,4300	0,9775	1,1038	0,8478	0,8751	0,8886	0,7319	
Kayma kipli	0,9324	1,0551	0,6181	0,7660	0,7508	0,5102	1,0857	1,1137	0,7093	0,9154	0,9149	0,6574	

### 9.5.3. 7 Katlı bina testleri

Şekil 9.12. incelendiğinde El-Centro depreminde enerji tabanlı kontrol küçük bir farkla başarılı olmakla beraber kontrolcülerin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Kocaeli deprem verileri için ise enerji tabanlı kontrol dışındaki kontrolcüler başarılıdır. Enerji tabanlı kontrolün Kocaeli deprem verileri karşısındaki başarısı, katların artması ile beraber kötüleşmekte ve sadece alt katlarda başarılı sonuçlar alınabilmektedir.



Şekil 9.12. 7 katlı model binanın üç farklı kontrol algoritmasına göre görel yer değiştirmeleri

Tablo 9.6. incelendiğinde Kocaeli deprem ivmesi altında 7 katlı binalarda kontrol algoritmalarının nispeten başarısız olduğu görölmektedir. Buna karşılık El-Centro depremi altında, üretilen MR damperin yüksek başarısı dikkat çekmektedir. PID algoritması ile  $J_6$  indeksinde %52 oranında bir azalma sağlanmıştır.

Tablo 9.6. 7 Katlı model binanın sarsma testleri sonucunda elde edilen değerlendirme kriterleri

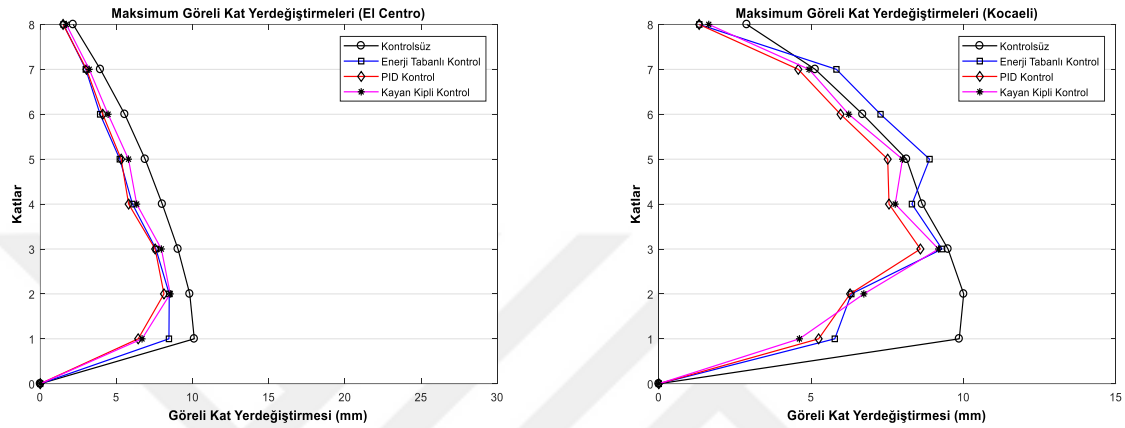
Lord MR Damper	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi						
	Kontrol Algoritması	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$
Kontrolsüz	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Enerji Tabanlı	0,8507	1,2170	0,7195	0,7983	0,8959	0,6579	1,0082	1,1415	0,8679	0,9482	1,0060	0,8340	
PID	0,7814	1,1483	0,7655	0,8593	0,9029	0,7292	0,9476	0,9596	0,9321	0,9913	0,9832	0,8796	
Kayma kipli	0,8204	0,9834	0,7218	0,8825	0,9109	0,6849	0,9790	1,0441	0,8607	0,9939	1,0052	0,8367	
Üretilen MR Damper	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi						
	Kontrol Algoritması	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$
Kontrolsüz	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	
Enerji Tabanlı	0,7078	0,8988	0,6212	0,6751	0,7974	0,5238	1,0373	1,1266	0,8586	0,9483	0,9633	0,8818	
PID	0,7618	0,7822	0,5438	0,7170	0,7266	0,4862	0,9458	2,0098	0,6931	0,9757	0,9035	0,6781	
Kayma kipli	0,8116	2,0556	0,6049	0,7547	1,4016	0,5609	0,9689	1,0695	0,8345	0,9938	0,9493	0,8065	

#### 9.5.4. 8 Katlı bina testleri

Şekil 9.13. incelendiğinde El-Centro depreminde kontrolcüler, 7 katlı binadakine benzer şekilde birbirine yakın bir başarıya sahiptirler. Kocaeli depreminde ise enerji tabanlı kontrolün başarısızlığı göze çarpmaktadır. Üst katlar dikkate alındığında,



kontrolcüsüz duruma göre daha büyük görelî yerdeğiştirmeler oluşmakta ve bu durum binanın kontrolcüsüz duruma göre daha fazla potansiyel enerji ile yüklendiğini göstermektedir. Öte yandan, diğer kontrolcülerin başarısı kat sayısı arttıka görünü bir şekilde azalmaktadır. Bu durum yüksek katlı binalar için iki veya daha fazla MR damper uygulamasının gerekli olabileceğini göstermektedir.



şekil 9.13. 8 katlı model binanın üç farklı kontrol algoritmasına göre görelî yer değiştirmeleri

Tablo 9.7. incelendiğinde  $J_3$  indeksiyle verilen taban kesme kuvvetlerinin nerdeyse düşük katlı binalarda olduğu kadar başarılı olduğu göze çarpmaktadır. Bu durum, üst katlardaki görelî kat yerdeğiştirmesindeki başarısızlığa karşılık yapıya gelen statik eşdeğer deprem yükünün azaltılabildiğini göstermektedir. Genel sonuçlara baktığımızda  $J_6$  indeksinde %55'e varan iyileşme görülmektedir.

Tablo 9.7. 8 Katlı model binanın sarsma testleri sonucunda elde edilen değerlendirme kriterleri

Lord MR Damper	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi						
	Kontrol Algoritması	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$
Kontrolcüsüz	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Enerji Tabanlı	0,9122	0,9990	0,7913	0,9320	1,0418	0,7656	1,0757	1,0621	1,0062	0,9748	0,9803	0,9704	0,9704
PID	0,8976	1,0395	0,7236	0,9637	1,0126	0,7397	1,0104	1,2327	0,8820	0,8664	0,8948	0,6944	0,6944
Kayma kipli	0,8792	0,9769	0,7724	0,9926	0,9949	0,7766	1,0340	1,0817	0,9037	0,8959	0,9232	0,7628	0,7628
Üretilen MR Damper	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi						
	Kontrol Algoritması	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$
Kontrolcüsüz	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Enerji Tabanlı	0,8643	1,1633	0,8354	0,9115	0,9758	0,8004	1,1342	1,4481	0,7110	0,6580	0,8152	0,5297	0,5297
PID	0,8394	1,1385	0,6359	0,9171	0,9432	0,6663	0,9260	1,5124	0,7187	0,6385	0,8378	0,4768	0,4768
Kayma kipli	0,8785	1,1704	0,6608	0,9607	0,9784	0,6883	0,9858	1,0610	0,5933	0,6924	0,7425	0,4497	0,4497

## 9.6. Tüm Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deprem etkisi altındaki yapıların davranışı dikkate alındığında performans indeksleri arasında en önemli parametre taban kesme kuvveti olarak kabul edilmektedir. Taban kesme kuvveti aynı zamanda yapıya aktarılan enerji ile ilişkilidir. Dolayısıyla  $J_3$  indeksinin küçültülebilmesi yapısal malzemedeki potansiyel bozulma ve akmaların önüne geçilmesi için kritiktir.  $J_6$  indeksinin küçültülmesi ise bina elemanlarındaki yorulmayı azaltabilir. Bu nedenle tüm yapı modelleri açısından hem kontrol algoritmalarının hem de MR damperlerin performansını birlikte değerlendirmek amacıyla  $J_3$  indeksi Tablo 9.8. ve Tablo 9.9.'da sunulmuştur. Bu tablolarda  $J_3$  performans indeksleri yani taban kesme kuvveti oranları tüm yapı modelleri için bir araya getirilmiştir.

Tablo 9.8. Tüm bina ve kontrolcülerin El-Centro depremi altında  $J_3$  katsayı değerleri

		Lord MR Damper	Üretilen MR Damper
5 Katlı	Enerji Tabanlı	0,7548	0,5846
	PID	0,6502	0,5212
	Kayma kipli	0,5974	0,5345
6 Katlı	Enerji Tabanlı	0,7694	0,6695
	PID	0,7752	0,5034
	Kayma kipli	0,626	0,6181
7 Katlı	Enerji Tabanlı	0,7195	0,6212
	PID	0,7655	0,5438
	Kayma kipli	0,7218	0,6049
8 Katlı	Enerji Tabanlı	0,7913	0,8354
	PID	0,7236	0,6359
	Kayma kipli	0,7724	0,6608

Tablo 9.9. Tüm bina ve kontrolcülerin Kocaeli depremi altında  $J_3$  katsayı değerleri

		Lord MR Damper	Üretilen MR Damper
5 Katlı	Enerji Tabanlı	0,7581	0,640
	PID	0,6866	0,5158
	Kayma kipli	0,6336	0,5768
6 Katlı	Enerji Tabanlı	0,8292	0,7578
	PID	0,8114	0,8478
	Kayma kipli	0,911	0,7093
7 Katlı	Enerji Tabanlı	0,8679	0,8586
	PID	0,9321	0,6931
	Kayma kipli	0,8607	0,8345
8 katlı	Enerji Tabanlı	1,0062	0,711
	PID	0,882	0,7187
	Kayma kipli	0,9037	0,5933

Tablolar incelendiğinde öncelikle üretilen MR damperin ticari MR dampere göre daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir. Minimum değerler dikkate alındığında üretilen MR damper, ticari MR dampere göre  $J_3$  indeksinde %23 ve  $J_6$  indeksinde %13 oranında daha başarılı olmuştur. Kontrolcülere baktığımızda ise PID kontrol, El-Centro depremi altında, üretilen MR damper ile en başarılı sonucu veren algoritma olarak karşımıza çıkmaktadır. Kocaeli depreminde de benzer şekilde PID en başarılı algoritma olarak gözükmemektedir.  $J_6$  indeksinde minimum düşüş, PID kontrol ile %50, kayma kipli kontrol ile %47 ve enerji tabanlı kontrol ile %42 oranındadır. Buna karşılık ticari MR damper kullanıldığında algoritmaların başarısında önemli farklar oluşabilmektedir. Bu durum algoritmaların başarısının kullanılan MR dampere bağlı olabileceğine bir işarettir.

Deneylerin tamamındaki karşılaştırma indekslerinde, yapı modellerinde MR damperin bulunduğu ve akım uygulanmadığı durum referans olarak alınmıştır. Dolayısıyla hiç damper kullanılmadığı koşulların referans alınması durumunda iyileşmenin çok daha büyük değerlere karşılık geleceği açıktır.

## BÖLÜM 10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında, sismik titreşim altındaki yapıların yarı-aktif kontrolünde kullanılmak üzere bir MR damper, özgün bir HAD yaklaşımı ile tasarlanmış ve optimize edilmiştir. Bu MR damper imal edilmiş ve çeşitli kontrol algoritmaları kullanılarak yapı modellerine uygulanmıştır.

MR damperin HAD ile modellenmesi için, bu çalışmada MR sıvının karmaşık reolojik özelliklerini temsil eden yeni dört farklı yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlardan kayma gerilmesi interpolasyonu yaklaşımı deney verilerine göre, maksimum kuvveti %1'in altında ve ortalama kuvvet değerini %2,34 hata ile tahmin etmiştir. Bu değerler bir MR damperin modellenmesi için oldukça başarılı değerlerdir. Ayrıca bu çalışmada önerilen diğer iki adet yaklaşımın deney verilerini % 4,9 ve % 6 hata ile başarılı bir şekilde tahmin ettiği görülmüştür.

Geliştirilen bu yeni yaklaşımlar sayesinde kanal içindeki akış profili daha gerçekçi bir şekilde elde edilmektedir. Geliştirilen bu yaklaşımlar, MR sıvı ile birlikte Newton tipi olmayan akışkanlar için de kullanılabilir. Ayrıca bu yaklaşımlar sayesinde, hiçbir reolojik modele uymayan akışkanların HAD ile modellenmesi mümkün hale gelmektedir.

Geliştirilen yaklaşımlardan en başarılı olan kayma gerilmesi interpolasyonu yaklaşımı, MR damperin optimizasyonu için gerçekleştirilen HAD analizlerinde kullanılmış ve elde edilen sonuçlara göre bir MR damper imal edilmiştir. Kullanılan yaklaşım yardımıyla gerçekleştirilen HAD analizleri, üretilen MR damperin test sonuçları ile bir kez daha doğrulanmıştır. Böylece, kullanılan yaklaşımın başarısı bir kez daha ispatlanmıştır.

Yapı kontrolü için geliştirilen kontrol algoritmalarından PID kontrol,  $J_3$  indeksini kontrolcüsüz duruma göre maksimum %50 ve kayma kipli kontrol %47 oranında azaltmıştır. Bu başarının arkasında MR damper dinamik modelinin yapay sinir ağları kullanılarak hassas bir şekilde kontrolcüye aktarılması yatmaktadır. Ancak yapı modellerinde kat sayısı arttıkça kontrolcülerin başarısı azalmaktadır. Bu nedenle kat sayısı arttıkça kontrolün üst katlarda da etkin bir şekilde sağlanabilmesi için daha fazla sayıda MR damperin kullanılması gereklidir.

Ayrıca gerçekleştirilen testler, deprem verilerinin kontrolcülerin başarılarını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Belirli bir kat sayısı ve deprem verisi altında başarılı olan bir kontrolcü, farklı koşullarda başarısız olabilmektedir. Bu durum, kontrolcülerin deprem verisinden bağımsız hale getirilmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca pratik uygulamalar için daha geniş deprem verileri ile başarılı bir şekilde çalışabilen ve yapıya potansiyel enerji yüklemeyen kontrol algoritmaları geliştirilebilir.

Tamamen yerli imkanlar ile üretilen MR damper, ticari bir MR damper olan LORD-RD-8041-1'e göre  $J_3$  indeksinde %23 oranında bir iyileşme sağlamıştır. MR damperin potansiyel kullanım alanları da dikkate alındığında bu durum ülkemiz için önemli bir başarıdır.

Bina testlerindeki tüm sonuçlar dikkate alındığında  $J_3$  indeksinde maksimum %50 ve  $J_6$  indeksinde maksimum %55 oranında bir düşüş gerçekleşmiştir. Bu düşüş, bir binanın can güvenliği seviyesinden, deprem sonrası hemen kullanım seviyesine gelmesini sağlamaktadır.

İnşaat mühendisliği uygulamalarında yapıların dinamik etkilere karşı korunmasında kullanılacak MR damperlerin yaygın hale gelmesi için kamu kurumlarınca belirli standartlar belirlenmesi gereklidir. Ayrıca, MR damperlerin çok daha büyük ölçekte üretilmesi için imalat süreçleri seri hale getirilerek kolaylaştırılmalıdır. Ülkemizde ve özellikle İstanbul ve çevresindeki deprem tehdidi dikkate alınırca, çalışmada önerilen uygulamanın düşük maliyetli hale getirilmesi halinde yaygın olarak kullanılabilmesi mümkün hale gelebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] D. Giardini *vd.*, “Seismic hazard map of the Middle East”, *Bull. Earthq. Eng.*, c. 16, sayı 8, ss. 3567–3570, 2018, doi: 10.1007/s10518-018-0347-3.
- [2] Ö. Sür, “Türkiye’nin Deprem Bölgeleri”, *Türkiye Coğrafyası Derg.*, c. 2, ss. 53–68, 1993.
- [3] B. Özmen, “17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depremi’nin Hasar Durumu”, Ankara, 2000.
- [4] Federal Emergency Management Agency, *Primer for Design Professionals: Communicating with Owners and Managers of New Buildings on Earthquake Risk*. Books Express Publishing, 2004.
- [5] Sabah gazetesi, “Kandilli Rasathanesi’nden büyük deprem uyarısı geldi! ‘Sona yaklaşıyoruz...’”, *Sabah gazetesi*, İstanbul, 27-Eyl-2019.
- [6] I. G. Buckle ve R. L. Mayes, “Seismic Isolation: History, Application, and Performance—A World View”, *Earthquake Spectra*, c. 6, sayı 2. ss. 161–201, 1990, doi: 10.1193/1.1585564.
- [7] T. T. Soong ve B. F. Spencer, “Supplemental energy dissipation: State-of-the-art and state-of-the-practice”, *Eng. Struct.*, c. 24, sayı 3, ss. 243–259, 2002, doi: 10.1016/S0141-0296(01)00092-X.
- [8] H. M. Narito Kurata, Takuji Kobori, Motoichi Takahashi, Naoki Niwa, “Actual seismic response controlled building with semi-active damper system”, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, c. 28, sayı April, ss. 1427–1447, 1999.
- [9] W. M. Winslow, “Method and means for translating electrical impulses into mechanical force”, US2417850A, 1947.
- [10] N. C. Rosenfeld ve N. M. Wereley, “Volume-constrained optimization of magnetorheological and electrorheological valves and dampers”, *Smart Mater. Struct.*, c. 13, sayı 6, ss. 1303–1313, 2004, doi: 10.1088/0964-1726/13/6/004.
- [11] Lord Corporation, “How Does an MR Damper Work?” [Çevrimiçi]. Available at: <https://www.lord.com/products-and-solutions/active-vibration-control/industrial-suspension-systems/how-does-mr-damper-work>. [Erişim: 29-Oca-2020].

- [12] J. de Vicente, D. J. Klingenberg, ve R. Hidalgo-Alvarez, “Magnetorheological fluids: a review”, *Soft Matter*, c. 7, sayı 8, s. 3701, 2011, doi: 10.1039/c0sm01221a.
- [13] F. D. Goncalves ve J. D. Carlson, “An alternate operation mode for MR fluids—magnetic gradient pinch”, *J. Phys. Conf. Ser.*, c. 149, s. 012050, 2009, doi: 10.1088/1742-6596/149/1/012050.
- [14] B. Ebrahimi, “Development of Hybrid Electromagnetic Dampers for Vehicle Suspension Systems”, University of Waterloo, 2009.
- [15] X. Zhu, X. Jing, ve L. Cheng, “Magnetorheological fluid dampers: A review on structure design and analysis”, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, c. 23, sayı 8, ss. 839–873, 2012, doi: 10.1177/1045389X12436735.
- [16] Q. Wang, M. Ahmadian, ve Z. Chen, “A novel double-piston magnetorheological damper for space truss structures vibration suppression”, *Shock Vib.*, c. 2014, sayı January 2016, 2014, doi: 10.1155/2014/864765.
- [17] A. Farjoud, N. Vahdati, ve Y. F. Fah, “MR-fluid yield surface determination in disc-type MR rotary brakes”, *Smart Mater. Struct.*, c. 17, sayı 3, 2008, doi: 10.1088/0964-1726/17/3/035021.
- [18] F. Imaduddin, S. A. Mazlan, ve H. Zamzuri, “A design and modelling review of rotary magnetorheological damper”, *Mater. Des.*, c. 51, ss. 575–591, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.04.042.
- [19] Formula 1 Dictionary, “Magnetic Damper - Magnetorheological Damper”. [Çevrimiçi]. Available at: [http://www.formula1-dictionary.net/damper\\_magnetorheological.html](http://www.formula1-dictionary.net/damper_magnetorheological.html). [Erişim: 29-Oca-2020].
- [20] J. Q. Zhang, Z. Z. Feng, ve Q. Jing, “Optimization analysis of a new vane MRF damper”, *J. Phys. Conf. Ser.*, c. 149, s. 012087, 2009, doi: 10.1088/1742-6596/149/1/012087.
- [21] S. B. Choi, M. H. Nam, ve B. K. Lee, “Vibration control of a MR seat damper for commercial vehicles”, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, c. 11, sayı 12, ss. 936–944, 2001, doi: 10.1106/AERG-3QKV-31V8-F250.
- [22] K. Karakoc, E. J. Park, ve A. Suleman, “Design considerations for an automotive magnetorheological brake”, *Mechatronics*, c. 18, sayı 8, ss. 434–447, 2008, doi: 10.1016/j.mechatronics.2008.02.003.
- [23] H. Böse, T. Gerlach, ve J. Ehrlich, “Magnetorheological torque transmission devices with permanent magnets”, *J. Phys. Conf. Ser.*, c. 412, sayı 1, 2013, doi: 10.1088/1742-6596/412/1/012050.
- [24] M. Hanlon, “Audi’s new magnetic semi-active suspension system”, 2006. [Çevrimiçi]. Available at: <https://newatlas.com/audis-new-magnetic-semi-active-suspension-system/5752>. [Erişim: 01-Şub-2020].

- [25] B. Spencer, S. Nagarajaiah, ve N. S. Spencer B.F., “State of the art of structural control”, *J. Struct. Eng.*, c. 129, sayı July, ss. 845–856, 2003, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129.
- [26] Z. Q. Chen, X. Y. Wang, J. M. Ko, Y. Q. Ni, B. F. Spencer, Jr., ve G. Yang, “MR damping system on Dongting Lake cable-stayed bridge”, *Smart Struct. Mater. 2003 Smart Syst. Nondestruct. Eval. Civ. Infrastructures*, c. 5057, sayı August, s. 229, 2003, doi: 10.1117/12.498072.
- [27] J. Blake ve H. B. Gurocak, “Haptic glove with MR brakes for virtual reality”, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, c. 14, sayı 5, ss. 606–615, 2009, doi: 10.1109/TMECH.2008.2010934.
- [28] J. D. Carlson, W. Matthis, ve J. R. Toscano, “Smart Prosthetics Based On Magnetorheological Fluids”, c. 4332, ss. 308–316, 2001.
- [29] T. Yang, Y. Gao, J. Zhao, S. Wang, ve Y. Zhu, “A rotary magnetorheological fluid damper for pathological tremor suppression”, *2012 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom. ICMA 2012*, sayı 1, ss. 575–580, 2012, doi: 10.1109/ICMA.2012.6283171.
- [30] Z. C. Li ve J. Wang, “A gun recoil system employing a magnetorheological fluid damper”, *Smart Mater. Struct.*, c. 21, sayı 10, 2012, doi: 10.1088/0964-1726/21/10/105003.
- [31] M. Ahmadian, R. Appleton, ve J. A. Norris, “An analytical study of fire out of battery using magneto rheological dampers”, *Shock Vib.*, c. 9, sayı 3, ss. 129–142, 2002, doi: 10.1155/2002/983140.
- [32] S. H. Ha, M. S. Seong, ve S. B. Choi, “Design and vibration control of military vehicle suspension system using magnetorheological damper and disc spring”, *Smart Mater. Struct.*, c. 22, sayı 6, 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/6/065006.
- [33] N. Caterino, “Semi-active control of a wind turbine via magnetorheological dampers”, *J. Sound Vib.*, c. 345, ss. 1–17, 2015, doi: 10.1016/j.jsv.2015.01.022.
- [34] C. Spelta, F. Previdi, S. M. Savaresi, G. Fraternali, ve N. Gaudio, “Control of magnetorheological dampers for vibration reduction in a washing machine”, *Mechatronics*, c. 19, sayı 3, ss. 410–421, 2009, doi: 10.1016/j.mechatronics.2008.09.006.
- [35] G. M. Kamath, N. M. Wereley, ve M. R. Jolly, “Characterization of magnetorheological helicopter lag dampers”, *J. Am. Helicopter Soc.*, c. 44, sayı 3, ss. 234–248, 1999, doi: 10.4050/jahs.44.234.
- [36] G. Mikulowski ve J. Holnicki-szulc, “Adaptive Aircraft Shock Absorbers”, *Inst. Fundam. Technol. Res. Smart Tech Centre, Polish Acad. Sci. Warsaw, Pol.*, c. 3, sayı July, ss. 12–15, 2004, doi: 10.1080/16549716.2017.1330915.



- [37] S. J. Dyke, B. F. Spencer, M. K. Sain, ve J. D. Carlson, "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction", *Smart Mater. Struct.*, c. 5, sayı 5, ss. 565–575, 1996, doi: 10.1088/0964-1726/5/5/006.
- [38] G. W. Housner *vd.*, "Structural Control: Past, Present, and Future", *J. Eng. Mech.*, c. 123, sayı 9, ss. 897–971, Eyl. 1997, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:9(897).
- [39] J. Rabinow, "The Magnetic Fluid Clutch", *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, c. 67, sayı 2, ss. 1308–1315, 1948, doi: 10.1109/T-AIEE.1948.5059821.
- [40] W. M. Winslow, "Induced fibrillation of suspensions", *J. Appl. Phys.*, c. 20, sayı 12, ss. 1137–1140, 1949, doi: 10.1063/1.1698285.
- [41] J. Rabinow, "Magnetic fluid torque and force transmitting device", US2575360A, 1951.
- [42] R. W. Phillips, "Engineering applications of fluids with a variable yield stress", University of California, Berkeley, 1969.
- [43] D. Karnopp, M. J. Crosby, ve R. A. Harwood, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators", *J. Eng. Ind.*, c. 96, sayı 2, s. 619, 1974, doi: 10.1115/1.3438373.
- [44] G. Leitmann ve E. Reithmeier, "Semiactive control of a vibrating system by means of electrorheological fluids", *Dyn. Control*, c. 3, sayı 1, ss. 7–33, 1993, doi: 10.1007/BF01968357.
- [45] K. Carlson, JD; Weiss, "A growing attraction to magnetic fluids", *Mach. Des.*, c. 8, ss. 61–66, 1994.
- [46] G. M. Kamath, M. K. Hurt, ve N. M. Wereley, "Analysis and testing of Bingham plastic behavior in semi-active electrorheological fluid dampers", *Smart Mater. Struct.*, c. 5, sayı 5, ss. 576–590, 1996, doi: 10.1088/0964-1726/5/5/007.
- [47] G. M. Kamath ve N. M. Wereley, "A nonlinear viscoelastic - plastic model for electrorheological fluids", *Smart Mater. Struct.*, c. 6, sayı 3, ss. 351–359, 1997, doi: 10.1088/0964-1726/6/3/012.
- [48] N. M. Wereley ve L. Pang, "Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models", *Smart Mater. Struct.*, c. 7, sayı 5, ss. 732–743, 1998, doi: 10.1088/0964-1726/7/5/015.
- [49] D.-Y. Lee ve N. M. Wereley, "Quasi-Steady Herschel-Bulkley Analysis of Electroand Magneto-Rheological Flow Mode Dampers", *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, c. 10, sayı 10, ss. 761–769, Eki. 1999, doi: 10.1106/E3LT-LYN6-KMT2-VJJD.

- [50] G. A. Dimock, J. E. Lindler, ve N. M. Wereley, “Bingham Biplastic Analysis of Shear Thinning and Thickening in Magnetorheological Dampers”, *Proc. SPIE*, c. 3985, ss. 444–455, 2000, doi: 10.1117/12.388847.
- [51] H. P. Gavin, “Annular Poiseuille flow of electrorheological and magnetorheological materials”, *J. Rheol. (N. Y. N. Y.)*, c. 45, sayı 4, ss. 983–994, Tem. 2001, doi: 10.1122/1.1378029.
- [52] D. Y. Lee, Y. T. Choi, ve N. M. Wereley, “Performance analysis of ER/MR impact damper systems using Herschel-Bulkley model”, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, c. 13, sayı 7–8, ss. 525–531, 2002, doi: 10.1106/104538902031061.
- [53] S. R. Hong, S. B. Choi, Y. T. Choi, ve N. M. Wereley, “Non-dimensional analysis and design of a magnetorheological damper”, *J. Sound Vib.*, c. 288, sayı 4–5, ss. 847–863, 2005, doi: 10.1016/j.jsv.2005.01.049.
- [54] Q. H. Nguyen ve S. B. Choi, “Optimal design of a vehicle magnetorheological damper considering the damping force and dynamic range”, *Smart Mater. Struct.*, c. 18, sayı 1, 2009, doi: 10.1088/0964-1726/18/1/015013.
- [55] Q. H. Nguyen, Y. M. Han, S. B. Choi, ve N. M. Wereley, “Geometry optimization of MR valves constrained in a specific volume using the finite element method”, *Smart Mater. Struct.*, c. 16, sayı 6, ss. 2242–2252, 2007, doi: 10.1088/0964-1726/16/6/027.
- [56] N. M. Wereley, J. U. Cho, Y. T. Choi, ve S. B. Choi, “Magnetorheological dampers in shear mode”, 2008, doi: 10.1088/0964-1726/17/01/015022.
- [57] N. M. Wereley, “Nondimensional herschel-bulkley analysis of magnetorheological and electrorheological dampers”, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, c. 19, sayı 3, ss. 257–268, 2008, doi: 10.1177/1045389X07088107.
- [58] Q. H. Nguyen ve S. B. Choi, “Dynamic modeling of an electrorheological damper considering the unsteady behavior of electrorheological fluid flow”, *Smart Mater. Struct.*, c. 18, sayı 5, 2009, doi: 10.1088/0964-1726/18/5/055016.
- [59] Z. Parlak, T. Engin, V. Ari, I. Sahin, ve I. Calli, “Geometrical optimisation of vehicle shock dampers with magnetorheological fluid”, *Int. J. Veh. Des.*, c. 54, sayı 4, s. 371, 2010, doi: 10.1504/IJVD.2010.036842.
- [60] G. M. Kamath ve N. M. Wereley, “A nonlinear viscoelastic-plastic model for electrorheological fluids”, *Smart Mater. Struct.*, c. 6, sayı 3, ss. 351–359, 1997, doi: 10.1088/0964-1726/6/3/012.
- [61] N. M. Wereley, L. Pang, ve G. M. Kamath, “Idealized hysteresis modeling of electrorheological and magnetorheological dampers”, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, c. 9, sayı 8, ss. 642–649, 1998, doi: 10.1177/1045389X9800900810.

- [62] B. F. J. Spencer, S. J. Dyke, M. K. Sain, ve J. D. Carlson, “Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers”, *J. Eng. Mech.*, c. 123, sayı 3, ss. 230–238, 1997, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:3(230).
- [63] Q. Zhou, S. R. K. Nielsen, ve W. L. Qu, “Semi-active control of three-dimensional vibrations of an inclined sag cable with magnetorheological dampers”, *J. Sound Vib.*, c. 296, sayı 1–2, ss. 1–22, Eyl. 2006, doi: 10.1016/j.jsv.2005.10.028.
- [64] F. Ikhouane ve S. J. Dyke, “Modeling and identification of a shear mode magnetorheological damper”, *Smart Mater. Struct.*, c. 16, sayı 3, ss. 605–616, 2007, doi: 10.1088/0964-1726/16/3/007.
- [65] R. Jimnez ve L. Alvarez, “Real time identification of structures with magnetorheological dampers”, içinde *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002.*, 2003, c. 1, sayı 1, ss. 1017–1022, doi: 10.1109/CDC.2002.1184643.
- [66] R. Jiménez ve L. Álvarez-Icaza, “LuGre friction model for a magnetorheological damper”, *Struct. Control Heal. Monit.*, c. 12, sayı 1, ss. 91–116, 2005, doi: 10.1002/stc.58.
- [67] N. M. Kwok, Q. P. Ha, T. H. Nguyen, J. Li, ve B. Samali, “A novel hysteretic model for magnetorheological fluid dampers and parameter identification using particle swarm optimization”, *Sensors Actuators, A Phys.*, c. 132, sayı 2, ss. 441–451, 2006, doi: 10.1016/j.sna.2006.03.015.
- [68] C. C. Chang ve P. Roschke, “Neural network modeling of a magnetorheological damper”, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, c. 9, sayı 9, ss. 755–764, 1998, doi: 10.1177/1045389X9800900908.
- [69] K. C. Schurter ve P. N. Roschke, “Fuzzy modeling of a magnetorheological damper using ANFIS”, *Ninth IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst. FUZZ- IEEE 2000 (Cat. No.00CH37063)*, c. 1, sayı April, ss. 122–127, 2000, doi: 10.1109/FUZZY.2000.838645.
- [70] C. Chang ve L. Zhou, “Neural Network Emulation of Inverse Dynamics for a Magnetorheological Damper”, *J. Struct. Eng.*, c. 128, sayı 2, ss. 231–239, 2002, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:2(231).
- [71] P. Q. Xia, “An inverse model of MR damper using optimal neural network and system identification”, *J. Sound Vib.*, c. 266, sayı 5, ss. 1009–1023, 2003, doi: 10.1016/S0022-460X(02)01408-6.
- [72] H. Du, J. Lam, ve N. Zhang, “Modelling of a magneto-rheological damper by evolving radial basis function networks”, c. 19, ss. 869–881, 2006, doi: 10.1016/j.engappai.2006.02.005.

- [73] X. Song, M. Ahmadian, ve S. C. Southward, “Modeling magnetorheological dampers with application of nonparametric approach”, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, c. 16, sayı 5, ss. 421–432, 2005, doi: 10.1177/1045389X05051071.
- [74] Z. D. Xu, Y. P. Shen, ve Y. Q. Guo, “Semi-active control of structures incorporated with magnetorheological dampers using neural networks”, *Smart Mater. Struct.*, c. 12, sayı 1, ss. 80–87, 2003, doi: 10.1088/0964-1726/12/1/309.
- [75] D. H. Wang ve W. H. Liao, “Modeling and control of magnetorheological fluid dampers using neural networks”, *Smart Mater. Struct.*, c. 14, sayı 1, ss. 111–126, 2005, doi: 10.1088/0964-1726/14/1/011.
- [76] H. Metered, P. Bonello, ve S. O. Oyadiji, “The experimental identification of magnetorheological dampers and evaluation of their controllers”, *Mech. Syst. Signal Process.*, c. 24, sayı 4, ss. 976–994, 2010, doi: 10.1016/j.ymsp.2009.09.005.
- [77] K.-M. Choi, S.-W. Cho, H.-J. Jung, ve I.-W. Lee, “Semi-active fuzzy control for seismic response reduction using magnetorheological dampers”, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, c. 33, sayı 6, ss. 723–736, May. 2004, doi: 10.1002/eqe.372.
- [78] Y. Kim, R. Langari, ve S. Hurlebaus, “Semiactive nonlinear control of a building with a magnetorheological damper system”, *Mech. Syst. Signal Process.*, c. 23, sayı 2, ss. 300–315, 2009, doi: 10.1016/j.ymsp.2008.06.006.
- [79] B. F. . J. Spencer, J. D. Carlson, M. K. Sain, ve G. Yang, “On the current status of magnetorheological dampers: seismic\ nprotection of full-scale structures”, *Proc. 1997 Am. Control Conf. (Cat. No.97CH36041)*, c. 1, sayı June, 1997, doi: 10.1109/ACC.1997.611840.
- [80] S. J. Dyke, B. F. Spencer, M. K. Sain, ve J. D. Carlson, “An experimental study of MR dampers for seismic protection”, *Smart Mater. Struct.*, c. 7, sayı 5, ss. 693–703, 1998, doi: 10.1088/0964-1726/7/5/012.
- [81] F. Yi, S. J. Dyke, J. M. Caicedo, S. Louis, ve J. D. Carlson, “Seismic Response Control Using Smart Dampers”, *Proc. Am. Control Conf.*, sayı June, ss. 1022–1026, 1999, doi: 10.1109/ACC.1999.783195.
- [82] F. Yi, S. J. Dyke, J. M. Caicedo, ve J. D. Carlson, “Experimental Verification of Multiinput Seismic Control Strategies for Smart Dampers”, *J. Eng. Mech.*, c. 127, sayı 11, ss. 1152–1164, Kas. 2001, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:11(1152).
- [83] L. M. Jansen ve S. J. Dyke, “Semiactive Control Strategies for MR Dampers: Comparative Study”, *J. Eng. Mech.*, c. 126, sayı 8, ss. 795–803, Ağu. 2000, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:8(795).

- [84] Y. L. Xu, W. L. Qu, ve J. M. Ko, “Seismic response control of frame structures using magnetorheological/electrorheological dampers”, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, c. 29, sayı 5, ss. 557–575, 2000, doi: 10.1002/(SICI)1096-9845(200005)29:5<557::AID-EQE922>3.0.CO;2-X.
- [85] S. J. Dyke ve B. F. Spencer, “A comparison of semi-active control strategies for the MR damper”, içinde *Proceedings Intelligent Information Systems. IIS'97*, 1997, sayı 6, ss. 580–584, doi: 10.1109/IIS.1997.645424.
- [86] O. Yoshida ve S. J. Dyke, “Seismic Control of a Nonlinear Benchmark Building Using Smart Dampers”, *J. Eng. Mech.*, c. 130, sayı 4, ss. 386–392, 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:4(386).
- [87] K. C. Schurter ve P. N. Roschke, “Neuro-fuzzy control of structures using acceleration feedback”, *Smart Mater. Struct.*, c. 10, sayı 4, ss. 770–779, 2001, doi: 10.1088/0964-1726/10/4/322.
- [88] L. Zhou, C. Chang, ve L. Wang, “Adaptive Fuzzy Control for Nonlinear Building-Magnetorheological Damper System”, *J. Struct. Eng.*, c. 129, sayı 7, ss. 905–913, 2003, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:7(905).
- [89] G. Yan ve L. L. Zhou, “Integrated fuzzy logic and genetic algorithms for multi-objective control of structures using MR dampers”, *J. Sound Vib.*, c. 296, sayı 1–2, ss. 368–382, 2006, doi: 10.1016/j.jsv.2006.03.011.
- [90] M. Bitaraf, O. E. Ozbulut, S. Hurlebaus, ve L. Barroso, “Application of semi-active control strategies for seismic protection of buildings with MR dampers”, *Eng. Struct.*, c. 32, sayı 10, ss. 3040–3047, 2010, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.05.023.
- [91] D. Das, T. K. Datta, ve A. Madan, “Semiactive fuzzy control of the seismic response of building frames with MR dampers”, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, c. 41, sayı 1, ss. 99–118, Oca. 2012, doi: 10.1002/eqe.1120.
- [92] C.-C. Chang ve L. Zhou, “Neural Network Emulation of Inverse Dynamics for a Magnetorheological Damper”, *J. Struct. Eng.*, c. 128, sayı 2, ss. 231–239, 2002, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:2(231).
- [93] G. Yang, B. F. Spencer, J. D. Carlson, ve M. K. Sain, “Large-scale MR fluid dampers: Modeling and dynamic performance considerations”, *Eng. Struct.*, c. 24, sayı 3, ss. 309–323, 2002, doi: 10.1016/S0141-0296(01)00097-9.
- [94] H. H. Tsang, R. K. L. Su, ve A. M. Chandler, “Simplified inverse dynamics models for MR fluid dampers”, *Eng. Struct.*, c. 28, sayı 3, ss. 327–341, 2006, doi: 10.1016/j.engstruct.2005.06.013.
- [95] J. E. Carrion, B. F. Spencer, ve B. M. Phillips, “Real-time hybrid simulation for structural control performance assessment”, *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, c. 8, sayı 4, ss. 481–492, Ara. 2009, doi: 10.1007/s11803-009-9122-4.

- [96] M. Zapateiro, H. R. Karimi, N. Luo, ve B. F. Spencer, “Real-time hybrid testing of semiactive control strategies for vibration reduction in a structure with MR damper”, *Struct. Control Heal. Monit.*, s. n/a-n/a, 2009, doi: 10.1002/stc.321.
- [97] Y. Cha *vd.*, “Comparative Studies of Semiactive Control Strategies for MR Dampers : Pure Simulation and Real-Time Hybrid Tests”, c. 139, sayı July, ss. 1237–1248, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000639.
- [98] Z. Jiang ve R. E. Christenson, “A fully dynamic magneto-rheological fluid damper model”, *Smart Mater. Struct.*, c. 21, sayı 6, 2012, doi: 10.1088/0964-1726/21/6/065002.
- [99] Y. Fujino, B. Erkus, ve M. Abe, “Investigation of semi-active control for seismic protection of elevated highway bridges”, c. 24, ss. 281–293, 2002.
- [100] H. Li, M. Liu, J. Li, X. Guan, ve J. Ou, “Vibration control of stay cables of the Shandong Binzhou Yellow River Highway Bridge using Magnetorheological fluid dampers”, *J. Bridg. Eng.*, c. 12, sayı 4, ss. 401–409, 2007, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:4(401).
- [101] S.-W. Cho, H.-J. Jung, ve I.-W. Lee, “Smart passive system based on magnetorheological damper”, *Smart Mater. Struct.*, c. 14, sayı 4, ss. 707–714, 2005, doi: 10.1088/0964-1726/14/4/029.
- [102] Y.-T. Choi ve N. M. Wereley, “Self-Powered Magnetorheological Dampers”, *J. Vib. Acoust.*, c. 131, sayı 4, s. 044501, 2009, doi: 10.1115/1.3142882.
- [103] B. Sapiński, “Vibration power generator for a linear MR damper”, *Smart Mater. Struct.*, c. 19, sayı 10, 2010, doi: 10.1088/0964-1726/19/10/105012.
- [104] C. Chen ve W.-H. Liao, “A self-sensing magnetorheological damper with power generation”, *Smart Mater. Struct.*, c. 21, sayı 2, s. 025014, 2012, doi: 10.1088/0964-1726/21/2/025014.
- [105] B. Sapiński, “Energy-harvesting linear MR damper: Prototyping and testing”, *Smart Mater. Struct.*, c. 23, sayı 3, 2014, doi: 10.1088/0964-1726/23/3/035021.
- [106] R. Ahamed, M. M. Ferdous, ve Y. Li, “Advancement in energy harvesting magneto-rheological fluid damper: A review”, *Korea Aust. Rheol. J.*, c. 28, sayı 4, ss. 355–379, 2016, doi: 10.1007/s13367-016-0035-2.
- [107] W. A. Bullough, D. J. Ellam, ve R. J. Atkin, “Electrostructured Fluid Flow Quantification”, 2001, ss. 145–166.
- [108] F. Zschunke, M. Steven, ve P. O. Brunn, “Simulation of a magnetorheological damper with a combination of a commercial CFD and FEA code”, *Am. Soc. Mech. Eng. Press. Vessel. Pip. Div. PVP*, c. 491, sayı 1, ss. 119–124, 2004, doi: 10.1115/PVP2004-3097.

- [109] F. Zschunke, R. Rivas, ve P. O. Brunn, “Temperature Behavior of Magnetorheological Fluids”, *Appl. Rheol.*, c. 15, sayı 2, ss. 116–121, Nis. 2005, doi: 10.1515/arh-2005-0007.
- [110] W. W. Chooi ve S. O. Oyadiji, “Design, modelling and testing of magnetorheological (MR) dampers using analytical flow solutions”, *Comput. Struct.*, c. 86, sayı 3–5, ss. 473–482, 2008, doi: 10.1016/j.compstruc.2007.02.002.
- [111] A. C. Shivaram, “Extended two-fluid model for simulating magneto-rheological fluid flows”, *Smart Mater. Struct.*, c. 20, sayı 6, 2011, doi: 10.1088/0964-1726/20/6/065006.
- [112] Z. Parlak ve T. Engin, “Time-dependent CFD and quasi-static analysis of magnetorheological fluid dampers with experimental validation”, *Int. J. Mech. Sci.*, c. 64, sayı 1, ss. 22–31, 2012, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2012.08.006.
- [113] Z. Parlak, T. Engin, ve İ. Çallı, “Optimal design of MR damper via finite element analyses of fluid dynamic and magnetic field”, *Mechatronics*, c. 22, sayı 6, ss. 890–903, 2012, doi: 10.1016/j.mechatronics.2012.05.007.
- [114] J. Zheng, Z. Li, J. Koo, ve J. Wang, “Magnetic circuit design and multiphysics analysis of a novel MR damper for applications under high velocity”, *Adv. Mech. Eng.*, c. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/402501.
- [115] A. Sternberg, R. Zemp, ve J. C. de la Llera, “Multiphysics behavior of a magneto-rheological damper and experimental validation”, *Eng. Struct.*, c. 69, ss. 194–205, 2014, doi: 10.1016/j.engstruct.2014.03.016.
- [116] D. Case, B. Taheri, ve E. Richer, “Multiphysics modeling of magnetorheological dampers”, *Int. J. Multiphys.*, c. 7, sayı 1, ss. 61–76, 2013, doi: 10.1260/1750-9548.7.1.61.
- [117] G. Hu, F. Liu, Z. Xie, ve M. Xu, “Design, Analysis, and Experimental Evaluation of a Double Coil Magnetorheological Fluid Damper”, *Shock Vib.*, c. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/4184726.
- [118] T. M. Gurubasavaraju, H. Kumar, ve A. Mahalingam, “An approach for characterizing twin-tube shear-mode magnetorheological damper through coupled FE and CFD analysis”, *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, c. 40, sayı 3, ss. 1–14, 2018, doi: 10.1007/s40430-018-1066-z.
- [119] P. Guo ve J. Xie, “Two-Dimensional CFD Modeling of Hysteresis Behavior of MR Dampers”, *Shock Vib.*, c. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/9383047.
- [120] M. Kubík ve J. Goldasz, “Multiphysics Model of an MR Damper including Magnetic Hysteresis”, *Shock Vib.*, c. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/3246915.

- [121] Q. H. Nguyen, S. B. Choi, Y. S. Lee, ve M. S. Han, “An analytical method for optimal design of MR valve structures”, *Smart Mater. Struct.*, c. 18, sayı 9, 2009, doi: 10.1088/0964-1726/18/9/095032.
- [122] Y. A. Çengel ve J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Higher Education, 2006.
- [123] B. Dyke, SJ and Spencer Jr, “Smart Dampers for Seismic Protection of Structures : A Full-Scale Study”, *2nd Int. Work. Struct. Control*, sayı January 1998, ss. 163--173, 1996.
- [124] Z. Parlak, T. Engin, ve İ. Şahin, “Optimal Magnetorheological Damper Configuration Using the Taguchi Experimental Design Method”, *J. Mech. Des.*, c. 135, sayı 8, s. 081008, 2013, doi: 10.1115/1.4024719.
- [125] D. Susan-Resiga, “A rheological model for magneto-rheological fluids”, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, c. 20, sayı 8, ss. 1001–1010, 2009, doi: 10.1177/1045389X08100979.
- [126] Lord Corporation, “MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid”, 2011.
- [127] Z. Parlak ve T. Engin, “Time-dependent CFD and quasi-static analysis of magnetorheological fluid dampers with experimental validation”, *Int. J. Mech. Sci.*, c. 64, sayı 1, ss. 22–31, 2012, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2012.08.006.
- [128] J. Gołdasz ve B. Sapiński, “Application Of CFD To Modeling Of Squeeze Mode Magnetorheological Dampers”, *Acta Mech. Autom.*, c. 9, sayı 3, ss. 129–134, Eyl. 2015, doi: 10.1515/ama-2015-0021.
- [129] B. Sapiński ve M. Szczech, “CFD model of a magnetorheological fluid in squeeze mode”, *Acta Mech. Autom.*, c. 7, sayı 3, ss. 180–183, 2013, doi: 10.2478/ama-2013-0031.
- [130] S. M. Chen, A. W. Bullough, ve J. Hart, “CFD study of the flow in a radial clutch with a real electrorheological fluid”, *J. Phys. Conf. Ser.*, c. 149, 2009, doi: 10.1088/1742-6596/149/1/012003.
- [131] D. A. Bompos ve P. G. Nikolakopoulos, “Rotordynamic Analysis of a Shaft Using Magnetorheological and Nanomagnetorheological Fluid Journal Bearings”, *Tribol. Trans.*, c. 59, sayı 1, ss. 108–118, 2016, doi: 10.1080/10402004.2015.1050137.
- [132] D. A. Bompos ve P. G. Nikolakopoulos, “CFD simulation of magnetorheological fluid journal bearings”, *Simul. Model. Pract. Theory*, c. 19, sayı 4, ss. 1035–1060, 2011, doi: 10.1016/j.simpat.2011.01.001.
- [133] F. Omidbeygi ve S. H. Hashemabadi, “Experimental study and CFD simulation of rotational eccentric cylinder in a magnetorheological fluid”, *J. Magn. Magn. Mater.*, c. 324, sayı 13, ss. 2062–2069, 2012, doi: 10.1016/j.jmmm.2012.02.016.



- [134] E. J. Park, L. F. da Luz, ve A. Suleman, “Multidisciplinary design optimization of an automotive magnetorheological brake design”, *Comput. Struct.*, c. 86, sayı 3–5, ss. 207–216, 2008, doi: 10.1016/j.compstruc.2007.01.035.
- [135] D. H. Wang ve W. H. Liao, “Magnetorheological Fluid Dampers: A Review of Parametric Modelling”, *Smart Mater. Struct.*, c. 20, s. 023001, 2011, doi: 10.1088/0964-1726/20/2/023001.
- [136] R. Bouc, “A Mathematical Model for Hysteresis”, *Acta Acust. united with Acust.*, c. 24, sayı 1, ss. 16–25, 1971.
- [137] Y.-K. Wen, “Method for random vibration of hysteretic systems”, *J. Eng. Mech.*, c. 102, sayı 2, ss. 249–263, 1976.
- [138] Q. Zhou ve W. Lian Qu, “Two mechanical models for magnetorheological damper and corresponding test verification”, *J. Earthq. Eng. Eng. Vib.*, c. 22, sayı 4, ss. 144–150, Ağu. 2002.
- [139] D. Guo ve H. Hu, “Nonlinear stiffness of a magneto-rheological damper”, *Nonlinear Dyn.*, c. 40, sayı 3, ss. 241–249, 2005, doi: 10.1007/s11071-005-6464-y.
- [140] I. Şahin, T. Engin, ve Ş. Çeşmeci, “Comparison of some existing parametric models for magnetorheological fluid dampers”, *Smart Mater. Struct.*, c. 19, sayı 3, 2010, doi: 10.1088/0964-1726/19/3/035012.
- [141] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets”, *Inf. Control*, c. 8, sayı 3, ss. 338–353, Haz. 1965, doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [142] J. P. Amezcua-Sanchez, A. Dominguez-Gonzalez, R. Sedaghati, R. De Jesus Romero-Troncoso, ve R. A. Osornio-Rios, “Vibration control on smart civil structures: A review”, *Mech. Adv. Mater. Struct.*, c. 21, sayı 1, ss. 23–38, 2014, doi: 10.1080/15376494.2012.677103.
- [143] W. S. McCulloch ve W. Pitts, “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity”, *Bull. Math. Biophys.*, c. 5, sayı 4, ss. 115–133, 1943, doi: 10.1007/BF02478259.
- [144] B. Alemdar, T. Türker, D. M. Özcan, M. Akköse, S. Adanur, ve Ş. Ateş, “Yapısal hasarların deneysel ve operasyonel modal analiz yöntemleriyle belirlenmesi”, 2009.
- [145] Y. Ohtori, R. E. Christenson, B. F. Spencer, ve S. J. Dyke, “Benchmark Control Problems for Seismically Excited Nonlinear Buildings”, *J. Eng. Mech.*, c. 130, sayı April, ss. 366–385, 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:4(366).

## EKLER

### EK A. Oluşturulan UDF kodları

#### DUVAR HAREKETLERİ

```
#include<udf.h>
DEFINE_CG_MOTION(velo, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
{
    double w = (0.05 / 0.0075);
    cg_vel[0] = -0.05*sin(w*time); /* x-velocity*/
    cg_vel[1] = 0.0;
    cg_vel[2] = 0.0;
    NV_S(cg_omega, = , 0.0); /* no angular motion */
    /* Messages in Fluent TUI */
    Message(" \n");
    Message("velocity \n");
    Message("%5.6f\t\n", cg_vel[0]);
    Message(" \n");
}

DEFINE_CG_MOTION(low_velo, dt, cg_vel, cg_omega, time, dtime)
{
    double w = (0.05 / 0.0075);
    cg_vel[0] = -0.05*sin(w*time)*(15.8*15.8-16)/15.8/15.8; /* x-velocity*/
    cg_vel[1] = 0.0;
    cg_vel[2] = 0.0;
    NV_S(cg_omega, = , 0.0); /* no angular motion */
    /* Messages in Fluent TUI */
    Message(" \n");
    Message("velocity \n");
    Message("%5.6f\t\n", cg_vel[0]);
    Message(" \n");
}

DEFINE_PROFILE(moving_wall, thread, position)
{
    face_t f;

    begin_f_loop(f, thread)

    {
        real t = RP_Get_Real("flow-time");
        double w = (0.05 / 0.0075);
```

```

        F_PROFILE(f,thread,position)= -0.05*sin(w*t); /* insert speed of
wall here */
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

```

## EŞLENİK ÇÖZÜM

```

/*****
Bu UDF kodu dördüncü dereceden bir polinom kullanılarak viskozitenin manyetik
akıya bağlı olarak değerini hesaplayan bir koddur.
This UDF code can calculate the viscosity as a function of
magnetic field density by using a fourth order polynomial.
Written by Muaz KEMERLİ
*****/
#include"udf.h"
DEFINE_PROPERTY(c_herschel_bulkley_model, cell, thread)
{
    double e_viscos;
    double k = 0.092;
    double strain;
    double critical_strain = 900;
    double magnetic_field;
    magnetic_field = C_UDSI(cell, thread, 0);
    double yield_stress = 52.962*pow(magnetic_field, 4) -
176.51*pow(magnetic_field, 3) + 158.79*pow(magnetic_field, 2) +
13.708*magnetic_field + 0.1442;
    strain = C_STRAIN_RATE_MAG(cell, thread);
    if (strain < critical_strain)
        e_viscos = yield_stress * 1000 * (2 - strain / critical_strain) /
critical_strain + k;
    else
        e_viscos = (yield_stress*1000/strain + k);
    return e_viscos;
}

```

## HERSCHEL-BULKLEY İNTERPOLASYONU

```

/*****
Bu UDF kodu Herschel-Bulkley değişkenlerinin manyetik akıya bağlı olarak
hazırlanmış 4 sütunlu bir matrisi kullanarak viskozitenin manyetik akıya
bağlı olarak değerini hesaplayan bir koddur.
This UDF code can calculate the viscosity as a function of magnetic field
density by using a 4 column matrix which contains the Herschel-Bulkley
variables corresponding to the magnetic flux density.
Written by Muaz KEMERLİ
*****/
#include"udf.h"
#include"math.h"
#include"stdio.h"

```

```

#include"stdlib.h"

float str1[18][4]; /*tao-k-n-B*/
int readFile;
DEFINE_PROPERTY(c_effective_viscosity, cell, thread)
{
    float e_viscos = 1;
    float strain = 1;
    float magnetic_field = 0.1;
    float critical_strain = 900;
    float x = 0;
    float yield_stress = 10;
    float k = 10;
    float n = 1;
    /* double temperature; */
    /* temperature = C_T(cell, thread); */
    magnetic_field = C_UDSI(cell, thread, 0);
    strain = C_STRAIN_RATE_MAG(cell, thread);
    int main();
    {
        int i, j, a, b;
        int M = 18;
        int N = 4;
        if (readFile==0){
            FILE * fp;
            fp = fopen("file.txt", "r");
            for (i = 0; i < M; i++)
                for (j = 0; j < N; j++)
                {
                    fscanf(fp, "%f", &str1[i][j]);
                }
            printf("matrix 22 X 1 = %f \n", str1[21][0]);
            printf("matrix 13 X 3 = %f \n", str1[12][2]);
            {
                for (a = 0; a < M; a++)
                {
                    for (b = 0; b < N; b++)

                        printf("matrix %d X %d = %f \n",
a+1,b+1,str1[a][b]);
                }
            }
            fclose(fp);
            readFile = 1;
        }
        x = magnetic_field;
        for (i = 0; i < M; i++)
        {
            if (x < str1[i][3] )
            {
                break;
            }
        }
        //printf("i = %d \n", i);
        yield_stress = str1[i - 1][0] + (magnetic_field - str1[i -
1][3]) / (str1[i][3] - str1[i - 1][3])*(str1[i][0] - str1[i - 1][0]);
        //printf("yield_stress = %f \n", yield_stress);
        k = str1[i - 1][1] + (magnetic_field - str1[i - 1][3]) /
(str1[i][3] - str1[i - 1][3])*(str1[i][1] - str1[i - 1][1]);
    }
}

```

```

//printf("k = %f \n", k);
n = str1[i - 1][2] + (magnetic_field - str1[i - 1][3]) /
(str1[i][3] - str1[i - 1][3])*(str1[i][2] - str1[i - 1][2]);
//printf("n = %f \n", n);
if (strain <= critical_strain)
{
    e_viscos = yield_stress*(2 - strain /
critical_strain) / critical_strain + k*powf(critical_strain, (n - 1))*((2 - n)
+ (n - 1)*strain / critical_strain);
}
if (strain > critical_strain)
{
    e_viscos = yield_stress / strain + k*powf(strain,
(n - 1));
}
if (e_viscos > 1000)
{
    printf("i = %d \n", i);
    printf("yield_stress = %f \n", yield_stress);
    printf("k = %f \n", k);
    printf("n = %f \n", n);
    printf("visocity = %f \n", e_viscos);
    printf("magnetic_field = %f \n", magnetic_field);
}
if (k < 0)
{
    printf("i = %d \n", i);
    printf("yield_stress = %f \n", yield_stress);
    printf("k = %f \n", k);
    printf("n = %f \n", n);
    printf("visocity = %f \n", e_viscos);
    printf("magnetic_field = %f \n", magnetic_field);
}
if (e_viscos < 0)
{
    printf("i = %d \n", i);
    printf("yield_stress = %f \n", yield_stress);
    printf("k = %f \n", k);
    printf("n = %f \n", n);
    printf("visocity = %f \n", e_viscos);
    printf("magnetic_field = %f \n", magnetic_field);
}
//printf("visocity = %f \n", e_viscos);
}
return e_viscos;
}

```

## EĞRİ UYDURMA

```

/*****
Bu UDF kodu Herschel-Bulkley değişkenlerinin manyetik akıya karşılık gelen
değerlerinin eğri uydurma yoluyla elde edilmiş denklemleri kullanılarak
viskozitenin manyetik akıya bağlı olarak değerini hesaplayan bir koddur.
This UDF code can calculate the viscosity as a function of magnetic flux
density by using the regression curves of Herschel-Bulkley variables
corresponding to the magnetic flux density.
Written by Muaz KEMERLİ
*****/

```

```

#include"udf.h"
DEFINE_PROPERTY(c_effective_viscosity, cell, thread)
{
    double e_viscos;
    double k;
    double k_n;
    double n;
    double a;
    double strain;
    double magnetic_field;
    double shear_stress;
    double critical_strain = 900;
    magnetic_field = C_UDSI(cell, thread, 0);
    strain = C_STRAIN_RATE_MAG(cell, thread);
    double as = 42090;
    double bs = 12380;
    double a0n = 8136000;
    double a1n = -12090000;
    double b1n = 1751000;
    double a2n = 4699000;
    double b2n = -1390000;
    double a3n = -745600;
    double b3n = 343000;
    double wn = -0.1839;
    double a0k = -796.6;
    double a1k = 725.5;
    double b1k = 1036;
    double a2k = 185.3;
    double b2k = -548.8;
    double a3k = -113.7;
    double b3k = 36.16;
    double wk = 1.739;
    n = a0n + a1n*cos(magnetic_field*wn) + b1n*sin(magnetic_field*wn) +
a2n*cos(2*magnetic_field*wn) + b2n*sin(2*magnetic_field*wn) +
a3n*cos(3*magnetic_field*wn) + b3n*sin(3*magnetic_field*wn);
    k_n = a0k + a1k*cos(magnetic_field*wk) + b1k*sin(magnetic_field*wk) +
a2k*cos(2 * magnetic_field*wk) + b2k*sin(2 * magnetic_field*wk) + a3k*cos(3 *
magnetic_field*wk) + b3k*sin(3 * magnetic_field*wk);
    a = 1 / n;
    k = pow(k_n, a);
    shear_stress = as*pow(magnetic_field, 2) + bs*magnetic_field;
    if (strain < critical_strain)
        e_viscos = shear_stress*(2-
strain/critical_strain)/critical_strain + (k*pow(critical_strain, (n-1)))*((2-
n)+(n-1)*strain/critical_strain);
    else
        e_viscos = shear_stress/strain + k*pow(strain, (n-1));
    return e_viscos;
}

```

## VİSKOZİTE İNTERPOLASYONU

/\*\*\*\*\*  
 Bu UDF kodu iki boyutlu interpolasyon yapılarak viskozitenin manyetik akı yoğunluğu ve kayma hızına bağlı olarak hesaplandığı bir koddur.

This UDF code can calculate the viscosity as a function of magnetic flux density and shear rate by using 2D interpolation technique  
Written by Muaz KEMERLİ

```

*****/
#include"udf.h"
#include"math.h"
#include"stdio.h"
#include"stdlib.h"

float str1[21][53];
int readfile;
DEFINE_PROPERTY(c_effective_viscosity, cell, thread)
{
    float e_viscos = 1;
    float strain = 1;
    float magnetic_field = 0.1;
    float x = 0, y = 0, fi = 0.1;
    /* double temperature; */
    /* temperature = C_T(cell, thread); */
    magnetic_field = C_UDSI(cell, thread, 0);
    strain = C_STRAIN_RATE_MAG(cell, thread);
    int main();
    {
        int i, j, m, n;
        int M = 21;
        int N = 53;
        if (readfile==0){
            FILE * fp;
            fp = fopen("file.txt", "r");
            for (i = 0; i < M; i++)
                for (j = 0; j < N; j++)
                {
                    fscanf(fp, "%f", &str1[i][j]);
                }
            printf("\n matrix 23 X 22 = %f \n", str1[22][21]);
            printf("matrix 25 X 43 = %f \n", str1[24][42]);
            {
                for (m = 0; m < M; m++)
                {
                    for (n = 0; n < N; n++)

                        printf("matrix %d X %d = %f \n",
m+1,n+1,str1[m][n]);
                }
            }
            fclose(fp);
            readfile = 1;
        }
        int mf, nf;
        x = strain;
        y = magnetic_field;
        for (i = 2; i < M; i++)
        {
            if (y < str1[i][0] )
            {
                break;
            }
        }
        nf = i;
    }
}

```

```

y, i, str1[i][0]);
/*printf("magnetic_field= %f i=%d matrix value=%f \n",
printf("nf=%d \n", nf);*/
for (j = 2; j < N; j++)
{
    if (x < str1[0][j])
    {
        break;
    }
}
mf = j;
/*printf("shear_rate= %f j=%d matrix value = %f \n", x,
j, str1[0][j]);
printf("mf=%d \n", mf);*/
fi = (str1[0][mf] - x)*(str1[nf][0] - y) / ((str1[0][mf] -
str1[0][mf - 1])*(str1[nf][0] - str1[nf - 1][0]))*str1[nf - 1][mf - 1]
+ (x-str1[0][mf-1])*(str1[nf][0] - y) / ((str1[0][mf] -
str1[0][mf - 1])*(str1[nf][0] - str1[nf - 1][0]))*str1[nf - 1][mf]
+ (str1[0][mf] - x)*(y - str1[nf-1][0]) / ((str1[0][mf] -
str1[0][mf - 1])*(str1[nf][0] - str1[nf - 1][0]))*str1[nf][mf - 1]
+ (x - str1[0][mf - 1])*(y - str1[nf - 1][0]) /
((str1[0][mf] - str1[0][mf - 1])*(str1[nf][0] - str1[nf -
1][0]))*str1[nf][mf];
/*printf("fi=%f \n", fi);
printf("strain=%f \n", strain);*/
e_viscos = fi;
//if (e_viscos > 1000)
//{
//    printf("viscosity overseeding = %f \n", e_viscos);
///// e_viscos = e_viscos*(156.9*powf(e_viscos, -0.7319));
//}
}
return e_viscos;
}

```

## KAYMA GERİLMESİ İNTERPOLASYONU

/\*\*\*\*\*  
 Bu UDF kodu iki boyutlu interpolasyon yapılarak kayma gerilmesinin manyetik akı yoğunluğu ve kayma hızına bağlı olarak hesaplandığı bir koddur. Kayma gerilmesi viskoziteye dönüştürülmüştür.  
 This UDF code can calculate the shear stress as a function of magnetic flux density and shear rate by using 2D interpolation technique. Shear stress is transformed to viscosity.  
 Written by Muaz KEMERLİ

```

*****/
#include"udf.h"
#include"math.h"
#include"stdio.h"
#include"stdlib.h"

float str1[21][53];
int readfile;
DEFINE_PROPERTY(c_effective_viscosity, cell, thread)
{
    float e_viscos = 1;

```



```

float strain = 1;
float magnetic_field = 0.1;
float x = 0, y = 0, fi = 0.1;
/* double temperature; */
/* temperature = C_T(cell, thread); */
magnetic_field = C_UDSI(cell, thread, 0);
strain = C_STRAIN_RATE_MAG(cell, thread);
int main();
{
    int i, j, m, n;
    int M = 21;
    int N = 53;
    if (readFile==0){
        FILE * fp;
        fp = fopen("file.txt", "r");
        for (i = 0; i < M; i++)
            for (j = 0; j < N; j++)
                {
                    fscanf(fp, "%f", &str1[i][j]);
                }
        printf("\n matrix 23 X 22 = %f \n", str1[22][21]);
        printf("matrix 25 X 43 = %f \n", str1[24][42]);
        {
            for (m = 0; m < M; m++)
                {
                    for (n = 0; n < N; n++)
                        printf("matrix %d X %d = %f \n",
m+1,n+1,str1[m][n]);
                }
        }
        fclose(fp);
        readFile = 1;
    }
    if (strain > 11000)
    {
        strain = 11000;
    }
    int mf, nf;
    x = strain;
    y = magnetic_field;
    for (i = 2; i < M; i++)
    {
        if (y < str1[i][0] )
        {
            break;
        }
    }
    nf = i;
    /*printf("magnetic_field= %f  i=%d  matrix value=%f \n",
y, i, str1[i][0]);
printf("nf=%d \n", nf);*/
    for (j = 2; j < N; j++)
    {
        if (x < str1[0][j])
        {
            break;
        }
    }
    mf = j;

```

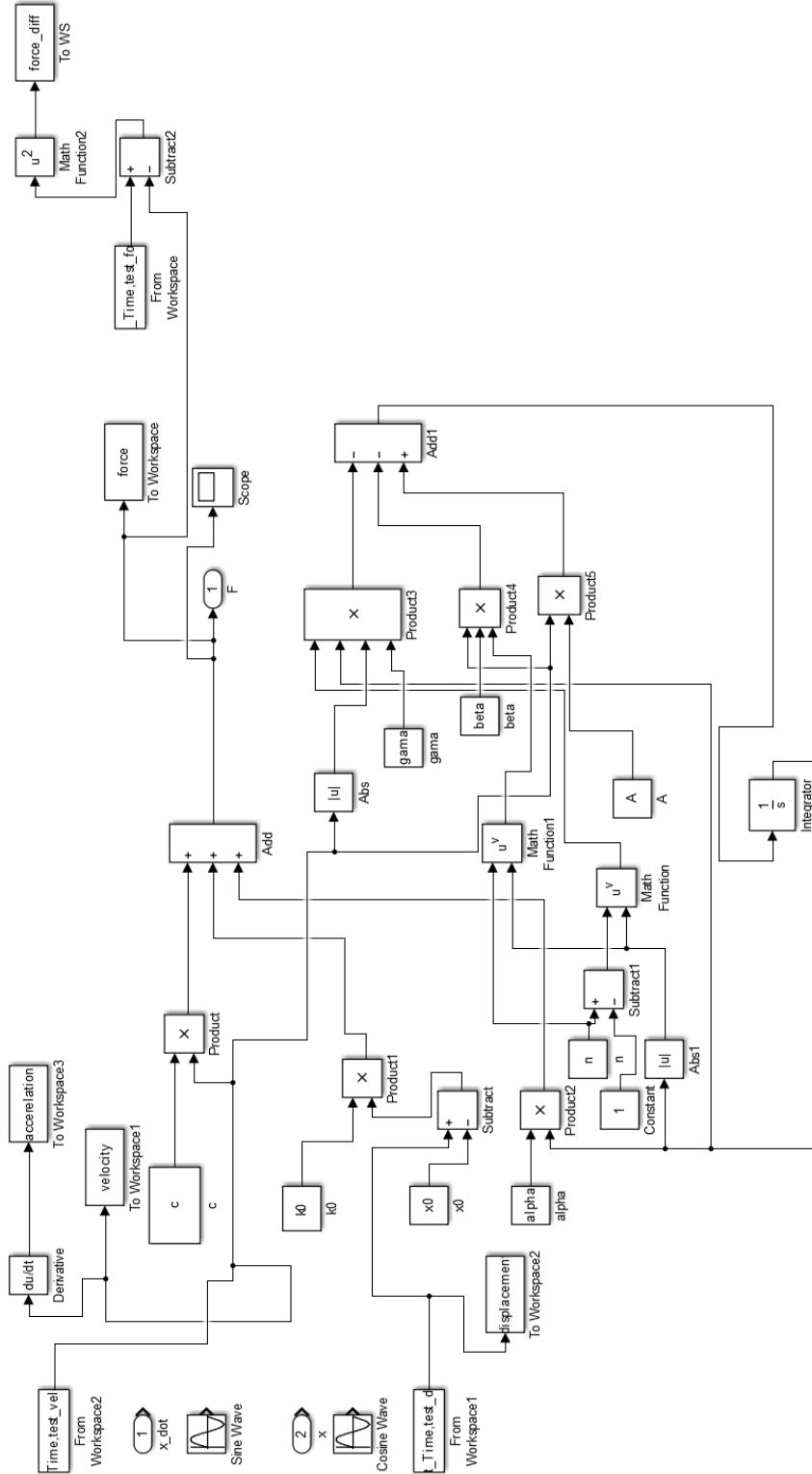
```

        /*printf("shear_rate= %f  j=%d matrix value = %f  \n", x,
j, str1[0][j]);
        printf("mf=%d  \n", mf);*/
        fi = (str1[0][mf] - x)*(str1[nf][0] - y) / ((str1[0][mf] -
str1[0][mf - 1])*(str1[nf][0] - str1[nf - 1][0]))*str1[nf - 1][mf - 1]
        + (x-str1[0][mf-1])*(str1[nf][0] - y) / ((str1[0][mf] -
str1[0][mf - 1])*(str1[nf][0] - str1[nf - 1][0]))*str1[nf - 1][mf]
        + (str1[0][mf] - x)*(y - str1[nf-1][0]) / ((str1[0][mf] -
str1[0][mf - 1])*(str1[nf][0] - str1[nf - 1][0]))*str1[nf][mf - 1]
        + (x - str1[0][mf - 1])*(y - str1[nf - 1][0]) /
((str1[0][mf] - str1[0][mf - 1])*(str1[nf][0] - str1[nf -
1][0]))*str1[nf][mf];
        /*printf("fi=%f  \n", fi);
        printf("strain=%f  \n", strain);*/
        if (strain < 1)
        {
            strain = 1;
        }
        e_viscos = (fi/strain);
        //if (e_viscos > 3000)
        //{
        //    printf("viscosity overseeding = %f  \n", e_viscos);
        //    e_viscos = e_viscos*(156.9*powf(e_viscos, -0.7319));
        //}
    }
    return e_viscos;
}

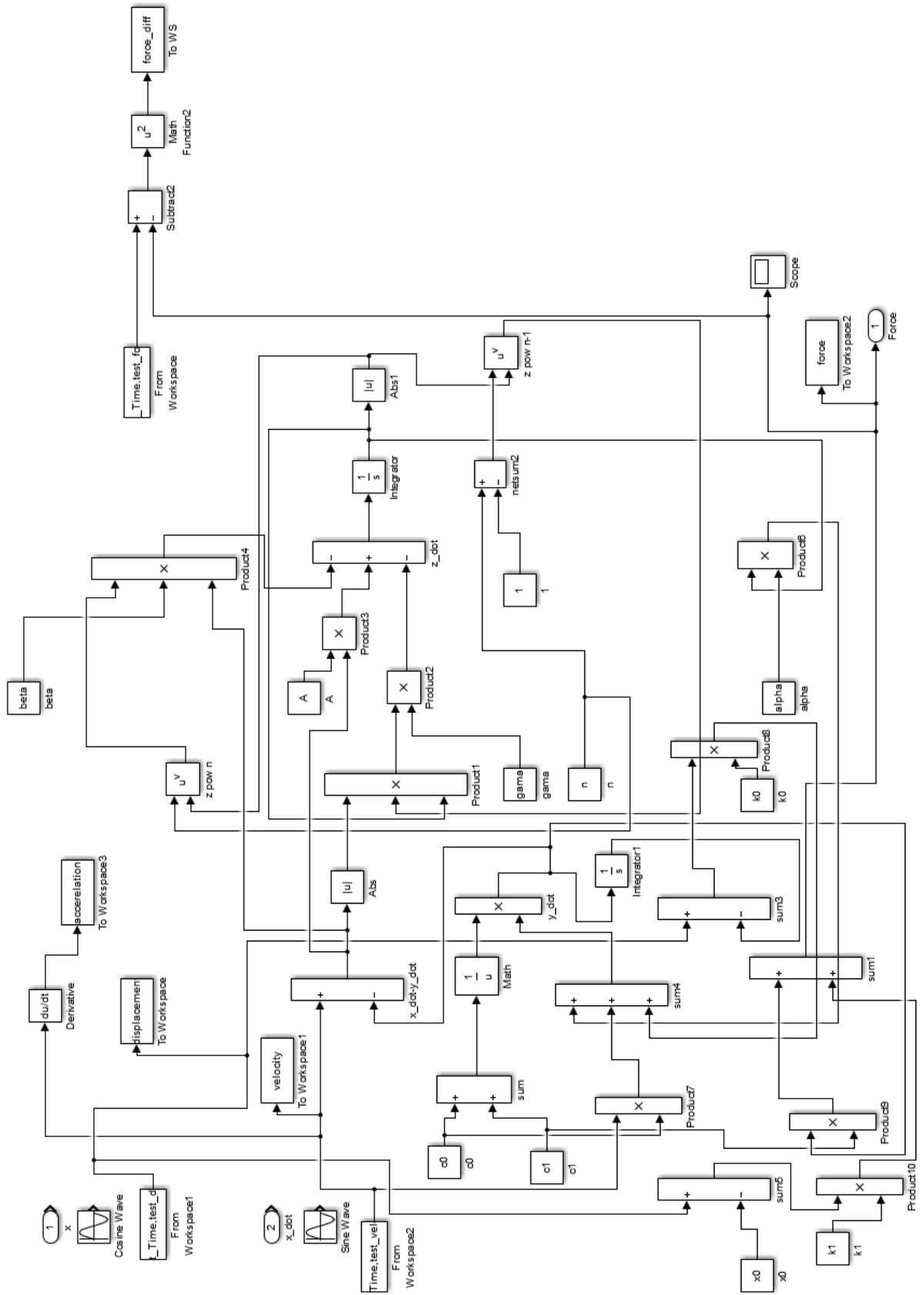
```

## EK B. Oluşturulan SIMULINK modelleri

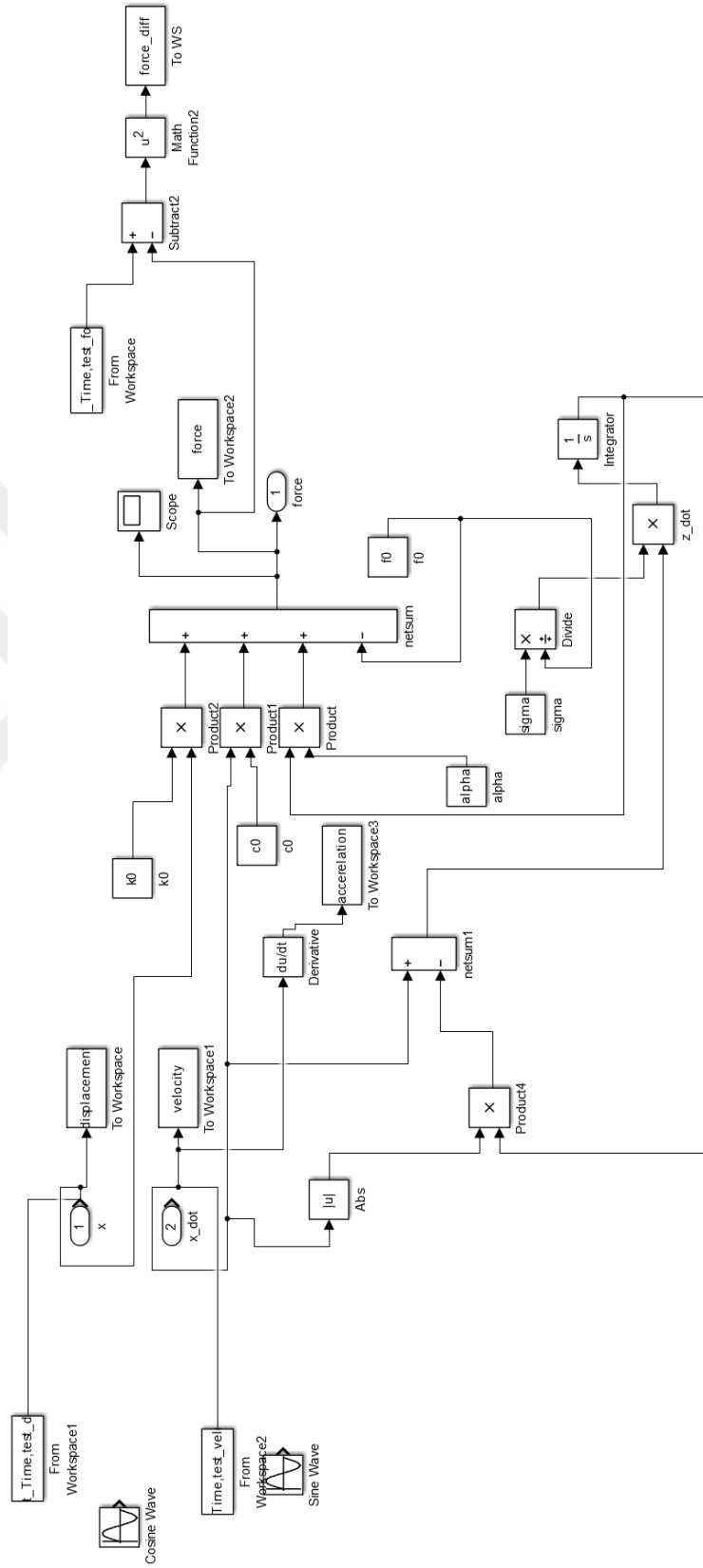
# BOUC-WEN



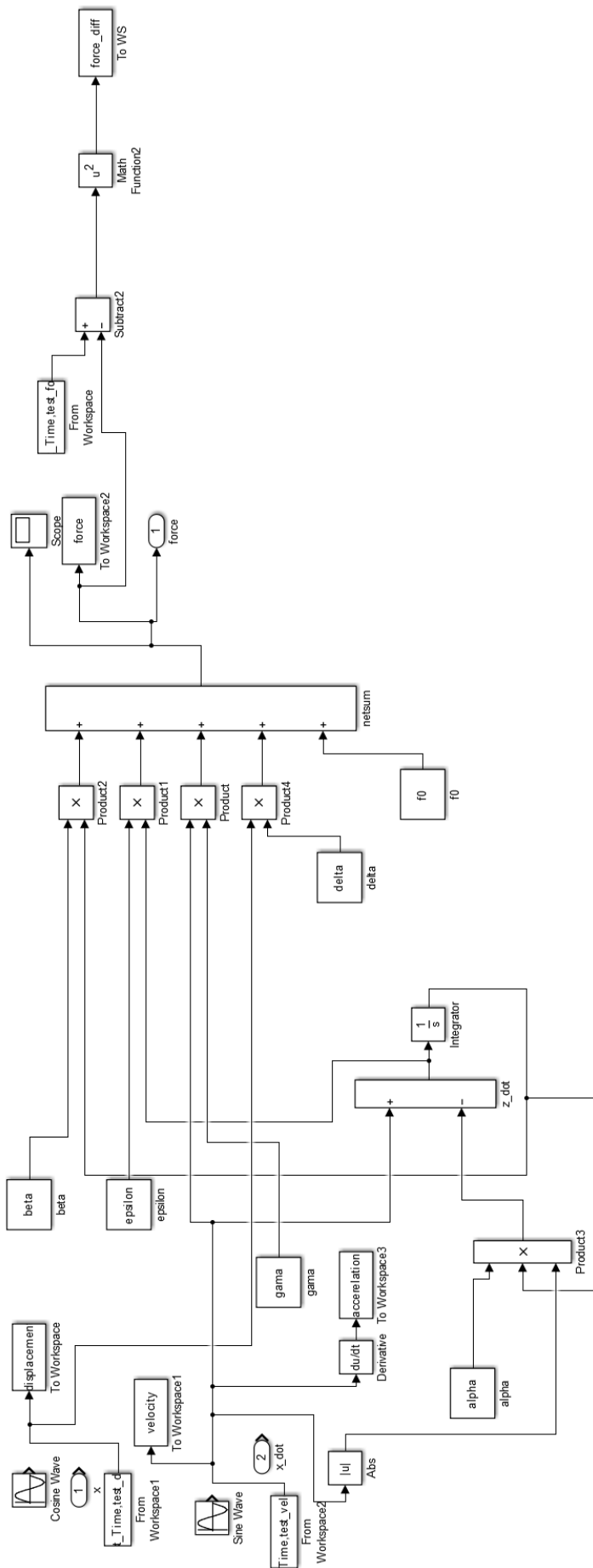
# DÜZENLENMİŞ BOUC-WEN



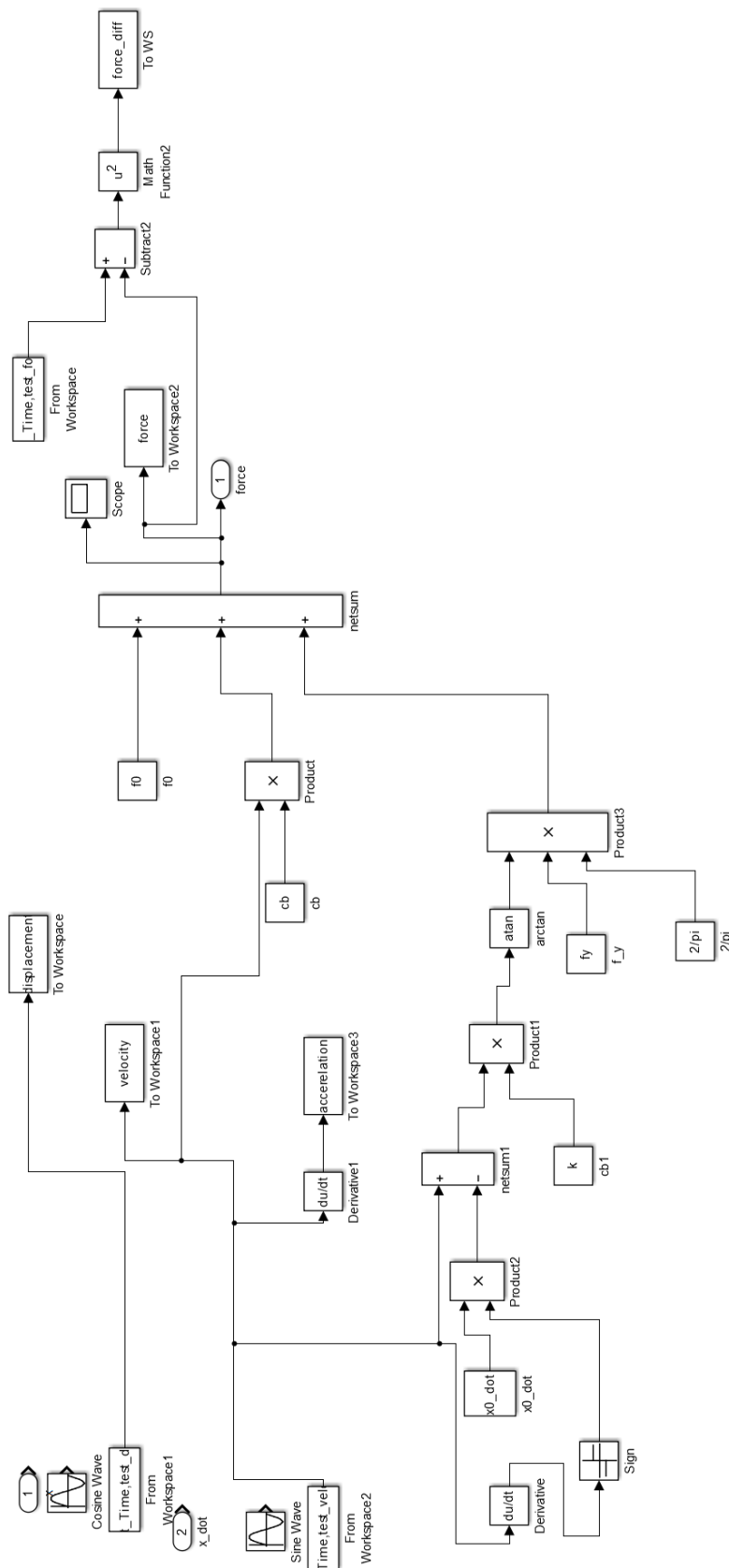
# DAHL



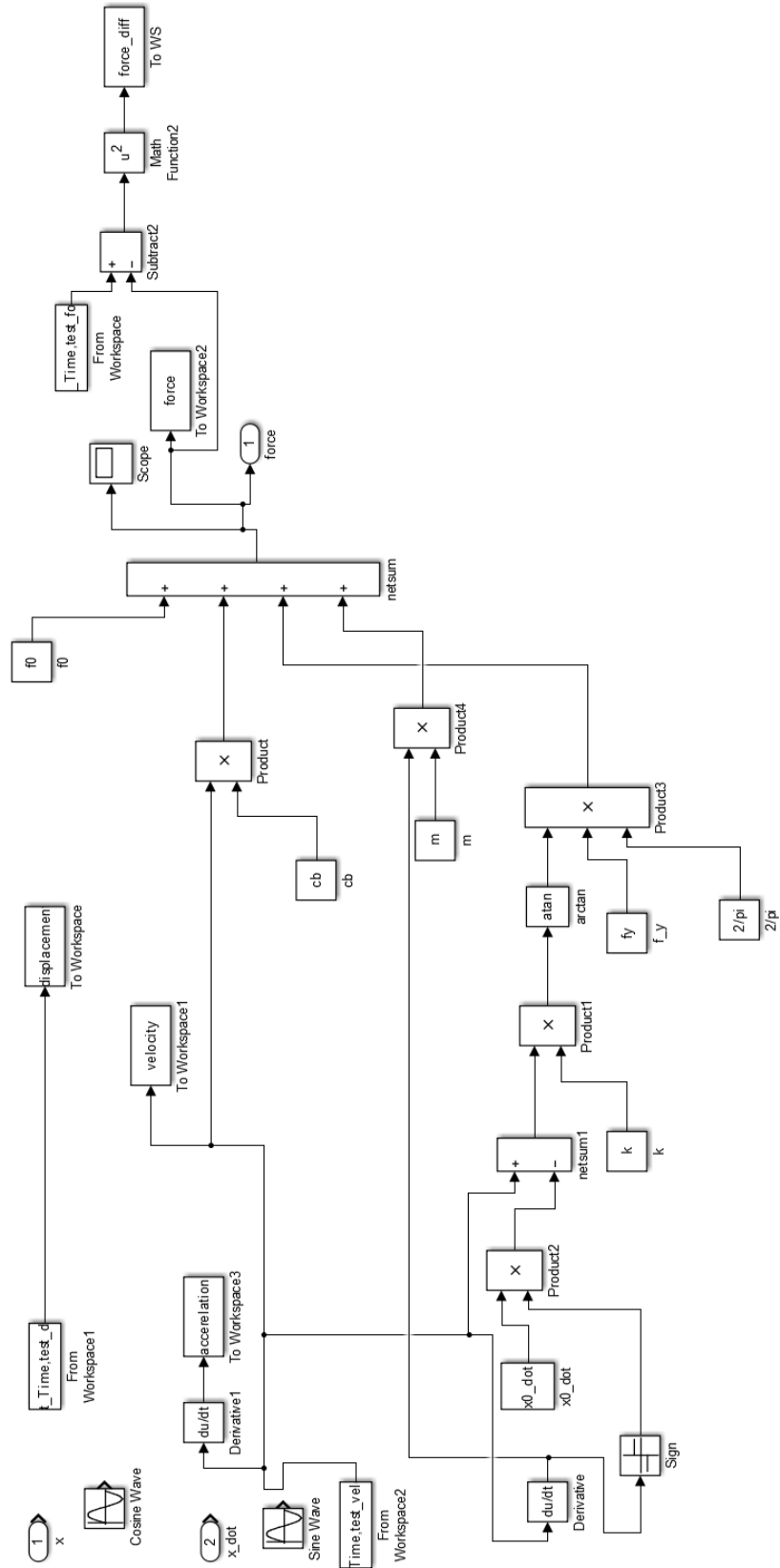
# LU-GRE



# CEBIRSEL MODEL



## DÜZENLENMİŞ CEBİRSEL MODEL





## ÖZGEÇMİŞ

Muaz KEMERLİ, 31.08.1986'da Kırkağaç'ta doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2004 yılında Yeşilköy 50.Yıl Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2004 yılında başladığı Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2010 yılında tamamladı. 2012 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde başladığı yüksek lisans eğitimini ise 2015 yılında Sakarya Üniversitesi'nde bitirdi. Aynı yılda Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde doktora eğitimine başladı. 2012 yılından beri Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.