



Depreme Duyarlı Yapıların Yarı-Aktif Manyeto-Reolojik Damperler ile Kontrolü

Program Kodu: 1001

Proje No: 115M363

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Tahsin ENGİN

Araştırmacı(lar):

Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR
Dr. Öğr. Üyesi İsmail ŞAHİN
Dr. Öğr. Üyesi Zekeriya PARLAK
Dr. Öğr. Üyesi Seval GENÇ
Dr. Öğr. Üyesi Gürsoy TURAN

Bursiyer(ler):

Arş. Gör. Muaz KEMERLİ
Arş. Gör. Özge ŞAHİN
Ceren GENÇ
Eda ÖZLEM
Hakan DOĞAN



ÖNSÖZ

Ülkemizin büyük bir bölümü ve önemli sanayi bölgelerinin birçoğu deprem kuşağı altında olduğu için, depreme karşı deprem gerçekleşmeden önlem almak büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada ülkemiz yapı stoğunun önemli bir kısmını oluşturan 5-8 katlı yapıların deprem dayanımı artırmak amacıyla manyeto-reolojik (MR) sıvılı bir damper (sönümleyici) kullanılmıştır. MR sıvılı damper yapısı gereği farklı sönüm kuvvetleri meydana getirebildiği için deprem sırasında gerekli olan sönüm kuvveti anlık olarak değiştirilebilmekte ve böylece daha etkili bir sönüm sağlanabilmektedir. Bu projede üniversitemize kazandırılmış olan hareket kontrollü sarsma tablası sayesinde yüksek kapasiteli ve gerçek verilere dayalı deprem sinyalleri kullanılarak yapıların testleri kontrolcüsüz ve MR etki altında kontrolcülü olarak gerçekleştirilmiştir. Gerçek binalar ile aynı rijitlik matrisine sahip kat sayıları farklı dört ayrı model çelik yapı üzerinde gerçekleştirilen testlerde, üç farklı kontrolcü, biri ticari diğer üçü proje kapsamında geliştirilen dört farklı MR damper kullanılmıştır. Bu damperlerde biri ticari olmak üzere iki farklı sıvı kullanılmış ve bunların her birinin genel performans üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Proje kapsamında gerek kontrol algoritmalarının uygulanması gerekse sarsma tablasının imalatını gerçekleştiren ve böylece üniversite-sanayii işbirliğinin ülkemizdeki en güzel örneklerinden birinin ortaya çıkmasını sağlayan SANLAB Simulation firmasına ve değerli ortakları Salih KÜKREK ve Evren EMRE ile, şirket mühendislerinden Beşir TAYFUR ve Berkay VOLKANER'e teşekkürü bir borç biliriz.

Ayrıca bu çalışmayı Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı (ARDEB 1001) kapsamında destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) şükranlarımızı sunarız.



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	1
İÇİNDEKİLER.....	2
TABLolar LİSTESİ	4
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	6
ÖZET	10
ABSTRACT	11
1. GİRİŞ.....	12
1.1 Projenin Tanımı.....	12
2. LİTERATÜR ÖZETİ	13
2.1 Binaların MR Damper ile Kontrolü	13
2.2 MR Damper Tasarımı.....	26
3. GEREÇ ve YÖNTEM.....	35
3.1 Bina Modeli Tasarımı	35
3.1.1 Bina Modellerinin Dinamik Karakterizasyonu.....	35
3.1.2 Kontrol Algoritması İçin Matematiksel Modelin Geliştirilmesi	39
3.2 Kontrol Algoritması Tasarımı	42
3.2.1 İncelenen ve Kodlaması Yapılan Kontrol Algoritmaları	43
3.2.2 Akım Kontrolcüsü Tasarımı (MR damperin ters modellemesi).....	48
3.2.3 Sıcaklık Değişimlerinin Damper Performansına Olan Etkisi.....	50
3.2.4 Karşılaştırma İndeksleri.....	51
3.2.5 MR Damper Kontrolcü Arayüzü	52
3.2.6 MR Damper ve Sarsma Tablası İçin Gereken Donanımların Kurulması	57
3.2.7 Model Binaya ait Test Düzeneği.....	60
3.3 Reometre ile MR Sıvı Karakterizasyonun Belirlenmesi.....	61
3.3.1 Paralel Plaka Başlığı İle Yapılan Ölçümler	63
3.3.2 Çift-Boşluk (Twin-Gap) Ölçme Başlığı İle Yapılan Ölçümler	63
3.4 MR Damperin Sayısal Modellenmesi.....	68
3.4.1 HAD Modelinin Genel Tasarımı.....	69
3.4.2 MR Damperdeki Manyetik Alanın Modellenmesi	72
3.4.3 Manyetik Alan Sonuçlarının HAD Modeline Uniform Olarak Adapte Edilmesi..	73

3.4.4	Manyetik Alan Sonuçlarının HAD Modeline Eşlenik Olarak Adapte Edilmesi ...	76
3.4.5	Eşlenik Modelin Reometre Ölçümleri İle Eşleştirilmesi	81
3.4.6	Reolojik Verilerin Regresyon Yöntemi İle Aktarılması	82
3.4.7	Reolojik Verilerin Herschel-Bulkley Modelinde İnterpolasyon ile Aktarılması ...	89
3.4.8	Reolojik Verilerin Kayma Gerilmesi İnterpolasyonu ve Viskozite İnterpolasyonu İle Aktarılması	90
3.5	MR Damper Tasarımı ve Optimizasyonu	94
3.5.1	Çift Milli MR Damper	94
3.5.2	Tek Milli (Akümülatörlü) MR Damper Tasarımı	104
3.6	Yeni MR Sıvıların Sentezlenmesi	106
3.6.1	Reolojik Ölçümler	107
3.6.2	Çökeltme Testleri	107
4.	MR DAMPER İMALATI VE PERFORMANS TEST SİSTEMİ	109
4.1	MR Damper İmalatı	109
4.2	MR Damper Performans Test Sistemi	111
4.3	HAD Modelinin Doğrulanması	112
5.	BİNA MODELLERİ VE SARMA TESTLERİ.....	114
5.1	Modellerin Üretim Süreci	114
5.2	Test Düzenegi	114
5.2.1	MR Damperin Yerleştirilmesi	115
5.2.2	İvmeölçerlerin Yerleştirilmesi.....	116
5.2.3	İpli Pozisyon Ölçerlerin Yerleştirilmesi.....	116
5.3	Modellerin Sarsma Tablasına Montajı	117
5.4	Testlerin Yürütülmesi.....	117
5.4.1	Deney Tasarımı.....	117
5.4.2	Deprem Verileri	118
6.	BULGULAR	120
6.1	Yeni sentezlenen MR Akışkanların Çökeltme Durumlarının İncelenmesi.....	120
6.2	MR Damper Test Sonuçları	123
6.3	Çelik Yapı Modelleri Sarsma Tablası Test Sonuçları	127
7.	GENEL SONUÇLAR.....	148
	KAYNAKÇA.....	151

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1. Deneysel frekanslar	35
Tablo 2. Analitik frekanslar	36
Tablo 3. Frekans değerleri.....	37
Tablo 4. (x) Yönünde görelî kat ötelemelerinin kontrolü (El-Centro)	38
Tablo 5. Sıcaklık aralıklarına bağılı kuvvet ifadeleri	51
Tablo 6. Sarsma tablası hareket sınırları	57
Tablo 7. Damper pistonuna ait hareket tanımları	72
Tablo 8. MRF132DG sıvısının 0.563 T için reolojik özellikleri	74
Tablo 9. Farklı sıcaklıklarda elde edilen Herschel-Bulkley eğri katsayılarının küçük bir örneğı	83
Tablo 10. Herschel-Bulkley eğri katsayıları için uydurulan yüzeye ait polinom katsayıları	83
Tablo 11. Ön tasarım için kullanılan geometrik değerler	96
Tablo 12. Optimizasyon için parametre sınırları.....	101
Tablo 13. Geometriye ait parametrik ilişkiler	101
Tablo 14. Aday noktaların parametre değerleri.....	102
Tablo 15. Aday noktaların optimizasyon ve analiz sonuçları	102
Tablo 16. Optimizasyon için sabit tutulan parameteler.....	105
Tablo 17. Optimizasyon için belirlenen değışken parametreler	105
Tablo 18. Tek milli damper için optimizasyon sonuçları ve analizler ile doğırulanması	106
Tablo 19. MR sıvı değışkenleri	106
Tablo 20. Hazırlanacak MR sıvıların içerik ve miktarları	107
Tablo 21. Üretilen damperler ve içine konulan sıvılar	109
Tablo 22. MR damper performans deney tasarımı.....	112
Tablo 23. İmal edilen MR damperin deneysel ve analiz sonuçları.....	112
Tablo 24. Deney Matrisi.....	118
Tablo 25. Yapı modellerine uygulanan deprem ivmelerinin ölçeklendirme katsayıları.....	119
Tablo 26. MR akışkanlarının viskozite değerleri	122
Tablo 27. Damper 1, Damper 2, Damper 3 ve LORD RD-8041-1'in artan akıma karşılık kuvvet artış oranları	123
Tablo 28. Kontrol edilmiş 5 katlı yapı modelinin deprem etkisi altındaki performansları	131
Tablo 29. Kontrol edilmiş 6 katlı yapı modelinin deprem etkisi altındaki performansları	136
Tablo 30. Kontrol edilmiş 7 katlı yapı modelinin deprem etkisi altındaki performansları	140
Tablo 31. Kontrol edilmiş 8 katlı yapı modelinin deprem etkisi altındaki performansları	144



Tablo 32. Kontrol algoritmaları ve damperler açısından J3 performans indeksleri (El-Centro)
..... 146

Tablo 33. Kontrol algoritmaları ve damperler açısından J3 performans indeksleri (Kocaeli)146

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Beş katlı betonarme binanın karkas durumu	35
Şekil 2. Çelik model bina sonlu eleman modeli.....	37
Şekil 3. Sırasıyla 5, 6, 7 ve 8 katlı çelik modellere ait perspektifler	39
Şekil 4. Sistemin genel blok diyagramı	43
Şekil 5. 5 katlı bina modeli örneği	47
Şekil 6. Ters MR damper modeline ait yapay sinir ağı şeması.....	49
Şekil 7.Farklı akımlarda sıcaklık ile MR damper sönüm kuvvetinin değişimi	50
Şekil 8. Kontrolcüler ve Ayarlar sekmesinin arayüzü	53
Şekil 9. MR damper Akım Tipi sekmesi arayüzü.....	54
Şekil 10. Grafikler sekmesinde Yer Değişimleri alt sekmesinin arayüzü	55
Şekil 11. Grafikler sekmesinde MR damper, Yer İvmeölçeri alt sekmesinin arayüzü	56
Şekil 12. Filtreler sekmesinin arayüzü	57
Şekil 13. Smotion 3000 sarsma tablası.....	58
Şekil 14. SenseBox marka ivmeölçerler	59
Şekil 15. (a) Kontrol panosu, (b) kuvvet sensörü, (c) pozisyon ölçer ve (d) sıcaklık ölçer (termokupul).....	59
Şekil 16. 3 Katlı ön test modeli	60
Şekil 17. Deney düzeneği blok diyagramı.....	61
Şekil 18. Reometre ölçüm cihazı (solda), Reometreye ait yardımcı ekipmanlar (sağda).....	62
Şekil 19. Paralel plaka başlığı (a), Çift-boşluk başlığı (b).....	62
Şekil 20. Paralel plaka başlığı ile yapılan ölçüm sonuçlarının kayma hızı-kayma gerilmesi ekseninde görünümü.....	63
Şekil 21. Çift-boşluk başlığı ile yapılan ölçüm sonuçlarının kayma hızı-kayma gerilmesi ekseninde görünümü.....	64
Şekil 22. MRF132DG sıvısı için paralel plaka, çift boşluk ile yapılan ölçümlerin manyetik akı-akma gerilmesi ilişkisinin matematiksel model ve katalog verileri ile karşılaştırılması	65
Şekil 23. MRF132DG sıvısı için paralel plaka, çift boşluk ile yapılan ölçümlerin kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisinin katalog verileri ile karşılaştırılması.....	65
Şekil 24. Kısa ve uzun aralıklarda çift boşluk ile alınan Herschel-Bulkley eğrilerinin kıyaslanması	66
Şekil 25. Paralel plaka ve çift boşluk ölçümleri kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisinin deneysel veriler ile kıyaslanması	67
Şekil 26. Paralel plaka ve çift boşluk ölçümleri kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-hız ilişkisinin deneysel veriler ile kıyaslanması	68

Şekil 27. 2B MR damper modeli ve simetri eksenini	69
Şekil 28. Ağ bağımsızlığının elde edilmesi.....	70
Şekil 29. HAD modelinin ağ yapısı	71
Şekil 30. MR damper geometrisindeki sınır şartları.....	71
Şekil 31. MR damperin manyetik alanı için (a) sonlu elemanlar çözüm ağı (b) akımın geçtiği geometri	73
Şekil 32. MR damperin manyetik akı yoğunluğunun sonlu elemanlar ile elde edilmesi (Manyetik akının akışkan içerisinde geçtiği bölgeler ok ile gösterilmiştir)	73
Şekil 33. MR damperin reolojik modelindeki viskozite bölgeleri	74
Şekil 34. MR damperin sayısal ve deneysel olarak elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması	75
Şekil 35. MR damperin sayısal ve deneysel olarak elde edilen kuvvet-hız eğrilerinin karşılaştırılması	75
Şekil 36. Manyetik akı yoğunluğunun 2B akış yüzeyi üzerindeki görünümü.....	77
Şekil 37. Manyetik akı vektörlerinin MR sıvı üzerindeki görünümü.....	77
Şekil 38. Verilerin FLUENT yazılımına aktarılmış hali	77
Şekil 39. Eşlenik modelin kuvvet-yer değiştirme grafiğinin eski model ve deneysel veriler ile kıyaslanması	79
Şekil 40. Eşlenik modelin kuvvet-hız grafiğinin eski model ve deney verileri ile kıyaslanması	80
Şekil 41. Etkin viskozitenin kanal girişindeki konturları (a) minimum hız için (b) maksimum hız için	81
Şekil 42. Akışkanın kanal kesit profili (a) Manyetik akıya maruz (b) Manyetik akıya maruz değil	81
Şekil 43. Bir kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisi ölçüm verilerine Herschel-Bulkley eğrisi uydurulması.....	82
Şekil 44. Herschel-Bulkley katsayıları için regresyon yüzeyleri	84
Şekil 45. Herschel-Bulkley katsayıları için regresyon yüzeyi kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-yerdeğiştirme sonuçları	85
Şekil 46. Herschel-Bulkley katsayıları için regresyon yüzeyi kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-hız sonuçları	85
Şekil 47. Herschel-Bulkley katsayıları için regresyon eğrisi oluşturulması.....	87
Şekil 48. Herschel-Bulkley katsayıları için regresyon eğrisi kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-yerdeğiştirme sonuçları	87
Şekil 49. Herschel-Bulkley katsayıları için regresyon eğrisi kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-hız sonuçları.....	88

Şekil 50. Herschel-Bulkley katsayılarının interpolasyon yoluyla elde edilmesine ait akış şeması	89
Şekil 51. Herschel-Bulkey interpolasyonunda kullanılan matris örneği.....	90
Şekil 52. Viskozite tabanlı interpolasyon için kullanılan matris örneği	91
Şekil 53. Viskozitenin interpolasyon yoluyla elde edilmesine ait akış çizelgesi	91
Şekil 54. İnterpolasyon metotları kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-yerdeğiştirme ilişkilerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması	93
Şekil 55. İnterpolasyon metotları kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-hız ilişkilerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması	93
Şekil 56. Çift milli (akümülatörsüz) MR damper modeli	95
Şekil 57. MR damper CAD modeli	95
Şekil 58. Ön tasarım geometrisinin HAD analizi kuvvet-yerdeğiştirme sonuçları.....	96
Şekil 59. Ön tasarım geometrisinin HAD analizi kuvvet-hız sonuçları	97
Şekil 60. Ön tasarım geometrisinin manyetik analizi sonucu dampere ait manyetik akı yoğunluğu konturları	97
Şekil 61. Ön tasarım geometrisinin manyetik analizi sonucu akışkan bölgesine ait manyetik akı yoğunluğu konturları	98
Şekil 62. Ön tasarım geometrisinin kanalındaki hız profilleri (0.23 sn için) (a) manyetik akının ulaşmadığı bölge (b) manyetik akı altındaki bölge	98
Şekil 63. MR dampere ait parametrik büyüklükler.....	99
Şekil 64. Makaranın dış kısmında eğimin olduğu bölgenin gösterimi	100
Şekil 65. Bobin içerisindeki tel yerleşimi	100
Şekil 66. Parametrelerin dinamik oran ve sönüm kuvveti üzerindeki etkileri.....	104
Şekil 67. Tek milli damperin önden görünüşü	104
Şekil 68. Tek milli damper için parametrelerin gösterimi	105
Şekil 69. Çökelme miktarının hesaplanması	108
Şekil 70. Damper 1 (SAU-MRD-TM-Pr1)	110
Şekil 71. Damper 2 (SAU-MRD-TM-Pr2)	110
Şekil 72. Damper 3 (SAU-MRD-ÇM-Pr3).....	110
Şekil 73. Lord RD-8041-1 MR Damper	111
Şekil 74. Deney düzeneği genel görünüşü.....	111
Şekil 75. İmal edilen MR damperin hız-yerdeğiştirme grafiklerinin kıyaslanması.....	113
Şekil 76. İmal edilen MR damperin hız-kuvvet grafiklerinin kıyaslanması	113
Şekil 77. Ölçeklenmiş çelik yapı modelleri	114
Şekil 78. Sarsma tablası deney düzeneği ve 8 katlı ölçeklenmiş yapı modeli	115
Şekil 79. MR damperin yerleşim detayı	115

Şekil 80. İvmeölçerlerin kat döşemelerine bağlantı detayı	116
Şekil 81. İpli pozisyon ölçerler detayları	116
Şekil 82. Binayı korumak için kullanılan çelik halatlar	117
Şekil 83. Model yapı montajı.....	117
Şekil 84. Sarsma tablası deneylerinde kullanılan deprem ivmeleri.....	119
Şekil 85. MR akışkanların çökme özellikleri	120
Şekil 86. Viskozitenin kayma hızına göre değişimi.....	121
Şekil 87. MR akışkanlarının akma gerilmelerinin manyetik alan ile değişimi	122
Şekil 88. Damper 1'in (a) Kuvvet-Yerdeğiştirme ve (b) Kuvvet-Hız grafikleri	124
Şekil 89. Damper 2'in (a) Kuvvet-Yerdeğiştirme ve (b) Kuvvet-Hız grafikleri	125
Şekil 90. Damper 3'ün (a) Kuvvet-Yerdeğiştirme ve (b) Kuvvet-Hız grafikleri.....	126
Şekil 91. LORD RD-8041-1 damper'in (a) Kuvvet-Yerdeğiştirme ve (b) Kuvvet-Hız grafikleri	127
Şekil 92. Ölçeklenmiş yapı modelinin (5 katlı) El-Centro depremi etkisi altındaki davranışı	129
Şekil 93. Ölçeklenmiş yapı modelinin (5 katlı) Kocaeli depremi etkisi altındaki davranışı....	130
Şekil 94. 5 katlı yapı modelinin farklı kontrol uygulamaları altındaki görel kat yer değiştirmeleri	131
Şekil 95. Ölçeklenmiş yapı modelinin (6 katlı) El-Centro depremi etkisi altındaki davranışı	134
Şekil 96. Ölçeklenmiş yapı modelinin (6 katlı) Kocaeli depremi etkisi altındaki davranışı....	135
Şekil 97. 6 katlı yapı modelinin farklı kontrol uygulamaları altındaki görel kat yer değiştirmeleri	136
Şekil 98. Ölçeklenmiş yapı modelinin (7 katlı) El-Centro depremi etkisi altındaki davranışı	138
Şekil 99. Ölçeklenmiş yapı modelinin (7 katlı) Kocaeli depremi etkisi altındaki davranışı....	139
Şekil 100. 7 katlı yapı modelinin farklı kontrol uygulamaları altındaki görel kat yer değiştirmeleri	140
Şekil 101. Ölçeklenmiş yapı modelinin (8 katlı) El-Centro depremi etkisi altındaki davranışı	142
Şekil 102. Ölçeklenmiş yapı modelinin (8 katlı) Kocaeli depremi etkisi altındaki davranışı..	143
Şekil 103. 8 katlı yapı modelinin farklı kontrol uygulamaları altındaki görel kat yer değiştirmeleri	144



ÖZET

Bu projede ülkemiz yapı stoğunu temsil eden 5-8 katlı yapıların deprem güvenilirliğini artırmak üzere yapı kontrolünü sağlayacak ekonomik ve etkili bir deprem sönümleyici sisteminin tasarımı, optimizasyonu ve değişik deprem yükleri etkisi altındaki testleri gerçekleştirilmiştir. Seçilen gerçek yapılarla aynı dinamik karakteristiklere sahip ölçeklenmiş çelik yapı modellerinin, altı serbestlik dereceli sarsma tablası ile gerçek deprem verileri kullanılarak dinamik deneyleri yapılmıştır.

Proje kapsamında kullanılan titreşim sönümleyiciler manyeto-reolojik (MR) sıvılı yarı-aktif damperlerdir. Çift milli ve tek milli olmak üzere iki farklı tipte MR damperlerin optimum tasarımı, analizi ve imalatı gerçekleştirilmiş, bu damperlerde dünya çapında yaygın olarak kullanılan ticari bir MR sıvı kullanılmasının yanında, proje kapsamında geliştirilen ve karakterizasyonu tanımlanmış olan özgün bir sıvı da kullanılmıştır. Performans ölçümleri yapılan biri ticari olmak üzere dört farklı MR damperin etkinliği, sarsma tablası üzerine yerleştirilen model yapılarda EI-Centro ve Kocaeli deprem yükleri etkisi altında incelenmiştir. MR damperin kontrolü üç farklı kontrol algoritması kullanılarak yapılmış ve her bir kontrol algoritmasının performansı değerlendirilmiştir. Ayrıca MR damperlerin dinamik karakterizasyonunda bugüne kadar literatürde pek dikkate alınmayan sıcaklık etkileri de kontrol algoritmalarına dahil edilerek MR damper performansı sıcaklığa adaptif hale getirilmiştir.

MR damperlerin tasarımı, manyetik alan etkileşimli akış alanı çözümüne dayalı optimizasyonu, alternatif bir yerli MR sıvı üretimi, Türkiye'deki yapı stoğunun dinamik karakteristiklerini yansıtan ölçeklenmiş çelik yapı modellerinin tasarımı ve kullanımı, sıcaklık etkilerinin dahil edildiği farklı kontrol algoritmalarının uygulanması bu projenin öne çıkan özgün yönleridir.

Bu proje sonucunda, aktif deprem kuşağı üzerinde bulunan ülkemizde depremin yıkıcı etkilerine karşı gerçek yapılarda uygulanabilecek ve ticarileştirme potansiyeli (Teknoloji Hazırlık Seviyesi en az 6) yüksek olan bir ürün, kontrol algoritmalarıyla beraber özgün olarak geliştirilmiştir. Önerilen entegre sistem ile depremin yıkıcı etkilerinin kontrolcüsüz duruma göre %67'ye varan oranlarda azaltılabileceği ve böylelikle can ve mal kayıplarının önüne geçilebileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deprem, Yapı güvenliği, MR sıvı, MR damper, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, MR damper optimizasyonu, Kontrol algoritmaları, Sarsma tablası, Yapay Sinir Ağları



ABSTRACT

In this study, design and optimization of an economic and effective earthquake resistant system is developed by providing structural control to increase the earthquake safety of our country building stock of 5-8 storey buildings by conducting tests with various seismic loads. The scaled steel building models were chosen with the same dynamic characteristics of real structures and dynamic tests are carried out on a 6-dof shaking table with real earthquake records.

The dampers used in this project are semi-active magnetorheologic (MR) dampers. Single ended and double ended MR dampers are designed with an optimization study, simulated in Computational Fluid Dynamics (CFD) and manufactured. The magnetorheological fluid inside the dampers are either obtained from a commercial MR fluid manufacturer or studied and manufactured. These produced fluids are also characterized and used in the MR dampers. Three manufactured and one commercial MR damper are tested and applied to the first floor of the scaled model buildings. The building is subjected to the seismic motions obtained from El-Centro and Kocaeli earthquake records. Three different control algorithms are applied to MR dampers during the shake tests and the effect of the algorithms are investigated. The temperature effect on MR dampers are also considered in the control algorithm which has not been considered in the studies before. This feature increases the damper performance by adapting it to temperature changes.

The design of the MR dampers, the optimization which is based on magnetically coupled CFD solution models, an alternative domestic MR fluid production, the manufacturing and application of scaled steel building models which are specific to represent the dynamic characteristics of Turkey building stock and the implementation of temperature effects on control algorithms are the original side of the project.

As a result, a final product is developed with the various control algorithms against hazards of an earthquake in our country which is placed on an active earthquake zone. The product is applicable to real structures with small modifications and ready for commercialization with a Technology Readiness Level of at least 6. It is shown that by using the proposed integrated system, the effect of an earthquake can be reduced up to %67 comparing to the fail-safe (off-state) condition of the controller and the life safety can be ensured while property losses can be prevented.

Keywords: Earthquake, Earthquake-resistant structure, MR fluid, MR damper, Computational Fluid Dynamics, MR damper optimization, Control algorithms, Shaking table, Neural network



1. GİRİŞ

1.1 Projenin Tanımı

Birçok yerleşim ve sanayi bölgesi deprem kuşağında yer alan ülkemizde ve özellikle Sakarya ve çevresinde 17 Ağustos 1999'da yaşanan can ve mal kayıpları dikkate alındığında, depreme dayanıklı yapıların geliştirilmesinin ve bu alanda çalışmaların yoğunlaştırılmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Türkiye yapı stoğunu temsil eden 5-8 katlı yapılara uygulanacak olan bir sönümlenme sistemi, yapıların performans seviyesinin can güvenliği (life safety) seviyesinden deprem sonrası hemen kullanım (immediate occupancy) seviyesine yükseltilmesini sağlayacaktır.

Yapılara gelen dış etkilerin sönümlenebilmesi için çok farklı tipte izolatörler bulunmaktadır ve bu alandaki çalışmalar halen güncelliğini korumaktadır. Üzerinde son yıllarda artan bir şekilde araştırma yapılan ve yapı güvenliği açısından da potansiyel barındıran sönümleyicilerden bir tanesi de yarı-aktif sönümleyici olarak tanımlanan MR damperlerdir. MR damperler, gerekli sönüm kuvvetini, uygulanan manyetik alan kontrolü sayesinde sağlayarak istenilen cevabı milisaniyeler içerisinde verebilecek özellikte cihazlardır. Ayrıca bu damperler bir kontrol algoritması sayesinde değişken kuvvetler üretilen ve aktif edilebilmesi için güç gerektirmeyen sönüm elemanlarıdır. Bu avantajları sayesinde MR damperler bugün bina ve köprü gibi yapılarda, lüks otomobil ve askeri araç süspansiyonlarında, protez bacak ve el gibi çok hızlı cevap ihtiyacı duyan mekanizmalarda kullanılabilir.

Bu proje kapsamında MR damperli bir yarı-aktif sönümlenme sisteminin optimum tasarımı, analizi, imalatı ve üç farklı kontrol algoritması kullanılarak sarsma tablası üzerine monte edilen 4 farklı model çelik yapı üzerinde uygulaması yapılmıştır. İmal edilen MR damperlerin bazılarında kullanılan MR sıvılar, proje ekibi tarafından üretilmiş ve karakterizasyonu yapılmıştır. Tasarımı ve imalatı yapılan MR damperlerin dinamik karakterizasyonu bugüne kadar literatürde dikkate alınmayan sıcaklık etkileri göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üç farklı kontrol algoritması karşılaştırılmalı olarak değerlendirip Türkiye yapı stoğuna uygunluk açısından incelenmiştir.

Böylece deprem güvenliğini artırmak amacıyla yapılara uygulanabilecek yeni bir damper ve bunun kontrolünü sağlayacak olan algoritmalar geliştirilmiştir. Yapılan testler neticesinde etkinliği kanıtlanmış olan bu damperlerin, gerçek yapılarda kullanılmak üzere daha büyük ölçeklerde üretim yapılmasını sağlayacak bilgi birikimi bu proje sayesinde ülkemize kazandırılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Proje, farklı disiplinlerin ortak çalışması niteliğinde olduğundan literatür araştırması da buna uygun olarak aşağıdaki gibi “Binaların MR Damper ile kontrolü” ve “MR Damper tasarımı” başlıkları altında sınıflandırılmıştır.

2.1 Binaların MR Damper ile Kontrolü

Yapısal sistemler hizmet süreleri boyunca deprem ve rüzgâr gibi dış kuvvetler etkisinde kalmakta ve bunlar zaman zaman yapı üzerinde ciddi hasarlara neden olabilmektedir. Bu etkiler sırasında oluşan yapısal titreşimleri ve hasarı azaltmak için pasif, aktif ve yarı-aktif kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Çok katlı bina türü yapıların deprem güvenliğinin artırılması ve sismik kayıpların azaltılmasında hasar süreci denetimi büyük önem taşımaktadır. Günümüzde enerji sönmüleyici cihazların kullanımı ile binaların sismik performansının geliştirilebileceği bilinmektedir. Bununla birlikte yapı güvenliği için, bu cihazların yerleşim ve boyutlarının uygun şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bu açıdan MR damperler üstün seviyedeki dinamik sönmüleme özelliği nedeniyle büyük bir potansiyel barındıran titreşim kontrol cihazları arasındadır.

Literatür incelendiğinde genellikle kontrol sistemleri ile ilgili genel bilgiler paylaşıldığı ve daha çok kontrol algoritmaları geliştirme üzerinde durulduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda öncelikle amaç, yapılarda deprem etkisiyle meydana gelen titreşimleri ve gerçek zamanlı yerdeğiştirmeleri azaltmaktır. Ayrıca yapısal kontrol yapılarda belli performans hedeflerini karşılamak amacıyla kullanılmış olup mevcut depreme dayanıklı tasarıma katkı sağlamıştır. Birçok yapıda yapısal kontrol, hasar tespitlerinin analiz edilmesinde de kullanılmıştır. Yapı sistemi olarak tek serbestlik dereceli yapılar, yüksek katlı çelik yapılar ve komşu çelik yapılar kullanılmıştır. 2016 yılında yapılan çalışmalarda MR damper davranışını en iyi temsil eden modelin bulunması konusuna da sıkça değinilmiştir. Yarı-aktif kontrol sistemlerinde yapılan detaylı literatür çalışmaları hem deneysel hem de teorik araştırmaların mevcut olduğunu, ancak deneysel araştırma sonuçlarına yoğunlaşıldığını göstermiştir.

Aldemir ve Aydın (2005) yaptıkları çalışmada, yapıların deprem ve rüzgâr gibi dinamik etkilere karşı korunması için Dünyadaki en son gelişmelere yer vermişlerdir. Pasif enerji sönmüleyiciler, sismik izolasyon, aktif/yarı aktif ve karma kontrol sistemleriyle ilgili bilgiler paylaşılmıştır.

Aldemir ve Bakioglu (2000), çalışmalarında deprem etkileriyle ortaya çıkan titreşimleri bastırabilmek için değişken rijitlik ve sönmüme sahip bir eyleyici kullanarak yeni bir yarı aktif

kapalı çevrim kontrol algoritması geliştirmiştir. Bu algoritmayı sistem enerjisinin değişme hızını mümkün olduğu kadar negatif olmaya zorlanması ile elde ettikleri görülmektedir. Metodun verimliliğini ölçmek amacıyla deprem etkisindeki tek katlı sönümlü bir yapının kontrollü ve kontrolsüz davranışını incelemişlerdir. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek amacıyla bu algoritma ile birlikte en uygun aktif kontrol algoritmasını da kullanmışlardır. Çalışmada önerilen yarı aktif kontrolün depremin oluşturduğu titreşimleri azaltmada etkin olarak kullanılabileceğini sayısal olarak göstermişlerdir.

Amini vd. (2013) aktif ayarlı kütle sönümleyici için optimal kontrol kuvvetlerini bulan yeni bir yöntem sundular. Bu metot için (DWT), (PSO) ve (LQR) algoritmalarını kullandılar. DWT algoritması frekans bandı üzerinden yerel enerji dağılımını elde etmek için kullanılmıştır. Yöntem, 10 katlı bir yapı için yakın tarihli birkaç yer hareketi göz önüne alınarak test edilmiştir. Sonuçlar önerilen yöntemin, geleneksel LQR kontrollerine göre yapıdaki gerçek zamanlı yerdeğiştirmeleri azaltmada daha etkili olduğunu göstermiştir.

Askari vd. (2016) doğrusal olmayan bulanık tabanlı sistem tanımlama yöntemi için k-ortalama kümeleme ve genetik sıralama algoritması belirleyerek gelişmekte olan bir kodlama şeması kullanmışlardır. Bu metot, bulanık model yapısındaki üyelik fonksiyonları gibi girişlerin en iyilerini otomatik olarak seçebilmektedir. Ayrıca, modelin doğruluğu ve kompaktlığı üç amaç fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Geliştirilen yöntem daha sonra doğrusal olmayan yapısal kontrol cihazının her iki düz ve ters modelini tespit etmek amacıyla kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar doğrusal olmayan MR damper davranışını minimum sayıda veri girişi ile Takagi-Sugeno-Kang bulanık modelinin iyi bir şekilde temsil ettiğini göstermiştir.

Bai ve Cha (2016) MR damperlerle yarı aktif kontrollü yüksek katlı binaların sismik kırılma analizi üzerinde durmuşlardır. Bina türü yapıların deprem hasarını azaltmak amacıyla çok çeşitli kontrol cihazları ve metodolojiler geliştirilmiştir. Ancak, sismik tehlike seviyeleri geniş bir yelpazede incelendiğinde sismik kırılma ile ilgili çok az sayıda araştırma yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmada, 9 katlı moment aktaran çelik bir çerçeve sistemi incelenmiş ve yapıya merkezi olmayan çıkış geri beslemeli polinom kontrol algoritması (DOFPC) uygulanmıştır. Sismik kırılma ilişkileri, iki farklı tehlike düzeyinde bir sistem güvenilirliği yaklaşımı kullanılarak 41 deprem yer hareketi için incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sistem güvenilirliği yaklaşımına dayalı kırılma tahmini ön sonuçları, birden çok deprem yer hareketiyle oluşan çoklu performans tabanlı kontrol tasarımlarının sismik performans üzerinde olumlu etkiler yaptığını göstermiştir (Bai vd., 2016).

Barbat vd. (1995) çalışmalarında, yapılar için aktif kontrol sistemi ile doğrusal olmayan pasif izolatör sistemini birleştiren karma bir sismik kontrol sistemi kullanmışlardır. Aktif kontrol kuvvetleri mutlak yer değiştirmelerin azaltılması amacı ile yapısal temele uygulanmıştır. Adaptif kontrol kanunu bina ve taban izolatör özelliklerindeki belirsizlikleri gidermek, sismik uyarı altında sistemin kararlı davranış biçimini sağlamak amacıyla kontrol kuvvetlerini hesaplamak için formülize edilmiştir. Hibrit kontrol sisteminin etkinliğini değerlendirmek amacıyla sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Yapı-temel-izolatör sisteminin davranışının temelde meydana gelen yer değiştirmeleri büyük ölçüde azalttığı sonucuna varılmıştır.

Basili vd. (2013) yaptıkları çalışmada pasif ve yarı aktif damperler tarafından kontrol edilen bitişik nizamlı yapıların sarsma tablası ile elde edilen test sonuçlarını sunmuştur. Amaç, sismik hareketlerle birlikte yapıda meydana gelen titreşimlerin azaltılmasında pasif ve yarı aktif yöntemlerin etkinliğini deneysel olarak göstermektir. Fiziksel model olarak komşu iki çelik yapı (2 ve 4 katlı) kullanılmıştır. Yapılara ikinci kat düzeyinde MR damperler yerleştirilmiştir. Yarı aktif modda çalıştırılan cihazda Lyapunov kararlılık teorisi ile elde edilen bir ON-OFF kontrol algoritması uygulanmış ve deneysel olarak geçerliliği gösterilmiştir. Deneylerde, komşu yapılara uygulandıktan sonra global ve seçici koruma olmak üzere iki kontrol hedefine ulaşılmıştır. Global korumada her iki yapıyı da korumak üzerinde durulurken, seçici korumada sadece bir yapıyı korumak üzerinde durulmuştur. Her hedef için öncelikle pasif kontrolün kontrolsüz duruma göre etkinliği sorgulanmış, daha sonra yarı aktif kontrolün etkinliği pasif kontrolle karşılaştırılmıştır. Yapılan deneylerde, global ve seçici koruma hedefleri için kontrol algoritması uygulanmış ve doğrulanmıştır.

Beard vd. (1994) hibrit olarak bilinen aktif/pasif titreşim izolasyon sistemlerini, sismik düzeyde hassas yüklerin meydana getirdiği bozuklukları gidermek için kullanmışlardır. Sistem dinamiğinde rijitlik dayanımı gereksinimleri bazı fiziksel sonuçlar vurgulanarak ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Hard-mount yönteminin istenen performans ve rijitlik kriterlerini sağladığını teorik ve deneysel sonuçlar ile doğrulamışlardır.

Bhardwarj ve Datta (2006) çerçevesel yapıların yarı aktif kontrolünü sağlamak amacıyla bulanık kontrolle çalışan bir yarı aktif hidrolik amortisör kullanmışlardır. SHD çelik çaprazlarla birlikte farklı kat seviyelerine yerleştirilen amortisörlerde, bulanık kontrol en alttaki SHD'de tasarlanmıştır. Farklı oranlarda (boyutlarda) farklı dağılımlar veren yarı aktif kontrol, çerçevenin yüksekliği boyunca maksimum tepki miktarını kontrol ederek en iyi dağılıma ulaşmıştır. Bu metod simulink ve bulanık araç çubukları kullanılarak MATLAB ortamında geliştirilmiştir. Örnek olarak, literatürden 5 katlı çelik bir çerçeve sistemi seçilmiştir. Çerçevenin El-Centro deprem kaydı altındaki kontrolü belirli bir çerçeve kümesi, çelik çaprazlar ve SHD özellikleri için elde

edilmiştir. Önemli parametrelerin değişimi altında kontrol şeması etkinliğini araştırmak amacıyla kapsamlı bir parametrik çalışma yapılmıştır. El-Centro depremi için tasarlanmış parametrelerin optimum değerleri ile kontrol stratejisi, üretilen 3 sentetik depremde test edilmiştir. Çalışma sonuçları etkin yarı aktif kontrol stratejisinin bulanık kural tabanı kullanılarak geliştirilebileceğini göstermiştir.

Bitaraf vd. (2012) yarı-aktif ve aktif kontrol cihazlarını kullanarak direkt adaptif kontrol yöntemi ile hasarlı ve hasarsız iki yapı sisteminin davranışını incelemiştir. Adaptif kontrol metodunda kontrol sistemi, istenen davranışın elde edilmesi için model sistem gibi davranmaya zorlanır. Adaptif kontrol yöntemi modeli, kontrollü yapının tepkisini optimize edecek şekilde tanımlanmıştır. Kontrolör, yapı özelliklerinde meydana gelen değişimleri, kontrol işlemi sırasında parametrelerin değiştirilebilmesiyle absorbe edebilen bir yöntemle geliştirilmiştir. Hidrolik aktüatörler (eyleyici) yapı davranışını denetlemek amacıyla aktif kontrol cihazları olarak kullanılırken, bu çalışmada MR damperler yarı aktif kontrol cihazı olarak kullanılmıştır. 3 katlı bir binanın performansı zaman tanım alanında analizler yapılarak incelenmiştir. Yapı farklı depremlere tabi tutulmuş ve direkt adaptif kontrol yöntemi ile kontrol edilmiştir. Yapı analizlerinde, bazı rijitlik azalmaları neticesinde yapının birinci katında hasarlar meydana gelmiştir. Ayrıca direkt adaptif kontrol stratejisi hasarsız yapı yanıtını optimize etmek için kullanılmış ve çıktı ölçümlerinden kontrollü yapıda meydana gelen hasarın azaldığı gözlemlenmiştir. Adaptif kontrol metodu ile elde edilen sonuçlar diğer kontrol yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. 3 katlı yapının performansının adaptif kontrol yöntemi kullanılarak geliştirilebildiği gösterilmiştir. Farklı kontrol yaklaşımlarının sonuçları değerlendirildiğinde, adaptif kontrol metodunun diğer yöntemlere göre daha güvenilir sonuçlar verdiği ve yarı aktif cihazların daha etkin çalıştığı tespit edilmiştir.

İnşaat Mühendisliği alanında, yapısal izleme sistemlerinde kablosuz sensör ağlar uygulanmak üzere tasarlanmıştır. Yapısal kontrol uygulamalarında, sürekli ve gerçek zamanlı algılama yapılırken ana zorluk kablosuz sensör ağında meydana gelen veri kaybıdır.

Casciati ve Chen (2012) sarsma tablasına monte edilmiş 3 katlı çelik bir çerçevenin yapısal kontrol mekanizmasına kablosuz bağlantılar ve dijital kontrolör tanıtmışlardır. Yapısal kontrol sistemi temel olarak 4 ivmeölçer, yapısal kontrolör ve harekete geçirici (aktüatör) olarak aktif kütleli damperden (amortisör) oluşmaktadır. Tasarlanan kablosuz sensörler düşük güç sistemlerinin kullanımına dayanmaktadır.

Cha vd. (2014) geleneksel performansa dayalı tasarım ve yarı aktif akıllı sönümlenme cihazları içeren doğrudan performansa dayalı tasarım metodolojisini, bir optimizasyon uygulaması ile

incelemişlerdir. Bu tasarım yöntemi, maliyet ve verimliliği aynı anda optimize ettiği için birden fazla tehlike seviyesine maruz hedefler birden fazla performans seviyesine ulaşılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmada, optimizasyon çalışması için genetik algoritma tekniği kullanılmıştır. Büyük ölçekli bir MR damper (200 kN) 9 katlı moment aktarabilen bir çerçeve sistemine yerleştirilmiştir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sırasında meydana gelen katlar arası kaymalar ve yerleştirilen minimum sayıda MR damper, performansa dayalı tasarım hedefleri olarak kabul edilmiştir. MR damperlerin yeri optimizasyon yoluyla elde edilmiştir. Her MR damperin yerleştirme düzeni performansını belirlemek amacıyla zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yapılmıştır.

Chae vd. (2014) 3 katlı çelik bir yapıda MR damperler kullanarak gerçek zamanlı hibrit simülasyonlar (RTHS) yapmışlardır. Çalışmada kullanılan prototip yapıda yanal kuvvet direnç sistemini moment aktaran çerçeveler ve sönümlü destek elemanları oluşturmaktadır. Simülasyonun deneysel alt yapısını MR damperler oluştururken, binanın kalan yapısal bileşenleri ise doğrusal olmayan analitik alt yapı üzerinden modellenmiştir. Deneylerden elde edilen veriler, nümerik simülasyon modellerinin kalibre edilmesi, MR damperlerin performansı ve gerçek yapıların performansa dayalı sismik tasarım prosedürlerini doğrulamak için kullanılmıştır. Gerçek zamanlı hibrit simülasyon (RTHS) prosedürü test kurulumu, entegrasyon algoritması ve aktüatör kontrolünü içermektedir. Gerçek zamanlı hibrit simülasyonlar (RTHS), aktüatör kontrolü, damper davranışı ve farklı kontrol yöntemleri altında yapısal tepkiler gibi önemli parametreleri içeren bir dizi sonuçlar sunmuştur. Kuvvetli yer hareketi altında yapısal tepkiyi azaltmak amacıyla MR damper kullanımının etkinliği deneysel olarak gösterilmiştir. Gerçek zamanlı hibrit simülasyonlar nümerik simülasyonlarla karşılaştırılmıştır. Böylece, RTHS'nin damperlerle birlikte gerçek yapılara uygulanabildiği ve yapılan uygulamanın depreme dayanıklı tasarım ilkesine katkı sağladığı sonucuna varılmıştır.

Chae vd. (2014) büyük ölçekli MR damper kullanarak gerçek zamanlı hibrit simülasyonları, 3 katlı çelik çerçevenin deprem tepkisini kontrol etmek ve çeşitli yapısal kontrol stratejilerinin performansını değerlendirmek amacıyla yaptılar. MR damperler binanın tasarım depremi altında kayma değerinin % 1.5 sınırının altına düşmemesi şartıyla yerleştirilmiştir. Bazı yarı aktif kontrolörler, belirli bir yer hareketi için daha iyi bir performans göstermesine rağmen, bu çalışmadaki 3 katlı yapıda kullanılan pasif kontrolörler ile yarı aktif kontrol algoritmalarının genel performansının benzer olduğunu göstermiştir. Kontrol algoritmalarının performansını anlamak amacıyla OpenSees kullanarak yapılan sayısal simülasyon sonuçları ile gerçek zamanlı hibrit simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

Chang vd. (2016), titreşim kontrol sistemleri ile ilgili gelişmeleri sunmuşlardır. Özellikle titreşim kontrol cihazlarının histerisiz davranışını doğru bir şekilde açıklayan Bouc-Wen model uygulamalarının üzerinde durulmuştur. Çalışma, titreşim kontrolünde kullanılan bu modele ait teorik bilgiler, tanımlama prosedürleri ve uygulamaları içermektedir.

Chen vd. (2016) yüksek frekanslı titreşim modunda MR sıvıların davranışı üzerine deneysel bir inceleme sunmuşlardır. Ayrıca, MR damper için matematiksel bir model önermişlerdir. Deneysel testler için kavitasyon etkisinden kaçınılarak özel bir MR yapısı tasarlanmıştır. Yüksek frekanslarda MR sıvısının davranışını yorumlamak için model sıvının atalet ve histerezis özelliği dikkate alınarak bir matematiksel model kurulmuştur. Sönüm kuvvetinin, yüksek frekanslı titreşim modunda teorik ve deneysel sonuçları karşılaştırıldığında, kayma gerilmelerinin MR sıvısının akış özelliğini iyi bir şekilde karakterize ettiği için uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Buna ek olarak, histerezis özelliğinin sönümleme performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür.

Çetin vd. (2011) çalışmalarında altı serbestlik dereceli bir yapının titreşimini azaltmak amacıyla MR damper kullanarak, H_{∞} gürbüz kontrolü tasarlamışlardır. Sismik açıdan uyarılmış, yarı aktif ve doğrusal olmayan bir yapı sistemi modellenmiştir. Kontrolör, order modele göre tasarlanmış ve full order modele uygulanmıştır. Kontrolörün performansı deneysel olarak doğrulanmıştır. H_{∞} kontrolör performansının, belirsizliklerin varlığına rağmen, yapı titreşimini azaltmada tatmin edici sonuçlar verdiği görülmüştür.

Dağıtılmış kitle amortisör sistemleri bina güvenliği ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla, yapısal ve çevresel kontrol sistemleri ile entegre olmuştur. Böyle bir sistem kullanılarak yapıyı harekete geçirmek ve elde edilen sonuçları analiz etmek için kullanılan birden çok aktif kütleli damper yapısal sağlık gözetimi artırılabilir. SHM'nin (Yapısal Sağlık Gözetimi) güvenilirliği yapısal tepki ölçümlerinden elde edilen yapısal özelliklerin doğru tahminine bağlıdır. Ancak, yapısal modlar gibi bazı yapısal özellikler iyi temsil edilemeyebilir. Yazarlar, yapılarda hasar tespitinin önemli ölçüde geliştirilmiş olduğunu, ilgili yapısal mod hedeflerinde DMD çoklu aktif amortisör kombinasyonlarını kullanarak göstermişlerdir. Fu ve Johnson (2014) DMD sistemini kullanarak modal algoritma parametreleri üretmek amacıyla algoritmaları türetmişlerdir. Rijitlik tahminleri ve hasar tespitleri elde edilen model parametrelerinden sonra hesaplanmıştır. Harmonik hareketler (uyarılar) DMD sistemleri ile birlikte belirli modları ve frekansları büyütme amacıyla kullanılmıştır. Uyarıların farklı konfigürasyonları daha sonra rijitlik tahminleriyle karşılaştırılmıştır. 20 katlı bir yapı doğru hasar tespitini göstermek amacıyla 4 farklı hasar modeliyle simüle edilmiştir.

Gu ve Oyadiji (2008) MR damper ile çok serbestlik dereceli yapılarda çevre kaynaklı titreşimin azaltılması amacıyla nöro-bulanık bir çıkarım sistemi (ANFIS) geliştirdiler. MR damperle istenen kontrol gücünü yaklaşık olarak üretirken komuta zorluğunu aşmak için bir kuvvet geri besleme kontrol şeması kullanılmıştır. Yarı aktif kontrol şemasının etkinliğini değerlendirmek amacıyla, deprem hareketi tepkileri pasif sistem tepkileriyle karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, geliştirilen kontrol şemasının performansının yapısal titreşimleri sönümlemede tatmin edici sonuçlar verdiğini göstermiştir.

MR cihazlar, etkin sismik hareketlerde meydana gelecek dinamik yüklere karşı yapısal parametreleri ayarlayarak kendi yetenekleri sayesinde dayanabilmektedir. Düşük kontrol sinyali altında bu hareketi yapabilmeleri yarı aktif kontrol için oldukça umut verici olmuştur. Viskoelastik ve ferromanyetik malzemeler ile üretilen MR damperlerdeki histerezislik akıllı yapıların performansını düşürebilmektedir. Bu nedenle, yapı sağlığı izleme ve yapı kontrolünde bu birden fazla doğrusal olmayışın modellenmesi ve karakterize edilmesi gerekmektedir. Normal koşullarda, mühendislik yapılarında alçak geçi filtresi (low-pass filter) kullanılır. Ancak, MR cihaz tabanlı akıllı yapılarda histerisiz davranışların analizi için klasik fonksiyon tanımlama yöntemi daha uygundur. Cihazların fonksiyonlarını elde etmek için karakterize edilen veriler bir eğri uydurma tekniğiyle taramalı tablolara kaydedilir. Önerilen fonksiyonlar yapısal frekans analizinde yararlı olmaktadır. Ha vd. (2016) sarsma tablası üzerinde çelik bir kirişi deprem kaynaklı titreşimlere maruz bırakmış ve elde edilen deneysel sonuçlar raporlanmıştır.

Housner vd. (1997) yaptıkları çalışmada inşaat mühendisliği yapılarının kontrol ve izleme yöntemi ile mevcut durumunu değerlendirmek isteyen araştırmacılar ve uygulamacılar için bir çıkış noktası sağlamıştır. Yapısal kontrol ve kontrol teorisi, farklılıkları ve benzerlikleri işaret ederek diğer alanlar arasında bağlantı sağlamakta ve gelecekteki araştırma ve uygulama çalışmalarındaki önemine dikkat çekmektedir. Çalışmada pasif enerji sarfiyatı, aktif kontrol, yarı-aktif kontrol ve hibrit sistemler, yapısal kontrol sensörleri, akıllı malzeme sistemleri, hasar tespiti ve health monitoring konularından bahsedilmiştir.

Kasai ve Matsuda (2014) 5 katlı çelik çerçevesel bir yapıya 4 farklı tipte amörtisörün yerleştirilmesi ya da kaldırılması şeklinde uygulanarak hazırlanan bir dizi sarsma tablası testleri gerçekleştirmişlerdir. Amaç risk kontrol teknolojilerinin daha büyük bir deprem yaşanmadan, yapılar için kabul edilebilir olduğunu doğrulamaktır. Test sonuçları amortisör ve çerçevenin iyi bir performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Tam ölçekli yapı testleri ve çeşitli kavramların katkıları tartışılmıştır. Tam ölçekli dinamik testler ile ilgili zorluk açıklanmıştır.

Aktif bir yapı, çevresine tepkisini içerdiği sensör ve aktüatörlerle değiştiren bir mühendislik yapısıdır. Aktif yapısal kontroldeki araştırmalar deprem riskinin de artması ile birlikte uzay, denizaltı ve kutup gibi uç ortamlarla, kirlenmiş ortamlara (nükleer, kimyasal ve biyolojik) doğru giderek artmaya başlamıştır. Aktif kontrol teknolojisindeki teorik ve pratikteki gelişmeler yapıların genel algısını değiştirmiştir. Korkmaz (2011) bu çalışmada aktif yapıların uygulamalarında yaşanan ilerlemelere genel bir bakış sağlamıştır. Yeni nesil aktif yapıların oluşturulabilmesi için önemli olan hesaplama zorlukları tespit edilmiştir.

Lee vd. (2010), MR damperlere dayalı çeşitli yarı aktif kontrol algoritmalarının etkinliği, tam ölçekli 5 katlı bir çelik çerçeve yapının sismik koruması amacıyla deneysel olarak incelemiştir. Bu belki de tam ölçekli test yapısı kullanılarak çeşitli yarı aktif kontrol algoritmalarının ilk deneysel karşılaştırılmasıdır. MR damper tabanlı kontrol sistemleri, optimizasyon problemi ve manyetik analizler dikkate alınarak elde edilen alt-optimal (en uyguna yakın-standart altı) tasarım prosedürü tasarlanmış ve 1 ton kapasiteli bir amortisör üretilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, yapısal sistemi ivmesinin azaltmada Lyapunov ve yarı aktif nöro-kontrol algoritmalarının uygun olduğu ve 1. kat yer değiştirme miktarını azaltmada maksimum enerji dağılımı algoritmasının mükemmel sonuç verdiğini göstermişlerdir.

Deprem ve rüzgâr kuvvetleri gibi bazı dış etkiler çok hassas olarak ölçülemez. Yapısal kontrol ve bilinmeyen kuvvetleri birbirine entegre etmek için algoritmaları bulmak gerekir. Lei vd. (2013) deprem kaynaklı bilinmeyen bir yer hareketi altında, yüksek kesme tipi binaların merkezi olmayan yapısal kontrolü için bir algoritma önermişlerdir. Bilinmeyen yer hareketine maruz (tall controlled-shear building) yüksek kontrollü bir kesme yapısına ait hareket denklemleri mutlak koordinat sisteminde kurulmuştur. Yer hareketi yapının 1. katına uygulanmış ve bilinmeyen bir dış kuvvet olarak kabul edilmiştir. Anlık optimal kontrol şemasını bağlı merkezi olmayan kontrol algoritması, yapısal mutlak ivme değerlerinin sınırlı ölçümleriyle geliştirilmiştir. Bitişik temeller arasındaki karşılıklı bağlantı etkisi her temele bilinmeyen ek bir düzensizlik-olumsuzluk olarak ele alınmıştır. Temel özellikleri durum vektörü için Kalman tahmini ve ek bilinmeyenler için en küçük kareler tahmini kullanılarak anlık optimal kontrol kuvvetleri elde edilmiştir. Daha sonra, Newmark Yöntemi ile bilinmeyen yer hareketi tahmin edilmiştir. Önerilen algoritmanın performansını doğrulamak için, bilinmeyen deprem etkisindeki yüksek yapıların merkezi olmayan kontrolü, 2 sayısal örnekle incelenmiştir. Ölçülen deprem

etkisi altında geleneksel merkezi kontrol ile elde edilen sonuçlar, simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Li vd. (2013) 3 katlı karma bir yapının doğrusal olmayan sismik kontrolünü MR damperler kullanarak deneysel çalışmalarla gerçekleştirmişlerdir. Kontrol stratejilerini pasif-on, pasif-off ve yarı aktif kontrol yöntemleri belirlemiştir. Çelik kolonların altlarında oluşan gerilmeler, yarı aktif kontrolörlerin inşa edilmesinde geri bildirim olarak kullanılmıştır. Her kontrol türü için, yapısal tepki ve hasar kontrolü etkinliği El-Centro, Taft ve Tianjin depremleri için sırasıyla 0.2g, 0.4g, 0.9g ve 1.2g pik yer ivmesi değeriyle doğrulanmıştır. Test sonuçları, MR damperler kullanarak çelik-betonarme karma yapının sismik tepkisini kontrol etmenin mümkün olduğunu; katlar arası kayma, zaman tanım alanında yer değiştirme ve enerji sönmüleme kapasitesi dikkate alındığında, yarı aktif kontrollü yapıların kontrolsüz yapılara göre sarsma tablasında daha iyi bir performans gösterdiğini ve kontrolsüz yapıların daha fazla hasar aldığını göstermiştir. Buna ek olarak, sarsma tablası testi sırasında gerilmeleri ve maddi hasar sürecini elde etmek için, çelik ve beton malzemenin hasar modeli kullanılarak, gerilmeleri etkin bir şekilde ölçebilen ters bir hesaplama yöntemi önerilmiştir.

Marshall ve Charney (2012) Karma Pasif Kontrol Sistemi kavramını çelik çerçeveli yapıların sismik tepkisini gözlemleyerek analitik olarak incelemişlerdir. Karma kontrol sistemleri tek bir cihaz veya sisteme birleştirilmiş iki farklı pasif elemandan oluşmuştur. Bu çalışmada incelenen karma sistem, bir hız-bağımlı yitim (rate-dependent dissipation) elemanı ile eşleştirilen hız-bağımsız (rate-independent) sönmüleme cihazından oluşmuştur. Yenilikçi konfigürasyonlar münferit eleman dayanımı ve çok aşamalı davranış yoluyla zayıflıkların karşılığını kullanmıştır. Analizler için 9 katlı, 5 açıklıklı bir çelik çerçeve modeli kullanılmıştır. Altı farklı sismik dayanımlı sistem analiz edilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Geleneksel sistemler özel bir dayanım momenti çerçevesi [a special moment-resisting frame (SMRF)] ve çift yönlü burulmayı engelleyen destek sistemlerini [a dual SMRF-buckling restrained brace system (BRB)] kapsamaktadır. Son dört konfigürasyon karma pasif sistemlerdir. Farklı hibrit konfigürasyonları, BRB'yi faydalı hale getirmek için ya yüksek sönmüleme özelliği olan kauçuk damperleri veya viskoz akışkanlı damperleri kullanmaktadır. Analizler, artımsal dinamik analizlerle gerçekleştirilmiştir. Maksimum çatı yer değiştirmesi, taban kesme kuvveti ve toplam çatı ivmesi gibi çeşitli hasar ölçüleri hesaplanmıştır. Sonuçlar, performansa dayalı sismik tasarım için geçerli olmak üzere karma pasif kontrol sistemlerinin kapasitesini göstermiştir.

Martinelli ve Mulas (2010) daha önce betonarme ve çelik çerçeveli yapılar için önerilen ve yapıya ek sönmü sağlamak amacıyla kullanılan pasif kontrol tekniğini betonarme prekast endüstriyel binalar için sunmuşlardır. Kolon-kiriş bağlantı bölgelerine sürtünme cihazları

yerleştirilmesine dayanan bu teknik, azaltılmış boyut ve kullanılan cihazların düşük maliyeti nedeniyle özellikle avantajlıdır. Prefabrik yapılarda, bu mafsallı bağlantılar süneklik açısından ilave bir avantaj sunmaktadır. Bu çalışmada, iyi bilen bir simulasyon platformu içinde cihaz kalibrasyonu için genel kriterler ve modelleme stratejisi sunulmuştur. Bir prototip bina orta-yüksek deprem riski için tasarlanmış, cihaz bu özel bina için ince bir şekilde ayarlanmıştır. Tasarlanan çerçevenin tasarım değerine eşit PGA ile on iki ivme kaydı sismik tepkisiyle karşılaştırılarak cihaz verimi incelenmiştir. Kritik olmayan kesme bölgelerine cihaz yerleştirildiğinde, en büyük yer değiştirmede oluşan uç değerler, kolon tabanında oluşan eğilme momenti ve malzemelerin histerisiz dağılım enerjisi miktarı değerleri azaltmada büyük ölçüde azalmıştır.

Martinez vd. (2013) sismik uyarılar altında binalarda beklenen performans düzeyini karşılamak amacıyla sönümlenme katsayılarını tanımlamak için eklenen doğrusal viskoz damperlerle oluşan optimal bir prosedür önermişlerdir. Performans kriteri maksimum kat ötelenmesi cinsinden ifade edilmiştir. Bu kriter sismik tasarım kodları tarafından en önemli sınırlamalardan biridir. Belirli bir performans seviyesinde, farklı amaç fonksiyonu vasıtasıyla elde edilen damper dağılım etkinliği de değerlendirilmiştir. Modellemek için en uygun yaklaşım sismik tasarım kodu ile tanımlanan tepki spektrumu ile uyumlu güçlü bir spektral yoğunluk ile karakterize edilmiş durağan olasılıksal bir süreci geçmekle mümkün kılınmıştır. Buna göre yapısal tepkinin frekans değeri elde edilmiştir. Sayısal örnekler sayesinde, 3 boyutlu çelik yapılarda, düzlemsel, yanal ve burulma titreşimleri ile önerilen prosedür doğrulanmıştır.

Motahari vd. (2007) yaptıkları çalışmada, enerji dağıtma yeteneğine sahip etkin bir davranış cihazı üretmek için, şekil bellekli alaşımlardan farklı kristalografik fazdaki malzemeler içeren bir amortisör kullanılmıştır. Önerilen dört farklı amortisör sisteminde depreme dayanıklı yapı sistemleri uygulamalarını optimize etmek amacıyla farklı yöntemler uygulanmıştır. Farklı cihazlar kullanılarak yapısal sistem performansını karşılaştırmak için, hasar göstergesi fikri bazı değişiklikler yapılarak kullanılmıştır. Yapısal hasar, yapısal olmayan hasar, kalıcı deformasyonlar ile sistemlerin içeriğine verilen hasar, farklı yer ivmesi geçmişlerinde dikkate alınmıştır. Karşılaştırmalar burkulma ölçülü çelik takviyeli sistemlerle yapılmıştır. Çok yüksek değerli zemin hareketleri sonrasında bile yapı üzerindeki kalıcı deformasyonların azaltılmasında SMA amortisörlerinin etkinliği kanıtlanmıştır.

Mualla ve Belev (2002) yeni bir sürtünme amortisör cihazı ile donatılmış tek katlı çelik çerçeve yapısının dinamik hareketi üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Kapsamlı testler, sürtünme malzemesini, amortisör ünitesinin performansını ve ölçekli model çerçevenin yanal harmonik hareketini değerlendirmek için yapılmıştır. FDD yerleştirilmiş çelik çerçevelerin sismik

davranışını incelemek için doğrusal olmayan zaman tanım alanına dayalı sayısal simülasyonlar kullanılmıştır. Ana parametreler belirlenmiştir ve etkileri izlenmiştir. Bu etkiler pratik tasarım ile birlikte özetlenmiştir. FDD uygulaması, yeni yapılarda ve mevcut yapıların iyileştirilmesinde geleneksel süneklik tabanlı depreme dayanıklı yapı tasarımına uygun bir alternatif olarak sunulmuştur.

Son yıllarda, fiziksel tabanlı olarak tasarlanan stokastik optimal kontrol yöntemleri önerilmektedir. Bu amaçla, Peng vd. (2016) rasgele titreşimlerle uyarılan yapıların yarı aktif kontrolü için MR damper tasarım ve optimizasyon prosedürü geliştirmişlerdir. Sismik zemin hareketleri stokastik modelini, kaynak özellikleri ve yayılma yolu belirlemektedir. MR damperli yapıların kontrol verimliliği sismik risk ve değişkenlik açısından incelenmiştir. Sayısal sonuçlar, düşük ve yüksek sismik risk durumunda MR damperli yapıların deprem güvenliğini artırdığını ortaya koymuştur. Buna ek olarak, uygun şekilde tasarlanmış bir yarı aktif sönümleyici de aynı olasılıkta etkin bir sonuç verebilir.

20 katlı çelik bir yapı, aktif, pasif, yarı aktif ve kombinasyonlu gibi farklı kontrol stratejilerini karşılaştırmak amacıyla Yapısal Kontrol Topluluğu tarafından sismik açıdan karşılaştırmalı değerlendirme yapısı olarak ilan edilmiştir. Raut ve Jangid (2014) bu çalışmada, sürtünme amortisörü ile yüklenen örnek yapının dinamik davranışını incelemişlerdir. Yapısal tepkilerin değerlendirilebilmesi için El-Centro, Hacninohe, Northridge ve Kobe sismik hareketleri dikkate alınmıştır. Analizler için sürtünme amortisörü ile dikdörtgen ideal elasto-plastik histerik modelin kullanılması önerilmiştir. İncelenen örnek problemde, yer değiştirme, ivme, taban kesme kuvveti ve performans kriteri gibi tepkilerin azaltılması için sürtünme etkili amortisörler öngörülmüştür. Sürtünme amortisörü kayma kuvvetine bağlı olduğu için, parametrik bir çalışmada amortisörlerin optimum kayma kuvvetini araştırmak için yapılmıştır. Dahası amortisörlerin optimum yerleşimi ve maliyetlerinin en aza indirilmesi için zemin seviyesinde çalışmalar yapılmıştır. Sayısal çalışma, örnek bina yüksekliği boyunca değişken kayma kuvveti amortisörü uygulanmıştır. Sonuçlar, uygun kayma kuvveti ve optimum konum ile örnek binada kurulu sürtünme amortisörlerin deprem kaynaklı etkileri azalttığını göstermiştir.

Seo vd. (2014) çökmeye karşı çelik çerçevelerin sismik dayanımını, viskoz akışkanlı amortisörlerle değerlendirmişlerdir. Viskoz akışkan amortisörlü dört farklı çelik MRF tasarlamak için basitleştirilmiş bir tasarım prosedürü kullanılmıştır. Mevcut sismik tasarım esaslarına göre oluşturulan geleneksel MRF'ler (Çelik Çerçeve) benzer ya da daha yüksek performans elde etmek için karma sistemler tasarlanmıştır. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap sonuçları ve artan dinamik analizlerle yapısal ve yapısal olmayan tepkiler analiz edilmiş ve çelik MRF'nin çökme olasılığı belirlenmiş ve geleneksel çelik MRF ile

sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tam geometrik doğrusal olmayan yapısal çelik elemanların plastik mafsal bölgelerinde oluşan mukavemet ve rijitlik kayıpları göz önüne alındığında, bu çalışmada kullanılan analitik çerçeve modellerinin yapının göçmesini yeterli şekilde simülize ettiğini belirtmişlerdir. Sonuçlar, ek sönümlenme yardımıyla, azaltılmış taban kesme kuvveti kullanılarak çelik MRF'nin performansının arttığını göstermiştir. Artımsal dinamik analizler, verilen dayanımda çelik MRF'nin göçme olasılığının ek sönümlenme yardımıyla azaldığını ortaya koymuştur. Ancak, bu çalışmanın önemli noktalarında taban kesme kuvveti kat kaymalarını kontrol etmek için ek sönümlenme boyunca tasarım taban kesme kuvvetinin minimum % 75'ine eşit alınmıştır. Geleneksel MRF ile karşılaştırıldığında daha güçlü bir çökme direnci garanti etmemiştir.

Symans ve. Constantinou (1999), çerçeve içerisinde uygun bir referans noktasına yarı-aktif kontrol sistemleri yerleştirmek için öncelikle deprem kaynaklı yer hareketine maruz yapıların korunması amacıyla kullanılan pasif, aktif ve yarı-aktif kontrol sistemlerinin niteliksel bilgi ve karşılaştırması konularında bilgi vermiştir. Özellikle, çeşitli sistemlerin ayırt edici özellikleri ve dinamik davranışı, bileşen düzeyinde ve küçük ölçekli yapısal modellerle deneysel olarak test edilmiştir. Yarı aktif sistemler, rijitlik kontrol cihazları dâhil, elektro reolojik amortisörler, magneto reolojik amortisörler, sürtünme kontrol cihazları, viskoz akışkanlı amortisörler, ayarlı kütle sönümleyici ve ayarlı akışkan sönümleyicileri kapsar. Literatür çalışmaları, yarı aktif kontrol cihazlarının tam ölçekli inşaat yapılarının deprem davranışını geliştirmek için önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

Şahin vd. (2005) MR damperler üzerinde durmuşlar ve mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Yarı aktif kontrol sistemleri, aktif ve pasif kontrol sistemlerinin özelliğini taşıdığı için son yıllarda önemli bir gelişme kaydetmiştir. Uygun bir manyetik alan ile aktifleştirilen damper sıvısının dinamik viskozitesinde önemli artışlar meydana gelir. Bu damperler yüksek güvenlik özelliğine sahiptir. Bunlar elektrik kesilmesi gibi durumlarda klasik damper özelliği gösterir. Bu araştırmada, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak değişik çalışma koşulları altında damperde meydana gelen gerilmeler incelenmiştir.

Şirin ve Boduroğlu (2010) hemen kullanım performans seviyesi için tek serbestlik dereceli betonarme sistemlerde kayma yer değiştirme değerleri ve sürtünmeli sönüm elemanının rijitliği ile ilgili sonuçları, doğrusal olmayan dinamik analizle sunmuşlardır. Maksimum yer değiştirme ve taban kesme kuvveti performans kriteri olarak ele alınarak, 360 adet farklı sistem ve sönümleyiciye sahip yapı tasarlanmıştır. Betonarme sistemlerde 0.1-0.9 sn aralığında 9 farklı periyot ve iki farklı akma değeri kullanılmıştır. Mevcut sistemin rijitlik ve akma yer değiştirme değerlerinin oranları sönüm elemanlarında kullanılan 4 farklı rijitlik ve 5 farklı kayma yer

değiştirme değeri olarak belirlenmiştir. Sıkı ve gevşek olmak üzere 2 farklı zemin tipi seçilmiştir. Bu zeminlerde faya en fazla 15 km mesafedeki deprem kayıtları kullanılmıştır. Doğrusal olmayan dinamik analiz yapılması için bir algoritma geliştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda betonarme sistemlerin zemin özelliklerine göre kayma yer değiştirme değerleri ve sürtünmeli sönüm elemanının rijitliği hesaplanmıştır. Aynı kayma yük seviyesinde sönüm elemanlarının özellikleri karşılaştırıldığında, sönüm elemanının rijitliğinin büyük olması yer değiştirme talebinde daha büyük azalmaya sebep olmuştur. Betonarme sistemlerin periyodu 0.5 saniyeden büyük olanlarının kayma yük seviyeleri sıkı zemin profili için azalırken gevşek zemin profili için aynı kalmaktadır.

Uz ve Hadi (2014) Genetik algoritmalara dayalı optimal tasarım stratejisi için doğrusal olmayan histeretik kontrol cihazları önermişlerdir. Böylece, iki komşu yapının birbirine vurarak zarar görmesi engellenmiş ve sismik hareketlerin azaltılması amaçlanmıştır. Bulanık kontrol, değiştirilmiş Bouc-Wen modeline dayalı MR damperler için damper kuvvetleri ve giriş gerilimleri arasındaki etkileşimi sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca, bulanık kontrolle elde edilen sonuçları karşılaştırmak için Gerilim Yasasına dayalı Doğrusal Kuadratik Regülatör (LQR) ve H_2/LQG (Lineer Kuadratik Gauss) kontrolörleri kullanılmıştır. Bu çalışmanın temel amacı sadece sismik hareketleri azaltmak değil aynı zamanda damper sisteminin toplam maliyetini en aza indirmek için en uygun tasarımı bulmaktır. Bu çalışmada Pareto Optimum Çözümler seti, Pareto çözümlerinin optimal yüzeyinden elde edilen uygun sonuçlarla yürütülmüştür. Sonuç olarak, damper sayısının zorunlu olarak azaltılması sistemin etkinliğini arttırmıştır.

Vadtala vd. (2013) 6 katlı bir değerlendirme problemini (benchmark problem) Yapay Sinir Ağlarına (ANN) dayalı bir yarı-aktif kontrol sistemiyle incelemişlerdir. Doğrusal Kuadratik Regülatör (LQR) optimal kontrol kuvvetleri oluşturmak için kullanılmıştır. MR damperi paralel levha Bouc-Wen modeline göre tasarlanmıştır. Değerlendirme probleminde LQR ve ANN kontrolörlerinin kombinasyonları uygun Tarihsel yer hareketleri için kullanılmıştır. MR damperlerle yapı kontrolünde, LQR ve YSA performansının diğer kontrol yasalarına göre daha iyi olduğunu göstermişlerdir.

Xu vd. (2013) bu çalışmada, Bouc-Wen modelini içeren MR damperlere dayalı yarı-aktif kontrol sistemini incelemişlerdir. Ana kontrol ve kontrol platformları arasında veri transferine dayalı, modelleme, analiz ve doğrusal olmayan yarı-aktif kontrol sistemini gerçekleştirebilen LS-DYNA programında, duvar hasar kriteri ile çelik malzeme hasar modelini geliştirilmişlerdir. Sismik kontrol etkinliğini tasarlanan 15 katlı karma (çelik-betonarme) yapı sayısal örneği ile doğrulamışlardır. Sonuçlar, yapıdaki deplasman, kesme kuvveti ve hasarın tasarlanan MR

damperler sayesinde büyük oranda azaldığını göstermiştir. Böylece, kontrol platformu ve sayısal yöntemin istikrarlı ve hızlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Yang vd. (2003) bitişik nizam yapıların dinamik karakteristiklerini belirlemek ve sismik tepkilerini ölçmek amacıyla, viskoz akışkanlı damperlerle kapsamlı bir deneysel inceleme yapılmıştır. Deneyde 4m x 4m ebatlarında sismik simülatör kullanılmıştır. Bina modellerinden ilki 5 m yüksekliğinde 5 katlı, diğeri 6 m yüksekliğinde 6 katlı çelik çerçeve olarak tasarlanmıştır. İki bina modelini bağlayan viskoz akışkan damperlerin lineer kuvvet-hız özelliği bulunmaktadır. Komşu yapılara iki tip yer hareketi uygulanmıştır. Viskoz akışkan damperlerin kontrol performansı bitişik nizam yapılara rijit çubuklarla ya da bağlantısız şekilde yerleştirilen damperlerle elde edilen dinamik karakteristikler ve sismik hareketin karşılaştırması ile değerlendirilmiştir. Damperlerin sayısı, konum ve bağlama şekli ile kontrol performansına yer hareketinin etkileri daha sonra incelenmiştir. İki yapı modelinin ilk doğal frekans oranı değiştirilmiş ve kontrol performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Deney sonuçları viskoz akışkanlı damperler yerleştirilen iki yapının da sismik hareketinin azaldığını göstermiştir. İyi bir kontrol performansı elde etmek için viskoz akışkanlı damperlerin sayısı, yerleşimi ve tasarımına dikkat edilmelidir.

Zhang ve Zu (2008) üç katlı doğrusal olmayan çelik çerçeve yapının deprem tepkisini kontrol etmek amacıyla şekil bellekli alaşımlı (SMA) tel (kablo) damperlerle simülasyon tabanlı bir kontrol çalışması sunmuşlardır. SMA tel damperlerde yorulma ömrü göz önünde bulundurulurken süper elastik Nitinol teller kullanılmıştır. SMA tellerinin eğitim etkisini göz önünde bulunduran bir analitik model süper elastik SMA tellerinin gerilme-gerinme ilişkisini tanımlamak amacıyla kullanılmıştır.

Yapılan çalışmalarda kullanılan deney modellerinin gerçek yapı dinamik parametrelerine uygun olarak tasarlanma gibi bir hedefi olmadığı görülmektedir. Projemiz Türkiye yapı stoğuna uygun gerçek yapıların dinamik karakteristiklerini göz önünde bulunduran deneysel modellere yer vereceği için bu yönüyle özgün bir değere sahip olacaktır. Ayrıca, literatürde aynı çalışma içinde üç farklı kontrol algoritması kullanılarak yapılan MR damperli yapısal kontrol sistemi bulunmamaktadır. Projemiz bu niteliğiyle de literatüre önemli bir katkıda bulunacaktır.

2.2 MR Damper Tasarımı

MR damperin binalarda uygulanması İnşaat Mühendisliği için olduğu kadar Makina Mühendisliği için de incelenmesi gereken önemli bir çalışma alanıdır. MR damperler özellikle son yıllarda hızlı bir şekilde akademik çalışmaların konusu olmaya başlamasıyla hem kontrol algoritmalarıyla hem de MR damperlerin tasarlanması, modellenmesi ve optimizasyonu ile ilgili

çok sayıda çalışma literatürde mevcuttur. Bu literatür araştırmasında özellikle proje ile ilgili olan ve son yıllarda yapılan çalışmalara odaklanılmıştır.

MR damperler ile yapı kontrolünde kullanılan kontrol teknikleri oldukça geniş bir alanda çeşitlilik göstermektedir.

Yapay sinir ağları (Neural network) kontrolü 1980'lerin sonunda geliştirilmiş ve insan beynini örnek alan, hızlı yakınsayan ve hızlı öğrenme kabiliyetine sahip bir algoritmadır. Sismik davranışlara karşı binanın tepkilerini hızlı bir şekilde yorumlayıp doğru cevabı verecek şekilde kullanımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Li ve Guo (2015) çalışmasında Neural network kontrol algoritmasını MR damper için kullanılmıştır. Gelişmiş Bouc-Wen modeli ile MR damper modellenmiştir. Neural Network'ün genel prensipleri (Ghaboussi, ve Joghataie, 1995) ve MR damperlerde kullanılması (Xu vd., 2003) ile ilgili yapılmış çeşitli çalışmalara müracaat edilebilir.

Mohammadzadeh ve Kim (2015) doğrusal olmayan davranışlı binalar için üç farklı kontrol algoritması geliştirmiştir. (a) Yapay sinir ağları (b) bulanık mantık teorisi, PANFIS (c) asal bileşen analizi. Algoritma El-Centro depremi ile eğitilmiştir. Bu konudaki en önemli modellerden biri olan ANFIS'ten daha az hesaplama yükü ile aynı performansı yakalamışlardır.

Kim vd. (2015) çeşitli bulanık mantık algoritmaları ile MR damperlerle kontrol edilen bir bina için kendi kendine öğrenen kontrol algoritmaları geliştirmişlerdir. Sismik yükler altında binanın non-lineer davranışının başarıyla sönmülenebildiği görülmüştür. Modelin doğrulanması için 4 adet gerçek deprem sinyali kullanılmıştır.

Patrascu (2015), MR damper kontrolü için genetik algoritmali iki farklı kontrol mekanizması uygulamıştır. Vrancea ve Northridge depremlerinin gerçek verileri ile algoritma test edilmiştir. Algoritma, Optimal kontrol algoritması ile karşılaştırılmıştır.

Uppatthangkul ve Ohmori (2015) araç süspansiyonu için LTI (Lineer Zaman Sabiti) ile L1 kontrol metodu kullanmıştır. Daha sonra bu kontrol, PID kontrolü ile karşılaştırılmıştır. Hızlı cevap alınabilecek durumlar için bu algoritmanın uygun olduğu öngörülmüştür. Kullanım amacına göre, seçilecek algoritmanın tipinin de önem kazandığı ortaya konulmuştur.

Yang ve Cai (2016) köprü üzerindeki titreşimlerin MR damper ile kontrol edilmesini ele almışlardır. Köprüde sismik ve araçların frenlemesi ile oluşan iki temel titreşim yükü ayrı ayrı tanımlanmıştır. 7 farklı kontrol algoritması test edilerek en iyi performansı veren algoritma tespit edilmiştir. Daha sonra sistem gerçek bir köprüye uygulanmış (Pinsheng Bridge) ve araç titreşimleri için passive-on ve sismik titreşimler için yarı-aktif fuzzy kontrolün uygun olduğu tespit edilmiştir. Kontrol algoritması ile dampere gelen yükün azaltılması hedeflenmiştir.

Mevada ve Jangid (2015) asimetrik binalarda pasif ve yarı-aktif (MR damper) sönümleyiciler ile deprem titreşimlerinin sönümlenmesi üzerine çalışmışlardır. Yarı aktif kontrolün pasif kontrole göre çok daha iyi olduğu görülmüştür.

Takin vd. (2015) bina üzerine gelen burulma ve köşe yüklerini sönümleyebilecek bir MR damper kontrol sistemi tasarlamıştır. Bu tarz gerilmeler genellikle daha yatay mimariye sahip binalarda ortaya çıkmaktadır.

Arsava vd. (2015) patlama/çarpışma etkisi ile oluşan darbelerin sönümlendiği güçlendirilmiş yarı-aktif sönümleyici binalarda bulanık mantık kontrolcüsü kullanmışlardır. (Collision-excited daha çok bomba patlaması, gemi veya araç çarpması gibi ani darbeleri, yıkıcı yükler olarak kabul edilmektedir). Bulanık mantık kontrolcüsü belirli yüklerdeki darbeler ile eğitilmektedir. Daha sonra kullanılan algoritma deneysel olarak test edilmiş ve olumlu sonuçlar alınmıştır.

Shrimali vd. (2015) komşu binalar için hibrit kontrolün yarı-aktif kontrolden daha iyi olduğunu ortaya koymuşlardır. Elastamerik taban izolasyonu ile MR damper bir arada kullanılarak hibrit bir kontrol gerçekleştirilmiştir.

Oliveira vd. (2015) taban izolasyonu yapılmış 2 katlı bir yapı için MR damper ve üç farklı kontrol algoritması kullanılmıştır. Geliştirilmiş Bouc-Wen modeli ile MR damper modellenmiştir. Model sarsma tablasında testler gerçekleştirilmiş ve farklı tipte kontrol algoritmaları ile hibrit model desteklenmiştir.

İzolatör kullanılan binalardaki lineer davranış ile binanın non-lineer davranışı yüksek titreşimlerde uyumsuzluk göstermektedir. Bunu engellemek için Amini vd. (2015) binanın hasar aldığı (deforme olduğu) durumda fuzzy kontrolcülü bir MR damper kullanılarak etkiyi hafifletmiştir. İzolatördeki hasar azaltılıp binanın dinamik davranışı iyileşmiştir.

Ribakov ve Agranovich (2015) binadaki uygun damper konumlarını bulmak ve damper sayısını azaltmak için bir algoritma kullanmışlardır. Bunun için beyaz gürültülü (White noise) bir yer hareketi kullanılarak simülasyon yapılmıştır. Daha sonra bina modelinin gerçek depremlere verdiği tepkiler ile modelin performansı ölçülmüştür.

MR sıvıların modellenmesi ve MR damperlerin tasarımı ve optimizasyonu ile ilgili de literatürde bol miktarda araştırma bulunmaktadır.

Zheng vd. (2015) MR damperlerin tepki sürelerinin azaltılması ile ilgili olarak çalışmışlardır. Devre tasarımının kritik önemi ortaya konulmuş ve yeni bir devre tasarımı yapılarak, tepki

süresi 5 ms azaltılmıştır. Ayrıca kontrol algoritmasının da tepki sürelerine olan etkisi ortaya konulmuştur.

Yu vd. (2015) çalışmasında sıcaklığın MR damper üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bununla ilgili yapılan az sayıda çalışma olduğu ifade edilmiştir. 360 kN'luk bir damper seçilmiş ve 3 ana sıcaklık oluşma nedeni incelenmiştir. 1) Viskoz sürtünme 2) sıkışma 3) akım. Enerjinin korunumu ilkesi kullanılarak teorik bir model ortaya konulmuştur. Sıcaklıkla beraber damperin sönümlenme kapasitesi (sönümleyebileceği kuvvet) azalmıştır. Sıcaklığı arttıran en büyük etkenler olarak titreşim ve akım öne çıkmaktadır. Damper 4000 saniye sonra termodinamik olarak denge haline ulaşmıştır. Oldukça büyük bir damper kullanılması çalışmayı bu proje için önemli kılmaktadır.

Xu vd. (2015) dinamik modeli ve kütle dağılımı bilinmeden non-lineer bir binanın dinamik davranışını sönümlenmeye yönelik bir çalışma yapmışlardır. 4 katlı model bina için MR damper kullanılmıştır. Hem sayısal hem de deneysel olarak çalışılmıştır. Belirsiz yük, dinamik yapı ve titreşim girişi için modelin başarılı olduğu gösterilmiştir.

Zheng vd. (2015) çoklu-fizik (multiphysics) analiz ile elektromanyetik alan ve akışkan davranışı eşlenik olarak sonlu elemanlar ile modellemişlerdir. Çalışmada damperin histerisiz davranışı Jiles-Atherton modeli ile simüle edilmiş ve deney sonuçlarına oldukça yaklaşılmıştır. Benzer çalışmalarda da MR damperin histerisizliği modellenerek analiz edilmiştir (Guan vd., 2011).

Xu vd. (2016) MR sıvısının modellenmesinde kayma gerilmelerinin bulunması ile ilgili klasik tek zincir yaklaşımı yerine "iki-sütun modeli" isimli bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşım ile klasik sonuçlara göre deney sonuçlarına daha yakın bir sonuç elde edilmiştir. Manyetik alan sonlu elemanlar metodu ile bulunduktan sonra kalan kısımlar teorik olarak modellenmiştir.

Thirupathi vd. (2015) üretilmiş olan yeni bir MR sıvısı için basit bir MR damper ile testler yapmışlardır. Yer değiştirme ve hıza göre kuvvet eğrileri çıkartılmış ve sonuçlar incelenmiştir.

Jancirani vd. (2015) istenilen bir sönüm kuvvetini elde etmek için sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gereken optimum akım şiddetini belirlemeye çalışmışlardır.

Li vd. (2015) geometrideki belirli parametrelerin (dış silindir kalınlığı, kanal uzunluğu, akım vs.) manyetik akı yoğunluğu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Simülasyon ANSYS ile gerçekleştirilmiştir. Bununla ilgili 8 adet sonuca ulaşılmıştır.

Azraai vd. (2015) MR dampere ait parametrelerin optimize edilmesi adına parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) kullanmışlardır. Düşük akımlarda

parametrelere karşılık Bingham, Bouc-Wen ve Bouc-Wen/Kwok modelleri doğru sonuç verirken, akım arttıkça Bingham modeli en kötü sonucu vermektedir. Yüksek akımlarda ise en iyi sonuç ise Bouc-Wen /Kwok ile elde edilmiştir

Gołdasz ve Sapiński (2015) 3 adet MR damper için deneysel çalışma yapmışlardır. Monotube damperler için bypass kanallı veya kanalsız durumdaki damperlerin sönümleri kıyaslanmıştır. Daha sonra simülasyonlar ile gerçek verilere ne kadar yaklaşıldığı incelenmiştir.

Shiao vd. (2015) çok kutuplu MR damper ile sönümleme gücü 7 kat artırmışlardır. Ayrıca bu tasarım ile MR damper çok geniş bir kuvvet skalasında kullanılmaktadır. Bu kuvvet skalası araç titreşimi sönümlemesi için ortaya konulsa da damperin skalasının büyütülmesi sismik titreşimler için de önemli olabilir.

Hu vd. (2016) çift sargılı MR damper için ANSYS APDL ile bir optimizasyon yöntemi önerilmiştir. Araçlarda için darbe sönümleyebilecek bir damper geometrisi optimize edilmiştir. Yapılan analizlerde kare profilli kenar formlu damperin daha iyi performans verdiği ortaya konulmuştur. Aynı ve ters yönlerdeki akımlar ve farklı tipteki geometriler için prototip damper üretilmiştir ve simülasyon sonuçları doğrulanmıştır.

Matsuoka vd. (2015) MR damper için bypass hattı uygulamışlardır. 3 katlı bir bina modeli için damper test edilmiştir. Bypass hattı kullanılan damperler ile ilgili detaylı bilgi, ilgili çalışmadan bulunabilir (Hitchcock vd., 2007).

Damper içerisindeki enerjinin ısı olarak çevreye yayıldığı bilinmektedir. Zhu vd. (2015) bu enerjinin geri dönüşümü üzerine pratik uygulamaların gerekliliğine binaen böyle bir güç üretim mekanizması önermişlerdir. Sonlu elemanlar analizi ile damper simüle edilmiş ve hem maksimum enerji üreterek güç ihtiyacını karşılayan hem de yeterli sönümlemeyi yapabilen bir MR damper için parametrik optimizasyon yapılmıştır.

MR damper ve bina etkileşimleri ile ilgili güncel konular ve tüm bu konuların tarandığı birçok derleme makale de literatürde yer almaktadır.

Örneğin Londoño vd. (2015) MR damperlerin bina yüküne göre kontrolünü düzenleyen bir ölçek üzerine çalışmışlardır. MR damperler küçük yer değiştirme etkilerinde darbeye karşı sert davrandıkları için enerjisi sönümleyememektedir. Dolayısıyla damper küçük titreşimlerde bir yay gibi davranıp darbenin enerjisinin binaya yayılmasına neden olmaktadır. (Minör ve orta ölçekteki depremlerde). Bunu engellemek için küçük titreşimleri büyülten ölçekler ile çalışarak, daha küçük damperler ile daha küçük titreşimlerde binanın kontrolünün sağlanmasını

önermişlerdir. Bunu sağlamak adına “Amplification factor” denilen bir büyütme faktörü kontrol yazılımına uygulanmaktadır.

Morales-Beltran ve Paul (2015) büyük deprem yükleri için binaların aktif ve yarı-aktif kontrolü ile ilgili makaleleri araştırmışlardır. Büyük depremlerin kontrolü için en hayati meselenin kontrol algoritması ile bina arasındaki uyumun sağlanması olduğu görülmüştür. Ayrıca yarı-aktif sönümleyicilerin deprem kaynaklı titreşimleri sönümlemede başarılı olduğu ispatlandığını belirtmişlerdir. Elektrik kesintisi gibi durumlarda emniyeti sağlamak için pasif sistem olarak çalışan yarı-aktif sistemlerin daha güvenilir olduğunu belirtmişlerdir. Darbe kontrolü için çok sayıda parametrenin varlığı da yaptıkları derlemede ortaya konulmuştur. Toprak tipi, cihaz ve yapı arasındaki doğrusal olmayan ilişki, kontrolcüdeki gecikmeler vs. gibi tüm bu parametreleri birleştiren bir algoritmanın başarı şansının daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Sismik kontrol için çok amaçlı (Multi-objective) şemaların kullanımı daha fazla araştırma konusu olmaya başladığı ve bu algoritmaların büyük depremlerin kontrolü için uygun olduğu görülmüştür. Sönümlenecek enerjinin minimize edilmesi, sensör ve damperlerin yerleşimi ve gecikmelerin azaltılması ve buna benzer çok parametreyi aynı anda dikkate alabilen algoritmalar buna örnek olarak verilmiştir. Performans bazlı tasarım kullanılarak bina ile daha iyi bir uyum yakalandığı ve sistemin kararlılığının artırıldığı görülmüştür.

Ghaffari vd. (2015) yaptığı çalışma MR damper modelleri ile ilgili geniş bir literatür taramasıdır. Ayrık faz ve tek fazlı yaklaşımlar, manyetik alan ile partiküllerin çok fazlı partikül modellemesi (parçacık modellemesi) gibi bir çok yaklaşım ve literatürdeki çalışmalar bir araya toplanmıştır. Oldukça faydalı bilgiler içeren bu makale, damperin modellenmesi esnasında sıkça başvurulabilecek bir kaynak olarak kullanılabilir.

MR sıvıları ve MR damperler ile bunların HAD ile modellenmesi ile ilgili araştırmaları Goldasz ve Sapiński (2015) tarafından derlenen çalışma ile kitabında ele alınmıştır.

Enerji üreten damperler de son yıllarda ortaya çıkan yenilikçi akademik çalışma alanlarından bir tanesidir. Bu fikir, damperlerin enerji üretiminin tamamen kendi içerisinde gerçekleştirdiği ve herhangi bir dış enerji kaynağına ihtiyaç duymadan sistemin çalıştığı bir MR damper sistemini öngörmektedir.

Bu fikir ilk olarak 1980 yılında Velinsky ve White (1980) tarafından ortaya atılmıştır. Daha sonra MR damperin titreşimlerinin enerjisinin bir jeneratör yardımı ile depolandığı bir sistem Cho vd. (2005) tarafından 2005 yılında önerilmiştir. Fakat bu sistem oldukça hantal ve kullanışlı olmayan bir sistemdir. Daha sonra sensörlerin enerjisini titreşim enerjisi ile karşılayabilen bir sistem Choi ve Wereley (2009) tarafından 2009 yılında ortaya konulmuştur. Kendi kendine

enerji depolayan sistemler ile ilgili çalışmalar 2014 yılına kadar mevcuttur. Bu çalışmalarda oldukça yeni teknolojiler ortaya atılmış ve çeşitli patent başvuruları gerçekleştirilmiştir. Bu sistemlerin en büyük dezavantajı karmaşık yapılara sahip olmaları ve düşük voltaj üreten, ağır ve hantal geometriler olmalarıdır.

Bu konuda ortaya konulmuş güncel çalışmalardan biri Ahamed vd. (2016) çalışmasıdır. Bu çalışmada damperin hareketi ile enerji üreten mıknatıslar ile bobin aynı merkez etrafında akuple bir şekilde tasarlanmış ve titreşim hareketi arttıkça artan bir voltaj ile kendi kendine enerji üreten akıllı bir sistem tasarlanmıştır. Oldukça etkin sonuçlar alınan bu tasarım gelecek nesil MR damperlerdeki enerji probleminin çözümü için önemli bir kolaylık sunmaktadır.

Xu vd. (2016) MR sıvısının modellenmesi ile ilgili ki sütunlu elektromanyetik bir zincir modeli önermişlerdir. Deneysel çalışmalar ve numerik çalışmalar karşılaştırmış ve iki sütunlu modelin tek zincir modeline göre daha başarılı olduğu ortaya konulmuştur.

Hu vd. (2016) yaptıkları çalışmada ANSYS APDL kullanılarak bir MR damper tasarımı yapmışlardır. Fakat elde edilen sonuçlar deney sonuçlarından oldukça uzak ve başarısızdır. Sadece eğrilerin şekillerinde uyum gözükmemektedir. Farklı tipteki çift bobin geometrileri denenmiş ve en uygun olan bobin/piston geometrisinin kare kesitli geometriler olduğu sayısal sonuçlardan elde edilmiştir

Krishna vd. (2017) MR damper içerisindeki manyetik alanın en az akım ile en yüksek değere ulaşması için gereken geometrik yapıyı, genetik algoritma optimizasyonu ve Design of Experiment (DOE) optimizasyonu ile elde etmişlerdir. 1.12 mm aralık optimum aralık olarak tespit edilmiştir. Optimizasyon parametreleri; sarım sayısı, akım şiddeti, kanal genişliği, bobin uzunluğu ve kanal uzunluğudur

Heo vd. (2016) MR damperin bina yüklerine göre hangi kuvvet skalasında seçilmesi ile ilgili çalışmışlardır. Yapısal kapasitenin %20 mertebesinde MR damperin optimum verim ile çalıştığı tespit edilmiştir.

Zheng vd. (2017) çoklu bobinli (multi-coil) MR damperler için verimi arttırmak amacıyla her bir bobinin üzerindeki kanal genişlikleri farklı olan bir tasarım ortaya koymuşlardır. Optimum sönüm için her bir bobindeki akım ve dolayısıyla manyetik alan değerleri farklıdır. Daha sonra tasarım optimize edilmiştir. Optimizasyon için Bound Optimization BY Quadratic Approximation (BOBYQA) kullanılmıştır. Analizler multi-fizik (eşlenik) olarak yapılmış ve klasik çoklu bobinli damperlere göre ciddi bir performans farkı olduğu ortaya konulmuştur.

MR damperin kontrolü ile ilgili yapılan çalışmalar halen oldukça fazladır. Peng vd. (2016) linear Quadratic Gaussian (LQG) kontrolü yerine olasılık tabanlı bir kontrol yöntemini önermişlerdir.

Li vd. (2016) sarsıntı yüklerini sönümlenmek üzere kullanılan MR damper kontrol algoritmalarının köprüler için uygun olmadığını ve bu nedenle köprü taşıyıcı elemanlarının (sütun ve ayakların) sağlam kalmasını sağlayabilen uygun bir kontrol algoritması gerektiğini söylemişler ve böyle bir algoritma geliştirmişlerdir.

Raizada vd. (2016) otomobillerde kullanılmak üzere yapay sinir ağlarıyla çalışan bir algoritma geliştirmişler ve yolcu konforunu hedef seçmişlerdir. Algoritma deneysel bir test düzeneğinde eğitilmiştir. Bina modellerinde de kullanılabilir bir algoritma olduğu iddia edilmektedir.

Heo vd. (2016) kesme kuvvetini sönümleyen bir MR damper üç farklı kontrol algoritması ile model köprü üzerinde denemişlerdir. Algoritmanın bu tip damperler için uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

Askari vd. (2016b) TSK-Inv Fuzzy ve maksimum-minimum kontrol yapan iki yeni kontrol algoritması test etmişlerdir. İvme verileri ile çalışan algoritmaların ikisinin de Clipped Optimal algoritmalarla göre başarılı olduğu anlaşılmıştır.

Kontrol algoritmalarında kullanılan dinamik modellerin geliştirilmesi adına modellemeye belirsizlik analizi ile dinamik modelin yanıldığı noktaların düzeltilerek ilave edildiği bir çalışma Caicedo vd. (2016) tarafından yapılmıştır. Belirsizlik ile ilgili nasıl daha uygun bir ilave gerçekleştirilebileceği araştırılmıştır.

Hu vd. (2016) Bingham modeli ile deneysel verileri ile iki farklı algoritma kullanılarak (En küçük kareler ve Bezier eğri uydurma yöntemleri) modele uygun eğriler oluşturmuşlardır. İki yöntemin de artıları ve eksileri ortaya konulmuştur. Bezier eğrisinin kuvvet ve hız eğrisinde başarılı iken, kuvvet ve yer değiştirme eğrisinde en küçük kareler yönteminin daha başarılı olduğu görülmektedir.

Deprem enerjisinden elektrik enerjisi üretimi literatürde yeni bir çalışma alanı olarak kabul görmeye başlamıştır. Shen vd. (2016) deprem titreşimlerinden kablosuz cihazlar için düşük akımlarda enerji üretimi yapabilen bir sistem öngörmüşlerdir. Sistem MR damper için özel olarak tasarlanmış olmasa da yöntem, fikir verici olabilir.

MR damperlerin binaya optimum yerleştirilmesi özel bir çalışma alanıdır. Askari vd. (2016c) genetik algoritmalar kullanarak MR damperlerin bina içerisinde yerleştirileceği pozisyonları ve MR damper sayısını en düşük maliyet için optimize etmişlerdir. İnsan konforu, insan güvenliği,



tepe ivmesi, tepe kesme kuvvetleri ve salınım oranları giriş parametreleri olarak seçilmiştir. 20 katlı bir bina için 5'ten 25 adete kadar MR damperin yerleşimi optimize edilmiştir.

Çalışmalar incelendiğinde MR damper modellemesi çalışmalarının yavaş yavaş güncelliğini kaybetmekte olduğu; buna karşılık son yıllarda MR damperler ile kullanılan kontrol algoritmalarının yoğun bir çalışma alanı olarak göze çarptığı görülmektedir. Kontrol algoritmalarının çok geniş bir alanda yayılmış olması mühendisler için çok sayıda seçenek sunmaktadır.

MR sıvısı ile ilgili çalışmalara bakıldığında halen yeni modeller önerildiği görülmektedir. Bunun yanı sıra depremden enerji üretimi konusu son yıllarda öne çıkan ve özellikle MR damperlerde kullanımı önem kazanan bir çalışma alanıdır.

Genel olarak bakıldığında MR damper ve yapı kontrolünün beraber kullanılması konusunun oldukça yoğun bir çalışma alanı olduğu ve yakın gelecekte bu çalışmaların artarak devam edeceği öngörülebilir. Literatür incelendiğinde, akademik alandaki bu çalışmaların yavaş ticari alana doğru aktarılmaya başlandığı görülmektedir. Özellikle önümüzdeki on yılda yapı kontrollerinde MR damperlerin yaygınlaşması, ülkemiz için de böyle bir çalışmanın ihtiyacını gözler önüne sermektedir.

Proje önerisinde de belirtildiği gibi literatürde göze çarpan en büyük eksiklik MR damper kontrolünde sıcaklık etkileri ile ilgili çok az sayıda çalışmanın olmasıdır. Özellikle sıcaklık etkilerini de içine alan bir reolojik model temelinde gerçekleştirilmiş bir MR damper optimizasyonu yoktur. Yine benzer şekilde projenin özgün yönlerinden biri olan manyetik alan-akış alanı etkileşimli simülasyonu konusunda literatürde sistematik ve kapsamlı çalışmalar yeresiz durumdadır. Sıcaklık etkilerinin dikkate alındığı manyetik alan-akış alanı eşlenik çözümü henüz ortaya konulamamıştır. Bu anlamda proje, MR damper tasarımı alanında bu açıkları kapatabilecek potansiyelindedir.

3. GEREÇ ve YÖNTEM

3.1 Bina Modeli Tasarımı

3.1.1 Bina Modellerinin Dinamik Karakterizasyonu

Dinamik olarak referans alınacak betonarme yapı, TÜBİTAK destekli 106M038 nolu “Yapısal Hasarların Deneysel ve Operasyonel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi” konulu projeden alınmıştır. Bu proje kapsamında inşa aşamasındaki gerçek bina üzerinde ölçümler yapılmıştır. Deneysel çalışma sonuçlarından elde edilen değerler analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Başlangıç analitik modellerin yapı davranışını temsil etmede yetersiz olduğu ve deneysel ölçüm sonuçlarına göre binaların analitik modellerinin güncellenmesi gerekliliği ortaya konulmuştur.

Ölçüm alınan betonarme yapı bir zemin ve dört normal kat olmak üzere toplam 5 kattan oluşmaktadır. Yapı içerisinde bir adet betonarme perde bulunmaktadır. Yapı asmolen döşeme sistemine sahiptir. Yapının ölçüm alınan karkas durumu Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Beş katlı betonarme binanın karkas durumu

5 katlı betonarme binanın karkas durumu için deneyle elde edilen periyod ve doğal frekanslar Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Deneysel frekanslar

Mod No	Frekans (Hz)	Periyod (s)
1	1.712	0.58
2	1.954	0.51
3	3.177	0.31
4	5.635	0.17

5 katlı betonarme binanın sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen frekans değerleri ve güncellenmiş frekanslar Tablo 2'de gösterilmiştir.

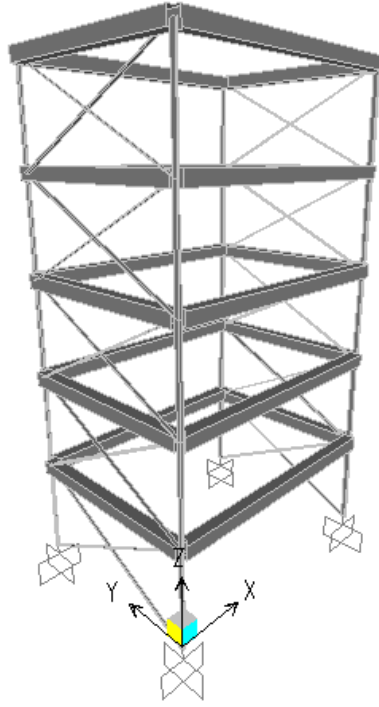
Tablo 2. Analitik frekanslar

Mod No	Başlangıç (Hz)	Güncellenmiş (Hz)
1	1.796	1.693
2	2.560	2.042
3	3.385	2.828
4	5.283	5.238

Çelik modeller, gerçek yapının operasyonel modal analizi ile deneysel olarak elde edilen frekanslarının aynı yapının sonlu eleman modellemesiyle elde edilen frekans değerlerine sonlu eleman güncelleme tekniği uygulanarak elde edilen güncellenmiş frekans değerleri referans alınarak oluşturulmuştur.

3.1.1.1 Bina Modellerinin Üretimi

Bu proje kapsamında 5, 6, 7 ve 8 katlı olmak üzere dört farklı model bina oluşturulmuştur. Referans alınan betonarme yapı dinamik parametrelerine uygun olarak tasarlanan 5 katlı çelik yapının analitik modeli Şekil 2'de gösterilmiştir. MR damperin strok değeri 50 mm ile sınırlandırılmıştır. MR damper, deneysel yapı modelinin 1. katına yerleştirileceği için bu katın yerdeğiştirme, hız ve kesme kuvvetinin alabileceği maksimum değerler de dikkate alınmalıdır. Deneysel yapı modelleri oluşturulurken MR damperin bu tasarım sınırlamaları göz önünde bulundurulmuştur. 5 katlı çelik yapı modeli, gerçek yapı dinamik benzerliği ve MR damper tasarım sınırlamaları göz önünde bulundurularak üretilmiştir.



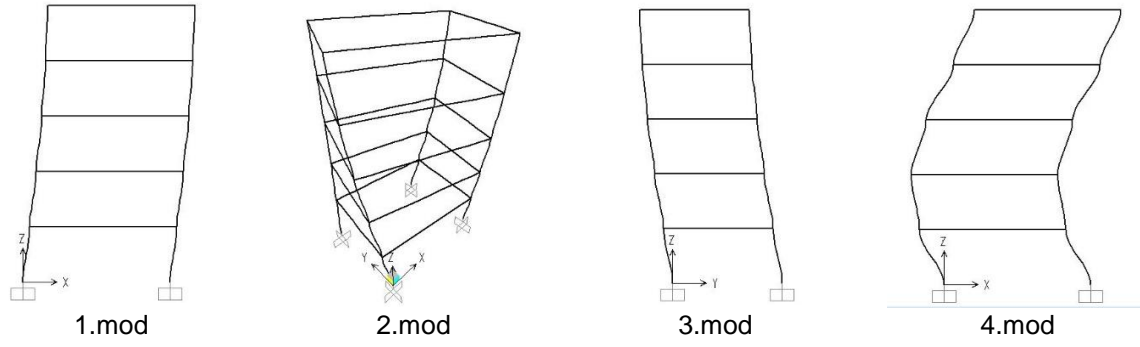
Şekil 2. Çelik model bina sonlu eleman modeli

5 katlı çelik yapı modelinin matematik modeli oluşturulurken kolon kesitleri 6x15 mm olarak seçilmiş ve yükseklik boyunca kolon kesitleri sabit tutulmuştur. Döşeme ağırlıkları kat birleşim bölgelerine kütle olarak atanmış ve döşemelerin rijit diyafram davranışı gösterdiği kabul edilmiştir. Model yapının birinci mod frekansı 1.65 Hz, ikinci mod frekansı 3.37 Hz ve üçüncü mod frekansı 3.98 Hz olarak hesaplanmıştır. Gerçek yapı ve model binaya ait frekans değerleri karşılaştırılması Tablo 3’de gösterilmiştir.

Tablo 3. Frekans değerleri

MOD	Mod şekli	Çelik Model f (Hz)	Betonarme Yapı f (Hz)
1	(x yönü)	1.70	1.690
2	(burulma)	3.66	2.042
3	(y yönü)	4.14	2.828
4	(x yönü)	4.96	5.238

Deneylerde kullanılacak olan deprem kayıtları çelik modele x-yönünde uygulanacağından, çelik modelin x-yönündeki frekans değerlerinin gerçek yapı frekans değerleri ile uygun olması yeterlidir (Tablo 3). Çelik model binaların tasarımı 1. ve 4. mod frekanslarının uyumu dikkate alınarak yapılmıştır.



Şekil 3. Bina modeline ait mod şekilleri

Model yapıların zaman tanım alanında doğrusal dinamik analizleri El-Centro deprem kaydı altında gerçekleştirilmiştir. Bu analizle görelî kat ötelemeleri belirlenmiş ve bu değerlerin DBYBHY (2007)'de belirtilen sınır şartını ($\delta_i/h_i \leq 0.02$) sağladığı Tablo 4'te gösterilmiştir.

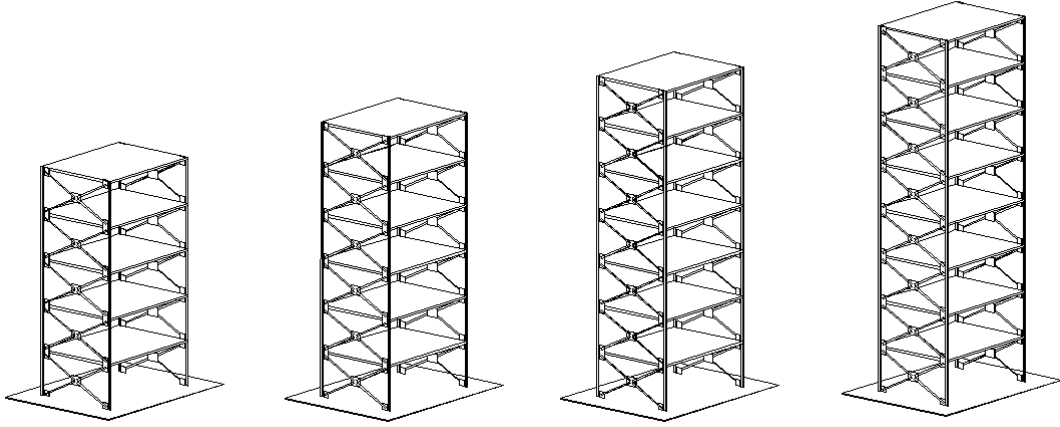
Tablo 4. (x) Yönünde görelî kat ötelemelerinin kontrolü (El-Centro)

Kat	h_i (m)	d_i (m)	Δ_i	$\delta_i=R.\Delta_i$	δ_i/h_i
5	0.3	0.02204	0.00202	0.00202	0.006
4	0.3	0.02001	0.00359	0.00359	0.011
3	0.3	0.01642	0.00448	0.00448	0.014
2	0.3	0.01195	0.00593	0.00593	0.019
1	0.3	0.00602	0.00602	0.00602	0.020

6, 7 ve 8 katlı bina modelleri oluşturulurken 5 katlı yapı modelinin geometrik özellikleri temel alınmış olup sadece kat sayıları değiştirilmiştir. Yapı modellerinin tamamında kat yüksekliği 300 mm olup, yanal rijitlik dört kolon tarafından sağlanmıştır. Yapıların döşeme kalınlıkları 15 mm ve bina boyutları x-yönünde 800 mm, y-yönünde 600 mm olarak seçilmiştir.

3.1.1.2 İmalat Modeli

Bu proje kapsamında sarsma tablası deneylerinde kullanılan dört adet çelik model Şekil 3'te gösterilmiştir. Kolonlar 6x15 mm ebatlarında ve akma dayanımı 750 MPa olan yüksek mukavemetli çelikten imal edilmiştir. Kat döşeme malzemesi olarak 15 mm kalınlığında St 37 çeliği kullanılmıştır. Hedeflenen frekans değerini sağlamak için her katta döşeme ağırlık merkezine 13.2 kg ağırlık ilave edilmiştir. Deneylerde kullanılacak olan deprem kayıtları çelik modele x-yönünde uygulanacağından y yönündeki hareket düşey çapraz elemanlarla engellenmiştir. Çelik modellerdeki tüm bağlantılar kaynaklı yapılmıştır.



Şekil 3. Sırasıyla 5, 6, 7 ve 8 katlı çelik modellere ait perspektifler

3.1.2 Kontrol Algoritması İçin Matematiksel Modelin Geliştirilmesi

Model binaların MR damper ile yarı aktif kontrolünde kullanılacak olan hareket denklemini aşağıda belirtilmiştir. Burada, M yapısal kütle matrisini (kg), C yapısal sönüm matrisini (N/m) ve K rijitlik matrisini (N.s/m) ifade etmektedir. x, \dot{x} ve \ddot{x} sırasıyla deprem tahriği altında yapısal modellere ait yerdeğiştirme, hız ve ivmeyi gösterir. Γ damperin bağlı olduğu katların indisleri, Λ depremin etki ettiği katları ve \ddot{x}_g yer titreşim ivmesini belirtmektedir.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = \Gamma f_{damper} + M\Lambda\ddot{x}_g$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} c_1 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_1 + c_2 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_2 + c_3 & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_3 + c_4 & -c_5 \\ 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_4 + c_5 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} k_1 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_1 + k_2 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_2 + k_3 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_3 + k_4 & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_4 + k_5 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \Lambda = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

Kolonların eğilme rijitliği aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$k = 4 \frac{12EI}{L^3}$$

$$k = 100800 \text{ N/m}$$

Bu denklemden E elastisite modülü ($E=2.1 \times 10^{11}$ N/m²), I kolon hareket yönündeki atalet momentine ($I=2.7 \times 10^{-10}$ m⁴) ve L kolon net açıklığına ($L=0.30$ m) karşılık gelmektedir. Her



katta dört kolon olduğu için eğilme rijitliği dört ile çarpılmıştır. Kütle matrisi oluşturulurken döşeme ağırlığı, kolon ağırlıkları ve ilave ağırlıklar göz önünde bulundurulmuştur.

$$\text{Döşeme ağırlığı} = 0.6 \times 0.80 \times 0.015 \times 7850 = 56.52 \text{ kg}$$

$$\text{1.kat kolon ağırlığı} = 0.006 \times 0.015 \times 0.3 \times 7850 = 0.21 \text{ kg} \times 4 \text{ adet} = 0.85 \text{ kg}$$

$$\text{İlave ağırlık} = 13.2 \text{ kg}$$

Yapısal dinamik analizlerde en yaygın olan sönüm modeli doğrusal viskoz sönümü modelleyen Rayleigh sönüm modelidir. Bu modelin yaygın olarak kullanılmasının sebebi yapısal sistemin kütlelerinin ve rijitliğinin orantılı toplamı olması sonucu hesaplamalarda sağladığı kolaylıktır. Rayleigh sönüm modeli kullanıldığında sönüm matrisi [C] aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir;

$$C = \alpha M + \beta K$$

Burada [M] yapısal sistemin kütle matrisi, [K] ise rijitlik matrisidir. Buna göre sistemin i. modunun sönümü aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\xi_i = \frac{1}{2w_i} \alpha + \frac{w_i}{2} \beta$$

Burada w_i sistemin i. modunun açısal frekansıdır. Yukarıda verilen ilişkilerden α ve β katsayılarının sistemin iki modu için belirlenmiş sönüm oranlarını sağlayacak şekilde tayin edilebileceği görülmektedir. Bu durumda sistemin diğer modlarına göre hesaplanan sönüm oranları tayin edilmektedir. Model sönüm matrisi oluşturulurken ilk iki mod için sönüm $\xi=0.01$ kabul edilmiştir.

Tasarlanan bina modellerine ait kütle, rijitlik ve sönüm matrisleri yukarıdaki ilişkiler kullanılarak belirlenmiştir.

5 katlı bina modeli için elde edilen kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri aşağıda gösterilmiştir.

$$M = \begin{bmatrix} 70.57 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 70.57 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 70.57 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70.57 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 70.57 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 201600 & -100800 & 0 & 0 & 0 \\ -100800 & 201600 & -100800 & 0 & 0 \\ 0 & -100800 & 201600 & -100800 & 0 \\ 0 & 0 & -100800 & 201600 & -100800 \\ 0 & 0 & 0 & -100800 & 100800 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 101.204 & -47.779 & 0 & 0 & 0 \\ -47.779 & 101.204 & -47.779 & 0 & 0 \\ 0 & -47.779 & 101.204 & -47.779 & 0 \\ 0 & 0 & -47.779 & 101.204 & -47.779 \\ 0 & 0 & 0 & -47.779 & 53.39 \end{bmatrix}$$

6 katlı bina modeli için elde edilen kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri aşağıda gösterilmiştir.

$$M = \begin{bmatrix} 70.57 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 70.57 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 70.57 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70.57 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 70.57 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70.14 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 201600 & -100800 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -100800 & 201600 & -100800 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -100800 & 201600 & -100800 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -100800 & 201600 & -100800 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -100800 & 201600 & -100800 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -100800 & 100800 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 116.888 & -56.044 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -56.044 & 116.888 & -56.044 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -56.044 & 116.888 & -56.044 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -56.044 & 116.888 & -56.044 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -56.044 & 116.888 & -56.044 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -56.044 & 60.814 \end{bmatrix}$$

7 katlı bina modeli için elde edilen kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri aşağıda gösterilmiştir.

$$M = \begin{bmatrix} 70.57 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 70.57 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 70.57 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70.57 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 70.57 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70.57 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70.14 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 201600 & -100800 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -100800 & 201600 & -100800 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -100800 & 201600 & -100800 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -100800 & 201600 & -100800 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -100800 & 201600 & -100800 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -100800 & 201600 & -100800 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -100800 & 100800 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 132.986 & -64.411 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -64.411 & 132.986 & -64.411 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -64.411 & 132.986 & -64.411 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -64.411 & 132.986 & -64.411 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -64.411 & 132.986 & -64.411 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -64.411 & 132.986 & -64.411 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -64.411 & 68.549 \end{bmatrix}$$

8 katlı bina modeli için elde edilen kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri aşağıda gösterilmiştir.

$$M = \begin{bmatrix} 70.57 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 70.57 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 70.57 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70.57 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 70.57 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70.57 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70.57 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70.14 \end{bmatrix}$$

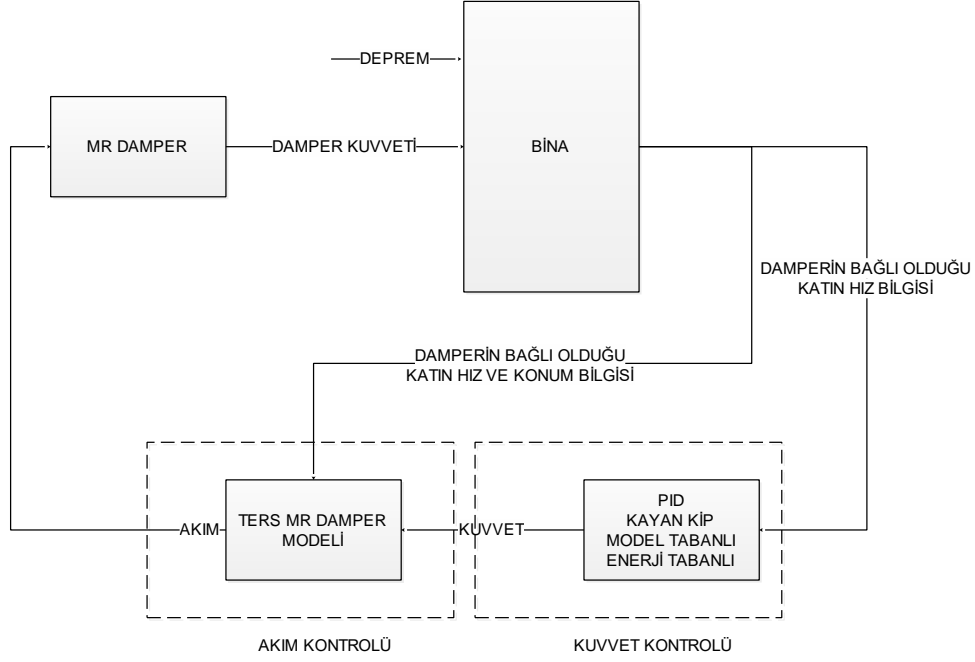
$$K = \begin{bmatrix} 201600 & -100800 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -100800 & 201600 & -100800 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -100800 & 201600 & -100800 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -100800 & 201600 & -100800 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -100800 & 201600 & -100800 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -100800 & 201600 & -100800 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -100800 & 201600 & -100800 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -100800 & 100800 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 149.232 & -72.777 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -72.777 & 149.232 & -72.777 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -72.777 & 149.232 & -72.777 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -72.777 & 149.232 & -72.777 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -72.777 & 149.232 & -72.777 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -72.777 & 149.232 & -72.777 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -72.777 & 149.232 & -72.777 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -72.777 & 76.432 \end{bmatrix}$$

Bu projede tasarlanan dört adet bina modeline ait yukarıda belirtilen M,K ve C matrisleri bir sonraki bölümde özetlenen model tabanlı oransal kontrol algoritmasıyla oluşturulacak MR damper kuvvet kontrolcüsü tasarımında kullanılmıştır.

3.2 Kontrol Algoritması Tasarımı

MR damperin kontrolü, kuvvet kontrolü ve akım kontrolü olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda binadan elde edilen veriler kullanılarak ihtiyaç duyulan damper kuvveti elde edilmektedir. İkinci kısımda ise elde edilen bu kuvvete karşılık gelen akım değeri ters MR damper modeli kullanılarak hesaplanmaktadır. Elde edilen bu akım değeri ise MR damperin kontrolünde kullanılmaktadır (Şekil 4). MR damper matematiksel modelinde temelde akıma karşılık gelen kuvvet hesaplanırken, ters MR damper modelinde kuvvete karşılık gelen akım değeri hesaplanır.



Şekil 4. Sistemin genel blok diyagramı

3.2.1 İncelenen ve Kodlaması Yapılan Kontrol Algoritmaları

Kontrolcünün birinci kısmı olan kuvvet kontrolünün amacı deprem sırasında binanın ilgili katına etkiye kuvveti hesaplamaktır. Kuvvet kontrolü için 4 adet kontrol algoritması göz önüne alınmıştır. Bu algoritmalar:

1. PID kontrol
2. Kayma kipli kontrol (Sliding mode)
3. Model tabanlı oransal kontrol
4. Enerji tabanlı kontrol

olarak sıralanmaktadır.

3.2.1.1 PID Kontrol

Sisteme ilk olarak PID kontrol uygulanmıştır. PID kontrolünün genel ifadesi

$$u = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (1)$$

şeklindedir. Burada K_p oransal katsayısını, K_i integral katsayısını, K_d türev katsayısını, e hatayı ve u kontrol büyüklüğünü ifade etmektedir.

Kontrolcünün geri besleme büyüklüğü olarak damperin bağlı olduğu katın hız değeri seçilmiştir. Deprem sırasından bina hızının sıfır olması amaçlanmaktadır. Bu durum (referans değeri=0) regülatör kontrol tasarımı uygulanması demektir.

Kontrolcü için gerekli olan hata değeri şu şekilde verilir:

$$e = v_{ref} - v_1$$

Burada v_{ref} damperin bağlı olduğu kattaki referans hızı ve v_1 damperin bağlı olduğu katın hızını temsil etmektedir. $v_{ref} = 0$ alındığında $e = -v_1$ elde edilir.

MR damperin bulunduğu katta pozisyon ölçer bulunmaktadır. Pozisyon ölçerden elde edilen konum verisinin türevi alınarak katın hızı, bu hız değerinin türevi alınarak da katın ivmesi elde edilmektedir. Böylece kontrolcü için gerekli olan konum, hız ve ivme değerleri elde edilmektedir. $v_{ref} = 0$ olup $e = -v_1$ olarak alınıp aşağıdaki denklem düzenlenirse;

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

ifadesi elde edilir.

Yukarıdaki ifade kullanarak damperin kontrolü için gerekli olan kuvvet değeri hesaplanabilir. Kontrolcü katsayıları deneme yanılma yöntemi ile belirlenmektedir.

3.2.1.2 Kayma kipli Kontrol (Sliding Mode)

Kayma kipli kontrolde, sistem çıkışını bir kayan doğru boyunca istenen referans sinyale getirip, bu sinyal üzerinde anahtarlama yaparak sistem çıkışının istenen değerde tutulması amaçlanır. Bu kontrolde damperin bağlı bulunduğu kata ait yerdeğiştirme ve hız bilgileri geri besleme olarak kullanılmaktadır.

Kontrol tasarım sırasında Sağlam vd. (2011) çalışmasından faydalanılmıştır. Kayma yüzeyi,

$$\sigma = \alpha e + \beta \dot{e}$$

şeklinde seçilmiştir. Burada e sistem hatası olup $e = x_{ref} - x_1$ olmaktadır. x_{ref} referans kat yerdeğiştirmesi, x_1 ise katın o anki ölçülen yerdeğiştirmesini temsil etmektedir. $x_{ref} = 0$ olması amaçlandığından $e = -x_1$ olmaktadır. Elde edilen genel denklem,

$$\dot{\sigma} + \lambda \sigma + \mu \text{sign}(\sigma) = 0 \quad (2)$$

olmaktadır. Burada λ , Lyapunov kararlılığından gelen pozitif değeri, μ signum fonksiyonunu, $\dot{\sigma}$ kayma yüzeyindeki değişimi ifade etmektedir ve gösterimi aşağıdaki gibidir;

$$\dot{\sigma} = GB(u^{eq} - u) \quad (3)$$

$G = [\alpha \ \beta]$ olmak üzere pozisyon ve hız kontrolcü katsayılarını, B model dinamiklerini içeren vektörü u^{eq} damper kuvvetinin bir önceki değerini temsil etmektedir.

Denklem 3 denklem 2'de yerine konup düzenlenirse

$$GB(u^{eq} - u) + (\lambda\sigma + \mu\text{sign}(\sigma)) = 0 \quad (4)$$

elde edilir.

Denklem 4'den u kontrol ifadesi çekilip, ayrık zaman için düzenlenirse

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

elde edilir.

Burada u damper kuvveti ($u = f_{damper}$), k örnekleme zamanıdır. Bu kontrolcüde ayarlanabilir parametreler α, β, λ ve μ olmaktadır.

3.2.1.3 Model Tabanlı Oransal MR Damper Kontrolü

Bina katlarının kütle, sönüm ve katılık matrisi ile bina - damper arasındaki kuvvet denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = \Gamma f_{damper} + M\Lambda\ddot{x}_g \quad (5)$$

5 katlı bina için

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_1 + c_2 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_2 + c_3 & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_3 + c_4 & -c_5 \\ 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_4 + c_5 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_1 + k_2 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_2 + k_3 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_3 + k_4 & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_4 + k_5 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \Lambda = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

şeklindedir. Burada M binanın kütle matrisi, C sönüm matrisi ve K katılık matrisi olmaktadır. x , \dot{x} ve \ddot{x} sırasıyla katların deprem esnasındaki yerdeğiştirilmesi, hızları ve ivmeleri olmaktadır. Γ damperin bağlı olduğu katların indisleri, Λ depremin etki ettiği katları ve \ddot{x}_g yer titreşim ivmesini belirtmektedir.

MR damperin karşı koyabildiği kuvvet değeri (f_{damper}), denklem 5'den türetilerek elde edilmiş ve model tabanlı kuvvet kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Kontrolcü için gerekli olan geri besleme büyüklüğü için damperin bulunduğu katın hızı seçilmiş olup, hata

$$e = v_{ref} - v_1$$

şeklindedir. Burada v_{ref} damperin bağlı olduğu kattaki referans hız değerini ve v_1 aynı katın hızını temsil etmektedir. $v_{ref} = 0$ olduğundan $e = -v_1 = -\dot{x}$ elde edilir.

Denklem 5'den \dot{x} çekilip düzenlenirse aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

$$\dot{x} = C^{-1}M\Lambda\ddot{x}_g - C^{-1}Kx - C^{-1}M\ddot{x} + C^{-1}\Gamma f_{damper}$$

Kontrolcü tasarımında aşağıdaki kriter seçilmiştir.

$$\dot{e} + Ae = 0 \quad (6)$$

Burada A kontrolcü parametresi temsil etmektedir.

Denklem 6 $e = \dot{x}$ olacak şekilde düzenlenirse

$$C^{-1}M\Lambda\ddot{x}_g - C^{-1}K\dot{x} - C^{-1}M\ddot{x} + C^{-1}\Gamma\dot{f}_{damper} + AC^{-1}M\Lambda\ddot{x}_g - AC^{-1}Kx - AC^{-1}M\ddot{x} + AC^{-1}\Gamma f_{damper} = 0$$

elde edilir.

Yukarıdaki denklemi frekans boyutunda açarsak,

$$(C^{-1}\Gamma s + AC^{-1}\Gamma)F_{damper}(s) = (C^{-1}Ms^3 + AC^{-1}Ms^2 + C^{-1}Ks + AC^{-1}K)X(s) - (C^{-1}M\Lambda s^3 + AC^{-1}M\Lambda s^2)X_g(s)$$

eşitliği elde edilmektedir. Damperin karşı koyabildiği kuvvet ifadesi frekans domaininde aşağıdaki gibi ifade edilir;

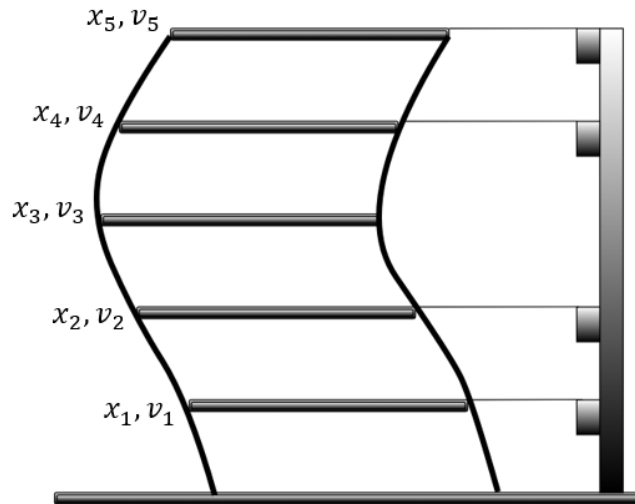
$$F_{damper}(s) = \frac{(C^{-1}Ms^3 + AC^{-1}Ms^2 + C^{-1}Ks + AC^{-1}K)X(s) - (C^{-1}M\Lambda s^3 + AC^{-1}M\Lambda s^2)X_g(s)}{(C^{-1}\Gamma s + AC^{-1}\Gamma)}$$

Frekans domainindeki kuvvet denkliği, zaman domainine dönüştürülerek sisteme entegre edilmiştir. Matris çarpımları yapıldığında sistemin bütün katlarına ait kuvvet denklileri elde edilmektedir. Fakat projede sadece tek bir kata bağlı MR damper kontrolü yapıldığı için, damperin bağlı olduğu kata ait kuvvet denkliği kullanılmıştır.

Lord Firmasının (www.lord.com) MR damperi ile yapılan ön çalışmalarda model tabanlı algoritmanın diğer üç algoritmaya göre kayda değer bir başarı sağlayamadığı için diğer testlerde kullanımından vazgeçilmiştir.

3.2.1.4 Enerji Tabanlı Kontrol

Bina katlarının deprem etkisinde hareket halinde iken sahip olduğu kinetik enerjileri temel alınarak, enerji optimizasyonuna bağlı bir kontrol algoritması tasarlanmıştır. Bu algoritma için bütün katların anlık hız değerlerinin elde edilmesi gerekecektir. Proje dâhilinde 4 adet ipli pozisyon ölçer kullanılmıştır. Bu pozisyon ölçerler kullanılarak katların hız bilgileri de elde edilebilmektedir. Pozisyon ölçer olmayan katların hız bilgileri ise lineer olmayan interpolasyon algoritması kullanılarak elde edilmiş ve algoritmaya bu şekilde dâhil edilmiştir. Şekil 5'de gösterilen titreşim halindeki 5 katlı bina modelinde pozisyon ölçerler 1, 2, 4 ve 5. katlarda bulunmaktadır.



Şekil 5. 5 katlı bina modeli örneği

Bu katlara ait yerdeğiştirme ve hız değerleri ölçülebilmektedir. Fakat 3. kata ait yerdeğiştirme ve hız değeri ölçülememektedir. Bu kısıtlamadan dolayı interpolasyon algoritması kullanılacak ve pozisyon ölçeri eksik olan katların hareket bilgileri elde edilebilecektir. Devamında, aşağıdaki enerji denklemi ile binanın toplam kinetik enerjisi hesaplanmaktadır;

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

Burada amaç toplam hareket enerjisini sıfıra çekmektir,

$$E_{top} \rightarrow 0$$

Buradan damper kuvveti aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$f_{damper} = KE_{top}$$

Buradaki K kontrolcü katsayısını ifade etmektedir.

3.2.2 Akım Kontrolcüsü Tasarımı (MR damperin ters modellemesi)

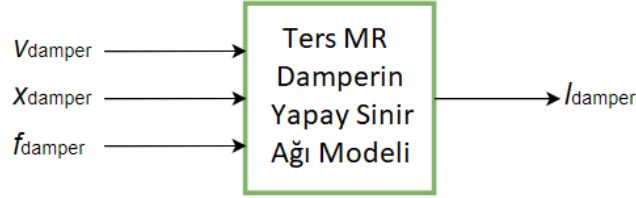
Kontrolcünün ikinci kısmı olan akım kontrolünün amacı, kuvvet kontrolcüsünden elde edilen kuvvet değerinin MR damperin hangi akım değerine karşılık geldiğini hesaplamaktır. Bunun için ters MR damper modeline ihtiyaç duyulmaktadır. MR damperin yüksek derecede doğrusal olmayan yapısından dolayı, damperin ters modeli için yapay sinir ağı ve Min-Max kuvvet olmak üzere iki model kullanılmıştır. Ayrıca sisteme MR damperin manuel kontrolü için Manuel akım kontrolü eklenmiştir.

3.2.2.1 Yapay Sinir Ağı Modeli

MR damperin ters modelinin elde edilmesi ve histerisiz özelliğinin eklenebilmesi için projenin ilk dönemi içerisinde MR damperin yapay sinir ağı modeli oluşturulmuş ve sisteme entegre edilmesi sağlanmıştır.

Yapay sinir ağının eğitimi için gerekli olan veri seti, Sakarya Üniversitesi'nde yapılan MR damper performans testlerinden elde edilmiştir. Bu veri setinde, yapay sinir ağının girişleri, damper pistonu yerdeğiştirme, hızı ve damper kuvvetidir. Yapay sinir ağının çıkışı ise akım olacak şekilde seçilmiştir. Bu veri seti kullanılarak yapay sinir ağının eğitimi gerçekleştirilmiştir.

Gerçek sistemde kuvvet kontrolcüsünden elde edilen damper kuvveti, damper pistonunun yerdeğiştirme ve hız bilgisi kullanılarak istenen referans akım değeri, eğitimi tamamlanan yapay sinir ağı kullanılarak elde edilmiştir. Modelin şematik gösterimi aşağıdaki gibidir.



Şekil 6. Ters MR damper modeline ait yapay sinir ağı şeması

3.2.2.2 Min-Max Modeli

Yapay sinir ağı algoritmasına alternatif olarak Min-Max kuvvet algoritması kullanılmıştır (Askari vd., 2016). Algoritma MR damperin akım uygulamamış haldeki (passive-off) konumundaki minimum aktiveleme kuvveti (f_{min}) ile akım uygulanmış (passive-on) konumunda elde edilebilecek maksimum kuvvet (f_{max}) arasında lineer bir ilişki kurularak oluşturulmuştur.

Algoritmaya temel teşkil eden parçalı akım fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$I_{damper} = \begin{cases} I_{max} & |f_{damper}| > |f_{max}| \\ I_{max} \left(\frac{|f_{damper}| - |f_{min}|}{|f_{max}| - |f_{min}|} \right) & |f_{min}| < |f_{damper}| < |f_{max}| \\ 0 & |f_{damper}| < |f_{min}| \end{cases}$$

Burada f_{damper} kuvvet kontrolcüsünden elde edilen referans damper kuvvetini, I_{max} maksimum damper akımını ifade etmektedir.

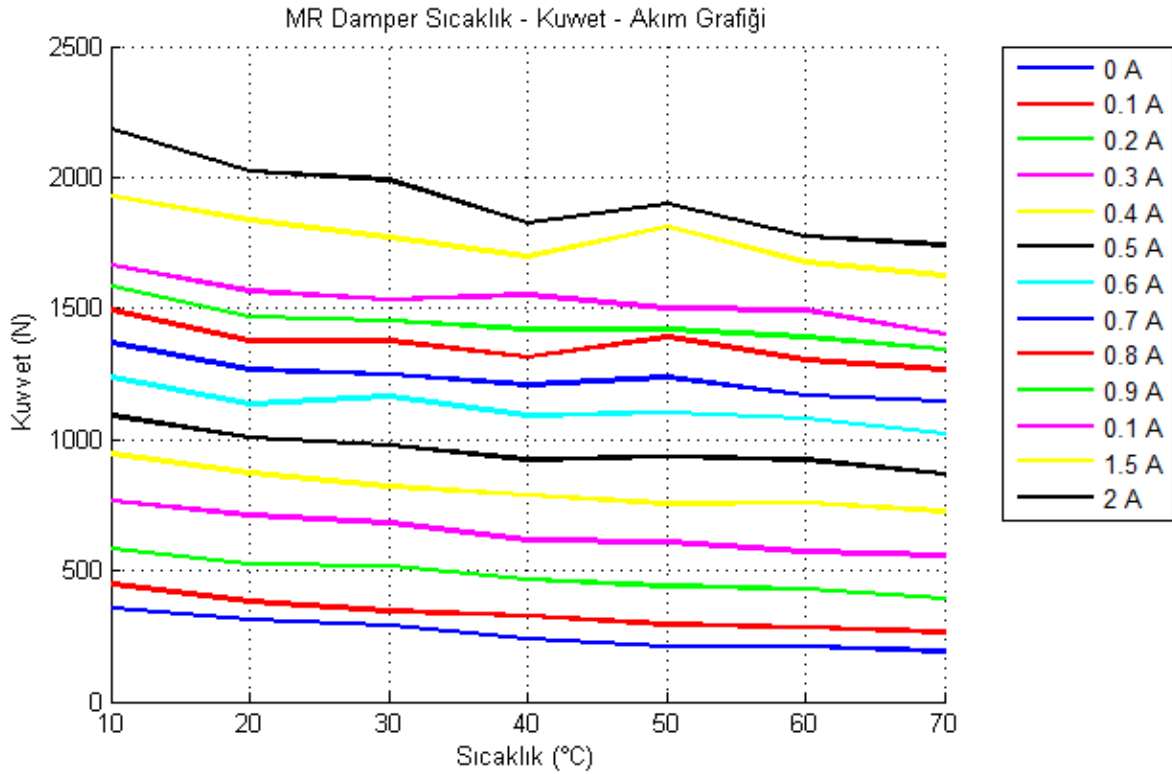
Yapılan ön testlerde etkin sonuç alınmadığı için diğer testlerde bu model kullanılmamıştır.

3.2.2.3 Sabit Akım Uygulaması

Sönümlenme etkisinin karşılaştırılması ve damper performansının gözlemlenmesi açısından, MR damper algoritmasına dampere kullanıcı tarafından arayüz üzerinden akım seviyesini değiştirebilme imkanı sağlanmıştır. Kullanıcı, arayüz üzerinden istediği sabit akım değerini dampere gönderebilmektedir. Böylece sabit akımda pasif (passive-on) durumdaki performansı ölçülebilmektedir. Fakat yapılan testlerde sabit akım uygulaması damperin bağlı olduğu yapının ilk katını rijit hale getirdiği için yapının diğer katları üzerinde sönümlenme etkisi göstermemektedir.

3.2.3 Sıcaklık Değişimlerinin Damper Performansına Olan Etkisi

MR damperlerin performansları sıcaklık artışı ile birlikte değişmektedir. Sıcaklığın yükselmesinin temel nedeni uzun süre çalışma sonucunda oluşan sürtünme etkileri ve manyetik alan uygulanan bobinden kaynaklanan sıcaklık yükselmesidir. Yükselen sıcaklık akışkanın viskozitesini düşürmekte, bunun neticesinde sönüm kuvveti de düşmektedir. Bu etkinin kontrol algoritması içinde tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle proje kapsamında geliştirilen MR damper kontrol algoritması içerisinde damper sıcaklığı dikkate alınmıştır. Algoritma damperin sıcaklık seviyesine göre uygulanması istenen referans kuvvetinin seviyesini değiştirmektedir. Sıcaklık seviyeleri 10, 20, 30, 40, 50, 60 ve 70°C olup, bu sıcaklık seviyelerine ait damperin akım ve kuvvet seviyeleri üzerinden bir yüzey denklemi oluşturulmuştur. Sıcaklık ile MR damperin sönüm kuvvetinin farklı akımlardaki değişimi Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7.Farklı akımlarda sıcaklık ile MR damper sönüm kuvvetinin değişimi

Her bir sıcaklık aralığı için, elde edilen maksimum değerler üzerinden doğrusal olmayan bir denklem elde edilmiş ve akım değerleri kullanılarak bu sıcaklık denklemleri üzerinden ihtiyaç olan kuvvet farkı bulunmuştur. Kuvvet farkı, istenen referans kuvvetin üzerine eklenerek

sıcaklığa bağlı referans kuvvet ifadesi elde edilmiştir. Elde edilen sıcaklık eşitlikleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 5. Sıcaklık aralıklarına bağlı kuvvet ifadeleri

Sıcaklık Aralıkları (°C)	Akıma Bağlı Katsayı (K_{Temp})
$0 \leq T < 10$	$0.873 + 0.102 \cdot I - 0.037 \cdot I \cdot I$
$10 \leq T < 20$	$0.81 + 0.2034 \cdot I - 0.0797 \cdot I \cdot I$
$20 \leq T < 30$	$0.6974 + 0.337558 \cdot I - 0.1561367 \cdot I \cdot I$
$30 \leq T < 40$	$0.6263 + 0.518636 \cdot I - 0.202 \cdot I \cdot I$
$40 \leq T < 50$	$0.6153 + 0.5074094 \cdot I - 0.2104537 \cdot I \cdot I$
$50 \leq T < 60$	$0.6153 + 0.5074094 \cdot I - 0.2104537 \cdot I \cdot I$
$60 \leq T < 70$	$0.568 + 0.5155703 \cdot I - 0.2063259 \cdot I \cdot I$

Elde edilen sıcaklık katsayısı aşağıda gösterilen kuvvet eşitliğine eklenerek güncellenmiş referans kuvveti elde edilmiştir,

$$F_{ref_T} = F_{ref} + (1 - K_{Temp}) * F_{ref}$$

Bu denklemde F_{ref} , sıcaklık dahil edilmeden elde edilen kontrolcü referans kuvvet değerini, K_{Temp} Tablo 5’te hesaplanan, damper akımına bağlı sıcaklık katsayısını, F_{ref_T} sıcaklık dahil edilerek hesaplanan referans kuvvet değerini temsil etmektedir.

3.2.4 Karşılaştırma İndeksleri

DeneySEL çalışmalar sonucunda, deprem etkisine maruz kalan bina modelinden elde edilen ölçüm verilerinin bir takım karşılaştırma indeksleri ile performans analizi yapılacaktır. Bu performans analizi için Ohtori vd. (2004) çalışmasında bulunan ilk 6 indeks kullanılmıştır. İlk üç indeks aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

$$J_1 = \max \left[\frac{\max_{t,i} \left| \frac{d_i(t)}{h_i} \right|}{\delta^{max}} \right]$$

$$J_2 = \max \left[\frac{\max_{t,i} |\ddot{x}_{ai}(t)|}{\ddot{x}_a^{max}} \right]$$

$$J_3 = \left[\frac{\max |k_1 \cdot x_1(t)|}{|F_b^{max}|} \right]$$

Bu indeks değerleri içerisinde J_1 katlar arasındaki maksimum yerdeğiştirme seviyesi, J_2 maksimum ivme seviyesi ve J_3 taban kesme kuvveti seviyesi olmaktadır. Denklemler içerisinde i bina katı numarası, \ddot{x}_{ai} bina katı ivmeleri, d_i katları arası yerdeğiştirme miktarını, F_b taban kesme kuvvetini, m_i katların kütlelerini ve h_i katlar arası mesafeyi ifade etmektedir. δ^{max} kontrolsüz haldeki simülasyon sonucunda elde edilen maksimum katlar arası yerdeğiştirme değerini ifade etmektedir ve $\max_{t,i} |d_i(t)/h_i|$ ile ifade edilmektedir. İlk üç karşılaştırma indekslerinin normları (mutlak değerleri) alınarak elde edilen diğer indeksler aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$J_4 = \max \left[\frac{\max_i \frac{\|d_i(t)\|}{h_i}}{\|\delta^{max}\|} \right]$$

$$J_5 = \max \left[\frac{\max_i \|\ddot{x}_{ai}(t)\|}{\|\ddot{x}_a^{max}\|} \right]$$

$$J_6 = \left[\frac{\|\max |k_1 \cdot x_1(t)|\|}{\|F_b^{max}\|} \right]$$

Seçilen karşılaştırma indeksleri otomatik olarak hesaplanmakta olup sistem arayüzüne eklenmiştir.

3.2.5 MR Damper Kontrolcü Arayüzü

MR damperin kontrolü ile beraber verilerin toplanması ve işlenmesi için bir arayüz geliştirilmiştir. Bu arayüz sayesinde MR damper ile ilgili kontrolcü katsayıları belirlenmekte, ters damper modeli için yapay sinir ağları oluşturulmakta, sarsma deneylerinde binadan gelen veriler kaydedilmekte ve sonuçlar değerlendirilmektedir. Arayüz beş sekmeden oluşmaktadır, bunlar;

- Kontrolcüler ve Ayarlar
- MR damper Akım Tipi
- Grafikler
- Filtreler
- Değerlendirme Kriterleri

MR Damper Kontrol Sistemi

Kontrolcüler ve Ayarlar MR Damper Akım Tipi Grafikler Filtreler Değerlendirme Kriterleri

Kontrolcüler

PID Kayma Kipli Enerji Tabanlı Model Tabanlı

PID Kontrolcü

P 5000,00
I 0,00
D 200,00

KP Kontrolcü

α 1,00
 β 1,00
 λ 12000,00
 μ 0,000

Enerji Tabanlı Kontrolcü

ETK Kazancı 7,00

Model Tabanlı Kontrolcü

MTK Kazancı1 49388,00
MTK Kazancı2 70,57
MTK Kazancı3 562,50

Bina Özellikleri

Katlar 8 Kat Yükseklikleri 0,00

	Kütle (kg)	Sönümlenme (N.s/m)	Katılık (N/m)
1. Kat	70	0	0
2. Kat	70	0	0
3. Kat	70	0	0
4. Kat	70	0	0
5. Kat	70	0	0
6. Kat	70	0	0
7. Kat	70	0	0
8. Kat	70	0	0

İvme Sensörleri Yerleşimi

Katlar	İvme Sensörleri
Floor 1	1 Eksenli İvme Sensörü 1
Floor 2	1 Eksenli İvme Sensörü 2
Floor 3	1 Eksenli İvme Sensörü 3
Floor 4	1 Eksenli İvme Sensörü 4
Floor 5	3 Eksenli İvme Sensörü 1
Floor 6	3 Eksenli İvme Sensörü 2
Floor 7	3 Eksenli İvme Sensörü 3
Floor 8	3 Eksenli İvme Sensörü 4

Grafik Çizimleri

Katlar

1 2 3 4
 5 6 7 8

Yer Değişimleri Hızlar İvmeler

Data Frekansı 125 Hz

Damper Sıcaklığı ve Yer İvme Ölçer Offsetleri

Sıcaklığı Dahil Et

Damper Sıcaklığı 25,9 °C T Maks (°C) 50,00

Yer İvmeölçeri X (m/s²) -2,760
Yer İvmeölçeri Y (m/s²) -3,150

Kuvvet Sensörü Offseti

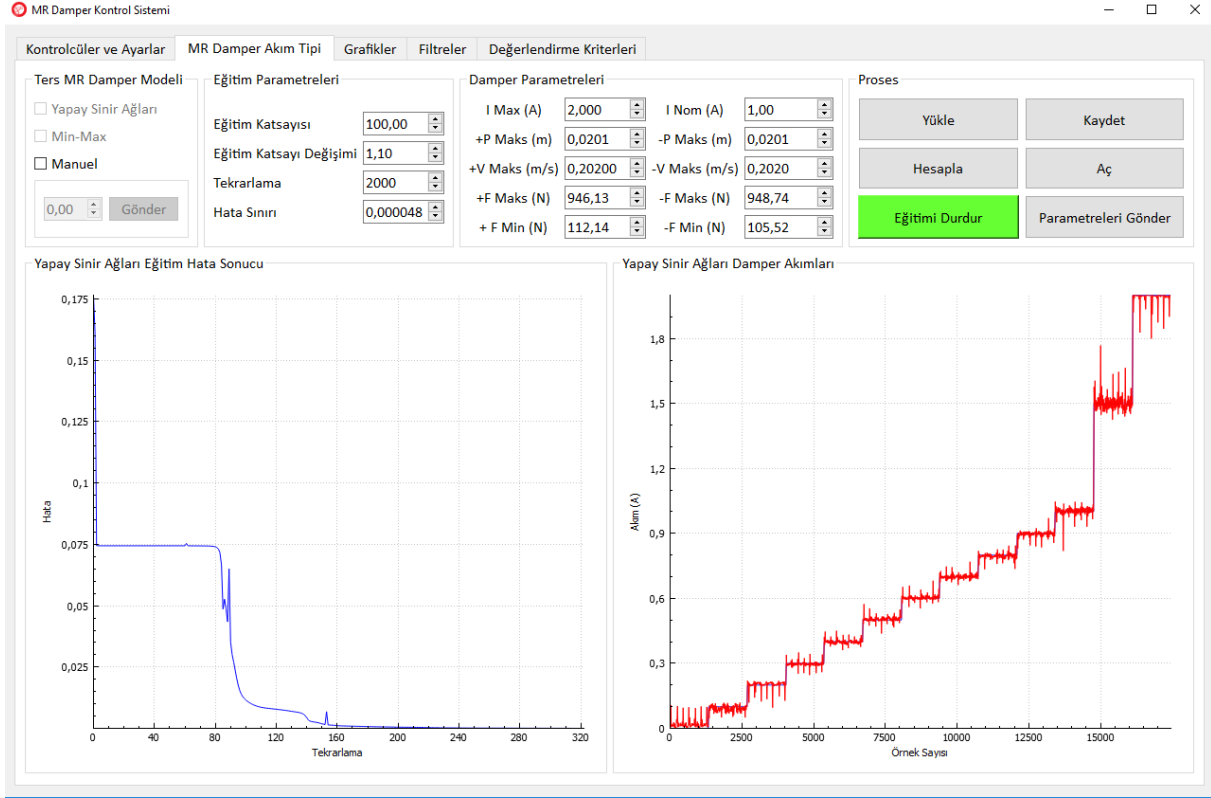
Kuvvet Sensörü Offseti (N) 124,00

? i

Sistem Ayarları Parametreleri Gönder

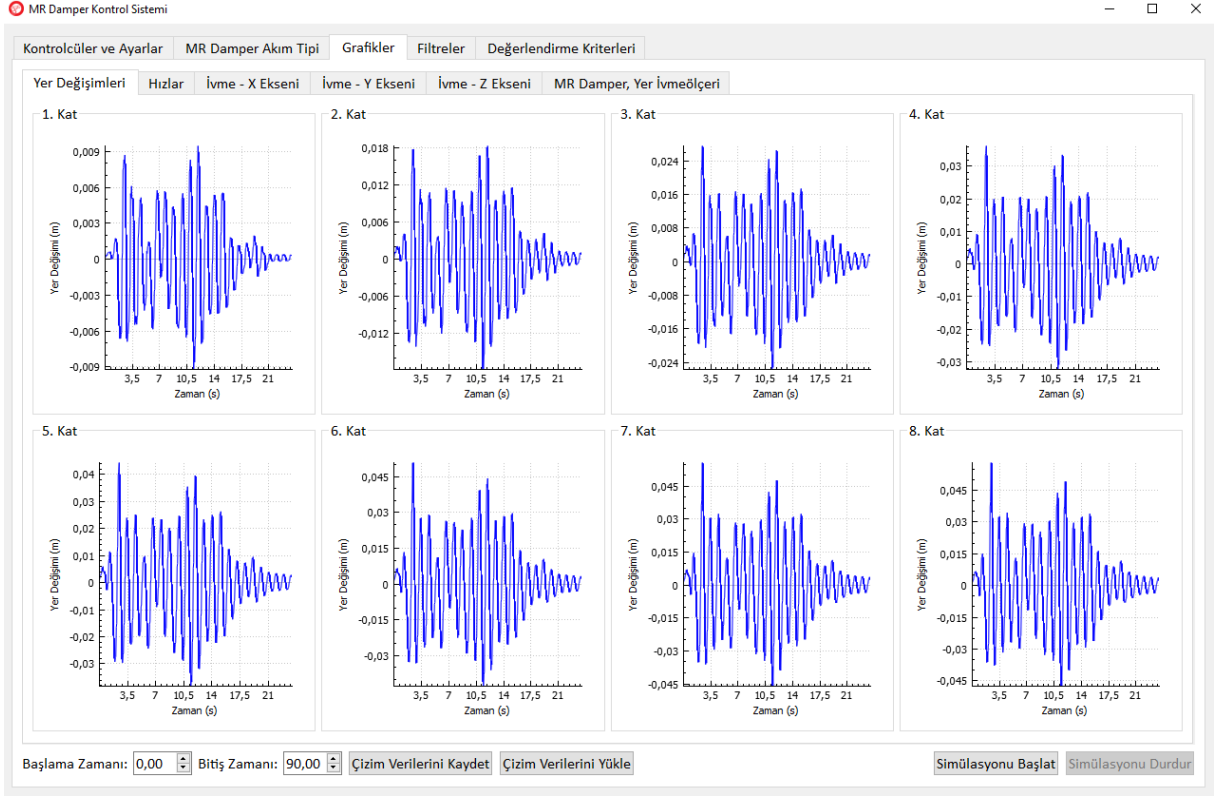
Şekil 8. Kontrolcüler ve Ayarlar sekmesinin arayüzü

Dört adet kontrolcünün katsayı değerleri Şekil 8’de gösterildiği gibi ilgili veri giriş kutucuklarına girilmektedir. Hiçbir kontrolcü seçilmediğinde yazılım MR dampere akım göndermemekte ve bu durumda MR damper en düşük sönüm değerinde (passive-off) çalışmaktadır. Yerleştirilen ivmeölçerlerin katlara göre seçimi arayüzdeki “İvme Sensörleri Yerleşimi” bölümünden yapılmaktadır. Hangi katlar için hangi grafiklerin kayda alınacağı ayrıca seçilebilmektedir. Ayrıca yer ivmeölçeri ve kuvvet sensörlerinin sıfırlanma ayarının yapıldığı seçenekler mevcuttur.



Şekil 9. MR damper Akım Tipi sekmesi arayüzü

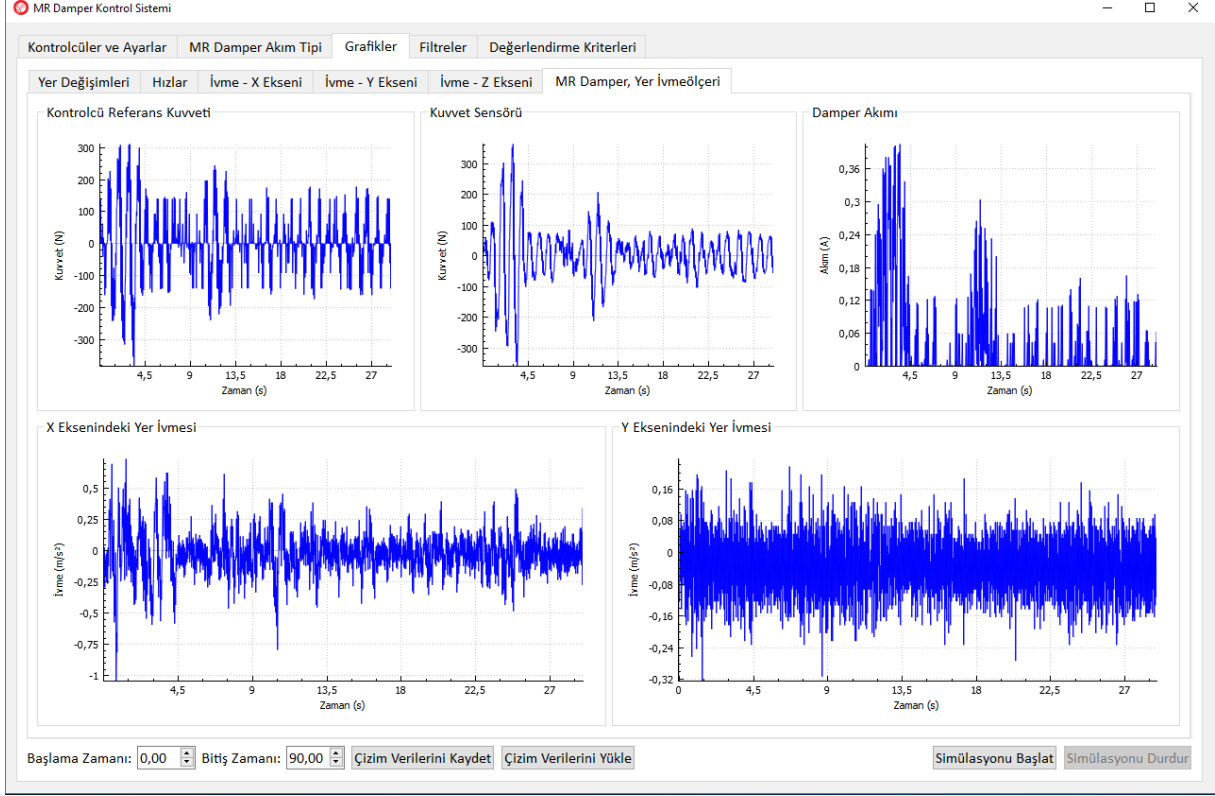
“MR damper akım tipi” sekmesinde yapay sinir ağlarının eğitimi yapılmaktadır. Bu ekrandan eğitim ile ilgili parametreler değiştirilerek eğitim sonucunda meydana gelen hata değerleri ayarlanabilmektedir. Bu ayarların yapılması; az iterasyon yapılan çözümlerin doğru cevap üretememesi, buna karşılık fazla yapılan eğitimlerin sonuçlarında ciddi sapma ve hatalar oluşmasından dolayı gereklidir. Eğitimin yapılabilmesi için MR damperin akım aralıklarının, nominal akımın, konum, hız ve kuvvet değerlerinin sınırlarının girilmesi gereklidir. Literatürde yer alan çalışmalardaki yaygın olan kullanıma benzer olarak nominal akım 1 A, maksimum akım ise 2 A olarak belirlenmiştir. Yazılım, eğitim için MR damperin performans testlerinden elde edilen verileri kullanmaktadır. Bu veriler uygun formata getirilerek yazılıma yüklenmekte ve eğitilmiş veriler oluşturulmaktadır. Eğitim tamamlandığında veriler kaydedilebilmekte ve istenildiğinde tekrar geri çağırılabilir. Ters MR damper modeli, tercihe göre yapay sinir ağları ve Min-Max modeli ile akım değeri üretebilmektedir. Ayrıca Manuel seçeneği ile MR dampere istenilen sabit akım sürekli olarak gönderilebilmektedir.



Şekil 10. Grafikler sekmesinde Yer Değişimleri alt sekmesinin arayüzü

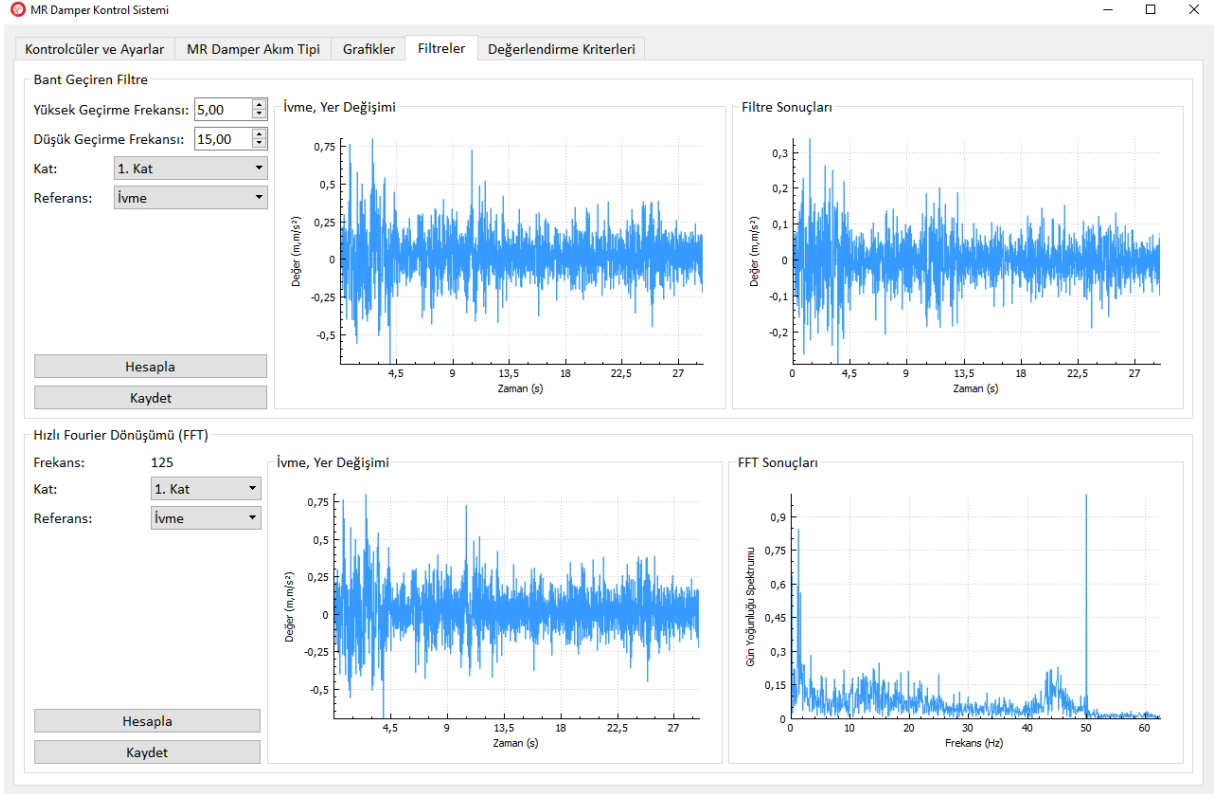
Grafikler sekmesinin altı adet alt sekmesi bulunmaktadır. Bu alt sekmelerden yer değişimleri, hızlar, üç eksende alınan ivme verileri ve MR dampere ait bilgiler okunmakta ve istenilen zaman aralıklarında kaydedilmektedir. Daha önce kaydedilmiş olan veriler yine bu ekrana geri yüklenerek yeniden incelenebilmektedir.

“Simülasyonu Başlat” düğmesi ile veri kaydı aktif hale getirilip “Simülasyonu Durdur” düğmesi ile kayıt durdurulmaktadır.



Şekil 11. Grafikler sekmesinde MR damper, Yer İvmeölçeri alt sekmesinin arayüzü

MR damper, Yer İvmeölçeri alt sekmesinde “Kontrolcü Referans Kuvveti” ters MR damperin hangi kuvvete karşılık akım ürettiğini, “Kuvvet Sensörü” MR damper üzerindeki kuvvet sensörünün ölçtüğü değeri ve “Damper Akımı” ise kontrolcünün MR dampere gönderdiği akımı göstermektedir. MR damper ile ilgili olan sekmede en alt kısımda iki eksenli yer ivmeölçerine ait değerler yazdırılmaktadır.



Şekil 12. Filtreler sekmesinin arayüzü

Şekil 12’de gösterildiği gibi arayüzün Filtreler kısmında Bant Geçiren Filtre (Bandpass filter) ekranı her kat için istenilen yerdeğiştirme, hız ve ivme verilerini istenilen frekans aralıklarında filtreleyebilmekte ve benzer şekilde her veriye ait Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) analizi yapabilmektedir. Bant Geçiren Filtre fonksiyonu, düşük geçiren (Low Pass), yüksek geçiren (High Pass), bant geçiren (Band Pass) veya bant durduran (Band Stop) şeklinde çalışabilmektedir.

Değerlendirme Kriterleri sekmesinde, Bölüm 3.2.4’de verilen karşılaştırma indekslerine göre hesaplanan değerler göstermektedir. Böylece MR damperin performansı kontrolcüsüz referans verilerine göre kıyaslanabilmektedir.

3.2.6 MR Damper ve Sarsma Tablası İçin Gereken Donanımların Kurulması

Testlerin yapılabilmesi için 30 kN kapasitesinde SANLAB Smotion 3000 markalı sarsma tablası kullanılmıştır. Sarsma tablasına ait özellikler Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Sarsma tablası hareket sınırları

	Pozisyon / Dönme	Hız / Açısal Hız	İvme / Açısal İvme
İleri / Geri (Surge)	± 0.34 m	± 0.7 m/s	± 6 m/s ²
Yukarı / Aşağı (Sway)	± 0.33 m	± 0.7 m/s	± 6 m/s ²
Sağ / Sol (Heave)	± 0.34 m	± 0.55 m/s	± 8 m/s ²

Yatma (Roll)	$\pm 18^\circ$	$\pm 33^\circ/\text{s}$	$\pm 220^\circ/\text{s}^2$
Yunuslama (Pitch)	$\pm 18^\circ$	$\pm 34^\circ/\text{s}$	$\pm 220^\circ/\text{s}^2$
Dönme (Yaw)	$\pm 24^\circ$	$\pm 33^\circ/\text{s}$	$\pm 300^\circ/\text{s}^2$

Sarsma tablasının platform ölçüleri 2.5 m x 2.5 m büyüklüğündedir. Bina modelleri sarsma tablasının üzerine teker teker monte edilerek testler yapılmıştır.



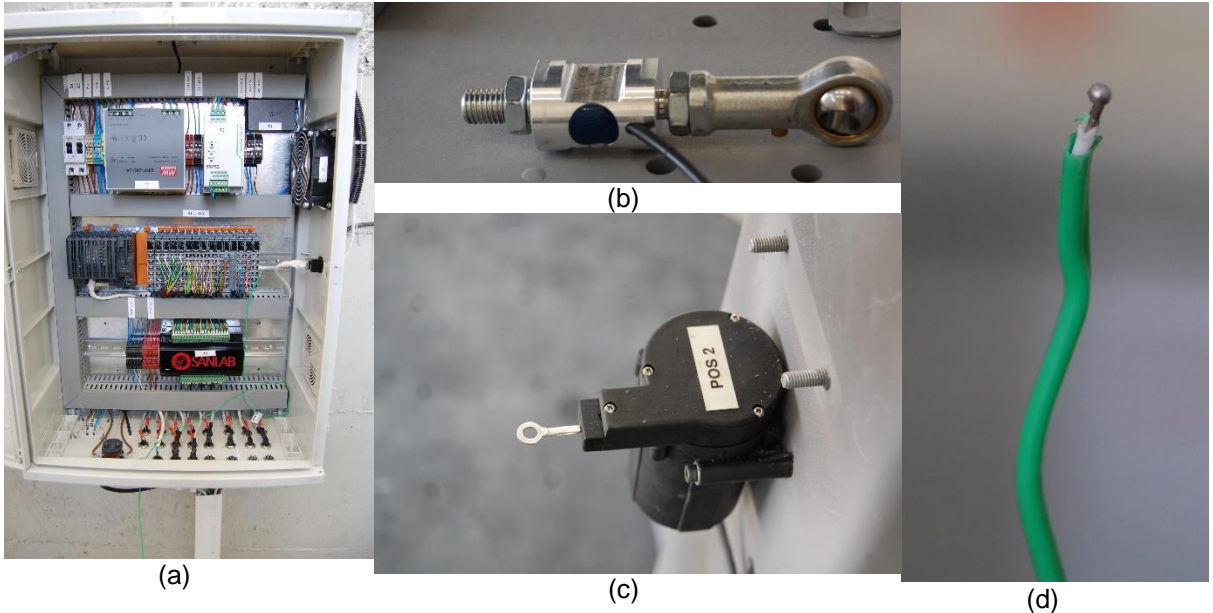
Şekil 13. Smotion 3000 sarsma tablası

Test sistemde uygun aralıklarda ölçüm gerçekleştiren sensörler kullanılmıştır.



Şekil 14. SenseBox marka ivmeölçerler

Hareket esnasında binada oluşan ivme verilerinin alınmasında sismik uygulamalar için özel geliştirilmiş 4 adet SenseBox 7021 tek eksenli ve 4 adet SenseBox 7023 üç eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Tüm ivmeölçerler $\pm 3g$ aralığında 2400 mV/g hassasiyetinde veri alabilme kapasitesine sahiptir. Katların pozisyonun ölçülebilmesi için 500 mm aralıkta 77 μm hassasiyetle ölçüm yapabilen dört adet UniMeasure marka pozisyon ölçer kullanılmıştır. Pozisyon ölçerler en alt ve en üst katta olmak kaydıyla bina kat sayısına göre simetrik olarak yerleştirilmiştir. MR damper üzerindeki kuvvet değerlerinin okunabilmesi için ± 2 kN aralığında, %0.5 hassasiyetle veri okuyabilen MeSysteme markalı KM30z kuvvet sensörü kullanılmıştır.

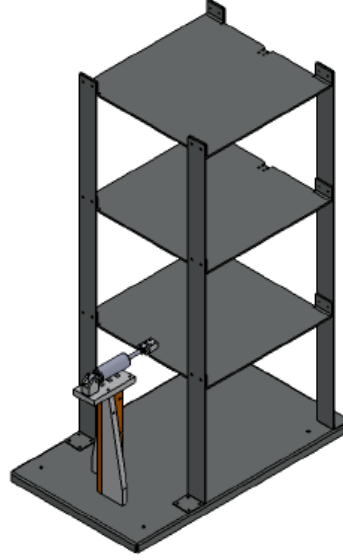


Şekil 15. (a) Kontrol panosu, (b) kuvvet sensörü, (c) pozisyon ölçer ve (d) sıcaklık ölçer (termokupul)

Sıcaklık verilerinin alınabilmesi için MR damper üzerine k-tipi termokupul monte edilmiştir. MR damper üzerine akım göndermek ve gelen verileri bilgisayara göndermek için dört adet NI 9239 kodlu 4 kanallı ± 10 V aralıkta çalışan voltaj giriş modülü ve cDAQ-9184 kodlu kompakt DAQ şasesi kullanılmıştır. Tüm sensörlerin kart ile olan bağlantıları Şekil 15a'da gösterilmiştir.

3.2.7 Model Binaya ait Test Düzenegi

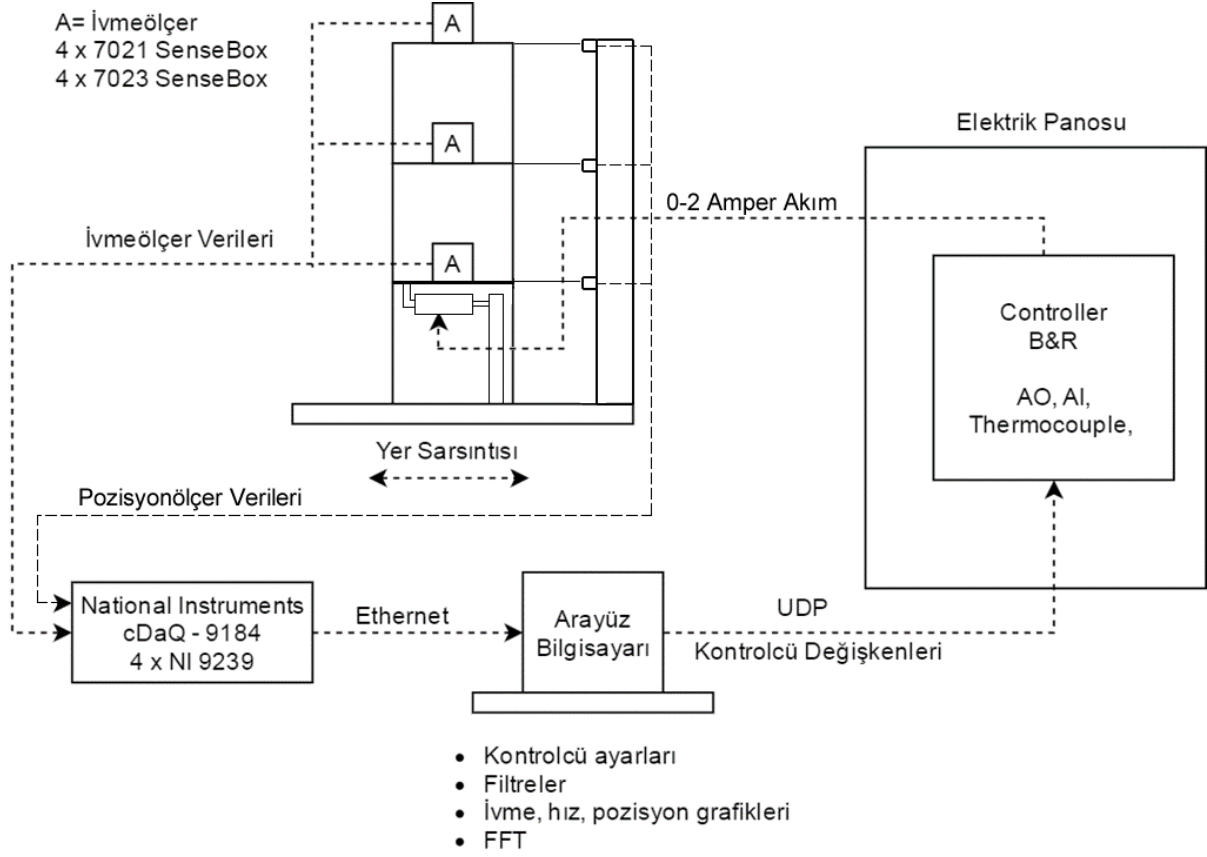
Kontrol algoritmalarının ön çalışmalarını yapabilmek amacıyla 3 katlı bir bina imal edilmiş (şekil 16) ve LORD 8040 marka MR damper kullanılarak dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.



şekil 16. 3 Katlı ön test modeli

Bu model binada yapılan testler sonucunda MR damperin bağlantısının zemin ile birinci kat arasına yapılmasına karar verilmiştir. Ayrıca yapılan ilk kontrol algoritmaları bu model üzerinde olgunlaştırılmıştır. Bu bina modeli üzerinde yapılan denemelerde görölen aksaklıklar Bölüm 3.1’de belirtilen bina modellerinin tasarımında dikkate alınarak giderilmiştir.

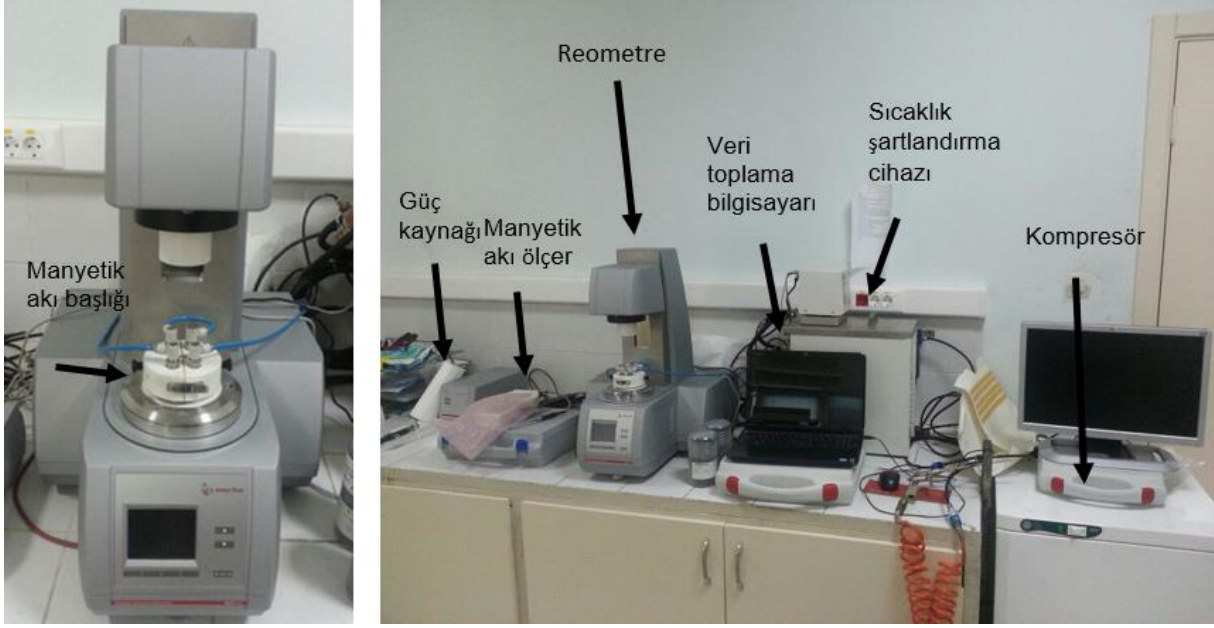
İmal edilen ölçeklenmiş elik yapı modellerinin ilk dört katında tek eksenli diğer katlarında ise üç eksenli ivmeölçerler, ağırlık merkezleri dikkate alınarak yapı modellerinin kat seviyelerine yerleştirilmiştir. İpli pozisyon ölçerler model binanın yanında bulunan rijit platform üzerine monte edilmiştir. İp bağlantı ucu katlarda bulunan bağlantı parçasına tutturulmuştur. MR damperin montajı için birinci katın altına ve zemin katın üstüne iki adet bağlantı elemanı imal ettirilmiştir. MR damperin çalışma esnasında ürettiği kuvveti görmek amacıyla MR dampere seri olarak kuvvet sensörü bağlanmıştır. Damperin sıcaklığını ölçmek için kullanılan termokupul plastik kelepçe ile MR damper gövdesine sabitlenmiştir. Kuvvet sensörü ve termokupul ile beraber MR damperin montajlı hali şekil 79’da gösterilecektir. Sarsma testleri esnasında sensörlerden gelen veriler DAQ kartta toplanarak bilgisayara aktarılmakta ve bunun neticesinde kontrolcünün belirlediği akım değerleri kontrol panosu üzerinden MR dampere geri beslenmektedir.



Şekil 17. Deney düzeneği blok diyagramı

3.3 Reometre ile MR Sıvı Karakterizasyonun Belirlenmesi

MR sıvıların reolojik özelliklerinin belirlenmesi için Anton Paar MCR 302 reometre kullanılmıştır (Şekil 18). Reometre; bir kompresör ile oluşturulan hava basıncını kullanarak ölçüm başlıklarını, numune içerisinde döndürmektedir. Bu dönüş esnasında başlığa gelen kuvvetler hassas bir şekilde ölçülerek akışkanın reolojik değerleri veri setleri olarak oluşturulmaktadır. Ayrıca reometre, numuneyi farklı sıcaklıklarda şartlandırabilme özelliğine sahiptir ve MR akışkan üzerine, manyetik akı başlığı vasıtasıyla 0 A ile 5 A arasında akım gönderebilecek şekilde çalışabilmektedir. Bu akım aralığı, bir MR damperin çalıştığı karakteristik aralığı fazlasıyla kapsamaktadır. Numune üzerine gelen manyetik akı yoğunluğu ise bir manyetik akı ölçer ile ölçülmektedir.



Şekil 18. Reometre ölçüm cihazı (solda), Reometreye ait yardımcı ekipmanlar (sağda)

Reometre ölçümleri için iki farklı ölçme başlığı kullanılabilir. Bunlardan birisi paralel plaka, diğeri ise çift-boşluk (Twin-Gap) ölçme başlığıdır (Şekil 19). Paralel plaka daha yavaş hızlarda çalışmakta buna karşın akma gerilmelerini daha hassas şekilde hesaplamakta iken, çift-boşluk başlığı daha yüksek kayma hızlarında (shear rate) daha düşük viskoziteye sahip sıvıların ölçülerinde kullanılmaktadır.



(a)

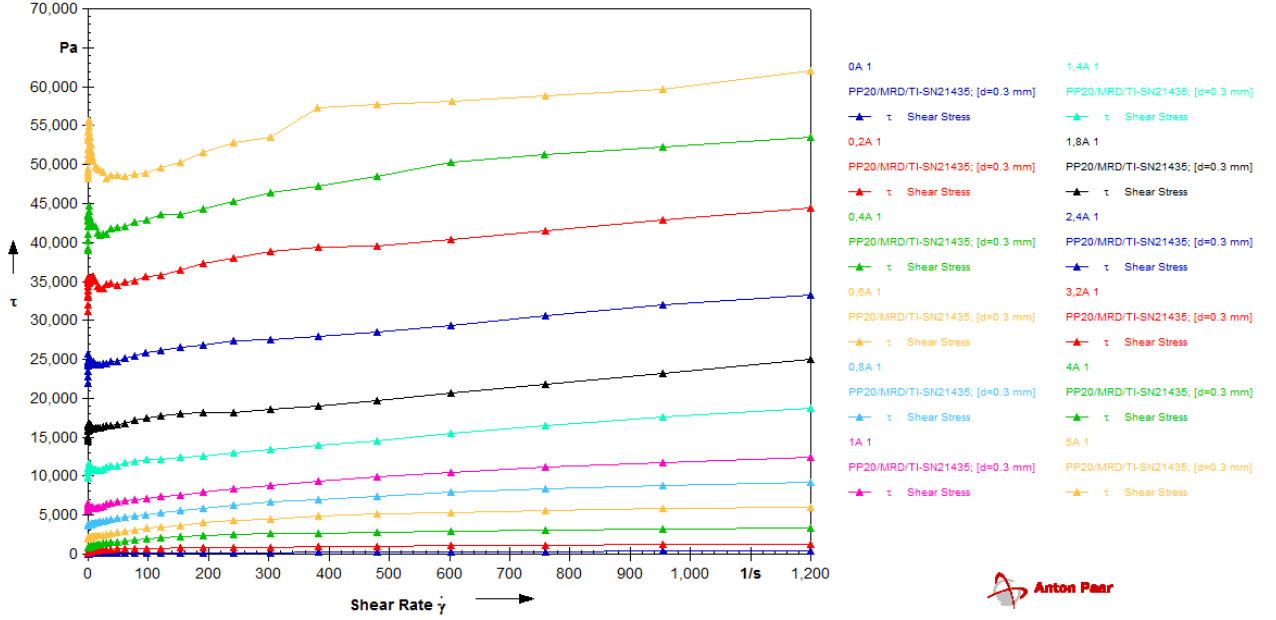


(b)

Şekil 19. Paralel plaka başlığı (a), Çift-boşluk başlığı (b)

3.3.1 Paralel Plaka Başlığı İle Yapılan Ölçümler

Lord firmasının MRF132DG isimli MR sıvısının paralel plaka ile 40°C için farklı akım değerlerinde yapılan ölçümleri Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 20. Paralel plaka başlığı ile yapılan ölçüm sonuçlarının kayma hızı-kayma gerilmesi ekseninde görünümü

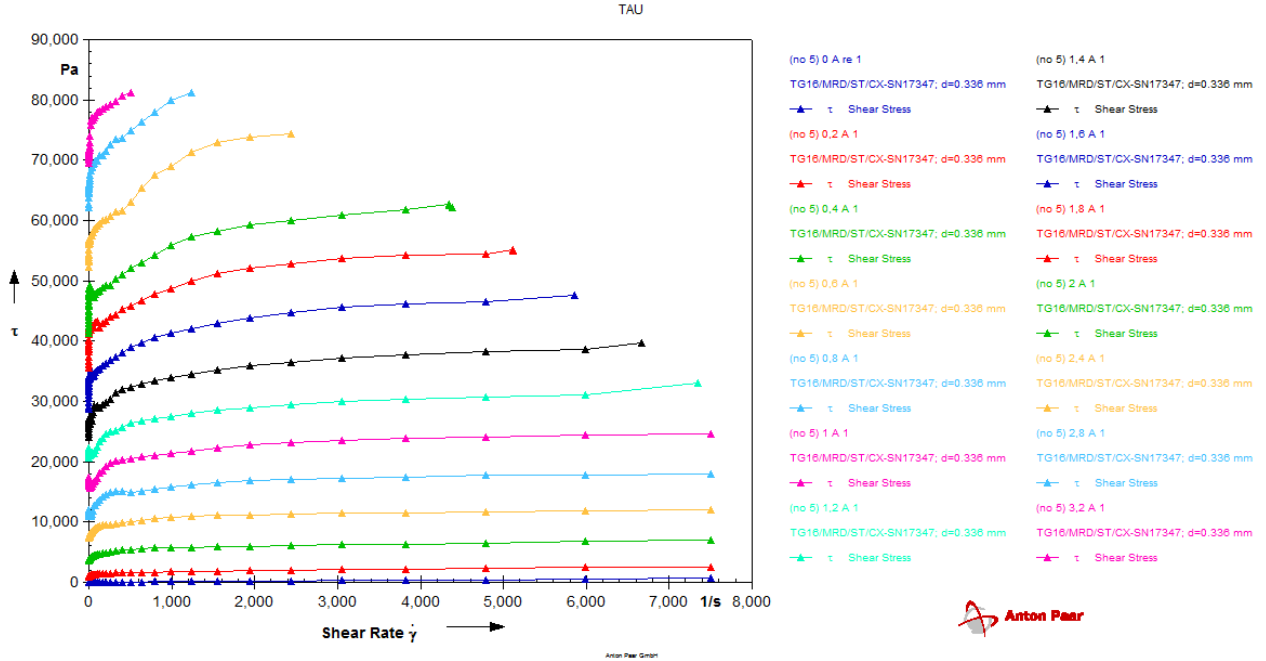
Ölçümlerde MR akışkanın karakteristik yapısına uygun bir şekilde belirli kayma gerilmelerinde akmaya başladığı; daha sonra ise incelendiği net olarak görülmektedir.

3.3.2 Çift-Boşluk (Twin-Gap) Ölçme Başlığı İle Yapılan Ölçümler

Çift-boşluk ölçme başlığı yüksek kayma hızları için tasarlanmış özel bir başlıktır. Bu başlık numunenin, plakanın hem alt hem de üst kısmına doldurulması ile çalışmaktadır. Bu sayede daha yüksek kayma hızlarına çıkabilmektedir. Paralel plakanın çıkamadığı kayma hızlarını da tarayabilmek adına bu başlık ile ulaşılabilen maksimum kayma hızı olan 7500 s^{-1} değerine kadar ölçümler yapılmıştır.

Her ne kadar bu yüksek kayma hızlarında ölçümler yapılabilir olsa da her akım değeri için maksimum kayma hızına çıkmak mümkün olmamaktadır. Çünkü yüksek akımlarda cihazın ölçüm kafasına gelen moment değerleri de artmaktadır. Cihazın limit moment değeri 200 mNm olduğu için yüksek manyetik akı değerlerinde belirli kayma hızlarının üzerine çıkılamamaktadır. Fakat bu problem sadece çok yüksek akım değerlerinde olduğu için bu bölgelerdeki veriler tahmin edilerek bu sorunun üstesinden gelinebilmektedir.

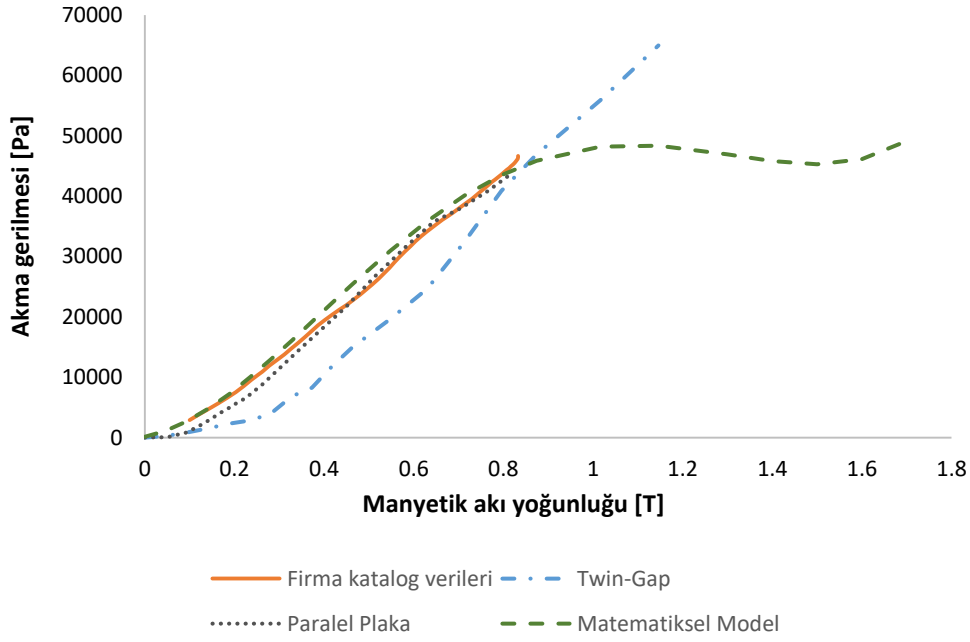
Çift-boşluk başlığı kullanımının bir diğer dezavantajı ise akma gerilmelerinin tespitinde paralel plaka kadar doğru tahmin yapılamamasıdır. Fakat bu durum, paralel plaka ölçüm verilerinin kullanıldığı HAD analizlerinde ortaya çıkan büyük hatalara benzer bir duruma neden olmamaktadır. Çift-boşluk başlığı ile yapılan ölçüm sonuçları Şekil 21’de verilmiştir.



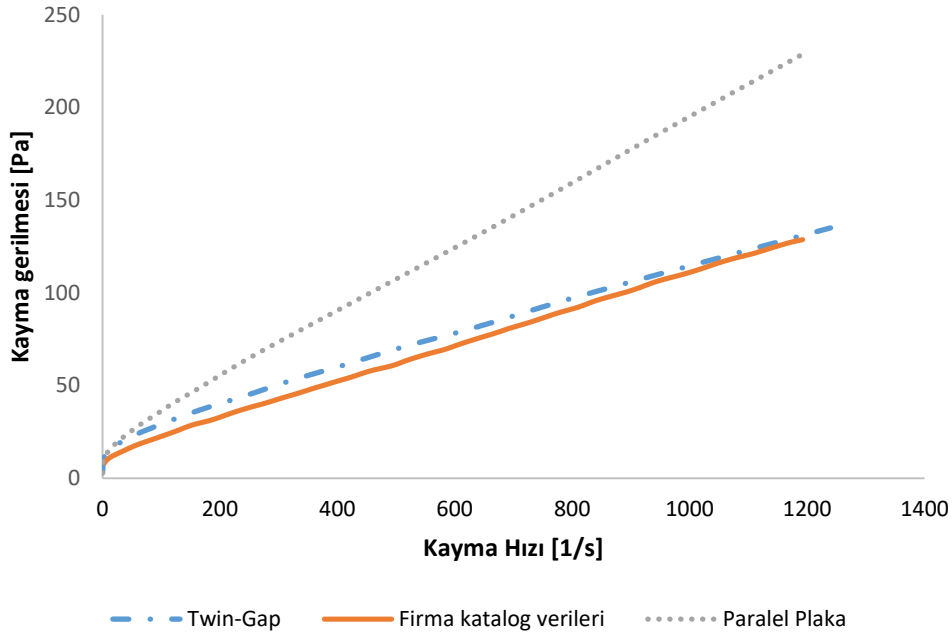
Şekil 21. Çift-boşluk başlığı ile yapılan ölçüm sonuçlarının kayma hızı-kayma gerilmesi ekseninde görünümü

Yapılan ölçümlerin MRF132DG sıvısının Lord firması tarafından verilen katalog verileri ile kıyaslanması Şekil 22 ve Şekil 23’de verilmiştir. Şekil 22, farklı akım değerleri için elde edilen manyetik akı yoğunluğuna karşılık gelen akma gerilmesini gösterirken; Şekil 23, 0 A değeri için kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

Şekil 22’de akma gerilmesi değerleri çok yakın bir uyum ile elde edilmiştir ve Şekil 23 incelendiğinde çift boşluk başlık 0 A akım değerinde katalog verileri ile iyi bir uyum sağlamıştır. Çift-boşluk başlık için akma gerilmesi değerleri her ne kadar paralel plaka kadar başarılı olmasa da katalog verilerinin uzağında değildir.



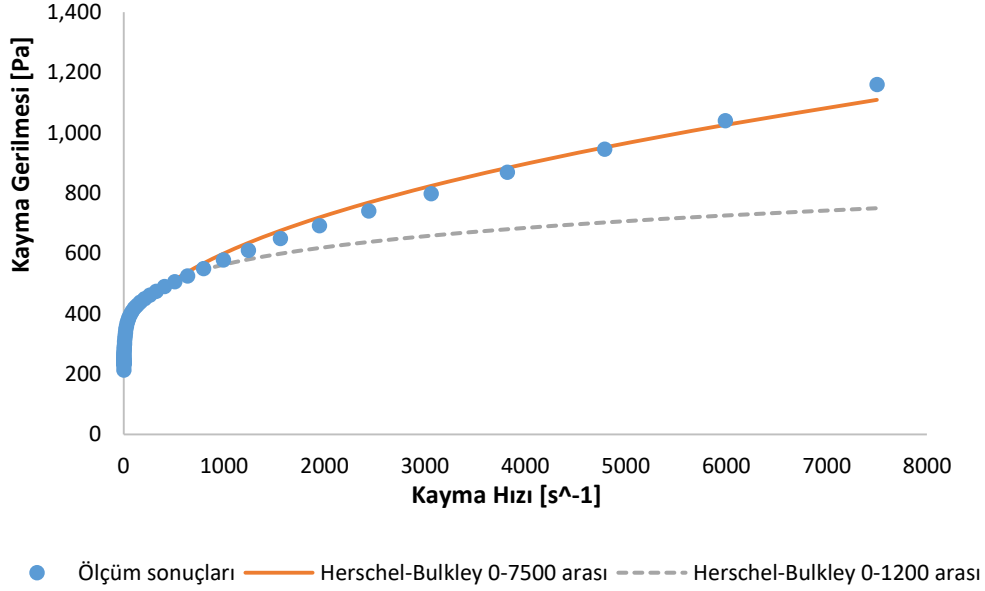
Şekil 22. MRF132DG sıvısı için paralel plaka, çift boşluk ile yapılan ölçümlerin manyetik akı-akma gerilmesi ilişkisinin matematiksel model ve katalog verileri ile karşılaştırılması



Şekil 23. MRF132DG sıvısı için paralel plaka, çift boşluk ile yapılan ölçümlerin kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisinin katalog verileri ile karşılaştırılması

Paralel plaka için, sonuçlara bakıldığında akma gerilmesi değerleri katalog verileri ile yakın olsa da 0 A akım altındaki duruma ait verilerle katalog verileri arasında ciddi bir fark olduğu görülmektedir.

Ölçümü yapılan MR sıvısının Kayma Gerilmesi-Kayma Hızı ilişkisi Herschel-Bulkley modeli ile uyumludur. Herschel-Bulkley modeli eğrisinin test verileri ile eğri uydurulması sonucu Kayma Gerilmesi-Kayma Hızı eğrisi çizilebilmiştir (Şekil 24).



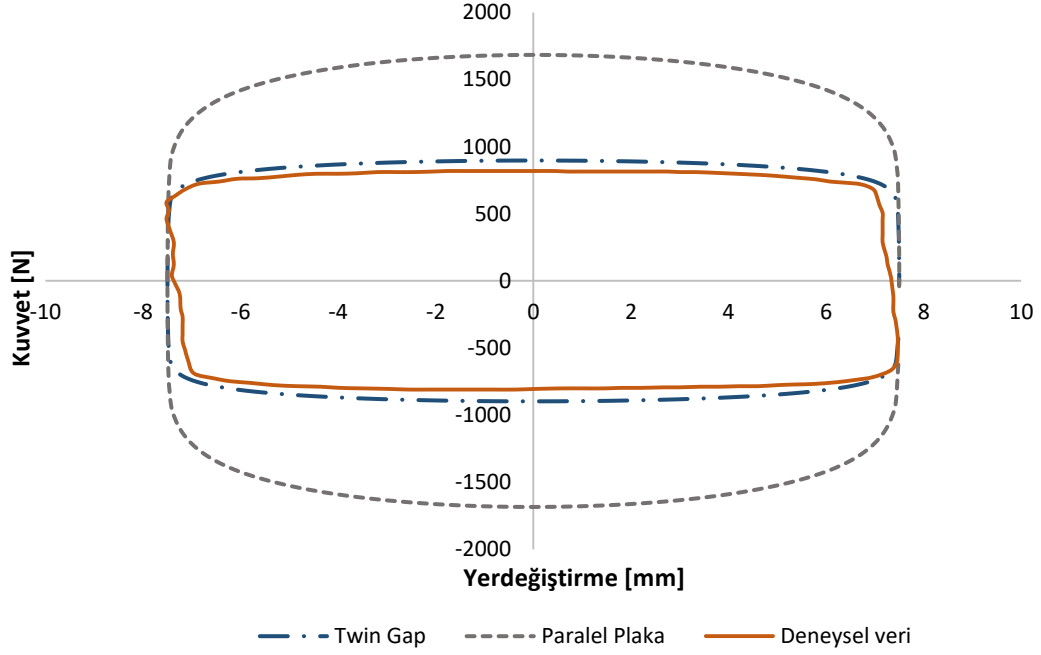
Şekil 24. Kısa ve uzun aralıklarda çift boşluk ile alınan Herschel-Bulkley eğrilerinin kıyaslanması

Aynı ölçüm sonuçları için, Herschel-Bulkley eğrisi; dikkate alınan veri aralığına göre ciddi oranda değişmektedir. Şekil 24'de $0 - 1200 s^{-1}$ ile $0 - 7500 s^{-1}$ aralığında alınan verilere göre uydurulan Herschel-Bulkley eğrisi kıyaslanmıştır. $1200 s^{-1}$ 'e kadar olan veriler kullanıldığında düşük kayma gerilmeleri için temsil kabiliyeti doğru olan bir Herschel-Bulkley eğrisi elde edilirken; aynı eğri, yüksek kayma hızları için başarısız olmaktadır. Özellikle MR damperin sayısal analizi esnasında kanal bölgesindeki kayma hızlarının $6000 - 7000 s^{-1}$ mertebelerine ulaştığı dikkate alınırsa bu hatanın HAD sonuçlarına etki edeceği daha net anlaşılmaktadır. Paralel plaka başlığı $1200 s^{-1}$ e kadar ölçüm yapabildiği için Herschel-Bulkley regresyon eğrileri bu bölgenin dışında doğru olmayan tahminlerde bulunmuş, interpolasyon yöntemi ise benzer şekilde matrisin dışında kalan bu bölgeler için son değer aralıklarından doğrusal ve hatalı bir tahmin yapmıştır. Bu hatanın düzeltilmesi için daha geniş aralıkta ölçüm yapabilen bir başlığa ihtiyaç vardır.

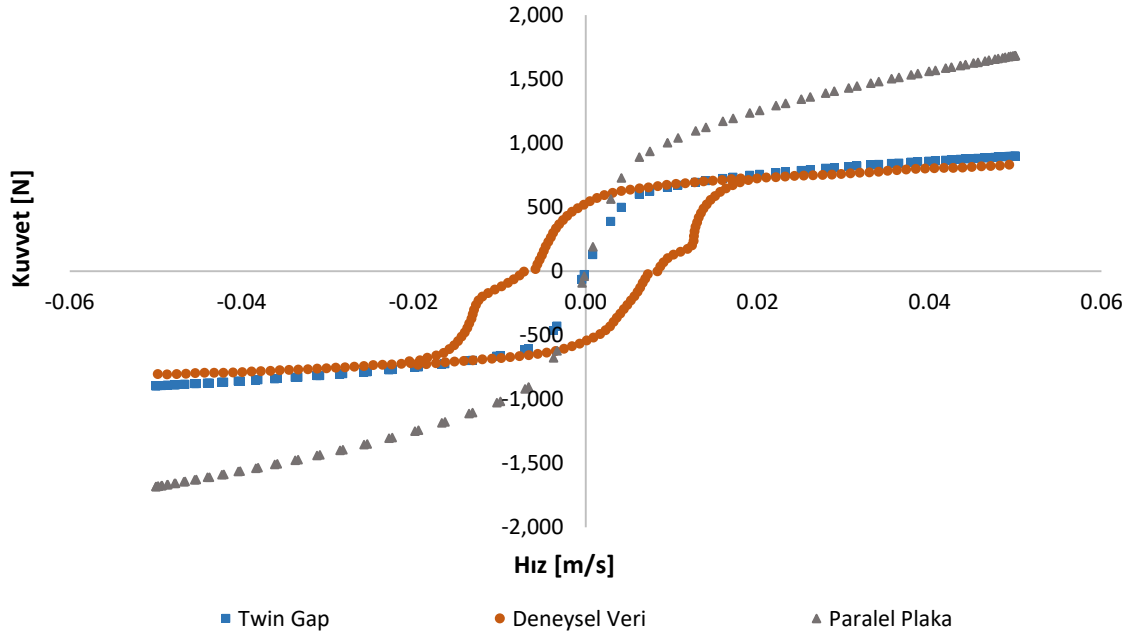
Ayrıca paralel plaka, ölçüm yapabildiği aralıkta bile üst sınıra yaklaştıkça numunenin kenarlarda savrulmasından dolayı daha yüksek kayma gerilmesi değerleri ölçmektedir. Paralel plaka ile elde edilen sonuçlar her ne kadar akma gerilmesini tahmin etmekte başarılı olsa da yüksek kayma hızlarında yanlış Herschel-Bulkley eğrileri elde edildiği için, bu başarılı tahmin

yeterli olmamaktadır. Bu hataların önlenmesi için çift-boşluk başlığı esas alınmış ve bundan sonra HAD modelinde kullanılan tüm ölçümler bu başlıkla yapılmıştır.

Paralel plaka ve çift boşluk ile yapılan ölçüm verileri aynı akışkan ve aynı HAD modeli ile kullanıldığında elde edilen sonuçlar ise Şekil 25 ve Şekil 26'da verilmiştir.



Şekil 25. Paralel plaka ve çift boşluk ölçümleri kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisinin deneysel veriler ile kıyaslanması



Şekil 26. Paralel plaka ve çift boşluk ölçümleri kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-hız ilişkisinin deneysel veriler ile kıyaslanması

Şekil 25 ve Şekil 26'da verilen analiz sonuçları çok açık bir şekilde göstermektedir ki çift boşluk ölçümleri paralel plakadan daha başarılıdır. Bunun en büyük sebebi daha önce de belirtildiği gibi yüksek kayma hızlarını modelleyebilmesidir.

3.4 MR Damperin Sayısal Modellenmesi

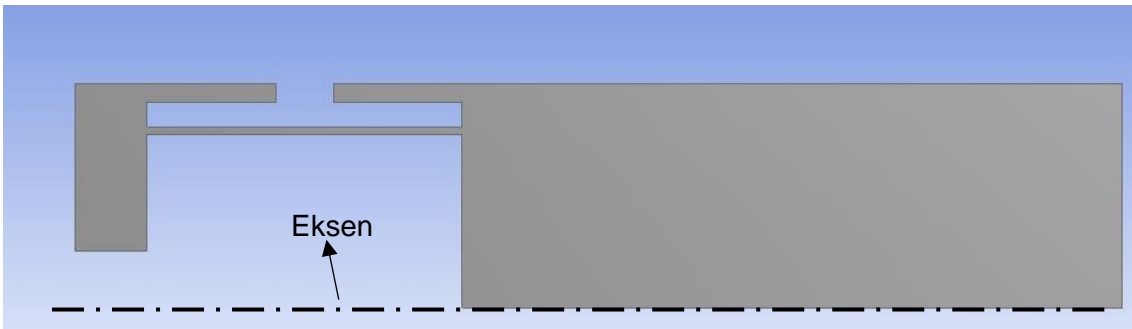
Proje kapsamında, binada meydana gelen deprem titreşimlerini sönmölemek için kullanılacak olan MR damperin öncelikle tasarlanması gerekmektedir. Bu tasarım gerçekleştirilirken; en yüksek kuvveti, en düşük akımla sağlayacak ve en geniş kuvvet aralıklarında çalışacak optimum bir MR damper tasarımı esas alınacaktır. Böyle bir tasarımı gerçekleştirmek için, istenen sonuçlara etkileri en fazla olan parametreler belirlenerek bir dizi optimizasyon çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Optimizasyon için belirli sayıda damperler imal ederek bunların test sonuçlarına göre çalışmak yerine, üretim zorluklarını ortadan kaldıran bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modeli geliştirmek ve bu modeli eldeki deneysel sonuçlar ile doğrulayarak yol almak daha pratik ve efektif bir yöntemdir. MR damperin içerisinde statik bir manyetik alan oluşması da sayısal analiz ile çözüme ulaşmayı kolaylaştırmaktadır. Akış analizleri için ANSYS yazılımının FLUENT aracı kullanılırken; manyetik alan analizleri için ANSYS yazılımının içerisindeki ANSYS Magnetostatic aracı kullanılmıştır.

3.4.1 HAD Modelinin Genel Tasarımı

HAD analizlerini gerçekleştirebilmek için öncelikle MR sıvının manyetik alan altındaki davranışını modelleyebilecek bir yaklaşım geliştirilmesi zorunludur. Çünkü manyetik alan altında MR sıvı Newton tipi olmayan bir karakter göstermektedir. Hatta manyetik alan altında bulunmasa bile MR sıvılar belirli ölçüde Newton tipi olmayan bir karakteristik arz ettiği için bu bölgelerde de benzer şekilde doğru bir modelleme yaklaşımı geliştirilmesi gereklidir. Bunu gerçekleştirebilmek için öncelikle proje kapsamında Lord firmasından temin edilen MRF132DG ve MRF122EG sıvılarının reometre analizleri yapılmıştır. Bu raporun 3.4.6 bölümünde gösterilen yöntemle kıyaslanabilmesi için, MRF132DG ile yapılan çalışmalar verilecektir. Diğer sıvılara ait ölçümlerde de aynı yöntemler kullanılmış fakat burada tekrardan verilmeye gerek duyulmamıştır.

MR damperin HAD modelinin oluşturulması için öncelikle proje ekibinin daha önceden tasarladığı (Parlak, 2010) 3 boyutlu modeller dikkate alınmıştır. Bu modellerde kullanılan 3 boyutlu geometri yerine, hesaplama süresini daha da kısaltmak ve ağ yapısının yapılandırılmış (structured) hale getirilebilmesini sağlamak amacıyla 2 boyutlu bir model kullanılmıştır. Bu sayede daha önce proje ekibi tarafından yapılmış olan deney verileri kullanılarak MR damperin HAD modelinin doğrulanması sağlanacaktır.

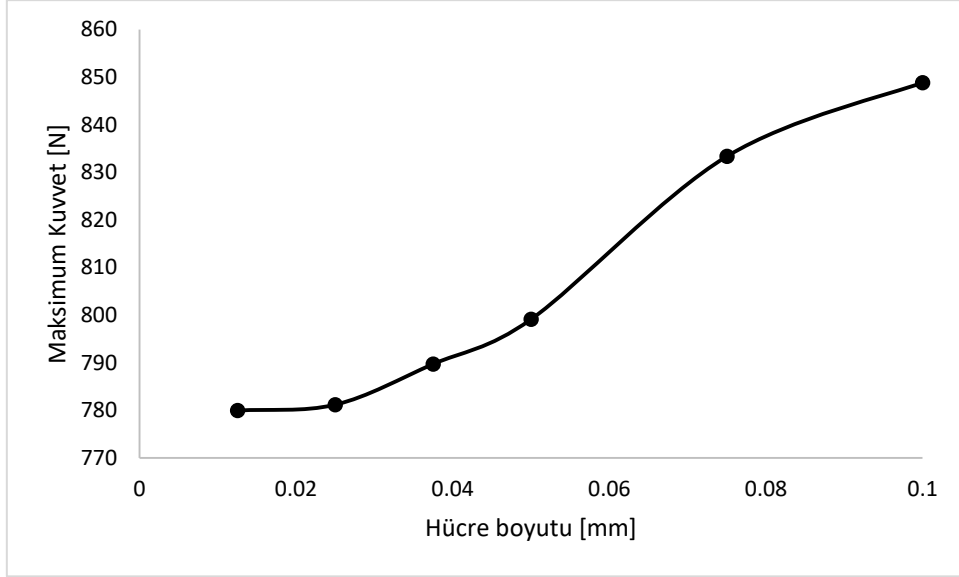
MR damper, 2 boyutlu (2B) modelin simetri eksenini etrafında döndürülmesiyle modellenmektedir. Bu tip çözümler sonlu elemanlar/sonlu hacimler yazılımlarında aksiyetrik (axisymmetric) model çözümü olarak tanımlanmaktadır. Şekil 27'de damperin aksiyetrik ve 2 boyutlu geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 27. 2B MR damper modeli ve simetri eksenini

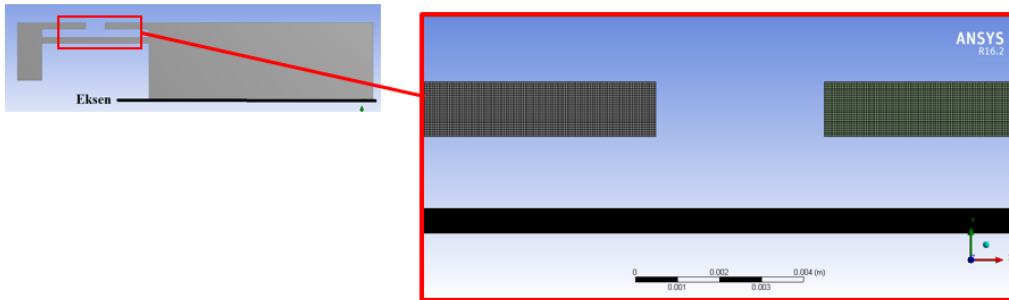
Geometrideki her bir hücre önce 0.1 mm olarak, kare şekilde yapılandırılmış ağ ile oluşturulmuştur. Şekil 28'de gösterildiği gibi daha sonra ağ bağımsızlığını yakalamak üzere hücre boyutları küçültülmüş ve en son olarak 0.0125 mm en ve boyu sahip hücrelerin kanal

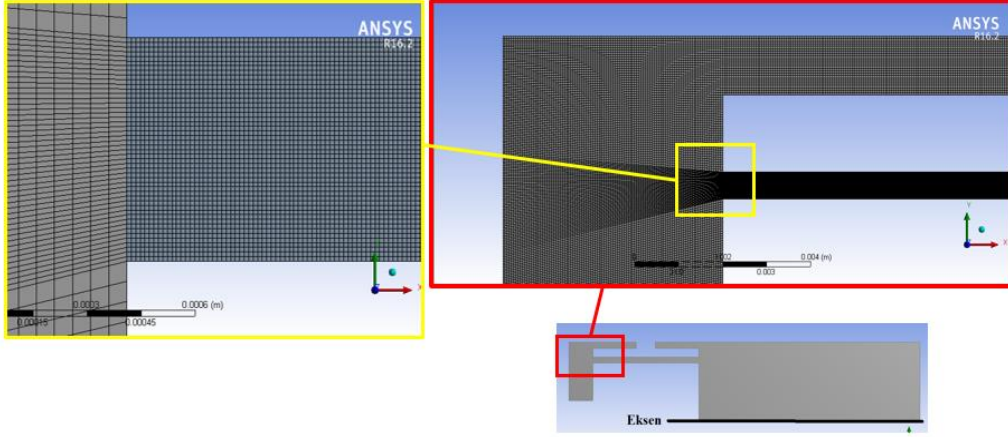
bölgesinde yoğunlaştırıldığı çözümde ağ bağımsızlığı elde edilmiştir. Bu model için akışın kanal dışındaki bölgelerindeki ağ büyüklüğü 0.05 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 28. Ağ bağımsızlığının elde edilmesi

Kullanılan sayısal ağ tipi dörtgen (quadrilateral) hücrelerden oluşmaktadır. Bu şekilde bir eleman kullanımı, diğer eleman tipleri arasında en doğru sonucu vermektedir. Akış bölgesinde toplam 434460 adet hücre ve 438152 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Akış bölgesinde çarpıklık (skewness) 10^{-4} ve orthogonal quality, 0.9995 ortalama değerindedir. Ağ bağımsızlığını yakalamak için kanal bölgesindeki ağların sayısında artırıma gidildiğinden ağ yapılarının en-boy oranlarında küçük farklılıklar ve sapmalar olabilmektedir. Yine de bu durum ağ yapısının dörtgen şeklini bozmamakta ve çarpıklık değerleri çok iyi bir değerde kalmaktadır. Şekil 29'da ağ yapısının genel görünümü geometrideki farklı bölgeler üzerinden gösterilmiştir.

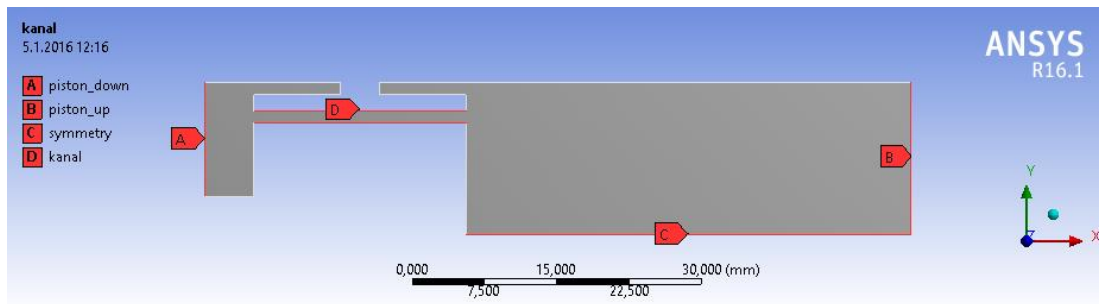




Şekil 29. HAD modelinin ağ yapısı

MR damperin ANSYS FLUENT yazılımındaki sınır şartları Şekil 30'da gösterilmiştir. Damperin piston kafasının hareketi, bağıl olarak A ve B sınırlarının hareketi ile modellenmiştir. Piston kafasının konumu ise sabit bırakılmıştır. Bu sayede manyetik alanın oluştuğu kanal bölgesi sabit kaldığı için modellemede önemli kolaylıklar sağlanmıştır. Damper geometrisi kapalı olduğu için akışkanın girdiği veya çıktığı bir sınır bulunmamaktadır. C çizgisi simetri, A ve B çizgileri hareket eden sınır, bunun dışında kalan tüm sınırlar ise sabit duvar olarak modellenmiştir. Çift milli model için simetri sınır şartı bulunmamaktadır.

A ve B sınırları testlerde gerçekleştirilen piston hızlarında hareket etmektedir. Şekil 30'da gösterilen MR damper sınırları sola doğru harekete başladığında, A piston hızında hareket ederken, akışkanın sıkıştırılmazlığı göz önüne alındığında damper içine giren piston mil hacmine karşılık gelen hacim kadar B sınırı hareket etmelidir. Aradaki bu hız farkı hacimlerin oranı ile hesaplanmış, A sınırının ve B sınırının hızları $V_B = V_A \cdot (R_B^2 - (R_B - R_A)^2) / R_B^2$ denklemiyle piston mili ve silindir kesitleri oranları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Çift milli modellerde ise iki sınır aynı hızda hareket ettiği için böyle bir denkleme ihtiyaç duyulmamaktadır.



Şekil 30. MR damper geometrisindeki sınır şartları

MR damperin modellenmesi için sınır hareketleri değerleri Tablo 7’de verilmiştir. Bu sınır hareketleri ANSYS FLUENT’e C dilinde yazılmış bir kullanıcı tanımlı fonksiyon (UDF) olarak edilmiştir. Her bir analizde bir çevrim gerçekleşecek kadar süre tanımlanarak zaman adımlı bir model geliştirilmiştir. Zaman adımlı model sayesinde deneysel verilerle kıyaslama yapılabilecek kuvvet-hız ve kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri HAD analizlerinden elde edilebilmiştir. Tablo 7’de belirtildiği gibi başlangıç noktası pozitif eksende 0.0075 m olarak belirlenmiş ve hareket sol tarafa doğru olduğu için hızın negatif büyüklüğü ile hareket başlamıştır. Verilen strok ve hız büyüklükleri proje ekibinin daha önceden yaptığı çalışmalarda testler referans alınarak belirlenmiştir (Parlak, 2010). Bu sayede modelin deneysel veriler ile doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7. Damper pistonuna ait hareket tanımları

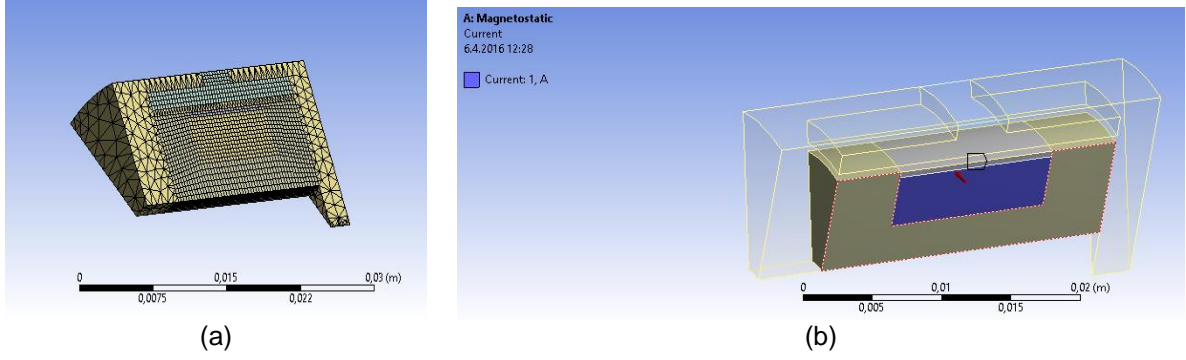
Konum (m)	$0.0075 \cos(\omega t)$
Hız (m/s)	$-0.05 \sin(\omega t)$
ω (rad/s)	6.667
Zaman adımı (s)	0.001
Toplam süre (s) ($2\pi/\omega$)	0.942

3.4.2 MR Damperdeki Manyetik Alanın Modellenmesi

MR akışkanlar, manyetik alan altında farklı reolojik özellikler göstermektedir. Bu manyetik alanlar altındaki davranışının incelenmesi gerekmektedir. Daha önce proje ekibi tarafından yapılmış çalışmalar ve deneyler dikkate alınarak damper modeli için Lord firmasının üretimi olan MRF132DG isimli bir MR akışkan kullanılmıştır.

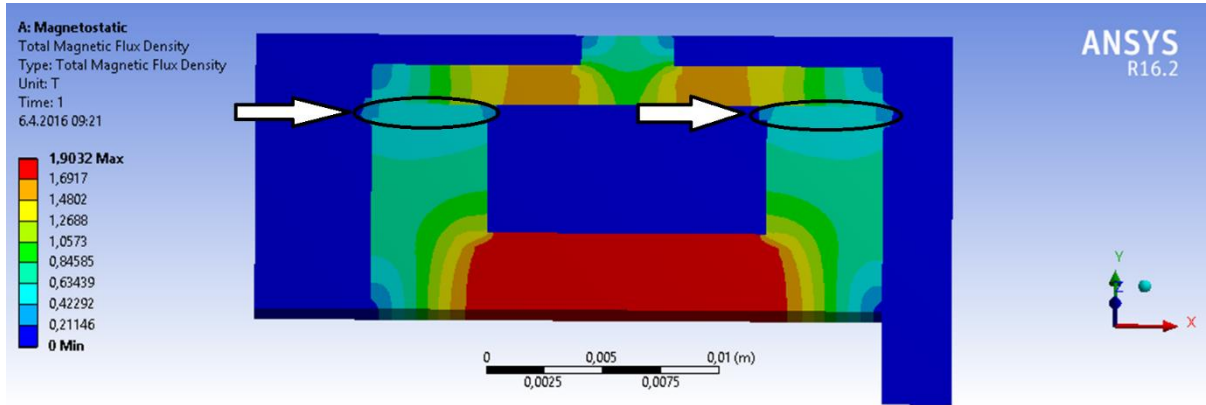
MR damperin içerisindeki manyetik akı yoğunluğunun bulunabilmesi için ANSYS Magnetostatic aracı kullanılarak bir sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Bunun için üç boyutlu bir geometri kullanılmıştır. Akım değeri daha önce yapılmış deneylerle kıyaslanabilmesi için 1 A belirlenmiştir. Şekil 31(a)’da manyetik alan analizinde kullanılan ağ yapısı görülmektedir. Damperin içerisindeki manyetik alanı oluşturan bobin, Şekil 31(b)’de mavi renk ile gösterilmiştir. Bobin üzerindeki sarım sayısı 220’dir. Hesaplama süresini kısaltmak için 25 derecelik bir dilimin analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizin sonuçları aksel simetrik olduğu için bir yüzey üzerindeki sonuçlar yeterli olmaktadır.

MR damper performansını belirleyen temel parametreler akışın içerisinden geçtiği kanalın genişliği ve aktif bölge uzunluğu olup, amacımız MR damperin bu kesitinde manyetik akı değerini en üst değerde elde etmektir.



Şekil 31. MR damperin manyetik alanı için (a) sonlu elemanlar çözüm ağı (b) akımın geçtiği geometri

Manyetik alan kanal boyunca sadece manyetik alanın dönüş yaptığı ve aktif uzunluk olarak adlandırılan Şekil 32’de gösterilen bölgede meydana gelmektedir. Manyetik alanın oluştuğu bir noktadaki manyetik akı yoğunluğu değeri belirlenmiş ve bu değer tüm aktif uzunluk için sabit manyetik akı yoğunluğunu değeri olarak kabul edilmiştir. Şekil 32’de kanal bölgesinde manyetik akı değerleri yaklaşık 0.563 T büyüklüğünde okunmuştur.



Şekil 32. MR damperin manyetik akı yoğunluğunun sonlu elemanlar ile elde edilmesi (Manyetik akının akışkan içerisinden geçtiği bölgeler ok ile gösterilmiştir)

3.4.3 Manyetik Alan Sonuçlarının HAD Modeline Uniform Olarak Adapte Edilmesi

Manyetik akı yoğunluğunda meydana gelen değişim sonunda normalde Newton tipine yakın akışkan özellikleri gösteren MR sıvı, Newton tipi olmayan davranış göstermeye başlamaktadır. Manyetik akı yoğunluğu, Newton tipi olmayan MR sıvıda akma gerilmesi (τ_0) değerini doğrudan değiştirmektedir.

Newton tipi olmayan bir akış modeli olan Herschel-Bulkley akışkanı için viskozite şu şekilde tanımlanmaktadır (ANSYS Documentation, 2016);

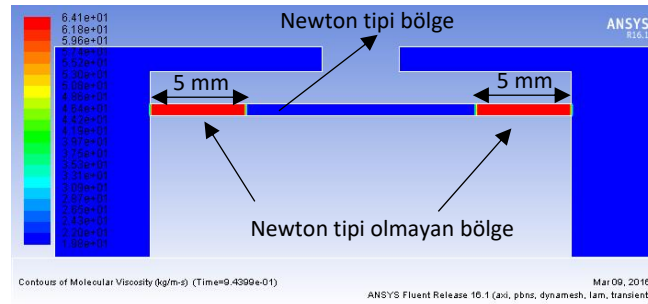
$$\begin{cases} \mu = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)^{n-1} & |\dot{\gamma}| \geq \dot{\gamma}_c \\ \mu = \tau_0 \frac{\left(2 - \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)}{\dot{\gamma}_c} + k \left[(2 - n) + (n - 1) \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right] & |\dot{\gamma}| \leq \dot{\gamma}_c \end{cases}$$

μ etkin viskoziteyi, $\dot{\gamma}$ deformasyon hızını, $\dot{\gamma}_c$ kritik deformasyon hızını, τ_0 akma gerilmesini temsil etmektedir. k ve n değerleri sırasıyla kıvam faktörü (consistency factor) ve akış indeksidir. Akışkanın, manyetik alan ile etkileşimini tanımlamada τ_0 , $\dot{\gamma}_c$, k ve n olmak üzere dört büyüklük kullanılmıştır. Bu büyüklükler farklı manyetik akı yoğunluğu için farklı sonuçlar vermektedir. Manyetik alan analizinden elde edilen 0.563T değerine karşılık gelen akma gerilmesi Bölüm 3.4.4'de verilen denklem ile 32000 Pa olarak hesaplanmıştır. Bu değer akışkanın manyetik akıya maruz kaldığı Newton tipi olmayan bölgedeki Herschel-Bulkley modelinde yerine konulmuştur. (Şekil 33). MRF132DG için bu manyetik alan büyüklüğündeki değerler Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8. MRF132DG sıvısının 0.563 T için reolojik özellikleri

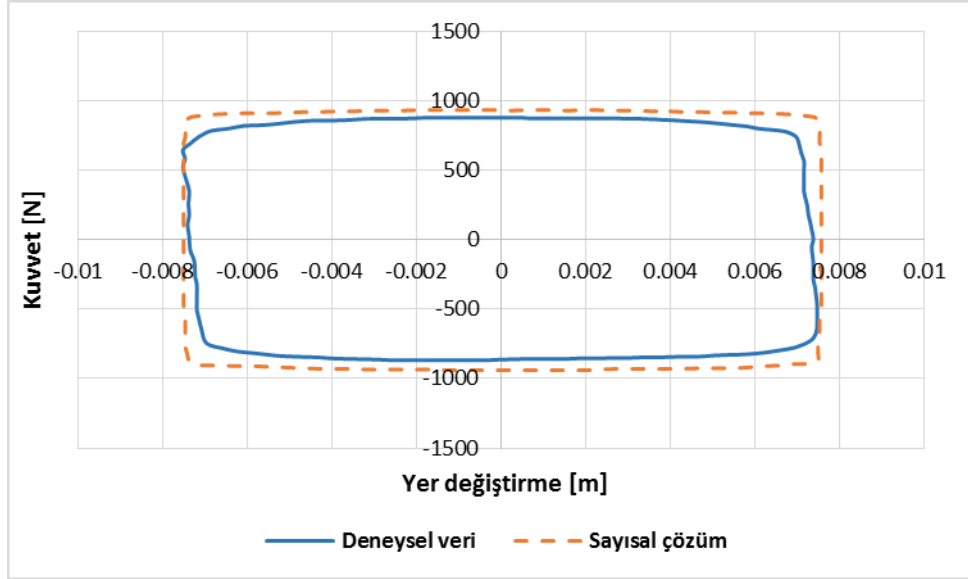
Yoğunluk	3090 kg/m ³
Viskozite modeli	Herschel – Bulkley Modeli
k	0.092 Pa.s
n	1
τ_0	32000 Pa
$\dot{\gamma}_c$	900 s ⁻¹

Tablo 8'de verilen n değerinin 1 olması durumunda akışkan Bingham akışkanı gibi davranmaktadır. Aktif bölgeler manyetik akıdan etkilenmiş ve üzerindeki manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak Newton tipi olmayan bir viskoziteye sahip iken, hesaplama bölgesinin kalan bütün kısımları Newton tipi olup Tablo 8'de verilen sabit viskoziteye sahiptir. Bunu HAD'da modellemek için Şekil 33'de gösterildiği gibi akış bölgesi iki farklı bölgeye ayrılmıştır.



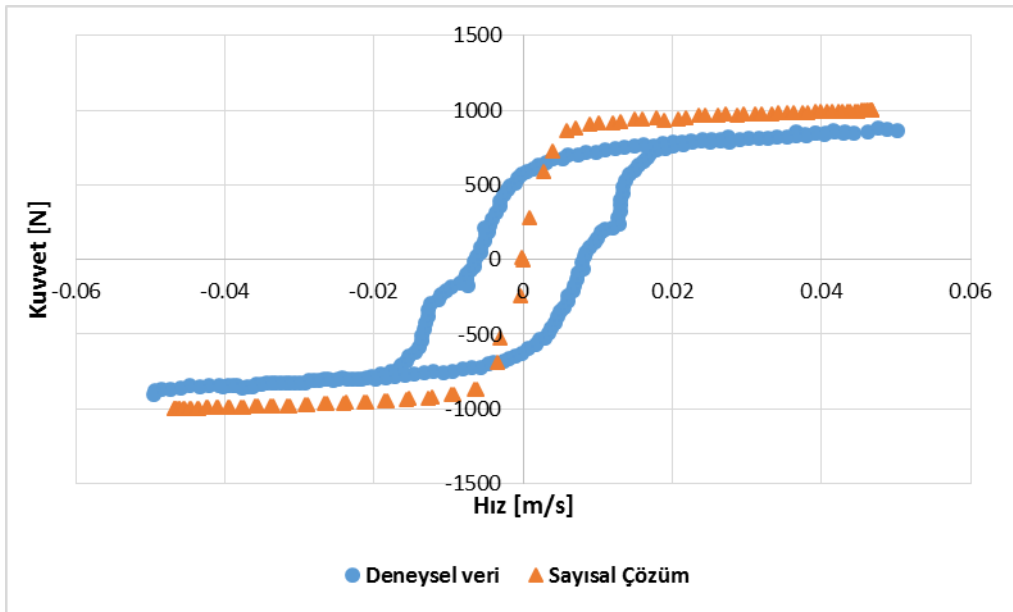
Şekil 33. MR damperin reolojik modelindeki viskozite bölgeleri

Tablo 6’da tanımlanmış HAD modeli için zaman adımlı çözüme ait kuvvet – yer değiştirme sonuçları Şekil 34’deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 34. MR damperin sayısal ve deneysel olarak elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

Burada manyetik akı yoğunluğunun tüm aktif uzunluk boyunca sabit alındığı da göz önüne alındığında Şekil 34’deki deneysel veriler ve sayısal çözüm arasında kabul edilebilir bir yakınlık olduğu görülmüştür.



Şekil 35. MR damperin sayısal ve deneysel olarak elde edilen kuvvet-hız eğrilerinin karşılaştırılması

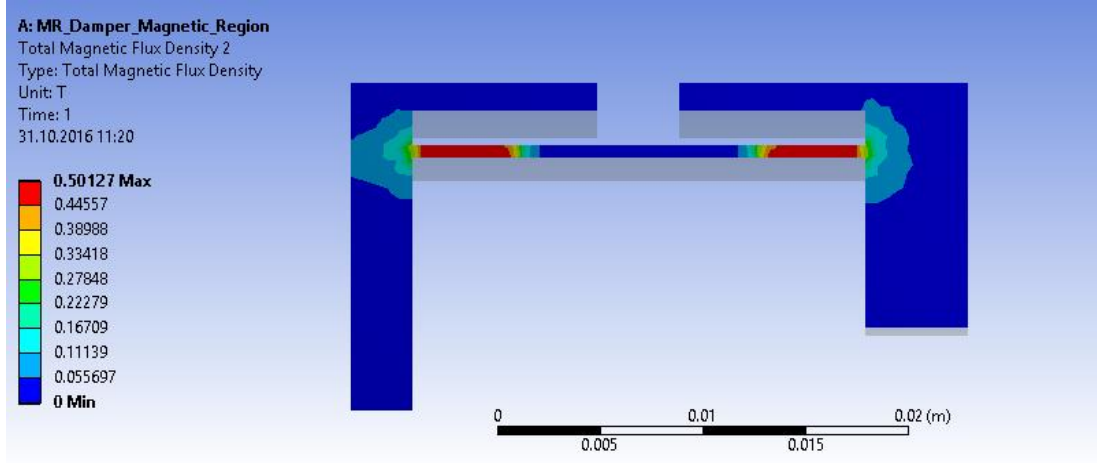
Benzer şekilde Şekil 35'deki kuvvet-hız arasındaki ilişkiye bakıldığında histerisiz davranışı dışında deneysel verilere yakın sayılabilecek sonuçların elde edildiği görülmektedir. Bu model, daha sonraki eşlenik çözümler için bir temel teşkil ettiğinden dolayı verilerin deneysel veriler ile uyumlu olması önem arz etmektedir ve araştırma için doğru bir yolda gidildiğini göstermektedir.

3.4.4 Manyetik Alan Sonuçlarının HAD Modeline Eşlenik Olarak Adapte Edilmesi

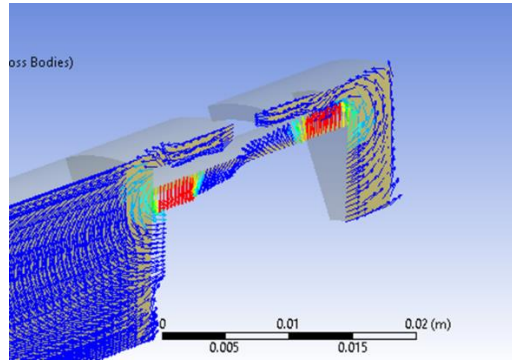
Proje önerisindeki hedeflerden birisi, yukarıda bahsi geçen modelden daha gelişmiş bir model olarak, manyetik alanın MR damper geometrisi ile eşlenik hale getirilerek her bir hücre için manyetik akı yoğunluğu değerlerinin viskozite üzerindeki etkisinin modellenbilmesidir. Bu sayede manyetik bölgede ortalamaya veya yaklaşık değerlere dayanan sabit reolojik özellikleri kullanmak yerine akış bölgesinin her noktası için var olan manyetik akı yoğunluğunun etkileri hücre hücre modellenmiş olacaktır.

Böyle bir çözümün gerçekleştirilmesi için akış bölgesinin ağ yapısı ile manyetik akı verilerinin elde edildiği analize ait geometrik yapının örtüşmesi gerekmektedir. Bu sayede manyetik akı verileri FLUENT yazılımında doğru pozisyonlarda temsil edilebilmektedir. Verilerin aktarılabilmesi için FLUENT yazılımına manyetik alana ait hücre verilerinin doğru bir şekilde okutulması gerekmektedir.

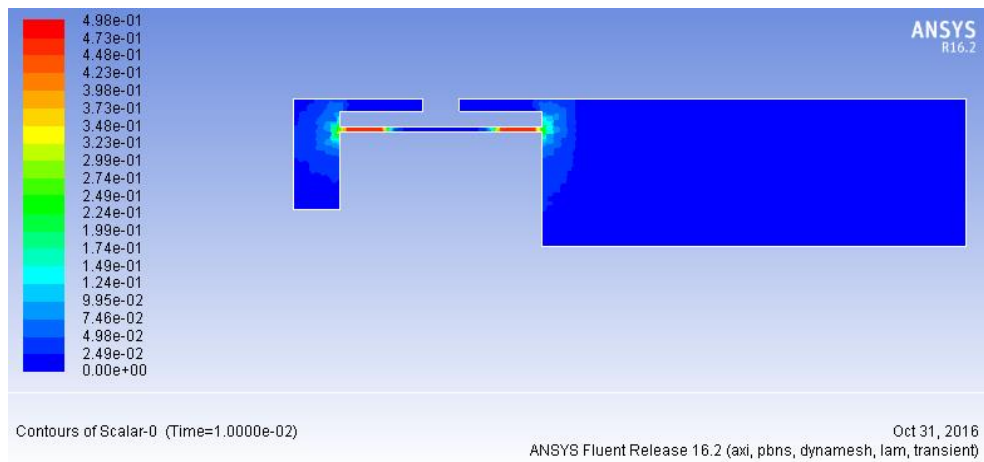
ANSYS Magnetostatic yazılımdaki geometri 3 boyutlu, FLUENT yazılımındaki ise iki boyutlu olmasına rağmen iki model tek bir düzlem üzerinde birbiri ile aynı boyutlara sahiptir. Üç boyutlu geometrideki veriler aksenel simetrik olduğu için bu geometrideki bir yüzeye ait verilerin iki boyutlu akış bölgesine aktarılması ile iki model arasında geçiş yapılabilmektedir. Magnetostatic yazılımı ile elde edilen verilerin FLUENT'e aktarılmadan önceki hali Şekil 36'da görülmektedir. Bunu sağlamak için Magnetostatic yazılımında akış bölgesine ait manyetik akı yoğunluğu FLUENT'e bir PROFILE dosyası aracılığı ile aktarılmıştır. Manyetik akı vektörleri Şekil 37'de ve verilerin FLUENT'e aktarıldıktan sonraki hali Şekil 38'de gösterilmektedir.



Şekil 36. Manyetik akı yoğunluğunun 2B akış yüzeyi üzerindeki görünümü



Şekil 37. Manyetik akı vektörlerinin MR sıvı üzerindeki görünümü



Şekil 38. Verilerin FLUENT yazılımına aktarılmış hali

Modelin en büyük avantajlarından bir tanesinin, piston bölgesinin hareketinin bağıl hareket olarak ve sınırların hareket etmesi şeklinde modellenmiş olması olduğu daha önce ifade edilmişti. Bu avantaj, manyetik alanın FLUENT'e aktarılmasında daha net olarak

görülmektedir. Manyetik akı, piston başı etrafında sabit bir değerde kalmaktadır. Bağlı hareket yapan piston başı bölgesi hareketli bir kontrol hacmi olarak düşünüldüğünden ve modelin hareketi de bu kontrol hacmine göre, sınırların hareketi ile oluşturulduğundan manyetik akı bölgesinin hareketi sabit kalmaktadır. Böylece herhangi bir ilave hareket denkleminde ihtiyaç kalmadan manyetik akı yoğunlukları FLUENT modeline aktarılabilmektedir. Eğer sınırların hareketi yerine piston başının hareketi modellenmiş olsaydı tüm manyetik verilerin her bir zaman adımı için yeni bir konumda tanımlanması gerekecekti.

Eşlenik çözüm için aktarılan manyetik alan verilerinin her bir hücredeki etkin viskoziteyi bulmak için kullanılması gerekmektedir. Bir önceki üniform çözüm için kullanılan yöntem bu kez her bir hücre için kullanılarak çözüm elde edilmiştir. İlgili manyetik akı yoğunluğuna karşılık gelen akma gerilmesinin bulunabilmesi için literatürde mevcut bulunan aşağıdaki formül kullanılmıştır (Susan-Resiga, 2009).

$$\tau_0 = 51.962 B^4 - 176.51 B^3 + 158.79 B^2 + 13.708 B + 0.1442$$

Bu denkleme göre akma gerilmesi elde edildikten sonra, bu değer Herschel-Bulkley modelinde kullanılmıştır. Oluşturulan reolojik model, bir önceki akış modeli ile benzer olmakla beraber bu kez akma gerilmesi manyetik akı yoğunluğu tarafından her bir hücre için belirlenmektedir. Bunun gerçekleşmesi için her bir hücrede etkin viskozitenin yeniden hesaplamasını sağlamak gerekmektedir. Bunun için FLUENT yazılımına bir kullanıcı tanımlı kod (UDF), C dilinde tanımlanmıştır. Herschel-Bulkley modeli için tüm sabitler Tablo 6'da verilen değerlerde kullanılmıştır.

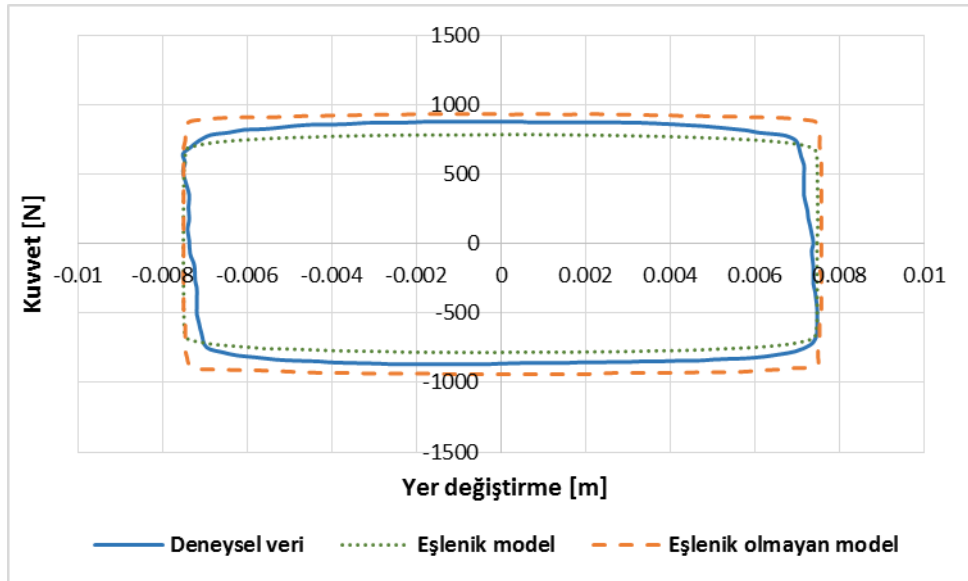
Modelin uygulanması için C dilinde yazılan aşağıdaki kod FLUENT yazılımına entegre edilmiştir.

```

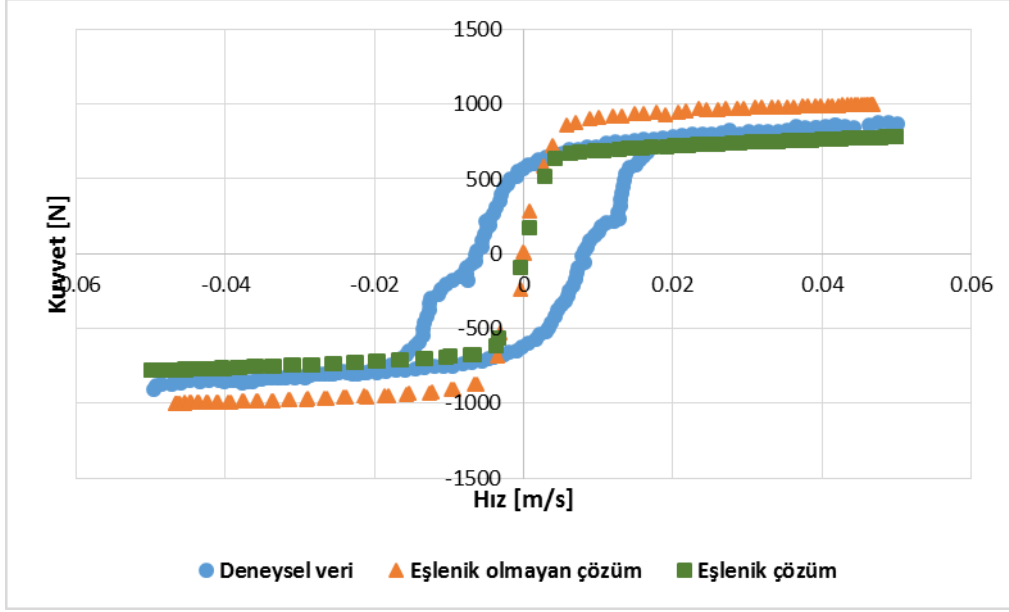
/*****
Bu UDF viskozitenin manyetik alan, sıcaklık ve kayma oranı
ile değişimini veren bir koddur.
This UDF is a code which can manipulate the viscosity as a function of
temperature, magnetic field density and shear rate
Written by Muaz KEMERLİ
*****/
#include"udf.h"
DEFINE_PROPERTY(c_herschel_bulkley_model, 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;
}

```

Modelin uygulanması sonucunda Şekil 39 ve Şekil 40'daki değerler elde edilmiştir.



Şekil 39. Eşlenik modelin kuvvet-yer değiştirme grafiğinin eski model ve deneysel veriler ile kıyaslanması



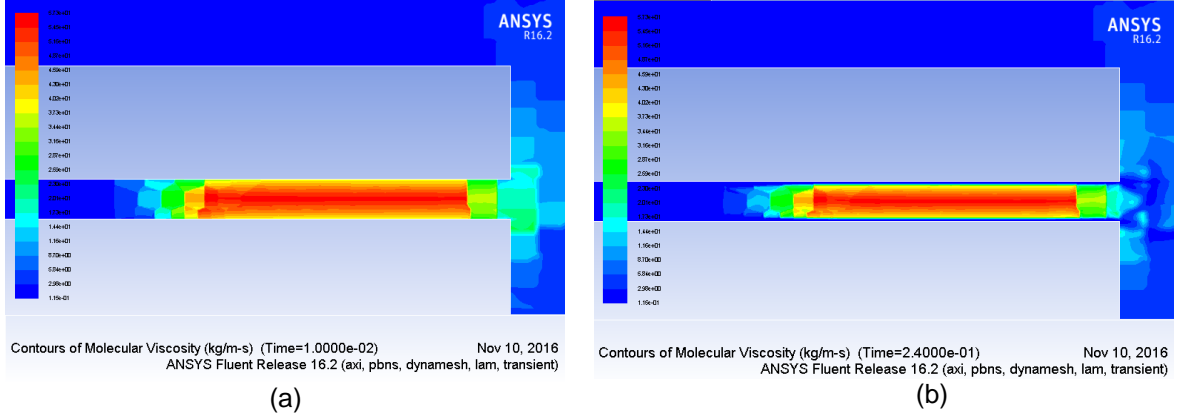
Şekil 40. Eşlenik modelin kuvvet-hız grafiğinin eski model ve deney verileri ile kıyaslanması

Değerlere bakıldığında maksimum hız anında kuvvet değeri 782.62 N elde edilerek deney sonuçlarına %9.8 hata ile yaklaşılmıştır.

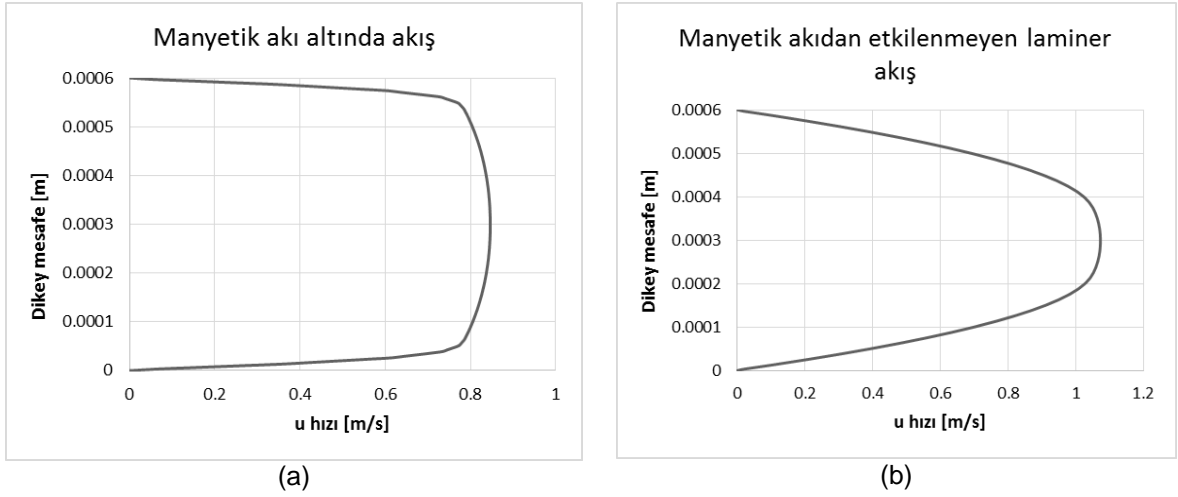
Pistonun alt ve üst ölü noktalarında yön değiştirme anında HAD analizinin kuvvet değerindeki değişimin daha hızlı olduğu görülmektedir. Oysaki deneyde, bu değişim daha yavaş bir şekilde meydana gelmektedir. Bu durum histerezis davranışın HAD modeli ile modellenememesinden kaynaklanmaktadır. Fakat maksimum kuvvetlere baktığımızda elde edilen uyumlu sonuçlar, damperin modellenmesi için yeterli öngörüü tasarımcıya verebilmektedir.

Hız-kuvvet eğrilerine bakıldığında ise eşlenik çözümün maksimum hızın altındaki hızlarda eşlenik olmayan çözüme göre deneysel verilere daha yakın olduğu görülmektedir. Bu durum eşlenik çözümün sadece maksimum hızlarda değil, histerisiz davranış bölgesi haricindeki tüm çalışma hızı bölgelerinde başarılı olduğunu göstermektedir.

Şekil 41'deki viskozite konturlarına bakıldığında; akışkanın etkin viskozitesinin manyetik bölgedeki artışı net olarak görülmektedir. MR sıvı Newton tipi olmayan akışkan özellikleri gösterdiği için etkin viskozite değerleri, akışa dik yöndeki hız değişimine bağlı olarak da değişmektedir. Düşük hızlarda akışkan viskozitesi daha büyük değerlerde iken, akışkan hızı arttıkça deformasyon hızı çeper kenarlarında artarak bu bölgedeki etkin viskozite düşmektedir.



Şekil 41. Etkin viskozitenin kanal girişindeki konturları (a) minimum hız için (b) maksimum hız için



Şekil 42. Akışkanın kanal kesit profili (a) Manyetik akıya maruz (b) Manyetik akıya maruz değil

Şekil 42'deki kanal içerisinde akış profilleri incelendiğinde manyetik akının etkin olmadığı bölgede akışkanın parabolik laminar akış formuna ulaştığı görülmektedir. Manyetik akının olduğu bölgede ise akışkanın orta bölgesindeki deformasyon oranının küçük olması nedeniyle bir katı cisim gibi davranmaktadır. Bu durum literatürde "plug flow" olarak isimlendirilmekte ve merkezdeki rijit bölge 'çekirdek bölgesi' olarak adlandırılmaktadır. Laminar akışta maksimum hız 1 m/s'nin üzerinde iken manyetik akı bölgesinde maksimum hız 0.8 m/s değerine doğru azalmaktadır.

3.4.5 Eşlenik Modelin Reometre Ölçümleri İle Eşleştirilmesi

Yukarıda anlatılan HAD yaklaşımlarının tamamı ölçüm yapmadan ve belirli yaklaşımlar ile literatürdeki MR sıvı verilerinin kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Modelleri daha başarılı bir hale getirmek ve üretilebilecek tüm sıvılar için modeli kullanılabilir hale getirmek için reometre verileri ile HAD modeli arasında bir ilişki tesis etmek zorunludur. Ayrıca yukarıda bahsi geçen,

Bingham akışkanı yerine, n katsayısının 1 dışında değerler alabildiği Herschel-Bulkley modelini sağlayacak bir yaklaşım geliştirilerek yukarıdaki modeller bir adım daha öteye taşınmak istenmektedir. Bunun için Bölüm 3.3'de detayları verilen MRF132DG akışkanına ait reometre analizleri gerçekleştirilmiştir.

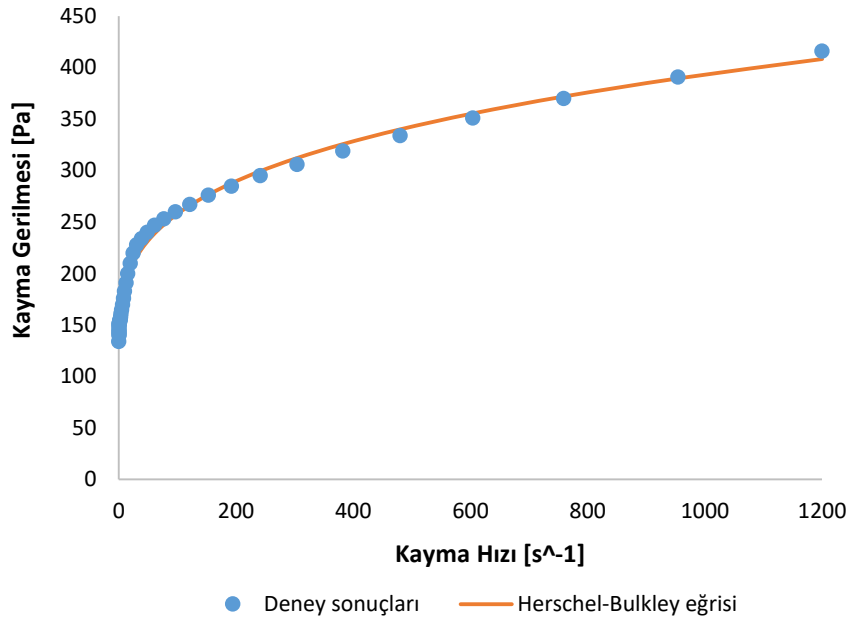
3.4.6 Reolojik Verilerin Regresyon Yöntemi İle Aktarılması

Daha önceki modellemelerde de kullanılan Herschel-Bulkley denklemi akışkanın reolojik özelliklerini kayma gerilmesi ve kayma hızı ekseninde belirleyen özel bir denklemdir. Denklem en genel yapısı aşağıdaki şekildedir;

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

Burada μ akışkanın viskozitesini, τ_0 akışkanın akma gerilmesini, $\dot{\gamma}$ kayma hızını temsil etmektedir. k ve n sırasıyla uyum faktörü ve akış indeksidir.

Şekil 43'de 0.1 A akım değerinde MRF132DG akışkanı için paralel plaka ile yapılmış deney sonuçlarına uydurulmuş Herschel-Bulkley eğrisi gösterilmiştir. Yapılan regresyon sonucunda k , n ve τ_0 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 43. Bir kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisi ölçüm verilerine Herschel-Bulkley eğrisi uydurulması

Fakat akışkana ait kayma gerilmesine karşılık gelen kayma hızı değerleri her sıcaklık ve manyetik akı değeri için farklı bir veri seti vermektedir. Diğer bir deyişle tüm katsayılar farklı

akımlar altındaki manyetik akı yoğunluklarında farklı bir değerdedir. Dolayısıyla her sıcaklık ve manyetik akı değeri için farklı k , n ve τ_o katsayıları oluşturulmalıdır. Bu katsayılar için $\tau_o = f(B, T)$, $k = f(B, T)$ ve $n = f(B, T)$ olmak üzere ilişkiler kurulabilir. Bu durumda ana denklem;

$$\mu = \frac{\tau_o(B, T)}{\dot{\gamma}} + k(B, T)\dot{\gamma}^{(n(B, T)-1)}$$

şeklinde ifade edilir. Bu ilişkiyi ifade edebilmenin en kolay yolu her bir katsayı için manyetik akıya bağlı regresyon eğrileri veya manyetik akı ve sıcaklığa bağlı regresyon yüzeyleri oluşturmak olduğu açıktır. Bu nedenle ilk olarak katsayıların bu iki değişkene göre değişiminin elde edileceği regresyon yüzeyleri ve daha sonra sabit sıcaklık için katsayıların, manyetik akıya göre değişimini veren regresyon eğrileri elde edilmeye çalışılmıştır.

3.4.6.1 Sıcaklık Değişkeni İle Regresyon Yüzeyi Oluşturulması

Tüm sıcaklık aralıklarında ve belirli akım değerleri altında MR sıvısının reolojik özelliklerinin belirlenmesi adına paralel plaka ile reometre ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C ve 70°C olmak üzere 6 farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Bu 6 farklı sıcaklığın her birisi için 0-5 A aralığında 23 adet ölçüm yapılmak üzere toplam 138 ölçüm yapılmıştır. Dolayısıyla 138 tane farklı Herschel-Bulkley eğrisi elde edilmiştir. Herschel-Bulkley eğrilerine ait elde edilen katsayıların bir kısmı Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9. Farklı sıcaklıklarda elde edilen Herschel-Bulkley eğri katsayılarının küçük bir örneği

T [°C]	τ_o [Pa]	k	n	B [T]
70	63.318	13.597	0.36117	0
70	35.425	165.67	0.2562	0.0256
60	134.5	218.92	0.30104	0.0382
60	492.31	183.83	0.37391	0.0516
50	4459.4	35.905	0.72977	0.129
50	6670	24.577	0.79216	0.156

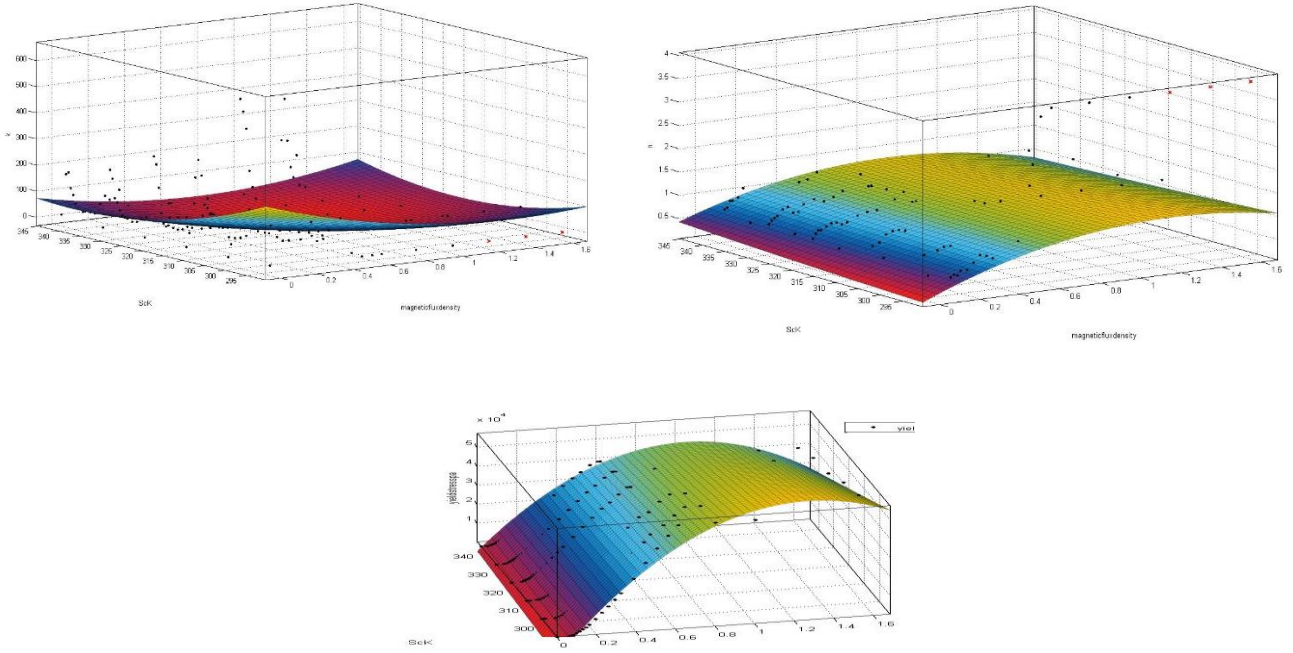
MATLAB yazılımı kullanılarak bu katsayılar, sıcaklık ve manyetik akı düzleminde yüzeyler uydurulmuştur. Yüzeyler ikinci derece polinomlar olarak belirlenmiştir. Yüzeylere ait genel denklem aşağıdaki gibidir;

$$Değişken(B, T) = p00 + p10 * B + p01 * T + p20 * B^2 + p11 * B * T + p02 * T^2$$

Katsayılar Tablo 10'da ve eğri yüzeyleri Şekil 44'de verilmiştir.

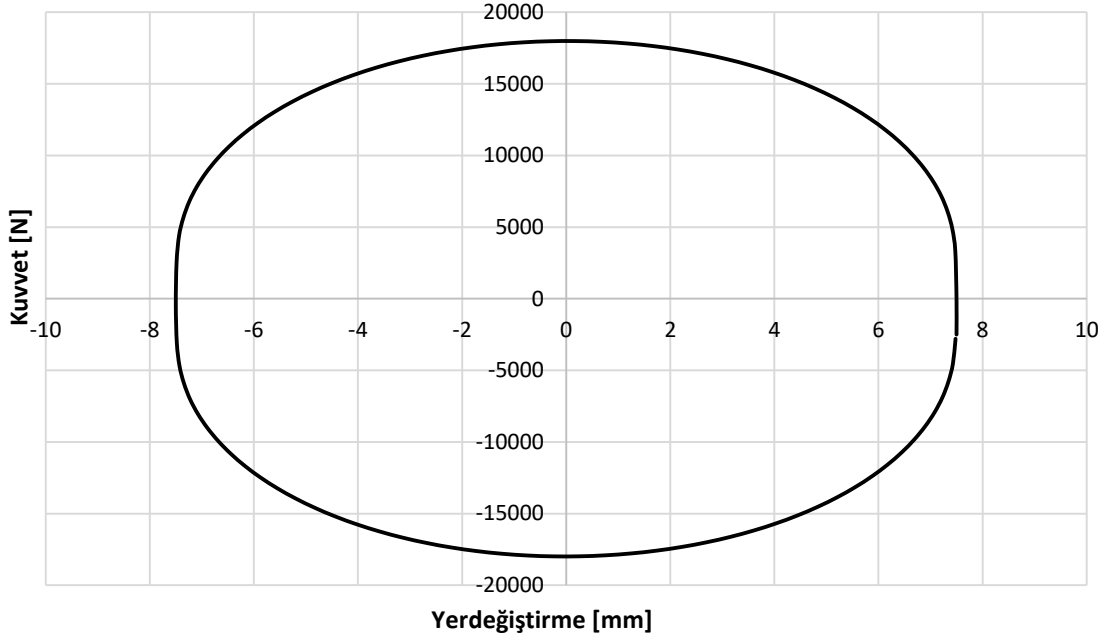
Tablo 10. Herschel-Bulkley eğri katsayıları için uydurulan yüzeye ait polinom katsayıları

	$p00$	$p10$	$p01$	$p20$	$p11$	$p02$	R^2
$\tau_o(B, T)$	-2.523e+04	2.256e+05	7.252	-4.541e+04	-377.8	0.1507	0.9618
$k(B, T)$	9948	-668.2	-59	86.91	1.532	0.08794	0.9008
$n(B, T)$	1.356	3.296	-0.01028	-0.7566	-0.00541	2.297e-05	0.8916

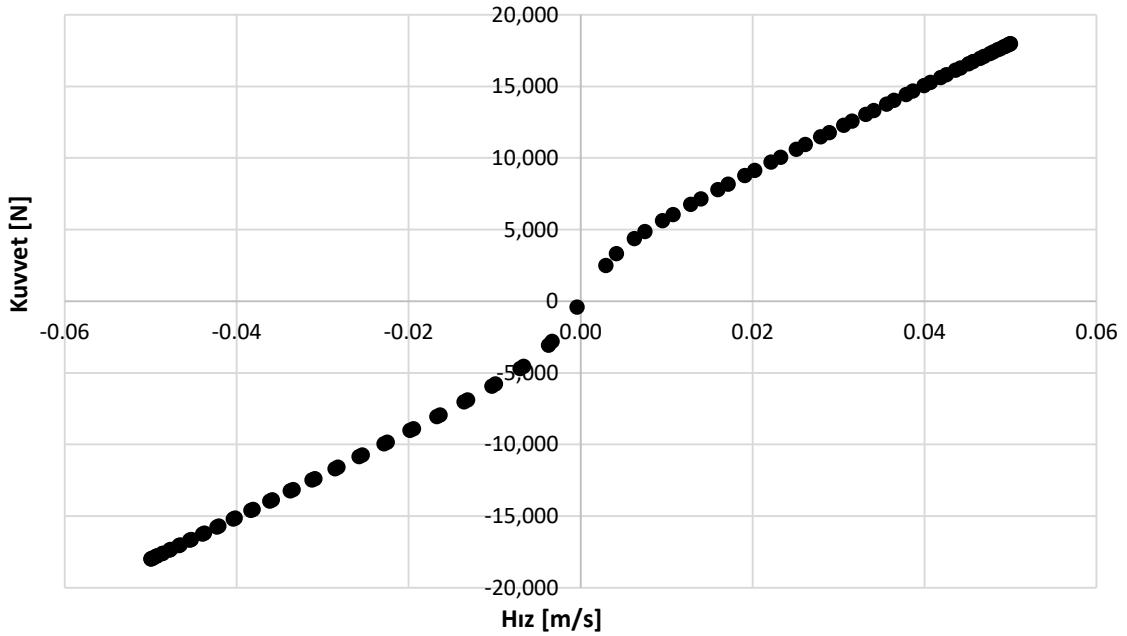


Şekil 44. Herschel-Bulkley katsayıları için regresyon yüzeyleri

Elde edilen yüzeyler için korelasyon katsayısı olan R^2 değerleri 0.9'un üzerindedir. Sadece n katsayısı bu değerlerin biraz altında kalmaktadır. Elde edilen bu eğriler yazılan UDF kodu ile FLUENT arayüzüne aktarılmıştır. Yapılan analizler neticesinde Şekil 45 ve Şekil 46'daki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 45. Herschel-Bulkley katsayıları için regresyon yüzeyi kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-yerdeğiştirme sonuçları



Şekil 46. Herschel-Bulkley katsayıları için regresyon yüzeyi kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-hız sonuçları

Elde edilen veriler incelendiğinde; deneysel verilerde 800 N olarak ölçülen deneysel kuvvete karşılık 18000 N büyüklüğünde bir kuvvet elde edilmektedir. Bu sonuç yöntemde ciddi sapmalar olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra kuvvet-hız eğrileri yükselen hızla beraber doğrusal bir profil arz etmemektedir. Hâlbuki MR sıvı ile çalışan tüm damperler belirli bir hız değerinden sonra neredeyse sabit bir kuvvet üretmektedir. Bu durum kuvvet-yerdeğiştirme

grafisinde de açıkça görülmektedir. Farklı pozisyon değerleri için benzer kuvvetler üretilmesi gerekirken, yani dikdörtgene yakın bir profil oluşması gerekirken; elde edilen grafik bombeli bir görünüm oluşturmaktadır. Bu durum kullanılan modelin uygun olmadığını göstermiştir. Bu durumun üstesinden gelebilmek için regresyon yüzeyi yerine sabit sıcaklıkta regresyon eğrilerinin kullanıldığı iki boyutlu bir eğri uydurma yöntemi kullanılacaktır.

3.4.6.2 Sıcaklık Değişkeni Olmadan Regresyon Eğrisi Oluşturulması

Regresyon eğrilerini daha başarılı hale getirebilmek için eğriler 40°C sabit sıcaklıkta oluşturulmuştur. Regresyonun temsil kabiliyetini artırmak için eğri uydururken parçalı fonksiyonlar kullanılmıştır. Ayrıca k ile manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki oldukça belirsiz olduğu için eğri k^n ile manyetik akı yoğunluğu arasındaki polinoma uygun ilişki kullanılarak eğri uydurulmuş, daha sonra bu değer tekrar $1/n$ üssü alınarak k' 'ya dönüştürülmüştür. Kullanılan denklemler aşağıdaki şekildedir;

$B < 0.075$;

$$\tau_0 = p4y * B^4 + p3y * B^3 + p2y * B^2 + p1y * B + p0y \quad [R^2 = 0.967]$$

$B \geq 0.075$;

$$\tau_0 = ay * \exp(by * x) \quad [R^2 = 0.999]$$

$B < 0.055$;

$$n = p3n1 * B^3 + p2n1 * B^2 + p1n1 * B + p0n1 \quad [R^2 = 0.999]$$

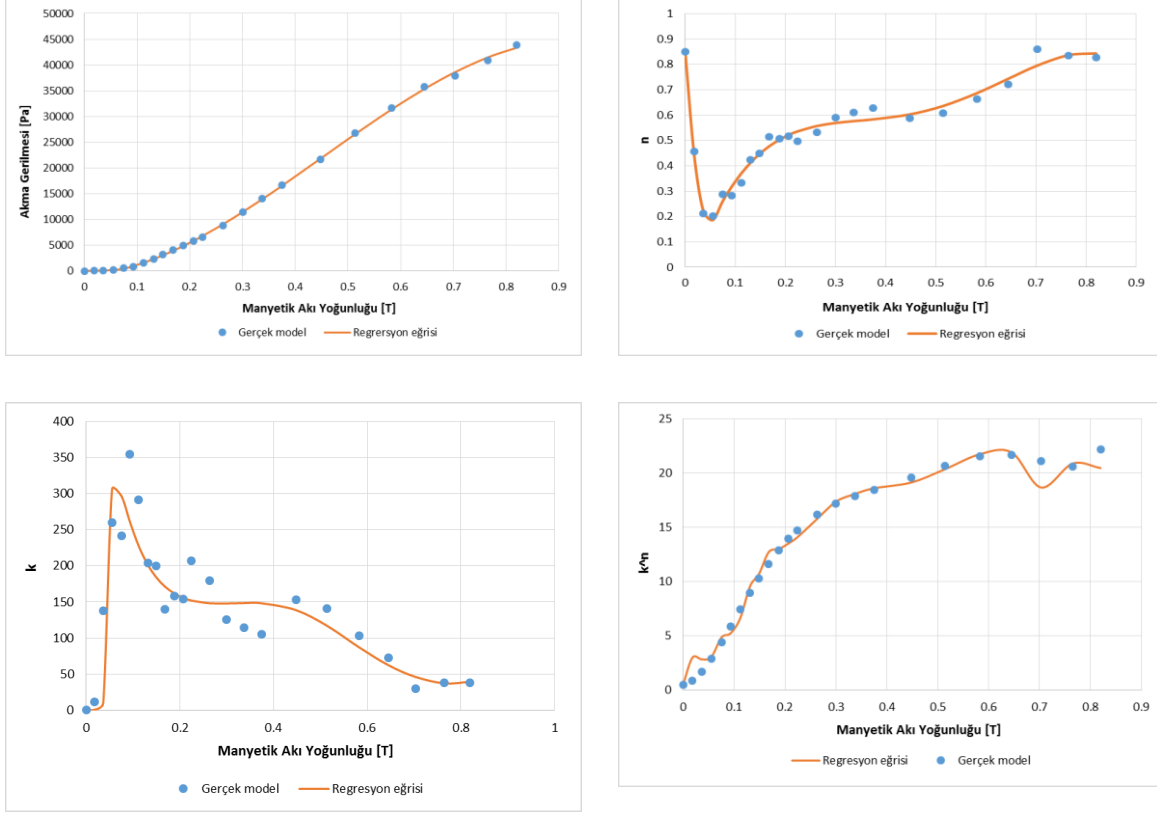
$B \geq 0.055$;

$$n = p5n2 * B^5 + p4n2 * B^4 + p3n2 * B^3 + p2n2 * B^2 + p1n2 * B + p0n2 \quad [R^2 = 0.973]$$

$$k^n = p6k * B^6 + p5k * B^5 + p4k * B^4 + p3k * B^3 + p2k * B^2 + p1k * B + p0k \quad [R^2 = 0.988]$$

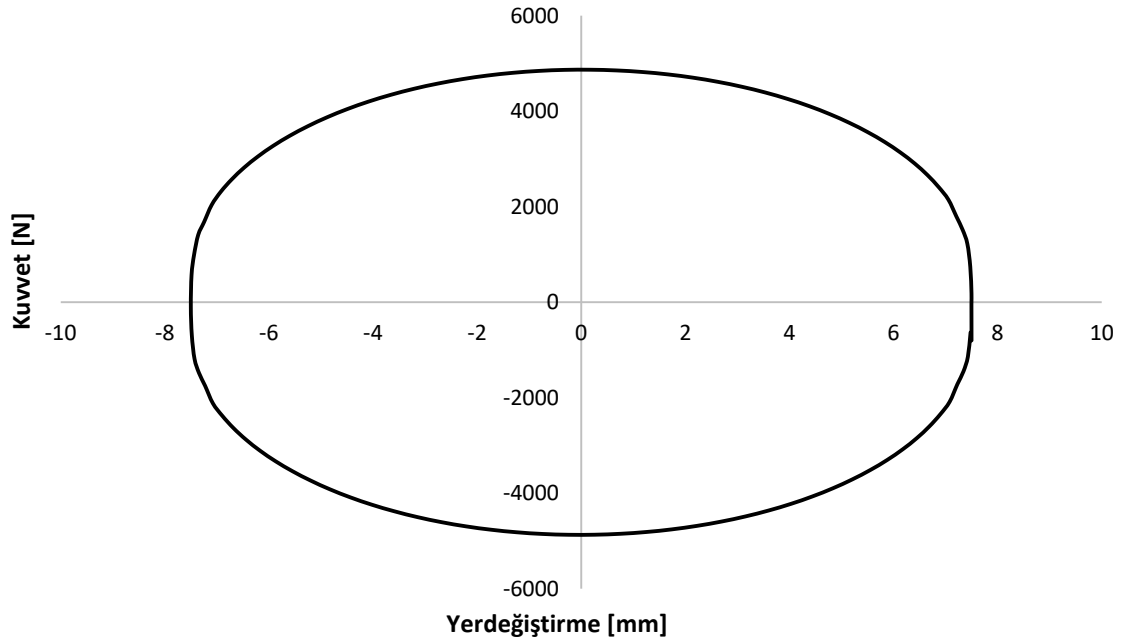
Eğrilere ait R^2 değerleri 1'e oldukça yaklaşmıştır.

Bu denklemler ile veri setleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler aşağıdaki şekildedir. Uydurulan Herschel-Bulkley katsayıları verileri mavi noktalar ile gösterilmiştir.

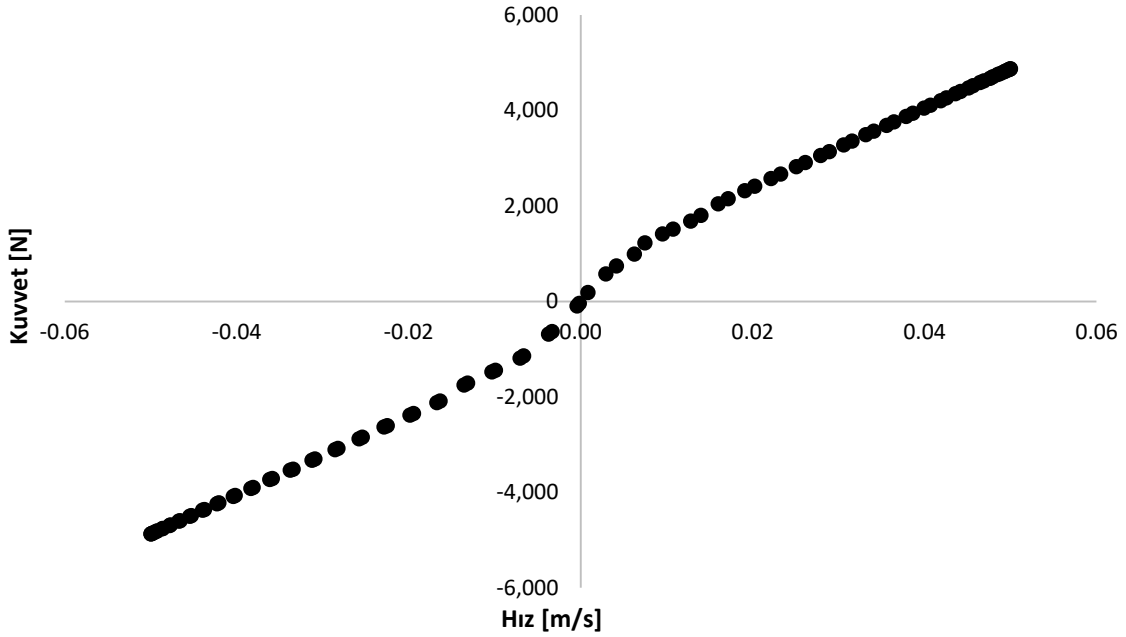


Şekil 47. Herschel-Bulkley katsayıları için regresyon eğrisi oluşturulması

Elde edilen veriler ANSYS FLUENT aracına ilave edilen bir UDF kodu ile aktarılmıştır. Yapılan analizler neticesinde elde edilen kuvvet değerleri Şekil 48 ve Şekil 49'da verilmiştir.



Şekil 48. Herschel-Bulkley katsayıları için regresyon eğrisi kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-yerdeğiştirme sonuçları



Şekil 49. Herschel-Bulkley katsayıları için regresyon eğrisi kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-hız sonuçları

Kuvvet değerleri 5000 N civarındadır. Her ne kadar bu kuvvet değerleri deneysel sonuçlara biraz daha yaklaşırsa da iyileşme düzeyi yeterli değildir.

Hatanın tespit edilmesi için farklı modeller de öngörülmüştür. Özellikle Fourier serileri ve fonksiyonun daha fazla sayıda parçaya ayrıldığı yöntemler denenmiştir. Fonksiyonlar karmaşık hale geldikçe analizlere iraksama hataları da eşlik etmiştir. Tüm bu yapılan değişiklikler neticesinde sonuçlarda kayda değer bir değişiklik saptanmamıştır.

Yukarıdaki hususlar değerlendirildiğinde regresyon modellerinin başarısız olduğu görülmektedir. Fakat çift-boşluk başlığı ile yapılan ölçümlere ait analiz sonuçları elde edildikten sonra, paralel plaka ölçümlerinin de hataya sebebiyet verdiği görülmüştür. Fakat modellerdeki hata başlık kullanımından ötürü oluşan hatadan daha fazladır. Daha sonra geliştirilecek olan ve deneysel verilere yakın sonuç veren modeller ile paralel plaka verileri uygulandığında Şekil 25'de gösterildiği üzere sonuçlar 1700 N bandındayken, regresyon yöntemleri 5000 N değerinin altına bile inememiştir. Kısaca regresyon verileri ile uygun sonuçlar elde edilememektedir. Bu durum akışkanın modellenmesi için farklı bir yöntem ihtiyacı olduğunu göstermektedir.

Bağımlı değişkenler
(k, n, τ_0)

	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

Bağımsız değişken (B ,
manyetik akı
yoğunluğu)

Şekil 51. Herschel-Bulkey interpolasyonunda kullanılan matris örneği

Matrise ait değerler kullanılarak ara değerlerin bulunması aşağıdaki denkleme göre gerçekleştirilmiştir. Buradaki y değeri bağımsız değişken olan manyetik akı yoğunluğuna karşılık gelmektedir ve her hücre için önceden bilinmektedir. x değerleri ise k, n ve τ_0 değerlerini temsil etmektedir. Her bir bağımlı değişkenin değeri tek tek x yerine konularak hesaplanmaktadır. Algoritmada bu üç hesaplama için üç ayrı satır bulunmaktadır.

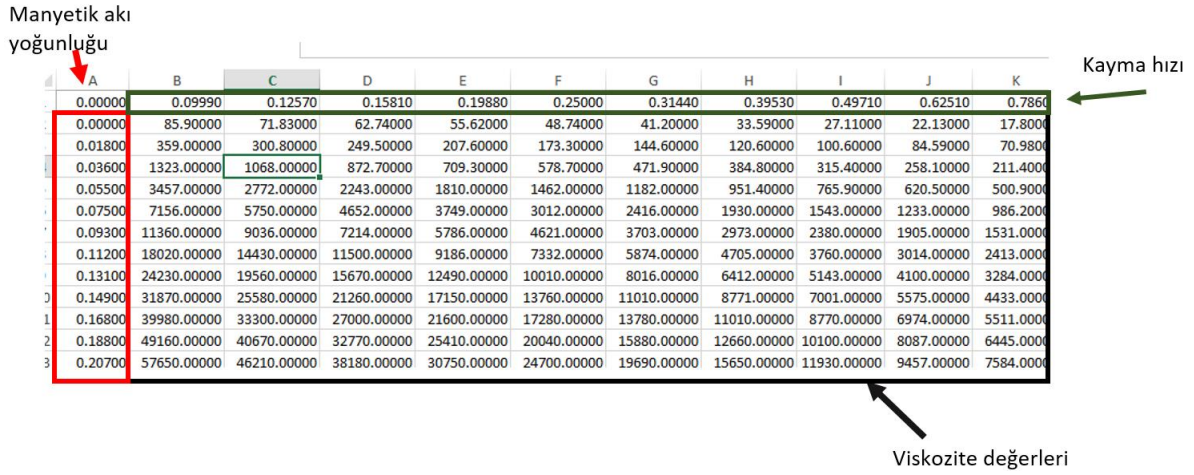
x_n	y_n
x	y
x_{n+1}	y_{n+1}

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

3.4.8 Reolojik Verilerin Kayma Gerilmesi İnterpolasyonu ve Viskozite İnterpolasyonu İle Aktarılması

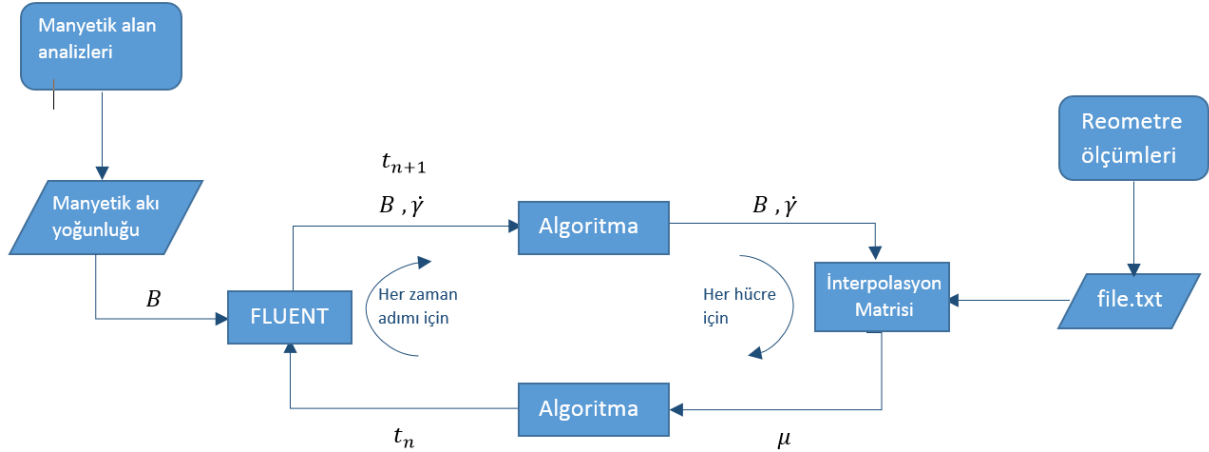
Bir başka interpolasyon yöntemi olarak viskozitenin ölçüm verilerinden doğrudan okunması öngörülmüştür. Bilindiği üzere Newtonyen olmayan akışkanların davranışını ortaya koyan Herschel-Bulkley veya Bingham gibi modeller en nihayetinde farklı kayma hızlarında viskozite

değerini elde etmek amacıyla uydurulmuş regresyon eğrileridirler. Doğrudan deney verilerinin okunması ile böyle bir model ihtiyacı ortadan kalkmış olacak ve herhangi bir kayma hızı ve manyetik akı yoğunluğuna karşılık gelen viskozite değeri doğrudan elde edilmiş olacaktır. Bunun için reometre ile farklı manyetik akılar altında yapılan ölçümler Şekil 52'deki gibi iki boyutlu bir matris haline getirilmiştir.



Şekil 52. Viskozite tabanlı interpolasyon için kullanılan matris örneği

Yukarıda gösterilen matris bir öncekine benzer şekilde .txt uzantılı bir dosya haline getirilerek FLUENT tarafından Şekil 53'de gösterildiği şekilde okutulmuştur.



Şekil 53. Viskozitenin interpolasyon yoluyla elde edilmesine ait akış çizelgesi

Matris için herhangi bir kayma gerilmesi ve manyetik akı yoğunluğuna karşılık gelen viskozite değeri aşağıdaki formül aracılığı ile bulunmaktadır.

	x_1	x	x_2
y_1	Q_{11}		Q_{12}

y		P	
y_2	Q_{21}		Q_{22}

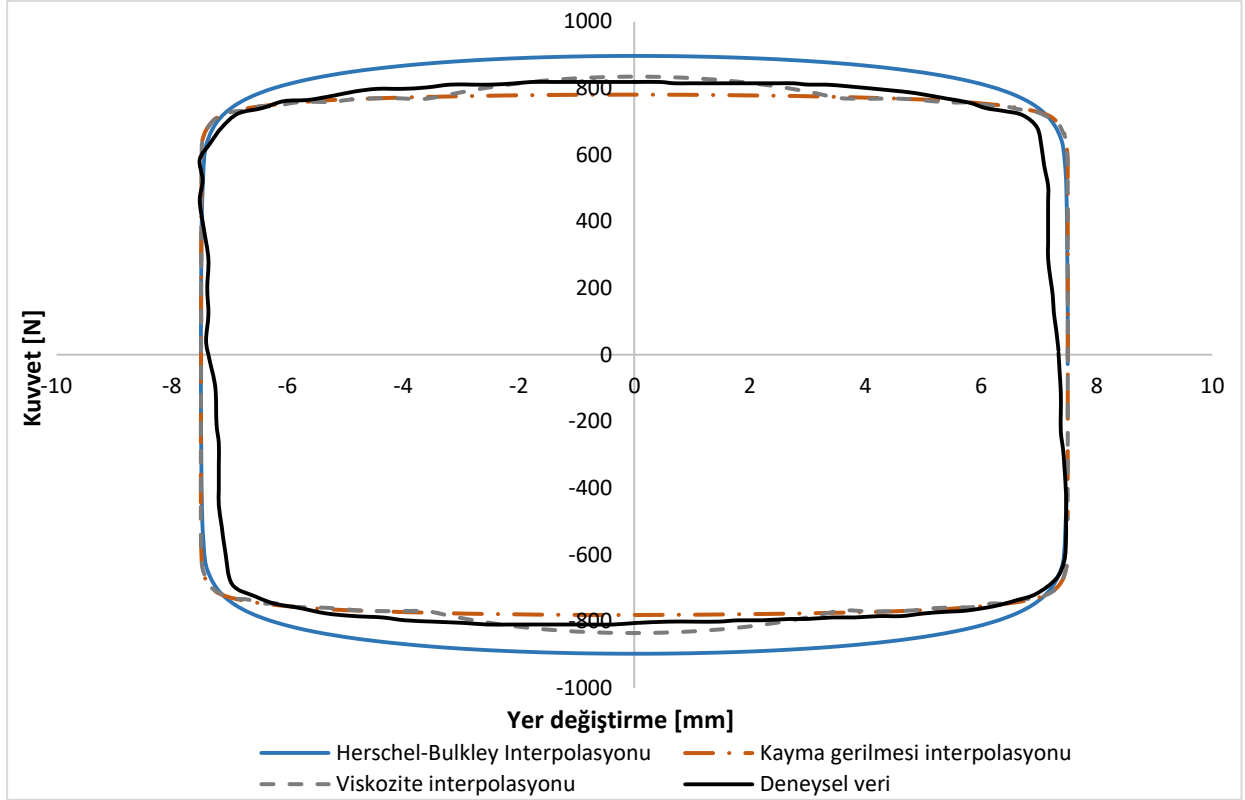
$$P = \frac{(x_2 - x)(y_2 - y)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} Q_{11} + \frac{(x - x_1)(y_2 - y)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} Q_{21} + \frac{(x_2 - x)(y - y_1)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} Q_{12} + \frac{(x - x_1)(y - y_1)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} Q_{22}$$

Viskozite verileri düşük kayma hızlarında çok yüksek değerlere ulaştığı için, viskoziteyi sınırlayan limit değerler koda ilave edilmiştir. Buna rağmen viskozite interpolasyonu sayısal verilerin birikmesi ile iraksama hataları göstermektedir.

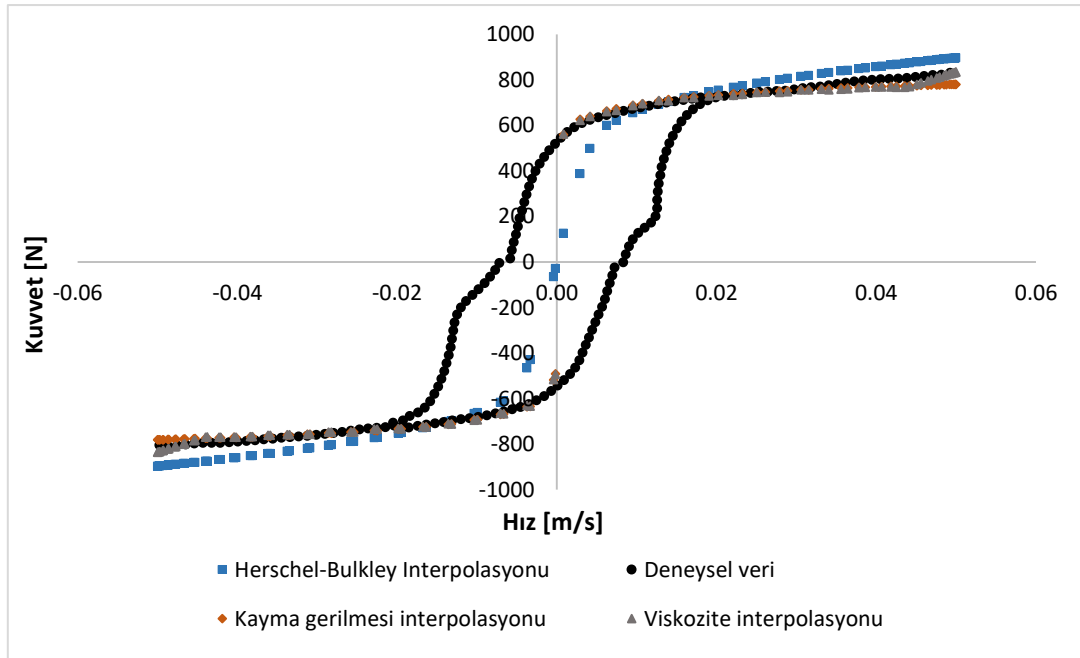
Kayma gerilmesi interpolasyonu ise, viskozite interpolasyonu ile aynı matematiksel prensibi kullanarak çalışmaktadır. Sadece farklı olarak viskozite yerine kayma gerilmesi değerleri elde edilmekte ve bu değerler aşağıdaki denklem ile viskoziteye dönüştürülmektedir;

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Yukarıdaki denklemde, kayma hızının çok düşük değerlerinde viskozite çok yüksek değerler aldığından kayma hızı için bir alt limit belirlenmiştir. Genellikle kayma hızı alt limiti 1 olarak kabul edilmiştir.



Şekil 54. İnterpolasyon metotları kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-yerdeğiştirme ilişkilerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması



Şekil 55. İnterpolasyon metotları kullanılarak yapılan HAD analizlerinin kuvvet-hız ilişkilerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması

Metotların kullanıldığı analizlerin sonuçları Şekil 54 ve Şekil 55’de verilmiştir. Herschel-Bulkley interpolasyonu sonuçları incelendiğinde elde edilen sonuçlar deney sonuçlarına oldukça yakındır. Fakat hız artışı ile beraber kuvvetin sabit olması gerekirken kuvvette artışlar görülmektedir. Bu metot başarılı bir sonuç vermiş olsa da daha iyi bir modelin geliştirilebileceği sıradaki metotlarda görülecektir.

Viskozite interpolasyonuna ait sonuçlar incelendiğinde deney verileri ile neredeyse tam bir örtüşme görülmektedir. Fakat yüksek hız değerlerinde kuvvetlerde istenmeyen artışlar oluşmaktadır. Bunun en büyük sebebi; doğrudan viskozite ölçümlerinin çok yüksek kayma hızlarında aşırı yüksek değerlere ulaşması ve bunu engellemek adına düşük viskozite limitlerinin uygulanmasının akış fiziğini bozarak sonuçları tamamen yanlış hale getirmesidir. Bu nedenle kayma gerilmesi interpolasyonu daha başarılıdır.

Kayma gerilmesi interpolasyonunda yukarıda bahsi geçen iki hata da yok edilmiştir. Diğer iki metoda kıyasla bu son yöntemin en başarılı uyumu gösterdiği net bir şekilde görülmektedir. Analizler oldukça kararlıdır ve iraksama hataları yoktur.

Çalışmanın devamında yapılacak olan optimizasyon çalışmalarında en başarılı model olduğundan dolayı kayma gerilmesi tabanlı interpolasyon kullanılmıştır.

3.5 MR Damper Tasarımı ve Optimizasyonu

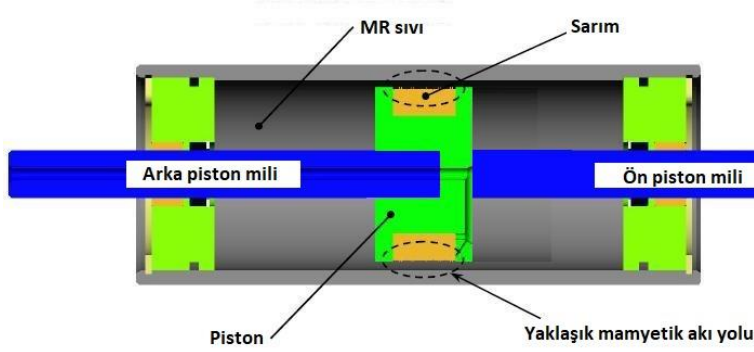
Genellikle literatürde sismik uygulamalarda çift milli damper uygulamaları ile karşılaşılrken, tek milli damperlerin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur (Zhu vd., 2012). Fakat bina modellerinde tek milli MR damperin piston mili tarafına doğru uyguladığı akümülatör kuvveti, MR damper kontrolcüsü tarafından dengelenir veya bu kuvvetin değeri bina kütesine göre ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

Bu projede hem çift milli hem tek milli olarak iki farklı MR damper tasarlanıp imal edilerek her iki damper tipinin bina modellerinin davranışına etkisini değerlendirmek amaçlanmıştır.

3.5.1 Çift Milli MR Damper

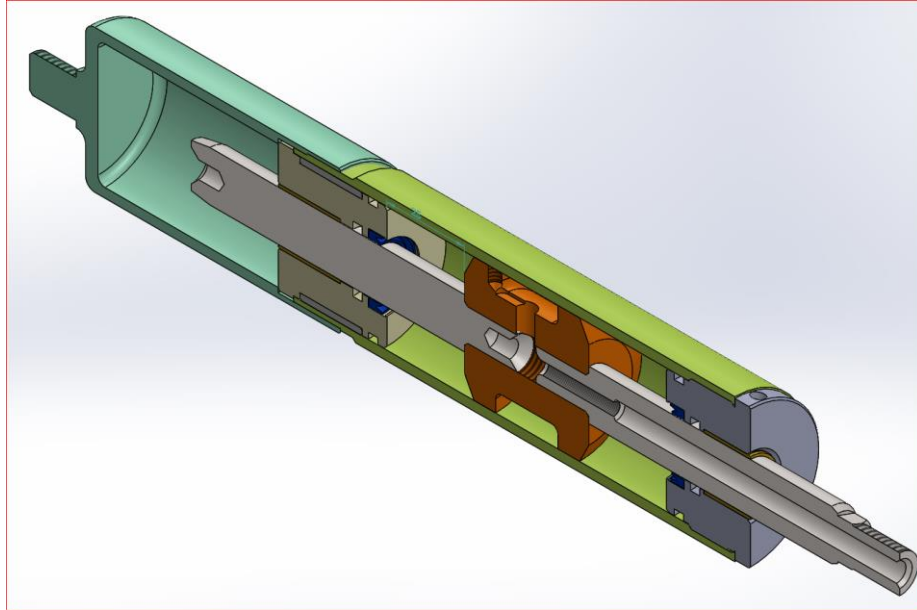
Bu damper tipinde piston kafasının her iki tarafında piston mili bulunmaktadır. Elektromanyetik bobin piston kafası üzerindedir. Kapalı kısımda piston milinden dolayı hacim değişimi bulunmamakla birlikte damper içerisinde kavitasyon ve benzeri sorunlarla karşılaşmamak için akışkanın basınç altında tutulması gerekmektedir. Bu amaçla akümülatör kullanılabildiği gibi akümülatör görevini yerine getirecek başka tasarımlar da kullanılabilmektedir. Çift milli damperde piston milleri basınçlı gazdan izole edildiğinden herhangi bir yöne kuvvet

uygulamazlar. Bu sebeple piston/piston mili bırakıldıkları konumda kalır. Dampere ait şematik gösterim Şekil 56'da verilmiştir.



Şekil 56. Çift millî (akümülatörsüz) MR damper modeli

Yeni tasarıma ait içyapı Şekil 57'de gösterilmiştir. Bu yeni modelde piston hareket ederken iki sınır da sabit kalmaktadır. Bu durumda HAD modelinde tek millî damperin aksine her iki sınır da eşit hızla hareket etmelidir.



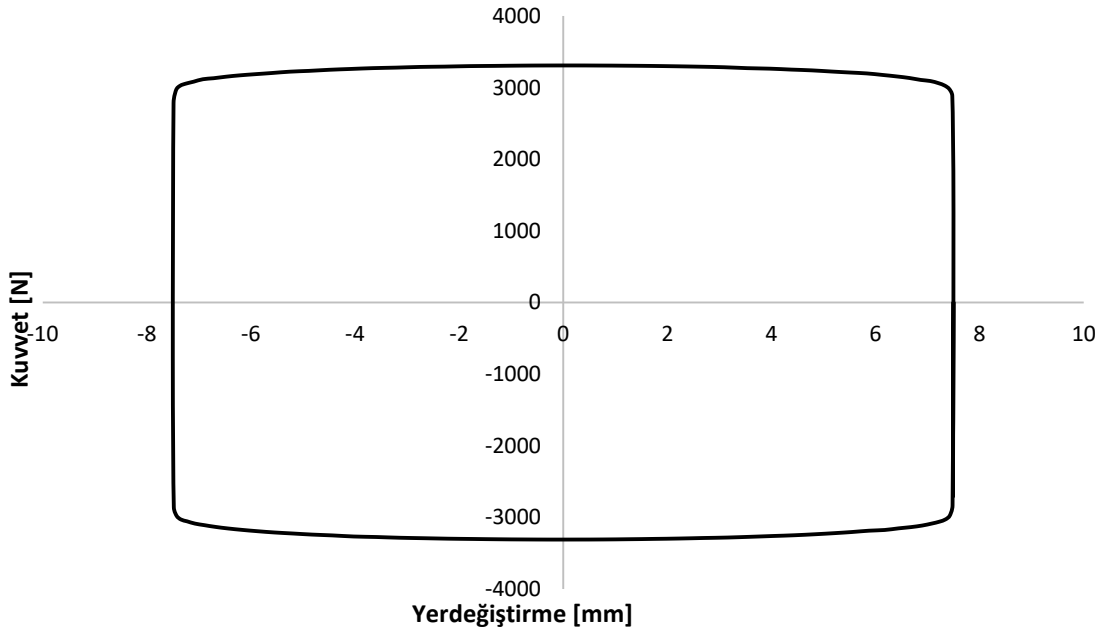
Şekil 57. MR damper CAD modeli

Bina modeline bağlı olarak belirlenen 1500 N sönümlenme kuvvetini sağlayacak geometrik boyutlar analitik olarak hesaplanmıştır. Optimizasyon sınırlarını doğru bir şekilde belirlemek için ön tasarım değerlerinde sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Ön tasarım büyüklükleri Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. Ön tasarım için kullanılan geometrik değerler

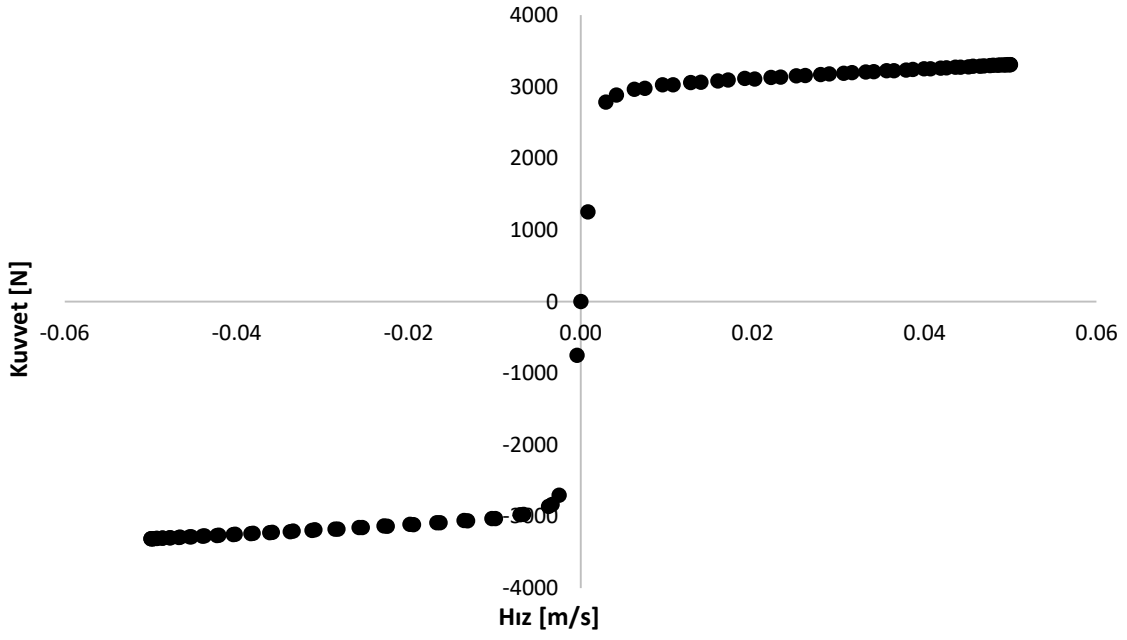
Parametre	Değer
Makara göbeği genişliği (R_p)	5 mm
Aktif bölge uzunluğu (t_k)	10 mm
Bobin uzunluğu (t_c)	20 mm
Kanal genişliği (g)	0.4 mm
Tel çapı (D_w)	0.5 mm
Akım (I)	1 A

Analizler sonucunda elde edilen kuvvet-hız ve kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 58 ve Şekil 59'da verilmiştir. Bu eğriler MR damperin genel yapısı ve tasarımın başarısı hakkında bizlere bir ön değerlendirme imkânı vermektedir. Analizler Tablo 7'de verilen değerlerde yapılmış ve MR damperin önceki çalışmaları ile kıyaslanması sağlanmıştır. Bu analizlerde henüz interpolasyon verileri ile kullanılan kodlar geliştirilmediği için doğrulama eşlenik çözüm metodu ile yapılmıştır.



Şekil 58. Ön tasarım geometrisinin HAD analizi kuvvet-yerdeğiştirme sonuçları

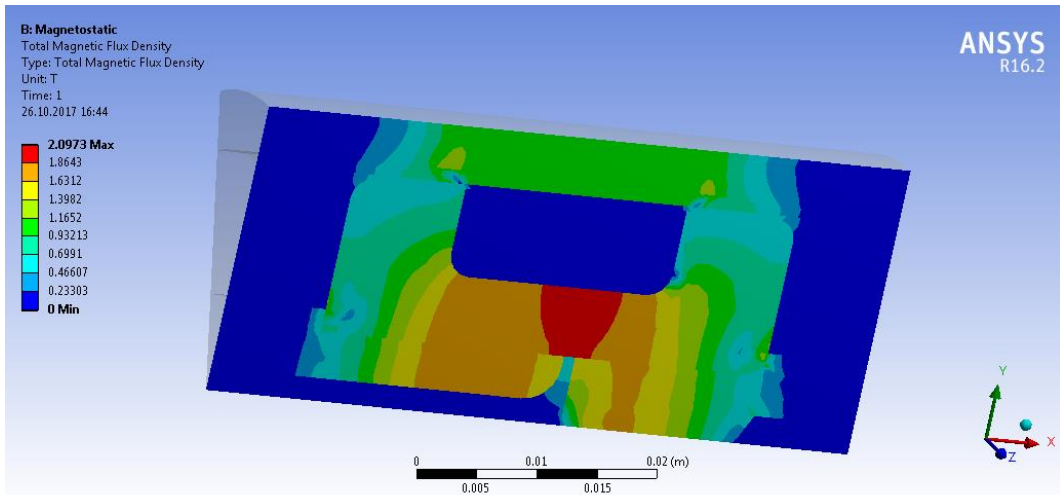
Şekil 58'deki kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerinde 3309.32 N değerine ulaşılmıştır. Tasarım kriteri olan 1500 N için yeterli derecede yüksek bir değer elde edilmiştir. Bunun yanı sıra kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi kontrol edilmeye uygun bir yapı göstermektedir.



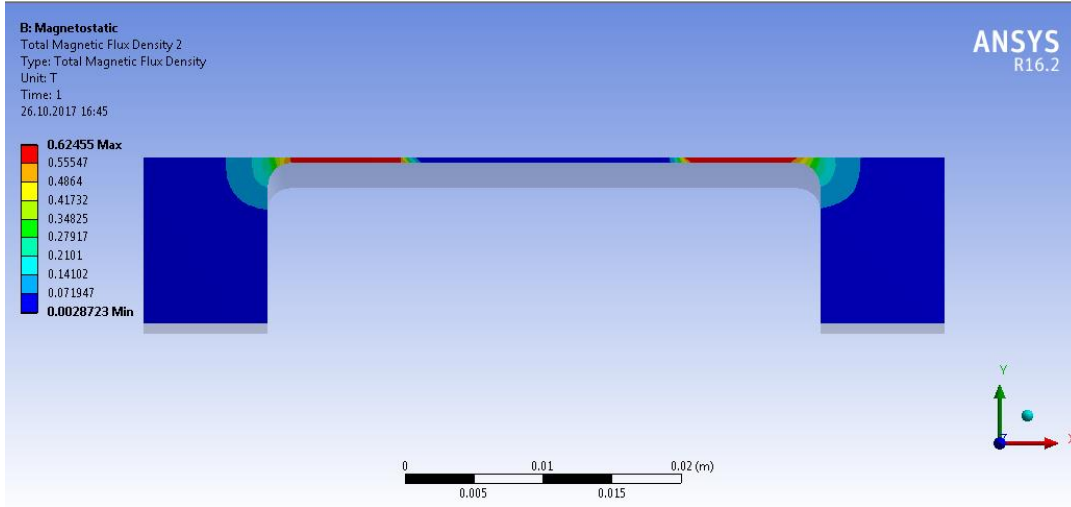
Şekil 59. Ön tasarım geometrisinin HAD analizi kuvvet-hız sonuçları

Şekil 59'daki kuvvet-hız eğrilerine bakıldığında ise artan hıza karşılık kuvvetin yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmektedir. Hız artışı ile kuvvet değişiminin oldukça düşük olması akışkanın kontrol uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir.

Şekil 60'taki manyetik alan analizlerine bakıldığında kanal içerisinde yeterli manyetik akı yoğunluğunun elde edildiği görülmektedir.

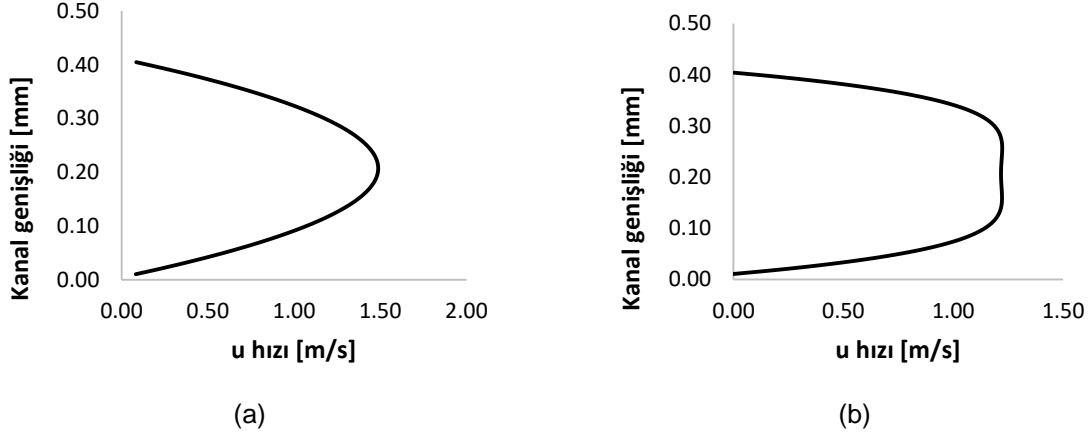


Şekil 60. Ön tasarım geometrisinin manyetik analizi sonucu dampere ait manyetik akı yoğunluğu konturları



Şekil 61. Ön tasarım geometrisinin manyetik analizi sonucu akışkan bölgesine ait manyetik akı yoğunluğu konturları

Şekil 61'deki kanal bölgesine bakıldığında manyetik akının aktif bölgede homojen bir şekilde oluştuğu görülmektedir. Aktif bölgedeki en büyük manyetik akı yoğunluğu değeri 0.62 T olarak okunmaktadır.

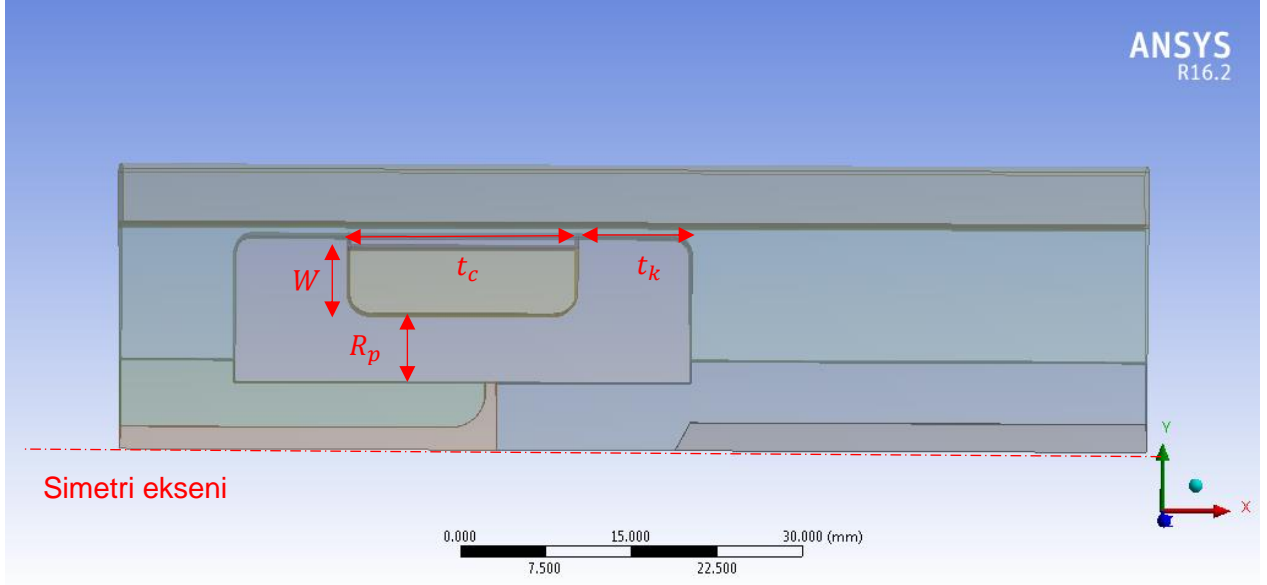


Şekil 62. Ön tasarım geometrisinin kanalındaki hız profilleri (0.23 sn için) (a) manyetik akının ulaşmadığı bölge (b) manyetik akı altındaki bölge

Şekil 62a'daki kanal içerisinde manyetik akıya maruz kalmayan hız profili incelendiğinde akış profilinin karakteristik laminer akış profiline benzediği görülürken, aktif bölgedeki akışın Şekil 62b'deki gibi bir çekirdek bölge akışına benzediği net bir şekilde görülmektedir.

3.5.1.1 Çift Milli Damperin Parametrik Modelinin Geliştirilmesi

Optimizasyon çalışmasının yapılabilmesi için damper performansını etkileyen parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Parametrelerin seçimine; özellikle, kuvvete ve dinamik orana olan etkileri dikkate alınarak karar verilmiştir. Geometrik parametreler Şekil 63'de verilmiştir.

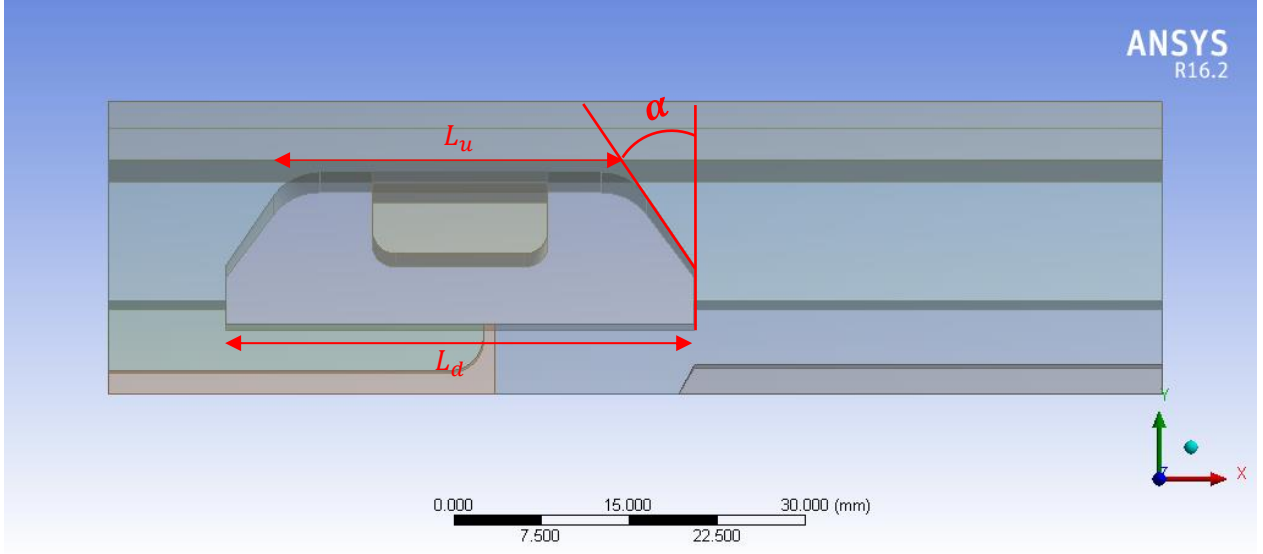


Şekil 63. MR dampere ait parametrik büyüklükler

Makara göbeği genişliğinin (R_p) azalması, manyetik alanın daha uzun bir yoldan geçmesine neden olmakta ve manyetik akı yoğunluğunu (B) düşürmektedir. Buna karşılık bu büyüklüğün azalması ile bobin genişliği (W) dolaylı olarak artmakta; bunun neticesinde bobin içerisinden geçen sarım sayısı (N_c) artmaktadır. Bu ise manyetik akı yoğunluğunu artırıcı yönde bir etkiye neden olmaktadır. Dolayısıyla bu büyüklüğün parametrik olarak incelenmesi gereklidir.

Bobin uzunluğu da (t_c) benzer şekilde sarım sayısını artırıcı veya azaltıcı yönde etki yapmaktadır. Bobin uzunluğunun artması sarım sayısını artırırken; manyetik akının yolunu uzatmakta ve büyüklüğünü dolaylı olarak küçültmektedir. Dolayısıyla bu büyüklük de parametrik olarak incelenmelidir.

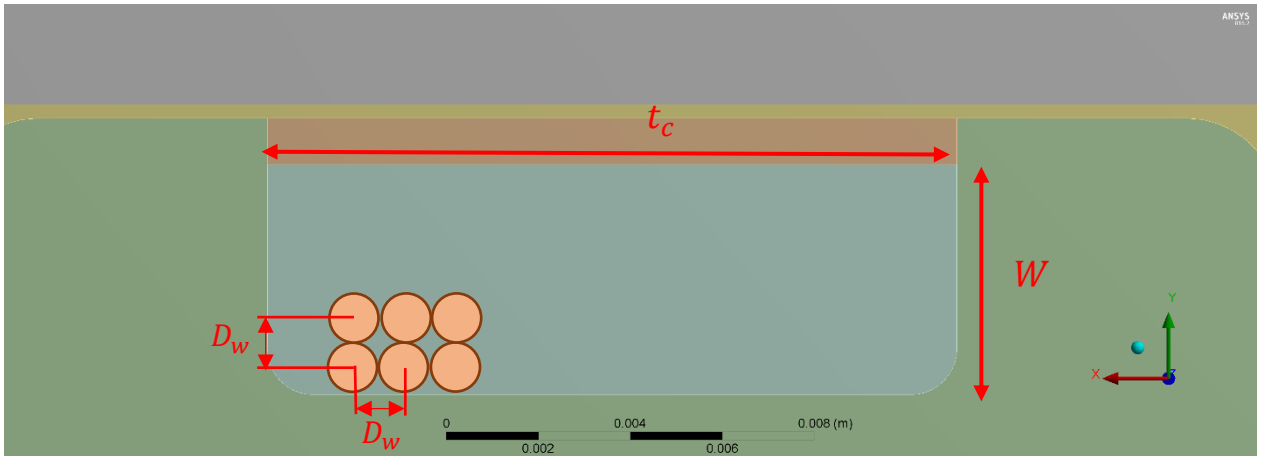
Aktif bölge uzunluğu (t_k) akışkanın manyetize olan miktarını doğrudan belirlediği için sönüm kuvveti üzerinde büyük bir etkiye sahiptir ve akış karakteristiğini belirleyen önemli bir parametredir.



Şekil 64. Makaranın dış kısmında eğimin oluştuğu bölgenin gösterimi

Makara alt uzunluğu (L_d) sabit ve makara üst uzunluğu (L_u) bağımlı değişken olan birer parametredir. Aktif bölge uzunluğu (t_k) ve bobin uzunluğu (t_c) bağımsız iki parametre olarak belirlenmiştir. Bu iki parametrenin toplam değerine göre üst uzunluk makara alt uzunluğundan küçük veya eşit olmaktadır. Üst uzunluğun makara alt uzunluğundan kısa olduğu durumlarda Şekil 64’de gösterildiği gibi açısallık bir kesit oluşacaktır. Bu ikisi arasındaki fark makaranın yan yüzeylerindeki eğim açısı α ’yı belirlemektedir.

Bunun dışındaki parametrik değerler ise akım (I) ve tel çapıdır (D_w). Tel çapı arttıkça bobin içerisindeki sarım sayısı artmakta; fakat damperin ısınması artmaktadır. Buna karşılık büyük tel çaplarında bobin içerisindeki sarım sayısı azdır fakat ısınma etkileri daha az ve kaynak iletken alanı (A_{sc}) daha büyüktür. Tel çapı ve bobin arasındaki ilişki Şekil 65’de gösterilmiştir.



Şekil 65. Bobin içerisindeki tel yerleşimi

Yukarıdaki şekilde toplam sarım sayısı bobin bölgesinin alanı kullanılarak hesaplanmaktadır. Her bir tel D_w kenarlı bir kare kadar alan kaplayacak şekilde alan hesaplanmaktadır. Fakat pratikteki uygulamalarda sarım bu ideal değer altında kaldığı için tecrübelerle dayanarak 0.6 gibi bir çarpan ile bu değer küçültülmüştür.

$$N_c = \frac{t_c W}{D_w^2} 0.6$$

Parametrik çalışma için aşağıdaki parametre aralıkları, önceki tecrübelerden yola çıkılarak ve geometrinin yapısı dikkate alınarak belirlenmiş ve Tablo 12’de gösterilmiştir.

Tablo 12. Optimizasyon için parametre sınırları

Parametre	Aralık
Makara göbeği genişliği (R_p)	2 – 9 mm
Aktif bölge uzunluğu (t_k)	5 – 10 mm
Bobin uzunluğu (t_c)	10 – 20 mm
Kanal genişliği (g)	0.4 – 2 mm
Tel çapı (D_w)	0.4 – 1 mm
Akım (I)	0 – 2 A

Bağlı değişkenlere ait ilişkiler ise Tablo 13’de verilmiştir.

Tablo 13. Geometriye ait parametrik ilişkiler

Parametre	İlişki tanımı	Birim
Bobin genişliği (W)	$14 - 1 - R_p$	[mm]
Sarım Sayısı (N_c)	$W * t_c / D_w^2 * 0.6$	[adet]
Kaynak iletken alanı (A_{sc})	$\pi D^2 / 4 * N_c$	[mm ²]
Makara üst uzunluğu (L_u)	$2 * t_k + t_c$	[mm]

3.5.1.2 Çift Milli Damperin Cevap Yüzeyi (Response Surface) Tabanlı Optimizasyonu

Verilen parametreler ile bir cevap yüzeyi oluşturabilmek için 45 adet tasarım noktası belirlenmiş ve bu tasarım noktalarının her birinin manyetik alan ve HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde MRF132DG sıvısına ait veriler geliştirilen interpolasyon metodu ile FLUENT’e aktarılmıştır. Sürtünme kuvveti (F_s) deneysel verilere dayanarak 170 N olarak tahmin edilmiştir. Optimizasyon için ANSYS Response Surface Optimization aracı kullanılmıştır.

Aday nokta 1 için Cevap Yüzeyi (Response Surface) Tam İkinci Derece Polinom (Full 2nd order Polynomials) metoduna göre oluşturulmuştur. Optimizasyon için Perdeleme (Screening) metodu kullanılmış, hedef olarak maksimum kuvvet, maksimum dinamik oran ve minimum akım hedeflenmiştir. Öncelikler (Priorities) Varsayılan (Default) düzeyde bırakılmıştır.

Aday nokta 2 için cevap yüzeyi Kriging metoduna göre oluşturulmuştur. Optimizasyon için MOGA (Çok hedefli genetik algoritma) kullanılmıştır. Hedef olarak maksimum kuvvet, maksimum dinamik oran ve minimum akım hedeflenmiştir. Minimum akım önceliği düşük tutulmuştur.

Aday nokta 3 için, aday nokta 1 ile aynı yöntemler kullanılmış fakat maksimum sıfır akım kuvveti 250 N ile sınırlandırılmıştır.

Aday noktalara ait elde edilen optimum parametre değerleri Tablo 14’de verilmiştir. Daha sonra bu optimum noktalara ait doğrulama analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde tüm değerler aynı tutulmuş fakat tel çapının üretim standartlarına uygun olması için değeri yuvarlatılmıştır. Optimizasyon ve doğrulama analiz değerlerinin karşılaştırılması Tablo 15’de yapılmıştır.

Tablo 14. Aday noktaların parametre değerleri

Parametre	Aday nokta 1	Aday nokta 2	Aday nokta 3
Aktif bölge uzunluğu (t_k)	6.7575 mm	8.8367 mm	5.6325 mm
Bobin uzunluğu (t_c)	19.79 mm	18.183 mm	14.927 mm
Kanal genişliği (g)	0.4293 mm	1.0372 mm	0.54566 mm
Tel çapı (D_w)	0.49851 mm	0.44669 mm	0.45278 mm
Akım (I)	0.4714 A	1.8419 A	0.4042 A
Makara göbeği genişliği (R_p)	7.9128 mm	6.6057 mm	4.7348 mm

Tablo 15. Aday noktaların optimizasyon ve analiz sonuçları

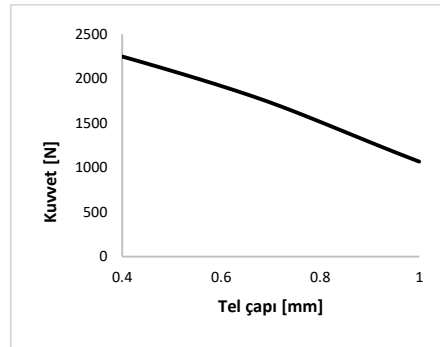
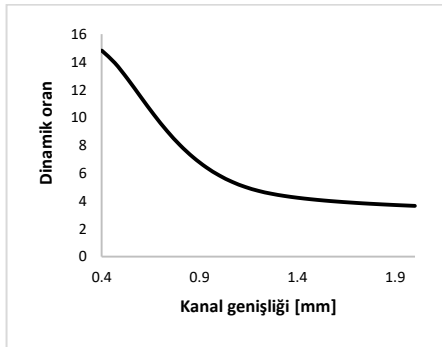
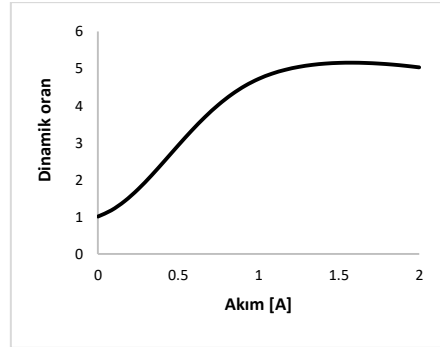
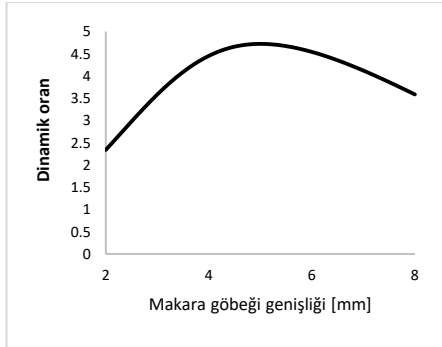
Parametre	Aday nokta 1		Aday nokta 2		Aday nokta 3	
	Optimizasyon	Analiz	Optimizasyon	Analiz	Optimizasyon	Analiz
Tel çapı (D_w)	0.49851 mm	0.5 mm	0.44669 mm	0.5 mm	0.45278 mm	0.5 mm
Maks. M. akı yoğunluğu (B)	0.82488 T	0.826 T	0.76859 T	0.81839 T	0.58465 T	0.58735 T
Kuvvet (F)	5308.8 N	4949.8 N	1637.3 N	1758.26 N	2319.1 N	2215.55 N
Sıfır akım kuvveti (F_μ)	332.47 N	329.97 N	171 N	185.65 N	243.24 N	241.46 N
Dinamik oran (F/F_μ)	15.97	15	9.57	9.47	10.23	9.17

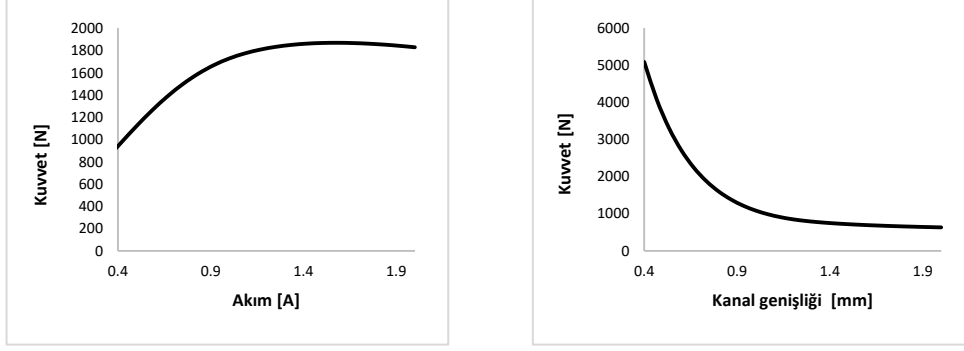
Yapılan analizlerde optimizasyon sonuçları ile doğrulama analizleri arasında yakın bir uyum görülmüştür. Bu durum optimizasyon için kullanılan algoritmanın hata değerinin makul düzeylerde ve başarılı olduğunu göstermektedir.

Aday nokta 1 yüksek kuvvetler, aday nokta 2 ise düşük sıfır akım kuvvetleri elde etmeyi amaçlamıştır. Aday nokta 1 hem düşük akımlar ile yüksek manyetik akı yoğunlukları elde edebilmekte, hem de yüksek kuvvet değerlerine ulaşabilmektedir. Fakat sıfır akım için gösterdiği kuvvet oldukça büyüktür. Bu kuvveti azaltmanın yolu kanal genişliğini artırmaktan geçmektedir. Kanal genişliğinin daha yüksek tutulduğu başka bir aday noktası elde etmek için optimizasyon hedefleri ve metotlarda bazı değişiklikler yapılmıştır. Bunun sonucunda elde edilen aday nokta 2 ise düşük sıfır akım kuvvet değerine sahip olsa da dinamik oranı birinci aday noktadan daha küçüktür.

Aday nokta 3, en düşük akım ile aday nokta 2'nin değerlerine yaklaşmaktadır. Fakat sıfır akım kuvveti oldukça büyüktür. Bir anlamda aday nokta 1 ile 2 arasında bir noktaya karşılık gelmektedir.

Şekil 66'da verilen parametrik ilişkilere bakıldığında dinamik oranın ile makara genişliğine göre maksimuma ulaştığı bir nokta vardır. Dinamik oranın akım ile değişimi incelendiğinde, 1 A akım değerine kadar doğrusala yakın olarak artmakta; yaklaşık 1.5 A değerinde maksimum değerine ulaşmaktadır. Kuvvetin akım ile değişimi incelendiğinde yaklaşık 1 A civarında damperin manyetik doyuma ulaştığı görülmektedir. 1.5 A değerinden sonra elektromanyetik devre tamamen doyuma ulaştığı için kuvvet üretimi durmakta, verilen elektrik enerjisi tamamen ısıya dönüşmektedir. Artan kanal genişliğinin dinamik oranı düşürdüğü görülmekte, ancak belli bir değerden sonra yatay devam etmektedir. Bunun sebebi düşük kanal genişliğinin kontrol edilebilir kuvveti artırması böylece dinamik oranın yükselmesini sağlamasıdır. Tel çapının artışı ise damper kuvvetini ciddi oranda düşürmektedir. Bunun sebebi aynı geometrik kısıtlar içerisinde tel çapı büyüdükçe sarım sayısının azalması ve dolayısıyla üretilebilen manyetik akının düşmesidir.



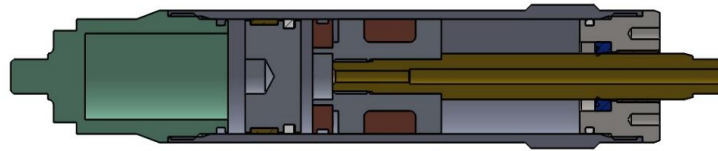


Şekil 66. Parametrelerin dinamik oran ve sönüm kuvveti üzerindeki etkileri

3.5.2 Tek Milli (Akümülatörlü) MR Damper Tasarımı

Tek milli MR damper tipinde mil damperin sadece bir tarafında çalışmaktadır. Piston milinin içe doğru hareketiyle kapalı bölgenin hacmi azalma eğilimi gösterir. Akışkan sıkıştırılmaz olduğu için hacim değişimi karşı tarafta basınçlı gaz bulunan kayar pistonun hareketi ile dengelenir. Dolayısıyla içeri giren mil hacmi akümülatördeki gazın sıkıştırılmasıyla karşılanmış olur.

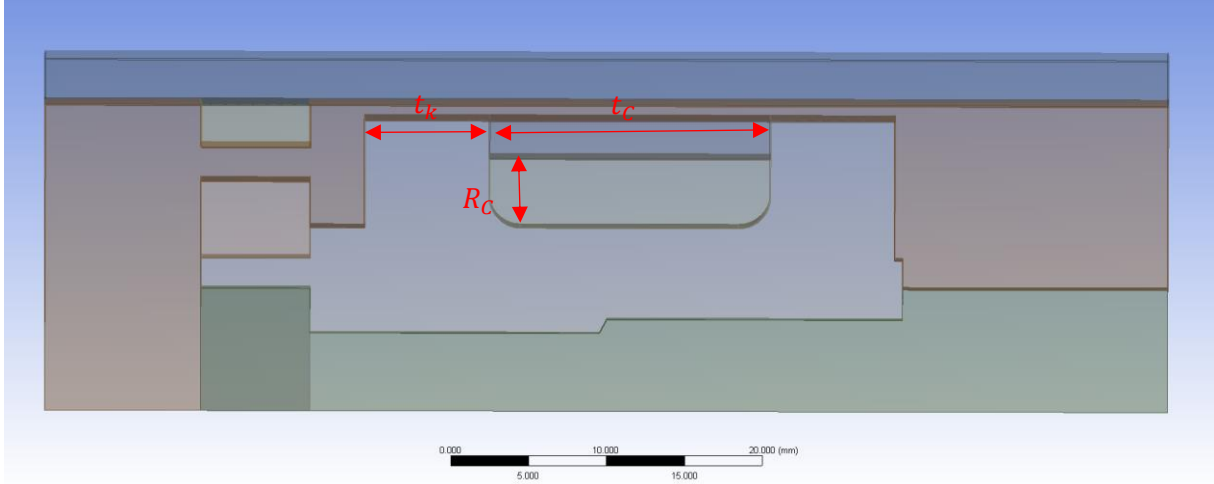
Bu damper tipinde piston alanı her iki tarafta aynı olmadığı için, mil alanı ve akümülatör basıncıyla orantılı olarak mil tarafına doğru tek taraflı bir kuvvet uygulanır. Bu kuvvetin değeri piston milinin alanıyla doğru orantılıdır. Bu kapsamda tasarlanan dampere ait görünüş Şekil 67'de gösterilmiştir.



Şekil 67. Tek milli damperin önden görünüşü

3.5.2.1 Tek Milli MR Damperin Parametrik Modelinin Geliştirilmesi

Tek milli damper için iki parametre kabul edilmiştir (Şekil 68). Bunlar aktif uzunluk ve kanal genişliğidir. Makaranın toplam uzunluğu sabit tutulmuştur. Analizler 1A akım için gerçekleştirilmiştir. Tel çapı standardize edilebilmesi için sabit tutulmuş kanal genişliği ve bobin uzunluğu da sarım sayısını aynı tutabilmek için sabit alınmıştır. Aktif uzunluk azaldıkça pistonun üstten tornalandığı bölge miktarı artırılarak makaranın alt bölgesi sabit tutulmuştur. Parametrik sınırlar bir önceki damperin verileri dikkate alınarak öngörülmüştür. Keçelerden dolayı oluşan sürtünme kuvveti (seal drag) damper üretilmeden bilinemediği için 150 N'luk bir sürtünme kuvveti tahmin edilerek HAD analizlerinde kullanılmıştır. Sabit tutulan ve değişken olarak belirlenen parametreler Tablo 16 ve Tablo 17'de verilmiştir.



Şekil 68. Tek milli damper için parametrelerin gösterimi

Tablo 16. Optimizasyon için sabit tutulan parameteler

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	200
Kaynak iletken alanı	$3.927 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

Tablo 17. Optimizasyon için belirlenen değişken parametreler

Parametre	Aralık
Aktif bölge uzunluğu (t_k)	5 – 8.5 mm
Kanal genişliği (g)	0.5 – 1.2 mm

3.5.2.2 Tek Milli Damperin Cevap Yüzeyi (Response Surface) Tabanlı Optimizasyonu

Belirlenen aralıklarda daha iyi bir optimizasyon gerçekleştirilmesi amacıyla tasarım noktaları detaylı olarak ele alınmıştır. Merkezi Birleşik Tasarım (Central Composite Design) tabanında Yüzey merkezli (Face-Centered) şeklinde gelişmiş (Enhanced) olarak bir cevap yüzeyi oluşturmak için 17 tasarım noktası belirlenmiştir. Cevap yüzeyi standart ikinci mertebe polinomlardan oluşturulmuştur. Analizlerde sıfır akım kuvvetini düşürmek için daha düşük sıfır akım viskozitesine sahip Lord Firmasına ait MRF122EG sıvısı kullanılmıştır. Ayrıca yapılan sarsma testlerinde bina modeline gönderilen deprem verileri, model binanın hasar görme riskine karşı ölçekli hale getirilmiş; dolayısıyla yüksek kuvvet cevabı veren bir MR dampere ihtiyaç kalmamıştır. Buna dayanarak hedef kuvvet değeri azaltılmış ve 800 N olarak belirlenerek optimizasyonda maksimum dinamik oran aranmıştır. İkinci bir optimizasyon ise 600 N kuvvet ve maksimum dinamik oran için gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon sonucunda elde edilen geometri ilk olarak HAD sonuçları ile doğrulanmıştır. Doğrulanana analiz sonuçları, optimizasyon sonuçları ile beraber Tablo 18’de verilmiştir.

Tablo 18. Tek milli damper için optimizasyon sonuçları ve analizler ile doğrulanması

Parametre	Aday nokta 4 (800 N)		Aday nokta 5 (600 N)	
	Optimizasyon	Analiz	Optimizasyon	Analiz
Aktif bölge uzunluğu (t_k)	6.087 mm	6.087 mm	6.9163 mm	6.9163 mm
Kanal genişliği (g)	0.797 mm	0.797 mm	1.037 mm	1.037 mm
Maks. M. akı yoğunluğu (B)	0.57991 T	0.57178 T	0.51912 T	0.52737 T
Kuvvet (F)	801.58 N	803.96 N	600.63 N	595.78 N
Sıfır akım kuvveti (F_μ)	158.3 N	158.81 N	154.43 N	154.43 N
Dinamik oran (F/F_μ)	5.063	5.062	3.8893	3.8579

Sonuçlar incelendiğinde cevap yüzeyinin çok iyi uyum gösterdiği anlaşılmaktadır. Bunun en önemli sebebi cevap yüzeyi oluşturulurken gelişmiş (enhanced) bir analiz yapılarak çok sayıda tasarım noktasının oluşturulmasıdır. Bu durum elde edilen cevap yüzeyinin matematiksel olarak çok düşük bir hataya sahip olduğunu net bir şekilde göstermiştir. HAD modelinin deneysel sonuçlar ile doğrulanması Bölüm 4.3’te verilmiştir.

3.6 Yeni MR Sıvıların Sentezlenmesi

Geliştirilen MR damperlerde kullanılmak üzere Marmara Üniversitesi Metalürji Mühendisliği Bölümünde yerli MR sıvı sentezleri gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen MR sıvı için polialfaolefin (PAO) bazlı sentetik yağ kullanılmış ve Taguchi deneysel tasarım metoduyla optimum sıvı tespit edilmeye çalışılmıştır. Sentetik yağın yoğunluğu 0.842 gr/cm^3 ve 40°C ’deki viskozitesi ise 68 cSt’dur. Bu çalışmada PAO’lerin tercih edilmesinin sebebi, başka bir sınıf hidrokarbon yağ olan mineral yağlarına göre çok daha üstün özellik taşımalarıdır. Bunlar arasında aşağıdaki özellikler sayılabilir:

- Oksitlenmeye karşı daha stabil
- Üstün volatilité
- Mükemmel düşük sıcaklık viskoziteleri
- Oldukça yüksek viskozite endeksi
- Kaliteli baz yağ
- Mükemmel akma noktası

Yüzey aktif madde olarak bir çeşit dikarboksilik asit kullanılmıştır. Bu deneylerde öğütme zamanı ve yüzey aktif madde miktarı da bir değişken olarak verilmiştir. Tablo 19’da bu değişkenlerin oranları görülmektedir.

Tablo 19. MR sıvı değişkenleri

Manyetik faz miktarı (wt %)	65	75	85
Nano Fe3O4 miktarı (wt%)	0	1.5	3
Yüzey aktif madde (wt %)	0	5	10

Öğütme zamanı (saat)	24	36	48
----------------------	----	----	----

Tablo 20'de Taguchi deneysel tasarım metoduna göre hazırlanan MR sıvıların reçetesi verilmiştir.

Tablo 20. Hazırlanacak MR sıvıların içerik ve miktarları

	Manyetik faz miktarı (wt %)	Nano Fe ₃ O ₄ miktarı (wt%)	Yüzey aktif madde (wt %)	Öğütme zamanı (saat)	Yağ(wt%)
MRF1	65	0	0	24	35
MRF2	65	1.5	5	36	28.5
MRF3	65	3	10	48	22
MRF4	75	0	5	48	20
MRF5	75	1.5	10	24	13.5
MRF6	75	3	0	36	22
MRF7	85	0	10	36	5
MRF8	85	1.5	0	48	13.5
MRF9	85	3	5	24	7

MR sıvılar geleneksel seramik yöntemleri ile hazırlanmıştır. Taşıyıcı yağın içerisine yüzey aktif madde eklenerek 500 rpm'de 5 dakika mekanik mikser ile karıştırılmış, daha sonra manyetik faz eklenerek 3000 rpm'de 10 dakika daha karıştırılmıştır. Hazırlanan süspansiyona 5 mm çapında öğütücü bilyalar eklenip öğütücüde Tablo 20'de verilen sürelerde öğütülmüştür. Bu işlem aglomerasyonların kırılmasına ve daha homojen bir süspansiyon elde edilmesine olanak sağlamıştır. Manyetik faz olarak BASF firmasından temin edilen SQ tip %99.5 saflıkta ve tane boyutu 3.5 µm olan demir tozu kullanılmıştır.

3.6.1 Reolojik Ölçümler

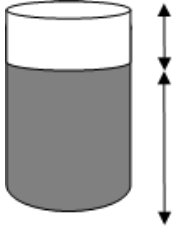
Hazırlanan MR sıvıların akma gerilmeleri ve viskoziteleri Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan ve Bölüm 3.3'te açıklanan Anton Paar MCR 302 model reometre ile manyetik alan altında ölçülmüştür. Bu ölçümlerde manyetik akı yoğunluğu 0.8 T değerine kadar çıkmıştır.

3.6.2 Çökelme Testleri

MR sıvıların çökelme deneyleri belli bir miktar numunenin mezürlere konarak belli zaman aralıklarında manyetik fazın ne kadar aşağı indiğinin tespitiyle yapılır ve Şekil 69'da gösterilen çökelme oranı;

$$\text{Çökelme oranı} = 1 - [A/(A + B)]$$

formülü ile hesaplanır.



A Saydam taşıyıcı sıvı (A)

B MR akışkanı (çökelen) (B)

Şekil 69. Çökeltme miktarının hesaplanması

4. MR DAMPER İMALATI VE PERFORMANS TEST SİSTEMİ

4.1 MR Damper İmalatı

Kavramsal tasarımı yapılan ve analizler yardımıyla en uygun geometrisi belirlenen tek ve çift milli damper, üç aşamada oluşturulmaktadır. Çoğu silindirik elemanlardan oluşan MR damper parçaları tornada belirtilen geçme ve yüzey toleranslarına dikkat edilerek torna tezgâhında imal ettirilmiştir. Özellikle MR damper performansını etkileyen piston kafası malzemesi düşük karbonlu çelikten (St37/2), dış silindir ise H8 toleranslı honlu borudan (St52) imal ettirilmiştir. Manyetik alanın etki etmemesi gereken yerlerde alüminyum veya plastik malzeme kullanılmıştır.

İmalat kolaylığı ve kavitasyonu engellemek amacıyla MR damperin piston başının her iki tarafına 2mmx30° pah oluşturulmuştur. Bu sayede akışkanın kanal kısmında daha kolay akması sağlanmış ve aktif bölge biraz daha uzun hale gelmiştir.

İkinci aşamada ise piston başına yine elektromanyetik analiz ile elde edilen sarım sayısına uygun bobin sarılmış ve üstü epoksi ile kaplanmıştır. Epoksinin kurumasından sonra, honlanmış borunun iç çapı referans alınarak piston başı arasında belirlenen akış boşluğuna göre piston başı belirlenen ölçüye getirilmiştir. Ardından poliüretan (PU) malzemedan boğaz keçesinin ve burç yataklarının montajı, keçenin yüzeyine zarar vermeden yapılmıştır.

Ön imalat ve montaj imalat işlemlerinden sonra parçalar bir araya getirilerek montaj işlemi tamamlanmıştır. Damper içine MR sıvı doldurulmadan önce MRF 122EG ve detayları Tablo 20'de verilmiş MRF5 sıvıları en az 15 dakika karıştırılmış ve 15 dakika dinlenmeye bırakılmıştır. İmalatı yapılan damperlerin kodları ve içine konulan MR sıvılar Tablo 21'de ve bunların resimleri Şekil 70-Şekil 72'de verilmiştir.

Tablo 21. Üretilen damperler ve içine konulan sıvılar

No	Damper kodu*	MR Sıvı
DAMPER 1	SAU-MRD-TM-Pr1	MRF 122EG
DAMPER 2	SAU-MRD-TM-Pr2	MRF5
DAMPER 3	SAU-MRD-CM-Pr3	MRF5

* TM: Tek milli, CM: Çift milli, Pr: Prototip

Dolum işlemi tamamlanan damperler en az 5 dakika alıştırma amacıyla damper alıştırma cihazında çalıştırılmıştır. Daha sonra damper test cihazında performans testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 70. Damper 1 (SAU-MRD-TM-Pr1)



Şekil 71. Damper 2 (SAU-MRD-TM-Pr2)



Şekil 72. Damper 3 (SAU-MRD-ÇM-Pr3)

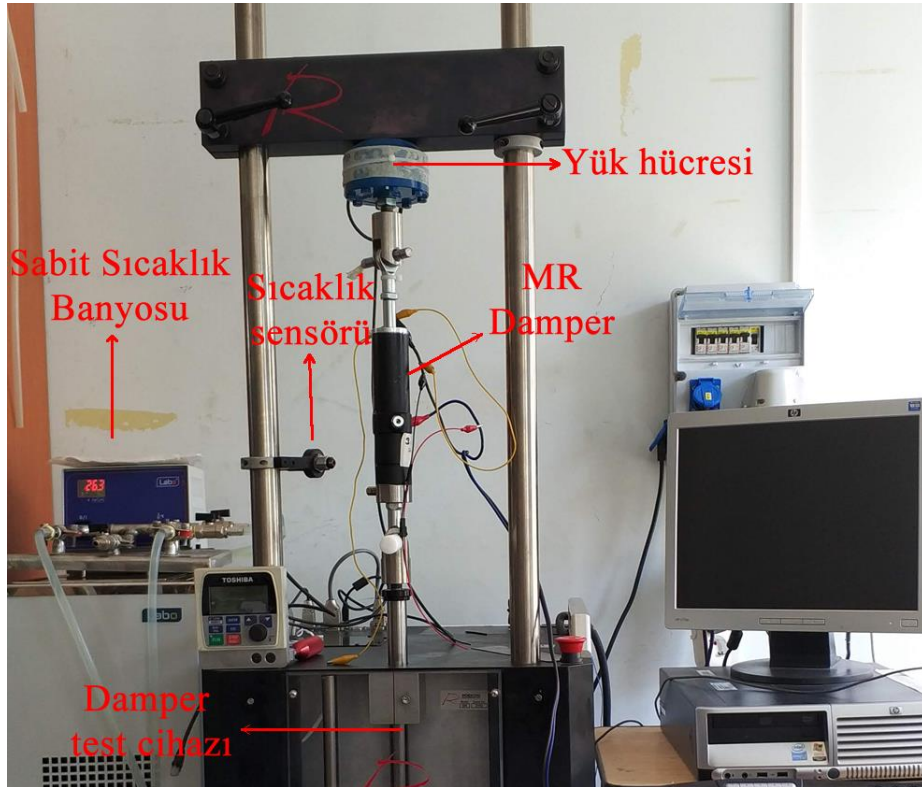
Ayrıca proje kapsamında bina testlerinde kullanılmak ve üretilen damperlerin performanslarını kıyaslamak için Lord Firmasının RD-8041-1 kodlu MR damperi de (Lord Damper) kullanılmıştır (Şekil 73).



Şekil 73. Lord RD-8041-1 MR Damper

4.2 MR Damper Performans Test Sistemi

Üretilen damperler, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Akışkanlar Mekaniği laboratuvarında yer alan Roehrig MK-2150 test cihazı (Şekil 74) ile test edilmiştir. Test cihazını kontrol etmek ve verileri toplamak için SHOCK 6.3 adlı bir yazılım kullanılmıştır. Akım kaynağı olarak dijital kontrollü programlanabilir GWinstek PPE 3223 güç kaynağı kullanılmıştır. Testler sırasında damper yüzeyindeki sıcaklık, test cihazındaki temassız sıcaklık sensörü ile ölçülmüştür. MR damperinin sönümleme kuvveti 22 kN kapasiteli yük hücresi ile yer değiştirmesi ise doğrusal değişken yer değiştirme dönüştürücüsü (LVDT) ile ölçülmüştür.



Şekil 74. Deney düzeneği genel görünüşü

Her bir damper için 4 ayrı hız ve 4 farklı sıcaklıkta, ayrıca 13 farklı akım değerinde testler gerçekleştirilmiştir (Tablo 22). Ayrıca bu deneylerden elde edilen veriler yapay sinir ağları ters MR damper modelinin eğitilmesinde kullanılmıştır.

Tablo 22. MR damper performans deney tasarımı

Parametre	Değerler
Hız [m/s]	0.05-0.1-0.15-0.2
Sıcaklık [°C]	15-30-45-60
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

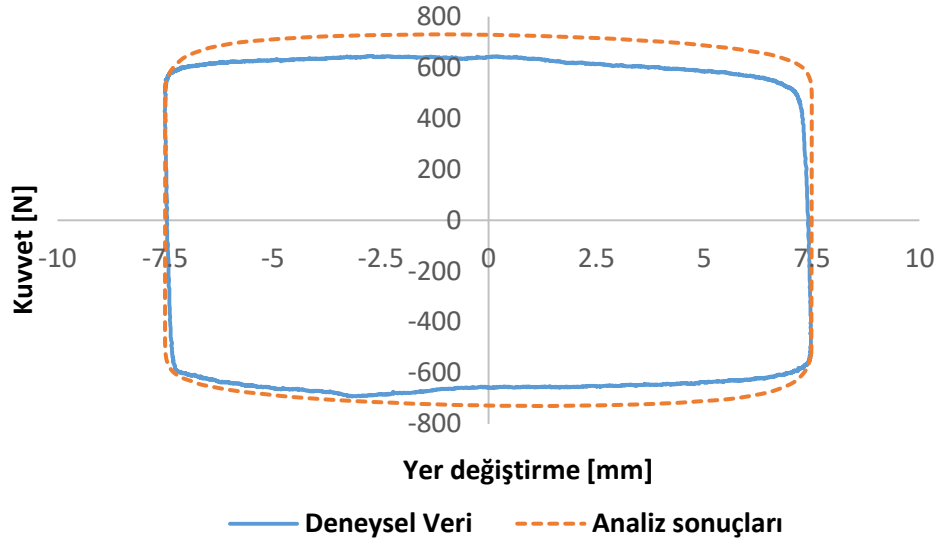
MR damperin performans testlerinde, Damper 1 için sürtünme kuvveti **53 N** ölçülmüştür.

4.3 HAD Modelinin Doğrulanması

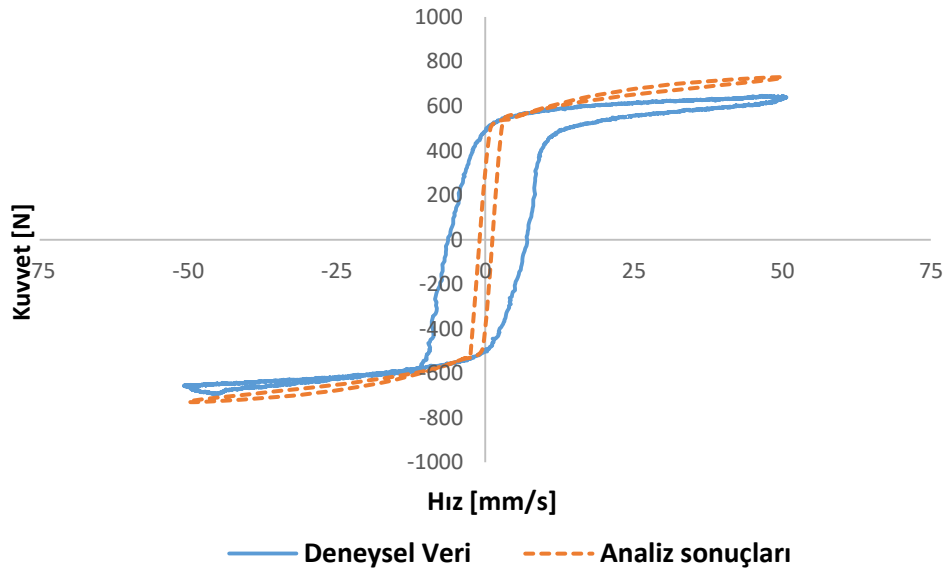
Yapılan performans testleri ile HAD sonuçları, deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Sonuçlar Tablo 23, Şekil 75 ve Şekil 76'da gösterilmiştir. Optimizasyonda sürtünme kuvvetleri 150 N tahmin edildiği fakat gerçekte bu kuvvetin 53 N olmasından dolayı, damper kuvveti sıfır akım kuvveti ve dinamik oranlar her iki durum için de ayrı ayrı ifade edilmiştir.

Tablo 23. İmal edilen MR damperin deneysel ve analiz sonuçları

Parametre	Aday nokta 6	
	Analiz	Deneysel
Aktif bölge uzunluğu (t_k)	6 mm	6 mm
Kanal genişliği (g)	0,8 mm	0,8 mm
Maksimum manyetik akı yoğunluğu (B)	0,57722 T	-
Gerçek damper kuvveti (F)	730 N	692,85 N
Optimizasyona göre damper kuvvet (F)	827 N	789,85 N
Gerçek sıfır akım kuvveti (F_μ)	61,8 N	74,25 N
Optimizasyona göre sıfır akım kuvveti (F_μ)	158,8 N	171,25 N
Gerçek dinamik oran (F/F_μ)	11,81229	9,33131
Optimizasyona göre dinamik oran (F/F_μ)	5,20780	4,61226



Şekil 75. İmal edilen MR damperin hız-yerdeğiştirme grafiklerinin kıyaslanması



Şekil 76. İmal edilen MR damperin hız-kuvvet grafiklerinin kıyaslanması

Elde edilen sonuçlarda HAD analizlerinin maksimum kuvveti deneysel verileri %5.4 fark ile yakaladığı görülmektedir. İmalat sürecindeki toleranslar dikkate alındığında deney sonuçlarının analiz sonuçlarının altında çıkması beklenen bir durumdur. Dolayısıyla üretilen damperler için kullanılan sayısal modelin yeterli olduğuna karar verilmiş ve bina modelleri için yapılan sarsma testlerinde üretilen bu damperler kullanılmıştır.

5. BİNA MODELLERİ VE SARSMA TESTLERİ

5.1 Modellerin Üretim Süreci

Bu proje kapsamında sarsma tablası deneylerinde kullanılmak üzere 5-6-7 ve 8 katlı dört adet ölçeklenmiş çelik yapı modeli imal edilmiştir. Ölçeklenmiş çelik yapı modellerinin oluşturulmasında literatürden seçilen 5 katlı gerçek bir betonarme yapı dikkate alınmıştır. Ölçeklenen 5 katlı çelik yapı modeli, 5 katlı betonarme yapının dinamik karakteristiklerini yansıtacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yapı modelinin kolonları 6x15 mm ebatlarında ve akma dayanımı 750 MPa olan yüksek mukavemetli çelikten imal edilmiştir. 5 katlı çelik yapı modelinin yapısal özellikleri korunarak 6-7 ve 8 katlı çelik yapı modelleri oluşturulmuştur (Şekil 77). Kat döşeme malzemesi olarak 15 mm kalınlığında St 37 çeliği kullanılmıştır. Çelik modellerdeki tüm bağlantılar kaynaklı yapılmıştır. Hedeflenen frekans değerini sağlamak için her katta döşeme ağırlık merkezine 13.2 kg ağırlık ilave edilmiştir. Deneylerde kullanılacak olan deprem kayıtları Ölçeklenmiş çelik yapı modellerine tek doğrultu boyunca (x-ekseni) uygulanacağından diğer doğrultudaki (y-ekseni) hareket düşey çapraz elemanlarla engellenmiştir.



Şekil 77. Ölçeklenmiş çelik yapı modelleri

5.2 Test Düzenegi

Bu proje kapsamında gerçekleştirilecek olan deneylerin 1 m x 1 m boyutlarında, 250 kg kapasiteli ve tek eksenli sarsma tablası ile yapılması planlanmıştır. Fakat projede tasarlanan damperlerin kontrol edilebilir kuvvet aralığı dikkate alındığında bu boyut ve kapasitedeki sarsma tablasının yetersiz kalacağı belirlendiğinden sarsma tablası özelliklerinin değiştirilmesine karar verilmiştir. Ölçeklenmiş çelik yapı modelleri ve proje kapsamında üretilen MR damperlerin özellikleri dikkate alınarak deneysel çalışmaların yürütülebilmesi için bedeli

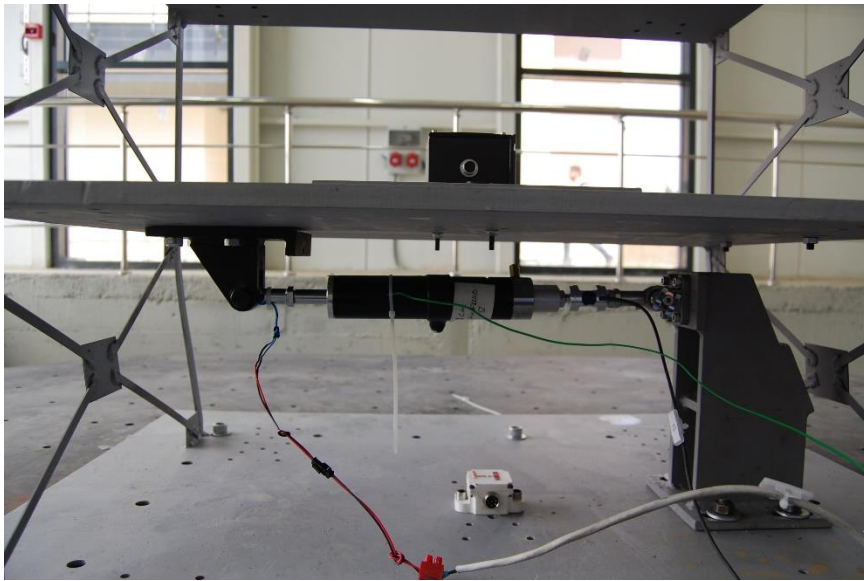
Sakarya Üniversitesi Ar-Ge bütçesinden karşılanan sarsma tablası (Motion Controlled Platform) üniversiteye kazandırılmıştır. Deneilerin gerçekleştirildiği sarsma tablası 2.5 m x 2.5 m boyutlarında, 30 kN kapasiteli ve 6 serbestlik derecesine sahiptir (Şekil 78).



Şekil 78. Sarsma tablası deney düzeneği ve 8 katlı ölçeklenmiş yapı modeli

5.2.1 MR Damperin Yerleştirilmesi

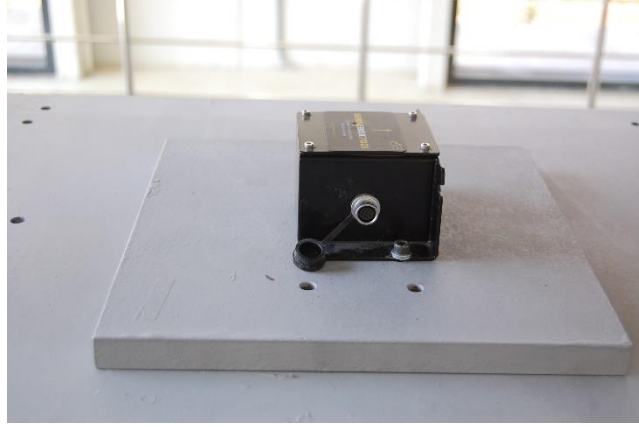
MR damper, çelik yapı modellerinin sadece 1. katlarına bağlanmıştır. MR damperin montajı için Şekil 79'da görüldüğü gibi temel seviyesinde ve birinci kat seviyesinde iki adet bağlantı elemanı imal edilmiştir. MR damperin çalışma esnasında ürettiği kuvveti görmek amacıyla MR dampere seri olarak kuvvet sensörü bağlanmıştır.



Şekil 79. MR damperin yerleşim detayı

5.2.2 İvmeölçerlerin Yerleştirilmesi

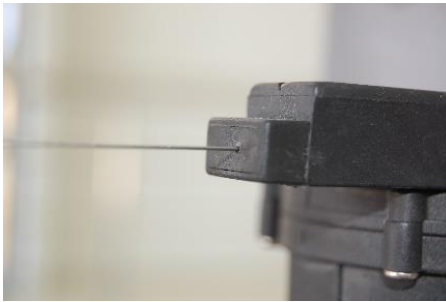
İvmeölçerler çelik yapı modellerinin her katına ve kat ağırlık merkezleri dikkate alınarak kat döşemelerine bulonlu olarak bağlanmıştır (Şekil 80). Tek eksenli ivmeölçerler çelik yapı modellerinin ilk dört katına üç eksenli ivmeölçerler ise diğer katlara yerleştirilmiştir.



Şekil 80. İvmeölçerlerin kat döşemelerine bağlantı detayı

5.2.3 İpli Pozisyon Ölçerlerin Yerleştirilmesi

Çelik yapı modellerinin katlarında oluşacak olan yerdeğişmeler ipli pozisyon ölçerler yardımıyla ölçülmüş olup bu pozisyon ölçerler sarsma tablası üzerinde yerleştirilmiş olan rijit kuleye bağlanmıştır. Sarsma tablası üzerine konumlandırılan bu kule, rijit kütle hareketi yapacak şekilde tasarlanmıştır. İpli pozisyon ölçerler sarsma tablasının hareket yönüne paralel olacak şekilde katlara ve rijit kuleye koruma kutusu ile beraber bağlanmıştır (Şekil 81).



a) İpli pozisyon ölçer



b) Rijit kuleye bağlantı

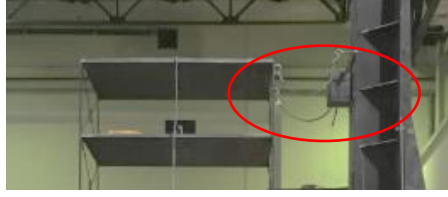


c) Koruma kutusu

Şekil 81. İpli pozisyon ölçerler detayları

Deneyler esnasında oluşabilecek büyük yerdeğişmelerin ve risklerin önlenmesi amacıyla rijit kule ile yapı modeli arasında 25 cm'lik bir mesafe bırakılmıştır. Ayrıca, bu önlemlere ek olarak yapı modellerinin en üst katından rijit kuleye 2 adet çelik halat ile bağlanmıştır. Bu çelik halatlar

serbest halde olup çelik yapı modelinin son katın ipli pozisyon ölçer strokunu aşmasına yönelik olarak güvenlik amacıyla yerleştirilmiştir. (Şekil 82).



Şekil 82. Binayı korumak için kullanılan çelik halatlar

5.3 Modellerin Sarsma Tablasına Montajı

DeneySEL çelik yapı modelleri risk oluşturmayacak şekilde ağırlık merkezlerine yakın bölgelerden vidalandıktan sonra 2 ton kapasiteli bir tavan vinci yardımıyla sarsma tablasının üzerine Şekil 83’de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 83. Model yapı montajı

5.4 Testlerin Yürütülmesi

5.4.1 Deney Tasarımı

MR damperler ile yarı aktif olarak kontrol edilmiş 4 farklı yapı modelinin (5-6-7 ve 8 katlı) dinamik deneyleri iki farklı deprem etkisi altında gerçekleştirilmiştir (Şekil 84). Tablo 24’de

verilen deney matrisinde görüldüğü gibi her bir yapı modeli iki farklı deprem ivmesi etkisi altında, 4 farklı özellikteki MR damper ile kontrollü ve kontrolsüz olmak üzere deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her bir MR damper için 3 farklı kontrol algoritması kullanılmıştır.

Tablo 24. Deney Matrisi

Bina Modeli Kat Sayısı	Deprem İvmesi	Kontrol Algoritması	MR Damper Tipi
5-6-7-8	El-Centro	Kontrolcüsüz	-
		Enerji Tabanlı	Lord-Damper
			Damper-1
			Damper-2
		PID	Damper-3
			Lord-Damper
			Damper-1
		Kayma kipli	Damper-2
			Damper-3
			Lord-Damper
			Damper-1
		Kocaeli	Kontrolcüsüz
	Enerji Tabanlı		Lord-Damper
			Damper-1
			Damper-2
	PID		Damper-3
Lord-Damper			
Damper-1			
Kayma kipli	Damper-2		
	Damper-3		
	Lord-Damper		
	Damper-1		

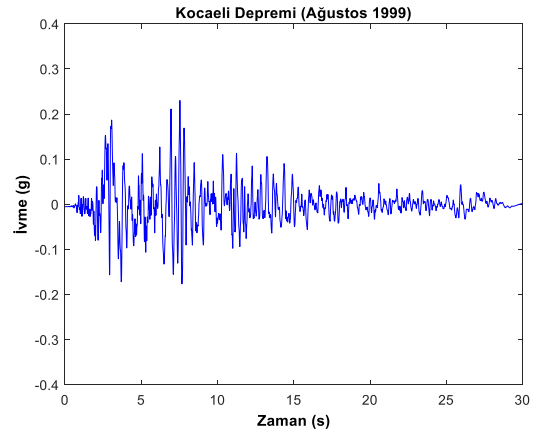
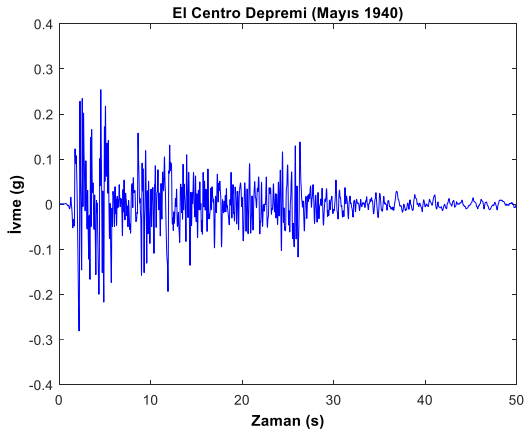
5.4.2 Deprem Verileri

Yer hareketlerini simule etmek amacıyla 18 Mayıs 1940 Imperial Valley El-Centro istasyonunda kaydedilen Kuzey-Güney bileşeni ve 17 Ağustos 1999 Kocaeli Yarımca-Petkim istasyonunda kaydedilen Doğu-Batı bileşeni deprem ivme kayıtları olarak kullanılmıştır (Şekil 84). MR damperlerin, yapı modellerinin deprem davranışında sağladıkları iyileştirmenin daha sağlıklı bir şekilde ölçülebilmesi için yapı modellerinin elamanlarının elastik bölgenin içinde

kalmasına özen gösterilmiştir. Bu amaçla deprem ivmeleri yapı modellerine ölçeklendirilerek uygulanmıştır (Tablo 25).

Tablo 25. Yapı modellerine uygulanan deprem ivmelerinin ölçeklendirme katsayıları

Kullanılan Deprem Kayıtları	Ölçeklendirme Katsayıları			
	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



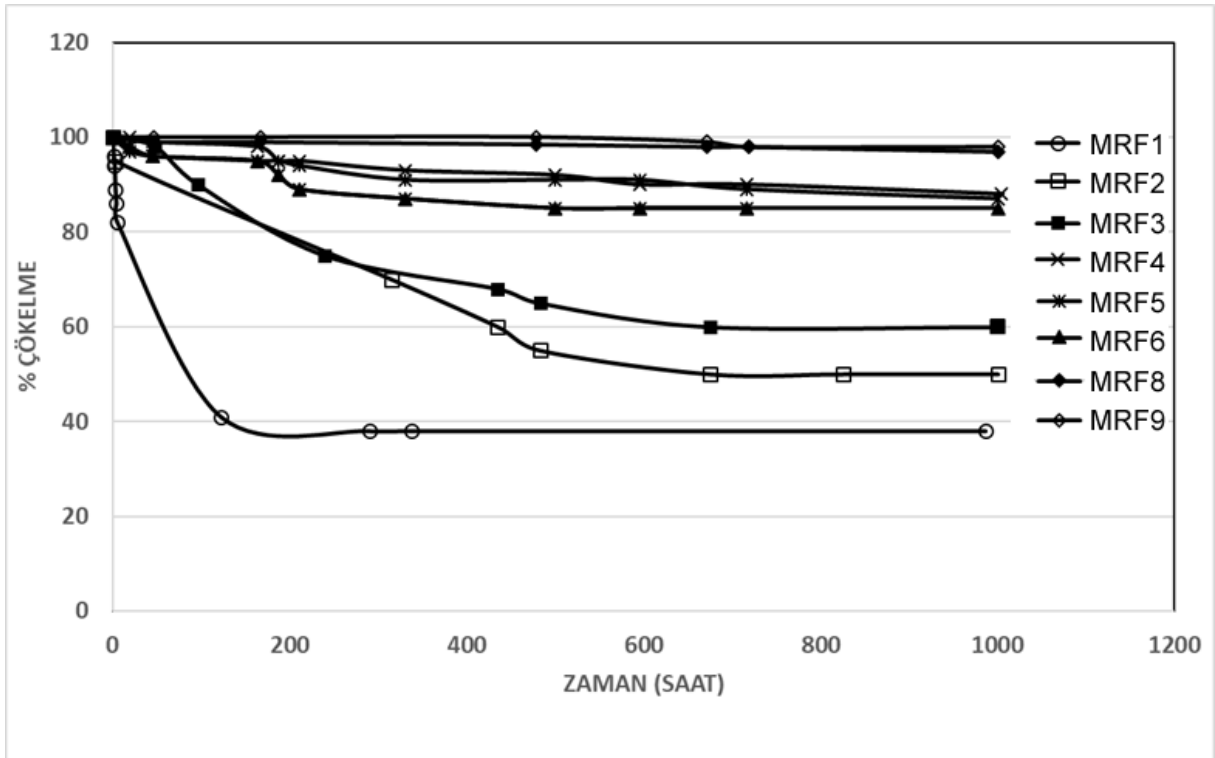
Şekil 84. Sarsma tablası deneylerinde kullanılan deprem ivmeleri

6. BULGULAR

Yeni sentezlenen MR Akışkanların Çökeltme Durumlarının İncelenmesi

Tablo 20'de Taguchi deneysel tasarım metoduna göre hazırlanan MR sıvılarının reçetesi verilmiştir.

Tablo 20 Tablo 19'da verilen konsantrasyonlarda sentezlenen MR sıvılarının çökeltme grafikleri incelendiğinde, yüzey aktif madde ve nano Fe_3O_4 partiküllerinin çökmeyi büyük oranda azalttığı görülmüştür. MRF1 yüzey aktif madde ve nano Fe_3O_4 partiküllerinden yoksun olduğu için çökeltme hem çabuk hem de büyük oranda meydana gelmiştir, ayrıca manyetik fazın düşük konsantrasyonda olması çökmeyi hızlandırmıştır. Grafiğe bakıldığında ikinci en fazla çökeltme MRF2'de görülmektedir. Aynı demir miktarına (%65) sahip MRF3'de ise, her ne kadar bu numune daha sonra yapılmış ise de, çökeltmesi MRF2'ye göre daha yavaş seyretmektedir. Bu durumda MRF2'deki daha fazla çökeltmenin yüzey aktif madde ve nano Fe_3O_4 miktarlarının daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çökmeme davranışı açısından en başarılı sıvılar manyetik fazın %75 ve %85 olan MRF4 ile MRF8 arasındaki numunelerdir (Şekil 85). MRF6, MRF7 ve MRF8 en az çökmeyi gösteren numunelerdir. Bunun başlıca sebebi daha fazla Fe miktarı (%85) olduğu düşünülmektedir. Gözlemlerimize dayanarak bu numunelerin viskozitelerinin yüksek olduğunu söyleyebiliriz.



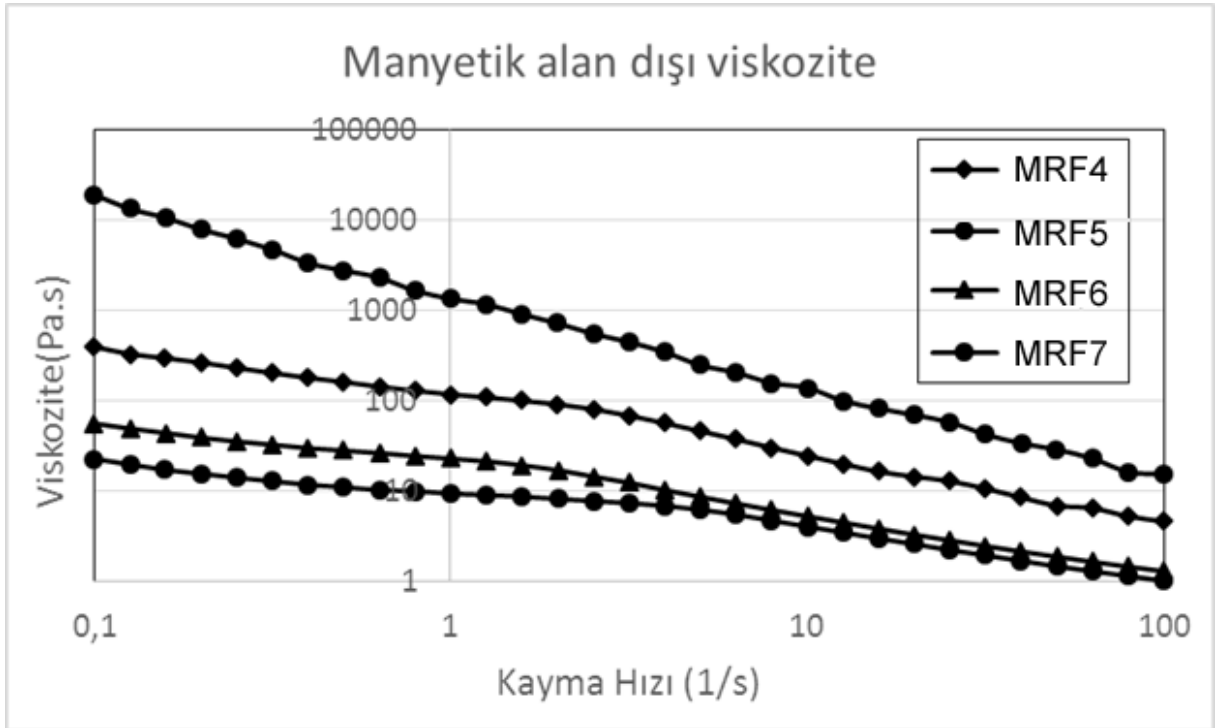
Şekil 85. MR akışkanların çökeltme özellikleri

%75 ve %85 lik MR akışkanlarında Fe_3O_4 nanopartiküllerin eklenmesinin ya da öğütme sürelerinin çökme üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. %75'lik numunelerde çökme görülse de tabanda çökmeden dolayı oluşabilecek sert bir manyetik faz tabakasına rastlanmamıştır; çökme gevşek bir çökmedir ve küçük bir mekanik kuvvetle tekrar dağıtılabilmektedir.

MRF1, MRF2 ve MRF3'ün kısa sürede çok fazla çökmesinden dolayı bu numunelerin viskoziteleri doğru sonuç vereceği düşünülmediği için ölçülmemiştir. Sedimentasyon açısından en iyi sonuç veren numuneler ölçülmüştür.

MR akışkanlarının etkisi manyetik alan altında akma gerilmesinin manyetik alan dışındaki viskoziteye oranı olarak verilir. Bu durumda düşük viskozite ve yüksek akma gerilmesi MR akışkanlarının aranan özelliğidir. Bir sonraki aşamada viskozite ve akma gerilmeleri ölçülmüştür.

Çökme özelliklerinden yola çıkarak %75'lik ve %80'lik numunelerin viskoziteleri oda sıcaklığı olan $25^{\circ}C$ 'de ölçülmüştür. MR sıvılarının hepsi incelen akışkan özelliği göstermiştir. %85'lik MRF7 sıvısı en yüksek viskoziteye sahiptir (Şekil 86). En düşük ve en yüksek kayma gerilmesinde viskozite değerleri Tablo 26'da verilmiştir.

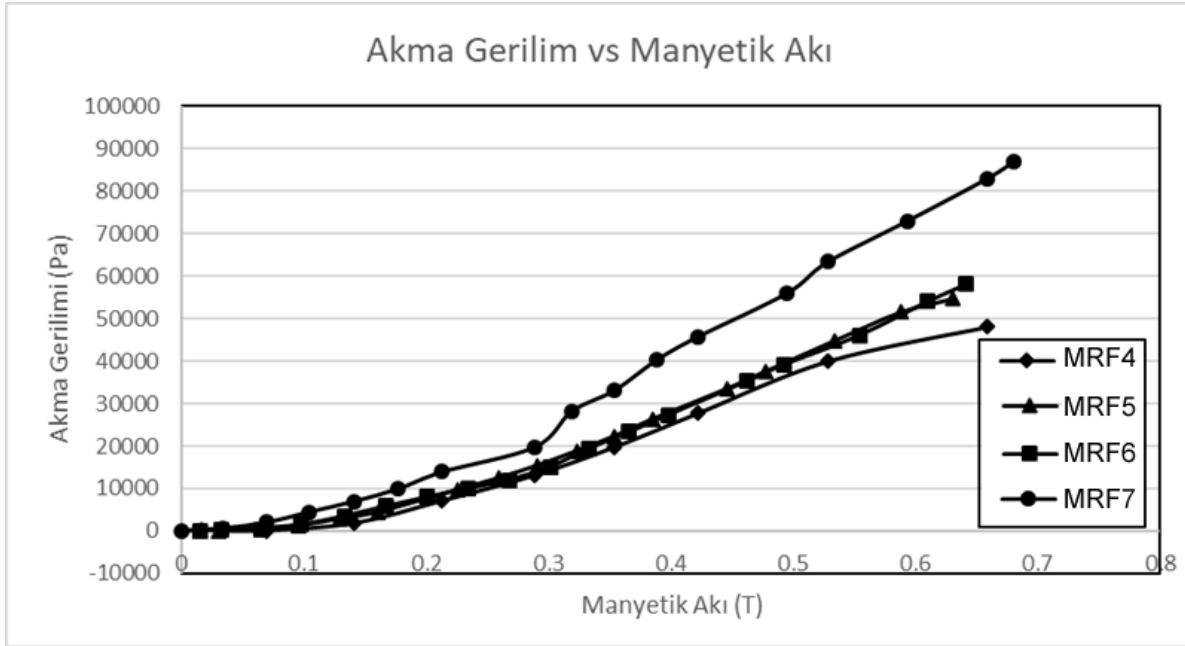


Şekil 86. Viskozitenin kayma hızına göre değişimi

Tablo 26. MR akışkanlarının viskozite değerleri

	VİSKOZİTE (Pa.s)	
	0.1 s ⁻¹	100 s ⁻¹
Deney 4	393	4.5
Deney 5	22.6	1.29
Deney 6	55.5	1.40
Deney 7	18900	15.3

MR Sıvıların manyetik alana bağlı olarak yapılan kayma gerilmesi-kayma hızı ölçümleri ile akma gerilmeleri elde edilmiştir. Şekil 87’de akma gerilmelerinin manyetik alan ile değişimi verilmiştir. %85’lik MR akışkanı (MRF7) en yüksek akma gerilmesine sahiptir. Bu numune için 0.7 T manyetik akı yoğunluğunda akma gerilimi yaklaşık 90 kPa olarak ölçülmüştür. %75’lik MR sıvılarda (MRF5 ve MRF6) ise 0.65 T manyetik akı yoğunluğu altında yaklaşık 60 kPa akma gerilimi tespit edilmiştir. MRF4 sıvısında ise akma gerilmesinde hafif bir düşüş gözlenmiştir.



Şekil 87. MR akışkanlarının akma gerilmelerinin manyetik alan ile değişimi

Fe₃O₄ nanomanyetik tozun eklenmesinin ya da öğütme zamanının değiştirilmesinin kayda değer bir etki yapmadığı görülmüştür.

Bütün bu verilerin ışığında %65’lik ve %85’lik sıvıların MR damper sistemi için çok uygun olmadığı görülmüştür, zira %65’lik sıvı çok çabuk çökelmektedir ve %85’lik sıvının da

viskozitesi yüksektir. Her ne kadar %85'lik sıvının akma gerilmesi fazla ise de yüksek dinamik viskozite sürtünmeyi arttırdığı için damper uygulamalarında bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu durumda üretilen optimum sıvılar MRF4, MRF5 ve MRF6 olarak isimlendirilen %75'lik sıvılardır. Proje kapsamında imal edilen MR damperlerin ikisinde MRF5 sıvısı tercih edilmiştir.

6.1 MR Damper Test Sonuçları

Şekil 88Şekil 91'de proje kapsamında yapı üzerindeki testlerinde kullanılan MR damperlerin Bölüm 4.2'de açıklanan MR damper performans test sistemi ile yapılan testleri neticesinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafikleri görülmektedir.

Bu sonuçlara göre Damper 1'den en yüksek akımda piston orta konum konumdayken elde edilen maksimum kuvvet değeri yaklaşık 1182 N değerindedir. Aynı koşullarda Damper 2 1495 N değerini sağlarken, Damper 3 1177 N değerindedir. Aynı yapıya sahip olan Damper 1 ile Damper 2 arasında oluşan farkın sebebi Damper 2'de kullanılan ve bu proje kapsamında geliştirilmiş olan MRF5 sıvısıdır.

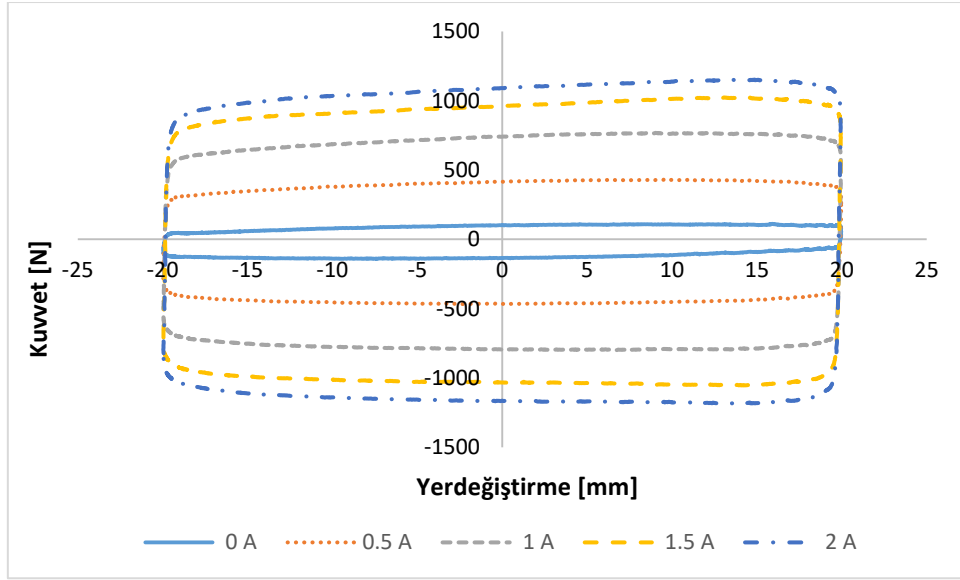
Damper 1 ve Damper 2'in artan akımla birlikte bir önceki akım değerindeki kuvvete göre artış oranları Tablo 27'de verilmiştir. Buna göre Damper 2 düşük akım değerlerine Damper 1'e yakın kuvvetler üretirken yükselen akım değerlerinde Damper 2'nin sönüm kuvveti Damper 1'e göre artmaktadır. Bu artış MRF5 sıvısının yüksek akma gerilmesine sayesinde olmaktadır. MRF5 sıvının kullanıldığı ancak yapıları farklı olan Damper 2 ve Damper 3'e baktığımızda, Damper 3'ün 0 A akım altındaki kuvvet değeri Damper 2'ye göre 2.7 kat daha fazladır, bu bize çift milli damperin mekanik sürtünme değerinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Ancak ilk artış oranından sonra diğer oranların yakın olduğu görülmektedir. Ticari bir ürün olan tek milli LORD RD-8041-1 damperinin değerleri Damper 3'e oldukça yakındır. Aynı zamanda tüm damperin benzer bir doyum karakteristiğine de sahip oldukları bu değerler vasıtasıyla görülmektedir.

Şekil 88Şekil 91 incelendiğinde LORD RD-8041-1'in düşük hızlardaki histerisizliğinin diğer damperlere göre daha büyük olduğu görülmektedir. Ancak LORD RD-8041-1'in yüksek hızlarda neredeyse histerisizlik görülmediği halde diğer damperlerde aynı hız değerlerinde histerisizlik artan akımla birlikte daha da artmıştır.

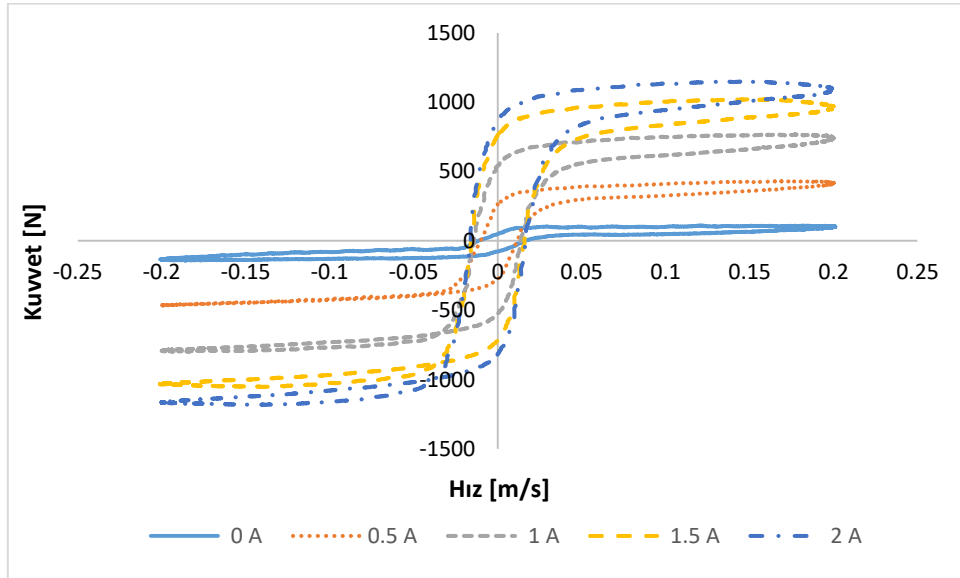
Tablo 27. Damper 1, Damper 2, Damper 3 ve LORD RD-8041-1'in artan akıma karşılık kuvvet artış oranları

Damper 1	Damper 2	Damper 3	LORD RD-8041-1
----------	----------	----------	----------------

0.5A	401.7%	1017.1%	275.7%	272.4%
1A	80.6%	86.2%	74.8%	75.0%
1.5A	31.1%	24.9%	32.1%	31.7%
2A	13.3%	12.2%	12.3%	12.2%

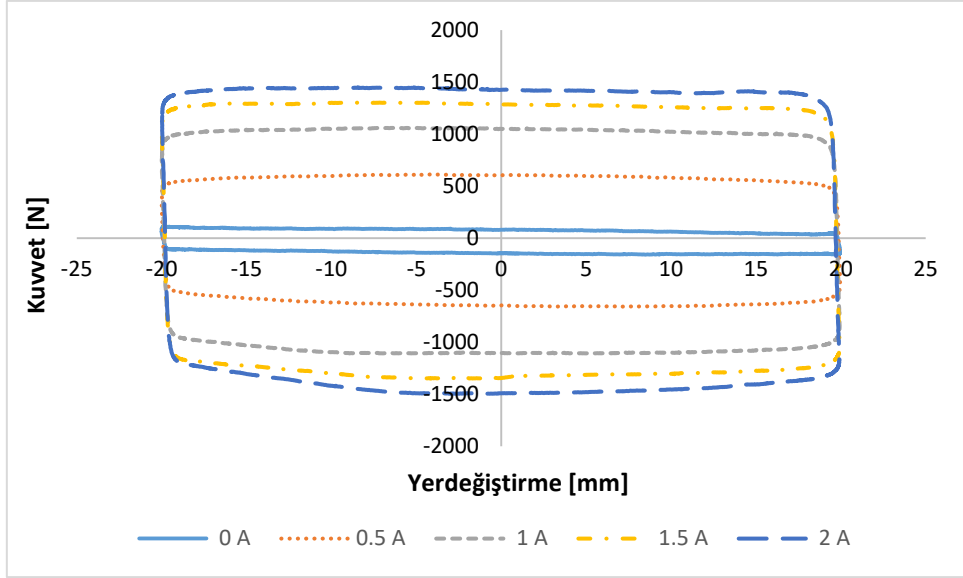


(a)

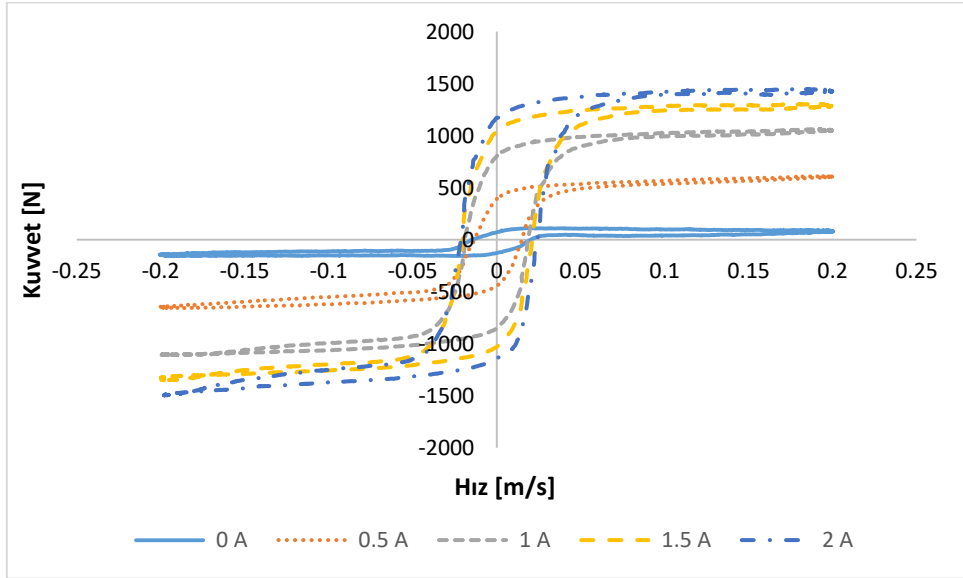


(b)

Şekil 88. Damper 1'in (a) Kuvvet-Yerdeğiştirme ve (b) Kuvvet-Hız grafikleri

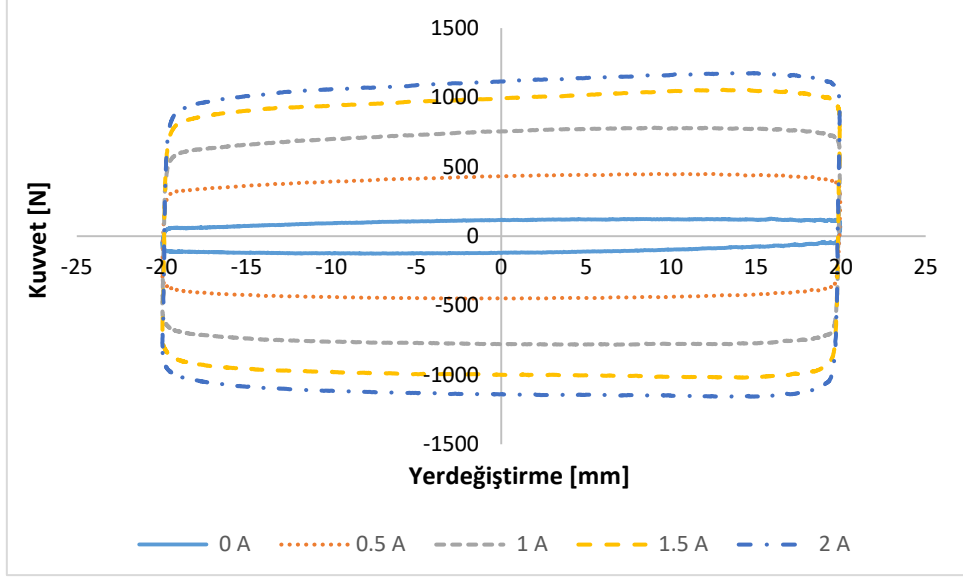


(a)

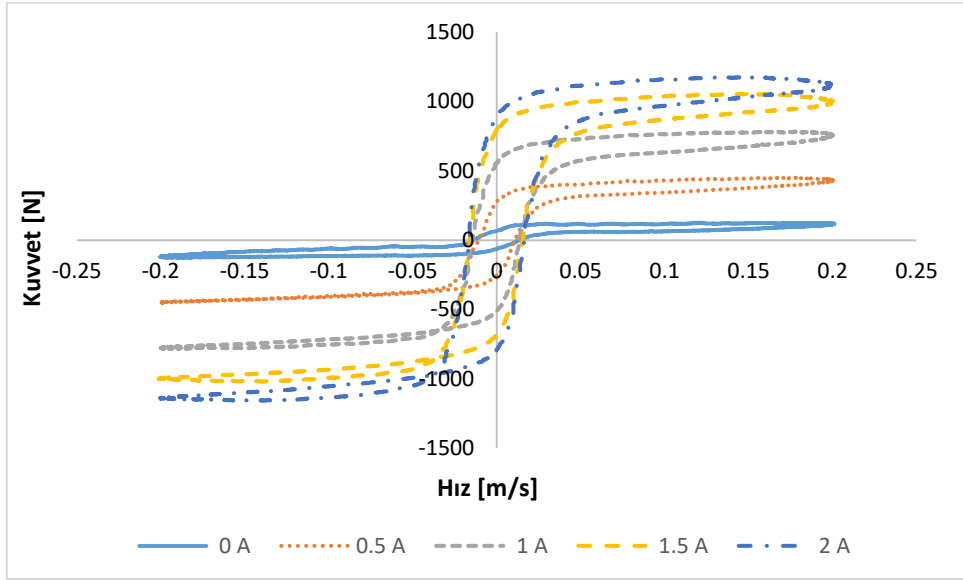


(b)

Şekil 89. Damper 2'in (a) Kuvvet-Yerdeğiştirme ve (b) Kuvvet-Hız grafikleri

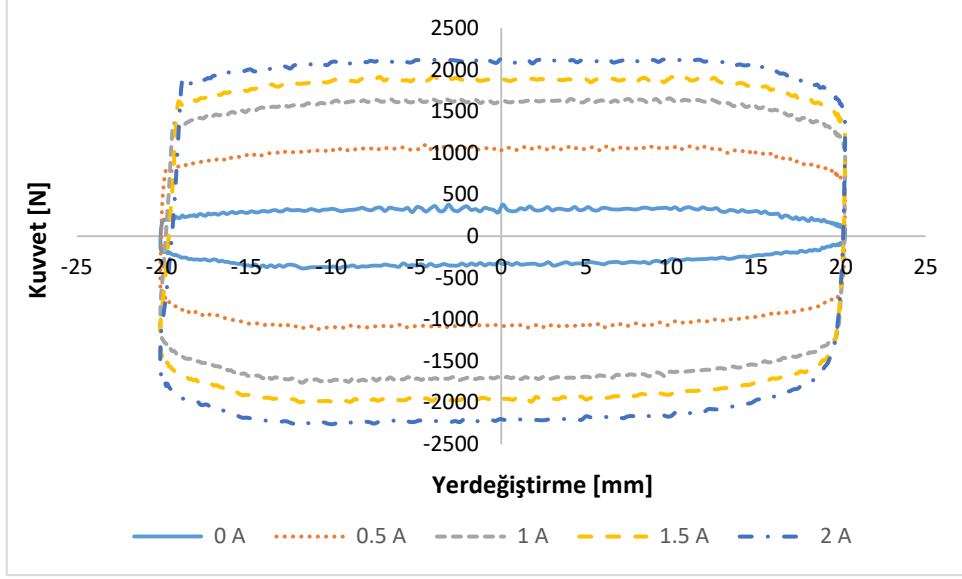


(a)

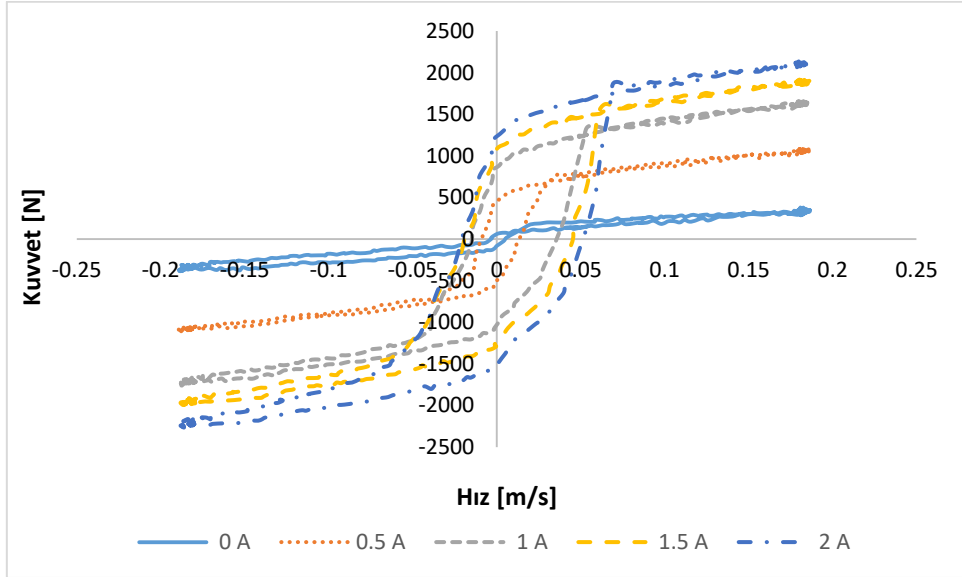


(b)

Şekil 90. Damper 3'ün (a) Kuvvet-Yerdeğiştirme ve (b) Kuvvet-Hız grafikleri



(a)



(b)

Şekil 91. LORD RD-8041-1 Damper'in (a) Kuvvet-Yerdeğiştirme ve (b) Kuvvet-Hız grafikleri

6.2 Çelik Yapı Modelleri Sarsma Tablası Test Sonuçları

Deprem etkisi altındaki yapıların MR damperler ile yarı aktif olarak kontrol edilmesi durumunda yapıların performanslarındaki iyileşmenin belirlenmesi amacıyla sarsma tablası yardımıyla dinamik deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde 5-6-7 ve 8 katlı ölçeklenmiş çelik yapı modelleri kullanılmıştır. Ölçeklenmiş çelik yapı modellerinin oluşturulmasında literatürden seçilen 5 katlı gerçek bir betonarme yapı dikkate alınmıştır. Ölçeklenen 5 katlı çelik yapı modeli, 5 katlı betonarme yapının dinamik karakteristiklerini yansıtacak şekilde tasarlanmış ve

bu 5 katlı çelik yapı modelinin yapısal özellikleri korunarak 6-7 ve 8 katlı çelik yapı modelleri oluşturulmuştur.

MR damper ile yarı aktif kontrollü yapıların performanslarının belirlenebilmesi için literatürden seçilen karşılaştırma indeksleri (Ohtori vd., 2004) kullanılmış ve bu indekslerden ilk 6 indeks (J1-J6) seçilmiştir. Bu indeks değerleri içerisinde J_1 ve J_4 görelî kat yer değiştirmeleri, J_2 ve J_5 kat ivmeleri ve J_3 ve J_6 ise taban kesme kuvvetlerine karşılık gelmektedir.

$$J_1 = \max \left[\frac{\max_{t,i} \frac{|d_i(t)|}{h_i}}{\delta^{max}} \right]$$

$$J_4 = \max \left[\frac{\max_i \frac{\|d_i(t)\|}{h_i}}{\|\delta^{max}\|} \right]$$

$$J_2 = \max \left[\frac{\max_{t,i} |\ddot{x}_{ai}(t)|}{\ddot{x}_a^{max}} \right]$$

$$J_5 = \max \left[\frac{\max_i \|\ddot{x}_{ai}(t)\|}{\|\ddot{x}_a^{max}\|} \right]$$

$$J_3 = \left[\frac{\max |k_1 \cdot x_1(t)|}{|F_b^{max}|} \right]$$

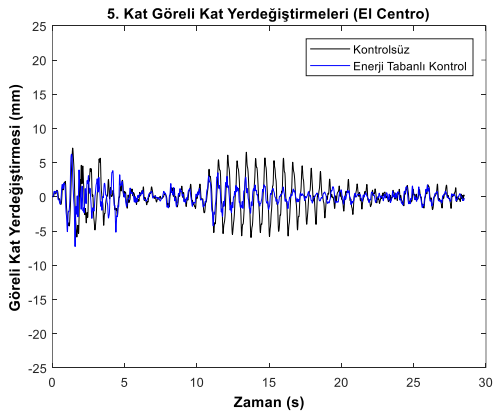
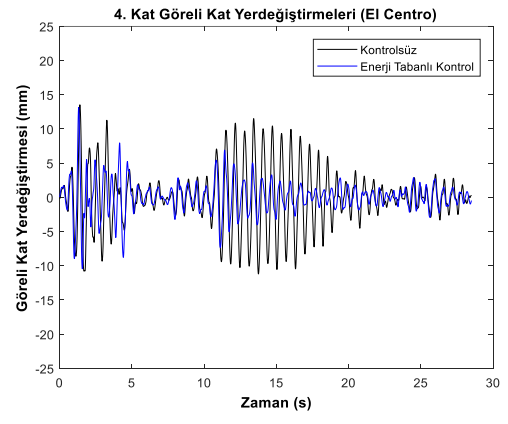
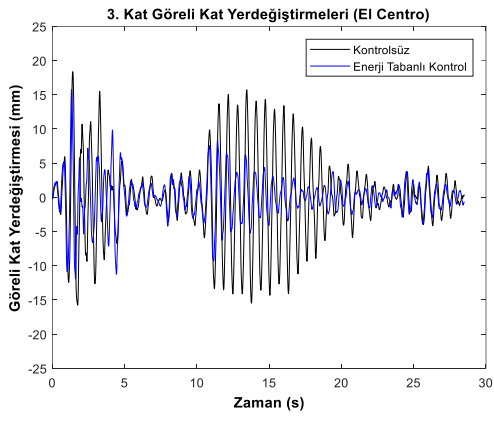
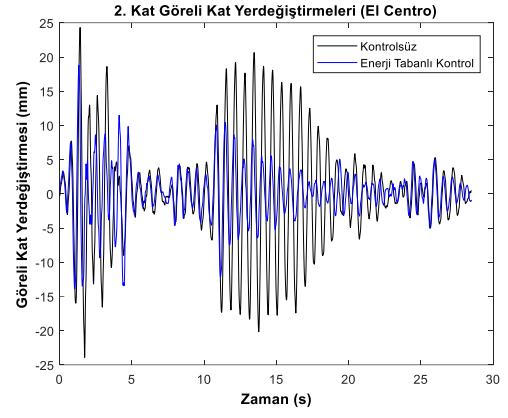
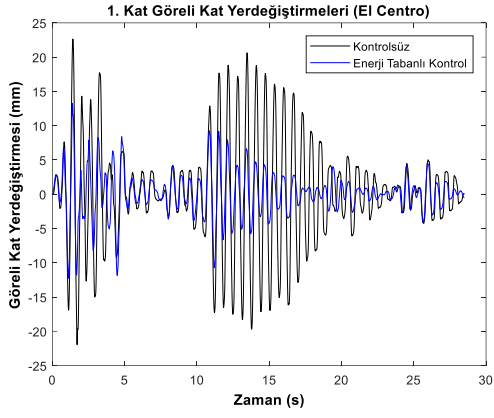
$$J_6 = \left[\frac{\|\max |k_1 \cdot x_1(t)|\|}{\|F_b^{max}\|} \right]$$

Bu indeks değerlerinden ilk üçü ($J_1 - J_2 - J_3$), her bir kattaki kontrol edilmiş ilgili değerlerin maksimumlarının aynı katlardaki kontrol edilmemiş maksimum değerlerine oranları arasındaki en büyük değeri ifade etmektedir.

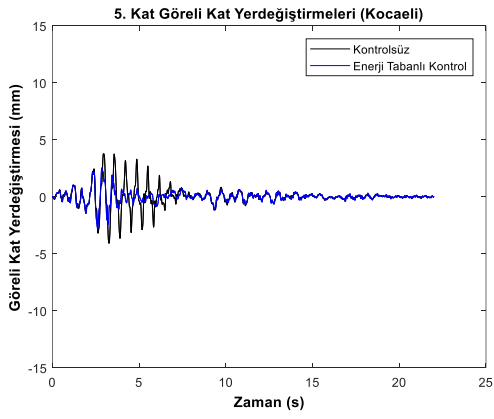
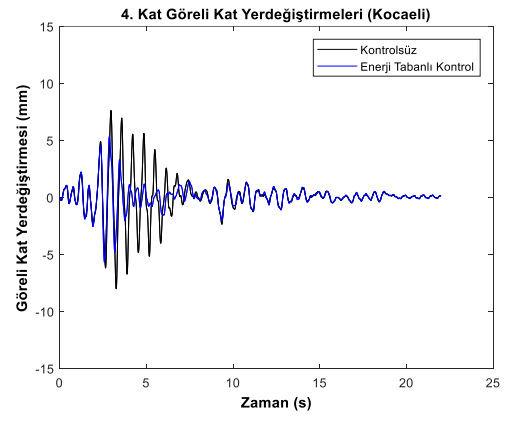
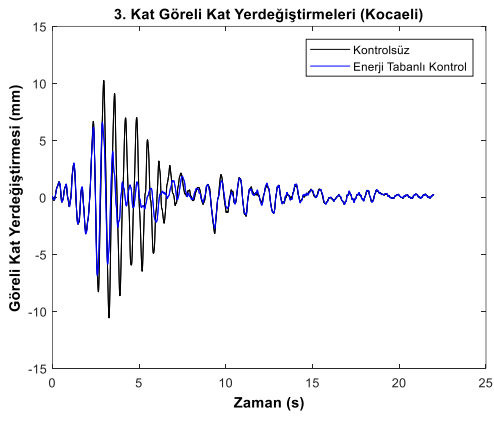
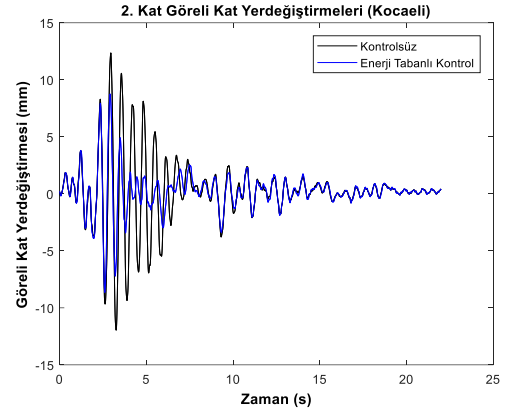
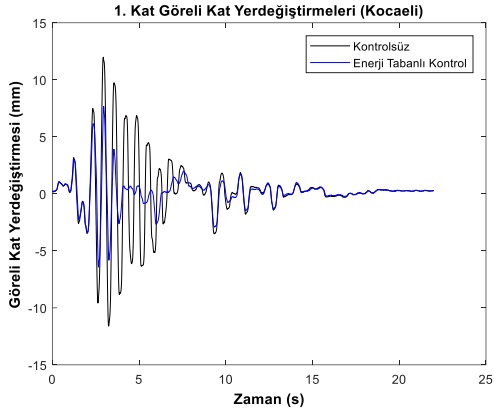
Bu indeks değerlerinden son üçü ise ($J_4 - J_5 - J_6$), her bir kattaki kontrol edilmiş ilgili değerlerin tamamının karelerinin toplamlarının karekökünün aynı katlardaki kontrol edilmemiş değerlerin tamamının karelerinin toplamlarının kareköküne oranları arasındaki en büyük değeri ifade etmektedir.

MR damper ile yarı aktif olarak kontrol edilmiş yapı modellerinin deprem etkisi altındaki performansları, birbirlerinden farklı her bir MR damper için karşılaştırma indeksleri yardımıyla belirlenmiş ve tablolar halinde sunulmuştur (Tablo 28-Tablo 31).

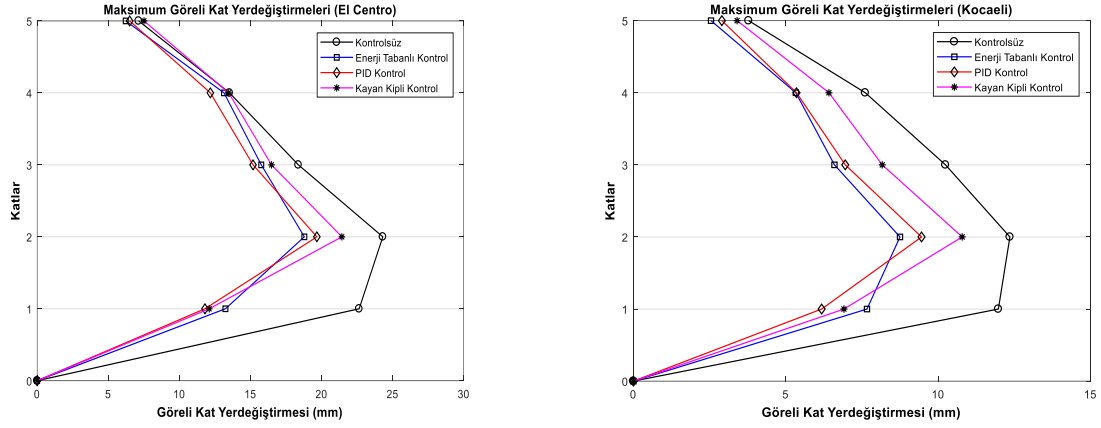
MR damperlerin yapıların performansında oluşturdukları iyileştirmenin daha iyi gözlemlenebilmesi için yapıların zaman tanım alanındaki görelî kat yer değiştirmeleri grafikler halinde sunulmuştur. Her bir yapı modeline ait zaman tanım alanındaki görelî kat yer değiştirmeleri sadece Damper 1 ve Enerji Tabanlı Kontrol algoritması için grafikler halinde sunulmuştur (Şekil 92.Şekil 93Şekil 95Şekil 96Şekil 98Şekil 99Şekil 101Şekil 102). Ayrıca, görelî kat yer değiştirmelerinin maksimum değerlerinin katlara göre değişimi de grafikler halinde gösterilmiştir (Şekil 94Şekil 97Şekil 100Şekil 103)



Şekil 92. Ölçeklenmiş yapı modelinin (5 katlı) El-Centro depremi etkisi altındaki davranışı



Şekil 93. Ölçeklenmiş yapı modelinin (5 katlı) Kocaeli depremi etkisi altındaki davranışı



Şekil 94. 5 katlı yapı modelinin farklı kontrol uygulamaları altındaki görel kat yer değiştirmeleri

Tablo 28. Kontrol edilmiş 5 katlı yapı modelinin deprem etkisi altındaki performansları

Lord Damper	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrol Algoritması												
Passive-off	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
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
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
Damper 1	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrol Algoritması												
Passive-off	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
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
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
Damper 2	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrol Algoritması												
Passive-off	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	0.9917	1.2775	0.5493	0.6190	0.7043	0.4276	0.7622	0.9098	0.6105	0.7029	0.7591	0.5152
PID	0.8697	0.9690	0.5515	0.6580	0.7408	0.3547	0.8121	0.9520	0.4836	0.8030	0.7928	0.3899
Kayma kipli	0.7622	0.9098	0.5844	0.7029	0.7591	0.4049	0.8550	0.9876	0.7199	0.7797	0.7979	0.6087
Damper 3	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrol Algoritması												
Passive-off	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	0.8772	1.2211	0.6029	0.6169	0.6896	0.4593	0.7466	0.9353	0.5587	0.7150	0.7439	0.5486
PID	0.9120	1.0244	0.5697	0.6718	0.7370	0.3721	0.8406	1.4834	0.5478	0.8038	1.1722	0.4615
Kayma kipli	0.9560	1.0998	0.5365	0.7263	0.8005	0.3390	0.9004	1.4992	0.6652	0.8312	1.2492	0.5944

Şekil 92'de El-Centro depremi altındaki 5 katlı binanın kontrolsüz ve Enerji tabanlı kontrol uygulaması neticesinde katların görece yer değiştirmeleri gösterilmektedir. Şekil 92a, b, c, d, ve e incelendiğinde, kat yüksekliği arttıkça, görece kat deplasmanının azaldığı tespit edilebilmektedir. Bu da yapının birinci modal davranış şekline karşılık gelmektedir. Daha yüksek modların etkisi olsa da, göz ile görülebilen davranışın çoğunluğu birinci mod davranışı olduğu belirtilebilir.

İlk göze çarpan unsurlardan biri, kontrol uygulamasının yüksek genliklerde yapı davranışını etkili bir şekilde azaltabildiği, düşük (5 mm ve altı) genliklerde ise kontrolsüz davranışından önemli sayılabilecek bir fark yaratmadığıdır. İkinci unsur ise, kontrollü ve kontrolsüz davranışlarının aynı periyotta ilerliyor olmalarıdır. MR damper özü itibarıyla enerji sönmeyen mekanik bir sistemdir ve yapıya katmış olduğu sönmü etkisinden dolayı periyotta bir artışa sebep olması beklenir. Şekil 92'deki davranışlar incelendiğinde ise, MR damper etkisinden dolayı yapı davranışının periyodunda bir değişiklik görülmemektedir, kontrolsüz binanın davranış periyodu ile aynıdır.

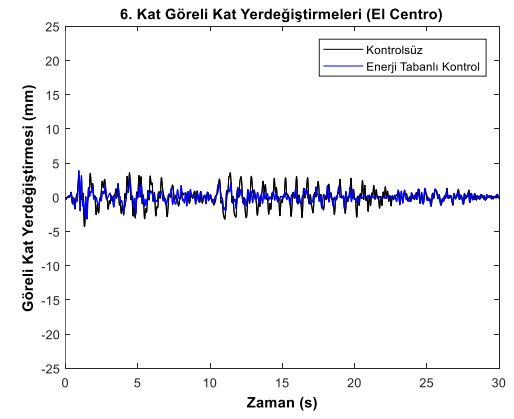
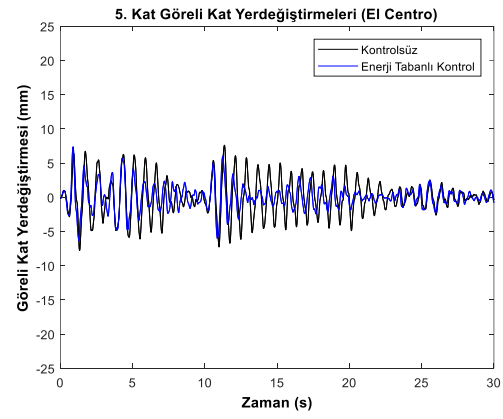
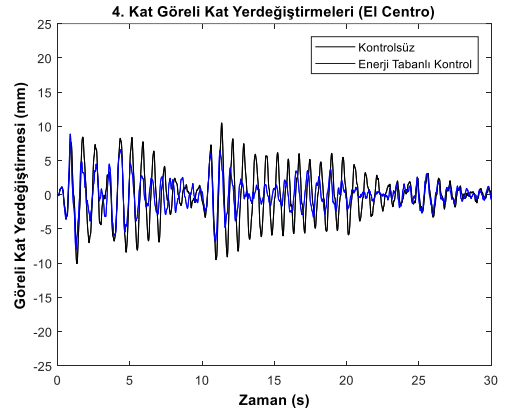
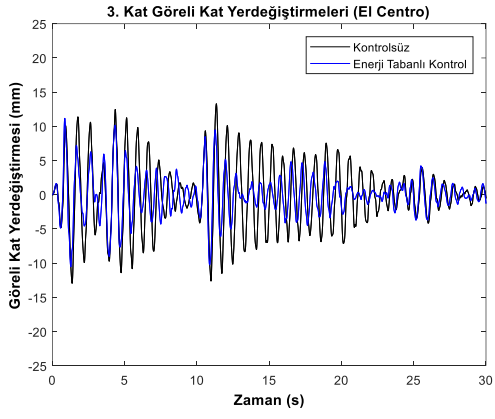
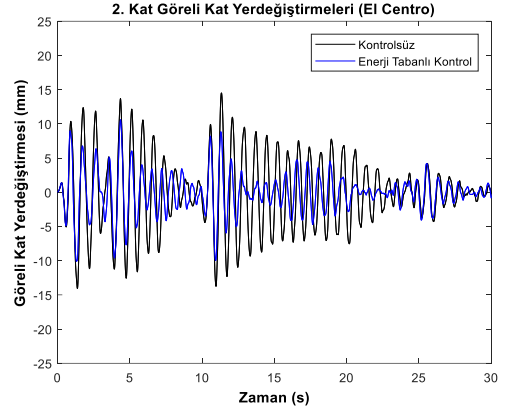
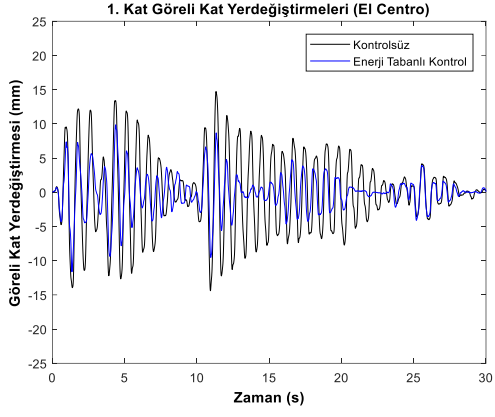
Şekil 93'de 5 katlı bina modelinin Kocaeli depremi ile etkileşimi sonucunda oluşan görece kat yer değiştirmeleri sunulmaktadır. 5 katın davranışı incelendiğinde yine Şekil 92'nin sonuçlarına varmak mümkündür. El-Centro etkisinden farklı olarak, Kocaeli depremi ile olan etkileşimde yaklaşık üçüncü saniye sonrasındaki yapının kinetik enerjisinden kaynaklandığı düşünülen yerdeğiştirme davranışı sürekli bir azalma eğilimindedir. Dokuzuncu saniyeden sonra küçük tepkiler binaya yine enerji yüklemekte olsa da, bunların etkisi 5 mm'nin altındadır ve ilk 5 saniyede gerçekleşen salınımların yanında ihmal edilebilir boyutta olduğu düşünülmektedir.

Şekil 94'te kontrolsüz ve üç farklı kontrol uygulaması neticesinde 5 katlı binanın en büyük görece kat yer değiştirme miktarları gösterilmektedir. Şekil 94a'da El-Centro etkisi gösterilmektedir. Buna göre enerji tabanlı kontrol ile PID kontrol uygulamaları kat yer değiştirmelerini en etkili azaltabilen yöntemler olarak görülebilmektedir. Şekil 94b'de gösterilen Kocaeli deprem etkileşimi de benzer sonuca ulaşmamızı sağlamaktadır. Enerji tabanlı kontrol uygulamasının PID ve kayan kip kontrolüne nazaran birinci katta %20 civarında daha etkisiz olduğu belirtilebilir. Ancak, üst katlarda Enerji tabanlı kontrol ile PID kontrolü yine lider durumundadırlar.

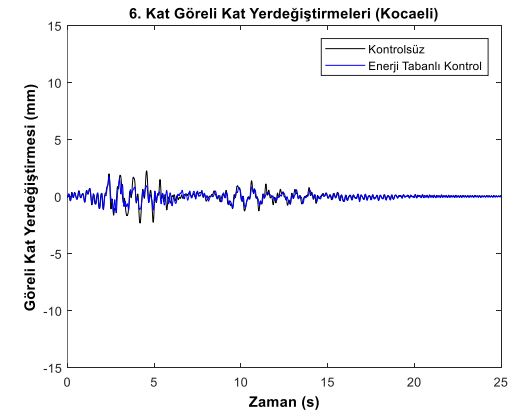
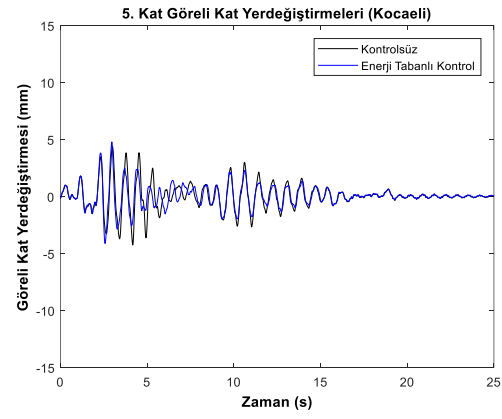
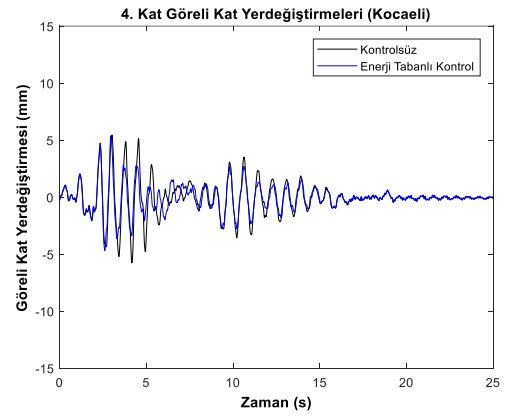
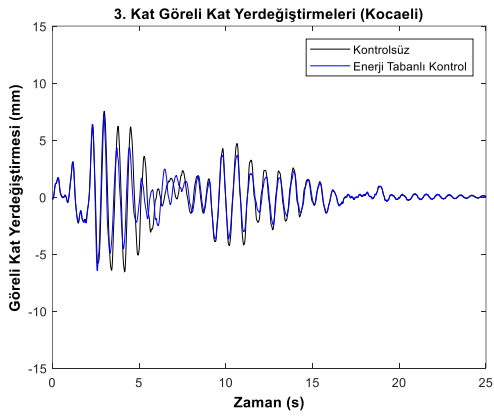
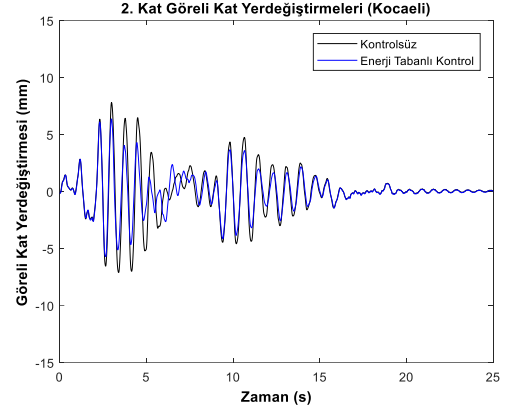
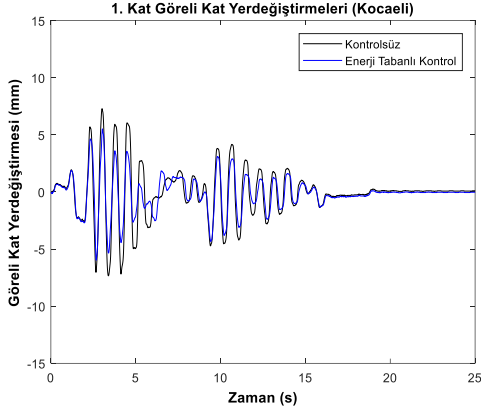
Şekil 92 ve Şekil 93'de gösterilmiş olan veriler kullanılarak karşılaştırma indeksleri hesaplanıp Tablo 28'de Damper 1 sütunu altındaki Enerji Tabanlı satırı başlığı altında toplanmıştır. Benzer şekilde, Şekil 94'te gösterilmiş olan farklı kontrol uygulamaları için performans indeksleri oluşturulmuş ve yine Damper 1 başlığı altında sunulmuştur. Farklı amortisör tipi ve MR sıvıları ile yapılmış olan deneylerin sonuçları da yine aynı tablo içerisinde gösterilmektedir.

J_3 ve J_6 indeksleri taban kesme kuvvetinin büyüklüğü ile ilişkili olduğundan dolayı, özellikle bu değerlerin küçük tutulması yarar sağlayacaktır. Farklı kontrol uygulamaları arasında kıyaslama yapıldığında, norm değerlerinin (J_4 , J_5 , ve J_6) çok değişmediği ve bu araştırma kapsamında geliştirilmiş olan Damper 1, Damper 2 ve Damper 3 tiplerinin Lord Damper'inden daha etkili oldukları görülebilmektedir. Sönümleyici farkından dolayı en çok %30 mertebesinde bir fark yaratılabilmektedir. J_3 indeksinde ise önemli ölçüde farklılıklar ortaya çıkmıştır. Lord damperi bu performans kategorisinde %25 ile %40 arasında bir iyileştirme oluştururken, Damper 1 için bu iyileştirme %36 ile %48 arasındadır. Damper 2 için %28 ile %52, ve Damper 3 için iyileştirme %34 ile %47 arasındadır.

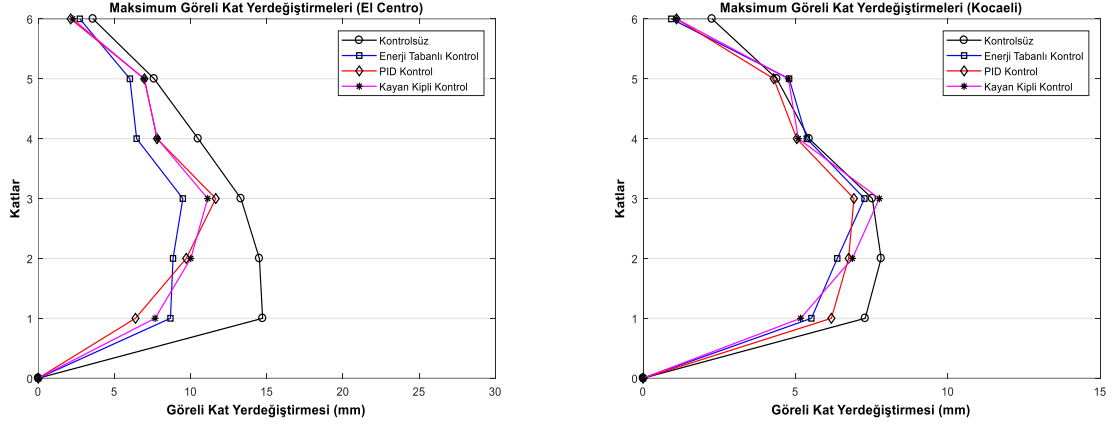
J_2 performans indeksleri ivme büyüklüğü hakkında bilgi veriyor olsa da, ivmeölçerlerin gürültülü oluşlarından dolayı bu değerlerin yüksek veya düşük olması bir çıkarımın yapılabilmesi için yeterli değildir.



Şekil 95. Ölçeklenmiş yapı modelinin (6 katlı) El-Centro depremi etkisi altındaki davranışı



Şekil 96. Ölçeklenmiş yapı modelinin (6 katlı) Kocaeli depremi etkisi altındaki davranışı



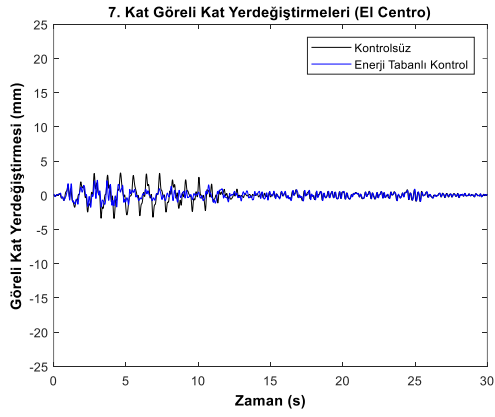
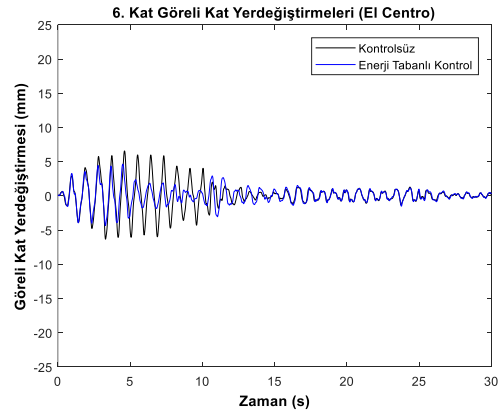
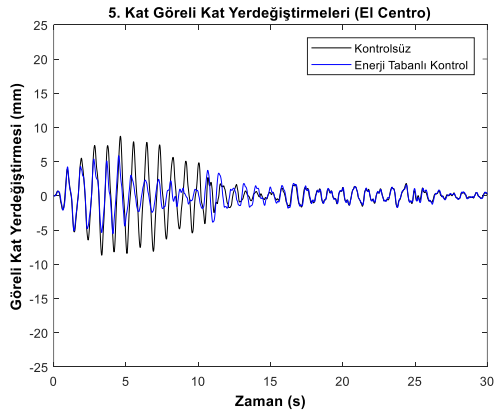
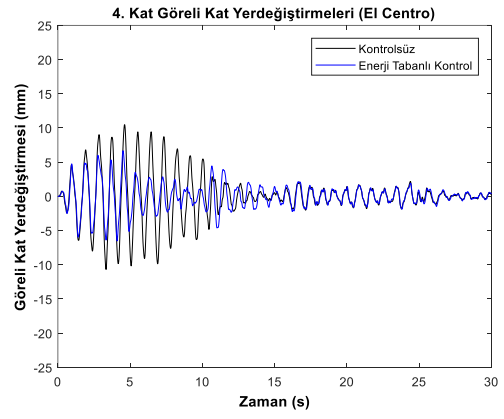
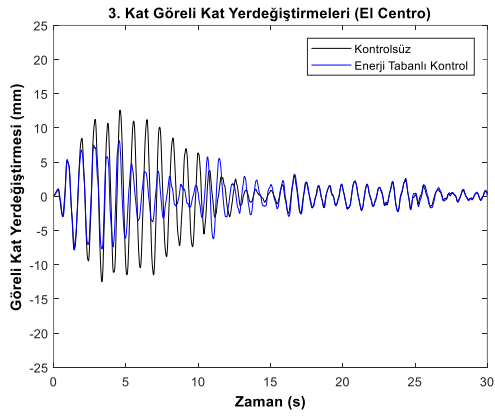
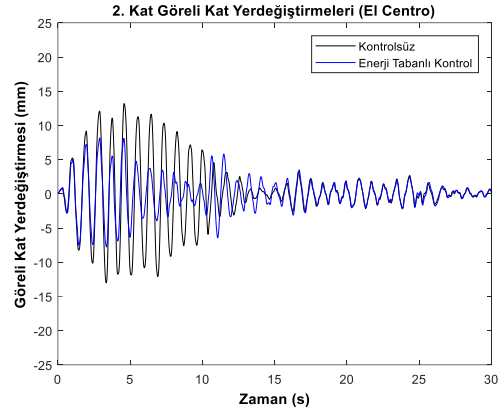
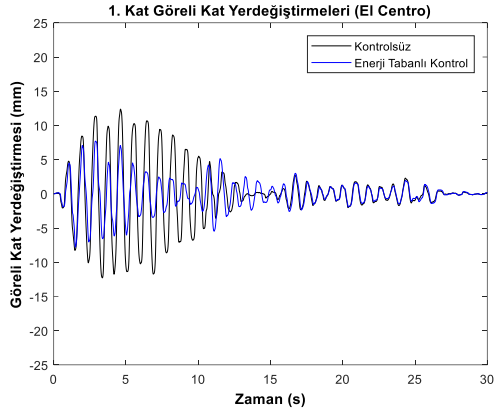
Şekil 97. 6 katlı yapı modelinin farklı kontrol uygulamaları altındaki görel kat yer değiştirmeleri

Tablo 29. Kontrol edilmiş 6 katlı yapı modelinin deprem etkisi altındaki performansları

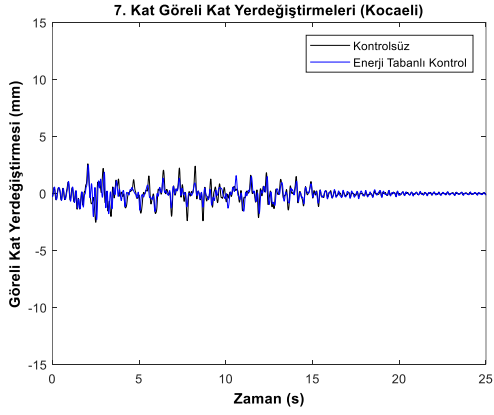
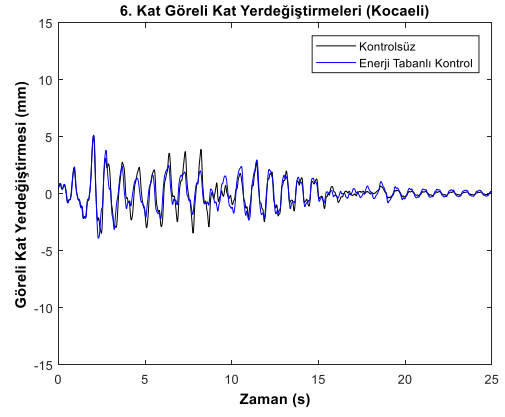
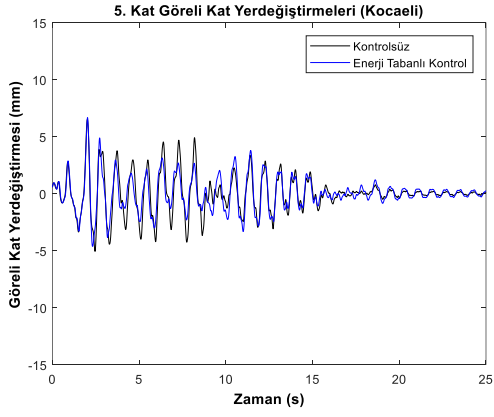
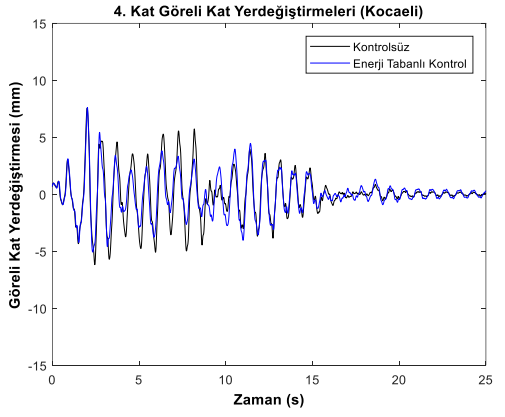
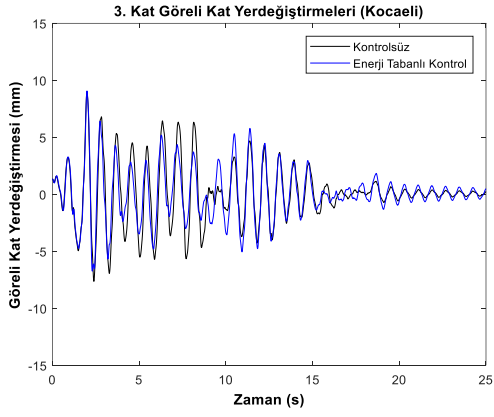
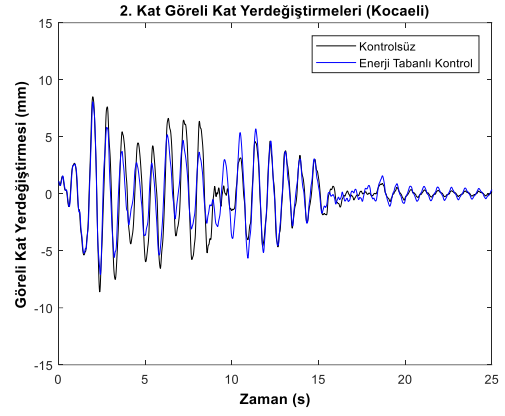
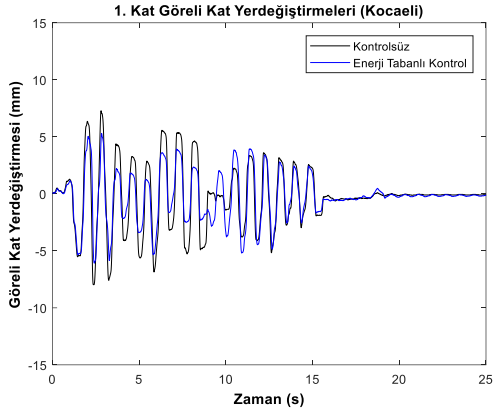
Lord Damper	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi						
	Kontrol Algoritması	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Passive-off	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Enerji Tabanlı	1.0255	1.2347	0.7694	0.8700	0.9883	0.6708	0.9898	1.1395	0.8292	0.9397	0.9592	0.8169	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	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	0.9257
Damper 1	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
Passive-off	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	0.9523	1.1757	0.6695	0.6928	0.7998	0.5227	1.0910	1.1234	0.7578	0.8658	0.9225	0.7135	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	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	0.6574
Damper 2	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
Passive-off	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	1.0521	1.2225	0.6778	0.8061	0.8265	0.5759	1.0866	0.9691	0.7906	0.9419	0.9160	0.7994	0.7994
PID	0.9371	1.0661	0.6518	0.8153	0.8153	0.5459	0.9676	0.9941	0.8267	1.0079	0.9260	0.7050	0.7050
Kayma kipli	1.0086	1.0615	0.7263	0.8831	0.8696	0.6422	1.0220	1.0810	0.9170	0.9982	0.9607	0.7900	0.7900
Damper 3	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
Passive-off	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	0.9229	1.0771	0.6737	0.7785	0.7899	0.5572	1.0701	1.1490	0.7874	0.9333	0.9327	0.8044	0.8044
PID	0.9267	1.0485	0.5273	0.8861	0.8125	0.4437	0.9948	1.0837	0.8405	0.9606	0.9183	0.7699	0.7699
Kayma kipli	0.9627	0.9986	0.6984	0.8702	0.8554	0.6452	1.0541	1.1059	0.7774	0.9880	0.9665	0.7396	0.7396

Şekil 95 ve Şekil 96’da altı katlı yapıya ait görelî kat davranışı gösterilmektedir. Şekil 97’de ise bu davranışın en büyük değerleri sunulmuştur. Aynı zamanda farklı kontrol uygulamaları ile elde edilen en büyük değerler de Şekil 97’de gösterilmiştir. Altı katlı yapıya uygulanan yer hareketi, 5 katlı yapıdaki El-Centro depremine göre %30 ve Kocaeli depremine göre %20 daha düşük genliklidir. Bir önceki bina modelinin ölçeklendirilecek sonuçları arasında bir ilişki gözlemleyebilmek ise anlamlı bulunmamaktadır çünkü 5 ile 6 katlı bina modelleri arasında frekans farkı bulunmaktadır ve bundan dolayı da deprem hareketinden tamamen farklı etkilenebilirler. Bu nedenle her farklı bina modeli kendi içerisinde değerlendirilmektedir.

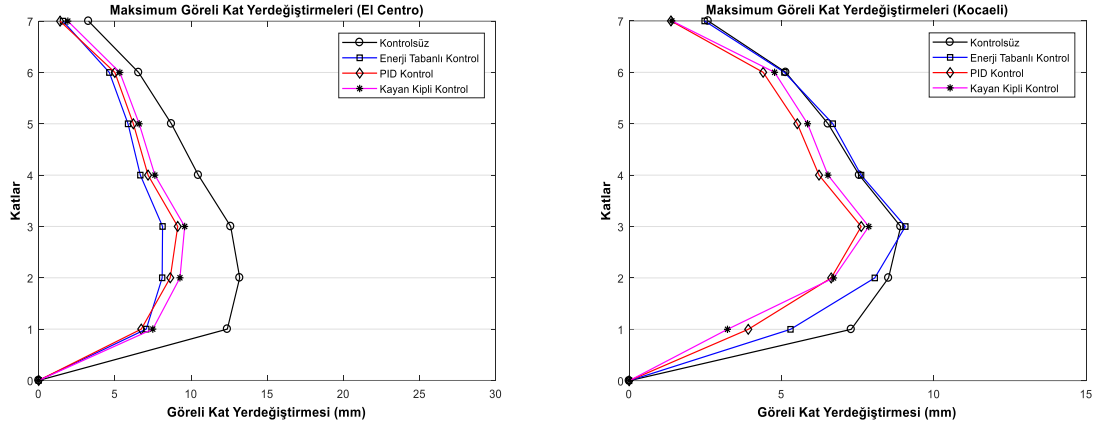
Tablo 29’da gösterilen J_3 indeksine göre, Damper 1’e uygulanan PID kontrolü sonucunda El-Centro depremi etkisinde binaya aktarılan taban kesme kuvveti %50’ye varan oranda azaltılmıştır. Bu azalma miktarı, diğer amortisör ve kontrol uygulamaları arasında en iyisidir. Ancak Kocaeli depremi etkisinde aynı etki görülmemektedir. Bu deprem hareketi ve Damper 1 içerisinde J_3 indeksinin azaltılabilmesi konusunda en verimsiz kontrol uygulaması olduğu görülmektedir.



şekil 98. Ölçeklenmiş yapı modelinin (7 katlı) El-Centro depremi etkisi altındaki davranışı



Şekil 99. Ölçeklenmiş yapı modelinin (7 katlı) Kocaeli depremi etkisi altındaki davranışı



Şekil 100. 7 katlı yapı modelinin farklı kontrol uygulamaları altındaki görece kat yer değiştirmeleri

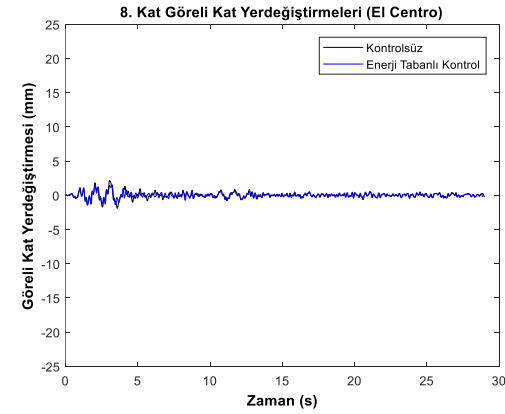
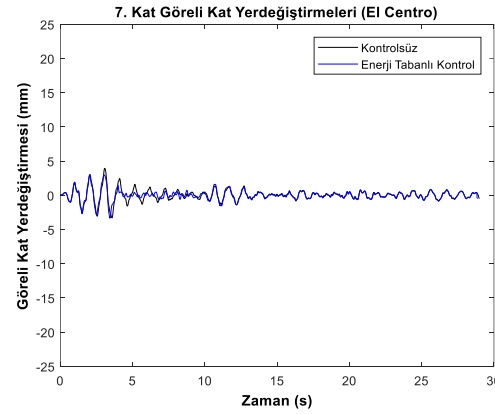
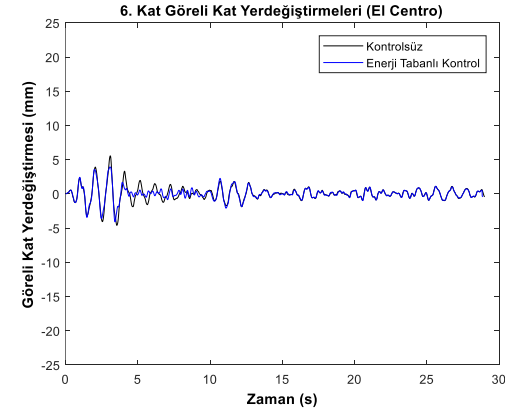
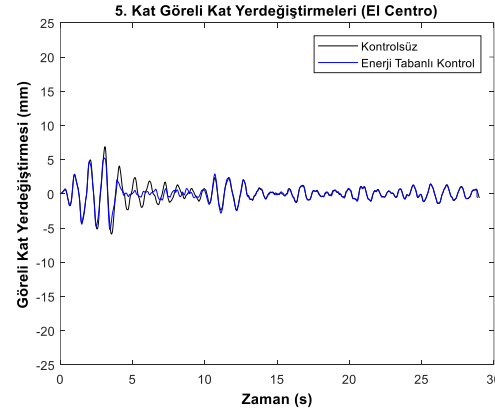
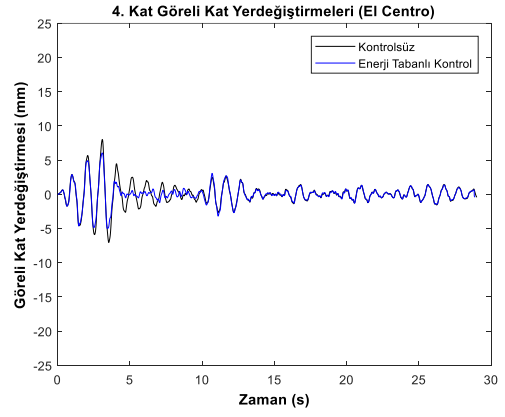
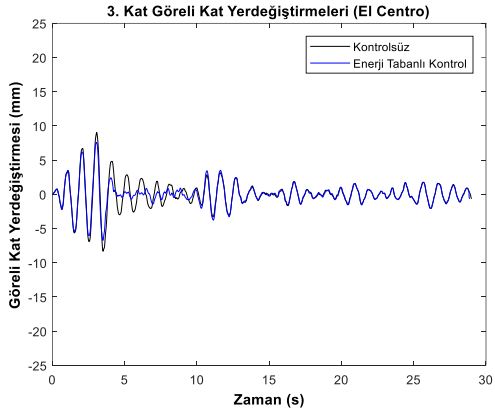
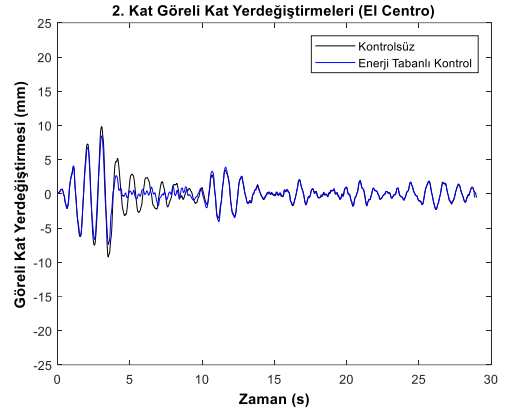
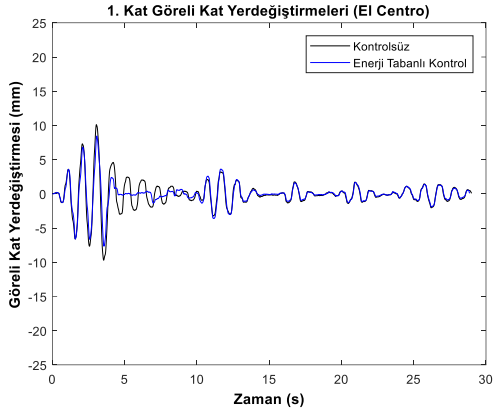
Tablo 30. Kontrol edilmiş 7 katlı yapı modelinin deprem etkisi altındaki performansları

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
Passive-off	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	
Damper 1	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	
Passive-off	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	
Damper 2	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	
Passive-off	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	0.6847	0.8602	1.1901	0.6877	0.6969	1.2167	1.0236	1.1160	0.7266	0.9356	0.9107	0.7876	
PID	0.7909	0.7445	0.8388	0.7764	0.6776	0.6725	0.8537	0.9672	0.5640	1.0369	0.8849	0.5725	
Kayma kipli	0.8734	0.7487	0.6942	0.8412	0.7164	0.6172	0.9299	0.9821	0.4637	1.2223	0.9453	0.5156	
Damper 3	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	
Passive-off	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	0.6941	0.9385	0.6653	0.7122	0.7915	0.5661	1.0110	1.0519	0.7378	0.9442	0.9466	0.7730	
PID	0.7861	0.8968	0.4456	0.7778	0.7468	0.3571	0.8962	0.9671	0.6433	1.0040	0.9610	0.6104	
Kayma kipli	0.8182	0.9228	0.4899	0.8141	0.7476	0.4144	0.9457	1.0457	0.7957	1.0329	0.9807	0.8120	

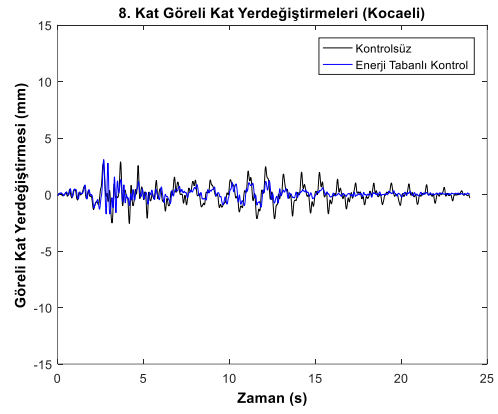
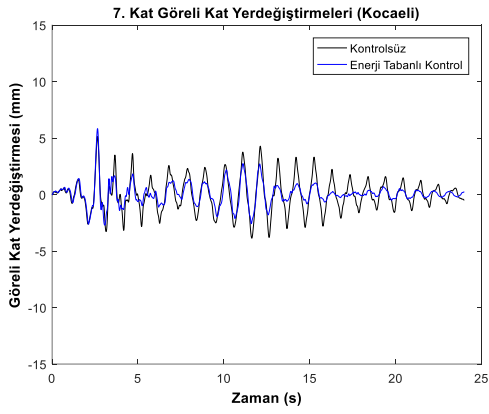
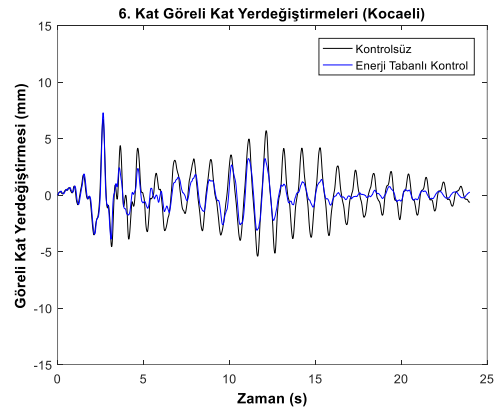
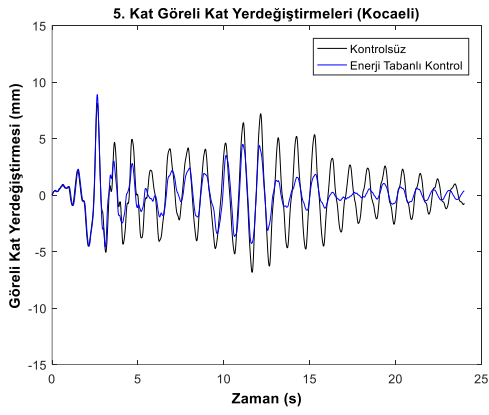
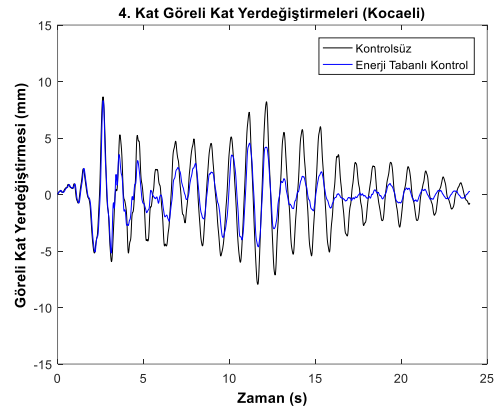
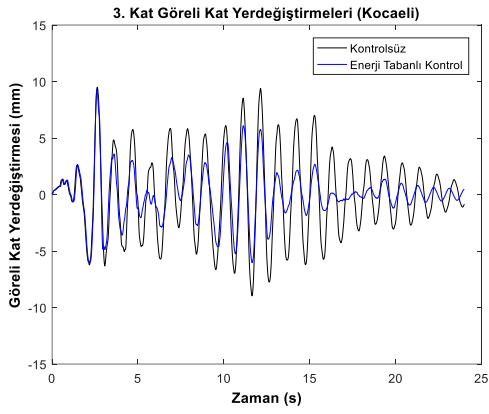
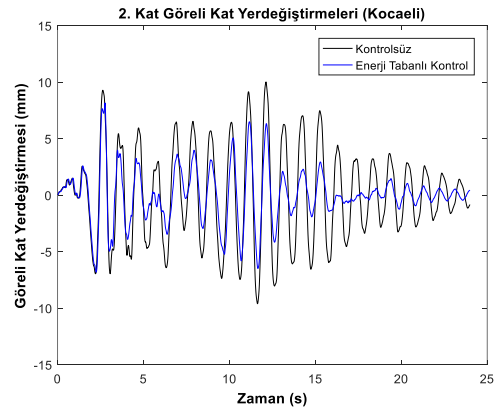
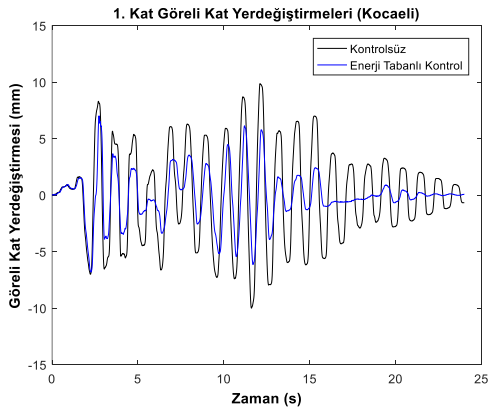
Şekil 98 ve Şekil 99'da 7 katlı yapıya ait görelî kat davranışı gösterilmektedir. Şekil 100'de ise bu davranışın en büyük değerleri sunulmuştur. Aynı zamanda farklı kontrol uygulamaları ile elde edilen en büyük değerler de Şekil 100'de gösterilmiştir. Buna göre El-Centro deprem etkisi altında uygulanan kontrol etkilerin her biri görelî kat yer değiştirmesini yaklaşık olarak aynı oranda azalttığı görülebilmektedir. Kocaeli deprem etkisi altında ise, enerji tabanlı kontrolcü sadece birinci katın yer değiştirme genliğini azaltabiliyorken, üst katlarda bu alanda etkin olamamaktadır.

Tablo 30'da bulunan J_3 indekslerine istinaden, El-Centro deprem etkisi altında Damper 3'ün %50'nin üzerinde bir azaltma yaratabildiği gösterilmiştir (PID ve Kayma Kipli kontrol uygulamaları). Kocaeli depreminde ise bu değer en fazla %36 ile PID kontrolü tarafından sağlanabilmektedir. Diğer kontrolcüler daha düşük performans seviyelerinde kalmaktadır.

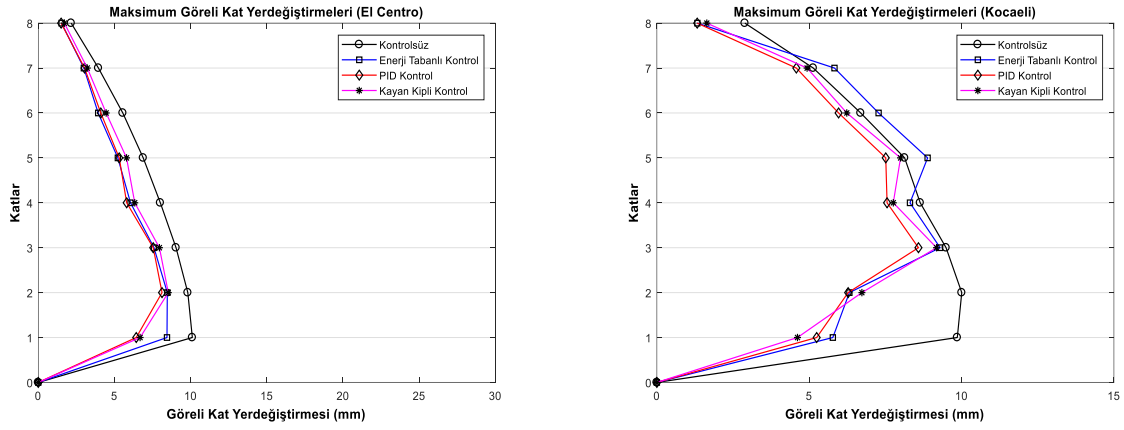
J_4 değerleri neredeyse hiç azaltılmamış görünmekle beraber, PID ve kayma kipli kontrolcülerin Damper 2 ve Damper 3 uygulamalarında J_4 indeksi birin üzerine çıkmıştır. Bunun anlamı ise yapının kontrolsüz duruma göre daha fazla potansiyel enerji yüklemiş olduğudur.



şekil 101. Ölçeklenmiş yapı modelinin (8 katlı) El-Centro depremi etkisi altındaki davranışı



Şekil 102. Ölçeklenmiş yapı modelinin (8 katlı) Kocaeli depremi etkisi altındaki davranışı



Şekil 103. 8 katlı yapı modelinin farklı kontrol uygulamaları altındaki görel kat yer değiştirmeleri

Tablo 31. Kontrol edilmiş 8 katlı yapı modelinin deprem etkisi altındaki performansları

Lord Damper	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrol Algoritması												
Passive-off	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
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
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
Damper 1	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrol Algoritması												
Passive-off	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
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
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
Damper 2	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrol Algoritması												
Passive-off	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	0.8846	1.0162	0.8494	0.9033	1.2561	0.8011	1.0624	1.1104	0.8746	0.7867	0.8384	0.7034
PID	0.8213	0.9383	0.7403	0.9036	0.9245	0.6941	0.9106	0.9980	0.7920	0.7052	0.7509	0.4986
Kayma kipli	0.8302	0.9418	0.6156	0.9730	0.9203	0.6015	0.9446	1.0378	0.7278	0.7501	0.7743	0.4950
Damper 3	El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrol Algoritması												
Passive-off	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	0.8729	1.8872	0.7714	0.9547	1.6449	0.7572	1.1641	1.2751	0.8960	0.8729	0.8132	0.8222
PID	0.8882	1.3356	0.6905	0.9331	2.0290	0.7468	0.9129	1.1382	0.8080	0.7380	0.6196	0.5095
Kayma kipli	0.9001	1.2407	0.5405	1.0766	0.9989	0.5594	0.9785	1.1909	0.6800	0.7821	0.6379	0.4850

Şekil 101 ve Şekil 102’de 7 katlı yapıya ait görelî kat davranışı gösterilmektedir. Şekil 103’de ise bu davranışın en büyük değerleri sunulmuştur. Aynı zamanda farklı kontrol uygulamaları ile elde edilen en büyük değerler de Şekil 103’de gösterilmiştir. 7 katlı bina örneğinde olduğu gibi, burada ele alınan 8 katlı binanın El-Centro deprem etkisi altında uygulanan kontrol etkilerin her biri görelî kat yer değiştirmesini yaklaşık aynı oranda azalttığı görülebilmektedir. Kocaeli deprem etkisi altında ise, enerji tabanlı kontrolcü birinci ve ikinci katın yer değiştirme genliklerini azaltabiliyorken, üst katlarda etkin olamamaktadır. J_1 indeksindeki en büyük azalma %14 ile sınırlı kalmaktadır.

Tablo 31’e göre El-Centro etkisi altında davranış norm değerlerin birim değer üzerinde buldukları görülmektedir. J_5 indeksi 2’nin üzerine çıkmaktadır, fakat ivme ölçümünde var olan gürültü etkisi düşünülüğünde indeks değerinin bağlayıcılığı kısıtlı olduğu vurgulanmalıdır. Ancak, kayma kipli Damper 3 kontrol uygulamasında J_4 indeksi birim değer üzerinde çıkmaktadır. Kocaeli deprem etkisi altında ise norm endekslerinde ($J_4 - J_6$) birim değer üzerine çıkan görülmemektedir. Taban kesme kuvveti normunu temsil eden J_6 indeksinde %50 ile %55 arasında azalma sağlayan Damper 1, Damper 2 ve Damper 3 ile PID veya kayma kipi kontrolüdür. Enerji tabanlı kontrolcünün J_6 indeks değerleri Damper 1 için %47 iken, Damper 2 için %30 ve Damper 3 için %18 azalma sağlayabilmektedir.

Deprem etkisi altındaki yapıların davranışı dikkate alındığında performans indeksleri arasında en önemli parametre **taban kesme kuvveti** olarak kabul edilmektedir. Taban kesme kuvveti aynı zamanda binaya aktarılan enerji ile ilişkilidir ve binaya giren enerji onu harekete geçirir. Bundan dolayı, J_3 indeksinin küçültülebilmesi yapısal malzemede 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 performansı hem de MR damperlerin performansı birlikte değerlendirmek amacıyla J_3 indeksi Tablo 32 ve Tablo 33’de sunulmuştur. Bu tablolarda J_3 performans indeksleri 5-6-7 ve 8 katlı yapıların tamamı için toplanmış ve en önemli kıstaslardan biri kabul edilen taban kesme kuvvetini en fazla azaltabilen kontrol algoritması ile damperler sıralanmıştır.

El-Centro deprem etkisi altında en verimli kontrolü sağlayan damper ve kontrol algoritması ikilisi; 5 katlı bina için Damper 1 ile PID kontrol algoritması, 6 katlı bina için Damper 1 ile 3 ve PID algoritması, 7 katlı bina için Damper 1 ve enerji tabanlı algoritma ve 8 katlı bina için Damper 3 ve kayma kipli kontrol algoritmasıdır (Tablo 32). Kocaeli deprem etkisi altında en verimli kontrolü sağlayan damper ve kontrol algoritması ikilisi ise; 5 katlı bina için Damper 2 ve PID algoritması, 6 katlı bina için Damper 1 ve kayma kipli algoritma, 7 katlı bina için Damper 2 ve kayma kipli algoritma ve 8 katlı bina için Damper 1 ve kayma kipli algoritmadır (Tablo 33).

Tablo 32. Kontrol algoritmaları ve damperler açısından J3 performans indeksleri (El-Centro)

		Damper Tipi				Başarılı Damper	Algoritmanın Başarı Sırası
		Lord	Damper 1	Damper 2	Damper 3		
5 Katlı	Enerji Tabanlı	0.7548	0.5846	0.5493	0.6029	2	3
	PID	0.6502	0.5212	0.5515	0.5697	1	1
	Kayma kipli	0.5974	0.5345	0.5844	0.5365	1,3	2
6 Katlı	Enerji Tabanlı	0.7694	0.6695	0.6778	0.6737	1,2,3	3
	PID	0.7752	0.5034	0.6518	0.5273	1,3	1
	Kayma kipli	0.626	0.6181	0.7263	0.6984	L, 1	2
7 Katlı	Enerji Tabanlı	0.7195	0.6212	1.1901	0.6653	1	1
	PID	0.7655	0.5438	0.8388	0.4456	3	1
	Kayma kipli	0.7218	0.6049	0.6942	0.4899	3	2
8 katlı	Enerji Tabanlı	0.7913	0.8354	0.8494	0.7714	L, 3	3
	PID	0.7236	0.6359	0.7403	0.6905	1	2
	Kayma kipli	0.7724	0.6608	0.6156	0.5405	3	1

Tablo 33. Kontrol algoritmaları ve damperler açısından J3 performans indeksleri (Kocaeli)

		Damper Tipi				Başarılı Damper	Algoritmanın Başarı Sırası
		Lord	Damper 1	Damper 2	Damper 3		
5 Katlı	Enerji Tabanlı	0.7581	0.640	0.6105	0.5587	3	2
	PID	0.6866	0.5158	0.4836	0.5478	2	1
	Kayma kipli	0.6336	0.5768	0.7199	0.6652	1	3
6 Katlı	Enerji Tabanlı	0.8292	0.7578	0.7906	0.7874	1	2
	PID	0.8114	0.8478	0.8267	0.8405	L, 1,2,3	3
	Kayma kipli	0.911	0.7093	0.917	0.7774	1	1
7 Katlı	Enerji Tabanlı	0.8679	0.8586	0.7266	0.7378	2, 3	3
	PID	0.9321	0.6931	0.564	0.6433	2	2
	Kayma kipli	0.8607	0.8345	0.4637	0.7957	2	1
8 katlı	Enerji Tabanlı	1.0062	0.711	0.8746	0.896	1	2
	PID	0.882	0.7187	0.792	0.808	1	3
	Kayma kipli	0.9037	0.5933	0.7278	0.680	1	1

PID kontrol algoritması El-Centro depremi etkisinde 5, 6 ve 7 katlı binada en fazla taban kesme kuvvetini azaltabilen algoritmadır. 8 katlı binada ise kayma kipli kontrolü daha etkin olmaktadır. Kocaeli depremi etkisinde ise bu durum tersine dönmektedir. 5 ve 8 katlı binayı en iyi kontrol eden PID algoritması, 6 ve 7 katlı binayı en iyi kontrol eden algoritma ise kayma kipli algoritma olmuştur.

El-Centro depremin etkisinde (Tablo 32) en iyi sonuçlarda rol oynayan damper, Damper 1 ile 3 iken Kocaeli depremi etkisinde ise (Tablo 33) Damper 1 ile Damper 2 en iyi sonuçları vermektedir. Taban kesme kuvvetinde büyük miktarda azalma sağlanamayan durumlarda



Lord Damperi de başarılı damper olarak ön plana çıkmakla birlikte bu başarı sınırlıdır. Çünkü farklı kontrol algoritmaları farklı damperler ile daha belirgin iyileştirmeler sağlamaktadır.

Tüm sonuçlar dikkate alındığında J_3 ve J_6 indekslerinde %50'nin üzerinde bir azalma elde edilmiştir.

Yapılan sarsma testlerine ilişkin dampersiz ve kontrolcüsüz olarak karşılaştırmaların gösterildiği 7 adet karşılaştırmaya ait 14 adet video görüntüsü çoklu ortam dosyası olarak proje raporuna eklenmiştir. Video görüntüleri, dikkate alınan her bir test için hem aynı ekran üst üste bindirilerek hem de ayrı ekranlarda yanyana olarak yüklenmiştir. 2 adet karşılaştırma dampersiz diğer 5 karşılaştırma ise kontrolcüsüz durumlar referans alınarak hazırlanmıştır.

7. GENEL SONUÇLAR

Bu projede, aktif deprem kuşağı üzerinde bulunan ülkemizdeki yapı stoğunu temsil eden 5-8 katlı yapıların deprem güvenilirliğini artırmak üzere yapı kontrolünü sağlayacak ekonomik ve etkili bir deprem sönümleyici sistemi geliştirilmiş ve deprem yükleri etkisi altında sarsma tablası ile deneyleri başarıyla yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- 1) Tek milli ve çift milli olarak ön tasarımı yapılan MR damperlerin, manyetik alan etkileşimli HAD analizleri kullanılarak ANSYS Cevap Yüzeyi Aracı (Response Surface Tool) ile optimizasyonu yapılmıştır. Analizlerde MR sıvıya ait reolojik veriler Kullanıcı Tanımlı Fonksiyonlar (UDF) yardımıyla doğrudan HAD analizlerine aktarılmıştır.
- 2) Prototip üretimi yapılan Damper 1, Damper 2 ve Damper 3 tiplerinin, sarsma tablası deney sonuçlarına göre ticari bir ürün olan Lord RD-8041-1 MR dampere kıyasla karşılaştırma indeksleri dikkate alındığında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür
- 3) 9 farklı MR sıvı (MRF1..9) başarıyla sentezlenerek karakterizasyonu yapılmıştır. Bu sonuçlara göre MRF4, MRF5 ve MRF6 sıvılarının ticari bir ürün olan Lord MRF132DG sıvısına göre aynı manyetik alan yoğunluğu için iki kata kadar daha yüksek akma gerilmesi ürettiği tespit edilmiştir. Ayrıca en düşük viskoziteye sahip olan MRF5 sıvısının akma gerilmesi aynı manyetik akı yoğunluğu için %50'ye yakın bir artış sağlarken dinamik viskozitesi, aynı kayma hızı için yaklaşık %10'luk bir farkla ilgili ürünü yakalamıştır. Dünyada MR sıvı üreten çok sınırlı sayıda üretici olduğu ve bu üreticilerden MR sıvı ve ilgili teknik veri tedarikinde çoğunlukla sıkıntı yaşandığı dikkate alınırsa bu ülkemiz açısından önemli bir kazanım olmuştur.
- 4) MR damperin kontrolünde dört ayrı (PID, Enerji Tabanlı Kontrol, Kayma kipli Kontrol, Model Tabanlı Kontrol) kontrol algoritması göz önüne alınmıştır. Bununla birlikte Model Tabanlı Kontrol algoritmasının diğer üçüne kıyasla kayda değer bir avantaj sağlamadığı belirlenmiştir. Bu nedenle çalışma üç kontrol algoritması ile tamamlanmıştır.
- 5) Gerekli olan sönümleme kuvvetini sağlayacak uygun elektrik akımı şiddetini bulmak için yapay sinir ağları modeli kullanılmış olup, bu modelin eğitim setinde MR damperin performans verileri doğrudan kullanılmıştır.
- 6) Sıcaklık ile birlikte MR sıvının dinamik viskozitesi üstel olarak düştüğü ve bu durum değişken sıcaklık şartlarında MR damperin kontrol hassasiyetini önemli ölçüde zayıflattığı için kontrol algoritmasına sıcaklık etkisi de dahil edilmiştir. Bu sayede içinde çalışan sıvının sıcaklığı ne olursa olsun herhangi bir performans kaybına uğramaksızın MR damper sistemi fonksiyonunu yerine getirmektedir.
- 7) Ölçeklenmiş yapı modelleri tasarlanırken gerçek bir yapı dikkate alınmış ve bu yapının özellikleri belirlenirken 106M038 nolu "Yapısal Hasarların Deneysel ve Operasyonel

Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi” adlı TÜBİTAK projesi kullanılmıştır. Ölçeklenen 5 katlı çelik yapı modeli, 5 katlı betonarme yapının dinamik karakteristiklerini yansıtacak şekilde tasarlanmış ve bu 5 katlı çelik yapı modelinin yapısal özellikleri korunarak 6-7 ve 8 katlı çelik yapı modelleri oluşturulmuştur.

- 8) Sarsma tablası ile iki farklı deprem etkisi altında test edilen 5-8 katlı yapıların davranışları birlikte incelendiğinde, kontrol uygulamasının genel olarak yapı davranışını yüksek genliklerde %67’ye varan oranlarda azaltabildiği, bununla birlikte düşük genliklerde yapı davranışında ise meydana getirdiği azalmaların sınırlı düzeyde kaldığı belirlenmiştir.
- 9) MR damperin sadece 1. kat seviyesinde konumlandırılmasından dolayı kat yüksekliği arttıkça etkinliğinin azaldığı ve görelî kat yer değiştirmelerinde meydana gelen azalmaların üst katlarda düşük seviyelerde kaldığı tespit edilmiştir. Özellikle 7 ve 8 katlı binalarda gözlemlendiği gibi, bina kat sayısı arttıkça kontrol etkisinin sadece ilk katlarda etkin olduğu ve üst katlarda ise görelî kat yer değiştirmelerinde kayda değer bir azalma oluşturamadığı görülmüştür.
- 10) Taban kesme kuvvetindeki azalma dikkate alındığında El-Centro depremi etkisi altında en iyi sonuçları veren Damper 1 ile Damper 3 iken, Kocaeli depremi etkisi altında ise Damper 1 ile Damper 2 en iyi sonuçları vermektedir.
- 11) El-Centro depremi etkisinde 5, 6 ve 7 katlı binada taban kesme kuvvetini en fazla azaltabilen PID kontrol algoritması iken 8 katlı binada kayma kipli kontrolü daha etkin olmaktadır. Kocaeli depremi etkisinde ise 5 ve 8 katlı binayı en iyi kontrol eden PID algoritması iken 6 ve 7 katlı binayı en iyi kontrol eden kayma kipli kontrol olmuştur.
- 12) MR damperin yapıya katmış olduğu ek sönümden dolayı yapının periyodunda beklenen artışın olmadığı ve kontrollü binanın davranış periyodunun kontrolsüz binanın periyodu ile yaklaşık olarak aynı olduğu gözlemlenmiştir.
- 13) Belirli şartlar altında daha başarılı kontrolcü ve damper tipi bulunabiliyor iken, deprem etkisinden kaynaklanan farklı dinamikler, kontrolcünün başarısını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu nedenle uygulanan bir deprem etkisi altında başarılı olan bir kontrol algoritması, farklı bir deprem etkisinde benzer başarıyı göstermeyebilir.
- 14) Tüm sonuçlar dikkate alındığında J_3 ve J_6 indekslerinde genel olarak %50’nin üzerinde bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.
- 15) Deneylerin tamamında yapı modellerine damperin bağlı olduğu fakat akım uygulanmadığı (kontrolcüsüz, passive-off), yani sadece viskoz sönümlenmenin etkin olduğu ve MR etkinin devre dışı kaldığı koşullardaki karşılaştırma indeksleri referans olarak alınmıştır. Dolayısıyla hiç damper kullanılmadığı koşulların karşılaştırma

indekslerinde referans alınması durumunda azalmaların çok daha yüksek olacağı açıktır.

Gelecekte yapılması muhtemel tamamlayıcı çalışmalarda aşağıdaki hususların dikkate alınması önerilmektedir:

- 1) Bina kat sayısı arttıkça, kontrol etkisi sadece birinci ve ikinci katlarda etkin kalmaktadır. Üst katların görece kat yerdeğiştirmelerinde kayda değer bir azalma görülememiştir. Dolayısıyla gelecek çalışmalarda yüksek katlı binalar için birden fazla damper uygulaması yapılması önerilmektedir. Ayrıca bundan sonraki çalışmalarda bu damperlerin binadaki yerleşimi ve sayıları ile ilgili bir optimizasyon çalışması da araştırma konusu olabilir.
- 2) MR damperin uzun süre hareketsiz durmasından kaynaklı olarak MR sıvıdaki çökme ve konsantrasyonundaki bozulmalar önemli bir araştırma konusudur. Bu konuda uzun ömürlü ve kararlı yapıda MR sıvılarının sentezlenmesi yönünde araştırmalar yapılması gerekmektedir.
- 3) MR damperler basit yapıları, kolay uygulanabilmeleri sayesinde çok çeşitli alanlarda kullanılma potansiyeli bulunan yarı-aktif sönümleyicilerdir. Bununla birlikte düşük de olsa bir enerji kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Özellikle deprem anındaki olası elektrik kesintileri dikkate alındığında MR damperlerin gerektiğinde kullanmak için kendi enerjilerini üretebilmesi önemli bir araştırma konusu olmaktadır.
- 4) MR damperlerin histerisiz davranışının hassas kontrol algoritmalarının geliştirilmesinde hala önemli bir sorundur. Her ne kadar bu problem projede yapay sinir ağı yöntemi kullanılarak aşılmış olsa da, yapay sinir ağlarının doğasından kaynaklanan çeşitli eksiklikler (örneğin modelin eğitim için bir veri setine ihtiyaç duyması, matematiksel modellere göre daha geniş hata bandına sahip olması vb.) kontrol algoritmasının başarısı açısından bir zayıf halkadır. Bu nedenle ters damper modelinin çözümünü yapacak matematiksel yaklaşımlar daha hassas bir kontrol algoritması geliştirilmesi açısından önem arz etmektedir.



KAYNAKÇA

- Ahamed, R., Rashid, M. M., Ferdous, M. M., & Yusof, H. M. (2016). Design and modeling of energy generated magneto rheological damper. *Korea-Australia Rheology Journal*, 28(1), 67-74.
- Aldemir, Ü., & Aydın, E. (2005). Depreme dayanıklı yapı tasarımında yeni yaklaşımlar. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 435(1), 81-89.
- Aldemir, Ü., & Bakioğlu, M. (2000). Semiactive control of earthquake-excited structures. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 24(4), 237-246.
- Amini, F., Hazaveh, N. K., & Rad, A. A. (2013). Wavelet PSO-based LQR algorithm for optimal structural control using active tuned mass dampers. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(7), 542-557.
- Amini, F., Mohajeri, S. A., & Javanbakht, M. (2015). Semi-active control of isolated and damaged structures using online damage detection. *Smart Materials and Structures*, 24(10), 105002.
- ANSYS Documentation (2016) ANSYS FLUENT Theory Guide. *ANSYS Help*.
- Arsava, K. S., Kim, Y., Kim, K. H., & Shin, B. S. (2015). Smart fuzzy control of reinforced concrete structures excited by collision-type forces. *Expert Systems with Applications*, 42(21), 7929-7941.
- Askari, M., Li, J., & Samali, B. (2016). Cost-effective multi-objective optimal positioning of magnetorheological dampers and active actuators in large nonlinear structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(2), 230-253.
- Askari, M., Li, J., & Samali, B. (2016b). Semi-active control of smart building-MR damper systems using novel TSK-Inv and max-min algorithms. *Smart Structures and Systems*, 18(5), 1005-1028.
- Askari, M., Li, J., Samali, B., & Gu, X. (2016c). Experimental forward and inverse modelling of magnetorheological dampers using an optimal Takagi–Sugeno–Kang fuzzy scheme. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 27(7), 904-914..
- Azraai, M. R., Priyandoko, G., Yusoff, A. R., & Rashid, M. F. F. A. (2015). Parametric Optimization of magneto-rheological fluid damper using particle swarm optimization. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 11, 2591.
- Bai, J. W., & Cha, Y. J. (2016). Seismic Fragility Analysis for Semi-Actively Controlled Structures Using MR Dampers. In *Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016* (pp. 1343-1353).
- Barbat, A. H., Rodellar, J., Ryan, E. P., & Molinares, N. (1995). Active control of nonlinear base-isolated buildings. *Journal of Engineering Mechanics*, 121(6), 676-684.
- Basili, M., De Angelis, M., & Fraraccio, G. (2013). Shaking table experimentation on adjacent structures controlled by passive and semi-active MR dampers. *Journal of Sound and Vibration*, 332(13), 3113-3133.
- Beard, A. M., Schubert, D. W., & von Flotow, A. H. (1994, October). Practical product implementation of an active/passive vibration isolation system. In *Vibration Monitoring and Control* (Vol. 2264, pp. 38-50). International Society for Optics and Photonics.
- Bhardwaj, M. K., & Datta, T. K. (2006). Semiactive fuzzy control of the seismic response of building frames. *Journal of Structural Engineering*, 132(5), 791-799.
- Bitaraf, M., Hurlebaus, S., & Barroso, L. R. (2012). Active and semi-active adaptive control for undamaged and damaged building structures under seismic load. *Computer-Aided Civil and*

Infrastructure Engineering, 27(1), 48-64.

Caicedo, J. M., Jiang, Z., & Baxter, S. C. (2016). Including Uncertainty in Modeling the Dynamic Response of a Large-Scale 200 kN Magneto-Rheological Damper. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 3(2), G4016002.

Casciati, S., & Chen, Z. (2012). An active mass damper system for structural control using real-time wireless sensors. *Structural Control and Health Monitoring*, 19(8), 758-767.

Cetin, S., Zengeroglu, E., Sivrioglu, S., & Yuksek, I. (2011). A new semiactive nonlinear adaptive controller for structures using MR damper: design and experimental validation. *Nonlinear Dynamics*, 66(4), 731-743.

Cha, Y. J., Agrawal, A. K., Phillips, B. M., & Spencer Jr, B. F. (2014). Direct performance-based design with 200 kN MR dampers using multi-objective cost effective optimization for steel MRFs. *Engineering Structures*, 71, 60-72.

Chae, Y., Ricles, J. M., & Sause, R. (2012). Large-scale experimental studies of structural control algorithms for structures with magnetorheological dampers using real-time hybrid simulation. *Journal of Structural Engineering*, 139(7), 1215-1226.

Chae, Y., Ricles, J. M., & Sause, R. (2014). Large-scale real-time hybrid simulation of a three-story steel frame building with magneto-rheological dampers. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(13), 1915-1933.

Chang, C. M., Strano, S., & Terzo, M. (2016). Modelling of hysteresis in vibration control systems by means of the Bouc-Wen model. *Shock and Vibration*, 2016.

Chen, P., Bai, X. X., & Qian, L. J. (2016). Magnetorheological fluid behavior in high-frequency oscillatory squeeze mode: Experimental tests and modelling. *Journal of Applied Physics*, 119(10), 105101.

Cho, S. W., Jung, H. J., & Lee, I. W. (2005). Smart passive system based on magnetorheological damper. *Smart Materials and Structures*, 14(4), 707.

Choi, Y. T., & Wereley, N. M. (2009). Self-powered magnetorheological dampers. *Journal of Vibration and Acoustics*, 131(4), 044501.

Çetin, Ş., Sivrioğlu, S., Zengeroğlu, E. and Yüksek, I. (2011) Semi-active H^∞ robust control of six degree of freedom structural system using MR damper. *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 19, no. 5, pp. 797–805.

Fu, T. S., & Johnson, E. A. (2014). Structural health monitoring with a distributed mass damper system. *Structural Control and Health Monitoring*, 21(2), 189-204.

Ghaboussi, J., & Joghataie, A. (1995). Active control of structures using neural networks. *Journal of Engineering Mechanics*, 121(4), 555-567.

Ghaffari, A., Hashemabadi, S. H., & Ashtiani, M. (2015). A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26(8), 881-904.

Gołdasz, J., & Sapiński, B. (2015). Experimental Verification of an MR Monotube Damper Model. In *Insight into Magnetorheological Shock Absorbers* (pp. 145-171). Springer, Cham.

Gołdasz, J., & Sapiński, B. (2015). *Insight into magnetorheological shock absorbers*. Cham: Springer International Publishing.

Gu, Z. Q., & Oyadiji, S. O. (2008). Application of MR damper in structural control using ANFIS method. *Computers & structures*, 86(3-5), 427-436.

Guan, X. C., Guo, P. F., & Ou, J. P. (2011). Modeling and analyzing of hysteresis behavior of magneto rheological dampers. *Procedia Engineering*, 14, 2756-2764.

- Ha, Q. P., Royel, S., Li, J., & Li, Y. (2016). Hysteresis modeling of smart structure MR devices using describing functions. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(1), 44-50.
- Heo, G., Jeon, J., & Jeon, S. (2016). Real-time Semi-active Vibration Control in Cable-stayed Bridges by Shear-type MR damper and Clipped-optimal Control Algorithm. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 20(2), 113-123.
- Heo, G., Jeon, S., Jeon, J., Lee, C., & Seo, S. (2016). Calculating a MR Dampers Optimal Capacity for a Control of Structural Vibration. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 20(3), 163-169.
- Hitchcock, G. H., Wang, X., & Gordaninejad, F. (2007). A new bypass magnetorheological fluid damper. *Journal of Vibration and Acoustics*, 129(5), 641-647.
- Housner, G. W., Bergman, L. A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F., ... & Yao, J. T. (1997). Structural control: past, present, and future. *Journal of engineering mechanics*, 123(9), 897-971.
- Hu, G., Liu, F., Xie, Z., & Xu, M. (2016). Design, analysis, and experimental evaluation of a double coil magnetorheological fluid damper. *Shock and Vibration*, 2016.
- Hu, W., Chang, T., Fu, L., & Xi, J. (2016, May). The establishment of dynamic model that based on magnetorheological damper. In *Control and Decision Conference (CCDC), 2016 Chinese* (pp. 349-354). IEEE.
- Jancirani, J., Nanthakumar, A. J. D., & Niketh, P. (2015). Optimal current value estimation for an automotive Magneto Rheological (MR) fluid damper actuation. In *Applied Mechanics and Materials*(Vol. 812, pp. 93-101). Trans Tech Publications.
- Kasai, K., & Matsuda, K. (2014). Full-scale dynamic testing of response-controlled buildings and their components: concepts, methods, and findings. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13(1), 167-181.
- Kim, Y., Kim, Y. H., & Lee, S. (2015). Multivariable nonlinear identification of smart buildings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 62, 254-271.
- Korkmaz, S. (2011). A review of active structural control: challenges for engineering informatics. *Computers & Structures*, 89(23-24), 2113-2132.
- Krishna, H., Kumar, H., & Gangadharan, K. (2017). Optimization of magneto-rheological damper for maximizing magnetic flux density in the fluid flow gap through FEA and GA approaches. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 98(4), 533-539.
- Lee, H. J., Jung, H. J., Moon, S. J., Lee, S. K., Park, E. C., & Min, K. W. (2010). Experimental investigation of MR damper-based semiactive control algorithms for full-scale five-story steel frame building. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21(10), 1025-1037.
- Lei, Y., Wu, D. T., & Lin, S. Z. (2013). Integration of decentralized structural control and the identification of unknown inputs for tall shear building models under unknown earthquake excitation. *Engineering Structures*, 52, 306-316.
- Li, X., & Guo, L. (2015). Research on the Application of Neural net in the Civil Engineering Semi-active Control. *3rd International Conference on Management, Education, Information and Control*, 1515-1521.
- Li, X., Liang, X., He, F., Guo, W., & Wang, W. (2015, March). Magnetic Design and Simulation Analysis of Magneto-rheological Damper. In *2015 International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference*, Atlantis Press.
- Li, Z. X., Chen, Y., & Shi, Y. D. (2016). Seismic damage control of nonlinear continuous reinforced concrete bridges under extreme earthquakes using MR dampers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88, 386-398.

- Li, Z. X., Lv, Y., Xu, L. H., Ding, Y., & Zhao, Q. (2013). Experimental studies on nonlinear seismic control of a steel–concrete hybrid structure using MR dampers. *Engineering Structures*, 49, 248-263..
- Londoño, J. M., Neild, S. A., & Wagg, D. J. (2015). Using a damper amplification factor to increase energy dissipation in structures. *Engineering Structures*, 84, 162-171.
- Lord Technical Data (2011) MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid. Available at: http://www.lordmrstore.com/_literature_231215/Data_Sheet_-_MRF-132DG_Magneto-Rheological_Fluid, (accessed 2 June 2018).
- Marshall, J. D., & Charney, F. A. (2012). Seismic response of steel frame structures with hybrid passive control systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(4), 715-733.
- Martinelli, P., & Mulas, M. G. (2010). An innovative passive control technique for industrial precast frames. *Engineering Structures*, 32(4), 1123-1132.
- Martínez, C. A., Curadelli, O., & Compagnoni, M. E. (2013). Optimal design of passive viscous damping systems for buildings under seismic excitation. *Journal of Constructional Steel Research*, 90, 253-264.
- Matsuoka, T., Yamano, S., Hiramoto, K., Sunakoda, K., Abe, N., & Lin, P. Y. (2015, July). Inertia Damper Using MR Fluid With Spiraled By-Pass Pipe. In *ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference* (pp. V008T08A036-V008T08A036). American Society of Mechanical Engineers.
- Matsuoka, T., Yamano, S., Hiramoto, K., Sunakoda, K., Abe, N., & Lin, P. Y. (2015, July). Inertia Damper Using MR Fluid With Spiraled By-Pass Pipe. In *ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference* (pp. V008T08A036-V008T08A036). American Society of Mechanical Engineers.
- Mevada, S. V., & Jangid, R. S. (2015). Seismic response of torsionally coupled building with passive and semi-active stiffness dampers. *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, 7(1), 31-48.
- Mohammadzadeh, S., & Kim, Y. (2015). PCA-based neuro-fuzzy model for system identification of smart structures. *Smart Structures and Systems*, 15(4), 1139-1158
- Morales-Beltran, M., & Paul, J. (2015). Active and Semi-Active Strategies to Control Building Structures Under Large Earthquake Motion. *Journal of Earthquake Engineering*, 19(7), 1086-1111.
- Motahari, S. A., Ghassemieh, M., & Abolmaali, S. A. (2007). Implementation of shape memory alloy dampers for passive control of structures subjected to seismic excitations. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(12), 1570-1579.
- Mualla, I. H., & Belev, B. (2002). Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation. *Engineering Structures*, 24(3), 365-371.
- Ohtori, Y., Christenson, R. E., Spencer Jr, B. F., & Dyke, S. J. (2004). Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(4), 366-385.
- Oliveira, F., de Morais, P. G., & Suleman, A. (2015). Semi-active control of base-isolated structures. *Procedia Engineering*, 114, 401-409.
- Parlak, Z. (2010). Manyeto-Reolojik Sıvılı Yarı-Aktif Bir Sönümleyici Tasarımı Ve Analizi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora tezi, Sakarya.
- Patrascu, M. (2015). Genetically enhanced modal controller design for seismic vibration in nonlinear multi-damper configuration. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 229(2), 158-168.

- Peng, Y., Yang, J., & Li, J. (2016). Seismic risk-based stochastic optimal control of structures using magnetorheological dampers. *Natural Hazards Review*, 18(1), B4016001.
- Raizada, A., Singru, P., Krishnakumar, V., & Raj, V. (2016). Development of an experimental model for a magnetorheological damper using artificial neural networks (Levenberg-Marquardt Algorithm). *Advances in Acoustics and Vibration*, 2016.
- Raut, B. R., & Jangid, R. S. (2014). Seismic analysis of benchmark building installed with friction dampers. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 7(1), 20-37.
- Ribakov, Y., & Agranovich, G. (2015). Using a limited set of MR dampers for improving structural seismic response. *Structural Control and Health Monitoring*, 22(4), 615-630.
- Şirin, S. and Boduroğlu, H. (2010) Sürtünme sönmümlü elemanlı betonarme sistemlerin sismik performansı. *İTÜ dergisi*, no. 9, pp. 169–177.
- Saglam, C. O., Baran, E. A., Nergiz, A. O., & Sabanovic, A. (2011, April). Model following control with discrete time SMC for time-delayed bilateral control systems. In *Mechatronics (ICM), 2011 IEEE International Conference on* (pp. 997-1002). IEEE.
- Seo, C. Y., Karavasilis, T. L., Ricles, J. M., & Sause, R. (2014). Seismic performance and probabilistic collapse resistance assessment of steel moment resisting frames with fluid viscous dampers. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(14), 2135-2154.
- Shen, W., Zhu, S., Zhu, H., & Xu, Y. L. (2016). Electromagnetic energy harvesting from structural vibrations during earthquakes. *Smart Struct. Syst*, 18(3), 449-470.
- Shiao, Y. J., Jow, M. L., Kuo, W. H., Nguyen, Q. A., & Lai, C. W. (2015). Design and experiment of the magnetorheological damper with multiple poles. In *Applied Mechanics and Materials*(Vol. 764, pp. 223-227). Trans Tech Publications.
- Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Dumne, S. M. (2015). Seismic response analysis of coupled building involving MR damper and elastomeric base isolation. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(2), 457-470.
- Susan-Resiga, D. (2009). A rheological model for magneto-rheological fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(8), 1001-1010.
- Symans, M. D., & Constantinou, M. C. (1999). Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review. *Engineering structures*, 21(6), 469-487.
- Şahin, İ., Öz, H. R., Engin T., İlhan, A. and Akpolat, A. (2005). Manyetik Sıvılı Damperlerin Yapısal Analizi. *Mühendis ve Makina*, 46(551), 41–49.
- Takin, K., Hashemi, B. H., & Nekooei, M. (2015). Response Controlling of Corner Lateral Displacements of Structures due to Time-Varying Torsion by using MR Damper. *Indian Journal of Science and Technology*, 8(22).
- Thirupathi, P., Janaki Ramulu, P., Venukumar, S., Saikiran Reddy, P., Krishna Reddy, B., & Battacharya, S. (2015). Experimental Analysis of MR Fluid by Magneto-Rheological (MR) Damper. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 813, pp. 1002-1006). Trans Tech Publications.
- Uppatthangkul, Y., & Ohmori, H. (2015, May). Optimizing vehicle MR damper semi-active suspension control system by L 1 adaptive control with linear time invariant controller. In *Control Conference (ASCC), 2015 10th Asian* (pp. 1-6). IEEE.
- Uz, M. E., & Hadi, M. N. (2014). Optimal design of semi active control for adjacent buildings connected by MR damper based on integrated fuzzy logic and multi-objective genetic algorithm. *Engineering Structures*, 69, 135-148.
- Vadtala, I. H., Soni, D. P., & Panchal, D. G. (2013). Semi-active control of a benchmark building using neuro-inverse dynamics of MR damper. *Procedia Engineering*, 51, 45-54.

- Velinsky, S. A., & White, R. A. (1980). Vehicle energy dissipation due to road roughness. *Vehicle System Dynamics*, 9(6), 359-384.
- Xu, B., He, J., & Masri, S. F. (2015). Data-based model-free hysteretic restoring force and mass identification for dynamic systems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30(1), 2-18.
- Xu, F. H., Xu, Z. D., Zhang, X. C., Guo, Y. Q., & Lu, Y. (2016). A compact experimentally validated model of magnetorheological fluids. *Journal of Vibration and Acoustics*, 138(1), 011017.
- Xu, L. H., Li, Z. X., & Lv, Y. (2013). Numerical study on nonlinear semiactive control of steel-concrete hybrid structures using MR dampers. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.
- Xu, Z. D., Shen, Y. P., & Guo, Y. Q. (2003). Semi-active control of structures incorporated with magnetorheological dampers using neural networks. *Smart materials and structures*, 12(1), 80.
- Yang, M. G., & Cai, C. S. (2016). Longitudinal vibration control for a suspension bridge subjected to vehicle braking forces and earthquake excitations based on magnetorheological dampers. *Journal of Vibration and Control*, 22(17), 3659-3678.
- Yang, Z., Xu, Y. L., & Lu, X. L. (2003). Experimental seismic study of adjacent buildings with fluid dampers. *Journal of Structural Engineering*, 129(2), 197-205.
- Yu, G., Du, C., & Sun, T. (2015). Thermodynamic behaviors of a kind of self-decoupling magnetorheological damper. *Shock and Vibration*, 2015.
- Zhang, Y., & Zhu, S. (2008). Seismic response control of building structures with superelastic shape memory alloy wire dampers. *Journal of engineering mechanics*, 134(3), 240-251.
- Zheng, J., Li, Y., & Wang, J. (2017). Design and multi-physics optimization of a novel magnetorheological damper with a variable resistance gap. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(17), 3152-3168.
- Zheng, J., Li, Y., Li, Z., & Wang, J. (2015). Transient multi-physics analysis of a magnetorheological shock absorber with the inverse Jiles–Atherton hysteresis model. *Smart Materials and Structures*, 24(10), 105024.
- Zheng, J., Li, Z., Koo, J. H., & Wang, J. (2015). Analysis and compensation methods for time delays in an impact buffer system based on magnetorheological dampers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26(6), 690-700.
- Zhu, X., Jing, X., & Cheng, L. (2012). Magnetorheological fluid dampers: A review on structure design and analysis. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(8), 839-873.
- Zhu, X., Wang, W., Yao, B., Cao, J., & Wang, Q. (2015, July). Analytical modeling and optimal design of a MR damper with power generation. In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2015 IEEE International Conference on* (pp. 1531-1536). IEEE.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. TAHSİN ENGİN
Proje No:	115M363
Proje Başlığı:	Depreme Duyarlı Yapıların Yarı-Aktif Manyeto-Reolojik Damperler İle Kontrolü
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	ZEKERİYA PARLAK, İSMAIL ŞAHİN, SEVAL GENÇ, GÜRSOY TURAN, NACİ ÇAĞLAR
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	SAKARYA Ü. MÜHENDİSLİK F. MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/11/2015 - 15/05/2018
Onaylanan Bütçe:	393000.0
Harcanan Bütçe:	245802.25
Öz:	<p>Bu projede ülkemiz yapı stoğunu temsil eden 5-8 katlı yapıların deprem güvenilirliğini artırmak üzere yapı kontrolünü sağlayacak ekonomik ve etkili bir deprem sönümleyici sisteminin tasarımı, optimizasyonu ve değişik deprem yükleri etkisi altındaki testleri gerçekleştirilmiştir. Seçilen gerçek yapılarla aynı dinamik karakteristiklere sahip ölçeklenmiş çelik yapı modellerinin, altı serbestlik dereceli sarsma tablası ile gerçek deprem verileri kullanılarak dinamik deneyleri yapılmıştır.</p> <p>Proje kapsamında kullanılan titreşim sönümleyiciler manyeto-reolojik (MR) sıvılı yarı-aktif damperlerdir. Çift milli ve tek milli olmak üzere iki farklı tipte MR damperlerin optimum tasarımı, analizi ve imalatı gerçekleştirilmiş, bu damperlerde dünya çapında yaygın olarak kullanılan ticari bir MR sıvı kullanılmasının yanında, proje kapsamında geliştirilen ve karakterizasyonu tanımlanmış olan özgün bir sıvı da kullanılmıştır. Performans ölçümleri yapılan biri ticari olmak üzere dört farklı MR damperin etkinliği, sarsma tablası üzerine yerleştirilen model yapılarda EI-Centro ve Kocaeli deprem yükleri etkisi altında incelenmiştir. MR damperin kontrolü üç farklı kontrol algoritması kullanılarak yapılmış ve her bir kontrol algoritmasının performansı değerlendirilmiştir. Ayrıca MR damperlerin dinamik karakterizasyonunda bugüne kadar literatürde pek dikkate alınmayan sıcaklık etkileri de kontrol algoritmalarına dahil edilerek MR damper performansı sıcaklığa adaptif hale getirilmiştir.</p> <p>MR damperlerin tasarımı, manyetik alan etkileşimli akış alanı çözümüne dayalı optimizasyonu, alternatif bir yerli MR sıvı üretimi, Türkiye'deki yapı stoğunun dinamik karakteristiklerini yansıtan ölçeklenmiş çelik yapı modellerinin tasarımı ve kullanımı, sıcaklık etkilerinin dahil edildiği farklı kontrol algoritmalarının uygulanması bu projenin öne çıkan özgün yönleridir.</p> <p>Bu proje sonucunda, aktif deprem kuşağı üzerinde bulunan ülkemizde depremin yıkıcı etkilerine karşı gerçek yapılarda uygulanabilecek ve ticarileştirme potansiyeli (Teknoloji Hazırlık Seviyesi en az 6) yüksek olan bir ürün, kontrol algoritmalarıyla beraber özgün olarak geliştirilmiştir. Önerilen entegre sistem ile depremin yıkıcı etkilerinin kontrolcüsüz duruma göre %67'ye varan oranlarda azaltılabileceği ve böylelikle can ve mal kayıplarının önüne geçilebileceği gösterilmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Deprem, Yapı güvenliği, MR sıvı, MR damper, optimizasyon, HAD, Kontrol algoritmaları, Sarsma tablası
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Coupled Magnetic And CFD Modelling of a Structural Magnetorheological Vibration Absorber with Experimental Validation (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),