

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KUVVET-GERİ-BESLEMELİ SİSTEMLER İÇİN SAĞINIMLI
DÖNER MANYETOREOLOJİK
FREN GELİŞTİRİLMESİ**



DOKTORA TEZİ

Okan TOPÇU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU

OCAK 2018

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 091511010 numaralı Doktora Öğrencisi **Okan TOPÇU** 'nun ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**KUVVET-GERİ-BESLEMELİ SİSTEMLER İÇİN SAĞINIMLI DÖNER MANYETOREOLOJİK FREN GELİŞTİRİLMESİ**” başlıklı tezi **25.01.2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Eş Danışman : **Doç. Dr. Erhan İlhan KONUKSEVEN**
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Yücel ERCAN (Başkan)**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Yiğit YAZICIOĞLU
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Ali Emre TURGUT
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Okan TOPÇU

ÖZET

Doktora Tezi

KUVVET-GERİ-BESLEMELİ SİSTEMLER İÇİN SAĞINIMLI DÖNER MANYETOREOLOJİK FREN GELİŞTİRİLMESİ

Okan TOPÇU

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU

Tarih: Ocak 2018

Haptik cihazların kuvvet geri besleme sistemlerinde aktif eyleyicilerin kullanılmasına bağlı olarak kullanıcı güvenliği problemleri açığa çıkmaktadır. Ayrıca aktif eyleyici kullanan sistemlerde empedansa bağlı istenmeyen titreşimlerin önlenmesi için de akıllı çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Reolojik özellikleri kontrol edilebilen Elektoreolojik (ER) ve Manyetoreolojik (MR) akışkanlar hem titreşimlerin engellenmesinde hem de tepki kuvveti elde edilmesinde kullanılmaktadırlar. Manyetoreolojik Akışkanlar (MRF) viskoziteleri Elektoreolojik Akışkanlara (ERF) göre çok daha kolay kontrol edilebilen akıllı malzemelerdir. Bu nedenden dolayı çeşitli fren, kavrama ve sönümleyicilerde ERF yerine MRF kullanımı tercih edilmektedir. Mevcut MRF cihazlarda akışkan sızması ve yüksek sürtünme torkları gibi sorunlar bulunmaktadır. Öte yandan, bu oldukça ağır cihazlardan elde edilen kuvvetler insanların kullanımı için çok yüksektir. Patentler ve akademik yayınlar incelendiğinde, haptik cihazlar ile kullanılacak küçültülmüş bir MRF cihaz konusunda çok az çalışma olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada haptik cihazlarda kullanılacak sağınımlı döner bir MRF sönümleyici geliştirilmiştir. Geliştirilen cihazda bahsedilen sorunların en aza indirilmesi amacı ile

peristaltik pompaların çalışma prensibi esas alınmıştır. Peristaltik hareket elde edebilmek ve sızdırmazlığı sağlamak amacı ile elastik malzemeler kullanılarak iki tip MRF haznesi tasarlanmış ve üretilmiştir. Elastik haznelerin üretilebilmesi için hızlı takımlama sürecinden faydalanılmıştır. Hareket halindeki büyük parçalar ataleti arttıracığından, ayrıca geliştirilen ürünün küçültülmüş boyutlarda olması gerekmektedir. Bu amaçla ilk çalışan prototipin ölçüleri kullanılarak en iyileme çalışması yapılmıştır. En iyileme çalışması Parçacık Sürü En İyilemesi (PSO) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PSO süreci sonrasında elde edilebilecek en hafif, en az güç tüketen ve en yüksek tepki torkunu veren tasarıma ulaşılmıştır. Hem çalışan prototiplerin hem de PSO ile elde edilen tasarıma ait deneysel sonuçlar ile teorik hesaplamalar kıyaslanmıştır. Ayrıca ısıl analizler gerçekleştirilerek cihazda meydana gelebilecek sıcaklıklar sayısal olarak elde edilmiştir. Geliştirilen tasarım ve cihaz ile kapalı çevrim sıvı taşınması yapan bir sistemdeki MR akışkanının viskozitesi kontrol edilebilmektedir. Böylece, bu cihazı kullanan haptik cihazlar veya sistemler titreşimsiz güç aktarımı yapabilecektir. Ayrıca yarı-aktif eyleyici olarak kullanılacak cihaz mevcut olan ayarlanabilir frenlerin yerine de kullanılabilir. Ayarlanabilir fren ve sönümleyicilerin kullandıkları diğer uygulamalar arasında koltuk süspansiyonu, egzersiz aleti sönümleyicileri ve bacak protezleri örnek olarak gösterilebilir.

Anahtar Kelimeler: MRF fren, Haptik, Parçacık Sürü En İyilemesi

ABSTRACT

Doctor of Philosophy

DEVELOPMENT OF A PERISTALTIC ROTARY MAGNETORHEOLOGICAL BRAKE FOR FORCE-FEEDBACK SYSTEMS

Okan TOPÇU

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Assistant. Professor Yiğit TAŞCIOĞLU

Date: January 2018

User safety problems arise due to the use of active actuators in force feedback systems of haptic devices. In addition, smart solutions are needed to prevent unwanted vibrations due to impedance in systems using active actuators. Electrorheological (ER) and Magnetorheological (MR) fluids, whose rheological properties can be controlled, are used both in the prevention of vibrations and in obtaining response force. Magnetorheological Fluids (MRF) are smart materials whose viscosities can be controlled much more easily than Electrorheological Fluids (ERF). For this reason, it is preferred to use MRF instead of ERF in various brakes, clutches and dampers. Existing MRF devices have problems such as fluid leakage and high friction torques. On the other hand, the forces obtained from these rather heavy devices are too high for people to use. Furthermore, when patents and academic publications are examined, it has been found that there is very little work on a compact MRF device that can be used with haptic devices. In this study, a peristaltic rotary MRF device which can be used in haptic devices was developed. The aim of reducing the difficulties mentioned above in the developed device is based on the working principle of peristaltic pumps. Two types of MRF reservoirs

are designed and manufactured using elastic materials with the aim of achieving peristaltic movement and sealing. The rapid assembly process has been utilized to produce elastic bulkheads. As the moving parts increase the inertia, the developed product must also be in reduced dimensions. For this purpose, optimization study was done by using the dimensions of working prototypes. The optimization study was performed using the Particle Swarm Optimization (PSO) method. The design that achieved the lightest, least power consumption and highest reaction torque reached after the PSO process is completed. The theoretical calculations are compared with the experimental results of both the working prototypes and the design obtained with PSO. In addition, numerical thermal analyzes were carried out to obtain temperatures that can occur in the device. The viscosity of the MR fluid in a closed loop fluidized system can be controlled with the developed design and device. Thus, haptic devices or systems that use this device will be able to perform vibration-free power transmission. The device, which can also be used as a semi-active actuator, can be used in place of the existing adjustable brakes. Other applications for adjustable brakes and dampers include seat suspension, exercise instrument dampers, and leg prostheses.

Keywords: MRF Brake, Haptic, PSO.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocalarım Yrd. Doç. Dr. Yiğit Taşcıoğlu'na ve Doç. Dr. Erhan İlhan Konukseven'e, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, ODTÜ ve TOBB ETÜ'nün bünyesindeki imalat atölyelerinde kullanılan CNC ve ve konvansiyonel talaőlı imalat tezgâhlarının kullanımını sağlayanlara ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

115M019 numaralı proje kapsamında vermiő olduğu maddi destekten dolayı TÜBİTAK 'a, teşekkür ederim.

Çalıőmam süresince maddi, manevi ve bilimsel desteğini esirgemeyen eőim Yrd. Doç. Dr. Serpil Atamaz Topçu'ya ve bu çalıőmamı sonlandırmama yardım eden biricik kızım Arya'ya teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xii
ÇİZELGE LİSTESİ	xviii
KISALTMALAR	xx
SEMBOL LİSTESİ	xxi
RESİM LİSTESİ	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Önerilen MRF Freni	1
1.2 Araştırma Hedefleri	3
1.3 Konu, Kapsam ve Özgün Değer	3
1.4 Yaklaşım Yöntemi	5
1.5 Bölüm Özeti	8
2. LİTERATÜR	9
2.1 Damperler, frenler ve kavramalar	9
2.2 Ticari Döner Damperler	9
2.2.1 Damper patentleri	10
2.3 Akıllı Malzemeler, ERF ve MRF	13
2.4 MRF Cihazlar	16
2.4.1 Haptik MRF cihazlar	24
2.4.2 Sürtünme ve sızma	27
2.4.2.1 O-Ring sürtünmesi	28
2.5 Empedans ve Admitans	30
2.5.1 Ağırlık en iyilemesi	31
2.6 Bölüm Özeti	32

3. MANYETİK AKI ve ISI TRANSFERİ	35
3.1 Amaç	35
3.2 Manyetik Alan için Temel Denklemler	35
3.3 Manyetik Devre Analizi	39
3.3.1 Ezici merdanelerin manyetik analize etkisi	43
3.4 Ohmik Isınma	45
3.4.1 İzin verilen akım şiddeti	46
3.4.2 Finite element methods magnetics (FEMM) ile ısı analiz	47
3.4.3 Isı transferi analizi	48
3.5 Bölüm Özeti	49
4. TEPKİ TORKU	51
4.1 Plastik Modelleri	52
4.1.1 Bingham viskoplastik modeli	53
4.1.1.1 Hız profili	54
4.1.1.2 Tampon geometrisi	56
4.1.1.3 Basınç gradyanı çözümünün kapalı biçimi	58
4.1.1.4 Silindirik ve doğrusal olmayan kanallar	61
4.2 Peristaltik Akış Direnci	64
4.2.1 Sönümlenme momenti	65
4.3 Döner Peristaltik MRF Cihazın Tepki Torku	66
4.4 Zaman Sabiti	69
4.5. Parametrik Histerezis Modelleri	71
4.5.1 Bingham histerezis modeli	73
4.5.2 Bouc–Wen histerezis modeli	73
4.5.3 Modifiye edilmiş Bouc–Wen histerezis modeli	74
4.5.4 Kwok cebirsel histerezis modeli	74
4.6 Bölüm Özeti	75
5. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU	77
5.1 Algoritma	79
5.2 PSO Parametre Kontrolü	80
5.3 PSO Parametreleri	81
5.4 Eylemsizlik Ağırlığı	81
5.5 Sınırlamaların Sisteme Dahil Edilmesi	82

5.6 MRF Tasarımının PSO Kullanılarak En İyilemesi	83
5.7 Bölüm Özeti	86
6. PROTOTİP GELİŞTİRME ve DENEY DÜZENEĞİ	87
6.1 İlk Prototip	87
6.2 İkinci Prototip	88
6.3 Son Prototip	88
6.3.1 Bobin sarımı	90
6.3.2 Hızlı takımlama	91
6.3.3 İmalat ve montaj	94
6.3.4 Deney düzeneği	97
6.4 Bölüm Özeti	100
7. SAYISAL ANALİZ ve DENEYSEL SONUÇLAR	101
7.1 Manyetik Akı Analizi	101
7.2 Ayırıcı Elastik Zar Modele ait Deneyler	105
7.3 Kartuşlu Modele ait Deneyler	109
7.4 PSO Deneyleri	118
7.5 Bölüm Özeti	124
8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	125
KAYNAKLAR	133
EKLER	147
ÖZGEÇMİŞ	159

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Peristaltik hareket	2
Şekil 1.2 : Döner peristaltik ayırıcı elastik zarlı ve kartuşlu MRF cihazların ayırıcı elastik zar ve kartuş resimleri ile şematik gösterimleri	7
Şekil 2.1 : MRF cihazların çalışma modları, (a) Kesme modu, (b) Akış modu, (c) Sıkıştırma modu, ve (d) Kıştırma modu	16
Şekil 2.2 : Bir döner MRF cihazdaki açısız hıza bağlı tepki torkları	19
Şekil 2.3 : Döner MRF cihazların genel metalik bileşenleri	19
Şekil 2.4 : Elektro mıknatıs, akış kanalı ve oluşan manyetik akının şematik gösterimi	19
Şekil 2.5 : Kesme modunda çalışan cihazlardaki sonsuz küçük alan elemanları	20
Şekil 2.6 : MR etkiye bağlı oluşan tepki torklarının cihaz tipi ve ilgili kabullere göre şematik gösterimi	23
Şekil 3.1 : (a) Elektrik devresi ile (b) manyetik devrenin şematik gösterimi	37
Şekil 3.2 : S235 Düşük Karbon Çeliğine ait H-B eğrisi	39
Şekil 3.3 : MRF 122-EG akışkanına ait H-B eğrisi [1]	39
Şekil 3.4 : MRF 132-DG akışkanına ait H-B eğrisi [1]	40
Şekil 3.5 : MRF 140-CG akışkanına ait H-B eğrisi [1]	40
Şekil 3.6 : MRF manyetik çekirdek rollerler elastik hazne	41
Şekil 3.7 : Boşluğunda MRF dolu elektro-mıknatıs devre şeması	43
Şekil 3.8 : Hava boşluğunda MRF ve ezici merdanlerin bulunduğu elektro-mıknatıs devre şeması	43
Şekil 3.9 : Sağınımlı döner MRF frene ait sadeleştirilmiş manyetik devre	45
Şekil 3.10 : Eşdeğer yalıtım ve iletken alanı elde edilmesi	48
Şekil 4.1 : Kesme hızına bağlı Newtonyan, Bingham plastiği ve kayma ile özdeşleşen akışkanlara ait kesme dayanımı eğrileri	51
Şekil 4.2 : İki paralel plaka arasındaki yarı kararlı MRF akışı	54

Şekil 4.3 : Tampon bölgedeki diferansiyel akışkan elemanın üzerindeki kuvvet dengesi	56
Şekil 4.4 : Farklı dirsek açıları ve eğrilik için kayıp katsayısı değerleri [131] ..	63
Şekil 4.5 : Peristaltik bir pompanın çalışma prensibini gösteren şematik çizim	65
Şekil 4.6 : MRF'in kapladığı hacmin hesaplanılmasında kullanılan değişenler	67
Şekil 4.7 : Döner peristaltik MRF frenin şematik kesit görünüşü ve geometrik parametleri	68
Şekil 4.8 : Zaman sabiti	69
Şekil 4.9 : Kwok modeli	75
Şekil 5.1 : PSO tasarımında kullanılan geometrik parametreler	83
Şekil 5.2 : PSO en iyilemesi sırasında parametrelerin değişimi	85
Şekil 5.3 : PSO en iyilemesi sırasında güç ve torkun değişimi	85
Şekil 5.4 : PSO en iyilemesi sırasında hacim ve ağırlığın değişimi	86
Şekil 5.5 : Maliyet fonksiyonu değişimi	86
Şekil 6.1 : (a), (b) 2nci prototipin katı modelleri ve (c) montaj sonrası resmi....	87
Şekil 6.2 : Son prototip tasarımına ait katı modeller, (a) 1nci sürüm, (b) 2nci sürüm, ve (c) 3ncü sürüm	89
Şekil 6.3 : Silikon hazne için kullanılan kalıplara ait katı modeller	91
Şekil 6.4 : Poliüretan kapalı çevrim hazne (kartuş), hazne kalıbı parçaları ve şematik açıklama	93
Şekil 6.5 : Poliüretan zar ve kalıp parçaları, ve şematik açıklama	93
Şekil 6.6 : Döner MRF fren ölçümleri için kullanılan 1nci deney düzeneği	97
Şekil 6.7 : Döner MRF fren ölçümleri için kullanılan 2nci deney düzeneği	97
Şekil 6.8 : Döner MRF fren ölçümleri için kullanılan 3ncü deney düzeneği	98
Şekil 7.1 : PSO modelin boşluğundaki manyetik alan	101
Şekil 7.2 : Ayırıcı elastik zar modelin boşluğundaki manyetik alan	102
Şekil 7.3 : AWG 26 tel kullanılmış ve 1,586 A'de çalışan prototip için sayısal hesaplamalı ısı transfer analizi	102
Şekil 7.4 : AWG 24 tel kullanılmış ve 0,8 A'de çalışan PSO tasarıma ait sayısal hesaplamalı ısı transfer analizi	102
Şekil 7.5 : Ayırıcı zar modelin elektro-mıknatıs FEMM analizi	104
Şekil 7.6 : Kartuşlu modelin elektro-mıknatıs FEMM analizi	104
Şekil 7.7 : PSO modelin elektro-mıknatıs FEMM analizi	104

Şekil 7.8 : Gauss metre Ayırıcı Zar Sızdırmazlık etkisi	105
Şekil 7.9 : Ayırıcı elastik zar takılı boş frene ait tepki torkları	105
Şekil 7.10 : MRF 132DG dolu frenin saat yönünde (SY) ve satin tersi yönündeki (STY) viskoz tepki torku	106
Şekil 7.11 : MRF 132DG dolu frenin viskoz tepki torku	106
Şekil 7.12 : 1 [dev/dak] dönme frekansındaki 2,0 A akım verilmiş sistemin basamak girişe cevabı ve MATLAB simulasyon sonuçları	107
Şekil 7.13 : 2 [dev/dak] dönme frekansındaki 2,0 [A] akım verilmiş sistemin basamak girişe cevabı ve MATLAB simulasyon sonuçları	107
Şekil 7.14 : 4 [dev/dak] dönme frekansındaki 2,0 [A] akım verilmiş sistemin basamak girişe cevabı ve MATLAB simulasyon sonuçları	108
Şekil 7.15 : 8 [dev/dak] dönme frekansındaki 2,0 [A] akım verilmiş sistemin basamak girişe cevabı ve MATLAB simulasyon sonuçları	108
Şekil 7.16 : 16 [dev/dak] dönme frekansındaki 2,0 [A] akım verilmiş sistemin basamak girişe cevabı ve MATLAB simulasyon sonuçları	108
Şekil 7.17 : MRF 122EG dolu frenin farklı dönme frekanslarındaki harekete teпки torku	110
Şekil 7.18 : MRF 122EG dolu frenin 1 Hz frekansındaki uyarıtıma farklı dönme frekanslarında verdiği tepki torku	110
Şekil 7.19 : MRF 122EG dolu frenin 1 Hz frekansındaki uyarıtıma 120 dev/dak dönme frekansı ve farklı akım değerlerinde verdiği tepki torku	111
Şekil 7.20 : MRF 122EG dolu frenin 1 Hz frekansındaki uyarıtıma 120 dev/dak dönme frekansı ve 0, 1, ve 2 A akım değerlerinde verdiği teпки torku ve Kwok cebirsel histerezis modeli simulasyon verileri	111
Şekil 7.21 : MRF 122EG dolu frenin 120 dev/dak dönme frekansında farklı akım değerlerine verdiği tepki torku	112
Şekil 7.22 : MRF 122EG dolu frenin ,25 [Hz] frekansındaki uyarıtıma 120 [dev/dak] dönme frekansı ve 0,5 [A] akım değerinde verdiği tepki torku ve Kwok cebirsel histerezis modeli simulasyon verileri	113
Şekil 7.23 : MRF 122EG dolu frenin ,25 [Hz] frekansındaki uyarıtıma 120 [dev/dak] dönme frekansı ve 1,0 [A] akım değerinde verdiği tepki torku ve Kwok cebirsel histerezis modeli simulasyon verileri	113

Şekil 7.24 : MRF 122EG dolu frenin ,25 [Hz] frekansındaki uyartıma 120 [dev/dak] dönme frekansı ve 1,5 [A] akım değerinde verdiği tepki torku ve Kwok cebirsel histerezis modeli simulasyon verileri	114
Şekil 7.25 : MRF 122EG dolu frenin ,25 [Hz] frekansındaki uyartıma 120 [dev/dak] dönme frekansı ve 2,0 [A] akım değerinde verdiği tepki torku ve Kwok cebirsel histerezis modeli simulasyon verileri	114
Şekil 7.26 : MRF 122EG dolu frenin 3 adet deneyine ait artan ve azalan akım değerlerine verdiği tepki torku ve teorik sonuçlar	115
Şekil 7.27 : MRF 122EG dolu frenin artan ve azalan akım değerlerine bağlı oluşan histerezis davranışı	115
Şekil 7.28 : MRF 132DG dolu frenin 3 adet deneyine ait artan ve azalan akım değerlerine verdiği tepki torku ve teorik sonuçlar	116
Şekil 7.29 : MRF 132DG dolu frenin artan ve azalan akım değerlerine bağlı oluşan histerezis davranışı	116
Şekil 7.30 : MRF 140CG dolu frenin 3 adet deneyine ait artan ve azalan akım değerlerine verdiği tepki torku ve teorik sonuçlar	116
Şekil 7.31 : MRF 140CG dolu frenin artan ve azalan akım değerlerine bağlı oluşan histerezis davranışı	117
Şekil 7.32 : 16 [dev/dak] ve 32 [dev/dak] dönme frekansındaki boş elastik ayırıcı zara ait tepki torku verileri	118
Şekil 7.33 : Farklı dönme frekanslarındaki MRF 140CG dolu frenin viskoz tepki torku	118
Şekil 7.34 : Artan ve azalan akım değerlerinde MRF 140CG dolu frenin 4, 8, 16, 32, ve 64 dev/dak dönme frekansındaki deney verileri	119
Şekil 7.35 : Artan ve azalan akım değerlerinde MRF 122EG dolu frenin 32, ve 64 dev/dak dönme frekansındaki deney verileri	119
Şekil 7.36 : MRF 140CG dolu frenin 2,0 [Hz] frekansındaki uyartıma 32 [dev/dak] dönme frekansında verdiği tepki torku	120
Şekil 7.37 : MRF 140CG dolu frenin 1,5 [Hz] frekansındaki uyartıma 32 [dev/dak] dönme frekansında verdiği tepki torku	120
Şekil 7.38 : MRF 140CG dolu frenin 1,0 [Hz] frekansındaki uyartıma 32 [dev/dak] dönme frekansında verdiği tepki torku	120

Şekil 7.39 : MRF 140CG dolu frenin 0,5 [Hz] frekansındaki uyarıtıma 32 [dev/dak] dönme frekansında verdiği tepki torku	121
Şekil 7.40 : MRF 140CG dolu frenin 4, 8, 16, 32, ve 64 [dev/dak] dönme frekansında rastgele akım girişlerine verdiği tepki torku	121
Şekil 7.41 : MRF 140CG dolu frenin 1, 2, 4, ve 8 [dev/dak] gibi düşük dönme frekansında 1,0 [A] akım girişine verdiği tepki torku	121
Şekil 7.42 : MRF 140CG dolu frenin 64 [dev/dak] dönme frekansında ve 1,0 [A] akımda 1,0 [Hz] frekansındaki uyarıtıma verdiği tepki torku	122
Şekil 7.43 : MRF 140CG dolu frenin 32 [dev/dak] dönme frekansında ve 1,0 [A] akımda 1,0 [Hz] frekansındaki uyarıtıma verdiği tepki torku	122
Şekil 7.44 : MRF 140CG dolu frenin 16 [dev/dak] dönme frekansında ve 1,0 [A] akımda 1,0 [Hz] frekansındaki uyarıtıma verdiği tepki torku	123
Şekil 7.45 : MRF 140CG dolu frenin 8 [dev/dak] dönme frekansında ve 1,0 [A] akımda 1,0 [Hz] frekansındaki uyarıtıma verdiği tepki torku	123
Şekil 7.46 : MRF 140CG dolu frenin 4 [dev/dak] dönme frekansında ve 1,0 [A] akımda 1,0 [Hz] frekansındaki uyarıtıma verdiği tepki torku	123
Şekil 7.47 : MRF 140CG dolu frenin 2 [dev/dak] dönme frekansında ve 1,0 [A] akımda 1,0 [Hz] frekansındaki uyarıtıma verdiği tepki torku	124
Şekil EkB.1 : MRF 122-ED için H- τ Eğrisi [1]	145
Şekil EkB.2 : MRF 132-DG için H- τ Eğrisi [1]	145
Şekil EkB.3 : MRF 140-CG için H- τ Eğrisi [1]	145
Şekil EkC.1 : MRF 132DG dolu frenin 1nci deneyine ait tepki torku verileri ...	146
Şekil EkC.2 : MRF 132DG dolu frenin 2nci deneyine ait tepki torku verileri ...	146
Şekil EkC.3 : MRF 132DG dolu frenin 3ncü deneyine ait tepki torku verileri ..	146
Şekil EkC.4 : MRF 132DG dolu frenin 1nci deneyine ait 1 dev/dak dönme frekansında basamak giriş cevabı	147
Şekil EkC.5 : MRF 132DG dolu frenin 2nci deneyine ait 1 dev/dak dönme frekansında basamak giriş cevabı	147
Şekil EkC.6 : MRF 132DG dolu frenin 3ncü deneyine ait 1 dev/dak dönme frekansında basamak giriş cevabı	147
Şekil EkC.7 :MRF 132DG dolu frenin 1nci deneyine ait 2 dev/dak dönme frekansında basamak giriş cevabı	148

Şekil EkC.8 : MRF 132-DG dolu frenin 2nci deneyine ait 2 dev/dak dönme frekansında basamak giriş cevabı	148
Şekil EkC.9 : MRF 132-DG dolu frenin 3ncü deneyine ait 2 dev/dak dönme frekansında basamak giriş cevabı	148
Şekil EkC.10 : MRF 132DG dolu frenin 1nci deneyine ait 4 dev/dak dönme frekansında basamak giriş cevabı	149
Şekil EkC.11 : MRF 132DG dolu frenin 2nci deneyine ait 4 dev/dak dönme frekansında basamak giriş cevabı	149
Şekil EkC.12 : MRF 132DG dolu frenin 3ncü deneyine ait 4 dev/dak dönme frekansında basamak giriş cevabı	149
Şekil EkC.13 : MRF 132DG dolu frenin 1nci deneyine ait 8 dev/dak dönme frekansında basamak giriş cevabı	150
Şekil EkC.14 : MRF 132DG dolu frenin 2nci deneyine ait 8 dev/dak dönme frekansında basamak giriş cevabı	150
Şekil EkC.15 : MRF 132DG dolu frenin 3ncü deneyine ait 8 dev/dak dönme frekansında basamak giriş cevabı	150
Şekil EkC.16 : MRF 132DG dolu frenin 1nci deneyine ait 16 dev/dak dönme frekansında basamak giriş cevabı	151
Şekil EkC.17 : MRF 132DG dolu frenin 2nci deneyine ait 16 dev/dak dönme frekansında basamak giriş cevabı	151
Şekil EkC.18 : MRF 132DG dolu frenin 3ncü deneyine ait 16 dev/dak dönme frekansında basamak giriş cevabı	151
Şekil EkC.19 : MRF132DG dolu frenin 1nci deneyine ait 16 dev/dak dönme frekansındaki kararlı tepki torku	152
Şekil EkC.20 : MRF132DG dolu frenin 2nci deneyine ait 16 [dev/dak] dönme frekansındaki kararlı tepki torku	152
Şekil EkC.21 : MRF132DG dolu frenin 3ncü deneyine ait 16 dev/dak dönme frekansındaki kararlı tepki torku	152
Şekil EkC.22 : MRF 140CG dolu frenin 1, 2, 4, ve 8 dev/dak gibi düşük dönme frekansında 1,0 A akım basmak girişine verdiği tepki torku	153
Şekil EkC.23 : MRF 140CG dolu frenin 1, 2, 4, ve 8 dev/dak gibi düşük dönme frekansında 1,0 A akım basmak girişinden çıkışa verdiği tepki torku	153

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 : Ürün tasarımı için Pugh karar matrisi	5
Çizelge 2.1 : MR etkiye bağlı oluşan tepki torklarının çalışma moduna bağlı değişimi	23
Çizelge 2.2 : O-ring kullanımına bağlı rotorda oluşan sürtünme torkları [83] ...	29
Çizelge 3.1 : Manyetik çekirdek malzemelerine ait manyetik geçirgenlik değerleri	42
Çizelge 3.2 : Manyetik geçirgenlik değerleri	42
Çizelge 4.1 : Newtonsal olmayan farklı akışkanlara ait karakteristik ve davranışlar [111]	53
Çizelge 4.2 : Histerezis modeller	72
Çizelge 5.1 : PSO hesaplama sonuçları [mm]	84
Çizelge 6.1 : Emaye izoleli bakır tel çapları ve direnç değerleri [158]	91
Çizelge 6.2 : Zarlı, Hazneli ve PSO tasarımlarında kullanılan malzemeler	96
Çizelge 6.3 : Ortak deney düzeneği bileşenleri	98
Çizelge 6.4 : Ayırıcı zar modeli deney düzeneği bileşenleri	99
Çizelge 6.5 : Kartuşlu modeli deney düzeneği bileşenleri	99
Çizelge 6.6 : PSO modeli deney düzeneği bileşenleri	99
Çizelge 7.1 : Tel tipinin bobin sıcaklığına ve güç tüketimine etkisi	103
Çizelge 7.2 : MRF 132DG dolu frenin ortalama tepki torku.....	109
Çizelge 7.3 : MRF 122EG dolu frenin farklı dönme frekanslarındaki harekete tepki torku	110
Çizelge 7.4 : MRF 122EG dolu frenin 1 [Hz] frekansındaki uyarıtma 120 [dev/dak] dönme frekansı ve 0, 1, ve 2 [A] akım değerlerinde verdiği tepki torkunun Kwok cebirsel histerezis modeli parametreleri	112
Çizelge 7.5 : MRF 122EG dolu frenin 120 [dev/dak] dönme frekansında farklı akım değerlerine verdiği tepki torku	112

Çizelge 7.6 : MRF 122EG dolu frenin 0,25 Hz frekansındaki uyarıtma 120 dev/dak dönme frekansı ve 0,0, 0,5, 1,0, ve 2,0 A akım değerlerinde verdiği tepki torkunun Kwok cebirsel histerezis modeli parametreleri 114



KISALTMALAR

ER	: Elektroeolojik
MR	: Manyetoreolojik
ERF	: Elektroeolojik Akışkan
MRF	: Manyetoreolojik Akışkan
PSO	: Parçacık Sürü En İyilemesi
PAO	: Para Alpha Olefin
FEA	: Sonlu Eleman Analizi
AWG	: Amerikan Tel Ölçeği
CNC	: Sayısal Numerik Kontrol
SY	: Saat Yönü
STY	: Saatin Tersi Yönü

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
D	Dinamik aralık
T_{τ}	Manyetik alan etkisi ile kontrol edilebilen tepki torku
T_u	Kontrol edilemeyen torklar toplamı
T_f	Sürtünme torkları
T_{η}	Viskoz torklar
T	Cihaz toplam tepki torku
r	Cihaz moment kolu
F_{mrbF}	Cihaz viskoz sürtünme kuvveti
A_{mrbFA}	Cihaz MRF akış alanı
ΔP_{mrbR}	Cihaz viskoz basınç düşümü
ΔP_{mrbMRF}	Cihaz manyetik alan bağımlı basınç düşümü
η	Akışkan viskozitesi
Q	Akış debisi
t_{mrb}	Cihaz plaka genişliği
h_{mrb}	Cihaz plakalar arası mesafe
τ_{yield}	MRF akma dayanımı
θ_{mrb}	Akış kanalı açısı
τ	Kesme dayanımı
r	Radyal uzaklık
ω	Açısal hız
r_i	Eksenel yüzey içyarıçapı
r_o	Eksenel yüzey dış yarıçapı
T	Tepki torku

T_{oRing}	O-Ring sürtünme torku
L_c	Sızdırmazlık sağlanmış yüzey uzunluğu
f_c	Origin sertliği
f_h	Akışkan basıncına bağlı açığa çıkan sürtünme kuvveti
A_r	Akışkanın basıncı uyguladığı yüzey alanı
F	Kuvvet
k	Yay sabiti
x	Yer değiştirme
$Z(\omega)$	Mekanik empedans
$F(\omega)$	Mekanik sistemin kuvveti
$V(\omega)$	Mekanik sistemin hızı
m	Kütle
V_{pM}	Paramanyetik malzeme hacim
ρ_{pM}	Paramanyetik malzeme yoğunluğu
V_{MRF}	MRF hacmi
ρ_{MRF}	MRF yoğunluğu
V_{St}	Manyetik ekirdek malzemesi hacmi
ρ_{St}	Manyetik ekirdek malzeme yoğunluğu
V_c	Tel sarımı hacmi
ρ_c	Tel sarım malzemesi yoğunluğu
H	Manyetik alan yoğunluğu
I_{net}	Manyetik alan oluşturan net akım
l_c	Manyetik ekirdek merkez uzunluğu
N	Sarım sayısı
B	Manyetik akı yoğunluğu
μ	Manyetik geçirgenlik
μ_0	Boş uzayın manyetik geçirgenliği
μ_r	Greli manyetik geçirgenlik
Φ	Manyetik akı
A	Kesit alanı
\mathcal{F}	Manyeto motor kuvvet
V	Voltaj
I	Akım

R	Direnç
\mathcal{R}	Manyetik direnç
$\mathcal{R}_{e\mathcal{s}}$	Eşdeğer manyetik direnç
\mathcal{P}	Manyetik iletkenlik
ρ_{ref}	Orantılılık katsayısı
R_{ref}	Referans sıcaklıktaki direnç
L_{ref}	Referans sıcaklıktaki boy
A_{ref}	Referans sıcaklıktaki alan
α_{ref}	Direncin sıcaklık katsayısı
T_{ref}	Referans sıcaklık
T_{wire}	Tel sıcaklığı
R_{wire}	Tel direnci
E_g	Direnin ısınma
\dot{q}	Hacimsel ısı üretimi oranı
q_x''	Isı akısı
k_q	Isıl iletkenlik katsayısı
h_q	Taşıyıcı ısı aktarım katsayısı
T_s	Yüzey sıcaklığı
T_∞	Akışkan sıcaklığı
E_b	Yayıncı güç
σ	Stefan-Boltzmann sabiti
ε	Yüzeyin yayım kabiliyeti
h_r	Isı aktarım katsayısı
Ra_L	Rayleigh sayısı
\overline{Nu}_L	Nusselt sayısı
Pr	Prandtl sayısı
Gr_L	Dik düz plakalar için Grashof sayısı
T_f	Film sıcaklığı
d_e	Hidrolik çap
f_s	Moody sürtünme katsayısı
Re	Reynolds sayısı
De	Dean sayısı

He	Hedström sayısı
Bi	Bingham sayısı
Re_B	Bingham akışkanları için Reynolds sayısı
λ	Buckingham-Reiner sürtünme katsayısı
P_f	Sürtünmeye bağlı basınç düşümü
c_{min}	En düşük torksal sönümleme katsayısı
T_{flow}	Ezici merdaneli cihaz tepki torku
$G(s)$	Transfer fonksiyonu
$C(s)$	Sistem cevabı
T_r	Yükselme zamanı
T_s	Yatışma zamanı
V_R	Direnç üzerindeki voltaj düşümü
V_L	İndüktans üzerindeki voltaj düşümü
R_g	Manyetik devredeki hava açıklığından kaynaklanan direnç
A_c	Manyetik çekirdek alanı
l_g	Açıklığın mesafesi
c_y	Bobin yüksekliği
c_x	Bobin genişliği

RESİM LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Resim 1.1 MRF cihaz resimleri, RD-8058-1 TFD Cihazı 12 Nm (sol taraf) ve RD-8040-1 MR Sönümleyici 1 kN (sağ taraf) [1]	1
Resim 2.1 Haptik cihaz resimleri (a–d) devinduyumsal cihazlar, ve (e–h) dokunsal cihazlar. (a) PHANToM Omni, (b) PHANToM Premium, (c) Omega.7, (d) Falcon, (e) CyberTouch, (f) Tactile Gloves, (g) Tactile Surface Display and (h) Texture Display Mouse [68]	24
Resim 2.2 Haptik MRF cihaz resimleri, sol baştan sırası ile haptik eldiven [70], haptik makas [71], ve haptik fren [72]	25
Resim 6.1 : İlk prototipe ait montaj sonrası resimleri	87
Resim 6.2 : Son prototipin üçüncü sürümüne ait parçalar	89
Resim 6.3 : (a) Prototiplerin üretiminde kullanılan bobin sarım sistemi ve (b) PSO tasarımında kullanılan bobin sarım sistemi	90
Resim 6.4 : Hızlı takımlamada kullanılan vakum ünitesi	92
Resim 6.5 : Hızlı takımlamada kullanılan sıvı kauçuk karıştırıcılar	92
Resim 6.6 : PSO tasarıma ait kalıp ve zar resimleri	94
Resim 6.7 : (a) Zarlı döner peristaltik MRF frenin parçaları ve (b) montaj resmi	95
Resim 6.8 : (a) Hazneli döner peristaltik MRF frenin parçaları, ve (b) montaj resmi	95
Resim 6.9 : (a) PSO tasarım döner peristaltik MRF frenin parçaları ve (b) montaj resmi	96
Resim 6.10 : (a) Hassas terazi üzerinde MRF doldurulmuş hazneli döner MRF fren, (b) MRF doldurulmuş zarlı döner MRF fren, ve (c) PSO tasarım	96

1. GİRİŞ

Haptik sistemlerde empedans değişimine bağlı istenmeyen titreşimlerin önlemesi için akıllı çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Manyetoreolojik Akışkanlar (MRF) viskoziteleri kontrol edilebildiği için akıllı malzemeler sınıfına girmektedirler. Manyetoreolojik (MR) akışkanlı cihazların kullanıldığı yerler arasında otomotiv kavramaları, egzersiz cihazları için frenler, koltuk sönümleyicileri, takma (protez) bacak eyleyicileri, ve darbe emiciler ön plana çıkmaktadır. Mevcut MRF cihazlar haptik sistemlerde kullanmak için çok ağır ve ürettikleri tepki kuvvetleri veya torkları da çok yüksektir. Mevcut MRF cihazlara örnek olarak Lord [1] firmasının ürünleri Resim 1.1’de verilmiştir.



Resim 1.1 MRF cihaz resimleri, RD-8058-1 TFD Cihazı 12 Nm (sol taraf) ve RD-8040-1 MR Sönümleyici 1 kN (sağ taraf) [1].

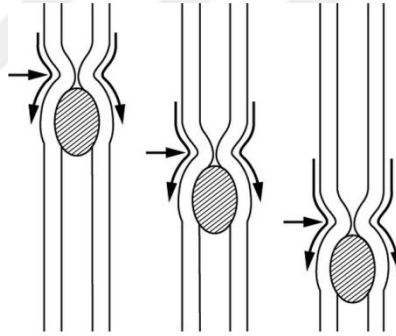
Tezin temel amacı haptik cihazlarda kullanılacak bir MRF fren ve sönümleyici geliştirmektir. Patentler ve akademik yayınlar incelendiğinde, haptik cihazlar ile kullanılacak hafif ve küçültülmüş bir MRF fren ve sönümleyici konusunda çok az çalışma yapılmış olduğu tespit edilmiştir.

1.1 Önerilen MRF Freni

Şeffaflık, haptik ara yüzlerde sanal veya uzak ortamın gerçek ortamdaki ayırt edilemez gibi hissedilmesi şeklinde özetlenebilir. MRF cihazlarda sızdırma ve kullanıma bağlı akışkan kalitesinde değişim gibi sorunları çözmek için şeffaflığı

azaltan bileşenler veya ferrofluid gibi farklı akışkan türleri kullanılmaktadır. Sızıntı, akışkanın yenilenmesi ve diğer olumsuz durumların önlenmesi amacı ile MR akışkanının kapalı hazne içerisinde tutulması özgün bir yaklaşım olarak ön plana çıkmaktadır.

Peristaltik hareketin en rahat gözlenebildiği elastik bir silindirik yapı düşünüldüğünde, bu gövde üzerinde yapılan sönümlenme çiftlik hayvanlarından süt sağmaya benzetilebilir. Şekil 1.1’de gösterilen bu sönümlenme hareketi elastik gövde üzerinde yüksek ve tekrar eden gerilmelere sebebiyet verecektir. Ayrıca peristaltik hareketin oluşmasını sağlayan baskı elemanının da bu hareketleri sürekli olarak tekrarlaması gerekmektedir. Peristaltik hareket ile akıllı malzeme olarak MRF’in birlikte kullanıldığı bir pasif eyleyici örneği mevcut değildir [2]. Diğer taraftan elastik gövdesi, baskı elemanı, ve akışın sürekliliğinin sağlandığı sistemin bir fren veya sönümleyici olarak üretilmesi mümkündür. Ayrıca, kapalı çevrim MRF taşıması yapan bir sistemdeki akışkanın viskozitesi kontrol edilerek haptik sistemlerde kullanılan aktif eyleyicilerde meydana gelecek olan titreşimlerin engellenmesi veya bu tür eyleyicilerin pasif bir eyleyici ile değiştirilmesi mümkündür.



Şekil 1.1 : Peristaltik hareket.

Yaylı sistemlerdeki yaya bağlı ortaya çıkan kuvvet mekanik empedansı tanımlamak için kullanılabilir. Değişken empedans aktivasyonu, eyleyicilerin çıkış kuvvetinin ve empedansının bağımsız olarak belirlenmesi biçiminde tanımlanmaktadır. Çıkış empedansının gerçek zamanlı olarak ayarlanması, eyleyicinin yüksek başarılı bir biçimde çeşitli görevleri, insan hareketlerine benzer eylemleri ve insan güvenliği desteğini gerçekleştirmesini sağlamaktadır.

Eyleyicilerdeki istenilmeyen sürtünme ve kuvvet etkilerini azaltmak amacı ile kuvvet kontrolcülerini kullanılmaktadırlar. Fakat birlikte yerleştirilemeyen eyleyici ve algılayıcıların, yükseltici dinamikleri ve algılayıcı yetersizliği nedeni ile bant

genişliği üzerinden sınırlı sistem kontrolü, sistemin doğal frekansında saplanıp kalmasına neden olmaktadır. Genel olarak yüksek frekanslarda sistem bileşenlerinin fiziksel tepkiler için yetersiz kalması dolayısı ile cihazın empedansını her hangi bir kontrol yöntemi ile kontrol etmek mümkün olamamaktadır.

1.2 Araştırma Hedefleri

Tezin amacı haptik cihazlarda ve ayarlanabilir fren veya sönümleyiciye ihtiyaç duyan sistemlerde kullanılabilir bir MRF cihaz geliştirmektir. Tez ile ulaşılmak istenen hedefler aşağıda sırası ile verilmiştir.

- Geliştirilecek MRF sönümleyici veya fren tasarımı için tepki ile gücün ağırlığa oranının en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi
- Geliştirilecek MRF fren veya sönümleyicinin diğer sistemler ile kullanılabilirliğini sağlayabilmek için standart bağlantı elemanları ile uyumlu hale getirilmesi
- Geliştirilecek frenin mevcut frenlerde bulunan ve istenilmeyen sızdırma sorununu ihtiva etmemesi
- Geliştirilecek MRF cihazda o-ring kullanılmaması ve o-ring kullanımına bağlı oraya çıkan istenilmeyen sürtünme torkunun azaltılması

1.3 Konu, Kapsam ve Özgün Değer

Günümüzde haptik, dokunma duyusu ile ilgilenen bilimlere tanımlamakta kullanılan bir terimdir. İlgilendiği konular arasında ön plana çıkan alan ise çevredeki objelerin buldukları ortam ile birlikte veya ortamdaki bağımsız bir biçimde genel olarak el ile uzaktan kontrolünü kapsamaktadır. Haptik teknoloji sayesinde, araç kılavuzluk sistemi desteği, cerrahi benzetimler ve ciddi oyun ve simülasyon “Serious Games and Simulations” kontrolcülerini gibi akıllı sistemler çok hızlı bir biçimde son kullanıcının hizmetine sunulmaktadır.

Frenleri ve motorları birleştiren melez (hibrid) eyleyiciler, haptik cihazlarda yüksek performans elde etmek için etkili bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Aktif arayüzlerde yaygın olarak aktif eyleyici olarak elektrik motorları kullanılır. Aktif

eyleyiciler hızlı tepki süresi ve nispeten iyi bir kontrol performansına sahiptirler. Pasif eyleyiciler elektrik güç girişine karşılık mekanik güç çıkışı göstermeyen pasiflikleri nedeni ile güvenli eyleyiciler olarak da bilinmektedirler. Mekanik güç çıkışı olmadığı için yüksek kuvvetler ve hızlar içeren etkileşimlerde operatörlere zarar verme riskleri en az seviyededir. Ayrıca, pek çok sanal ortam gerçekçi bir biçimde sadece pasif eyleyiciler ile modellenabilmektedir. Toz frenler, reolojik frenler ve amortisörler gibi pasif eyleyiciler elektrik motorlarına kıyasla daha az güç tüketmekte ve yüksek tepki torku sergileyebilmektedirler. Kısaca, hybrid eyleyicilerde aktif ve pasif eyleyiciler birleştirilerek her iki eyleyiciden kaynaklanan olumsuzluklar en aza indirilmiştir.

Kuvvet geri beslemeli sistemlerinin sınıflandırılması pasif, aktif ve yarı-aktif olarak üç grupta gerçekleştirilebilir. Güç kaynağı kullanılmayan pasif sistemler, temelde sistemi taşıyan bir yay ve titreşim enerjisini ısı enerjisine dönüştüren damperden oluşmaktadır. Yarı-aktif sistemler, kontrol edilebilen pasif eyleyicileri tanımlamaktadır. Elektorreolojik (ER) akışkanlı ve MR akışkanlı cihazlar pasif eyleyicidirler.

MRF, bünyesinde mikron seviyesinde ferromanyetik parçacıklar, bu parçacıkların içerisinde yüzdüğü taşıyıcı sıvı ve parçacıklar arası etkileşimleri güçlendirmek ve çökmeyi engellemek için eklenmiş katkı maddeleri bulunduran bir akışkandır. Manyetik alan uygulandığında akışkan içerisindeki ferromanyetik parçacıklar mikro mıknatıslar gibi davranarak birbirlerini çekerek manyetik alan vektörleri (N'den S'ye) boyunca dizilirler. Bu davranış ile birlikte MRF Bingham akışkanı olarak tanımlanan daha viskoz bir biçim alır. Bu kuvvetli, hızlı ve ters çevrilebilir etki 1940'lı yılların sonlarında Rabinow tarafından tespit edilmiştir [3]. MR akışkanların en umut veren kullanım alanları uyarlamalı titreşim sönümleme uygulamaları olmaktadır [4]. MRF cihazların çalışma modları, Direk kesme modu, Vana veya akış modu, Sıkıştırma modu, Paralel mod olarak tanımlanmıştır. MRF cihazlar ise MRF Fren, MRF Sönümleyici, MRF Kavrama olarak literatürde yer almaktadır.

Pompalama sistemleri incelendiğinde MRF taşıyabilecek ve bu süreç sırasında en az zarar görebilecek cihazların yer değiştirme pompaları olarak da bilinen diyafram pompası, peristaltik pompa ve bükülgen çark "flexible impeller" olduğu tespit edilmiştir. Yapılan patent ve akademik yazılı eser incelemesi sonrasında bu

taşıyıcıların MRF ile kullanılma biçiminin sadece akışkanın taşınması olarak sınırlandırıldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 1.1’de gösterilmiş olan Pugh karar matrisi kullanılarak geliştirilecek yeni üründe kullanılması gereken kontrol bileşeni (akıllı malzeme) ve çalışma tipi (sürekli/sınırlı dönme) gibi özellikler tespit edilmiştir. Peristaltik pompanın MRF cihazı olarak kullanımı araştırılmamış bir konudur. Bu konunun araştırılması ve ortaya çıkan yeni ürün ile birlikte yeni bilimsel ve teknolojik kullanım alanlarının belirlenmesi süreci de başlayacaktır.

Çizelge 1.1 : Ürün tasarımı için Pugh karar matrisi.

Açıklama	Şeffaflık	Ağırlık	Boyutlar	Tork	Kontrol	Modelleme	Özgünlük	TOPLAM AĞIRLIKLI ETKİ
Ağırlık	5	5	4	3	5	3	3	
Sınırlı Dönme								
Elektrik Motoru	5	1	1	5	3	5	3	88
Piezo Eyleyici	5	2	2	5	5	5	3	107
Manyetostriktif Eyleyici	5	2	2	5	5	5	3	107
Kanal Kontrolü	5	5	4	5	3	3	5	120
Sürekli Dönme								
Elektrik Motoru	5	1	1	5	3	5	4	91
Piezo Eyleyici	5	2	2	5	5	5	4	110
Manyetostriktif Eyleyici	5	2	2	5	5	5	4	110
Kanal Kontrolü	5	5	4	5	3	3	5	120
MRF Eyleyici	5	5	3	4	5	3	5	125

1.4 Yaklaşım Yöntemi

MRF, MRF cihazlar ve bu cihazların kullanıldığı haptik sistemleri kapsayan geniş bir yazılı eser incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bu inceleme sonrasında MRF cihazlardan elde edilen tepki kuvveti ve torku değerleri ile cihaz başarımları hakkında genel bir bilgi birikimi elde edilmiştir. Yazılı eser incelemesi ile ayrıca döner MRF cihazların test edilebilmesi ve başarımlarının ölçülebilmesi için gerekli olan deney düzeneği bileşenleri ve tasarım parametleri tespit edilmiştir. Yazılı eserlerin incelenmesi ile son olarak tepki torklarının hesaplanmasında ve dinamik olarak modellenmesinde kullanılan matematiksel modeller belirlenmiştir.

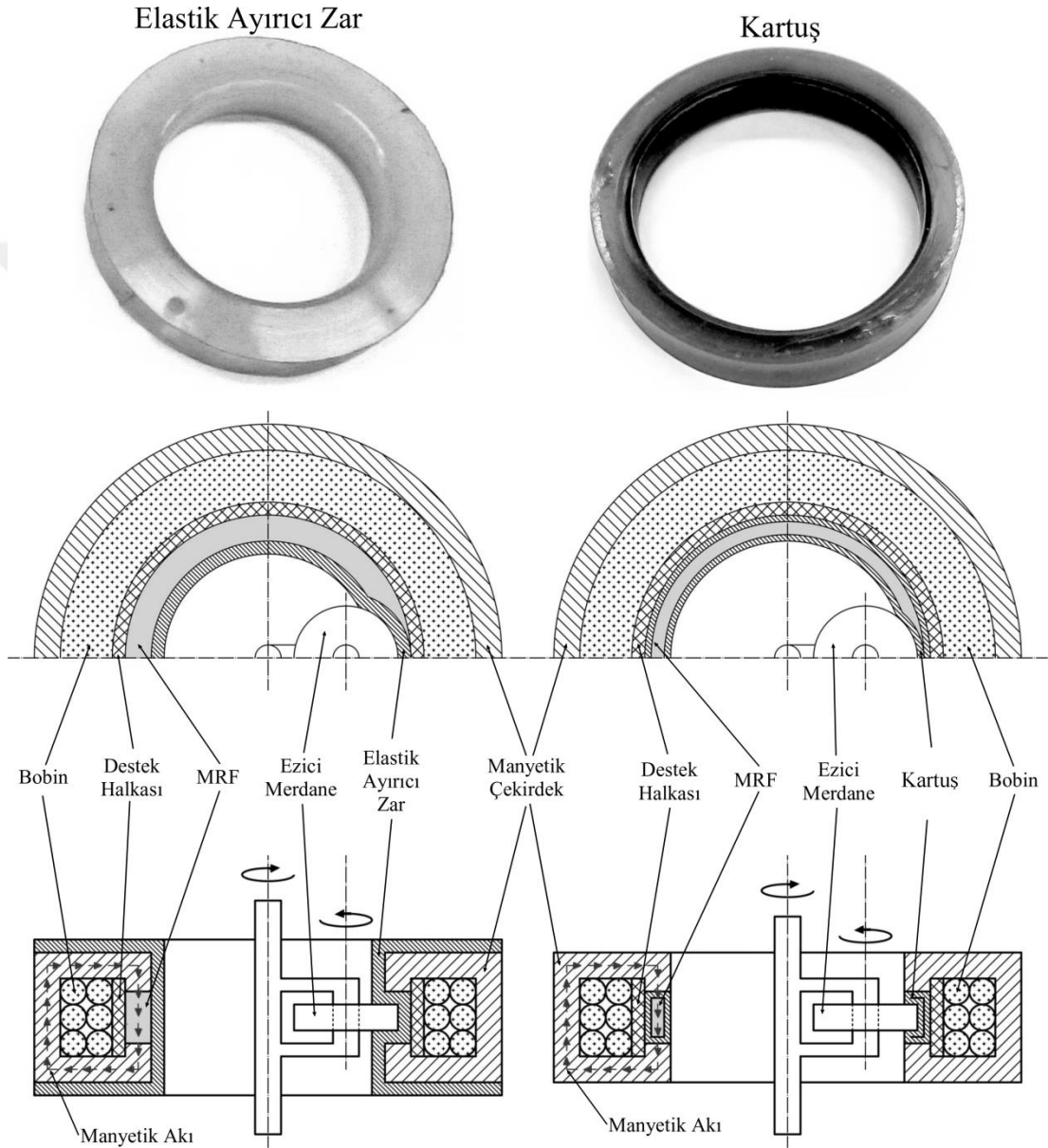
Yazılı eserlerin incelenmesinden sonra sayısal yöntemler kullanılarak peristaltik döner MRF cihazın elektro mıknatısının geometrik parametrelerinin tespit edilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu sürece paralel olarak geliştirilen elektro mıknatıs ile uyumlu olacak bir peristaltik pompa geliştirilmiştir. Her aşamada bir önceki aşamada karşılaşılan sorunlar ortadan kaldırılarak peristaltik pompa ile bütünleşik çalışan elektro mıknatıs prototipleri tasarlanmıştır. Peristaltik hareket için gerekli olan elastik ayırıcının tasarımı ve üretimin tamamlanmasının ardından prototip üretim süreci tamamlanmıştır.

İlk çalışan peristaltik MRF frenin elde edilmesi ile deneylerin yapılması için gerekli olan deney düzeneği kurulmuştur. Deneylerin tamamlanmasının ardından matematiksel modellerin iyileştirilmesi ve frenin geliştirilmesi süreci başlamıştır. Deneysel çalışmalarda üç adet tasarım incelenmiştir. Bu tasarımlar ön plana çıkan özellikleri ve deney sırası göz önüne alınarak ayırıcı elastik zarlı, kartuşlu ve PSO ile tasarlanmış peristaltik döner MRF frenler olarak tanımlanmışlardır.

Döner peristaltik ayırıcı elastik zarlı ve kartuşlu MRF cihazların ayırıcı elastik zar ve MRF dolu kartuş resimleri ile şematik gösterimleri Şekil 1.2’de verilmiştir. Stator bir bobin, bir demir gövdeden üretilmiş manyetik çekirdek, bir manyetik olmayan destek halkası ve MRF yerleştirilmesi için elektro mıknatısın kutupları arasında bir akış kanalı içermektedir. Akış kanalına kartuş yerleştirilmekte veya MRF ile doldurulduktan sonra elastik bir zar ile kapatılmaktadır. Bobin enerjilendirildiğinde, manyetik çekirdek, manyetik alanı tüm MRF üzerinden rotor eksenine paralel olarak akış kanalı boyunca yönlendirir. Rotor bir merkez mil ve kartuş veya elastik ayırıcı zara karşı baskı yapan bir dizi çevresel silindirden (ezici merdane) oluşur. Çalıştırma prensibi, peristaltik pompalarinkine benzerdir, ancak akışkanın tamamı cihazın içinde tutulur ve akış kanalı içinde sürekli devir daimlidir. Önerilen cihazın geleneksel kesme modu cihazlarına göre en önemli avantajı MRF’in hareket eden yüzeylerle doğrudan temas etmemesidir. Bu sayede, cihaza enerji verilmediğinde bile sürtünme torkuna sebebiyet veren O-ring (mil contası) kullanılmasına olan ihtiyacı ortadan kaldırır.

Haptik sistemlerde kullanılan döner MRF frenler diğer MRF frenlere göre nispeten daha az tepki torkuna sahiptirler. Ayrıca MRF damperlerin aksine düşük dönme frekanslarında sınırlı sayıda dönme gerçekleştirirler. Bu sebeplerden dolayı cihaz çalışırken sürtünme sonucu açığa çıkan ısı, manyetik alan oluşturulurken açığa çıkan

ısı karşısında ihmal edilebilir. Cihazlara ait tepki torkları, tepki süreleri, ağırlıkları ve benzeri karakteristik teknik özellikleri tespit edildikten sonra manyetik alan oluşturulmasına bağlı açığa çıkan ısı için sonlu elemanlar metodu hesaplamaları gerçekleştirilmiş, deneysel sonuçlar sunulmuş, değerlendirilmiş ve önerilerde bulunulmuştur.



Şekil 1.2 : Döner peristaltik ayırıcı elastik zarlı ve kartuşlu MRF cihazlarının ayırıcı elastik zar ve kartuş resimleri ile şematik gösterimleri.

1.5 Bölüm Özeti

Haptik cihazlarda ve ayarlanabilir fren ve sönümleyiciye ihtiyaç duyan sistemlerde kullanılabilir küçültülmüş bir MRF cihaz geliştirilmesi sırasında gerçekleştirilen literatür araştırmasından, teorik ve deneysel çalışmalardan bahsedilmiştir. Bu süreçlerin sonunda ayırıcı elastik zarlı, kartuşlu ve PSO yöntemi ile tasarlanmış döner peristaltik MRF frenler üretilmiş ve deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tezin sonunda elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve gelecekte yapılabilecek araştırmalar ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.



2. LİTERATÜR

2.1 Damperler, frenler ve kavramalar

Bir damper veya sönümleyici, hareket hızına bağlı olarak harekete karşı yönde direnç gösteren bir mekanizmadır. Doğrusal damperler için tepki kuvveti hız ile döner damperler için tepki torku ise açısal hız ile doğru orantılı değişmektedir. Fren, sistemin enerjisini ısıya dönüştürerek hareketi engelleyen mekanizmalara verilen isimdir. Kavrama miller arasında güç aktarımını kontrol etmek amacıyla kullanılan mekanik cihazlardır. Akışkan sürtünmesinden yararlanan bu cihazlardan önemli bir bölümü bünyelerindeki akışkanın viskozitesine, türüne ve montaj biçimine bağlı olarak sadece damper, veya damper ve fren veya kavrama olarak kullanılabilir. Buna bağlı olarak cihazların isimlendirilmesi de kullanım yerine göre değişiklik göstermektedir.

2.2 Ticari Döner Damperler

Döner damperlerin mevcut ticari modelleri incelendiğinde tepki torkunun 80 mN.m ile 700 N.m aralığında değerler alabildiği görülmektedir. Ayrıca bu damperlerin üretiminde, kullandıkları sektörlerin ihtiyaçları doğrultusunda plastik, alüminyum, çinko ve çelik gövde bileşenleri kullanılmaktadır [5]. Örnek vermek gerekirse, sağlık sektöründe paslanmaz çelik modeller tercih edilmektedir. Çelik ve alüminyum gövde kullanan cihazların tepki torkları, plastik gövdeli türlerine göre daha yüksek değerlere çıkartılabilmektedir. Plastik cihazların sahip olduğu en büyük avantajı ise çok düşük olan üretim maliyetleridir [6-10]. Ticari döner damperlerin sadece küçük bir kısmı ayarlanabilme özelliğine sahiptir. Tepki torkunu belirleyen parametrelerin ayarlanabilme özelliği, yüksek maliyetler ya da pahalı ürünler olarak son kullanıcıya yansımaktadır [11, 12]. Tepki torkları ayarlanabilen cihazların da büyük bir kısmı sınırlı dönme açısına sahip cihazlar olarak üretilmektedir. Sınırlı dönme açılı cihazlarda viskoz akışkanın geçtiği dar kanalın boyutları ayarlanarak tepki torku kontrol edilmektedir [13, 14]. Cihaz ağırlıkları ise 34 gr ile 1750 gr aralığında

değerler almaktadır [15, 16]. Atalet sönümleyici olarak kullanılan damperlerde ise yüksek viskoziteli bir akışkan olan silikon jel ya da ferro akışkan kullanılmıştır [17, 18]. Tepki torkunun, hızın bir fonksiyonu olduğu hatırlanırsa, bu cihazların düşük açısız hızlarda başarımlarının da istenilen seviyelere ulaşamayacağı görülmektedir.

2.2.1 Damper patentleri

Ticari ürünler, tasarım ve üretim süreçlerine ek olarak patentlenmesi gerçekleştirilen ürünlerdir. Ticari ürünlere ait araştırmanın derinleştirilmesi ve patentlenmemiş fikri mülkiyet tespiti amacı ile damper “damper, dashpot”, fren “brake” ve kavrama “clutch” anahtar kelimeleri kullanılarak patent araştırması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca patentlenmiş ürünlerin tespiti geliştirilen sönümleyicinin patentlenebilirliğinin tespiti için gerekmektedir. İlerleyen paragraflarda bu araştırma sonucu ön plana çıkan patentlerden bahsedilmiştir.

Rohs ve ark. [19] patentlerinde alın dişlilerinden oluşan bir gezegen dişli tipi sistemi ile kapalı devre bir pompa oluşturmuş ve sönümleme sisteminin sıvı akış kontrolünü sağlamıştır. Bu sistem piston motorlu araçların motorlarının çalışması sırasında meydana gelen titreşimleri ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilmiştir. Halkasal yağ sönümleyici düzeneği Chalaire ve ark. [20] tarafından silindirik bir gövdenin silindirik veya yörüngesel hareketlerini sönümlemek amacıyla geliştirilmiştir. Geliştirilen icat daha çok eksantrik hareket eden bir gövdenin bir pompa gibi davranarak çevresini saran yağı itmesi esasına dayanmaktadır. Kapalı hazne içerisinde bulunan viskoz yağ eksantrik hareket sonucu gövdeyi terk etmeye zorlanmakta ve sönümleme etkisi elde edilmektedir. Yağ bir haznede biriktirilmekte ve daha sonra tekrar gövde içerisine bir pompa yardımı ile pompalanmaktadır. Sönümleme etkisi akışkanın genişliği kontrol edilebilir dar bir kanaldan geçirilmesi yöntemi ile de elde edilebilmektedir. Sönümleme etkisi için dar kanal kullanılan patentlerdeki icatlar ise çok girişli dar kanal vanası, ayarlanabilir dar kanal tümleşkesi, ayarlanabilir dar kanal vanası, değişken dar kanal içeren elastik vana elemanı, ayarlanabilir dar kanal sızdırmazlık vanası ve elektromanyetik vana olarak isimlendirilmişlerdir. Dar kanallı sistemler genel olarak akışın seçici geçirilmesinde, engellenmesinde veya hızlandırılmasında kullanılmaktadırlar. Bu sistemler özellikle petrol ve gaz akışı kontrolünde kullanılmaktadırlar. Dar kanal kontrolü genellikle

sistemde bulunan bir rijit elemanın dairesel ve dönel hareketi sonucu oluşan kanal daralması veya genişlemesi ile gerçekleşmektedir.

Akışın elastik bir eleman üzerindeki etkisinin göz ardı edilebilecek bir seviyede olduğu uygulamalarda, dar kanalın kontrolü için elastik bir parça kullanılabilir. Woodson ve ark. [21] dar kanal üzerinde akış kontrolünü elastik elemanın boyutlarını kontrol ettikleri bir vida mekanizması ile sağlamıştır. Kanal kontrolü sürekli akış olan durumlar dışında akış olması muhtemel durumlarda sızdırmaklık sağlamak amacıyla da kullanılabilir. Özellikle tıbbi uygulamalarda sonda kullanımında, sondanın geçeceği kanalda sızdırmaklık elastik bir kontrol elemanının sondanın duvarlarını sararak sızdırmaklık sağlaması ile mümkün kılınmıştır [22]. Akışın kontrol edilebilmesi amacıyla elektromıknatıs ve doğal mıknatıs kullanılan patentte [23] dar kanalın genişliği aksel hareket edebilen doğal mıknatısın iki adet elektromıknatıs ile konum kontrolü yapılarak gerçekleştirilmiştir.

Butler ve Weise [24] buluşlarında, nispeten basit parçalardan oluşmuş, böylece imalatı basit ve ucuz olan gelişmiş bir döner sönümleyici sunmuşlardır. Sürekli döner sönümleme sağlayan bir başka patent [25] dairesel gövde birimi, bir dairesel statör birimi ve bir rotor birimi ihtiva etmektedir. Ticari ürünler geliştirilirken öncelikle düşük maliyetli ve imalatı kolay ürünler hedeflenmektedir. Ito ve Watanabe [26] istikrarlı ve hassas bir şekilde çalıştırılabilen yönsel özelliğe sahip bir döner sönümleyiciyi düşük maliyetle imal edilecek biçimde geliştirmişlerdir. Kaset kaydediciler, video kaydediciler ve kompakt disk oynatıcılar gibi elektrikli cihazlar, bir kayıt ortamının takılmasına izin vermek için bir açık-kapalı tip tutucu veya kapak ile donatılmıştır. Bu tip tutucular bir yay kuvveti ile açıldığında veya kapatıldığında, titreşim ve darbe içeren esnek bir hareket üretir. Titreşim ve darbe cihaz üzerinde olumsuz etkilere neden olacağından, cihazlar en az bir sönümleyici ile donatılırlar. Omata [27] ve Oshida [28] kaset kapakları ve kapılar gibi çeşitli kapatma aygıtlarının hem açılış hem de kapanış hareketlerini frenlemek için bir döner sönümleyici sunmuşlardır. Bünyesinde viskoz bir akışkan bulunduran benzer bir buluş [29], raf veya dişli sistemini sönümlemek amacı ile geliştirilmiştir. Isıl etkilere bağlı akışkan hacmindeki olumsuz değişimlerin bir elastik zar yardımı en aza indirildiği buluşlarında Aubry ve Deguise [30] bir mekanizmanın sabit kısmı ile hareketli kısmı arasında kurulan bir döner sönümleyici taşıt süspansiyon sistemleri için sunmuşlardır. Döner damper olarak isimlendirilmiş bazı patentler [31, 32] ve

ayarlanabilir döner damperlere ait yukarıda bahsedilen patentler genellikle bünyesinde viskoz akışkana ek olarak yay, esnek zar ve benzeri mekanik bileşenler bulunduran birden fazla döner disk içerebilen ve isimlendirilmesi kullanım tipine (damper, fren veya kavrama) göre yapılmış ticari ürünlere ait patentlerdir.

Tepki kuvveti veya torkunun şiddetinin kontrol edilebilmesi amacı ile mekanik sistem bileşenlerinin yerine daha etkili olan viskozitesi manyetik alan ile kontrol edilebilen manyetoreolojik akışkanları kullanan ilk araştırma [3] aynı zamanda MR akışkan ile çalışan cihazlara ait ilk bilgi kaynaklarından bir tanesini temsil etmektedir. Viskozitesi manyetik olarak kontrol edilebilen akışkan kullanılan 1950'li yıllara ait patentlerden ilki bağımsız olarak dönebilir iki ünite arasında, bir tahrik veya kuvvet bağlantısı kurmak için elektromanyetik olarak kontrol edilebilen ve aşınmayan tahrik bağlantısı sağlayan bir cihaza ait buluş olarak Rabinow [33] tarafından sunulmuştur. Döner eklem olarak tanımlanmış Razdowitz [34] tarafından özellikle radar ekipmanları için geliştirilen buluş manyetik kutuplar arasında kolon benzeri yapılar oluşturan bir akışkan içerisindeki tozları kullanarak çalışmaktadır. Benzer bir ürüne ait patent [35], torksal titreşim sönümlenmesi elde etmek için ince ferromanyetik parçacıkların süspansiyonunu içeren bir akışkan kullanmıştır. Winslow [36, 37] 1953 yılında viskoziteleri alan etkisi ile kontrol edilebilen akışkanların kullanıldığı akma modunda çalışan alan kontrollü hidrolik cihaz ve kesme modunda çalışan yüksek doğruluklu kayma kontrolü isimli iki adet patent almıştır. Manyetik alan etkisi altında viskoz özellikleri değişen akışkanların ortaya çıkması ile viskoziteleri değiştirilemeyen akışkan kullanılan cihazlar, viskoziteleri kontrol edilebilen ürünler olarak yeniden geliştiriciler tarafından seri bir biçimde geliştirilmişlerdir. Manyetik akışkan amortisörü [38], manyetik sıvı karışımlı debriyaj [39] ve manyetik akışkanlı sönümlenme cihazı [40] bu tür ürünlere örnek olarak gösterilebilirler.

Bünyesinde pozitif deplasmanlı pompa veya benzeri bir çalışma prensibi kullanan MRF damperlere ait patentler [41, 42] incelenildiğinde ise genellikle doğrusal damper ve türevleri ile karşılaşılmaktadır. Doğrusal sönümlenme yapmayan tasarımlarda ise sınırlı dönme [43] ve pompa ile elektro mıknatısın iki farklı sistem bileşeni olduğu [44, 45] çözümlere rastlanılmaktadır.

2.3 Akıllı Malzemeler, ERF ve MRF

Sönümlenme sistemlerinde çeşitli akıllı malzemeler kullanılmaktadır. Doğru malzemenin seçilmesi ile birlikte güç, boyut, ağırlık gibi başarımları belirleyen unsurlarda iyileştirmeler yapılabilmektedir.

Aktif sistemler, aktif bir eleman aracılığıyla kontrol kuvveti üretmektedir. Yüksek güç tüketen bu aktif elemanlar genellikle elektrohidrolik ve elektromekanik bir eleman barındırmaktadırlar. Aktif kontrol sistemlerinin başarımları yüksektir, fakat yüksek maliyet ve düşük güvenilirlik gibi dezavantajları bulunmaktadır. Yarı-aktif kontrol sistemleri sistemde bulunan enerjiyi kullandıkları için bu sistemlere ilave bir mekanik enerji verilmesine gerek kalmamaktadır. Yarı-aktif sistemler, kontrol edilebilen pasif eyleyicileri tanımlamaktadır. Yarı aktif sönümlenme sistemlerinde piezoelektrik, biçim bellekli alaşımlar, iyonik jeller, elektriksel etkin polimerler, ve akıllı sıvılar gibi akıllı malzemeler kullanılmaktadır [46]. Bu akıllı malzemelerin sağladığı pek çok avantajın yanında tercih edilmemelerine neden olacak olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Piezoelektrik malzemeler, mekanik gerilme altında elektriksel yük üreten ve bu davranışın tersini de sergileyenebilen bazı kristalize malzemelerden oluşmaktadır. Piezoelektrik malzemeler çok küçük yer değiştirmelerin olduğu sönümlenme uygulamalarında tercih edilmektedir. Piezoelektrik malzemelerin dezavantajlarının başında pahalı ve yüksek frekanslardaki akım gereksinimleri gelmektedir. Biçim bellekli alaşımlar, ısıtıldıklarında kalıcı gerinim değerlerini tekrar kazanabilen metal alaşımlardır. Sönümlenme uygulamalarında, görünüşte elastik davranarak uygulanan kuvvet altında östenit yapıdan martenzitik yapıya geçiş sergileyerek biçim değiştirirler. Tekrar eski biçimlerine gelmeleri için ısıtılarak martenzit yapının östenit yapıya dönüştürülmesi gerekmektedir. Biçim bellekli alaşımların dezavantajları arasında, ısı olarak kontrol edilme biçiminin yavaş olan soğuma hızına bağlı olması ve üretim sürecinin pahalı olması gelmektedir. Biçim bellekli alaşımlardakine benzer biçimde iyonik jellerde de ısı süreç bağımlı yavaş bir kontrol süreci bulunmaktadır. Elektriksel etkin polimerler ise düşük aktifleşme kuvveti, mekanik enerji yoğunluğu ve yavaşlık gibi tercih edilmeyen özelliklere sahip diğer bir akıllı malzemedir.

Pasif eyleyicilerden bazıları elektroeolojik (ER) akışkanlı, manyetoreolojik (MR) akışkanlı, sürtünme kontrollü ve çeşitli viskoz akışkanlı cihazlardır. Akıllı sıvılar

veya viskozitesi kontrol edilebilen akışkanlar ER akışkanlar (ERF) ve MR akışkanlar (MRF) olarak iki gruba ayrılmaktadırlar. Her iki akışkan, bünyelerindeki katı parçacıkların sütun biçimli yapı oluşturması sonucu akışa karşı direnç göstermekte veya başka bir ifade ile viskozitelerini değiştirebilmektedirler. Viskozite kontrolü için gerilim alanı oluşturulması gereken ER akışkanlar kapsamlı olarak araştırılmıştır. Dezavantajları arasında kirletici madde olarak tanımlanan akışkan saflığını bozan madde hassasiyetleri, çok yüksek çalışma gerilimi gereksinimleri ve düşük kesme gerilmesi değerleri gelmektedir. MR akışkanlar manyetik alan altında viskozitelerini değiştirebilen, kirleticilerden daha az etkilenen, sıcaklık değişimlerine karşı daha az duyarlı akışkan sınıflarıdır. MR akışkanlar daha yüksek kesme dayanımı sergiledikleri ve tasarım gereksinimleri daha az olduğu için ER akışkanlara oranla daha fazla tercih edilmektedirler.

MRF, bünyesinde mikron seviyesinde ferromanyetik parçacıklar, bu parçacıkların içerisinde yüzdüğü taşıyıcı sıvı ve parçacıklar arası etkileşimleri güçlendirmek ve çökmeyi engellemek için eklenmiş katkı maddeleri bulunduran bir akışkandır. Manyetik alan uygulandığında akışkan içerisindeki ferromanyetik parçacıklar mikro miktatıslar gibi davranarak birbirlerini çekerek manyetik alan vektörleri (N'den S'ye) boyunca dizilirler. Bu davranış ile birlikte MRF Bingham akışkanı olarak tanımlanan daha viskoz bir biçim alır. Bu kuvvetli, hızlı ve ters çevrilebilir etki 1940'lı yılların sonlarında ilk olarak Rabinow tarafından tespit edilmiştir [3]. MR akışkanların en umut veren kullanım alanları uyarlamalı titreşim sönümlenme uygulamaları olmaktadır [4]. Günümüzde MR akışkan olarak tanımlanan sıvıların içerisinde asılı olarak mikron boyutunda demir parçacıkları yüzmektedir.

MR etki manyetik alanın özelliklerinin değiştirilmesi ile hızlı bir şekilde ters çevrilebilmektedir. MR akışkanların reolojik özelliklerinin ER akışkanlardan daha üstün olması sebebi ile 20-50 kat seviyelerinde akma gerilmesi artışı elde edilebilmektedir. MRF cihazlardaki güç tüketimi ve voltaj değerleri, ERF cihazlar ile karşılaştırıldığında güç tüketiminin 50 W ve voltaj değerlerinin 12-24 V arasında değişmesi MRF cihazları çok daha cazip kılmaktadır [47].

MR akışkanına ait literatür incelendiğinde, büyük oranda Lord Firması [1] tarafından gerçekleştirilen araştırmalar ile karşılaşılmaktadır. Lord firması haricinde özellikle otomotiv sektörünün gelişmiş olduğu Japonya, Almanya ve bu alanda çalışmaları olan akademisyenlerin bulunduğu ülkelerin üniversiteleri MRF konusunda

çalışmalarda bulunmaktadır. İncelenen bildiri ve makalelerin büyük kısmında finansal kaynak alındığı tespit edilmiştir.

Akışkan elde edilirken taşıyıcı sıvı olarak mineral yağı, sentetik yağ, glikol veya su kullanılmaktadır. En yüksek MR etkinin elde edilebilmesi için taşıyıcı sıvının viskozitesinin düşük ve ısıdan en az şekilde etkilenmesi gerekmektedir. Yer çekiminin etkisi ile ferromanyetik taneciklerin dibe çökmemesi, kayganlıklarının korunması ve aşınmalarını engelleyici katkı maddeleri de taşıyıcı sıvıya ek olarak MR akışkanına eklenmektedir.

Literatürde MRF ve bileşenleri her ne kadar sade bir biçimde ifade edilsede özellikle bu bileşenlerden katkı maddeleri ile ilgili yoğun bilimsel çalışmalar devam etmektedir.

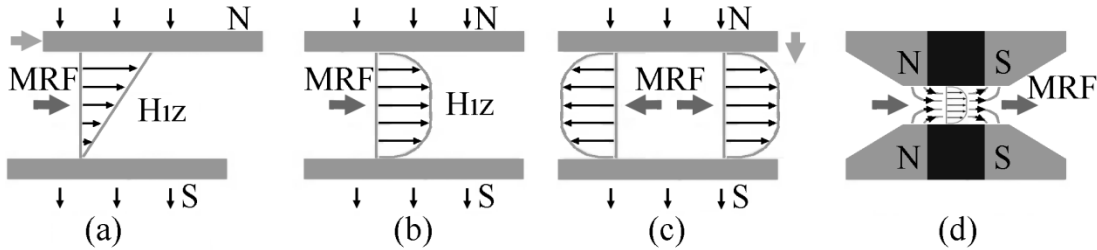
Katkı maddeleri, kararlaştırıcılar ve yüzey aktif maddelerinden oluşmaktadır. Kararlaştırıcılar, parçacıkların akışkan içerisinde asılı kalmasını ve dibe çökmesini engellemektedir. Yüzey aktif maddeler ise akışkan içerisindeki toz parçacıklarının yüzeylerini sararak manyetik alan oluşması sırasındaki kutuplaşmayı kuvvetlendirmektedir [48]. Ahn ve ark. parçacıkların ağırlık oranı %80 olan ve viskozitesi 4.0 mPa.s olan sentetik kayganlaştırıcı PAO (Para Alpha Olefin) taşıyıcı yağı içeren MRF sıvısı kullanarak sönümlenme aparatı geliştirmişlerdir [49]. Katkı maddelerinin kullanılmasındaki amaç, akışkan viskozitesini kontrol etmek, metal parçacıklar arasındaki sürtünmeyi sağlamak ve uzun süreli kullanıma bağlı sıvının kalınlaşmasını azaltarak sıvı ömrünü arttırmak olarak ifade edilmektedir. Çoğunlukla kullanılan katkı maddeleri Ferrous Oleate ve Lithium Stearate'dır [50].

Manyetik alan altında 10 mikrometre boyutlarındaki demir tozu, carbonil demir veya demir kobalt alaşım tanecikleri zincirimsi bir dizilime giderek sütun biçiminde yapılar oluşturmaktadırlar. MR akışkanda taşıyıcı akışkan, ferromanyetik tanecikler ve katkı maddeleri arasında bir denge sağlanarak en iyileme yapılabilmektedir [51]. Birkaç milisaniye içerisinde oluşan yapılar, manyetik alan çizgileri boyunca dizilerek hem akışı engellemekte hem de harekete direnç sergilemektedirler. Aynı yapılar manyetik alanın kaldırılması ile aynı hızda dağılmaktadırlar. Manyetik alan elektronik olarak kontrol edildiği için cihazlar çok hızlı bir biçimde aktif ve pasif durum arasında geçiş yapabilmektedirler.

Manyetoreolojik akışkanların sahip olduğu kesme dayanımı değeri, içerisinde kullanılan ferromanyetik malzemenin mıknatıslanabilirliği ile doğru orantılıdır. Fakat yüksek mıknatıslanabilirliği olan malzemeler pahalı olduklarından genellikle MR akışkanlarda mikron boyutlu demir parçacıkları kullanılmaktadır [52].

2.4 MRF Cihazlar

MRF ile çalışan cihazlar genellikle çalışma modlarına göre sınıflandırılmaktadırlar [50]. MRF cihazlarını çalışma modları, Direk kesme modu, Vana veya akış modu, Sıkıştırma modu, Paralel kıştırma modu olarak tanımlanmıştır. MRF cihazlar ise MRF Fren, MRF Sönümleyici, MRF Kavrama olarak literatürde yer almaktadır. Bu modlara ait şematik gösterim Şekil 2.1’de verilmiştir. MR akışkanının kullanım bulunduğu yerler ise otomotiv kavramaları, egzersiz cihazları için frenler, optik sistemler için parlatma sıvıları, koltuk sönümleyicileri, takma (protez) bacak sönümleyicileri, eyleyici sistemler, darbe emiciler olarak dikkat çekmektedir. Ayrıca motor bağlantıları, deprem sönümleyicileri ve MR elastomer sönümleyiciler ile ilgili akademik çalışmalara da rastlanmıştır.



Şekil 2.1 : MRF cihazların çalışma modları, (a) Kesme modu, (b) Akış modu, (c) Sıkıştırma modu, ve (d) Kıştırma modu.

Akış modunda, akışkan bir kanal içerisinde akmaya zorlanmakta ve akışkanın kesme dayanımı bu kanal içerisinde akışa dik manyetik alan oluşturularak kontrol edilmektedir. Akış modunda çalıştırılan cihazlar genel olarak doğrusal olarak hareket eden sönümleyici ve şok emicilerden oluşmaktadır. Kesme modunda akışkan birbirlerine göre göreceli hareket eden iki plaka arasında biçim değiştirmeye zorlanmaktadır. Sıkıştırma modunda manyetik alan çizgileri yönünde oluşan kolon yapılar basınç altında biçim değiştirmeye zorlanmaktadır. Son çalışma modu olan kıştırma da ise manyetik alan çizgileri boyunca dizilen parçacıkların birikmesi ile oluşan zincirimsi yapılar akış kanalının boyutlarını değiştirmekte diğer bir ifade ile

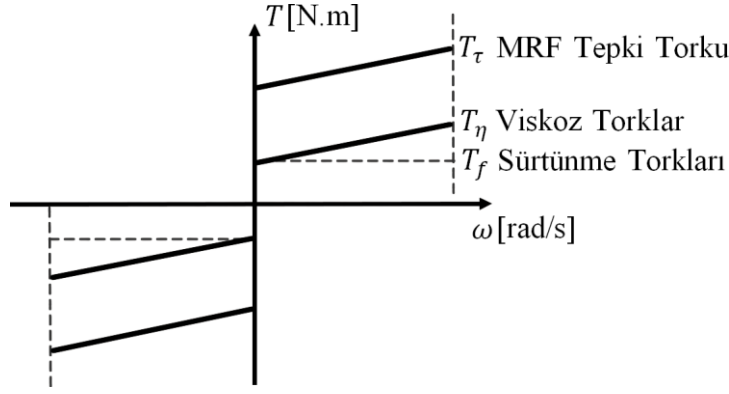
kanalı kısırmaktadır. Kısırtma modu en az araştırılmış çalışma modudur [53]. Bütün çalışma modları akış modunda da bahsedildiği gibi manyetik alan oluşturan kutupların arasında kalan akışkanın kesme dayanımı özelliklerinin değişmesi prensibine dayanarak çalışmaktadır. Manyetik alan şiddetinin artırılması ile MR akışkanın kesme dayanımı buna bağlı olarak da pasif sönümleyicinin verdiği tepki kuvveti veya torku arttırılmaktadır.

Manyetik alan şiddetinin kontrolü için sönümleyicinin hareketli parçaları ile bütünleşmiş bir manyetik devre tasarlanması gerekmektedir. Manyetik devre tasarlanırken doyma noktası ve manyetik geçirimsizliği yüksek malzemeler kullanılmaktadır. Düşük karbonlu çelikler bu tanımlamaya uymakta ve manyetik akıyı akışkanın üzerine yönlendirebilmektedir. Manyetik devre tasarlanırken manyetik akının geçtiği kısımlardaki kayıplar en aza indirilmeye ve akışkanın üzerinden en fazla akı geçirilmeye çalışılmaktadır.

Manyetik devre tasarımında da önemli olan ve cihaz tasarımında ön plana çıkan diğer bir kritik belirleyici geometrik parametrelerin doğru seçilmesidir. Geometrik parametrelerin doğru seçilmesi ile cihazdan elde edilebilecek verim en iyilenmekte, diğer bir ifade ile dinamik aralık olarak tanımlanan kontrol edilebilir kuvvetin, kontrol edilemeyen kuvvete oranı en yüksek değerine getirilmektedir [54]. Dinamik aralık döner damperler için torklar oranı şeklinde de yazılabilir.

$$D = \frac{T_\tau}{T_u} = \frac{T_\tau}{T_f + T_\eta} \quad (2.1)$$

Döner damperler için yazılmış olan Eşitlik (2.1)'de T_τ manyetik alan etkisi ile kontrol edilebilen tepki torkunu, $T_f + T_\eta$ toplamı ise sürtünme ve viskoz etkilerden dolayı oluşan ve T_u ile tanımlanmış kontrol edilemeyen tepki torkunu temsil etmektedir. Kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen tepki torkunun hıza bağlı grafiği Şekil 2.2'de verilmiştir. Dinamik aralığın arttırılabilmesi için sürtünme ve viskoz bileşenlerden kaynaklanan tepkilerin en aza indirilirken, manyetik alan etkisi ile elde edilen tepkinin arttırılması gerekmektedir.



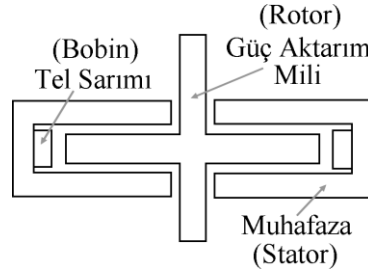
Şekil 2.2 : Bir döner MRF cihazdaki açısal hıza bağlı tepki torkları.

Sistem bileşenlerinin en iyi çalışma değerlerine getirilebilmesi için, tüm bileşenlerden oluşan etkinin incelenilmesi gerektiği görülmektedir. Manyetik devre tasarlanırken kullanılan geometrik parametreler aynı zamanda tepki kuvvetleri veya torklarının hesaplanmasında da kullanılmaktadır. En iyileme yapılabilmesi için manyetik devre ve pasif cihazın verdiği tepkilerin birlikte hesaplanması gerekmektedir.

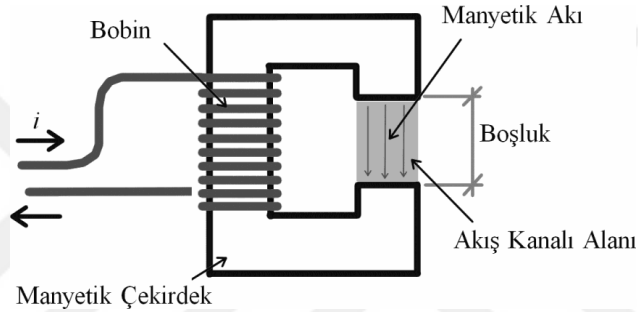
Tepki torku MR akışkanın manyetik alan ile kontrol edilen kesme dayanım değerinden elde edilmektedir. Lord firmasının [1] en yaygın kullanılan MR akışkanlarından olan MRF 132-DG için manyetik akı yoğunluğu 200 kA/m olması durumunda 45 kPa değerleri elde edilebilmektedir [51, 55]. MRF cihazların tepki torklarının hesaplanmasında viskoplastik akışkanların modellerinden faydalanılmaktadır. Bu modeller arasında en çok Bingham viskoplastik modeli, Herschel-Bulkley akışkan modeli, ve Casson akışkan modeli kullanılmaktadır [56]. Bingham modeli düşük kesme hızlarında cihazların tepki kuvvetlerini küçük hata oranları ile verebilmektedir. Yüksek kesme hızlarında gözlemlenen kayma incelmeleri veya kayma kalınlaşması gibi akışkana özel mekanik davranışların etkilerinin de hesaplamalara dahil edilebilmesi için Herschel-Bulkley, Casson akışkan modeli gibi modellerin kullanılması gerekmektedir.

Vana ya da akış modunda çalışan cihazlarda manyetoreolojik akışkan birbirine paralel iki plaka arasında manyetik alana dik olarak akmaya zorlanmaktadır. Plakalar ferromanyetik malzemelerden üretildiklerinden ayrıca manyetik alanın kutuplarını da temsil etmektedirler. Manyetik alan ile birlikte oluşan zincirimsi ferromanyetik parçacık kolonları bu iki plaka arasındaki boşluğu doldurmaktadır. Akış modunda çalışan cihazlardaki basınç düşüşünün bu kolonların akışı engellemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [51]. Şekil 2.3'de MRF cihazların genel metalik

bileşenleri olan tel sarımı, muhafaza ve güç aktarım mili gösterilmiştir. Genellikle bobinin bulunduğu kısım stator olarak kabul görmektedir. Akış modunda çalışan bir cihaza ait akış kanalı, manyetik alan yönü ve akış yönüne ait şematik gösterim Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.3 : Döner MRF cihazların genel metalik bileşenleri.

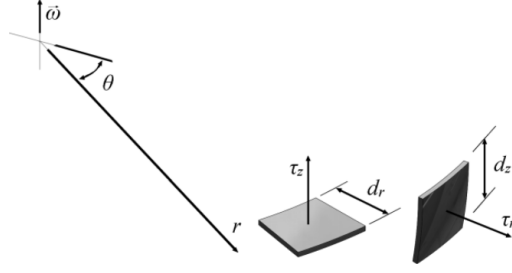


Şekil 2.4 : Elektro mıknatıs, akış kanalı ve oluşan manyetik akının şematik gösterimi.

Kesme modunda oluşan tepki torku, plaka yüzeylerindeki akma gerilmelerine bağlı oluşmaktadır. Bu modda çalışan fren, kavrama ve sönümleyiciler, genellikle birbirine göre hareket eden en az iki yüzeyden oluşan silindirik veya disk geometrisine sahip cihazlardır. Manyetik alan yokken Newtonyen akışkan gibi davranan MRF, manyetik alan etkisiyle akma dayanımı elektronik olarak kontrol edilebilen Bingham plastiği gibi davranmaya başlamaktadır. Elde edilen tepki torku dinamik akma dayanımı ve akışkan viskozitesine bağlı değişmektedir [55]. Düşük kesme hızlarında MRF basit ve etkili olan Bingham plastik modeli kullanılarak modellenenilmektedir. Bu modele ait eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$\tau = \begin{cases} \tau_{yield}(H) + \eta \frac{r\omega}{h} & \tau > \tau_y \\ 0 & \tau \leq \tau_y \end{cases} \quad (2.2)$$

Eşitlikte, τ kesme dayanımını, $\tau_{yield}(H)$ dinamik akma dayanımını, η akışkan viskozitesini, r radyal uzaklığı, ω açısal hızı, ve h akışkan açıklığını temsil etmektedir.



Şekil 2.5 : Kesme modunda çalışan cihazlardaki sonsuz küçük alan elemanları.

Kesme modunda çalışan MRF cihazlarda açığa çıkan tepki torku, Şekil 2.5’de gösterilen sonsuz küçük alan elemanları kullanılarak hesaplanmaktadır. Yüzeyler arasında kalan MR akışkanının kesme zorlanması sonucu açığa çıkan akma streslerine bağlı oluşan sonsuz küçük tepki torku aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$dT = 2r\tau_z r d\theta dr + r\tau_r r d\theta dz \quad (2.3)$$

Disk tipi cihazlarda disk geometrisinden dolayı cihazın sahip olduğu ince kenardaki tepki torku, kenarın ince olması nedeni ile çoğu zaman göz ardı edilmektedir. Bu nedenden dolayı aksel yüzey boyunca kesme gerilmesi integrallenecek tepki torku hesaplanmaktadır.

$$T = 2\pi \int_{r_i}^{r_o} 2\tau_z r^2 dr \quad (2.4)$$

Eşitlik (2.4)’de T tepki torkunu, r_i ve r_o sırasıyla aksel yüzeyin iç ve dış yarıçap değerlerini temsil etmektedir. Bingham plastik modeline ait eşitlik yukarıdaki eşitlikte yerine yazılırsa, tepki torku aşağıdaki biçimi almaktadır.

$$T = \frac{4\pi}{3} \tau_y(H)(r_o^3 - r_i^3) + \frac{\pi\eta\omega}{h} (r_o^4 - r_i^4) \quad (2.5)$$

Eşitlik (2.5)’de ilk ifade manyetik alan etkisi altındaki tepkiyi diğer bir ifade ile MR etkiyi temsil etmektedir. İkinci ifade akışkanın viskozitesine bağlı oluşan tepki torkunu temsil etmektedir. MRF cihazın düşük hızlarda çalıştığı kabulü yapılırsa, ikinci ifade de göz ardı edilebilecek düşük değerler seviyesine gelecektir.

Kampana tipi MRF cihazlarda, silindirik geometri dolayısı ile Eşitlik (2.3)’deki ilk ifade göz ardı edilmektedir. Bundan dolayı radyal yüzey boyunca kesme dayanımının integrali alınarak tepki torku aşağıdaki biçimde elde edilmektedir.

$$T = 2\pi \int_0^h \tau_z r^2 dz \quad (2.6)$$

Eşitlik (2.6)'da T kampana tipi cihazlardaki tepki torkunu, r_i ve r_o sırasıyla radyal yüzeylere ait iç ve dış yarıçap değerlerini temsil etmektedir. Bingham plastik modeli eşitlikte yerine yazılarak tepki torku ifadesi aşağıdaki biçimde elde edilmektedir.

$$T = r(2\pi r)h\tau_y(H) + r \frac{2\pi r^2 \eta \omega}{t} h \quad (2.7)$$

Benzer biçimde ikinci ifade olarak eşitlikte yer alan viskoz bileşene ait etki cihazın düşük hızlarda çalıştırıldığı düşünülürse göz ardı edilebilmektedir.

Akış modunda çalışan cihazlarda basınç düşümü, viskoz bileşen ΔP_{mrbR} ve manyetik alan bağımlı ΔP_{mrbMRF} bileşenlerden oluşmaktadır. Toplam tepki kuvveti ise sürtünme, viskoz ve manyetik etkilerin toplanması ile elde edilmektedir. Toplam tepki kuvvetinin elde edilmesinde kullanılan yaklaşık ifadeye ait eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$F_{mrb} = F_{mrbF} + A_{mrbFA} \Delta P_{mrbR} + A_{mrbFA} \Delta P_{mrbMRF} \quad (2.8)$$

Yukarıdaki eşitlikte toplam sürtünmeye ait kuvvet F_{mrbF} , ve akış kanalı alanı ise A_{mrbFA} olarak tanımlanmıştır. Saf viskoz etkiyi temsil eden bileşene (ΔP_{mrbR}) ve manyetik alan bağımlı bileşene (ΔP_{mrbMRF}) ait eşitlikler [55, 57-61] aşağıda verilmiştir.

$$\Delta P_{mrbR} = \frac{12\eta QL}{t_{mrb} h_{mrb}^3} \quad (2.9)$$

$$\Delta P_{mrbMRF} = \frac{3\tau_{yield}(H)L}{h_{mrb}} \quad (2.10)$$

$$A_{mrbFA} = t_{mrb} h_{mrb} \quad (2.11)$$

Yukarıdaki eşitliklerde η akışkanın viskozitesini, Q basınç düşümüne bağlı oluşan akış debisini, t_{mrb} plakaların genişliğini ve h_{mrb} plakalar arasındaki boşluğu temsil etmektedir. Akış kanalı alanı A_{mrbFA} olarak tanımlanan ifadenin t_{mrb} ve h_{mrb} değerlerinin çarpımı olduğu ilgili eşitliklerden anlaşılmaktadır. Akma dayanımını

temsil eden τ_{yield} 'in ise manyetik alan şiddetine bağlıdır. Akış kanalı boyu L , akışın gerçekleştiği kanalın uzunluğunu temsil etmektedir.

Akış modunda çalışan bir cihazın akış kanalı ölçülerinin radyal uzaklık değerine oranının küçük olduğu durumlarda, cihazın tepki torku için doğrusal bir cihaza ait ifade kullanılabilir. Bu durumda tepki torku ifadesi Eşitlik (2.8) kullanılarak aşağıdaki Eşitlik (2.12) ile ifade edilebilir.

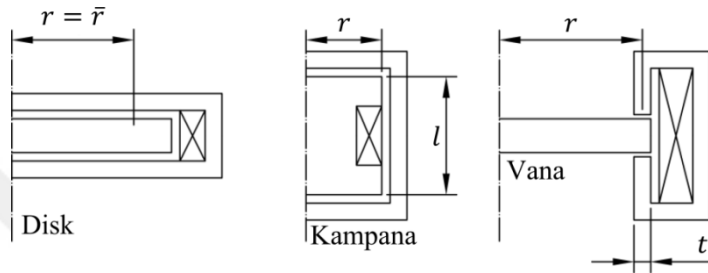
$$T = r\Delta P_{viscous}A_{MRF} + r\Delta P_{MRF}A_{MRF} \quad (2.12)$$

Yukarıdaki eşitlikte toplam basınç düşümü ifadeleri MR akışkanının aktığı kanalın kesit alanı A_{MRF} ve merkeze olan uzaklık değeri radyal uzaklık r ile çarpılarak tepki torkuna dönüştürülmüştür. Düşük hızlarda kesme modunda çalışan cihazlarda olduğu gibi viskoz bileşen hesaplamalarda göz ardı edilebilecek kadar küçük değerler almaktadır.

Akış modunda çalışan döner MRF cihazlara ait tepki torkunun, disk, ve kampana tipi cihazlara ait tepki torkları ile karşılaştırılabilmesi için bazı kabuller yapılmıştır [58]. Çizelge 2.1'de MR etkiye bağlı oluşan tepki torklarının çalışma moduna bağlı değişimine ait çizelge verilmiştir. Tepki torku eşitliklerindeki (Eşitlik (2.8), Eşitlik (2.10), ve Eşitlik (2.11)) ortak ifadeler korunarak, disk tipi cihaza ait tepki torku ifadesindeki iç yarıçap değeri sıfır olarak kabul edilmiştir. Disk tipi cihazlarda dış ve iç yarıçap arasındaki yüksek oran ve manyetik alan etkin bölge dikkate alındığında yapılan bu yaklaşımın kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir. Bu kabulden oluşacak hatanın ortadan kaldırılması amacı ile dış yarıçap ifadesi rakamsal değer olarak dış çap değerine yakın bir ortalama yarıçap ifadesi ile değiştirilmiştir. Benzer biçimde vana tipi cihazın da akış kanalı uzunluğu tam bir daire olarak tanımlanmıştır. Bu tanımın geçerli olacağı durumlar sadece iticinin boyutlarının akış kanalı uzunluğuna göre çok küçük olduğu durumlar olduğu unutulmamalıdır. Şekil 2.6'da MR etkiye bağlı oluşan tepki torklarının cihaz tipi ve ilgili kabullere göre şematik gösterimi verilmiştir.

Çizelge 2.1 : MR etkiye bağlı oluşan tepki torklarının çalışma moduna bağlı değişimi.

Cihaz Tipi	Kabuller	MR etki ile oluşan tepki torku
Disk	$r = \bar{r}$	$\frac{2}{3}r[2\pi\tau_y(H)r^2]$
Kampana	-	$l[2\pi\tau_y(H)r^2]$
Vana	$\theta_1 = \theta_2 = 2\pi$ $A_{MRF} = ht$	$3t[2\pi\tau_y(H)r^2]$



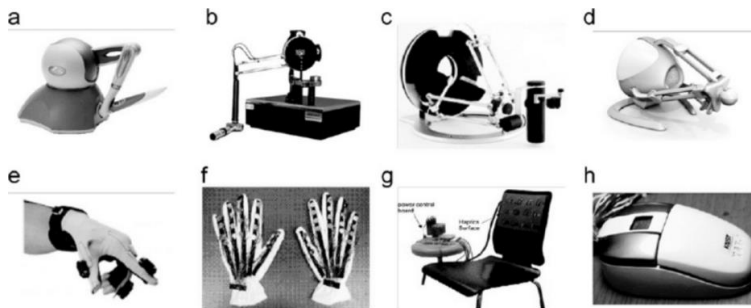
Şekil 2.6 : MR etkiye bağlı oluşan tepki torklarının cihaz tipi ve ilgili kabullere göre şematik gösterimi.

MRF cihazların sadece 4 adet çalışma modu olmasına rağmen çok sayıda özgün cihaz tasarımı bulunmaktadır. Burgess ve ark. [62] tarafından uzay araçlarının boyut ve ağırlık sınırlamaları göz önüne alınarak, bu araçlarda kullanılacak şekilde hafif ve küçültülmüş bir tasarım sunulmuştur. Bu tasarımda çevrimsel yüklemdeki malzeme sönümlemesi prensibi ile enerji dağılımı gerçekleştirilmektedir. Çok katmanlı ve dört akış aralığı bulunan bir silindirik MRF fren Rossa ve ark. [63] tarafından özgün tasarım olarak önerilmiştir. İlginçtir, bu tasarıma inceleme makalelerinin sadece küçük bir kısmında değinilmiştir. Pek çok araştırmacı, araştırmalarında MRF cihazların bobinlerinin başarımına odaklanmışlardır. Buna mukabil, tel sarımlarının konumları da önemli bir araştırma konusudur. İnceleme makalelerinde de nadiren bahsedilen bu tasarım yaklaşımı ile tel sarımlarının MRF cihazı içerisindeki konumlarının ayarlanması ile pek çok iyileştirme yapılabilmektedir. Nguyen ve ark. [64] yaptıkları araştırmada genellikle merkeze uzak olarak konumlandırılan bobinleri disklerin orta noktasına gelecek şekilde yerleştirmesini araştırmışlardır. Tel sarımlarının merkeze daha yakın konumlandırılması daha az bakır kullanılmasına ve buna bağlı olarak cihazın hafiflemesini sağlamıştır. Avraam ve ark. [65] kas rehabilitasyonu alanında kullanılmak üzere, T-şekilli bir rotoru olan ve MR akışkanı ile çalışan bir fren tasarlamış ve bu çoklu tel sarımı içeren cihaz için kas

rehabilitasyonu cihazı olarak değerlendirme sürecini gerçekleştirmişlerdir. Beklentiler göz önüne alındığında, sisteme kolaylıkla bütünleşmiş (entegre) edilebilen birden çok fonksiyonu yerine getirebilecek küçük cihazlar rakiplerine göre daha çok tercih edilecektir. Guo ve ark. [66] tarafından geliştirilen çok fonksiyonlu döner eyleyici bu amaçla tasarlanmıştır. Bu araştırma MRF ile çalışan cihazların aynı anda sönümleyici, kavrama ve fren olarak kullanılabilmesini de ayrıca göstermiştir. Şu ana kadar bahsedilen özgün cihazlarda manyetik alan elde etmek için doğal mıknatıslar yerine tel sarımı veya sarımları kullanılmıştır. Doğal mıknatıs kullanan cihazlara nadiren rastlanılmaktadır. Bu cihazlar arasında da özgün bir tasarıma rastlamak doğal olarak daha zor olmaktadır. Bucchi ve ark. [67] MRF ile çalışan cihazlarında doğal mıknatıs kullanarak daha küçük boyutta ve güç tüketiminde eksenel yük olmaksızın arızada güvenli işletim elde etmişlerdir.

2.4.1 Haptik MRF cihazlar

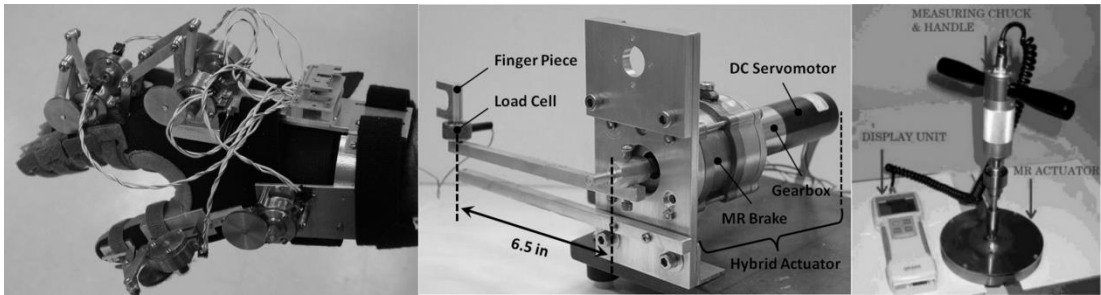
Haptik (dokunma bilimi), eski Yunancaya ait bir fiil olan haptesthai'dan türetilmiş bir kelimedir. Dokunma bilimi kısaca dokunma hissi ile ilgili olan konuları incelemektedir. Objelerin buldukları ortam ile etkileşim içerisinde veya tek başlarına el ile hareket ettirilmesi de dokunma biliminin çalışma alanına girmektedir. Dokunsal arayüzler genellikle mekanik çevirgeçlerden “transducer” imal edilmektedir. Bu arayüzlerden obje veya çevre ile olan etkileşimlerden açığa çıkan kuvvetlerin kullanıcıya geri beslenilmesi beklenilmektedir. Özet olarak, haptik arayüzler kullanılarak, sanal veya gerçek fiziksel sistemlere ait kuvvet veya torklar büyük bir doğrulukla taklit edilebilmektedirler. Bazı haptik arayüzlere ait fotoğraflar Resim 2.1’de verilmiştir.



Resim 2.1 Haptik cihaz resimleri (a–d) devinduyumsal cihazlar, ve (e–h) dokunsal cihazlar. (a) PHANToM Omni, (b) PHANToM Premium, (c) Omega.7, (d) Falcon, (e) CyberTouch, (f) Tactile Gloves, (g) Tactile Surface Display and (h) Texture Display Mouse [68].

Çevirgeç olarak aktif cihaz kullanılması durumunda genellikle elektrik motorları tahsis edilmektedir. Bu tip çevirgeçlerin tercih edilmesindeki en önde gelen sebepler arasında kolay tedarik ve kontrol edilebilirlik bulunmaktadır. Çarpışmaların veya rijit temasların modellenebilmesi için büyük elektrik motorlarına ve dişli kutularına gerek duyulmaktadır. Diğer bir taraftan ise büyük motor ve dişli kutularının sisteme dahil edilmesi ile sistemin ağırlığı ve boyutları da artmaktadır. Daha da fazlası sürtünme ve atalet nedeni ile sanal veya uzak ortamın gerçek ortamdan ayırt edilemez gibi hissedilmesi (sistemin şeffaflığı) bundan büyük oranda olumsuz etkilenmektedir.

Uzaktan ameliyat ve benzeri uygulamalarda genişletilmiş kavrama aralığı aranan bir niteliktir. İnsan işaret parmağı en fazla 50 N seviyesinde bir baskı kuvveti uygulayabilmektedir. Normal şartlarda işaret parmağı ile parmağın sezişini olumsuz etkilemeden 7 N seviyelerinde baskı kuvveti uygulanabilmektedir. Baskı kuvveti değeri orta parmak için 6 N, ve yüzük parmağı için 4,5 N olarak verilmektedir [69]. Parmakların kavrama sırasında ürettikleri baskı kuvvetleri göz önüne alınınca, MRF cihazların ürettikleri kuvvetlerin beklenenden çok fazla olduğu görülmektedir. Maalesef aynı durum bu cihazların sistemde kullanımına bağlı açığa çıkan düşük kuvvetler için geçerli değildir [58]. Örneğin insan parmağı 0,2 N değerinden küçük kuvvetleri hissedememektedir [69]. Moment kolu 60 mm olan bir döner MRF cihazın kapalı durumda 12 mN.m'den fazla tepki torku vermesi durumunda operatör şeffaflığı olumsuz etkileyen bu kuvveti hissedecektir. Bazı haptik MRF cihazlara ait fotoğraflar Resim 2.2'de verilmiştir.



Resim 2.2 Haptik MRF cihaz resimleri, sol baştan sırası ile haptik eldiven [70], haptik makas [71], ve haptik fren [72].

MRF cihazların en büyük avantajı kontrolleri için çok düşük güce gereksinim duymalarıdır. Bu cihazlar, sönümleme, frenleme ve güç aktarım elemanı olarak güç aktarma organlarında da kullanılabilirler. Bu nedenden dolayı gerçekleştirilen çalışmaların büyük kısmı büyük ölçekli sönümleyici ve frenler üzerine yoğunlaşmıştır. Haptik arayüzler büyük oranda kuvvet geri-beslemeli uzaktan

kontrol ve sanal eğitim sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu arayüzlerde özellikle küçük, hafif, düşük sürtünme sergileyen ve yüksek kuvvet kapasitesine sahip eyleyiciler tercih edilmektedir. MRF cihazlar bu beklentileri karşılayabilecek potansiyele sahip olmalarına rağmen günümüze kadar yapılan araştırmaların büyük kısmında büyük ölçekli MRF fren ve sönümleyicilerin araştırılmasına öncelik verilmiş ve bu çalışmalarda tepki torkunun arttırılması ön planda tutulmuştur. Ticari MRF cihazları ile 2 kN seviyelerinde tepki kuvvetleri elde edilebilmektedir. Bu ticari ürünler genellikle çok ağır ya da dokunsal arayüz uygulamaları için boyutsal sınırın dışında kalmaktadırlar. Bu bilgiler ışığında hafif ve küçük bir MRF cihaz geliştirilmesinin ilgi çekici bir araştırma konusu olduğu görülmektedir. Şu ana kadar geliştirilen pek çok MRF cihaz güç tüketimi, boyut ve sağlayabildikleri en yüksek tepki kuvvetleri cinsinden değerlendirilmişlerdir. MRF cihazlara ait tasarımlar incelenildiğinde ne yazık ki, şeffaklık ve sıfır-alan “zero-field” tepki kuvvetini temsil eden değerler ya nadiren raporlanmış ya da bu değerlere hiç değinilmemiştir. Her zaman küçük, hafif ve ucuz eyleyiciler için talep olacaktır. Örnek olarak [70] istenilmeyen titreşimleri, yavaş tepki süreleri, ve statik sürtünme değerleri nedeni ile sürtünme frenlerinin yerini MRF frenler almıştır.

Yeni yapılan araştırmalarda medikal takmalara (protezlere) ve haptik uygulamalara önem verilmeye başlanmıştır. Bu çalışmalarda cihazların küçültülmesi ve tork hacim oranının arttırılması hedeflenilmiştir. [73-76]. Shafer ve ark. [77] tarafından insan dostu robotik sistemlerin servo kontrol uygulamalarında kullanılmak üzere bir ilk örnek (prototip) MRF kavrama geliştirip test etmişlerdir. Geliştirilen bu kavrama endüstriyel alanda kullanılan düşük ve orta tork beklentisi olan sistemler için geliştirilmiştir. Çalışmanın asıl amacı konvansiyonel servo motorlu sistemlerde mevcut olmayan güvenli eyleyici hareketin sisteme kazandırılmasıdır. Bu güvenli eyleyici hareketi özellikle insanların sistem ile etkileşimi sırasında büyük önem arz etmektedir. Blake ve ark. [70] tarafından 84 g ağırlığında, 25 mm çapında ve 899 mN.m tepki torku üretebilen haptik arayüzlerde kullanılmak üzere kompakt bir MRF fren geliştirilmiştir. Kıvrımlı akı yolu oluşturularak elde edilen bu kompakt tasarım kuvvet geri beslemeli eldiven üretmek için kullanılmıştır. Haptik eldivenin ağırlığı 6 adet pasif eyleyici kullanılması nedeni ile 640 gr olarak ölçülmüştür. Doğrusal bir MRF sönümleyici yaklaşımı Topcu ve ark. tarafından [53] haptik parmak kavrama uygulamalarında kullanılmak üzere sunulmuştur. Yapılan farklı çalışmalarda ayrıca

156 mm çapında, 21 mm boyunda, 4,5 N.m tepki torku verebilen ve 2786 gr kütleli bir haptik cihaz [72], 120 mm çapında, 38 mm boyunda, 4,24 N.m tepki torku verebilen, 1400 gr kütleli bir döner MRF eyleyici [78], 92,2 mm çapında, 36,6 mm boyunda, 5,6 N.m tepki torku verebilen, 1410 gr kütleli bir MRF fren [79], ve 52 mm çapında, 32 mm boyunda, 6 N.m tepki torku verebilen, 237 gr kütleli bir MRF kavrama [75] gibi pasif eyleyiciler de geliştirilmiştir. Özet olarak pasif eyleyici olan MRF cihazlar haptik arayüzler için beklentileri karşılayabilecek özelliklere sahiptirler.

2.4.2 Sürtünme ve sızma

Manyetoreolojik akışkanlı cihazların haptik açısından en büyük dezavantajı sızdırmazlık için kullanılan o-ringlerden kaynaklanan yüksek sürtünme kuvvetleridir. Bu dezavantaja rağmen araştırma önceliği aktif durumdaki yüksek tork değerlerine verilmiştir. Haptik sistemlerde kullanılması mümkün olmayan 1200 mN.m ve 535 mN.m gibi yüksek pasif durum tepki tork değerleri [80] bu araştırma önceliğinin sonuçlarından bir tanesidir. Aktif durumdaki tepki torkunun pasif durumdaki tork değerine bölünmesi ile elde edilen değer dinamik aralığı temsil etmektedir ve cihazın kontrol edilebilirliği ile ilişkilendirilmiştir. Cihazların kontrol edilebilirliğini arttırmak için öncelik pasif tepki tork değerini düşürmek yerine aktif tork değerinin arttırılmasına verilmiştir. Bu nedenden dolayı pasif tepki torku alanında çok az yayın yapılmıştır. Bilgimiz dâhilinde, o-ringlerden kaynaklanan olumsuzlukları çözmek amacıyla özgün bir çözüm olarak ferro-akışkanlı sızdırmazlık özelliği Senkal ve ark. [81] tarafından MRF cihazın her iki ucunda kullanılmıştır. Ferro-akışkanlı sızdırmazlık kullanarak kapalı hal tepki torku değeri 80 mN.m gibi çok düşük bir değere çekilmiştir.

Ferro-akışkanlı sızdırmazlık manyetoreolojik özelliğe sahip akışkanın sızdırmazlık elemanı olarak kullanılması prensibine göre çalışmaktadır. Rotor ve gövde arasında manyetik alan oluşturularak, bu bölgedeki akışkanın akma dayanımını değiştirilerek bir basınç farkı yaratılmakta ve içerideki MR akışkanın sızması engellenmektedir. Rotor ve gövde arasında herhangi bir fiziksel temas olmadığı için Coulomb sürtünmesi oluşmamakta ve haptik uygulamalarda önemli olan pasif durum tepki torku değeri çok düşük değerlere gelmektedir [76, 77, 81].

Kapalı tepki torkuna araştırmalarında değinen Liu ve ark. [72] 500 mN.m, Senkal ve ark. [81] 100 mN.m, Guo ve ark. [82] 50 mN.m ve Rossa ve ark. [63] 30 mN.m, Kikuchi ve ark. [75] 150 mN.m seviyelerinde sürtünme ve viskoz etkilere bağlı oluşan tepki torku değerleri ölçmüşlerdir.

2.4.2.1 O-Ring sürtünmesi

Sızdırmazlık konusundan sadece akışkan sızmasının engellenildiği durumlarda bahsedilmektedir. Bu nedenden dolayı sadece bir kaç araştırmacı yaptıkları araştırmalarda bu konudan bahsetmişlerdir. Silikon tabanlı MR akışkanlar için sızdırmazlık elde etmek alışıla gelmiş yöntemler ile zorlu bir süreçtir [51]. Genel olarak silikon tabanlı MR akışkanlar için sızdırmazlık elde etmek hidrokarbonlu MR akışkan kullanan sistemlere göre daha zordur. Sızdırmazlık MRF cihaz tasarlanırken tatbiki mümkün tasarım hususlarından bir tanesidir. Assadsangabi ve ark. [80] MR akışkanın aktif bölgelerde tekrarlı bir biçimde katılaşması konusunda uyarımışlardır. Katılaşma sonucu sızdırmazlık elemanlarında hasarlar oluşmakta ve buna bağlı olarak sızma ve kirlenme oluşmaktadır. Sızdırmazlık cihazın aktif durumda sergilediği tepki torku üzerinde bir etki oluşturmazken, cihaz kapalı durumda iken oluşan tepki torkunun büyük bir kısmını kontrol etmektedir. MRF cihazlarda genellikle birbirine göre hareket halinde olan parçaların arasına o-ring yerleştirilerek sızdırmazlık elde edilmektedir.

O-ring kullanımına bağlı açığa çıkan sürtünme değerlerinin hesaplanabilmesi için genellikle üretici firmanın sağladığı çizelgeler kullanılmaktadır. Oluşan sürtünme kuvvetleri sistemdeki diğer kuvvetlere oranla çok düşük ise genellikle bu kuvvetler ya göz ardı edilmekte ya da deneysel olarak belirlenmektedir. Harekete ters yönde etki eden sürtünme kuvveti, o-ring yuva boyutlarından, hareketli parçanın boyutlarından, sızdırmazlık aralığından ve sızdırmazlık elemanının sertliğinden etkilenmektedir. Sürtünme kuvveti ayrıca sistemin çalışmasına bağlı ortaya çıkan basınç değişimlerden de etkilenmektedir. O-ring kullanımına bağlı oluşan tepki torku yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir [83].

$$T_{oRing} = (f_c L_c + f_h A_r) R_s \quad (2.13)$$

eşitlikte L_c sızdırmazlık sağlanmış yüzey uzunluğunu, f_c O-ringin sertliği ve sıkıştırılma miktarına bağlı birim uzunluk başına tanımlanan sürtünmeyi, f_h akışkan

basıncına bağılı açığa çıkan sürtünme kuvvetini ve A_r akışkanın basınç uyguladığı yüzey alanını temsil etmektedir. Haptik sistemlerde kullanılan MR akışkanlı cihazlarda rotorun açısal hızının ve MR akışkana bağılı oluşan basıncın çok düşük olması nedeni ile eşitlikteki ikinci bileşen göz ardı edilebilir. Cihaz içerisindeki MR akışkan çalışma sırasında veya cihaz içerisinde bulunurken yüksek basınca sebebiyet vermediği için o-ringlerin düşük sıkıştırma oranları ile kullanımı yeterli olmaktadır [84].

O-ring kullanımına bağılı oluşacak tepki torkunun sızdırmazlık elemanının sıkıştırılma oranına bağılı hesaplanmış değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. Düşük sıkıştırmaya bağılı elde edilebilecek düşük sürtünme değerlerinin akışkan sızmasına neden olabileceği unutulmamalıdır. MRF cihazlarda sıkça rastlanılan akışkan sızması arzu edilmeyen bir durumdur.

Çizelge 2.2 : O-ring kullanımına bağılı rotorda oluşan sürtünme torkları [83].

Rotor Çapı [mm]	3,90	4,68	5,47	6,28	7,07
Sürtünme Torku [mN.m] %10 Sıkılıkta	10,02	13,99	18,69	24,22	30,30
Sürtünme Torku [mN.m] %15 Sıkılıkta	29,27	38,22	48,48	60,24	72,93

O-ring kullanılması çok etkili bir çözüm olmasına rağmen pasif durumdaki tepki torkunun sızdırmazlık istenilen bölgedeki çap değerine bağılı olarak artmasına sebebiyet vermektedir. Daha da fazlası o-ringler üzerinde aşındırıcı özelliği olan MR akışkanlar için o-ring ideal bir sızdırmazlık elemanı olarak görülmemektedir. Bucchi ve ark. [67] yaklaşık 200 mN.m seviyelerinde pasif tepki torku değeri raporlamışlardır. Bu değer viskoz bileşen ve sızdırmazlık elemanından kaynaklanan tepki torku değerlerinin düşük hızlarda elde edilen değerlerinin toplanması ile elde edilmiştir. Kikuchi ve ark. [75] yaklaşık 150 mN.m değerinde pasif tepki torku değeri ölçmüşlerdir. Ayrıca 1960 mN.m gibi çok yüksek kuru sürtünme değerleri de literatürde mevcuttur [85].

2.5 Empedans ve Admitans

Kararlılık ve şeffaklık haptik arayüzlerdeki en önemli konulardan iki tanesidir. Bu unsurlar haptik arayüzlerde kontrol edilebilir bileşenler kullanılarak sağlanmaktadır [86]. MR akışkanlı eyleyiciler kontrol edilebilirlikleri nedeni ile bu alanlarda tercih edilmektedirler. Değişken empedanslı eyleyiciler, insan makine etkileşimi olan durumlarda robot çevirgeçlerinde gerçek zamanlı güvenlik gereksinimlerini karşılamak için kullanılmaktadırlar [87]. Bu transdüserlerin kontrolünde empedans veya admitans kontrol yaklaşımları kullanılmaktadır.

Empedans kontrollü sistemlerde kullanıcıdan alınan yer değiştirme bilgisi kullanılarak bir tepki kuvveti üretilmektedir. Bu tepki kuvvetinin miktarı en basit şekilde doğrusal bir yay modeli (Eşitlik (2.14)) kullanılarak elde edilmektedir [88-90]. Düşük empedanslarda, doğrusal yay sabiti sıfır veya düşük değerler almaktadır. Eğer tepki kuvvetinin elde edilmesinde elektrik motorları kullanılıyorsa, bu motorlar kapatılmakta ve kullanıcı sadece sistemin ağırlığı ile eklemlerdeki sürtünme kuvvetlerini hissetmektedir. Yüksek empedanslarda, yay sabiti de yüksek değerler almakta ve sistem katılık (bükülmezlik) hissi vermektedir. Yüksek empedanslarda yüksek yay sabitine bağlı olarak sistem kararsızlık sergilemektedir. Kullanıcıdan alınan yer değiştirme verisindeki hata, yüksek yay sabiti ile çarpıldığında sistemde insan uzuvlarının başa çıkamayacağı istenilmeyen yüksek titreşimlere sebebiyet verebilmektedir.

Admitans kontrollü sistemlerde kullanıcıdan elde edilen kuvvet bilgisi kullanılarak gerçekleşecek yer değiştirme hissini verecek konum güncellemesi yapılmaktadır. Bu kontrol sisteminde ise düşük empedans durumlarında doğrusal yay sabiti sıfıra yaklaşmaktadır. Kullanıcıdan ölçülen baskı kuvvetindeki hataların, doğrusal yay eşitliğinden yararlanılarak konum bilgisine dönüştürülmesi sırasında hata yükselmektedir. Empedans kontroldeki gibi istenilmeyen enerji sistemi kararsız hale getirmektedir.

$$F(t) = -kx(t) \quad (2.14)$$

Kullanıcı bakışı açısından, haptik cihazların başarımı Colgate ve ark. [91] tarafından empedans uygunluğu olarak tanımlanmaktadır. Empedans uygunluğu, haptik cihazın empedansı ile arzu edilen empedans değerinin örtüşme başarısını ifade etmektedir. Empedans bant genişliği veya “Z-Genişliği” olarak da ifade edilen bu değer her iki

kontrol yaklaşımında da kolay elde edilememektedir. Kontrol sırasında uç empedans değerlerine gelindiğinde empedans aralığı da azalmaktadır [92].

Empedans ve admitans kontrol yaklaşımlarının ikisi de büyük kütle ve ataletler karşısında ağır ve hantal kalmakta veya yavaş hareket eden admitans sistemler gibi davranış göstermektedir. Mekanik empedans, bir mekanik sistemin kuvveti ve hızı arasındaki ilişki olarak aşağıdaki eşitlikte verilmektedir.

$$Z(\omega) = F(\omega)/V(\omega) \quad (2.15)$$

Yüksek empedanslı bir sistem için büyük kuvvetler küçük hızların oluşmasına, düşük empedanslı bir sistem için ise küçük kuvvetler büyük hızların oluşmasına sebebiyet verecektir. Haptik etkileşimlerde ortam ve ortam içindeki objeler ile etkileşim sırasında oluşan kuvvetlerin hissedildiği hatırlanırsa, bir uzvun havada hareket ettirilmesi düşük empedansa örnek, bir uzuv ile ağır bir objenin hareket ettirilmesi yüksek empedansa örnek teşkil etmektedir [93].

2.5.1 Ağırlık en iyilemesi

MRF cihaz ağırlığı haptik uygulamalarında fazla bahsedilmeyen önemli konulardan bir tanesidir. MRF cihazların ağırlıkları hesaplanırken aşağıdaki yaklaşık ağırlık ifadesi kullanılmaktadır.

$$m = V_{pM}\rho_{pM} + V_{MRF}\rho_{MRF} + V_{St}\rho_{St} + V_C\rho_C \quad (2.16)$$

eşitlikte V_{pM} , V_{MRF} , V_{St} , ve V_C sırasıyla manyetik olmayan kısma, MR akışkana, manyetik çekirdeğe, ve tel sarımına ait hacim değerlerini temsil etmektedir. Cihaz ağırlığının yaklaşık olarak hesaplanabilmesi için hacim değerleri ρ_{pM} , ρ_{MRF} , ρ_{St} ve ρ_C sırası ile manyetik olmayan kısma, MR akışkana, manyetik çekirdeğe ve bakıra ait yoğunluk değerleri ile çarpılmaktadır. Cihazın fiziksel boyutlarının yanında kullanılan manyetik çekirdeğin ölçüleri ve tel sarımındaki bakırın miktarı da ağırlık üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Ağırlık en iyilemesi alanın uzmanları tarafından yeni yeni araştırılmaya başlanmıştır [84]. Ağırlık en iyilemesi için cihaz boyutları, malzeme seçimi ve manyetik devre tasarımı gibi alt başlıklarda en iyileme yapılmaktadır. En iyileme sürecinde sonlu eleman analizi (FEA) simülasyonları kullanılmaktadır. Bu yöntem bu tür cihazların tasarımında tercih edilen yaklaşımların başında gelmektedir. Tepki torku değerlerinin

elde edilebilmesi için Bingham plastiği veya benzeri modellerden yararlanılmaktadır. Tepki torkuna ait değerler elde edildikten sonra en iyi tork ağırlık oranını veren tasarım parametreleri birleşimi (kombinasyonu) elde edilmektedir. Assadsangabi ve ark. [80] tarafından tepki torku kapasitesi arttırılırken fren ağırlığı mümkün olan en düşük seviyede tutulmuştur. Kavramadan elde edilebilecek tepki torkunun arttırılması ve bu sırada cihaz ağırlığının en düşük değerinde tutulmasını sağlayacak bir en iyi tasarım yaklaşımı Li ve ark. [94] tarafından sunulmuştur. Topcu ve ark. [76] farklı gövde malzemesi ve manyetik devre en iyilemesi yaparak disk tipi bir MRF cihazın ağırlığını düşürmüştür. Yaklaşık 237 gr ağırlığında bir kompakt bir manyetoreolojik cihaz Kikuchi ve ark. [75] tarafından sunulmuştur. El ile kavranılan veya kullanılan cihazlar daha düşük ağırlıklı eyleyicilere ihtiyaç duymaktadırlar. Sadece 68 gr ve 84 gr ağırlığında olan iki adet MRF cihaz Blake ve ark. [70] tarafından sunulmuştur. Özet olarak hafif eyleyiciler pek çok haptik arayüz için hem ihtiyaç duyulan hem de elzem bileşenlerdir.

2.6 Bölüm Özeti

Damperler, kavramalar ve frenler incelenildiğinde hem akademik olarak hem de endüstriyel olarak tepki kuvvetinin kontrol edilebildiği modellerin diğer modellere oranla daha çok tercih edildiği görülmektedir. Kontrol edilebilirlik bakımından akıllı sıvıların ön plana çıktığı ve bu sıvılardan MR akışkanlarının diğer akışkanlardan daha etkili olduğu görülmektedir. Haptik arayüzlerde kullanılan eyleyicilerin yardımı ile kullanıcı ortam veya ortam içerisindeki obje ile etkileşime geçtiğini hissedebilmektedir. Bu eyleyicilerde aranılan özelliklerin başında tepki kuvveti veya torkunun ağırlığa veya hacime oranının yüksek olması gelmektedir. Eyleyicinin MR akışkanlı bir eyleyici olması durumunda, aranılan diğer bir özellik ise eyleyicinin dinamik aralığının da yüksek olmasıdır. MR akışkanlı pasif eyleyicilerin akış, kesme, sıkıştırma ve kısıtma gibi sadece dört adet çalışma modu olmasına rağmen doğrusal ve döner biçimde çalışan pek çok cihaz tasarlanmış ve tasarlanmaktadır. MR akışkanların pasif eyleyicilerde kullanılması beraberinde sızdırmazlık sorununu da getirmektedir. Sızdırmazlık o-ring kullanılarak çözülebilmekte fakat pasif durumdaki tepki torku o-ringlerin sayısına, konumuna ve gerginliğine göre değişiklik göstermektedir. Düşük tepki torku elde edebilmek için küçük çaplarda gevşek

biçimde takılan o-ringler akışkanın sızmasına sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca MR akışkanların aşındırıcı özellikleri uzun süreli o-ring kullanımı zorlaştırmaktadır.

Haptik cihazlar empedans ve admitans kontrol yöntemleri ile kontrol edilmektedirler. Bu kontrol sistemlerinin başarılı olabilmesi için haptik arayüzlerde bulunması gereken eyleyicilerin küçük, hafif ve yüksek empedanslı olması gerekmektedir. İdeal eylecinin elde edilebilmesi için ağırlık en iyilemesi yapılması gerekmektedir. Döner cihazlar çalışma modlarına göre kıyaslandığında cihazın geometrik parametrelerinin tepki torku değeri üzerinde büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir. Diğer bir taraftan da bu parametrelerin büyütülmesi durumunda ise haptik sistemlerde tercih edilmeyen ağır ve yüksek tepki torkuna sahip cihazlar elde edilecektir.





3. MANYETİK AKI ve ISI TRANSFERİ

3.1 Amaç

İletken tel üzerinden akım geçirilmesine bağlı olarak oluşan manyetik akı ve ısı transferi bu bölümde incelenmiştir. Manyetik akı dağılımını incelemek için matematiksel bir model oluşturulmuş ve bu model uygun sınır koşulları ile seçilen sayısal yöntem ile çözümlenmiştir. Aynı şekilde ısı transferi problemi de sayısal yöntemler kullanılarak çözüme ulaştırılmıştır.

3.2 Manyetik Alan için Temel Denklemler

Manyetik alan, manyetik malzemenin veya elektrik akımının oluşturduğu manyetik etkiyi ifade etmektedir. Manyetik alan ile çalışan sistemler,

- üzerinden akım geçen iletken telin çevresinde manyetik alan oluşturması,
- üzerinden akım geçen iletkenin, başka bir manyetik alanın etkisine girmesi durumunda, iletkene kuvvet etki etmesi
- manyetik alan içerisinde hareket eden iletkenin voltaj indüklemesi
- zamanla değişen manyetik alanın içerisindeki iletkenin voltaj indüklemesi

prensiplerini kullanmaktadırlar.

Manyetik alan elde edilmesini ifade eden temel eşitlik (Eşitlik (3.1)) Ampere yasası olarak tanımlanmaktadır [95].

$$\oint H \cdot dl = I_{net} \quad (3.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte H manyetik alan yoğunluğunu, dl integralin alındığı doğru boyunca tanımlı olan diferansiyel elemanı ve I_{net} manyetik alanın oluşmasını sağlayan net akımı ifade etmektedir. Akımın manyetik alan yoğunluğu üzerine olan etkisini arttırmak için akımı taşıyan iletkenin sayısının arttırılması veya defalarca

ferromanyetik malzemeye etki edecek şekilde (sarılması) yerleştirilmesi gerekmektedir. Manyetik alan elde etmek için kullanılan çekirdeğin ferromanyetik malzeme olması durumunda, manyetik akı çekirdek içerisinde kalmakta ve Eşitlik (3.1)'deki integralli ifade yerine çekirdeğin merkezine ait ortalama uzunluğu (l_c) yazılabilmektedir.

$$Hl_c = NI \quad (3.2)$$

H manyetik alan yoğunluğu vektörünün şiddetini temsil ettiği için aynı zamanda çekirdekte oluşan manyetik alan yoğunluğunu da temsil etmektedir. Çekirdekte elde edilen manyetik alan akısının şiddeti çekirdek malzemesinin özelliklerinden etkilenmektedir. Manyetik alan yoğunluğu, manyetik akı elde etmek için sarf edilen çabayı temsil etmektedir. Malzemenin manyetik geçirgenliği ise bu çabanın başarımını belirleyen özelliktir. Manyetik akı yoğunluğu (B), çekirdek malzemesine bağlı olarak aşağıdaki şekilde Eşitlik (3.3)'de tanımlanmıştır.

$$B = \mu H \quad (3.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte μ malzemenin manyetik geçirgenliğini temsil etmektedir. Boş uzayın manyetik geçirgenliği μ_0 ile temsil edilir ve değeri $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m'dir. Malzemelerin manyetik geçirgenliği boş uzayın manyetik geçirgenliği ile kıyaslanarak ifade edilmekte ve görelî manyetik geçirgenlik (Eşitlik (3.4)) olarak tanımlanmaktadır.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.4)$$

Demirin görelî manyetik geçirgenliği 2000-6000 arasında değerler almaktadır. Diğer bir ifade ile manyetik çekirdek için hava ve demir kullanılması arasındaki fark en az 2000 kat daha fazla akı olarak yorumlanabilir. Bu yüzden manyetik uygulamalarda kullanılan manyetik çekirdek için görelî manyetik geçirgenliği yüksek malzemeler tercih edilmektedir. Çekirdekte oluşacak manyetik akı yoğunluğu aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$B = \mu H = \frac{\mu Ni}{l_c} \quad (3.5)$$

Belirli bir alandaki toplam akı ise

$$\Phi = \int_A B \cdot dA \quad (3.6)$$

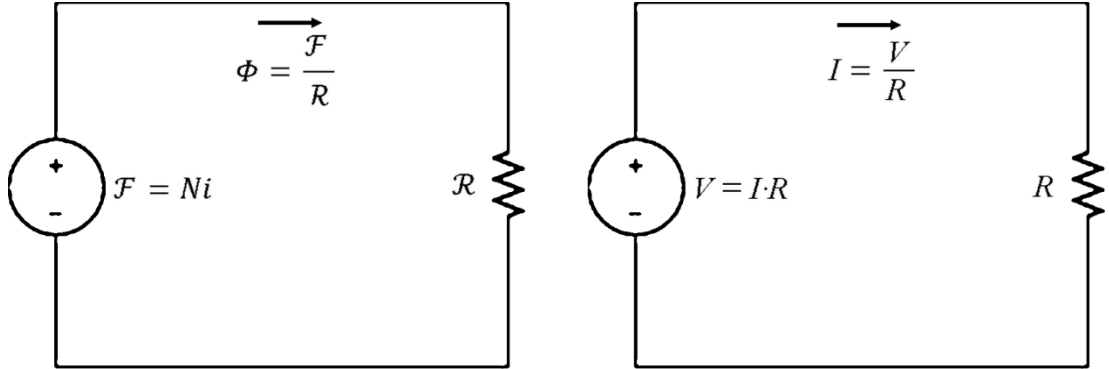
Eşitlik (3.6) ile tanımlanmaktadır. Eğer akı yoğunluğu vektörü A alanına dik ise ve akı yoğunluğu tüm alan boyunca değişmiyorsa yukarıdaki eşitlik aşağıdaki sade biçimde yazılabilmektedir.

$$\Phi = BA \quad (3.7)$$

Manyetik çekirdek geometrisinin düzenli akı yoğunluğuna izin verdiği durumlarda, yukarıdaki Eşitlik (3.7) yardımı ile çekirdekteki toplam akı değeri aşağıdaki şekilde elde edilebilmektedir. Manyetik çekirdeğin kesit alanı A ile ifade edilmiştir.

$$\Phi = BA = \frac{\mu NiA}{l_c} \quad (3.8)$$

Bir elektrik devresindeki voltaj farkının akım oluşturması, manyetik çekirdekte akım ve iletkenler yardımı ile akı oluşturulmasına benzerlikler göstermektedir. Bu ilişki göz önüne alınarak manyetik sistemler için elektrik devrelerinde kullanılan yaklaşımlara benzer ifadeler kullanan, manyetik devreler tanımlanmıştır. Elektrik devresi ile manyetik devrenin şematik gösterimleri Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 : (a) Elektrik devresi ile (b) manyetik devrenin şematik gösterimi.

Manyetomotor kuvvet \mathcal{F} , sarım sayısı N , ve akım i arasındaki ilişki $\mathcal{F} = Ni$ olarak verilmektedir. Elektrik devrelerinde voltaj V , akım I ve direnç R arasındaki ilişki Ohm yasasına göre $V = IR$ olarak tanımlanırken, manyetik devrelerde manyetomotor kuvvet \mathcal{F} , akı Φ , ve manyetik direnç \mathcal{R} arasındaki ilişki ise $\mathcal{F} = \Phi \mathcal{R}$ olarak ifade

edilmektedir. Çekirdeğin manyetik direnci bu bilgiler ışığında aşağıdaki biçimde elde edilebilmektedir.

$$\Phi = BA = \frac{\mu NiA}{l_c} = Ni \left(\frac{\mu A}{l_c} \right) \quad (3.9)$$

$$\Phi = \mathcal{F} \left(\frac{\mu A}{l_c} \right) \quad (3.10)$$

Eşitlik (3.9) ve Eşitlik (3.10) kıyaslandığı zaman manyetik direnci tanımlayan özellikler (Eşitlik (3.11)) ortaya çıkmaktadır.

$$\mathcal{R} = \frac{\mu A}{l_c} \quad (3.11)$$

Elektrik devrelerinde dirençlerin seri ve paralel bağlanması ile ilgili kurallar manyetik devrelerdeki manyetik dirençler için de geçerlidir. Seri bağlı manyetik dirençler için eşdeğer direnç,

$$\mathcal{R}_{eş} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \dots + \mathcal{R}_n \quad (3.12)$$

ve paralel bağlı manyetik dirençler için eşdeğer direnç ise

$$\frac{1}{\mathcal{R}_{eş}} = \frac{1}{\mathcal{R}_1} + \frac{1}{\mathcal{R}_2} + \dots + \frac{1}{\mathcal{R}_n} \quad (3.13)$$

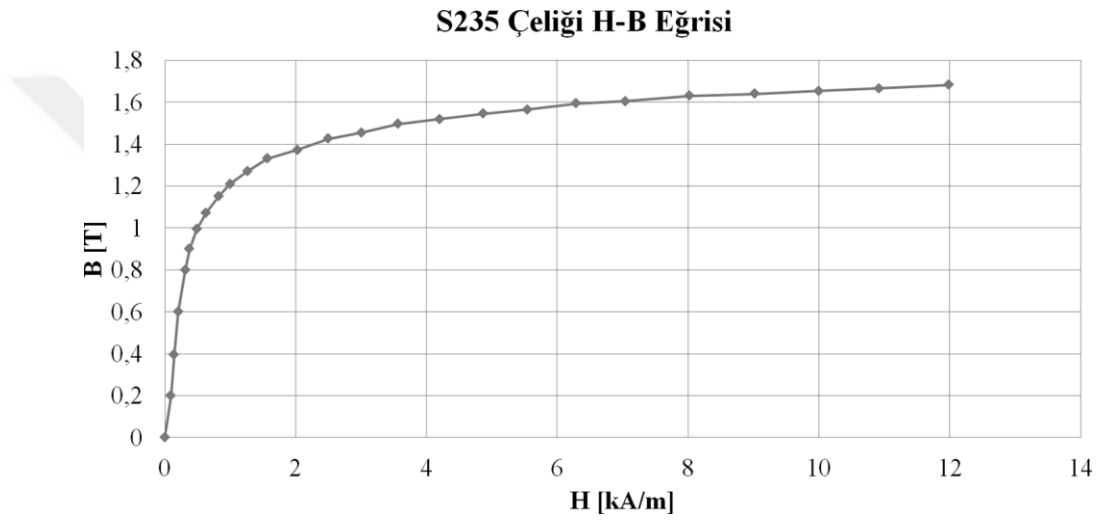
şeklinde Eşitlik (3.12) ve Eşitlik (3.13) kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Manyetik devre kullanılarak hesaplanan akı değeri, her zaman yaklaşık bir değer verecektir. En iyi durumda gerçek değere %5 yakın bir değer elde edilebilmektedir [96]. Ayrıca manyetik geçirgenlik sadece belirli bir aralıkta sabit olarak kabul edilebilmektedir. Pek çok malzeme için manyetik geçirgenlik manyetik alan yoğunluğuna bağlı doğrusal olmayan bir eğri ile ifade edilmektedir. Diğer bir ifade ile akımı sürekli arttırmak, akının artacağı anlamına gelmemektedir. Bünyesinde manyetik alan üreten sistemlere verilen akım değerleri, manyetik geçirgenlik eğrisinin eğiminin yataylaşmaya başladığı bölgeleri (diz noktalarını) geçmeyecek biçimde seçilmektedirler. Verilen akım değerleri ile diz noktaları geçildiğinde ise sistemden daha düşük başarımlar elde edilmekte ve verilen fazla akım daha fazla ısının sisteme zarar vermesine sebebiyet vermektedir. Manyetik alan üreten sistemlere

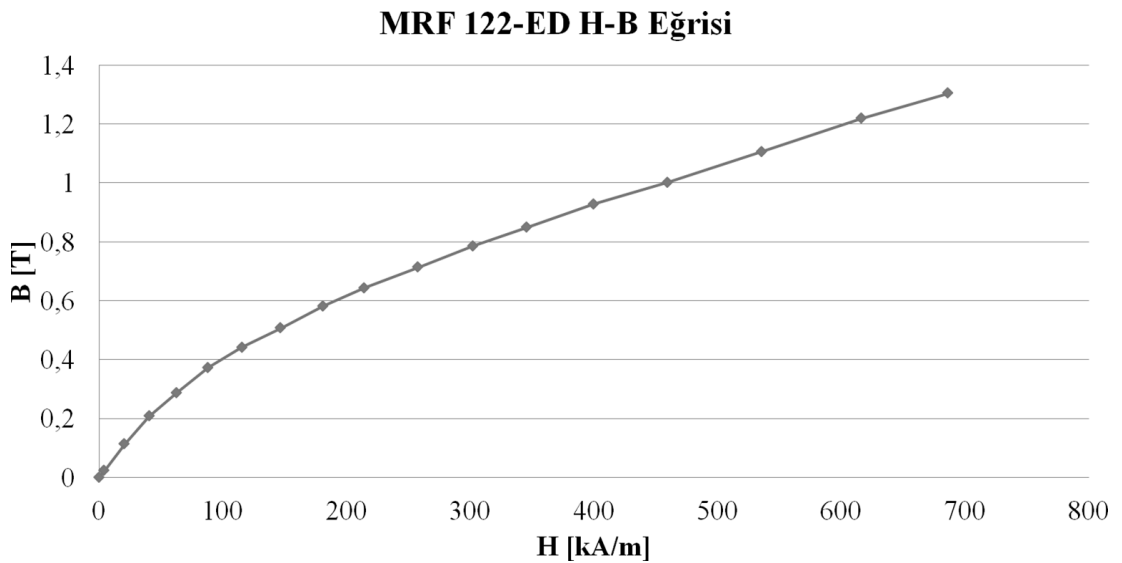
verilebilecek zararların başında gelen yüksek akıma bağlı ısınma, sarımlarda kullanılan iletken tellerdeki yalıtım malzemesinin yıpranmasına ve sistemi çalışamaz hale gelmesine sebebiyet vermektedir. [96]

3.3 Manyetik Devre Analizi

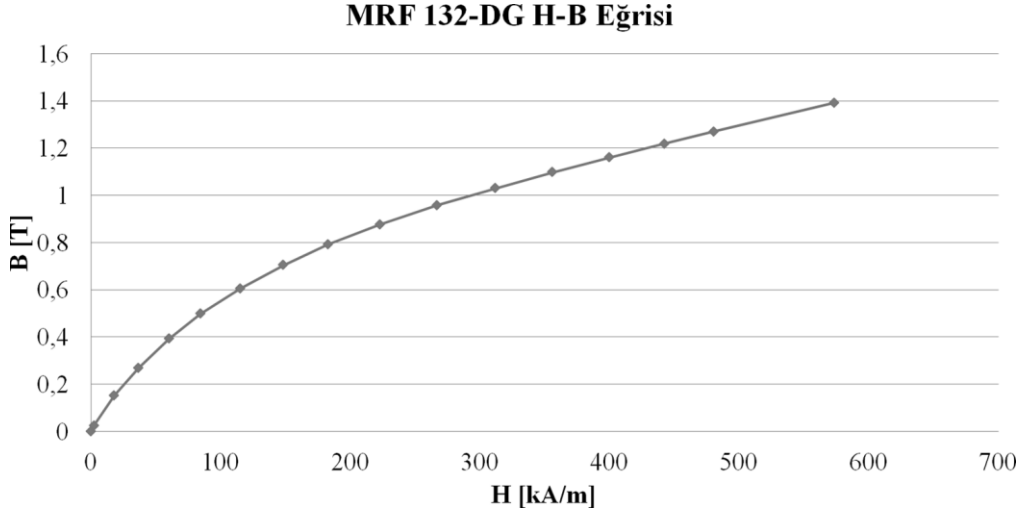
Şekil 3.2’de deneylerde kullanılan düşük karbon çeliğine ait H-B eğrisi verilmiştir. Ayrıca Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de LORD firmasının MR akışkanlarına ait manyetik alan yoğunluğuna (H) karşılık manyetik akı yoğunluğu (B) eğrileri (H-B eğrisi) verilmiştir. Bu eğriler kullanılarak ilgili malzemelerin manyetik geçirgenlikleri elde edilmiştir.



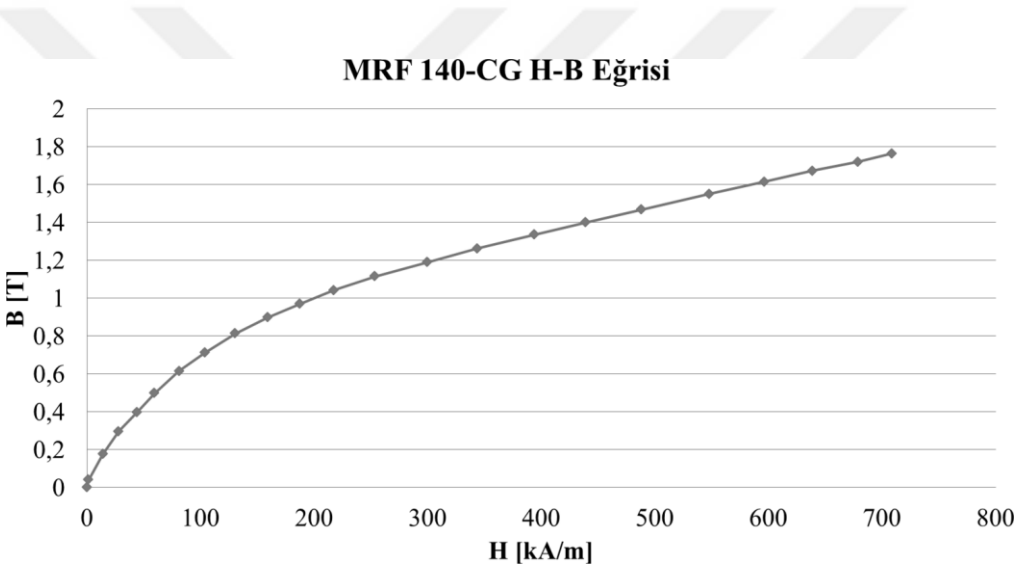
Şekil 3.2 : S235 Düşük Karbon Çeliğine ait H-B eğrisi [97].



Şekil 3.3 : MRF 122-EG akışkanına ait H-B eğrisi [1].



Şekil 3.4 : MRF 132-DG akışkanına ait H-B eğrisi [1].

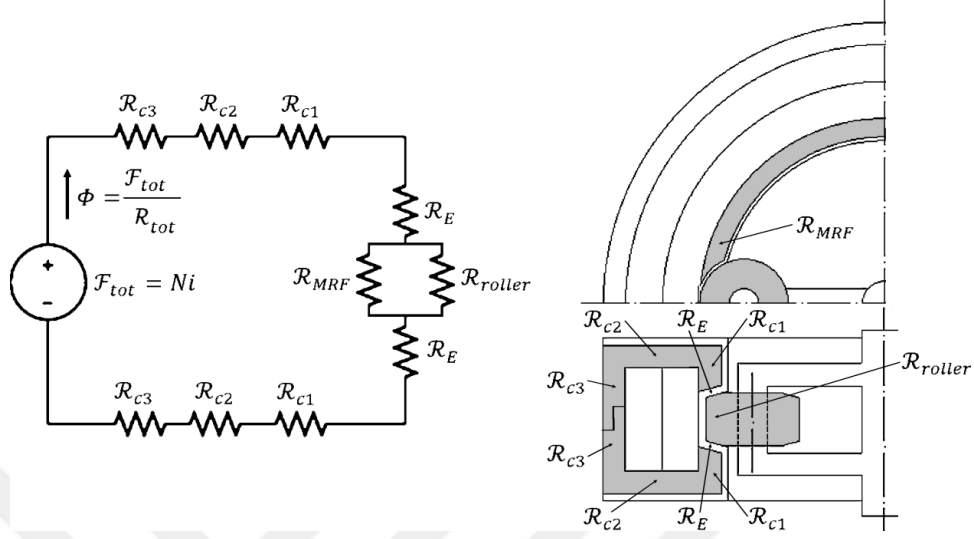


Şekil 3.5 : MRF 140-CG akışkanına ait H-B eğrisi [1].

Manyetik alan yoğunluğuna (H) karşılık manyetik akı yoğunluğu (B) eğrileri (H-B eğrisi) MRF cihaz tasarımının manyetik devre hesaplamalarında en çok kullanılan verilerin başında gelmektedir. Özel olarak geliştirilmiş bir akışkan kullanılmıyorsa H-B eğrileri üretici firmadan temin edilirler. Manyetik devre analizi sırasında H-B eğrileri Eşitlik (3.3)'de tanımlandığı şekilde manyetik geçirgenliğin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Sağınımlı (peristaltik) döner MRF frene ait manyetik devre Şekil 3.6'da verilmiştir. Manyetik çekirdek, kesit alanın değişmesi nedeni ile R_{c1} , R_{c2} , ve R_{c3} olarak üç adet manyetik direnç biçiminde ifade edilmiştir. Manyetik akı, manyetik çekirdekten hemen sonra elastik ayırıcıdan R_E ve devamında hem ezici merdanelerden R_{roller}

hem de MR akışkanından R_{MRF} geçmektedir. Elektro-mıknatısın tasarımının yatay ekseninde simetrik olmasından dolayı devre elemanları da manyetik devrede simetrik bir biçimde gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : MRF manyetik çekirdek rollerlar elastik hazne ve ilgili MRF frenin şematik gösterimi.

Şekil 3.6’da verilen manyetik devrenin çözümü için Eşitlik (3.2), Eşitlik (3.5) ve Eşitlik (3.12) birleştirilerek aşağıdaki genel eşitlik (Eşitlik (3.14)) kullanılabilir.

$$\mathcal{F}_{tot} = \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{\mu_i} l_{ci} = Ni \quad (3.14)$$

Yukarıdaki eşitlikte, \mathcal{F}_{tot} toplam manyeto-motor kuvveti, N bobinin sahip olduğu sarım sayısını, i bobinden geçen akımı, B_i manyetik devredeki dirençlerin üzerinden geçen akı yoğunluğunu, μ_i her bir direncin manyetik geçirgenliğini ve l_{ci} her bir direncin karşılık geldiği malzemenin ortalama uzunluğunu temsil etmektedir. Eşitlik (3.14)’ün çözülebilmesi için manyetik akı (Φ), sarım sayısı (N) ve akım (i) değerlerinden en az ikisinin bilinmesi gerekmektedir. Genellikle izlenen çözüm yöntemi, manyetik çekirdekteki açıklık kullanılarak elde edilen akı değeri ile sabit akım değerinde gerekli olan sarım sayısının hesaplanmasıdır. Genellikle sabit akım değeri olarak, 1 A veya 2 A gibi iletken tele zarar vermeyecek düşük akım değerleri tercih edilmektedir.

Manyetik çekirdek malzemesi seçiminde düşük karbonlu çelikler kolay temin edilebildikleri için tercih edilmektedirler. Çekirdek malzemesi seçimi Eşitlik

(3.14)'deki manyetik geçirgenlik değerlerini (μ_i) belirlemektedir. Bazı farklı ferromanyetik çekirdek malzemelerine ait manyetik geçirgenlik değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Manyetik çekirdek malzemelerine ait manyetik geçirgenlik değerleri [96].

Manyetik çekirdek malzemesi	Manyetik geçirgenlik μ [H/m]
Kobalt Demiri	$2,3 \times 10^{-2}$
Demir (%99,8 saflıkta)	$6,3 \times 10^{-3}$
Silikon çeliği	$5,0 \times 10^{-3}$
Düşük karbon çeliği	$2,26 \times 10^{-3}$

Çizelge 3.1 incelendiğinde manyetik çekirdek malzemesi olarak Kobalt demiri kullanılmasının başarımı arttıracığı görülmektedir. Sağınımlı (peristaltik) döner MRF frenin manyetik çekirdeği temin edilebilirlik ve diğer sınırlayıcı unsurlar nedeni ile düşük karbon çeliğinden imal edilmiştir. Manyetik devre analizinde kullanılan malzemelere ait manyetik geçirgenlik değerleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Manyetik geçirgenlik değerleri [96].

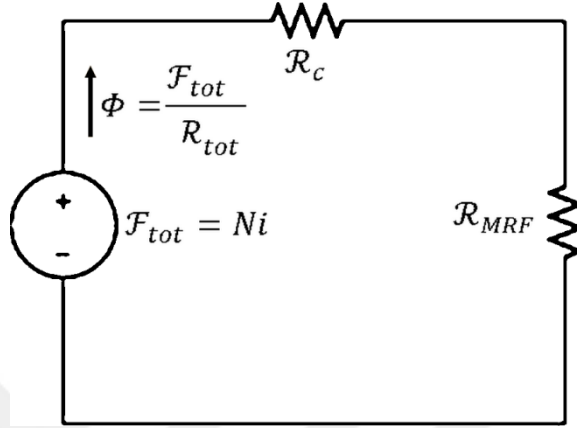
Malzeme	Manyetik geçirgenlik μ [H/m]
Hava	$1,257 \times 10^{-6}$
Poliürethan, Silikon μ_E	$1,257 \times 10^{-6}$
Aluminyum μ_{Al}	$1,257 \times 10^{-6}$
MR akışkanı μ_{mrf}	$5,503 \times 10^{-6}$

Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2 birlikte incelendiğinde MR akışkanının paramanyetik bir malzeme gibi davrandığı ve hava gibi modellenebileceği kabulünün yapılabileceği görülmektedir. Manyetik devrenin başarımını arttırmak için, elastik ayırıcının kalınlığına bağlı ortaya çıkacak manyetik direnç etkisinden daha çok elastik haznenin kalınlığına bağlı oluşacak boşluk değerindeki artışın azaltılması gerekmektedir.

Diğer bir ifade ile elastik ayırıcının kalınlığının en aza indirilmesi açıklığın küçülmesine, ve akış kanalının artmasına sebebiyet verecektir.

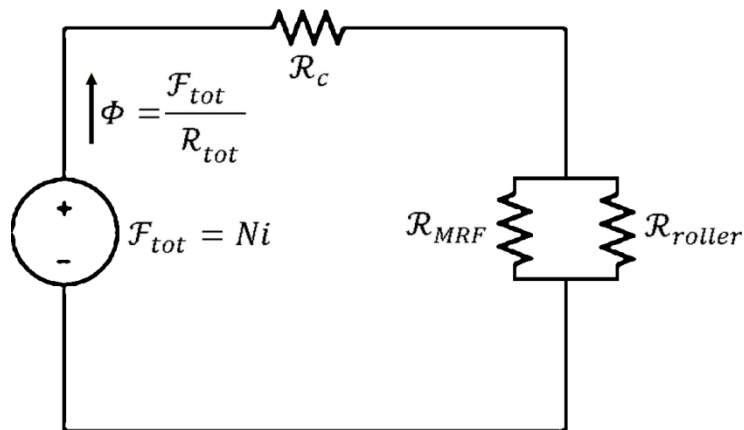
3.3.1 Ezici merdanelerin manyetik analize etkisi

Sadece MRF dolu bir akış kanalı olması durumunda manyetik devre Şekil 3.7'deki gibi sadeleştirilebilir.



Şekil 3.7 : Boşluğunda MRF dolu elektro-mıknatis devre şeması.

MR akışkanını temsil etmek için, MRF 132-DG akışkanının manyetik geçirgenliği (μ_{mrf}) akışkanın doyma noktası baz alınarak ve Eşitlik (3.3) kullanılarak hesaplanmıştır. Manyetik geçirgenlik değerleri hem Alüminyum (μ_{Al}) ezici merdaneler için hem de MRF akışkanı için Çizelge 3.2'de görülmektedir. Akış kanalı içerisinde hem MR akışkanı hem de Alüminyum ezici merdanelerin bulunması durumunda ise manyetik devre Şekil 3.8'deki gibi modellenebilir.



Şekil 3.8 : Hava boşluğunda MRF ve ezici merdanlerin bulunduğu elektro-mıknatis devre şeması.

Manyetik iletkenlik, manyetik direncin tersi olarak ifade edilmektedir ve Eşitlik (3.15)'de verilmiştir.

$$\mathcal{P} = \frac{1}{\mathcal{R}} \quad (3.15)$$

Eşitlik (3.10), Eşitlik (3.11) ve (3.15) kullanılarak tekrar yazılırsa akı ifadesi manyetik geçirgenlik cinsinden tekrar elde edilir.

$$\Phi = \mathcal{F} \cdot \mathcal{P} \quad (3.16)$$

Sadece MR akışkanı olan durum Eşitlik (3.17) ile ifade edilirken, MRF ve Alüminyum ezici merdanelerin de sisteme dahil edildiği durum Eşitlik (3.18) ile tanımlanabilir.

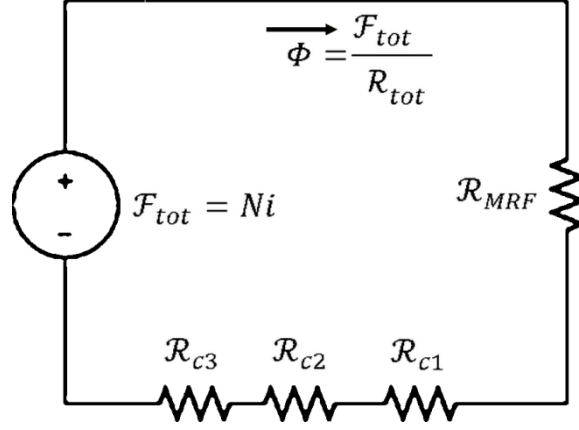
$$\Phi = \mathcal{F} \cdot \mathcal{P}_{mrf} \quad (3.17)$$

$$\Phi = \mathcal{F} \cdot \mathcal{P}_{mrf+Al} \quad (3.18)$$

Alüminyum ezici merdanelerin sabit akım değerinde devreyi doyuma ulaştıracak sarım sayısına etkisi yüzde olarak Eşitlik (3.19) ile ifade edilmiştir.

$$\frac{\mathcal{R}_{mrf+Al} - \Phi \mathcal{R}_{mrf}}{\Phi \mathcal{R}_{mrf}} \times 100 \quad (3.19)$$

Eşitlik (3.12) ve (3.13) kullanılarak Şekil 3.7 ve 3.8'de gösterilmiş olan durumlar için manyetik geçirgenlik değerleri, açıklık 9 mm ve Alüminyum ezici merdanelerin doldurduğu alanın toplam alanın %12'si olduğu kabul edilerek hesaplanırsa, her iki durum için gerekli olan manyetomotor kuvvet (\mathcal{F}) bu kabuller altında elde edilir. Ezici merdanelerin kapladığı alanın hesaplamasında kullanılan eşitlik ilerleyen bölümlerde verilmiştir. Eşitlik (3.19)'a ilgili değerlerin yerleştirilmesi ile sabit akım değerinde Alüminyum ezici merdanelerden kaynaklanan manyetik akı kaybının azaltılabilmesi amacı ile sarım sayısının %3 artırılması gerektiği bilgisi elde edilmektedir. Elde edilen bu sonuç her iki malzemenin de tek bir malzeme gibi modellenebileceğini göstermiştir. Yapılan kabuller sonrası, manyetik çekirdeğin boyutsal farklılıkları da dahil edilerek oluşturulan sağınımlı döner MRF frene ait sadeleştirilmiş manyetik devre Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 : Sağınımlı döner MRF frene ait sadeleştirilmiş manyetik devre.

3.4 Ohmik Isınma

Elektrik motorlarında ve elektro mıknatıslarda enerji kayıplarının büyük kısmı akımı taşıyan iletkenlerdeki direnç kayıplarından oluşmaktadır. Kayıpların tespit edilebilmesi için bobinin (sargının) direncinin tespit edilmesi önemlidir. İletken malzemenin elektriksel direnci, boyunun akımın geçtiği kesit alanı oranından elde edilebilir. Orantılılık katsayısı ρ_{ref} 'in elektrik özdirenci temsil ettiği (3.20) numaralı eşitlikte iletken malzemenin elektriksel direnç eşitliği verilmiştir.

$$R_{ref} = \rho_{ref} \left(\frac{L_{ref}}{A_{ref}} \right) \quad (3.20)$$

Referans sıcaklığını temsil etmek için kullanılan altsimge “*ref*”, elektriksel direncin iletken sıcaklığına bağlı bir değer olduğunu temsil etmektedir. Genellikle bilgi kaynakları [98-100] referans sıcaklık değeri olarak oda sıcaklığını kullanmaktadırlar. Motorların ve elektro mıknatısların çalışma sıcaklıkları bünyelerinde özel bir soğutma sistemi mevcut değil ise sarımlarda kullanılan iletkenlerin çalışma sıcaklığı, oda sıcaklığından farklı bir değerde olacaktır. Bu durumda elektriksel direncin sıcaklığa bağlı yeni değerinin hesaplanması gerekmektedir. Sıcaklık farkının çok yüksek olmadığı koşullarda aşağıdaki (3.21) numaralı eşitlik elektriksel direnç değerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Eşitlik (3.21)'de α_{ref} , direncin sıcaklık katsayısını temsil etmektedir ve deneysel olarak elde edilmiş bir katsayıdır [98].

$$R_{wire} = R_{ref} [1 + \alpha_{ref} (T_{wire} - T_{ref})] \quad (3.21)$$

Eşitlik (3.20) ve Eşitlik (3.21) kullanılarak elektriksel dirençler elde edildikten sonra bobinlerde meydana gelecek direnç kayıpları tespit edilebilir. Ohmik ısınma, bir iletken üzerinden elektrik akımı geçmesi sonucu üzerinden akım geçen bu iletkenin ısı yayması olarak tanımlanmaktadır. Direnç ısınma veya jul ısınma olarak da tanımlanmaktadır.

$$\dot{E}_g = i(V_A - V_B) = i^2 R \quad (3.22)$$

Joule-Lenz yasası ya da Joule'un 1inci kanunu olarak tanımlanan (3.22) numaralı deklemden $V_A - V_B$ iletken boyunca gerçekleşen gerilim düşümünü, i ise akımı temsil etmektedir. Ohm kanununun geçerli olduğu durumlarda salınımı gerçekleşen ısı, akımın i karesi ve iletkenin direnci R ile doğru orantılı ve zamana bağlıdır [101]. Peltier etkisine bağlı ısınmadan farklı olarak, ohmik ısınmada akım yönünün ısınmaya etkisi yoktur.

$$\dot{q} = \frac{i^2 R}{V} \quad (3.23)$$

Isı salınımının belirli bir hacim (V) içerisinde eşit olarak gerçekleşmesi durumunda, hacimsel ısı üretimi oranı (\dot{q}) yukarıdaki (3.23) numaralı eşitlik ile ifade edilmektedir [98, 101].

3.4.1 İzin verilen akım şiddeti

İletkenin yıpranmaya sebebiyet vermeden anlık veya uzun süreli dayanabileceği en yüksek akım değeri o iletken için izin verilen akım şiddetini ifade etmektedir. Ayrıca akım taşıma kapasitesi ve akım oranı olarak tanımlanan izin verilen akım şiddeti, bir iletken veya cihazın sürekli tanımlı olduğu sıcaklık aralığında çalıştığı etkin akım değeridir. Bakır ve alüminyum gibi iletken malzemeler yüksek akım değerlerini hasar görmeden iletebilirler. Genellikle yalıtım malzemesi, akıma bağlı oluşan yüksek sıcaklık değerlerine dayanamayarak hasar görmektedir. İletkenler için izin verilen akım şiddeti, yalıtım malzemesinin dayanım gösterebildiği sıcaklık değerine, iletkenin elektriksel direncine, alternatif akım olması durumunda akımın frekansına, iletken geometrisine, çevreleyen unsurlara, ısı yayma yeteneğine ve ortam sıcaklığına bağlıdır. Ortam sıcaklığının iletken sıcaklığından daha düşük olduğu ve iletkenin yüzey alanının yeteri kadar büyük olduğu durumlarda izin verilen akım değerinin referans değerden daha yüksek olması beklenemez. Kısaca iletkenler için izin

verilebilir en yüksek sürekli akım değeri, iletkenin fiziksel ve elektriksel özellikleri ve yalıtım malzemesi tipi, ortam sıcaklığı ve ısı iletim katsayılarına bağlı olarak değişiklik gösterecektir. İletkenlerde kullanılan yalıtım malzemesine bağlı olarak izin verilen en yüksek iletken yüzey sıcaklığı genellikle 90 °C'dan başlamaktadır. Bu değer için ortam sıcaklığı değeri 30 °C referans değer olarak kullanılmıştır. İzin verilen akım değerlerinden bahsedilirken iletken kablolar tek bir tel olarak ve ortam sıcaklığının oda sıcaklığında olduğu durumlar referans alınmaktadır. Kabloların kapalı bir ortamda ve bir sarımın parçası olarak kullanılması durumunda referans olarak kullanılacak olan akım değerleri anlamlarını yitirmektedirler. İzin verilen akım şiddeti iletkene zarar vermeyecek şekilde, genellikle sürekli sağlanan akım değerine veya kısa süreli yüksek akım değerlerine karşılık gelmektedir. Uygulanabilir en yüksek akım değeri ve uygulama süresi izin verilen akım şiddetinden farklı bir durumdur ve ayrı değerlendirilmelidir. Elektrik devresi tasarlanırken, akımın geçtiği ve direnç kayıplara bağlı olarak sıcaklıktan etkilenen sistem bileşenlerine ayrıca dikkat edilmelidir. Diğer taraftan sınır değerlerinde çalıştırılmayan cihazlar için, akım dolayısı ile elektrik devresinde meydana gelebilecek ısı hasarlar göz ardı edilebilir. [99, 100, 102]

3.4.2 Finite element methods magnetics (FEMM) ile ısı analiz

Manyetik alan elde etmek için gerekli olan akım değerinin tespit edilebilmesi için akımı taşıyacak olan iletken tellerin ısı analizinin yapılması gerekmektedir. Yapılacak ısı analiz için tellerin sıcaklığının yalıtım malzemesinin izin verdiği üst değerde kalmasını sağlayacak olan sarım içerisindeki hacimsel ısı üretiminin değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sadece bobin sıcaklığının bilindiği, diğer parametrelerin tespit edilmesinin gerektiği bu problemin çözümü için sonlu elemanlar metodu ve yinelemeli hesaplama yapılması gerekmektedir. Bu amaçla bobin ve içerisinde bulunduğu yapıların ısı transferi analizleri sonlu elemanlar metodu yazılımı olan FEMM [103] ile gerçekleştirilmiştir. FEMM ısı transferi problemlerini aşağıdaki biçimde çözmektedir.

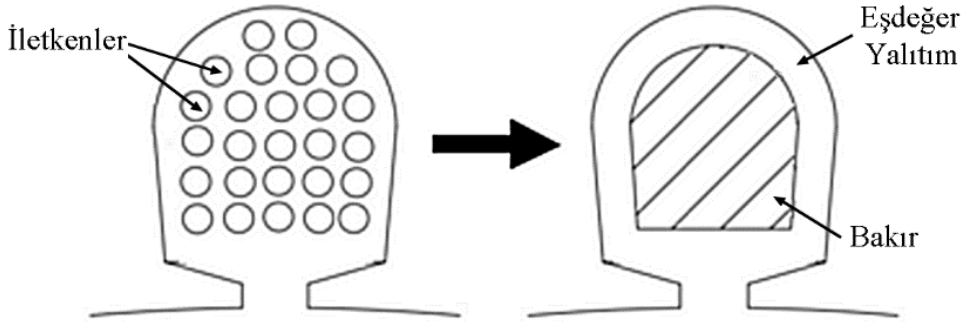
$$\rho c_p \frac{dT}{dt} - \nabla \cdot (k \nabla T) = q \quad (3.24)$$

FEMM yazılımı örtük (implicit) Euler zamanı ayrıştırması şeması kullanmaktadır. Diğer bir ifade ile $n - 1$ anındaki çözüm ile eşitlikler çözülmekte ve n anındaki çözüm bir sonraki aşama için gerekli değer olarak kullanılmaktadır.

$$\rho c_p \left(\frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta t} \right) - \nabla \cdot (k \nabla T_n) = q \quad (3.25)$$

Eşitlik (3.24) ve (3.25)'de kullanılan malzeme özellikleri sırasıyla hacimsel ısı kapasitesi ρc_p ve ısıl iletkenlik k kat sayısıdır. Problemin çözümü hacimsel ısı üretimi q ile gerçekleştirilmektedir. Isı ayrıca sınır tanımlarına bağlı olarak sınırlardan giriş ve çıkış gerçekleştirebilmektedir.

Hem analitik hem de sonlu elemanlar metodu ile ısı transferi analizi yapılacak bobin ve benzeri birden fazla iletken tel ve yalıtım malzemesi içeren sistemlerde geometrilerin basitleştirilmesi tercih edilmektedir [104-108]. Şekil 3.10'da bobin geometrisinin sadeleştirilmesi sonucu elde edilen iletken ve eşdeğer yalıtım malzeme gösterimi verilmiştir. Bobin yuvasına yerleştirilecek olan eşdeğer homojen iletken malzemenin alanı asıl bobinin tel alanı kullanılarak elde edilmekte ve bobin yuvasının geri kalan kısmının ise hava veya yalıtım malzemesi ile kaplı olduğu kabul edilmektedir.



Şekil 3.10 : Eşdeğer yalıtım ve iletken alanı elde edilmesi.

3.4.3 Isı transferi analizi

İzin verilen akım şiddeti ve bobin teli seçiminin cihazın ve bobinin ısıl başarımına etkisi incelenmiştir. Bakırın sahip olduğu yüksek yoğunluk değeri düşünülerek, cihazın hafifletilmesi için bobin haznesinin mümkün olduğunca küçük tutulması gerektiği rahatlıkla anlaşılmaktadır. Diğer bir taraftan yüksek manyetik alan elde etmek için sarım sayısının mümkün olduğunca yüksek tutulması gerekmektedir.

Küçük hazne içerisine yüksek sarımlı bobin yerleştirebilmek için küçük çaplı tel seçimi hem açığa çıkan ısı hem de izin verilen akım şiddeti açısından sorun teşkil edecektir. Geliştirilen tasarımların ısı transferi analizleri aşağıdaki kodsuz algoritma kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Cihazın ölçülerini ve parametrelerini oku

Tel çapı ve sarım sayısı verisini kullanarak tel boyunu ve direncini hesapla

Eşitlik (3.21) ile direnç ısınma ve Eşitlik (3.23) ile hacimsel ısı üretimini hesapla

Isı transferi analizi için gerekli olan katsayıları, Rayleigh, ve Nusselt sayılarını ilgili eşitlikler yardımı ile hesapla

Başlangıç hesaplaması için sadece taşınım ısı transfer katsayılarını hesapla

Do

Sistemin FEMM yazılımı ile ısı transferi analizini gerçekleştir

Cihazın dış yüzey sıcaklığı oku

Taşınım ve ışıma ile gerçekleşen ısı transferi miktarlarını alt, üst, ve dikey plakalar ile ilgili eşitlikleri dikkate alarak güncelle

Genel bir ısı transferi eşitliği elde et.

Taşınım ısı transferi katsayılarını güncelle

While (yüzey sıcaklığındaki hata miktarı 1×10^{-3} değerinin altına inene kadar)

3.5 Bölüm Özeti

Elektro-mıknatısın bünyesindeki malzemelerin fiziksel özellikleri sıcaklığa bağlı değişiklik göstermektedir. Diğer bir ifade ile sıcaklıktaki değişiklikler elektro-mıknatısın başarımını etkilemektedir. Bu nedenden dolayı, manyetik devrenin hesaplanılmasında kullanılan akım, tel tipi, sarım sayısı ve elektro-mıknatısın geometrisi gibi değerlerin tespit edilmesi için, elektro-mıknatısa ait ısı transferi analizlerinin de yapılması gerekmektedir. Bu analizler için bobin sıcaklığı izin verilebilen üst sınır değeri geçemeyecek biçimde seçilmelidir. Elektro mıknatısın geometrisi ve bu geometride kullanılan tel özelliklerine bağlı sisteme verilebilecek en yüksek akım değerinin tespit edilmesi önemli bir husustur. Hem ayırıcı elastik zar ve kartuş modelinde kullanılan hem de PSO tasarımı ile elde edilen elektro mıknatıslara ait ısı analizleri gerçekleştirilerek sisteme verilebilecek en yüksek akım

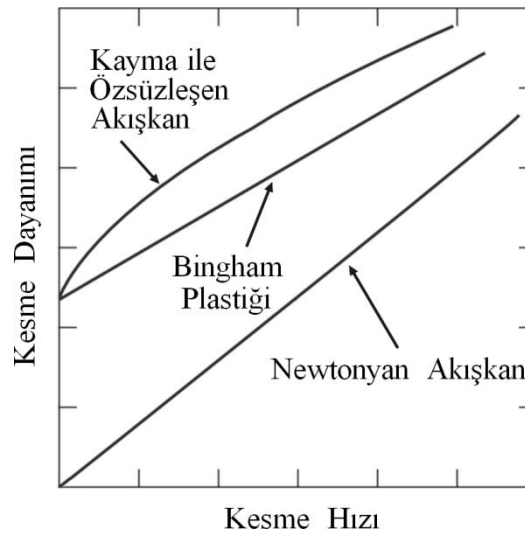
değerleri elde edilmiştir. Bu süreç sırasında ayrıca kullanılması gereken tel tipi de belirlenmiştir.



4. TEPKİ TORKU

MRF cihazlarda harekete direnç gösteren kuvvet, cihazın dönerek çalışan bir cihaz olması durumunda moment oluşturmaktadır. Bu moment MRF cihazların pasif eyleyici olması nedeni ile direnç gösteren tork olarak tanımlanmakta ve sönümleme, frenleme ve güç aktarımı elde edilmesinde kullanılmaktadır. MRF cihazlarda kullanılan akışkanlar, zamandan bağımsız akış davranışı gösteren viskoplastik (ağdalı yoğruk) akışkanlar olarak modellenmektedirler.

Bu akışkanların karakteristik davranışı sahip oldukları akma dayanımına (τ_0) bağlı tanımlanmaktadır. Şekil 4.1’de farklı akışkanlar için kesme hızının akma dayanımına etkisi görülmektedir. Akışkan akma dayanımı eşiği geçildikten sonra şekil değiştirmeye ve akmaya başlamaktadır. Diğer bir ifade ile elastik olarak deformasyona uğrayan malzeme bütün olarak veya katı bir cisim olarak akmaya başlamaktadır. Akma dayanımı geçildiğinde akışkan kesme hızına bağlı olarak doğrusal veya doğrusal olmayan bir eğri izleyerek akma davranışı sergileyecektir. Direnç gösteren tork değerinin elde edilmesinde bu viskoplastik akışkanlara ait model ve eşitlikler kullanılarak hesaplamalar yapılmaktadır.



Şekil 4.1 : Kesme hızına bağlı Newtonyan, Bingham plastiği ve kayma ile özsüzleşen akışkanlara ait kesme dayanımı eğrileri.

4.1 Plastik Modelleri

Viskoplastik akışkanlara ait davranışların elde edilmesinde en sık kullanılan modeller Bingham plastik modeli, Herschel-Bulkley akışkan modeli ve Casson akışkan modelidir. Akma dayanımı olan bir akışkanın kesme hızına bağlı tanımlandığı en basit model Bingham plastik modelidir. Kararlı durumda 1-boyutlu akma dayanımı ilişkisi aşağıdaki Eşitlik (4.1) ve (4.2) ile ifade edilmektedir.

$$\tau_{yx} = \tau_0^B + \mu_B(\dot{\gamma}_{yx}) \quad |\tau_{yx}| > |\tau_0^B| \quad (4.1)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad |\tau_{yx}| < |\tau_0^B| \quad (4.2)$$

Eşitlikte kullanılan τ_0^B ve μ_B model parametreleri, akışkanın gerçek akma gerilmesi göstermesine bakılmaksızın eğri uydurma katsayıları olarak kullanılmaktadır. Bingham plastik eşitliğine üçüncü bir parametre eklenerek kesme hızına bağlı doğrusal olmayan eğri eşitliği ile tanımlanan viskoplastik davranış Herschel-Bulkley akışkan modeli olarak isimlendirilmektedir. Sürekli durumda, Herschel-Bulkley akışkan modeli için 1-boyutlu akma dayanımı Eşitlik (4.3) ve Eşitlik (4.4)'de gösterildiği biçimde tanımlanmaktadır.

$$\tau_{yx} = \tau_0^H + m(\dot{\gamma}_{yx})^n \quad |\tau_{yx}| > |\tau_0^H| \quad (4.3)$$

$$\dot{\gamma}_{yx} = 0 \quad |\tau_{yx}| < |\tau_0^H| \quad (4.4)$$

m ve n parametrelerinin eşitliğe eklenmesi ile yüksek kesme hızlarında deneysel olarak gözlemlenen doğrusal olmayan davranışlar deney verileri ile örtüşürülebilmiştir. Yiyecek endüstrisinde kullanılan sıvıların ve biyolojik sıvıların özellikle kanın modellenmesinde Casson akışkan modeli (Eşitlik (4.5) & (4.6)) kullanılmaktadır.

$$(|\tau_{yx}|)^{1/2} = (|\tau_0^C|)^{1/2} + (\mu_c |\dot{\gamma}_{yx}|)^{1/2} \quad |\tau_{yx}| > |\tau_0^C| \quad (4.5)$$

$$\dot{\gamma}_{yx} = 0 \quad |\tau_{yx}| < |\tau_0^C| \quad (4.6)$$

Casson akışkan modeli çoğunlukla kan, yoğurt, eritilmiş çikolata ve domates püresinin sürekli durumdaki kesme dayanımı – kesme hızı ilişkisini modellemekte kullanılmaktadır. Casson ve Herschel-Bulkley akışkanları kayma ile özdeşleşen

akışkanlardır. Bazı parçacıklı çökeltilerin de akış davranışı bu model ile benzerlikler göstermektedir. Bu modellerin karşılaştırılması ve modellerde yapılan kabullerin detaylı bir incelemesi ayrıca literatürde [109, 110] mevcuttur. Bazı Newtonsal olmayan farklı akışkanlara ait karakteristik ve davranışlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Newtonsal olmayan farklı akışkanlara ait karakteristik ve davranışlar [111].

Akışkan	Karakteristiği	Newtonsal olmayan akış davranışı
Diş macunu	Bingham plastiği	Fırçanın üzerinde şeklini korur, sürülürken sıvı gibi davranır
Delme çamurları	Bingham plastiği	İyi yağlama ve moloz taşıma becerisi
Damlamayan boya	Akışkanlığı hıza bağlı artan	Kutuda kalın, fırçada ince
Oyun hamuru	Viskoelastik (ağdalı esnek)	Sert çarpınca zıplar veya parçalanır, yavaşça uzatılınca akar

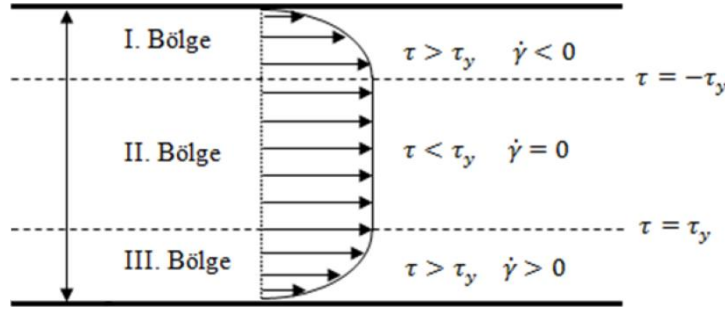
4.1.1 Bingham viskoplastik modeli

MR akışkanlar, manyetik alan etkisi altında Bingham plastiği gibi davranış gösterirken, manyetik alan mevcut değil iken Newtonyan akışkan gibi davranmaktadırlar. Bu davranışı modellemekte kullanılan eşitlikler Eşitlik (4.1), Eşitlik (4.2) eşitlikleri ile veya Eşitlik (4.7) ile tanımlanmaktadır.

$$\tau = \pm\tau_0 + \mu \frac{du}{dy} \quad (4.7)$$

Eşitliklerde kullanılan terimler sırası ile τ_0 manyetik alan bağımlı akma dayanımını, μ viskoziteyi ve $\dot{\gamma}$ veya du/dy olarak da tanımlanan kesme hızını temsil etmektedir. Şekil 4.2’de iki paralel plaka arasındaki yarı kararlı MRF akışı gösterilmiştir. Bu akış, akışkanın MR vanalardaki akışının özelliklerinin saptanmasında kullanılmaktadır. Akışın sadece akma dayanımı eşiğinin geçildiği durumlarda meydana geldiği hatırlanırsa akışın üç farklı bölgede incelenmesinin gerektiği

anlaşılmaktadır. Plaka ile temasın gerçekleştiği bölgelerde akışkan kesme hızına bağlı bir akış gösterirken, orta kısımdaki akışkan akma dayanımı eşiği geçilmediği için kanal içerisinde hareket eden katı veya tıpa benzeri bir akış sergilemektedir.



Şekil 4.2 : İki paralel plaka arasındaki yarı kararlı MRF akışı.

MR vanalardaki akışa ait eşitliğin elde edilmesi için Navier-Stokes eşitliğinin 1 boyutlu akışa indirgenmiş biçimine sınır değerleri eklenerek hız profili elde edilmekte ve momentum eşitliği yardımı ile hız profili ifadesi daha da sade bir biçime indirgenmektedir. Hız profili kullanılarak, basınç gradyanı (eğimi) ifadesi akış oranı ve ortalama hıza bağlı kübik bir eşitlik olarak tanımlanmaktadır. Son olarak kübik eşitliğe ait ifade kapalı biçimde elde edilmektedir.

4.1.1.1 Hız profili

Hız profilini elde etmek için kullanılacak olan Navier-Stokes eşitliğinin bir boyutlu akışa indirgenmiş biçimi Eşitlik (4.8) ile verilmiştir.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (4.8)$$

Momentum eşitliği akışın yatay ve tam gelişmiş bir akış olduğu kabulü ile Eşitlik (4.9)'daki biçime indirgenebilmektedir. [112]

$$\frac{d^2 u}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (4.9)$$

Her bölgedeki kesme oranına bağlı sınır değerleri kullanılarak momentum eşitliğinin integrali alındığında aşağıdaki kesme oranına karşılık gelen eşitlikler elde edilmektedir.

$$\frac{du}{dy}(h_a) = 0 \quad 0 \leq y \leq h_a \quad (4.10)$$

$$\frac{du}{dy} = 0 \quad h_a \leq y \leq h_b \quad (4.11)$$

$$\frac{du}{dy}(h_b) = 0 \quad h_b \leq y \leq h \quad (4.12)$$

Üçüncü bölgedeki kesme oranının (Eşitlik (4.11)) sıfır olduğuna dikkat etmek gerekmektedir. Birinci ve ikinci bölgedeki kesme oranları hesaplanırken yukarıdaki Eşitlik (4.10) ve Eşitlik (4.12)'deki eşitlikler kullanılacaktır.

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} (y - h_a) \quad 0 \leq y \leq h_a \quad (4.13)$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} (y - h_b) \quad h_b \leq y \leq h \quad (4.14)$$

Her bir bölgedeki hız ifadesi ise, kesme hızları ve Eşitlik (4.15), (4.16), ve (4.17) ile verilen sınır değerleri kullanılarak y değişkenine göre tümlen alınması ile bulunmaktadır.

$$u(0) = 0 \quad 0 \leq y \leq h_a \quad (4.15)$$

$$u = u_p \quad h_a \leq y \leq h_b \quad (4.16)$$

$$u(h) = 0 \quad h_b \leq y \leq h \quad (4.17)$$

Birinci ve ikinci bölgelerdeki hız profilleri Eşitlik (4.13) ve Eşitlik (4.14) kullanılarak aşağıdaki ifadelere dönüşecektir.

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y(y - 2h_a) \quad 0 \leq y \leq h_a \quad (4.18)$$

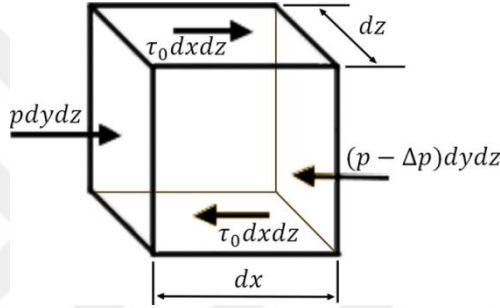
$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} [(y^2 - h^2) - 2h_b(y - h)] \quad h_b \leq y \leq h \quad (4.19)$$

4.1.1.2 Tampon geometrisi

Hız profiline ait ifadenin elde edilebilmesi için h_a , h_b , ve u_p parametrelerine ait ifadelerin tespit edilmesi gerekmektedir. Şekil 4.2 incelendiğinde tamponun hız profilinin (Eşitlik (4.20)), Eşitlik (4.18)'de $y = h_a$ veya Eşitlik (4.19)'da $y = h_b$ yazılarak elde edilebileceği görülmektedir.

$$u_p = -\frac{h_a^2}{2\mu} \frac{dp}{dx} \quad (4.20)$$

Tampon kalınlığını $\delta = h - (h_a + h_b)$ tanımlayan bir ifade elde etmek için tampona etki eden kuvvetlere ait denge eşitliğini yazılması gerekmektedir.



Şekil 4.3 : Tampon bölgedeki diferansiyel akışkan elemanın üzerindeki kuvvet dengesi.

Şekil 4.3'de resmedilmiş olan tampon bölgedeki diferansiyel akışkan elemanın üzerindeki kuvvet dengesi Eşitlik (4.21)'de yazılmıştır.

$$\Delta p dy dz = -2\tau_0 dx dz \quad (4.21)$$

Kesme gerilmesine bağlı saat yönünde gerçekleşen dönme hareketi pozitif olarak kabul edilmiştir [57]. Eşitlik (4.21) tekrar düzenlenirse,

$$\frac{dp}{dx} \delta = -2\tau_0 \quad (4.22)$$

eşitliğinden tampon kalınlığı Eşitlik (4.23)'deki gibi elde edilir.

$$\delta = h_b - h_a = -\frac{2\tau_0}{dp/dx} \quad (4.23)$$

Akış profilindeki simetriklikten dolayı $h_b = h - h_a$ eşitliği kullanılarak Eşitlik (4.23)'den tampon geometrisi elde edilir.

$$h_a = \frac{h}{2} + \frac{\tau_0}{p/dx} \quad (4.24)$$

$$h_b = \frac{h}{2} - \frac{\tau_0}{dp/dx} \quad (4.25)$$

Elde edilen eşitlikler ve bilinen parametlerden faydalanılarak, hız profili eşitlikleri Eşitlik (4.26) ve Eşitlik (4.27) ile tanımlanmaktadır.

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y(y-h) - \frac{\tau_0}{\mu} y \quad 0 \leq y \leq h_a \quad (4.26)$$

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y(y-h) + \frac{\tau_0}{\mu} (y-h) \quad h_b \leq y \leq h \quad (4.27)$$

Benzer biçimde tampona ait hız eşitliği ise Eşitlik (4.28)'de verilmiştir.

$$u_p = -\frac{1}{8\mu} \frac{dp}{dx} h^2 - \frac{\tau_0}{2\mu} \left(h + \frac{\tau_0}{(dp/dx)} \right) \quad (4.28)$$

Ortalama hız ifadesinin elde edilebilmesi için iki plaka arasında tanımlı olan hız profillerinin tümlevlerinin alınması gerekmektedir.

$$u_m = \frac{1}{h} \int_0^h u dy = \frac{1}{h} \left[\int_0^{h_a} u dy + \int_{h_a}^{h_b} u dy + \int_{h_b}^h u dy \right] \quad (4.29)$$

Akış profilindeki simetrikliği ifade eden $h_b = h - h_a$ eşitliği ile Eşitlik (4.29), Eşitlik (4.30)'daki biçimi alacaktır.

$$u_m = \frac{1}{h} \left[\frac{1}{3\mu} \frac{dp}{dx} (4h_a^3 - 3h_a^2 h) - \frac{\tau_0}{\mu} h_a^2 \right] \quad (4.30)$$

Eşitlik (4.24) kullanılarak, ortalama hız ifadesindeki h_a ve h_b değişkenlerinin yer almadığı bir ifade elde edilir.

$$u_m = -\frac{1}{12\mu} \frac{dp}{dx} h^2 - \frac{1}{4\mu} h \tau_0 + \frac{1}{3\mu h} \frac{\tau_0^3}{(dp/dx)^2} \quad (4.31)$$

Basınç eğrisine ait ifade, τ_0 ve u_m bilinmesi durumunda üçüncü dereceden bir eşitlik olan Eşitlik (4.32)'ye dönüşmektedir.

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)^3 + \left(\frac{12u_m\mu}{h^2} + \frac{3\tau_0}{h}\right)\left(\frac{dp}{dx}\right)^2 - \frac{4\tau_0^3}{h^3} = 0 \quad (4.32)$$

Ortalama hız için elde edilen Eşitlik (4.31)'de $\tau_0 = 0$ yazılması durumunda eşitlik Newtonyan akış ifadesine dönüşecektir.

$$\frac{dp}{dx_N} = -\frac{12u_m\mu}{h^2} \quad (4.33)$$

Kritik basınç düşümü ifadesi, tamponun iki plaka arasındaki tüm boşluğu kapladığının kabul edildiği durumu temsil etmekte ve bu kabule bağlı olarak aşağıdaki biçimde tanımlanmaktadır.

$$\frac{dp}{dx_C} = -\frac{2\tau_0}{h} \quad (4.34)$$

Plakalar arasında akışın gerçekleşebilmesi için Eşitlik (4.35)'deki şartın sağlanması gerekmektedir.

$$\frac{dp}{dx} \geq \frac{dp}{dx_C} \quad (4.35)$$

4.1.1.3 Basınç gradyanı çözümünün kapalı biçimi

Basınç eğrisine ait üçüncü dereceden eşitliğin çözülebilmesi için Newtonyan akışa bağlı normalleştirme yapılması gerekmektedir.

$$\left(\frac{dp/dp}{dx/dx_N}\right)^3 - \left(1 + \frac{3\tau_0 h}{12u_m\mu}\right)\left(\frac{dp/dp}{dx/dx_N}\right)^2 + 4\left(\frac{\tau_0 h}{12u_m\mu}\right)^3 = 0 \quad (4.36)$$

Aşağıdaki boyutsuz parametreler cinsinden Eşitlik (4.36)'nın tekrar yazılması ile,

$$\mathcal{P} = -\frac{dp}{dx} \frac{h^2}{12u_m\mu} \quad (4.37)$$

$$\mathcal{T} = \frac{\tau_0 h}{12u_m \mu} \quad (4.38)$$

Philips [57] tarafından ilk literatüre kazandırıldığı biçim olan Eşitlik (4.39) elde edilecektir.

$$\mathcal{P}^3 - (1 + 3\mathcal{T})\mathcal{P}^2 + 4\mathcal{T}^3 = 0 \quad (4.39)$$

Yukarıdaki eşitliğin kapalı biçim çözümünün elde edilmesi Gavin [113] tarafından detaylı biçimde yapılmıştır.

$$\mathcal{P} = x - \lambda \quad (4.40)$$

Eşitlik (4.40)'da verilen dönüştürme işlemi ile aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

$$\lambda = -\frac{1 + 3\mathcal{T}}{3} \quad (4.41)$$

Bu sayede ikinci dereceden olan terim kaybolmakta ve x 'e bağlı çokterimli aşağıdaki Eşitlik (4.42) elde edilmektedir.

$$x^3 - \frac{1}{3}(1 + 3\mathcal{T})^2 x + 4\mathcal{T}^3 - \frac{2}{27}(1 + 3\mathcal{T})^3 = 0 \quad (4.42)$$

Yukarıdaki çokterimli eşitliğin katsayıları aşağıdaki biçimde sadeleştirilebilir.

$$a = -\frac{1}{3}(1 + 3\mathcal{T})^2 \quad (4.43)$$

$$b = 4\mathcal{T}^3 - \frac{2}{27}(1 + 3\mathcal{T})^3 \quad (4.44)$$

En sade hali ile çokterimli ifade Eşitlik (4.45)'de görülmektedir.

$$x^3 - ax + b = 0 \quad (4.45)$$

Yukarıdaki biçimde iken eşitlik trigonometrik bir eşitliğe dönüştürülerek, her zaman bir çözüm elde edilebilmektedir [114].

$$4\cos^3\theta - 3\cos\theta - \cos(3\theta) \equiv 0 \quad (4.46)$$

$x = m\cos\theta$ yazılması ile eşitlik

$$m^3 \cos^3 \theta + am \cos \theta + b \equiv 4 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta - \cos(3\theta) \equiv 0 \quad (4.47)$$

biçimini almakta ve Eşitlik (4.45) ile tanımlanan eşitliği her zaman sağlamaktadır.

$$\frac{4}{m^3} = -\frac{3}{am} = \frac{-\cos(3\theta)}{b} \quad (4.48)$$

Buna bağlı olarak,

$$m = 2\sqrt{-\frac{a}{3}} \quad (4.49)$$

ve

$$\cos(3\theta) = \frac{3b}{am} \quad (4.50)$$

ifadeleri elde edilmektedir. Eşitlik (4.49) ve Eşitlik (4.50) ile ifade edilen m ve θ için aşağıdaki eşitlikler yazılabilmekte

$$m = \frac{2}{3}(1 + 3\mathcal{T}) \quad (4.51)$$

$$\theta = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(1 - \frac{54\mathcal{T}^3}{(1 + 3\mathcal{T})^3} \right) \quad (4.52)$$

ve buna bağlı olarak x için aşağıdaki Eşitlik (4.53) elde edilmektedir.

$$x = \frac{2}{3}(1 + 3\mathcal{T}) \cos \left[\frac{1}{3} \arccos \left(1 - \frac{54\mathcal{T}^3}{(1 + 3\mathcal{T})^3} \right) \right] \quad (4.53)$$

Dönüştürme işlemi ile \mathcal{P} 'nin (boyutsuz basınç gradyeni) \mathcal{T} 'ye (boyutsuz akma gerilmesi) bağlı eşitliği elde edilir.

$$\mathcal{P}(\mathcal{T}) = \frac{2}{3}(1 + 3\mathcal{T}) \left\{ \cos \left[\frac{1}{3} \arccos \left(1 - \frac{54\mathcal{T}^3}{(1 + 3\mathcal{T})^3} \right) \right] + \frac{1}{2} \right\} \quad (4.54)$$

Yukarıdaki eşitlik boyutsuz basınç gradyeninin, boyutsuz akma gerilmesi cinsinden ifade edildiği çözümü vermektedir. Bu eşitlik kullanılarak iki plaka arasındaki basınç düşüşü ifadesi plakalar arası mesafe ve plaka boyu cinsinden aşağıdaki biçimi almaktadır [46, 54, 61, 115].

$$\Delta P_{\tau} = \frac{12\mathcal{P}u_m\mu}{h^2}L_{mr} \quad (4.55)$$

Makris ve arkadaşları [116] tarafından, basınç düşümü için elde edilmiş olan ifade Eşitlik (4.56)'da sunulmuştur.

$$\Delta p = \frac{12v_0LQ}{\pi dh^2} \left(1 - 3 \frac{\tau_y L}{\Delta p h} + 4 \left(\frac{\tau_y}{\Delta p} \right)^3 \left(\frac{L}{h} \right)^3 \right)^{-1} \quad (4.56)$$

Eşitlik (4.55)'e ait basınç düşümü eşitliğinin kubik biçimi yukarıda Eşitlik (4.56) olarak tekrar yazılmıştır. Yukarıdaki kubik eşitlik, Eşitlik (4.39)'un farklı bir biçimde yazılmış halidir ve matematik kitaplarında çözümü mevcuttur. [117, 118]

$$\Delta p^3 - \left(3\tau_y \frac{L}{h} + \frac{12v_0LQ}{\pi dh^2} \right) \Delta p^2 + 4\tau_y^3 \left(\frac{L}{h} \right)^3 = 0 \quad (4.57)$$

Eşitlik (4.55) veya Eşitlik (4.57) gibi eşitlikler kullanılarak elde edilen, vana modunda çalışan MR sıvı cihazlarına ait basınç düşümü ifadesi Eşitlik (4.58) ile verilmektedir. Bu eşitlik, taşıyıcı sıvının viskozitesinden kaynaklanan basınç düşümü ifadesi ve manyetik alan tarafından kontrol edilen akma dayanımına bağlı basınç düşümü ifadelerinin toplamı şeklinde yazılmaktadır.

$$\Delta P_{valve} = \Delta P_{\tau} + \Delta P_{\mu} = \frac{c\tau L_{mr}}{g} + \frac{12\mu Q L_{mr}}{g^3 w} \quad (4.58)$$

Yukarıdaki (4.58) numaralı eşitlikte $2 < c < 3$ aralığında değerler alan deneysel olarak belirlenmiş katsayı, manyetik alan şiddetini temsil etmektedir [119]. Manyetik etkiye bağlı elde edilen basınç düşümünün viskoz etkinin 100 katı veya daha fazlası olması durumunda c değeri 3 olarak kabul edilmektedir.

4.1.1.4 Silindirik ve doğrusal olmayan kanallar

İki plaka arasındaki MR sıvısına ait basınç düşüm eşitliği (Eşitlik (4.58)), akışın dairesel bir kanal içerisinde gerçekleşmesi durumunda aşağıdaki biçimi almaktadır.

$$\Delta P_{valve} = \Delta P_{\tau} + \Delta P_{\mu} = \frac{c\tau_{mrf}L_{fc}}{d_{fc}} + \frac{8\mu Q_{fc}L_{fc}}{\pi \left(\frac{d_{fc}}{2} \right)^4} \quad (4.59)$$

Eşitlik (4.59)'da silindirik kanaldaki akış debisi Q_{fc} , silindirik akış kanal boyu L_{fc} , ve silindirik akış kanalı çapı d_{fc} ile tanımlanmıştır [51]. Zamandan bağımsız akışkanların aksel simetrik olmayan kanallardaki katmanlı (laminer) akışı için analitik çözüm mümkün değildir [120]. Bu tür problemler arasında kare, dikdörtgen, üçgen ve benzeri boru geometrileri mevcuttur ve kesin çözüm için sayısal yöntemlerden faydalanılmaktadır [121-125].

Hidrolik çap

Kesit alanı dairesel olmayan borularda, boru iç çapı için Eşitlik (4.60) ile verilen ifade kullanılmaktadır.

$$d_e = \frac{4(\pi d_i^2/4)}{\pi d_i} = d_i \quad (4.60)$$

Eşdeğer çap veya hidrolik çap olarak tanımlanan d_e , kesit alanın dört katının, akışın gerçekleştiği kanal içindeki ıslak çevreye bölünmesi ile elde edilmektedir. [111]

Dirsek akış

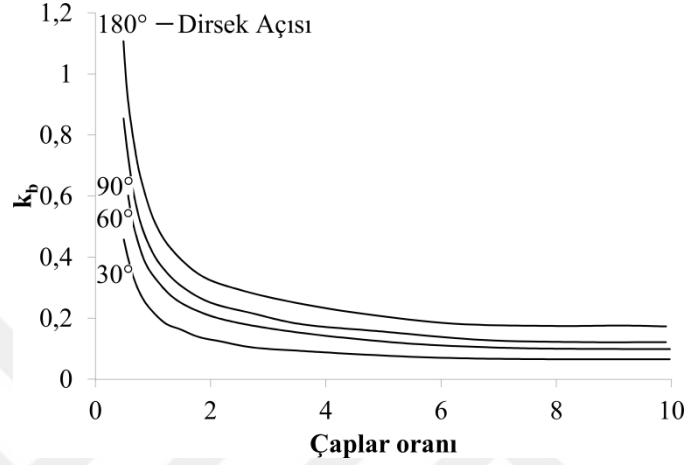
Newtonyan veya Newtonyan olmayan sıvıların eğri borulardaki akışı iki grup olarak incelenmektedir. Bu gruplandırma, eğri yarıçapının boru yarıçapına oranına göre yapılmaktadır. Küçük yarıçaplı ($R/r_i < 6$) eğrilik durumlarında, akış geometrisinden kaynaklanan yerel dirençler ve sürtünme dirençleri basınç düşüşüne sebebiyet vermektedir [126]. Büyük yarıçaplı ($R/r_i \geq 6$) eğriliklerde ise basınç düşüşü sürtünme direncine bağlı olarak değişmektedir [127]. Sürtünme direnci ise akışın laminar veya burgaçlı (türbülanslı) akış olmasına bağlı olarak Dean sayısından yararlanılarak bulunmaktadır. [128] Tek fazlı eğri akışlardaki basınç düşümü ifadesi aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\Delta P = \frac{1}{2} f_s \rho u^2 \frac{\pi R}{r_i} \frac{\theta}{360^\circ} + \frac{1}{2} k_b \rho u^2 \quad (4.61)$$

Yukarıdaki (4.61) numaralı eşitlikte, f_s düz borudaki Moody sürtünme katsayısını, ρ akışkan yoğunluğunu, u akışa ait ortalama hız değerini, R eğrilik, r_i boru yarıçapını, θ eğrilik açısını ve k_b eğrilik kayıp katsayısını ifade etmektedir. Laminer akışlar için

Moody sürtünme katsayısı $f_s = 64/Re$ değerini almaktadır. Eğrilik kayıp katsayısı Şekil 4.4'den yararlanılarak elde edilmektedir [129]. Eğri boru içerisindeki akış ayrıca, Dean sayısı De ile de tanımlanabilmektedir [130].

$$De = \left(2 \frac{r_i u \rho}{\mu}\right) \left(\frac{r_i}{R}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.62)$$



Şekil 4.4 : Farklı dirsek açıları ve eğrilik için kayıp katsayısı değerleri [131].

Bingham akışkanı için eğri akışlarda kullanılan boyutsuz ifadelerin başında, akma dayanımının belirleyici değişken olduğu Hedström sayısı gelmektedir.

$$He = \frac{D^2 \rho \tau_{yield}}{\mu_B^2} \quad (4.63)$$

Akış kanalı çapının D ile ifade edildiği diğer bir boyutsuz sayı ise Bingham sayıdır.

$$Bi = \frac{D \tau_{yield}}{\mu_B u} \quad (4.64)$$

Bingham akışkanları için Reynolds sayısı ise aşağıdaki biçimde tanımlanmaktadır.

$$Re_B = \frac{D \rho v}{\mu_B} \quad (4.65)$$

Yukarıdaki (4.63), (4.64), ve (4.65) numaralı eşitlikler ile tanımlanmış olan boyutsuz sayıların kullanıldığı ve Buckingham-Reiner eşitliği ile elde edilen sürtünme katsayısı aşağıda verilmiştir.

$$\lambda = \frac{64}{Re_B} \left[1 + \frac{He}{6Re_B} - \frac{64}{3} \left(\frac{He^4}{\lambda^3 Re_B^7} \right) \right] \quad (4.66)$$

Yukarıdaki eşitliğin yineleme gerektirmeyen çözümü aşağıdaki Eşitlik (4.67) ile gösterilen biçimi almaktadır [132]. Akışın laminer kabul edilebilmesi için Reynolds sayısının düşük olması, Reynolds sayısının sınır değerden küçük olması durumlarda ise Hedström sayısının yüksek ($>10^4$) değerlere sahip olması gerekmektedir.

$$\lambda_{analytik} = \frac{64}{Re_B} + \frac{10,67 + 0,1414(He/Re_B)^{1,143}}{[1 + 0,0149(He/Re_B)^{1,16}]Re_B} \left(\frac{He}{Re_B} \right) \quad (4.67)$$

4.2 Peristaltik Akış Direnci

Literatürde karşılaşılan sönümleyici ve pompaların birlikte kullanıldığı tasarımlarda sönümleyicilerin kullanılmasındaki asıl amaç MRF akışının sürekliliğini sağlamak olarak özetlenebilir. Diğer tasarımlarda sistem içerisinde pompa ve sönümleyici bulunmakta fakat pompa sadece sönümleyiciyi MRF ile beslemekte veya sönümleyiciden bağımsız çalışmaktadır. Yazılı eserler arasında peristaltik hareket ve peristaltik pompaları ile birlikte MRF kullanımı araştırılmıştır. Peristaltik pompalar çalışma sırasında akışkan ile pompanın mekanik aksamalarını ayrı tuttuğu için MR akışkanının taşınması için tercih edilmektedir. MR akışkanının taşınması özellikle cam yüzeylerinin nano ölçekte parlatılması amacıyla kullanılmaktadır.

Akışkan taşıma sistemleri incelendiğinde MRF taşıyabilecek ve bu süreç sırasında en az zarar görebilecek cihazların yer değiştirme pompaları olarak da bilinen diyafram pompası, peristaltik pompa ve bükülgen çark olduğu tespit edilmiştir. Yapılan patent ve akademik yazılı eser incelemesi sonrasında bu taşıyıcıların MRF ile kullanılma nedeninin sadece akışkanın taşınması olarak sınırlandırıldığı tespit edilmiştir.

Peristaltik pompalar çeşitli akışkanların pompalanmasında kullanılan pozitif yer değiştirmeli bir pompa türüdür. Rotorla bağlı merdane veya merdanelerin esnek boruyu sıkıştırarak yuvarlanması sonucu esnek boru içerisindeki akışkanın akmaya zorlanması biçiminde çalışmaktadır. Elastik boru içerisinde akmaya zorlanan akışkan, merdanelerin diğer tarafında oluşan vakum etkisi ile de elastik boru içerisine tekrar dolmaktadır. Akışkanı taşıyan borunun yaptığı bu hareket, sağınım (peristaltis) olarak isimlendirilmekte ve pek çok biyolojik sistemdeki mide-bağırsak kanalının

çalışmasını temsil etmektedir. Peristaltik bir pompanın çalışma prensibini gösteren şematik çizim Şekil 4.5’de verilmiştir.

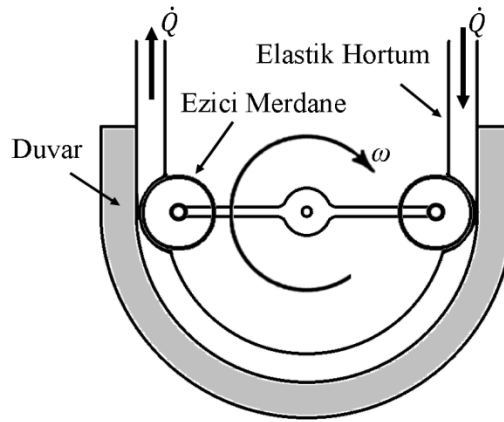
Peristaltik pompaların sağladığı avantajlar ve dezavantajlar aşağıda sıralanmıştır.

Avantajlar:

- Pompa akışkana temas etmez.
- Az bakım gerektirir.
- Çamurumsuları, viskoz akışkanları, kesme hassasiyeti olan sıvıları, ve agresif sıvıları pompalayabilir.
- Geri akışa izin vermez.

Dezavantajlar:

- Elastik borunun aşınmaya bağlı değiştirilmesi gerekmektedir.
- Akış darbeleri gerçekleşmektedir.



Şekil 4.5 : Peristaltik bir pompanın çalışma prensibini gösteren şematik çizim.

4.2.1 Sönümlenme momenti

Peristaltik pompalarda rotorda oluşacak direnç torku aşağıdaki biçimde elde edilebilmektedir. Kanal içerisinde laminer akış kabulü yaparak, hacimsel akış oranı q , Poiseuille kanunu kullanılarak,

$$q = \frac{\Delta p}{32 \mu L} \frac{\pi d^4}{4} \quad (4.68)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Eşitlik (4.68)'de kanal boyu $L = 2\pi R$, olarak tanımlanmıştır. Elastik haznenin ortasından geçtiği kabul edilen eğrinin yarıçapı R ile ifade edilmiştir. Akış sırasında sürtünmelere bağlı harcanan güç,

$$P_f = q \Delta P \quad (4.69)$$

eşitliği ile, tekeri döndüren güç eşitliği ise,

$$P_r = c_{min} \omega^2 \quad (4.70)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. Hacimsel debi eşitliği,

$$Q = v A_s = (\omega R) \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \quad (4.71)$$

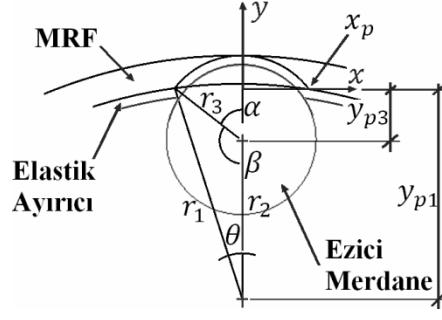
kullanılarak açısal hızı (ω) ait ifade yazılabilir. Enerjinin korunumu kanunundan ve Eşitlik (4.70) ve Eşitlik (4.71)'den yararlanılarak, en düşük torksal sönümleme katsayısı,

$$c_{min} = \frac{Q \Delta P}{\left(\frac{4q}{\pi R d^2} \right)^2} = 16\pi^2 \mu R^3 \quad (4.72)$$

şeklinde elde edilecektir [133].

4.3 Döner Peristaltik MRF Cihazın Tepki Torku

Sağınımlı hareket elde etmek için kullanılan ezici merdanelerden dolayı akış kanalının tamamı MR akışkanı ile dolu değildir. MRF doluluk oranının elde edilmesi için ezici merdanelerin ve ezici merdaneleri saran elastik ayırıcıların akış kanalında kapladıkları hacmin tespit edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.6 : MRF'in kapladığı hacmin hesaplanılmasında kullanılan değişkenler.

MRF'in kapladığı hacmin hesaplanmasında kullanılan değişkenler Şekil 4.6'da verilmiştir. Değişkenler akış kanalının, ezici merdane tarafından itilen elastik ayırıcının kesiştiği x_p noktası yatay eksen üzerinde olacak şekilde seçilmiştir. Ezici merdane merkezi ile akış kanalı iç çemberinin yatay eksene uzaklıkları ise y_{p3} ve y_{p1} mesafeleri ile temsil edilmiştir. İki çemberin merkezleri arasında oluşan üçgenin kenarları r_1 , r_2 , ve r_3 şeklinde tanımlanmıştır. Ayrıca üçgen üzerinde oluşan açılar α , β , ve θ değişkenleri ile ifade edilmiştir. Kosinüs kanunundan faydalanılarak Eşitlik (4.73) ile θ açısına ait ifade elde edilmiştir.

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{r_1^2 + r_2^2 - r_3^2}{2r_1r_2} \right] \quad (4.73)$$

Benzer şekilde Sinüs kanunundan faydalanılarak Eşitlik (4.74) ile β açısına ait ifade elde edilmiştir.

$$\beta = \sin^{-1} \left[\frac{r_1}{r_3} \sin(\theta) \right] \quad (4.74)$$

Elde edilen β ve θ açıları ile α açısı hesaplanmaktadır.

$$\alpha = \pi - \beta \quad (4.75)$$

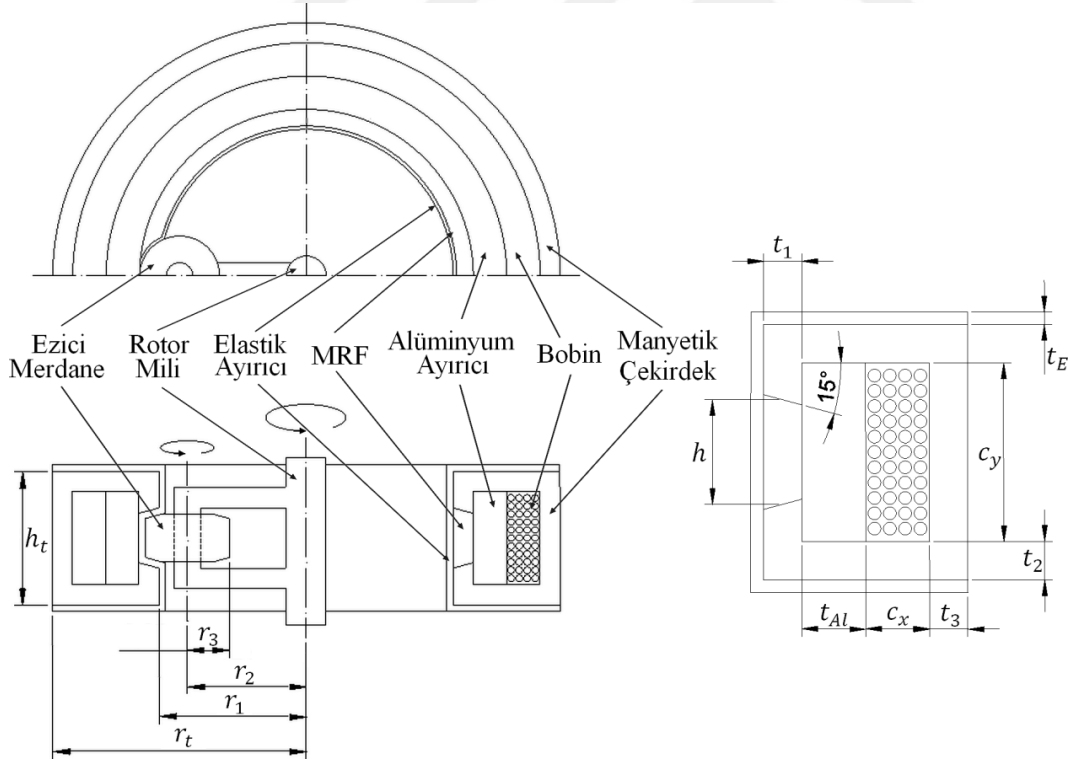
Ezici merdane tarafından itilen elastik ayırıcının yatay eksenini kestiği x_p noktası α açısı kullanılarak elde edildikten sonra her iki çemberin arasında kalan alan aşağıdaki integral yardımı ile hesaplanılmaktadır.

$$Alan = \int_0^{x_p} \left\{ \left[\sqrt{(r_3^2 - x^2)} - y_{p3} \right] - \left[\sqrt{(r_1^2 - x^2)} - y_{p1} \right] \right\} dx \quad (4.76)$$

Eşitlik (4.76) ile elde edilen alanın iki katı alındıktan sonra ezici merdane sayısı ile çarpılmakta ve bu sayede akış kanalı içerisindeki MRF hacmi (V_{MRF}) elde edilmektedir. Tepki torku eşitliği (Eşitlik (4.77)) ezici merdanelerin olmadığı biçimde tekrar yazılırsa döner sağınmımlı MRF cihazlar için aşağıdaki tepki torku eşitliği elde edilir.

$$T_{flow} = \frac{3r_2V_{MRF}}{h} \left[\frac{4\eta Q}{th^2} + \tau_{yield}(H) \right] \quad (4.77)$$

Tepki torku hesaplamasında kullanılan geometrik parametreler Şekil 4.7’de verilmiştir. Bu geometrik parametreler sırası ile toplam yarıçap (r_t), cihaz iç yarıçapı (r_1), ezici merdane merkez çemberi yarıçapı (r_2), ezici merdane yarıçapı (r_3), akış kanalı yüksekliği (h), akış kanalı genişliği (t_1), manyetik çekirdek taban kalınlığı (t_2), manyetik çekirdek dış duvar kalınlığı (t_3), bobin genişliği (c_x), bobin yüksekliği (c_y), elastik hazne kalınlığı (t_E), alüminyum ayırıcı genişliği (t_{Al}), ve cihazın toplam yüksekliği (h_t) şeklindedir.



Şekil 4.7 : Döner peristaltik MRF frenin şematik kesit görünüşü ve geometrik parametreleri.

Sayısal yöntemlerle hesaplanan manyetik akı yoğunluklarına karşılık gelen manyetik alan yoğunlukları ve bu değerlere karşılık gelen kesme gerilmesi değerleri EkB'deki grafiklerden elde edilerek tepki torqu hesaplamalarında kullanılmıştır.

4.4 Zaman Sabiti

Birinci dereceden sistemlerin başarımlarının belirlenebilmesi için basamak girişe verdikleri cevabın incelenmesi gerekmektedir. Sıfırları olmayan birinci dereceden bir sisteme ait transfer fonksiyonu, Eşitlik (4.78)'de verilmiştir.

$$G(s) = \frac{a}{(s + a)} \quad (4.78)$$

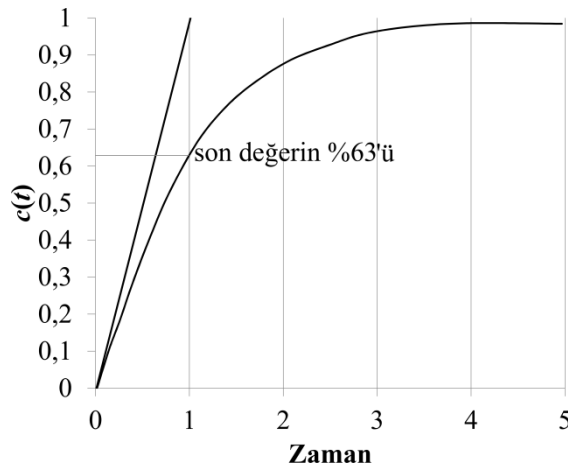
Laplace uzayında sistemin basamak girişe $R(s) = 1/s$ cevabı,

$$C(s) = R(s)G(s) = \frac{a}{s(s + a)} \quad (4.79)$$

biçiminde olacaktır. Basamak cevabının ters Laplace dönüşümü alınırsa, sistemin zamana bağlı cevabının matematiksel karşılığı olan eşitlik elde edilecektir.

Basamak girişe tepkinin zaman sabiti $1/a$ olarak ifade edilmektedir. Zaman sabiti e^{-at} değerinin başlangıç değerinin %37'sine düşmesi için geçen zaman olarak tanımlanmaktadır. Farklı bir anlatım ile zaman sabiti, basamak cevabın değerinin %63'üne ulaştığı süre (Şekil 4.8) olarak da tanımlanmaktadır [134].

$$c(t) = c_f(t) + c_n(t) = 1 - e^{-at} \quad (4.80)$$



Şekil 4.8 : Zaman sabiti.

MR akışkanlı cihazlarda ataletsel etkilerin az olduğu veya cihazın hafif olduğu durumlarda, cihazın zaman sabiti büyük oranda elektro-manyetik devre tarafından belirlenmektedir [135]. Bu durumda ataletsel etkilerin olmadığı birinci dereceden sistemler için kullanılan zaman sabiti ifadesi, MRF cihazının tepki süresi hakkında yaklaşık bir değer elde etmek için kullanılabilir. MRF cihazlarda manyetik alan elde etmek için kullanılan bobinler, indüktans L ve direncin R seri bağlandığı elektrik devreleri olarak modellenmektedirler. Kontrol sistemlerinde LR seri devresi olarak bilinen bobinlere ait transfer fonksiyonu ikinci Kirchoff'un kanunu kullanılarak aşağıdaki biçimde elde edilmektedir.

$$V(t) = V_R + V_L = 0 \quad (4.81)$$

Direncin üzerindeki voltaj düşümü V_R , Ohm kanunundan

$$V_R = IR \quad (4.82)$$

şeklinde elde edilir. Benzer biçimde indüktans üzerindeki voltaj düşümü ise aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (4.83)$$

Eşitlik (4.81) tekrar yazılarak tüm devre üzerindeki voltaj düşümü ifadesi elde edilebilir. Bu eşitlik birinci dereceden bir diferansiyel eşitliktir. Çözümü (Eşitlik (4.84)) ise her hangi bir andaki LR seri devresindeki akım değerini vermektedir.

$$I(t) = \frac{V}{R} (1 - e^{-Rt/L}) \quad (4.84)$$

LR seri devresinin birinci dereceden bir sistem olduğu için zaman sabiti aynı birinci dereceden sistemlerde tanımlandığı gibi L/R değerini almaktadır. Devrenin direnç R değerinin hesaplanabilmesi için tel boyu, çapı ve malzemesi gibi değerler yeterli olurken, indüktans L değerinin hesaplanabilmesi için aşağıdaki eşitlikten faydalanılmaktadır.

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad (4.85)$$

Diğer bir ifade ile indüktans, genel olarak manyetik akının manyetik akıyı oluşturan akıma oranı olarak tanımlanmaktadır. Fakat indüktansın bobinin geometrisinden ve aracı malzemenin manyetik geçirgenliğinden etkilendiği unutulmamalıdır. [136] Indüktans değerinin hesaplamasında kullanılan ve bobin geometrisi ile manyetik geçirgenliğin de dahil edildiği eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$L = \frac{N^2}{R_g} = \frac{\mu_0 A_c N^2}{l_g} \quad (4.86)$$

Eşitlik (4.86)'de, manyetik devredeki açıklıktan kaynaklanan direnç R_g , sarım sayısı N , manyetik çekirdek alanı A_c , ve açıklığın mesafesi l_g olarak tanımlanmıştır. Indüktansın hesaplanmasında açıklık, en yüksek manyetik akı değerini etkilediği için belirleyici olmaktadır. [137]

Kikuchi ve ark. geliştirdikleri 50 μm boşluklu çok diskten oluşan kompakt MRF kavramasında 6 N.m tepki torkunu 20 ms gibi hızlı bir tepki süresi ile gözlemlenmişlerdir [75]. Blake ve ark. [70] geliştirdikleri küçük ve büyük MRF frenlerde 67 ms ve 100 ms gibi tepki süreleri ölçmüşlerdir. Grunwald ve ark. [51] vana modunda çalışan bir MRF cihaz için 150 ms ve 200 ms aralığında tepki süresi değerleri elde etmişlerdir. Guo ve ark. [66] ürettikleri kavrama ve fren görevi gören MRF cihaz için 100 ms gibi bir tepki süresi raporlamışlardır. Literatürdeki diğer zaman sabitleri ise Nam [138] tarafından 33 ms, Senkal [81] tarafından 60 ms, Guo [82] tarafından 25 ms ve Rossa [63] tarafından 50 ms olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, sistemlerin tepki süreleri sistem bileşenlerine bağlı olarak 20 ms ile 200 ms aralığında değerler almaktadır [86].

4.5 Parametrik Histerezis Modelleri

MRF cihazların histerezis davranışları matematiksel olarak ifade edebilmek için çeşitli modeller sunulmuştur. Bu modeller arasında en çok kullanılanlar Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Histerezis modeller.

Evrimsel modeller	Cebirsel Modeller
General Bouc–Wen	Kwok
Modified Bouc–Wen	Cebirsel
Voltage-dependent modified Bouc–Wen	Modifiye edilmiş Cebirsel
Modified Dahl	
Modified LuGre friction	

Mevcut modeller kullanılarak geliştirilen kontrol algoritmalarında MRF cihazlara has özelliklerin en iyi biçimde kullanılabilmesi amaçlanılmaktadır. Kullanılan parametrik modeller iki gruba ayrılmaktadırlar. Histerezis davranış bir grupta adi diferansiyel eşitlikler ile tanımlanırken, diğer grupta bu davranış cebirsel ifadeler ile modellenmektedir.

En çok bilinen histerezis system modeli Bouc–Wen modelidir. Bu model ilk olarak Bouc tarafından 1971 yılının başlarında sunulmuş ve Wen [139] tarafından 1976 yılında iyileştirilmiş ve o tarihten itibaren Bouc–Wen modeli olarak kullanılmaktadır. Bouc-Wen modeli MRF sönümleyicilerin kuvvet yerdeğiştirme davranışını başarılı bir biçimde tahmin edebilmektedir. Ayrıca kuvvet hız verileri deneysel veriler ile örtüşmektedir. Diğer bir taraftan Bouc–Wen modeli Bingham modelinde olduğu gibi ivmelenme ve hızın farklı işaretlerde olduğu ve hızın düşük değerlerde olduğu doğrusal olmayan kuvvet hız tepkilerinde başarılı olamamaktadır. Modelin bahsedilen durumları da modelleyebilmesi için Spencer ve ark. [140] modifiye edilmiş Bouc–Wen modelini geliştirmişler ve farklı akım değerlerinde de cihazın modellenebilmesi için manyetik alana bağlı sonuç verecek şekilde genelleştirmişlerdir. Bouc-Wen modelindeki karakteristik parametreler frekansın, ve akımın bir fonksiyonu olmadıkları için elde edilen parametreler sadece deneyleri gerçekleştirilen MRF cihazın davranışının aynı şartlar altında temsil edilmesi için kullanılabilir. Modellerin genelleştirilmesi ile MRF cihazların kontrol edilebilirliği iyileştirilmiş ve Dominguez ve ark. [141] frekans ve diğer parametreleri de modele dahil etmişlerdir. Zhou ve ark. [142] ilk olarak Dahl [143] tarafından geliştirilen modeli kullanarak daha basit ve etkili bir model geliştirmişlerdir.

Coulomb sürtünme kuvveti histerezis modeline dahil edilerek daha az parametreye gerek duyan Dahl modeli ortaya çıkmıştır. Daha özgün ve görel olarak basit bir cebirsel model Kwok ve ark. [144] tarafından önerilmiştir. Kwok modeli Gavin ve ark. [145] tarafından geliştirilen modele benzer biçimde MRF cihazların histerezis davranışı taklit etmek için hiperbolik tanjant fonksiyonunu kullanmaktadır. Başka bir cebirsel modelde Guo ve Hu [146] MRF cihazın doğrusal olmayan davranışlarının cebirsel bir model ile başarılı bir biçimde tekrarlanabildiğini göstermişlerdir.

4.5.1 Bingham histerezis modeli

Bingham modeli gerilme gerinim visko plastik davranışını matematiksel olarak elde etmek için kullanılmaktadır. Bingham modeli basit bir modele ihtiyaç duyulan durumlarda tercih edilmektedir. Bu modelde süreksizlik bulunduğu için histerezis davranışı başarılı bir biçimde temsil edilememektedir.

4.5.2 Bouc–Wen histerezis modeli

Bouc-Wen modeli bünyesinde bir viskoz sönümleyici, bir yay ve bir histerezis bileşeni bulundurmaktadır. Bu modele ait eşitlik Eşitlik (4.87) ve Eşitlik (4.88)'de verilmiştir.

$$f = c\dot{x} + kx + \alpha z + f_0 \quad (4.87)$$

$$\dot{z} = \delta\dot{x} - \beta\dot{x}|z|^n - \gamma z|\dot{x}||z|^{n-1} \quad (4.88)$$

Yukarıdaki eşitlikte α , β , δ , γ , n model parametreleri ve z 'de hysterezis değişkenidir. Parametrelerden α 'nın sıfır alınması durumunda model konvansiyonel bir sönümleyiciyi temsil etmeye başlamaktadır. Bouc–Wen modeli MRF cihazlardaki histerezis davranışı elde etmek için kullanılan en yaygın modeldir. Bouc-Wen modeli daha az hassas sonuçlar verirken, modifiye edilmiş Bouc-Wen modelinden daha az karmaşık ve daha az parametre bulundurmaktadır.

Ataletsel dinamiklerin damper durum değişkeni z ile etkileşim içinde olması arzu edilmeyen tekilliklerin tanımlama sürecinde oluşmasına sebebiyet verebilmektedir. [147, 148]

4.5.3 Modifiye edilmiş Bouc–Wen histerezis modeli

Modifiye edilmiş Bouc–Wen modelindeki ek parametreler daha hassas sonuçlar elde etmek amacı ile modele dahil edilmişlerdir.

$$f = c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1x + \alpha z + f_0 \quad (4.89)$$

$$\dot{y} = (c_0 + d_1)^{-1}(c_0\dot{x} + k_0(x - y) + \alpha z) \quad (4.90)$$

$$\dot{z} = \delta(\dot{x} - \dot{y}) - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n - \gamma z|\dot{x} - \dot{y}||z|^{n-1} \quad (4.91)$$

Modifiye edilmiş Bouc-Wen eşitliğindeki y ataletsel dinamik değişkeni, d_1 ve k_1 amortisör ve yaya ait ek katsayıları temsil etmektedir. Modifiye edilmiş Bouc-Wen modelinin hassasiyeti arttırmakta fakat parametrelerin sayısındaki artış ve buna bağlı olarak belirlenebilirlikleri modelin kullanımında zorluklara sebebiyet vermektedir [140]. Bu nedenlerden dolayı bu model hassas bir modele ihtiyaç duyulan durumlarda kullanılmaktadır.

4.5.4 Kwok cebirsel histerezis modeli

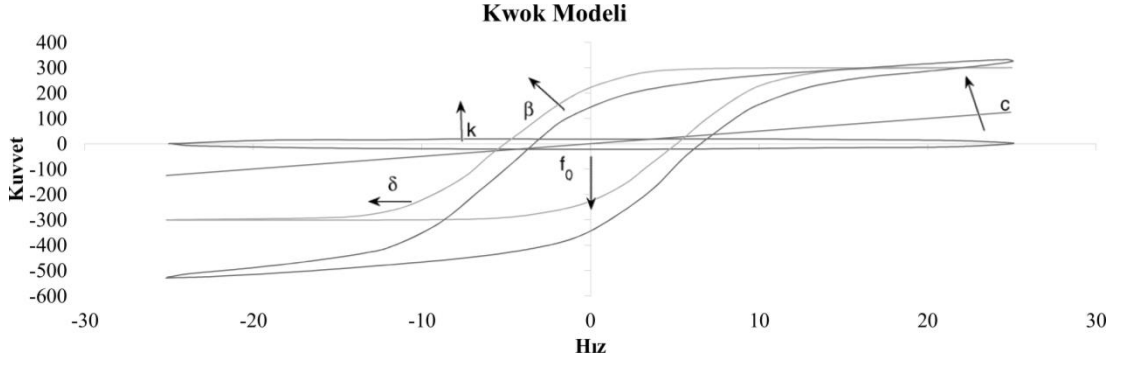
Kwok cebirsel modeli MRF cihazların histerezis kuvvet-hız ilişkisini basit bir biçimde ifade edebilmek için önerilmiş bir modeldir. Model matematiksel olarak hiperbolik tanjant fonksiyonunu histerezis davranışı temsil etmek ve doğrusal fonksiyonları viskozite ve sertliği temsil etmek için kullanılmaktadır. Modele ait eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$f = c\dot{x} + kx + \alpha z + f_0 \quad (4.92)$$

$$z = \tanh(\beta\dot{x} + \delta \text{sign}(x)) \quad (4.93)$$

Yukarıdaki eşitliklerde c ve k viskoz ve yay bileşenlerinin katsayılarını, α histerezis ölçek faktörünü, z hiperbolik tanjant fonksiyonunun histeretik değişkenini ve f_0 sönümleyici kuvvet ötelemesini temsil etmektedir.

Histerezis davranışa etki eden bileşenler ve etki biçimleri Şekil 4.9'da verilmiştir [144].



Şekil 4.9 : Kwok modeli.

4.6 Bölüm Özeti

MR akışkanlarının kanal içerisinde akışı sırasında meydana gelen basınç düşümü eşitlikleri iki paralel plaka arasında akış kabulü yapılarak elde edilmiş olan eşitliklerdir. Farklı kanal geometrileri için analitik çözümlerin mevcut olmadığı, bunların yerine sayısal yöntemlerin kullanılması gerektiği literatürde belirtilmiştir. Yaklaşık çözümler için dairesel olmayan kanallarda taşınan viskoz sıvılar için analitik eşitliklerde kanal geometrisini ifade etmek için hidrolik yarıçap eşitliği kullanılmaktadır.

Akışın eğri olduğu kanallarda sayısal yöntemler ile birlikte boyutsuz sayılar kullanılmakta ve akış hakkında fikir sahibi olunulmaktadır. Eğri kanallardaki Newtonyan akışlarda basınç düşümü ifadelerinin belirlenmesinde Reynolds sayısı ve eğri yarıçapının boru yarıçapına oranının etkin olduğu görülmektedir. Eğri kanallardaki Newtonyan olmayan akışkanlara ait basınç düşümü ifadeleri incelendiğinde ise, Hedström sayısının, Reynolds sayısı ve eğri yarıçapının boru yarıçapına oranından daha fazla etkili olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek Hedström sayılarında akışkan daha çok Bingham plastiği gibi davranmakta ve eğriliğin ve akış hızının etkileri azalmaktadır. Diğer bir ifade ile Hedström sayısının büyük olduğu durumlarda tıpa veya kütle olarak akış gerçekleşmektedir.

Peristaltik pompalara ait tepki torku eşitliği göz önüne alındığında, eşitlikte elastik serum malzemesine ait özelliklerin, eğri akışa ait ifadelerin ve Newtonyan olmayan sıvılara ait katsayıların mevcut olmadığı görülmektedir.

Akış modunda çalışan döner MRF cihaza ait tepki torku değerinin belirlenebilmesi için akış kanalındaki eğrilikten kaynaklanan basınç düşümünün göz ardı edilebilir olduğu tespit edilmiştir. Akış kanalındaki kısılmanın ise merdanelerin kapladıkları alanların tüm alandan çıkartılarak elde edilebileceği gösterilmiştir.

Akış modunda çalışan döner MRF cihaz ile elde edilebilecek en küçük zaman sabitinin büyük oranda elektro-mıknatısın zaman sabiti tarafından belirlendiği gösterilmiştir. Cihazın dinamik davranışının parametrik bir model olan Kwok cebirsel modeli ile düşük hesaplama zamanlarında tekrar edilebileceği açıklanmıştır.



5. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU

MRF cihazların boyutlarının belirlenebilmesi amacı ile en iyileme çalışmasının sayısal hesaplama yöntemi ile tespit edilmesi gerekmektedir. Boyutların belirlenmesi manyetik akı ve manyetik alan değerlerinin arzu edilen aralıkta elde edilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Manyetik alana ait özellikler MATLAB v.b. yazılımlarda kodlanan PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) gibi en iyileme yöntemleri ile elde edilen geometri kullanılarak COMSOL, FEMM ve ANSYS v.b. yazılımlarla elde edilmektedir.

Parçacık Sürüsü fikri, sosyal etkileşime benzer bir davranışın modellenmesi amacı hedeflenerek Kennedy ve Eberhart [149] tarafından 1995 yılında geliştirilmiş yığınsal tabanlı bir rastgele en iyileme tekniğidir. PSO geliştirilirken kuşların toplanma ve balık sürülerinin davranışlarından ilham alınmıştır. Hazırlanan ilk simülasyonlar Heppner ve Grenander'in çalışmalarından etkilenmiş ve bir kuş sürüsünün mısır arama süreci incelenmiştir [150]. Bu çalışma daha sonra Parçacık Sürü En İyilemesi olarak bilinen çok güçlü bir en iyileme yönteminin geliştirilmesinde kullanılmıştır. PSO'da parçacıkların konumlarını temsil eden fonksiyon değişkenlerine ait gerçek sayılar problem uzayında farklı değerler alarak, ilgili fonksiyonun o konumdaki değerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Her parçacık bir sonraki konumuna giderken kendi elde ettiği en iyi sonucu, sürü içerisindeki diğer en iyi sonuç veya sonuçları dikkate alarak ilerlemektedir. İlerleme miktarı belirlenirken rastgele elde edilen katsayılar (öğrenme katsayıları vb.) kullanılmaktadır. Parçacığın sahip olduğu konum, en iyi konum (p_{Best}), diğer en iyi konumlar ile kıyaslanarak bölgesel en iyi konumun (l_{Best}), veya genel en iyi konumun (g_{Best}) belirlenmesinde kullanılmaktadır. Tüm parçacıklar hareket ettikten sonra ilgili konumlar güncellenmekte ve sürü yeni hedefe doğru hareket etmektedir. Maliyet fonksiyonunun en az değerini verecek değişkenlerin elde edilmesi, kuş sürüsünün yiyecek konumuna doğru hareket etmesi şeklinde bir davranışla anlatılmaktadır [151].

Sürüdeki her bir parçacık üç adet D-boyutlu vektör ile ifade edilmektedir. Maliyet fonksiyonundaki D adet değişken çözüm uzayına D kadar boyut kazandırmaktadır. Kullanılan vektörler ise sırasıyla mevcut pozisyonu, bir önceki en iyi pozisyonu ve hızı temsil etmektedir.

Mevcut konumu temsil eden vektör aynı zamanda fonksiyonun değişkenlerini temsil etmektedir. Her iterasyon sonrasında konumlar güncellenmekte ve problemin çözümüne yaklaşılmaktadır. Eğer elde edilen yeni konumlar önceki konumdan daha avantajlı ise kayıt altına alınmaktadır. Parçacığın en iyi konumu olarak (p_{Best}) kayıt edilen konum bilgisi devam eden iterasyonlarda elde edilecek diğer konumlarla kıyaslanmakta ve sürekli olarak en iyilenmiş değerlere doğru çözüm hareket ettirilmektedir. Yeni konumların elde edilmesi (v_i) hız vektörünün (x_i) konum vektörüne eklenmesi işlemi ile elde edilmektedir. Hız vektörü aynı zamanda çözüme götüren basamak miktarı olarak da düşünülebilir.

Parçacık sürüsü, parçacıklar bağımsız iken çözüm üretmeyecek bir yaklaşımdır. Parçacıkların kendi aralarındaki iletişimi sayesinde problemler çözülebilmektedir. Problem çözümü, parçacıkların etkileşimi ile ortaya çıkan popülasyon sayesinde gerçekleşmektedir. Bu etkileşim sosyal ağ olarak da nitelendirilebilmektedir. Parçacıklar bölgesel en iyi konum (l_{Best}) ve genel en iyi konum (g_{Best}) verileri üzerinden konum bilgilerini paylaşmaktadırlar.

PSO sürecinde parçacık hızları her iterasyon ile güncellenmekte ve parçacıklar kendi en iyi konum ve genel veya bölgesel en iyi konum etrafında stokastik olarak salınmaktadırlar [151].

PSO, Genetik Algoritmalar gibi evrimsel hesap teknikleri ile pek çok özellik paylaşmaktadır. Sistem rastgele yığınsal çözümlerin oluşturulması ile başlar ve nesillerin güncellenmesi ile en ideal çözümü arar. Genetik algoritmalarından farklı olarak çapraz geçiş veya mutasyon gibi evrimsel operatörleri bulunmamaktadır. Çözüm uzayında hareket eden parçacıklar, en iyi çözüme sahip parçacıklara doğru uçarak en iyileme süreci gerçekleştirilmiş olur. PSO, genetik algoritma ile kıyaslandığında PSO'nun sisteme entegre edilmesi kolaydır ve çok az sayıda parametre ayarlaması gerektirmektedir. PSO fonksiyon en iyilemesi, yapay sinir ağları eğitimi, bulanık sistem kontrolü ve genetik algoritmaların uygulanabildiği diğer alanlarda başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

PSO, son yıllarda başarılı bir biçimde araştırma ve uygulama alanlarında kullanılmıştır. Diğer yöntemlerden daha hızlı, kolay ve etkili olduğunu göstermiştir. PSO'nun diğer en iyileme uygulamalarından daha çok tercih edilme nedenlerinin arasında çok az sayıda parametre ayarlaması gereksinimi gelmektedir.

5.1 Algoritma

PSO bir kuş sürüsünün yiyecek arama davranışı incelenerek geliştirilmiş bir algoritmadır. Kuş sürüsünün bir bölgeye rastgele dağıldığı ve yiyecek aradığı düşünülmüş ve bölgede sadece tek bir konumda yiyecek bulunduğu kabul edilmiştir. Yiyeceği bulan kuşun konumunu değiştirmeyerek, diğer kuşları kendisine doğru çekeceği düşünülmüştür.

Kuş sürüsünün yukarıda açıklanan davranışına benzer biçimde PSO ile çözülen en iyileme problemlerinde sonuca en iyi konuma sahip parçacığın diğer parçacıkları kendisine doğru çekmesi ve grup içerisindeki iletişimle ulaşılmaktadır. Maliyet ya da başarımlar fonksiyonu kullanılarak en iyi sonuçlar arasında kıyaslama yapılmakta ve p_{Best} , l_{Best} , ve g_{Best} değerleri güncellenmektedir. Değerlerin güncellenmesi ile parçacıklar sürü halinde yeni konuma doğru yönlendirilmektedir.

PSO rastgele konumlar ile başlamakta ve sonra her iterasyon ile en iyi konum arayışı gerçekleşmektedir. En iyi konumları temsil eden p_{Best} , l_{Best} , ve g_{Best} değerleri elde edildikten sonra aşağıdaki eşitlikler kullanılarak parçacık hızları ve bu hız bilgisi ile elde edilen yeni konum değerleri hesaplanmaktadır. Her iterasyon ile elde edilen yeni konumlar kullanılarak maliyet veya başarımlar fonksiyonları hesaplanılmakta, hız bilgileri güncellenmekte ve yeni konumlar hesaplanmaktadır. Algoritmanın kodsunu yazılımı aşağıda verilmiştir.

For her parçacık için

Parçacığı problem uzayında konumlandır

End

Do

For her parçacık için

Maliyet veya başarımlar fonksiyonunu hesapla

If başarımlar fonksiyonu daha önceki değerden iyi

Yeni p_{Best} değeri olarak ata

End

p_{Best} değerleri arasından en iyi olanı seç ve g_{Best} değeri olarak ata

For her parçacık için

Parçacık hızlarını hesapla

Parçacık konumlarını güncelle

End

While iterasyon veya hata kriteri sınırına ulaşılmadı

Parçacıkların ulaşabilecekleri en yüksek hız değeri (V_{max}) hareket edebilecekleri sınırların dışına çıkmalarını engellemek amacı ile bu sınırların içerisinde kalan değerler ondan bir seviyesinde seçilmektedir.

5.2 PSO Parametre Kontrolü

PSO'nun en büyük avantajlarından bir tanesi parçacıkların konumları için gerçek sayılar kümesini kullanmasıdır. Parçacıkların konumları aynı zamanda maliyet fonksiyonunda kullanılan değişkenleri temsil etmektedirler. Aşağıdaki eşitlik bir maliyet fonksiyonuna örnek olarak verilebilir.

$$f(x) = x_2^2 - x_3^2 / x_1^{1/2} \quad (5.1)$$

Optimum noktanın araştırılması sırasında belirleyici ölçüt, arzu edilen farkın en aza indirilmesi ve en fazla iterasyon sayısına ulaşılması olarak belirlenebilir. PSO ile en iyileme yapılırken genellikle parçacık sayısı 20 ile 50 değerleri arasında seçilmektedir. Genellikle 10 adet parçacık kullanmak pek çok optimizasyon uygulaması için yeterli olurken zorlu problemlerde 100 ya da 200 adet parçacık kullanımı olumlu sonuçlar verebilmektedir. Öğrenme katsayıları 0 ile 4 arasında değer alabilmekte ama genellikle bu katsayılar 2 değeri verilmektedir.

PSO'da bölgesel en iyi (l_{best}) kullanılması ile bölgesel tepe noktalarına takılma durumu engellenebilmekte fakat genel en iyi (g_{best}) kullanımına göre çözümün elde edilme süreci uzamaktadır. Diğer bir parametre ise atalet (Eylemsizlik Ağırlığı) faktörüdür. Atalet faktörü parçacıkların ani değişimlere direnç gösterebilmesine olanak sağlamaktadır [152].

5.3 PSO Parametreleri

Temel PSO uygulamaları için çok az sayıda parametre ayarlanması yeterlidir. Genellikle 20 ile 50 arasında değer verilen ilk parametre popülasyonun büyüklüğüdür. Popülasyon için değer ataması, problemin karmaşıklığı ve boyutları ile alakalı bir süreçtir.

Hız vektörünün (v_i) elde edilmesinde kullanılan c_1 ve c_2 öğrenme katsayıları en iyi konumlara doğru olan hareketin şiddetini temsil etmektedirler. Diğer bir ifade ile parçacıkların süreç sırasındaki canlılıklarını temsil eden bu değerler, aynı zamanda parçacık hareketlerinin kararlılığını belirlemektedir. Mekanik bakış açısından yay sabiti gibi yorumlanabilen c_1 ve c_2 katsayılarının değeri yayın sertliği gibi de yorumlanmaktadır. Genellikle hızlı sonuçlar elde etmek amacı ile 2,0 değeri alan bu katsayılara 0,5 değeri verilmesinde durumunda çözüm süreci uzamakta ve parçacıklar çözüm uzayında daha yavaş hareket etmektedirler. Hızlı sonuçlar elde etmek için tercih edilen yüksek değerler, parçacıkların davranışlarını kararsızlaştırmaktadır. Her ne kadar parçacıklar en yüksek ve en düşük hız değerleri ile sınırlandırılmış olsalarda doğru parametre seçimi çözüm uzayında kararlı bir arayış için kaçınılmazdır.

5.4 Eylemsizlik Ağırlığı

Shi and Eberhart [153] tarafından getirilen eylemsizlik ağırlığı değeri ile çözüm sürecinde iyileştirmeler meydana gelmiş ve en yüksek hız değeri araştırmalardaki önemini yitirmeye başlamıştır. Eylemsizlik ağırlığı parçacık üzerine etki eden bir sürtünme kuvveti gibi yorumlanırsa, ortamın akışkanlığını ifaden eden bir değer olduğu rahatlıkla görülmektedir. Genellikle bu ağırlık 0,0 ile 1,0 arasında değerler almaktadır. En çok tercih edilen 0,9 değeri düşük yoğunluklu bir ortamı temsil etmektedir. Ağırlığın düşük değerler alması yüksek yoğunluklu bir ortama karşılık gelmektedir. İterasyonların başında 0,9 gibi yüksek değerler alan eylemsizlik katsayısı, ilerleyen süreçte daha düşük değerlere getirilmekte ve çözüm arayışı daha hassas bir biçimde yapılmaya devam edilmektedir. Eylemsizlik ağırlığının kararlılığı kesinleştiren değerlerin seçimi hızlanma katsayılarının seçimine bağlı olarak yapılabilmektedir. Ağırlığın alacağı değerler genellikle problemin tipi veya en iyi

konumlara çözüm uzayında ulaşılma biçimi ile alakalıdır. Farklı yaklaşımlar ve yöntemler mevcut yöntemlerden daha iyi sonuçlar vermiştir [149, 154].

5.5 Sınırlamaların Sisteme Dahil Edilmesi

PSO sınırlamaların olduğu problemlerin çözümünde çok etkili bir araçtır. Diğer bir taraftan pek çok fiziksel problemin geometrik, kimyasal, fiziksel, güç tüketimine bağlı sınırlamaları bulunmaktadır. PSO'nun fiziksel problemlerin çözümünde kullanılabilmesi için bu sınırlamaları da çözüme dâhil edecek yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Sınırlama, onarma, cezalandırma gibi pek çok yöntem denenmiştir.

Eğim tabanlı onarma metodu, Genetik Algoritma uygulamalarında başarılı olmuştur. Aynı yöntem Nguyen ve ark. [155] tarafından PSO sistemlerine de entegre edilmiştir. Eğim tabanlı onarım metodu, hızın değişimine bağlı ortaya çıkan türev bilgisinin kullanılarak hızın onarılması esasına dayanmaktadır. Hız verisinin onarılmasına bağlı olarak konum değişiminde meydana gelen hatalar engellenmektedir.

Genel sınırlama problemine ait eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$l_m \leq g_m(\mathbf{x}) \leq u_m, m = 1, \dots, M, \quad (5.2)$$

$$h_n(\mathbf{x}) = c_n, n = 1, \dots, N, \quad (5.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte \mathbf{x} çözüm vektörünü $g_m(\mathbf{x})$ ve $h_n(\mathbf{x})$ sırasıyla eşitsizlik ve eşitlik sınırlamalarını ifade etmektedir. Diğer bir ifade ile çözümün dışına çıkmaması gereken alan veya sınırlar matematiksel olarak tanımlanmaktadır. Sınırlama problemleri çözülürken aşağıdaki adımlar izlenilmektedir.

- Aşağıdaki eşitlik kullanılarak sınırlamaların ihlal edilme derecesi ΔV hesaplanır.

$$\Delta V = \left[\frac{\text{Min}\langle \mathbf{0}, \mathbf{u} - \mathbf{g}(\mathbf{x}) \rangle + \text{Max}\langle \mathbf{0}, l - \mathbf{g}(\mathbf{x}) \rangle}{h(\mathbf{x}) - \mathbf{c}} \right] \quad (5.4)$$

- $\nabla_{\mathbf{x}} V^+$ ve $\Delta \mathbf{x}$ değerleri hesaplanır. İlerleyen hesaplamalarda sadece ΔV vektörünün sıfırdan farklı olan değerleri kullanılmaktadır. $\nabla_{\mathbf{x}} V^+$ değerinin

hesaplanması için $\nabla_x V$ matrisinin Moore-Penrose tersi [156] veya sanki/yalancı tersi alınması gerekmektedir.

$$\Delta V = \nabla_x V \times \Delta x \quad (5.5)$$

$$\Delta x = \nabla_x V^{-1} \times \Delta V \quad (5.6)$$

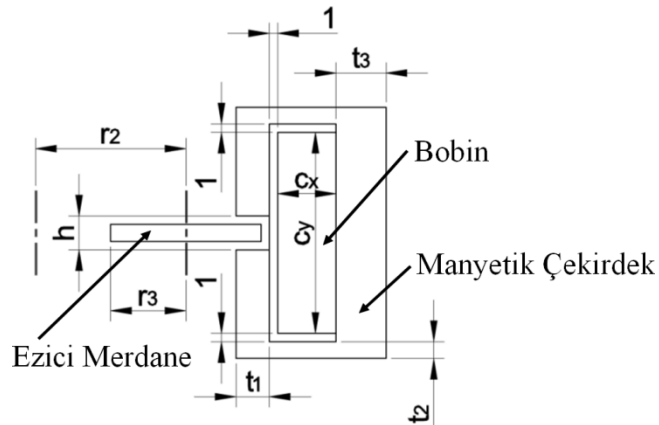
- Çözüm vektörü aşağıdaki eşitlik kullanılarak güncellenir.

$$x^{t+1} = x^t + \nabla_x V^+ \times \Delta V \quad (5.7)$$

- Çözüm vektörü onarım sonrası istenilen bölgede değilse işlem tekrarlanabilir [157].

5.6 MRF Tasarımının PSO Kullanılarak En İyilemesi

Döner MRF frenin en iyilemesinin yapılabilmesi amacı ile PSO algoritmasından faydalanılmıştır. Üretimin gerçekleştirilebilmesi için PSO tasarımında kullanılan geometrik sınırlamalara ait eşitlikler ((5.8)–(5.15)) aşağıda verilmiştir. Pasif frenin toplam çapının 84 mm'yi geçmemesi için eklenen sınırlamaya ait Eşitlik (5.15) ise yarıçaptan sabitlerin çıkartılması sonucu ve r_3 parametresinin t_1 cinsinden yazılması ile elde edilmiştir. Bileşenlerin kapalı alanlar ile temsil edildiği, geometrik sınırlamalara ait teknik çizim resmi Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 : PSO tasarımında kullanılan geometrik parametreler.

Yukarıdaki temel ölçülerin verildiği teknik çizimde r_2 rotor yarıçapını, r_3 tekerlek yarıçapını, h MRF akışkanının aktığı kanal yüksekliği, t_1 ise kanal genişliğini, t_1 , t_2

ve t_3 manyetik çekirdeğin aynı zamanda statorun plaka kalınlıklarını c_x ve c_y ise bobinin genişliğini ve yüksekliğini temsil etmektedir.

$$2 \leq t_2 \leq 6 \quad (5.8)$$

$$6 \leq t_3 \leq 8 \quad (5.9)$$

$$4 \leq h \leq 8 \quad (5.10)$$

$$r_2 \geq 12 \quad (5.11)$$

$$r_3 = t_1 + 5 \quad (5.12)$$

$$t_1 > 2 \quad (5.13)$$

$$c_x > 5 \quad (5.14)$$

$$r_2 + t_1 + c_x = 29 \quad (5.15)$$

İmalat ve montaj süreçlerinden dolayı ortaya çıkan sınırlamalar altında, PSO yardımı ile en yüksek tork değerini, en düşük güç tüketiminde ve en düşük ağırlıkta veren tasarımı elde edebilmek amacı ile yukarıdaki eşitlik ve eşitsizlikler ile aşağıdaki toplam maliyet fonksiyonu kullanılmıştır.

$$\text{Toplam Maliyet} = \frac{(\text{Kütle [kg]} \cdot \text{Güç[W]})}{\text{Tork [Nm]}} \quad (5.16)$$

Toplam maliyet fonksiyonunun kullanılmasına bağlı olarak elde edilen ölçü değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : PSO hesaplama sonuçları [mm].

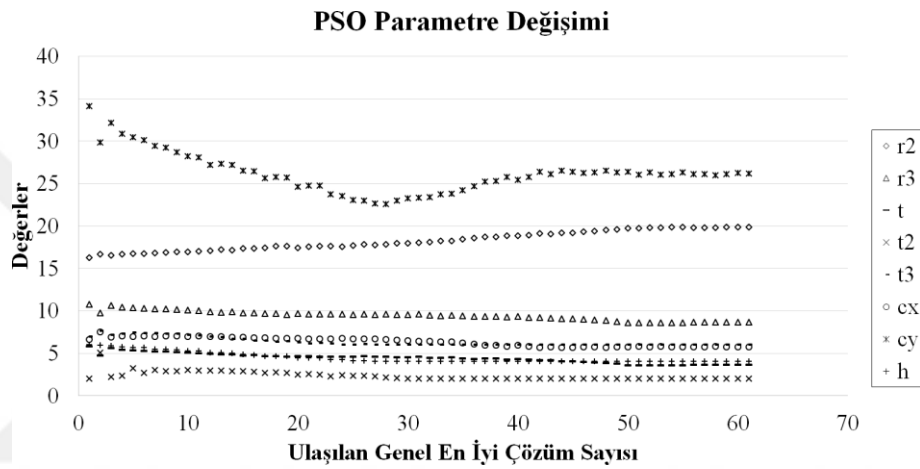
r_2	r_3	t_1	t_2	t_3	c_x	c_y	h
18,835	8,631	3,631	2	6	5,734	26,159	4

Bobin yüksekliğini tanımlayan c_y değerinin hesaplanılmasında kullanılan eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$c_y = ((150h)/4)/c_x \quad (5.17)$$

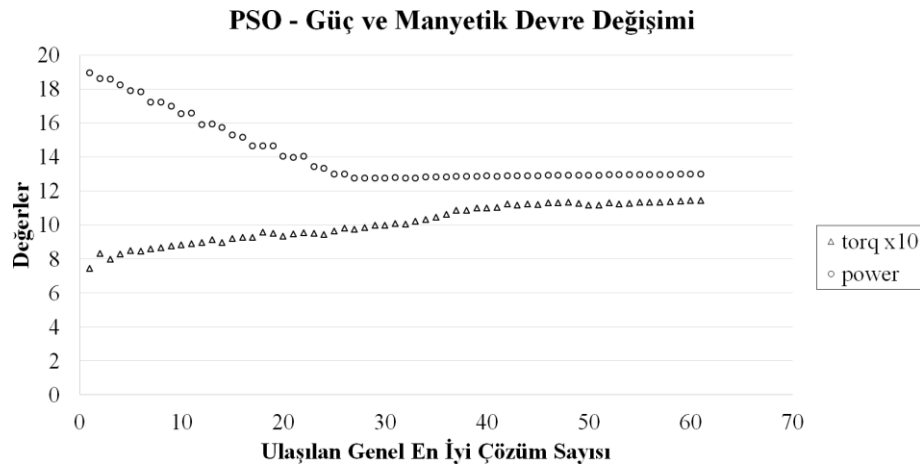
Yukarıdaki eşitlikte MRF 140-CG akışkanının doyma noktası 150 kA/m olarak alınmış ve bobinden 1 A akım geçmesi durumunda doyma noktasına ulaşabilmek için gerekli olan sarım sayısı bu sayede $150h$ olarak ifade edilmiştir. PSO hesaplamaları sonucu elde edilen en iyilenmiş pasif frenin özellikleri sırasıyla 1144 mN.m tork, 12,984 W güç tüketimi ve 812,33 gr ağırlık şeklindedir. Hesaplamalarda üretime ve tasarıma bağlı oluşan kayıplar dâhil edilmemiştir. Toplam Maliyet [(W.kg)/(N.m)] PSO sonrasında 7,048 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.2’de PSO en iyilemesi sırasında r_2 , r_3 , t_1 , t_2 , t_3 , c_x , c_y , ve h parametrelerinin ulaşılan genel en iyi çözüm sayısına göre değişimi verilmiştir.



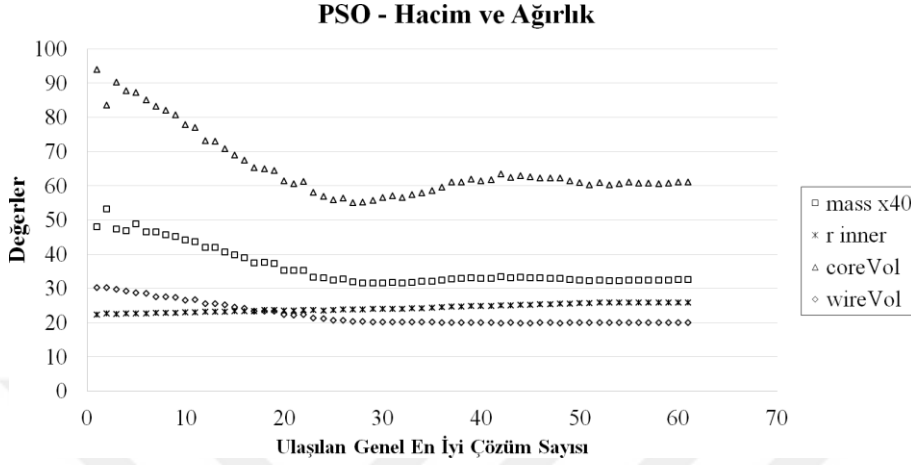
Şekil 5.2 : PSO en iyilemesi sırasında parametrelerin değişimi.

Şekil 5.3’de PSO en iyilemesi sırasında güç ve torkun değişimi gösterilmiştir. Tork değerlerinin güç değerleri ile birlikte değerlendirilebilmeleri için bu değerler 10 kat büyütülmüşlerdir.



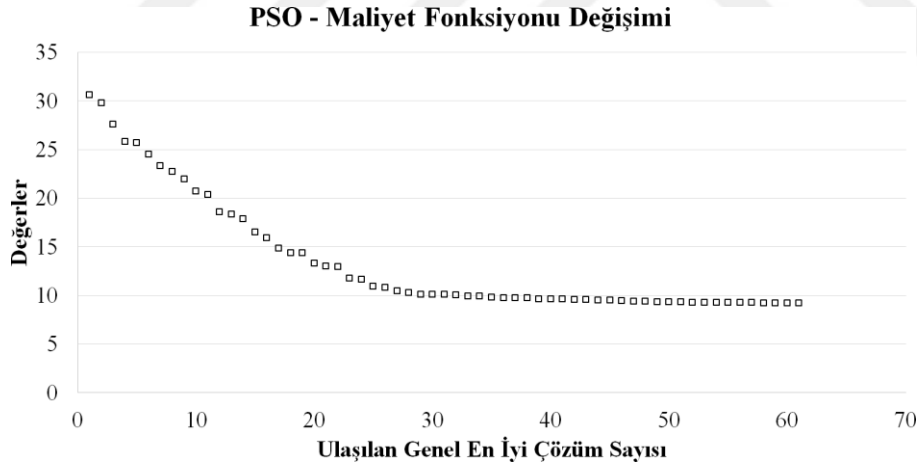
Şekil 5.3 : PSO en iyilemesi sırasında güç ve torkun değişimi.

Şekil 5.4'de PSO en iyileşmesi sırasında manyetik çekirdek hacminin ve bobin hacminin (mm^3 cinsinden), iç yarıçapın (mm cinsinden) ve ağırlığın (kg cinsinden) 40 kat büyültülmüş olarak ulaşılan genel en iyi çözüme göre değişimi verilmiştir.



Şekil 5.4 : PSO en iyileşmesi sırasında hacim ve ağırlığın değişimi.

Şekil 5.5'de maliyet fonksiyonu değişiminin ulaşılan genel en iyi çözüme göre değişimi sunulmuştur.



Şekil 5.5 : Maliyet fonksiyonu değişimi.

5.7 Bölüm Özeti

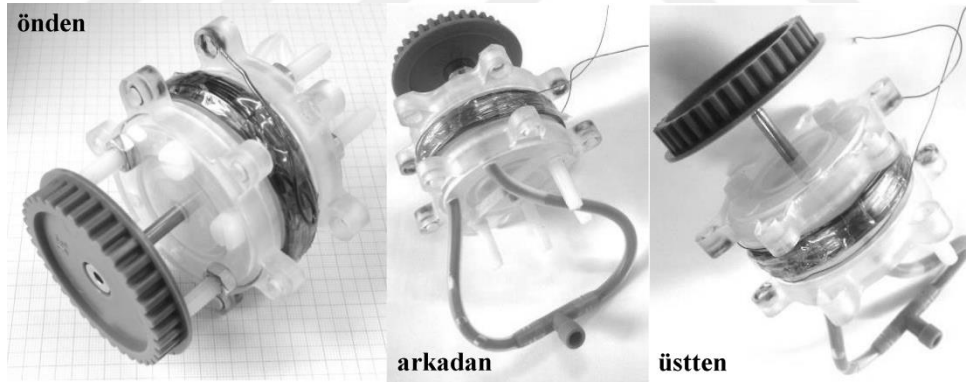
Parçacık sürü en iyileşmesi (PSO) yapılarak geometrik parametreler, en hafif tasarımı ve en yüksek tepki torkunu verecek şekilde elde edilmiştir. Diğer bir ifade ile ağırlık en iyileşmesi ile tepki empedansı en iyileşmesi aynı anda gerçekleştirilerek, tasarım problemi çözülmüştür.

6. PROTOTİP GELİŞTİRME ve DENEY DÜZENEGİ

Peristaltik hareket ile manyetoreolojik akışkanlı frenlemenin birleştirilebilmesi amacı ile üç adet tasarım üzerinde çalışılmıştır. Her yapılan tasarım ile cihazın imalat, montaj ve gereksinimleri belirlenmiş ve bir sonraki tasarımda bu eksiklikler giderilmiştir.

6.1 İlk Prototip

İlk prototip pleksiglas ve plastik malzemeler kullanılarak üretilmiştir. İlk prototipte önceliğin peristaltik tasarıma verilmesi nedeni ile manyetik akıyı taşıyacak ferromanyetik çekirdek bulunmamaktadır. Bu neden dolayı prototipin toplam ağırlığı 180,5 gr ve verimi en az 1000 kat düşüktür. Resim 6.1’de ilk prototipe ait montaj sonrası resimleri verilmiştir.



Resim 6.1 : İlk prototipe ait montaj sonrası resimleri.

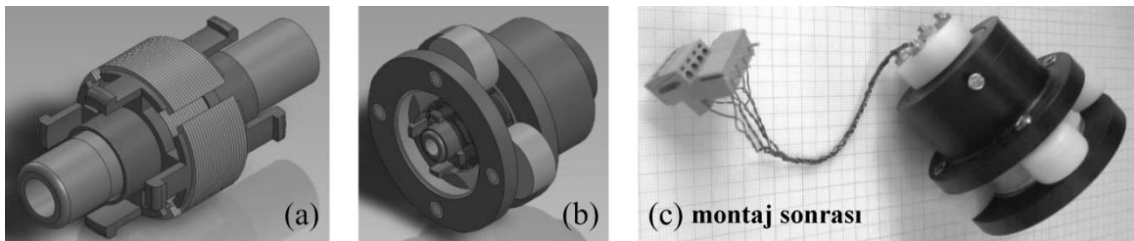
İlk prototipin değerlendirilmesi sonucu

- Peristaltik pompa imal edilebilirliğinin kolay olduğu,
- Manyetik alan oluşturmak için çekirdek kullanılmasının kaçınılmaz olduğu,

sonuçlarına ulaşılmıştır.

6.2 İkinci Prototip

İkinci prototipin tasarımında elektro-mıknatis iç kısma taşınarak, rotor dış kısma alınmıştır. Elektro-mıknatis olarak bilgisayar fanlarında mevcut bulunan manyetik çekirdekler kullanılmıştır. Çekirdeklerin yerleştirilmesine ait katı model Şekil 6.1-a'da verilmiştir. Rotorun dış kısma taşınması tasarımda daha fazla hareketli parça ve boyutsal hassasiyet oluşmasına sebebiyet vermiştir. İkinci prototipin tasarımında hafiflik ön planda tutulmuştur. Çeşitli plastik malzemeler kullanılarak üretilen prototip 145 gr ağırlığında ölçülmüştür. Prototipin katı modeli Şekil 6.1-b'de ve montaj sonrası resmi Şekil 6.1-c'de verilmiştir.



Şekil 6.1 : (a), (b) 2nci prototipin katı modelleri ve (c) montaj sonrası resmi.

İkinci prototipin değerlendirilmesi sonucu

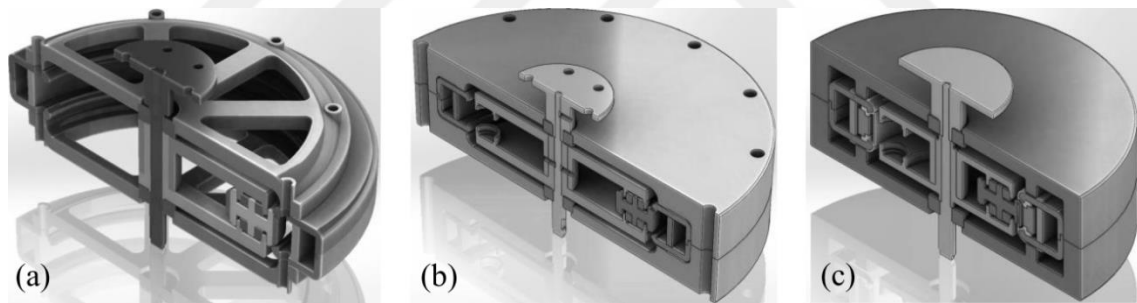
- Delrin, kestamit, teflon, polyamid ve benzeri malzemeler yerine daha rijit olan Alüminyumun kullanılması gerektiği,
- Yataklamalarda küçük ve hafif rulman kullanılmasının kaçınılmaz olduğu,
- Ticari serum hortum yerine sıvı plastik döküm gibi farklı çözümlerin kullanılabilirliğinin araştırılması gerektiği,
- Ticari elektro mıknatis ve türevi yaklaşımların, akış kanalı boyunca homojen manyetik akı yoğunluğu elde edilmesinde yetersiz kalmasından dolayı terk edilmesi gerektiği,

gözlemlenmiştir.

6.3 Son Prototip

Prototip geliştirme sürecinde, her prototip baştan tasarlanmış ve elde edilen deneyimler bir sonraki prototipin tasarımında kullanılmıştır. Prototipler tasarlanırken, arzulanan ürünün ihtiyaçları ön planda tutulmuş, diğer bir ifade ile hafif, küçük, şeffaf (transparent)

ve yüksek başarımlı tasarımda belirleyici olmuştur. Her prototip tasarlanırken problemin farklı alanlarına yoğunlaşmıştır. Bu alanlar sırasıyla 1nci prototipte peristaltik pompa üretimi, 2nci prototipte elektro mıknatıs üretimi ve son prototipte kapalı hazne içerisinde MR akışkanı elde edilmesi olarak ifade edilebilirler. Serum hortum özelliklerine sahip kapalı bir hazne elde edilebilmesi amacı ile sıvı silikon plastiği döküm yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile üretilen hazneler, hazırlanan sıvı silikon plastiğin hazne biçimindeki kalıp boşluğu içerisine dökülüp sertleşmesi sonucu elde edilmektedirler. Geometrik etkilerin anlaşılması amacıyla hesaplamalı yöntemlerden (COMSOL 4.4) yararlanılmış ve farklı kalınlıklarda manyetik malzeme, farklı kutuplar arası boşluk ve farklı hazne kalınlık değerleri alınarak 27 adet geometri için manyetik akı yoğunluğu hesaplanmıştır. Elde edilen veriler yorumlanarak ve imalat sınırlamaları göz önünde bulundurularak son prototipin tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan ilk sürümde kullanılan malzeme hacmi en az seviyede tutulmuştur. İkinci sürümde imalatı kolaylaştırmak için basit geometriler kullanılmıştır. Basit geometrilere sahip ve kompakt olan üçüncü sürüm için üretim gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.2’de gerçekleştirilen tasarımlar verilmektedir. Resim 6.2’de üretimi gerçekleştirilen prototipe ait parçalar görülmektedir.



Şekil 6.2 : Son prototip tasarımına ait katı modeller, (a) 1nci sürüm, (b) 2nci sürüm, ve (c) 3ncü sürüm.



Resim 6.2 : Son prototipin üçüncü sürümüne ait parçalar.

Resim 6.2’de hem rotorun yataklanmasında hem de elektro-mıknatısın sabitlenmesinde kullanılan alüminyum üst kapak (C) ve alt kapak (A) görülmektedir. Elektro-mıknatıs bobinin yerleştirilebilmesi amacı ile iki parça olarak tasarlanmıştır. Elektro-mıknatısın çekirdeğinin üst kapağı (B) ve diğer bileşenler (A) sırası ile alt kapak, rotor, merdaneler, alüminyum ayırıcı, bobin elektro-mıknatısın çekirdeğinin alt bileşeni Resim 6.6’de ayrıca gösterilmiştir.

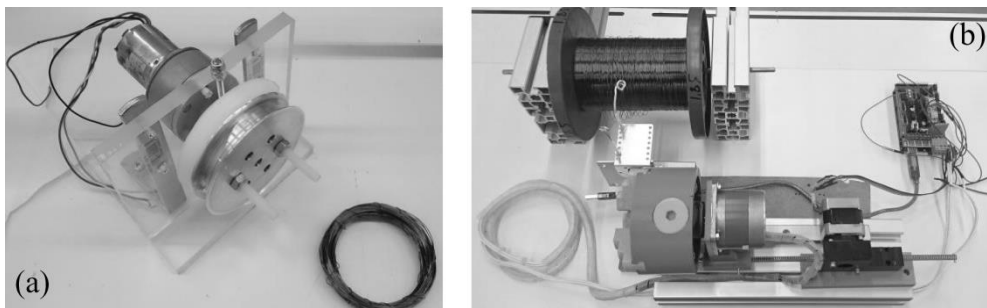
Son prototipin değerlendirilmesi sonucu

- Kalıplarda gözlemlenen eksikliklerin giderilip yeni kalıplar hazırlanması gerektiği,
- Test kalıpları kullanılarak silikon döküm ile ilgili sorunlar karşısında daha hızlı çözüm üretilebileceği,

kesinlik kazanmıştır. Döner MRF frenin ilk deneyleri son prototipin dördüncü sürümünde gerçekleştirilmiştir. Döner MRF frenin en iyilemesinin yapılabilmesi amacı ile PSO yaklaşımından faydalanılmıştır.

6.3.1 Bobin sarımı

Bobin sarımı için kullanılan sistemler Resim 6.3’de görülmektedir. El ile sarım yapılması durumunda çok fazla zaman, enerji ve dikkat gerekmekte, ve ayrıca sonuç yetersiz olabilmektedir. Hedef sarım sayısı 200 sarım iken sonuç yaklaşık 170 sarım olarak ortaya çıkmıştır. Tel türünün tespit edilmesi için tel çapı ölçülmüş ve FEMM hesaplamalarında kullanmak için AWG-26 (American Wire Gauge) olarak tanımlama yapılmıştır. AWG-26 telin özellikleri sırasıyla çap 0,405 mm, maksimum akım dayanımı ve süresi 20 A ve 10 s ayrıca telin 75 °C’da taşıyabileceği maksimum akım değeri ise 1,3 A’dir.



Resim 6.3 : (a) Prototiplerin üretiminde kullanılan bobin sarım sistemi ve (b) PSO tasarımında kullanılan bobin sarım sistemi.

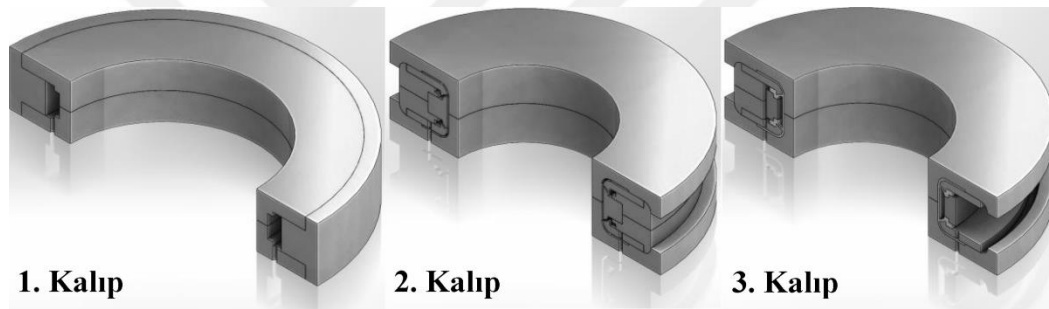
PSO tasarımında tel sarımı için Resim 6.3-b’de görülen sistem kullanılmıştır. PSO tasarımında kullanılan emaye izoleli bakır tellere ait özellikler de Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Emaye izoleli bakır tel çapları ve direnç değerleri [158].

Tel Çapı [mm]	0,4	0,425	0,45	0,475	0,5	0,53	0,56
DC Direnci [Ω /m]	0,136	0,121	0,108	0,096	0,087	0,077	0,069

6.3.2 Hızlı takımlama

Hızlı takımlama yöntemi ile ilk olarak silikon haznelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Silikon haznelerin üretiminde kullanılan ilk kalıplara ait katı modeller Şekil 6.3’de görülmektedir.



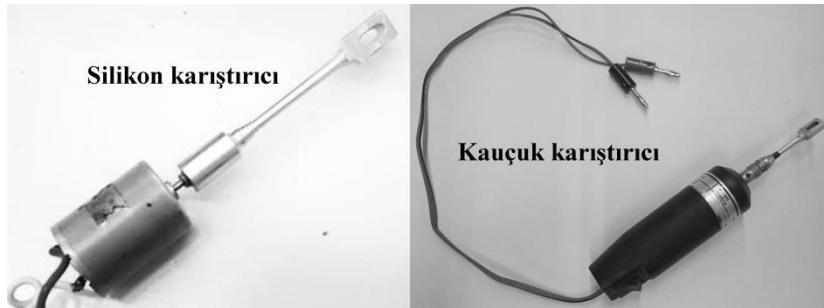
Şekil 6.3 : Silikon hazne için kullanılan kalıplara ait katı modeller.

Silikon haznenin elde edilmesi üç aşamada planlandığı için, üç adet kalıp tasarlanmıştır. Silikon haznelerde yaşanan terleme ve akışkan kaybı gibi olumsuzlukların giderilmesi amacı ile MR akışkan ile biraz daha uyumlu olan poliürethan malzemesi kullanılmıştır. Poliürethan hazneler için daha az parçadan oluşan yeni kalıplar tasarlanmıştır. Ayrıca kapalı haznenin et kalınlığı nedeni ile tepki torkuna olan olumsuz etkisini önleyecek bir hazne tasarımı da gerçekleştirilmiştir. Poliürethan hazneler POLYTEK Development Corp.’dan temin edilen kehribar renkli A30 shore sertliğindeki Poly 74-30 sıvı kalıp kauçuğundan elde edilmiştir. Sıvı kauçuk ve katalizör karışımı içerisinde ve kalıp içerisinde sıkışan havanın boşaltılmasında kullanılan vakum ünitesinin parçaları olan vakum haznesi, sızdırmaz kapak, vakum pompası ve gaz giriş ve çıkış kanalları Resim 6.4’de verilmiştir.



Resim 6.4 : Hızlı takımlamada kullanılan vakum ünitesi.

Kür kimyasalı ve sıvı kauçuk kalıba dökümünden önce üreticilerin belirlediği oranda karıştırılmaktadır. Karışım daha sonra vakum ortamında gazdan arındırılır ve kalıp içerisine dökülür. Kalıp içerisinde iken vakum haznesi kullanılarak reaksiyonlar sonucu oluşan gaz alınmaya devam edilir. Sertleşmenin başlaması ile birlikte kalıp ve kauçuk oda sıcaklığında beklemeye terk edilir. Sıvı kauçukların hazırlanmasında kullanılan karıştırıcı uç ve karıştırma işlemi için hareketi veren motor Resim 6.5’de verilmiştir. Karıştırıcı aynı zamanda MR akışkanın da hazne içerisine doldurulmadan önce karıştırılmasında kullanılmıştır.



Resim 6.5 : Hızlı takımlamada kullanılan sıvı kauçuk karıştırıcılar.

İki bileşen kullanılarak elde edilen poliüretan zar ve haznelerin üretim aşamaları aşağıda verilmiştir.

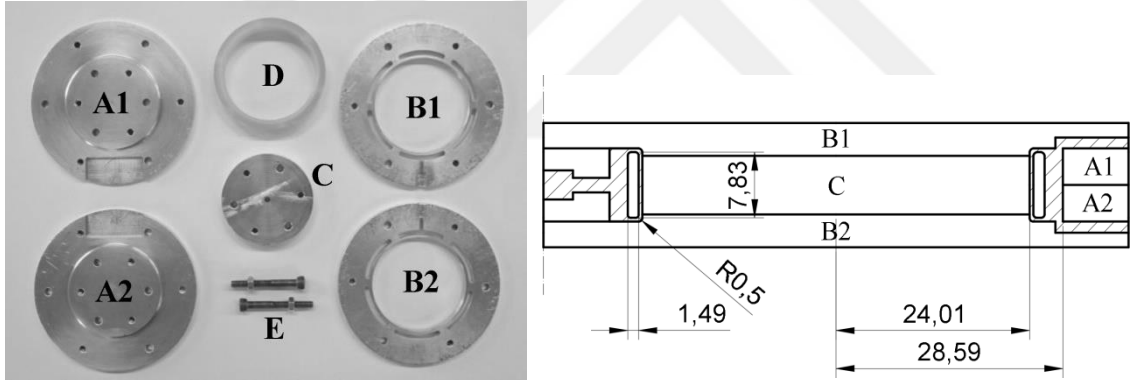
- Kalıplar kapatılır ve civatalar yardımı ile yüzeyler birbirine boşluksuz temas ettirilir.
- Poly 74-30 sıvı kalıp kauçuğu 1A:1B oranında karıştırılır.
- Karıştırma sırasında sıvı içerisinde sıkışan hava vakum ünitesi yardımı ile alınır.

- Karışım kalıbın içine doldurulur.
- Kalıp içerisinde hava sıkışmasını engellemek için kalıp vakum ünitesinde vakumlanır.
- Kalıp oda sıcaklığında yaklaşık 16 saat kadar bekletilir.

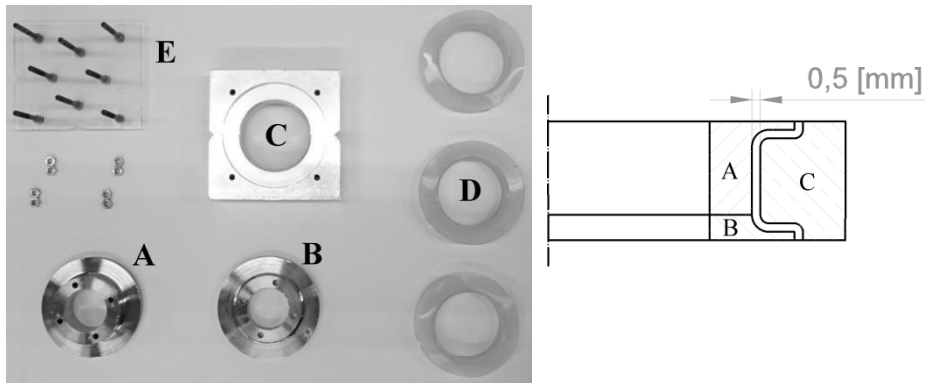
Poliürethan haznenin elde edilmesi için aşağıdaki ek işlemlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

- Hazne yapıştırma bölgesinden kesilerek kalıptan çıkartılır.
- Yapıştırma bölgesindeki boşluklar kapatıldıktan sonra hazne poliürethan bir kat ile kaplanır.

Hazne üretimi tamamlandıktan sonra MR akışkanı hazne içerisine enjektör yardımı ile doldurulur. Dolum deliğinin çok küçük olması nedeni ile sıvı poliürethan kullanılarak kolaylıkla kapatılabilmektedir. Prototip üretiminde kullanılan kalıplara ait resimler Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’de verilmiştir.

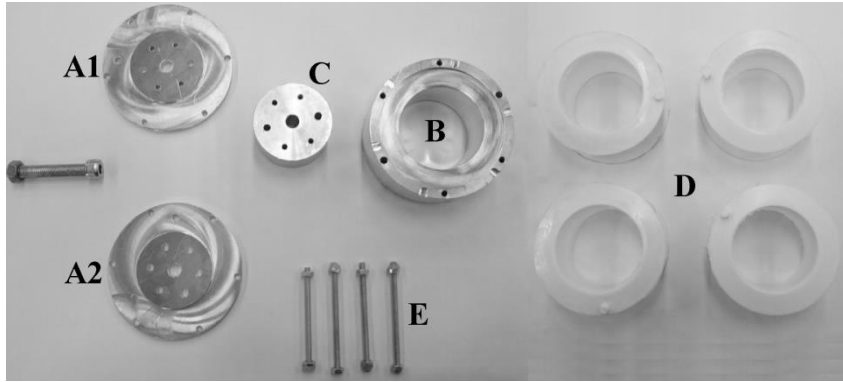


Şekil 6.4 : Poliürethan kapalı çevrim hazne (kartuş), hazne kalıbı parçaları ve şematik açıklama.



Şekil 6.5 : Poliüretan zar ve kalıp parçaları, ve şematik açıklama.

PSO tasarımının üretiminde kullanılan kalıba ait resim Resim 6.6'da verilmiştir. Resim 6.6'da parçalar sırası ile alt kalıp parçası (A1), üst kalıp parçası (A2), dış kalıp parçası (B), iç kalıp parçası (C), elastik zarlar (D), ve montaj parçaları (E) görülmektedir.



Resim 6.6 : PSO tasarıma ait kalıp ve zar resimleri.

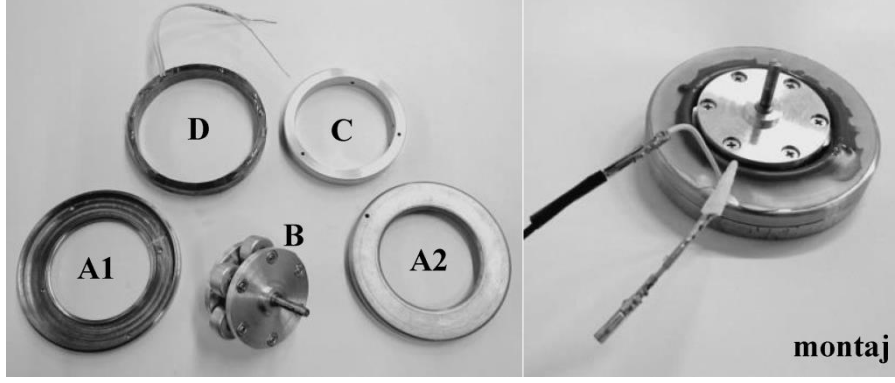
Sıvı silikon ve yapıştırıcı yerli bir üretici olan Aydın Kompozit firmasından temin edilmiştir. PSO tasarımda kullanılan zarın üretim aşamaları aşağıda verilmiştir.

- Kalıp kapatılır ve civatalar yardımı ile yüzeyler birbirine boşluksuz temas ettirilir.
- Sıvı silikon ve %3 oranında eklenen yapıştırıcı karışımı karıştırılır.
- Karıştırma sırasında sıvı içerisinde sıkışan hava vakum ünitesi yardımı ile alınır.
- Karışım kalıbın içine doldurulur.
- Kalıp oda sıcaklığında yaklaşık 12 saat kadar bekletilir.

Silikon ayırıcı zar kullanılarak deney gerçekleştirilemediği için tekrar poliürethan ayırıcı zar üretimi gerçekleştirilmiştir.

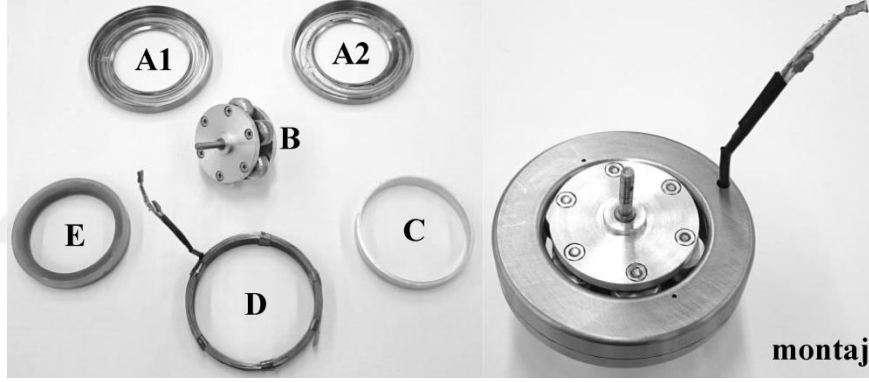
6.3.3 İmalat ve montaj

Ayırıcı elastik zar kullanılan döner perisaltik MRF frenin bileşenleri sırası ile elektromıknatis çekirdeğinin alt (A1) ve üst (A2) parçaları, merdaneler ile rotor (B), ayırıcı alüminyum halka (C), ve bobin (D) Resim 6.7'de montaj sonrası hali ile birlikte verilmiştir.



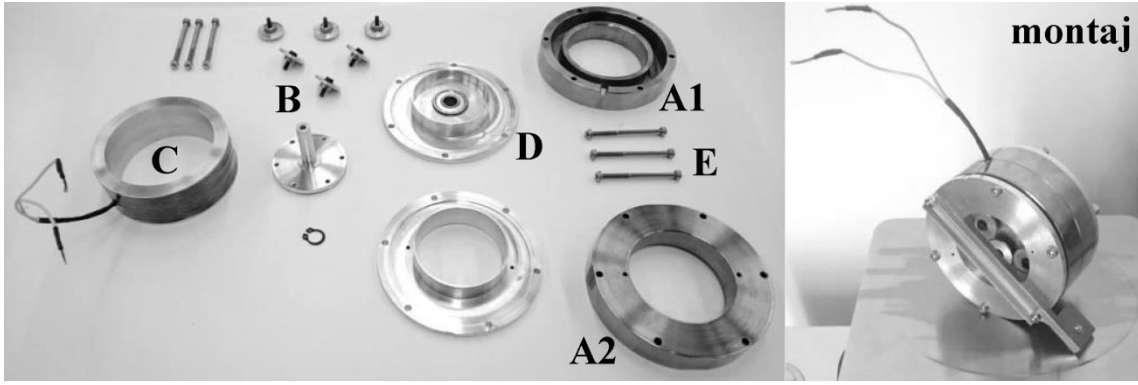
Resim 6.7 : (a) Zarlı döner peristaltik MRF frenin parçaları ve (b) montaj resmi.

MRF dolu elastik kartuşlu döner peristaltik MRF frenin bileşenleri sırası ile elektromıknatıs çekirdeğinin alt (A1) ve üst (A2) parçaları, merdaneler ile rotor (B), ayırıcı alüminyum halka (C), bobin (D), ve MRF dolu elastik kartuş Resim 6.8’de montaj sonrası hali ile birlikte verilmiştir.



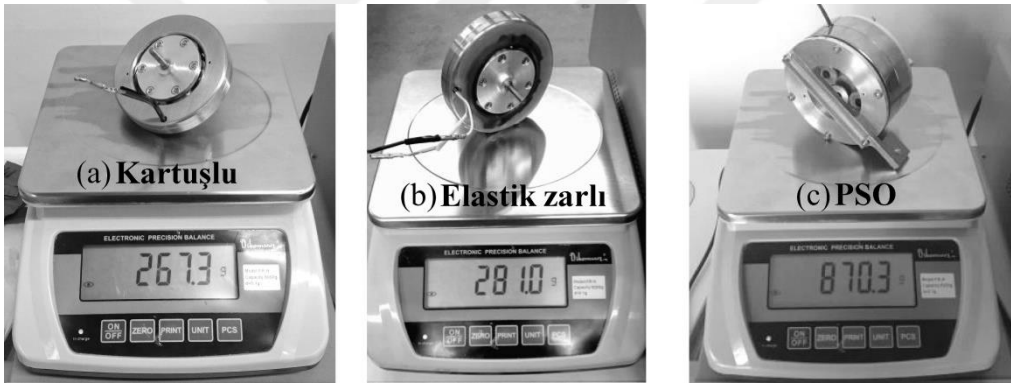
Resim 6.8 : (a) Hazneli döner peristaltik MRF frenin parçaları, ve (b) montaj resmi.

Ayırıcı elastik zar kullanılan ve PSO yöntemi kullanılarak ölçüleri elde edilen döner peristaltik MRF frenin bileşenleri sırası ile elektromıknatıs çekirdeğinin alt (A1) ve üst (A2) parçaları, merdaneler ile rotor (B), ayırıcı alüminyum halka ile bobin (C), üst ve yataklama görevi gören alt kapak (D), ve montaj elemanları (E) Resim 6.9’da montaj sonrası hali ile birlikte verilmiştir.



Resim 6.9 : (a) PSO tasarım döner peristaltik MRF frenin parçaları ve (b) montaj resmi.

Elastik ayırıcı zarlı ve elastik kartuşlu ve PSO yöntemi kullanılarak ölçüleri elde edilen elastik ayırıcı zarlı modellerin Dikomsan marka hassas terazide ölçülen 267,3, 281,0, ve 870,3 [gr] toplam ağırlıkları Resim 6.10'da verilmiştir.



Resim 6.10 : (a) Hassas terazi üzerinde MRF doldurulmuş hazneli döner MRF fren, (b) MRF doldurulmuş zarlı döner MRF fren, ve (c) PSO tasarımı.

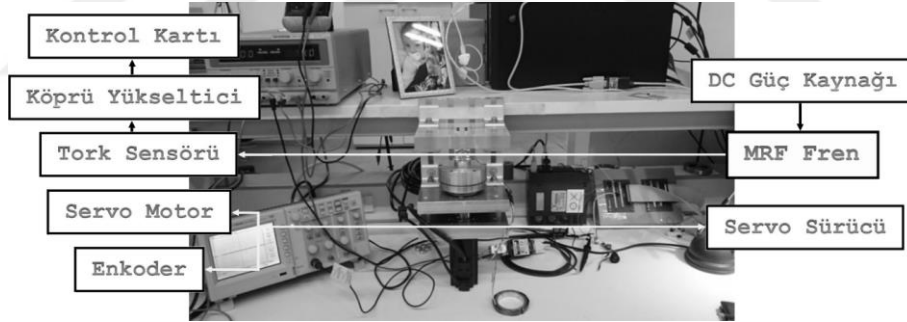
Frenlerin üretiminde kullanılan malzemelere ait bilgiler ve kullanıldıkları yerler Çizelge 6.2'de verilmiştir. Rotorda ve itici merdanelerde paramanyetik olan alüminyum kullanılarak akının büyük oranda MR akışkanının üzerinden geçmesi sağlanmıştır. İtici merdanelerde bilyalı rulmanlar kullanılarak merdanelerin dönmesi sonucu oluşan sürtünme en aza indirilmiştir. Ayrıca itici merdanelerin sayısı istenilmesi durumunda değiştirilebilmektedir. Manyetik gövde hem imal edilebilirlik hem de bobin sarımının gerçekleştirilebilmesi amacı ile iki parçalı olarak tasarlanmıştır.

Çizelge 6.2 : Zarlı, Hazneli ve PSO tasarımlarında kullanılan malzemeler.

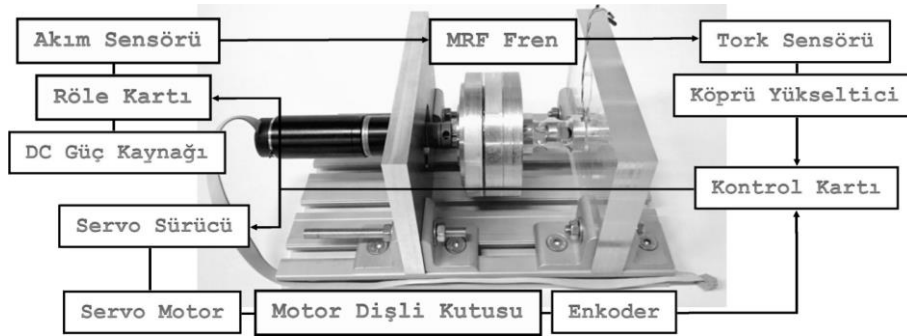
Malzeme	Kullanıldığı yer
Ortak Malzemeler	
6000 serisi Alüminyum	Rotor, İtici merdaneler, ayırıcı bilezik ve yataklama plakaları
Zarlı ve Hazneli Tasarım	
AISI 1010 Düşük karbon çeliği	Manyetik çekirdek
Ø 0,4 [mm] emaye izoleli bakır tel	Bobin teli
PSO Tasarım	
S235 Düşük karbonlu yapı çeliği	Manyetik çekirdek
Ø 0,5 [mm] emaye izoleli bakır tel	Bobin teli

6.3.4 Deney düzeneği

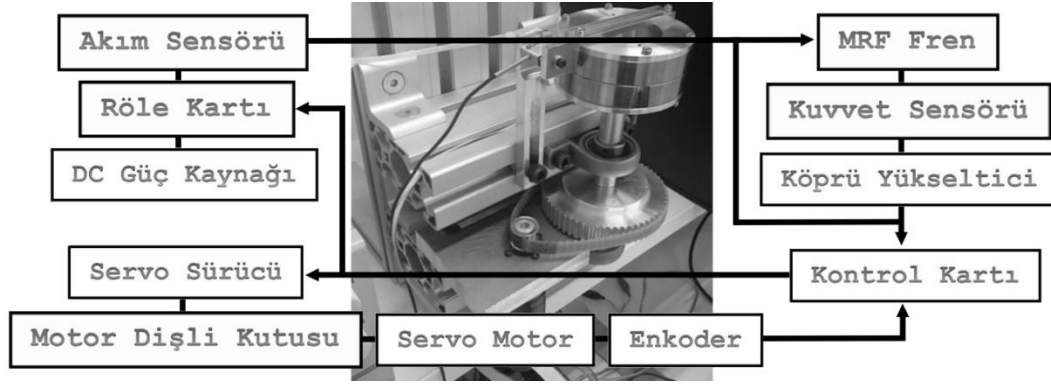
Şekil 6.6, Şekil 6.7, ve Şekil 6.8’de görülmekte olan düzeneklerde MRF fren gövdesini yataklamak için kullanılan destek plakaları aynı zamanda freni sıkıştırma görevini de yerine getirmektedir.



Şekil 6.6 : Döner MRF fren ölçümleri için kullanılan 1nci deney düzeneği ve diyagramı.



Şekil 6.7 : Döner MRF fren ölçümleri için kullanılan 2nci deney düzeneği ve diyagramı.



Şekil 6.8 : Döner MRF fren ölçümleri için kullanılan 3ncü deney düzeneği ve diyagramı.

Rotorların hareketleri açısal hızı, ve torku kontrol edilebilen bir doğru akım motoru kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Rotorların hareketlerine ait detaylar motorların arkasına monte edilmiş olan artımlı enkoderler yardımı ile elde edilmiştir. Deneyler sırasında elde edilen veriler gerçek zamanlı olarak HUMUSOFT veri toplama kartı ile yapılmıştır. Ayrıcı elastik zarlı frenin deneyleri hariç motorların ve pasif frenlerin kontrolü bilgisayar ortamında gerçek zamanlı bir şekilde MATLAB/Simulink Desktop Real-Time yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıcı elastik zarlı frenin deneyleri sırasında pasif frenin akım kontrolü ve akım giriş ve çıkış işlemleri el ile kontrol edilmiştir. Ayrıcı elastik zarlı frenin deneyleri sırasında ayrıca motorun hareketi ilgili firmanın sağladığı yazılım aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneklerinde ortak kullanılan bileşenlere ait detaylar Çizelge 6.3’de verilmiştir. Çizelge 6.4’de ayrırcı zar modeli deney düzeneği bileşenleri, Çizelge 6.5’de kartuşlu modeli deney düzeneği bileşenleri, ve Çizelge 6.6’da PSO modeli deney düzeneği bileşenleri verilmiştir.

Çizelge 6.3 : Ortak deney düzeneği bileşenleri.

Bileşen	Marka / Model	Kapasite
Kontrol kartı	HUMUSOFT MF634 Board	16 analog port, 16 digital port
Köprü yükseltici	Futek CSG-110	10 kHz
DC güç kaynağı	GW Instek GPC-3060D	2 adet 30V 6A port

Çizelge 6.4 : Ayırıcı zar modeli deney düzeneği bileşenleri.

Bileşen	Marka / Model	Kapasite
Servo motor	Delta AC Servo Motor ECMA C20604RS	VAC 110 A2,6 r/min 3000 N.m 1,27
Servo sürücü	Delta AC Servo Drive ASD B2 0421 B	750W 220V
Enkoder	ECMA 20bit	1280000 puls/dev
Tork sensörü	FUTEK TFF325	$\pm 1,3558$ N.m

Çizelge 6.5 : Kartuşlu modeli deney düzeneği bileşenleri.

Bileşen	Marka / Model	Kapasite
Servo motor	Maxon RE-35	1,25 Nm, 1500 dev/dak
Motor dişli kutusu	Planetary Gearhead GP 32 BZ	Oran 57/11, maksimum başarım %85
Enkoder	Maxon MR Type L	1024 puls/dev
Servo sürücü	Maxon ESCON 70/10	70V, 10A
Tork sensörü	FUTEK TFF325	$\pm 1,3558$ N.m
Akım kontrolcüsü	Pololu Simple Motor Controller 24v23	34V, 23A, max 40V
Akım sensörü	ACS712 Hall Current Sensor	66mV / A
Röle kartı	1 Yollu 12V Röle Modülü	12V, 10A

Çizelge 6.6 : PSO modeli deney düzeneği bileşenleri.

Bileşen	Marka / Model	Kapasite
Servo motor	Maxon RE-35	1,25 Nm, 1500 dev/dak
Motor dişli kutusu	Planetary Gearhead GP 32 BZ	Oran 57/11, maksimum başarım %85
Enkoder	Maxon MR Type L	1024 puls/dev
Servo sürücü	Maxon ESCON 70/10	70V, 10A
Kuvvet sensörü	FUTEK 485445 10lb Sensor	± 44,48 N
Akım kontrolcüsü	Pololu Simple Motor Controller 24v23	34V, 23A, max 40V
Akım sensörü	ACS712 Hall Current Sensor	66mV / A
Röle kartı	1 Yollu 12V Röle Modülü	12V, 10A
Triger Kayış Kasnak	T5 10 AL	Oran 1/6

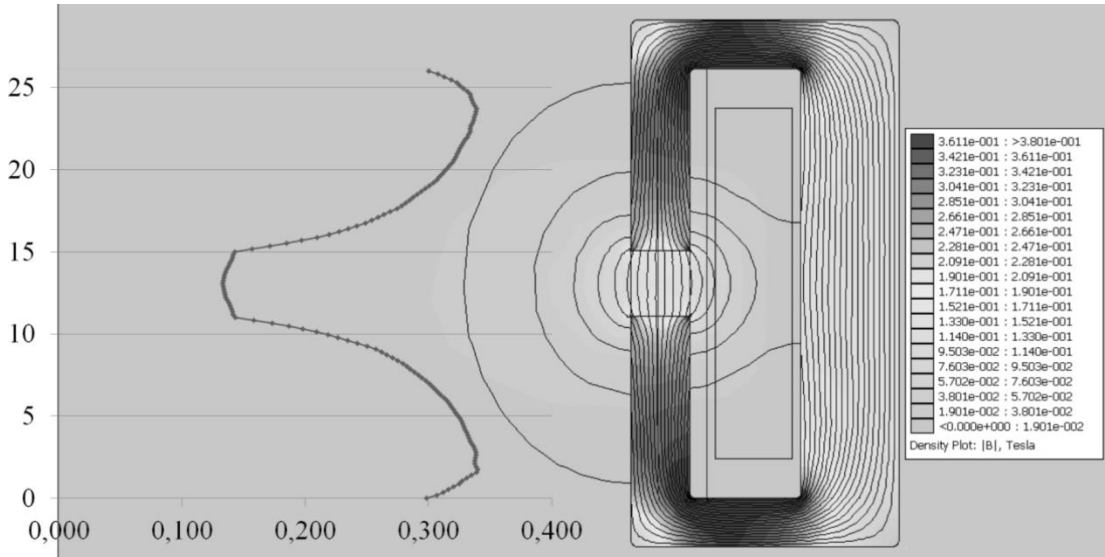
6.4 Bölüm Özeti

Peristaltik hareketi hedef alan prototip tasarımından sonra elektro mıknatıs ve peristaltik pompanın iç içe çalışabildiği bir prototip tasarlanmış ve son olarak özel bir elektro mıknatıs tasarımı kullanılarak akış modunda çalışan bir döner peristaltik manyetoreolojik fren elde edilmiştir. Geliştirilen son prototip ile kullanılmak üzere iki adet MRF haznesi tasarlanmıştır. Sıvı haznelerinin üretilebilmesi amacıyla hızlı takımlama yönteminden faydalanılmıştır. Her iki hazne tasarımı ile deneyler yapıldıktan sonra PSO algoritması kullanılarak tasarım için en iyileme çalışması gerçekleştirilmiştir. Sınırlamalar dâhilinde en iyilemesi yapılan frenin başarımının ölçülmesi amacıyla gerekli deneyler yapılmıştır.

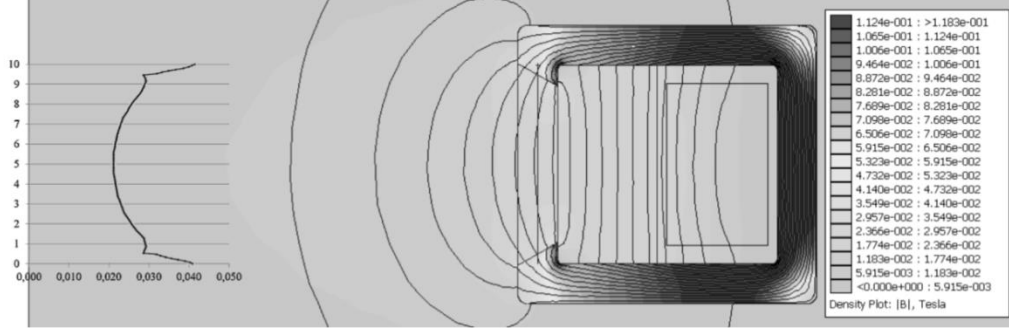
7. SAYISAL ANALİZ ve DENEYSEL SONUÇLAR

7.1 Manyetik Akı Analizi

Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de sırası ile PSO modelin boşluğundaki manyetik alana ve ayırıcı elastik zar modelin boşluğundaki manyetik alana ait FEMM yazılımı simülasyon sonuçları verilmiştir. Ayırıcı elastik zar modelin elektro mıknatısına ait FEMM modelinin simülasyonunda 1 A akım, 170 sarım sayısına sahip AWG 26 iletken bakır telden üretilmiş bobin kullanılmıştır. Benzer şekilde akış kanalında hava bulunan PSO modelin elektro mıknatısına ait FEMM modelinin simülasyonunda 1 A akım, 443 sarım sayısına sahip AWG 24 iletken bakır telden üretilmiş bobin kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarına ek olarak her iki modelin ayrıca akış kanallarının ortasından geçen doğru boyunca ölçülen manyetik alan kuvvetleri verilmiştir. Akış kanallarının ortasındaki manyetik alan kuvvetlerinin oranı, kanal yükseklikleri ve sarım sayıları kullanılarak yaklaşık olarak Eşitlik (3.2)’nin yardımı ile kontrol edilebilir.

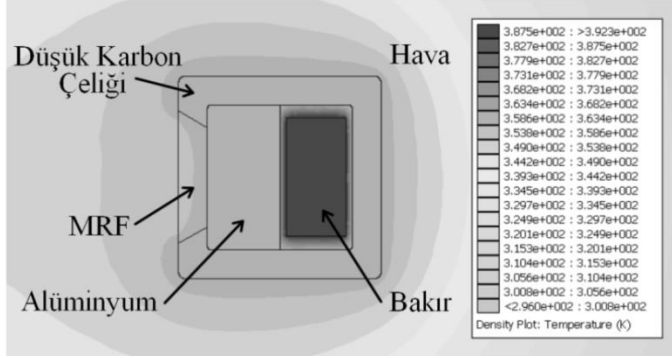


Şekil 7.1 : PSO modelin boşluğundaki manyetik alan.

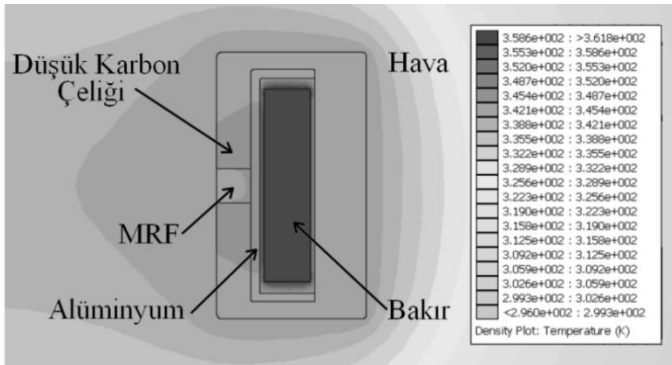


Şekil 7.2 : Ayırıcı elastik zar modelin boşluğundaki manyetik alan.

Sabit sarım sayısı ve sabit akım altında farklı iletken tel seçilmesi durumunda PSO tasarımındaki bobinde gözlemlenebilecek sıcaklık değerlerinin değişimi Çizelge 7.1’de verilmiştir. Çizelge 7.1’deki veriler kullanılarak hem hazneli ve zarlı hem de PSO tasarımlarında kullanılan manyetik çekirdeğe ait sayısal ısı transferi analiz sonuçları Şekil 7.3 ve Şekil 7.4’de görülmektedir. Şekil 7.3’de 1,586 A akım verilen elektro-mıknatısta MRF bulunan bölgenin sıcaklığının yaklaşık 90 °C seviyelerinde olacağı görülmektedir. Şekil 7.4’de ise MRF bulunan bölgenin sıcaklığının yaklaşık 80 °C seviyelerinde olacağı görülmektedir.



Şekil 7.3 : AWG 26 tel kullanılmış ve 1,586 A’de çalışan prototip için sayısal hesaplamalı ısı transfer analizi.



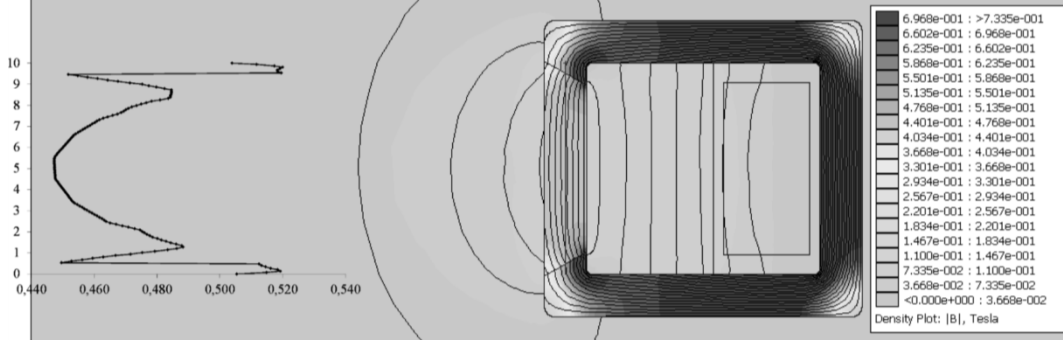
Şekil 7.4 : AWG 24 tel kullanılmış ve 0,8 A’de çalışan PSO tasarıma ait sayısal hesaplamalı ısı transfer analizi.

Çizelge 7.1 : Tel tipinin bobin sıcaklığına ve güç tüketimine etkisi.

Tel tipi	Verilen Akım [A]	Bobin Sıcaklığı [°C]	Güç Tüketimi [W]	Manyetomotor Kuvvet [sarım.A/m]
AWG 22	0,5	28,468	0,349	7,562
	1,0	37,157	1,395	15,125
	1,5	51,590	3,139	22,687
	2,0	71,696	5,580	30,250
	2,5	86,656	8,718	37,812
AWG 24	0,5	33,049	0,900	11,937
	1,0	55,396	3,600	23,875
	1,5	83,298	8,099	35,812
	2,0	114,955	14,399	47,750
AWG 26	0,5	45,624	2,417	19,063
	1,0	91,689	9,668	38,125
	1,5	146,348	21,753	57,188
AWG 28	0,5	70,609	6,057	30,313
	1,0	155,791	24,226	60,625

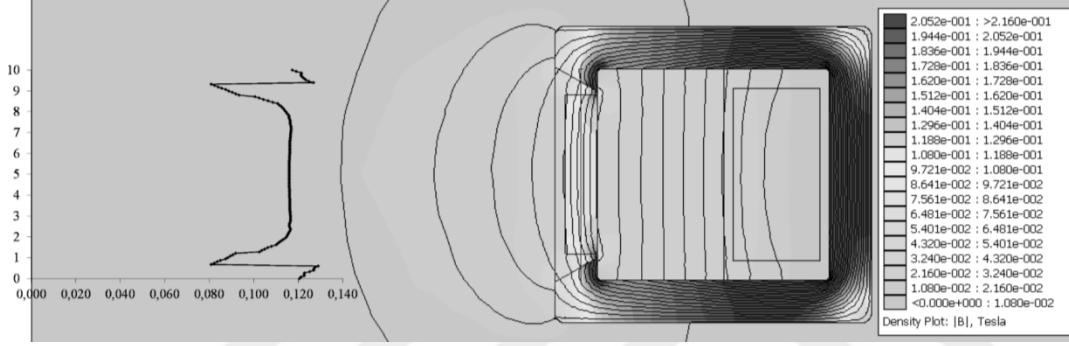
Isı transferi ve izin verilen akım şiddeti göz önüne alındığında büyük çaplı iletken tel ve düşük akım değerlerinin kullanılmasının daha doğru olduğu görülmektedir. Bobin sıcaklığı yaklaşık 90 °C iken AWG 22, AWG 24, AWG 26, ve AWG 28 için manyetomotor kuvvetler sırası ile 39,891, 37,861, 29,543, ve 22,174 sarım.A/m olarak elde edilmektedir. Elde edilen sarım sayıları sırası ile 121, 191, 305 ve 485 değerindedir. Teller için izin verilebilir en yüksek akım değerleri ise sırası ile 2,637, 1,586, 0,775, ve 0,582 A olarak tespit edilmiştir. Bobin için izin verilen sıcaklığın 90 °C olduğu kabulü ile en az güç tüketiminde en yüksek manyetomotor kuvveti veren telin AWG 24 olduğu elde edilen verilerden anlaşılmaktadır.

Elektro-mıknatısların tasarımlarının tamamlanmasının ardından, MRF içerisinde oluşacak manyetik alan değerleri FEMM yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 7.5'de MRF 132DG doldurulmuş kanala sahip elastik ayırıcı zar modelin 4,0 A akımda çalışan elektro-mıknatısına ait FEMM analizi sonuçları verilmiştir.



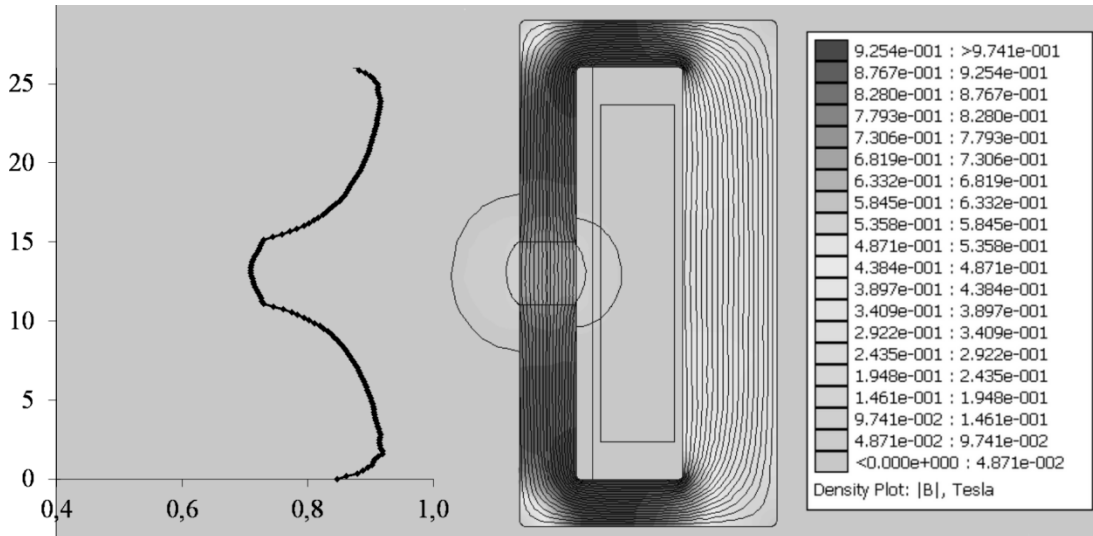
Şekil 7.5 : Ayırıcı zar modelin elektro-mıknatıs FEMM analizi.

Şekil 7.6'da MRF 122EG doldurulmuş kartuşa sahip kartuşlu modelin 1,4 A akımdaki elektro-mıknatısına ait FEMM analizi sonuçları verilmiştir.



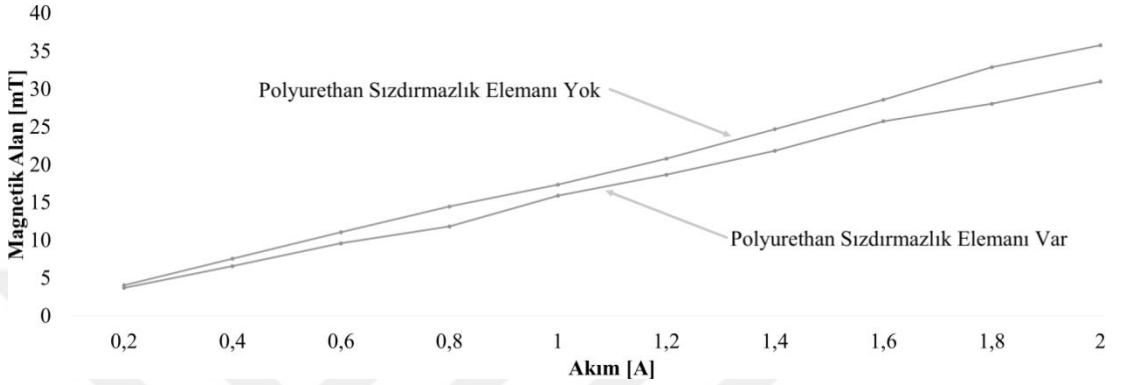
Şekil 7.6 : Kartuşlu modelin elektro-mıknatıs FEMM analizi.

Şekil 7.7'de MRF 140CG doldurulmuş PSO modelin 1,0 A akımdaki elektro-mıknatısına ait FEMM analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 7.7 : PSO modelin elektro-mıknatıs FEMM analizi.

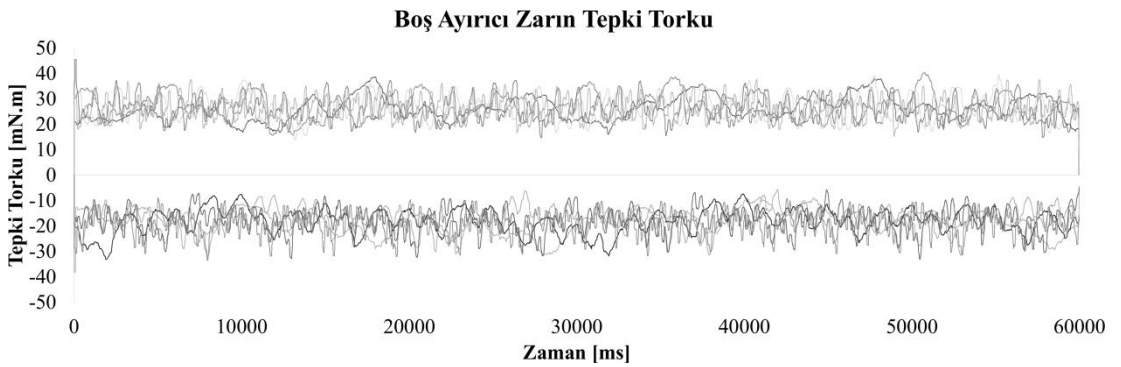
Şekil 7.8’de MRF elastik ayırıcı zar modelin kanal boşluğundaki manyetik alan değişimi verilmiştir. Manyetik alan değerleri yüksek hassasiyetli bir gaussölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin amacı poliüretan sızdırmaklık elemanlarının manyetik alan eldesi üzerine olan etkisinin elde edilmesidir. Ölçümler sonucu elde edilen %12,19 manyetik alan kaybı elastik ayırıcı zar modelin manyetik alan hesaplamalarına dahil edilmiştir.



Şekil 7.8 : Gauss metre Ayırıcı Zar Sızdırmazlık etkisi.

7.2 Ayırıcı Elastik Zar Modele ait Deneyler

Elastik ayırıcı zar modelin sadece zardan kaynaklanan tepki torkunun tespit edilebilmesi amacı ile ilk deneyler MRF doldurulmadan, akış kanalı boşken gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.9’da farklı dönme frekanslarında ölçülen ayırıcı elastik zar takılı boş frene ait saat yönündeki (SY) ve saatin tersi yönündeki (STY) tepki torku verileri verilmiştir.

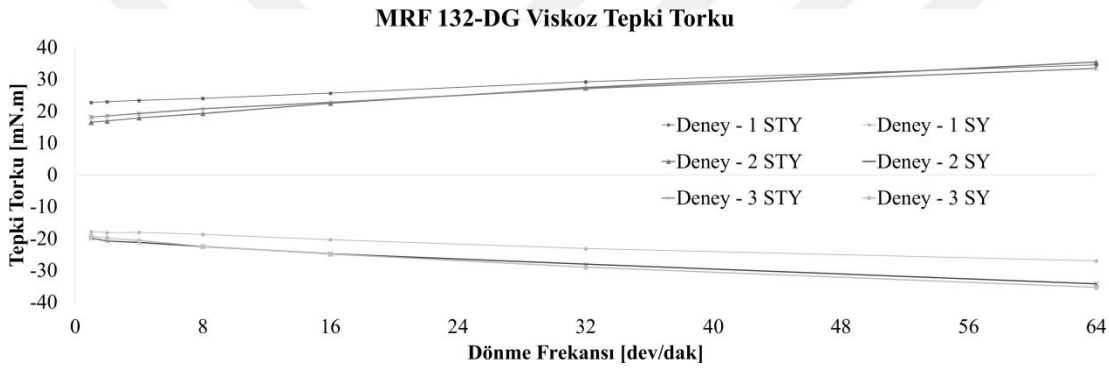


Şekil 7.9 : Ayırıcı elastik zar takılı boş frene ait tepki torkları.

Elastik ayırıcı zar kalınlığı Şekil 6.5’de 0,5 mm olarak verilmiştir. Fakat dış kalıp konvansiyonel tezgahlar kullanılarak üretildiği için elastik ayırıcı zar kalınlığının bölgesel olarak farklılık gösterdiği ve bazı bölgelerde 0,5 mm’den daha kalın olduğu

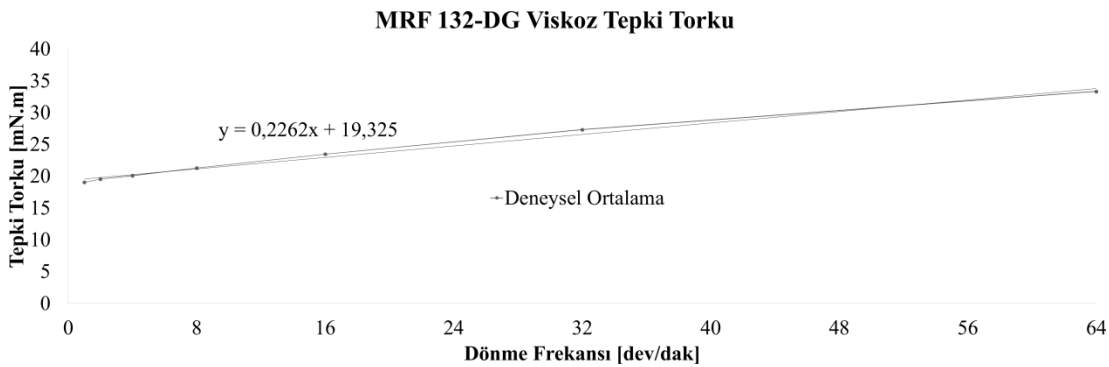
gözlemlenmiştir. Ayırıcı elastik zardan kaynaklanan tepki torkunun hareket yönünden bağımsız değerinin elde edilebilmesi amacı ile her iki yöndeki tepki torkunun ortalaması alınmıştır. Her noktada aynı kalınlığa sahip olmayan ayırıcı elastik zardan kaynaklanan ortalama tepki torku 22,3 mN.m ve standart sapma değeri 4,3 mN.m olarak elde edilmiştir. Dönme frekansından kaynaklanan tepki torku değerleri deneysel olarak gözlemlenemediği için göz ardı edilmiştir.

Ayırıcı elastik zarlı modele ait deneyler MRF 132DG akışkanı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneylere ait veriler Şekil EkC.1, Şekil EkC.2, ve Şekil EkC.3’de verilmiştir. Şekil 7.10’da ayırıcı elastik zar takılı MRF 132DG akışkan doldurulmuş fren ile yapılan tüm deneylerin saatin tersi yönündeki ve saat yönündeki ortalamaları kullanılarak elde edilmiş olan viskoz tepki torku verileri verilmiştir.



Şekil 7.10 : MRF 132DG dolu frenin saat yönünde (SY) ve saatin tersi yönündeki (STY) viskoz tepki torku.

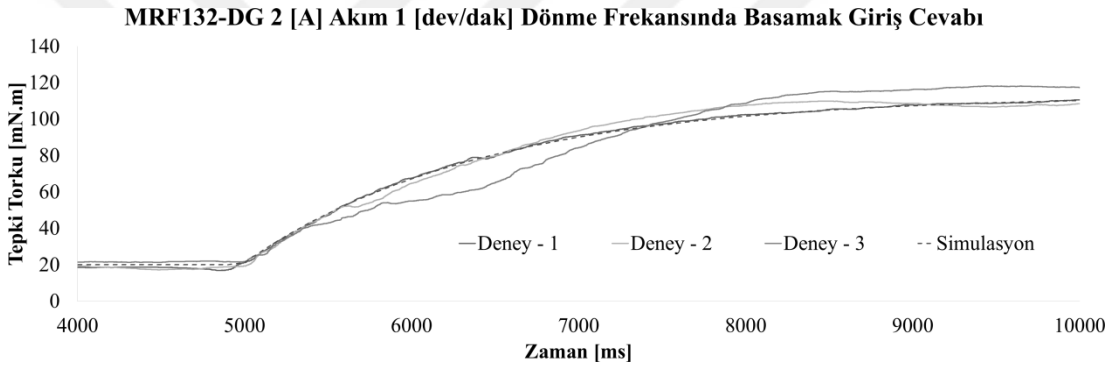
Şekil 7.11’de dönme yönünden bağımsız viskoz davranışın tespit edilebilmesi ve algılayıcıdan kaynaklanan ölçümsel hataların ortadan kaldırılması için saatin tersi yönündeki ve saat yönündeki tepki torklarının mutlak değerlerinin toplamının ortalaması alınmıştır.



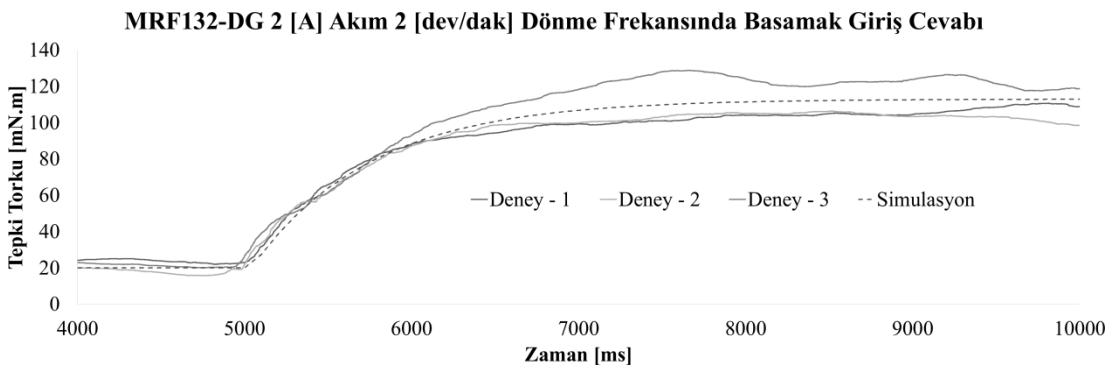
Şekil 7.11 : MRF 132DG dolu frenin viskoz tepki torku.

MRF 132DG dolu ayırıcı elastik zarlı fren modeli ile yapılan deneyler sonrası viskoz tepki torkuna ait eşitlik $y = 0,2262x + 19,325$ mN.m olarak tespit edilmiştir. Eşitlikteki x değişkeni dönme frekansını temsil etmektedir.

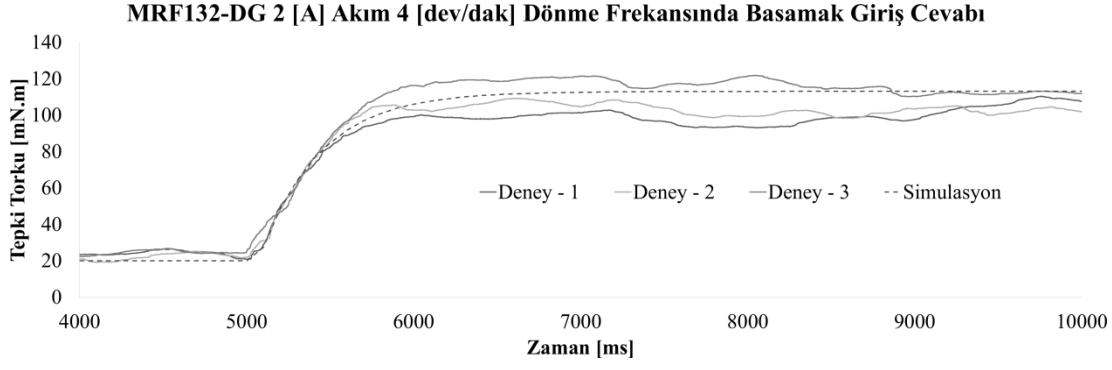
MRF 132DG dolu ayırıcı elastik zarlı fren modeli ile yapılan saatin tersi ve saat yönündeki 1 dev/dak dönme frekansından 16 dev/dak dönme frekansına kadar gerçekleştirilen deneylere ait tepki torku verileri Şekil EkC.4'ten Şekil EkC.18'e kadar olan şekillerde verilmiştir. Sistemin dönme yönünden bağımsız basamak girişe cevabın tespit edilebilmesi ve algılayıcıdan kaynaklanan ölçümsel hataların ortadan kaldırılması için saatin tersi yönündeki ve saat yönündeki tepki torklarının mutlak değerlerinin toplamının ortalaması alınmıştır. Şekil 7.12'den Şekil 7.16'ya kadar olan şekillerde sırası ile 1 dev/dak'dan 16 dev/dak'ya kadar olan dönme frekansındaki 2,0 A akım verilmiş sistemin basamak girişe cevaplar verilmiştir.



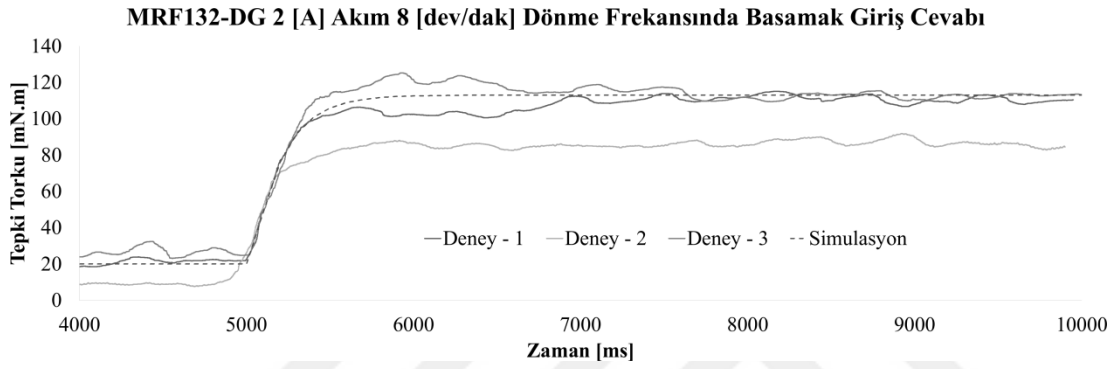
Şekil 7.12 : 1 [dev/dak] dönme frekansındaki 2,0 A akım verilmiş sistemin basamak girişe cevabı ve MATLAB simulasyon sonuçları.



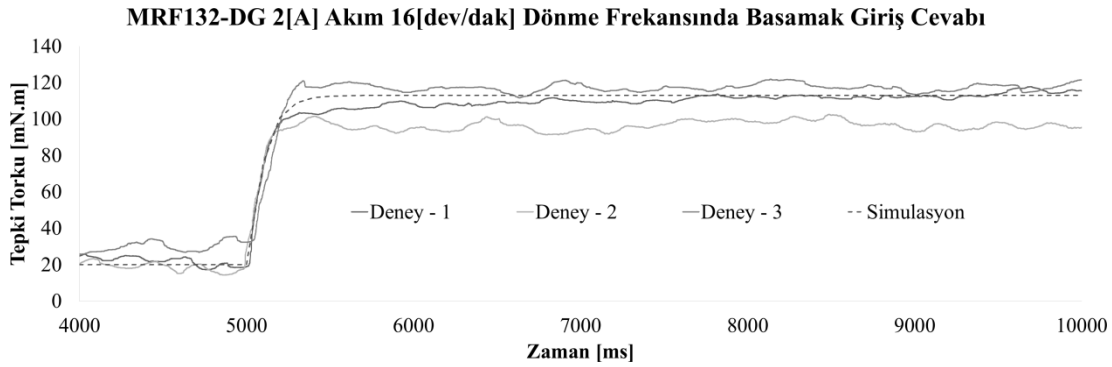
Şekil 7.13 : 2 dev/dak dönme frekansındaki 2,0 A akım verilmiş sistemin basamak girişe cevabı ve MATLAB simulasyon sonuçları.



Şekil 7.14 : 4 dev/dak dönme frekansındaki 2,0 A akım verilmiş sistemin basamak giriş cevabı ve MATLAB simulasyon sonuçları.



Şekil 7.15 : 8 dev/dak dönme frekansındaki 2,0 A akım verilmiş sistemin basamak giriş cevabı ve MATLAB simulasyon sonuçları.



Şekil 7.16 : 16 dev/dak dönme frekansındaki 2,0 A akım verilmiş sistemin basamak giriş cevabı ve MATLAB simulasyon sonuçları.

MRF 132DG dolu ayırıcı elastik zarlı fren modeli ile yapılan saatin tersi ve saat yönündeki 16 dev/dak dönme frekansındaki deneyler sonucu sistemin 16 dev/dak dönme frekansındaki zaman sabitinin 0,09 s olduğu tespit edilmiştir.

Zaman sabiti sırası ile 1,44 s, 0,72 s, 0,36 s, 0,18 s, ve 0,09 s olan sistemlerin basamak giriş cevaplarını gösteren MATLAB simulasyon sonuçları Şekil 7.12, Şekil

7.13, Şekil 7.14, Şekil 7.15, ve Şekil 7.16'daki şekillerde deneysel veriler ile birlikte gösterilmiştir. Zaman sabitine ait matematiksel bir ifade n dev/dak dönme frekansında çalışan elastik ayırıcı zarlı MRF frende ($16 \geq n \geq 1$) deneysel veriler ışığında $t_c = 1,44/n$ saniye şeklinde elde edilmektedir.

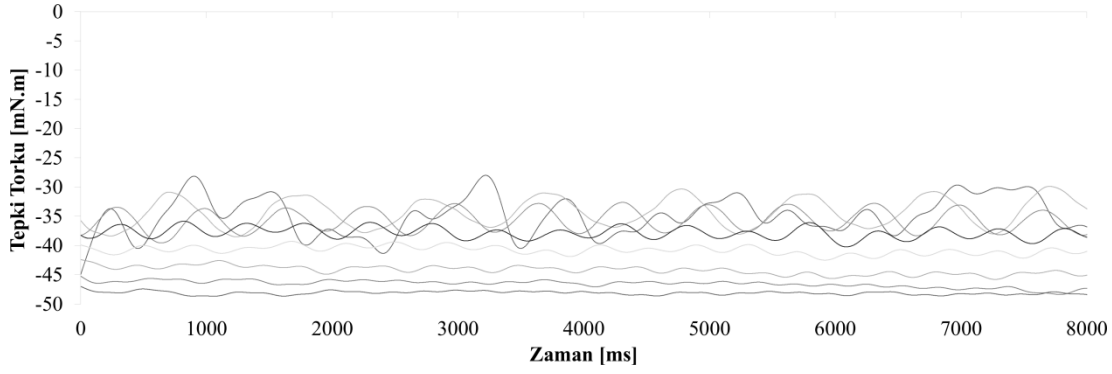
MRF 132DG dolu ayırıcı elastik zarlı fren modeli ile yapılan saatin tersi ve saat yönündeki 16 dev/dak dönme frekansındaki deneylerine ait kararlı durum tepki torku verileri Şekil EkC.19, Şekil EkC.20, ve Şekil EkC.21'de verilmiştir. MRF 132DG dolu ayırıcı elastik zarlı fren modeli ile yapılan 16 dev/dak dönme frekansındaki deneylere ait veriler, hareket yönünden bağımsız tepki torkunun tespit edilebilmesi ve algılayıcıdan kaynaklanan ölçümsel hataların ortadan kaldırılması için saatin tersi yönündeki ve saat yönündeki tepki torklarının mutlak değerlerinin toplamının ortalaması alınmıştır. Bu veriler ayrıca Çizelge 7.2'da teorik veriler ile karşılaştırılmış ve fark yüzdesel oran olarak hesaplanmıştır. Çizelge 7.2'da verilen teorik hesaplamalara ayrıca ayırıcı elastik zardan kaynaklanan 19,325 mN.m tepki torku verisi de eklenmiştir. Teorik veriler hesaplanırken Eşitlik (4.77) ile Şekil EkB.1, Şekil EkB.2 ve Şekil EkB.3'deki $H-\tau$ eğrilerinden faydalanılmış ve poliüretan sızdırmazlık elemanlarından kaynaklanan %12,19 oranındaki manyetik alan kaybı da hesaplamalara dahil edilmiştir.

Çizelge 7.2 : MRF 132DG dolu frenin ortalama tepki torku.

Akım [A]	1	2	3	4
Ortalama Değer [mN.m]	69,252	125,786	198,586	266,101
Standart Sapma [mN.m]	4,338	5,225	6,807	13,062
Teorik Hesaplama [mN.m]	79,716	150,354	223,230	288,652
Fark [%]	13,1	16,3	11,0	7,8

7.3 Kartuşlu Modele ait Deneyler

MRF 122EG doldurulmuş kartuşlu modelin viskoz tepki torkunun elde edilebilmesi amacı ile Şekil 7.17'de sonuçları gösterilen farklı dönme frekanslarında deneyler gerçekleştirilmiştir.



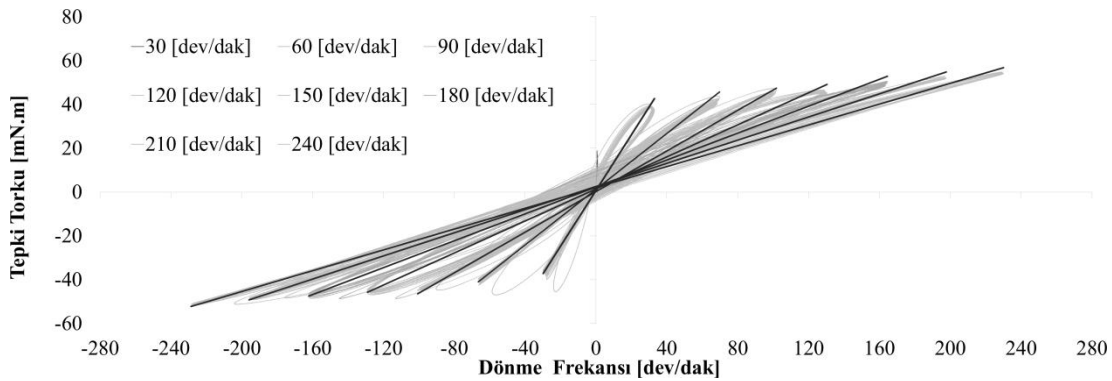
Şekil 7.17 : MRF 122EG dolu frenin farklı dönme frekanslarındaki harekete tepki torku.

Farklı dönme frekanslarındaki harekete tepki torku değerlerine ait ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 7.3'de ilgili dönme frekansları ile birlikte verilmiştir.

Çizelge 7.3 : MRF 122EG dolu frenin farklı dönme frekanslarındaki harekete tepki torku.

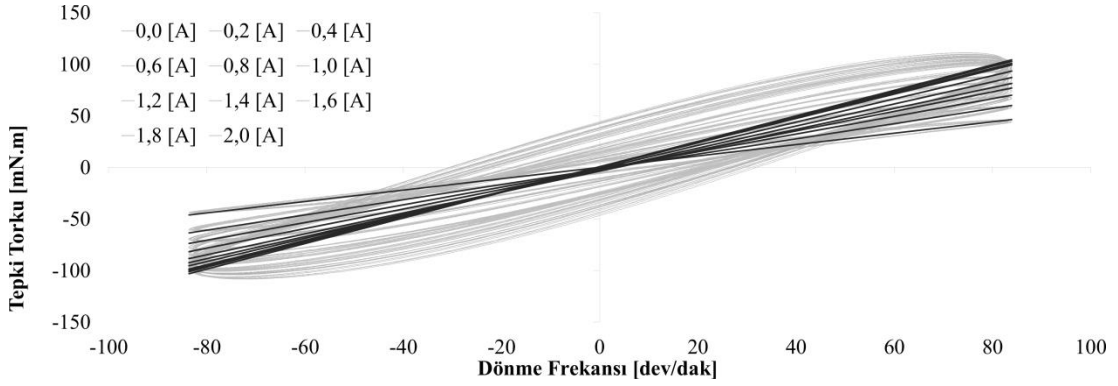
Dönme Frekansı [dev/dak]	30	60	90	120	150	180	210	240
Ortalama Değer [mN.m]	34,9	34,4	35,6	37,8	40,8	44,2	46,5	48,1
Standart Sapma [mN.m]	3,2	2,4	1,8	1,0	0,7	0,7	0,6	0,3

Şekil 7.18'da MRF 122EG dolu frenin 1 Hz frekansındaki uyarıtıma farklı dönme frekanslarında verdiği tepki torku görülmektedir. Davranışın genel olarak yatay ekseninde dönme frekansını, dikey ekseninde ise elastik kartuş ve viskoz tepki torku değerlerinin toplamını temsil ettiği anlaşılmaktadır.



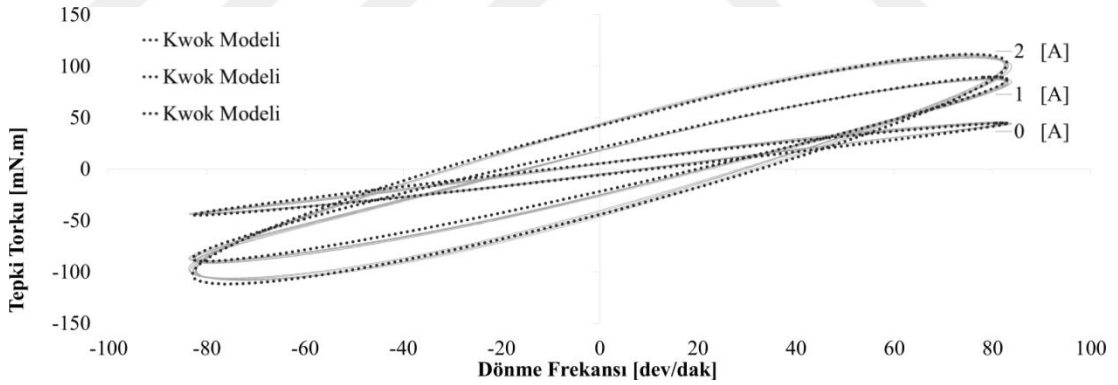
Şekil 7.18 : MRF 122EG dolu frenin 1 Hz frekansındaki uyarıtıma farklı dönme frekanslarında verdiği tepki torku.

Şekil 7.19’da MRF 122EG dolu frenin 1 Hz frekansındaki uyarıtıma 120 dev/dak dönme frekansı ve farklı akım değerlerinde verdiği tepki davranışı görülmektedir. Histerezis davranışının akımdaki artış ile arttığı görülmektedir.



Şekil 7.19 : MRF 122EG dolu frenin 1 Hz frekansındaki uyarıtıma 120 dev/dak dönme frekansı ve farklı akım değerlerinde verdiği tepki torku.

Şekil 7.19’da net biçimde gözlemlenemeyen bu artış Şekil 7.20’de 0, 1 ve 2 A akım değerleri için tekrar gösterilmiştir. Ayrıca histerezis davranışı Kwok modeli ile tekrar elde edilmiştir.



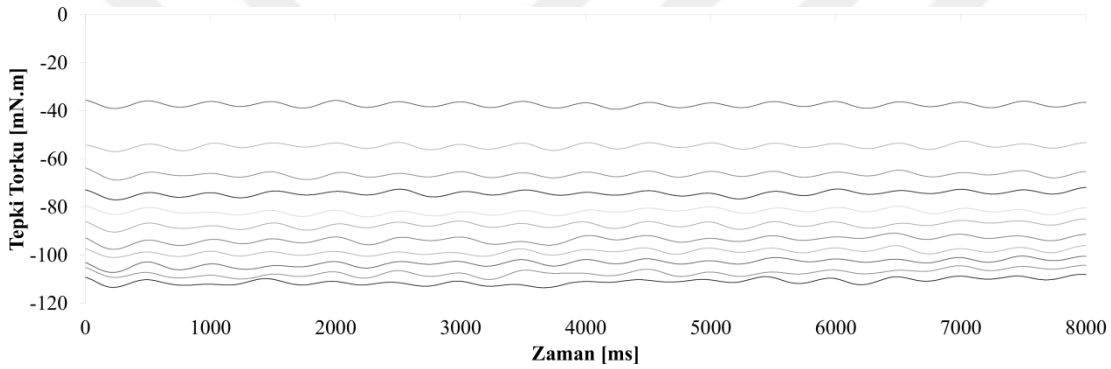
Şekil 7.20 : MRF 122EG dolu frenin 1 Hz frekansındaki uyarıtıma 120 dev/dak dönme frekansı ve 0, 1, ve 2 A akım değerlerinde verdiği tepki torku ve Kwok cebirsel histerezis modeli simülasyon verileri.

Deneysel veriler ile örtüşen Kwok modeli parametreleri 0, 1, ve 2 A akım için sırası ile Çizelge 7.4’de ortak ve ortak olmayan parametreler şeklinde verilmiştir.

Çizelge 7.4 : MRF 122EG dolu frenin 1 [Hz] frekansındaki uyarıtıma 120 [dev/dak] dönme frekansı ve 0, 1, ve 2 [A] akım değerlerinde verdiği tepki torkunun Kwok cebirsel histerezis modeli parametreleri.

0 [A] akım	$k = 0,08, c = 0,5$
1 [A] akım	$k = 0,28, c = 1,02$
2 [A] akım	$k = 0,56, c = 1,2$
Ortak parametreler	$\alpha = 0,064, \beta = 1,2, \gamma = -0,12, f_0 = 0,0$

Şekil 7.21’de MRF 122EG dolu frenin 120 dev/dak dönme frekansında farklı akım değerlerine verdiği tepki torku değerleri verilmiştir.



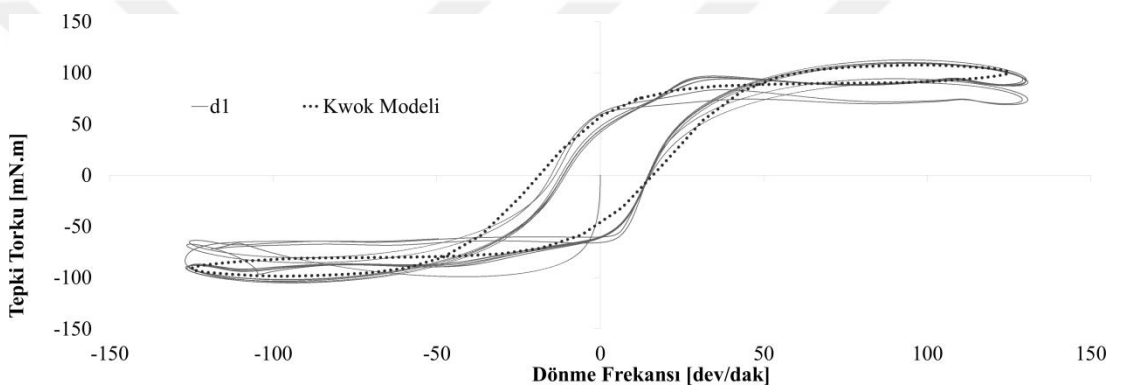
Şekil 7.21 : MRF 122EG dolu frenin 120 dev/dak dönme frekansında farklı akım değerlerine verdiği tepki torku.

Şekil 7.21’de kullanılan akım değerleri Çizelge 7.5’de verilmiştir. Çizelge 7.5’de ayrıca ortalama tepki torku, standart sapma ve fark yüzdesel oran olarak verilmiştir. Fark hesaplamasında kullanılan teorik değerlere elastik kartuştan kaynaklanan 37 mN.m tepki torku da eklenmiştir. Çizelge 7.5’de elde edilen en düşük fark değeri %2 ile 1,4 A kullanılan deney olarak gözlemlenmektedir.

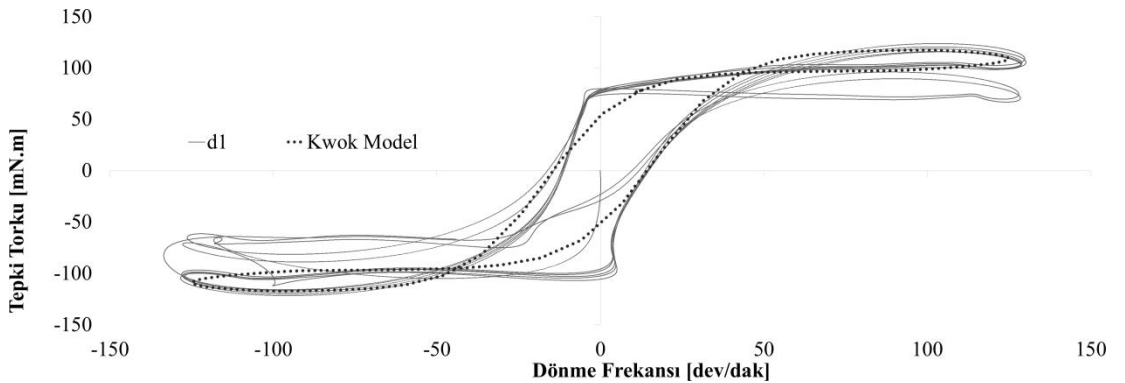
Çizelge 7.5 : MRF 122EG dolu frenin 120 [dev/dak] dönme frekansında farklı akım değerlerine verdiği tepki torku.

Akım [A]	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Ortalama Değer [mN.m]	37	55	66	74	82	87	94	99	103	107	111
Standart Sapma [mN.m]	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,3	1,1	1,4	1,3	1,2
Teorik Hesaplama [mN.m]	37	44	52	60	68	77	87	97	107	116	125
Mutlak Fark [%]	0	26	27	23	20	12	8	2	4	8	11

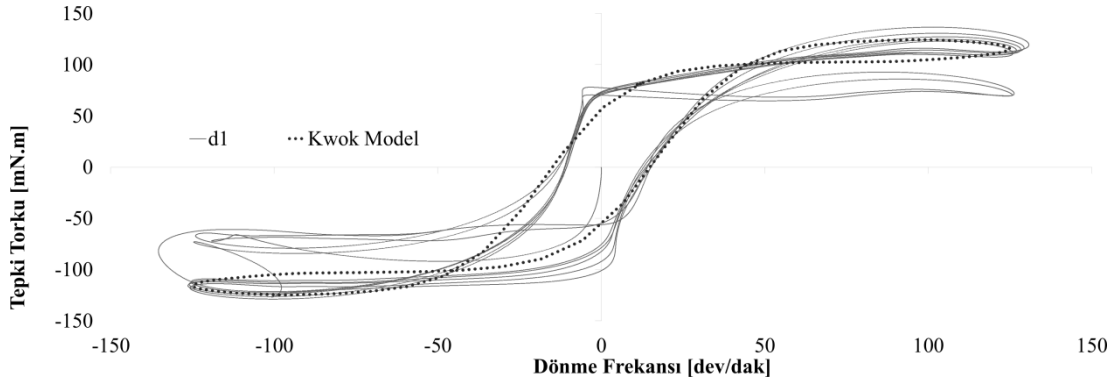
MRF fren, kavrama ve sönmüleyicilerin dinamik davranışlarının simule edilmesi için kullanılan Kwok modelinin α , β , γ , c , ve k karakteristik parametreleri, deneysel veriler kullanılarak tahmin edilmiştir. Deneysel veriler kullanılarak gerçekleştirilen eğri uydurma sürecinde kartuşlu MRF frenin 120 dev/dak dönme frekansındaki 0,25 Hz uyartıma farklı akım değerlerinde verdiği tepki torku verileri kullanılmıştır. Eğri uydurma sürecinde MATLAB yazılımına ait Curve Fitting aracı kullanılmıştır. Şekil 7.22, 7.23, 7.24, ve 7.25’de MRF 122EG dolu frenin 0,25 Hz frekansındaki uyartıma 120 dev/dak dönme frekansında 0,5, 1,0, 1,5, ve 2,0 A akım değerlerinde verdiği tepki torku ve Kwok cebirsel histerezis modeli simülasyon sonucu gösterilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan Kwok modeli parametreleri Çizelge 7.6’da ayrıca verilmiştir.



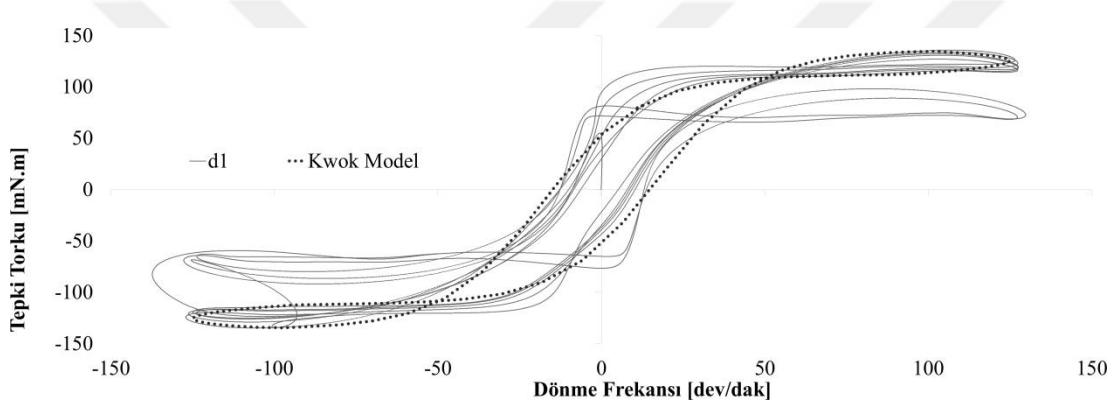
Şekil 7.22 : MRF 122EG dolu frenin 0,25 Hz frekansındaki uyartıma 120 dev/dak dönme frekans ve 0,5 A akım değerinde verdiği tepki torku ve Kwok cebirsel histerezis modeli simülasyon verileri.



Şekil 7.23 : MRF 122EG dolu frenin 0,25 Hz frekansındaki uyartıma 120 dev/dak dönme frekans ve 1,0 A akım değerinde verdiği tepki torku ve Kwok cebirsel histerezis modeli simülasyon verileri.



Şekil 7.24 : MRF 122EG dolu frenin 0,25 Hz frekansındaki uyartıma 120 dev/dak dönme frekansı ve 1,5 A akım değerinde verdiği tepki torku ve Kwok cebirsel histerezis modeli simülasyon verileri.

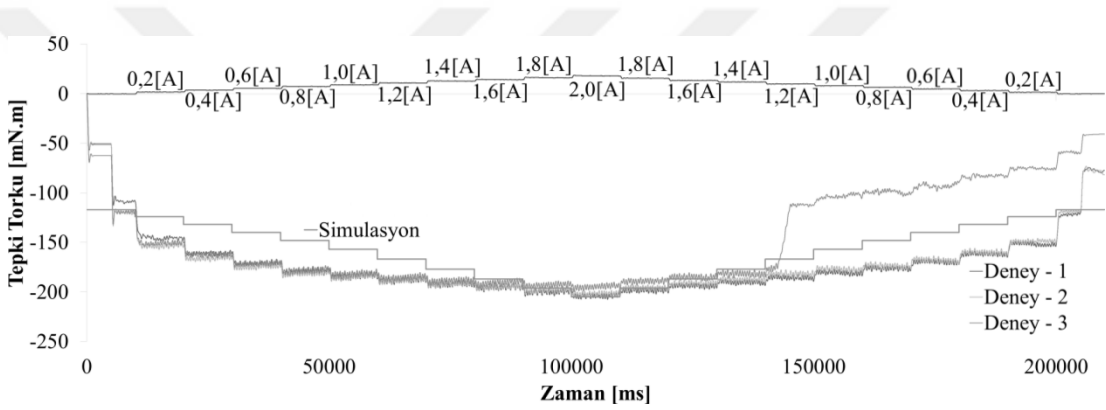


Şekil 7.25 : MRF 122EG dolu frenin 0,25 Hz frekansındaki uyartıma 120 dev/dak dönme frekansı ve 2,0 A akım değerinde verdiği tepki torku ve Kwok cebirsel histerezis modeli simülasyon verileri.

Çizelge 7.6 : MRF 122EG dolu frenin 0,25 Hz frekansındaki uyartıma 120 dev/dak dönme frekansı ve 0,0, 0,5, 1,0, ve 2,0 A akım değerlerinde verdiği tepki torkunun Kwok cebirsel histerezis modeli parametreleri.

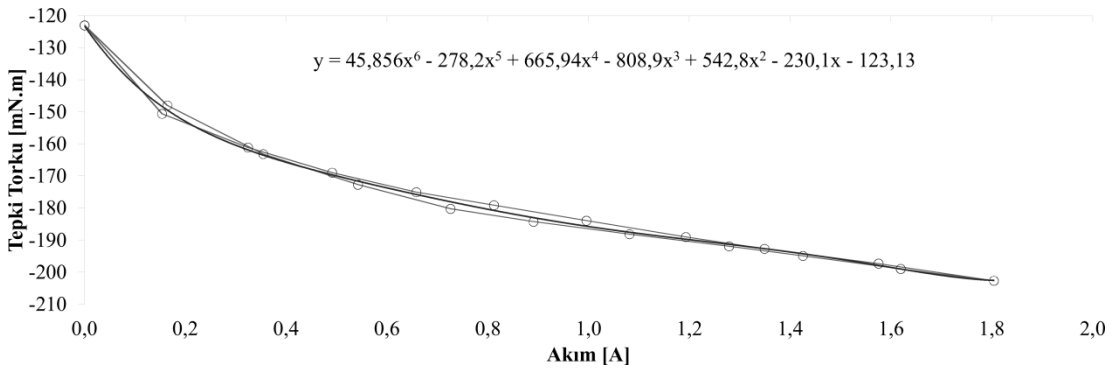
0,5 [A] akım	$k = 0,48, c = 0,08, \alpha = 3,2, \beta = 5,0, \gamma = -0,8$
1,0 [A] akım	$k = 0,48, c = 0,08, \alpha = 3,2, \beta = 5,2, \gamma = -0,7$
1,5 [A] akım	$k = 0,48, c = 0,08, \alpha = 3,2, \beta = 5,0, \gamma = -0,7$
2,0 [A] akım	$k = 0,48, c = 0,08, \alpha = 3,2, \beta = 4,2, \gamma = -0,6$

Şekil 7.26, Şekil 7.28, ve Şekil 7.30'da sırası ile MRF 122EG, MRF 132DG ve MRF 140CG dolu frenlerin 3'er adet deneylerine ait artan ve azalan akım değerlerine verdikleri tepki torku verileri ve teorik sonuçlar sunulmuştur. Akım değerleri akım kontrolcüsüne gönderilen değerleri temsil etmektedirler. MRF frene dönme hareketi 5nci saniyeden sonra verilmiş ve fren 205nci saniyede durdurulmuştur. Şekillerde teorik ve deneysel sonuçlar arasında belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. Şekil 7.26 ve Şekil 7.28'de deneyler sırasında yırtılan kartuşlardan elde edilen veriler de görülmektedir. Bu veriler incelendiğinde tepki torku değerlerinin akıma bağlı değişmeye devam ettiği ve 0,2 ve 0,4 A akım değerlerinde ise akış modu tepki torklarına benzer tepki torku değerleri elde edildiği görülmektedir.

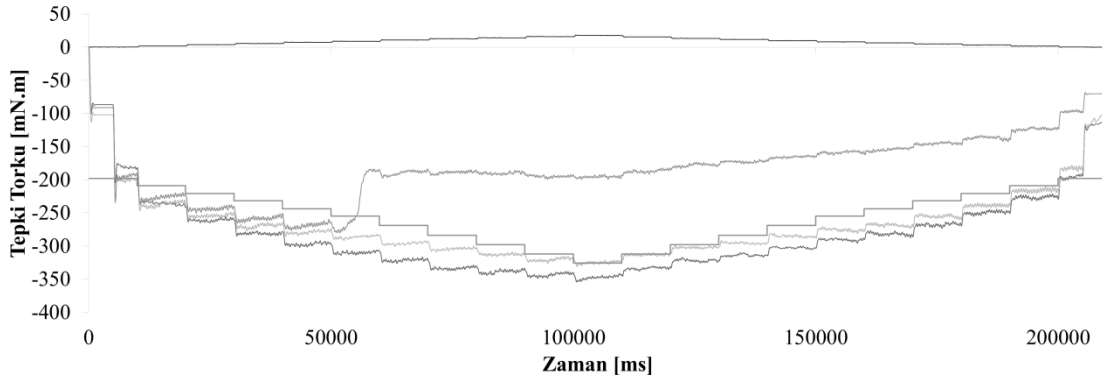


Şekil 7.26 : MRF 122EG dolu frenin 3 adet deneyine ait artan ve azalan akım değerlerine verdiği tepki torku ve teorik sonuçlar.

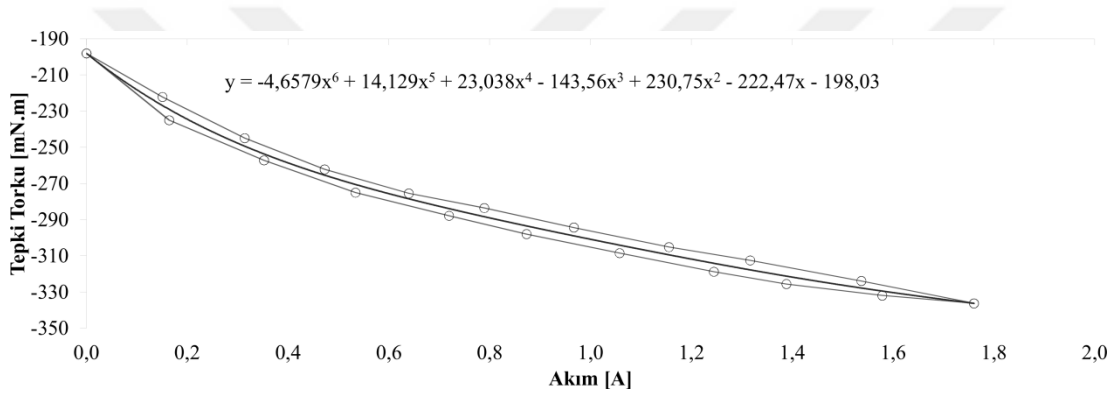
Şekil 7.27, Şekil 7.29, ve Şekil 7.31'de sırası ile MRF 122EG, MRF 132DG, ve MRF 140CG dolu frenin artan ve azalan akım değerlerine bağlı oluşan histerezis davranışı verilmiştir.



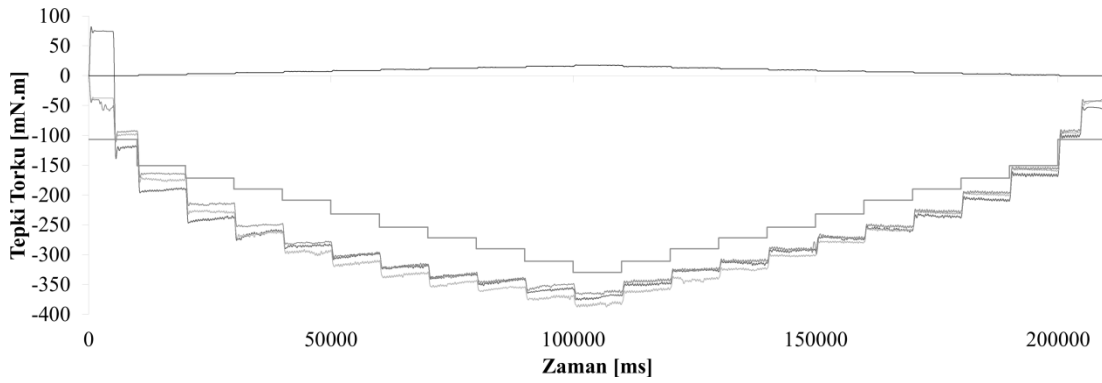
Şekil 7.27 : MRF 122EG dolu frenin artan ve azalan akım değerlerine bağlı oluşan histerezis davranışı.



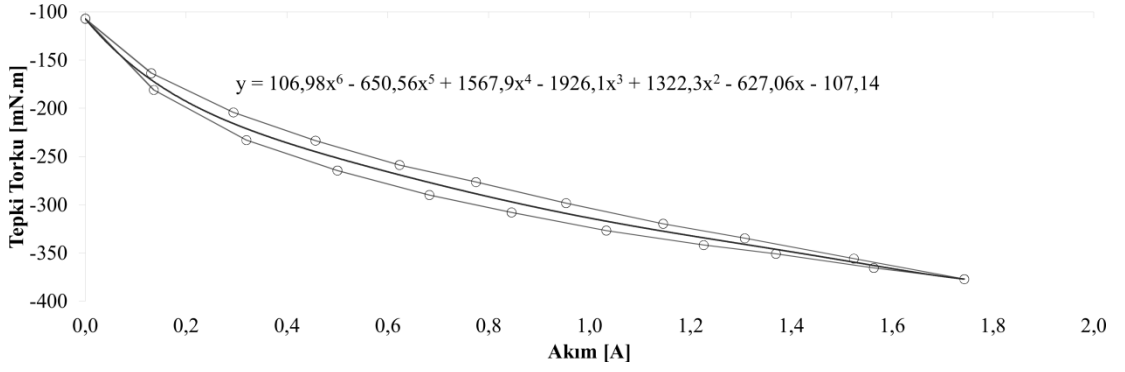
Şekil 7.28 : MRF 132DG dolu frenin 3 adet deneyine ait artan ve azalan akım değerlerine verdiği tepki torku ve teorik sonuçlar.



Şekil 7.29 : MRF 132DG dolu frenin artan ve azalan akım değerlerine bağlı oluşan histerezis davranışı.



Şekil 7.30 : MRF 140CG dolu frenin 3 adet deneyine ait artan ve azalan akım değerlerine verdiği tepki torku ve teorik sonuçlar.



Şekil 7.31 : MRF 140CG dolu frenin artan ve azalan akım değerlerine bağlı oluşan histerezis davranışı.

Artan akım değerlerinde, tepki torkunun ve ölçülen akım değerinin azalan akım değerlerindeki değerlerden fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca akım değerlerinin arzu edildiği gibi 2,0 A değerine ulaşamadığı gözlemlenmiştir. Akım değerlerinin 1,8 A seviyelerinde kalmasına elektro mıknatısın aşırı ısınması sebebiyet vermiştir. Her üç kartuşlu tasarımın akıma bağlı üreteceği tepki torkuna ait eşitlikler aşağıda MRF 122EG, MRF 132DG, ve MRF 140CG için sırası ile verilmiştir.

$$y = 45,856x^6 - 278,2x^5 + 665,94x^4 - 808,9x^3 + 542,8x^2 - 230,1x - 123,13 \quad (7.1)$$

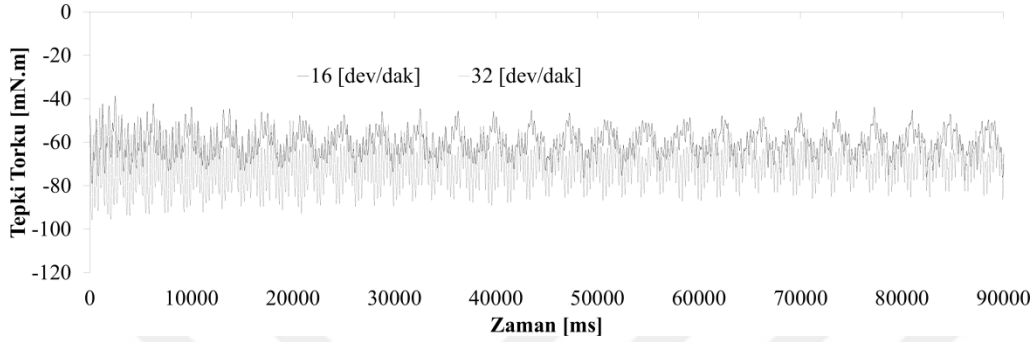
$$y = -4,6579x^6 + 14,129x^5 + 23,038x^4 - 143,56x^3 + 230,75x^2 - 222,47x - 198,03 \quad (7.2)$$

$$y = 106,98x^6 - 650,56x^5 + 1567,9x^4 - 1926,1x^3 + 1322,3x^2 - 627,06x - 107,14 \quad (7.3)$$

Teorik hesaplamalar ile deneysel verilerin arasındaki farklılığın sebepleri arasında kartuş geometrisi ile elektro mıknatısın akış kanalı geometrisinin uyumlu olmaması, akış modu varsayımının geometrik uyumsuzluğa bağlı olarak geçerliliğini yitirmesi, ve metal yüzey yerine ferromanyetik parçacıkların elastik yüzey ile temas halinde olması gösterilebilir.

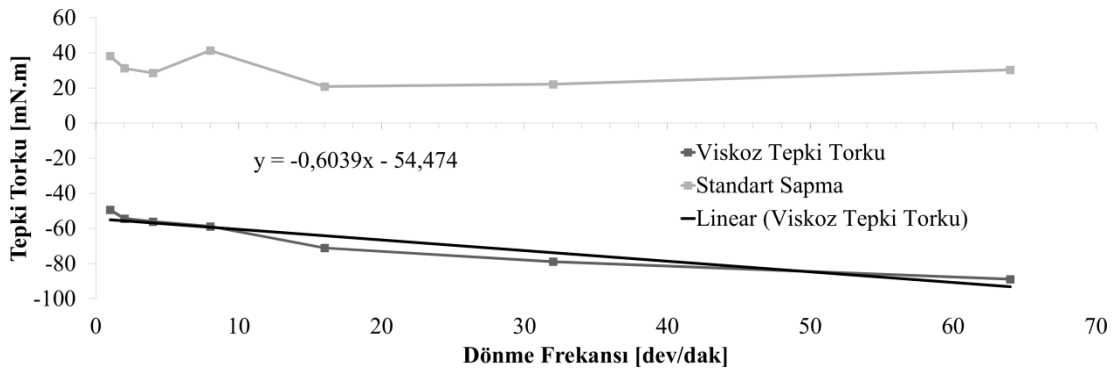
7.4 PSO Deneyleri

Bu bölümde MRF 140CG ve MRF 122EG akışkanları ile parçacık sürü en iyilemesi yapılan tasarıma ait deney sonuçları verilmiştir. Şekil 7.32’de 16 dev/dak ve 32 dev/dak dönme frekansındaki boş elastik ayırıcı zara ait tepki torku verileri verilmiştir.



Şekil 7.32 : 16 dev/dak ve 32 dev/dak dönme frekansındaki boş elastik ayırıcı zara ait tepki torku verileri.

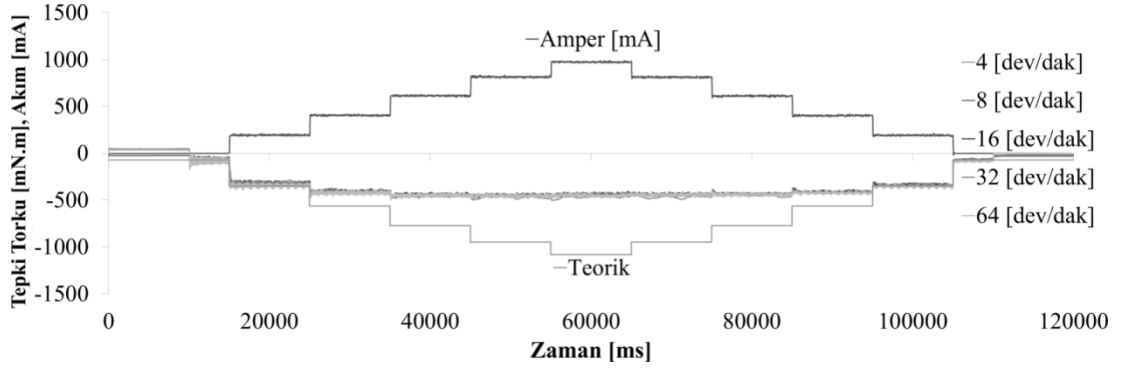
Şekil 7.33’de 1, 2, 4, 8, 16, 32, ve 64 dev/dak dönme frekanslarındaki tepki torklarının ortalamaları kullanılarak elde edilen doğrusal viskoz tepki torku doğrusu, ortalama tepki torkları ve standart sapma değerleri verilmiştir.



Şekil 7.33 : Farklı dönme frekanslarındaki MRF 140CG dolu frenin viskoz tepki torku.

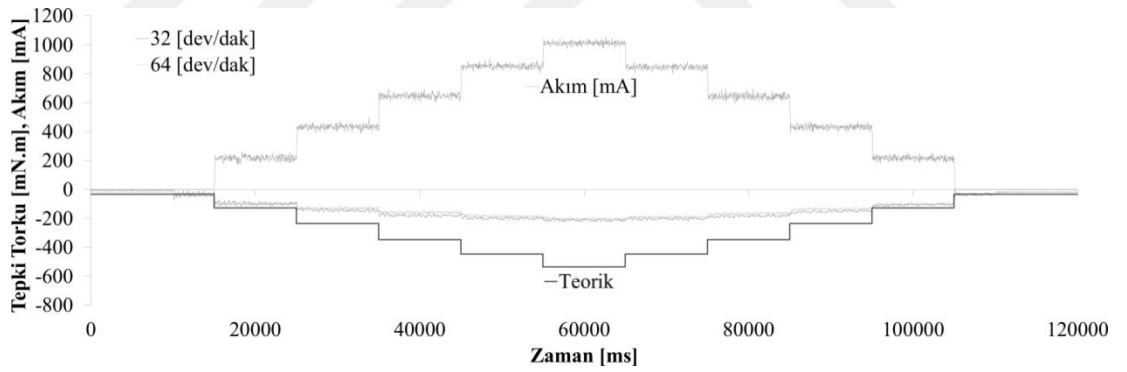
Dönme frekansına bağlı olarak elde edilen doğrusal viskoz tepki torkuna ait eşitlik $y = -0,6039x - 54,474$ olarak elde edilmiştir.

Şekil 7.34’de artan ve azalan akım değerlerinde MRF 140CG dolu frenin 4, 8, 16, 32, ve 64 dev/dak dönme frekansındaki deney verileri, ve teorik sonuçlar verilmiştir.



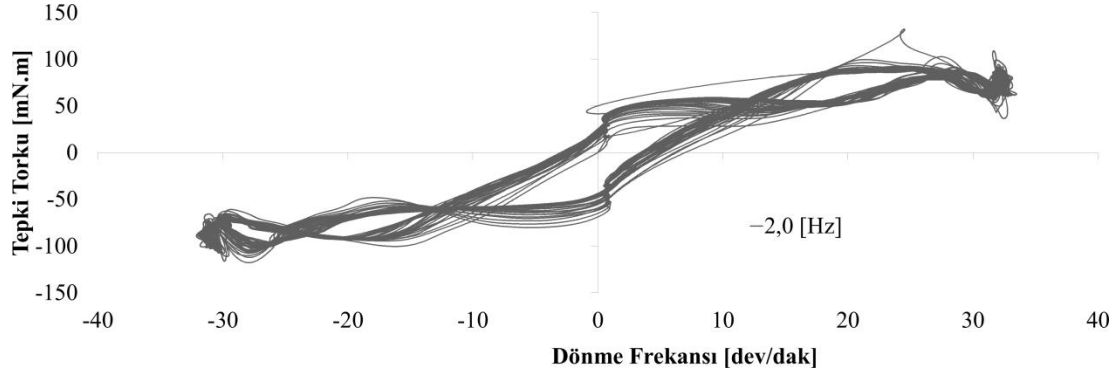
Şekil 7.34 : Artan ve azalan akım değerlerinde MRF 140CG dolu frenin 4, 8, 16, 32, ve 64 dev/dak dönme frekansındaki deney verileri.

Şekil 7.35’de aynı deneyler MRF 122EG dolu fren ile tekrar edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 7.26 ve Şekil 7.28’deki yırtılmış kartuşlara ait sonuçlar ile benzerlikler göstermektedir. Şekil 7.34 ve Şekil 7.35’da sonuçları gösterilmiş deneylerde elastik ayırıcı zar hasar görmemiştir. Deneysel veriler ile teorik hesaplama arasındaki farkın kanal içerisinde akış modundan farklı bir çalışma modunun hakim olduğuna işaret etmektedir. Bu çalışma modunun ise ezici merdanenin hareketi ile kanalı terk etmeye zorlanan akışkanın tepki torkunu temsil ettiği kabulü yapılabilir.

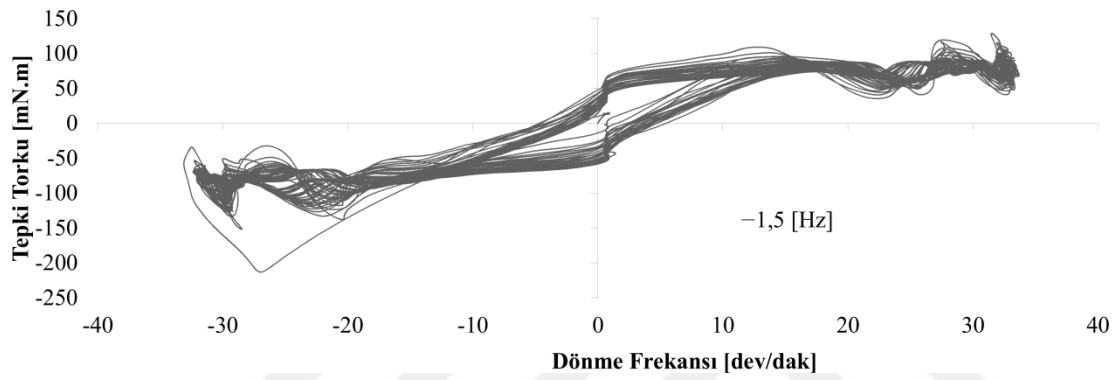


Şekil 7.35 : Artan ve azalan akım değerlerinde MRF 122EG dolu frenin 32, ve 64 dev/dak dönme frekansındaki deney verileri.

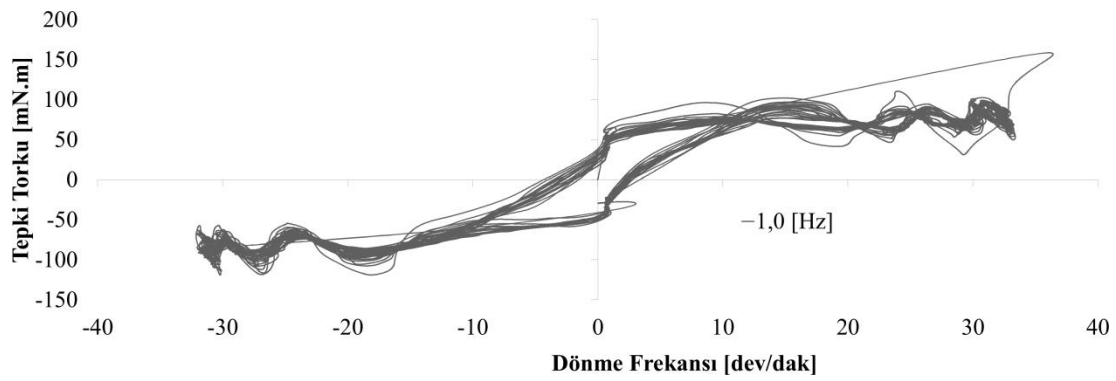
Şekil 7.36, Şekil 7.37, Şekil 7.38, ve Şekil 7.39’da MRF 140CG dolu frenin sırası ile 2,0, 1,5, 1,0, ve 0,5 Hz frekansındaki uyarıtıma 32 dev/dak dönme frekansında verdiği tepki torku değerleri verilmiştir.



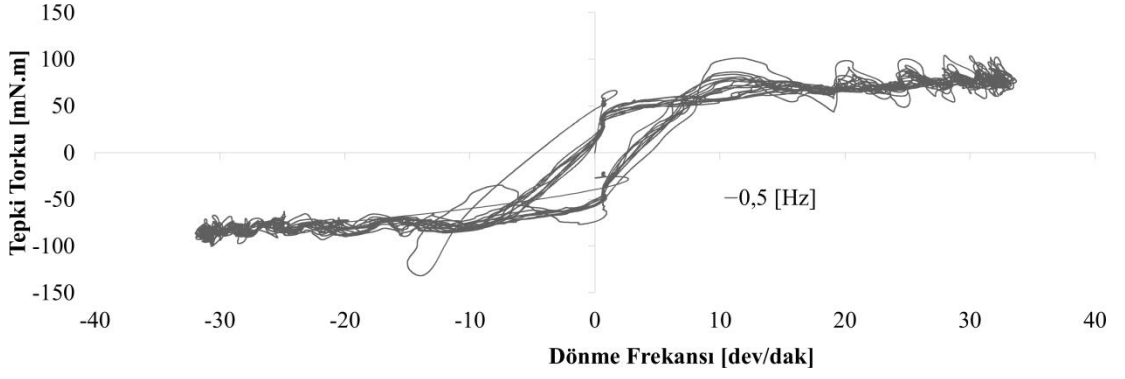
Şekil 7.36 : MRF 140CG dolu frenin 2,0 Hz frekansındaki uyartıma 32 dev/dak dönme frekansında verdiği tepki torku.



Şekil 7.37 : MRF 140CG dolu frenin 1,5 Hz frekansındaki uyartıma 32 dev/dak dönme frekansında verdiği tepki torku.

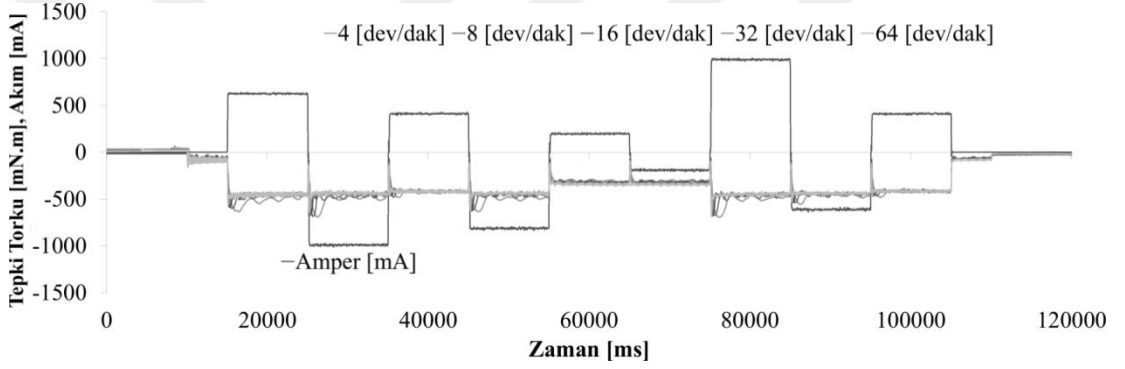


Şekil 7.38 : MRF 140CG dolu frenin 1,0 Hz frekansındaki uyartıma 32 dev/dak dönme frekansında verdiği tepki torku.



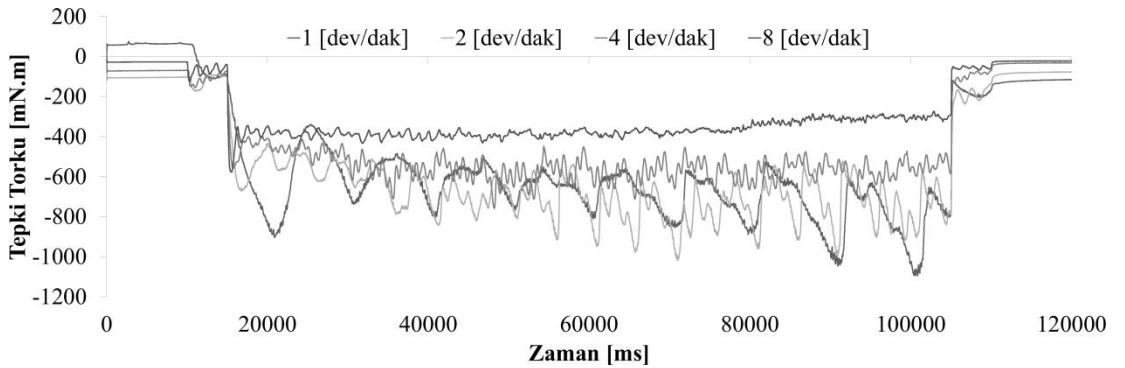
Şekil 7.39 : MRF 140CG dolu frenin 0,5 Hz frekansındaki uyarıma 32 dev/dak dönme frekansında verdiği tepki torku.

Şekil 7.40'de MRF 140CG dolu frenin 4, 8, 16, 32, ve 64 dev/dak dönme frekansında rastgele akım girişlerine verdiği tepki torku verileri gösterilmiştir.



Şekil 7.40 : MRF 140CG dolu frenin 4, 8, 16, 32, ve 64 dev/dak dönme frekansında rastgele akım girişlerine verdiği tepki torku.

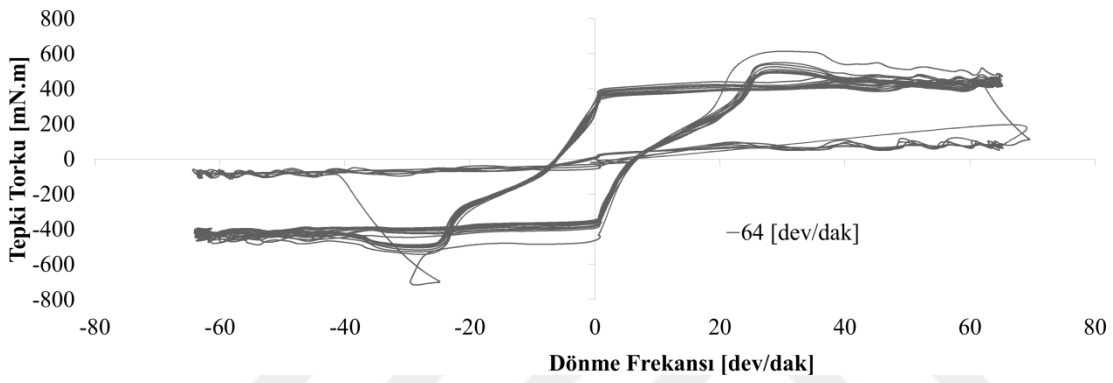
Şekil 7.34'de verilen teorik hesaplama değerlerinin dönme frekansının düşürülmesi ile elde edilebildiği Şekil 7.41'de görülmektedir.



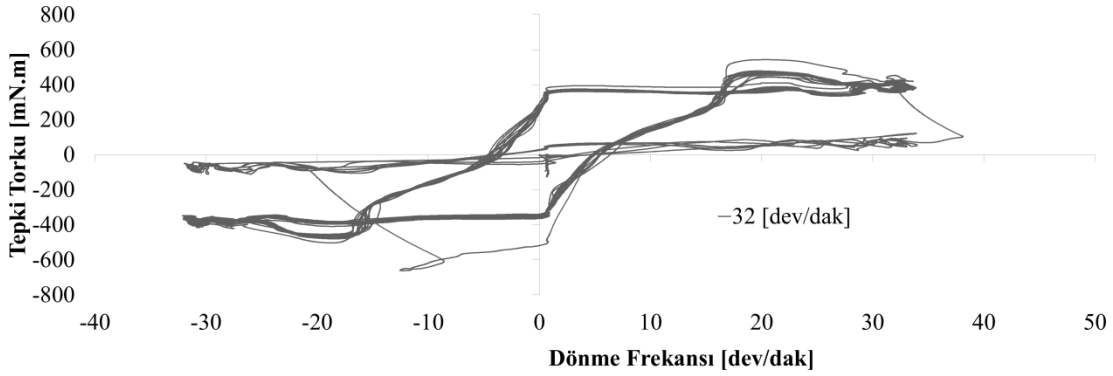
Şekil 7.41 : MRF 140CG dolu frenin 1, 2, 4, ve 8 dev/dak gibi düşük dönme frekansında 1,0 A akım girişine verdiği tepki torku.

Şekil 7.41’de edilen en yüksek tepki torku değeri 1 dev/dak gibi düşük bir dönme frekansında elde edilmiş ve süreklilik göstermeyen bir durumdur. Şekil 7.41’de elde edilen basamak girişe cevap davranışı eğrileri de düşük bir dönme frekansında elde edilen ve süreklilik göstermeyen tepki torku değerlerini daha net biçimde göstermektedir. Basamak giriş eğrileri ayrıca Şekil EkC.22 ve Şekil EkC.23’de de verilmiştir.

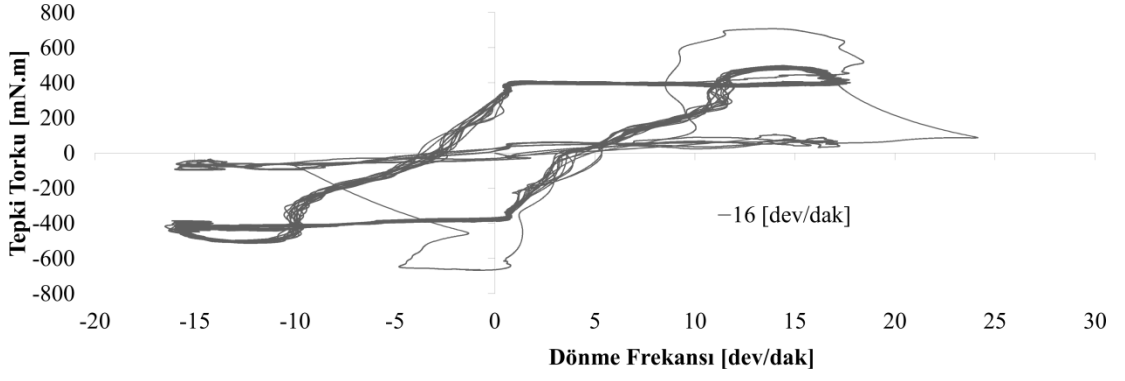
Şekil 7.42, .7.43, 7.44, 7.45, 7.46 ve Şekil 7.47’de 1,0 A akımda ve 1,0 Hz frekansındaki uyarıma sırası ile 64, 32, 16, 8, 4, ve 2 dev/dak dönme frekanslarında frenin verdiği tepki torku değerleri verilmiştir.



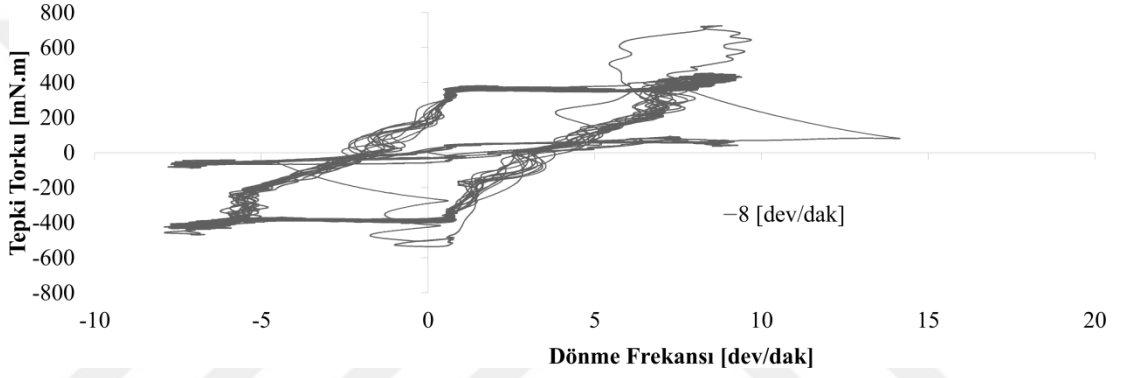
Şekil 7.42 : MRF 140CG dolu frenin 64 dev/dak dönme frekansında ve 1,0 A akımda 1,0 Hz frekansındaki uyarıma verdiği tepki torku.



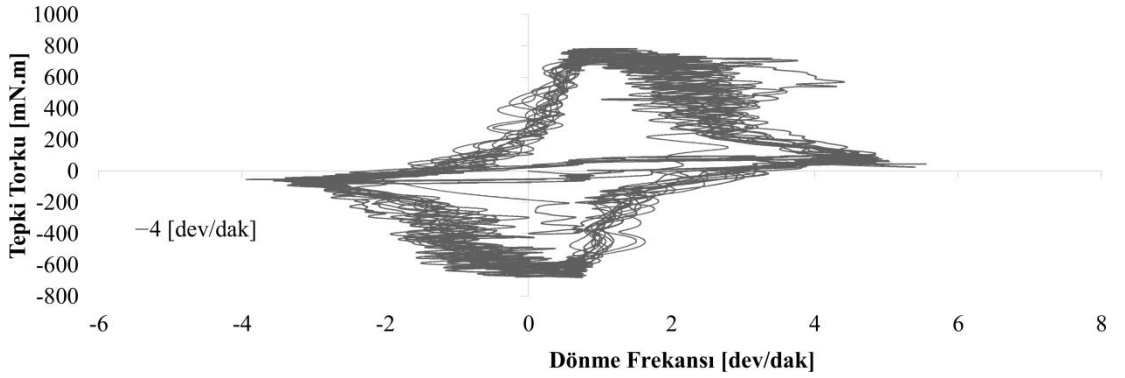
Şekil 7.43 : MRF 140CG dolu frenin 32 dev/dak dönme frekansında ve 1,0 A akımda 1,0 Hz frekansındaki uyarıma verdiği tepki torku.



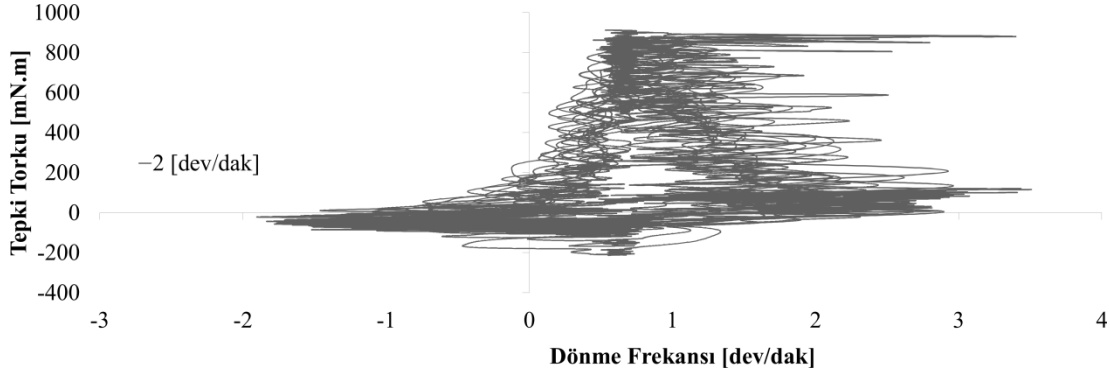
Şekil 7.44 : MRF 140CG dolu frenin 16 dev/dak dönme frekansında ve 1,0 A akımda 1,0 Hz frekansındaki uyartıma verdiği tepki torku.



Şekil 7.45 : MRF 140CG dolu frenin 8 dev/dak dönme frekansında ve 1,0 A akımda 1,0 Hz frekansındaki uyartıma verdiği tepki torku.



Şekil 7.46 : MRF 140CG dolu frenin 4 dev/dak dönme frekansında ve 1,0 A akımda 1,0 Hz frekansındaki uyartıma verdiği tepki torku.



Şekil 7.47 : MRF 140CG dolu frenin 2 dev/dak dönme frekansında ve 1,0 A akımda 1,0 Hz frekansındaki uyarıma verdiği tepki torku.

Şekil 7.41’de gözlemlenen yüksek tepki torku değerleri 2 dev/dak gibi düşük dönme frekansına sahip Şekil 7.47’deki veriler ile benzerlik göstermektedir. Fakat elde edilen tepki torku değeri çift yönlü hareketten bağımsız bir biçimde sadece tek yönlü olarak ortaya çıkmıştır.

7.5 Bölüm Özeti

Elastik ayırıcı zarlı, kartuşlu ve PSO yöntemi ile tasarlanmış elastik ayırıcı zarlı MRF frenlere ait deneysel sonuçlar, simulasyon sonuçları ve teorik sonuçlar verilmiştir. Teorik veriler ile en uyumlu sonuçlar elastik ayırıcı zarlı model ile elde edilmiştir. Kartuşlu modelin sonuçlarında gözlemlenen farklılıkların ise kartuş ile elektromıknatis geometrisinin arasındaki uyumsuzluk nedeni ile olduğu görülmektedir. PSO yöntemi ile tasarlanmış modelde ise akış modunun gerçekleşmediği buna bağlı olarak elde edilen tepki torkunun yırtılmış kartuş değerleri ile örtüştüğü gözlemlenmiştir.

8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bir döner sağınımlı MRF fren geliştirilmesi amacı ile yapılan çalışmalar sonucunda, hafif, sızdırma yapmayan, egzersiz cihazlarında fren, koltuklarda sönümleyici, takma (protez) bacak ve haptik sistemlerde pasif eyleyici olarak kullanılabilir bir ürün geliştirilmiştir. Cihazın ulaşabileceği tork değerleri, tepki süresi değerleri, hacim ve kütle bilgileri teorik ve deneysel olarak tespit edilmiştir. Üretilen eyleyici için WO 2017091171 A1 numaralı patent başvurusu yapılmıştır. Döner sağınımlı MRF frenin bobin teli tipi, sarım sayısı ve boyutları, manyetik çekirdek ve MR akışkan tipi, hazne boyutları ve malzeme özellikleri etkileri, ezici merdane boyutları ve sayısı ve cihazın genel boyutlarının etkileri hem teorik hem de deneysel olarak incelenmiştir.

Geliştirilen elektro-mıknatısların aralıkları boş ve farklı MR akışkanları ile dolu iken sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. MRF eyleyicilerde kullanılan elektro-mıknatısların başarımları aralığın genişliği tarafından belirlenmektedir. Diğer taraftan akış modunda kullanılacak elektro-mıknatısların aralıklarının akış modunun gerçekleşebilmesi için geniş tutulması gerekmektedir. Buna bağlı olarak akış modunda kullanılan elektro-mıknatıslara ya yüksek akım verilmesi gerekmekte ya da sarım sayılarının yüksek tutulması gerekmektedir. Sarım sayısının yüksek tutulması için tel tipinin inceltilmesinin başarımları azaltacağı ve yüksek akım değerleri kullanılmasının da sisteme zarar vereceği gerçekleştirilen ısı analizleri ile gösterilmiştir. Geliştirilen her iki elektro-mıknatıs tasarımında manyetomotor kuvvet ve 90 °C bobin sıcaklığı göz önüne alınarak, kullanılması gereken tel tipinin AWG 24 olduğu, ve verilebilecek en yüksek akım değerinin PSO tasarım için 0,8 A ve diğer tasarım için 1,586 A olduğu tespit edilmiştir.

Elastik ayırıcı zarlı modelde sızdırmazlık sağlamak amacı ile kullanılan malzemelerden kaynaklanabilecek olan verim kaybı montaj sonrası yapılan manyetik alan ölçümleri ile tespit edilmiştir. Manyetik alan kaybı %12,19 olarak elde edilmiş ve bu kayıp etkisi teorik hesaplamalara dahil edilmiştir.

MRF ile ezici merdaneler arasında ayırıcı görevi gören elastik malzemeden kaynaklanan tepki torku değerleri 0,5 mm ve 1,0 mm kalınlığındaki elastik malzeme için sırası ile yaklaşık olarak 20 mN.m ve 55 mN.m olarak tespit edilmiştir. Benzer biçimde farklı dönme frekanslarında deneyler gerçekleştirilerek tasarlanan cihazlara ait sıfır-alandaki viskoz karakteristik özellikleri doğrusal denklem biçiminde elde edilmiştir.

Çeşitli dönme frekanslarında ve farklı akım değerlerinde elastik ayırıcı zarlı cihaza basamak giriş uygulanarak pasif MRF eyleyicinin zaman sabitinin dönme frekansı n ve $16 \geq n \geq 1$ için deneysel veriler ışığında $t_c = 1,44/n$ eşitliği ile ifade edilebileceği tespit edilmiştir. Deneyler kapsamında ölçülebilen en düşük zaman sabiti değeri 90 ms olarak 16 dev/dak dönme frekansında elde edilmiştir.

Artan ve azalan akım değerlerine bağlı oluşabilecek histerezis davranışın tespit edilebilmesi amacı ile 0,2 A basamak yüksekliği bulunan çıkışlı ve inişli merdiven giriş uygulanmıştır. Yükselen akım değerlerinde elektro-mıknatısın ısınmasına bağlı olarak cihaz ısınmış ve akım seviyesi düşmüştür. Akım değişimine bağlı ortaya çıkan histerezis davranışın sırası ile MRF 122EG, MRF 132DG ve MRF 140CG için arttığı gözlemlenmiştir.

Çeşitli dönme frekanslarındaki ve akım değerlerindeki histerezis davranışın tespit edilebilmesi amacı ile farklı frekanslarda uyarımlar verilmiştir. Gözlemlenen histerezis davranış Kwok cebirsel modeli kullanarak tekrar elde edilmiştir. Kwok cebirsel modeli parametrelerinin hem 0,5 A artışla 0,5 A'den 2,0 A'e kadar olan hem de sıfır-alandaki değerleri tespit edilmiştir.

PSO yöntemi ile tasarlanmış modelde akış modu gerçekleşmemiştir. Elde edilen tepki torku değerleri yırtılmış kartuş değerleri ile benzerlik göstermiştir.

Geliştirme süreci sırasında yapılan prototip çalışmaları ve deney düzenekleri kurulumları süreçte yaşanabilecek sorunlar ve ihtiyaç duyulabilecek çözümler konusunda detaylı bilgiler içermektedir.

Gelecekte yapılması muhtemel araştırmalar için tavsiye edilen öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Kullanılan modellerin iyileştirilmesi amacı ile sağınımlı hareketin tepki kuvveti ve torku üzerine etkilerinin hem teorik hem de deneysel olarak araştırılması,

- Elastik ayırıcı malzeme için sızdırmazlığın, inceliğın ve yüksek elastikliğın hangi aralıklarda elde edilebileceğinin araştırılması,
- Elastik ayırıcı kalınlığının etkilerinin hem teorik hem de deneysel olarak araştırılması,
- Sıcaklık artışının ve soğuma karakteristiklerinin MRF, elastik hazne, ve diğeri sistem bileşenleri üzerindeki etkisinin araştırılması,
- Haptik sistemler için geliştirilen tasarımın farklı uygulama alanlarında kullanılabilirliğinin araştırılması,
- Haptik sistemlerde gereksinim duyulan kuvvet alt eşığının yakalanabilmesi amacı ile elastik ayırıcının kalınlığının inceltilmesi ve farklı MR akışkanlar kullanılması,
- Tasarımın iyileştirilebilmesi amacı ile üretilecek cihazların CNC tezgâhlar kullanılarak dayanımı yüksek ve hafif malzemelerden profesyonel bir ortamda hazırlanması,
- Mevcut MR akışkanlı cihazlardan farklı bir tasarım geliştirildiğii için geliştirilen cihaza uyumlu MR akışkanlar üretilmesi,
- Tepki torkunun yükseltmesi için itici merdanelerin cihazın dış silindirik yüzeyine taşınması
- Tasarımın farklı uygulamalarda kullanımını mümkün kılmak için dinamik davranışlarının ve kontrol edilebilirliğinin araştırılması,
- Fren olarak geliştirilen cihazın, kavrama ve sönümleyici olarak kullanılması durumunda başarımının incelenmesi,

önerilmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **Lord Corporation**, <http://www.lord.com/>, erişim tarihi 24.01.2017
- [2] **Poole, A. D., & Booker, J. D.** (2011). Design methodology and case studies in actuator selection. *Mechanism and machine theory*, 46(5), 647-661.
- [3] **Rabinow, J.** (1948). The magnetic fluid clutch. *Electrical Engineering*, 67(12), 1167-1167.
- [4] **Böse, H., Gerlach, T., & Ehrlich, J.** (2013). Magnetorheological torque transmission devices with permanent magnets. *In Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 412, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.
- [5] **ACE Controls Inc.**, <http://www.acecontrols.com/us/>, erişim tarihi: 24.01.2013
- [6] **Essentra Components**, <http://skiffy.com/>, erişim tarihi: 24.01.2013
- [7] **ITW Automotive Products GmbH**, <http://www.itwmotion.com/>, erişim tarihi: 24.01.2013
- [8] **Cultraro Automazione Engineering S.r.l.**, <http://www.cultraro.it/>, erişim tarihi: 24.01.2013
- [9] **RS Components Ltd.**, <http://uk.rs-online.com/web/p/rotational-dampers/0455457/>, erişim tarihi: 24.01.2013
- [10] **Tochigiya Co.,Ltd.**, <http://tochigiya.jp/en/>, erişim tarihi: 24.01.2013
- [11] **Hobby and Engineering Supplies**, <http://www.hobbyparts.com.au>, erişim tarihi: 24.01.2013
- [12] **Small Parts and Bearings**, <http://www.smallparts.com.au>, erişim tarihi: 24.01.2013
- [13] **EFDYN Incorporated**, <http://efdyn.com/rotary-dampers/>, erişim tarihi: 24.01.2013
- [14] **ITT Enidine Inc.**, <http://www.enidine.com/Home/>, erişim tarihi: 24.01.2013
- [15] **Weforma Dämpfungstechnik GmbH**, <http://www.weforma.com/en/home.html>, erişim tarihi: 24.01.2013
- [16] **Kinetrol Ltd.**, <http://www.kinetrol.com/>, erişim tarihi: 24.01.2013

- [17] **Phytron Inc.**, <http://www.phytron.com/>, erişim tarihi: 24.01.2013
- [18] **Ferrotec USA**, <https://www.ferrotec.com/>, erişim tarihi: 24.01.2013
- [19] **Rohs, U., & Voigt, D.** (1990). U.S. Patent No. 4,905,807. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [20] **Chalaire, D. K., Hoyt, H. L., & Hurchalla, J.** (1987). U.S. Patent No. 4,669,893. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [21] **Riley D. Woodson** (1972). "Elastic valve element having variable orifice." U.S. Patent 3,685,786,. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [22] **Powers, R. J.** (1993). U.S. Patent No. 5,211,370. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [23] **Bosley, R. W., Kirshman, S., LeMay, D. B., & Renken, W. G.** (1987). U.S. Patent No. 4,690,371. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [24] **Butler, H. G., & Weise, I. B.** (1972). U.S. Patent No. 3,651,903. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [25] **Gryglas Bogdan R.**, (1975) "Continuous rotary damper." U.S. Patent 3,865,216, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [26] **Ito, K., & Watanabe, M.** (1986). U.S. Patent No. 4,574,423. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [27] **Omata, N.** (1985). U.S. Patent No. 4,550,470. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [28] **Oshida, T.** (1986). U.S. Patent No. 4,614,004. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [29] **Arakawa, M., & Numata, M.** (1987). U.S. Patent No. 4,691,811. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [30] **Aubry, J., & Deguise, M.** (1988). U.S. Patent No. 4,768,630. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [31] **Arakawa, M.**, Nifco, Inc., 1990. Rotary damper. U.S. Patent 4,893,522.
- [32] **Kanno, T., & Oikawa, M.** (1990). U.S. Patent No. 4,908,905. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [33] **Jacob, R.** (1951). U.S. Patent No. 2,575,360. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

- [34] **Razdowitz, A.** (1951). U.S. Patent No. 2,557,140. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [35] **Welsh, H. W.** (1953). U.S. Patent No. 2,635,483. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [36] **Winslow, W. M.** (1953). U.S. Patent No. 2,661,596. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [37] **Winslow, W. M.** (1953). U.S. Patent No. 2,661,825. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [38] **Jacob, R.** (1954). Magnetic fluid shock absorber. U.S. Patent No. 2,667,237. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [39] **Saxl, E. J.** (1956). Clutch with magnetic fluid mixture US Patent No. 2,733,792, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [40] **Roland, E. G.** (1958). U.S. Patent No. 2,846,028. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [41] **Carlson, J. D., & Chrzan, M. J.** (1994). U.S. Patent No. 5,277,281. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [42] **Meckstroth, R. J., & Toth, G. S.** (1998). U.S. Patent No. 5,752,891. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [43] **Arnold, S. M., & Penney, N.** (2008). U.S. Patent No. 7,416,062. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [44] **Cherney, M. J.** (2005). U.S. Patent No. 6,910,699. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [45] **Kuechler, W., & Schuberth, S.** (2006). U.S. Patent No. 7,032,726. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [46] **Unsal, M.** (2006). Semi-active vibration control of a parallel platform mechanism using magnetorheological damping (Doctoral dissertation, University of Florida).
- [47] **Jolly, M. R., Bender, J. W., & Carlson, J. D.** (1998, June). Properties and applications of commercial magnetorheological fluids. *In 5th annual international symposium on smart structures and materials* (pp. 262-275). International Society for Optics and Photonics.
- [48] **Huang, J., Zhang, J. Q., Yang, Y., & Wei, Y. Q.** (2002). Analysis and design of a cylindrical magneto-rheological fluid brake. *Journal of Materials Processing Technology*, 129(1), 559-562.

- [49] **Ahn, Y. K., Yang, B. S., Ahmadian, M., & Morishita, S.** (2005). A small-sized variable-damping mount using magnetorheological fluid. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16(2), 127-133.
- [50] **Baranwal, D., & Deshmukh, T. S.** (2012). MR-fluid technology and its application-a review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(12), 563-569.
- [51] **Grunwald, A., & Olabi, A. G.** (2008). Design of magneto-rheological (MR) valve. *Sensors and Actuators A: Physical*, 148(1), 211-223.
- [52] **Carlson, J. D., & Jolly, M. R.** (2000). MR fluid, foam and elastomer devices. *mechatronics*, 10(4), 555-569.
- [53] **Topçu, O., Aygün, M. M., Çöllü, Ö., & Taşcıoğlu, Y.** (2015). Experimental Investigation of a Magneto-Rheological Fluid Damper with Permanent Magnet for Haptic Finger Grasping. In *Machine Vision and Mechatronics in Practice* (pp. 105-112). Springer Berlin Heidelberg.
- [54] **Yang, G., Spencer, B. F., Carlson, J. D., & Sain, M. K.** (2002). Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering structures*, 24(3), 309-323.
- [55] **Jolly, M. R., Bender, J. W., & Carlson, J. D.** (1999). Properties and applications of commercial magnetorheological fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 10(1), 5-13.
- [56] **Choi, Y. T., Cho, J. U., Choi, S. B., & Wereley, N. M.** (2005). Constitutive models of electrorheological and magnetorheological fluids using viscometers. *Smart Materials and Structures*, 14(5), 1025.
- [57] **Phillips, R. W.** (1969). Engineering applications of fluids with a variable yield stress (Doctoral dissertation, University of California, Berkeley).
- [58] **Topcu, O., Tascioglu, Y., & Konukseven, E. I.** (2015, November). A Novel Rotary Magneto-Rheological Damper for Haptic Interfaces. In *ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (pp. V04BT04A056-V04BT04A056). American Society of Mechanical Engineers.
- [59] **Zhang, J. Q., Feng, Z. Z., & Jing, Q.** (2009). Optimization analysis of a new vane MRF damper. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 149, No. 1, p. 012087). IOP Publishing.

- [60] **Yang, L., Chen, S. Z., Zhang, B., & Feng, Z. Z.** (2011). A rotary magnetorheological damper for a tracked vehicle. *In Advanced Materials Research* (Vol. 328, pp. 1135-1138). Trans Tech Publications.
- [61] **Imaduddin, F., Mazlan, S. A., & Zamzuri, H.** (2013). A design and modelling review of rotary magnetorheological damper. *Materials & Design*, 51, 575-591.
- [62] **Burgess, S. C., & Clarkson, P. J.** (1997). The development of a novel rotary damping mechanism for aerospace deployment systems. *Materials & Design*, 18(1), 17-24.
- [63] **Rossa, C., Jaegy, A., Micaelli, A., & Lozada, J.** (2014). Development of a multilayered wide-ranged torque magnetorheological brake. *Smart Materials and Structures*, 23(2), 025028.
- [64] **Nguyen, Q. H., Nguyen, N. D., & Choi, S. B.** (2015). Design and evaluation of a novel magnetorheological brake with coils placed on the side housings. *Smart Materials and Structures*, 24(4), 047001.
- [65] **Avraam, M., Horodinca, M., Romanescu, I., & Preumont, A.** (2010). Computer controlled rotational MR-brake for wrist rehabilitation device. *Journal of intelligent material systems and structures*, 21(15), 1543-1557.
- [66] **Guo, H. T., & Liao, W. H.** (2012). A novel multifunctional rotary actuator with magnetorheological fluid. *Smart Materials and Structures*, 21(6), 065012.
- [67] **Bucchi, F., Forte, P., Frenzo, F., Musolino, A., & Rizzo, R.** (2014). A fail-safe magnetorheological clutch excited by permanent magnets for the disengagement of automotive auxiliaries. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(16), 2102-2114.
- [68] **Kim, J., Lee, C. G., Kim, Y., & Ryu, J.** (2013). Construction of a haptic-enabled broadcasting system based on the MPEG-V standard. *Signal Processing: Image Communication*, 28(2), 151-161.
- [69] **Shimoga, K. B.** (1992, September). Finger force and touch feedback issues in dexterous telemanipulation. *In Intelligent Robotic Systems for Space Exploration, 1992. Proceedings. Fourth Annual Conference on* (pp. 159-178). IEEE.

- [70] **Blake, J., & Gurocak, H. B.** (2009). Haptic glove with MR brakes for virtual reality. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 14(5), 606-615.
- [71] **Gonenc, B., & Gurocak, H.** (2016). Virtual Tissue Cutting With Haptic Feedback Using a Hybrid Actuator With DC Servomotor and Magnetorheological Brake. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 16(3), 030902.
- [72] **Liu, B., Li, W. H., Kosasih, P. B., & Zhang, X. Z.** (2006). Development of an MR-brake-based haptic device. *Smart materials and structures*, 15(6), 1960.
- [73] **Demersseman, R.** (2008). Magnetorheological Brake for Haptic Rendering Haptics: Perception, Devices and Scenarios. *In 6th International Conference, Eurohaptics* (pp. 940-945).
- [74] **Senkal, D., & Gurocak, H.** (2010). Serpentine flux path for high torque MRF brakes in haptics applications. *Mechatronics*, 20(3), 377-383.
- [75] **Kikuchi, T., Ikeda, K., Otsuki, K., Kakehashi, T., & Furusho, J.** (2009). Compact MR fluid clutch device for human-friendly actuator. *In Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 149, No. 1, p. 012059). IOP Publishing.
- [76] **Topcu, O., Tascioglu, Y., & Konukseven, E. I.** (2015). Design and Analysis of a Lightweight Disc-Type Magnetorheological Device. *In Proceedings of the World Congress on Engineering* (Vol. 2).
- [77] **Shafer, A. S., & Kermani, M. R.** (2011, May). Design and validation of a magneto-rheological clutch for practical control applications in human-friendly manipulation. *In Robotics and Automation (ICRA)*, 2011 IEEE International Conference on (pp. 4266-4271). IEEE.
- [78] **Nam Yun-Joo, Moon Young-Jin, Park Myeong-Kwan.** (2008) Performance improvement of a rotary MR fluid actuator based on electromagnetic design. *J Intell Mater Syst Struct*;19:695–705.
- [79] **Zhou, W., Chew, C. M., & Hong, G. S.** (2007). Development of a compact double-disk magneto-rheological fluid brake. *Robotica*, 25(04), 493-500.
- [80] **Assadsangabi, B., Daneshmand, F., Vahdati, N., Eghtesad, M., & Bazargan-Lari, Y.** (2011). Optimization and design of disk-type MR brakes. *International Journal of Automotive Technology*, 12(6), 921-932.

- [81] **Senkal, D., & Gurocak, H.** (2009, March). Compact MR-brake with serpentine flux path for haptics applications. *In EuroHaptics conference, 2009 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2009. Third Joint* (pp. 91-96). IEEE.
- [82] **Guo, H., & Liao, W. H.** (2011, July). Optimization of a multifunctional actuator utilizing magnetorheological fluids. *In Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011 IEEE/ASME International Conference on* (pp. 67-72). IEEE.
- [83] **Suisse, B. E.** (2007). Research for Dynamic Seal Friction Modeling in Linear Motion Hydraulic Piston Applications.
- [84] **Nguyen, Q. H., Lang, V. T., Nguyen, N. D., & Choi, S. B.** (2013). Geometric optimal design of a magneto-rheological brake considering different shapes for the brake envelope. *Smart Materials and Structures*, 23(1), 015020.
- [85] **Cobanoglu, N., Gordaninejad, F., Evrensel, C. A., Liu, Y., Kavlicoglu, B. M., & Korol, G.** (2003, August). Time response of a controllable multiplate magnetorheological fluid limited slip differential clutch. *In Smart Structures and Materials* (pp. 514-523). International Society for Optics and Photonics.
- [86] **Najmaei, N., Yadmellat, P., Kermani, M. R., & Patel, R. V.** (2014, May). Application of magneto-rheological fluid based clutches for improved performance in haptic interfaces. *In Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on* (pp. 832-837). IEEE.
- [87] **Walker, D. S., Thoma, D. J., & Niemeyer, G.** (2009, October). Variable impedance magnetorheological clutch actuator and telerobotic implementation. *In Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 2885-2891). IEEE.
- [88] **Ueberle, M., & Buss, M.** (2004, October). Control of kinesthetic haptic interfaces. *In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst., Workshop on Touch and Haptics.*
- [89] **Rob. and Syst.,** Workshop on Touch and Haptics, 2004, pp. 1-14
- [90] **Clover, C. L., Luecke, G. R., Troy, J. J., & McNeely, W. A.** (1997, April). Dynamic simulation of virtual mechanisms with haptic feedback using industrial robotics equipment. *In Robotics and Automation, 1997.*

Proceedings., 1997 IEEE International Conference on (Vol. 1, pp. 724-730). IEEE.

- [91] **Colgate, J. E., Stanley, M. C., & Schenkel, G. G.** (1993, December). Dynamic range of achievable impedances in force-reflecting interfaces. In *Optical Tools for Manufacturing and Advanced Automation* (pp. 199-210). International Society for Optics and Photonics.
- [92] **Colgate, J. E., & Brown, J. M.** (1994, May). Factors affecting the z-width of a haptic display. In *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on* (pp. 3205-3210). IEEE.
- [93] **Discover Haptics**, http://discoverhaptics.com/category/haptic_technology/, Son erişim tarihi : 24.01.2015
- [94] **Li, W., Yadmellat, P., & Kermani, M. R.** (2014, May). Design optimization and comparison of magneto-rheological actuators. In *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on* (pp. 5050-5055). IEEE.
- [95] **Sadiku, M.** (2014). *Elements of electromagnetics (the oxford series in electrical and computer engineering)*., Edminister, J. A. (1979). *Electromagnetics. Schaum's Outline series.*, 92
- [96] **Chapman, S. J.** (2005). *Electric machinery fundamentals* 4th edition.
- [97] **Minorowicz, B., & Stefanski, F.** (2014). Proposal of a new group of magnetorheological dampers. *Przełąd Elektrotechniczny*, 90(7), 263-267.
- [98] **Andersen, S. B., Santos, I. F., & Fuerst, A.** (2015). Multi-physics modeling of large ring motor for mining industry—Combining electromagnetism, fluid mechanics, mass and heat transfer in engineering design. *Applied Mathematical Modelling*, 39(7), 1941-1965.
- [99] **Wikipedia, the free encyclopedia**, <https://en.wikipedia.org/wiki/Ampacity>, erişim tarihi : 24.01.2016
- [100] **NFPA, A.** (2005). *70-National Electrical Code*. National Fire Protection Association, 1.
- [101] **Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., & Lavine, A. S.** (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.

- [102] **Fuller, M. A.** (1989, October). Heat transfer characteristics of mining cables. *In Industry Applications Society Annual Meeting, 1989., Conference Record of the 1989 IEEE* (pp. 1503-1508). IEEE.
- [103] **Meeker, D.** (2010). Finite element method magnetics. *FEMM*, 4, 32.
- [104] **Yu, B., Zhang, S., Yan, J., Cheng, L., & Zheng, P.** (2015). Thermal analysis of a novel cylindrical transverse-flux permanent-magnet linear machine. *Energies*, 8(8), 7874-7896.
- [105] **Bai, J., Liu, Y., Sui, Y., Tong, C., Zhao, Q., & Zhang, J.** (2014). Investigation of the cooling and thermal-measuring system of a compound-structure permanent-magnet synchronous machine. *Energies*, 7(3), 1393-1426.
- [106] **Marquez, F.** (2014). Electric traction machine design for an E-RWD unit.
- [107] **Lindström, J.** (1999). Development of an experimental permanent-magnet motor drive. Chalmers University of Technology, Göteborg. Sweden. Raport, (12R).
- [108] **Kylander, G.** (1995). Thermal modelling of small cage induction motors. Chalmers University of Technology.
- [109] **Bird, R. B., Dai, G. C., & Yarusso, B. J.** (1983). The rheology and flow of viscoplastic materials. *Reviews in Chemical Engineering*, 1(1), 1-70.
- [110] **Barnes, H. A.** (1999). The yield stress—a review or ‘παντα ρει’—everything flows?. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 81(1), 133-178.
- [111] **Chhabra, R. P., & Richardson, J. F.** (2011). Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications. Butterworth-Heinemann.
- [112] **Constantinescu, V. N.** (2012). Laminar viscous flow. Springer Science & Business Media.
- [113] **Gavin, H. P.** (1994). Electrorheological dampers for structural vibration suppression (Doctoral dissertation).
- [114] **Beyer, W. H.** (1987). CRC handbook of mathematical sciences. CRC press.
- [115] **Goncalves, F. D.** (2005). Characterizing the behavior of magnetorheological fluids at high velocities and high shear rates (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- [116] **Makris, N., Burton, S. A., Hill, D., & Jordan, M.** (1996). Analysis and design of ER damper for seismic protection of structures. *Journal of engineering mechanics*, 122(10), 1003-1011.

- [117] **Makris, N., Burton, S. A., & Taylor, D. P.** (1996). Electrorheological damper with annular ducts for seismic protection applications. *Smart Materials and Structures*, 5(5), 551.
- [118] **Spiegel, M. R.** (1968). Mathematical handbook of formulas and tables.
- [119] **Carlson, J. D.** (2005). MR fluids and devices in the real world. *International Journal of Modern Physics B*, 19(07n09), 1463-1470.
- [120] **Holland, F., & Bragg, R.** (1995). Fluid Flow for Chemical and Process Engineers. Butterworth-Heinemann.
- [121] **Schechter, R. S.** (1961). On the steady flow of a non-Newtonian fluid in cylinder ducts. *AIChE Journal*, 7(3), 445-448.
- [122] **Wheeler, J. A., & Wissler, E. H.** (1965). The friction factor–Reynolds number relation for the steady flow of pseudoplastic fluids through rectangular ducts. Part I. Theory. *AIChE Journal*, 11(2), 207-212.
- [123] **Miller, C.** (1972). Predicting non-Newtonian flow behavior in ducts of unusual cross section. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 11(4), 524-528.
- [124] **Mitsuishi, N., & Aoyagi, Y.** (1969). Non-Newtonian flow in non-circular ducts. *Chemical Engineering Science*, 24(2), 309-319.
- [125] **Mitsuishi, N., & Aoyagi, Y.** (1974). Non-Newtonian fluid flow in an eccentric annulus. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 6(5), 402-408.
- [126] **Idielcik, I. E.** (1994). Handbook of Hydraulic Resistance.
- [127] **Ito, H.** (1959). Friction factors for turbulent flow in curved pipes. *J. Basic Eng*, 81(2), 123-134.
- [128] **Niezgoda-Żelasko, B., & Żelasko, J.** (2014). Flow resistance of ice slurry in bends and elbow pipes. *In Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 530, No. 1, p. 012054). IOP Publishing.
- [129] **Babcock & Wilcox Company.** (1913). Steam, its generation and use. Babcock & Wilcox..
- [130] **Zheng, E.** (2015). Hydrodynamic Simulation of Oil Sand Multiphase Flow in At Face Slurry System (Doctoral dissertation, University of Alberta).
- [131] **Nuclear Power for Everybody**, <http://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/major-head-loss-friction-loss/moody-diagram/>, erişim tarihi : 24.01.2015

- [132] **Csizmadia, P., & Hócs, C.** (2014). CFD-based estimation and experiments on the loss coefficient for Bingham and power-law fluids through diffusers and elbows. *Computers & Fluids*, 99, 116-123.
- [133] **Carpino, G., Accoto, D., Di Palo, M., Tagliamonte, N. L., Sergi, F., & Guglielmelli, E.** (2011, June). Design of a rotary passive viscoelastic joint for wearable robots. *In Rehabilitation Robotics (ICORR)*, 2011 IEEE International Conference on (pp. 1-6). IEEE.
- [134] **Nise, N. S.** (2007). CONTROL SYSTEMS ENGINEERING, (With CD). John Wiley & Sons.
- [135] **Kavlicoglu, N. C., Kavlicoglu, B. M., Liu, Y., Evrensel, C. A., Fuchs, A., Korol, G., & Gordaninejad, F.** (2007). Response time and performance of a high-torque magneto-rheological fluid limited slip differential clutch. *Smart Materials and structures*, 16(1), 149.
- [136] **Edminister, J. A.** (1979). Schaum's outlines theory and problems of electromagnetics. Chinese Version P, 148, 2002.
- [137] **Erickson, R. W., & Maksimovic, D.** (2007). Fundamentals of power electronics. Springer Science & Business Media.
- [138] **Nam, Y. J., Moon, Y. J., & Park, M. K.** (2008). Performance improvement of a rotary MR fluid actuator based on electromagnetic design. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 19(6), 695-705.
- [139] **Wen, Y. K.** (1976). Method for random vibration of hysteretic systems. *Journal of the engineering mechanics division*, 102(2), 249-263.
- [140] **Spencer Jr, B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K., & Carlson, J.** (1997). Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of engineering mechanics*, 123(3), 230-238.
- [141] **Dominguez, A., Sedaghati, R., & Stiharu, I.** (2006). A new dynamic hysteresis model for magnetorheological dampers. *Smart materials and structures*, 15(5), 1179.
- [142] **Zhou, Q., Nielsen, S. R., & Qu, W. L.** (2006). Semi-active control of three-dimensional vibrations of an inclined sag cable with magnetorheological dampers. *Journal of sound and vibration*, 296(1), 1-22.
- [143] **Dahl, P. R.** (1976). Solid friction damping of mechanical vibrations. *AIAA journal*, 14(12), 1675-1682.

- [144] **Kwok, N. M., Ha, Q. P., Nguyen, T. H., Li, J., & Samali, B.** (2006). A novel hysteretic model for magnetorheological fluid dampers and parameter identification using particle swarm optimization. *Sensors and Actuators A: Physical*, 132(2), 441-451.
- [145] **Gavin, H. P., & Dobossy, M. E.** (2001, July). Optimal design of an MR device. In *SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials* (pp. 273-280). International Society for Optics and Photonics.
- [146] **Guo, D., & Hu, H.** (2005). Nonlinear stiffness of a magneto-rheological damper. *Nonlinear Dynamics*, 40(3), 241-249.
- [147] **D'Souza, R. D., Benny, B., Sequeira, A., & Karanth, N.** (2016). Hysteresis Modeling of Amplified Piezoelectric Stack Actuator for the Control of the Microgripper. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*, 15(1), 265-281.
- [148] **Weber, F.** (2013). Bouc–Wen model-based real-time force tracking scheme for MR dampers. *Smart Materials and Structures*, 22(4), 045012.
- [149] **Poli, R., Kennedy, J., & Blackwell, T.** (2007). Particle swarm optimization. *Swarm intelligence*, 1(1), 33-57.
- [150] **Hu, X., Shi, Y., & Eberhart, R.** (2004, June). Recent advances in particle swarm. In *Evolutionary Computation, 2004. CEC2004. Congress on* (Vol. 1, pp. 90-97). IEEE.
- [151] **Shi, Y., & Eberhart, R.** (1998, May). A modified particle swarm optimizer. In *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on* (pp. 69-73). IEEE.
- [152] **Eberhart, R. C., & Shi, Y.** (2000). Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. In *Evolutionary Computation, 2000. Proceedings of the 2000 Congress on* (Vol. 1, pp. 84-88). IEEE.
- [153] **Eberhart, R. C., & Shi, Y.** (2001). Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms. In *Evolutionary Computation, 2001. Proceedings of the 2001 Congress on* (Vol. 1, pp. 94-100). IEEE.
- [154] **Zhang, W. J., & Xie, X. F.** (2003, October). DEPSO: hybrid particle swarm with differential evolution operator. In *Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference on* (Vol. 4, pp. 3816-3821). IEEE.

- [155] **Nguyen, P. B., & Choi, S. B.** (2011). A new approach to magnetic circuit analysis and its application to the optimal design of a bi-directional magnetorheological brake. *Smart Materials and Structures*, 20(12), 125003.
- [156] **Campbell, S. L., & Meyer, C. D.** (2009). Generalized inverses of linear transformations. *Society for industrial and applied Mathematics*.
- [157] **Chootinan, P., & Chen, A.** (2006). Constraint handling in genetic algorithms using a gradient-based repair method. **Computers & operations research**, 33(8), 2263-2281.
- [158] **Emtel Emaye Tel & Kablo Sanayi A.Ş.**, emtel.com.tr, erişim tarihi : 24.01.2016





EKLER

EK A. Isı Transferi Analizi için Temel Denklemler

1 boyutlu bir düzlem duvardaki ısı transferi oransal eşitliği (iletim),

$$q''_x = k_q \frac{T_1 - T_2}{L} = k_q \frac{\Delta T}{L}$$

Taşıyımli ısı transferi eşitliği,

$$q'' = h_q(T_s - T_\infty)$$

Yayıcı güç ifadesi,

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

Işınımlı ısı transferi eşitliği,

$$q''_{rad} = h_r(T_s - T_\infty)$$

Işınım ısı aktarım katsayısı,

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_\infty)(T_s^2 + T_\infty^2)$$

Işınımın ve taşıyımın etkin olduğu durumlardaki ısı transferi eşitliği,

$$q = q_{conv} + q_{rad} = hA(T_s - T_\infty) + \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_\infty^4)$$

Nusselt sayısı,

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} = CRa_L^n$$

Rayleigh sayısı,

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha}$$

Film sıcaklığı eşitliği,

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

Dikey plakalar için Nusselt sayısı,

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad Ra_L \leq 10^9$$

Yatay plakaların alt yüzeyi için Nusselt sayısı,

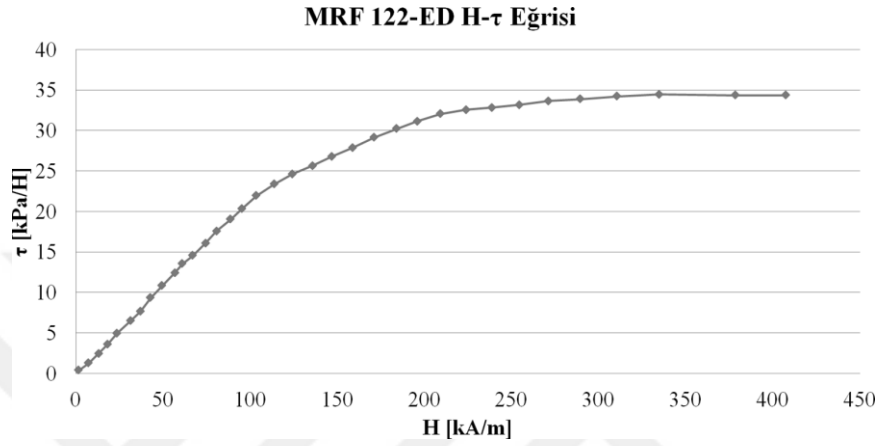
$$\overline{Nu}_L = 0.54Ra_L^{1/4}$$

Yatay plakaların üst yüzeyi için Nusselt sayısı,

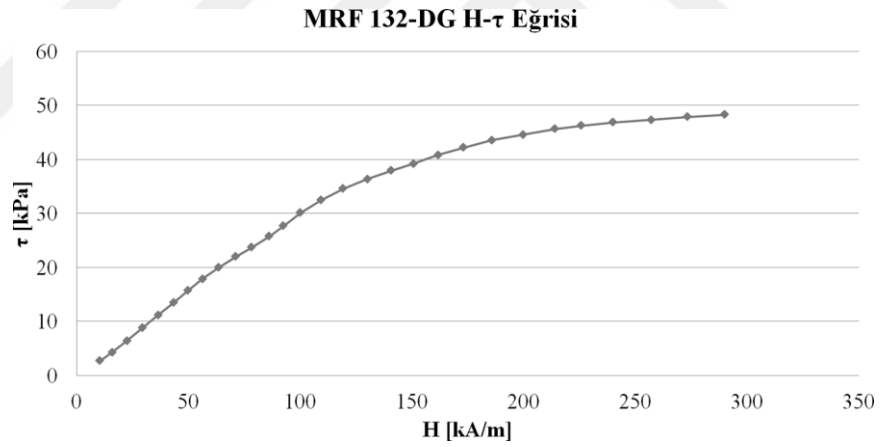
$$\overline{Nu}_L = 0.52Ra_L^{1/5} \quad 10^4 \leq Ra_L \leq 10^9, Pr \geq 0.7$$



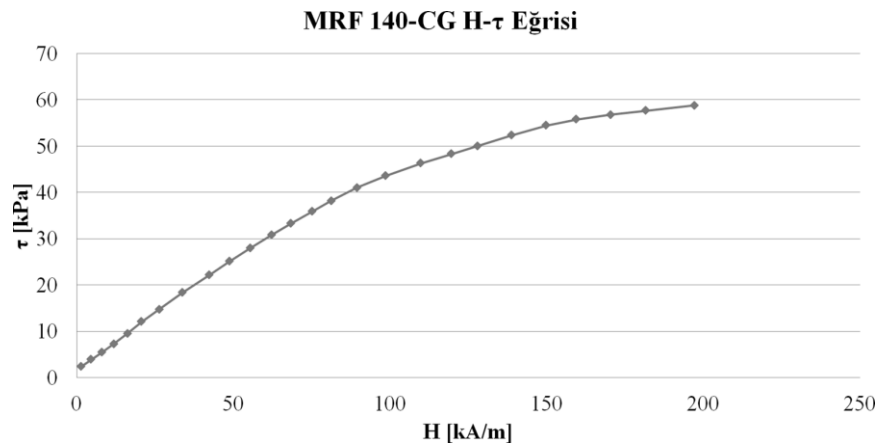
EK B. MRF akışkanları için H- τ Eğrileri



Şekil EkB.1 : MRF 122-ED için H- τ Eğrisi [1].

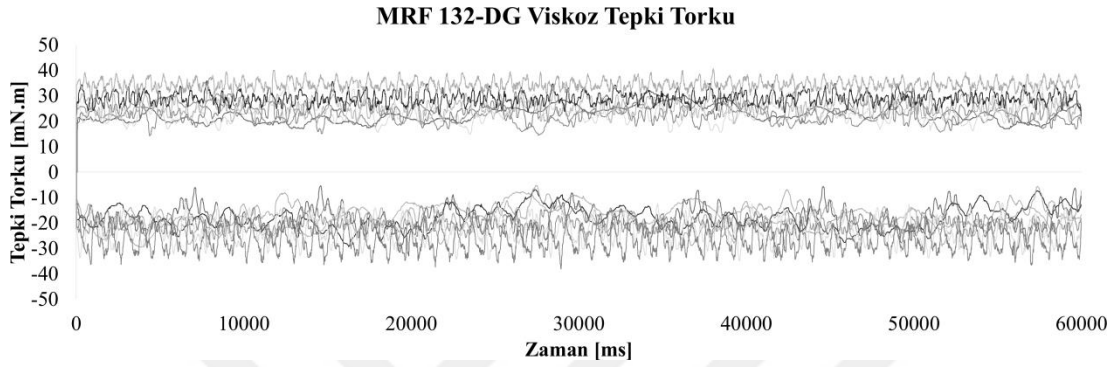


Şekil EkB.2 : MRF 132-DG için H- τ Eğrisi [1].

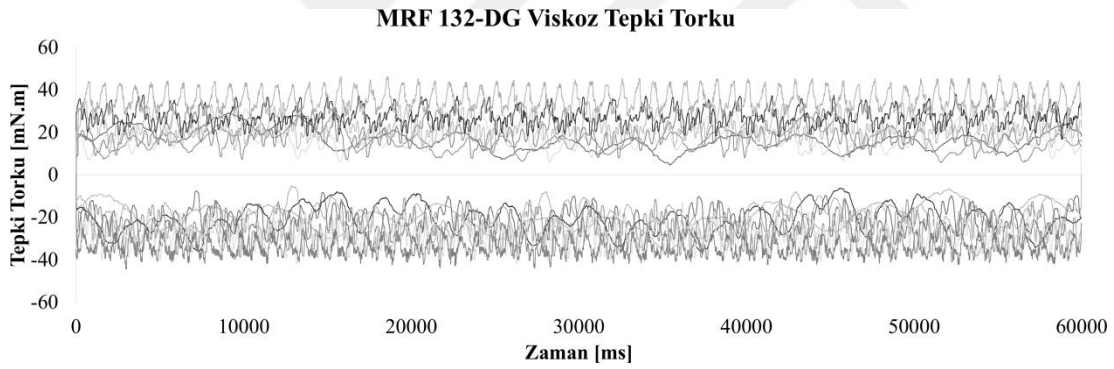


Şekil EkB.3 : MRF 140-CG için H- τ Eğrisi [1].

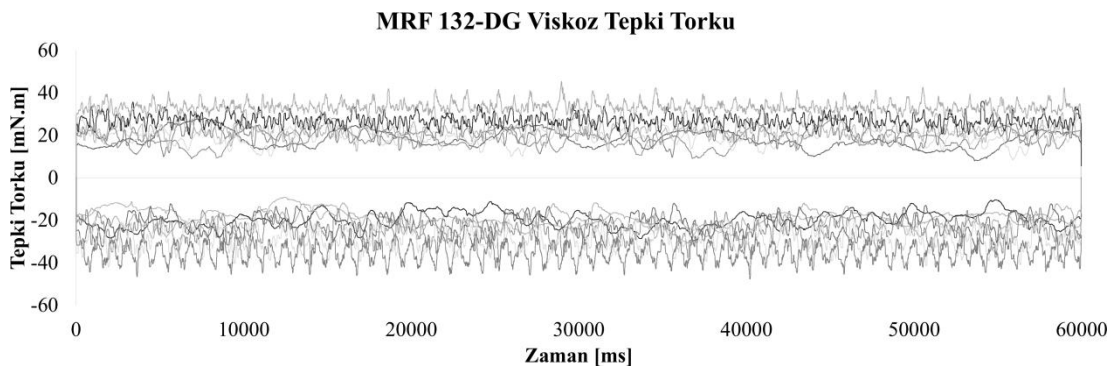
EK C. MRF frenlerin Deneysel Verileri



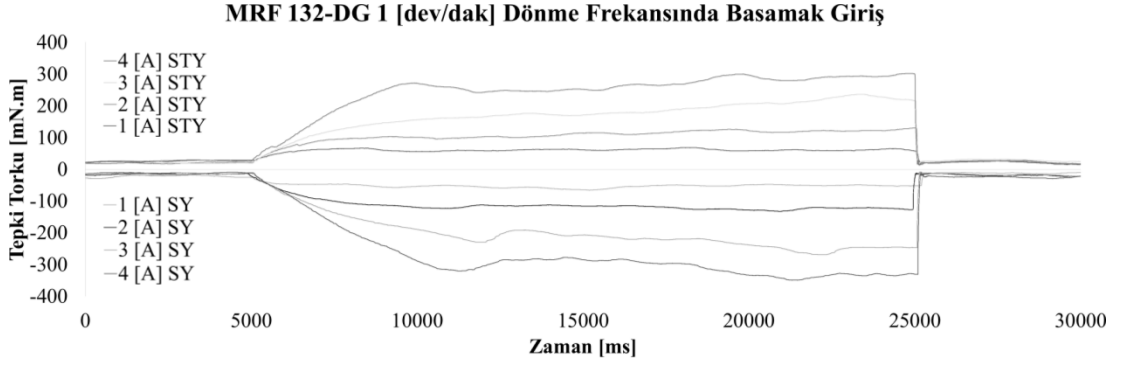
Şekil EkC.1 : MRF 132DG dolu frenin 1nci deneyine ait tepki torku verileri.



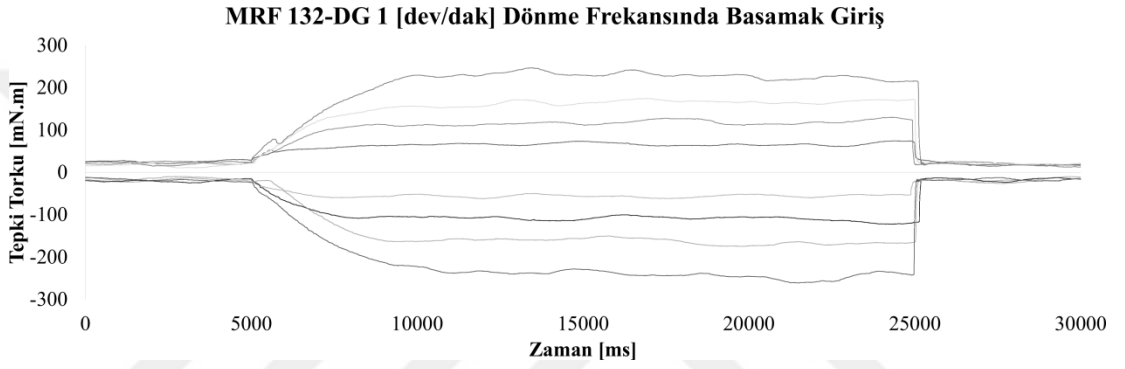
Şekil EkC.2 : MRF 132DG dolu frenin 2nci deneyine ait tepki torku verileri.



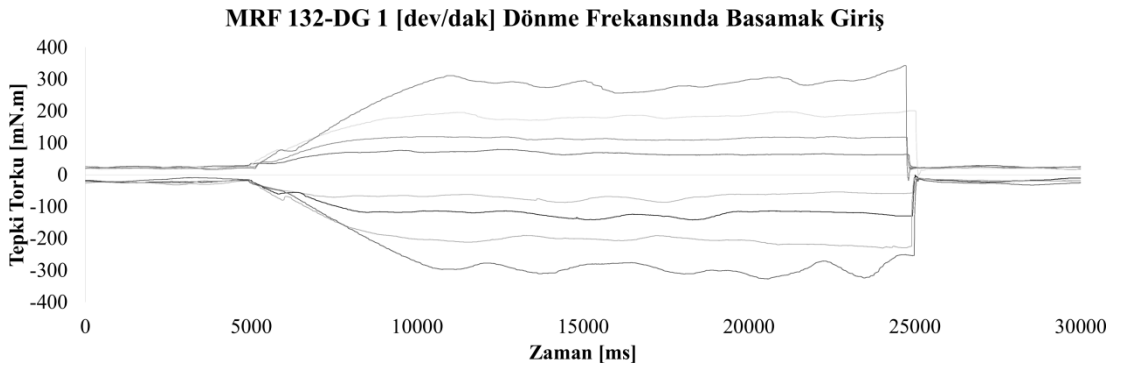
Şekil EkC.3 : MRF 132DG dolu frenin 3ncü deneyine ait tepki torku verileri.



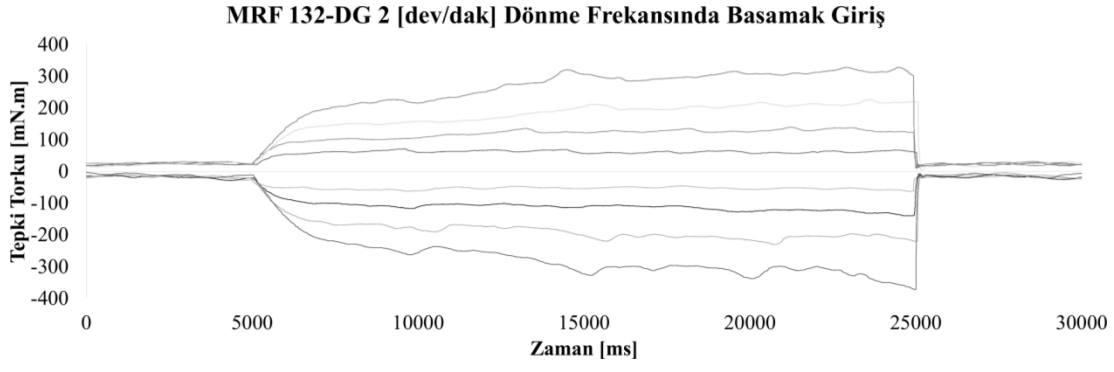
Şekil EkC.4 : MRF 132DG dolu frenin 1nci deneyine ait 1 dev/dak dönme frekansında basamak girişe cevabı.



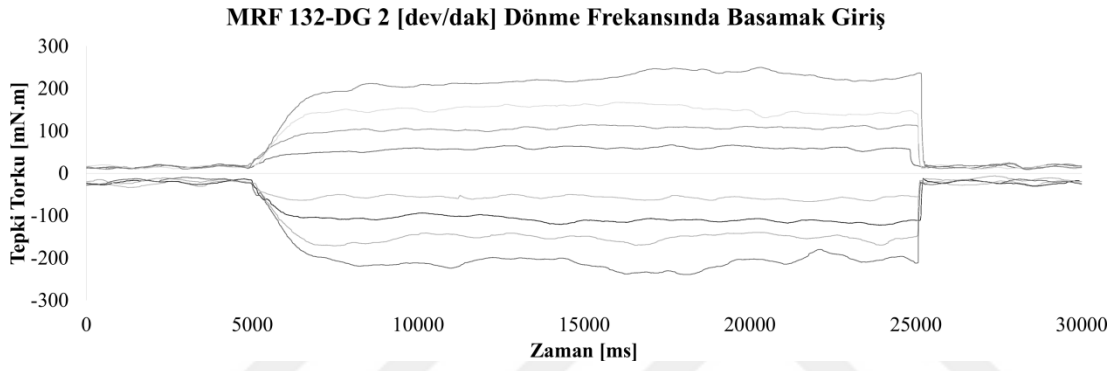
Şekil EkC.5 : MRF 132DG dolu frenin 2nci deneyine ait 1 dev/dak dönme frekansında basamak girişe cevabı.



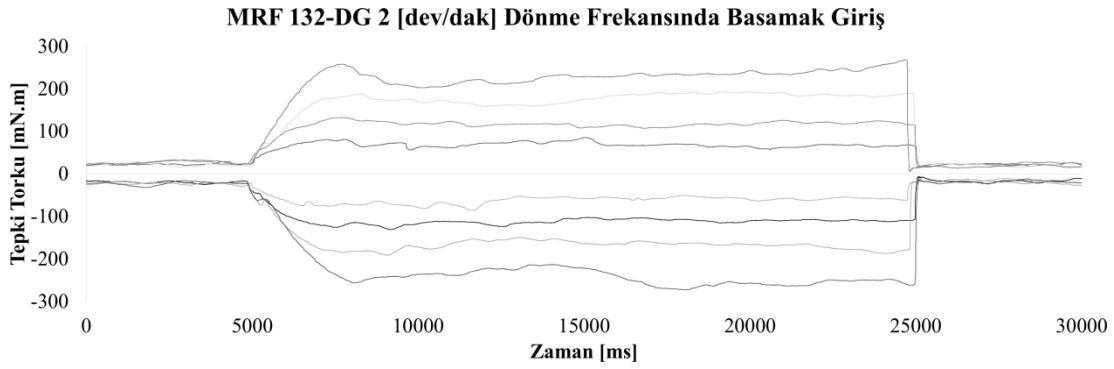
Şekil EkC.6 : MRF 132DG dolu frenin 3ncü deneyine ait 1 dev/dak dönme frekansında basamak girişe cevabı.



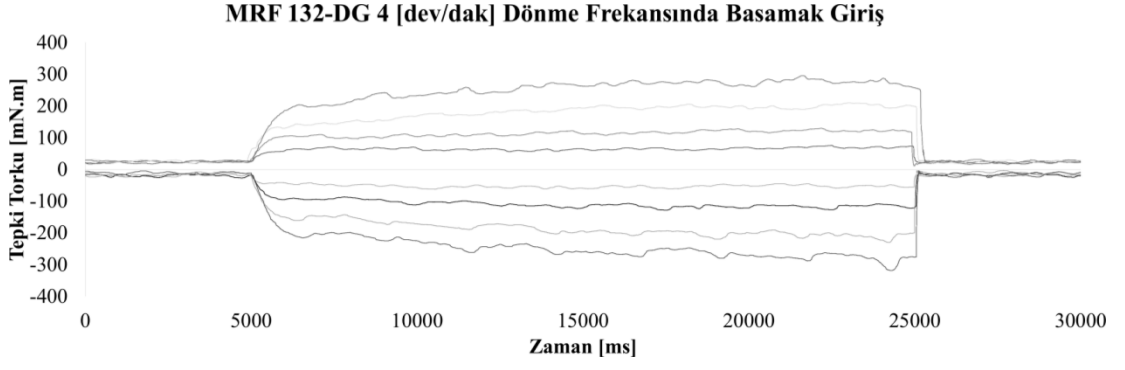
Şekil EkC.7 :MRF 132DG dolu frenin 1nci deneyine ait 2 dev/dak dönme frekansında basamak girişe cevabı.



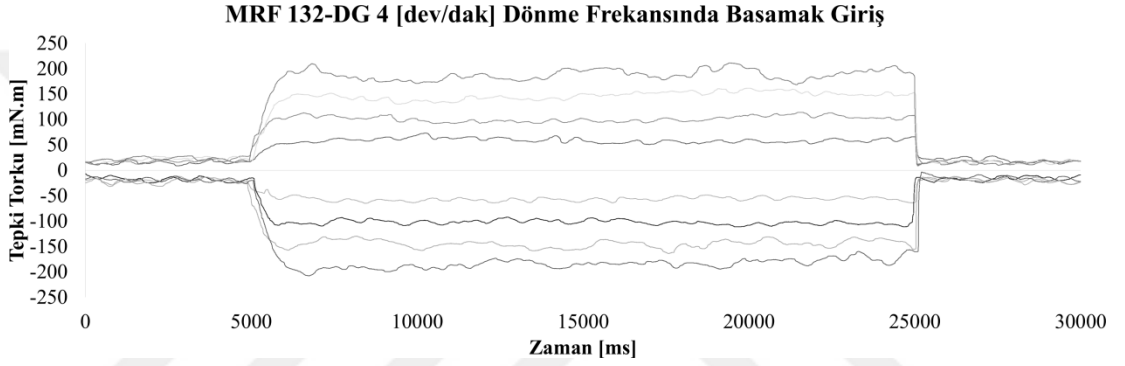
Şekil EkC.8 : MRF 132-DG dolu frenin 2nci deneyine ait 2 dev/dak dönme frekansında basamak girişe cevabı.



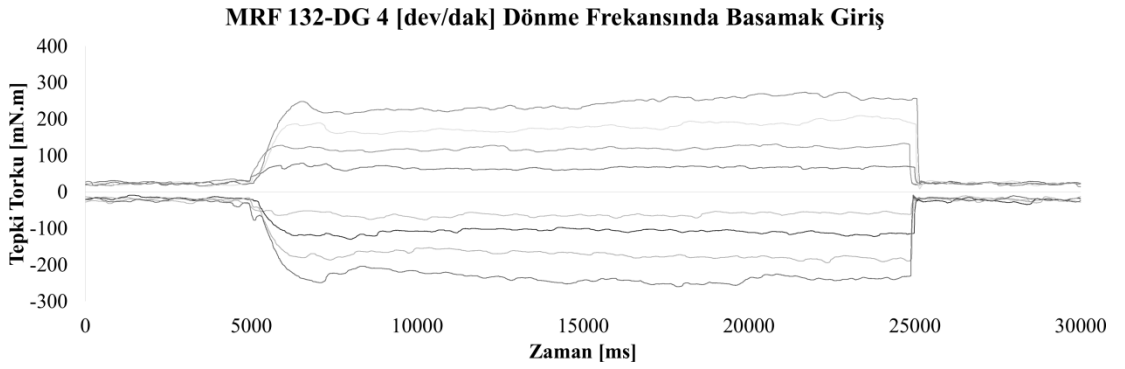
Şekil EkC.9 : MRF 132-DG dolu frenin 3ncü deneyine ait 2 dev/dak dönme frekansında basamak girişe cevabı.



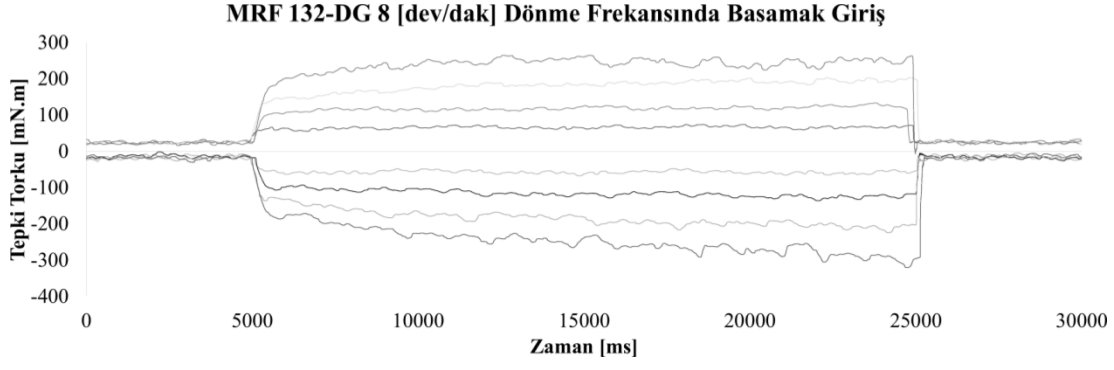
Şekil EkC.10 : MRF 132DG dolu frenin 1nci deneyine ait 4 dev/dak dönme frekansında basamak girişe cevabı.



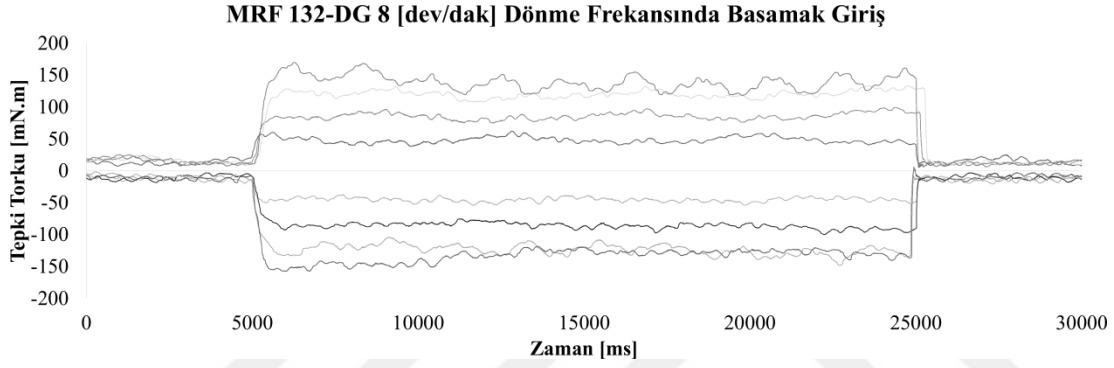
Şekil EkC.11 : MRF 132DG dolu frenin 2nci deneyine ait 4 dev/dak dönme frekansında basamak girişe cevabı.



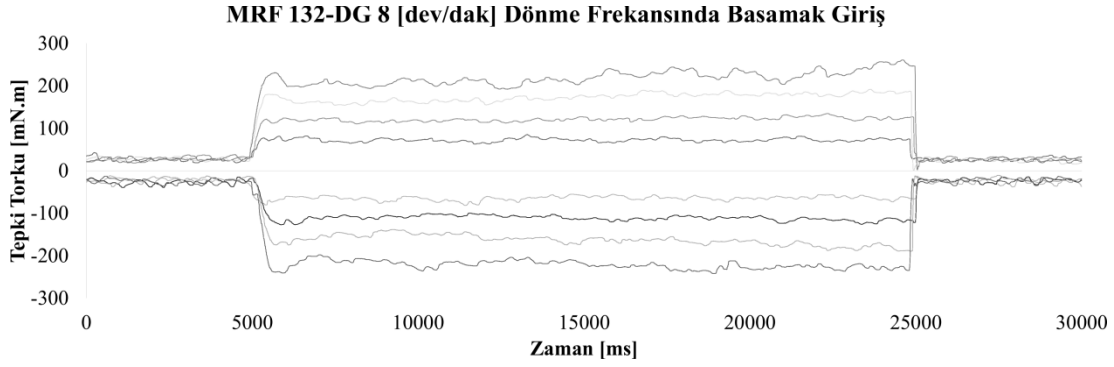
Şekil EkC.12 : MRF 132DG dolu frenin 3ncü deneyine ait 4 dev/dak dönme frekansında basamak girişe cevabı.



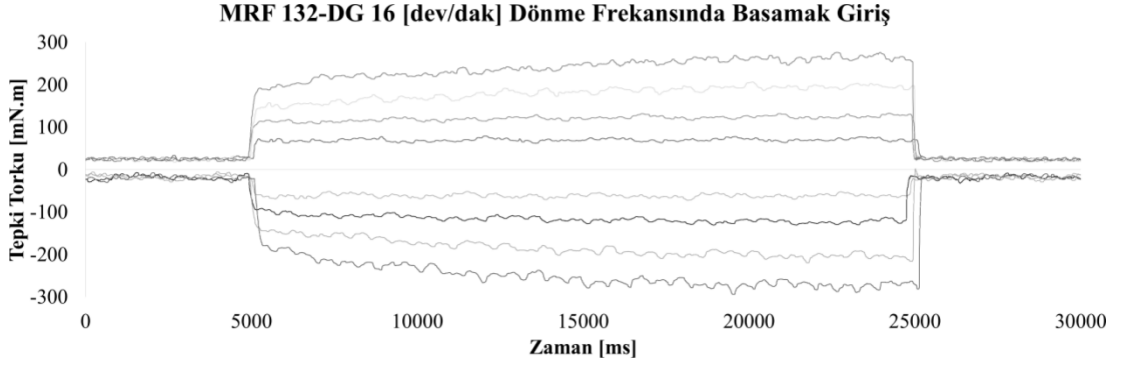
Şekil EkC.13 : MRF 132DG dolu frenin 1nci deneyine ait 8 dev/dak dönme frekansında basamak girişe cevabı.



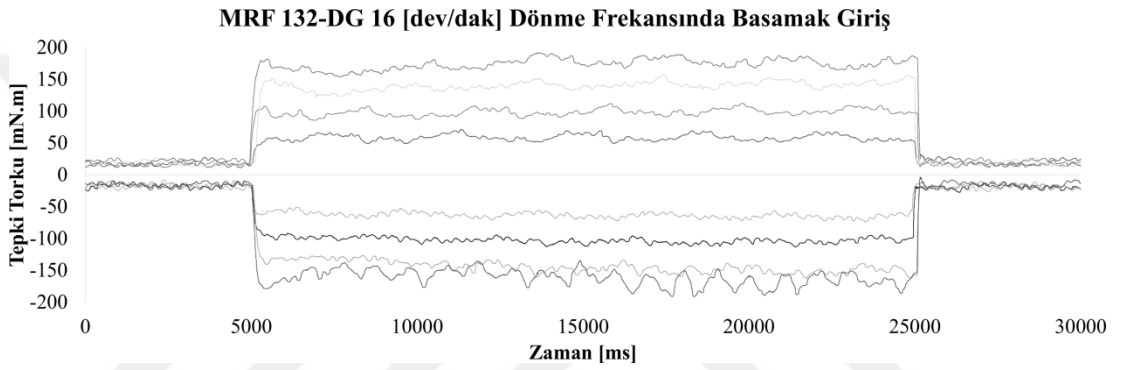
Şekil EkC.14 : MRF 132DG dolu frenin 2nci deneyine ait 8 dev/dak dönme frekansında basamak girişe cevabı.



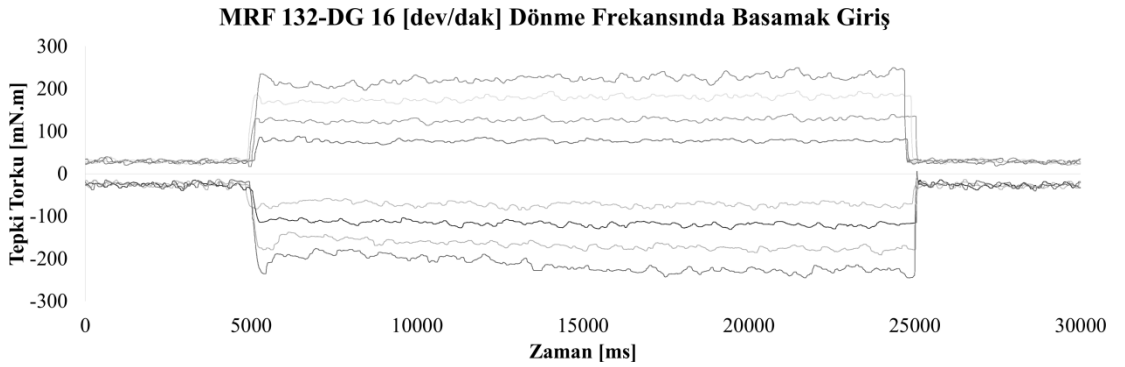
Şekil EkC.15 : MRF 132DG dolu frenin 3ncü deneyine ait 8 dev/dak dönme frekansında basamak girişe cevabı.



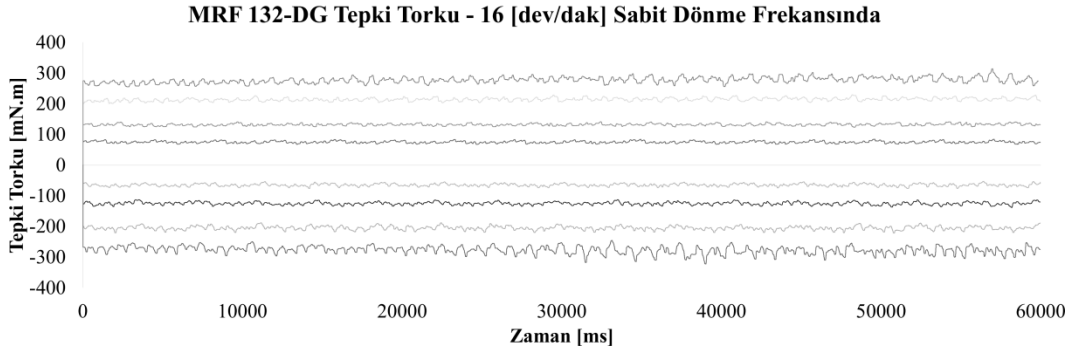
Şekil EkC.16 : MRF 132DG dolu frenin 1nci deneyine ait 16 dev/dak dönme frekansında basamak girişe cevabı.



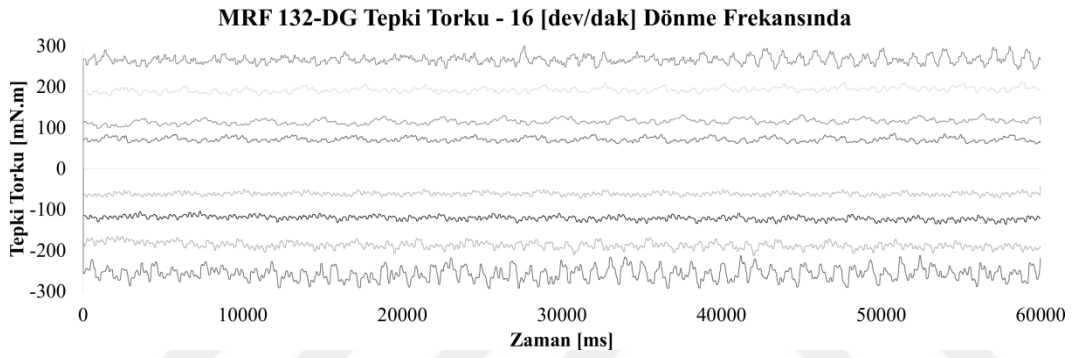
Şekil EkC.17 : MRF 132DG dolu frenin 2nci deneyine ait 16 dev/dak dönme frekansında basamak girişe cevabı.



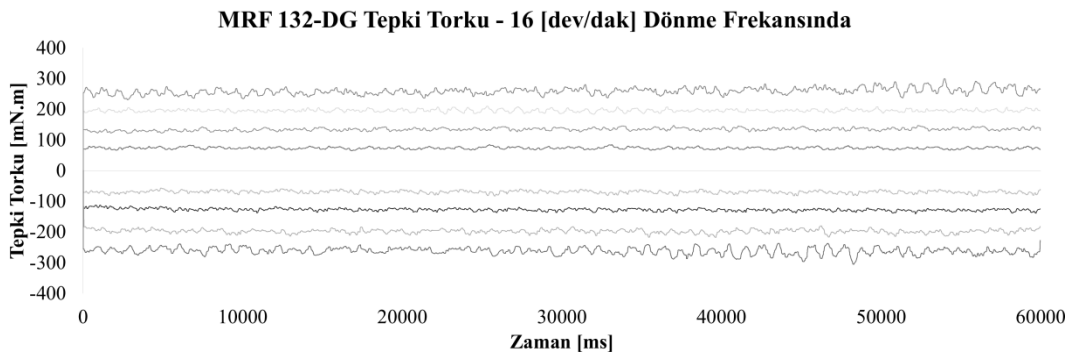
Şekil EkC.18 : MRF 132DG dolu frenin 3ncü deneyine ait 16 dev/dak dönme frekansında basamak girişe cevabı.



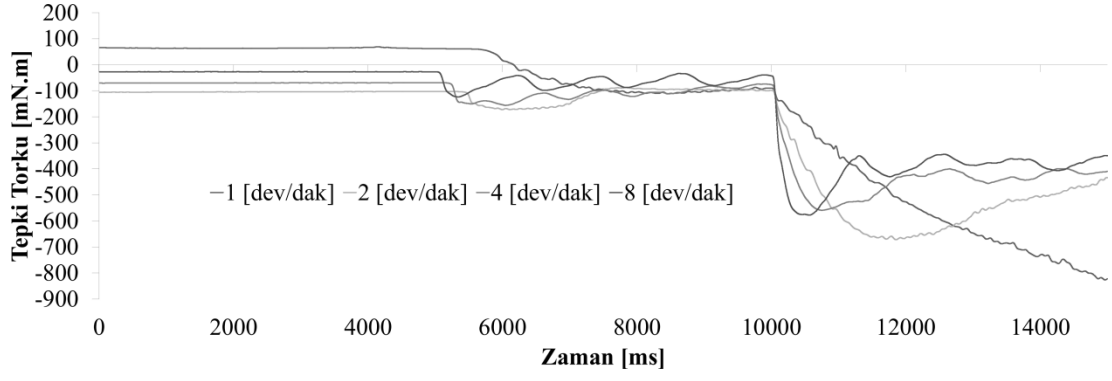
Şekil EkC.19 : MRF132DG dolu frenin 1nci deneyine ait 16 dev/dak dönme frekansındaki kararlı tepki torku.



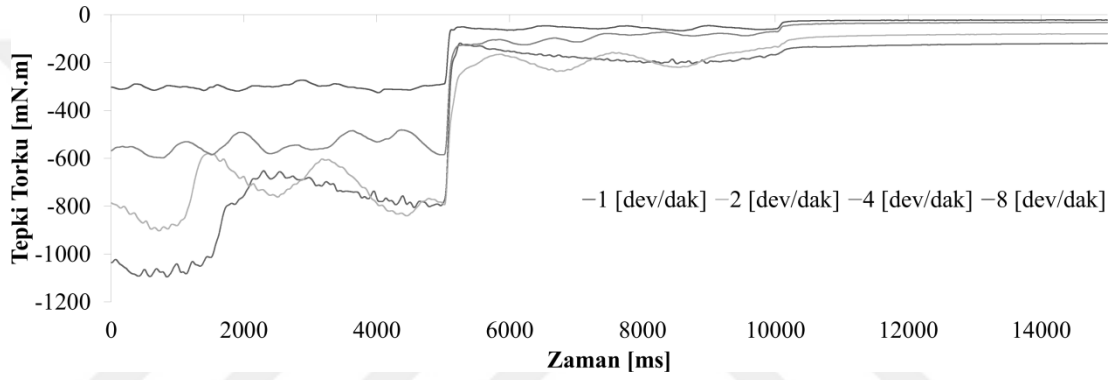
Şekil EkC.20 : MRF132DG dolu frenin 2nci deneyine ait 16 [dev/dak] dönme frekansındaki kararlı tepki torku.



Şekil EkC.21 : MRF132DG dolu frenin 3ncü deneyine ait 16 dev/dak dönme frekansındaki kararlı tepki torku.



Şekil EkC.22 : MRF 140CG dolu frenin 1, 2, 4, ve 8 dev/dak gibi düşük dönme frekansında 1,0 A akım basmak girişine verdiği tepki torqu.



Şekil EkC.23 : MRF 140CG dolu frenin 1, 2, 4, ve 8 dev/dak gibi düşük dönme frekansında 1,0 A akım basmaktan çıkışa verdiği tepki torqu.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Okan TOPÇU
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 24.01.1980
E-posta : meng.otopcu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2005, Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakülte, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2009, Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Bilimleri Programı

MESLEKİ DENEYİM ve ÖDÜLLER:

2015-2017	TOBB ETU, Ankara	YarıZamanlı Öğretim Elemanı
2009-2015	TOBB ETU, Ankara	B. Doktora Öğrencisi
2007-2009	TOBB ETU, Ankara	B. Yüksek Lisans Öğrencisi
2006	Türk Silahlı Kuvvetleri, Kıbrıs	Asteğmen
2005	Rona Şirketler Grubu	Assistan Mühendis

YABANCI DİL:

İngilizce, Japonca

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR ve PATENTLER:

- **Topçu, O.**, Taşcıoğlu, Y., Konukseven, E. İ., 2015. Design and Analysis of a Lightweight Disc-Type Magnetorheological Device, *The 2015 International Conference of Mechanical Engineering (ICME)*, May 25-26, London, UK.
- **Topçu, O.**, Taşcıoğlu, Y., Konukseven, E. İ., 2015. A Novel Rotary Magneto-Rheological Damper for Haptic Interfaces, *ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE)*, November 13-19, Houston, USA.
- Y. Taşcıoğlu, and E. İ. Konukseven., **Topçu, O.**, 2017. Amortisseur réglable Patent Başvuru Numarası: WO2017091171A1 / PCT/TR2016/000167
- **Topçu, O.**, Taşcıoğlu, Y. and Konukseven, E. İ., 2018. Modeling and experimental evaluation of a rotary peristaltic magnetorheological fluid device with low off-state torque for haptic interfaces. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(1), p.9.
- **Topçu, O.**, Taşcıoğlu, Y. and Konukseven, E. İ., 2018. Design and Multi-Physics Optimization of Rotary MRF Brakes. *Results in Physics*.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR ve PATENTLER:

- **Topçu, O.**, Übeyli, M., 2009. Effect of Intercritical Heat Treatment on Mechanical Properties of a Microalloyed Steel, *The Fifth International Materials Symposium (MATERIAIS)*, April 5-8, Lisbon, Portugal.
- **Topçu, O.**, Übeyli, M., 2009. On the microstructural and mechanical characterizations of a low carbon and micro-alloyed steel. *Materials & Design*, 30(8), pp.3274-3278..
- **Topçu, O.**, Übeyli, M., Demir, T., 2010. On the Hardenability of an Intercritically Heat Treated Microalloyed Steel, *Instrum Sci Technol*, Volume 38, No. 2, 178 – 186.
- **Topçu, O.**, Taşcıoğlu, Y., Ünver, H. Ö., 2011. A Method for Slicing CAD Models in Binary STL Format, *The Sixth International Advanced Technologies Symposium (IATS)*, May 16-18, Elazığ, Turkey.
- **Topçu, O.**, Aslan, E., 2011. Web-Based Simulation of a Lathe using Java 3D API, *The Second International Symposium on Computing in Science and Engineering (ISCSE)*, June 1-4, İzmir, Turkey.

- **Topçu, O.,** Übeyli, M., Acır, A., 2011. Effect of the Martensite Volume Fraction on the Machining of a Dual-Phase Steel using a Milling Operation", *Mater Tehnol*, Volume 45, No. 2, 145-150.
- **Topçu, O.,** Taşcıoğlu, Y., 2011. A Virtual Prototyping System for Additive Manufacturing Process Development, *The 14th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies (AMPT)*, July 13-16, İstanbul, Turkey.
- **Topçu, O.,** Taşcıoğlu, Y., 2012., A Cell Based Approach to Modeling Discrete Multi-Material Objects, *15th International Conference On Machine Design And Production (UMTIK)*, June 19-22, Pamukkale, Denizli, Turkey
- **Topçu, O.,** Taşcıoğlu, Y., 2012. A Virtual Prototyping System for Additive Manufacturing Process Development, *Advanced Materials Research (AMR)*, Volume 445, 971-975.
- **Topçu, O.,** 2012. CFD-DP Modeling of Multiphase Flow in Dense Medium Cyclone, *CFD Letters*, Volume 4, No. 1, 33-42.
- **Topçu, O.,** Aygün, M. M., Çöllü, Ö., Taşcıoğlu, Y., 2013. "Experimental Investigation of a Magnetorheological Fluid Damper with Permanent Magnet for Haptic Finger Grasping", *The 20th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, September 18-20, Ankara, Türkiye.
- **Topçu, O.,** Aygün, M. M., Çöllü, Ö., Taşcıoğlu, Y., 2015. Experimental Investigation of a Magnetorheological Fluid Damper with Permanent Magnet for Haptic Finger Grasping, *Machine Vision and Mechatronics in Practice*, eds. J. Billingsley and P. Brett, 105-112, Springer Berlin Heidelberg.

