

Manyeto Reolojik Damper Optimizasyonu ve Dinamik Model Parametrelerinin Tayini

Proje No: 108M635

Yrd. Doç. Dr. İsmail ŞAHİN

Doç. Dr. Tahsin ENGİN

Yük. Müh. Zekeriya Parlak

Şubat 2010

SAKARYA

ÖNSÖZ

Manyeto Reolojik (MR) Damperler, sahip oldukları üstün özellikleri sayesinde hızla gelişen ve ilgi uyandıran yarı-aktif kontrol edilebilir elemanlardır. Sunduğu avantajlar sebebi ile hem taşıma araçlarında hem de inşaat sektöründe özellikle ilgi uyandırmaktadır. Ancak yapısından kaynaklanan histerisiz olgusu sebebi ile son derece doğrusal olmayan bir davranış göstermesi, bu elemanların kontrolünde kısıtlara sebep olmaktadır. Bu kısıtların ortadan kaldırılabilmesi için MR damperi oluşturan elemanlar ile geometrik yapının, MR damper davranışına olan etkisinin tam olarak bilinmesi zorunluluğunu getirmektedir. Bu amaçla birçok bilimsel çalışma özellikle 1990 sonrasında hızla artmıştır. Bu çalışmalar, MR sıvı özelliklerinden MR damper davranışının tespit edilmesine, MR damper kontrol uygulamalarından akışkanlar mekaniği yönünden incelenmesine kadar geniş bir alanda ilgi odağı olmuş ve olmaya da devam etmektedir.

Bu çalışmada, damper geometrisini optimize etmek amacıyla MR damper içerisindeki; özellikle piston kafasına açılan akış kanalındaki MR sıvı akışı, hem hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) hem de manyetik alan analizi beraber incelenmiştir. Belirlene bir hedef kuvvete göre geometrinin en uygun biçime getirilmesi işlemine paralel olarak, MR damper histerisiz davranışının da tahmin edilebildiği hem cebirsel hem de zamana bağlı dinamik modeller incelenmiştir. İncelenen modeller literatürde çokça kullanılan, referans verilen veya uygulaması olan modellerdir. İncelenen modeller eğer zamana bağlı çözülmesi gerekli ise, Matlab/Simulink modelleri oluşturulmuş ve zamana bağlı çözümleri yapılarak model parametreleri bulunmuştur. Eğer sadece cebirsel ifadeli ise, Matlab-Eğri Uydurma paket programı aracılığı ile parametreler bulunmuştur. Elde edilen parametreler topluca incelenerek en az hataya sahip olanlar belirlenmiştir. Sonuç olarak MR damperin kapsamlı bir HAD analizi parametrik olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca en yaygın dinamik modeller ile MR damper davranışı tanımlanmış ve en uygun modeller tespit edilmiştir.

Bu çalışma, TÜBİTAK Hızlı destek programı (1002) kapsamında 108M635 proje numarası ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	2
İÇİNDEKİLER.....	3
ŞEKİL LİSTESİ	5
TABLO LİSTESİ.....	8
ÖZET	10
ABSTRACT	11
1. MR DAMPER DİNAMİK MODELLERİNİN İNCELENMESİ	12
1.1. Bouc-Wen Model (BW).....	12
1.2. Modifiye Bouc-Wen (mBW)	14
1.3. Akıma bağlı Modifiye Bouc-Wen Model (amBW)	14
1.4. Modifiye Dahl Model (mDM).....	15
1.5. Algebraic Model (Alg)	16
1.6. Modifiye Algebraic Model (mAlg).....	16
1.7. Modified LuGre Friction Model (mLFM)	16
1.8. Kwok Model (KM)	16
1.9. Model parametrelerin tespiti	18
1.10. Deneysel sonuçlarla karşılaştırma.....	18
1.11. Değerlendirme	19
2. MR DAMPERİN GEOMETRİK YAPISININ ANALİZİ.....	21
2.1. MR Cihazların Tasarımı	21
2.2. Kontrol edilebilir Kuvvet ve Dinamik Aralık.....	26
2.3. Manyetik Akı Yoğunluğunun Hesaplanması	28
2.4. Taguchi Deney Tasarımı Metodu.....	31
2.5. Sinyal Gürültü (S/N)Oranı	34
2.6. Taguchi Metodunun temel çalışma biçimi	35
2.7. Taguchi Deney Tasarımının Aşamaları.....	36
2.8. Etkin Bir Deney Tasarımı İçin İstenen Özellikler	36
2.9. Taguchi Deneysel Tasarım Modelinin MR Dampere Uygulanması	37

2.10.	Aday Geometrilerin diğ er büyüklüklerinin hesaplanması	38
2.11.	Manyetik akı yoğunluğunun hesaplanması	39
2.12.	Kanal boyunca olan basınç kaybının hesaplanması	39
2.13.	Taguchi metodu ile deney sonuçlarının değerlendirilmesi	40
2.14.	Faktör etkilerinin varyans analizi ile araştırılması	43
2.15.	Değerlendirme	46
3.	MANYETİK ALAN VE AKIŞ ANALİZLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE GEOMETRİK OPTİMİZASYONU.....	47
3.1.	Manyetik Akı Yoğunluğunun Sayısal Olarak Hesaplanması.....	47
3.2.	Akış Analizi.....	50
3.2.1.	Çözüm Ağı.....	52
3.2.2.	CFD Analizi	52
3.2.3.	CFD Sonuçlar.....	56
3.3.	Optimizasyon Çalışmaları	57
3.4.	Manyetik Alan Optimizasyon Çalışmaları.....	58
3.5.	Manyetik Döngü Açısından Optimum Değerler.....	66
3.6.	CFX ile geometrik optimizasyon.....	67
3.7.	CFD Analizi Açısından Optimum Değerler	71
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	76
4.1.	MR damper testleri	78
4.2.	Qualitek-4 Programı ile yapılan Taguchi analizi:.....	78
4.3.	S/N Analizi:.....	80
4.4.	Test Sonuçları	81
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ	103
6.	KAYNAKLAR	105

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Bingham modeli Kuvvet-Hız grafiği	12
Şekil 1.2. Bouc-Wen Model	12
Şekil 1.3 Bouc-Wen modelinin Matlab/Simulink diyagramları	13
Şekil 1.4. The Modifiye Bouc-Wen model.	14
Şekil 1.5. Modified Dahl model of MR damper.	15
Şekil 1.6. mLugre modeline ait Simulink ana blok gösterimi	17
Şekil 1.7. Kwok model (a) Şematik gösterim (b)Parametrelerinin etkisi	17
Şekil 2.1. Piston kafası üzerindeki manyetik alan uygulanan kanal	22
Şekil 2.2. Piston kafasında bobinin görüldüğü bir MR Damper kesiti	22
Şekil 2.3. Manyetik alan uygulanan kontrol edilebilir akışkanlı cihazların temel çalışma modları	23
Şekil 2.4. MR damperdeki manyetik döngü	24
Şekil 2.5. İncelen (shear thinning) akışta post-yield bölgede değişen plastik viskozite	25
Şekil 2.6. MR Damperin kuvvet bileşenleri	27
Şekil 2.7. MR damperin basitleştirilmiş manyetik döngüsü	29
Şekil 2.8. C1010 çeliğinin B-H Eğrisi	30
Şekil 2.9. MRF-132DG numaralı sıvının B-H Eğrisi	30
Şekil 2.10 Taguchi kalite kontrol sistemi	33
Şekil 2.11. SN Oranlarının Grafiksel Gösterimi	42
Şekil 2.12. Ortalamaların Grafiksel Gösterimi	42
Şekil 3.1. Manyetik akı yoğunluğunu hesaplamak için gerekli adımlar	47
Şekil 3.2. Manyetik alan simülasyonunun gerçekleştirildiği geometri	48
Şekil 3.3. Cihaz 1 için manyetik akı yoğunluğu	49
Şekil 3.4. Cihaz 2 için manyetik akı yoğunluğu	49
Şekil 3.5. Cihaz 3 için manyetik akı yoğunluğu	49
Şekil 3.6. Cihaz 4 için manyetik akı yoğunluğu	49
Şekil 3.7. Cihaz 5 için manyetik akı yoğunluğu	49
Şekil 3.8. Cihaz 6 için manyetik akı yoğunluğu	49
Şekil 3.9. Cihaz 7 için manyetik akı yoğunluğu	50
Şekil 3.10. Cihaz 8 için manyetik akı yoğunluğu	50
Şekil 3.11. Cihaz 9 için manyetik akı yoğunluğu	50
Şekil 3.12. Cihaz 9 için manyetik akı döngüsü	50
Şekil 3.13. Akış analizi için gerekli adımlar	51

Şekil 3.14. Akış geometrisi üzerinde tanımlanan parametreler	51
Şekil 3.15. Analizde tanımlanan tüm giriş parametreleri	52
Şekil 3.16. Çözüm ağı ve Sınırlar	53
Şekil 3.17. CFX-Pre üzerinde yapılan çeşitli şartlarının tanımlanması	55
Şekil 3.18. 0.53 sn de belirlene bir yüzey üzerindeki basınç düşümü	56
Şekil 3.19. 0.53 sn de belirlene bir yüzey üzerindeki dinamik viskozite	56
Şekil 3.20. 1.57. sn de belirlene bir yüzey üzerindeki sıcaklık değişimi	57
Şekil 3.21. Manyetik alan için yapılan optimizasyon çalışmasının şematik gösterimi	57
Şekil 3.22. Akış analizi için yapılan optimizasyon çalışmasının şematik gösterimi	58
Şekil 3.23. ANSYS Workbench'de Magnetostatic analiz ile Optimizasyon	59
Şekil 3.24. Manyetik Akı Yoğunluğunun uygulan akım ile değişimi	61
Şekil 3.25. Manyetik Akı Yoğunluğunun kutupbaşı ile değişimi	62
Şekil 3.26. Manyetik Akı Yoğunluğunun kanal genişliği ile değişimi	62
Şekil 3.27. Manyetik Akı Yoğunluğunun manyetik akı dönüş genişliği ile değişimi	63
Şekil 3.28. Manyetik Akı Yoğunluğunun çekirdek genişliği ile değişimi	63
Şekil 3.29. Manyetik Akı Yoğunluğunun piston kafası toplam uzunluğu ile değişimi	64
Şekil 3.30. Manyetik Akı Yoğunluğunun sarım sayısı ile değişimi	64
Şekil 3.31. Manyetik Akı Yoğunluğunun çekirdek genişliği ve manyetik akı dönüş genişliği ile değişimi	65
Şekil 3.32. Manyetik Akı Yoğunluğunun sarım sayısı ve akım ile değişimi sonucu oluşan yüzey	65
Şekil 3.33. Manyetik Akı Yoğunluğunun kutup başı ve piston kafası toplam uzunluğu ile değişimi	66
Şekil 3.34. ANSYS Goal Optimization Driven üzerinde MOGA	66
Şekil 3.35. ANSYS CFX'de manyetik alan analizi ile elde edilen optimal geometrilerin damper kuvveti	67
Şekil 3.36. ANSYS Workbench de CFX analizi ile Optimizasyon	68
Şekil 3.37. Damper kuvvetinin akma gerilmesi ile değişimi	69
Şekil 3.38. Damper kuvvetinin kutup başı ile değişimi	69
Şekil 3.39. Damper kuvvetinin kanal genişliği ile değişimi	70
Şekil 3.40. Damper kuvvetinin kanal genişliği ve kutup başı ile değişimi sonucu oluşan yüzey	70
Şekil 3.41. Damper kuvvetinin akma gerilmesi ve kutupbaşı ile değişimi sonucu oluşan yüzey	71
Şekil 3.42. Damper kuvvetini akma gerilmesi ve kanal genişliği ile değişimi sonucu oluşan yüzey	71
Şekil 3.43. Hedef kuvvet 1000 N ve Minimum Akma Gerilmesi için geometrinin Optimizasyon aracı üzerindeki görünümü	72
Şekil 3.44. CFX'de elde edilen optimum koşullara karşılık gelen diğer geometrik büyüklükler	73

Şekil 3.45. Hedef kuvvet 1000 N, Minimum Akma Gerilmesi ve Maksimum kanal genişliği için geometrinin Optimizasyon aracı üzerindeki görünümü	73
Şekil 3.46. Hedef kuvvet 1000 N, Minimum Akma Gerilmesi ve Minimum kutupbaşı için geometrinin Optimizasyon aracı üzerindeki görünümü	74
Şekil 4.1. İmal edilen MR damperlerin montaj öncesi görüntüsü	76
Şekil 4.2. MR Damper alıştırma ünitesi	77
Şekil 4.3. Roehrig Damper test ünitesi	77
Şekil 4.4. Shock yazılımında MR damper veri ve grafik görüntüsü	78
Şekil 4.5. Ölçüm sonuçlarının normalize edilmesi	79
Şekil 4.6 . 100 değerine normalize edilmiş ve tek bir değer haline getirilmiş olan dinamik aralık ve kuvvet değerleri	79
Şekil 4.7. Her bir cihazın S/N oranları	80
Şekil 4.8. ANOVA analizi	80
Şekil 4.9. Optimal değerler	81
Şekil 4.10. Optimal geometrinin S/N ve kalite karakteristik değerleri	81
Şekil 4.11. V=0.05 m/s ve 0.075 m yerdeğiştirmede Cihaz 1 test sonuçları	82
Şekil 4.12.V=0.05 m/s ve 0.075 m yer değiştirmede Cihaz 2 test sonuçları	83
Şekil 4.13. V=0.05 m/s ve 0.075 m yer değiştirmede Cihaz 3 test sonuçları	84
Şekil 4.14. V=0.05 m/s ve 0.075 m yer değiştirmede Cihaz 4 test sonuçları	85
Şekil 4.15. V=0.05 m/s ve 0.075 m yer değiştirmede Cihaz 5 test sonuçları	86
Şekil 4.16. V=0.05 m/s ve 0.075 m yer değiştirmede Cihaz 6 test sonuçları	87
Şekil 4.17. V=0.05 m/s ve 0.075 m yer değiştirmede Cihaz 7 test sonuçları	88
Şekil 4.18. V=0.05 m/s ve 0.075 m yer değiştirmede Cihaz 8 test sonuçları	89
Şekil 4.19. V=0.05 m/s ve 0.075 m yer değiştirmede Cihaz 9 test sonuçları	90
Şekil 4.20. V=0.05 m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 1 test sonuçları	91
Şekil 4.21. V=0.05 m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 2 test sonuçları	92
Şekil 4.22. V=0.05 m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 3 test sonuçları	93
Şekil 4.23. V=0.05 m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 4 test sonuçları	94
Şekil 4.24. V=0.05 m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 5 test sonuçları	95
Şekil 4.25. V=0.05 m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 6 test sonuçları	96
Şekil 4.26. V=0.05 m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 7 test sonuçları	97
Şekil 4.27. V=0.05 m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 8 test sonuçları	98
Şekil 4.28. V=0.05 m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 9 test sonuçları	99

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. Karşılaştırılan modellerin her bir hızda ve ortalama hata değerleri.....	19
Tablo 1.2. Test ve model verileri arasındaki hata miktarları (Denklem 2.19, 2.20, 2.21'e göre).....	20
Tablo 2.1. Sinyal Gürültü (S/N) oranlarının hesaplanması.....	34
Tablo 2.2. Taguchi ve tam faktöryel tasarım için kombinasyonlar	36
Tablo 2.3. Deney Tasarımında Bulunması İstenen Özellikler	37
Tablo 2.4. MR damperin Taguchi analizinde kullanılan parametreler ve seviyeleri	37
Tablo 2.5. L-9 ortogonal dizisine parametrelerin atanması	38
Tablo 2.6. L-9 ortogonal dizisine göre deney şartları	38
Tablo 2.7. Bobin genişliği, Piston yuvası kalınlığı ve Sarım sayısı	38
Tablo 2.8. Manyetik Akı Yoğunlukları ve Akma Gerilmesi Değerleri.....	39
Tablo 2.9. Basınç Düşümü ve Dinamik Aralık Değerleri	40
Tablo 2.10. Damper Kuvveti ve Dinamik Aralık Değerleri	40
Tablo 2.11. Deneylerin dinamik aralığa göre SN Oranları	40
Tablo 2.12. Faktörlerin seviyelerine göre SN Oranları	41
Tablo 2.13. Faktörlerin seviyelerine göre Ortalama Değerleri.....	41
Tablo 2.14. SN oranları sonuçlarına göre en uygun seviyeler	43
Tablo 2.15. Deneylere göre cevap değeri (y_1) ve cevap değerinin karesi (y_1^2).....	44
Tablo 3.1. Manyetik Akı Yoğunlukları ve Akma Gerilmesi Değerleri.....	48
Tablo 3.2. MR sıvısının özellikleri.....	55
Tablo 3.3. Tasarım parametrelerini alt ve üst sınırları.....	58
Tablo 3.4. Optimizasyon için ANSYS tarafından yapılan numune çözümler	59
Tablo 3.5. Maksimum B için geometri	66
Tablo 3.6. Maksimum B için CFD analizi sonucu elde edilen damper kuvveti.....	67
Tablo 3.7. Maksimum B, Minimum Akım ve Sarım sayısı için geometri	67
Tablo 3.8. Maksimum B için CFD analizi sonucu elde edilen damper kuvveti.....	67
Tablo 3.9. CFX Tasarım parametrelerinin alt ve üst sınırları	68
Tablo 3.10. CFX analizinde optimizasyon için ANSYS tarafından yapılan numune çözümler	68
Tablo 3.11. Hedef kuvvet 1000 N ve Minimum Akma Gerilmesi için geometri	72
Tablo 3.12. Elde edilen optimum değerlere karşılık gelen B, N, d_k ve l değerleri.....	72
Tablo 3.13. Hedef kuvvet 1000 N 'u Minimum Akma Gerilmesi ve en büyük kanal genişliği için geometri.....	73
Tablo 3.14. Elde edilen optimum değerlere karşılık gelen B, N, d_k ve l değerleri	74

Tablo 3.15. Hedef kuvvet 1000 N 'u Minimum Akma Gerilmesi ve en küçük kutupbaşı için geometri .	74
Tablo 3.16. Elde edilen optimum değerlere karşılık gelen B, N, d_k ve l değerleri	75
Tablo 4.1. L9 Ortogonal Dizisine göre Aday geometri ve akım değerleri.....	76
Tablo 4.2. MR damperden 0.015 m genlikte elde edilen basma ve çekme kuvvet değerleri (N).....	100
Tablo 4.3. MR damperden 0.025 m genlikte elde edilen basma ve çekme kuvvet değerleri (N).....	101
Tablo 4.4. MR damper kuvvetlerinin akıma bağlı yüzde artış değerleri	102

ÖZET

Manyeto Reolojik (MR) Damperler, kontrol edilebilirlik, düşük güç gereksinimi gibi sahip olduğu üstün özellikleri sebebiyle hızla gelişen ve ilgi uyandıran yarı-aktif kontrol elemanlardır. Ancak yapısı gereği son derece doğrusal olmayan bir davranış göstermesi, bu elemanların kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu sebeple MR damperi oluşturan parçaların geometrik yapısının, MR damper davranışına olan etkisinin tam olarak bilinmesi zorunluluğunu getirmektedir. MR damper içinde bulunan MR sıvının manyetik alana olan duyarlılığı ile MR damper geometrisine bağlı olarak, MR damper içerisinde oluşan akışın tam olarak bilinmesi, MR damper davranışının kestirilmesi için önemlidir.

MR damper geometrisini optimize etmek amacıyla, özellikle piston kafasında bulunan kanaldaki MR sıvı akışı, hem hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) hem de manyetik alan analizi ile beraber incelenmiştir. Belirlenen bir hedef kuvvete göre damper parametrelerinin en uygun değerleri bulunmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmaya paralel olarak manyetik analiz de gerçekleştirilerek akış bölgesinde oluşan akma gerilmesi hesaplanmaya çalışılmıştır. Uygun geometriyi tespit edebilmek için Taguchi optimizasyon yöntemi ilk defa kullanılmıştır. Bu kapsamda 9 adet MR damper imal edilmiştir. İmal edilen bu damperler test edilerek, analiz ile test sonuçları kıyaslanmıştır. MR damperden elde edilen kuvvetlerin, başta hedeflenen kuvvetlere büyük ölçüde uyduğu tespit edilmiştir.

Dinamik model çalışmalarında ise, akış analizinde elde edilemeyen MR damper histerisiz davranışının da tahmin edilebildiği, hem cebirsel hem de zamana bağlı dinamik modeller incelenmiştir. İncelenen modeller literatürde çokça kullanılan, referans verilen veya uygulaması olan modellerdir. Modeller eğer zamana bağlı çözülmesi gerekli ise, Matlab/Simulink programı ile model parametreleri bulunmuştur. Sadece cebirsel ifadeli ise, Matlab-Eğri Uydurma programı aracılığı ile parametreler bulunmuştur. Elde edilen parametreler incelenerek, en az hataya sahip olanlar belirlenmiştir.

ABSTRACT

Magneto Rheological (MR) dampers are semi-active controllable devices, which have drawn significant attention especially in transportation vehicle and building suspensions in the last two decades owing to their unique advantages. However, the control accuracy of these devices is limited due to their inherent highly nonlinear hysteretic behavior. To enhance the controllability of an MR damper, the effects of its geometry and mechanical components on its behavior should be clearly identified. It is of crucial importance to describe the flow of MR fluid in an MR damper, which is strongly dependent upon the geometry as well as sensitivity of MR fluid to the applied magnetic field, in order to predict the operational behavior of an MR damper.

In the present study, computational fluid dynamics (CFD) analysis of the flow of MR fluid inside the MR damper especially through the flow channel opened on the piston head has been performed in order to optimize the damper geometry. A CFD analysis, which is considered to result in more detailed and realistic information about the flow field and thus, is able to capture the hysteretic behavior of the MR damper, is intended to be utilized to seek for the optimum damper geometry in the preliminary design process. Once the optimum damper geometry is determined, the next step, which is also the essential part of the project, is to study the dynamic models to predict hysteretic behavior of the MR damper. For this purpose, a number of MR dampers were designed and manufactured within a certain range of dynamic load. Then, the prototyped dampers were tested to obtain force-time, force-velocity, and force-displacement curves for each damper.

In this stage, several models were taken into consideration after a detailed literature search among the most commonly used dynamic models for MR dampers. After having identified the unknown parameters of each model, the most successful model was determined based on a comparison of errors between the model and test values through an error analysis. Moreover, it was intended to modify the present models to give more accurate and precise results.

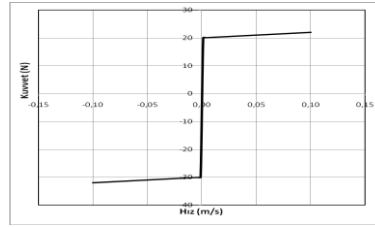
In the dynamic model study, hysteretic behavior of the MR damper, which cannot be portrayed by flow models, is described through use of algebraic and differential parametric models. The models are selected from the ones that have been most commonly studied, validated and referred in the literature. Model parameters are calculated via Matlab/Simulink and Matlab Curve Fitting toolbox for the differential and algebraic models, respectively. Then, the models are compared through an error analysis to find out the most successful model.

1. MR DAMPER DİNAMİK MODELLERİNİN İNCELENMESİ

Literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. İncelenen modeller genelde çokça kullanılan, referans verilen veya uygulaması olan modellerdir. İncelenen cebirsel modellerin parametreleri Matlab ortamında eğri uydurma (Curve Fitting) aracı yardımı ile bulunmuştur. Diferansiyel ifade içeren modellerin ise Matlab/Simulink modelleri oluşturulmuş ve zamana bağlı çözümleri yapılmıştır. Bu konuda karşılaşılan ilk model Şekil 1.1 şematik resmi gösterilen Bingham modelidir ve;

$$f = f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} + f_0 \quad (1.1)$$

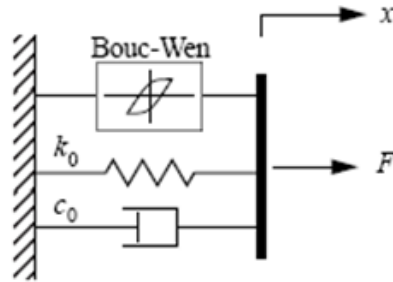
olarak tanımlanmaktadır. Ancak bu modelde histerisiz tarif edilmediğinden davranışı yeterli derecede modelleyememektedir.



Şekil 1.1. Bingham modeli Kuvvet-Hız grafiği

1.1. Bouc-Wen Model (BW)

Tek bir sönüm elemanı ve sürtünme elemanından oluşan Bingham modeline alternatif benzer modellerde önerilmiştir. Ancak histerisiz davranışını temsil eden ilk modellerinden biri Bouc-Wen modelidir (SPENCER VE ARK., 1997). Model Şekil 1.2'de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Bouc-Wen Model

Bouc-Wen modeli çok yönlü ve histerisiz davranışı oldukça geniş bir alanda gösterebilir. Matematik model ise,

$$f = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + az \quad (1.2)$$

olup, burada z değişkeni,

1.2. Modifiye Bouc-Wen (mBW)

Bouc-Wen modelinde özellikle eğim geçişlerinde görülen bozulmalar sebebi ile Spencer ve ark. Tarafından Modifiye edilmiş Bouc-Wen modeli önerilmiştir (SPENCER VE ARK., 1997). Bu modelde,

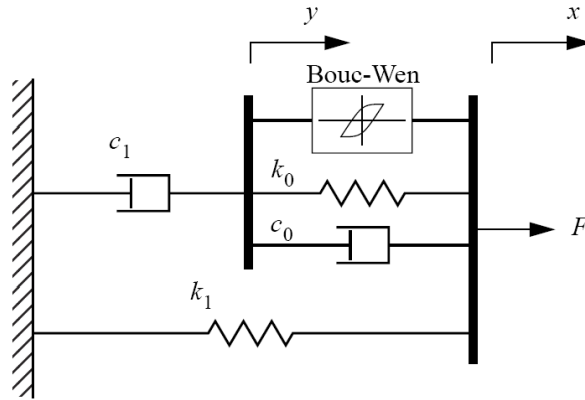
$$f = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad (1.4)$$

Burada,

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}||z||z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (1.5)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0+c_1)}\{\alpha z + c_0\dot{x} + k_0(x - y)\} \quad (1.6)$$

olarak tanımlanmıştır. Bu modelde akümülatör kuvveti k_1 , yüksek hızlarda görülen viskoz sönüm c_0 , düşük hızlarda görülen yuvarlanma davranışını tanımlamak için eklenen sönüm elemanı c_1 , yüksek hızlarda rijitliği kontrol etmek için k_0 ve akümülatörden dolayı damper kuvveti ile ilgili k_1 yayının başlangıç yer değiştirmesi x_0 olarak tanımlanmaktadır. Modelin şeması Şekil 1.4' re gösterilmektedir.



Şekil 1.4. The Modifiye Bouc-Wen model.

1.3. Akıma bağlı Modifiye Bouc-Wen Model (amBW)

Şekil 1.4'te gösterilen modelde, akımın kuvvet ile olan ilişkisi belirtilmemiştir. Bunu belirtmek için Spencer ve ark., uygulanan akımı modele aktarmak için genel bir model önermişlerdir (SPENCER VE ARK., 1997). Bunu yapmak için uygulanan gerilimle bazı belli parametrelerin değişimini gözlemlemişlerdir ve bu değişimler için aşağıdaki ilişkiler önerilmiştir.

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u, \quad c_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u, \quad \text{and} \quad c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad (1.7)$$

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (1.8)$$

Gerilim uygulandıktan sonraki dinamik dengenin oluşumunu tanımlamak için birinci derece filter kullanılmıştır. Akım sürücüyeye uygulanan voltaj v 'dir. Buradaki 14 adet parametrenin her biri MR damper test verileri yardımı ile belirlenmektedir.

$(c_{0a}, c_{0b}, k_0, c_{1a}, c_{1b}, k_1, x_0, \alpha_a, \alpha_b, \gamma, \beta, n, \eta, \text{ ve } A)$. Bu son model her ne kadar çok yönlü olsa da parametre sayısının fazla olması, çözüm uzayının geniş olması sebebi ile parametrelerin bulunması işlemi oldukça zahmetlidir. Uygun başlangıç değerleri verilmediği takdirde yakınsayamama problemleri ile sıklıkla karşılaşılmaktadır.

1.4. Modifiye Dahl Model (mDM)

Zhou and Qu (ZHOUA VE ARK., 2008) tarafından önerilen önerilen model Şekil 1.5'te gösterilmiştir. Bu modelde, çok fazla parametreyi tahmin etmeyi önlemek için Bouc-Wen yerine Dahl histerisiz modeli Coloumb kuvvetini tanımlamak için kullanılmıştır. Dahası, düşük hız bölgelerinde kuvvet-hız ilişkisini yakalamak için modifiye Dahl modeli başarılıdır. MR damper tarafından üretilen kuvvet

$$f = K_0x + C_0\dot{x} + F_dZ - f_0 \quad (1.9)$$

ile tanımlanmaktadır. Burada K_0 is the yay katsayısı, C_0 the sönüm katsayısı, F_d uygulanan manyetik alanla ayarlanan Coulomb kuvveti, MR damper yer değiştirmesi x , sürtünme vb. çeşitli sebeplerden oluşan kuvvet f_0 olarak tanımlanmıştır. Z boyutsuz histerisiz değişkeni

$$\dot{Z} = \sigma\dot{x}(1 - Z\text{sgn}(\dot{x})) \quad (1.10)$$

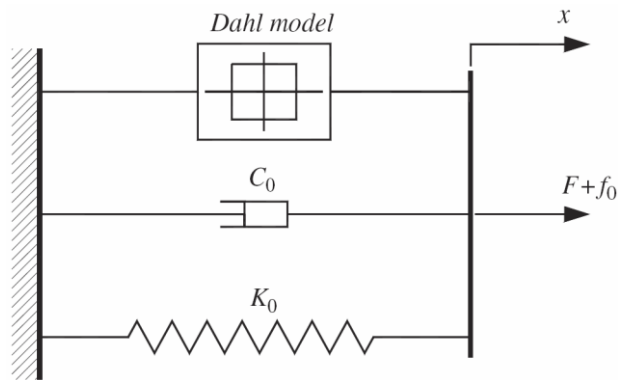
olarak tanımlanmıştır. Burada σ histerisiz döngü biçimini tanımlar. Akım altındaki modifiye Dahl modeli ayarlamak için uygulanan manyetik alan ile model parametreleri arasında ilişki kurmak gerekmektedir. Bu ilişki,

$$C_0 = C_{0s} + C_{0d}u, F_d = F_{ds} + F_{dd}u \quad (1.11)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada C_{0s} sönüm katsayıları, F_{ds} 0 V'ta MR damper Coulomb kuvvetidir. u ve V arasındaki ilişki Spencer ve ark. tarafından birinci-derece-filtre olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$\dot{u} = -\eta(u - V) \quad (1.12)$$

Burada η , MR damperin tepki süresi katsayısı, V uygulanan gerilimdir. Model sekiz parametre ($C_{0s}, C_{0d}, F_{ds}, F_{dd}, K_0, \sigma, f_0, \text{ ve } \eta$) içermekte olup deneysel veriler yardımı ile bulunur.



Şekil 1.5. Modified Dahl model of MR damper.

1.5. Algebraic Model (Alg)

MR damperin histerisiz davranışını modellemek için başka basit cebirsel bir model Guo ve Hu (GOU VE ARK., 2005) tarafından önerilmiştir. Model,

$$f = f_0 + c_b \dot{x} + \frac{2}{\pi} f_y \tanh^{-1}\{k[\dot{x} - \dot{x}_0 \operatorname{sgn}(\ddot{x})]\} \quad (1.13)$$

biçiminde verilmektedir. Bu denklemde MR damperin toplam kuvveti f , akümülatör gazının ön yükleme kuvveti f_0 , sönüm katsayısı c_b , akma gerilmesi kuvveti f_y , şekil katsayısı k , histerisiz hızı \dot{x}_0 , damper pistonunun hızı \dot{x} ve ivmesi ise \ddot{x} olarak tanımlanmıştır. Bu modelin en önemli özelliği histerisiz davranışı tanımlamak için diferansiyel ifade yerine trigonometrik ifade içermesidir. Dolayısı ile parametrelerinin bulunması daha kolay olmaktadır.

1.6. Modifiye Algebraic Model (mAlg)

Çeşmeci ve Engin, Alg'e sıvı ataletinin etkisini eklemek için, Alg düzenlenerek (ÇEŞMECİ VE ENGİN, BASIMDA),

$$f = f_0 + c_b \dot{x} + \frac{2}{\pi} f_y \tanh^{-1}\{k[\dot{x} - \dot{x}_0 \operatorname{sgn}(\ddot{x})]\} + m\ddot{x} \quad (1.14)$$

formuna dönüştürmüşlerdir. Burada m , deneysel verilere dayanılarak belirlenen sanal kütleyi temsil etmektedir.

1.7. Modified LuGre Friction Model (mLFM)

MR damper dinamik davranışını gösteren diğer bir çalışma ise ilk defa 15. IFAC Dünya Kongresinde sunulan LuGre modelidir (ALVAREZ VE JİMENEZ, 2002). Daha sonra Jimenez ve Icaza (JİMENEZ VE ICAZA, 2005) bu modeli modifiye ederek ifade etmişlerdir. Modifiye LuGre (mLG) modelde üretilen kuvvet,

$$f = \beta(i)z + \gamma(i)\dot{x} + \delta x + \varepsilon \dot{z} + f_0 \quad (1.15)$$

ve \dot{z} ,

$$\dot{z} = \dot{x} - \alpha|\dot{x}|z \quad (1.16)$$

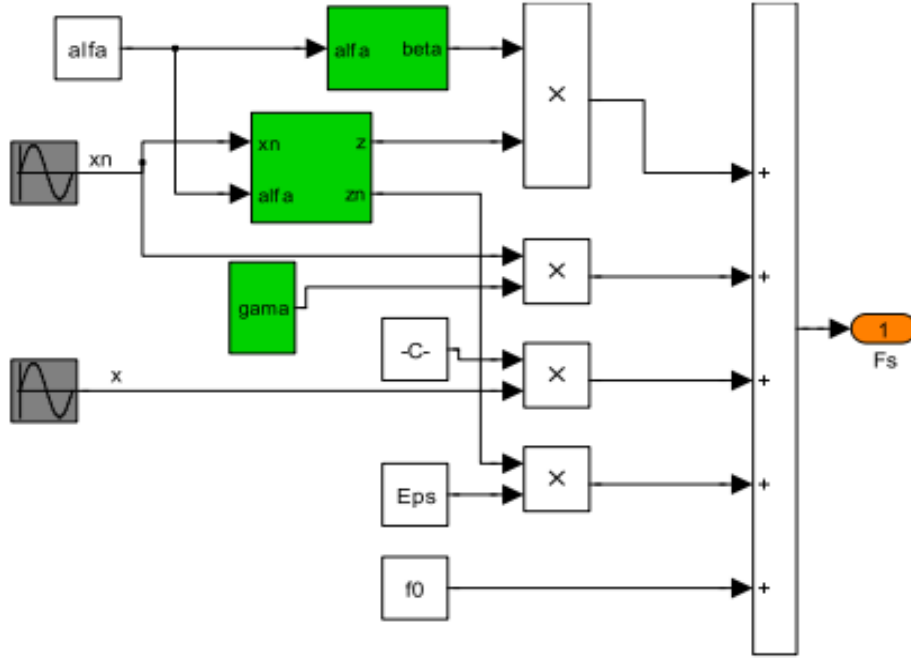
olarak tanımlanmıştır. Burada α, β, γ ve ε uygulanan akıma göre değişen yay katsayıları ve sönüm parametreleridir. Bu modele ait Simulink diyagramı ana gövdesi Şekil 1.6'de gösterilmiştir.

1.8. Kwok Model (KM)

Algebratik modele benzer diğer bir modelde Kwok ve ark. (KWOK VE ARK, 2006) tarafından viskoz ve rijitliği göstermek için doğrusal, histerisizi göstermek için hiperbolik tanjant fonksiyon kullanılmasını önermişlerdir. Model aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$f = c\dot{x} + kx + \alpha z + f_0 \quad (1.17)$$

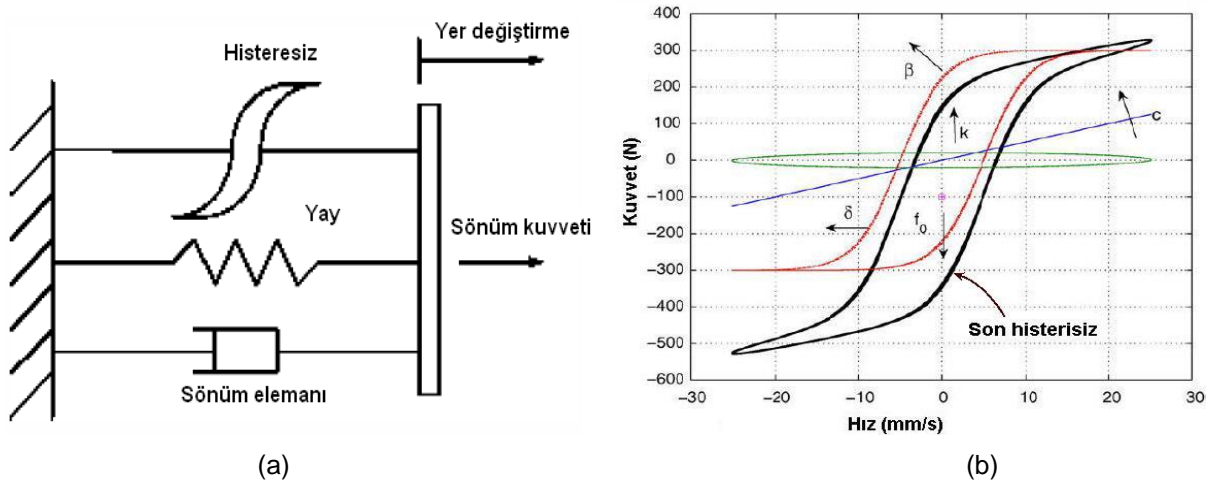
$$z = \tanh[\beta\dot{x} + \delta \text{sgn}(x)] \quad (1.18)$$



Şekil 1.6. mLugre modeline ait Simulink ana blok gösterimi

Bu eşitliklerde c sönüm katsayısı, k yay katsayısı, α histerisiz ölçek faktörü, z hiperbolik tanjant fonksiyon ile verilen histerisiz değişkeni ve f_0 orta konuma göre damper dengeleme kuvvidir. Dikkat edilirse model sadece basit bir hiperbolik tanjant fonksiyon içermektedir. Doğal olarak bu parametrelerin tahmininde hesaplama süresini azaltmakta, kontrol tasarımı ve uygulamasını kolaylaştırmaktadır.

Şekil 1.7.a'da model ve 1.7.b'de ise model parametrelerinin etkisi kuvvet-hız grafiğinde gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Kwok model (a) Şematik gösterim (b) Parametrelerinin etkisi

1.9. Model parametrelerin tespiti

Bölüm 1’de bahsedilen 9 modelden Bingham modeli hariç, diğer modellerin parametreleri, SAUMRD2’nin 4 farklı hız kademesi (0.05/0.10/0.15/0.20 m/s) ve 0/0.2/0.4/0.6/0.8/1/1.5/2 A. akım kademelerinde test edilmesi ile elde edilen 32 adet test verileri, test cihazının “Shock 6” yazılımı yardımı ile Matlab ortamına alınmış ve kaydedilmiştir. Her bir modelin, 32 adet test için parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda özellikle modifiye ve akıma bağlı modifiye Bouc-Wen modelinin parametrelerinin bulunması için uzun süre gerekmiştir. Bazen yakınsayamama sebebi ile çözüme farklı başlangıç değerleri devam edilmiş ve çözüm bulunmuştur. Farklı parametre sayısı ve denklem yapılarına sahip olduğu için modellerin çözüm süreleri farklılıklar göstermiştir. Ancak cebirsel modeller, başlangıç değerleri uygun seçilmek şartıyla çok kısa sürede çözüme gitmiştir.

1.10. Deneysel sonuçlarla karşılaştırma

Model verilerinin, test verilerini hangi doğrulukta takip ettiğini grafik olarak incelemek mümkündür. Buna ek olarak kıyaslanan modellerin diğerlerine olan üstünlüğünü sayısal olarak hesaplanmıştır. Her bir model için, test kuvvetleri ile modelden elde edilen kuvvetleri arasındaki hata zamanın, yer değiştirmenin ve hızın bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Hata miktarlarını göstermek için kullanılan ifadeler aşağıdadır (SPENCER VE ARK., 1997).

$$E_t = \sqrt{\frac{\int_0^T (F_{test} - F_{model})^2 dt}{\int_0^T (F_{test} - \mu_F)^2 dt}} \quad (1.19)$$

$$E_x = \sqrt{\frac{\int_0^T (F_{test} - F_{model})^2 \left| \frac{dx}{dt} \right| dt}{\int_0^T (F_{test} - \mu_F)^2 dt}} \quad (1.20)$$

$$E_{\dot{x}} = \sqrt{\frac{\int_0^T (F_{test} - F_{model})^2 \left| \frac{d\dot{x}}{dt} \right| dt}{\int_0^T (F_{test} - \mu_F)^2 dt}} \quad (1.21)$$

F_{test} damper testinden elde edilen damper kuvveti, F_{model} ise model ile elde edilen kuvvettir. μ_F ise test verilerinin ortalamasıdır. Toplam 32 adet test verisi için 8 modelin parametreleri tek tek hesaplanmış ve elde edilen bu parametrelere göre model kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda $E_t, E_x, E_{\dot{x}}$ değerleri bulunmuş ve Tablo 1.2’de verilmiştir. 8 ayrı akım kademesinde elde edilen verilerin ortalaması alınarak her bir hız için tek bir hata değeri elde edilmiş ve sonuç Tablo 1.2’de ortalama değer olarak verilmiştir. Bu tablodaki ortalama hata miktarları da bir araya getirilerek tüm modeller için tek bir ortalama hata değeri Tablo 1.1’de verilmiştir.

1.11. Değerlendirme

Tablodaki hata değerlerinin incelenmesinden Kwok modelinin en az hata değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Diferansiyel ifade içeren modellere göre oldukça basit olan bu model her üç hata tanımlama yönteminde de en az hata değerini elde etmiştir. Diğer cebirsel ifadeli Alg (Guo) ve mAlg modelleri ise genel ortalamanın altında bir hata değeri elde etmiştir. Klasik BW modeli tüm hata değerlerinde de en kötü değere sahiptir. Ancak mBW ve amBW modeli ortalamanın altında bir hata değeri elde etmişlerdir. mLFM ve mDM modelleri ise genel ortalamanın üstündeki hata değerleri ile dikkati çelmektedir.

Genel olarak beklenenin aksine cebirsel modeller yapılarının basitliği, modelleme kolaylığı, parametrelerinin kolay elde edilebilirliğinin yanında düşük hata değerleri ile öne çıkmaktadırlar.

Tablo 1.1. Karşılaştırılan modellerin her bir hızda ve ortalama hata değerleri

	E_t					E_x					$E_{\dot{x}}$				
v (m/s)	0.05	0.10	0.15	0.20	Ort.	0.05	0.10	0.15	0.20	Ort.	0.05	0.10	0.15	0.20	Ort.
mDM	0.041	0.042	0.043	0.038	0.0410	0.004	0.006	0.008	0.009	0.0066	0.018	0.036	0.056	0.064	0.0435
KM	0.026	0.021	0.018	0.023	0.0221	0.003	0.003	0.004	0.006	0.0042	0.011	0.018	0.023	0.036	0.0219
BW	0.035	0.036	0.092	0.038	0.0503	0.004	0.005	0.016	0.008	0.0082	0.015	0.031	0.122	0.065	0.0583
mBW	0.034	0.022	0.021	0.024	0.0251	0.004	0.004	0.005	0.007	0.0046	0.015	0.019	0.025	0.038	0.0243
amBW	0.032	0.022	0.022	0.020	0.0241	0.004	0.004	0.005	0.006	0.0043	0.014	0.018	0.028	0.031	0.0230
mLFM	0.038	0.031	0.031	0.034	0.0333	0.004	0.005	0.006	0.008	0.0059	0.016	0.026	0.039	0.056	0.0343
AM	0.034	0.023	0.021	0.025	0.0257	0.004	0.004	0.005	0.007	0.0048	0.015	0.020	0.026	0.040	0.0251
mAM	0.044	0.026	0.022	0.016	0.0270	0.004	0.003	0.004	0.004	0.0038	0.020	0.023	0.030	0.025	0.0243

Tablo 1.2. Test ve model verileri arasındaki hata miktarları (Denklem 2.19, 2.20, 2.21'e göre)

Model adı	Hız→	0.05 m/s			0.10 m/s			0.15 m/s			0.20 m/s		
	i (A)	E_t	E_x	E_x	E_t	E_x	E_x	E_t	E_x	E_x	E_t	E_x	E_x
mDM	0.0	0.022	0.003	0.009	0.038	0.005	0.033	0.021	0.005	0.025	0.022	0.007	0.033
	0.2	0.037	0.004	0.016	0.038	0.005	0.033	0.030	0.006	0.038	0.029	0.007	0.048
	0.4	0.042	0.004	0.018	0.043	0.006	0.038	0.039	0.007	0.051	0.038	0.009	0.065
	0.6	0.044	0.004	0.019	0.044	0.006	0.038	0.050	0.008	0.065	0.042	0.009	0.071
	0.8	0.044	0.004	0.019	0.046	0.006	0.040	0.051	0.008	0.066	0.044	0.010	0.074
	1.0	0.046	0.005	0.020	0.045	0.006	0.040	0.052	0.009	0.068	0.043	0.010	0.073
	1.5	0.047	0.005	0.020	0.044	0.006	0.038	0.051	0.008	0.067	0.044	0.010	0.075
2.0	0.045	0.005	0.019	0.035	0.005	0.030	0.052	0.008	0.068	0.044	0.010	0.074	
mDahl Ortalama		0.041	0.004	0.018	0.042	0.006	0.036	0.043	0.008	0.056	0.038	0.009	0.064
KM	0.0	0.019	0.003	0.007	0.016	0.004	0.012	0.018	0.005	0.020	0.021	0.007	0.029
	0.2	0.027	0.003	0.012	0.018	0.003	0.015	0.016	0.004	0.018	0.019	0.006	0.029
	0.4	0.025	0.003	0.011	0.019	0.003	0.016	0.018	0.004	0.022	0.022	0.006	0.034
	0.6	0.027	0.003	0.012	0.020	0.003	0.018	0.019	0.004	0.023	0.024	0.006	0.038
	0.8	0.027	0.003	0.012	0.021	0.003	0.019	0.019	0.004	0.024	0.024	0.006	0.038
	1.0	0.029	0.003	0.013	0.021	0.003	0.019	0.019	0.004	0.024	0.024	0.006	0.039
	1.5	0.029	0.003	0.013	0.021	0.003	0.018	0.019	0.004	0.024	0.024	0.006	0.039
2.0	0.027	0.003	0.012	0.032	0.005	0.028	0.020	0.004	0.025	0.024	0.006	0.040	
Kwok Ortalama		0.026	0.003	0.011	0.021	0.003	0.018	0.018	0.004	0.023	0.023	0.006	0.036
BW	0.0	0.019	0.003	0.007	0.025	0.004	0.020	0.023	0.006	0.027	0.021	0.007	0.030
	0.2	0.040	0.004	0.018	0.035	0.005	0.030	0.067	0.011	0.089	0.028	0.007	0.046
	0.4	0.040	0.004	0.017	0.044	0.005	0.039	0.101	0.017	0.135	0.037	0.008	0.062
	0.6	0.036	0.004	0.016	0.029	0.004	0.025	0.089	0.015	0.118	0.039	0.009	0.066
	0.8	0.036	0.004	0.016	0.065	0.008	0.058	0.099	0.017	0.131	0.042	0.008	0.073
	1.0	0.037	0.004	0.016	0.030	0.004	0.026	0.113	0.020	0.150	0.043	0.008	0.075
	1.5	0.038	0.004	0.016	0.029	0.004	0.025	0.119	0.022	0.157	0.048	0.008	0.084
2.0	0.036	0.004	0.016	0.029	0.004	0.025	0.126	0.024	0.166	0.049	0.009	0.086	
Bouc-Wen		0.035	0.004	0.015	0.036	0.005	0.031	0.092	0.016	0.122	0.038	0.008	0.065
mBW	0.0	0.019	0.003	0.007	0.018	0.004	0.014	0.018	0.005	0.020	0.021	0.007	0.029
	0.2	0.041	0.004	0.018	0.025	0.004	0.021	0.018	0.004	0.022	0.020	0.006	0.031
	0.4	0.044	0.005	0.019	0.023	0.004	0.019	0.021	0.004	0.025	0.023	0.006	0.038
	0.6	0.049	0.005	0.021	0.022	0.003	0.019	0.022	0.005	0.026	0.026	0.007	0.041
	0.8	0.028	0.003	0.013	0.023	0.004	0.020	0.021	0.005	0.027	0.026	0.007	0.042
	1.0	0.030	0.003	0.013	0.022	0.003	0.019	0.022	0.005	0.027	0.026	0.007	0.042
	1.5	0.030	0.003	0.013	0.021	0.003	0.018	0.021	0.004	0.027	0.025	0.006	0.042
2.0	0.028	0.003	0.012	0.021	0.004	0.018	0.022	0.004	0.027	0.026	0.007	0.043	
M.Bouc-Wen		0.034	0.004	0.015	0.022	0.004	0.019	0.021	0.005	0.025	0.024	0.007	0.038
amBW	0.0	0.020	0.003	0.008	0.017	0.004	0.013	0.020	0.006	0.023	0.023	0.007	0.035
	0.2	0.042	0.004	0.019	0.023	0.004	0.019	0.026	0.005	0.033	0.027	0.008	0.041
	0.4	0.042	0.004	0.018	0.020	0.003	0.017	0.037	0.007	0.049	0.018	0.005	0.029
	0.6	0.028	0.003	0.012	0.020	0.003	0.017	0.019	0.004	0.023	0.018	0.005	0.030
	0.8	0.028	0.003	0.012	0.031	0.006	0.025	0.019	0.004	0.023	0.019	0.005	0.030
	1.0	0.042	0.004	0.018	0.022	0.003	0.019	0.019	0.004	0.024	0.018	0.005	0.029
	1.5	0.030	0.003	0.013	0.021	0.003	0.018	0.018	0.004	0.024	0.017	0.005	0.028
2.0	0.028	0.003	0.012	0.021	0.004	0.018	0.019	0.004	0.025	0.018	0.005	0.029	
Akıma bağlı M.Bouc-		0.032	0.004	0.014	0.022	0.004	0.018	0.022	0.005	0.028	0.020	0.006	0.031
mLFM	0.0	0.022	0.003	0.008	0.019	0.004	0.015	0.019	0.005	0.023	0.021	0.007	0.031
	0.2	0.035	0.004	0.015	0.029	0.005	0.025	0.027	0.005	0.033	0.027	0.007	0.043
	0.4	0.038	0.004	0.017	0.033	0.005	0.028	0.034	0.006	0.043	0.034	0.008	0.056
	0.6	0.041	0.004	0.018	0.033	0.005	0.028	0.033	0.007	0.042	0.037	0.009	0.061
	0.8	0.040	0.004	0.018	0.035	0.005	0.030	0.033	0.007	0.042	0.038	0.009	0.063
	1.0	0.042	0.004	0.018	0.034	0.005	0.029	0.034	0.007	0.044	0.037	0.009	0.062
	1.5	0.043	0.005	0.018	0.033	0.005	0.029	0.032	0.006	0.041	0.037	0.009	0.062
2.0	0.041	0.004	0.018	0.031	0.005	0.027	0.033	0.006	0.042	0.042	0.009	0.070	
LuGre		0.038	0.004	0.016	0.031	0.005	0.026	0.031	0.006	0.039	0.034	0.008	0.056
Alg	0.0	0.056	0.007	0.023	0.031	0.006	0.025	0.024	0.006	0.029	0.028	0.009	0.042
	0.2	0.035	0.005	0.015	0.020	0.004	0.016	0.016	0.004	0.018	0.021	0.007	0.032
	0.4	0.029	0.004	0.012	0.019	0.003	0.017	0.018	0.004	0.022	0.022	0.006	0.034
	0.6	0.029	0.004	0.013	0.022	0.003	0.019	0.020	0.004	0.025	0.024	0.006	0.039
	0.8	0.029	0.003	0.013	0.023	0.003	0.020	0.020	0.004	0.025	0.025	0.007	0.040
	1.0	0.030	0.003	0.014	0.024	0.003	0.021	0.022	0.004	0.028	0.026	0.007	0.042
	1.5	0.031	0.003	0.014	0.024	0.003	0.021	0.023	0.004	0.030	0.027	0.007	0.044
2.0	0.031	0.003	0.014	0.023	0.004	0.021	0.024	0.005	0.032	0.027	0.007	0.046	
Guo		0.0337	0.0040	0.0146	0.0231	0.0038	0.0199	0.0209	0.0046	0.0262	0.0250	0.0069	0.0399
mAlg	0.0	0.032	0.004	0.014	0.018	0.003	0.015	0.017	0.004	0.022	0.015	0.005	0.023
	0.2	0.055	0.004	0.025	0.022	0.003	0.020	0.021	0.003	0.028	0.013	0.004	0.020
	0.4	0.046	0.004	0.020	0.025	0.003	0.022	0.021	0.003	0.028	0.014	0.004	0.023
	0.6	0.046	0.004	0.021	0.026	0.004	0.023	0.023	0.004	0.030	0.015	0.004	0.024
	0.8	0.045	0.004	0.020	0.027	0.004	0.024	0.022	0.004	0.029	0.015	0.004	0.024
	1.0	0.047	0.004	0.021	0.030	0.004	0.027	0.023	0.004	0.031	0.018	0.004	0.029
	1.5	0.042	0.004	0.019	0.027	0.004	0.024	0.026	0.004	0.035	0.017	0.004	0.029
2.0	0.042	0.004	0.019	0.028	0.004	0.025	0.026	0.004	0.035	0.017	0.004	0.029	
Modifiye Guo		0.044	0.004	0.020	0.026	0.003	0.023	0.022	0.004	0.030	0.016	0.004	0.025

2. MR DAMPERİN GEOMETRİK YAPISININ ANALİZİ

MR damperin hız ve akım değişkenlerine göre nasıl davrandığının incelendiği dinamik modeller hazır ürünlerin durumunu ortaya koyarlar. Ancak MR damperin en büyük tepki kuvveti, manyetik alan oluşumu ve bu manyetik alandaki akma gerilmesinin değeri vb. özellikler ise geometrik yapının tasarım esnasında dikkate alınmasını gerektirir. Ayrıca kuvvet aralığı, f_0 olarak tarif edilen akümülatör kuvvetinin büyüklüğü ve f_c olarak tanımlanan sürtünme kuvveti de tasarım esnasında dikkate alınması gerekli büyüklüklere sahiptir. Bir diğer yandan viskoz kuvvetlerin büyüklüğü de başlangıçta dikkate alınması gereken önemli diğer unsurlardır. Bilindiği gibi dinamik oran olarak adlandırılan damper çalışma alanının büyüklüğü, geometrik yapıya bağlı bu bileşenlerin toplam büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir. Bu geometrik yapıya sahip parametrelerin en uygun değerlerinin tasarım şartlarına göre belirlenmesi, en uygun damper geometrisi değerlerinin belirlenmesi ile mümkündür. Bu değerleri bulmak için Taguchi deney tasarım metodu kullanılacaktır. Bu metotla uygun parametrelerinin tespitine çalışılacaktır. Elde edilen bu geometriye göre katı model oluşturulacak ve analizler yapılacaktır. Bu analiz sonucunda varılan sonuçlara göre katı model tasarlanıp ANSYS-CFX paket yazılımı analizler yapılacak ve yapılacak analizlere göre imalat için son parametreler belirlenecektir. Bu parametrelere göre Taguchi metodunun gerektirdiği kadar MR damper imalatı yapılacaktır. İmal edilen MR damperler belirlenen hız ve akımlarda testlere tabi tutulacak ve başlangıçta öngörülen değerlere göre kıyaslama yapılacaktır.

2.1. MR Cihazların Tasarımı

MR cihazlar çalışma mantığı, yüksek basınçlı bir akışkan bir dar kanal boyunca kuvvetlendirilir ve sonuçta akışkan bu dar kanalın dışına doğru akarken basıncında bir düşme meydana gelir. Dar kanal boyunca yapılan bu kuvvetlendirme, bu kanal boyunca MR akışkana bir manyetik alan uygulanmasıyla etkin hale geçirilir. Bu manyetik alan, sıvı içindeki mikron seviyesinde çapa sahip olan demir parçacıklarının akış alanına paralel olarak sütun şeklinde yerleşmesine sebep olur. Bu oluşan zincir benzeri yapı akışkanın akmasına karşı bir direnç oluşturur, bundan dolayı akışkan görünür viskozitesinde bir yükselme meydana gelir. Akışkanın bu değişimi, yükselen manyetik alan ile beraber büyüyen bir akma gerilmesi ile sonuçlanacaktır. Bu manyetik alanın varlığı altında MR akışkanalar newton tipi olmayan davranış sergilerler. Kontrol edilebilen akışkanların bu davranışları genellikle Bingham plastik modeli veya Herschel-Bulkley modeli gibi lineer olmayan akış modelleri kullanılarak modellenebilir.

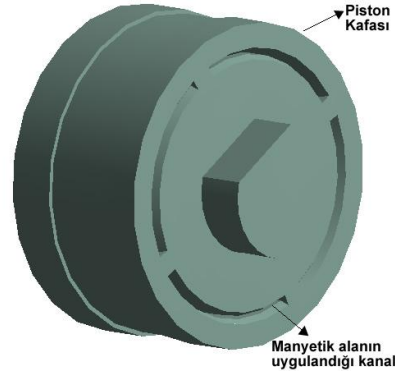
$$\begin{aligned} \tau &= \tau_y(B) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \mu_p \dot{\gamma} & |\tau| &\geq |\tau_y| \\ \dot{\gamma} &= 0 & |\tau| &< |\tau_y| \end{aligned} \quad (2.1)$$

burada τ kayma gerilmesi, $\dot{\gamma}(du/dr)$ kayma oranı, $\tau_y(B)$ manyetik akı yoğunluğu ile oluşan dinamik akma gerilmesi, μ_p manyetik alan şiddetinden bağımsız plastik viskozitedir.

Bingham plastik modeli, MR akışkanlı cihazların karakterizasyonu ve tasarımı için yararlı olduğu

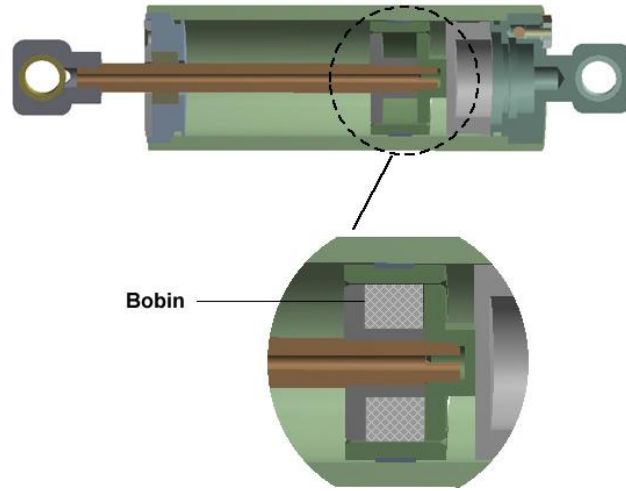
ispatlanmasına rağmen, gerçek MR akışkan davranışları bu modelden bazı önemli sapmalar gösterirler. Kanal boyunca meydana gelen bu basınç kaybı, uygulanan manyetik alandan ve viskoziteden kaynaklanan akışkan içindeki enerji kaybıdır.

Tasarlanması planlanan MR damperde, akışkan yine piston kafası üzerindeki kanal aracılığıyla silindirin diğer tarafına geçebilmektedir (Şekil 2.1. Piston kafası üzerindeki, akışkanın silindirin diğer tarafına geçtiği ve manyetik alan uygulanan kanal).



Şekil 2.1. Piston kafası üzerindeki manyetik alan uygulanan kanal

Manyetik alan piston kafasında yer alan bobine gönderilen akım ile kanal boyunca meydana gelmektedir (Şekil 2.2. Piston kafasında bobinin görüldüğü bir MR Damper kesiti).



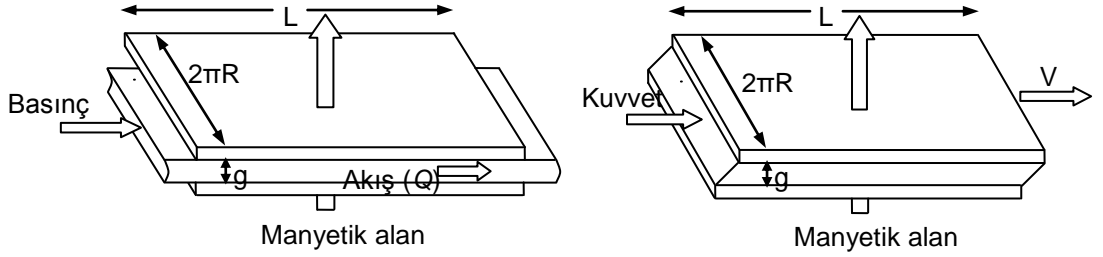
Şekil 2.2. Piston kafasında bobinin görüldüğü bir MR Damper kesiti

Tipik olarak MR cihazlar, akış geçişinin sağlandığı bir halka şeklinde kanala sahiptir, ancak bu kesin bir sınırlandırma değildir. İyi bir tasarım, akımın olmadığı durumlarda gerekli olan minimum viskoz (pasif) damper kuvvetini elde edecek olan uygun kanal geometrisinin seçimiyle başarılıdır (HITCHCOCK, 2002). Teorik olarak tanımlanan tasarım kuralları sadece başlangıç tasarımı için yararlıdır. Nümerik hesaplama yardımıyla daha detaylı tasarım elde edilebilir (DELIVORIAS, 2004).

MR akışkanların kullanılmasının temel tasarım sınırlanması, bu akışkanları etkinleştirmek için manyetik alan uygulanmasına gereksinim olduğudur. Bir manyetik alan sağlamak cihazın ağırlığı, şekli ve

büyüküğünün yanında bir bobin ve bir manyetik akı kılavuzuna ihtiyaç vardır (DELIVORIAS, 2004). Hitchcock (HITCHCOCK, 2002), Ansoft firmasının Maxwell yazılımını kullanarak yaptığı üç boyutlu sonlu eleman analizinde, manyetik alan yönü ve şiddeti için en iyi değerleri aramıştır. Analiz neticesinde ve deneysel ölçümlerde manyetik alanın akış yönüne dik gelmesini uygun olarak bulmuştur.

MR akışkan kullanan cihazların çoğu ya sabit kutupların arasında basınç ile sürüklenen akış modu veya göreceli olarak hareket edebilen kutuplar arasında direkt kesme modu olmak üzere iki şekilde sınıflandırılırlar. Bu iki temel modelin bir halkasal kanal için şematik görünümü Şekil 2.3'de verilmiştir.



(a) Basınç ile sürüklenen akış modu

(b) Direkt kesme modu

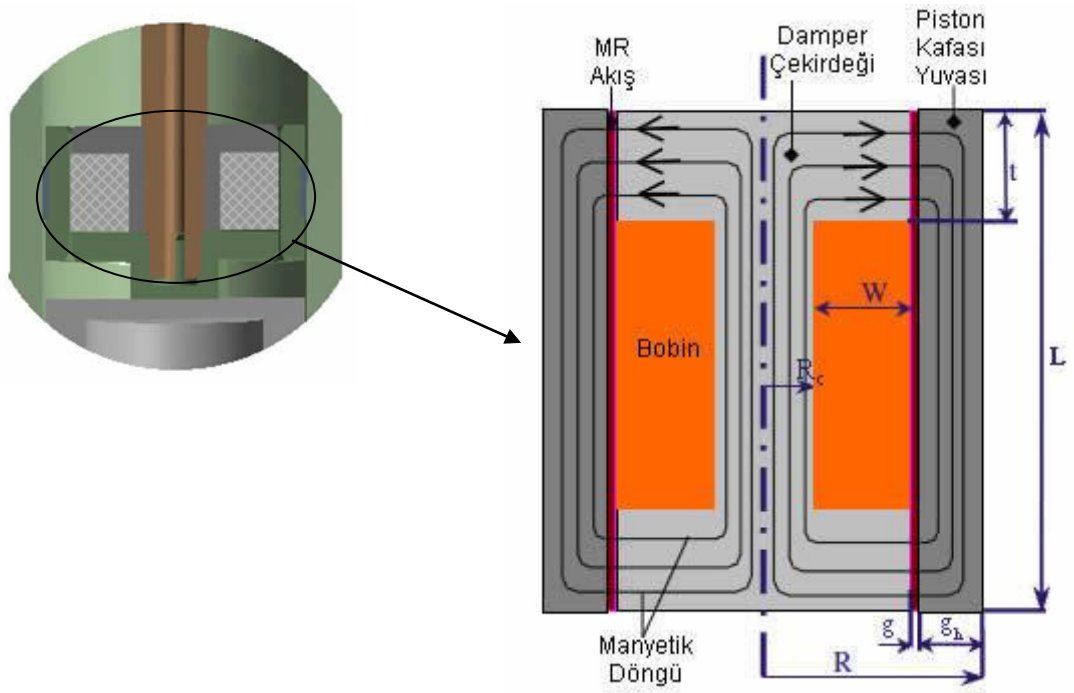
Şekil 2.3. Manyetik alan uygulanan kontrol edilebilir akışkanlı cihazların temel çalışma modları

Basınç ile sıvının sürüklendiği aygıtlara örnek olarak, servo valfler, damperler ve şok emiciler örnek verilebilir. Kuvvet ile sürüklenen aygıtlara örnek ise kavramalar, frenler ve kilitleme cihazları örnek verilebilirler (WEISS VE ARK, 1994).

Şekil 2.4'te. MR damperdeki manyetik döngü'de tek bobinli ve halkasal kanallı bir MR dampere manyetik alan uygulandığında manyetik döngü yapısı ve önemli boyutları görülmektedir. Burada L kanal uzunluğu, g_h piston yuvası et kalınlığı, g dar kanalın genişliği, t kutup başı uzunluğu, R piston kafası yarıçapı, R_c piston çekirdeği yarıçapı ve W bobin genişliğidir.

Bobine bir manyetik alan uygulandığında, akı çizgileri akışa karşı direnç meydana getirecek olan iki uçtaki kutup başlarına dik yöndedir. Akışa karşı direncin meydana geldiği bu kutup başı uzunluğu aktif uzunluk olarak adlandırılır.

Damperi daha efektif yapmak için, büyük bir aktif hacim boyunca daha yüksek bir manyetik akı arzu edilir. Ancak bu büyük manyetik alan daha fazla bobin gerektirir, bu da belli bir hacimde olması gereken bir damper için ideal değildir. Çünkü daha fazla bobin daha küçük aktif hacme neden olabilmektedir. Optimize edilmiş bir devre, üretilen manyetik alan ve manyetik bobin tarafından gerekli görülen güç arasında bir denge sağlamalıdır. MR akışkanın akma gerilmesini etkinleştirebilmek için en iyi manyetik alan şiddeti kullanımını sağlayacak bir cihaz tasarımı yapılmalıdır (WERELEY VE ROSENFELD, 2004).



Şekil 2.4. MR damperdeki manyetik döngü

Bu kanal boyunca meydana gelen basınç düşümü, Delivorias (DELIVORIAS, 2004) tarafından belirtilen iki paralel plaka arasındaki kanal boyunca olan basınç düşümüne denk olduğu varsayılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (NGGUYEN VE CHOI, 2009).

$$\Delta P = \Delta P_{\mu} + \Delta P_{\tau} = \frac{6Q\mu L}{\pi R_1 g^3} + 2c \frac{t}{g} \tau_y \quad (2.2)$$

Burada ΔP_{μ} viskoz yani kontrol edilemeyen basınç düşümü ve ΔP_{τ} manyetik alan oluşumuna bağlı olarak akma gerilmesinden kaynaklanan yani kontrol edilebilen basınç düşümüdür. Q damper boyunca olan debidir ve piston hızından hesaplanır, $Q = u_p (A_p - A_k)$. R_1 halka biçimli kanalın ortalama yarıçapıdır ve $R_1 = R - (g_h + 0.5g)$ ile hesaplanır. c akış hızı profiline bağlı bir katsayıdır ve minimum 2.07 ile maksimum 3.07 arasında değişen bir değere sahiptir. c katsayısı Spencer ve ark. (SPENCER VE ARK, 1998) tarafından yaklaşık olarak aşağıdaki gibi tahmin edilmiştir;

$$c = 2.07 + \frac{1}{1 + 0.4T} \quad (2.3)$$

T burada boyutsuz gerilme değeridir ve Spencer ve arkadaşları tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

$$T = \frac{2\pi R_1 g^2 \tau_y}{12Q\mu} \quad (2.4)$$

Bu durumda c katsayısı

$$c = 2.07 + \frac{6Q\mu}{6Q\mu + 0.4\pi R_1 g^2 \tau_y} \quad (2.5)$$

Denklem 2.2 kontrol edilebilir cihazların tasarımı için önemlidir, fakat bu denklem çeşitli parametrelerin

önemini en iyi şekilde kavramak için genellikle yetersizdir. Bu denklem cebirsel olarak manipüle edilerek, minimum dar kanal hacmi ($V = 2\pi R_1 \cdot L \cdot g$) elde edilir,

$$V = \frac{12}{c^2} \left(\frac{\mu}{\tau_y^2} \right) \left(\frac{L}{2t} \right)^2 \left(\frac{\Delta P_\tau}{\Delta P_\mu} \right) Q \Delta P_\tau \quad (2.6)$$

Manyetik alana maruz kalarak istenen MR etkiyi sağlayan minimum aktif hacim ($V_e = 2\pi R_1 \cdot 2t \cdot g$) aşağıda görüldüğü gibidir.

$$V_e = \frac{12}{c^2} \left(\frac{\mu}{\tau_y^2} \right) \left(\frac{L}{2t} \right) \left(\frac{\Delta P_\tau}{\Delta P_\mu} \right) Q \Delta P_\tau \quad (2.7)$$

Bu V_e değeri, istenen kontrol oranını, $\lambda = \Delta P_\tau / \Delta P_\mu$, gerekli kontrol edilebilir güç seviyesinde, $W_m = Q \Delta P_\tau$, gerçekleştirmek için gerekli olan aktif akışkan hacmidir. İstenilen dinamik aralık ve kontrol seviyelerinin elde edilmesi için önemli bir değer olan aktif hacim değeri, akışkanın cevap zamanı üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir (DELIVORIAS, 2004).

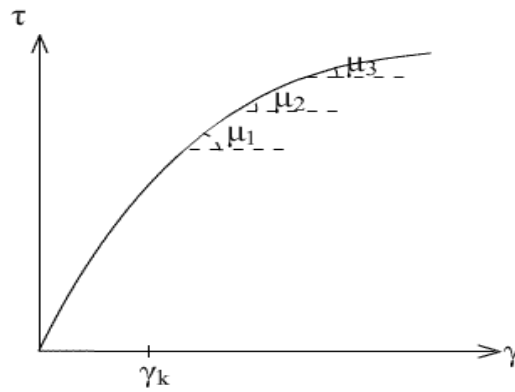
Denklem 2.6'da eşitliğin sol tarafına $V = 2\pi R_1 \cdot L \cdot g$ ifadesi yazılırsa bir geometrik sınırlama ifadesi elde edilir;

$$\pi R_1 g^2 \left(\frac{4t}{L} \right) = \frac{12}{c} \frac{\mu}{\tau_y} \lambda Q \quad (2.8)$$

ya da aynı işlemi denklem 2.7 ile yaptığımızda, aynı geometrik sınırlamanın elde edildiği görülecektir.

Yukarıdaki denklemlerde MR akışkanının özelliklerinin bilindiğini varsayılmaktadır. Özellikle μ ve τ_y nin özellikleri MR sıvısının katalog verilerinden sırasıyla şekil değiştirme hızı ($\dot{\gamma}$) ve uygun manyetik akının bir fonksiyonu olarak bulunabilir.

Bununla birlikte bazı özellikler (özellikle μ) sıcaklığın bir fonksiyonu olabilmektedirler. Bu durumda tasarım yapan kişi cihazın hangi şartlar altında çalışacağı ve yukarıda verilen denklemlere uygun hangi akışkan özelliklerinin kullanacağını bilmelidir. Örneğin MR akışkan önemli oranda incelen özellikler gösterir. (Şekil 2.5)



Şekil 2.5. İncelen (shear thinning) akışta post-yield bölgede değişen plastik viskozite

Böylece tasarım yapan kişi denklem 2.7' de verilen aktif hacmi, uygun şekil değiştirme hızına karşılık gelen bir viskoziteyi kullanarak hesap etmelidir.

MR sıvılı cihazlar genellikle MR sıvısının manyetik olarak neredeyse tam doymuş olduğu düşünülerek tasarlanırlar. Bu şartlar altında, akışkan maksimum akma gerilmesi üretecektir. Bununla birlikte yukarıdaki denklemde kullanılan akma gerilmesi MR akışkan kataloglarından öngörülen çalışma şartların karşılık bir değerinde seçilmelidir (LORD CORP, 1999).

Cihazın dinamik aralığı λ , MR akışkanın μ ve τ_y gibi viskoz özelliklerini kapsamaktadır. Gerçekte dinamik aralık cihazın conta ve yatak sürtünmeleri gibi cihazın diğer özelliklerinin de önemli bir fonksiyonu olabilir. Böylece tasarımcı cihazının dinamik aralığını yukarıdaki denklemler temelinde 20 değeri ile tasarlanması gerektiğine inanmalıdır. Ancak bu dinamik aralık sürtünme ve zararlı etkiler nedeniyle azabilir (LORD CORP, 1999).

2.2. Kontrol edilebilir Kuvvet ve Dinamik Aralık

MR damper tarafından üretilen toplam kuvvet üç bileşenden meydana gelmektedir. F_μ , viskoz kuvvetlerden kaynaklanan kuvvet, F_f , damperin mekanik bileşenleri arasındaki hareketten kaynaklanan sürtünme kuvveti, MR akışkanın içindeki demir partiküllerinin neden olduğu manyetik alan kuvveti F_τ . Bu kuvvetlerden F_μ ve F_f herhangi bir akışkan hızına göre sabit bir kuvvet ürettiklerinden dolayı kontrol edilemeyen kuvvet olarak adlandırılırlar. F_τ ise uygulanan manyetik alan ile değişen kontrol edilebilir kuvvet olarak adlandırılır. Toplam kuvvetin kontrol edilemeyen kuvvete oranı olarak tanımlanan Boyutsuz bir parametre olan dinamik aralık (D), MR damperin performansı değerlendirmek için kullanılır.

Kontrol edilebilir kuvvet ve dinamik aralık MR damperin performansını değerlendirmek için en önemli iki parametredir.

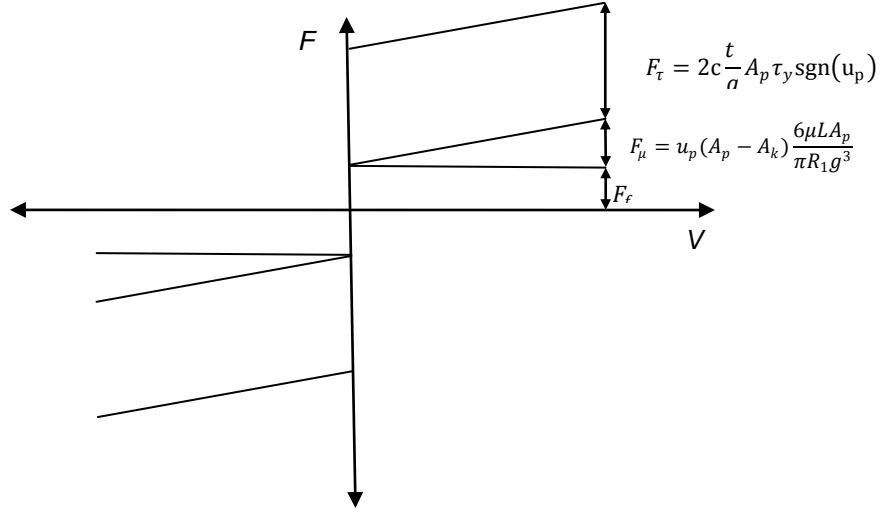
$$D = 1 + \frac{F_\tau}{F_\mu + F_f} \quad (2.9)$$

Bu denklemde,

$$F_\mu = u_p (A_p - A_k) \frac{6\mu L A_p}{\pi R_1 g^3} \quad (2.10)$$

$$F_\tau = 2c \frac{t}{g} A_p \tau_y \text{sgn}(u_p) \quad (2.11)$$

biçimindedir. MR Damperin kuvvet bileşenleri' Şekil 2.6'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6. MR Damperin kuvvet bileşenleri

Denklem 2.5'de verilen c katsayısı ifadesi, denklem 2.11'de verilen kontrol edilebilir kuvvet ifadesi içinde yazılırsa;

$$F_t = \left(2.07 + \frac{6Q\mu}{6Q\mu + 0.4\pi R_1 g^2 \tau_y} \right) \frac{2t A_p}{g} \tau_y \cdot \text{sgn}(u_p) \quad (2.12)$$

Bu denklemden görülebileceği gibi kontrol edilebilir kuvvet ifadesi, g dar kanal ile ters orantılıdır. Damperin verimliliğini mümkün olduğunca büyük olması istendiğinden dinamik aralığından büyük olmasını gerektirir. Bu sebeple denklem 2.12'de verilen dar kanal boyutunun da küçük seçilmesi gerekmektedir. Ancak küçük bir kanal genişliğinin seçilmesi aynı zamanda denklem 2.10 da verilen kontrol edilemeyen kuvvet ifadesini de büyüteceği ve bunun neticesinde dinamik aralığında küçüleceği görülmektedir. Denklem 2.10 ve denklem 2.12'ye bakıldığında, eğer manyetik alan doygunluğa ulaştığı varsayılması durumunda, seçilen küçük kanal genişliği ile viskoz kuvvet, kontrol edilebilen kuvvetten iki kat daha hızlı büyüyecektir, sonuçta dinamik aralık azalma eğiliminde olacaktır. Eğer kanal genişliğinin büyük seçilmesi durumunda ise hem kontrol edilebilen hem de viskoz kuvvet düşecektir. Sürtünme kuvvetinin sabit bir değerde olduğu dikkate alındığında bu durumda dinamik aralık yine azalma eğiliminde olacaktır. Optimal bir dinamik aralığın var olması gerekliliği açıktır (DELIVORIAS, 2004). Optimal dinamik aralık ancak optimal olarak seçilecek olan bir kanal genişliği ile mümkündür.

Dinamik aralık ifadesini bir kez daha açık bir şekilde yazarsak;

$$D = 1 + \frac{2ctA_p\tau_y}{(A_p - A_k) \frac{6\mu L u_p A_p}{\pi R_1 g^2} + gF_f} \quad (2.13)$$

Bu denklem bir MR damperin başlangıç tasarımı için yararlıdır ama bu başlangıç tasarımı daha kesin bir simetrik bir model ile doğrulanmalıdır (DELIVORIAS, 2004). Delivorias bu dinamik aralık değerinin 2.6 değerinden büyük olması gerektiğini belirtmiştir. Bunun anlamı, kontrol edilebilen kuvvetin, viskoz kuvvetten 2.6'nın bir faktörü kadar daha büyük olmasıdır. Ancak bu değeri yakalamak kolay değildir, çünkü viskoz kuvvet g^3 ile değişmektedir. Çok küçük dar kanal büyüklüğü daha önce de belirtildiği gibi dinamik aralığın sıfır değerine yaklaşmasına neden olacaktır. Piston çapı, akma gerilmesi ve kanal

büyüklüğü doğru tasarımı araştırma da önemli bir role sahiptirler.

MR damperin tasarımı göz önüne alındığında ikinci ve daha önemli aşama MR akışkanın viskozite değişime neden olan manyetik devre tasarımıdır. Pratik birçok mühendislik kaynağında manyetik devre tasarımı ile ilgili bir çok tasarım prosedürü bulunmasına rağmen, bunun için en uygun yöntemlerden biri piston kafasında oluşan manyetik alanı ticari bir kod kullanarak (ZHANG VE ARK, 2006), sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmek olacaktır. Daha detaylı bir tasarım prosedürü, akış geometeri tasarımı ve ileride bahsedilecek olan manyetik devre tasarımının beraber çözülebileceği daha detaylı iterasyonları kapsar.

2.3. Manyetik Akı Yoğunluğunun Hesaplanması

MR damperdeki basınç düşümünü ve buna bağlı olarak damper kuvvetini hesaplamak için bu damper için manyetik döngü denklemlerini çözmek gerekmektedir. Bu manyetik döngü denklemlerinden, MR akışkanın etkin hacimdeki akma gerilmesi elde edilmektedir. Bu durumda basınç düşümü denklem 2.2 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Bu çalışmada Lord firmasının MRF-132DG numaralı MR akışkanın kullanılması planlanmaktadır. Firmanın akışkan özelliklerinin belirtildiği verilerde belgelerdeki Manyetik alan şiddeti-Manyetik akı yoğunluğu ve akma gerilmesi-manyetik alan şiddeti grafiklerinin en küçük kareler eğri uydurma metodu uygulanarak akma gerilmesi ile manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki yaklaşık olarak aşağıdaki bir polinom ifadesi bulunmuştur ,

$$\tau_y = 52.962B^4 - 176.51B^3 + 158.79B^2 + 13.708B + 0.1442 \quad (2.14)$$

burada B manyetik akı yoğunluğudur ve birimi Tesla, Akma gerilmesi τ_y 'nin birimi ise KPa dır.

MR akışkanlarda manyetik akı yoğunluğu, B , uygulanan akım değeri ile değişmektedir. Bu durumda manyetik akı yoğunluğu ile akım arasında bir ifade yazılmalıdır.

Manyetik döngü, aşağıda verilen manyetik Kirchoff kanunu kullanılarak analiz edilebilir;

$$\sum H_k l_k = N_c I \quad (2.15)$$

burada H_k döngünün herhangi k bağlantı noktasındaki manyetik alan şiddetidir, l_k ise bu bağlantının aktif uzunluğudur. N_c damperdeki bobinin sarım sayısı, I ise bobine uygulanan akımdır. Manyetik akı korunum kuralına göre;

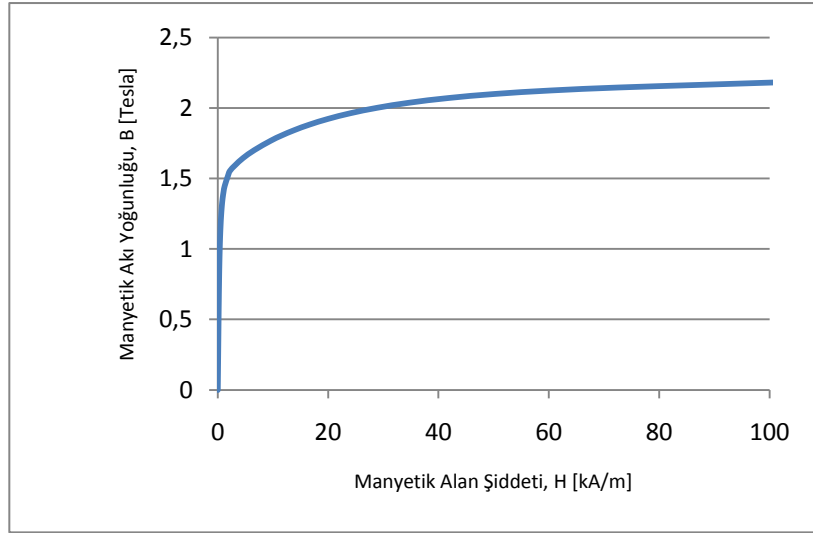
$$\Phi = B_k A_k \quad (2.16)$$

burada Φ manyetik akı, A_k ve B_k sırasıyla k bağlantı noktasındaki kesit alanı ve manyetik akı yoğunluğudur. Manyetik alan şiddeti ile manyetik akı yoğunluğu arasında $B_k = \mu_o \mu_{r_k} H_k$ şeklinde bir ilişki mevcuttur. Burada μ_o boşluktaki manyetik geçirgenlik ($\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} TmA^{-1}$) ve μ_r ise malzemenin türüne göre değişen bir sabit olan, göreceli geçirgenliktir. Düşük manyetik alanlarda bu ilişki geçerlidir, manyetik alan büyüdükçe malzemenin polarize olma yeteneği azalacak ve doygunluğa ulaşacaktır.

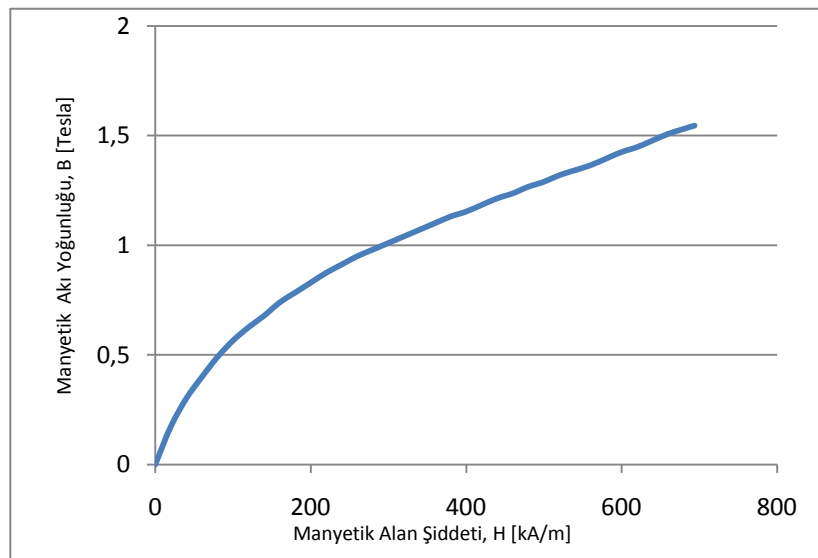
sıcaklık ile birlikte düşer, ayrıca malzeme sonlu bir sıcaklık değerine ulaşıldığında manyetik özelliklerini kaybeder. Bu noktaya Curie noktası denir. Malzeme kendi Curie sıcaklığına kadar çıktığında geçirgenlik değeri 1'e yaklaşacaktır. Örneğin demir için bu Curie noktası 770°C 'dir (KARAKOÇ, 2007).

Düşük karbonlu çelikler yüksek bir manyetik geçirgenliğe ve doyuma sahiptir. MR cihazlarda kullanılacak çeliğin ideal karbon bileşeni %0.15 den az olmalıdır. Bu değerlerde kabul edilebilir çelikler AISI-12L14, AISI-1008, AISI-1010 ve AISI-1018 dir (LORD CORP, 2009).

Bu çalışmada damperin piston malzemesi olarak kullanılması planlanan C1010 çeliği düşük karbonlu bir çeliktir ve C1010 çeliğinin (SALVETTİ, 2009) ve MRF-132DG (LORD CORP, 2009) MR sıvısının B-H eğrileri sırasıyla Şekil 2.8. C1010 çeliğinin B-H Eğrisi ve Şekil 2.9. MRF-132DG numaralı sıvının B-H Eğrisi'da verilmiştir.



Şekil 2.8. C1010 çeliğinin B-H Eğrisi



Şekil 2.9. MRF-132DG numaralı sıvının B-H Eğrisi

Karmaşık bir manyetik döngünün kesin analitik metotlar ile çözümünü bulmak zordur, bu yüzden bu manyetik döngülerin yaklaşık sonuçları kullanılır. Sonlu Eleman Yöntemi (FEM) ile daha karmaşık olan bu manyetik döngü çözümleri yapılabilmektedir (NGUYEN ve CHOI 2009, NGUYEN ve ARK. 2008).

İstenen damper geometrisi, manyetik alanın geçtiği yolun her zaman aynı büyüklükte olduğu bir geometridir. Yani manyetik yoğunluğun geçtiği, çeşitli kritik alanlar aynı büyüklükte olmalıdır. Bu manyetik akı yoğunluğunu döngü boyunca sabit tutmak için gereklidir. Bu durum manyetik döngünün bir bölgesinde erken bir doyma olmaması ve bir darboğaz etkisine neden olmamasını sağlar (WERELEY VE ROSENFELD, 2004). Damper üzerinde üç kritik alan vardır: Piston çekirdeğinin dairesel kesit alanı, (A_{Rc}), Manyetik akının dönüş yaptığı piston yuvası et kalınlığının halkasal kesit alanı, (A_{gh}), Piston çekirdeğinin kutup başı uzunluğu boyunca silindirik alanı, (A_{tc}).

$$A_{Rc} = \pi(R_c^2 - R_k^2) \quad (2.20)$$

(R_k mm piston çubuğu içinden kablo için açılmış olan kanalın yarıçapı)

$$A_{gh} = \pi[R^2 - (R_c + W + g)^2] \quad (2.21)$$

$$A_{tc} = 2\pi R_c t \quad (2.22)$$

A_{Rc} ve A_{gh} alanları birbirine eşitlendiğinde;

$$W = -(g + R_c) + \sqrt{R^2 - R_c^2 + R_k^2} \quad (2.23)$$

A_{Rc} ve A_{tc} alanları birbirine eşitlendiğinde;

$$t = \frac{R_c^2 - R_k^2}{2R_c} \quad (2.24)$$

$$g_h = R - (W + g + R_c) \quad (2.25)$$

Nguyen ve arkadaşları (NGUYEN ve ARK. 2007) yaptıkları çalışmada, bobin genişliği (W) ve piston kafası et kalınlığı (g_h) için bu varsayımın geçerli olduğunu ancak kutup başı (t) için bu geçersiz olduğunu tespit etti. Çünkü dinamik aralık (λ) sadece manyetik akı yoğunluğuna değil aynı zamanda kutupbaşı uzunluğuna da bağlıdır. Bu sebeple burada yaptığımız çalışmada, denklem 2.23 ve 2.25 i optimum geometri tespitinde kullandık ama denklem 2.25 de elde edilen değer kullanılmamıştır. Bunu yerine kutup başı uzunluğu bir tasarım değişkeni olarak alınmış, herhangi bir başka büyüklüğe bağlı olarak hesaplanmamıştır.

2.4. Taguchi Deney Tasarımı Metodu

Ürün ve süreç tasarımında kalitenin geliştirilmesi konusunda en önemli katkıyı yapan Genichi Taguchi Japonya'nın endüstriyel ürün ve süreç geliştirmesinde 1940 sonlarından beri aktif olarak yer alan bir Japon makine mühendisidir. Ağırlıklı olarak istatistiksel kavram ve araçlara, özellikle istatistiksel deney tasarımına dayalı kalite geliştirme için hem felsefe hem de metodoloji geliştirmiştir. Tasarım için teklif edilen istatistiksel deneyler, ürün parametrelerinin ve parametre sayılarının artması sonucu, ürün maliyetinin yükselmesine ve hızlı bir şekilde neticeye ulaşamadığından dolayı da uygulanabilirliğini

tamamen yitirmektedir. Ancak Taguchi uzun yıllar yaptığı çalışmalar sonucunda, çok az deneme ile çok iyi neticeler veren ortogonal dizileri geliştirmiştir (KAYI, 2006). Ortogonal diziler, faktör seviyelerini, teker teker değiştirmek yerine, eş zamanlı değiştirmeyi önermektedir.

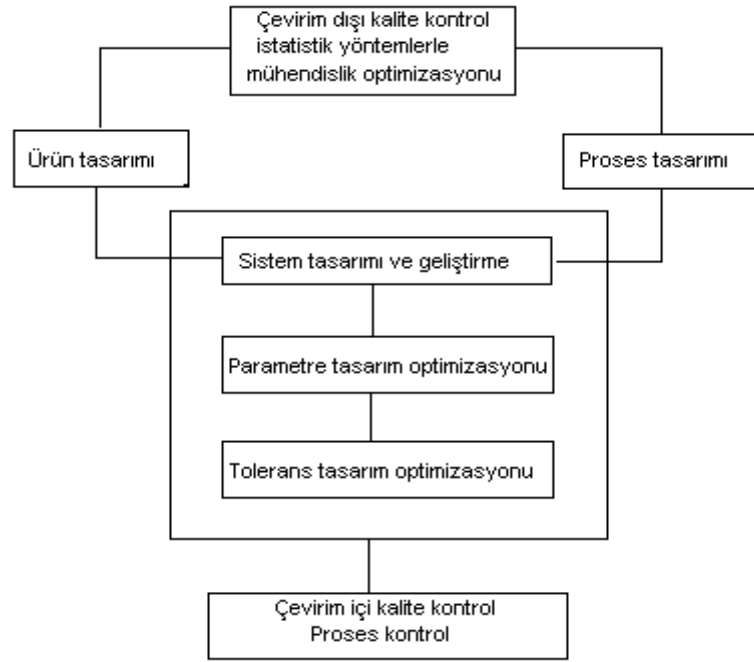
Taguchi metodunun esas amacı; kontrol edilebilen değişkenlerin belirli seviyelerde zaman ve maliyet açısından etkin, aynı zamanda kontrol edilemeyen faktörlerin tüm kombinasyonlarına karşı duyarsız ürünler/prosesler tasarlamaktır. Taguchi Deney Tasarım tekniği; ürünlerin kalitesinin olmasının yanı sıra, kalite geliştirmede çok daha az deneme ile daha iyi sonuç alma imkânını vermektedir.

Taguchi metodunun temelini oluşturan deney tasarımı, 1920'lerde istatistik biliminin babası sayılan İngiliz istatistikçi Sir Ronald Fisher tarafından bulunmuş ve geliştirilmiştir. Fisher, ayrıca deney verilerinin analizi için bugün klasik sayılan "varyans analizi" (ANOVA) yöntemini de geliştirmiştir. Genichi Taguchi, metodların standardize edilmesini ve faktöryel tasarımların kullanılmasını önermiştir. Taguchi metodu ile ürün kalitesinin ancak tasarım aşamasında sağlanabileceği ve yapılacak deneysel çalışma ile gelecekte ortaya çıkması muhtemel hata ve aksaklıklar önceden tespit edilerek prosesin etkilere duyarsızlığının sağlanması vurgulanmıştır (ŞİRVANCI, 1997).

Deney tasarımı ve Taguchi metodu, ürün kalitesini ve süreç performansını geliştirmek için kullanılan ileri düzeyde istatistik tekniklerdir. Deney tasarımı süreç optimizasyonu ve ürün ve süreç davranışlarının çalışması için güçlü bir araçtır. Deney tasarımı, süreç performansını optimize eden değişkenlerin sağlanması, çıktılarda etkili olan süreç değişkenlerinin bulunması için kullanılır. Taguchi metodu, gerçek üretim şartları süresince kontrol edilemeyen ve istenmeyen dış etkiler sebebiyle varyasyonun azaltılması ile ürün ve süreç sağlamlılığını maksimize etmek için kullanılır (FERAH, 2003).

Kaliteyi sağlamak için yapılan faaliyetler Taguchi tarafından Çevrim içi ve Çevrim dışı olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır. Bu durum Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Çevrim-içi kalite denetimi ürünün imalatı sırasındaki ve imalat sonrası, örneğin hizmet sırasındaki, kalite faaliyetlerini kapsar. Çevrim dışı kalite ürün ve üretim sürecinin geliştirilmesi sırasında gerçekleştirilen kalite faaliyetlerini içermektedir.

Bu faaliyetler ürüne doğrudan müdahale yerine, üretimin başlamasından önce gerçekleştirilen tasarım çalışmalarıdır (ŞİRVANCI, 1997). Tüm bu gereksinimlerin sağlanabilmesi için ürün ve sürecin tasarımı: Sistem tasarımı, Parametre tasarımı, Tolerans tasarımı aşamalarından oluşur. Bu aşamanın hedefleri şöyle sıralanabilir.



Şekil 2.10 Taguchi kalite kontrol sistemi

Sistem tasarımı (Fonksiyon belirleme):

- Araştırma geliştirme,
- Prototip sistemin yenilenmesi ve geliştirilmesi,
- Bilim ve mühendislik bilgisi,
- Bileşenlerin ve malzemelerin öncelikli seçimi.

Parametre tasarımı (Hedef belirleme):

- Kontrol edilebilir faktörler için en iyi seviyelerin belirlenmesi,
- Deneylerin tasarım metodolojisinin optimize edilmesi,
- Hedef değerlerin geliştirilmesi,

Maliyeti artırmaksızın gürültü faktörlerine göre sistemin duyarsızlaştırılması:

Burada temel amaç, üründe ve süreçte varyasyon (hedef değerden farklılık yani kalitesizlik) yaratan kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin (parametrelerin) değerlerini en uygun seçerek, ürün ve süreçteki varyasyonu en aza indirmektir. Taguchi buna sağlam tasarım demektir. Sağlam tasarımda, kalitesizlik yaratan ve kontrol edilemeyen bir faktörün etkisi, kontrol edilebilen başka bir faktörün ayarlanması sonucu azaltılmaktadır.

Tolerans tasarımı (Tolerans belirleme):

- Kalite ve maliyette dengeyi sağlayacak toleransların seçimi,
- Optimizasyon için kullanılan kalite kayıp fonksiyonunun belirlenmesi.

Tolerans tasarımı, parametre tasarımının varyasyonu azaltmada yeterli olmadığı durumlarda kullanılır. Parametre tasarımında düşük maliyetli, geniş ölçüde değişen bileşenler veya faktörler kullanılabilir. Varyasyonu istenilen değere düşürmek için bu bileşenlerin kalitesinin geliştirilmesi halen gerekiyorsa, tolerans tasarımı uygulanır. Tolerans tasarımında üç tür kalite değişkeni vardır.

Bunlar;

- ✓ En büyük en iyi,
- ✓ En küçük en iyi ve
- ✓ Hedef değer en iyidir.

En büyük en iyi; bu tip tolerans çalışmalarında kalite değişkeninin bir üst sınır yoktur ve dolayısıyla hedef değer de yoktur. Ölçü büyüdükçe verimlilik artacaktır. Buna örnek olarak malzemelerin dayanıklılığı verilebilir.

En küçük en iyi; bu karakteristik tipi negatif yönden bir sapma göstermez. Daima alt sınırın olması istenir. Tolerans azaldıkça durumda iyileşme artar. Bu tipe örnek olarak bir üretim sürecindeki hurda miktarı verilebilir.

Hedef değer en iyi; Bu durumda sapmalar iki yönlü olarak değişebilir. Dolayısıyla iki taraflı toleransa sahiptir. Buna en iyi örnek olarak boyut kriterleri verilebilir.

2.5. Sinyal Gürültü (S/N)Oranı

Taguchi performans istatistiği Sinyal/Gürültü (S/N) oranı olarak adlandırdığı bir kriterin kullanımının faydalı olacağını ifade etmiştir. Performans istatistiği, kontrol edilemeyen faktörlerin performans karakteristiği üzerindeki etkisinin araştırılmasında kullanılmaktadır. Böylece kontrol edilebilen faktörler için en uygun bileşenler elde edilebilmektedir.

Değişime sebep olan tüm faktörlere gürültü faktörü denir. İç gürültü faktörleri ürünün hedef değerden sapmasına veya kullanım esnasında bozulmasına sebep olur. Dış gürültü faktörleri ürünün kullanıldığı çevre faktörlerini içerir. Gürültü faktörü doğrudan üreticinin kontrolünde olmayıp kullanımla ve tüketicinin kullanım ortamı ile ilgilidir. Gürültü faktörleri üretim veya operasyon esnasında kalite karakteristiklerinde ve ölçülen sistemin performansında ki değişime sebep olan ve kontrol edilmesi pahalı ya da imkânsız olan faktörlerdir. Taguchi Kayıp fonksiyonunda olduğu gibi 3 tane S/N oranı geliştirmiştir. Bunlar Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Sinyal Gürültü (S/N) oranlarının hesaplanması

Karakteristik tipi	S/N Oranı
En küçük en iyi	$-10\log\left(\frac{1}{n}\sum y_i^2\right)$
Nominal en iyi	$-10\log\left(\frac{\bar{y}}{s^2}\right)$
En büyük en iyi	$-10\log\left(\frac{1}{n}\sum \frac{1}{y_i^2}\right)$

S/N oranı büyüdükçe hedef değer etrafında ürün varyansı küçülmektedir. Tercih edilmesi gereken durumun tespitinde S/N'nin en büyük değeri dikkate alınır.

2.6. Taguchi Metodunun temel çalışma biçimi

Mühendislik projeleri çok sayıda faktör içerdiği için, bir grup olabilecek kombinasyon denenemeyecek kadar geniştir. Test kombinasyonlarını azaltmada geleneksel olarak kısmi faktöryel tasarım kullanılmaktadır. Taguchi faktöryel deneyler için özel bir tasarım geliştirmiştir. Bu tasarım ortogonal dizilerden oluşmaktadır. Bu tasarımların kullanılması, verilen faktörlerin en az sayıda deneyle incelenmesine olanak tanımaktadır. Tüm faktörlerin sabit seviyeli olduğu ve etkileşimlerin önemsiz olduğu durumlarda standart ortogonal diziler kullanılmaktadır. Faktörlerin karışık seviyeli olduğu ve etkileşimlerin inceliği durumlarda ortogonal dizilerin modifiye edilmesi gerekmektedir.

Çoğu endüstriyel deney genellikle çok sayıda faktör içerir. Tam faktöryel tasarımda çok geniş bir deney seti incelenir. Örneğin tam faktöryel tasarımda 7 faktörlü ve her bir faktörün 2 seviyeli olduğu bir deney için tam 128 deneye ihtiyaç vardır.

Kısmi faktöryel tasarımda deney sayısını azaltmak için tüm kombinasyonlar arasından belirli grup seçilerek o grup üzerinde inceleme yapılır. Kısmi faktöryel tasarım iyi bir kestirme yol olarak bilirse de uygulamalar ve analiz için belirli kuralı yoktur. Taguchi metodu bu konuda iki önemli boşluğu tamamlamaktadır. Bunlar; deney koşullarına uygun olarak seçilebilecek ortogonal diziler net bir şekilde tanımlanmıştır. Sonuçların analizinde standart metotlar belirlenmiştir.

Ortogonal bir faktörün, bir başka faktöre bağımlı olmaksızın hesaplanabilmesi demektir. Bir faktörün etkisi, bir başka faktörün etkisini tahmin etmeyi bağlamaz. Ortogonal dizilerin birinci şartı, dengeli deneyler olmalarıdır. Farklı deneme koşullarında, eşit sayıda deneme içermeleridir. Her kolonda, eşit sayıda deneme bulunmalıdır. Ortaogonal dizilerin seçiminde toplam serbestlik derecesi kriterinden yararlanılır. Toplam serbestlik derecesi gruptaki tüm faktörlerin ayrı ayrı serbestlik dereceleri toplamıdır. Ortogonal dizi seçiminde toplam serbestlik derecesine eşit ya da daha büyük bir dizi seçilir. Bir faktörün serbestlik derecesi faktörün seviye sayısının bir eksiğidir. Ortogonal dizilerde kolonların tek tek serbestlik derecelerinin toplamından oluşan bir toplam serbestlik derecesi mevcuttur. Kolonların her birine ait serbestlik derecesi de kolondaki seviye adedinin bir eksiğine eşittir. Örneğin bir grupta 7 faktör mevcut ise ve her bir faktörün seviye sayısı da 2 ise, bu durumda toplam serbestlik derecesi 7 olacağından onun 1 fazlası olan L8 dizisi seçilir.

Deneyler bazı durumlarda kesirli olarak ifade edilebilir. 3 faktörlü 2 seviyeli bir deney tasarımı için bütün etkileşimler dikkate alındığında L8 dizisi yeterli olacaktır. Faktörler A,B,C olmak üzere 2'şerli etkileşimler AB, AC, BC ve üçlü etkileşim ABC olup 7 kolon olacaktır.

Tam faktöryel bir tasarımda kombinasyonların nasıl oluşturulduğuna şu örnekle bakabiliriz. Tasarım için A ve B isimli iki faktör olduğunu düşünelim ve bu her bir faktörün iki seviyeli olduğunu göz önüne alalım, bu durumda A1B1, A1B2, A2B1 ve A2B2 olmak üzere 4 kombinasyonu söz konusudur. Eğer faktör sayısı 3 ve her biri 2 seviyeli olursa $2^3=8$ deneme ile karşı karşıya kalırız. Bunlar; A1B1C1, A1 B1C2, A1B2C1, A1B2C2, A2B1C1, A1B1C2, A2B2C1, A2B2C2'dir.

Görüldüğü gibi bütün kombinasyonların denendiği tam faktöryel tasarımda, faktör seviyesi arttıkça,

deney sayısı 2 seviyeli deneylerde ikinin kuvvetleri şeklinde artmaktadır. Farklı faktör ve seviyeli deneyler için tam faktöryel tasarım ve Taguchi metodu için gerekli deneme sayıları Tablo 2.2 de verilmiştir. Burada deney sayılarındaki farklılık bariz bir şekilde görülmektedir.

Tablo 2.2. Taguchi ve tam faktöryel tasarım için kombinasyonlar

Faktör	Seviye	Deney Sayıları	
		Tam Faktöryel	Taguchi Metodu
2	2	$4(2^2)$	4
3	2	$8(2^3)$	4
4	2	$16(2^4)$	8
7	2	$128(2^7)$	8
15	2	$32768(2^{15})$	16
4	3	$81(3^4)$	9

2.7. Taguchi Deney Tasarımının Aşamaları

Taguchi deney tasarımının geleneksel deney tasarımlarından farkı daha az sayıda deney yaparak uygun sonuçlara daha kısa sürede ve maliyetle ulaşmaktır. Taguchi bu amaçla ortogonal dizilerden yararlanmaktadır. Taguchi deney tasarımı aşağıdaki temel adımları içerir.

- Analiz edilecek problemin belirlenmesi,
- Performans karakteristikleri ve ölçüm sisteminin belirlenmesi,
- Performansı etkileyen faktörler ve seviyelerinin belirlenmesi,
- Faktörlerin kontrol ve hata faktörleri olarak ayrılması,
- İncelenecek faktörler arası etkileşimlerin belirlenmesi,
- Uygun ortogonal dizinin seçilmesi,
- Kontrol faktörleri ve etkileşimler için lineer grafiğin çizilmesi,
- Faktör ve etkileşimlerin sütunlara atanması,
- Kalite kayıp fonksiyonu ve performans istatistiklerinin seçilmesi,
- Deneylerin yapılması ve sonuçların kaydedilmesi,
- Veri analizi yapılarak etkin faktör ve seviyelerin belirlenmesi
- Doğrulayıcı deneylerin yapılması.

2.8. Etkin Bir Deney Tasarımı İçin İstenen Özellikler

Deney tasarımının amacı genel olarak bir sürecin gösterdiği davranışlar hakkında bilgi toplayarak, bu sürecin kalite karakteristiklerini etkileyen faktörleri belirlemek ve sürecin kalitesinin iyileştirilebilmesi için hangi faktörlerin hangi seviyede olması gerektiğini tespit etmektir. Böylece süreçten beklenen performansın elde edilmesi için optimum faktör seviyeleri belirlenmiş ve sürecin kalitesi geliştirilmiş olur. İlgili özelliklerin uygulama yöntemleri Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Deney Tasarımında Bulunması İstenen Özellikler

Özellikler	Yöntemler
1.Deneyin kapsamı, amacı açık şekilde tanımlanmış olmalıdır.	1.Kapsamın tanımlanması, deneyin gerektirdiği tüm ayrıntıların deney tasarımı ekibi tarafından biliniyor olmasını ifade eder. Ayrıca;Faktörlerin ve seviyelerinin seçimini, <ul style="list-style-type: none"> Deneyde kullanılacak malzemelerin, ekipman ve prosedürlerin seçimini, Ölçüm metodunun belirlenmesini gerektirir.
2.Mümkün olduğunca faktörlerin etkilerinin diğer değişkenlerle karıştırılmamasına dikkat edilmelidir.	2.Uygun bir deney örneğinin seçimi kontrol edilemeyen değişkenlerin etkilerinden arındırılmasına ve analiz sonuçlarının basitleştirilmesine yardım eder.
3.Mümkün olduğunca, deneyin sebebi bilinen ya da bilinmeyen sapmalardan arındırılması gerekir.	3. Rassallaştırmanın kullanımı sapmaların önlenmesine yardımcı olur.
4.Deneylerin, deneysel hata sapmalarının (varyans) ölçümüne elverişli olması gerekir.	4. Tekrarlı deneylerin yapılması varyansın ölçümünü ve rassallaştırma da deneyin geçerliliğini mümkün kılar.
5.Deneyin doğruluğu sonuçların belirlenen amaçları sağlamasıyla mümkündür.	5.Doğruluğun artırılması ölçümlerin hassaslığı ve deneylerin tekrarıyla gerçekleştirilir.

2.9.Taguchi Deneysel Tasarım Modelinin MR Dampere Uygulanması

MR damperin Taguchi analizi için 4 parametre göz önüne alınmıştır. Her parametre için 3 seviye tespit edilmiştir. Bu parametre ve seviyeler MR damperin Taguchi analizinde kullanılan parametreler ve seviyeleri Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

Tablo 2.4. MR damperin Taguchi analizinde kullanılan parametreler ve seviyeleri

	Faktörler	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
A	Kanal	0.4 mm	0.8 mm	1.2 mm
B	Kutupbaşı	2 mm	3 mm	4 mm
C	Çekirdek	5 mm	6 mm	7 mm
D	Akım (I)	0.2 A	0.4 A	0.6 A

* 1.4 mm piston çubuğu içinden kablo için açılmış olan kanalın yarı çapı

Bu aşamada belirlenen faktör ve seviye sayısına göre uygun ortogonal dizi seçimi yapılmalıdır.Tablo 2.4'de verildiği gibi 4 faktör ve 3 seviye için her bir faktör için serbestlik derecesi $3-1=2$ ve 4 faktör için toplam serbestlik seviyesi $4*2=8$ olacağından onun bir fazlası olan L9 dizisi seçilir (Tablo 2.5). Ortogonal dizi şartları ise Tablo 2.6'da verilmiştir. Deneylerin yapılış sırası belirlenirken çeşitli yöntemler kullanılır. Rassallaştırma en çok kullanılan yöntemlerdendir. Rassallaştırma, deney esnasında oluşabilecek ve sonuçları olumsuz yönde etkileyebilecek, fakat başlangıçta öngörülmemiş olan değişkenlik kaynaklarına karşı korunabilmek mümkündür.

Tablo 2.5. L-9 ortogonal dizisine parametrelerin atanması

Deney	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Faktör 4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Tablo 2.6. L-9 ortogonal dizisine göre deney şartları

Deney no	Kanal genişliği	Kutupbaşı (t)	Çekirdek	Akım (I)
1	0.4	2	5	0.2
2	0.4	3	6	0.4
3	0.4	4	7	0.6
4	0.8	2	6	0.6
5	0.8	3	7	0.2
6	0.8	4	5	0.4
7	1.2	2	7	0.4
8	1.2	3	5	0.6
9	1.2	4	6	0.2

2.10. Aday Geometrilerin diğer büyüklüklerinin hesaplanması

Bobin genişliğinin (W) ve piston yuvası et kalınlığının (g_n) sırasıyla denklem 2.23 ve denklem 2.25 ile; ayrıca bobin genişliğinin sağ ve solundan 2 mm makara genişliği ve yalıtım malzemesi genişliği çıkarılarak kullanılacak bobin kablosu çapının 0.516 mm olduğunu da göz önüne alarak yaklaşık sarım sayısının hesaplanması neticesinde, elde edilen bobin genişliği, piston yuvası kalınlığı ve sarım sayısı değerleri Tablo 2.7'de verilmiştir.

Tablo 2.7. Bobin genişliği, Piston yuvası kalınlığı ve Sarım sayısı

Deney no	Bobin genişliği (W)	Piston yuvası et	Sarım Sayısı (N_c)
1	12.200	1.000	549
2	10.833	1.367	434
3	9.404	1.796	321
4	10.433	1.367	408
5	9.004	1.796	297
6	11.800	1.000	522
7	8.604	1.796	273
8	11.400	1.000	495
9	10.0330	1.367	383

2.11. Manyetik akı yoğunluğunun hesaplanması

Bu çalışmada Lord firmasının MRF-132DG numaralı MR akışkanın denklem 14'de verilen manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak akma gerilmesinin hesaplanabilmesi için ilk olarak denklem 19 ile manyetik akı yoğunluğunun hesaplanması gerekmektedir. Denklem 2.19'a göre manyetik akı yoğunluklarının hesaplanabilmesi için Şekil 2.8'de C1010 çeliğinin, B-H Eğrisi ve Şekil 2.9'da MRF-132DG numaralı sıvının B-H eğrileri aracılığıyla verilen görelî geçirgenliklerin hesaplanması gerekmektedir. $\mu_{rk} = B_k / \mu_o H_k$ denklemi ile $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} TmA^{-1}$ olmak üzere Şekil 2.8. C1010 çeliğinin B-H Eğrisi ve Şekil 2.9. MRF-132DG numaralı sıvının B-H eğrisinden hesaplanır. Burada C1010 çeliği için $\mu_r \cong 1240$ ve MR akışkan için $\mu_r \cong 3$ değerleri hesaplanmıştır. Piston mili malzemesi olan paslanmaz sert kromun görelî geçirgenliği C1010 ile aynı olarak kabul edilmiştir. Sarım sayısı hesabı için gerekli olan bobin teli kablo çapı 0.516 mm (24-gauge) olarak seçilmiştir. Deney numaralarına göre hesaplanan Manyetik akı yoğunluğu (B) ve Akma gerilmesi (τ_y) değerleri Tablo 2.8'de verilmiştir.

Tablo 2.8. Manyetik Akı Yoğunlukları ve Akma Gerilmesi Değerleri

Deney no	Manyetik akı Yoğunluğu (B)	Akma Gerilmesi (τ_y)(kPa)
1	0.516477832	29.03193
2	0.816185771	44.64455
3	0.904778684	47.2922
4	0.576796411	32.86984
5	0.139486714	4.686802
6	0.49197341	27.40586
7	0.171530959	6.322619
8	0.466526509	25.68584
9	0.120008839	3.782103

2.12. Kanal boyunca olan basınç kaybının hesaplanması

Denklem 2.2 kullanılarak her deney için ayrı ayrı olmak üzere kanal boyunca meydana gelen basınç kaybı hesaplanabilir. Bu hesaplama için ilk olarak denklem 2.5 kullanılarak c katsayısı hesaplanmalıdır. Kontrol edilebilen basınç düşümü ile kontrol edilemeyen basınç düşümünün birbirine oranı olan $\lambda = \Delta P_t / \Delta P_u$ kontrol oranı da aşağıda verilmiştir.

- Piston Kafası Çapı: 0.02 mm
- Piston Mili Çapı: 0.01 mm
- Piston Hızı: 0.2 m/s

Bu sonuçlara bağlı olarak denklem 2.10 ve 2.11'den elde edilen, kontrol edilemeyen ve kontrol edilebilen damper kuvvetleri, toplam damper kuvveti ve denklem 13 ile elde edilen dinamik oran değerleri Tablo 2.9 ve 2.10'daki gibi elde edilmiştir. $F_s = 30$ N olarak alınmıştır.

Tablo 2.9. Basınç Düşümü ve Dinamik Aralık Değerleri

Deney no	c	ΔP_u (Pa)	ΔP_r (Pa)	ΔP (Pa)	λ
1	2.612373	619348.4	758422.2	1377771	1.224549
2	2.510104	631669.2	1680937	2312606	2.661104
3	2.501727	646717.1	2366243	3012960	3.658854
4	2.282496	79824.74	375126.4	454951.1	4.699375
5	2.729634	81747.72	95949.4	177697.1	1.173726
6	2.310844	78251.01	633306.6	711557.6	8.09327
7	2.462372	24496.72	51895.46	76392.19	2.118465
8	2.202003	23437.5	282801.5	306239	12.0662
9	2.583104	23914.09	65130.43	89044.52	2.723517

Tablo 2.10. Damper Kuvveti ve Dinamik Aralık Değerleri

Deney no	F_u (N)	F_r (N)	F (N)	D
1	778.2	953.0	1731.3	2.18
2	793.7	2112.3	2906.1	3.57
3	812.6	2973.5	3786.1	4.53
4	100.3	471.3	571.7	4.62
5	102.7	120.5	223.3	1.91
6	98.3	795.8	894.1	7.20
7	30.7	65.2	95.9	2.07
8	29.4	355.3	384.8	6.98
9	30.0	81.8	111.8	2.37

2.13. Taguchi metodu ile deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Taguchi deneysel tasarım metodu kullanılarak seçilen faktör ve seviyelerin sonuçlar üzerindeki etkisini incelenebilir ve bu sayede en iyi geometriyi elde etme imkânı sağlanabilir. Her bir deney için dinamik aralık değeri kullanılacaktır. Dinamik aralığın büyük olması istendiğinden Sinyal-gürültü oranını hesaplamak için “en büyük en iyi seçeneği” kullanılmıştır. Tablo 2.11’de dinamik aralığa göre hesaplanmış olan S/N oranları verilmiştir.

Tablo 2.11. Deneylerin dinamik aralığa göre SN Oranları

Deney	(g)	(t)	(R_c)	(l)	D	SN
1	1	1	1	1	2.18	6.77
2	1	2	2	2	3.56	11.04
3	1	3	3	3	4.53	13.12
4	2	1	2	3	4.62	13.29
5	2	2	3	1	1.91	5.61
6	2	3	1	2	7.20	17.15
7	3	1	3	2	2.07	6.33
8	3	2	1	3	6.98	16.87
9	3	3	2	1	2.36	7.47

$SN = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right)$ formülü kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Burada y_i ölçüm sonucu

ilgili faktörün aldığı dinamik aralık değerdir. Her bir faktörün seviyelerde aldığı değerlerin SN oranı için örnek hesaplama şu şekildedir;

g faktörünün 1. seviyesini aldığı 1, 2, 3 deneylerindeki dinamik aralık değerinin (y_i) için,

$$\sum \frac{1}{y_i^2} = \left(\frac{1}{2.178^2} + \frac{1}{3.564^2} + \frac{1}{4.528^2} \right) = 0.338$$

$$SN \text{ oranı } SN = -10 \log \left(\frac{0.338}{3} \right) = 9.4811$$

elde edilir. Buna benzer olarak faktörlerin seviyelerine göre SN oranları Tablo 2.12’de yanıtların ortama değeri de Tablo 2.13’de verilmiştir. İlgili tablolardaki verilerin grafik gösterimi sırası ile Şekil 2.11 ve 2.12’de verilmiştir.

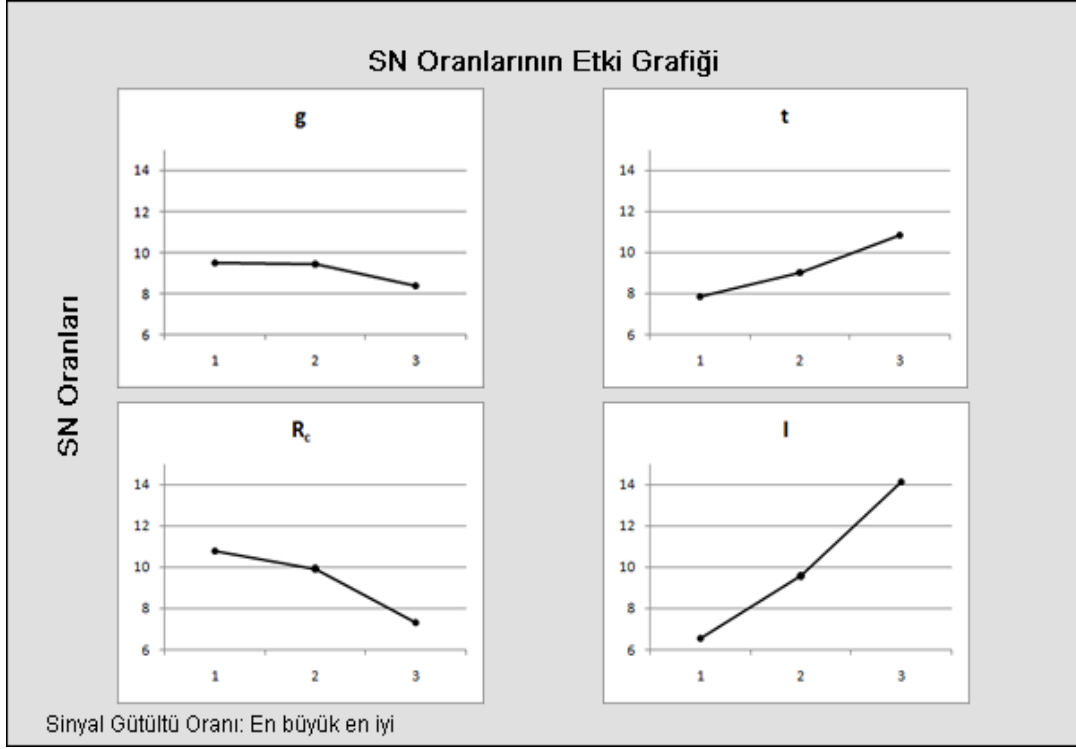
Tablo 2.12. Faktörlerin seviyelerine göre SN Oranları

Seviye	g	t	R_c	I
1	9.481100	7.867268	10.78458	6.547817
2	9.446845	9.044534	9.932167	9.576478
3	8.412654	10.84167	7.320032	14.11906
Delta	1.068445	2.9744053	3.464546	7.571243
Rank	4	3	2	1

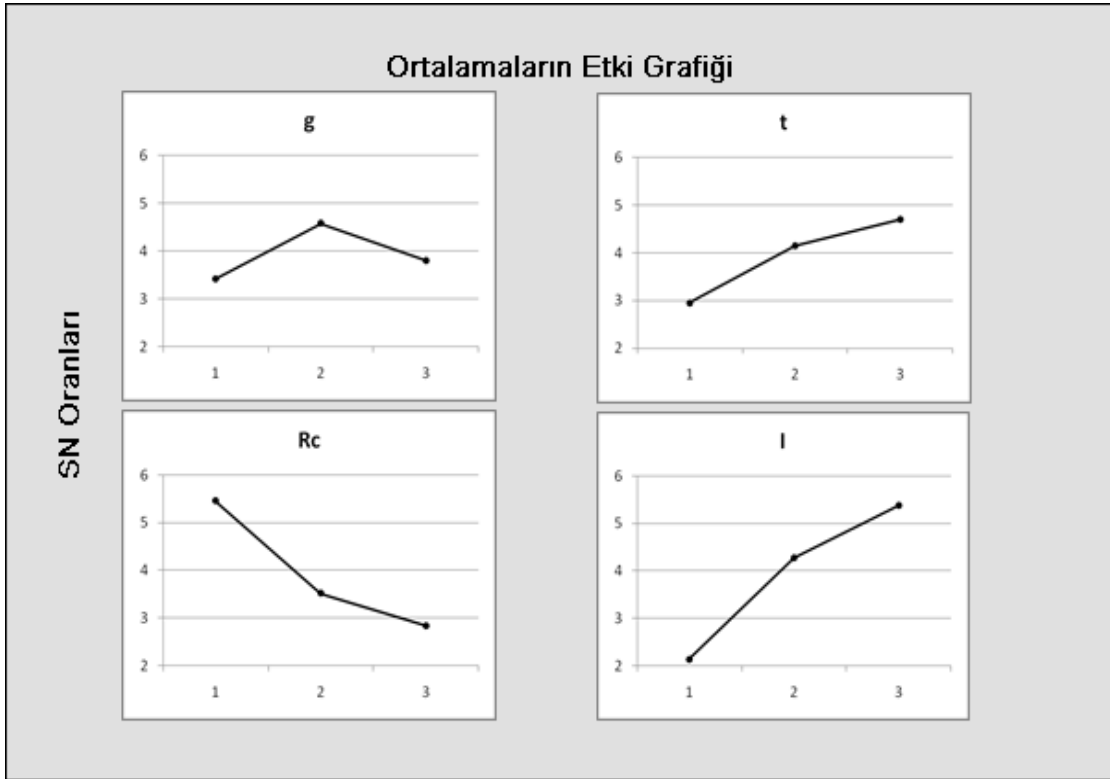
Tablo 2.13. Faktörlerin seviyelerine göre Ortalama Değerleri

Seviye	g	t	R_c	I
1	3.423963	2.956492	5.452656	2.150151
2	4.575752	4.150053	3.514868	4.279471
3	3.804447	4.697618	2.836638	5.374540
Delta	1.151788	1.741126	2.616017	3.224389
Rank	4	3	2	1

Burada delta ve rank değerleri, her bir faktörün etkilerini birbirleri ile karşılaştırmak için kullanılır. Delta her bir faktörün en büyük değerinden ile en küçük değerinin çıkarılması ile elde edilir. Rank değerleri delta değerleri temelinde atanırlar, en büyük delta değeri 1 rank değerini ve sonraki büyük delta değeri 2 değerini alır böyle devam eder. Rank değerleri her bir faktörün göreceli önemini gösterir.



Şekil 2.11. SN Oranlarının Grafiksels Gösterimi



Şekil 2.12. Ortalamaların Grafiksels Gösterimi

SN oranları için en büyük değerler uygun seviye olarak ele alınır. Bu durumda bu analizlerden çıkan uygun sonuçlar Tablo 2.14'te verilmiştir.

Tablo 2.14. SN oranları sonuçlarına göre en uygun seviyeler

Faktör	Uygun Seviye	Değer
<i>g</i>	1	0.4 mm
<i>t</i>	3	4 mm
<i>R_c</i>	1	5 mm
<i>I</i>	3	0.6 A

Bu uygun parametre değerleri ile bir deney yapılacak olursa bu deneyin SN oranı 20.0691 ve cevap değeri olarak dinamik oran 8.29640 değerini almış olacaktır. Bu değerler, Tablo 2.13'de verilen değerlerden daha büyük bir değer olmaktadır ve dolayısıyla optimal bir seçimi göstermektedirler.

2.14. Faktör etkilerinin varyans analizi ile araştırılması

Ürün veya süreç geliştirmenin amacı, ürün veya sürecin performans karakteristiğini geliştirmektir. Deneylerin amacı ise ürün veya sürecin değişimini kontrol etmek ve azaltmaktır. Sonra da performansını etkileyen parametrelerin hangileri olduğu ile ilgili bir karar verilmelidir. Deney verilerinin yorumlanmasında ve gerekli kararların verilmesinde varyans analizi (ANOVA) kullanılmaktadır.

ANOVA test edilen parça gruplarının ortalama performansları arasındaki farklılığı ortaya koyma için kullanılan istatistiksel bir araçtır. Varyans analizi toplam varyasyonu bileşenlerine ayıran matematiksel bir tekniktir.

Aşağıda Varyans analizinde kullanılan formüller yer almaktadır (ROY, 2003)

$$S_T = [\sum_{i=1}^N y_i^2] - \frac{T^2}{N} \quad : \text{Tüm verilerin kareleri toplamı}$$

$$T^2 = (\sum_{i=1}^N y_i)^2 \quad : \text{Tüm verilerin toplamının karesi}$$

$$S_A = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad : \text{A faktörünün kareleri toplamı}$$

A_i : A faktörünün *i*. seviyesi için ölçülen değerler

$$S_B = \left[\sum_{i=1}^{k_B} \left(\frac{B_i^2}{n_{B_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad : \text{B faktörünün kareleri toplamı}$$

C, D vs. faktörler için de kareler toplamı benzer şekilde hesaplanır.

$$S_e = S_T - (S_A + S_B) \quad : \text{Hata kareleri toplamını verir.}$$

$$f_T = N - 1 \quad : \text{Toplam serbestlik derecesi}$$

$$f_A = k_A - 1 \quad : \text{A'nın serbestlik derecesi seviye sayısından 1}$$

çıkarmakla bulunur. Bu her faktör için aynıdır.

$$f_B = k_B - 1 \quad : \text{B'nin serbestlik derecesi seviye sayısından 1}$$

çıkarmakla bulunur.

$$f_{AxB} = (v_A) \cdot (v_B) \quad : \text{Herhangi bir etkileşimin serbestlik derecesi ilgili faktör}$$

serbestlik derecelerinin çarpımına eşittir.

$$f_e = f_T - (f_A + f_B + f_{AB}) \quad : \text{Hata varyansının serbestlik derecesi}$$

Hesaplama da kullanılan notasyonlar aşağıda verilmiştir.

N : Elde edilen toplam veri sayısı

n_A : A faktörü için veri sayısı

y_i : Gözlenmiş i. değeri

k_A : A faktörünün seviye sayısı

$\frac{T^2}{N}$: düzeltme faktörü

Yukarıda hesaplanan kareler toplamından hareketle varyanslar elde edilir. Bunun için kareler toplamını ilgili serbestlik derecesine oranlamak yeterlidir.

$V_T = S_T/f_T$: Toplam varyans

$V_A = S_A/f_A$: A faktörünü varyansı

$V_B = S_B/f_B$: B faktörünün varyansı

$V_{AB} = S_{AB}/f_{AB}$: AB etkileşiminin varyansı

$V_e = S_e/f_e$: Hata varyansı

Varyans oranlarının dağılımı F dağılımına uymaktadır. Bu sebeple her bir faktöre ait varyanslar hata varyansına oranlanarak F değerleri elde edilir. Bu F değerleri teorik F dağılımı ile karşılaştırılarak test edilir.

$F_A = \frac{V_A}{V_e}$: A faktörü için deneysel F değeri

$F_B = \frac{V_B}{V_e}$: B faktörü için deneysel F değeri

$F_{AB} = \frac{V_{AB}}{V_e}$: AB etkileşimi için deneysel F değeri

Elde edilen F deneysel değerleri teorik F değeri ile teorik F dağılım değeri karşılaştırılarak faktör seviyeleri arasındaki farkın kalite değişkeni üzerindeki etkilerinin farklı olup olmadığı hipotezi hakkında karar verilir.

$P_A = \frac{S'_A}{S_t} = \frac{S_A - (V_e \times f_A)}{S_t}$: A Faktörünün yüzdeler etkisi

Tablo 2.15. Deneylere göre cevap değeri (y_i) ve cevap değerinin karesi (y_i^2)

Deney no	(g)	(t)	(R_c)	(l)	D (y_i)	(y_i) ²
1	1	1	1	1	2.17909934	4.7484739
2	1	2	2	2	3.56419278	12.703470
3	1	3	3	3	4.52859753	20.508195
4	2	1	2	3	4.6174896	21.321210
5	2	2	3	1	1.90843137	3.6421103
6	2	3	1	2	7.20133388	51.859209
7	3	1	3	2	2.07288609	4.2968567
8	3	2	1	3	6.97753345	48.685973
9	3	3	2	1	2.36292265	5.5834034
Toplam					35.412	173.349

Tablo 2.15. de gösterilen deneylere göre cevap değeri (y_i) ve cevap değerinin karesi (y_i^2) değerleri kullanılarak tüm verilerin toplam karesi ve tüm verilerin karelerinin toplamı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$T^2 = \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 = (35.412)^2 = 1254.01$$

$$S_T = \left[\sum_{i=1}^N y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} = 173.349 - \left(\frac{1254.01}{9} \right) = 34.014$$

g faktörünün 1 nolu seviyesinin aldığı cevap değerleri aşağıdaki gibi bulunur,

$$g_1 = 2.18 + 3.564 + 4.528 = 10.272$$

benzer şekilde tüm faktörlerin tüm seviyeleri için yapılan hesaplama sonuçları aşağıdaki gibi olacaktır.

$$g_2 = 13.727 \quad g_3 = 11.413$$

$$t_1 = 8.870 \quad t_2 = 12.450 \quad t_3 = 14.093$$

$$R_{c1} = 16.358 \quad R_{c2} = 10.544 \quad R_{c3} = 8.510$$

$$I_1 = 6.450 \quad I_2 = 12.839 \quad I_3 = 16.124$$

$$S_g = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{g_i^2}{n_{g_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} = \left(\frac{10.272^2}{3} + \frac{13.727^2}{3} + \frac{11.413^2}{3} \right) - \left(\frac{1254.01}{9} \right) = 2.066$$

benzer şekilde;

$$S_t = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{t_i^2}{n_{t_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} = 4.756$$

$$S_{R_c} = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{R_{c_i}^2}{n_{R_{c_i}}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} = 11.058$$

$$S_I = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{I_i^2}{n_{I_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} = 16.130$$

$$S_e = [S_T - (S_g + S_t + S_{R_c} + S_I)] \cong 0$$

Varyansların hesaplanması için serbestlik derecelerinin bilinmesi gerekir;

$$f_T = 9 - 1 = 8$$

$$f_g = 3 - 1 = 2$$

$$f_t = 3 - 1 = 2$$

$$f_{R_c} = 3 - 1 = 2$$

$$f_{v_I} = 3 - 1 = 2$$

$$f_e = 8 - (2 + 2 + 2 + 2) = 0$$

Bu serbestlik derecelerine göre varyanslar şu şekilde bulunur;

$$V_g = S_g/f_A = 2.066/2 = 1.033$$

$$V_t = S_t/f_t = 4.756/2 = 2.3728$$

$$V_{R_c} = S_{R_c}/f_{R_c} = 11.058/2 = 5.529$$

$$V_I = S_I/f_I = 16.130/2 = 8.065$$

$$V_e = S_e/f_e = 0/0 \text{ karar verilemiyor (ne büyük ne de küçük)}$$

V_e değeri hesaplanamadığı için F değerleri de hesaplanamaz. Faktörlerin yüzdeler etkisi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$S'_g = S_g - (V_e \times f_A) = S_g$$

$$S'_t = S_t \quad S'_{R_c} = S_{R_c} \quad S'_I = S_I$$

$$P_g = \frac{S'_g}{S_t} = \frac{100 \times 2.066}{34.014} = \%6.07$$

$$P_t = \% 14$$

$$P_{R_c} = \% 32.51$$

$$P_I = \% 47.42$$

ANOVA faktörlerin toplam yüzde etkisi daima %100'e ayarlanır. Hata teriminin de yüzde etkisi aynı şekilde bulunur ancak hata serbestlik derecesi hesaplanmadığından, bu durumda hata terimlerinin yüzde etkisi; toplam yüzde etkisinden (%100), tüm faktörlerin yüzde etkisi çıkarılarak bulunur (ROY, 2003).

$$P_e = 100 - (P_g + P_t + P_{R_c} + P_I) = \%0$$

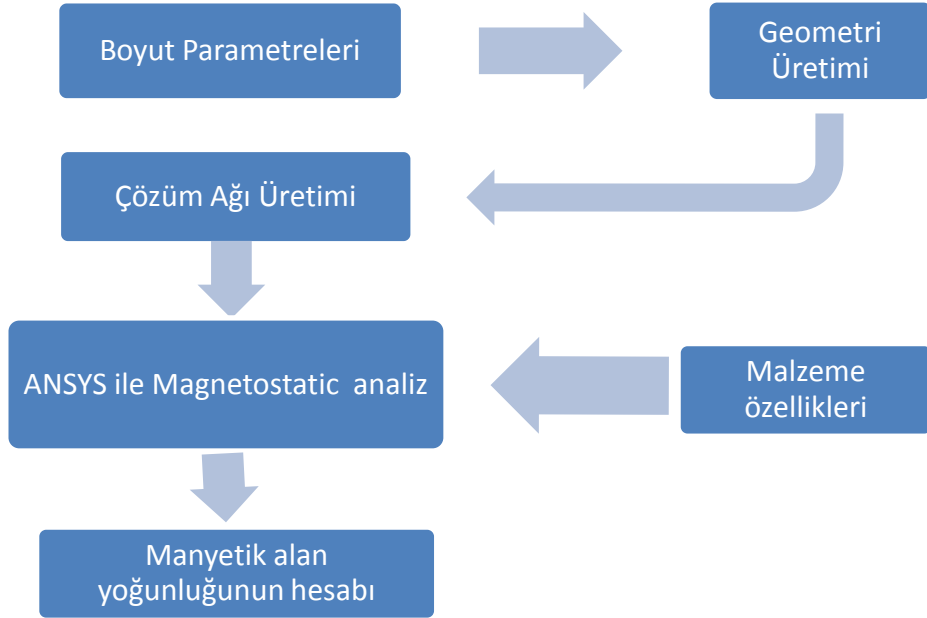
2.15. Değerlendirme

Dinamik oranın max. olmasına göre yapılan analizde en önemli faktörler akım ve piston çekirdeği yarıçapı olarak görülmektedir. Bu açıdan bakıldığında sıvının geçtiği kanalın etkisi daha az görünmektedir. Ancak diğer bir önemli parametre ise hedeflenen MR damper kuvvetine göre en yüksek dinamik oranın elde edilmesidir. Bu sebeple buraya kadar olan çalışmalar hedef damper kuvvetine göre tekrar gerçekleştirilecektir. Sıvının geçtiği halka biçimli kanalın hem viskoz hem de akma gerilmesi ile oluşturulan kuvvetler üzerine etkisi çok olduğu için sıvı kanal yüksekliğinin de önemli bir parametre olacağı düşünülmektedir.

3. MANYETİK ALAN VE AKIŞ ANALİZLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE GEOMETRİK OPTİMİZASYONU

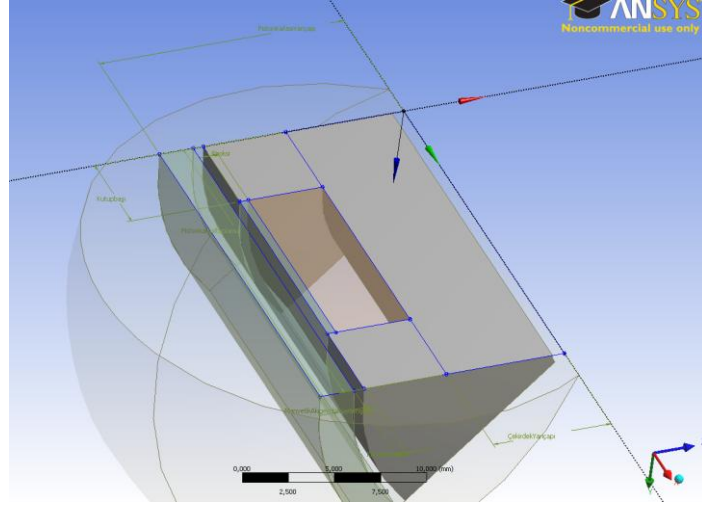
3.1. Manyetik Akı Yoğunluğunun Sayısal Olarak Hesaplanması

Daha önce belirlenen çeşitli geometriler için ANSYS v.12'de Magnetostatic aracı kullanılarak sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar, manyetik alanın meydana geldiği piston kafasının, daha hızlı bir çözüm gerçekleştirilebilmesi için geometrisinin 45° lik bir parçası alınarak gerçekleştirildi ve bu simülasyonlar 3 boyutlu olarak gerçekleştirildi. Piston kafasının MR sıvısı tarafından çerçeveslendirildiğinden geometri de bu şekilde oluşturulmuştur. Şekil 3.1 de Manyetik akı yoğunluğunu hesaplamak için gerekli adımlar şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.1. Manyetik akı yoğunluğunu hesaplamak için gerekli adımlar

Manyetik alan simülasyonunun gerçekleştirildiği geometri Şekil 3.2.'de gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Damper geometrisinin etrafına bu damperi kapsayan bir hacim oluşturulmuştur. Bu hacim manyetik alanın yönünü tanımlamak için gerekli olan bir hacimdir.



Şekil 3.2. Manyetik alan simülasyonunun gerçekleştirildiği geometri

Verilen cihazların geometrik büyüklüklerine göre hesaplanan Manyetik akı yoğunluğu (B) ve Akma gerilmesi (τ_y) değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

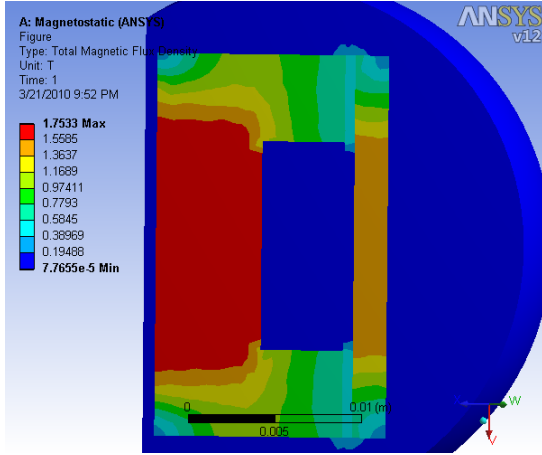
Tablo 3.1. Manyetik Akı Yoğunlukları ve Akma Gerilmesi Değerleri

Cihaz no	g (mm)	t (mm)	g _h (mm)	I (A)	W (mm)	N _c	B (T)	τ_y (Pa)
1	0.6	5	1.8	1	4.9	220	0.56305	32,02
2	0.6	6	1.9	1.2	4.9	183	0.50594	28,34
3	0.6	7	2	1.5	4.9	146	0.45403	24,83
4	0.8	5	1.9	1.5	4.7	209	0.56167	31,93
5	0.8	6	2	1	4.7	174	0.4549	24,89
6	0.8	7	1.8	1.2	4.7	138	0.41146	21,89
7	1	5	2	1.2	4.5	197	0.50334	28,16
8	1	6	1.9	1.5	4.5	164	0.4631	25,45
9	1	7	1.8	1	4.5	131	0.36559	18,70

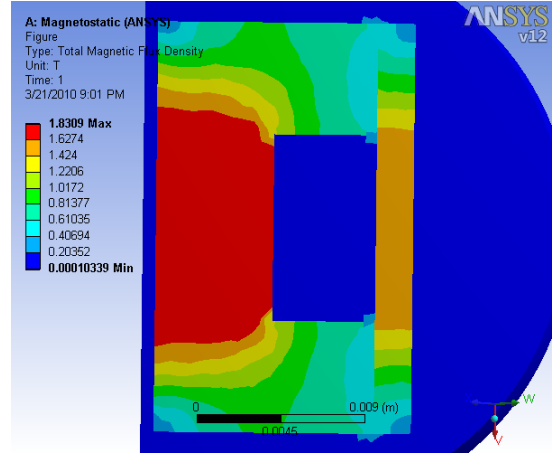
Burada,

g	Kanal Genişliği
t	Kutupbaşı
g _h	Manyetik Akı Geri dönüş Genişliği
I	Akım
W	Bobin Genişliği
N _c	Sarım Sayısı
B	Manyetik Akı yoğunluğu
τ_y	Akma Gerilmesi

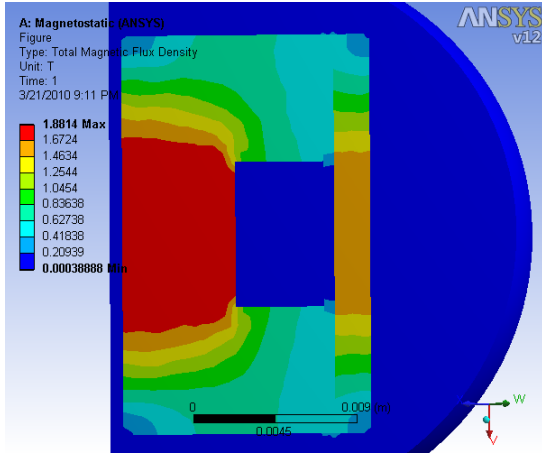
Analiz sonucunda elde edilen manyetik akı yoğunluğunun görsel sonuçları Şekil 3.3 ile 3.12 aralığındadır.



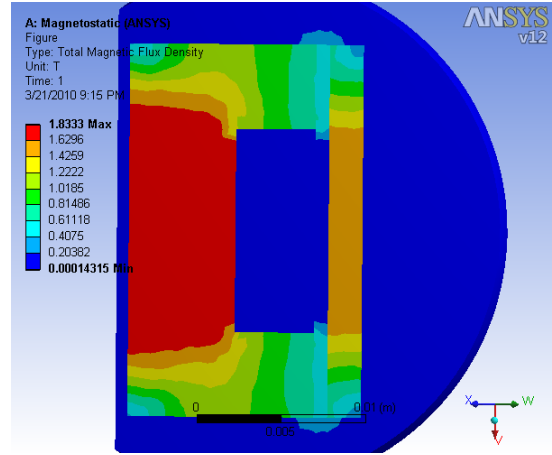
Şekil 3.3. Cihaz 1 için manyetik akı yoğunluğu



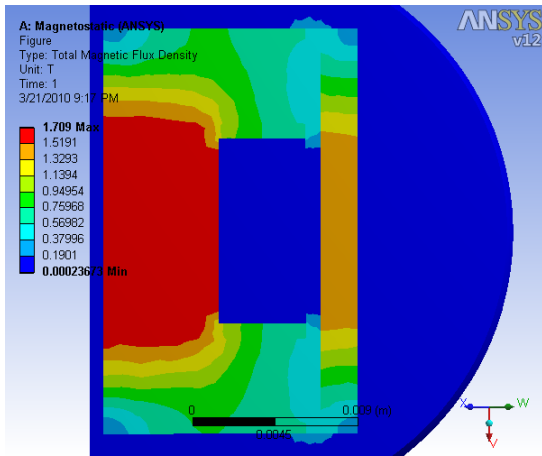
Şekil 3.4. Cihaz 2 için manyetik akı yoğunluğu



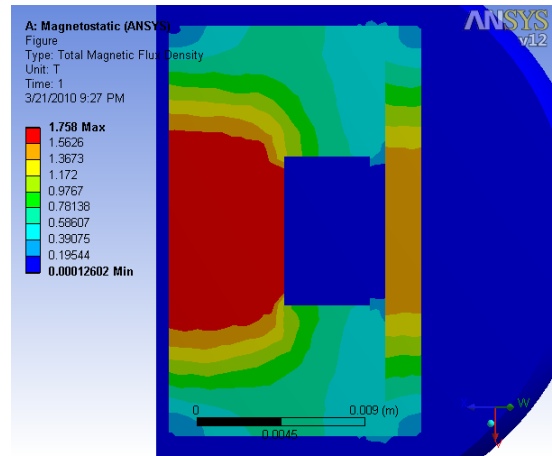
Şekil 3.5. Cihaz 3 için manyetik akı yoğunluğu



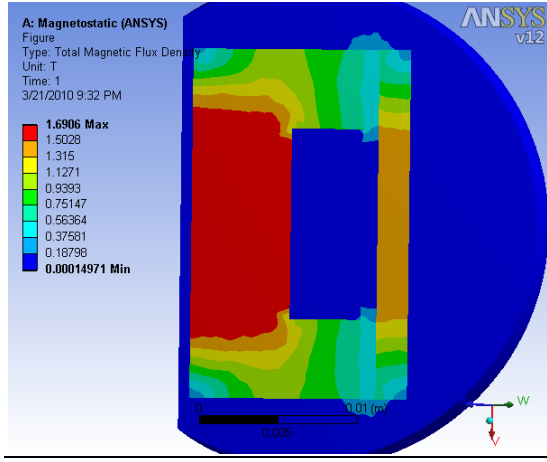
Şekil 3.6. Cihaz 4 için manyetik akı yoğunluğu



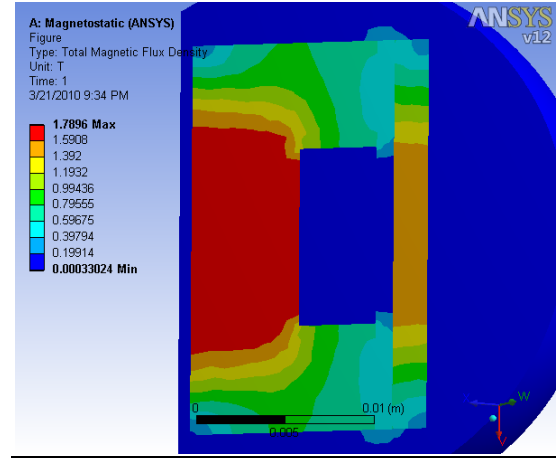
Şekil 3.7. Cihaz 5 için manyetik akı yoğunluğu



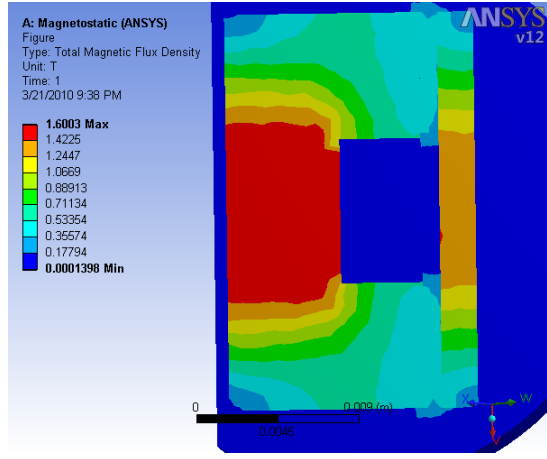
Şekil 3.8. Cihaz 6 için manyetik akı yoğunluğu



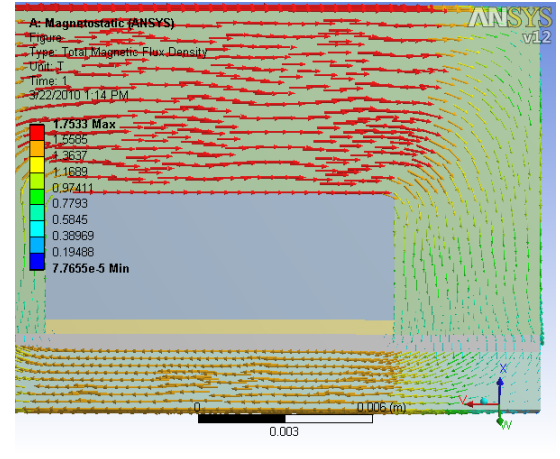
Şekil 3.9. Cihaz 7 için manyetik akı yoğunluğu



Şekil 3.10. Cihaz 8 için manyetik akı yoğunluğu



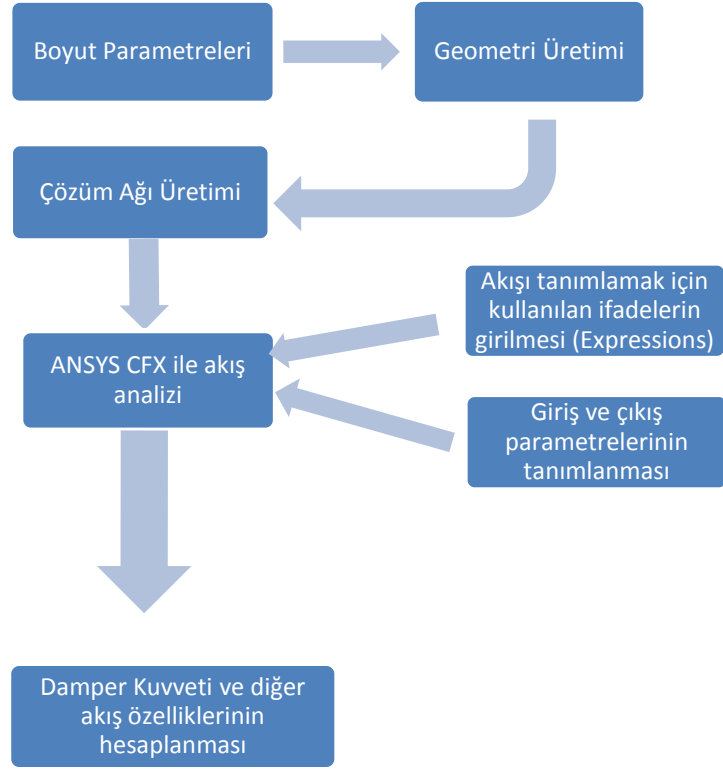
Şekil 3.11. Cihaz 9 için manyetik akı yoğunluğu



Şekil 3.12. Cihaz 9 için manyetik akı döngüsü

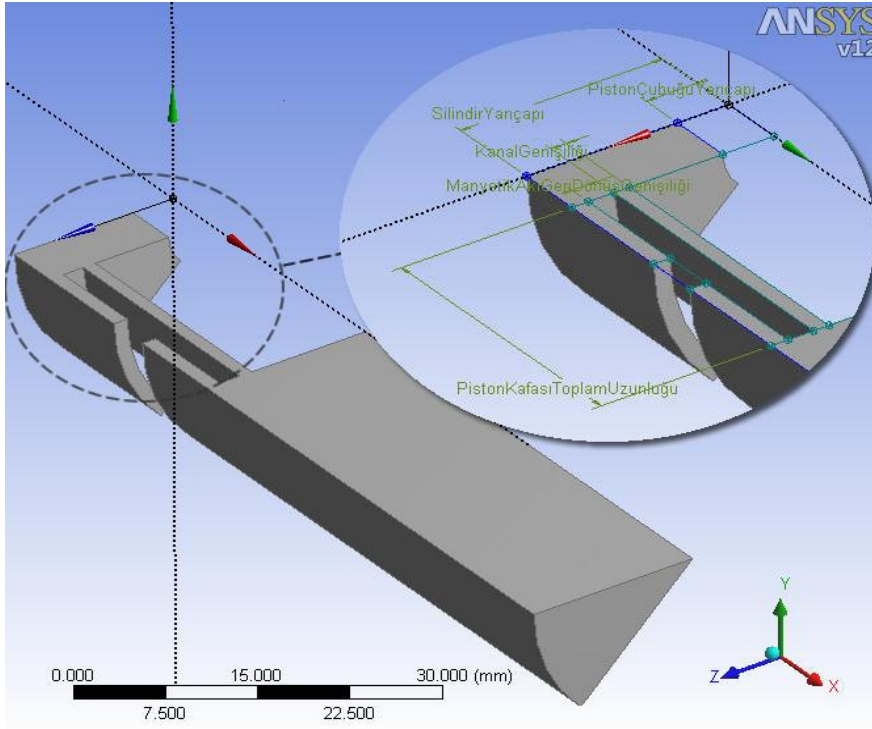
3.2. Akış Analizi

CFD çalışmaları ANSYS 12.1 yazılımı kullanılarak parametrik olarak hazırlanmıştır. Hesaplama hızını artırmak için tam geometriden 45 derecelik bir dilim alınarak hesap gerçekleştirilmiştir. Analiz tamamen parametrik olarak hazırlanmıştır. Tüm geometrik büyüklükler ve rakamsal olarak ifade edilen tüm akış analizi tanımlamaları parametrikdir. Şekil 3.12 de akış analizi için gerekli adımlar şematik olarak verilmiştir.
















Şekil 3.13. Akış analizi için gerekli adımlar

Akış geometrisi geometri üzerinde tanımlanan parametreler Şekil 3.14'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.14. Akış geometrisi üzerinde tanımlanan parametreler

Şekil 3.15’de akış analizinin gerçekleştirilebilmesi için tanımlanmış olan parametreler yer almaktadır.

Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	<input type="checkbox"/> Input Parameters			
3	 P3	piston_rod_radius	4	
4	 P9	cylinder_leght	46	
5	 P15	flange_space	4	
6	 P26	maksimum hiz	0,05	m s ⁻¹ ▼
7	 P27	maksimum strok	0,0125	m ▼
8	 P42	gap_geo	1,2	
9	 P52	piston_back_leght	5	
10	 P68	gap_leght	22	
11	 P75	flange	0,007	m ▼
12	 P79	flange_geo	9	
13	 P80	gh	2	
14	 P81	gh_out	1,3	
15	 P82	piston_radius	15,8	
16	 P87	yieldstressreal	11000	Pa ▼
*	 New input parameter	New name	New expression	

Şekil 3.15. Analizde tanımlanan tüm giriş parametreleri

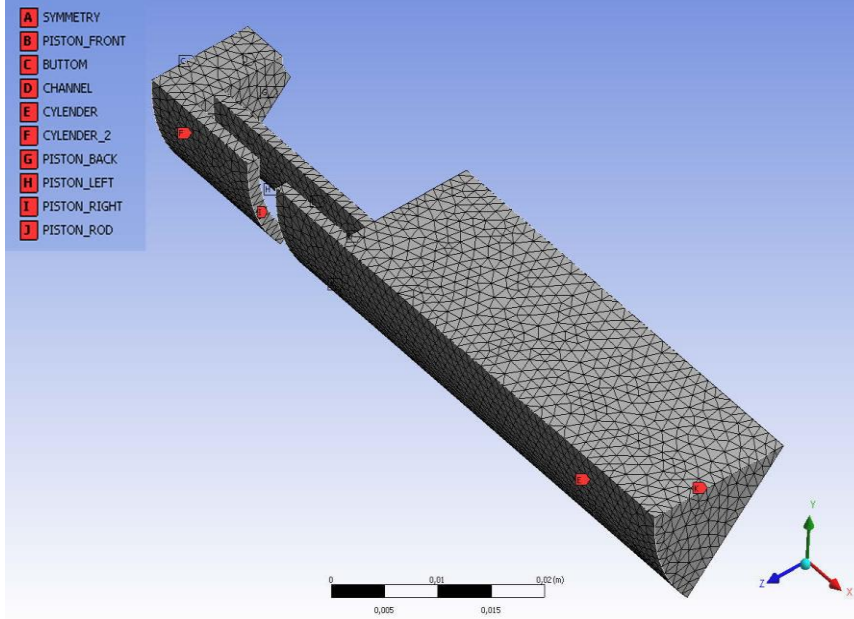
3.2.1. Çözüm Ağı

Bir CFD analizini gerçekleştirmek için ilk aşama bir çözüm ağı (mesh) oluşturmaktır. Bu çözüm ağını oluşturmak için kullanılan program ANSYS v.12 Meshing dir. ANSYS v12 Meshing aracı ile hazırlanan çözüm ağları parametrik analize izin vermektedir. Meydana getirilmiş olan tetrahedral mesh ve bazı sınır bölgeleri Şekil 3.16’da görülmektedir. Geometrinin 45 derecelik bir dilim tercih edilme sebebi, daha az sayıda mesh elemanı elde ederek analizi daha hızlı ve sorunsuz yapabilmeyi sağlamaktır. Oluşturulmuş olan bu çözüm ağında toplam 19251 eleman yer almaktadır.

Çözüm ağı oluşturulurken damperin hareketli olan piston ve kayar piston (akümülatör) bölümleri göz önünde bulundurulmuştur. Bununla birlikte, farklı stroklarla çözüm yapmayı sağlamak maksatlı olarak piston üst noktada konumlandırılmıştır.

3.2.2. CFD Analizi

Analiz için ANSYS CFX v.12.1 kullanıldı. CFX v.12.1 üç parçadan meydana gelmektedir. CFX-Pre üzerinde akışın sınır şartları ve akış tipi diğer tanımlamalar yapılır. CFX-Solver üzerinde CFX-Pre de verilen yakınsama kriterleri göz önüne alınarak akış denklemlerinin sayısal yöntemlere göre çözülür ve yakınsama grafikleri alınır. CFX-Post üzerinde ise yapılan analizin görsel ve sayısal sonuçları alınır.



Şekil 3.16. Çözüm ağı ve Sınırlar

MR Damper'in mesh üzerinde hareketli bölgeler olduğu için simülasyon tipi transient (zamana bağlı) ve deforme olan çözüm ağı olarak tanımları yapılmıştır. CFX üzerinde akışı tanımlayabilmek için bazı ifadeler (expression) yazıldı. Bu ifadeler yazılırken aynı çözüm ağı ile, sadece ifadeler üzerinde değişiklik yaparak başka hız ve stroklarda da çözüm yapılabilmesine olanak verecek şekilde oluşturulmuştur.

Akışkanın Newton tipi olmayan bir akışkan olarak tanımlaması, Bingham plastik modeli temelinde yazılan μ_B ifadesinin, akışkanın görünür viskozitesi olarak belirtilmesi aracılığıyla yapılmıştır. γ ifadesi program tarafından hesaplanan kayma şeklide değiştirme hızıdır.

$$\mu_B = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \mu_p \quad |\tau| \geq |\tau_y| \quad (3.1)$$

$$\mu_B = \mu_p \quad |\tau| < |\tau_y|$$

Denklem 3.1'de belirtildiği gibi, viskozite değerinin hesaplanması için, kayma gerilemesi değerinin akma gerilmesi değerinin altında ya da üstünde olduğu önem arz etmektedir. Buna CFD tarafından hesaplanan şekil değiştirme hızının Susan-Resiga'nın MRD 132-DG sıvısı için belirtildiği gibi $10^{-3} s^{-1}$ değerine bakılarak karar verilmiştir. (Eğer $\dot{\gamma} < 10^{-3} s^{-1}$, $\mu_B = \mu_p$). Hareketli pistonun açısal hızı deneyler de kullanılan maksimum hız ve strok'tan elde edilmiş ve açısal hız ile frekans değeri elde edilmiştir.

$$\omega = \frac{V_{max}}{S_{max}} \quad (3.2)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3.3)$$

Pistonun bir stroğunu tamamlaması için geçen zaman aşağıdaki ifade aracılığıyla elde edilmiş olup CFD analizinde kullanılan toplam zamandır.

$$t_{total} = \frac{1}{f} \quad (3.4)$$

Piston sinüzoidal bir hareket yaptığından aşağıdaki S ifadesi yazılmıştır. Burada t zaman adımıdır ve analiz t_{total} zamanına ulaşana kadar her bir zaman adımı için yapılır. Bu analizde t=0.01 s olarak alınmıştır. Bu şekilde bu analiz 157 adımda tamamlanmıştır. Yapılan analiz için $S_{mak} = 0.0125$ m dir.

$$S = S_{mak} \cdot \cos(\omega t) \quad (3.5)$$

Kayar pistonun hareketini tanımlamak için aşağıdaki denklem yazılmıştır. Bu ifade kayar pistonun hareketi piston çubuğunun hareketine göre silindirin içine giren veya çıkan hacmi göz önüne alınarak stroğun 9'da biri olarak modellenmiştir.

$$S_{kp} = \frac{S}{15} \quad (3.6)$$

Bununla birlikte Newton tipi olmayan akışın sadece kutup başları boyunca ve Newton akışın bunun dışındaki bölgelerde olduğu tanımlı için CFX de aşağıdaki ifadeler. Bu ifadede genel yaklaşım herhangi akışkan düğüm elemanının o ana için kanal içinde mi yoksa dışında mı olduğunu veren bir matematiksel ifade geliştirilmiştir. Bu ifadeler aşağıda verilmiştir.

```

Bingham visc = ((yieldstress)/(min(UpperS,max(sstrnr,LowerS))))+plastic visc
ChannelRadius = sqrt((z)^2+(y)^2)
LowerS = 0.01 [s^-1]
MR Fluid visc =if (Shear Strain Rate<10^-3, plastic visc, (Bingham visc*NonNewtonian + plastic visc*(1-NonNewtonian)))
MaxChannelHeight = MinChannelHeight +flange
MaxChannelHeight2 = MinChannelHeight +gapleghtpre
MaxChannelRadius = 0.0125 [m]
MinChannelHeight = 0.005 [m]
MinChannelHeight2 = MinChannelHeight +gapleghtpre -flange
MinChannelRadius = MaxChannelRadius -gap
NonNewtonian = (step((x-(MinChannelHeight+strok))/1[m])*step(((MaxChannelHeight+strok)-x)/1[m])+step((x-(MinChannelHeight2+strok))/1[m])*step(((MaxChannelHeight2+strok)-x)/1[m]))*step((ChannelRadius-MinChannelRadius)/1[m])*step((MaxChannelRadius-ChannelRadius)/1[m])
UpperS = 1000 [s^-1]
flange = 0.007 [m]
gap = 0.0012 [m]
gapleghtpre = 0.022 [m]
kuvvet = (areaAve(Pressure)@piston front *area()@piston front +areaAve(Pressure)@piston back *area()@piston back)*8
plastic visc = 0.092 [Pa s]
yieldstress = 11000 [Pa]

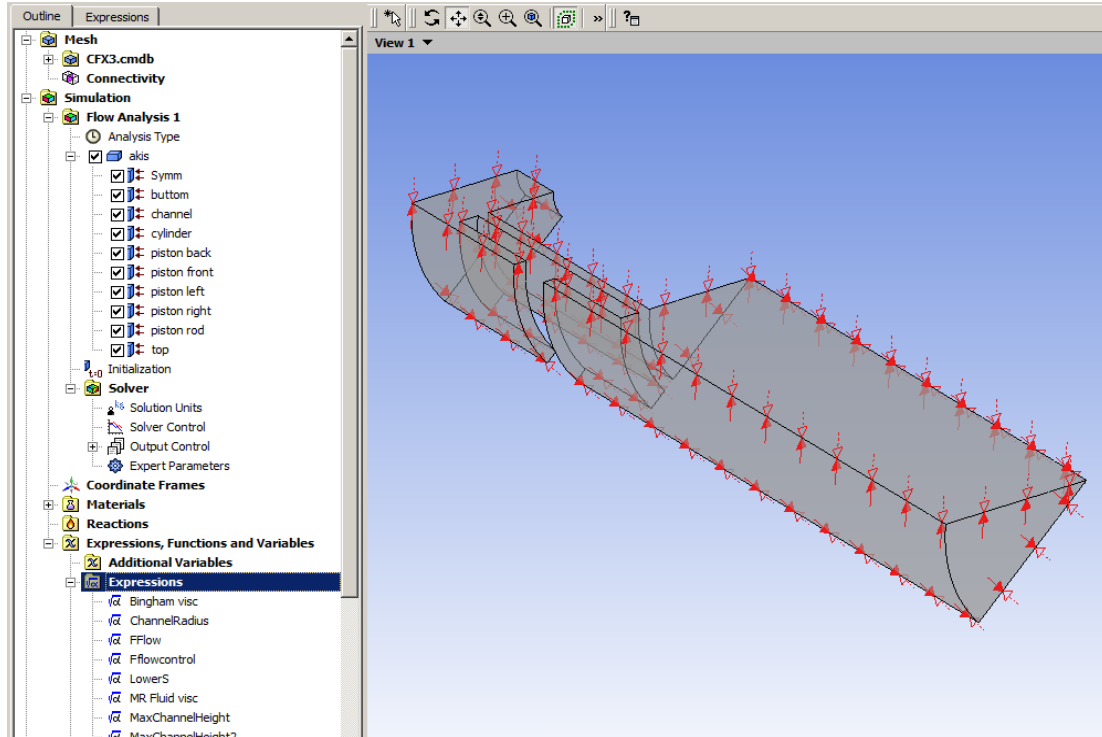
```

Lord firmasına ait MRF-132DG akışkanın özellikleri Tablo 3.2'de de özet olarak verilen değerler kullanılarak CFX'de yeni materyal olarak tanımlanmıştır.

Tablo 3.2. MR sıvısının özellikleri

Özellik	Değer/Sınır
Akışkan Temeli	Hidrokarbon
Çalışma Sıcaklığı	-40 to 130 (°C)
Yoğunluk	3090 (kg/m3)
Renk	Koyu Gri
Partiküllerin oranı	81.64 (%)
Termal Genişleme Katsayısı	
0-50 (°C)	5.5e-4
50-100 (°C)	6.6e-4
100-150 (°C)	6.7e-4
Özgül Isı 25 (°C) de	800 (J/kg K)
Isı İletim Katsayısı 25 (°C) de	0.25-1.06 (W/m K)
Donma Noktası	-150 (°C)
Viskozite	0.09(±0.02) Pa s

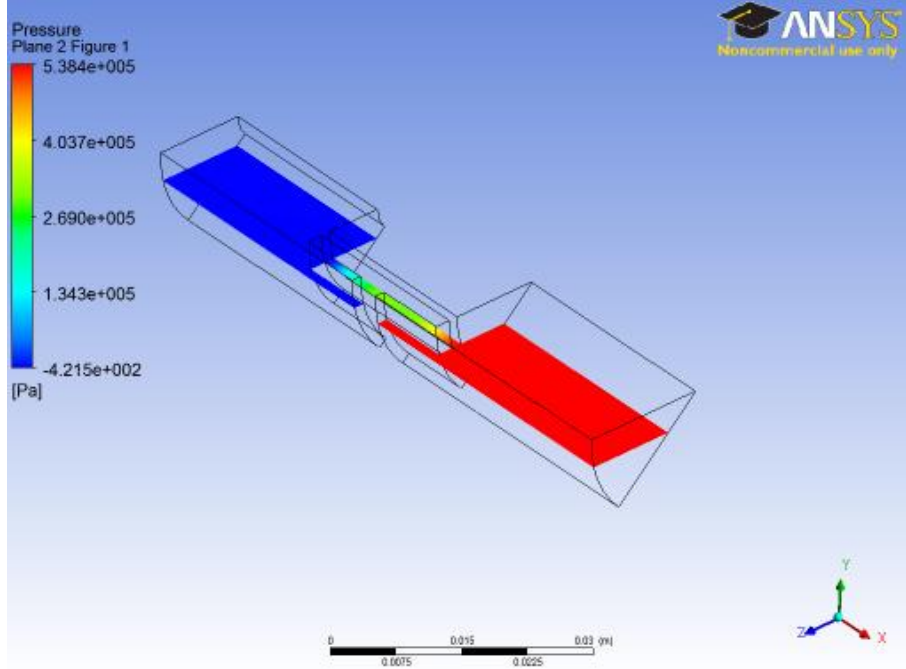
Referans basıncı akümülatöre basılan azot gazı basıncı olan 17 bar basınç değeri alınmıştır. Yakınsama kriteri olarak Residual değeri 1.10^{-4} olarak tanımlanmıştır ve yakınsama kontrolü zaman adımı başına 10 olarak tanımlanmıştır.



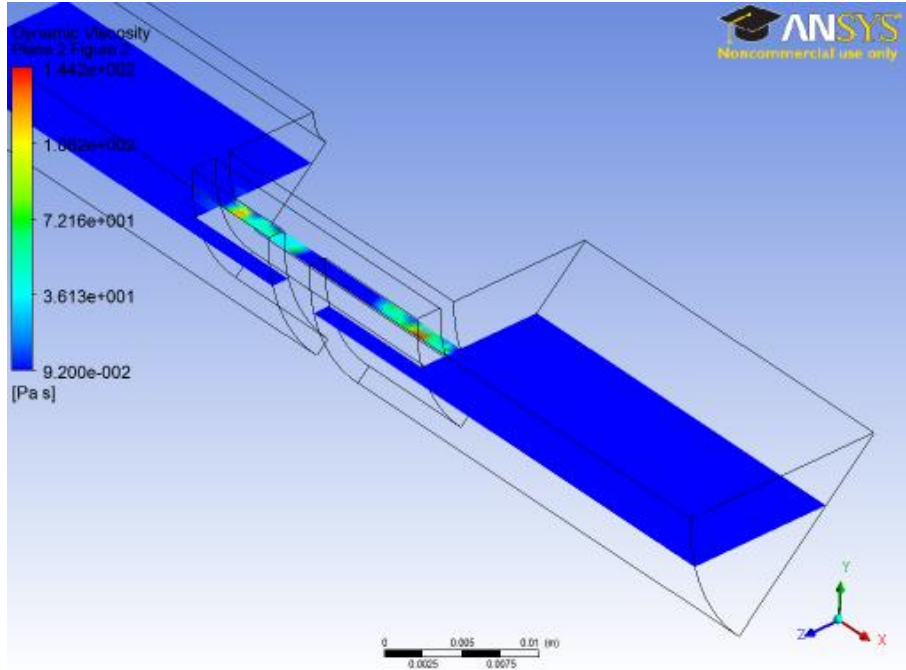
Şekil 3.17. CFX-Pre üzerinde yapılan çeşitli şartlarının tanımlanması

3.2.3. CFD Sonuçlar

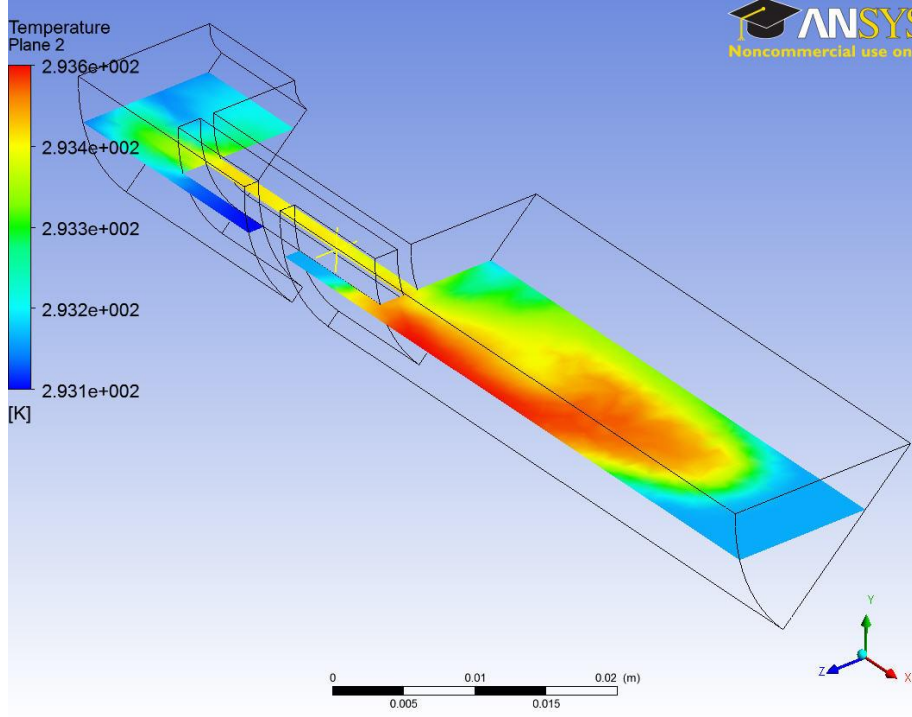
Aşağıda verilen görsel sonuçlar $t=5$ mm $g=1.2$ mm $\tau=11000$ Pa için yapılan analiz neticesinde elde edilen sonuçlardır.



Şekil 3.18. 0.53 sn de belirlene bir yüzey üzerindeki basınç düşümü



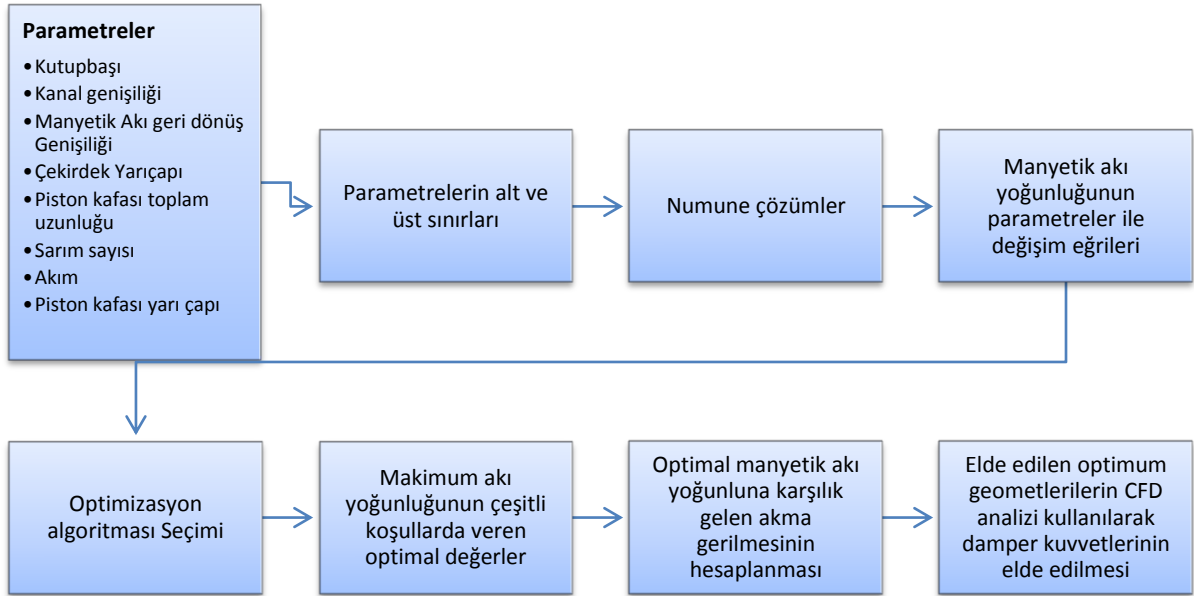
Şekil 3.19. 0.53 sn de belirlene bir yüzey üzerindeki dinamik viskozite



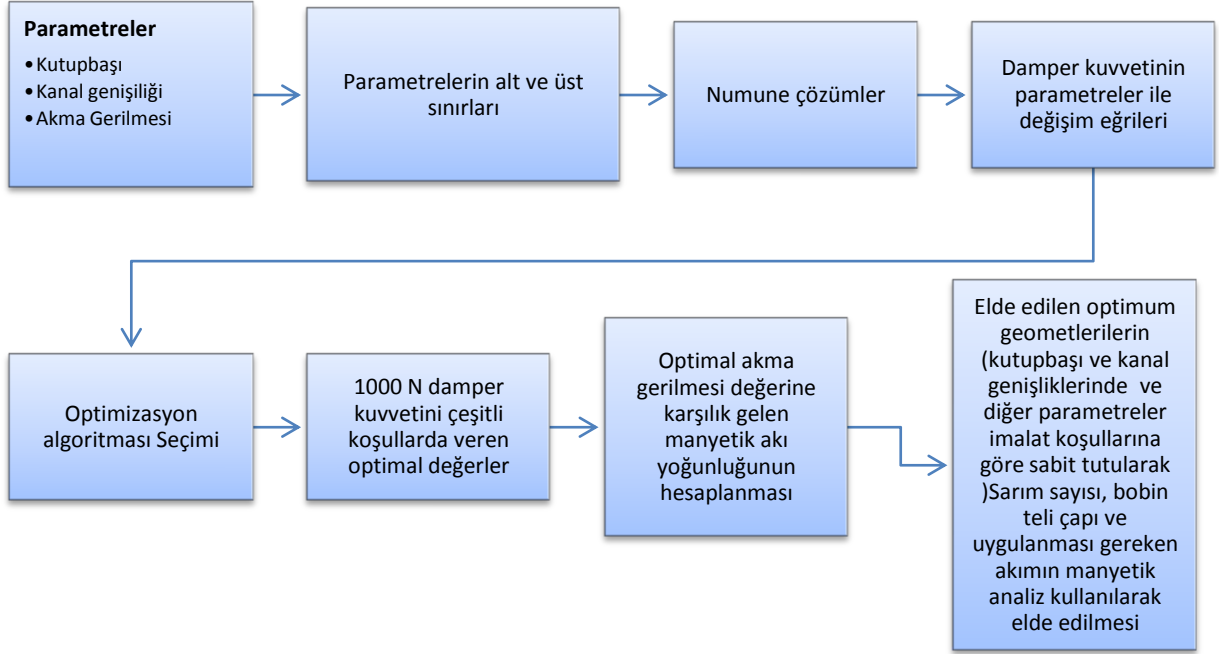
Şekil 3.20. 1.57. sn de belirlene bir yüzey üzerindeki sıcaklık değişimi

3.3. Optimizasyon Çalışmaları

Çalışmamızın bu kısmında gerek manyetik alan analizleri gerekse CFD analizlerini göz önüne alarak optimum damper geometrisi elde edilmeye çalışılacaktır. Yapılan optimizasyon çalışması şematik olarak Şekil 3.21 ve 3.22'de özetlenmiştir.



Şekil 3.21. Manyetik alan için yapılan optimizasyon çalışmasının şematik gösterimi



Şekil 3.22. Akış analizi için yapılan optimizasyon çalışmasının şematik gösterimi

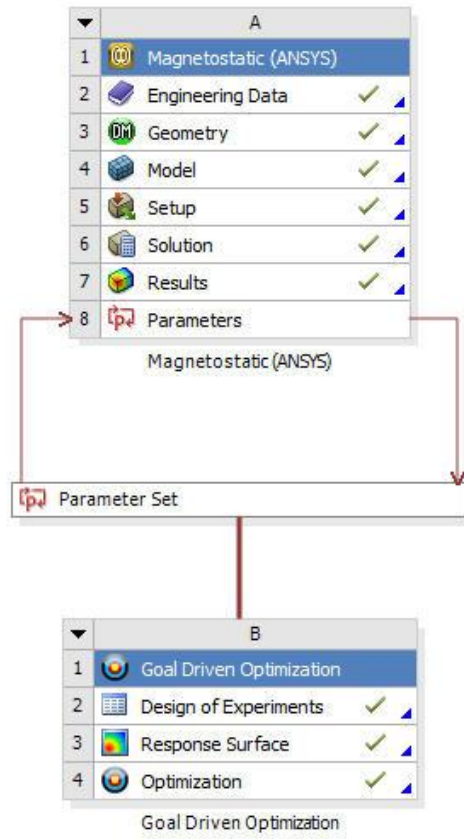
3.4. Manyetik Alan Optimizasyon Çalışmaları

Optimizasyon için ANSYS Goal Driven Optimization aracı kullanılmıştır. Bu optimizasyon sayesinde en büyük manyetik akı yoğunluğunu verecek olan geometrik büyüklükler elde edilir ve bu çalışma sayesinde manyetik alan açısından optimum geometri elde edilebilir. ANSYS Goal Driven Optimization aracında optimizasyon algoritması olarak Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) kullanılmıştır. ANSYS Workbench'de Magnetostatic analiz ile Optimizasyon için oluşturulmuş olan ağaç yapısı Şekil 3.23'de verilmiştir.

Tasarım parametreleri uygun olan alt ve üst sınırlar arasında belirlendi (Tablo 3.3).

Tablo 3.3. Tasarım parametrelerini alt ve üst sınırları

Parametre	Alt Sınır	Üst Sınır
Kutupbaşı (t)	2 mm	7 mm
Kanal genişliği (g)	0.4 mm	1.2 mm
Manyetik Akı geri dönüş Genişliği (g _n)	1.5 mm	2.5 mm
Çekirdek Yarıçapı (R _c)	6 mm	8 mm
Piston kafası toplam uzunluğu (L)	18 mm	22 mm
Sarım sayısı (N _c)	100 mm	581 mm
Akım (I)	0 A	2 A
Piston kafası yarı çapı (R)		14.5 mm



Şekil 3.23. ANSYS Workbench'de Magnetostatic analiz ile Optimizasyon

Bu optimizasyon çalışması için ANSYS tarafından 79 adet numune çözüm oluşturulup gerçekleştirilmiştir (Tablo 3.4).

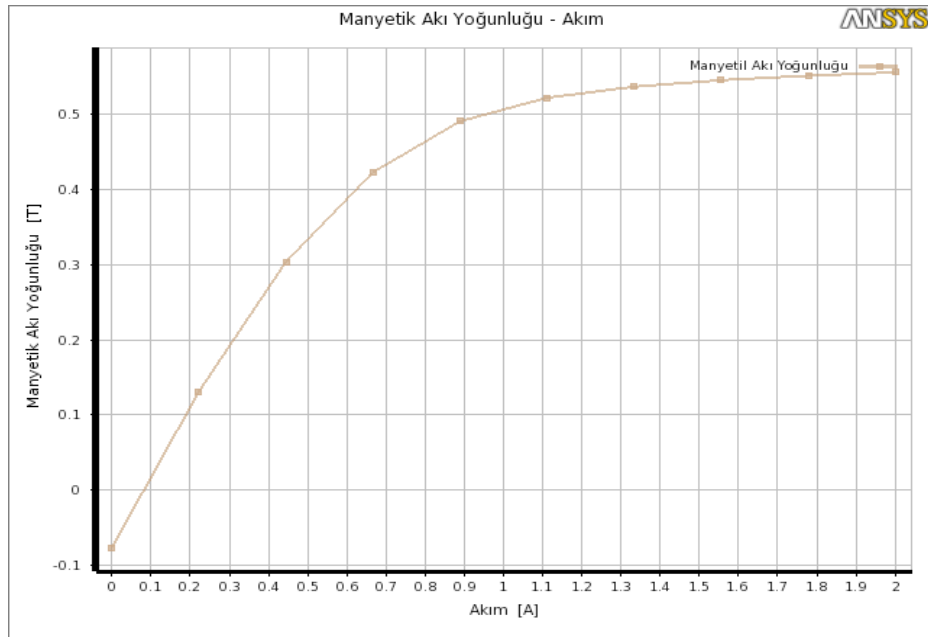
Tablo 3.4. Optimizasyon için ANSYS tarafından yapılan numune çözümler

	t	g	g _h	R _c	L	N	I	B
1	4.50	0.80	2.00	7.00	20.00	341	1.00	0.591333508
2	2.00	0.80	2.00	7.00	20.00	341	1.00	0.743415848
3	7.00	0.80	2.00	7.00	20.00	341	1.00	0.415409715
4	4.50	0.40	2.00	7.00	20.00	341	1.00	0.682031767
5	4.50	1.20	2.00	7.00	20.00	341	1.00	0.466436267
6	4.50	0.80	1.50	7.00	20.00	341	1.00	0.560925666
7	4.50	0.80	2.50	7.00	20.00	341	1.00	0.602794156
8	4.50	0.80	2.00	6.00	20.00	341	1.00	0.480320502
9	4.50	0.80	2.00	8.00	20.00	341	1.00	0.618414784
10	4.50	0.80	2.00	7.00	18.00	341	1.00	0.227212523
11	4.50	0.80	2.00	7.00	22.00	341	1.00	0.602363862
12	4.50	0.80	2.00	7.00	20.00	100	1.00	0.347405247
13	4.50	0.80	2.00	7.00	20.00	581	1.00	0.640706377
14	4.50	0.80	2.00	7.00	20.00	341	0.00	0

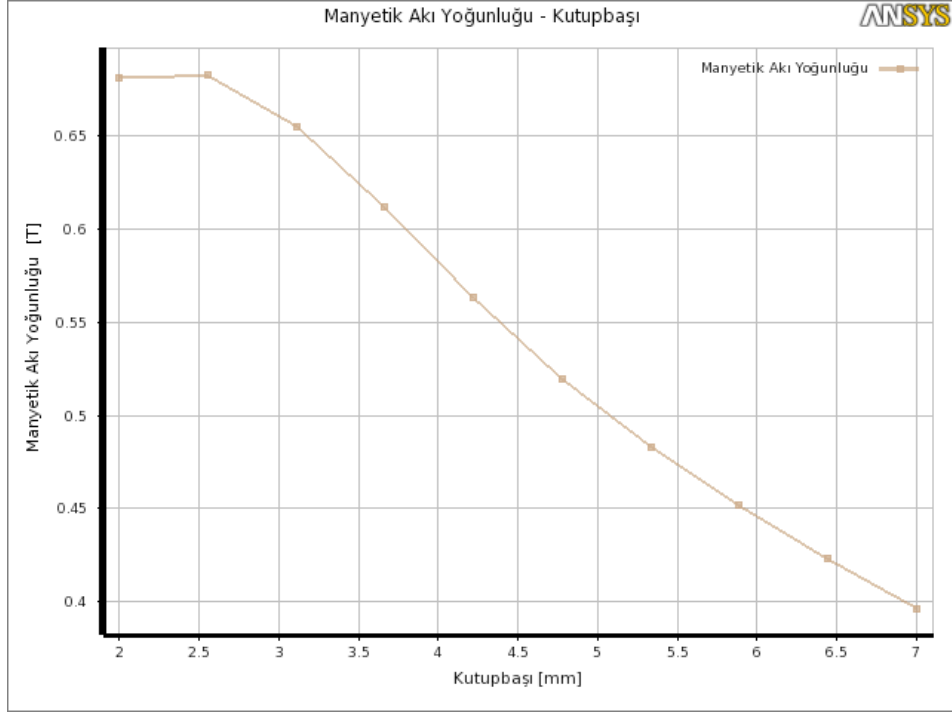
15	4.50	0.80	2.00	7.00	20.00	341	2.00	0.65468732
16	3.18	0.59	1.74	6.47	18.94	213	1.53	0.281614955
17	5.82	0.59	1.74	6.47	18.94	213	0.47	0.120240532
18	3.18	1.01	1.74	6.47	18.94	213	0.47	0.186797797
19	5.82	1.01	1.74	6.47	18.94	213	1.53	0.215457033
20	3.18	0.59	2.26	6.47	18.94	213	0.47	0.198329381
21	5.82	0.59	2.26	6.47	18.94	213	1.53	0.183629056
22	3.18	1.01	2.26	6.47	18.94	213	1.53	0.329663525
23	5.82	1.01	2.26	6.47	18.94	213	0.47	0.104122733
24	3.18	0.59	1.74	7.53	18.94	213	0.47	0.172834591
25	5.82	0.59	1.74	7.53	18.94	213	1.53	0.200122933
26	3.18	1.01	1.74	7.53	18.94	213	1.53	0.353570888
27	5.82	1.01	1.74	7.53	18.94	213	0.47	0.095113828
28	3.18	0.59	2.26	7.53	18.94	213	1.53	0.358754732
29	5.82	0.59	2.26	7.53	18.94	213	0.47	0.101845128
30	3.18	1.01	2.26	7.53	18.94	213	0.47	0.13504744
31	5.82	1.01	2.26	7.53	18.94	213	1.53	0.2204427
32	3.18	0.59	1.74	6.47	21.06	213	0.47	0.560085839
33	5.82	0.59	1.74	6.47	21.06	213	1.53	0.462378703
34	3.18	1.01	1.74	6.47	21.06	213	1.53	0.598559258
35	5.82	1.01	1.74	6.47	21.06	213	0.47	0.277529747
36	3.18	0.59	2.26	6.47	21.06	213	1.53	0.717029545
37	5.82	0.59	2.26	6.47	21.06	213	0.47	0.382781788
38	3.18	1.01	2.26	6.47	21.06	213	0.47	0.364232584
39	5.82	1.01	2.26	6.47	21.06	213	1.53	0.421749083
40	3.18	0.59	1.74	7.53	21.06	213	1.53	0.79551828
41	5.82	0.59	1.74	7.53	21.06	213	0.47	0.364737833
42	3.18	1.01	1.74	7.53	21.06	213	0.47	0.335049367
43	5.82	1.01	1.74	7.53	21.06	213	1.53	0.467149371
44	3.18	0.59	2.26	7.53	21.06	213	0.47	0.480991015
45	5.82	0.59	2.26	7.53	21.06	213	1.53	0.590623606
46	3.18	1.01	2.26	7.53	21.06	213	1.53	0.638484423
47	5.82	1.01	2.26	7.53	21.06	213	0.47	0.21478864
48	3.18	0.59	1.74	6.47	18.94	468	0.47	0.261083883
49	5.82	0.59	1.74	6.47	18.94	468	1.53	0.189750257
50	3.18	1.01	1.74	6.47	18.94	468	1.53	0.384065772
51	5.82	1.01	1.74	6.47	18.94	468	0.47	0.195663257
52	3.18	0.59	2.26	6.47	18.94	468	1.53	0.353437463
53	5.82	0.59	2.26	6.47	18.94	468	0.47	0.169987569
54	3.18	1.01	2.26	6.47	18.94	468	0.47	0.291762393
55	5.82	1.01	2.26	6.47	18.94	468	1.53	0.250444659
56	3.18	0.59	1.74	7.53	18.94	468	1.53	0.392786552
57	5.82	0.59	1.74	7.53	18.94	468	0.47	0.176930717
58	3.18	1.01	1.74	7.53	18.94	468	0.47	0.281385669

59	5.82	1.01	1.74	7.53	18.94	468	1.53	0.296057104
60	3.18	0.59	2.26	7.53	18.94	468	0.47	0.301021485
61	5.82	0.59	2.26	7.53	18.94	468	1.53	0.274460303
62	3.18	1.01	2.26	7.53	18.94	468	1.53	0.456808818
63	5.82	1.01	2.26	7.53	18.94	468	0.47	0.163504239
64	3.18	0.59	1.74	6.47	21.06	468	1.53	0.773369079
65	5.82	0.59	1.74	6.47	21.06	468	0.47	0.437416533
66	3.18	1.01	1.74	6.47	21.06	468	0.47	0.560366954
67	5.82	1.01	1.74	6.47	21.06	468	1.53	0.460358869
68	3.18	0.59	2.26	6.47	21.06	468	0.47	0.673777436
69	5.82	0.59	2.26	6.47	21.06	468	1.53	0.537721659
70	3.18	1.01	2.26	6.47	21.06	468	1.53	0.682543457
71	5.82	1.01	2.26	6.47	21.06	468	0.47	0.392048508
72	3.18	0.59	1.74	7.53	21.06	468	0.47	0.73099844
73	5.82	0.59	1.74	7.53	21.06	468	1.53	0.620860743
74	3.18	1.01	1.74	7.53	21.06	468	1.53	0.773679039
75	5.82	1.01	1.74	7.53	21.06	468	0.47	0.399192512
76	3.18	0.59	2.26	7.53	21.06	468	1.53	0.939211773
77	5.82	0.59	2.26	7.53	21.06	468	0.47	0.543564452
78	3.18	1.01	2.26	7.53	21.06	468	0.47	0.520664529
79	5.82	1.01	2.26	7.53	21.06	468	1.53	0.583578122

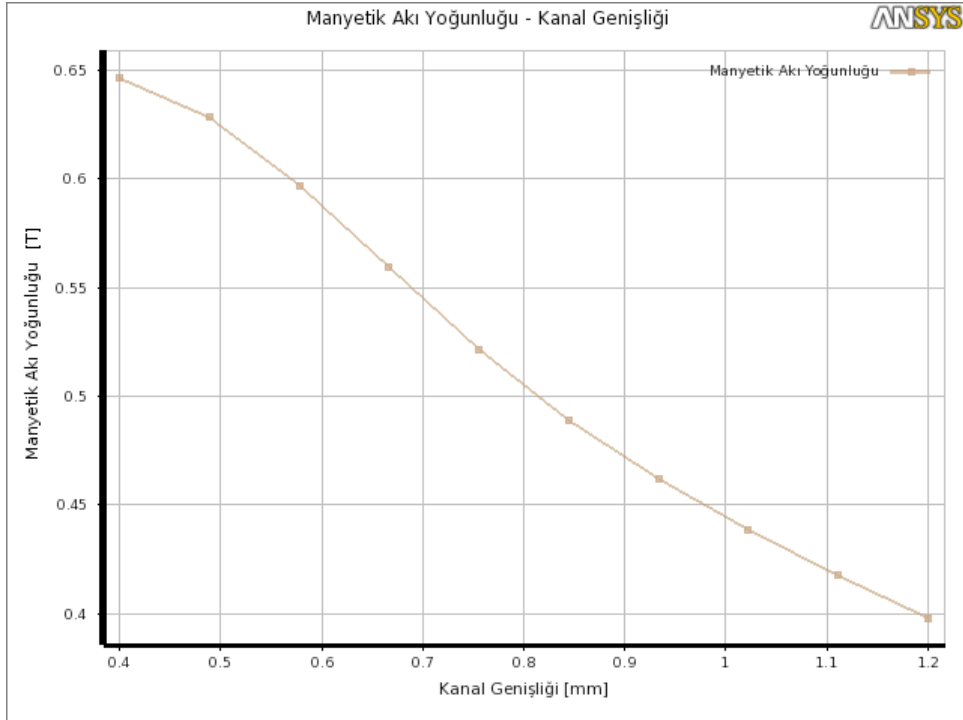
Bu numuneler oluşturulduktan sonra tüm parametrelerin, diğer parametreler sabit tutularak, belirlenen alt ve üst sınırlar arasında alabileceği manyetik akı yoğunluğu değerleri grafiksel olarak elde edilebilir (Şekil 3.24 - 3.33).



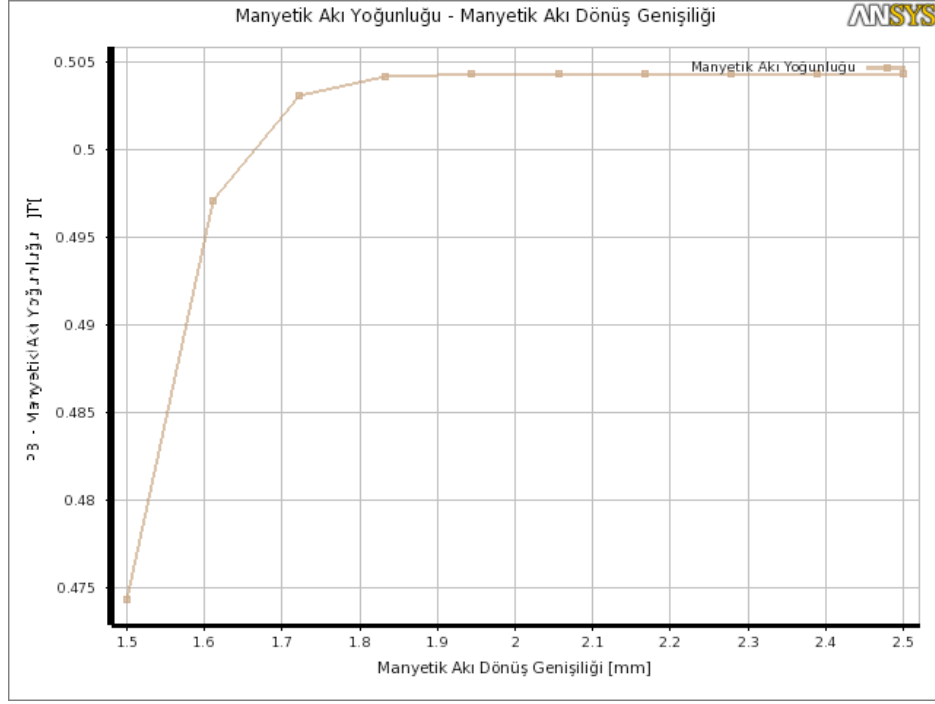
Şekil 3.24. Manyetik Akı Yoğunluğunun uygulan akım ile değişimi



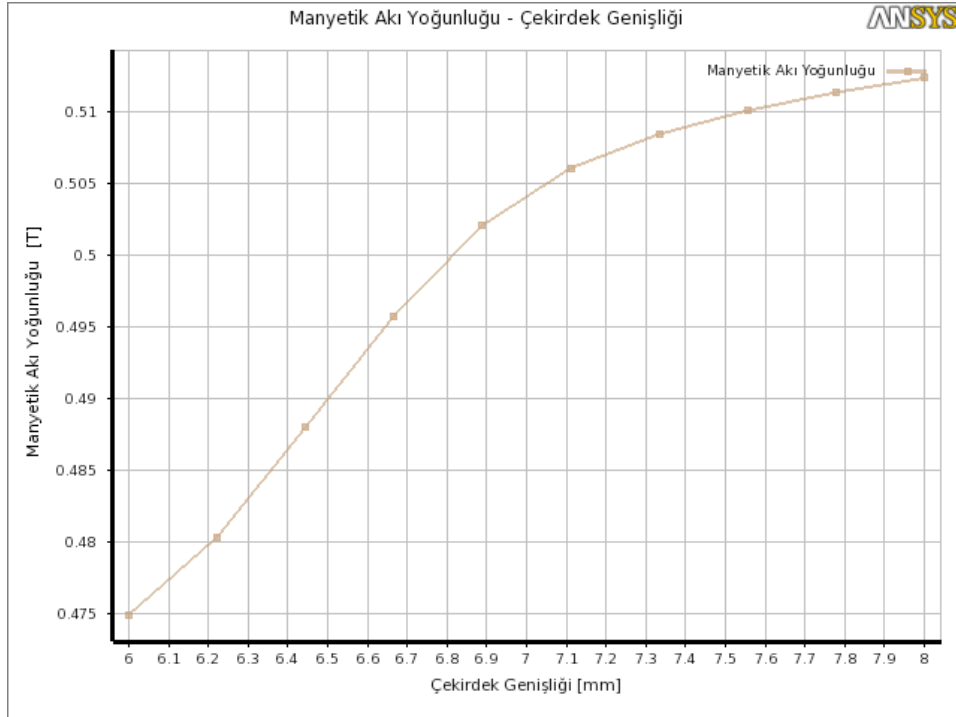
Şekil 3.25. Manyetik Akı Yoğunluğunun kutupbaşı ile değişimi



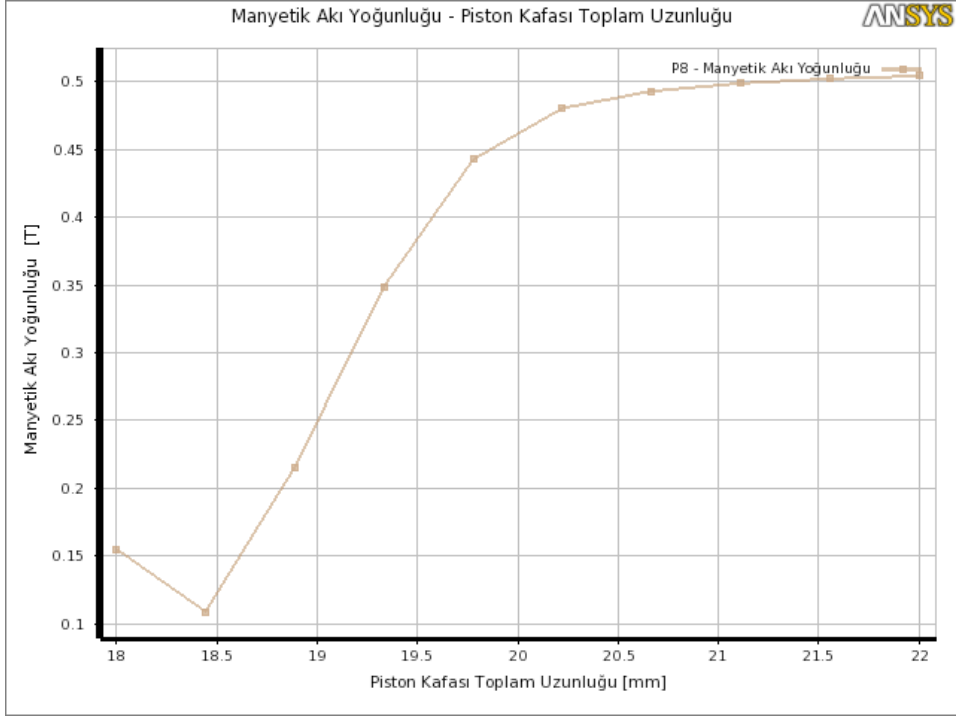
Şekil 3.26. Manyetik Akı Yoğunluğunun kanal genişliği ile değişimi



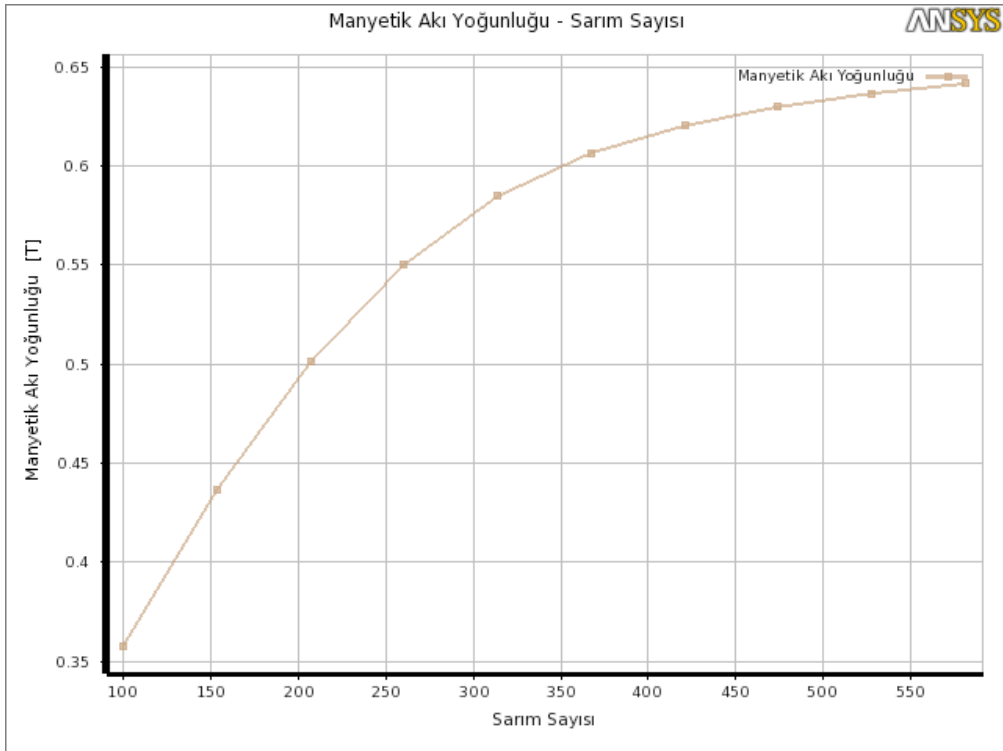
Şekil 3.27. Manyetik Akı Yoğunluğunun manyetik akı dönüş genişliği ile değişimi



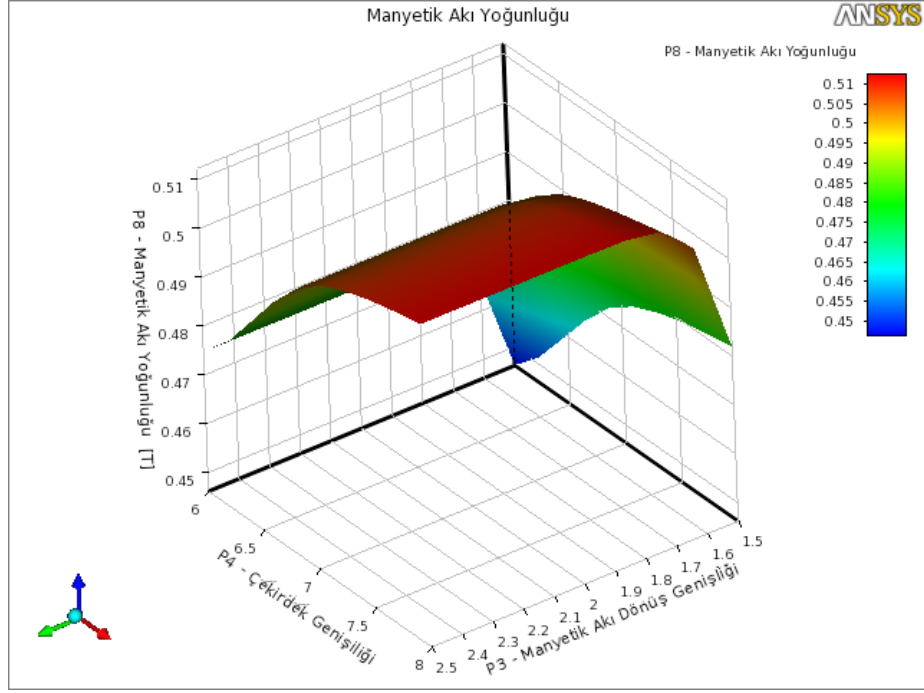
Şekil 3.28. Manyetik Akı Yoğunluğunun çekirdek genişliği ile değişimi



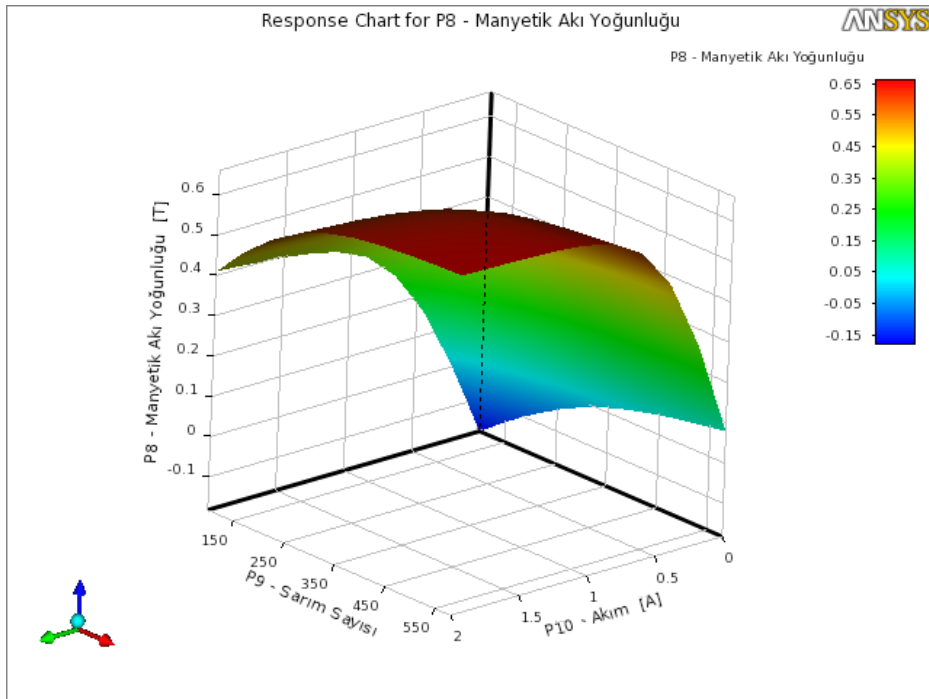
Şekil 3.29. Manyetik Akı Yoğunluğunun piston kafası toplam uzunluğu ile değişimi



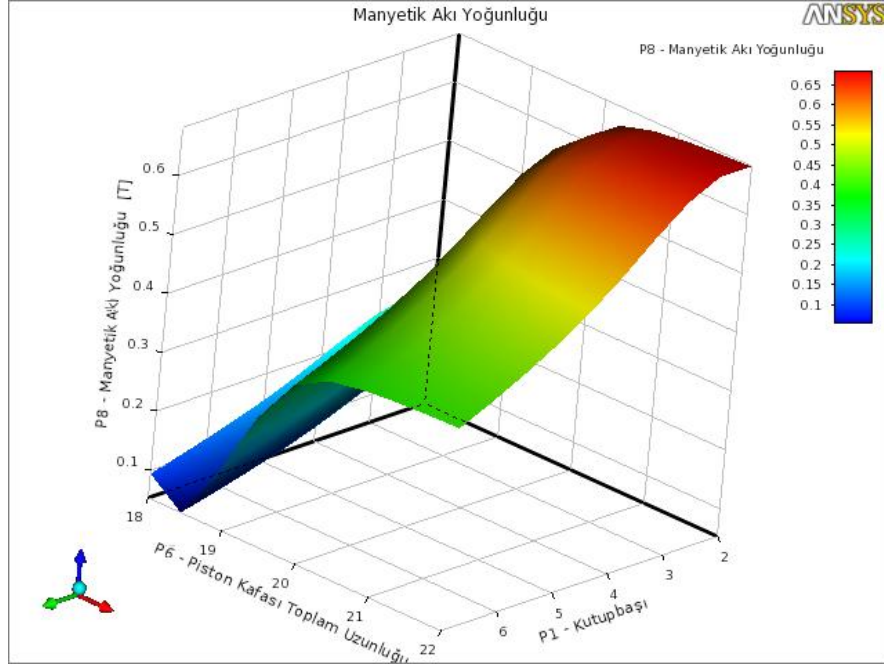
Şekil 3.30. Manyetik Akı Yoğunluğunun sarım sayısı ile değişimi



Şekil 3.31. Manyetik Akı Yoğunluğunun çekirdek genişliği ve manyetik akı dönüş genişliği ile değişimi



Şekil 3.32. Manyetik Akı Yoğunluğunun sarım sayısı ve akım ile değişimi sonucu oluşan yüzey



Şekil 3.33. Manyetik Akı Yoğunluğunun kutup başı ve piston kafası toplam uzunluğu ile değişimi

3.5. Manyetik Döngü Açısından Optimum Değerler

En büyük manyetik akı yoğunluğunu elde etmek için yapılan optimizasyon çalışmasında genetik algoritma (MOGA) kullanılmıştır (Şekil 3.34) ve aşağıdaki tasarım parametreleri elde edilmiştir.

Properties of Schematic B4: Optimization		
A	B	
1	Property	Value
Optimization		
3	Optimization Method	MOGA
4	Number of Initial Samples	300
5	Number of Samples Per Iteration	300
6	Maximum Allowable Pareto Percentage	70
7	Maximum Number of Iterations	400
8	Initial Samples	Generate Initial Samples
9	Constraint Handling (GDO)	As Goals
10	Size of Generated Sample Set	300

Şekil 3.34. ANSYS Goal Optimization Driven üzerinde MOGA

i. Maksimum manyetik akı yoğunluğunu veren geometrik değerler

Tablo 3.5. Maksimum B için geometri

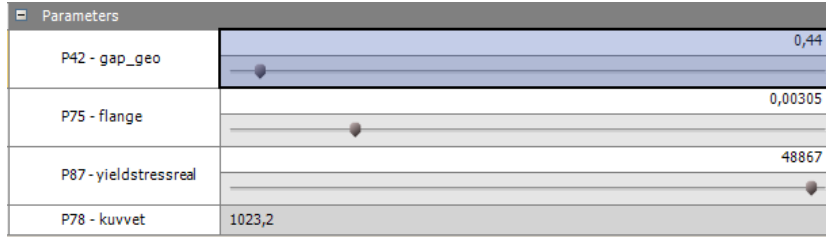
	t (mm)	g(mm)	g _h (mm)	R _c (mm)	L (mm)	N	d _k (mm)	I(A)	B(T)
Aday Geometri 1	2.34	0.52	2.22	7.90	21.60	498	0.3	1.7	1.078
Aday Geometri 2	2.21	0.55	2.08	7.96	20.97	432	0.32	1.9	1.053
Aday Geometri 3	3.04	0.44	2.14	7.71	21.91	292	0.4	1.6	0.987

d_k: Elde edilen sarın değeri için gerekli maksimum kablo çapı

Elde edilen bu aday geometrilerin manyetik akı yoğunlukları denklem 2.14 kullanılarak akma gerilmesine dönüştürüldü ve bu akma gerilmesi, kutup başı ve kanal genişliği değerlerinde CFD analizi sonucunda elde edilecek olan damper kuvveti değerleri şöyle olacaktır (Tablo 3.6).

Tablo 3.6. Maksimum B için CFD analizi sonucu elde edilen damper kuvveti

	B	τ_y (Pa)	F (N)
Aday Geometri 1	1.078	49850	849.03
Aday Geometri 2	1.053	49670	795.8
Aday Geometri 3	0.987	48910	1023.2



Şekil 3.35. ANSYS CFX’de manyetik alan analizi ile elde edilen optimal geometrilerin damper kuvveti

ii. Minimum akım ve sarım sayısı değerlerinde elde edilebilecek olan maksimum manyetik akı yoğunluğu veren geometrik değerler

Tablo 3.7. Maksimum B, Minimum Akım ve Sarım sayısı için geometri

	T (mm)	G(mm)	g_n(mm)	R_c(mm)	L (mm)	N	d_k(mm)	I(A)	B(T)
Aday Geometri 4	3.04	0.44	2.14	7.71	21.91	292	0.4	1.6	0.987
Aday Geometri 5	2.31	0.56	1.92	7.84	21.01	455	0.32	0.9	0.980
Aday Geometri 6	2.29	0.49	2.43	7.04	21.96	398	0.35	0.6	0.870

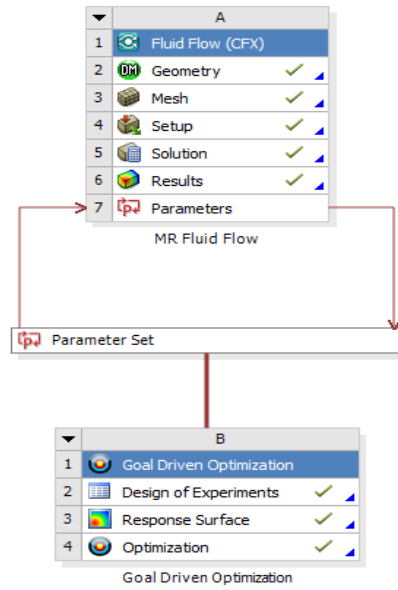
Aday geometri 4 ile aday geometri 3 aynı değerlere sahiptirler.

Tablo 3.8. Maksimum B için CFD analizi sonucu elde edilen damper kuvveti

	B	τ_y (Pa)	F (N)
Aday Geometri 5	0.981	48800	783.92
Aday Geometri 6	0.870	46370	981.18

3.6. CFX ile geometrik optimizasyon

Optimizasyon için ANSYS Goal Driven Optimization aracı kullanılmıştır. Bu optimizasyon sayesinde hedeflenen damper kuvveti olan 1000 N değerini verecek olan geometrik büyüklükler elde edilir ve bu çalışma sayesinde akış analizi açısından optimum geometri elde edilebilir. ANSYS Goal Goal Driven Optimization aracında optimizasyon algoritması olarak Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) (Şekil 3.36) kullanılmıştır.



Şekil 3.36. ANSYS Workbench de CFX analizi ile Optimizasyon

Tasarım parametreleri, manyetik alan analizine paralel olarak, uygun olan alt ve üst sınırlar arasında belirlendi (Tablo 3.9). ANSYS optimizasyon algoritmasını çalıştırabilmesi için 15 numune çözüm gerçekleştirmiştir (Tablo 3.10).

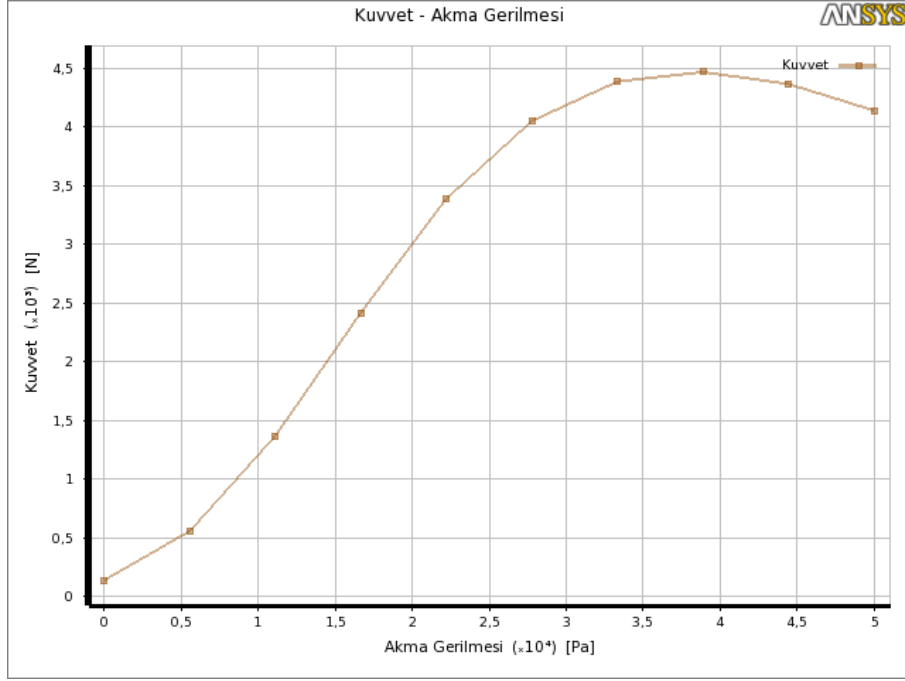
Tablo 3.9. CFX Tasarım parametrelerinin alt ve üst sınırları

Parametre	Alt Sınır	Üst Sınır
Kutupbaşı (t)	2 mm	7 mm
Kanal genişliği (g)	0.4 mm	1.2 mm
Akma Gerilmesi (τ_y)	0 Pa	50000 Pa

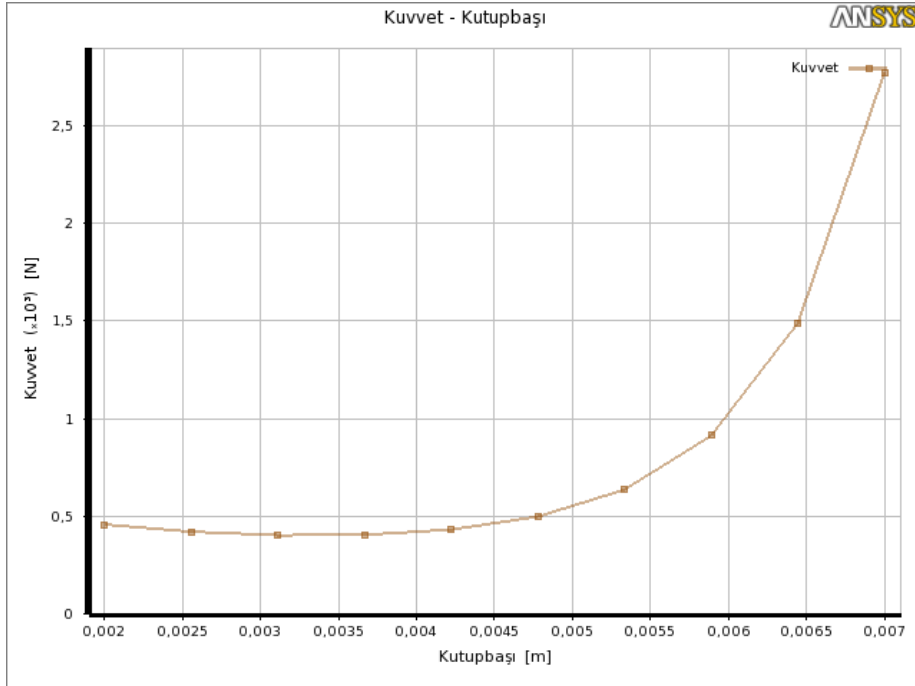
Tablo 3.10. CFX analizinde optimizasyon için ANSYS tarafından yapılan numune çözümler

	g	t	τ_y	F
	0.8	4.5	25000	412.054
2	0.4	4.5	25000	1108.94
3	1.2	4.5	25000	376.631
4	0.8	2	25000	197.343
5	0.8	7	25000	2616.34
6	0.8	4.5	0	2.22716
7	0.8	4.5	50000	704.408
8	0.47	2.5	4674	119.107
9	1.13	2.5	4674	47.3971
10	0.47	6.5	4674	427.483
11	1.13	6.5	4674	132.297
12	0.47	2.5	45326	961.633
13	1.13	2.5	45326	382.597
14	0.47	6.5	45326	3632.21
15	1.13	6.5	45326	1078.41

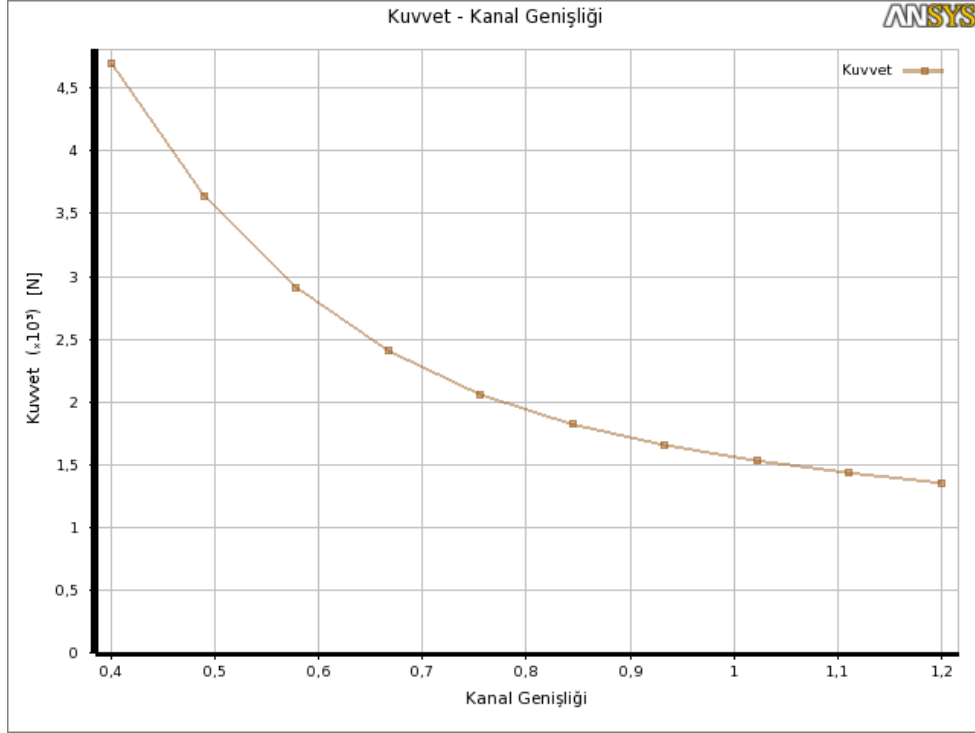
Bu numuneler oluşturulduktan sonra tüm parametrelerin, diğer parametreler sabit tutularak, belirlenen alt ve üst sınırlar arasında alabileceği damper kuvveti değerleri grafiksel olarak elde edilebilir (şekil 3.37- 3.42).



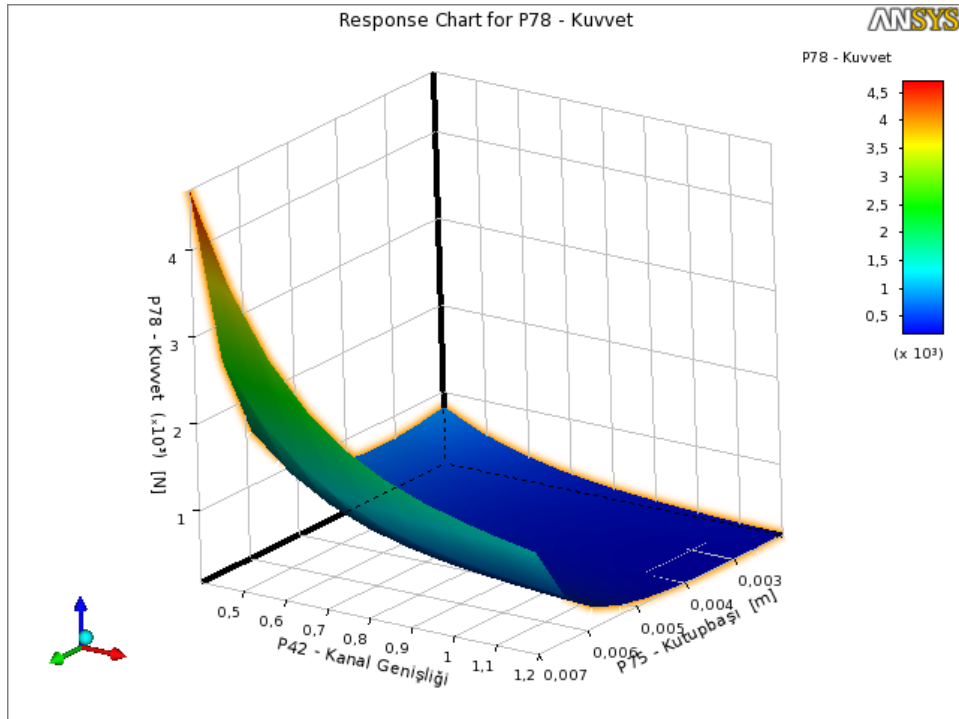
şekil 3.37. Damper kuvvetinin akma gerilmesi ile değişimi



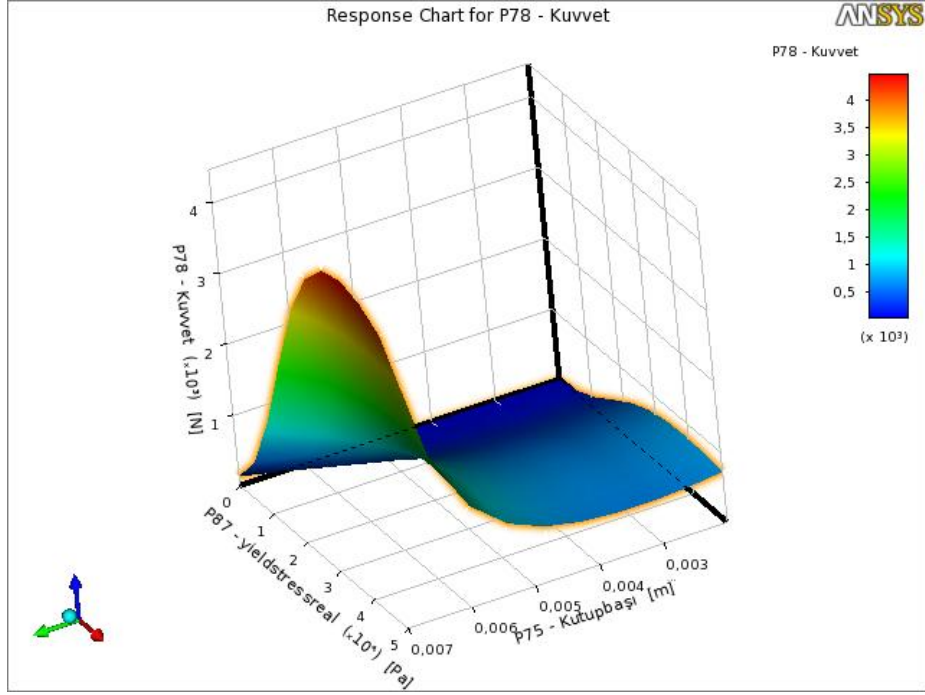
şekil 3.38. Damper kuvvetinin kutup başı ile değişimi



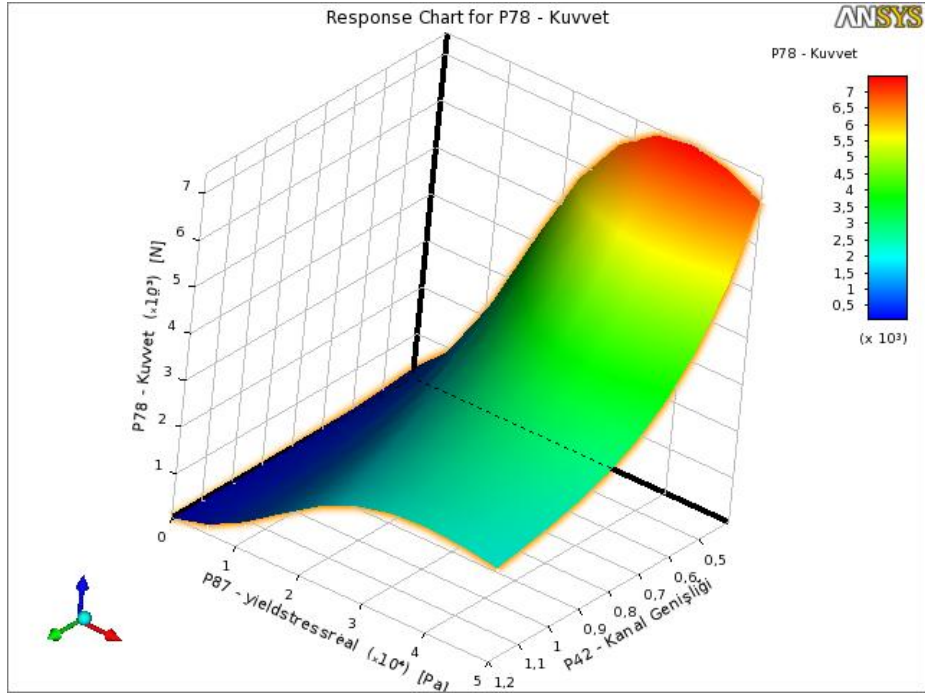
şekil 3.39. Damper kuvvetinin kanal genişliği ile değişimi



şekil 3.40. Damper kuvvetinin kanal genişliği ve kutup başı ile değişimi sonucu oluşan yzey



Şekil 3.41. Damper kuvvetinin akma gerilmesi ve kutupbaşı ile değişimi sonucu oluşan yüzey



Şekil 3.42. Damper kuvvetini akma gerilmesi ve kanal genişliği ile değişimi sonucu oluşan yüzey

3.7. CFD Analizi Açısından Optimum Değerler

En büyük manyetik akı yoğunluğunu elde etmek için yapılan optimizasyon çalışmasında genetik algoritma (MOGA) kullanılmıştır ve aşağıdaki tasarım parametreleri elde edilmiştir.

i. Hedef kuvvet değeri olan 1000 N minimum akma gerilmesi (τ_y) ile veren geometrik değerler

Tablo 3.11. Hedef kuvvet 1000 N ve Minimum Akma Gerilmesi için geometri

	g (mm)	t (mm)	τ_y (Pa)	F (N)
Amaç	Yok	Yok	En Küçük	1000 N
Aday Geometri 7	0.52	6	13188	997.69
Aday Geometri 8	0.47	2	28850	988.02
Aday Geometri 9	0.48	4	32213	998.23

	A	B	C	D	E
1		P42 - gap_geo	P75 - flange (m)	P87 - yieldstressreal (Pa)	P78 - kuvvet (N)
2	Optimization Study				
3	Objective	No Objective	No Objective	Minimize	Seek Target
4	Target Value				1000
5	Importance	Default	Default	Default	Default
6	Candidate Points				
7	Candidate A	0,5183	0,0063096	★ 13188	★★★ 997,69
8	Candidate B	0,47413	0,0021987	28850	★★★ 988,02
9	Candidate C	0,47784	0,0041678	✘ 32213	★★★ 998,23

Şekil 3.43. Hedef kuvvet 1000 N ve Minimum Akma Gerilmesi için geometrinin Optimizasyon aracı üzerindeki görünümü

Elde edilen aday geometrilere karşılık gelen manyetik akı yoğunluğu değerleri denklem 2.14 kullanılarak ele edilir. Manyetik alan simülasyonunda, bu manyetik akı yoğunluğunu elde etmek için gereken akım değerleri ve sarım sayıları ile bu sarım değerine karşılık gelen bobin teli çapı g_h (2 mm), R_c (7 mm), L (22 mm) (Şekil 44) değerleri sabit tutularak elde edilebilir (Tablo 3.12).

Tablo 3.12. Elde edilen optimum değerlere karşılık gelen B, N, d_k ve I değerleri

	τ_y (Pa)	B	N	d_k	I
Aday Geometri 7	13188	0.28463	187	0.45	0.34
			236	0.4	0.28
			309	0.35	0.22
Aday Geometri 8	28850	0.51371	344	0.45	0.3
			435	0.4	0.26
			567	0.35	0.22
Aday Geometri 9	32213	0.56616	266	0.45	0.44
			337	0.4	0.38
			439	0.35	0.32

P1 - Kutupbaşı	6
P2 - Kanal Genişliği	0.52
P3 - Manyetik Akı Dönüş Genişliği	2
P4 - Çekirdek Genişliği	7
P6 - Piston Kafası Toplam Uzunluğu	22
P9 - Sarım Sayısı	187
P10 - Akım	187 0.34
P8 - Manyetik Akı Yoğunluğu	0.2803

Şekil 3.44. CFX'de elde edilen optimum koşullara karşılık gelen diğer geometrik büyüklükler

ii. **Hedef kuvvet değeri 1000 N 'u yapan ve bunu en düşük akma gerilmesi (τ_y) ve en büyük kanal genişliği (g) ile veren geometrik değerler**

Tablo 3.13. Hedef kuvvet 1000 N 'u Minimum Akma Gerilmesi ve en büyük kanal genişliği için geometri

	g (mm)	t (mm)	τ_y (Pa)	F (N)
Amaç	En Büyük	Yok	En Küçük	1000 N
Aday Geometri 10	1.1	6	29882	998.55

	A	B	C	D	E
1		P42 - gap_geo	P75 - flange (m)	P87 - yieldstressreal (Pa)	P78 - kuvvet (N)
2	Optimization Study				
3	Objective	Maximize	No Objective	Minimize	Seek Target
4	Target Value				1000
5	Importance	Default	Default	Default	Default
6	Candidate Points				
7	Candidate A	★★★ 1,132	→ 0,0062828	✗ 29882	★★★ 998,55
8	Candidate B	★★★ 1,1642	→ 0,0062771	✗✗ 46626	★★★ 991,49
9	Candidate C	★ 0,96326	→ 0,0060783	✗✗ 43243	★★★ 996,84

Şekil 3.45. Hedef kuvvet 1000 N, Minimum Akma Gerilmesi ve Maksimum kanal genişliği için geometrinin Optimizasyon aracı üzerindeki görünümü

Şekil 3.45'den görülebileceği gibi Aday B ve C ancak çok büyük akma gerilmeleri ile elde edildiği optimal değerler olarak seçilmemişlerdir.

Elde edilen aday geometrilere karşılık gelen manyetik akı yoğunluğu değerleri denklem 3.1 kullanılarak ele edilir. Manyetik alan simülasyonunda, bu manyetik akı yoğunluğunu elde etmek için gereken akım değerleri ve sarım sayıları ile bu sarım değerine karşılık gelen bobin teli çapı g_h (2 mm), R_c (7 mm), L (22 mm) değerleri sabit tutularak elde edilebilir (Tablo 3.14).

Tablo 3.14. Elde edilen optimum değerlere karşılık gelen B, N, d_k ve I değerleri

	r_y (Pa)	B	N	d_k	I
			581	0.25	2
Aday Geometri 10	29882	0.52950	236	0.4	0.28
			309	0.35	0.22

Aday geometri 10, çok ince bir tel çapı ve yüksek akım ile elde edilebileceğinden uygun bir geometri olarak değerlendirilmemiştir.

iii. **Hedef kuvvet değeri 1000 N 'u yapan ve bunu en düşük akma gerilmesi (r_y) ve en küçük kutupbaşı (t) ile veren geometrik değerler**

Tablo 3.15. Hedef kuvvet 1000 N 'u Minimum Akma Gerilmesi ve en küçük kutupbaşı için geometri

	g (mm)	t (mm)	r_y (Pa)	F (N)
Amaç	Yok	En Küçük	En Küçük	1000 N
Aday Geometri 11	0.47	2	28850	988,02
Aday Geometri 12	0.46	2.5	30911	1013,68

	A	B	C	D	E
1		P42 - gap_geo	P75 - flange (m)	P87 - yieldstressreal (Pa)	P78 - kuvvet (N)
2	Optimization Study				
3	Objective	No Objective	Minimize	Minimize	Seek Target
4	Target Value				1000
5	Importance	Default	Default	Default	Default
6	Candidate Points				
7	Candidate A	0,47413	0,0021987	28850	988,02
8	Candidate B	0,46553	0,0024674	30911	1013,7
9	Candidate C	0,4823	0,0024992	35864	1003,7

Şekil 3.46. Hedef kuvvet 1000 N, Minimum Akma Gerilmesi ve Minimum kutupbaşı için geometrinin Optimizasyon aracı üzerindeki görünümü

Şekil 3.46'dan görülebileceği gibi Aday C ancak çok büyük akma gerilmeleri ile elde edildiği optimal değerler olarak seçilmemiştir.

Manyetik alan simülasyonunda, bu manyetik akı yoğunluğunu elde etmek için gereken akım değerleri ve sarım sayıları ile bu sarım değerine karşılık gelen bobin teli çapı g_h (2 mm), R_c (7 mm), L (22 mm) değerleri sabit tutularak elde edilebilir (Tablo 3.16).

Tablo 3.16. Elde edilen optimum değerlere karşılık gelen B, N, d_k ve I değerleri

	r_y (Pa)	B	N	d_k	I
Aday Geometri 11	28850	0.51371	340	0.45	0.3
			431	0.4	0.26
			563	0.35	0.22
Aday Geometri 12	30911	0.54550	325	0.45	0.3
			411	0.4	0.26
			538	0.35	0.22

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bölüm 2 ve 3'te ayrıntıları verilen tasarım faktörleri dikkate alınarak, Taguchi optimizasyon tekniği ile belirlenen MR damper parametreleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. L9 Ortogonal Dizisine göre Aday geometri ve akım değerleri

	g	t	d_k	i
Cihaz 1	0.6	5	0.45	1
Cihaz 2	0.6	6	0.4	1.25
Cihaz 3	0.6	7	0.35	1.5
Cihaz 4	0.8	5	0.4	1.5
Cihaz 5	0.8	6	0.35	1
Cihaz 6	0.8	7	0.45	1.25
Cihaz 7	1	5	0.35	1.25
Cihaz 8	1	6	0.45	1.5
Cihaz 9	1	7	0.4	1

Bu verilere göre 9 adet MR damper (Şekil 4.1) tasarlanıp imal edilmiştir. İmal edilen MR damperler ilk önce en az 30 dk. damper alıştırma ünitesinde (Şekil 4.2) temasta olan yüzeyleri, birbirleri çalıştırılarak çalışan yüzeylerin alıştırması yapılmıştır. Daha sonra Roehrig damper test cihazına (Şekil 4.3) bağlanarak akım değerleri 0.25 A kademelerinde 0 A'den 2 A' e kadar, 0.0075 m ve 0.0125 m genlik kademesinde test edilmiştir.



Şekil 4.1. İmal edilen MR damperlerin montaj öncesi görüntüsü



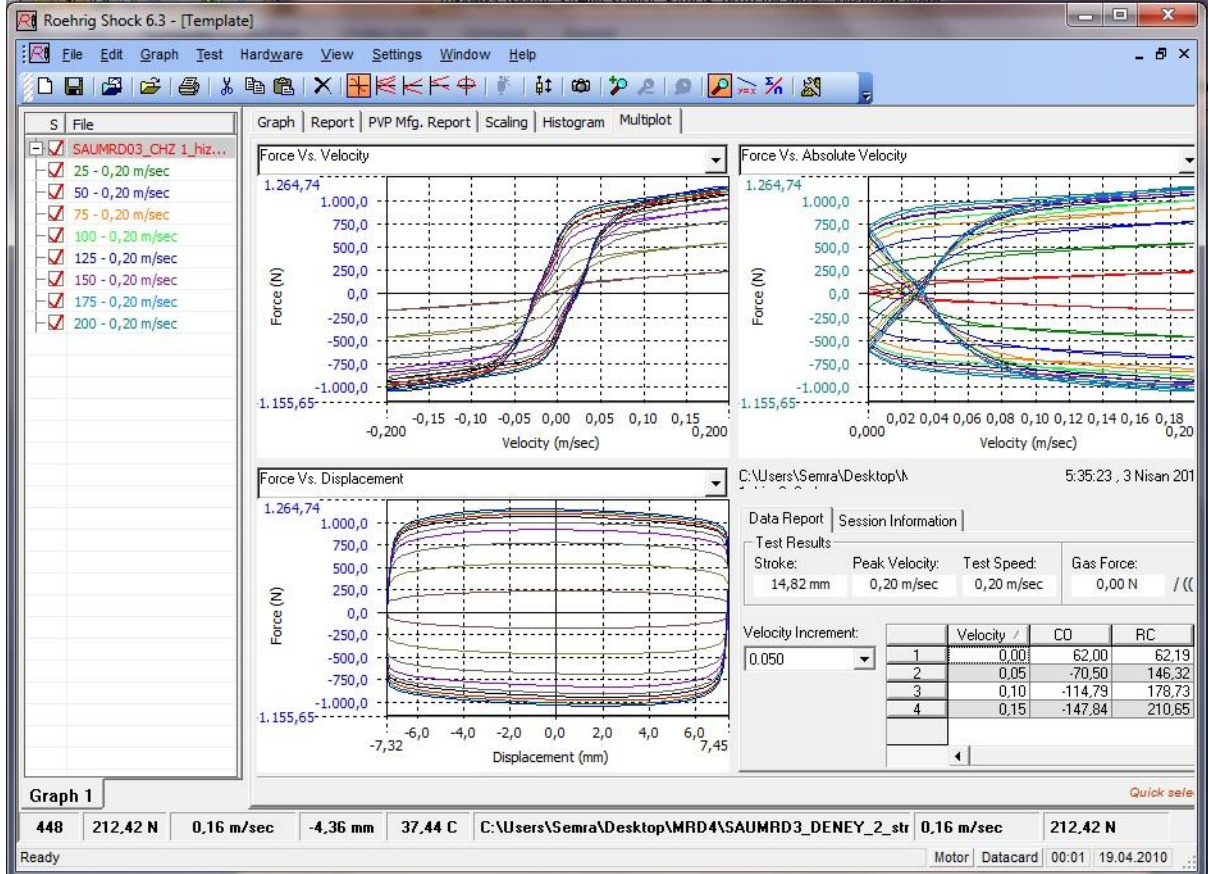
Şekil 4.2. MR Damper alıştırma ünitesi



Şekil 4.3. Roehrig Damper test ünitesi

4.1. MR damper testleri

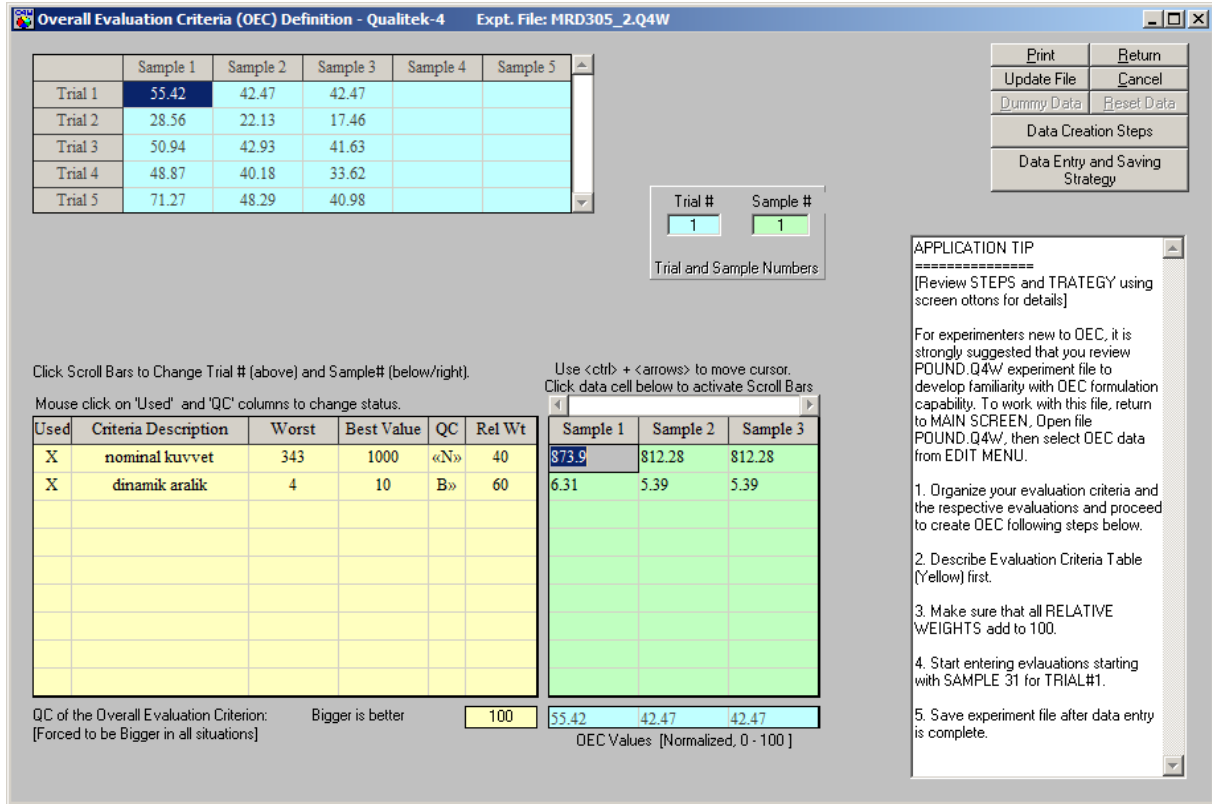
MR damperler Roehrig marka test cihazı ve yine aynı firmanın "Shock 6.0" yazılımı ile sinüs dalga formunda tahrikle testler yapılmıştır. Programın test verisi aldıktan sonraki örnek görüntüsü Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Shock yazılımında MR damper veri ve grafik görüntüsü

4.2. Qualitek-4 Programı ile yapılan Taguchi analizi:

İki adet hedef fonksiyonu (Maksimum dinamik aralık ve 1000 N damper kuvveti) olduğu için Qualitek-4 programı ile Çoklu Değerlendirme Kriteri (Overall Evaluation Criterion -OEC) özelliği kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Bu değerlendirmede hedef kuvvetin sonuç üzerindeki ağırlığı %40, dinamik aralığın ise sonuç üzerindeki ağırlığı için %60 olmasına karar verilmiştir. Ancak dinamik aralık ve kuvvet farklı birim ve kalite karakteristiğine (En Büyük En İyi, Hedef Değer En İyi) sahip olduğu için bu değerler ile olarak Qualitek-4 tarafından 100 değerine normalize edilirler (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Ölçüm sonuçlarının normalize edilmesi

Cihazlara göre test verilerinin 100 değerine normalize edilmiş sonuçları ve bu amaç için kullanılan formül aşağıdadır.

$$OEC = \left(1 - \frac{F_W - F_E}{F_B - F_W}\right) * F_{Rel\ Wt} + \left(\frac{D_E - D_W}{D_B - D_W}\right) * D_{Rel\ Wt} \quad (4.1)$$

Burada W : en kötü değer, B : en iyi değer, E : Ölçülen değer, $Rel. Wt.$: Ağılık değeri

Tüm dämpeler için bu şekilde hesaplanan değerler Şekil 4.6'da görülmektedir.

	1	2	3	4	5	6	7		1	2	3	4
1	1	1	1	1	-	-	-	▲	55.42	42.47	42.47	-----
2	1	2	2	2	-	-	-		28.56	22.13	17.46	-----
3	1	3	3	3	-	-	-		50.94	42.93	41.63	-----
4	2	1	2	3	-	-	-		48.87	40.18	33.62	-----
5	2	2	3	1	-	-	-		71.27	48.29	40.98	-----
6	2	3	1	2	-	-	-		22.86	20.27	16.86	-----
7	3	1	3	2	-	-	-		14.64	13.48	5.79	-----
8	3	2	1	3	-	-	-	▼	25.92	19.77	15.54	-----
	Inner Array								Results			

Şekil 4.6 . 100 değerine normalize edilmiş ve tek bir değer haline getirilmiş olan dinamik aralık ve kuvvet değerleri

4.3. S/N Analizi:

Bir OEC analizi Taguchi de en büyük en iyi kriterine göre yapılır. Bunun için kullanılan formül;

$$\text{En Büyük En İyi} = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (4.2)$$

Burada y_i ölçüm değerleridir (Denklem 4.1 ile hesaplanan değerler). Herbir cihazın ayrı ayrı S/N oranları hesaplanır, bu hesaplama sonucunda en büyük değer en iyi değerdir (Şekil 4.6).

Conditions	Sample# 1	Sample# 2	Sample# 3	Sample# 4	Sample# 5	Sample# 6	S/N Ratio
Trial# 1	55.42	42.47	42.47				33.204
Trial# 2	28.56	22.13	17.46				26.61
Trial# 3	50.94	42.93	41.63				32.995
Trial# 4	48.87	40.18	33.62				31.931
Trial# 5	71.27	48.29	40.98				33.903
Trial# 6	22.86	20.27	16.86				25.814
Trial# 7	14.64	13.48	5.79				18.75
Trial# 8	25.92	19.77	15.54				25.639
Trial# 9	25.96	11.5	9.3				21.63

Şekil 4.7. Her bir cihazın S/N oranları

ANOVA analizi ile her bir faktörün sonuç üzerindeki etkisi aşağıdaki gibi olacaktır (Şekil 4.8).

Col # / Factor	DOF (f)	Sum of Sqrs. (S)	Variance (V)	F - Ratio (F)	Pure Sum (S')	Percent P(%)
1 Kanal genişliği	2	152.866	76.433	----	152.866	63.563
2 Kutupbasi uzunlug	2	5.514	2.757	----	5.514	2.293
3 Bobin teli capı	2	5.677	2.838	----	5.677	2.36
4 Akım	2	76.433	38.216	----	76.433	31.781
Other/Error	0					
Total:	8	240.492				100.00%

Şekil 4.8. ANOVA analizi

Buradan da görülebileceği gibi sonuç üzerinde en büyük etkiye sahip parametre kanal genişliğidir. Daha sonra Akım, Bobin teli çapı ve kutup başı uzunluğu sırasıyla gelmektedir. Bu sonuçlara göre seçilen optimal değerler Şekil 4.9'daki gibi tespit edilmiştir.

Column # / Factor	Level Description	Level	Contribution
1 Kanal genişliği	0.6 mm	1	3.105
2 Kutupbasi uzunlug	6	2	.886
3 Bobin teli capi	0.35	3	.718
4 Akim	1.5	3	2.357
Total Contribution From All Factors.....			7.066
Current Grand Average Of Performance...			27.831
Expected Result At Optimum Condition...			34.897

Şekil 4.9. Optimal değerler

Bu optimum parametrelere karşılık gelen S/N oranı ve bu optimum değerlere sahip olan cihazın denklem 4.1 sonucunda elde edilecek olan değeri, Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

Expt File: MRD305_2.Q4w

Data Type: S/N Ratio QC Type: Bigger is Better

Estimate of expected results from S/N ratio

S/N = -10 Log (MSD) = 34.899

or MSD = $10^{[-(S/N)/10]}$ = 0.000324

where

MSD = $[(1/y_1)^2 + (1/y_2)^2 + \dots + (1/y_n)^2] / n$

= [Avg. $(1/y_i)^2$] = $1/Y_{exp}^2$

or $Y_{exp} = \text{SQR}(1/\text{MSD})$

Expected performance in QC units
(or overall evaluation criteria) is:

$Y_{exp} = 55.584$ QC units

(Based on **$S/N = 34.899$** at optimum)

Şekil 4.10. Optimal geometrinin S/N ve kalite karakteristik değerleri

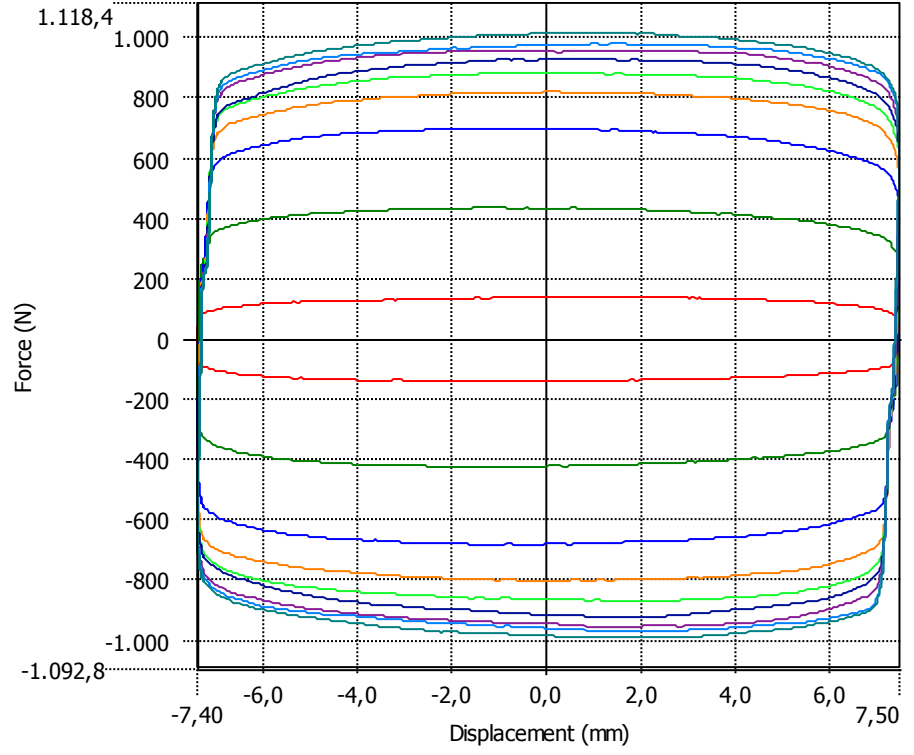
Şekil 4.10'da optimum değerler için elde edilen S/N değeri, Şekil 4.7 de görülen aday 9 damper değişkeni için hesaplanmış olan S/N değerlerinden daha büyük olduğu, böylece imalatı yapıp testleri gerçekleştirilecek olan optimum damperin aday damperlerde daha iyi bir sonuç vereceği, bu değer sayesinde açıkça görülmektedir. Aynı sonuca optimal geometri için hesaplanan, dinamik aralık ve damper kuvvetinin bir bileşimi olan Y_{exp} değerinin Şekil 4.6 ile karşılaştırılması ile de varılabilmektedir.

4.4. Test Sonuçları

Yapılan testlerde hedeflenen değerlere oldukça yakın değerler elde edilmiştir. MR damperden elde edilen kuvvet-hız ve kuvvet-yer değiştirme grafiklerine, Şekil 4.11-28'de 0.05 m/s hız değerinde, hem 7.5 ve 12.5 mm genlik değerinde grafikler örnek olarak verilmiştir. Grafikler Shock yazılımından doğrudan alınmıştır.

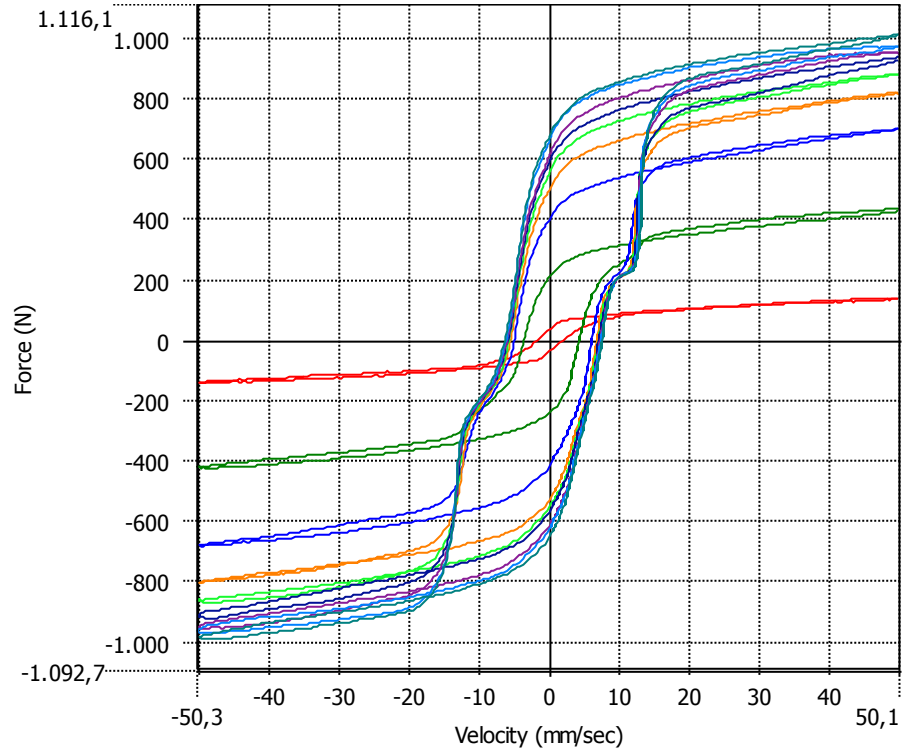
Her bir dampere 9 farklı akım, 2 farklı genlik ve 4 farklı hız kademesi olmak üzere toplam 648 adet test yapılmıştır. Bu sonuçlar, elde edilen en düşük ve en büyük kuvvet değerlerini belirtmek üzere Tablo 4.2 ve 4.3'de verilmiştir.

SAUMRD03_CHZ
1_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet– Yer Değişirme

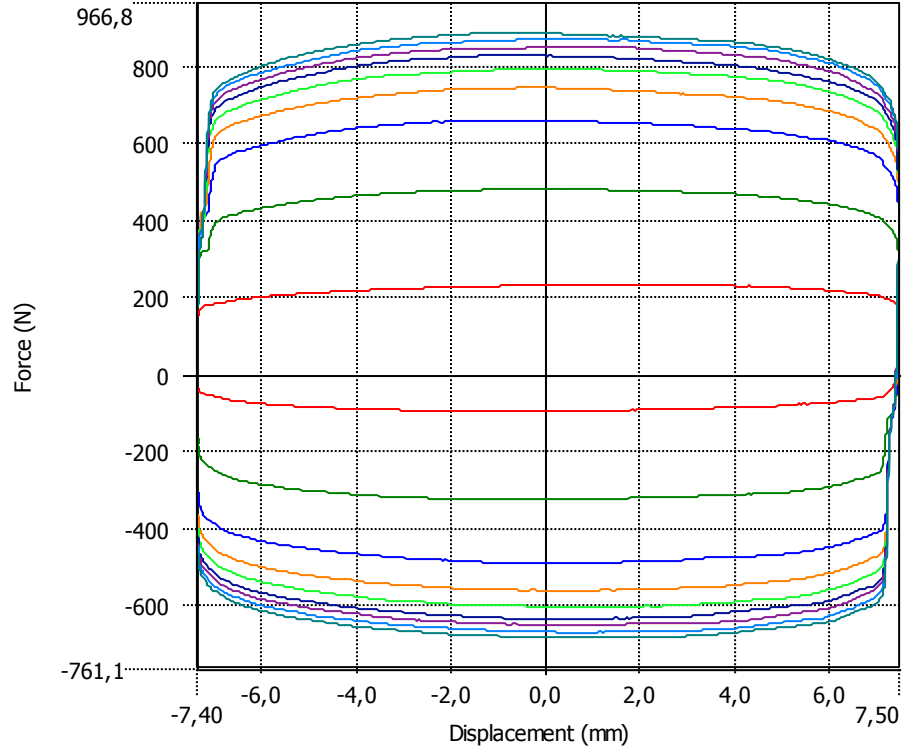
SAUMRD03_CHZ
1_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet– Hız grafiği

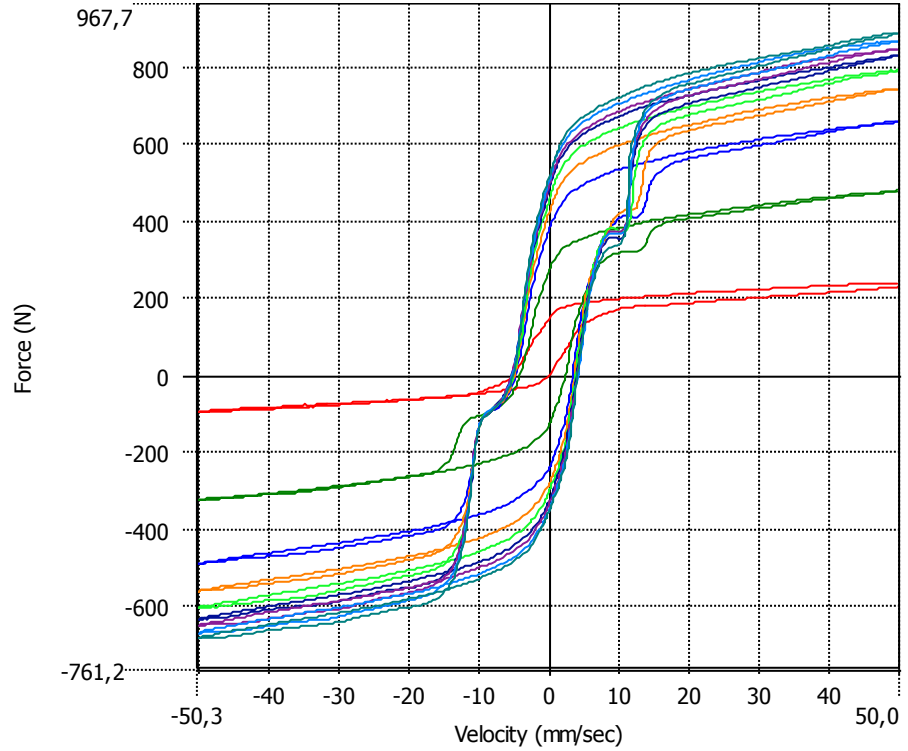
Şekil 4.11. $V=0.05$ m/s ve 0.075 m yerdeğişirmede Cihaz 1 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
2_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet- Yer Değişirme

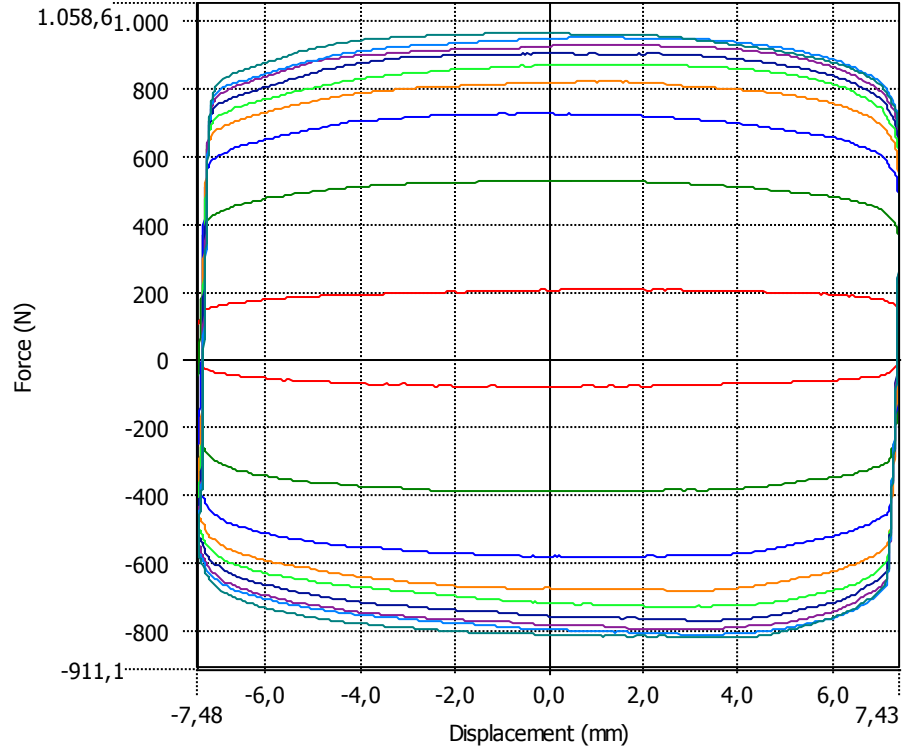
SAUMRD03_CHZ
2_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet- Hız

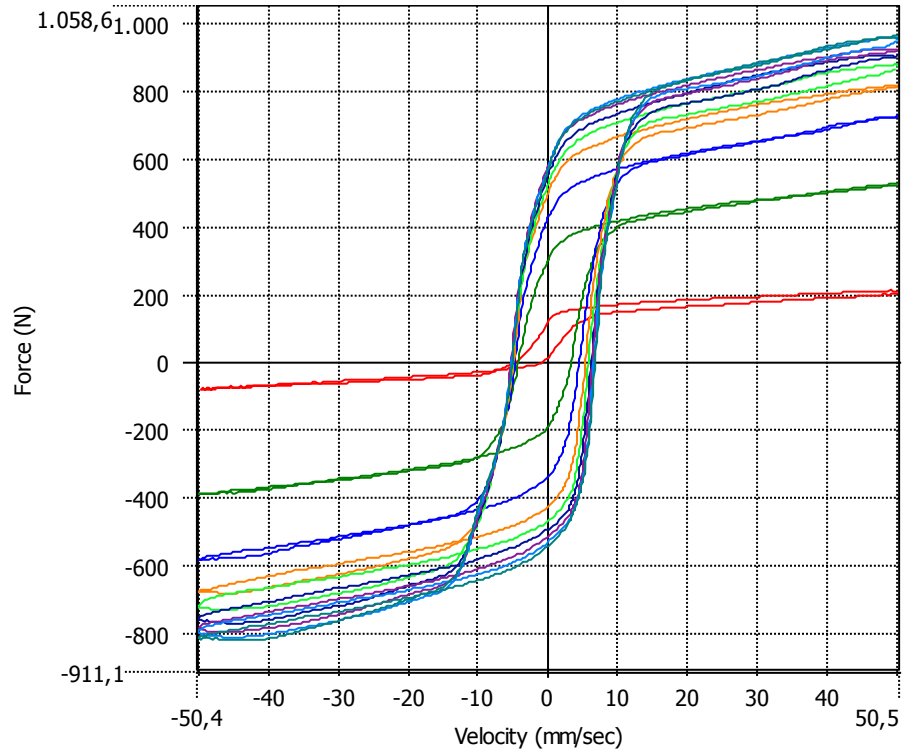
Şekil 4.12.V=0.05 m/s ve 0.075 m yer değişirmede Cihaz 2 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
3_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet– Yer Değişirme

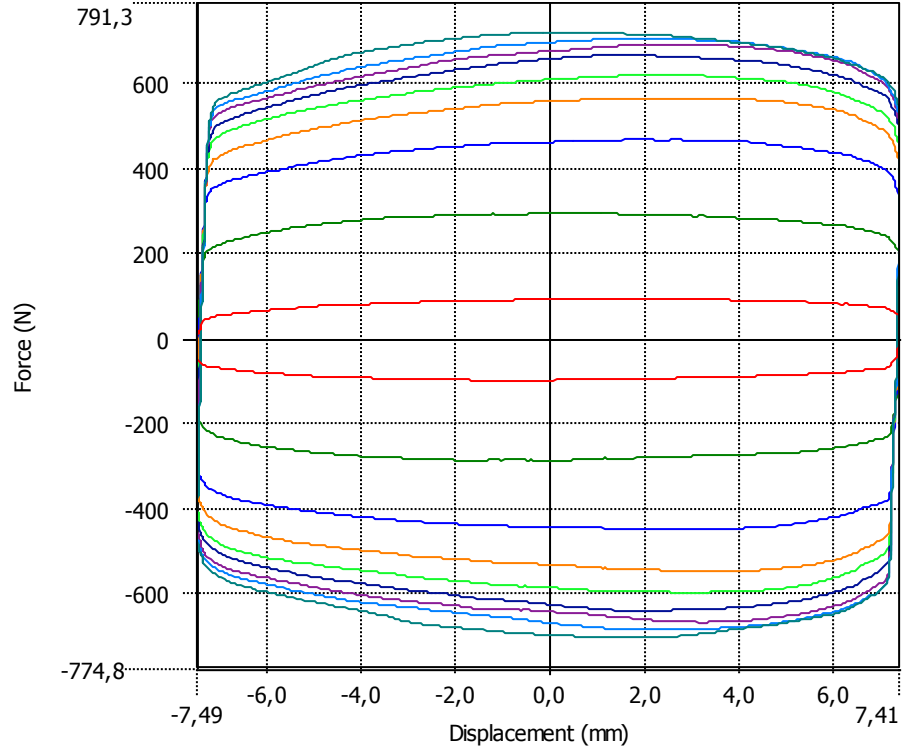
SAUMRD03_CHZ
3_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet- Hız

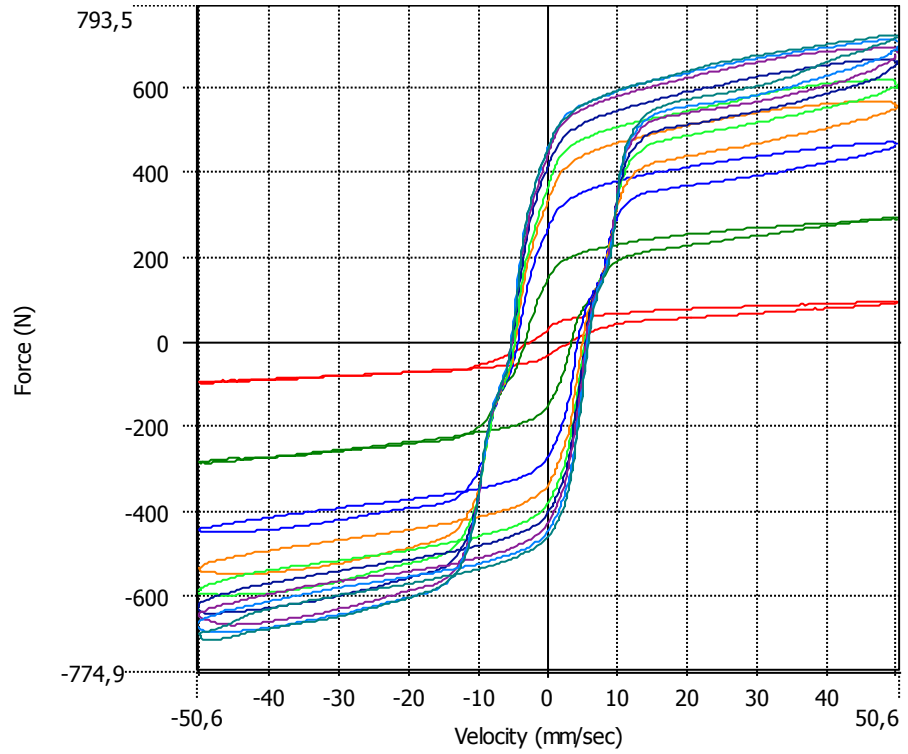
Şekil 4.13. $V=0.05$ m/s ve 0.075 m yer değiştirmede Cihaz 3 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
4_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet– Yer Değişirme

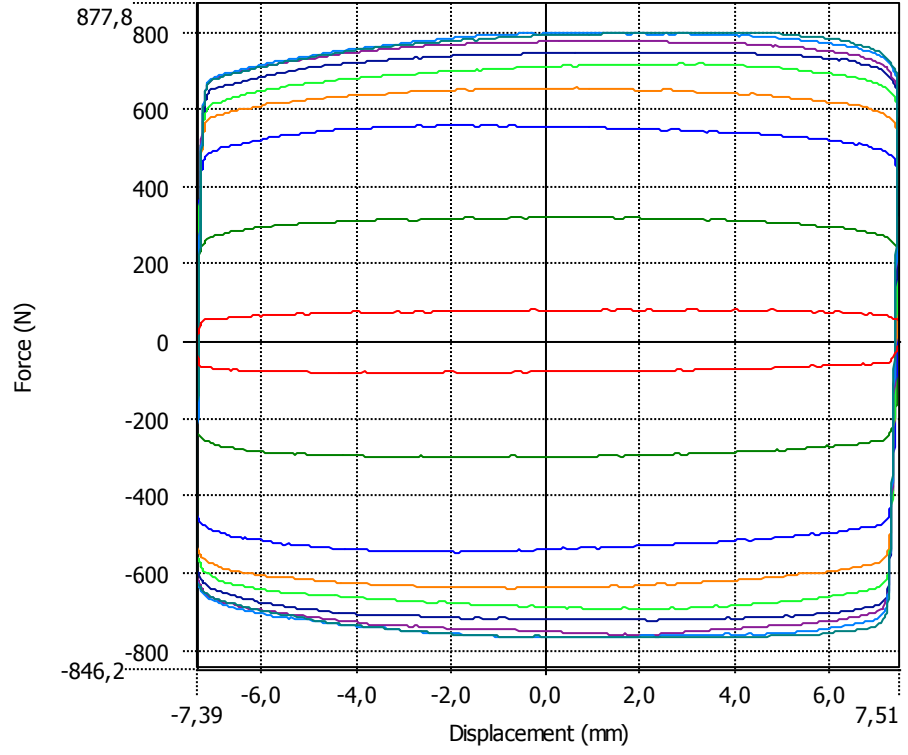
SAUMRD03_CHZ
4_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet– Hız grafiği

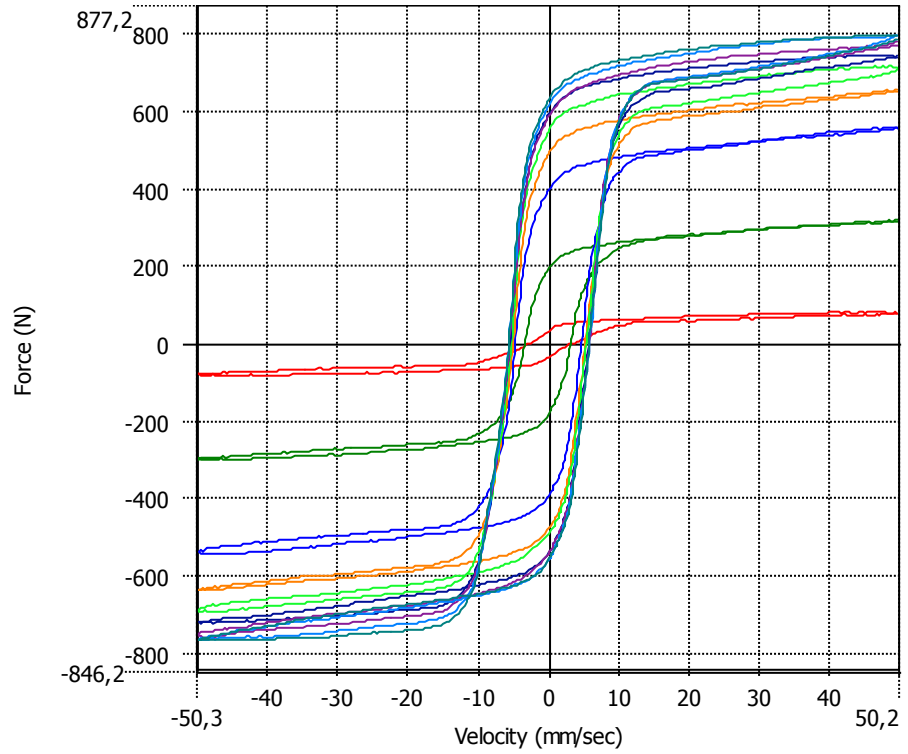
Şekil 4.14. $V=0.05$ m/s ve 0.075 m yer değiştirmede Cihaz 4 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
5_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet– Yer Değişirme

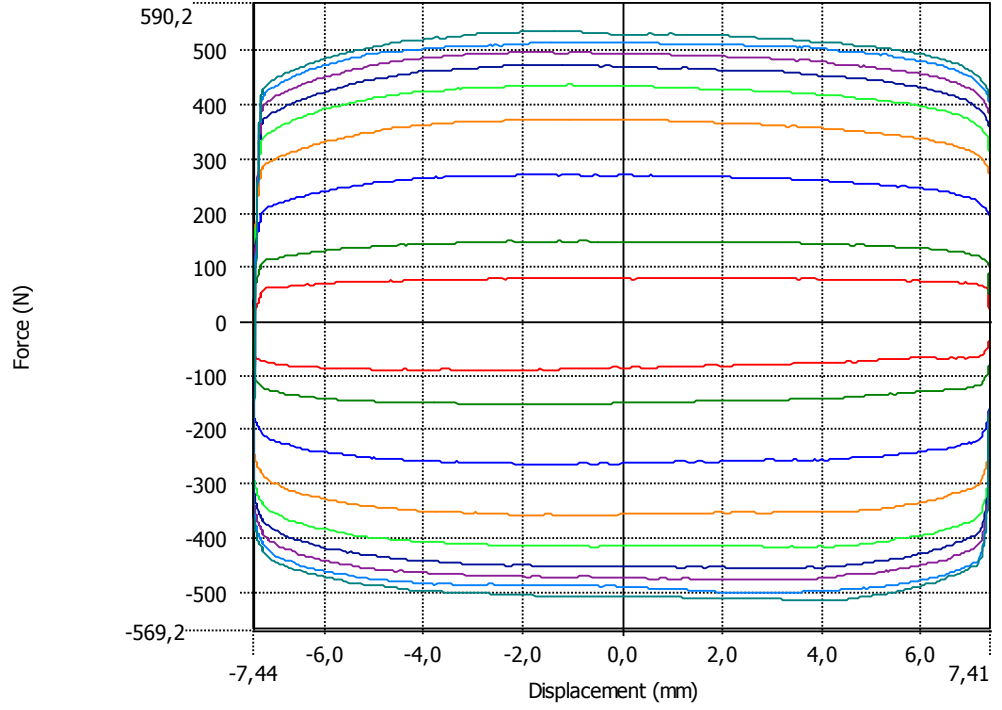
SAUMRD03_CHZ
5_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet– Hız grafiği

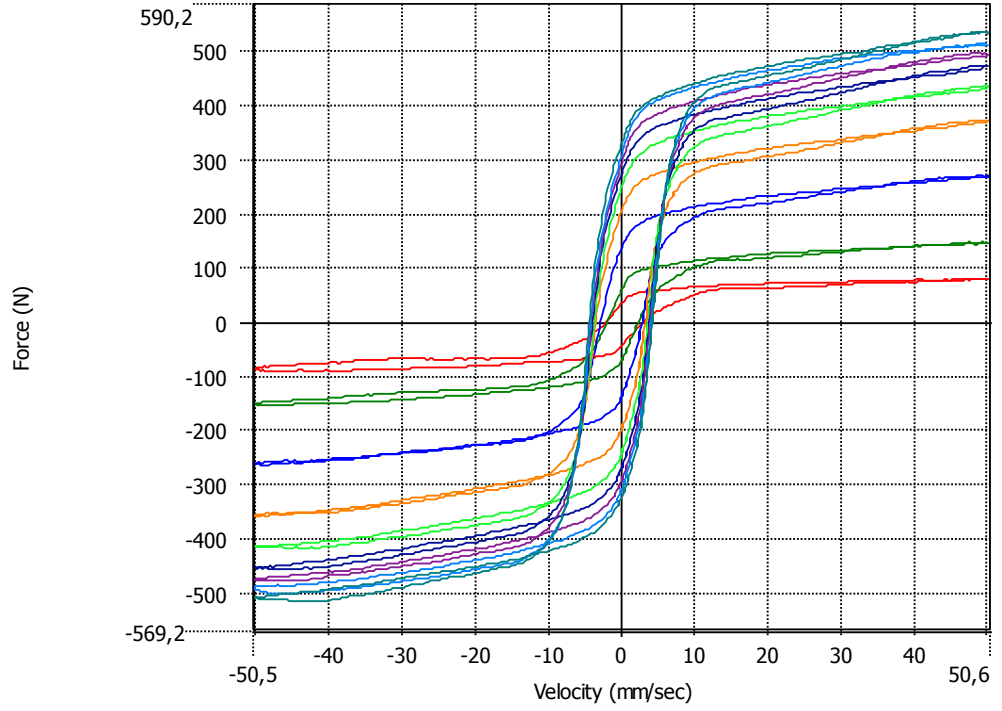
Şekil 4.15. $V=0.05$ m/s ve 0.075 m yer değiştirmede Cihaz 5 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
 6_hiz_0.05_deneme_
 1.MCR - 0 - 50,00
 mm/sec
 25 - 50,00 mm/sec
 50 - 50,00 mm/sec
 75 - 50,00 mm/sec
 100 - 50,00 mm/sec
 125 - 50,00 mm/sec
 150 - 50,00 mm/sec
 175 - 50,00 mm/sec
 200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet– Yer Değişirme

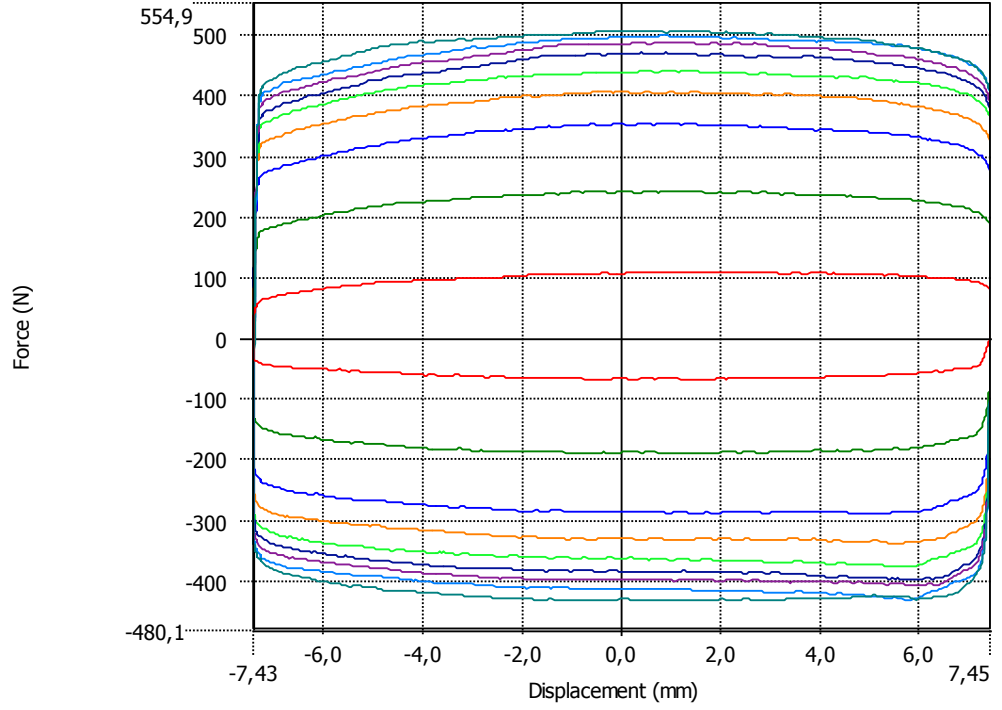
SAUMRD03_CHZ
 6_hiz_0.05_deneme_
 1.MCR - 0 - 50,00
 mm/sec
 25 - 50,00 mm/sec
 50 - 50,00 mm/sec
 75 - 50,00 mm/sec
 100 - 50,00 mm/sec
 125 - 50,00 mm/sec
 150 - 50,00 mm/sec
 175 - 50,00 mm/sec
 200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet– Hız grafiği

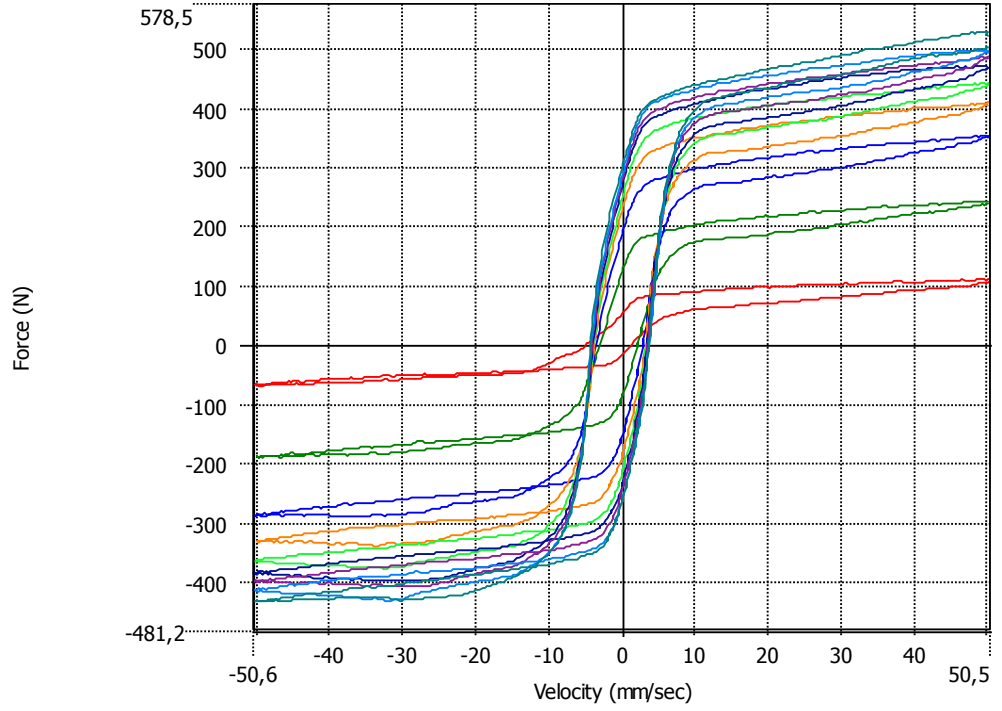
Şekil 4.16. $V=0.05$ m/s ve 0.075 m yer değiştirmede Cihaz 6 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
 7_hiz_0.05_deneme_
 1.MCR - 0 - 50,00
 mm/sec
 25 - 50,00 mm/sec
 50 - 50,00 mm/sec
 75 - 50,00 mm/sec
 100 - 50,00 mm/sec
 125 - 50,00 mm/sec
 150 - 50,00 mm/sec
 175 - 50,00 mm/sec
 200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet– Yer Değişirme

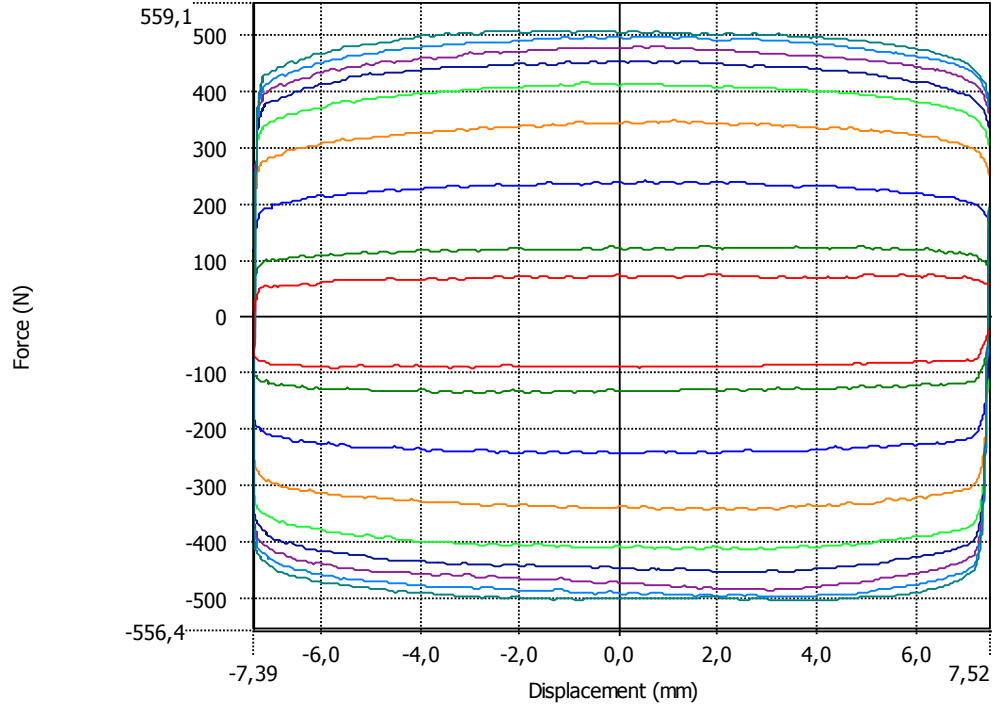
SAUMRD03_CHZ
 7_hiz_0.05_deneme_
 1.MCR - 0 - 50,00
 mm/sec
 25 - 50,00 mm/sec
 50 - 50,00 mm/sec
 75 - 50,00 mm/sec
 100 - 50,00 mm/sec
 125 - 50,00 mm/sec
 150 - 50,00 mm/sec
 175 - 50,00 mm/sec
 200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet– Hız grafiği

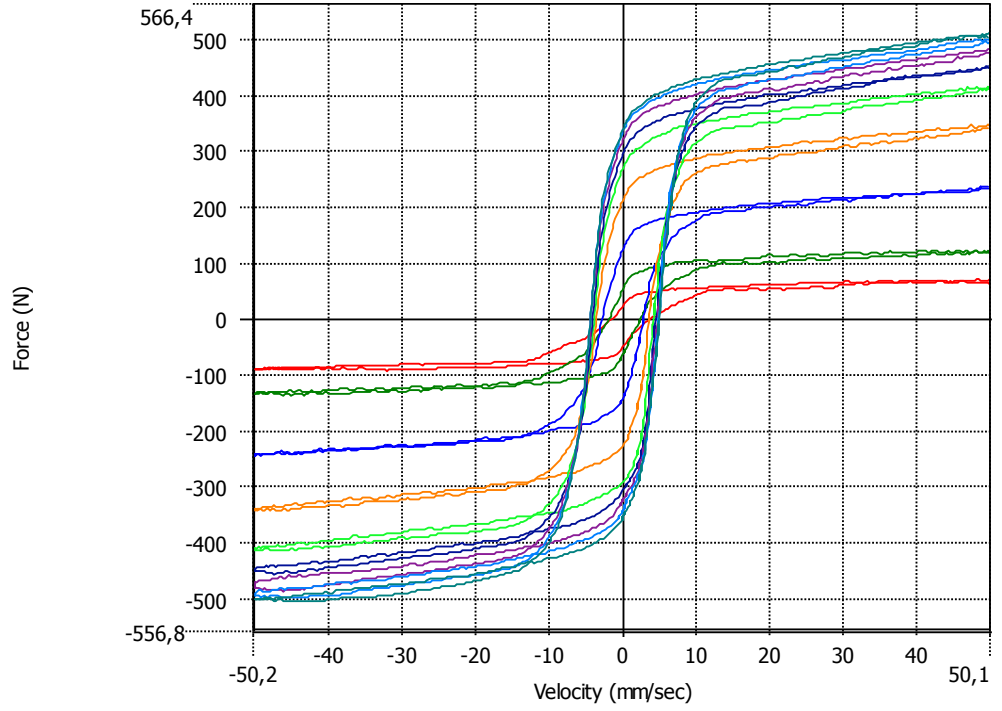
Şekil 4.17. $V=0.05$ m/s ve 0.075 m yer değiştirmede Cihaz 7 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
 8_hiz_0.05_deneme_
 1.MCR - 0 - 50,00
 mm/sec
 25 - 50,00 mm/sec
 50 - 50,00 mm/sec
 75 - 50,00 mm/sec
 100 - 50,00 mm/sec
 125 - 50,00 mm/sec
 150 - 50,00 mm/sec
 175 - 50,00 mm/sec
 200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet– Yer Değişirme

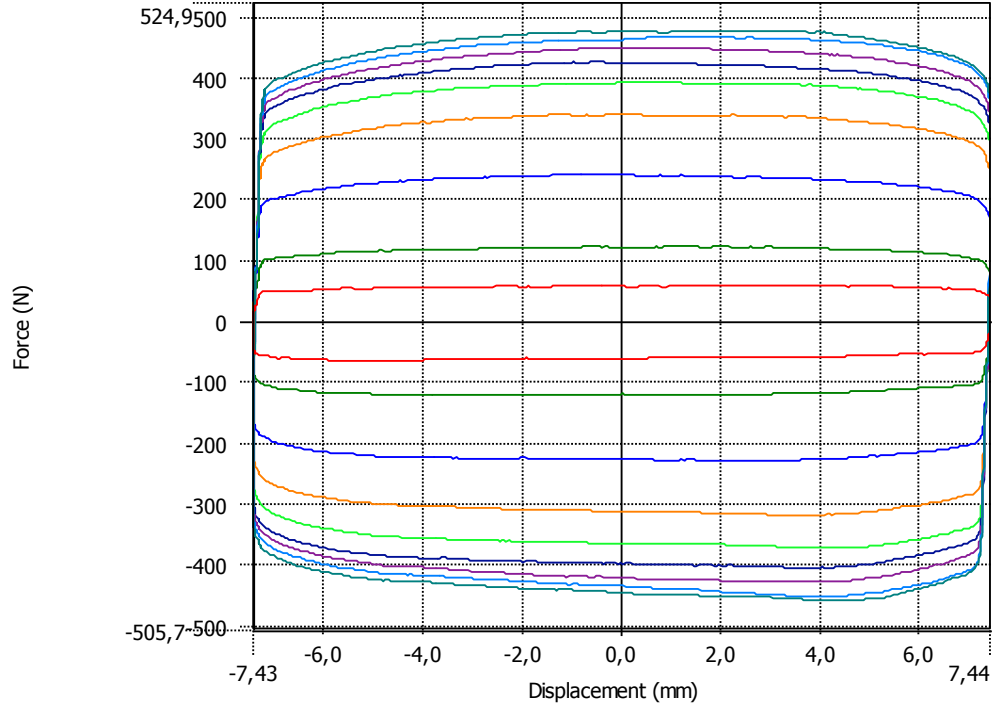
SAUMRD03_CHZ
 8_hiz_0.05_deneme_
 1.MCR - 0 - 50,00
 mm/sec
 25 - 50,00 mm/sec
 50 - 50,00 mm/sec
 75 - 50,00 mm/sec
 100 - 50,00 mm/sec
 125 - 50,00 mm/sec
 150 - 50,00 mm/sec
 175 - 50,00 mm/sec
 200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet– Hız grafiği

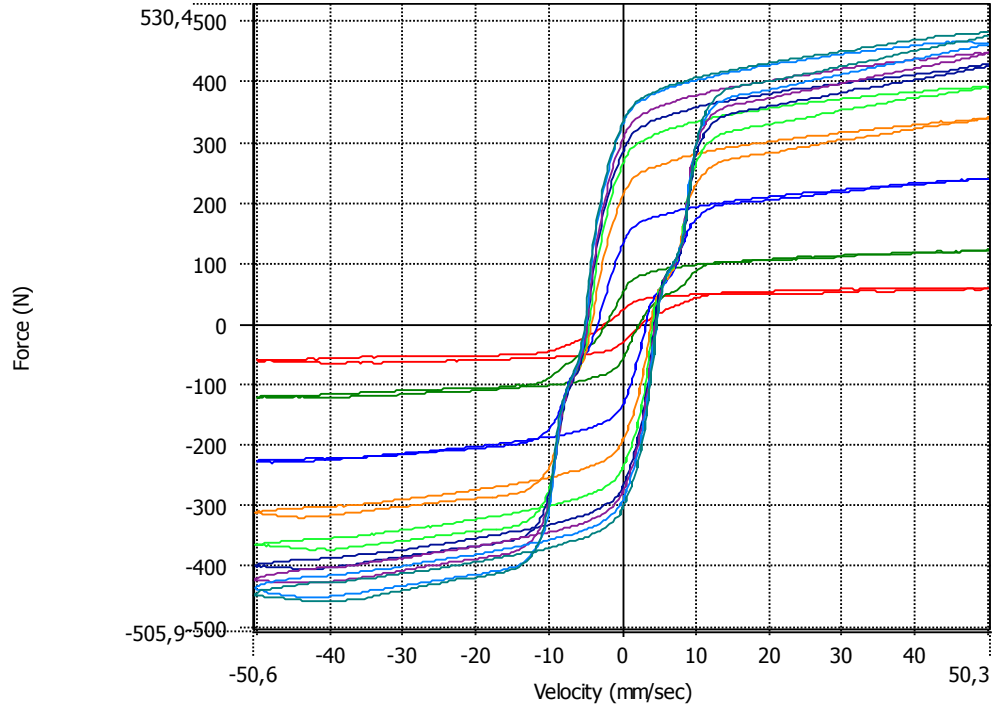
Şekil 4.18. $V=0.05$ m/s ve 0.075 m yer değiştirmede Cihaz 8 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
9_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet– Yer Değişirme

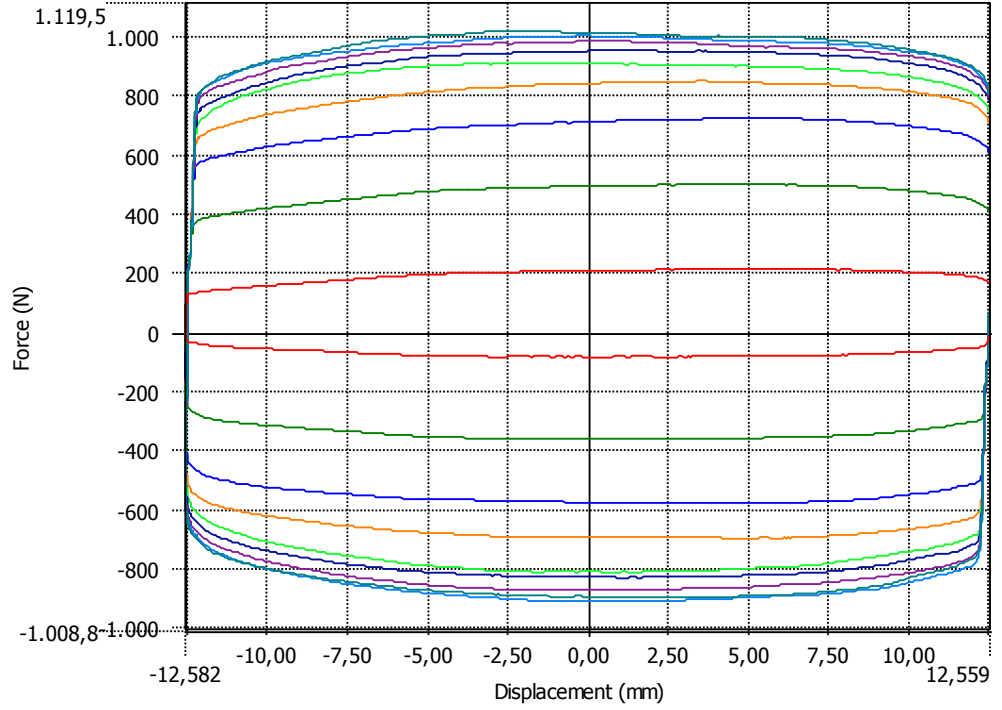
SAUMRD03_CHZ
9_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet– Hız grafiği

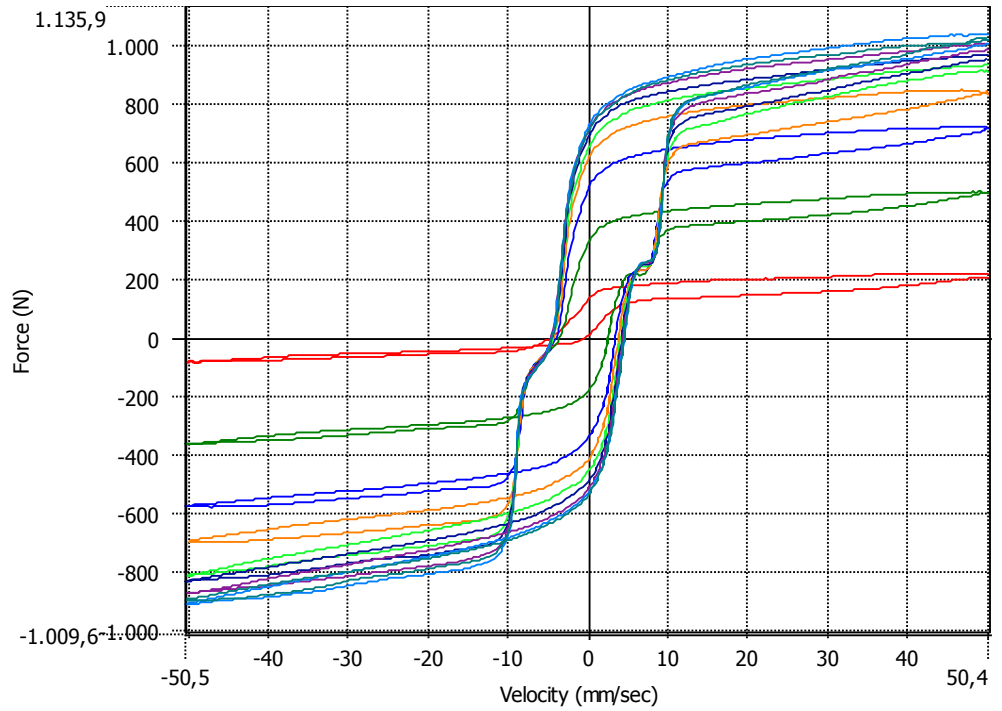
Şekil 4.19. $V=0.05$ m/s ve 0.075 m yer değiştirmede Cihaz 9 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
1_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet– Yer Değişirme

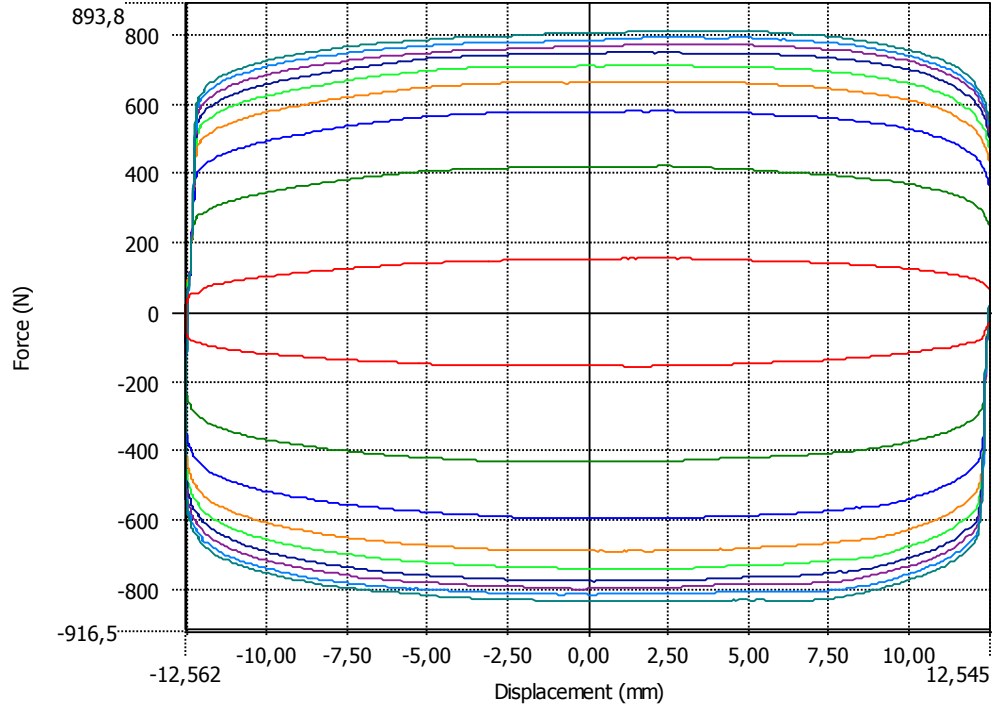
SAUMRD03_CHZ
1_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet– Hız grafiği

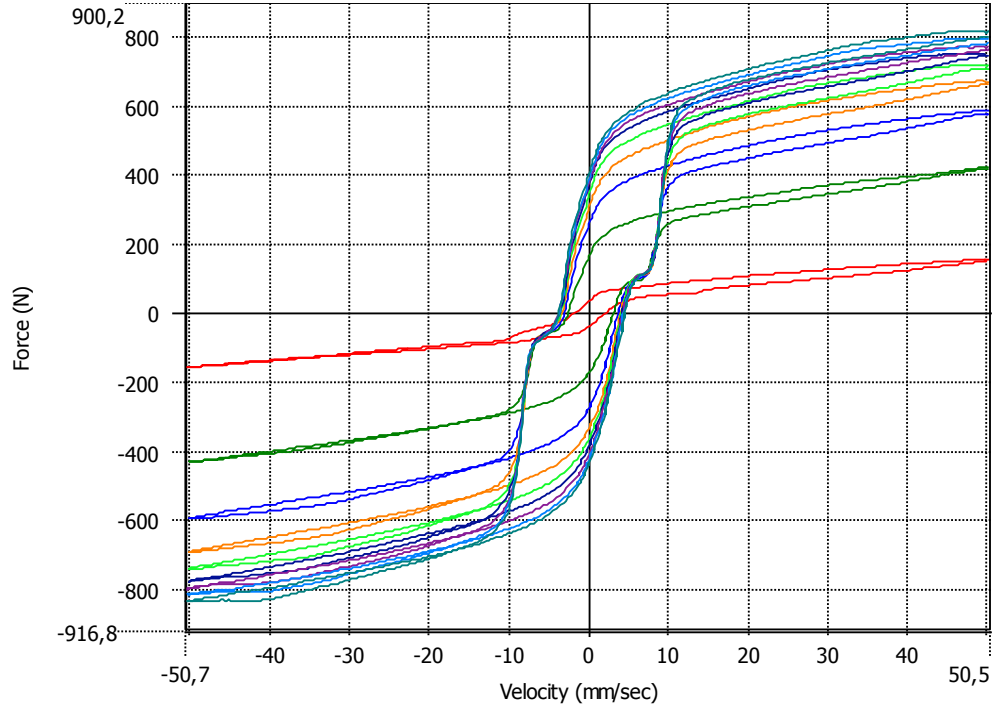
Şekil 4.20. $V=0.05$ m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 1 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
2_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet- Yer Değişirme

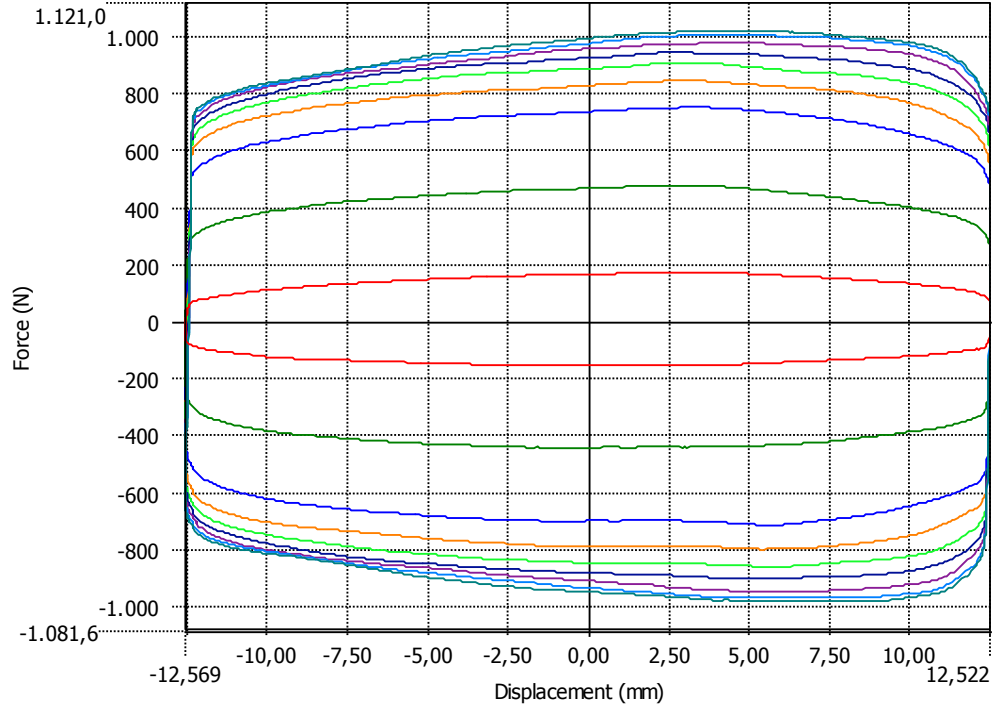
SAUMRD03_CHZ
2_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet- Hız grafiği

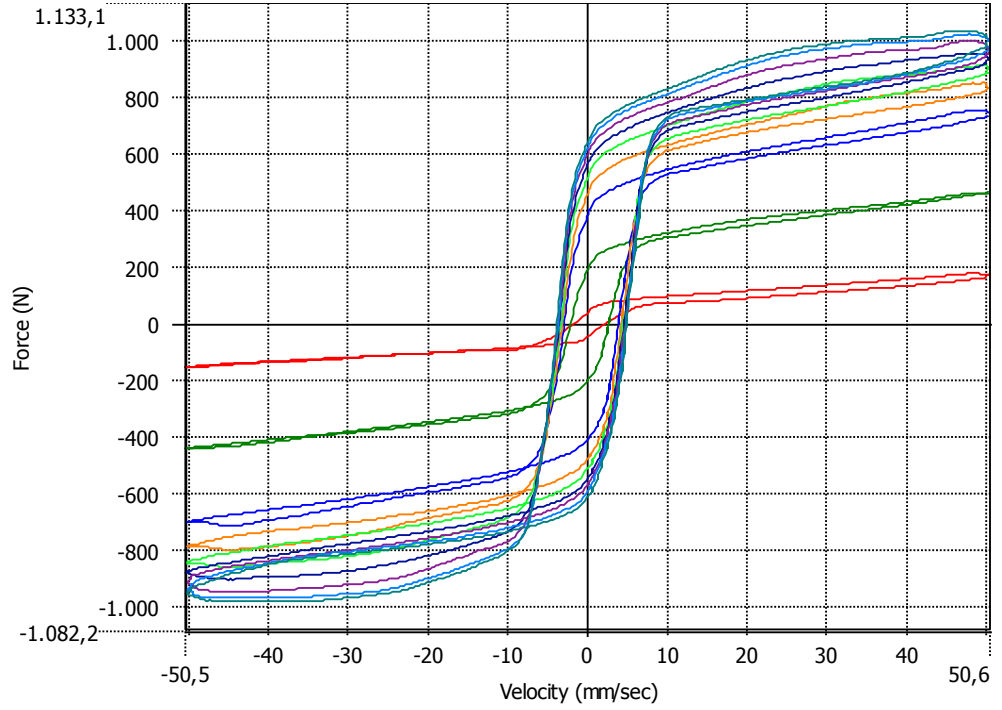
Şekil 4.21. $V=0.05$ m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 2 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
3_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet– Yer Değişirme

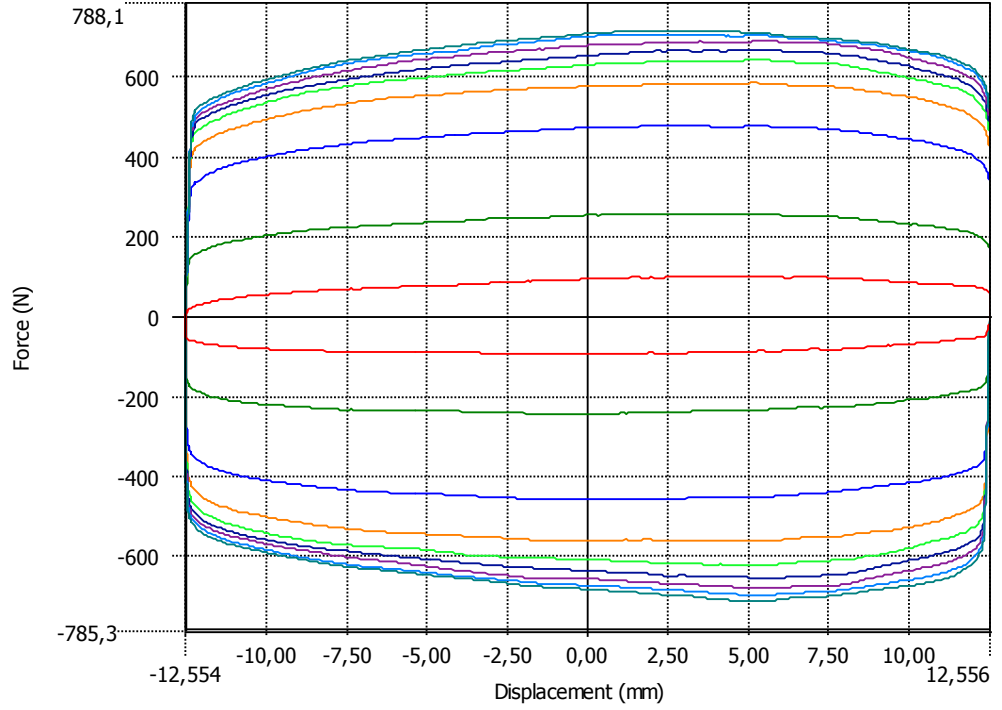
SAUMRD03_CHZ
3_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet– Hız grafiği

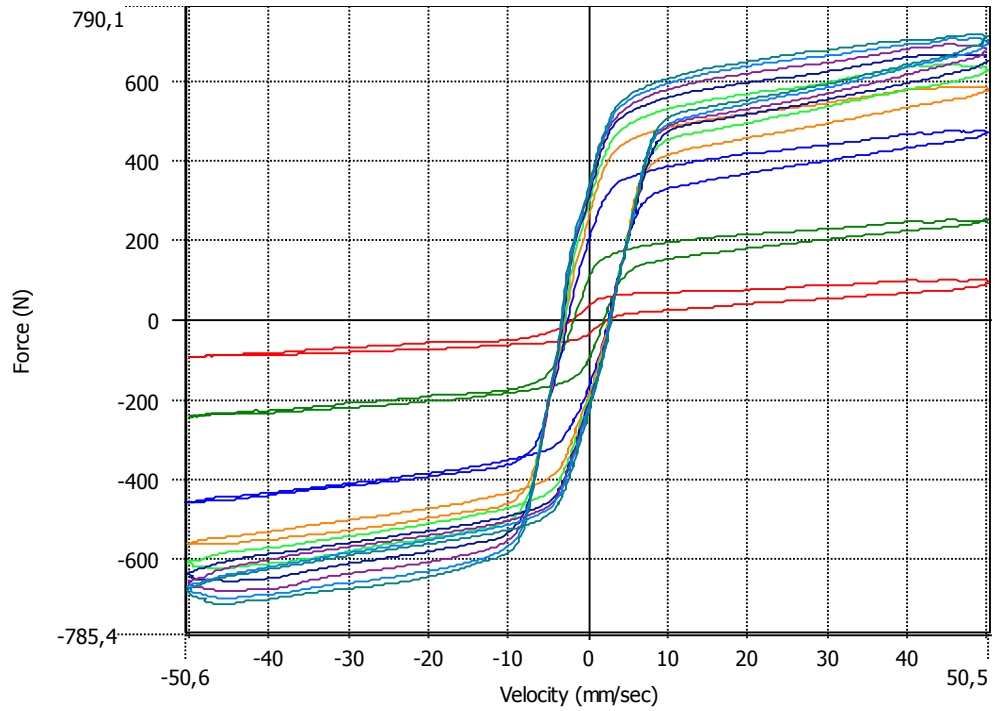
Şekil 4.22. $V=0.05$ m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 3 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
4_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet- Yer Değişirme

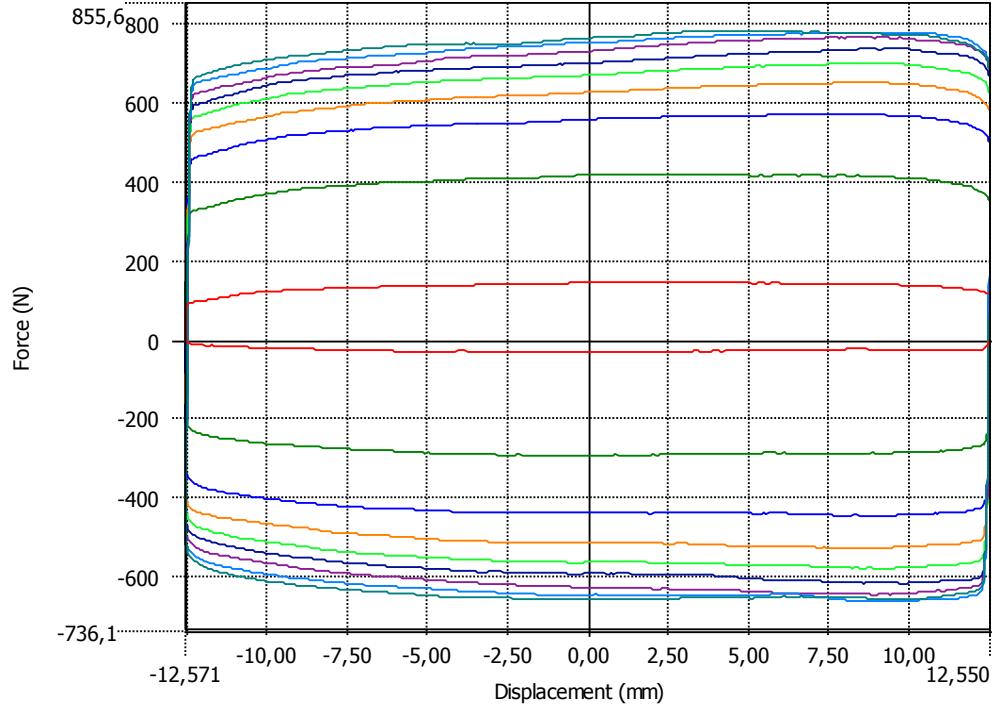
SAUMRD03_CHZ
4_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet- Hız grafiği

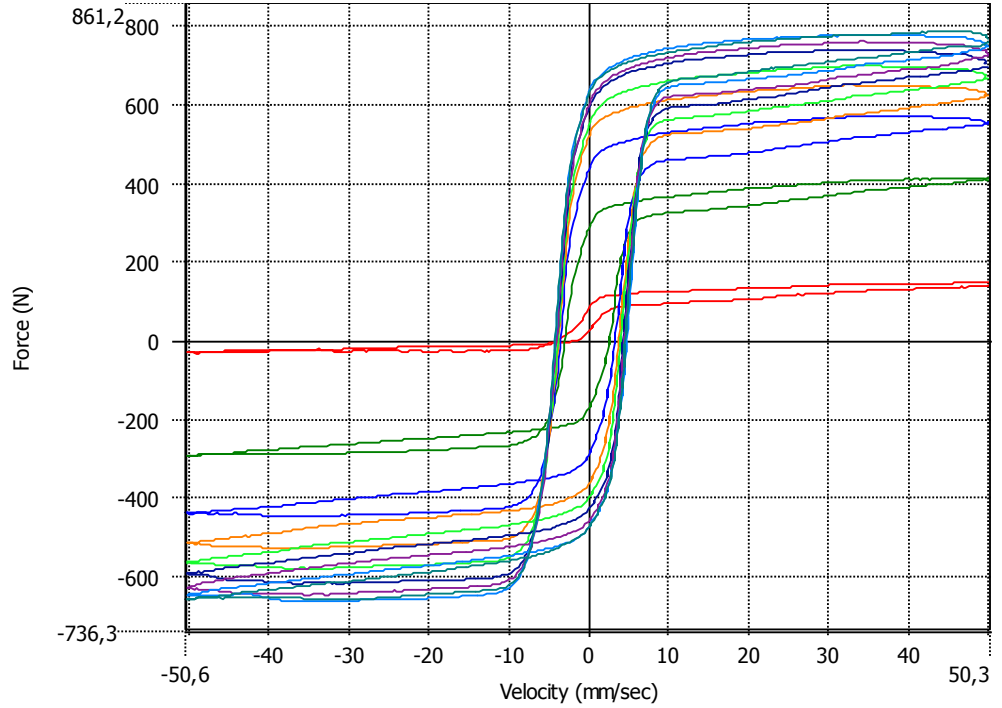
Şekil 4.23. $V=0.05$ m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 4 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
5_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet- Yer Değişirme

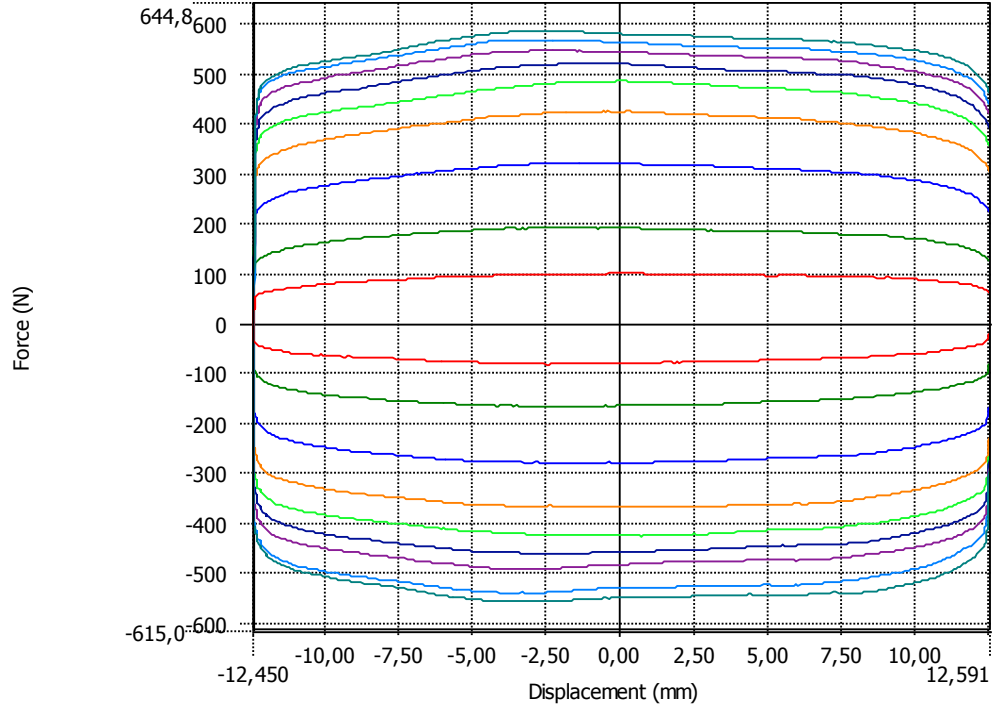
SAUMRD03_CHZ
5_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet- Hız grafiği

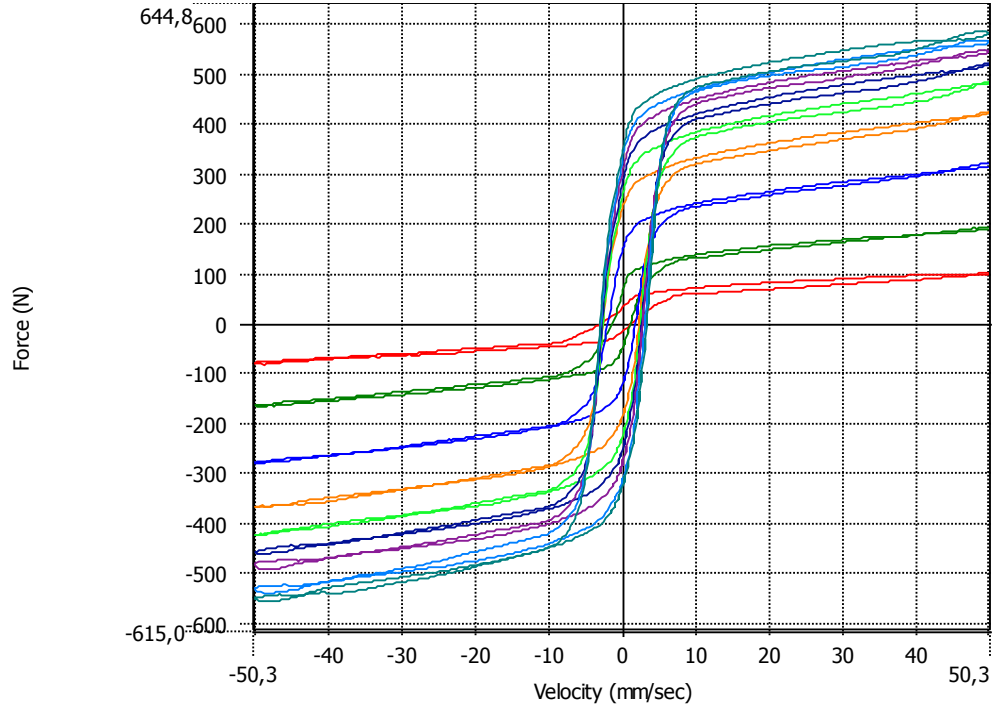
Şekil 4.24. $V=0.05$ m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 5 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
6_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet- Yer Değişirme

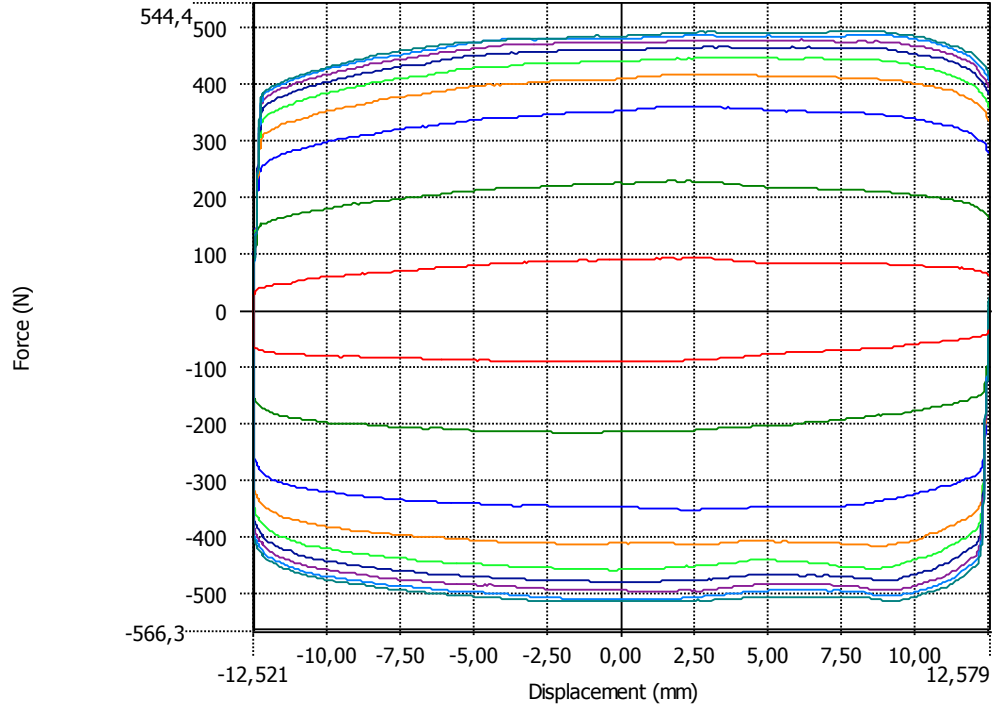
SAUMRD03_CHZ
6_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet- Hız grafiği

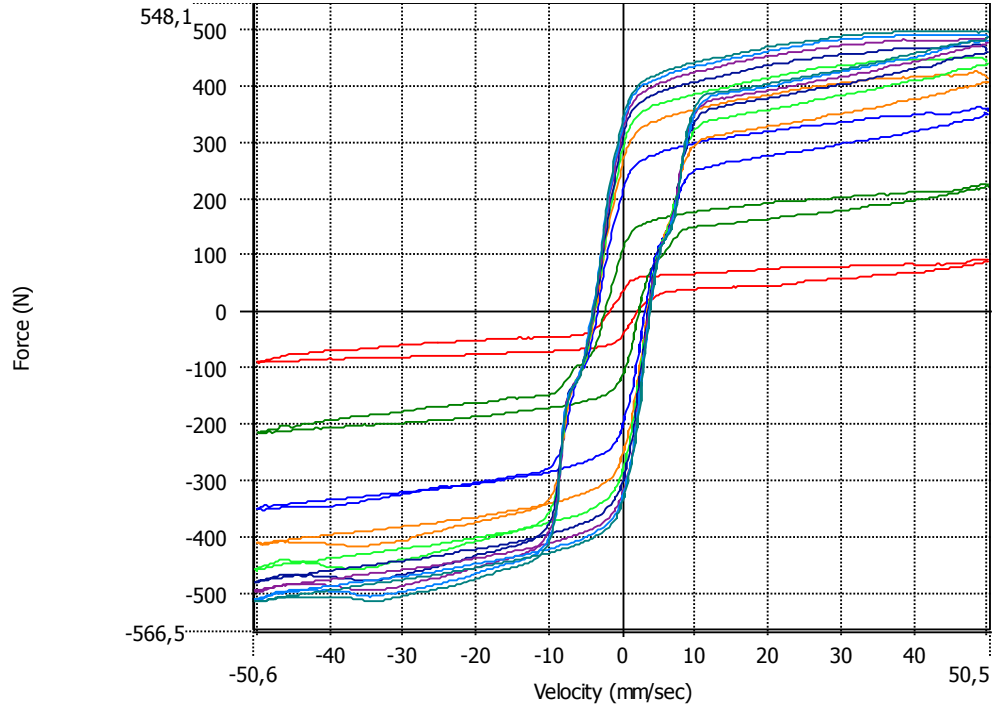
Şekil 4.25. $V=0.05$ m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 6 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
 7_hiz_0.05_deneme_
 1.MCR - 0 - 50,00
 mm/sec
 25 - 50,00 mm/sec
 50 - 50,00 mm/sec
 75 - 50,00 mm/sec
 100 - 50,00 mm/sec
 125 - 50,00 mm/sec
 150 - 50,00 mm/sec
 175 - 50,00 mm/sec
 200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet- Yer Değişirme

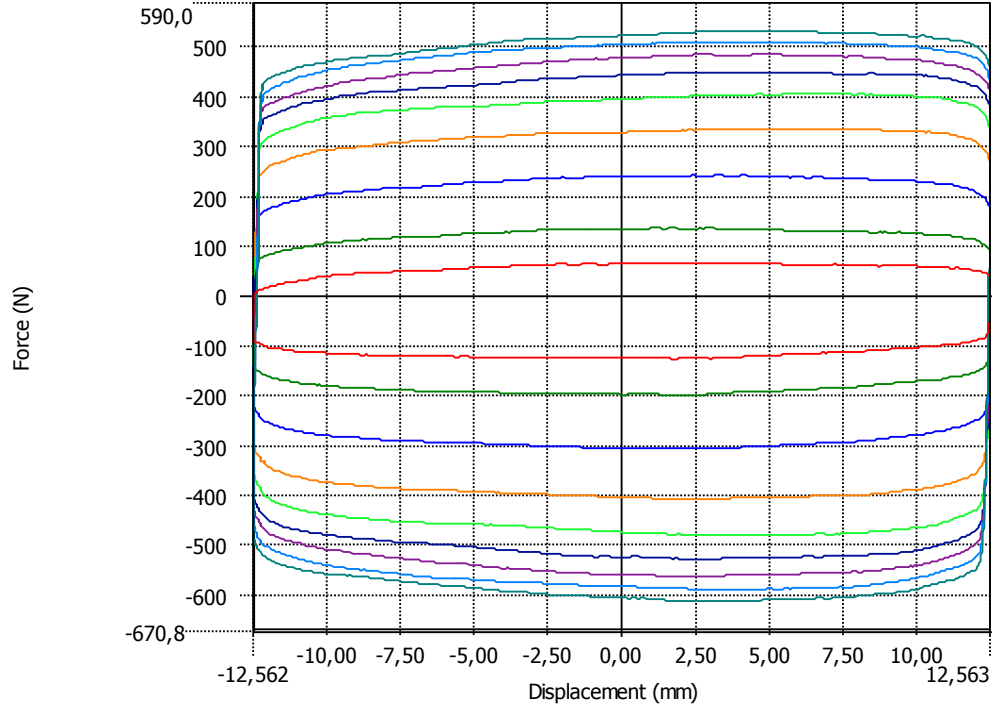
SAUMRD03_CHZ
 7_hiz_0.05_deneme_
 1.MCR - 0 - 50,00
 mm/sec
 25 - 50,00 mm/sec
 50 - 50,00 mm/sec
 75 - 50,00 mm/sec
 100 - 50,00 mm/sec
 125 - 50,00 mm/sec
 150 - 50,00 mm/sec
 175 - 50,00 mm/sec
 200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet- Hız grafiği

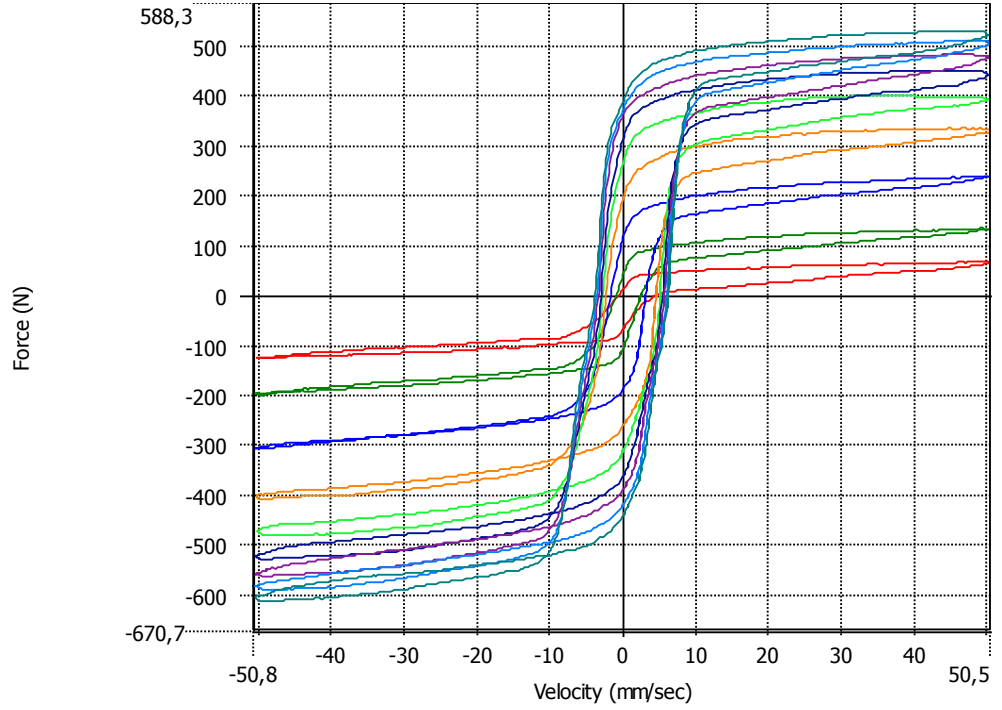
Şekil 4.26. $V=0.05$ m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 7 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
8_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet- Yer Değişirme

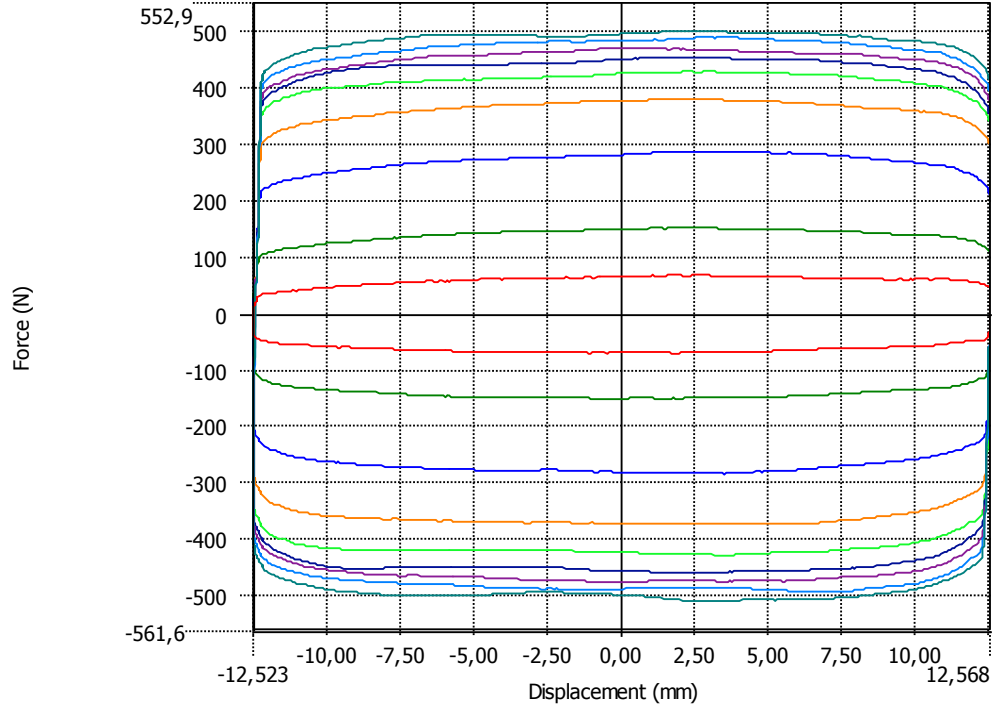
SAUMRD03_CHZ
8_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet- Hız grafiği

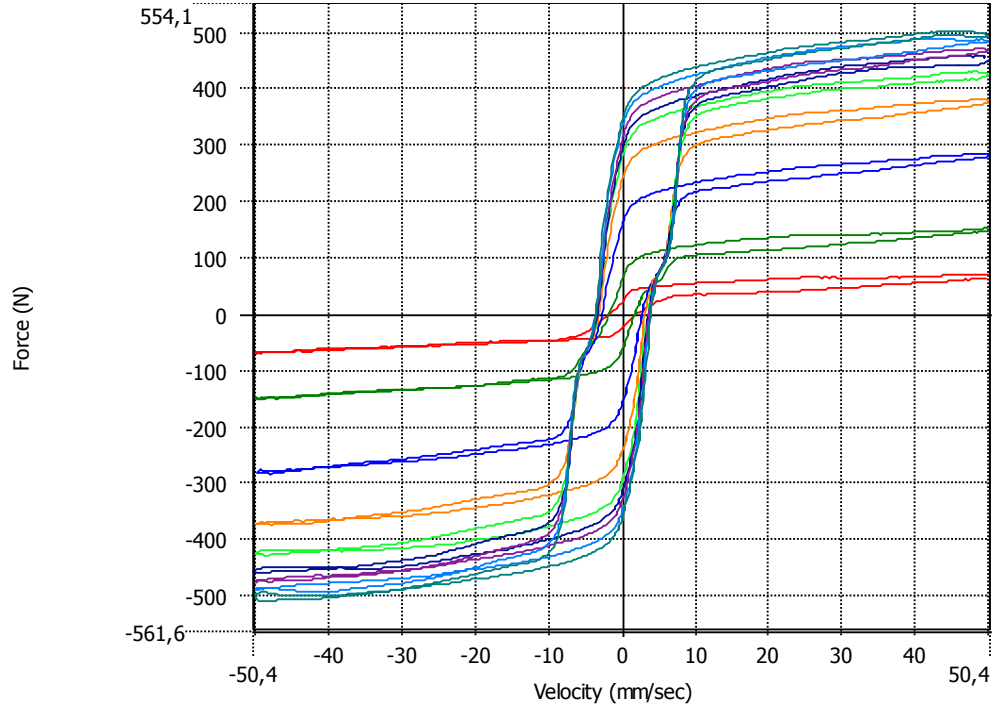
Şekil 4.27. $V=0.05$ m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 8 test sonuçları

SAUMRD03_CHZ
9_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(a) Kuvvet- Yer Değişirme

SAUMRD03_CHZ
9_hiz_0.05_deneme_
1.MCR - 0 - 50,00
mm/sec
25 - 50,00 mm/sec
50 - 50,00 mm/sec
75 - 50,00 mm/sec
100 - 50,00 mm/sec
125 - 50,00 mm/sec
150 - 50,00 mm/sec
175 - 50,00 mm/sec
200 - 50,00 mm/sec



(b) Kuvvet- Hız grafiği

Şekil 4.28. $V=0.05$ m/s ve 0.125 m yer değiştirmede Cihaz 9 test sonuçları

Tablo 4.2. MR damperden 0,015 m genlikte elde edilen basma ve çekme kuvvet değerleri (N)

v (mm/s)	Akım (A)	MRD3 CH1		MRD3 CH2		MRD3 CH3		MRD3 CH4		MRD3 CH5		MRD3 CH6		MRD3 CH7		MRD3 CH8		MRD3 CH9	
		BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME
5	0,000	-96	185	-95	239	-81	214	-68	128	-84	83	-83	90	-102	80	-92	74	-42	84
	0,250	-380	481	-325	481	-391	530	-256	326	-301	321	-147	157	-224	210	-137	125	-99	146
	0,500	-639	748	-490	660	-584	730	-418	501	-546	560	-257	280	-324	321	-244	239	-206	266
	0,750	-759	869	-561	745	-684	822	-517	596	-640	656	-351	381	-373	377	-344	349	-297	366
	1,000	-827	930	-603	793	-731	883	-566	649	-694	718	-410	445	-411	409	-415	418	-349	416
	1,250	-881	988	-635	834	-773	910	-610	696	-723	747	-449	483	-432	439	-456	454	-382	454
	1,500	-911	1002	-651	850	-798	928	-636	725	-761	783	-470	507	-442	457	-487	486	-405	475
	1,750	-925	1021	-669	870	-813	963	-653	742	-768	799	-496	525	-466	466	-499	504	-429	490
2,000	-948	1061	-683	889	-822	970	-672	754	-768	798	-509	546	-467	497	-506	516	-436	506	
10	0,000	-156	241	-138	292	-139	254	-93	144	-122	107	-115	119	-107	80	-110	92	-58	103
	0,250	-460	558	-440	566	-508	623	-250	310	-405	410	-226	240	-242	226	-189	172	-150	201
	0,500	-700	806	-668	793	-676	811	-457	536	-597	607	-328	347	-353	349	-281	272	-248	303
	0,750	-841	950	-773	901	-759	906	-560	648	-684	702	-411	436	-411	405	-378	379	-331	389
	1,000	-918	1029	-828	951	-808	965	-616	704	-748	763	-459	490	-440	438	-450	454	-377	441
	1,250	-974	1084	-869	993	-845	993	-659	750	-788	803	-491	526	-457	457	-489	497	-402	471
	1,500	-1004	1124	-900	1034	-876	1012	-678	776	-818	833	-514	552	-472	474	-516	523	-423	492
	1,750	-1033	1152	-918	1045	-892	1041	-692	790	-838	854	-533	572	-488	487	-536	551	-441	511
2,000	-1055	1177	-931	1062	-910	1058	-711	805	-855	873	-549	587	-500	501	-547	563	-454	529	
15	0,000	-50	62	-241	265	-175	316	-120	171	-69	66	-45	55	-60	65	-51	58	-41	56
	0,250	-501	598	-533	578	-548	702	-334	397	-446	436	-236	248	-256	234	-214	196	-178	228
	0,500	-737	843	-711	763	-723	881	-499	566	-583	592	-353	374	-364	340	-305	291	-278	330
	0,750	-880	992	-803	851	-808	966	-592	656	-682	691	-440	466	-417	395	-401	391	-361	416
	1,000	-955	1071	-853	906	-856	1011	-640	705	-745	751	-499	521	-448	429	-466	464	-406	467
	1,250	-1004	1120	-880	937	-892	1042	-669	738	-787	795	-533	558	-470	452	-508	509	-435	496
	1,500	-1039	1158	-909	961	-918	1071	-693	764	-814	827	-554	582	-486	468	-536	534	-457	520
	1,750	-1068	1187	-927	979	-932	1086	-713	784	-837	849	-573	601	-500	485	-558	561	-472	537
2,000	-1088	1208	-944	993	-948	1096	-727	800	-860	867	-587	615	-511	495	-579	585	-485	550	
20	0,000	-212	284	-280	304	-203	339	-134	182	-151	127	-156	158	-116	92	-101	165	-92	130
	0,250	-504	597	-588	622	-584	733	-350	404	-413	394	-254	262	-276	262	-182	244	-182	222
	0,500	-735	830	-762	800	-763	919	-522	578	-603	594	-382	396	-399	394	-274	344	-301	346
	0,750	-883	980	-850	890	-846	1001	-611	668	-692	687	-476	493	-455	458	-375	447	-385	434
	1,000	-960	1061	-898	940	-894	1046	-658	719	-744	743	-531	549	-488	489	-447	523	-433	485
	1,250	-1013	1116	-925	970	-925	1080	-690	748	-782	779	-561	579	-511	512	-492	572	-463	515
	1,500	-1041	1149	-952	990	-951	1103	-713	772	-811	814	-582	603	-525	528	-524	602	-483	538
	1,750	-1069	1176	-969	1008	-967	1113	-730	784	-834	838	-599	620	-537	539	-546	625	-500	552
2,000	-1092	1201	-982	1022	-977	1130	-745	797	-843	843	-615	632	-546	547	-562	643	-512	566	

Tablo 4.3. MR damperden 0.025 m genlikte elde edilen basma ve çekme kuvvet değerleri (N)

v (mm/s)	Akım (A)	MRD3 CH1		MRD3 CH2		MRD3 CH3		MRD3 CH4		MRD3 CH5		MRD3 CH6		MRD3 CH7		MRD3 CH8		MRD3 CH9	
		BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME
5	0,000	-84	219	-129	185	-99	232	-69	127	-33	150	-82	102	-65	121	-70	125	-47	95
	0,250	-363	499	-405	450	-386	522	-220	277	-294	417	-168	193	-190	253	-143	192	-128	176
	0,500	-579	723	-568	615	-658	808	-435	502	-446	572	-281	321	-327	390	-251	296	-261	308
	0,750	-697	847	-662	700	-742	905	-537	611	-530	652	-369	426	-390	453	-352	393	-352	405
	1,000	-813	935	-715	747	-804	964	-598	668	-580	701	-426	486	-432	479	-425	458	-406	454
	1,250	-831	967	-748	779	-848	1009	-630	693	-618	742	-462	522	-453	501	-472	507	-438	482
	1,500	-875	1005	-770	801	-891	1056	-655	718	-646	761	-492	549	-470	513	-507	541	-453	495
	1,750	-912	1039	-787	824	-913	1076	-674	732	-664	777	-540	569	-486	520	-534	569	-471	512
2,000	-898	1023	-807	846	-926	1088	-689	744	-660	789	-558	588	-489	526	-557	588	-489	526	
10	0,000	-180	228	-195	240	-167	284	-110	156	-75	193	-123	139	-78	137	-92	131	-67	106
	0,250	-505	558	-498	530	-532	671	-312	373	-346	473	-235	251	-238	286	-176	213	-172	211
	0,500	-765	819	-678	695	-714	858	-487	554	-500	627	-361	373	-371	413	-279	318	-291	330
	0,750	-921	960	-769	782	-791	952	-587	649	-582	712	-459	471	-441	474	-382	420	-394	428
	1,000	-1010	1047	-824	835	-839	1002	-651	707	-627	762	-516	530	-480	502	-460	495	-452	486
	1,250	-1072	1105	-860	868	-872	1030	-686	744	-666	797	-550	561	-501	524	-501	538	-490	523
	1,500	-1119	1151	-881	894	-900	1060	-714	764	-690	825	-575	587	-517	541	-532	570	-516	551
	1,750	-1152	1188	-896	913	-921	1086	-738	782	-713	844	-591	607	-529	552	-558	594	-532	568
2,000	-1171	1199	-915	927	-933	1096	-748	794	-728	855	-605	626	-541	560	-584	617	-543	580	
15	0,000	-136	254	-244	281	-201	324	-131	173	-65	167	-145	165	-97	152	-111	149	-81	113
	0,250	-425	555	-562	584	-586	726	-352	409	-345	468	-269	285	-263	309	-194	234	-183	220
	0,500	-680	803	-740	754	-773	913	-526	583	-518	630	-402	413	-412	426	-297	340	-311	342
	0,750	-808	949	-830	843	-860	1000	-614	673	-601	716	-500	511	-471	489	-401	446	-411	440
	1,000	-920	1003	-887	899	-909	1062	-660	715	-652	763	-557	570	-514	543	-472	520	-466	494
	1,250	-928	1076	-919	929	-944	1092	-694	755	-691	798	-591	606	-530	568	-519	565	-501	530
	1,500	-1011	1086	-956	958	-964	1114	-726	795	-720	824	-614	629	-549	580	-554	600	-528	553
	1,750	-1006	1161	-971	974	-984	1129	-745	803	-756	853	-630	651	-558	586	-579	623	-548	572
2,000	-1021	1167	-976	986	-994	1138	-764	826	-755	873	-645	665	-567	592	-594	643	-564	582	
20	0,000	-165	298	-266	300	-218	331	-150	184	-274	437	-174	182	-120	172	-126	162	-93	123
	0,250	-463	602	-599	612	-614	743	-367	406	-452	593	-291	306	-295	337	-207	245	-201	233
	0,500	-696	843	-782	789	-809	945	-547	585	-639	786	-425	438	-423	466	-312	350	-327	359
	0,750	-857	1001	-874	872	-888	1024	-641	676	-709	853	-523	539	-490	527	-413	452	-430	460
	1,000	-944	1086	-927	919	-937	1072	-689	720	-746	892	-582	598	-527	557	-487	525	-486	513
	1,250	-996	1136	-968	951	-974	1107	-719	750	-773	927	-614	631	-546	578	-532	571	-516	543
	1,500	-1035	1176	-988	979	-997	1130	-746	772	-797	947	-636	657	-561	589	-566	598	-541	568
	1,750	-1065	1204	-1003	993	-1019	1148	-759	800	-815	974	-655	676	-578	604	-588	621	-562	587
2,000	-1098	1225	-1013	1010	-1031	1153	-778	802	-823	974	-668	688	-587	601	-605	637	-574	607	

Tablo 4.2 ve 4.3 incelendiğinde MR damperin davranışına etki eden en temel parametrelerin sıvının aktığı kanal genişliği ve uygulana akım olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 4.1’de verilen aday geometri özellikleri incelendiğinde, en fazla damper kuvveti üreten Cihaz 1, 2 ve 3’ün 0.6 mm kanal genişliğine, en az damper kuvveti üreten Cihaz 6, 7 ve 9’un 1 mm kanal genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Bu aynı zamanda beklenen bir durumdur. Ancak burada önemli olan husus, kanal genişliğinin aynı zamanda sıvı sürtünmesinden kaynaklanan viskoz sürtünme kuvvetlerini önemli ölçüde etkilemesidir. Bu sebeple en uygun damper geometrisin aranmasında mümkün olan en büyük kanal genişliğinin bulunması önemlidir. Kanal genişliğinin artırılması durumunda ise üretilen manyetik alan hızla azalma göstermektedir. Bu durumda önemli olan hedeflenen uygulama akımına göre en büyük kanal genişliği bulunmalıdır.

Tablo 4.3’deki sayısal verilerin akım kademelerine göre yüzde artış oranları incelenmiştir (Tablo 4.4) . Bu verilerden en etkili akım kademelerini ilk iki akım değeri olduğu görülmektedir. Sonraki iki akım kademesi biraz daha etkisini yitirmiş görülmektedir. Akım değeri 1 A’dan sonra diğerlerindeki artış oranlarının uygulanan akıma göre çok olmadığı görülmektedir. Bu ilişkiyi Şekil 4.11-28’verilen grafiklerde de görmek mümkündür. Bu durum manyetik malzemelerde görülen doyum olayının bir sonucudur. Dolayısı ile en düşük güç tüketimini elde edebilmek için malzemenin manyetik doyum değeri de önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tablo 4.4. MR damper kuvvetlerinin akıma bağlı yüzde artış değerleri

v (m)	Akım (A)	MRD3 CH1		MRD3 CH2		MRD3 CH3		MRD3 CH4		MRD3 CH5		MRD3 CH6		MRD3 CH7		MRD3 CH8		MRD3 CH9	
		BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME	BASMA	ÇEKME
5	0,250	334	127	215,0	143	289,6	125	219,7	118	795,2	177	103,9	89,4	192,3	110	104,4	53,6	170,3	85,3
	0,500	59,4	44,7	40,1	36,7	70,5	54,7	98,0	81,0	52,0	37,2	67,5	66,8	72,0	53,9	75,4	54,1	104,0	75,2
	0,750	20,4	17,1	16,6	13,8	12,8	12,1	23,7	21,7	18,7	13,9	31,4	32,5	19,0	16,2	39,9	32,8	34,5	31,4
	1,000	16,6	10,5	8,0	6,6	8,4	6,5	11,2	9,3	9,5	7,6	15,6	14,1	11,0	5,7	20,8	16,6	15,4	12,1
	1,250	2,3	3,4	4,7	4,3	5,4	4,7	5,5	3,7	6,4	5,8	8,5	7,4	4,8	4,6	11,2	10,7	7,9	6,1
	1,500	5,2	3,9	3,0	2,8	5,1	4,6	3,9	3,7	4,6	2,7	6,4	5,2	3,8	2,3	7,4	6,7	3,5	2,7
	1,750	4,3	3,4	2,2	2,9	2,5	2,0	2,9	1,9	2,8	2,1	9,8	3,7	3,2	1,4	5,2	5,2	3,8	3,5
	2,000	1,6	1,5	2,5	2,6	1,5	1,1	2,3	1,6	0,7	1,5	3,3	3,2	0,6	1,1	4,4	3,2	3,8	2,8
	0,250	181,0	145	155,4	120	218,4	136	183,2	138	359,3	144	91,3	81,1	205,6	109	91,2	62,5	157,7	99,7
0,500	51,4	46,8	36,0	31,2	34,3	28,0	56,3	48,5	44,5	32,5	53,6	48,6	56,1	44,5	58,8	49,4	68,9	56,0	
0,750	20,4	17,2	13,4	12,6	10,9	10,9	20,4	17,0	16,4	13,6	27,0	26,2	18,9	14,7	37,2	32,0	35,2	29,7	
1,000	9,7	9,0	7,1	6,7	6,0	5,3	11,0	9,0	7,7	7,0	12,4	12,6	8,8	5,8	20,3	17,9	14,8	13,7	
1,250	6,1	5,5	4,4	4,0	4,0	2,8	5,4	5,2	6,3	4,5	6,5	5,9	4,3	4,5	8,9	8,8	8,3	7,5	
1,500	4,3	4,2	2,4	3,0	3,2	2,9	4,1	2,7	3,7	3,5	4,6	4,6	3,3	3,2	6,3	5,8	5,4	5,4	
1,750	3,0	3,2	1,8	2,1	2,4	2,4	3,3	2,4	3,3	2,4	2,8	3,4	2,3	2,1	4,8	4,3	3,0	3,0	
2,000	1,7	0,9	2,1	1,5	1,3	0,9	1,4	1,5	2,1	1,2	2,2	3,1	2,2	1,5	4,6	4,0	2,2	2,1	
0,250	212,3	118	130,0	107	191,3	124	168,0	136	430,3	179	85,6	72,8	170,7	102	74,3	56,6	126,2	95,4	
0,500	59,7	44,7	31,7	29,2	31,9	25,8	49,5	42,6	50,0	34,7	49,8	45,0	56,7	38,0	52,9	45,2	69,6	55,8	
0,750	18,8	18,2	12,1	11,8	11,2	9,5	16,8	15,4	16,0	13,7	24,2	23,8	14,3	14,8	35,1	31,2	32,2	28,5	
1,000	14,0	5,7	6,9	6,5	5,8	6,2	7,3	6,2	8,5	6,5	11,4	11,6	8,9	11,0	17,8	16,7	13,5	12,2	
1,250	0,8	7,3	3,6	3,4	3,9	2,8	5,3	5,6	6,1	4,6	6,0	6,3	3,3	4,6	10,0	8,5	7,4	7,3	
1,500	9,0	0,9	4,1	3,1	2,0	2,0	4,6	5,3	4,1	3,2	4,0	3,9	3,5	2,1	6,7	6,3	5,5	4,3	
1,750	0,5	6,9	1,5	1,6	2,1	1,4	2,6	1,0	5,0	3,6	2,5	3,4	1,6	1,1	4,5	3,8	3,8	3,4	
2,000	1,5	0,5	0,5	1,2	1,0	0,8	2,5	2,9	0,1	2,3	2,5	2,2	1,6	0,9	2,6	3,1	2,9	1,8	
0,250	180,0	102	125,3	103	181,5	124	144,1	120	64,6	35,9	67,2	67,8	146,2	95,6	63,5	50,8	116,4	89,5	
0,500	50,4	39,9	30,5	28,9	31,7	27,2	49,1	44,2	41,5	32,5	46,3	43,0	43,3	38,2	50,9	42,9	62,6	53,9	
0,750	23,1	18,8	11,7	10,5	9,8	8,4	17,3	15,4	10,8	8,5	23,0	23,3	15,7	13,2	32,4	29,3	31,6	28,2	
1,000	10,1	8,5	6,1	5,4	5,5	4,7	7,4	6,5	5,3	4,6	11,2	10,9	7,6	5,7	17,8	16,0	13,2	11,5	
1,250	5,6	4,6	4,4	3,5	3,9	3,2	4,4	4,2	3,6	3,9	5,5	5,5	3,6	3,7	9,3	8,8	6,1	5,8	
1,500	3,9	3,5	2,1	3,0	2,3	2,1	3,8	3,0	3,2	2,2	3,7	4,1	2,8	1,9	6,3	4,8	4,8	4,5	
1,750	2,9	2,4	1,5	1,4	2,2	1,6	1,8	3,6	2,3	2,8	2,9	2,9	3,0	2,5	3,8	3,8	4,0	3,4	
2,000	3,1	1,7	1,0	1,7	1,2	0,4	2,5	0,2	1,0	0,0	2,1	1,9	1,5	0,4	3,0	2,4	2,0	3,4	

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan sonlu eleman analizleri sayesinde MR damperin optimum geometrisi araştırılmıştır. Bu araştırma için manyetik alan ve akışkan akışı sonlu eleman analizleri ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Her ikisinde de belirlenen geometrik ve diğer büyüklüklerin değerleri yine belirlenen sınırları içindeki en uygun koşulları araştırılmıştır. Manyetik alan analizlerinde en uygun değerleri (kanal genişliği, kutup başı uzunluğu, piston kafası toplam uzunluğu, manyetik akı geri dönüş genişliği, çekirdek yarıçapı), en büyük manyetik akı yoğunluğunu, uygulanacak olan en küçük akım değeri ile elde edilecek şekilde optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Akışkan akışı analizlerinde ise hedef kuvvet değeri olarak belirlenen 1000 N değerini, en küçük akma gerilmesi (en küçük akım değeri) koşullarında optimal kanal genişliği ve kutup başı uzunluğu değerleri elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen analizler neticesinde hem manyetik alan analizinden hem de akışkan akışı analizinden ayrı ayrı en uygun değerler elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen bu en uygun değerler çaprazlama analizde, hangi değerlere karşılık geldikleri incelenmiştir. Yani manyetik alan analizi sonucunda bulunan en uygun değerler, akış analizinde kullanılarak bu değerlere karışık gelen damper kuvveti ve akış analizinde bulunan en uygun değerler, manyetik alan analizine konularak bunların hangi manyetik akı değerinde ve bu değerlerin hangi akım ve hangi kalınlıktaki kablo ile elde edilebileceği incelenmiştir.

Sonuç olarak, hedef değer olan 1000 N damper kuvveti değerinin en küçük akma gerilmesi koşulunda, hangi kanal genişliği ve hangi kutup başı uzunluğunda meydana geldiği sonlu eleman akışkan analizi ile bulunmuştur. Kısaca kanal genişliği ve kutup başı için optimal değerlere akışkan analizi ile karar verilmiş olup, bu iki değer ve hedef değer olan 1000 N'u elde etmek için gerekli olan akma gerilmesine karşılık gelen manyetik akı yoğunluğunun diğer hangi geometrik büyüklükler (piston kafası toplam uzunluğu, Manyetik akı geri dönüş genişliği, Çekirdek yarıçapı) ile elde edileceğine ise sonlu eleman manyetik alan analizi neticesinde karar verilmiştir. Tüm bu sonlu eleman analizleri yapılan optimizasyon çalışmaları neticesinde, ortaya yeni bir yöntem koyulmuştur. Bu yöntem, hem sonlu eleman akışkan akışı analizi hem de sonlu eleman manyetik alan analizi beraber kullanılarak bir MR damper için optimum değerlerin tespit edilmesidir.

Ayrıca bu çalışma kapsamında deneysel sonuçlar değerlendirilerek uygun geometriyi tespit etmek için Taguchi deneysel tasarım çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde 4 parametre (kanal genişliği, kutup başı uzunluğu, bobin tel çapı, akım) tespit edilmiş ve bu belirlenen parametreler ile 9 adet aday geometrideki damperler imal edilmiştir. Taguchi analizi neticesinde deneysel sonuçlar kullanılarak bir en uygun geometri belirlenmiştir. Ayrıca Taguchi çalışması sonucunda damper için en önemli büyüklüğün kanal genişliği ve akım olduğunun tespiti yapılmıştır. Kutup başı uzunluğu ve bobin teli çapları hedef damper kuvveti ve dinamik aralık açısından ciddi bir öneme sahip olmadıkları görülmüştür.

Tablodaki hata değerlerinin incelenmesinden Kwok modelinin en az hata değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Diferansiyel ifade içeren modellere göre oldukça basit olan bu model her  hata tanımlama yönteminde de en az hata değerini elde etmiştir. Diğer cebirsel ifadeli Alg (Guo) modeli ise genel ortalamanın altında bir hata değeri ile Kwok modeline yakın hata değerleri elde etmiştir. Hatta 0.2 m/s hız değerinde daha düşük hata değerleri elde etmiştir.

Klasik BW modeli tüm hata değerlerinde de en kötü değere sahiptir. Ancak mBW ve amBW modeli ortalamanın altında bir hata değeri elde etmişlerdir. mLFM ve mDM modellerinde ise genel ortalamanın üstünde hata değerleri hesaplanmıştır. Genel olarak beklenenin aksine cebirsel modeller yapılarının basitliği, modelleme kolaylığı, parametrelerinin kolay elde edilebilirliğinin yanında düşük hata değerleri ile öne çıkmaktadırlar.

6. KAYNAKLAR

- ALVAREZ L, ve JIMENEZ R, "Real-Time Identification Of Magneto-Rheological Dampers", IFAC 15th Triennial World Congress, (2002). Barcelona, Spain,
- ÇEŞMECİ Ş. Ve ENGİN T, M.Sc, "Modeling And Testing Of A Field-Controllable Magnetorheological Fluid Damper", Journal of Mechanical Sciences. (Basımda)
- DELIVORES R.P, "Application of ER and MR fluid in an Automotive Crash Energy Absorber", Eindhoven University of Technology Department of Mechanical Engineering. Eindhoven : s.n., 2004. Report No. MT04.18.
- FERAH M, "Çok Yanıtlı Taguchi Tasarım Metodu ve Alüminyum Sanayinde Bir Uygulama". s.l. : Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2003). Yüksek Lisans Tezi.
- GUO D, ve HU H, "Nonlinear Stiffness of a Magneto-Rheological Damper" , Nonlinear Dynamics (2005) 40: 241–249
- HITCHCOCK G.H, "A Novel Magneto-Rheological Fluid Damper", Reno, Mechanical Engineering Department, University of Nevada, (2002). Master thesis.
- JIMENEZ R, ALVAREZ-ICAZA L., "Lugre Friction Model For A Magneto Rheological Damper", Structural Control And Health Monitoring, Struct. Control Health Monit. (2005); 12:91–116
- KARAKOÇ K., M.Sc. "Design of a Magnetorheological Brake System Based on Magnetic Circuit Optimization", University of Victoria in the Department of Mechanical Engineering., 2007.
- KARAKOÇ K, PARK E. J., SULEYMAN A. "Design considerations for an automotive Magnetorheological brake", Mechatronics, 2008, Cilt 18, s. 434–447.
- KAYI Y, "Plastik Enjeksiyon Prosesindeki Parametrelerin Çekme Problemine Etkilerinin Taguchi Metodu İle İncelenmesi". s.l. : Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2006) Yüksek Lisans Tezi.
- KWOK N.M., HA Q.P, NGUYEN T.H, Lİ J, SAMALİ B, "A Novel Hysteretic Model For Magneto Rheological Fluid Dampers And Parameter Identification Using Particle Swarm Optimization", Sensors and Actuators A 132 (2006) 441–451.
- LORD CORP. MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid. [Çevrimiçi]
<http://www.lordfulfillment.com/upload/DS7015.pdf>.
- LORD CORPORATION. Design with MR Fluids. December (2010). [Çevrimiçi] Engineering Note.
http://www.lord.com/Portals/0/MR/designing_with_MR_fluids.pdf
- LORD CORPORATION. Engineering Note. Magnetic Circuit Design. (2010) [Çevrimiçi]
http://www.lord.com/Portals/0/MR/Magnetic_Circuit_Design.pdf.
- LORD CORPORATION. Lord Technical Data. [Çevrimiçi]
<http://www.lordfulfillment.com/upload/DS7015.pdf>.
- LORD CORPORATION. Lord Technical Data. MR fluid product bulletions online. [Çevrimiçi] 2003.
<http://www.rheonetic.com/fluidbegin.htm>.
- NGUYEN Q. N, CHOI S. B, WERELEY N. M, "Optimal design of Magnetorheological valves via a finite element method considering control energy and a time constant", Smart Materials and Structures, Cilt 17, s. 12pp. 2008.
- NGUYEN Q.H, CHOI S.B, "Dynamic modeling of an Electrorheological damper considering the unsteady behavior of Electrorheological fluid flow". Smart Materials and Structures, 2009, Cilt 18, s. 8pp.

NGUYEN Q. H, HAN Y.M, CHOI S.B, WERELEY N.M, "Geometry optimization of MR valves constrained in a specific volume using the finite element method". Smart Materials and Structures, (2007) Cilt 16, s. 2242-2252 .

ROY R. K. "Design Experiments Using The Taguchi Approach:16 steps to product and process improvement", A Wiley-Interscience Publication, (2003) New York ,.

SALVETTI M, Detector Solenoid: Thermal and Structural analyses. Magnet Documents. [Çevrimiçi] http://meco.ps.uci.edu/old/magnet_docs/mm056.pdf.

SPENCER B. F, DYKE S. J, SAIN M. K, Carlson, J. D, "Phenomenological Model Of A Magneto Rheological Damper" J. Eng. Mech. 123 (1997), 230—238.

SPENCER B. F, YANG G, CARLSON J.D, SAIN M. K, "Smart Dampers for Seismic Protection of Structures", Second World Conference on Structural Control A Full-Scale Study. Kyoto, Japan :, June 28 – July 1, 1998.

ŞİRVANCI M. "Kalite İçin Deney Tasarımı, Taguchi Yaklaşımı". İstanbul: Literatür Yayıncılık, (1997).

WEISS K. D, CARLSON J. D, NIXON, D, "Viscoelastic Properties of Magneto- and Electro-Rheological Fluids.", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, A. 6, 1994, , Vol. 5, pp. 772-775.

WERELEY N.M, ROSENFELD N.C, "Volume-constrained optimization of magnetorheological and electrorheological valves and dampers", Smart Mater. Struct, 2004, Cilt 13, s. 1303–1313.

ZHANG H. H, Liao, C. R, CHEN, W. M, HUANG, S. L, "A Magnetic Design Method of MR Fluid Dampers and FEM Analysis on Magnetic Saturation". Journal Of Intelligent Material Systems And Structures, 2006, Cilt 17, s. 813-818.

ZHOUA Q, NIELSENB S.R.K, QUA W.L, "Semi-Active Control Of Shallow Cables With Magneto Rheological Dampers Under Harmonic Axial Support Motion" Journal of Sound and Vibration 311 (2008) 683–706

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 108 M 635
Proje Başlığı: Manyeto Reolojik Damper Optimizasyonu Ve Dinamik Model Parametrelerinin Tayini
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Proj. Yürütücüsü: Yrd. Doç. Dr. İsmail ŞAHİN Doç.Dr. Tahsin ENGİN Yük. Müh. Zekeriya Parlak
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Sakarya Üniversitesi Akyazı MYO. Akyazı/SAKARYA
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 15/02/2009—15/02/2010
Öz (en çok 70 kelime): Manyeto Reolojik (MR) Damper Yarı aktif bir kontrol elemanıdır. Bu çalışmada, damper geometrisini optimize etmek amacıyla MR damper piston kafasına açılan akış kanalındaki MR sıvı akışı, hem hesaplamalı akışkanlar dinamiği hem de manyetik alan analizi beraber incelenmiştir. Belirlenen bir hedef kuvvete göre geometrinin en uygun biçime getirilmesi işlemine paralel olarak, MR damper histerisiz davranışının da tahmin edilebildiği hem cebirsel hem de zamana bağlı dinamik modeller incelenmiştir.
Anahtar Kelimeler: Manyeto Reolojik damper, Yarı aktif kontrol, Taguchi optimizasyon metodu, Dinamik model, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/> Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.
Projeden Yapılan Yayınlar: <ol style="list-style-type: none">Sahin, İ., Engin, T., and Çeşmeci, Ş., "Comparison of Some Existing Parametric Models for Magnetorheological Fluid Dampers," Smart Materials and Structures, 19 (Paper No: 035012), 11pp, 2010.Parlak Z., Sahin, İ., Engin, T., Dynamic characterization of a vehicle magnetorheological shock absorber", Int. J. Of Vehicle Design, Vol. x, No. x, xxxx.,2010. (Kabul edildi, yayınlanmak için bekliyor)