

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

**KISITLI AÇILI DÖNEL MANYETO-REOLOJİK
DAMPER TASARIMI VE GEOMETRİK
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan DOĞAN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ
Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr.İsmail ŞAHİN

Haziran 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KISITLI AÇILI DÖNEL MANYETO-REOLOJİK
DAMPER TASARIMI VE GEOMETRİK
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

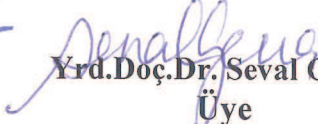
Hakan DOĞAN

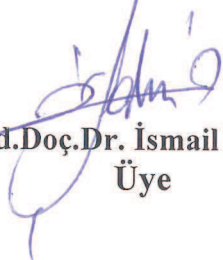
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez 21 / 06 /2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Tahsin ENGİN
Jüri Başkanı


Yrd.Doç.Dr. Seval GENÇ
Üye


Yrd.Doç.Dr. İsmail ŞAHİN
Üye

BEYAN

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

Hakan DOĞAN

../06/2017

TEŞEKKÜR

Görev aldığım 1505-5140003 ve 115M363 numaralı projeler kapsamında danışmanlığımı yapan, desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen tez direktörüm Yrd.Doç.Dr. İsmail Şahin’e, tecrübelerini ve bilgilerini benimle paylaşan Yrd.Doç.Dr. Zekeriya Parlak’a, Ar.Gör. Muaz Kemerli’ye, Makine Yüksek Mühendisi Ahmet Aydın’a, Gökhan Canbolat’a, Makine Mühendisi Sercan Çam’a, Sevkan Güner’e, Neslihan Karaca’ya bu süreç boyunca hep yanımda olan kıymetli aileme ve yüksek lisansa başvuru yapmama vesile olan Mert Turan’a teşekkürü borç bilirim.

1505-5140003 ve 115M363 numaralı projeler kapsamında maddi desteğinden ötürü TUBİTAK’a , lisansüstü tez projesi kapsamında (FBYLTEZ 2016-50-01-020) maddi desteğinden ötürü Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığına teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.	1
1.1. Literatür Çalışması.....	2
1.1.1. Sürekli açılı dönel MR damper.....	2
1.1.2. Kısıtlı açılı dönel MR damper	4
1.1.3. MR damper manyetik alan analizi.....	5
1.1.4. MR sıvının yapısı.....	7
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	8
BÖLÜM 2.	
MANYETO-REOLOJİK SIVILAR.....	9
2.1. Akıllı Sıvılar.....	10
2.1.1. MR sıvılar	12
2.1.2. MR sıvının çalışma modları	15
2.1.3. MR sıvının akış modelleri	16
2.1.4. MR sıvı uygulamaları	18

BÖLÜM 3.	
KAD-MR DAMPER TASARIMI	26
 BÖLÜM 4.	
KAD-MR DAMPERİN MANYETİK ALAN ANALİZİ	30
4.1. Manyetik Alanın Sayısal Olarak Hesaplanması.....	33
4.1.1. Manyetik alan optimizasyon çalışması.....	36
4.1.2. Manyetik alan optimizasyon sonuçları	37
 BÖLÜM 5.	
KAD-MR DAMPERİN AKIŞ ANALİZİ.....	41
5.1. Analitik Yöntemle Tork Hesabı	41
5.2. Akışın Sayısal Olarak Hesaplanması	43
5.2.1. Tasarım parametrelerinin tespiti ve geometri oluşturma	45
5.2.2. CFD için çözüm ağı	48
5.2.3. CFD analizi	50
5.2.4. CFD sonuçları	52
5.2.4.1. Akış hacmi dış çapı.....	52
5.2.4.2. Akış hacmi yatay uzunluğu.....	53
5.2.4.3. Kanal genişliği	53
5.2.4.4. Delik merkezinin yatay eksenindeki konumu.....	54
5.2.4.5. Delik çapı.....	55
5.2.5. Akış analizi temelli optimizasyon çalışması	56
5.2.6. Akış analizinin optimizasyon sonuçları	56
 BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
 KAYNAKLAR.....	65
EKLER	69
ÖZGEÇMİŞ	78

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

α	: Delik açısı (Derece)
A	: Akım (Amper)
A_k	: Kanadın yüzey alanı (mm^2)
β	: Kanat geometrisinin çalışma açısı (Derece)
B	: Manyetik akı yoğunluğu (Tesla)
B_{maks}	: Maksimum manyetik akı yoğunluğu (Tesla)
B_{min}	: Minimum manyetik akı yoğunluğu (Tesla)
B_{ort}	: Ortalama manyetik akı yoğunluğu (Tesla)
CFD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
d_k	: Kablo çapı (mm)
D_1	: Akış hacmi dış çapı (mm)
D_2	: Kanat dairesi çapı (mm)
D_3	: Delik çapı (mm)
e	: Epoksi kaplama kalınlığı (mm)
ER	: Elektro-reolojik
$\text{Fe}(\text{CO})_5$	: Demir-penta-karbonil
g	: Kanal genişliği (mm)
g_h	: Manyetik alanin dönüş genişliği (mm)
h_1	: Delik merkezinin dışarıya olan uzaklığı (mm)
H_m	: Manyetik alan şiddeti (kA/m)
H	: Akış hacmi yatay uzunluğu (mm)
H_k	: Devrenin k bağlantı noktasındaki manyetik alan şiddeti
I_k	: Bağlantının efektif uzunluğu
K	: Uyumluluk endeksi (Pa.s)
N_c	: Bobin sarım sayısı
Nm	: Moment birimi (Newton metre)

P_a	: Basınç birimi (Pascal)
Δp	: Toplam basınç düşümü (Pa)
Q	: Hacimsel debi ($m^3 \cdot s^{-1}$)
r	: Kanaldaki bir noktanın silindir merkezine göre yarıçapı (mm)
r_k	: Konik yarıçapı (mm)
R_b	: Bobin yarıçapı (mm)
R_d	: Saplama yarıçapı (mm)
Re	: Reynolds sayısı
R_k	: Kablo bağlantı delik yarıçapı (mm)
R_m	: Makara dış yarıçapı (mm)
RMS	: Kuadratik Ortalama
RSO	: Tepki Yüzeyi Optimizasyonu
R_1	: Akış hacmi dış yarıçapı (mm)
R_2	: Kanat dairesi yarıçapı (mm)
t_k	: Kutup başı uzunluğu (mm)
T_B	: Manyetik alana bağlı tork sönümü (Nm)
T_v	: Viskoz (kontrol edilemeyen) tork sönümü (Nm)
V	: Gerilim (Volt)
w	: Kanat kalınlığı (mm)
ω_k	: Kanadın açısal hızı (rad/sn)
W	: Güç (Watt)
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği (TmA^{-1})
μ_p	: Manyetik alandan bağımsız plastik viskozite (Pa.s)
μ_r	: Malzeme cinsine göre göreceli geçirgenlik
η	: Akışkanın dinamik viskozitesi (Pa.s)
λ	: Dinamik oran
$\dot{\gamma}$	: Deformasyon hızı (s^{-1})
φ	: Manyetik akı (Weber)
τ	: Kayma gerilmesi (Pa)
$\tau_y(B)$	: Manyetik alana bağlı olarak oluşan dinamik akma gerilmesi (Pa)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Çeşitli akışkan tipleri için τ ile $\dot{\gamma}$ ilişkisi	9
Şekil 2.2. MRF-132DG'nin akma gerilmesi-manyetik alan ilişkisi	14
Şekil 2.3. MRF-132DG'nin $B-H$ grafiği	14
Şekil 2.4. MR sıvıda manyetik alan altında oluşan zincir yapı	15
Şekil 2.5. MR sıvının çalışma modları a-Kayma b-Valf c-Sıkıştırma.....	15
Şekil 2.6. MR sıvının kayma gerilmesi ve hız profili bölgeleri	17
Şekil 2.7. Herschel-Bulkley modelde τ ile $\dot{\gamma}$ ilişkisi	17
Şekil 2.8. KAD-MRD'de MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı bölge	18
Şekil 2.9 Klasik MR damperin basitleştirilmiş kesit görüntüsü.....	19
Şekil 2.10. Volvo VN 770 ve amortisör dağılımları	19
Şekil 2.11. Volvo VN 770'de kullanılan amortisörler	20
Şekil 2.12. Volvo VN 770 tümsek testi	21
Şekil 2.13. The Dongting Lake Köprüsü, Çin	21
Şekil 2.14. The Dongting Lake'deki taşıyıcı kablolar MR damper uygulaması...	21
Şekil 2.15. MR damperli protez diz.....	22
Şekil 2.16. Deneğin 3km/h hızda yaptığı yürüyüş çevrimlerinin ortalamaları	22
Şekil 2.17. MRB-2107-3'ün şematik görünümü	23
Şekil 2.18. Alfa Romeo 147'de kısıtlı açılı dönel damper uygulaması.....	24
Şekil 2.19. A-kanat, B-valf gövdesi, C-valf yatakları, D-gövde, E-civata	24
Şekil 2.20. Çalışmada elde edilen tork sönüm değerleri	25
Şekil 2.21. Alfa 147 için gereken sönüm karakteristiği aralığı (gri bölge)	25
Şekil 3.1. Kavramsal tasarım süreç döngüsü	26
Şekil 3.2. Tasarımı gerçekleştirilen KAD-MR damper geometrisi	27
Şekil 4.1. MR damperde kullanılan bobinin manyetik döngüsü	31
Şekil 4.2. St37 çeliğine ait $B-H$ grafiği	32
Şekil 4.3. MRF-132DG'ye ait $B-H$ grafiği	32
Şekil 4.4. ANSYS Magnetostatic programı workbench ara yüzü	33

Şekil 4.5. Manyetik alan analizi için akış algoritması.....	33
Şekil 4.6. Manyetik alan analizi için tasarlanan geometri	34
Şekil 4.7 Manyetik alan analiz geometrisi üzerindeki büyüklükler	34
Şekil 4.8. MR sıvı üzerinde B’yi maksimuma ulaştırmak istediğimiz bölge.....	35
Şekil 4.9. Manyetik akı vektörlerinin büyüklüğü ve dağılımı.....	38
Şekil 4.10. PG8’de MR sıvı üzerindeki manyetik akı yoğunluğu	40
Şekil 4.11. PG8’deki manyetik akı yoğunluğu	40
Şekil 4.12. PG8 makarasındaki manyetik akı döngüsü.....	40
Şekil 5.1. KAD-MR damperde kanat geometrisi	42
Şekil 5.2. ANSYS v16.2’de CFD analizi için kullanılan modüller	44
Şekil 5.3. Akış analizinin algoritması.....	45
Şekil 5.4. Akış analizindeki parametreler (a)	46
Şekil 5.5. Akış analizindeki parametreler (b)	46
Şekil 5.6. Akış analizindeki parametreler (c)	47
Şekil 5.7. Akış analizindeki parametreler (d).....	47
Şekil 5.8. KAD-MRD’nin akış hacmine ait geometri	48
Şekil 5.9. Akış hacmi çözüm ağı.....	49
Şekil 5.10. Ağ bağımsızlığının grafiksel gösterimi	49
Şekil 5.11 Analiz kurulum ayarları	50
Şekil 5.12. Akış modeli türünün seçilmesi	51
Şekil 5.13. MRF-132DG’ye ait Herschel Bulkley parametreleri.....	51
Şekil 5.14. Akış hacmi dış çap-tork ilişkisi	52
Şekil 5.15. Akış hacmi yatay uzunluğu-tork ilişkisi.....	53
Şekil 5.16. Kanal genişliği-tork ilişkisi	54
Şekil 5.17. Delik merkezinin yatay eksenindeki konumu-tork ilişkisi.....	55
Şekil 5.18. Delik çapı-tork ilişkisi	55
Şekil 5.19. 0.040. sn’de P10’daki (-7.17 rad/sn) akım çizgileri.....	58
Şekil 5.20. 0.08. sn’de P10’daki (-7.17 rad/sn) akım çizgileri.....	58
Şekil 5.21. 0.12. sn’de P10’daki (-7.17 rad/sn) akım çizgileri.....	59
Şekil 5.22. 0.04. sn’de P7’deki (-7.17 rad/sn) akım çizgileri	59
Şekil 5.23. Kanal içinde herhangi bir konumda oluşan hız vektörleri (0.04 sn).....	60
Şekil 5.24. 0.0802. sn’de P7’nin kanal kesitindeki hız profili	60

Şekil 5.25. 0.0802. sn'de P10'nun kanal kesitindeki hız profili	61
Şekil 5.26. 0.163.sn'de P10'da (-7.17 rad/sn) basınç dağılımı	61
Şekil 5.27. 0.163.sn'de P10'daki (-7.17 rad/sn) basınç düşümü (@0 Tesla)	62
Şekil 5.28. 0.163.sn'de P10'daki (-7.17 rad/sn) basınç düşümü (@0.6 Tesla)	62



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. MR ve ER sıvıların özelliklerinin karşılaştırılması.....	12
Tablo 2.2. MRF-132DG'ye ait katalog bilgileri.....	13
Tablo 2.3. MRB-2107-3'e ait teknik özellikler	23
Tablo 3.1. KAD-MR damper tasarım adımları.....	27
Tablo 3.2. KAD-MR damperin bileşenleri.....	28
Tablo 4.1. Manyetik alan analizinde kullanılan parametreler	35
Tablo 4.2. Parametrelerin aralık değerleri.....	37
Tablo 4.3. MR sıvı üzerindeki B_{maks} için optimize edilmiş PG değerleri.....	37
Tablo 4.4. Optimum B 'ye karşılık olarak akma gerilmesi ve tork değerleri	38
Tablo 4.5. Kısıtları dikkate alarak yapılan optimizasyon değerleri	39
Tablo 4.6. Optimize edilmiş geometrik değerler.....	39
Tablo 5.1. Akış analizinde incelenen parametreler	48
Tablo 5.2. Akış hacmine ait parametre değerleri(i)	52
Tablo 5.3. Akış hacmine ait parametre değerleri(ii)	53
Tablo 5.4. Akış hacmine ait parametre değerleri(iii).....	54
Tablo 5.5. Akış hacmine ait parametre değerleri(iv)	54
Tablo 5.6. Akış hacmine ait parametre değerleri(v)	55
Tablo 5.7. Akış analizinde kullanılan parametrelerin aralıkları	56
Tablo 5.8. Akış analizinin optimizasyon sonuçları.....	57
Tablo 5.9. Optimize edilen prototipe ait sonuçlar	57

ÖZET

Anahtar kelimeler: Manyetoreolojik Sıvı, Kısıtlı Açılı Dönel (KAD) MR Damper

Manyetoreolojik (MR) sıvı, bir taşıyıcı akışkan içerisine belirli oranda konmuş, mikron seviye boyuta sahip, mıknatıslanma özellikli katı taneciklerden oluşur. MR sıvının uygun bir manyetik alan altında aktifleştirilmesiyle, bu sıvıların görünür dinamik viskozitelerinde çok hızlı ve büyük artışlar olmaktadır. Kısıtlı açılı dönel (KAD) MR damper, kanat hareketiyle MR sıvıyı bir bölmeden diğer bölmeye transfer ederken, belirlenen lokasyonda MR sıvının manyetik alana maruz bırakıldığı sistemdir. KAD-MR damperin yüksek tork sönümü, düşük enerji tüketimi, akış özelliklerinin manyetik alanla kontrol edilebilmesi ve kompakt yapıda tasarlanabilmesi onu dikkat çekici kılmıştır.

Bu çalışmanın temelinde değişken viskoz tork sönümüne sahip olan KAD-MR damper geliştirilmesi vardır. Başlangıçta, MR sıvı ve KAD-MR damper hakkında bilgi verilmiş, devamında ise KAD-MR damperin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım parametrik hale dönüştürülerek sırasıyla manyetik alan analizi (ANSYS Magnetostatic) ve akış analizi (ANSYS-CFD) yapılarak sayısal çözümleme gerçekleştirilmiştir. Akışkan incilmesi veya kalınlaşması etkilerini dikkate almak için akış analizi Herschel-Bulkley modeli kullanılarak yapılmıştır. MR sıvının Herschel-Bulkley indeks bilgileri bir doktora tezinden, yoğunluk ve viskozite bilgileri ise üretici firmaya ait katalogdan referans alınmıştır. Akış analizindeki hareketin tanımlaması için profil dosyası yazılmıştır. Analitik olarak KAD-MR damperin tork sönümünü hesaplayabilmek için bir matematiksel bağıntı geliştirilmiştir.

0.6T manyetik alan altında 90 Nm tork sönümünü verecek olan KAD-MR damperin geometrik ölçüleri simülasyon sonuçlarına göre belirlenmiştir. Sonuçlar bu yaklaşımın KAD-MR damper tasarımı için kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

LIMITED ANGLE ROTARY MR DAMPER DESIGN AND OPTIMIZATION OF GEOMETRY

SUMMARY

Keywords: MR Fluid, Limited Angle Rotary (KAD) MR Damper

A magnetorheological (MR) fluid consists of solid particles of magnetizing nature, with a micron level dimension, placed in a carrier fluid. By activating the MR fluid under an appropriate magnetic field, there are very fast and large increases in the apparent dynamic viscosities of these fluids. A limited angle rotary (KAD) MR damper is a system in which the MR fluid is exposed to the magnetic field at the determined locus while transferring the MR fluid from one section to the other with the wing motion. It is noteworthy that KAD-MR damper's high torque damping, low energy consumption, flow characteristics can be controlled by magnetic field and can be designed in a compact structure.

At the heart of this work is the development of KAD MR damper with variable viscous torque damping. At the beginning, information about MR fluid and KAD-MR damper was given, followed by design of KAD MR damper. The design was transformed into parametric and numerical analysis was carried out by performing magnetic field analysis (ANSYS Magnetostatic) and flow analysis (ANSYS-CFD), respectively. Flow analysis was performed using the Herschel-Bulkley model to account for fluid thinning or thickening effects. Herschel-Bulkley index information of MR fluid is obtained from a doctoral dissertation, density and viscosity information are taken from catalog of manufacturer's company. The profile file is written to identify the movement in the flow analysis. Analytically, a mathematical relationship has been developed to calculate the torque damping of the KAD MR damper.

The geometric measurements of the KAD-MR damper, which will produce a torque damping of 90 Nm under a magnetic field of 0.6T, are determined according to the simulation results. The results show that this approach can be used for KAD MR damper design.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsanoğlu varoluşundan bu yana hep en iyisini aramaktadır. Tarihsel gelişim sürecine baktığımızda kendisinden önceki bilgi mirasını katlayarak bunu başardığı görülmektedir. Öyle seviyelere gelmiştir ki insansız hava araçları, otomatik sürüş moduna sahip otomobiller, yapay zekâya sahip robotlar, sönüm katsayısı değiştirilebilir amortisörler geliştirmiştir. Tıp bilimi de bu ilerlemeye endeksli olarak gelişmektedir. Akıllı malzemelerin keşfiyle bu süreç daha da hızlanmıştır.

Gerilme, sıcaklık, nem, pH, elektrik veya manyetik alan gibi dış uyarılar vasıtasıyla hacmi, şekli, akışkanlığı, elektrik iletkenliği kontrollü bir şekilde ayarlanabilen malzeme sistemlerinin geneline akıllı malzemeler denilmektedir. Manyetoreolojik (MR) sıvılar ise uygulanan manyetik alana tepki veren (viskozite davranışında değişiklik meydana gelen) akıllı malzemelerin bir türüdür. MR sıvıların keşfi 1940'lı yılların sonlarına doğru Uluslararası Standart ve Teknoloji Enstitüsü'nde çalışan Jacob Rabinow tarafından gerçekleştirilmiştir [1]. Yarı aktif titreşim kontrol sistemleri için uygulanabilir olmasından dolayı bu konudaki çalışmalar son 30 yılda hız kazanmıştır.

Günümüzde MR sıvılar, amortisör sistemlerinde, fren, kavrama, şok emme ve servo-valf sistemlerinde kullanılmaktadır [2]. MR damper sistemlerine yönelik çalışmalar önemli ölçüde otomotiv, havacılık-uzay, köprü ve binaların titreşimlerinin azaltılmasına yönelmiş olup hızla gelişmeye devam etmektedir. MR damperlerin kullanıldığı bir diğer önemli alan ise biyomekaniktir.

Dünya üzerinde çeşitli sebeplerle bir ya da iki bacağını kaybetmiş insanlar mevcuttur. Klasik yöntemlerle yapılan takma dizlerle hareket kabiliyeti sınırlı olmaktadır. MR damper kullanılarak yapılan takma dizler,

yürüyüş dengesi ve enerji verimliliği açısından klasik sistemlere göre daha fazla konfor sağlamaktadır. Uygun kontrol sistemi entegre edilerek bireylerin spor yapabilmesi, engelden atlayabilmesi ve bisiklete binebilmesi gibi aktiviteler mümkün olacaktır [2]. Tüm bunlar dikkate alındığında MR damperlerin incelenmesi ve teknolojisinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

1.1. Literatür Çalışması

Dönel MR damper, açısal hızı temel alarak bir veya daha fazla MR sıvı çalışma modlarında çalışan cihazlardır. Yapısal tasarıma göre dönel MR damperler sürekli açılı ve kısıtlı açılı dönel MR damper olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir [3]. Dönme kavramına atfen genellikle MR fren, MR kavramalar akla gelmektedir. Ancak MR kavramalar güç aktarma cihazı olarak çalışmaktadır. MR damperler gibi enerji absorpsiyonu yapmamaktadır. Bu yüzden MR kavramalar, dönel MR damper olarak ele alınmamaktadır [3]. Bu bölümde, bu alanda yapılmış olan akademik çalışmalar özetlenmiştir.

1.1.1. Sürekli açılı dönel MR damper

Sürekli açılı dönel MR damperler silindir tip ve disk tip olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Farjoud ve ark. Herschel-Bulkley modelini kullanarak silindir tip dönel MR frenin matematiksel modelini oluşturmayı amaçlamışlardır. MR frende, kayma hızlarının 10000 s^{-1} seviyelerine ulaşabileceğini ve yüksek kayma hızlarında da MR sıvıda kayma incelmeleri meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Bu durum hesaplanan tork büyüklüğünü etkileyeceğinden Bingham model ile bu değişikliği açıklamanın yetersiz olduğunu vurgulayıp, Herschel-Bulkley modelini kullanarak silindir tip MR frenin matematiksel modelini oluşturmuşlardır [4].

Wereley ve ark. kayma modunda çalışan silindir ve disk tip dönel MR damper ile doğrusal MR damperin sönüm performansını teorik olarak Bingham plastik, biviskoz

ve Herschel-Bulkley akış modellerine göre açıklamayı hedeflemişlerdir. Bu amaçla silindir ve disk tip ile doğrusal MR damper için Bingham sayısı farklı akış modellerine göre tanımlanmıştır. MR damperde manyetik alana bağlı sönüm katsayısını, manyetik alan olmadığındaki sönüm katsayısına oranlayarak farklı akış modellerinde sönüm denklemlerini elde etmişlerdir [5].

Huang ve ark. tarafından yapılan çalışmada silindir tip MR fren tasarım metodunun teorik olarak incelenmesi hedeflenmiştir. Farklı manyetik alan altında frenleme torku hesaplanmıştır. Rotorun dönme hızı ile maksimum mekanik gücü, arzu edilen tork kontrol oranı belirtildiğinde; MR Fren içindeki halka şeklindeki MR sıvı hacmi, kalınlığı ve genişliğinin denklemlerle ifade edilebileceğı belirtilmiştir. Bu yolla MR frenin tasarımını teorik olarak göstermişlerdir [6].

Karakoç ve ark. otomobillerde klasik hidrolik frene alternatif olabilecek bir disk tip MR fren prototipi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Sonlu elemanlar metodu ile MR frenin manyetik akı yoğunluğunu, ardından maksimum torku veren minimum akım değerini ve ağırlık parametrelerini optimize etmişlerdir. Optimizasyon sonuçlarından elde edilen geometrik değerlere göre prototip imâl edip, fren performansını test etmişlerdir. Deneysel sonuçlara göre 1,8 A'de 23 Nm fren torku elde etmişlerdir. Bu tork değeri, 1000 kg'lık bir aracı 6 m/s^2 'lik ivmeyle durdurabilmek için yaklaşık olarak her bir tekerleğin üretmesi gereken 500 Nm fren torku ihtiyacının %5'ine karşılık gelmektedir [7].

Bier ve ark. farklı geometrilere sahip MR sıvılı fren modellerinin tork yoğunluğu, verim ve kontrol edilebilirliğini incelemişlerdir. Bu amaçla disk tip ve silindir tip MR fren modelini sonlu elemanlar metoduyla analiz etmişlerdir. Sonuç olarak aynı tork değerleri için silindir tip MR frenin daha hassas çalıştığı ve daha az güç ihtiyacı olduğunu belirtmişlerdir [8].

Kikuchi ve ark. disk tip MR fren üzerinde kanal büyüklüğünün ($50\mu\text{m}$ - $100\mu\text{m}$) tork parametresine olan etkisini ortaya çıkarmayı hedeflemişlerdir. Sonlu elemanlar analizi yardımıyla MR frenin frenleme torkunu hesaplamışlardır. Ardından 5 Nm

tork sönümü üretebilen kompakt çok katmanlı disk tip MR fren imal etmişlerdir. 0-2A arasında, farklı kanal büyüklüklerinde elde edilen tork değerlerinin hem simülasyon hemde deneysel sonuçlarını kıyaslamışlardır. 50 μ m kanal genişliğinde simülasyon ve deneysel sonuçlarda iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Aynı akım ve aynı dönme hızında kanal büyüklüğü arttıkça tork değerinin azaldığını vurgulamışlardır [9].

Shiao ve ark. klasik MR frendeki manyetik alanı artırarak daha fazla fren torku veren yeni bir MR fren geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu kapsamda mevcut MR frendeki elektromanyetik kutup sayısını artırarak sonlu elemanlar metoduyla manyetik alan yoğunluğunu analiz etmişlerdir. Ayrıca optimum giriş gücünde maksimum torku veren kutuplar arasındaki mesafeyi, manyetik kutup kalınlığını, bobin sarım sayısını optimize etmişlerdir. 400 Amper-turn'da, 0.5 mm kanal genişliğinde 25.1 Nm tork sönümü üretebilen 6 kutuplu MR fren geliştirmişlerdir. Bu fren konseptinin tork sönümü açısından gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli bir adım olduğu vurgulanmıştır [10].

1.1.2. Kısıtlı açılı dönel MR damper

KAD-MR damper veya kanatlı tip damper, sınırlı (sonlu) açısal deplasmanlı yüksek tork sönümlenmesi gereken uygulamalar için kullanılmaktadır. Ancak rotor tabanlı veya yüksek devir içeren uygulamalar için uygun değildir [3]. KAD-MR damperler üzerine yapılan akademik çalışmalar oldukça azdır. Mevcut yayınlar incelenmiş olup aşağıda özetlenmiştir.

Zhang ve ark. kısıtlı açılı dönel damperin yarı aktif süspansiyon sistemleri için uygulanabilirliğini incelemişler ve bu amaçla ağır vasıtalarda kullanılan bir hidrolik çift kanatlı KAD-damperin yapısını, KAD-MRD'ye dönüştürmüşlerdir. Bu kapsamda kanat gövdesi ile kanadın hareketini sınırlayan yapı arasında, yay görünümünde kanal geçişi tasarlamışlardır. Bu, yay MR valf olarak adlandırılmıştır. Sonlu elemanlar analizi yardımıyla manyetik alan analizi ve optimizasyonu yapılmıştır. Tork sönümünün matematiksel modeli geliştirilmiştir. Çalışmanın, yarı

aktif süspansiyon sistemleri için uygulanabilir olduğu ve bozuk yollarda sürüş kalitesini iyileştireceği belirtilmiştir [11]. Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi yardımıyla akış analizide yapılmamıştır.

Giorgetti ve ark. yenilikçi adaptif süspansiyon sistemi tasarlamak için, Alfa Romeo 147 marka otomobilin ön tekerlek süspansiyonu için KAD-MR damper geliştirmeyi hedeflemişlerdir. MR dampere ait katı model tasarımı, manyetik alanın sonlu elemanlar analizi ve deneysel testleri yapılmıştır. Tasarımda kanal genişliği, gövde üzerinde olup (kanat üzerinde değil) kanadın dönüş eksenine dik olacak şekilde bir valfin içindedir. Böylece MR sıvının çalışma modeli, kayma modundan akış moduna değişmiştir. Kanadın çalışma açısı $\pm 7^\circ$ aralığında olup, 3A'de 200 Nm'ye kadar tork sönümü elde etmişlerdir. Geliştirilen MR damper doğrusal MR damper ile karşılaştırıldığında; MR sıvıdaki demir parçacıklar daha az çökmekte (Çalışma esnasında sürekli olarak yeniden harmanlandığı için), daha küçük boyutlarda imal edilebilmekte (Daha az MR sıvı ihtiyacı demek), sızdırmazlık elemanlarında daha az aşınma olduğu için daha kararlı yapıya sahip olması gibi yenilikçi yönleri vurgulanmıştır [12].

Yang ve ark. bir arazi aracı için KAD-MRD tasarlamış ve damperin matematiksel modelini geliştirmeyi amaçlamışlardır. MR damper gövdesi üzerinde halkasal akışa sahip valf tasarlayıp, bobini iç radyal akış yoluna yerleştirmişlerdir. Sonlu elemanlar metoduyla elektromanyetik valfin, manyetik alan analizini ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Kanat üzerinde maksimum basınç limiti için boşaltma valfi kullanmışlardır. Ardında prototip damper imal edilerek sinüs harmonik yüklü (0.5 - 4 Hz) altında sönüm performansı test edilmiştir. 4A'da 3kN sönüm kuvveti elde edilmiştir. Damperin sönüm kapasitesinin kuvvet genliği ve manyetik alan büyüklüğünün bir fonksiyonu olduğu ifade edilmiştir [13].

1.1.3. MR damper manyetik alan analizi

Zhang ve ark. MR damperde manyetik alana bağlı sönüm kuvvetini artırmak için, manyetik akı tasarımın metodunu ve potansiyel doyum bölgelerini analiz ederek,

deneysel sonuçlarla sönüm kuvvetini eşleştirmişlerdir. Sonlu elemanlar analizi yardımıyla manyetik alan analizi yapmışlardır. 0.3A ile 0.75A arasında MR etkinin geçiş aşamasında olduğunu, 0.75A'den sonra bu artışın durağanlaşarak sabit kaldığını ifade etmişlerdir. Deneysel sonuçlarla analiz sonuçlarını örtüştürmeyi başarmışlardır [14].

Rosenfeld ve Wereley silindirik hacim içinde çalışan manyetoreolojik (MR) ve elektoreolojik (ER) valf tasarımı geliştirmeyi, MR valf ile ER valfin sönüm performansını hem nümerik hem de analitik yöntemle göre karşılaştırmayı hedeflemişlerdir. Bir valf geometrisi tasarlayıp sonlu elemanlar metoduyla manyetik alan analizini ve optimizasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada kanal boyunca ortalama bir manyetik akı yoğunluğu tespit edip, daha sonra akma gerilmesini elde etmişlerdir. Valfin sönüm performansını ifade eden boyutsuz parametrelerin değerlendirilmesiyle optimum geometriye valfi elde etmişlerdir. Optimize edilmiş MR valfin sönüm performansının, aynı ölçülere sahip ER valfe göre daha iyi olduğunu vurgulamışlardır [15].

Nguyen ve ark. MR valf tasarımlarının (dairese tek bobinli, dairese çift bobinli, dairese radyal tip) güç tüketimini azaltmak, basınç düşüm performansını iyileştirmek için optimum MR valf geometrilerini bulmayı amaçlamışlardır. Sonlu elemanlar analizi ile manyetik alan çözümü yapılarak, elde edilen parametre değerleri analitik çözümle doğrulanmıştır. Ayrıca manyetik alana bağlı basınç düşümü ile viskoz basınç düşümünü oranlayarak valf oranını elde etmişlerdir. Üç farklı tipte MR valf tasarlamışlardır. Tek bobinli MR valf en az güç tüketirken (7.92W), iki bobinli dairese MR valf en iyi valf oranını (0.002296) sağlamakta, dairese radyal tip ise en iyi basınç düşüşünü (64.4 bar) sağlamaktadır. Çalışmada izlenen metoda göre hedeflenen MR valf tasarım ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir [16].

Yang ve ark. MR sıvı parçacıklarının hacim oranını, tepki süresini, manyetik döngü analizini ve etkin gücünü göz önünde bulundurarak detaylı bir MR valf tasarlamayı hedeflemişlerdir. Hedef sönüm kuvvetini amaç denklemi yapan, hacim oranı,

manyetik alan şiddeti, zaman sabiti, kayıp güç oranını ise kısıt fonksiyonu olarak kullanan bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Sabit silindir çapına, uzunluğuna ve kanal genişliğine sahip MR valfte, değişen bobin sarım sayıları için sönüm kuvveti, manyetik alan şiddeti, zaman sabiti, kayıp güç oranını elde etmişlerdir. MR cihaz tasarımı aşamasında uygun bir akma gerilmesi için uygun hacim oranı (fraksiyonu) seçilmesi gerektiğini, manyetik döngü analizini vurgulayarak MR valf tasarımını gerçekleştirmişlerdir [17].

Grunwald ve Olabi MR valfin ve MR orifisin basınç düşümünü hesaplamak için manyetik alan simülasyonlarını ve parametrik analizlerini gerçekleştirmeyi amaçlamışlardır. MR valf ve MR orifis imal edilerek performans testleri gerçekleştirilmiştir. MR valf, manyetik alan yokken $5 \text{ cm}^3/\text{sn}$ 'lik bir debi altında 0.05 MPa'dan daha az basınç düşümüne sahip iken, 4.5A'de 1.5MPa'lık bir basınç düşümüne sahiptir. MR orifis manyetik alan yok iken, $5 \text{ cm}^3/\text{sn}$ 'lik bir debi altında 0.2 MPa'dan daha az bir basınç düşümüne sahip iken, 4.5A'de 0.6 MPa'lık bir basınç düşümü ortaya koymuştur. Bu çalışma MR kontrolün hızlı yanıtının ve kontrollü basınç düşümünün iyi bir örneğidir [1].

Zhu tarafından yapılan çalışmada disk tip MR damperin rotor sistemindeki sönümleme etkisini ve rotor sistemlerinin titreşim kontrolünün dönme hızına verdiği tepkiyi ölçmek amaçlanmıştır. Eksenel boşlukların içine MR sıvısı doldurularak bobine gönderilen akım ile titreşim etkisi teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. MR damperin rotor titreşimini sönümlemekte ve kontrol etmekte etkili olduğu vurgulanmıştır [18].

1.1.4. MR sıvının yapısı

Felt ve ark. MR sıvının tanecik büyüklüğü, hacimsel oran ve manyetik alan şiddetinin MR sıvının akma gerilmesi üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemeyi amaçlamışlardır. Brookfield LVDV 3 reometresini kullanarak ölçümler yapılmıştır. MR sıvının akma gerilmesinin, 0.014 ile 0.12 hacim oranı arasında ve

0.5 μm ile 1 μm tanecik büyüklüğü arasında doğrusal olarak arttığı ancak manyetik alan şiddeti ile parabolik olarak büyüdüğü vurgulanmıştır [19].

Lita ve ark. MR sıvının çökeltme karakterizasyonunu X-Ray ile incelemeyi hedeflemişlerdir. Kendi geliştirdikleri MR sıvıya (MRF-LM5) çeşitli ilaveler yaparak demir taneciklerinin taşıyıcı akışkan içindeki dağılım ve stabilizasyonunu iyileştirmenin yollarını aramışlardır. Sonuç olarak reolojik ve yapısal özellikleri MRF-132DG ile benzer olan MRF-LM5'in iki kat daha yavaş çökeldiğini fakat MRF-132DG'nin MR etkisinin daha büyük olduğunu ifade etmişlerdir [20].

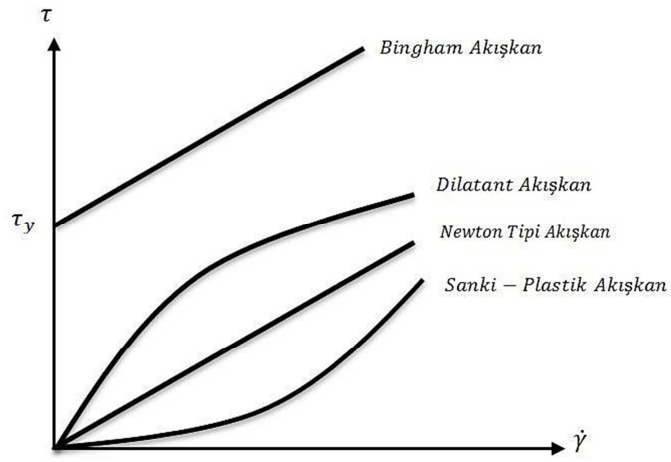
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

KAD-MR damper kısıtlı açısal deplasmanlı tork sönümlenmesi gereken uygulamalarda kullanılmaktadır. KAD-MR damperde değişken tork eldesi, MR sıvının bir bölümden diğerine geçerken manyetik alana maruz bırakılarak sıvının görünür viskozitesinin değiştirilmesi prensibine göre çalışmaktadır. Çeşitli uygulamalarda ihtiyaç duyulan farklı tork sönümleme ihtiyacı sebebiyle tork sönümü kontrol edilebilir kompakt ve basit yapıda bir KAD-MR damper tasarımı bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Literatürde mevcut yayınlar incelenmiş olup çalışma açısı ile tork sönüm değerleri birlikte düşünüldüğünde ya çalışma açısı yüksek-tork sönüm değerleri düşüktür ya da çalışma açısı düşük-tork sönüm değerleri yüksektir.

Bu çalışma ile KAD-MRD'nin hem çalışma açısını hem de tork sönüm değerini yükseltmeyi hedefliyoruz. Bu kapsamda dönel MR damperin kavramsal tasarımı yapıldıktan sonra, dinamik modeli oluşturulacaktır. Daha sonra akış ve manyetik alan analizleri yardımıyla geometrik optimizasyon yapılarak maksimum tork sönümünü verecek olan en uygun prototip boyutları belirlenmeye çalışılacaktır. Yapılan çalışma AR-GE niteliğinde olup gelecekteki çalışmalara ışık tutacaktır.

BÖLÜM 2. MANYETOREOLOJİK SIVILAR

Reoloji, kuvvet altında malzemelerin akış ve deformasyonunu inceleyen bilim dalıdır. Manyetoreoloji ise uygulanan bir manyetik alan altında malzemelerin akışını ve deformasyonunu ele alan reolojinin bir dalıdır [21]. Akışkanlar iki temel başlık altında incelenebilir. Bunlar Newtonian (Newton tipi) ve Non-Newtonian akışkanlardır. Newton tip akışkanlarda, kayma gerilmesi ile deformasyon hızı arasındaki ilişki doğrusaldır (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Çeşitli akışkan tipleri için τ ile $\dot{\gamma}$ ilişkisi [22].

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

Burada τ kayma gerilmesini, η akışkanın dinamik viskozitesini, $\dot{\gamma}$ ise deformasyon hızını ifade etmektedir. Newton tip akışkanlar için viskozite sabittir, zamandan ve uygulanan kayma gerilmesinden bağımsızdır. Newton tip akışkanların viskozitesi sıcaklık ve basınç ile değişmektedir. Mineral yağlar, silikon yağları, su bu gruba girmektedir. Newton tip olmayan (Non-Newtonian) akışkanlarda ise kayma gerilmesi ile deformasyon hızı arasındaki ilişki doğrusal değildir.

Bingham akışkanlar, sanki-plastikler ve dilatant akışkanlar bu gruptadır. Bingham akışkanlar, küçük ve sonlu büyüklükteki kayma gerilmesine karşı koyarak katı gibi davranan, fakat kayma gerilmesinin akma gerilmesini aştığında viskoz bir akışkan gibi akmaya başlayan akışkanlardır. Bu tip akışkanlar, kritik kayma değerinden sonra Newton tip akışkan gibi davranırlar ve kayma gerilmesi ile deformasyon hızı arasında doğrusal bir ilişki vardır (Şekil 2.1.).

Sanki-plastik ve dilatant akışkanların akma gerilimi değerleri sıfırdır. Kayma gerilmesi ile deformasyon hızı arasındaki ilişki doğrusal değildir (Şekil 2.1.). Bu ilişkiyi gösteren eğrinin eğimi akışkanın görünür viskozitesini vermektedir.

Eğer deformasyon hızı arttıkça görünür viskozite azalıyorsa sanki-plastik akışkan, artıyorsa dilatant akışkan denir. Sanki-plastik akışkanlar kayma incilmesi özelliği gösteriyorken, dilatant akışkanlar kayma kalınlaşması özelliği gösterirler [22].

2.1. Akıllı Sıvılar

Akıllı sıvılar elektoreolojik (ER) ve manyetoreolojik (MR) olmak üzere iki çeşittir. MR sıvılarda, yüksek manyetik enerji yoğunluğu oluşturulabildiğinden yüksek dinamik akma gerilmeleri elde etmek mümkündür.

MR sıvılardaki enerji yoğunluğu demir parçacıkların manyetik doygunluğu ile sınırlıdır. Tipik bir demir esaslı MR sıvının maksimum enerji yoğunluğu 0.1 J/cm^3 'tür. ER sıvıların enerji yoğunluğu ise dielektrik kırılma ile sınırlıdır ve 0.001 J/cm^3 'tür. Bu, MR sıvıların akma gerilmelerinin ER sıvılardan daha fazla olmasının başlıca nedenidir. Bununla birlikte her iki sıvı tipinin de viskozitesi hemen hemen aynıdır.

ER sıvılarda elde edilen akma gerilme değerleri 2-5 kPa aralığında iken, MR sıvılarda bu değer 100 kPa'lara kadar çıkabilmektedir. MR sıvıların bu özelliği küçük boyutlarda, geniş dinamik akma gerilmesi aralığına sahip cihazlar tasarlamaya olanak tanımaktadır.

Literatürde kontrol edilebilir sıvılı cihazlardaki minimum etkin sıvı hacminin plastik viskozite ile doğru; maksimum akma gerilmesinin karesi ile ters orantılı olduğu belirtilmektedir.

Aynı mekanik performansı elde etmek üzere MR cihazlarla ER cihazlar karşılaştırıldığında, MR cihazlarda gerekli olan minimum etkin sıvı hacmi ER cihazlardakinin yarısı kadardır. Bu da şüphesiz MR cihazın boyutunun ER cihaza oranla küçük olacağı anlamına gelmektedir.

MR sıvılar -40 ila 150 °C aralığında çalışabilmektedir. Bu, manyetik polarizasyonun sıcaklıktan pek etkilenmediği gerçeğiyle açıklanabilir. Bunun yanında MR sıvılar imalat, montaj ve kullanım sırasında yaygın olarak kirleticilere karşı duyarsızdır. Üstelik, manyetik polarizasyon yüzey-aktif maddelerden ve eklentilerden etkilenmediğinden MR sıvılarda parçacıkların çökmesini engellemek ve parçacık/taşıyıcı sıvı oranını belirli bir düzeyde kararlı halde tutmak daha kolaydır.

Bunun yanında, yine elektrokimya, manyetik polarizasyon mekanizmasını etkilemediğinden, MR sıvılara kararlılığı, sızdırmazlık elemanlarının ve yataklama elemanlarının ömrünü arttırmak üzere aşınmayı önleyici, yağlayıcı özellikte katkı maddeleri eklenebilmektedir [23].

Uygulama açısından bakıldığında, MR ve ER cihazların güç gereksinimleri hemen hemen aynı olsada, sadece MR cihazlar yaygın düşük voltajlı güç kaynakları ile kolaylıkla beslenebilmektedir.

MR cihazlar için 1-2 A'lık çıktı alınabilecek düşük voltajlı, akım sürücülü güç kaynakları yeterli iken, ER cihazlar için yüksek voltajlı güç kaynaklarına ihtiyaç vardır (2000-5000V). Bu durum ER cihazların özellikle deprem uygulamalarında büyük zorlukları beraberinde getirmektedir (Tablo 2.1.). Ayrıca, bu denli yüksek voltaj insan sağlığı açısından da büyük bir tehlike teşkil etmektedir.

Tablo 2.1. MR ve ER sıvıların özelliklerinin karşılaştırılması [24].

Özellik	MR sıvılar	ER sıvılar
Maksimum Akma Gerilmesi	10-100 kPa	2-5 kPa
Maksimum manyetik alan şiddeti, H	250 kA/m	4 kV/mm
Görünür plastik viskozite, μ	0,1-10 Pa.s	0,1-1 Pa.s
Çalışma sıcaklığı aralığı	-40 ile +150°C arası	+10 ile +90 °C (iyonik, DC) -25 ile +125 °C (iyonik olmayan, AC)
Kararlılık	Çoğu kirlerden etkilenmez	Kirlerden etkilenir
Yoğunluk	3-4 g/cm ³	1-2 g/cm ³
μ/τ_y^2	$10^{-11} - 10^{-10}$ s/Pa	$10^{-8} - 10^{-7}$ s/Pa
Maksimum enerji yoğunluğu	0,1 J/cm ³	0,001 J/cm ³
Güç gereksinimi	2-25 V, 1-2 A	2000-5000 V, 1-10 mA

Bu çalışmada, geliştirilmek istenen damperin daha iyi sönümleme yapabilmesi ve kompakt boyutlarda tasarlanabilmesi için MR sıvının daha doğru tercih olduğuna karar verilmiştir.

2.1.1. MR sıvılar

MR sıvılar, silikon-yağ veya hidrokarbon-yağ gibi bir taşıyıcı sıvı içerisinde, genellikle 1-10 μ m çaplarında, manyetize olabilen Fe(CO)₅ (demir-penta-karbonil) küresel biçimli parçacıklarından oluşmaktadır [23].

Taşıyıcı sıvının görevi, MR sıvı içerisindeki mıknatıslanabilen taneciklere ve katkı maddelerine akışkan bir ortam sağlamaktır. En çok kullanılan taşıyıcı sıvılar hidrokarbon yağlarıdır. Uzun ömürlü olmakla birlikte yağlayıcı özellikleri yüksektir. Sık kullanılan bir diğer taşıyıcı sıvılar ise silikon yağdır. Silikon yağları lastik conta ve diyafram gibi parçalarla uyumlu çalışabilmektedir. Fakat viskozite artışına ve sakızlaşmaya eğilimlidir. MR sıvılarda kullanılan taşıyıcı sıvının kaynama noktası

yüksek olmalıdır. Reaktif ve zehirleyici olmamalı, tekrar karışma özelliği ile kararlılığı sağlamak da taşıyıcı sıvının görevidir [22].

Yüksek manyetik doygunluğa sahip olduğundan dolayı MR sıvılarda en çok tercih edilen parçacık türü demirdir. Yaygın olarak kullanılan manyetik parçacık ise karbonil demirdir [25]. Ayrıca manyetik alanın geri döndürülmesine karşı gösterdiği direnci yani koersivitesi düşüktür [22]. Uygulamada, manyetik alan uygulanmasına son verildiğinde MR sıvının eski haline dönmesi istendiği için koersivitesinin de düşük olması istenmektedir.

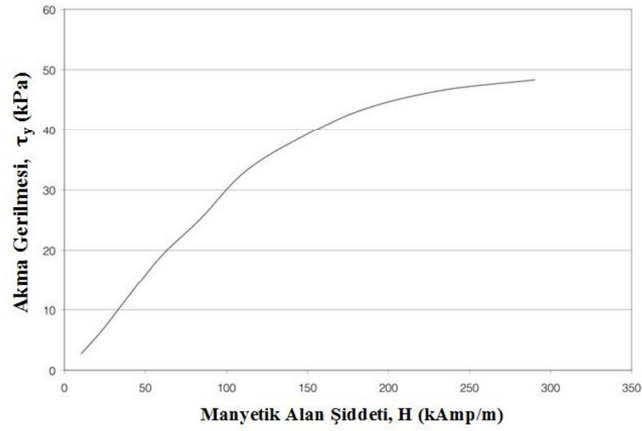
MR sıvıda, manyetik tanecikler ve taşıyıcı faz arasındaki yoğunluk farkından dolayı çökme meydana gelmektedir. Tanecikler çöktüğü zaman aralarındaki uzaklık kaybolmakta ve akışkan üzerinde kalan çok küçük manyetikleşme etkisi dahi taneciklerin çökmesine neden olmaktadır. Çökme istenmeyen bir durumdur çünkü akışkanın kararlı olması istenmektedir.

Ayrıca demir tozlarının zamanla oksitlenmesi, yüzeylerde aşındırma yapması gibi olumsuzlukları da mevcuttur. Tüm bu olumsuzlukların önüne geçmek için katkı maddeleri kullanılmaktadır [26]. Katkı maddeleri viskoziteyi düzenlemek ve topaklanmayı önlemek için de kullanılmaktadır. Bu çalışmada Lord firması tarafından üretilen MRF-132DG kodlu MR sıvı kullanılmıştır. Sıvıya ait özellikler Tablo 2.2.'de belirtilmiştir.

Tablo 2.2. MRF132-DG'ye ait katalog bilgileri [27].

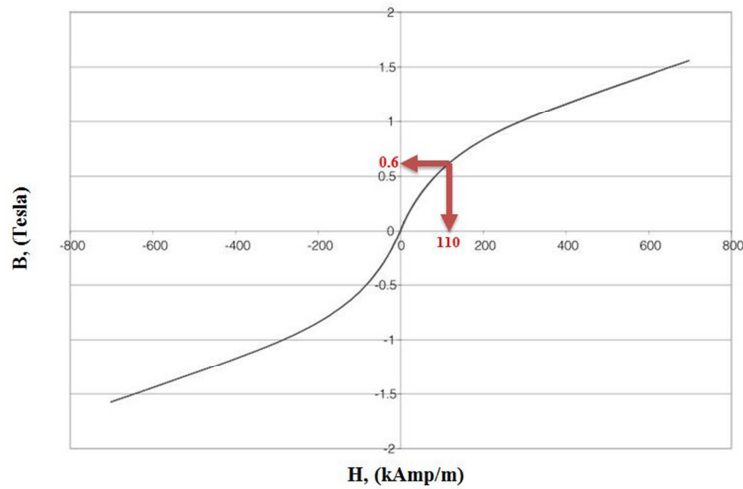
Özellik	Değer/Sınır
Akışkan Taşıyıcı	Hidrokarbon
Renk	Koyu Gri
Viskozite (@40°C)	0,112 ±0,02 Pa.s
Yoğunluk	2,95-3,15 (g/cm ³)
Partiküllerin kütle oranı	80,98 (%)
Çalışma Sıcaklığı	-40°C'den +130 °C

MR sıvıya uygulanan manyetik alanla akma gerilmesinin değişimi Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. MRF-132DG'nin akma gerilmesi manyetik alan ilişkisi [27].

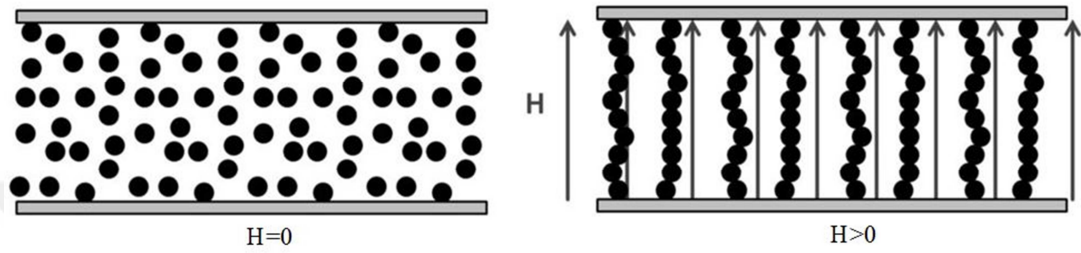
Bir diğer önemli özellik ise MR sıvıdaki manyetik alan şiddeti ile manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişkidir (Şekil 2.3.). Düşük manyetik alan şiddetinde eğimin daha fazla olduğu görülmektedir. Bir başka deyişle yaklaşık 110 kA/m'lik manyetik alan şiddetine kadar oluşturulan manyetik akı verimi yüksektir. Ancak bu değerden sonra manyetik alan şiddetinin artışıyla, bu enerjiyle oluşturulabilen manyetik akı yoğunluğu aynı oranda artmamaktadır. Bu sebeple 110 kA/m değerinin karşılık geldiği 0.6 Tesla çalışmamıza referans olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.3. MRF-132DG'nin B-H grafiği [27].

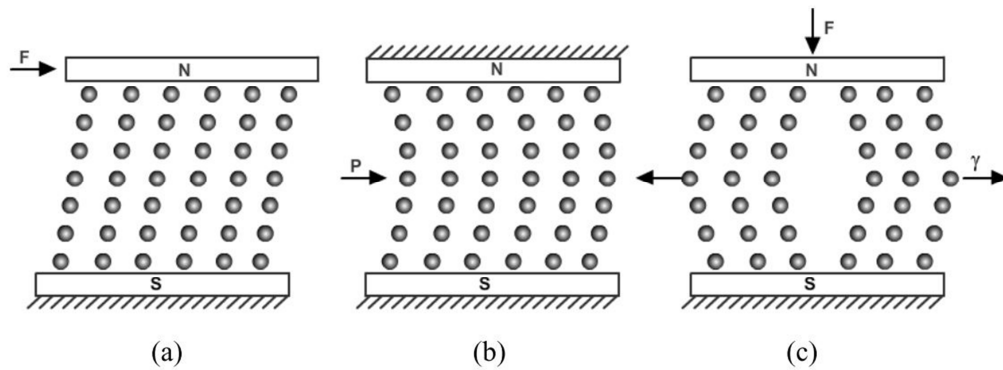
2.1.2. MR sıvının çalışma modları

MR sıvıya, manyetik alan uygulanmadığı durumda manyetik parçacıklar taşıyıcı sıvı içerisinde rastgele dağılmış haldedir. Manyetik alan uygulandığında ise, manyetik parçacıklar polarize olarak manyetik akı çizgileri doğrultusunda dizilerek zincir yapı oluştururlar (Şekil 2.4.).



Şekil 2.4. MR sıvıda manyetik alan altında oluşan zincir yapısı [28].

Böylece birkaç milisaniye içerisinde sıvının akma gerilmesi, MR sıvının türüne göre 100 kPa seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Eğer bu zincir yapısı üzerine bir kuvvet uygulanırsa, kuvvetin ve manyetik alanın büyüklüğüne göre zincir yapısı şekil değiştirir. MR sıvının uygulanan basınca gösterdiği bu tepki MR etki olarak adlandırılmaktadır. MR sıvılar aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi üç farklı modda çalıştırılabilmektedir.



Şekil 2.5. MR sıvının çalışma modları a- Kayma b- Valf c- Sıkıştırma [2].

MR sıvı iki yüzey arasına yerleştirilir, sadece bir yüzey diğerine göre kayar veya döner. MR etki, kayma gerilmesinden dolayı sıvı plakanın hareketine karşı koyacak

şekilde bir tepki kuvveti oluşturur ve bu kayma modu olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.5.a.). Bu tür çalışmalar genellikle dönel damperlerde, MR fren ve kavramalarda görülür.

Eğer sabit iki plaka arasındaki MR sıvı, bir basınç gradyeni ile akmaya zorlanırsa zincir yapı sıvı akışına engel olmaya çalışır. Valf modu veya akış modu olarak adlandırılan bu sistemler çoğunlukla MR damperlerde görülmektedir (Şekil 2.5.b.).

Son modda ise bir sıkıştırma akışına neden olan paralel plakalar arasındaki mesafeyi azaltmak veya arttırmak için plakalara manyetik alan ile aynı yönde bir kuvvet uygulanır. Sıkıştırma modunda (Şekil 2.5.c.) MR sıvısı dinamik veya statik yüklemelere tabi tutulur. Bu modda yerdeğiştirmeler nispeten çok küçük (birkaç milimetre) ancak büyük kuvvetler gerektirmektedir [25].

2.1.3.MR sıvının akış modelleri

MR sıvılar normal durumda (manyetik alan sıfır iken) newton tipi akışkanlar olarak davranmaktadır. Manyetik alan uygulandığında ise, non-newtonian davranış sergilemektedir.

MR sıvılar Bingham plastik modeli veya Herschel-Bulkley modeli gibi doğrusal olmayan akış modelleri kullanılarak modellenmektedir. Bingham plastik modeli;

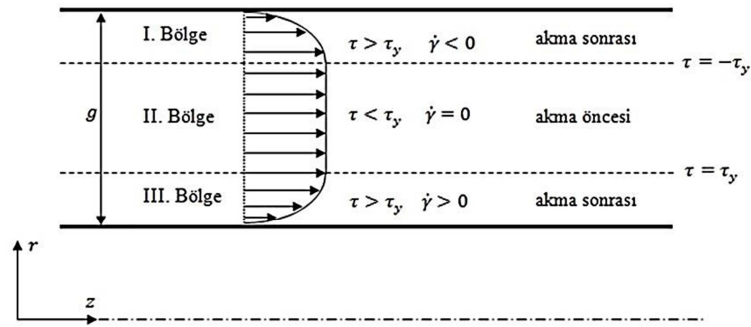
$$\begin{aligned} \tau &= \tau_y(B) + \mu_p \dot{\gamma} & |\tau| > \tau_y \\ \dot{\gamma} &= 0 & |\tau| < \tau_y \end{aligned} \quad (2.1)$$

τ kayma gerilmesini, $\dot{\gamma}$ deformasyon hızını, $\tau_y(B)$ manyetik alana bağlı olarak oluşan dinamik akma gerilmesini, μ_p ise manyetik alandan bağımsız plastik viskoziteyi ifade etmektedir. Herschel Bulkley modeli;

$$\tau = \tau_y(B) + K(\dot{\gamma})^{\frac{1}{m}} \quad |\tau| > \tau_y \quad (2.2)$$

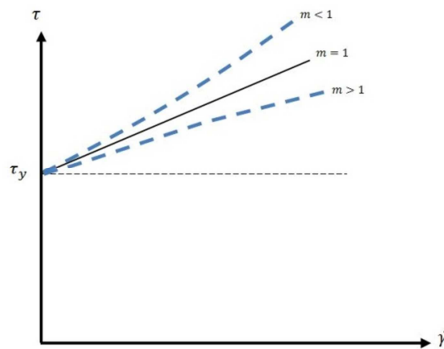
$$\dot{\gamma} = 0 \quad |\tau| < \tau_y$$

K uyumluluk endeksi, $1/m$ ise akış davranış endeksi olarak ifade edilmektedir ($m, K > 0$). Eğer $m > 1$ ise incelen, $m < 1$ ise kalınlaşan ve $m = 1$ ise Bingham akışkan olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.6. MR sıvının kayma gerilmesi ve hız profili bölgeleri [2].

Bingham plastik modeli, tüm deformasyon hızlarında MR sıvının akma sonrası bölgesinde plastik viskozite değerinin sabit olduğunu kabul eder. Bu yaklaşım yüksek deformasyon hızlarında viskozitenin ifadesinde yetersiz kalmaktadır. MR akışkanlar incelen davranış gösterdikleri için sabit viskozite tanımı uygun değildir. Bu çalışmada, MR sıvının akma sonrası bölgesinde doğrusal olmayan davranışlarını doğru şekilde tanımlanmak için Herschel-Bulkley model kullanılmıştır [29].



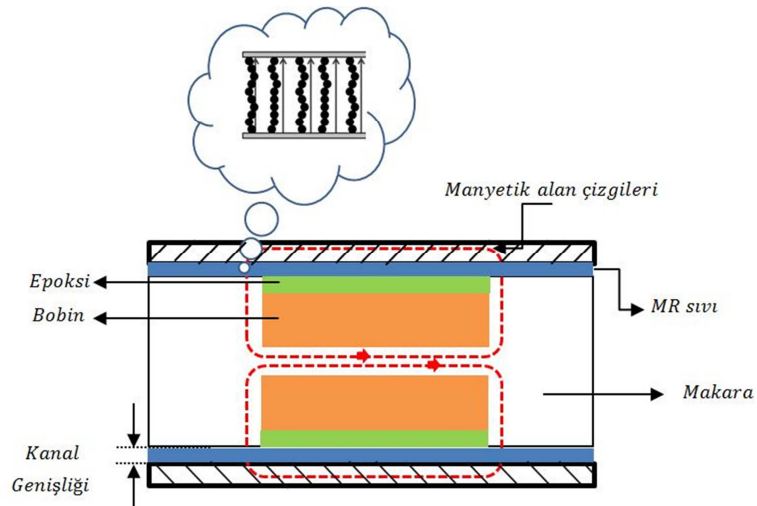
Şekil 2.7. Herschel Bulkley modelde τ ile γ ilişkisi

2.1.4. MR Sıvı Uygulamaları

MR damperler motorsiklet, otomobil ve kamyon süspansiyonlarında, tren bojilerinde, uçakların iniş takımlarında, binalarda, köprülerde, rüzgar türbinlerinde, çamaşır makinaları ile sürücü koltukları gibi geniş bir alanda titreşim engelleyicisi olarak kullanılmaktadır.

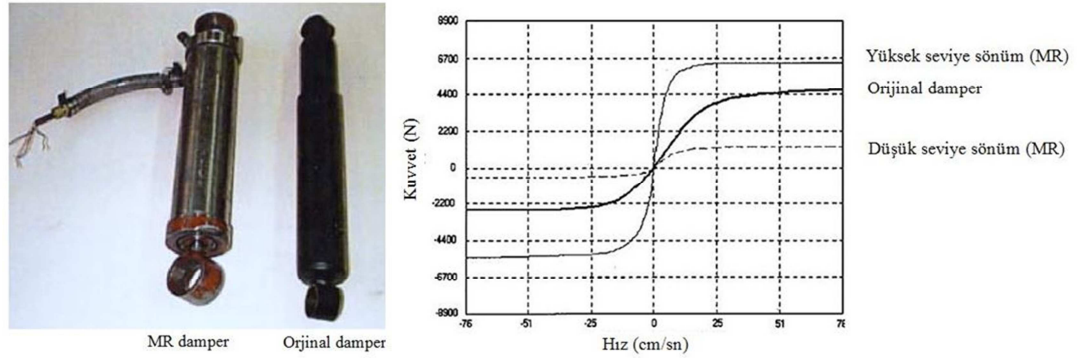
KAD-MR damperin çalışma mantığı, kanat hareketiyle MR sıvıya kazandırılan yüksek basınç ile MR sıvı, basıncın daha düşük olduğu diğer bölmeye bir dar kanaldan gitmeye zorlanır. Bu kanal boyunca MR akışkana manyetik alan uygulanmasıyla, sıvı içerisinde mikron seviyedeki demir parçacıkları akış alanına paralel olarak sütun şeklinde yerleşir (Şekil 2.8.) ve zincir benzeri yapı oluşturur. Bu durum akış hareketini zorlaştırarak akışkanın görünür viskozitesinde bir artışa neden olur.

Akışkanın bu değişimi, artan manyetik alan ile beraber büyüyen bir akma gerilmesi ile sonuçlanmaktadır. Manyetik alan altında MR sıvı, non-newtonian akışkan olarak davranmaktadır. Kanal boyunca meydana gelen bu basınç kaybı uygulanan manyetik alandan ve viskoziteden kaynaklanan akışkan içindeki enerji kaybıdır [2].

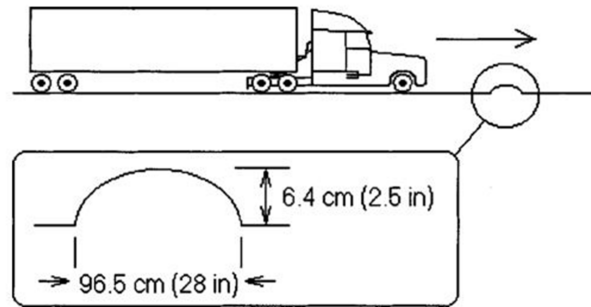


Şekil 2.8. KAD-MRD'de MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı bölge

Bu çalışmada, Şekil 2.10.'de yeşil ile gösterilen yerlere MR damperler monte edilmiştir. İlk başta kamyon yoldaki bir hız kesici üzerinden 8-11 km/h hızla geçerken sistem zamana bağlı test edilmiştir (Şekil 2.11.). İkinci testte (kararlı durum) ise kamyon düz bir otobanda (Şekil 2.12.) 100 km/h hızla yolculuk ederken ölçümler yapılmıştır.



Şekil 2.11. Volvo VN 770'de kullanılan amortisörler [30].



Şekil 2.12. Volvo VN 770 tümsek testi [30].

Geçici test sonuçlarında MR damperler orjinal damperler ile karşılaştırıldığında, daha büyük hız ve yer değiştirme pikleri ürettiği fakat hızlanma ve yerdeğiştirme RMS değerlerinin aynı artışı göstermediği tespit edilmiştir. Kararlı durum testlerinde MR damperler RMS ivme değerlerini düşürmede daha etkili olduğu görülmüştür.

Bir başka uygulama alanı da inşaat ve köprü uygulamalarıdır. Çin'de bulunan The Dongting Lake Köprüsü (Şekil 2.13.), 310 m'lik iki ana açıklığa, üç adet kablo

bağlantılı taşıyıcı kuleye ve 23,4 m'lik köprü güvertesi genişliğine sahip, öngerilme verilmemiş bir beton köprüdür. Nisan, Temmuz, Aralık aylarında şiddetli yağmura ve 36 saatten fazla süren güçlü rüzgarlara maruz kalmaktadır. Köprü Aralık 1999'da tamamlandıktan sonra taşıyıcı kablolarda yağmur ve rüzgardan kaynaklanan kablo titreşimi gözlenmiştir. Kritik öneme sahip olan bu kablo titreşimini önlemesi için Lord RD-1005 MR damperler kullanılmıştır (Şekil 2.14.). MR damperler olmadan maksimum düzlem içi ivmelenme 15 m/s^2 iken, MR damperler sisteme monte edildikten sonra maksimum düzlem içi ivmelenme $0,4 \text{ m/s}^2$ 'den düşüktür [31].

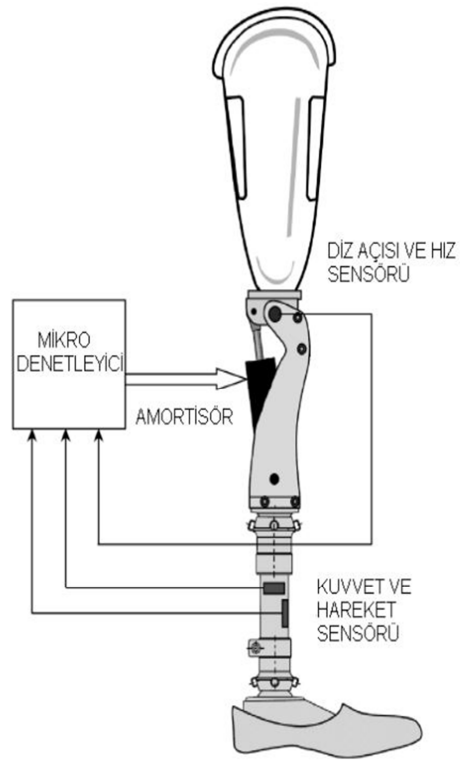


Şekil 2.13. The Dongting Lake Köprüsü, Çin [31].

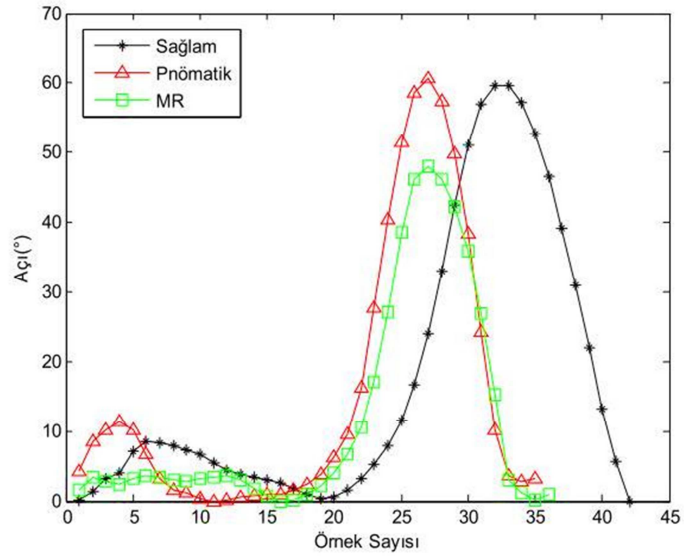


Şekil 2.14. The Dong Ting Lake'deki taşıyıcı kablolara MR damper uygulaması [31].

Medikal alanda, MR damperlerin protez eklemlerde uygulamaları mevcuttur. Şekil 2.15.'de görülen MR damperli diz üstü protezi uygulamasında yürüyüş evresinde doğal diz hareketi incelenmiştir [32]. Karşılaştırma için 3 km/h yürüyüş hızında denek değişmeli olarak pnömatis ve MR damperli protezle yürürken görüntü tabanlı hareket ölçüm düzeneği ile yürüyüş verisi toplanmıştır (Şekil 2.16.).



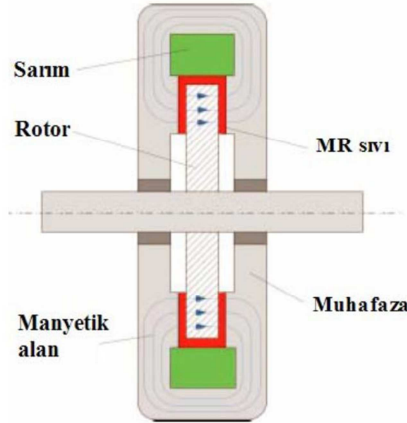
Şekil 2.15. MR damperli protez diz [32].



Şekil 2.16. Deneğin 3km/h hızda yaptığı yürüyüşlerin çevrimlerinin ortalamaları [32].

Bu çalışmada MR damperli protezle ulaşılan en yüksek diz açısı değeri $48,08^\circ$ ve pnömatik silindirli protez ile elde edilen $60,68^\circ$ 'dir. MR damperli yürüyüş doğal yürüyüşe daha yakındır.

MR sıvıların bir başka uygulama alanı ise kavramalar, frenler ve dönel damperlerdir. Lord firması tarafından ticari olarak üretilen MRB-2107-3 kodlu MR frenin şematik görünüşü verilmiştir (Şekil 2.17.). MRB-2107-3 10-30 milisaniyelerde tepki verebilmekte, düşük enerji tüketimine sahip ve düşük hızlarda dahi yüksek tork sönümlemesi yapabilmektedir. Programlanabilir ve sisteme kolayca entegre olabilir.



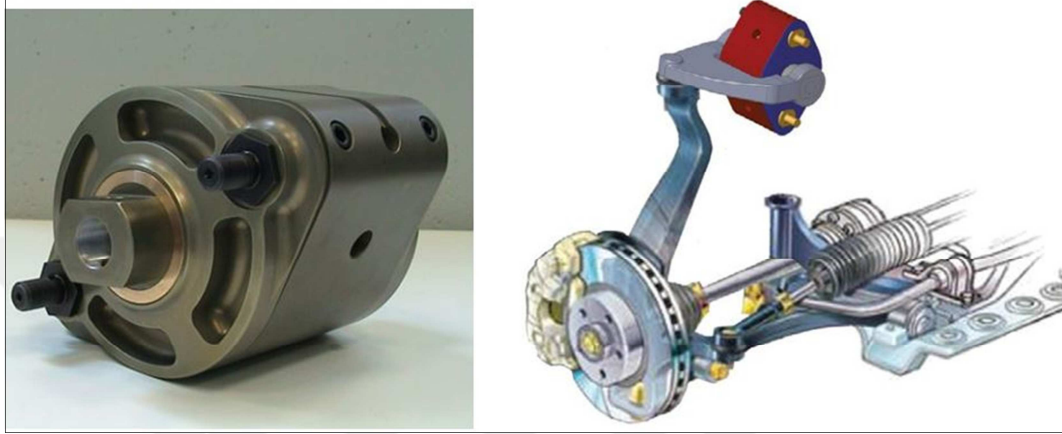
Şekil 2.17. MRB-2107-3'ün şematik görünümü [23].

Tablo 2.3'te MR frene ait teknik bilgiler verilmiştir.

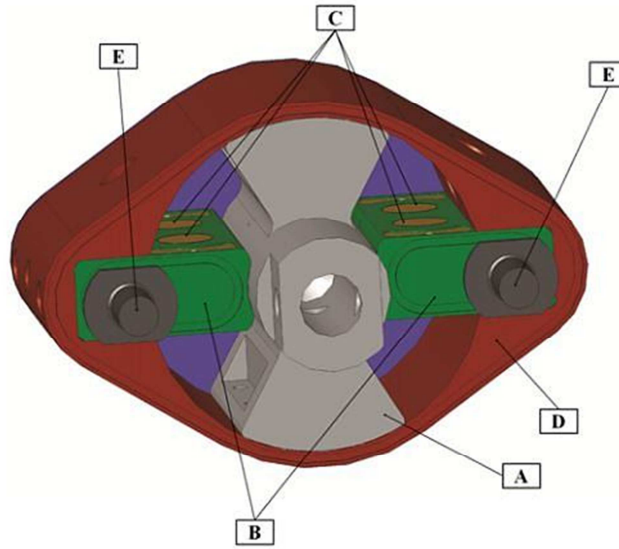
Tablo 2.3. MRB-2107-3'e ait teknik özellikler

Özellikler	Açıklama
Tip	Disk
Çap	92,20 mm
Uzunluk	36,57 mm
Ağırlık	1,40 kg
Maksimum Tork	5,64 Nm
Minimum Tork	0,3 Nm
Maksimum Akım	1A
Maksimum Çalışma Hızı (RPM)	1000
Çalışma Sıcaklığı	-28 °C ile 71 °C arası

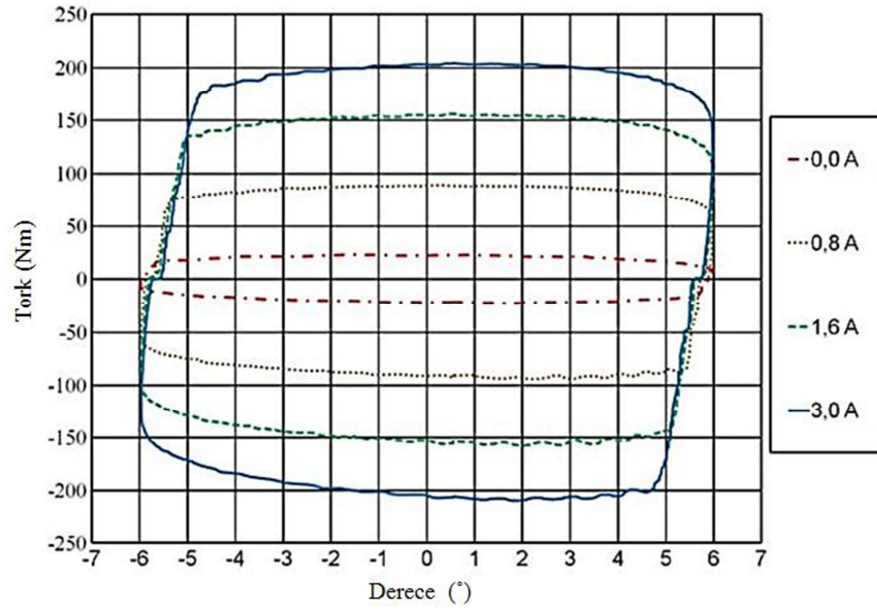
Otomotiv sektöründe KAD-MR damper uygulamasının bir örneği de FIAT tarafından, Alfa Romeo 147 aracının ön süspansiyon takımında meydana gelen titreşimi absorbe etmek için geliştirilmiştir. Geliştirilen KAD-MR damper Şekil 2.18’de, bileşenleri Şekil 2.19.’da gösterilmiştir. KAD-MR damperin sönüm değerleri ise Şekil 2.20. ve Şekil 2.21.’de gösterilmiştir.



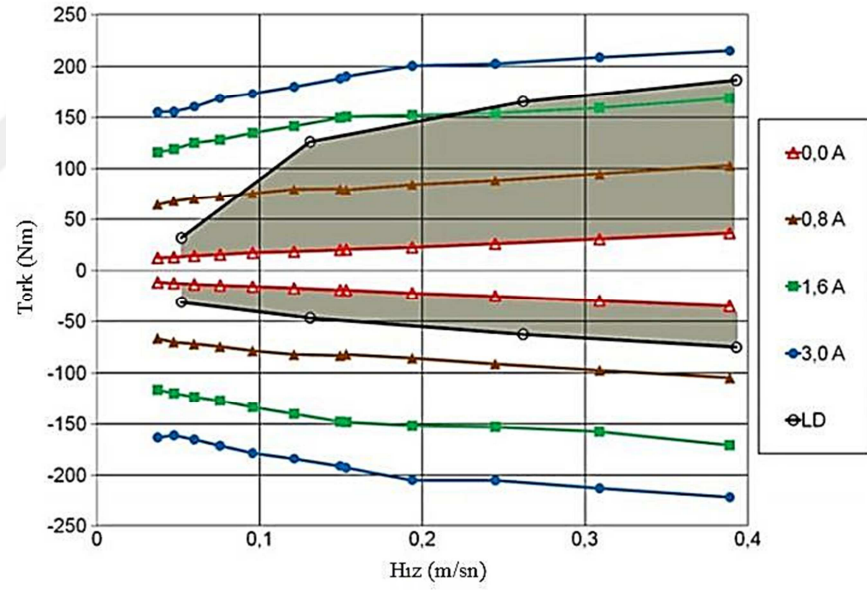
Şekil 2.18. Alfa Romeo 147’de KAD-MR damper uygulaması [11].



Şekil 2.19. A-kanat, B-valf gövdesi, C-valf yatakları, D-damper gövdesi, E-civata [11].



Şekil 2.20. Farklı akımlarda test edilen KAD-MR damperin tork sönüm değerleri [11].

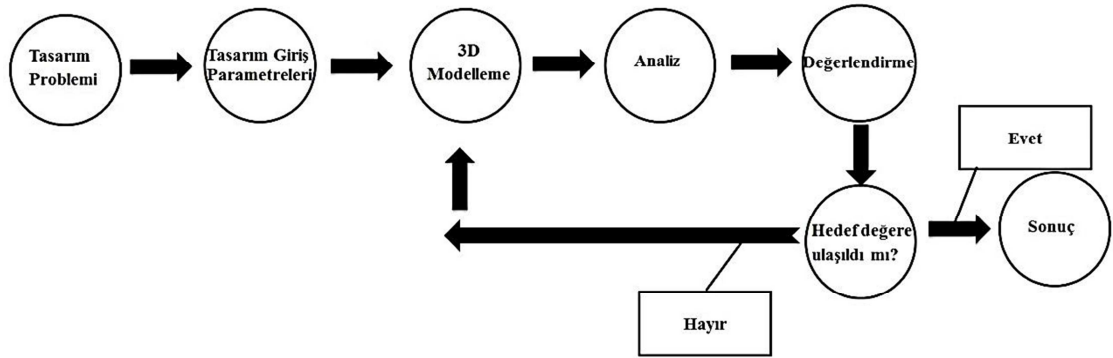


Şekil 2.21. Alfa 147 için gereken sönüm karakteristiği aralığı (gri bölge) [11].

BÖLÜM 3. KAD-MR DAMPER TASARIMI

KAD-MR damper, kısıtlı açısal deplasmanlı tork sönümlenmesi gereken uygulamalarda kullanılmaktadır. Örneğin insan vücudunda normal bir yürüyüşte diz ekleminde ortaya çıkan tork sönüm ihtiyacı yaklaşık olarak 20-30 Nm arasında değişmektedir [33][34]. 90 kg'lık ampute bir insan, merdivenden inerken diz ekleminde 45 Nm tork sönümüne ihtiyaç duymaktadır [35].

Farklı alanlardaki tork sönüm ihtiyacına cevap verebilmek için hedefimiz, yenilikçi bobin yerleşimiyle daha yüksek çalışma açısına sahip kompakt yapıda başlangıç için 90 Nm tork sönümü yapabilen bir KAD-MR damper geometrisi tasarlamaktır.

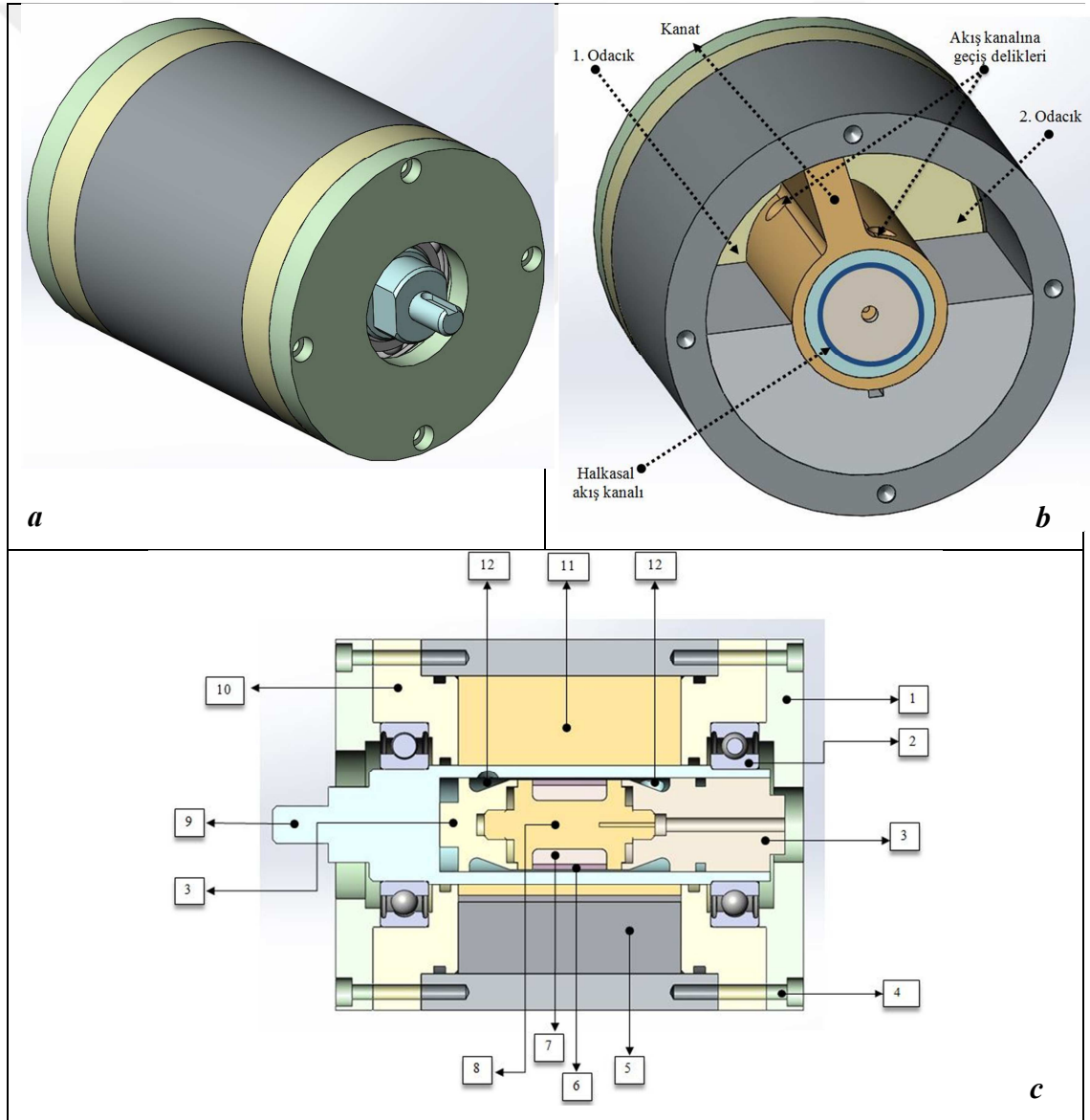


Şekil 3.1. Kavramsal tasarım süreç döngüsü

KAD-MR damperin kavramsal tasarımı üç boyutlu modelleme programı ile yapılmıştır. Tasarıma ait süreç döngüsü Şekil 3.1.'de, tasarım adımları ise Tablo 3.1.'de listelenmiştir. Bu süreç döngüsü dikkate alınarak tasarlanan prototip Şekil 3.2. a'da, kesit görünüş Şekil 3.2.b ve Şekil 3.2. c'de, KAD-MR damperin bileşenleri ise Tablo 3.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. KAD-MR damper tasarım adımları

- 1 Sistemde ilk tasarımı için geometrik büyüklüklerin kararını vermek,
- 2 Kanat geometrisinin kaç derece çalışacağına karar vermek,
- 3 Kanat sayısı ve kanat yapısını (düz veya açılı bir kanat geometrisi) belirlemek,
- 4 MR sıvının transfer olacağı deliğin kanat üzerindeki konumunun belirlenmesi,
- 5 Milin yataklama konstrüksiyonunun belirlenmesi,
- 6 Sızdırmazlık elemanlarının türü ve yerleştirileceği bölgenin tespiti,
- 7 KAD-MR damperde kullanılacak malzemelerin cinsinin tespiti



Şekil 3.2. Tasarımı gerçekleştirilen KAD-MR damper geometrisi

Tablo 3.2. KAD-MR damperin bileşenleri

Numara	Açıklama
1	Gövde kapağı
2	Rulman
3	Makara merkezleme parçası
4	İmbus başlı civata
5	Kabuk
6	Bobin yalıtım malzemesi
7	Bobin
8	Elektromanyetik çekirdek
9	Mil
10	Rulman yataklama parçası
11	Kanat
12	Akış kanalına geçiş delikleri

BÖLÜM 4. KAD-MR DAMPERİN MANYETİK ALAN ANALİZİ

KAD-MR damperin sönüm kuvvetinin belirlenmesi için manyetik devre denklemlerinin çözülmesi gerekmektedir. Bu yolla, MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı bölgedeki akma gerilmesi değeri elde edilmektedir [36]. KAD-MR damperde, akışkan olarak Lord Şirketi'ne ait, MRF-132DG sıvısı kullanılmıştır. Bu sıvının katalog verileri [27], manyetik alan şiddeti-manyetik akı yoğunluğu ile akma gerilmesi-manyetik akı yoğunluğu ilişkisi en küçük kareler metoduyla eğri uydurularak denklem (4.1)'de ifade edilmiştir [37].

$$\tau_y = 52.962B^4 - 176.51B^3 + 158.79B^2 + 13.708B + 0.1442 \quad (4.1)$$

B, Tesla cinsinden manyetik akı yoğunluğudur ve τ_y ise KPa cinsinden akma gerilmesidir. Kirchoff'un manyetik devre kuralına göre;

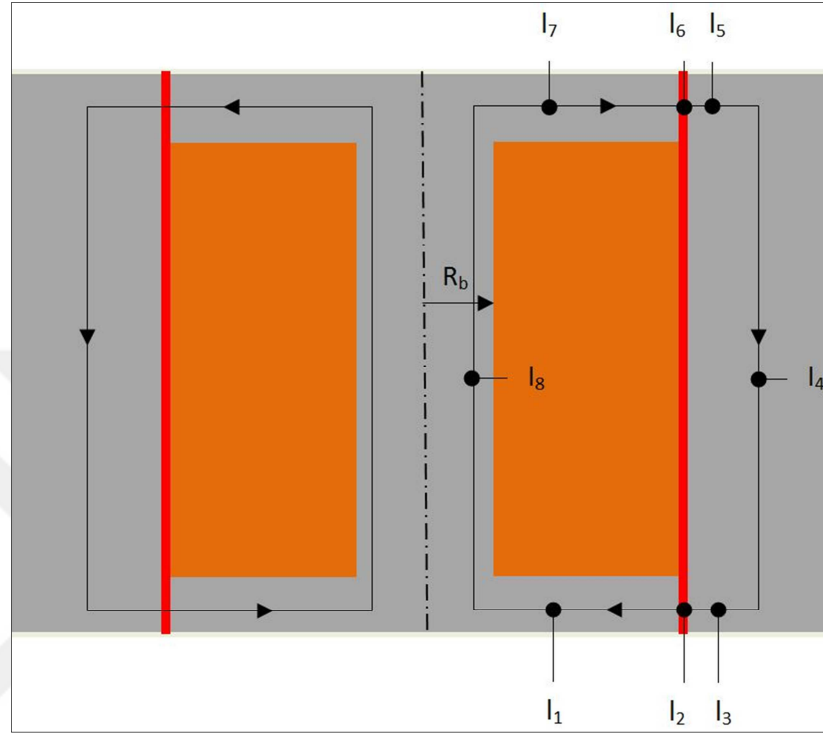
$$\sum H_k I_k = N_c I \quad (4.2)$$

H_k devrenin k bağlantı noktasındaki manyetik alan şiddeti, I_k bağlantının efektif uzunluğudur. N_c bobinin sarım sayısı, I ise bobine uygulanan akımı ifade etmektedir. Manyetik akı korunum kuralına göre;

$$\varphi = B_k A_k \quad (4.3)$$

φ manyetik akıyı, A_k k bağlantı noktasındaki kesit alanı, B_k k bağlantı noktasındaki manyetik akıyı ifade etmektedir. Manyetik akı yoğunluğu $B_k = \mu_0 \mu_r H_k$ şeklinde yazılabilir. μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğidir ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ TmA}^{-1}$). μ_r ise bir

ortamın manyetik geçirgenliğinin, boşluğun manyetik geçirgenliğine oranını yani göreceli geçirgenliği ifade etmektedir. Malzemelerin manyetik özelliklerini ifade etmek için çoğunlukla doğrusal olmayan B-H eğrileri kullanılmaktadır [36].



Şekil 4.1. KAD-MR damperde kullanılan bobinin manyetik döngüsü

MR damperde kullanılan bobinin manyetik döngüsü (Şekil 4.1.),

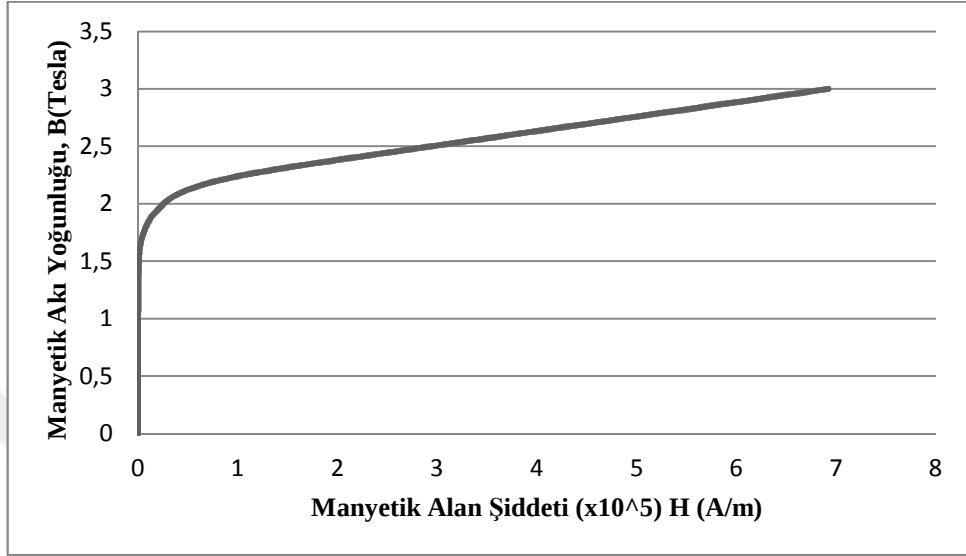
$l_1 = l_7$, $l_2 = l_6$, $l_3 = l_5$ olmak üzere

$$2H_1l_1 + 2H_2l_2 + 2H_3l_3 + H_4l_4 + H_8l_8 = N_cI \quad (4.4)$$

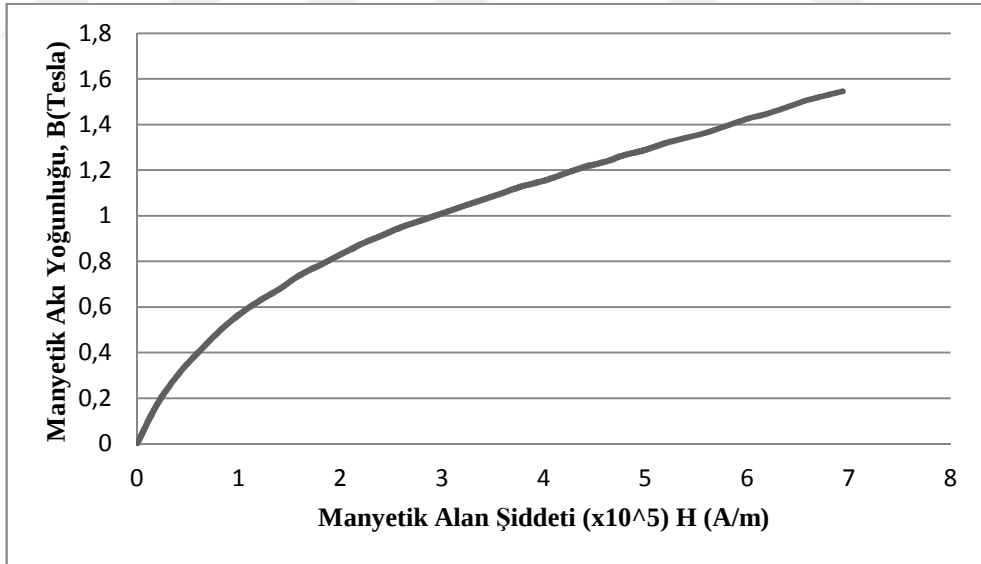
$$\varphi = B_1A_1 = B_2A_2 = B_3A_3 = B_4A_4 = B_8A_8 \quad (4.5)$$

şeklinde ifade edilebilir [2]. Göreceli geçirgenlik manyetik alan şiddeti ve sıcaklık ile değişmektedir. Artan manyetik alan şiddeti ile göreceli geçirgenlik doyum noktasına kadar artar, sonra azalır. Malzeme seçimi yapılırken manyetik ve termal özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır [38]. MR damperlerde, yüksek manyetik geçirgenliğe ve doyuma sahip düşük karbonlu (%0.15' den daha az) çelikler kullanılmalıdır [23].

Bu çalışmada mil ve makara malzemesi için St37 çeliği, makara merkezleme parçaları için Al alaşımı tercih edilmiştir. St37 çeliğine ve MR sıvıya ait B-H eğrileri sırasıyla Şekil 4.2., Şekil 4.3.'te gösterilmiştir [39].



Şekil 4.2. St37 çeliğine ait B-H grafiği [39].

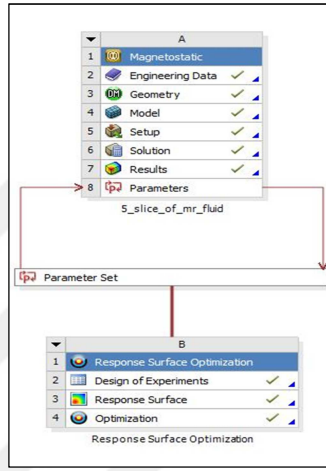


Şekil 4.3. MRF-132DG'ye ait B-H grafiği [39].

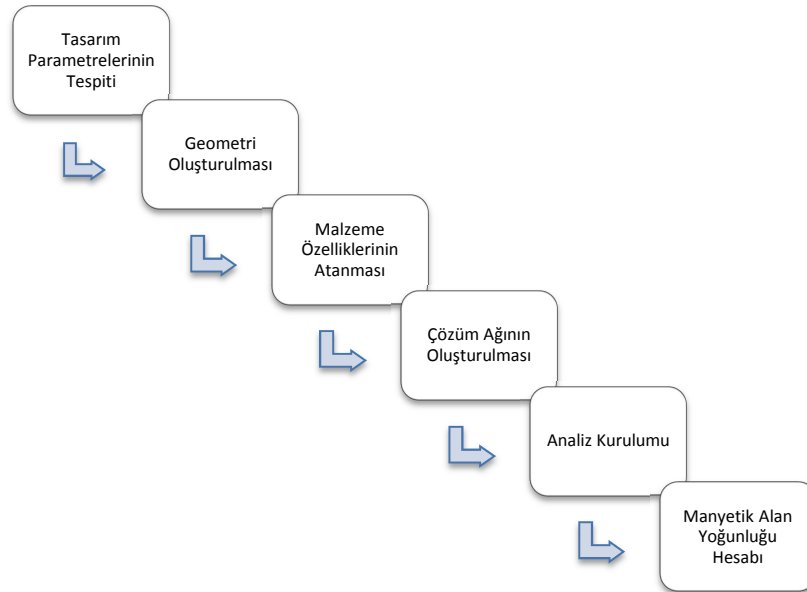
MR cihaz davranışını doğru karakterize etmek için sonlu elemanlar metodu kullanılmaktadır. Manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu manyetostatik analiz ile hesaplanmaktadır [40].

4.1. Manyetik Alanın Sayısal Olarak Hesaplanması

KAD-MR damperde, MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı bölge ANSYS v16.2 Magnetostatic’de (Şekil 4.4.) üç boyutlu olarak modellenmiştir. Analizlerde, boyutsal büyüklüklerin manyetik alana olan etkisini etkin olarak inceleyebilmek için tasarım parametrik olarak çalışılmıştır. Manyetik alan analizinde izlenen adımlar Şekil 4.5.’te gösterilmiştir.

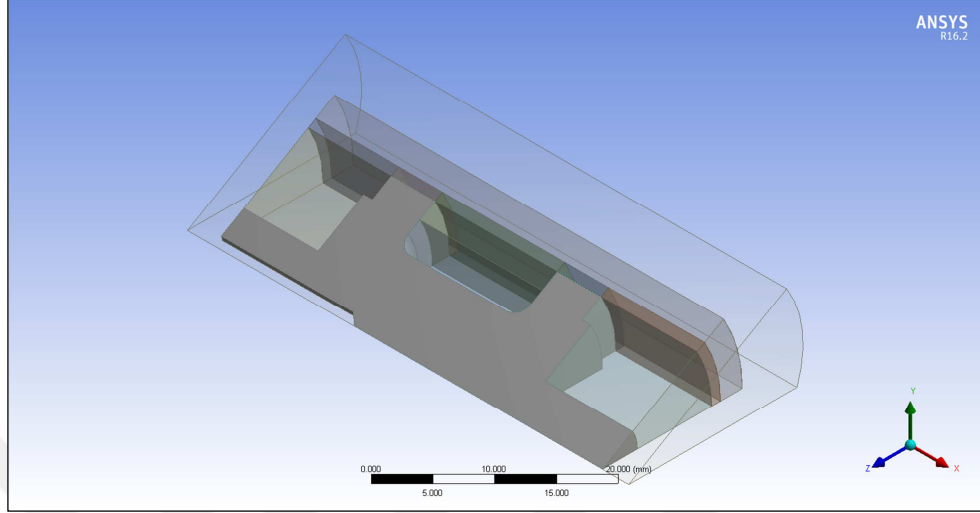


Şekil 4.4. ANSYS Magnetostatic programı workbench arayüzü



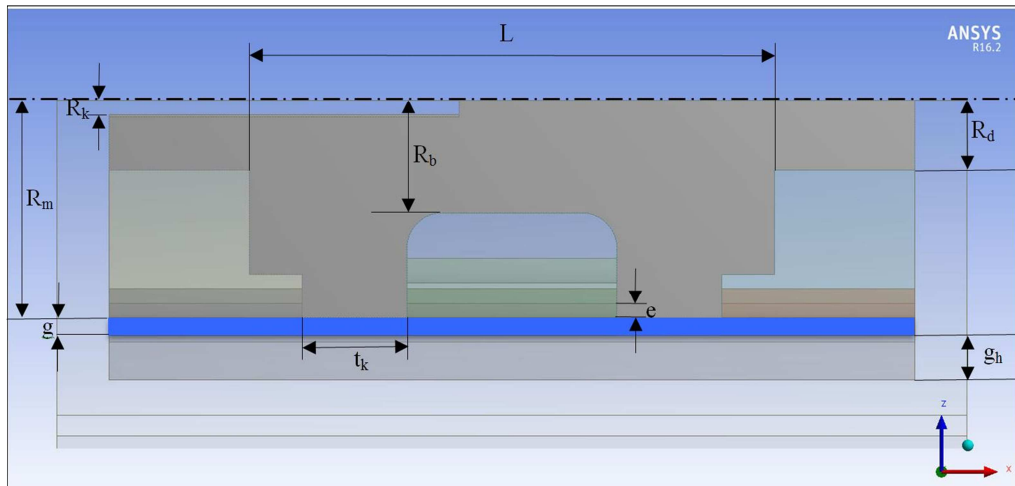
Şekil 4.5. Manyetik alan analizi için akış algoritması

Manyetik alanın meydana geldiği bölge simetrik olduğundan, bu bölgede daha hızlı sonuca ulaşmak için, 30°'lik bir dilim sayısal olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.6.).



Şekil 4.6. Manyetik alan analizi için tasarlanan geometri

Manyetik alan analizinde incelenen parametreler Şekil 4.7.'de ve Tablo 4.1.'de verilmiştir.

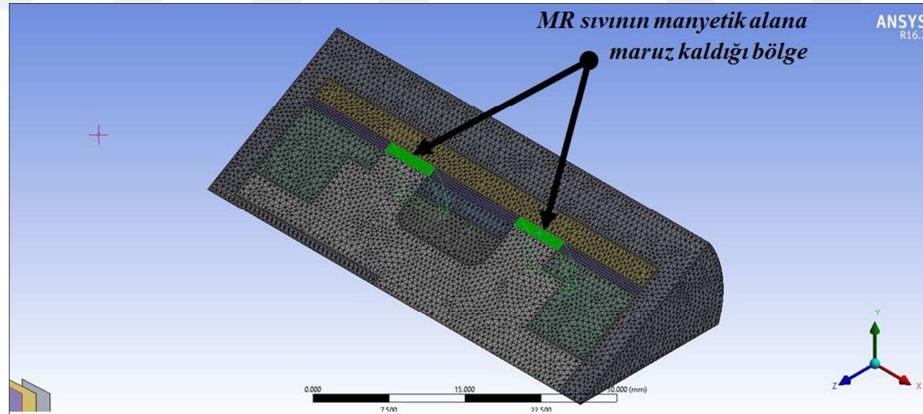


Şekil 4.7. Manyetik alan analiz geometrisi üzerindeki büyüklükler

Tablo 4.1. Manyetik alan analizinde kullanılan parametreler

Parametre	Açıklama	Birimi
L	Makara boyu	mm
g	Kanal genişliği	mm
g_h	Manyetik alanın dönüş genişliği	mm
e	Epoksi kaplama kalınlığı	mm
t_k	Kutup başı uzunluğu	mm
R_k	Kablo bağlantı delik yarıçapı	mm
R_m	Makara dış yarıçapı	mm
R_b	Bobin yarıçapı	mm
R_d	Saplama yarıçapı	mm
d_k	Kablo çapı	mm

Manyetik alan analizi için geometri 346.000 düğüm ve 203.000 dört yüzeyle (tetrahedral) hacim elemanına bölünerek çözüm ağı oluşturulmuştur (Şekil 4.8.).



Şekil 4.8. MR sıvı üzerinde B'yi maksimuma ulaştırmak istediğimiz bölge

Manyetik alan analizindeki hedefimiz, bobin üzerinden minimum değerlerde manyetik alan üretirken, MR sıvı üzerindeki (Şekil 4.8.) manyetik alanı maksimuma ulaştırmaktır. MR sıvının manyetik alana duyarlılığının 0.6 Tesla değerine kadar yüksek olduğunu ve bu değerden sonra manyetik alan şiddeti arttıkça manyetik akı yoğunluğunun aynı oranda artmadığını sayfa 14'te açıklamıştık. Bu sebeple en

yüksek verimi alabilmek için, (minimum akımda MR sıvı üzerinde 0.6 Tesla manyetik alan şiddetini elde etmek için) gerekli analizler ve optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

4.1.1. Manyetik alan optimizasyon çalışması

Bu bölümde, minimum akım ile istenilen akıma gerilmesini sağlayacak optimum boyutları elde etmek için gerekli optimizasyon çalışmaları açıklanacaktır. Sayısal olarak hedef değerleri sağlayan birden çok analiz olabilir. Her bir prototipin imalatını ve testini yapmak hem maliyet hem de zaman açısından zor olacağı için geometrik boyutların optimizasyonu yapılacaktır.

ANSYS v16.2’de Workbench arayüzündeki Response Surface (Cevap Yüzeyi/İlişki Yüzeyi) modülü kullanılarak manyetik alanın optimizasyonu yapılmıştır. Response Surface çıkış parametrelerinin giriş parametrelerine göre değişimini belirlemektedir.

Veriler önceden oluşturulan tasarım noktalarını (Design of Experiment-DOE) kullanırlar ve DOE’nin analizini yapmadığı tüm ara bölgeyi tarayarak, önceden belirlenen sınırlar aralığındaki tüm giriş parametreleri için bir cevap oluştururlar. Yani sınırlar arasındaki farklı giriş parametreleri için hangi değerler seçilirse seçilsin, buna karşılık gelen bir çıkış parametresi oluşturulmuş olur.

Algoritma olarak da MOGA (Çok Amaçlı Genetik Algoritma) seçilmiştir. Bu algorithmada ise Face-centered adında ve eş yüzeyler oluşturularak optimum noktanın arandığı matematiksel bir bağıntı kullanılmıştır.

İlk olarak minimum akımda MR sıvı üzerinde 0,6 Tesla eldesi için; Tablo 4.2’deki geometrik boyutların aralık değerleri dikkate alınarak ANSYS Workbench arayüzündeki Response Surface (RSO/Cevap Yüzeyi/İlişki Yüzeyi) modülüyle 136 adet çözüm yapılmıştır. (Bkz. Ek A).

Tablo 4.2. Parametrelerin aralık değerleri

Parametre	Alt Sınır	Üst Sınır	Sabit Değer
L	28mm	32mm	-
g	0,4mm	1mm	-
g_h	2,5mm	4,1mm	-
R_m	11,5mm	12,5mm	-
R_b	4,5mm	6,5mm	-
t_k	4mm	6mm	-
I	0,25A	2A	-
N_c	100	160	-
e			2mm
R_k			1mm
R_d			4mm
d_k			0,4mm

4.1.2. Manyetik alan optimizasyon sonuçları

Parametre değer aralıkları (Tablo 4.2.) temel alınarak, herhangi bir kısıt belirtmeden bu aralıkta MR sıvı üzerinde oluşturabileceğimiz maksimum manyetik akıyı veren parametreler optimize edilmiştir. Üç adet prototip geometri (PG) değerleri hesaplanmıştır (Tablo 4.3.). Daha sonra manyetik alan büyüklükleri dikkate alınarak akma gerilmeleri, denklem (5.1) ile hesaplanmıştır (Tablo 4.4.).

Tablo 4.3. MR sıvı üzerindeki B_{maks} için optimize edilmiş PG değerleri

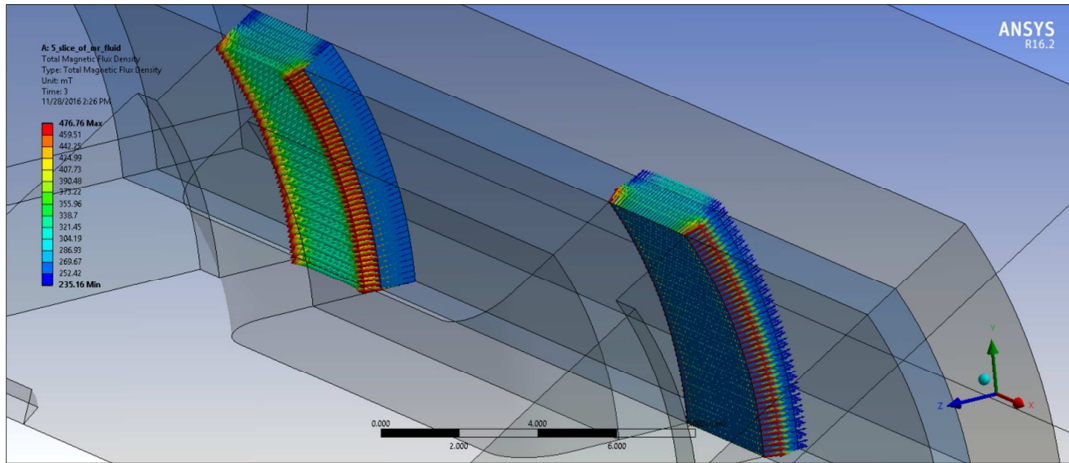
	t_k	g	g_h	R_m	R_b	L	N_c	I (A)	B_{maks} (T)	d_k
PG1	4,0453	0,46607	3,0678	12,446	6,4388	28,092	160	1,9918	0,79965	0,4
PG2	4,0418	0,45613	3,0779	12,466	6,4559	28,071	160	1,9791	0,79924	0,4
PG3	4,036	0,69074	2,8413	12,468	6,4619	28,058	160	1,9625	0,79876	0,4

MR etkinin olduğu bölgenin büyüklüğü, akma gerilmesi ve kanal genişliği değerleri kullanılarak KAD-MR damperin akış analizi yapılmıştır. Sönüm tork değeri hesaplanmıştır (Bölüm 5).

Tablo 4.4. Optimum B'ye karşılık olarak akma gerilmesi ve tork değerleri

	B_{maks} (T)	τ_y (kPa)
PG1	0,79965	44,043
PG2	0,79924	44,027
PG3	0,79876	44,009

MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı bölgede manyetik akı vektörlerinin büyüklüklerini incelediğimizde, bazı bölgelerde maksimum değerde bazı bölgelerde ise minimum değerde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.9.). Yani maksimum manyetik akı yoğunluğu (B_{maks}), MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı bölgenin tamamında aynı değerde değildir.



Şekil 4.9. Manyetik akı vektörlerinin büyüklüğü ve dağılımı

Bu durum, denklem (4.1)'de daha büyük akma gerilmesi hesaplamamıza fakat uygulamada daha düşük akma gerilmesi elde etmemize neden olacaktır. Doğal olarak sayısal çözümle hesapladığımız tork değeriyle deneysel çalışmada elde edeceğimiz tork değeri farklı olacaktır. Muhtemel sorunun önüne geçmek için MR sıvı

üzerindeki manyetik akı yoğunluğunun ortalama değerini (B_{ort}) hesaplayarak optimizasyonu revize ettik.

Bu kapsamda MR sıvı üzerindeki minimum manyetik akı yoğunluğu (B_{min}) parametre olarak tanımlanmıştır. Çalışmanın amacı doğrultusunda minimum akımda MR sıvı üzerinde ortalama 0,6 T ve 34.000 Pa akma gerilmesi eldesi için; akımı minimize, ortalama manyetik akıyı 0,6 T' ya maksimize ederek yeni prototip geometri değerleri elde edilmiştir (Tablo 4.5.).

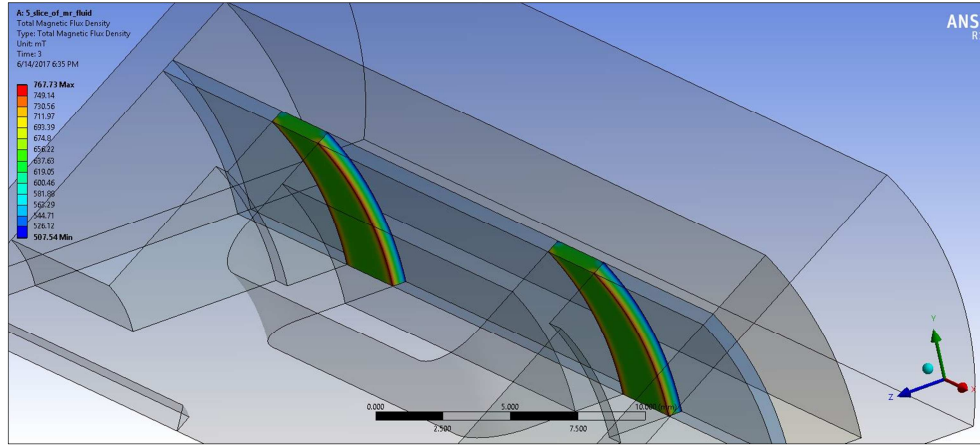
Tablo 4.5. Kısıtları dikkate alarak yapılan optimizasyon değerleri

	t_k	g	g_h	R_m	R_b	L	N_c	I (A)	$B_{min}(T)$	$B_{maks}(T)$
PG5	4,0707	0,40214	3,124	12,474	6,4735	29,927	160	1,593	0,55048	0,76704
PG6	4,0251	0,40186	3,2639	12,334	6,3311	29,826	160	1,704	0,54446	0,7577
PG7	4,2717	0,48979	3,0259	12,484	6,4646	30,193	160	1,671	0,5085	0,7497

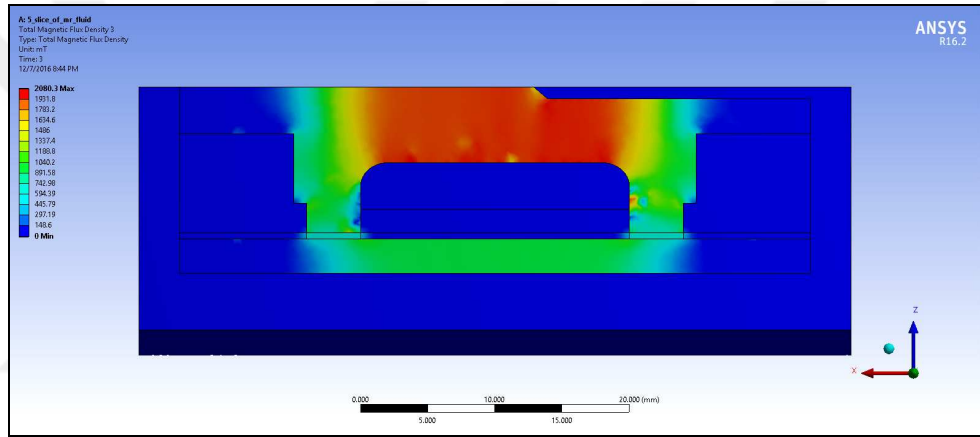
PG5-PG6-PG7 değerleri hedef manyetik alan büyüklüğünü sağlamaktadır. Fakat bu değerleri kullanarak talaşlı imalat yapmanın zorluğundan (hassas tezgahlara ihtiyaç duyulmasından ve maliyetli olması) dolayı, boyutsal büyüklükler girilerek yeni bir optimizasyon ile aşağıdaki PG8 değerleri elde edilmiştir (Tablo 4.6.). PG8'e ait görsel sonuçlar Şekil 4.10., Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.'te gösterilmiştir.

Tablo 4.6. Optimize edilmiş geometrik değerler

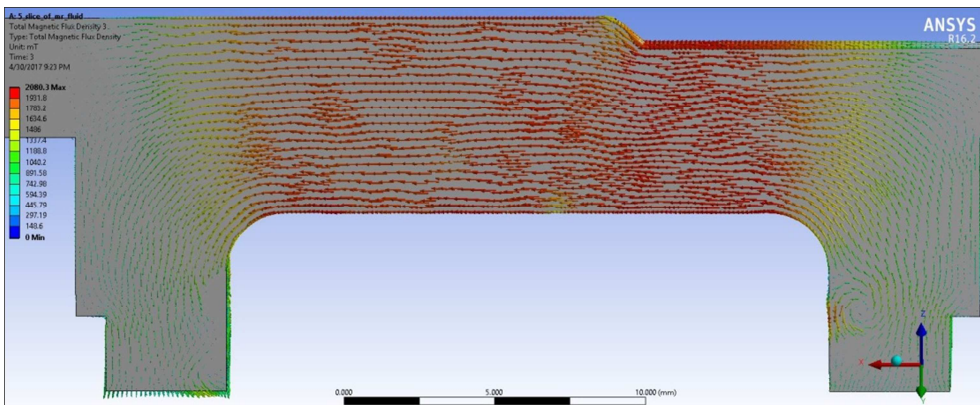
	t_k	g	g_h	R_m	R_b	L	N_c	I (A)	$B_{min} (T)$	$B_{maks}(T)$	$B_{ort}(T)$
PG8	4	0,55	2,95	12,5	6,5	30	160	1,70	0,50778	0,76794	0,6



Şekil 4.10. PG8’de MR sıvı üzerindeki manyetik akı yoğunluğu



Şekil 4.11. PG8’deki manyetik akı yoğunluğu



Şekil 4.12. PG8 makarasındaki manyetik akı döngüsü

BÖLÜM 5. KAD-MR DAMPERİN AKIŞ ANALİZİ

5.1. Analitik Yöntemle Tork Hesabı

KAD-MR damper tarafından üretilen tork sönümünü hesaplamak için, halkasal kanal içindeki basınç düşümünün hesaplanması gerekmektedir. Halkasal kanal içindeki basınç düşümü, denklem (5.1)'de ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta P = \Delta P_{\mu} + \Delta P_{\tau} = \frac{6\mu L Q}{\pi R_{ort} g^3} + c \frac{2t_k}{g} \tau_y \quad (5.1)$$

ΔP_{μ} viskoz yani kontrol edilemeyen basınç düşümü ve ΔP_{τ} manyetik alana bağlı olarak akma gerilmesinden kaynaklanan yani kontrol edilebilen basınç düşümüdür. R_{ort} halkasal kanalın ortalama yarıçapıdır. Q ise KAD-MR damper boyunca olan debidir ve kanat hızından hesaplanır.

$$Q = Q_k = \frac{dV}{dt} = \frac{\frac{d\theta}{2\pi} \int_{R_2}^{R_1} 2\pi \cdot dr \cdot H}{dt} = \frac{1}{2} H (R_1^2 - R_2^2) \omega \quad (5.2)$$

Q_k kanadın açısal hareketiyle oluşan debiyi, θ kanadın kaç derece döndüğünü, H akış hacmi yatay uzunluğunu, R_1 akış hacmi dış yarıçapını, R_2 kanat dairesi yarıçapını, ω ise açısal hızı ifade etmektedir.

Akış hızı profiline bağlı bir katsayı olan c ise, 2.07 ile 3.07 arasında değişen bir değer olup Spencer ve ark. tarafından ifade edilmiştir [41]:

$$c = 2.07 + \frac{6\mu Q}{6\mu Q + 0.4\pi R_{ort} g^2 \tau_y} \quad (5.3)$$

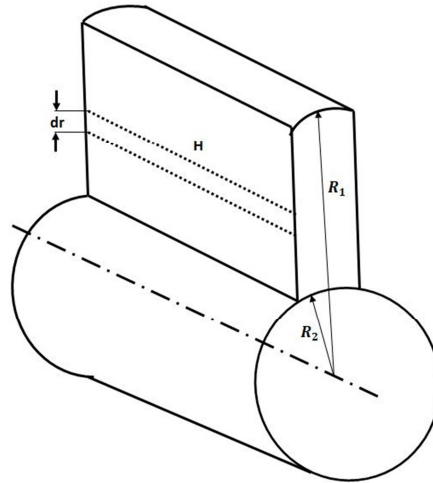
KAD-MR damper tarafından üretilen toplam sönüm kuvveti üç bileşenden meydana gelmektedir. Viskoz kuvvetlerden kaynaklanan kuvvet F_μ , damperin mekanik bileşenleri arasındaki hareketten kaynaklı sürtünme kuvveti F_f , MR akışkanının içindeki demir partiküllerinin neden olduğu manyetik alan kuvveti F_t olmak üzere damper kuvveti denklem x’de ifade edilmiştir.

$$F = F_t + F_\mu + F_f \quad (5.4)$$

Bu kuvvetlerden F_μ ve F_f herhangi bir akışkan hızına göre sabit bir kuvvet ürettiklerinden dolayı kontrol edilemeyen kuvvet olarak, F_t ise manyetik alan ile değiştiği için kontrol edilebilir kuvvet olarak isimlendirilir. Toplam kuvvetin kontrol edilemeyen kuvvete oranı olarak tanımlanan boyutsuz bir parametre olan dinamik aralık λ , MR damperin performansını değerlendirmek için kullanılmaktadır.

$$\lambda = 1 + \frac{F_t}{F_\mu + F_f} \quad (5.5)$$

KAD-MR damperde tork hesabı şu şekildedir:



Şekil 5.1. KAD-MR damperde kanat geometrisi

$$\begin{aligned}
dF &= P \cdot dA \\
dT &= P \cdot r \cdot dA \\
dT &= P \cdot r \cdot H \cdot dr
\end{aligned}
\tag{5.6}$$

F kuvveti, P basıncı, T torku ifade etmektedir. Denklem (5.6)'yı KAD-MR damperdeki kanadın sınırları boyunca integre edersek:

$$\begin{aligned}
\int dT &= \int_{R_2}^{R_1} P \cdot r \cdot H \cdot dr \\
T &= \frac{P \cdot H}{2} (R_1^2 - R_2^2)
\end{aligned}
\tag{5.7}$$

elde edilmiş olur.

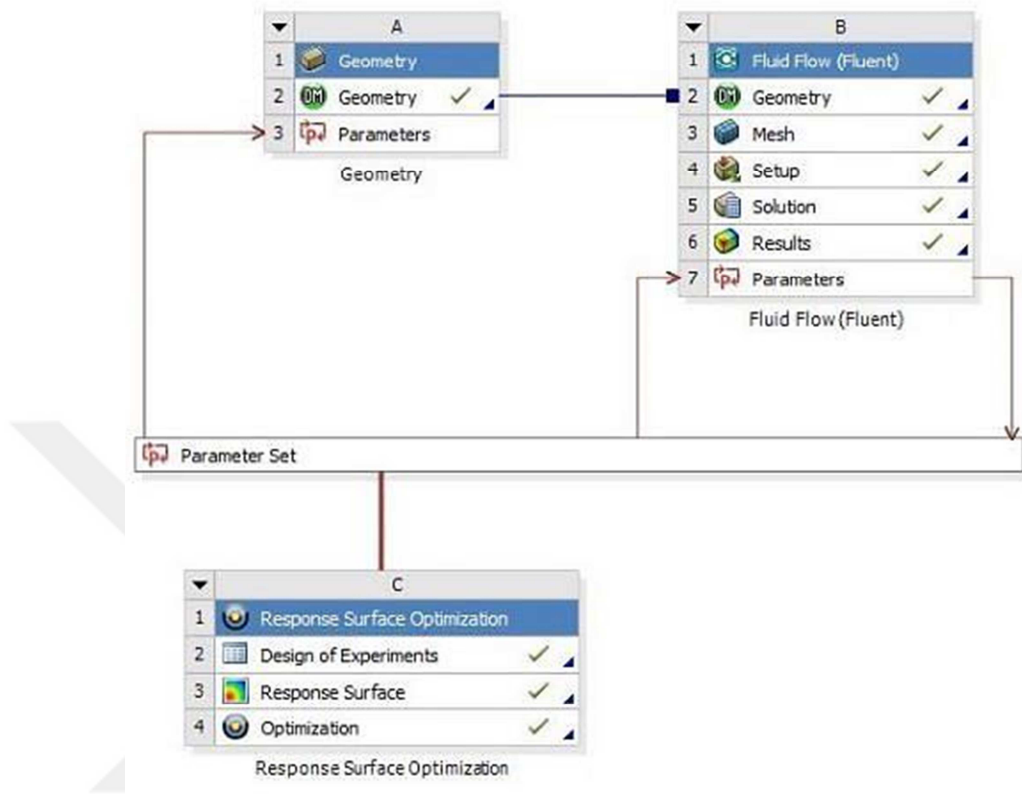
5.2. Akışın Sayısal Olarak Hesaplanması

Navier-Stokes momentum denklemleri, süreklilik denklemi, enerji denklemlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle bir akış hacmine uygulanarak yapılan bilgisayar destekli hesaplamaların tümü hesaplamalı akışkanlar dinamiği sınıfına girmektedir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, CFD (Computational Fluid Dynamics), olarak da ifade edilmektedir.

Halihazırda, lisanslı olarak kullanılan çok sayıda CFD programı vardır. KAD-MR damperin akış analizi (CFD) çalışmaları ANSYS FLUENT v16.2 programı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 5.2.).

FLUENT, ANSYS Workbench modülüyle veya tek başına çalışan bir ticari CFD programıdır. Program, ANSYS Workbench üzerindeki bir çok diğer programla uyumlu çalışmaktadır. Bu sayede hem akış hacminin geometrisini oluşturmak daha

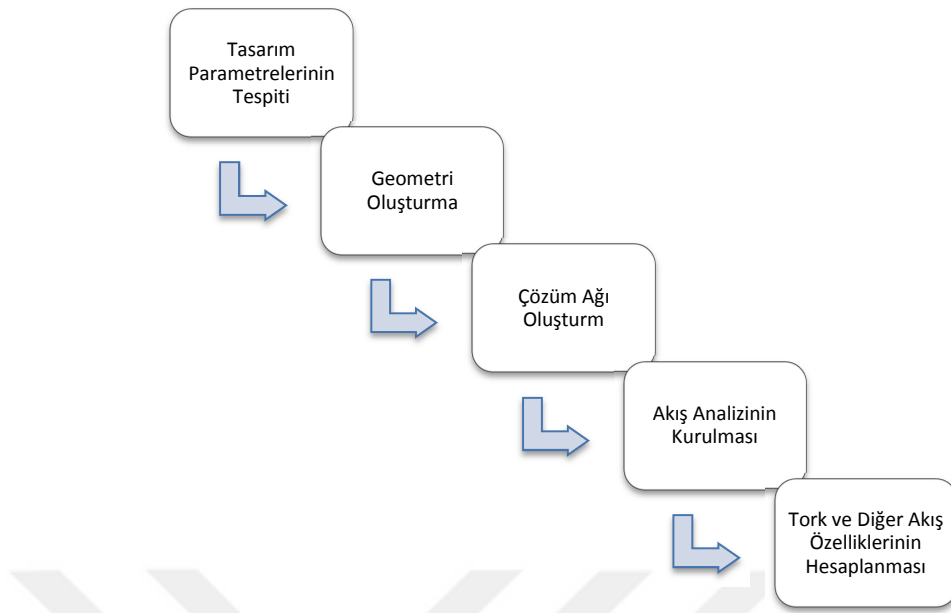
kolay hale gelmekte hemde çözüm dosyaları daha etkili bir şekilde çalışılmaktadır.



Şekil 5.2. ANSYS v16.2’de CFD analizi için kullanılan modüller

Akış analizindeki hedefimiz; manyetik alan analizinden elde ettiğimiz (kanal genişliği, makara çapı, kutup başı, makara boyu, manyetik alana bağlı kayma gerilmesi) değerler doğrultusunda sistemden 90 Nm tork sönümünü veren optimum akış geometrisini tespit etmektir.

Ayrıca 90 Nm tork sönümü eldesinde bir diğer hedefimiz, manyetik alana bağlı tork sönümünü maksimum yaparken, manyetik alan sıfır iken viskoz tork sönümü minimize yapmaktır. Analizde kullanılan adımlar sırasıyla açıklanmıştır (Şekil 5.3.).



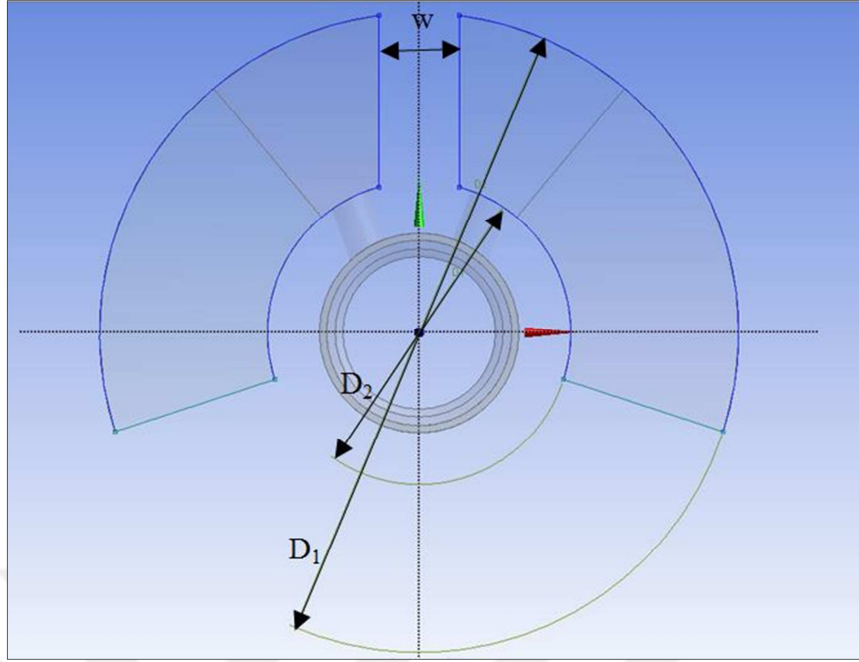
Şekil 5.3. Akış analizinin algoritması

5.2.1. Tasarım parametrelerinin tespiti ve geometri oluşturma

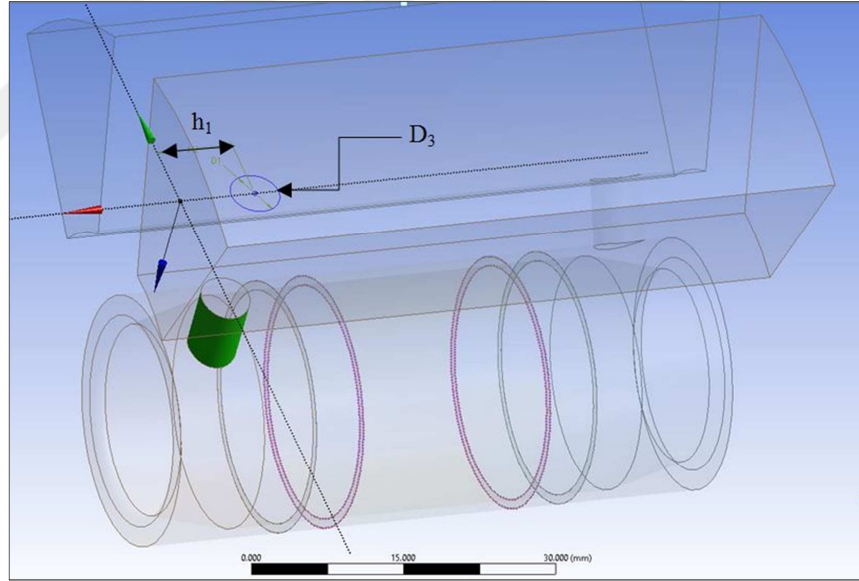
Parametrelerin belirlenmesi, optimizasyon ve cevap yüzeylerinin doğru oluşturulabilmesi için önemlidir. Doğru ve tutarlı cevap yüzeylerinin uygun sürelerde hesaplanabilmesi için toplam giriş parametrelerinin 10-15 sınırlarını geçmemesi tavsiye edilmektedir.

Parametre sayısı arttıkça DOE noktaları arttığı için, yapılacak analiz sayısı da arttırmaktadır. Parametreler, mantıklı veya yakınsayabilen sonuçlar üretmiyor ise bu durumda cevap yüzeylerinin oluşması imkansızdır. Sadece bir nokta çözüm vermediğinde, optimizasyon gerçekleşmemektedir.

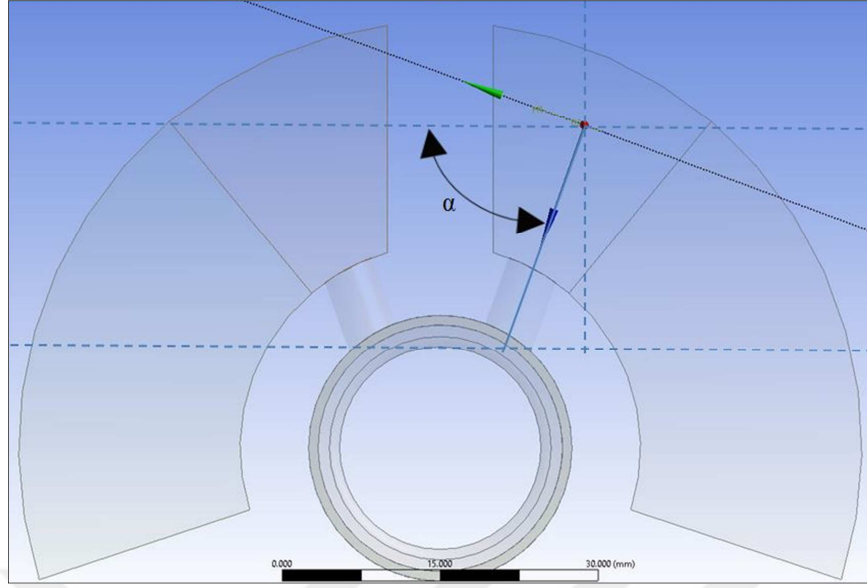
KAD-MRD'nin akış hacmi ANSYS Dizayn Moduler'da çizilmiştir (Şekil 5.4.-5.-6.-7.-8.) ve büyüklükler parametre olarak tanımlanmıştır (Tablo 5.1.).



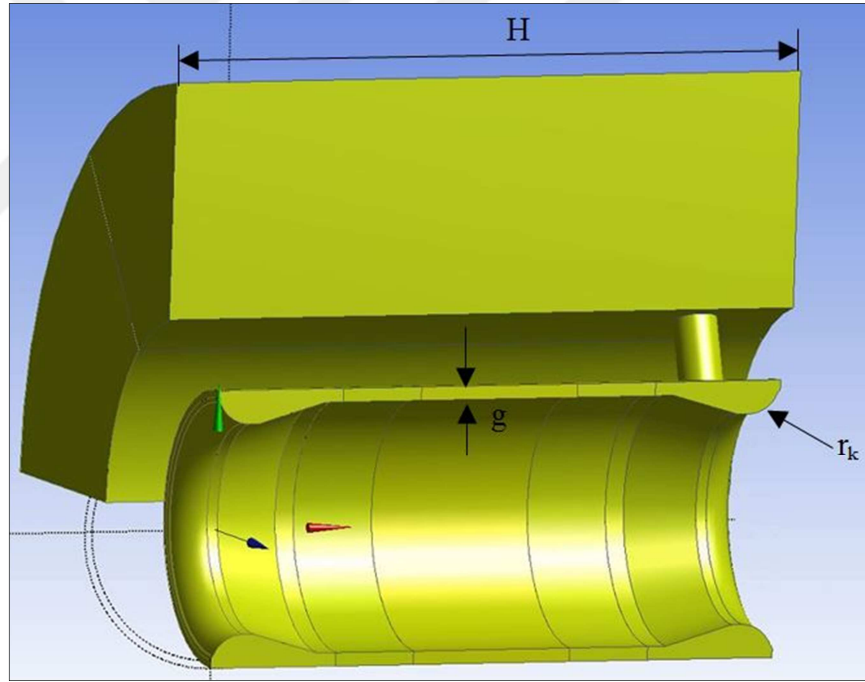
Şekil 5.4. Akış analizindeki parametreler (a)



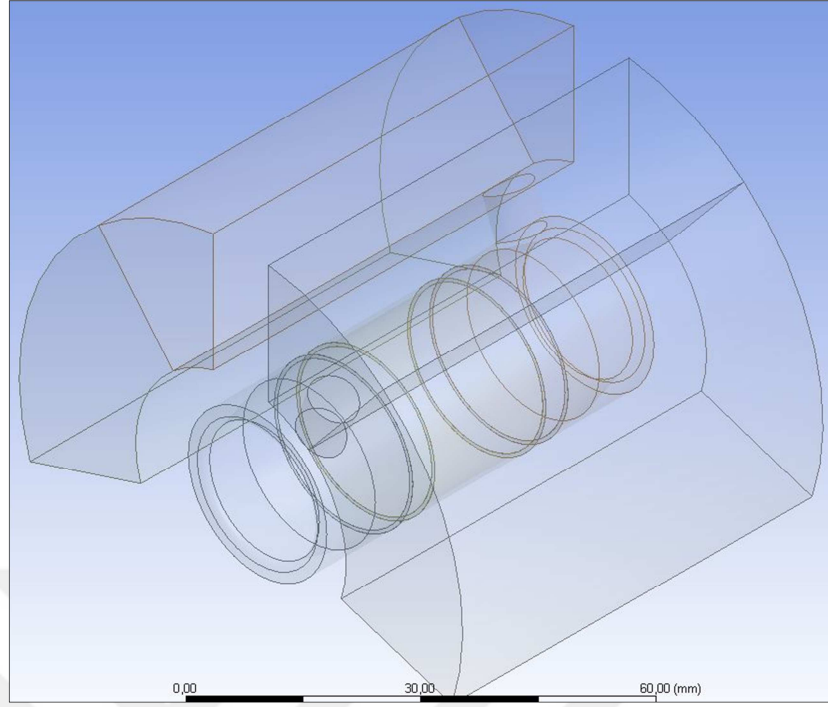
Şekil 5.5. Akış analizindeki parametreler (b)



Şekil 5.6. Akış analizindeki parametreler (c)



Şekil 5.7. Akış analizindeki parametreler (d)



Şekil 5.8. KAD-MRD'nin akış hacmine ait geometri

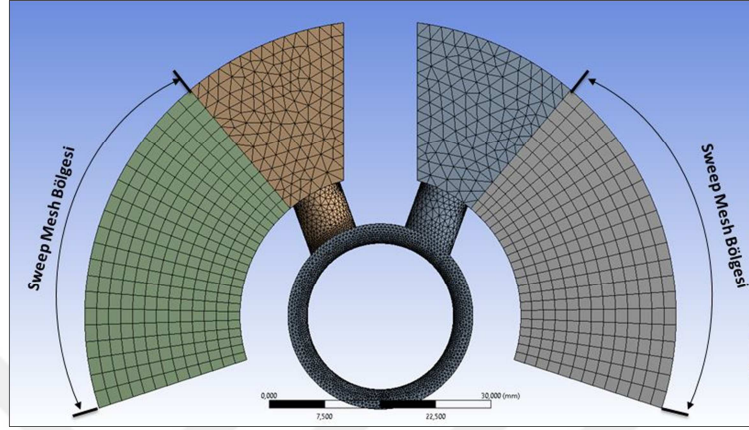
Tablo 5.1. Akış analizinde incelenen parametreler

Parametre	Açıklama	Birimi
w	Kanat kalınlığı	mm
D_1	Akış hacmi dış çapı	mm
D_2	Kanat dairesi çapı	mm
D_3	Delik çapı	mm
h_1	Delik merkezinin dışarıya olan uzaklığı	mm
α	Delik açısı	derece
H	Akış hacmi yatay uzunluğu	mm
g	Kanal genişliği	mm
r_k	Konik yarıçapı	mm

5.2.2. CFD için çözüm ağı

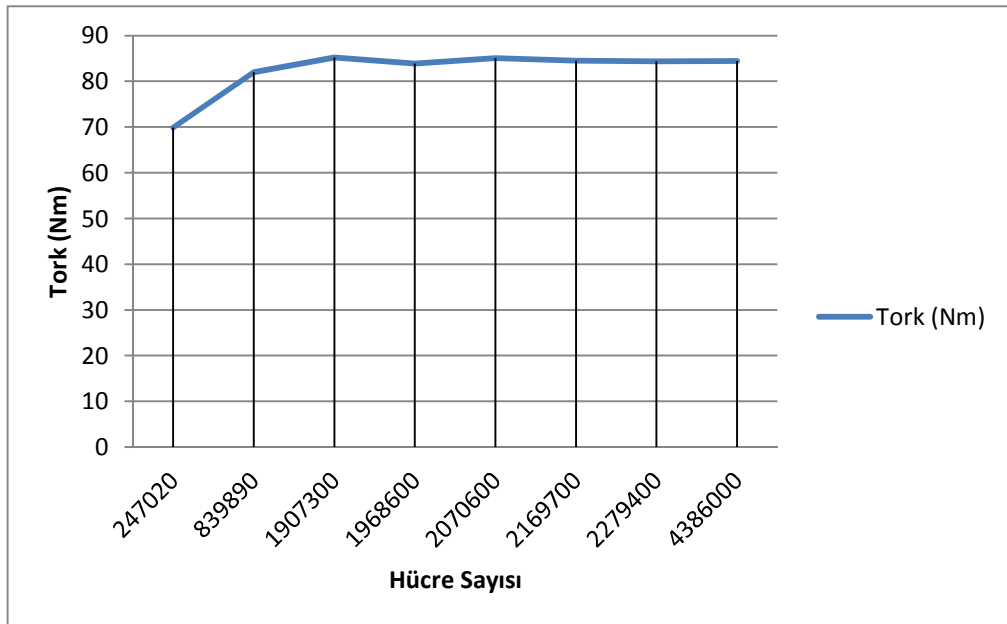
Çözüm ağı yapısı analiz sonuçlarını etkileyen önemli bir parametredir [42]. KAD-MR damperin çözüm ağında; süpürme tekniği ile (sweep mesh) ile ağ oluşturulmuş,

karmaşık yüzeylerde ise kolay oluşturulup çözülebilen tetragonal mesh kullanılmıştır (Şekil 5.9.). Sınır tabakanın daha iyi modellenebilmesi için, sınırların ince ağırlara bölme metodu (inflation layers) kullanılmıştır.



Şekil 5.9. Akış hacmi çözüm ağı

Ağ bağımsızlığının elde edilmesi için analizler yapılmış ve örnek olarak Şekil 5.10.'daki grafik verilmiştir. Yaklaşık olarak 1900000 hücre sayısından sonra tork değerinin sabit kaldığı görülmektedir. Hesaplaması yapılacak olan akış geometrisinin boyutlarına göre değişmek üzere, hesaplama bölgesinde yaklaşık olarak 1352000 düğüm ve 2120000 adet hacim elemanına ayrılmıştır.

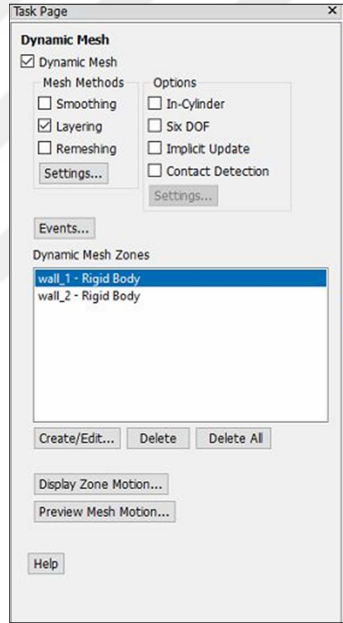


Şekil 5.10. Ağ bağımsızlığının grafiksel gösterimi

5.2.3. CFD analizi

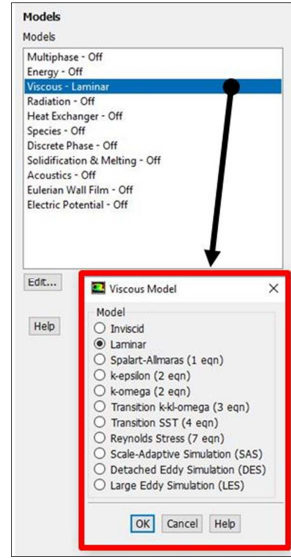
KAD-MRD'nin akış analizi, hareketli çözüm ağı (dinamik ağ) modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.11.). Hareketli çözüm ağı, duvar olarak tanımlanmış bölgelerin veya nesnelerin hareketi ile ağın yeniden düzenlenmesi temeline dayanır. Sabit olarak dönme veya öteleme hareketi yapan sınırlar için kullanılmaktadır. Örnek olarak, uçak kanadının hareketi, şişen bir balon veya insan kalbinin tasarımı gibi, sınırların değiştiği problemler verilebilir.

Dinamik ağ metodu zaman adımlı olarak hesap yapmaktadır. Zaman adımlı çözümde hesaplama süresi uzundur ve yüksek boyutta veri ortaya çıkmaktadır. [43].



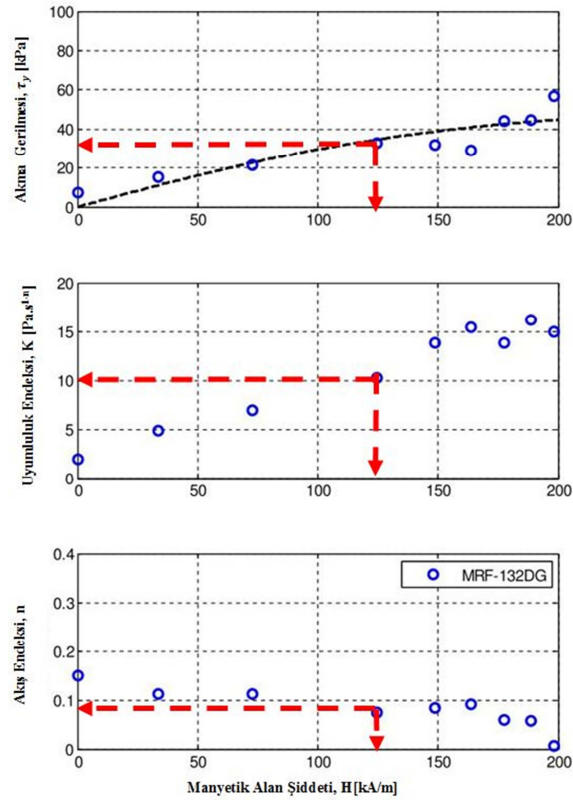
Şekil 5.11. Analiz kurulum ayarları

Hareketin tanımlaması profil dosyası yazılarak yapılmıştır (Ek B). Bu yolla akış analizinin zamana bağlı simülasyonu yapılabilmiştir. MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı dairesel kanal içerisinde $Re \leq 2300$ olduğu için laminar akış söz konusudur (Şekil 5.12.).



Şekil 5.12. Akış modeli türünün seçilmesi

KAD-MRD içinde manyetik alan bölgesinde akan MR sıvının davranışını modelleyebilmek için gereken Herschel-Bulkley indeks bilgileri Becnel'in doktora çalışmasından [28] referans alınmıştır.



Şekil 5.13. MRF-132DG'ye ait Herschel-Bulkley parametreleri [28].

MRF-132DG'den 34000 Pa akma gerilmesi elde etmek için gereken çalışma noktaları Şekil 5.13.'te kırmızı oklarla gösterilmiştir. Bu değerler, manyetik etkinin olduğu bölgede, Herschel Bulkley modeline göre viskoziteyi hesaplamak için olarak analize tanımlanmıştır. Manyetik alan olmayan akış bölgesinde ise MRF-132DG'ye ait viskozite değerleri Lord firmasına ait teknik katalogdan sağlanmıştır [27].

5.2.4. CFD sonuçları

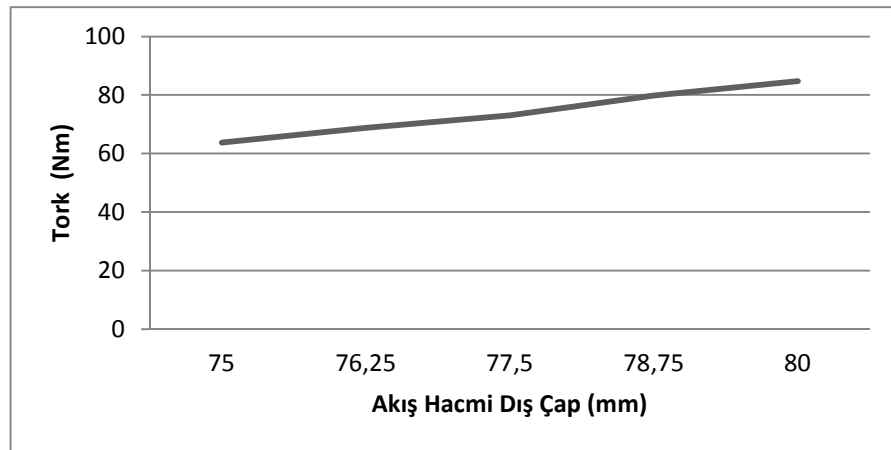
Akış analizindeki dizayn parametrelerin bireysel olarak tork sönümüne olan etkisi grafikler ile gösterilmiş ve yorumlanmıştır. Bazı geometrik kısıtlamalardan dolayı en uygun geometrik aralıklar taranmıştır (Tablo 5.2.-3.-4.-5.-6.).

5.2.4.1. Akış hacmi dış çapı

Akış hacmi dış çapı tork eldesinde önemli bir parametredir. Akış hacmi dış çapı büyüdükçe daha büyük moment elde edildiğinden, doğru orantılı olarak tork değeri büyümektedir (Şekil 5.14.).

Tablo 5.2. Akış hacmine ait parametre değerleri (i)

w	D_1	D_2	D_3	h_1	α	H	g	r_k
10	75-80	38	7	8	70	60	0.55	2



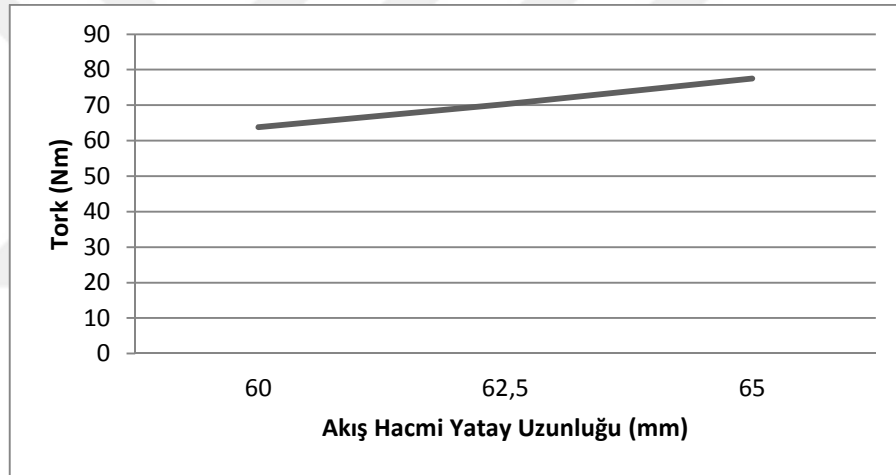
Şekil 5.14. Akış hacmi dış çap – tork ilişkisi

5.2.4.2. Akış hacmi yatay uzunluğu

Akış hacmi yatay uzunluğu ile tork değeri doğru orantılıdır. Bu değer büyüdüğünde kanadın süpüreceği hacim artmakta ve daha büyük viskoz kuvvetler oluşmaktadır. Sonuç olarak daha büyük tork sönümü elde edilmektedir (Şekil 5.15.).

Tablo 5.3. Akış hacmine ait parametre değerleri (ii)

w	D_1	D_2	D_3	h_1	α	H	g	r_k
10	80	38	7	8	70	60-65	0.55	2



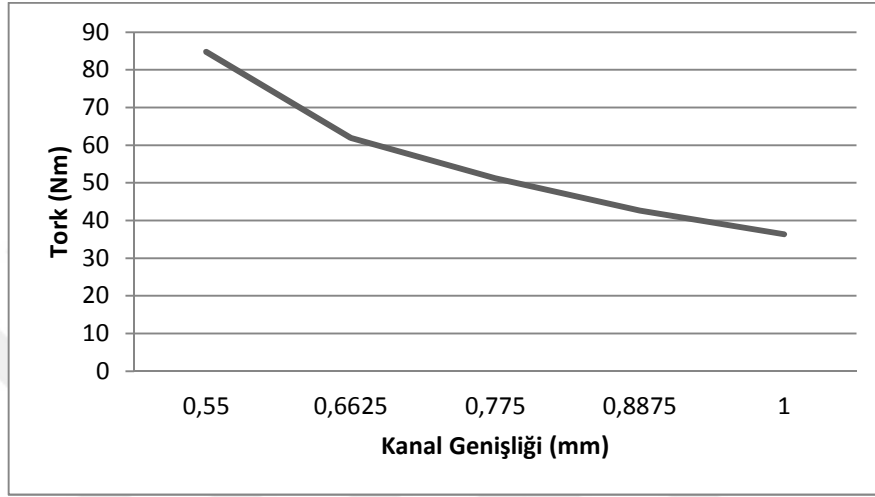
Şekil 5.15. Akış hacmi yatay uzunluğu-tork ilişkisi

5.2.4.3. Kanal genişliği

Kanal genişliği arttıkça, dairesel kanalda MR sıvı daha rahat hareket edebilmekte daha az sürtünme kuvveti ve viskoz kuvvetler oluşmaktadır. Sonuç olarak kanal genişliği ile tork arasında ters orantılı bir ilişki vardır (Şekil 5.16.).

Tablo 5.4. Akış hacmine ait parametre değerleri (iii)

w	D_1	D_2	D_3	h_1	α	H	g	r_k
10	80	38	7	8	70	60	0.55-1	2



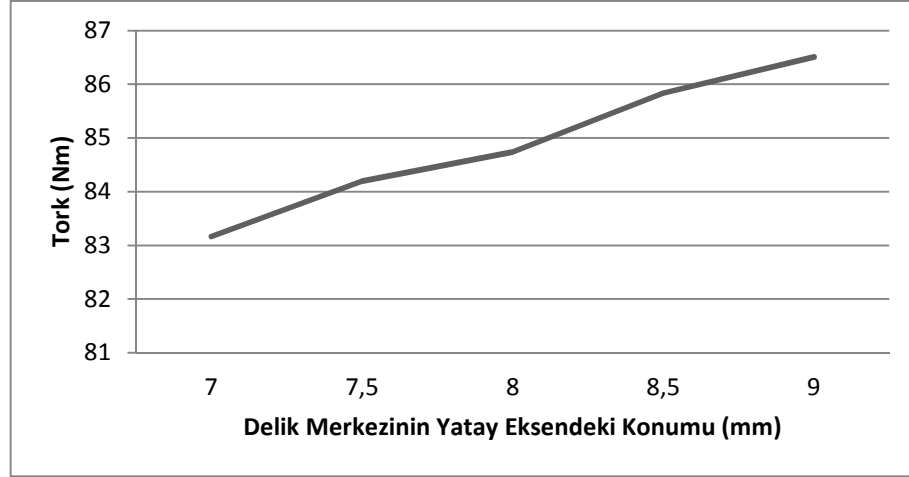
Şekil 5.16. Kanal genişliği-tork ilişkisi

5.2.4.4. Delik merkezinin yatay eksenindeki konumu

Delik merkezinin yatay eksenindeki konumu ile tork arasında doğru orantı vardır. Delik merkezinin yatay eksenindeki değeri büyüdükçe viskoz kuvvetler artmaktadır (Şekil 5.17.).

Tablo 5.5. Akış hacmine ait parametre değerleri (iv)

w	D_1	D_2	D_3	h_1	α	H	g	r_k
10	80	38	7	7-9	70	60	0.55	2



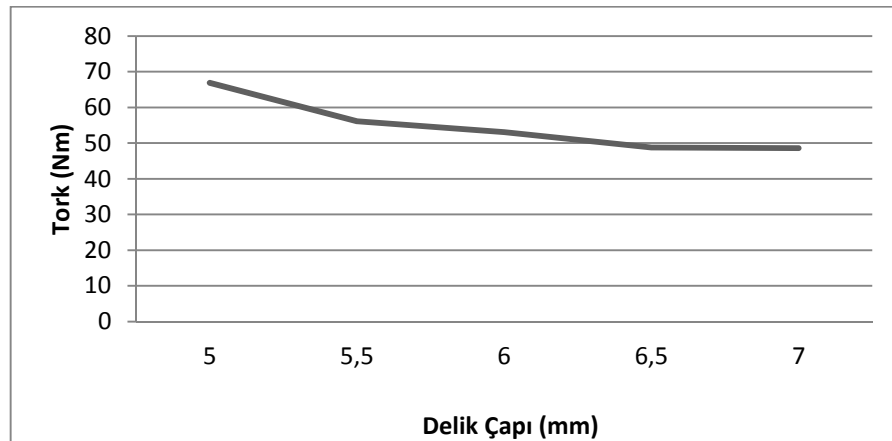
Şekil 5.17. Delik merkezinin yatay eksenindeki konumu-tork ilişkisi

5.2.4.5. Delik çapı

Delik çapı ile tork arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Delik çapı büyüdükçe, daha az sürtünme kuvveti daha az viskoz kuvvetler oluşmaktadır (Şekil 5.18.).

Tablo 5.6. Akış hacmine ait parametre değerleri (v)

w	D_1	D_2	D_3	h_1	α	H	g	r_k
10	80	38	5-7	8	70	60	0.8	2



Şekil 5.18. Delik çapı-tork ilişkisi

5.2.5. Akış analizi temelli optimizasyon çalışması

Akış analizinin optimizasyon çalışması Response Surface (Cevap Yüzeyi/İlişki Yüzeyi) modülü yapılmıştır. Algoritma olarak çok amaçlı genetik algoritma (MOGA) seçilmiştir. İlk olarak parametrelerin aralık değerleri belirlenmiştir (Tablo 5.7.).

Manyetik alan sıfır iken aşağıdaki tabloda gösterilen parametre aralıklarında 9 adet numune çözüm yapılarak viskoz tork sönüm değerleri hesaplanmıştır. Ardından manyetik alan altında ve aynı parametre aralıklarında 9 adet numune çözüm gerçekleştirilmiştir.

Hedef değerimiz 90 Nm tork sönümü eldesi için manyetik alana bağlı tork sönümünü (T_B), viskoz tork (T_v) sönümüne oranlayarak maksimum dinamik oran (λ) değerini veren akış geometrisi değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 5.7. Akış analizde kullanılan parametrelerin aralıkları

Parametre	Alt Sınır	Üst Sınır	Sabit Değer
w	-	-	10mm
D_1	75mm	80mm	-
D_2	-	-	38mm
D_3	6mm	7mm	-
h_1	-	-	8mm
α	-	-	70°
H	60mm	65mm	-
g	-	-	0,55mm
r_k	-	-	2mm

5.2.6. Akış analizinin optimizasyon sonuçları

Akış analizinin optimizasyon sonuçları Tablo 5.8.'de verilmiştir.

Tablo 5.8. Akış analizinin optimizasyon sonuçları

	w	D_1	D_2	D_3	h_1	α	H	g	T_B	T_v	λ
P1	10	75	38	7	8	70	60	0,55	63,787	34,669	1,83
P2	10	75	38	7	8	70	62,5	0,55	70,286	40,001	1,75
P3	10	77,5	38	7	8	70	60	0,55	72,726	42,72	1,70
P4	10	75	38	7	8	70	65	0,55	77,477	48,099	1,61
P5	10	77,5	38	7	8	70	62,5	0,55	80,475	49,292	1,63
P6	10	80	38	7	8	70	60	0,55	84,74	51,893	1,63
P7	10	77,5	38	7	8	70	65	0,55	88,324	56,002	1,57
P8	10	80	38	7	8	70	62,5	0,55	92,029	59,46	1,54
P9	10	80	38	7	8	70	65	0,55	101,9	69,613	1,46

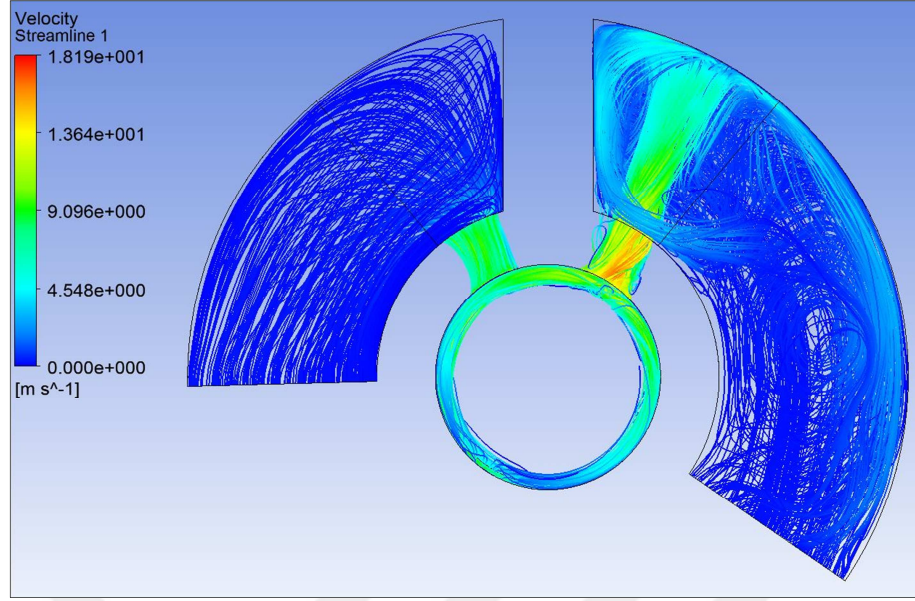
P7 ve P8 numaralı prototipler hedef tork değerine yakındır. Ancak hedef değere daha da yaklaşmak için, MOGA ile bu değer aralığında optimizasyon yaparak Tablo 5.9.'daki sonuçlar elde edilmiştir. 90 Nm değerine en yakın ve dinamik oranı yüksek olan P10 numaralı KAD-MRD optimizasyon ile tespit edilmiştir.

Tablo 5.9. Optimize edilen prototipe ait sonuçlar

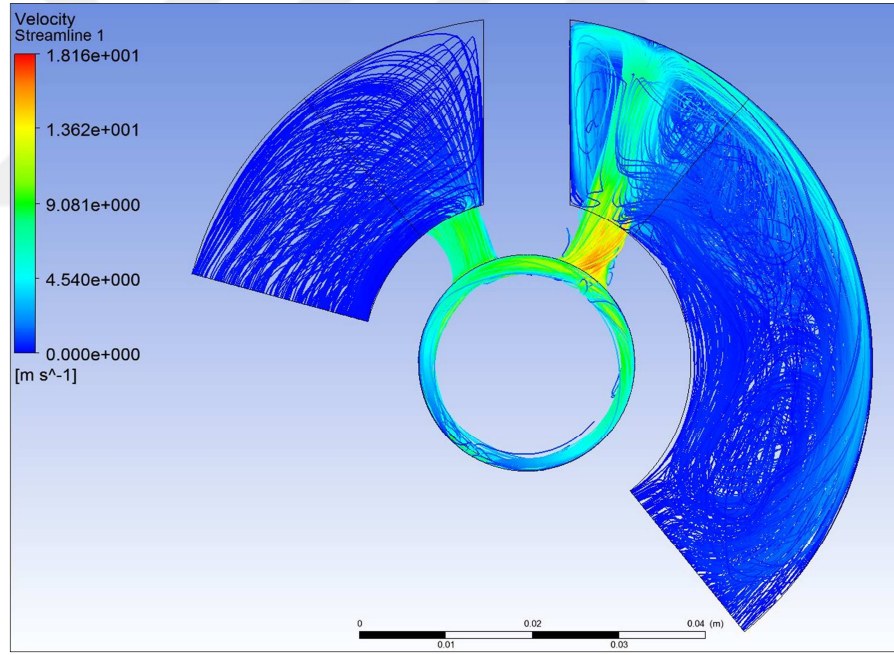
	w	D_1	D_2	D_3	h_1	α	H	g	T_B	$T_{B@analitik}$	T_v
P10	10	80	38	7	8	70	62	0,55	90,7	82,03	57,3

Manyetik alan varlığında, analitik yöntemle hesaplanan hesaplanan tork değeri olan $T_{B@analitik}$ Tablo 5.9.'da verilmiştir.

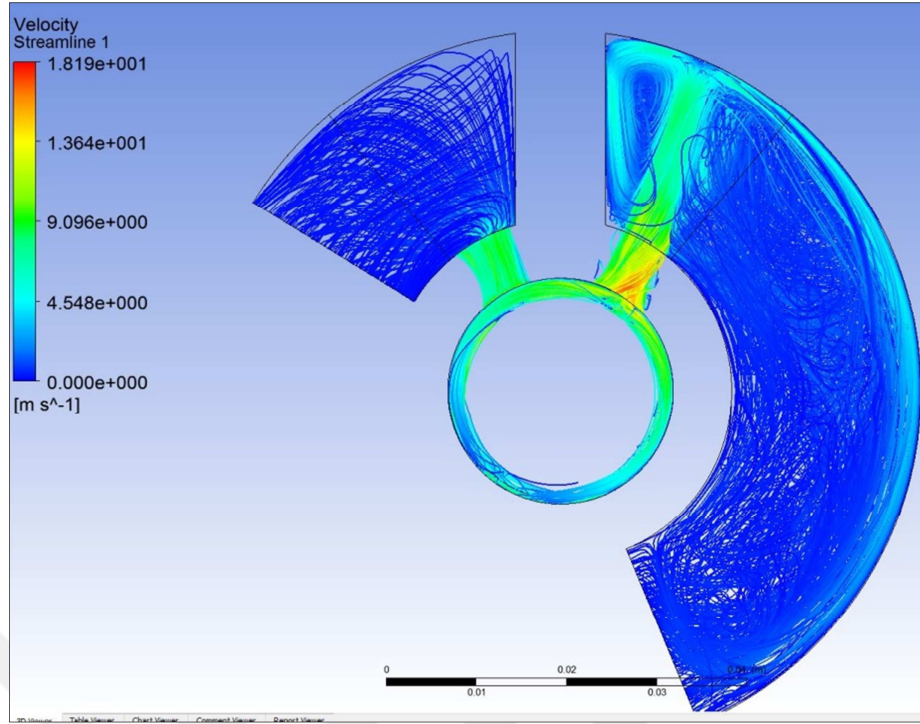
P10'da MR sıvının izlediği yolu gösteren akım çizgileri Şekil 5.19. Şekil 5.20. Şekil 5.21.'de, P7'deki akım çizgileri ise Şekil 5.22.'de gösterilmiştir.



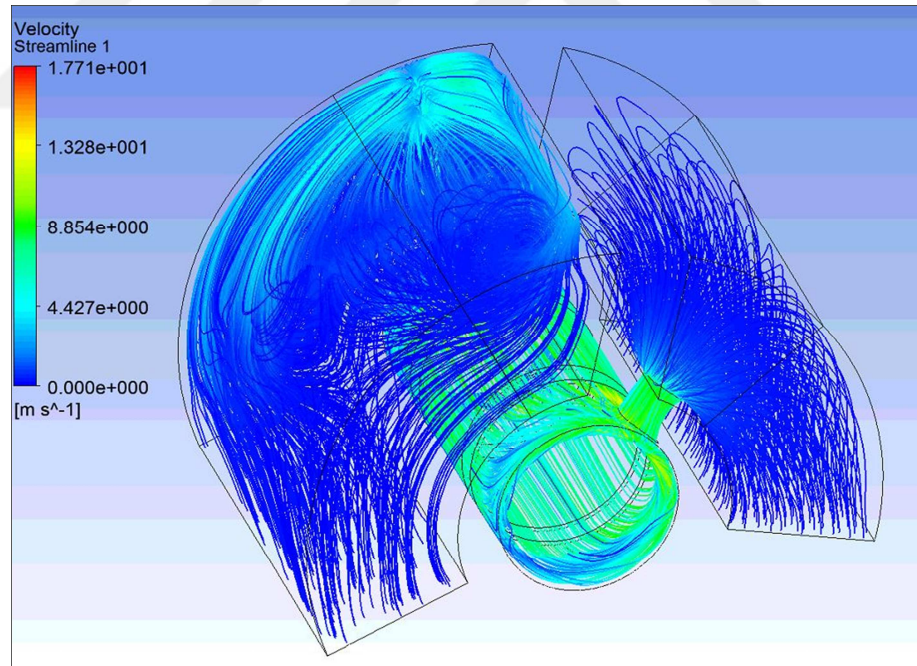
Şekil 5.19. 0.040. sn'de P10'daki (-7.17 rad/sn) akım çizgileri



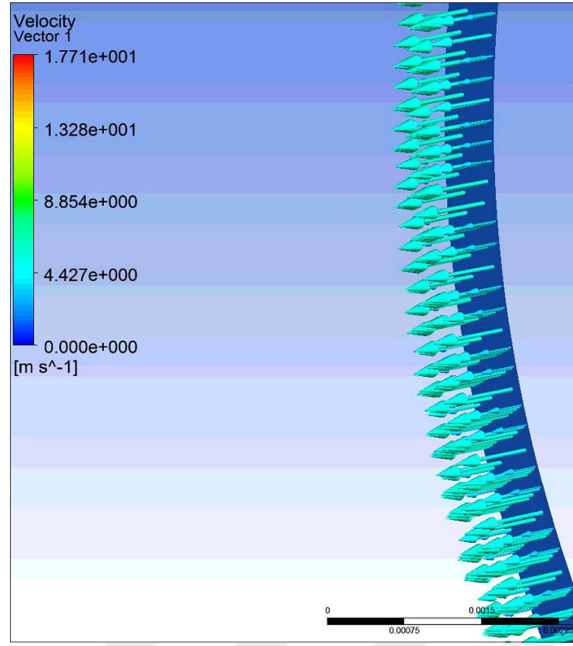
Şekil 5.20. 0.08. sn'de P10'daki (-7,17 rad/sn) akım çizgileri



Şekil 5.21. 0.12. sn'de P10'daki (-7,17 rad/sn) akım çizgileri

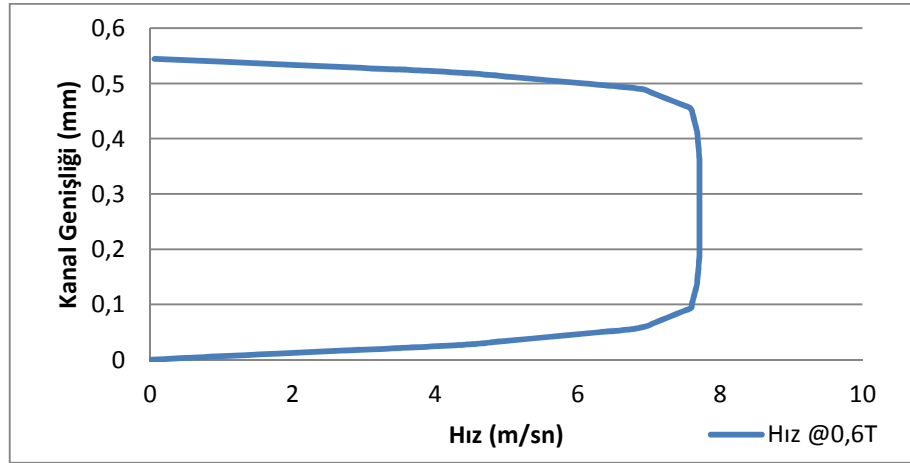


Şekil 5.22. 0.040. sn'de P7'deki (-7,17 rad/sn) akım çizgileri

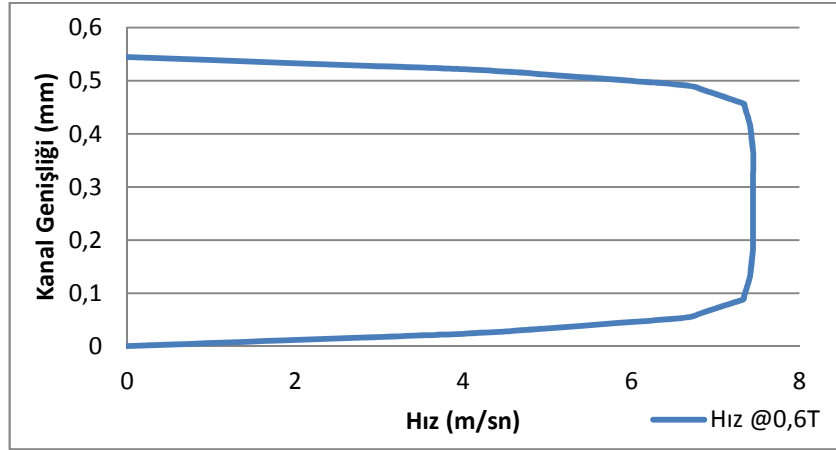


Şekil 5.23. Kanal içinde herhangi bir konumda oluşan hız vektörleri (0.04 sn)

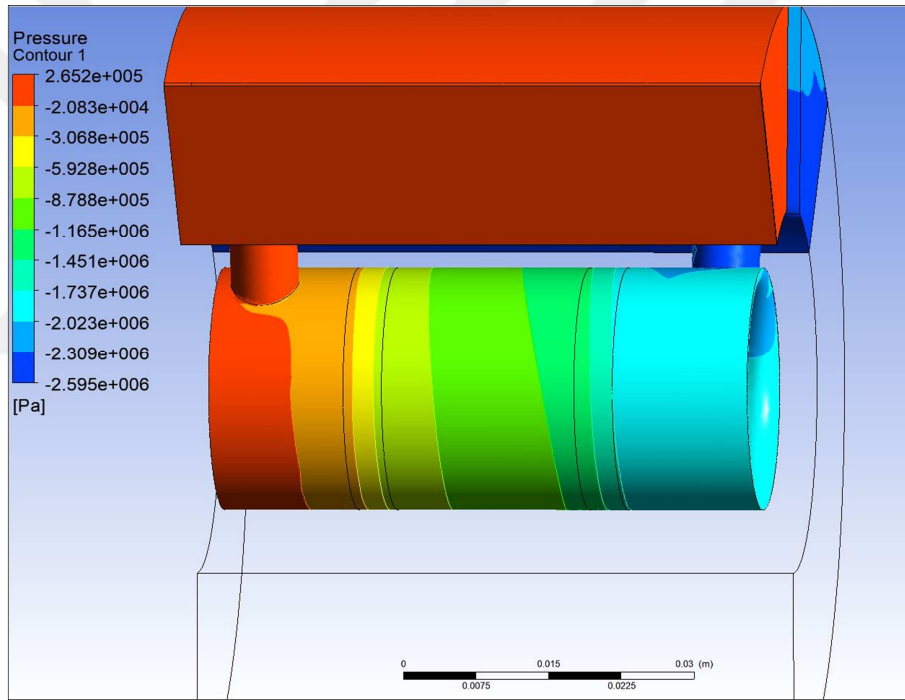
0.0802'inci saniyede halkasal kanal içerisinde akmakta olan MR sıvısının $B = 0.6$ Tesla manyetik alan şiddeti altında oluşan hız profili P7 için Şekil 5.24.'de, P10 için Şekil 5.25.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.24. 0.0802. sn'de P7'nin kanal kesitindeki hız profili

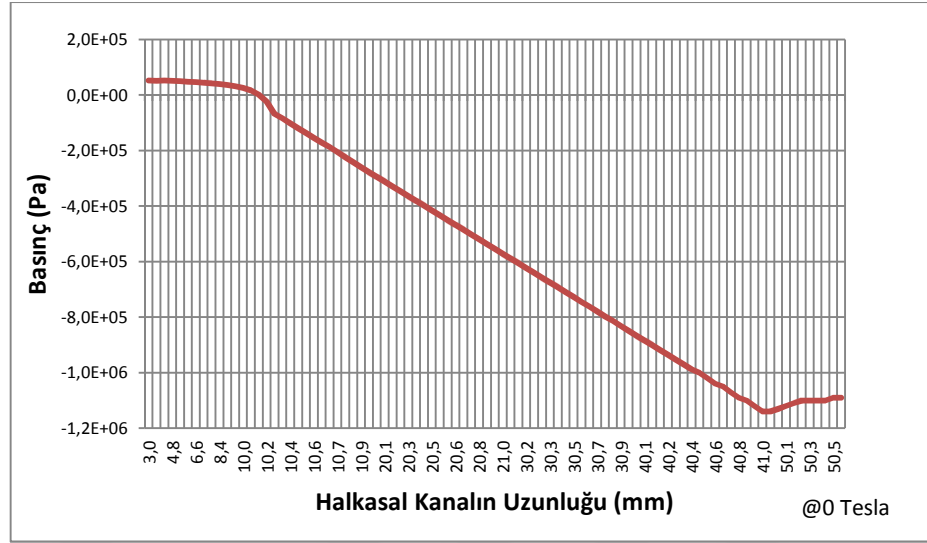


Şekil 5.25. 0.0802. sn'de P10'nun kanal kesitindeki hız profili

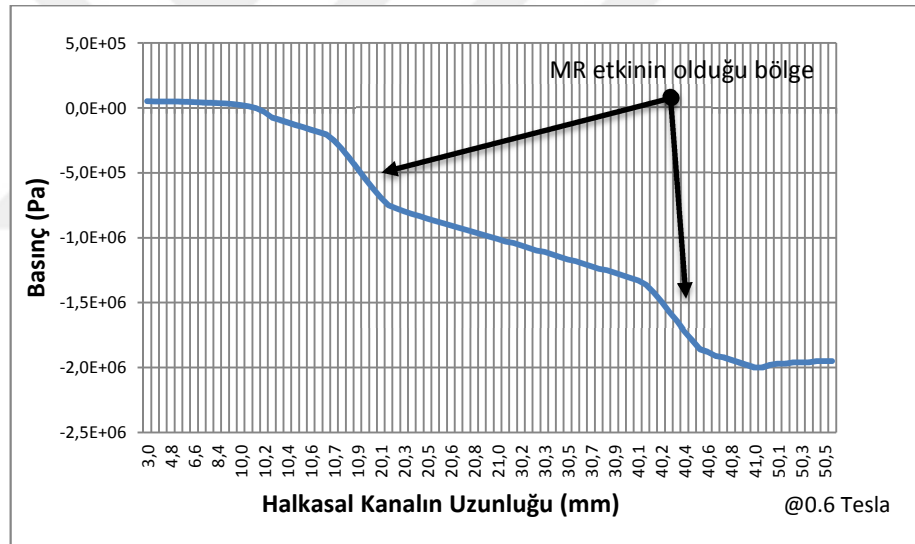


Şekil 5.26. 0.163. sn'de P10'da (-7.17 rad/sn) basınç dağılımı

KAD-MR damper içerisinde 0.040. saniyede oluşan basınç dağılımı Şekil 5.26.'da gösterilmektedir. Manyetik alan sıfır iken halkasal kanal boyunca ölçülen basınç düşümü Şekil 5.27.'de, manyetik alan varlığında halkasal kanal boyunca ölçülen basınç düşümü ise Şekil 5.28.'da gösterilmektedir.



Şekil 5.27. 0.163. sn'de P10'daki basınç düşümü (@0 Tesla).



Şekil 5.28. 0.163. sn'de P10'daki basınç düşümü (@0.6 Tesla).

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yarı aktif bir sönümleme elemanı olarak kısıtlı açılı dönel manyeto-reolojik sıvılı damper (KAD-MRD) geliştirilmiştir. Yenilikçi bobin yerleşimi ile daha yüksek çalışma açısı ve daha yüksek tork sönümü, geliştirilen KAD-MRD ile mümkün olmuştur. Tasarım üç boyutlu modelleme programı ile yapılmıştır. 70° açısal deplasmana sahip olan KAD-MRD yaklaşımı genel amaçlı olsa da araçlar ve diz eklemleri için düşünülmektedir.

Akma gerilmesinin kestirimi için ANSYS-Magnetostatic yazılımı kullanılmış ve üç boyutlu analiz yapılmıştır. KAD-MRD’ de MR sıvının manyetik alana maruz kaldığı bölge ANSYS Dizayn Moduler’da çizilerek parametrik hale getirilmiştir. Akım, kanal genişliği, kutup başı, makara çapı, makara boyu, sarım sayısı parametre olarak tanımlanmıştır.

MR sıvı üzerinde 0.6 T yaklaşık olarak 34000 Pa akma gerilmesinin elde edilmesi için gerekli olan minimum akım değeri ve diğer parametreler ANSYS RSO ile optimize edilmiştir. Optimizasyon algoritması olarak MOGA (Çok Amaçlı Genetik Algoritma) kullanılmıştır. Optimizasyon sonuçlarına göre akım 1.7A, kanal genişliği 0.55 mm, kutup başı 4 mm, makara çapı 12.5 mm, makara boyu 30 mm, sarım sayısı 160 olarak tespit edilmiştir.

KAD-MRD içerisindeki akışın hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çözümü gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak akış hacmi ANSYS Dizayn Moduler’da çizilmiştir. Kanat kalınlığı, akış hacmi dış çapı, kanat dairesi çapı, delik çapı, delik merkezinin dışarıya olan uzaklığı, delik açısı, akış hacmi yatay uzunluğu, kanal genişliği, konik yarı çapı parametre olarak tanımlanmıştır.

Akış analizi zamana bağlı olarak çözülmüştür. Analizde hareket eden duvarlar tanımlanmış ve bu hareket için profil dosyası yazılmıştır. Açısal hızı ve zaman bilgisini akış analizinde işleyerek her bir zaman adımında sistemde üretilen tork sönümünü görmek mümkün olmuştur.

Akışkan incilmesi veya kalınlaşması durumunu dikkate almak amacıyla MR sıvısının KAD-MRD içindeki akışı Herschel-Bulkley modeline göre hesaplanmıştır.

MRF-132DG'nin Herschel-Bulkley akışkan indeks bilgileri, Becnel'in doktora çalışmasından [28] referans alınmıştır. Bu bilgiler manyetik etkinin olduğu bölgedeki viskoziteyi hesaplamak için kullanılmıştır. Manyetik alan olmayan akış bölgesinde, MRF-132DG'nin yoğunluk ve viskozite bilgileri Lord firmasına ait ticari katalogdan [27] referans alınmıştır.

90 Nm tork sönümü için ANSYS RSO'da, MOGA ile optimizasyon yapılmış en uygun geometri tespit edilmiştir. Buna göre kanat genişliği 10 mm, akış hacmi dış çapı 80 mm, kanat dairesi çapı 38 mm, delik çapı 7 mm, delik merkezinin yatay eksenindeki mesafesi 8 mm, akış hacmi yatay uzunluğu 62 mm, kanal genişliği 0.55 mm, delik açısı 70° olarak hesaplanmıştır.

Kanadın açısal hareketiyle ortaya çıkan debinin denklemi, kanadın yüzey alanı ve açısal hızın bir fonksiyonu olarak geliştirilmiştir.

Kanal boyunca meydana gelen basınç düşümü, MR sıvı özellikleri, geometri ve hacimsel debiye bağlı olarak ifade edilmiştir.

KAD-MR damperde üretilen tork sönümünün matematiksel bağıntısı, kanadın geometrik büyüklüğüne ve kanal boyunca meydana gelen basınç düşümüne bağlı olarak geliştirilmiştir.

Geliştirilen bu bağıntı ile tork sönüm değeri, ANSYS Fluent'te hesaplanan tork sönüm değerleriyle kıyaslandığında yaklaşık olarak %10'luk bir sapma ile tahmin edilebilmektedir.

KAD-MRD'de, sıcaklık değişimlerinin tork sönümüne olan etkisini incelemek için dış gövdeye, damperi soğutmak için kanatçık eklenebilir. Kanatçıkların konumu, boyutu, adedi yapılacak hesaplamaların neticesinde ortaya çıkacaktır.

Bu çalışmada MR sıvı olarak MRF 132DG kullanılmıştır. Aynı boyutlara sahip KAD-MRD'ler içerisinde farklı MR sıvılar kullanıldığında elde edilen tork değerleri de ayrı bir araştırma konusudur.

KAD-MRD'de sayısal hesaplamalar ile deneysel olarak elde edilen tork sönüm değerlerinin kıyaslanması sonraki hedeftir.

KAYNAKLAR

- [1] A. G. Olabi ve A. Grunwald, "Design and Application of Magneto-rheological Fluid," *Mater. Des.*, vol. 28, no. 10, pp. 2658–2664, 2007.
- [2] Z. Parlak, "Manyeto-Reolojik Sıvılı Yarı Aktif Bir Sönümleyici Tasarımı ve Analizi," Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2010.
- [3] F. Imaduddin, S. A. Mazlan, ve H. Zamzuri, "A Design And Modelling Review Of Rotary Magnetorheological Damper," *Mater. Des.*, vol. 51, pp. 575–591, 2013.
- [4] A. Farjoud, N. Vahdati, ve Y. F. Fah, "Mathematical Model Of Drum-Type MR Brakes Using Herschel Bulkley Shear Model," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 19, no. 5, pp. 565–572, 2008.
- [5] N. M. Wereley, J. U. Cho, Y. T. Choi, ve S. B. Choi, "Magnetorheological Dampers In Shear Mode," *Smart Mater. Struct.*, vol. 17, no. 1, p. 015022, 2007.
- [6] J. Huang, J. Q. Zhang, Y. Yang, ve Y. Q. Wei, "Analysis And Design Of A Cylindrical Magneto-Rheological Fluid Brake," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 129, no. 1–3, pp. 559–562, 2002.
- [7] K. Karakoc, E. J. Park, ve A. Suleman, "Design Considerations For An Automotive Magnetorheological Brake," *Mechatronics*, vol. 18, no. 8, pp. 434–447, 2008.
- [8] R. Bier, H. Huey, V. Associates, ve P. Alto, "Design Considerations For Magnetorheological Brakes," *Computer (Long. Beach. Calif.)*, vol. 19, no. 5, pp. 834–837, 1984.
- [9] T. Kikuchi, K. Kobayashi, ve Inoue, "Gap-Size Effect of Compact MR Fluid Brake," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 22, no. 15, pp. 1677–1683, Oct. 2011.
- [10] Y. Shiao ve Q. A. Nguyen, "Torque Enhancement For A New Magnetorheological Brake," *Procedia Eng.*, vol. 76, no. Icmat 2013, pp. 12–23, 2014.
- [11] J. Q. Zhang, Z. Z. Feng, ve Q. Jing, "Optimization Analysis Of A New Vane MRF Damper," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 149, p. 12087, 2009.

- [12] A. Giorgetti, N. Baldanzini, M. Biasiotto, ve P. Citti, "Design And Testing Of A MRF Rotational Damper For Vehicle Applications," *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, no. 6, p. 65006, 2010.
- [13] L. Yang, S. Z. Chen, B. Zhang, ve Z. Z. Feng, "A Rotary Magnetorheological Damper for a Tracked Vehicle," *Adv. Mater. Res.*, vol. 328–330, pp. 1135–1138, Sep. 2011.
- [14] H. H. Zhang, "A Magnetic Design Method Of MR Fluid Dampers And FEM Analysis On Magnetic Saturation," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 17, no. 8–9, pp. 813–818, 2006.
- [15] N. C. Rosenfeld ve N. M. Wereley, "Volume-Constrained Optimization Of Magnetorheological And Electrorheological Valves And Dampers," *Smart Mater. Struct.*, vol. 13, no. 6, pp. 1303–1313, 2004.
- [16] Q. H. Nguyen, Y. M. Han, S. B. Choi, ve N. M. Wereley, "Geometry Optimization Of MR Valves Constrained In A Specific Volume Using The Finite Element Method," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 6, pp. 2242–2252, 2007.
- [17] L. Yang, F. Duan, ve A. Eriksson, "Analysis Of The Optimal Design Strategy Of A Magnetorheological Smart Structure," *Smart Mater. Struct.*, vol. 17, no. 1, p. 015047, 2008.
- [18] C. Zhu, "A Disk-Type Magneto-Rheological Fluid Damper For Rotor System Vibration Control," *J. Sound Vib.*, vol. 283, no. 3–5, pp. 1051–1069, 2005.
- [19] D. W. Felt, M. Hagenbüche, ve J. Lui, "Rheology Of A Magnetorheological Fluid," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 7, 1996.
- [20] M. Lita, A. Han, ve D. Susan-Resiga, "Characterization Of Sedimentation And High Magnetic Field Flow Behavior Of Some Magnetorheological Fluids," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 149, p. 012071, 2009.
- [21] S. Genç, "Synthesis ve Properties Of Magnetorheological (MR) Fluids," Pittsburgh University, Materials Science and Engineering, Doctor of Philosophy, 2002.
- [22] T. Ergin, "Manyetoreolojik (MR) Sıvılı Yarı-Aktif Bir Amortisörün Tasarımı Ve Prototip İmalatı," Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2013.
- [23] Ş. Çeşmeci, "Bir Manyeto-Reolojik Damperin Manyetik Alan Simülasyonu, Akış Analizi Ve Deneylerle Karşılaştırılması," Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- [24] S. H. L. A. Rutten, "Smart Materials In Automotive Applications," 2003.

- [25] S. A. Bin Mazlan, "The Behaviour Of Magnetorheological Fluids In Squeeze Mode," Dublin City University, Mechanical And Manufacturing Engineering Faculty, Doctor of Philosophy, 2008.
- [26] H. E. Uzun, "Manyetoreolojik Akışkanların Sentezi," İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [27] T. Data, "MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid," *Lord Prod. Sel. Guid. lord Magnetorheol. fluids*, vol. 54, no. 2, p. 11, 2011.
- [28] A. C. Becnel, "High Strength Semi-Active Energy Absorbers Using Shear And Mixed Mode Operation At High Shear Rates," Maryland University, Aerospace Engineering, Doctor of Philosophy, 2014.
- [29] G. A. Dimock, J.-H. Yoo, ve N. M. Wereley, "Quasi-Steady Bingham Biplastic Analysis Of Electrorheological And Magnetorheological Dampers," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 13, no. 9, pp. 549–559, 2002.
- [30] D. Simon ve M. Ahmadian, "Vehicle Evaluation Of The Performance Of Magneto Rheological Dampers For Heavy Truck Suspensions," *J. Vib. Acoust.*, vol. 123, no. 3, pp. 365–375, 2001.
- [31] Z. Q. Chen, X. Y. Wang, J. M. Ko, Y. Q. Ni, J. Billie F. Spencer, ve G. Yang, "MR Damping System On Dongting Lake Cable-Stayed Bridge," vol. 5057, no. 1, pp. 229–235, 2003.
- [32] K. E. Akdoğan, A. Yılmaz, A. Sadeghimorad, ve İ. Şahin, "Magnetorheological (MR) Silindir Sönümlü Yarı Etkin Diz Ekleme Tasarımı," pp. 1–4.
- [33] H. T. Guo ve W. H. Liao, "Magnetorheological Fluids Based Multifunctional Actuator For Assistive Knee Braces," *2009 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBIO 2009*, pp. 1883–1888, 2009.
- [34] B. Hwang ve D. Jeon, "A Method To Accurately Estimate The Muscular Torques Of Human Wearing Exoskeletons By Torque Sensors," *Sensors (Basel)*, vol. 15, no. 4, pp. 8337–8357, 2015.
- [35] K. H. Gudmundsson, F. Jonsdottir, ve F. Thorsteinsson, "A Geometrical Optimization Of A Magneto-Rheological Rotary Brake In A Prosthetic Knee," *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, no. 3, p. 035023, 2010.
- [36] Q.-H. Nguyen ve S.-B. Choi, "Optimal design of a vehicle magnetorheological damper considering the damping force and dynamic range," *Smart Mater. Struct.*, vol. 18, no. 1, p. 015013, 2008.

- [37] R. M. Thakkar, L. D. College, ve E. Mechanical, “Modeling And Simulation Of Magnetorheological Fluid Damper For Predicting The Saturation Limit To Applied Field Current,” no. 2277, pp. 69–71, 2013.
- [38] K. Karakoç, “Design Of A Magnetorheological Brake System Based On Magnetic Circuit Optimization,” Victoria University, Mechanical Engineering, Master Thesis, 2005.
- [39] Z. Parlak, T. Engin, V. Ari, I. Sahin, ve I. Calli, “Geometrical Optimisation Of Vehicle Shock Dampers With Magnetorheological Fluid,” *Int. J. Veh. Des.*, vol. 54, no. 4, p. 371, 2010.
- [40] Ubaidillah, A. N. R. S. Perniata, Triyono, D. D. D. P. Tjahjana, M. Nizam, S. A. Mazlan, ve F. Imaduddin, “Simulation And Experimental Studies On Braking Response Of Inertial Load Using Magnetorheological Brake,” *Proc. 2014 Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Sci. ICEECS 2014*, no. November, pp. 353–358, 2014.
- [41] B. F. Spencer, G. Yang, ve J. D. Carlson, “Smart Dampers for Seismic Protection of Structures : A Full-Scale Study,” no. January 1998, 2014.
- [42] D. E. Alnak, A. Öztürk, A. Pınarbaşı, ve Ç. Özalp, “Karıştırıcı Tanklarda Farklı Kanat Yapılarının Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi,” 2008, pp. 379–385.
- [43] M. Kemerli, “İki Çıkışlı Bir Santifüj Pompanın Tasarımı Ve CFD İle Optimizasyonu,” Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2015.

EKLER

EK A: Manyetik Alan Optimizasyonu İçin ANSYS Tarafından Yapılan Çözümler

Tablo A.1. Manyetik alan analizinde optimizasyon için ANSYS tarafından yapılan çözümler

	t_k	g	g_h	R_m	R_b	L	N_c	I (mA)	B_{maks} (mT)
1	5	0.7	3.3	12	5.5	30	100	1125	499.3
2	4	0.7	3.3	12	5.5	30	100	1125	578.8
3	6	0.7	3.3	12	5.5	30	100	1125	435.6
4	5	0.7	3.3	12	6	30	100	1125	559.4
5	5	0.7	3.3	12	5	30	100	1125	425.7
6	5	0.7	3.8	11.5	5	30	100	1125	439.7
7	5	0.7	2.8	12.5	6	30	100	1125	559.1
8	5	0.4	3.6	12	5.5	30	100	1125	483.9
9	5	1	3	12	5.5	30	100	1125	506.6
10	5	0.7	3.3	12	5.5	30	100	250	310.7
11	5	0.7	3.3	12	5.5	30	100	2000	534.7
12	5	0.7	3.3	12	5.5	28	100	1125	497.2
13	5	0.7	3.3	12	5.5	32	100	1125	500.9
14	4	0.4	4.1	11.5	5.5	28	100	250	363.8
15	6	0.4	4.1	11.5	5.5	32	100	250	328.8
16	4	0.4	4.1	11.5	4.5	32	100	250	351.1
17	6	0.4	4.1	11.5	4.5	28	100	250	249.9
18	4	0.4	3.1	12.5	6.5	32	100	250	421.9
19	6	0.4	3.1	12.5	6.5	28	100	250	276.8
20	4	0.4	3.1	12.5	5.5	28	100	250	422.0
21	6	0.4	3.1	12.5	5.5	32	100	250	329.8
22	4	1	3.5	11.5	5.5	32	100	250	295.1
23	6	1	3.5	11.5	5.5	28	100	250	209.7
24	4	1	3.5	11.5	4.5	28	100	250	301.5
25	6	1	3.5	11.5	4.5	32	100	250	255.9
26	4	1	2.5	12.5	6.5	28	100	250	274.9

Tablo A.1. Devamı

27	6	1	2.5	12.5	6.5	32	100	250	262.3
28	4	1	2.5	12.5	5.5	32	100	250	358.6
29	6	1	2.5	12.5	5.5	28	100	250	239.8
30	4	0.4	4.1	11.5	5.5	32	100	2000	619.1
31	6	0.4	4.1	11.5	5.5	28	100	2000	456.2
32	4	0.4	4.1	11.5	4.5	28	100	2000	448.2
33	6	0.4	4.1	11.5	4.5	32	100	2000	317.5
34	4	0.4	3.1	12.5	6.5	28	100	2000	769.8
35	6	0.4	3.1	12.5	6.5	32	100	2000	566.0
36	4	0.4	3.1	12.5	5.5	32	100	2000	598.4
37	6	0.4	3.1	12.5	5.5	28	100	2000	495.2
38	4	1	3.5	11.5	5.5	28	100	2000	633.0
39	6	1	3.5	11.5	5.5	32	100	2000	491.3
40	4	1	3.5	11.5	4.5	32	100	2000	481.3
41	6	1	3.5	11.5	4.5	28	100	2000	359.9
42	4	1	2.5	12.5	6.5	32	100	2000	775.2
43	6	1	2.5	12.5	6.5	28	100	2000	604.3
44	4	1	2.5	12.5	5.5	28	100	2000	620.4
45	6	1	2.5	12.5	5.5	32	100	2000	476.3
46	5	0.7	3.3	12	5.5	30	130	1125	515.7
47	4	0.7	3.3	12	5.5	30	130	1125	597.7
48	6	0.7	3.3	12	5.5	30	130	1125	450.8
49	5	0.7	3.3	12	6	30	130	1125	579.0
50	5	0.7	3.3	12	5	30	130	1125	440.4
51	5	0.7	3.8	11.5	5	30	130	1125	454.6
52	5	0.7	2.8	12.5	6	30	130	1125	579.4
53	5	0.4	3.6	12	5.5	30	130	1125	498.4
54	5	1	3	12	5.5	30	130	1125	525.2
55	5	0.7	3.3	12	5.5	30	130	250	368.4
56	5	0.7	3.3	12	5.5	30	130	2000	550.9
57	5	0.7	3.3	12	5.5	28	130	1125	514.4
58	5	0.7	3.3	12	5.5	32	130	1125	517.3
59	4	0.4	4.1	11.5	5.5	28	130	250	431.1
60	6	0.4	4.1	11.5	5.5	32	130	250	359.1
61	4	0.4	4.1	11.5	4.5	32	130	250	364.7
62	6	0.4	4.1	11.5	4.5	28	130	250	260.3
63	4	0.4	3.1	12.5	6.5	32	130	250	497.7
64	6	0.4	3.1	12.5	6.5	28	130	250	333.3
65	4	0.4	3.1	12.5	5.5	28	130	250	470.1
66	6	0.4	3.1	12.5	5.5	32	130	250	347.4
67	4	1	3.5	11.5	5.5	32	130	250	357.8

Tablo A.1. Devamı

68	6	1	3.5	11.5	5.5	28	130	250	257.7
69	4	1	3.5	11.5	4.5	28	130	250	351.5
70	6	1	3.5	11.5	4.5	32	130	250	279.7
71	4	1	2.5	12.5	6.5	28	130	250	335.6
72	6	1	2.5	12.5	6.5	32	130	250	318.9
73	4	1	2.5	12.5	5.5	32	130	250	428.7
74	6	1	2.5	12.5	5.5	28	130	250	291.8
75	4	0.4	4.1	11.5	5.5	32	130	2000	638.3
76	6	0.4	4.1	11.5	5.5	28	130	2000	470.8
77	4	0.4	4.1	11.5	4.5	28	130	2000	463.3
78	6	0.4	4.1	11.5	4.5	32	130	2000	328.2
79	4	0.4	3.1	12.5	6.5	28	130	2000	794.7
80	6	0.4	3.1	12.5	6.5	32	130	2000	582.4
81	4	0.4	3.1	12.5	5.5	32	130	2000	618.3
82	6	0.4	3.1	12.5	5.5	28	130	2000	522.5
83	4	1	3.5	11.5	5.5	28	130	2000	654.5
84	6	1	3.5	11.5	5.5	32	130	2000	506.8
85	4	1	3.5	11.5	4.5	32	130	2000	498.1
86	6	1	3.5	11.5	4.5	28	130	2000	373.0
87	4	1	2.5	12.5	6.5	32	130	2000	801.7
88	6	1	2.5	12.5	6.5	28	130	2000	625.7
89	4	1	2.5	12.5	5.5	28	130	2000	640.4
90	6	1	2.5	12.5	5.5	32	130	2000	493.2
91	5	0.7	3.3	12	5.5	30	160	1125	528.4
92	4	0.7	3.3	12	5.5	30	160	1125	612.5
93	6	0.7	3.3	12	5.5	30	160	1125	462.6
94	5	0.7	3.3	12	6	30	160	1125	594.2
95	5	0.7	3.3	12	5	30	160	1125	451.9
96	5	0.7	3.8	11.5	5	30	160	1125	466.4
97	5	0.7	2.8	12.5	6	30	160	1125	595.7
98	5	0.4	3.6	12	5.5	30	160	1125	509.7
99	5	1	3	12	5.5	30	160	1125	540.2
100	5	0.7	3.3	12	5.5	30	160	250	409.9
101	5	0.7	3.3	12	5.5	30	160	2000	564.6
102	5	0.7	3.3	12	5.5	28	160	1125	527.7
103	5	0.7	3.3	12	5.5	32	160	1125	530.2
104	4	0.4	4.1	11.5	5.5	28	160	250	479.2
105	6	0.4	4.1	11.5	5.5	32	160	250	374.9
106	4	0.4	4.1	11.5	4.5	32	160	250	374.1
107	6	0.4	4.1	11.5	4.5	28	160	250	266.6
108	4	0.4	3.1	12.5	6.5	32	160	250	555.7

Tablo A.1. Devamı

109	6	0.4	3.1	12.5	6.5	28	160	250	381.9
110	4	0.4	3.1	12.5	5.5	28	160	250	493.2
111	6	0.4	3.1	12.5	5.5	32	160	250	357.3
112	4	1	3.5	11.5	5.5	32	160	250	413.4
113	6	1	3.5	11.5	5.5	28	160	250	300.0
114	4	1	3.5	11.5	4.5	28	160	250	379.5
115	6	1	3.5	11.5	4.5	32	160	250	290.8
116	4	1	2.5	12.5	6.5	28	160	250	391.0
117	6	1	2.5	12.5	6.5	32	160	250	369.6
118	4	1	2.5	12.5	5.5	32	160	250	480.5
119	6	1	2.5	12.5	5.5	28	160	250	334.9
120	4	0.4	4.1	11.5	5.5	32	160	2000	654.5
121	6	0.4	4.1	11.5	5.5	28	160	2000	482.8
122	4	0.4	4.1	11.5	4.5	28	160	2000	475.7
123	6	0.4	4.1	11.5	4.5	32	160	2000	337.3
124	4	0.4	3.1	12.5	6.5	28	160	2000	812.2
125	6	0.4	3.1	12.5	6.5	32	160	2000	596.6
126	4	0.4	3.1	12.5	5.5	32	160	2000	634.8
127	6	0.4	3.1	12.5	5.5	28	160	2000	545.4
128	4	1	3.5	11.5	5.5	28	160	2000	671.0
129	6	1	3.5	11.5	5.5	32	160	2000	519.4
130	4	1	3.5	11.5	4.5	32	160	2000	511.8
131	6	1	3.5	11.5	4.5	28	160	2000	383.5
132	4	1	2.5	12.5	6.5	32	160	2000	821.7
133	6	1	2.5	12.5	6.5	28	160	2000	641.9
134	4	1	2.5	12.5	5.5	28	160	2000	657.0
135	6	1	2.5	12.5	5.5	32	160	2000	507.1

EK B: CFD Analizinde Kullanılan Profile Dosyası Kodu

((movement_rotational 200 point)	(omega_z
(time	
0	-7.17
0.00081911	-7.17
0.00163822	-7.17
0.00245733	-7.17
0.00327644	-7.17
0.00409555	-7.17

0.00491466	-7.17
0.00573377	-7.17
0.00655288	-7.17
0.00737199	-7.17
0.0081911	-7.17
0.00901021	-7.17
0.00982932	-7.17
0.01064843	-7.17
0.01146754	-7.17
0.01228665	-7.17
0.01310576	-7.17
0.01392487	-7.17
0.01474398	-7.17
0.01556309	-7.17
0.0163822	-7.17
0.01720131	-7.17
0.01802042	-7.17
0.01883953	-7.17
0.01965864	-7.17
0.02047775	-7.17
0.02129686	-7.17
0.02211597	-7.17
0.02293508	-7.17
0.02375419	-7.17
0.0245733	-7.17
0.02539241	-7.17
0.02621152	-7.17
0.02703063	-7.17
0.02784974	-7.17
0.02866885	-7.17
0.02948796	-7.17
0.03030707	-7.17
0.03112618	-7.17
0.03194529	-7.17
0.0327644	-7.17
0.03358351	-7.17
0.03440262	-7.17
0.03522173	-7.17
0.03604084	-7.17
0.03685995	-7.17
0.03767906	-7.17
0.03849817	-7.17
0.03931728	-7.17
0.04013639	-7.17

0.0409555	-7.17
0.04177461	-7.17
0.04259372	-7.17
0.04341283	-7.17
0.04423194	-7.17
0.04505105	-7.17
0.04587016	-7.17
0.04668927	-7.17
0.04750838	-7.17
0.04832749	-7.17
0.0491466	-7.17
0.04996571	-7.17
0.05078482	-7.17
0.05160393	-7.17
0.05242304	-7.17
0.05324215	-7.17
0.05406126	-7.17
0.05488037	-7.17
0.05569948	-7.17
0.05651859	-7.17
0.0573377	-7.17
0.05815681	-7.17
0.05897592	-7.17
0.05979503	-7.17
0.06061414	-7.17
0.06143325	-7.17
0.06225236	-7.17
0.06307147	-7.17
0.06389058	-7.17
0.06470969	-7.17
0.0655288	-7.17
0.06634791	-7.17
0.06716702	-7.17
0.06798613	-7.17
0.06880524	-7.17
0.06962435	-7.17
0.07044346	-7.17
0.07126257	-7.17
0.07208168	-7.17
0.07290079	-7.17
0.0737199	-7.17
0.07453901	-7.17
0.07535812	-7.17
0.07617723	-7.17

0.07699634	-7.17
0.07781545	-7.17
0.07863456	-7.17
0.07945367	-7.17
0.08027278	-7.17
0.08109189	-7.17
0.081911	-7.17
0.08273011	-7.17
0.08354922	-7.17
0.08436833	-7.17
0.08518744	-7.17
0.08600655	-7.17
0.08682566	-7.17
0.08764477	-7.17
0.08846388	-7.17
0.08928299	-7.17
0.0901021	-7.17
0.09092121	-7.17
0.09174032	-7.17
0.09255943	-7.17
0.09337854	-7.17
0.09419765	-7.17
0.09501676	-7.17
0.09583587	-7.17
0.09665498	-7.17
0.09747409	-7.17
0.0982932	-7.17
0.09911231	-7.17
0.09993142	-7.17
0.10075053	-7.17
0.10156964	-7.17
0.10238875	-7.17
0.10320786	-7.17
0.10402697	-7.17
0.10484608	-7.17
0.10566519	-7.17
0.1064843	-7.17
0.10730341	-7.17
0.10812252	-7.17
0.10894163	-7.17
0.10976074	-7.17
0.11057985	-7.17
0.11139896	-7.17
0.11221807	-7.17

0.11303718	-7.17
0.11385629	-7.17
0.1146754	-7.17
0.11549451	-7.17
0.11631362	-7.17
0.11713273	-7.17
0.11795184	-7.17
0.11877095	-7.17
0.11959006	-7.17
0.12040917	-7.17
0.12122828	-7.17
0.12204739	-7.17
0.1228665	-7.17
0.12368561	-7.17
0.12450472	-7.17
0.12532383	-7.17
0.12614294	-7.17
0.12696205	-7.17
0.12778116	-7.17
0.12860027	-7.17
0.12941938	-7.17
0.13023849	-7.17
0.1310576	-7.17
0.13187671	-7.17
0.13269582	-7.17
0.13351493	-7.17
0.13433404	-7.17
0.13515315	-7.17
0.13597226	-7.17
0.13679137	-7.17
0.13761048	-7.17
0.13842959	-7.17
0.1392487	-7.17
0.14006781	-7.17
0.14088692	-7.17
0.14170603	-7.17
0.14252514	-7.17
0.14334425	-7.17
0.14416336	-7.17
0.14498247	-7.17
0.14580158	-7.17
0.14662069	-7.17
0.1474398	-7.17
0.14825891	-7.17

0.14907802	-7.17
0.14989713	-7.17
0.15071624	-7.17
0.15153535	-7.17
0.15235446	-7.17
0.15317357	-7.17
0.15399268	-7.17
0.15481179	-7.17
0.1556309	-7.17
0.15645001	-7.17
0.15726912	-7.17
0.15808823	-7.17
0.15890734	-7.17
0.15972645	-7.17
0.16054556	-7.17
0.16136467	-7.17
0.16218378	-7.17
0.16300289	-7.17
0.163822	-7.17

)

)

ÖZGEÇMİŞ

Hakan Doğan, 10.01.1990'da Kdz.Ereğli'de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kdz. Ereğli'de tamamladı. 2008 yılında Zonguldak Ereğli Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi'nden mezun oldu. Üniversite eğitime, Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2009 yılında kazanarak başladı ve 2013 yılında da mezun oldu. Ardından Sakarya Üniversitesi Enerji Anabilim dalında yüksek lisans kariyerine başladı. 2014-2017 yılları arasında 1505-5140003 ve 115M363 numaralı TUBİTAK projelerinde proje asistanı olarak, 2015 yılında da Detay Makine-Plastik'te Makine Mühendisi olarak çalıştı.