

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİBRİT YAPILI BİR MANYETOREOLOJİK FRENİN SAYISAL
YÖNTEMLERLE TASARIMI VE DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kasım Enes KALIN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yiğit TAŞCIOĞLU

AĞUSTOS 2018

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

.....
Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ
Anabilim Dalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151511017 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Kasım Enes KALIN**'ın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**HİBRİT YAPILI BİR MANYETOREOLOJİK FRENİN SAYISAL YÖNTEMLERLE TASARIMI VE DENEYSEL İNCELENMESİ**" başlıklı tezi **02.08.2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Yiğit TAŞCIOĞLU**
TOBB Ekonomik ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Selin ARADAĞ**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. E. İlhan KONUKSEVEN
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.

Kasım Enes Kalın

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HİBRİT YAPILI BİR MANYETOREOLOJİK FRENİN SAYISAL YÖNTEMLERLE TASARIMI VE DENEYSEL İNCELENMESİ

Kasım Enes Kalın

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yiğit Taşcıoğlu

Tarih: Ağustos 2018

Manyetoreolojik akışkanlar manyetik alana duyarlı reolojik özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sebebiyle manyetoreolojik akışkanlar “akıllı” malzeme olarak sınıflandırılır. Hızlı tepki süresi, yüksek akma gerilmesi gibi çekici özellikleri sayesinde manyetoreolojik akışkanlı cihazlar benzer akıllı malzemelere üstünlük göstererek kullanım yoğunluğu açısından öne çıkmaktadır. Manyetoreolojik akışkanlar kullanılarak titreşim sönümleme ve fren uygulamaları için birçok damper ve fren tasarlanmıştır. Literatürdeki fren tasarımları önceleri otomotiv ve motosikletler için olsa da günümüzdeki birçok çalışma haptik uygulamalar için yüksek tork yoğunluğuna sahip manyetoreolojik fren tasarımına yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada yüksek tork yoğunluğuna ulaşmak için H-tipi manyetoreolojik fren önerilmiştir. Önerilen frenin değerlendirilmesi için haptik sistemlere indirgenebilecek boyutlar seçilmiştir. Bu sebeple frenin çapı ve uzunluğu kısıtlanmıştır. Karşılaştırma yapmak için belirtilen boyutlarda literatürde iyi sonuçlarıyla bilinen kampana ve T-tipi fren seçilmiştir. Kampana, T-tipi ve H-tipi

frene Parçacık Sürü Optimizasyonu yöntemiyle optimizasyon çalışması yapılmıştır. Frenlere uygulanan kısıtları yönetmek için gradyan temelli kısıt yönetme yöntemi kullanılmıştır. Frenlerin manyetik devresi hem iteratif formülasyon hem de sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılarak çözülmüştür. İki yaklaşım karşılaştırılmış; sonlu elemanlar yaklaşımının sonuçlarının daha güvenilir olduğu belirlenmiştir. Frenleme torqu Bingham plastik modeli kullanılarak türetilmiştir. Optimum tasarımların karşılaştırılması sonucu H-tipi MR frenin kampana tipine göre %22, T-tipine göre %13 daha yüksek tork yoğunluğuna sahip olduğu açığa çıkmıştır. Ayrıca, önerilen frenin kampana tipine göre %60, T-tipine göre %18 fazla tork ürettiği gösterilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu sonlu elemanlar yaklaşımı doğrulanmış, frenin histerisiz davranışı hakkında çıkarımlar yapılmıştır. Prototip H-tipi frenin zaman sabitinin 1.5 A basamak girişinde 69 ms olduğu saptanmıştır. Frenin bobinine sinüzoidal uyarı verilmiş; frenin birinci derece sistemler gibi davrandığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Manyetoreolojik akışkan, Manyetoreolojik fren, Tork yoğunluğu, Frenleme torqu, Parçacık sürü optimizasyonu, Gradyan temelli kısıt yönetme.

ABSTRACT

Master of Science

NUMERICAL DESIGN AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF A HYBRID MAGNETORHEOLOGICAL BRAKE

Kasım Enes Kalın

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

Supervisor: Assist. Prof. Yiğit Taşcıoğlu

Date: August 2018

Magnetorheological fluids exhibit magnetically sensitive rheological behavior. Thus, they are classified as “smart” materials. Magnetorheological fluid devices have attractive properties such as fast response time, higher yield stress, and relatively low power consumption. Magnetorheological devices distinguish among similar smart materials, as its properties are superior. Magnetorheological devices include dampers and brakes. Initially, magnetorheological brakes are developed for automotive and motorcycles. Recent studies focuses on increasing torque density in haptic systems. In this study, H-shaped MR brake is proposed to achieve higher torque density. Proposed brake is compared to drum and T-shaped MR brakes. All brakes are designed parametrically. Parametric designs are optimized using Particle Swarm Optimization. Gradient-based constraint handling method is used to handle constraints. Magnetic analysis is conducted using both developed iterative formulation and finite element approaches. Two approaches are compared, latter of which is shown to be the method of choice. Braking torques are deducted

analytically using Bingham plastic model. Comparison of the optimum designs show that the torque density of H-shaped MR brake is 22% higher than drum type and 13% higher than T-shaped MR brake. Also, H-shaped MR brake generates 60% more braking torque than the drum type and 18% more than T-shaped MR brake. Experimental study validates the finite element approach while deductions are made about hysteresis characteristics. Time constant of the proposed brake is found to be 69 ms in response to 1.5 A step input. Sinusoidal excitation to the coil of the brake shows that proposed brake can be modeled as first order systems.

Keywords: Magnetorheological fluid, Magnetorheological brake, Torque density, Braking torque, Particle swarm optimization, Gradient based constraint handling.



TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim süresince bana yol gösteren, yardımda ve katkıda bulunan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Yiğit Taşcıoğlu'na teşekkür ederim.

Yüksek Lisans'ta yaptığım ders seçimlerinde ve katıldığım projelerde yönlendirmelerde bulunan; tecrübelerini benimle paylaşan Dr. Öğr. Üyesi Yiğit Taşcıoğlu'na, Prof. Dr. Selin Aradağ'a ve Dr. Kutay Çelebioğlu'na teşekkür ederim.

Yüksek Lisans eğitimim boyunca bilgilerini ve tecrübelerini paylaşan bölüm hocalarım Prof. Dr. Ünver Kaynak'a, Prof. Dr. Selin Aradağ'a, Prof. Dr. Sadık Kakaç'a, Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı Uslu'ya, Doç. Dr. Murat Kadri Aktaş'a, Prof. Dr. Mehmet Ali Güler'e ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Bülent Özer'e teşekkür ederim.

Gerek yurtiçinden gerek yurtdışından çok değerli akademisyen ve araştırmacıları okulumuza getirerek bize sunumlar yapmasını sağlayan, bilgi birikimimizin artmasına ve çevremizin genişlemesine vesile olan başta Prof. Dr. Sadık Kakaç olmak üzere bütün herkese ve konuşmacılara teşekkür ederim.

Yüksek Lisans eğitimim sırasında bana burs sağladığı için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Yüksek Lisans eğitimim boyunca gerek derslerde gerek gündelik hayata dair konularda her an yardımlarına başvurabildiğim ofis arkadaşlarım Burak Altıntaş'a, Emre Arıöz'e, Dr. Öğr. Üyesi Ece Aylı'ya, Ferdi Besni'ye, Fevzi Büyüksolak'a, Hüseyin Çetintürk'e, Özgür Çöllü'ye, Gizem Demirel'e, Kübra Asena Gelişli'ye, Mustafa Can Güçlü'ye, Alper Kaplan'a, Gülsevrim Sepetçi'ye, Mustafa Tuncer'e, Elçin Ceren Yaldır'a, Selahattin Özhan Yüksel'e teşekkür ederim. Tezime ait deneyleri yaparken deney düzeneğini paylaştığım ve deneye dair birçok konuda yardım aldığım Sait Yılmaz'a teşekkürü bir borç bilirim. Deneyleri yapmamda yardımları bulunan Eren Can Ergül'e ve Mehmet Akif Şahin'e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca daima yanımda olan; herşeylerini bize daha iyi bir hayat sunabilmek için yapan annem Safiye Kalın'a ve babam Mustafa Kalın'a çok teşekkür ederim. Yanlarında bulunmaktan keyif aldığım ve her zaman yanımda olan kardeşlerim Havva Nur Kalın'a, Muhammet Furkan Kalın'a, Şerife Reyyan Nur Kalın'a çok teşekkür ederim.

Tezimi yazdığım süreçte hayatını benimle birleştiren ve ayrılamaz bir parçam haline gelen eşim Mualla Kalın'a teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
ŞEKİL LİSTESİ	xii
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
KISALTMALAR	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Kapsam	2
1.2 Önerilen H-tipi MR Fren	3
1.3 MR FREN TASARIMINDA DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSUSLAR	4
1.3.1 Elde edilebilecek maksimum torkun artırılması	5
1.3.2 Frenin minimum torkunun azaltılması	6
1.3.3 MR akışkan seçimi	6
1.3.4 Sızdırmazlık	7
1.3.5 Kanal kalınlığı	7
2. LİTERATÜR	9
2.1 Akıllı Malzemeler	9
2.2 MR Akışkanlar	10
2.3 ER Akışkan ve MR Akışkan Karşılaştırması	11
2.4 MR Frenler	13
2.5 Literatür Araştırması	18
3. MODELLEME VE BENZETİM	33
3.1 İteratif Formülasyon	35
3.2 Sonlu Elemanlar - FEMM	40
3.3 Bingham Modeli	42
3.4 Frenleme Torkunun Hesaplanması	43
3.5 MR Frenlerin Deneysel İncelenmesi	45
3.5.1 Histerisiz karakteristiği	45
3.5.2 Zaman sabiti / Basamak giriş	46
3.5.3 Frekans cevabı	48
3.5.3.1 Ayrık Fourier Dönüşümü	49
3.5.4 Deney düzeneği	50
4. H-TİPİ MR FREN TASARIMI	53
5. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU	57
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	63
6.1 Benzetim Sonuçları	63
6.2 Deney Sonuçları	74
6.2.1 Prototip frenin histerisiz karakteristiği	76
6.2.2 Prototip frenin basamak giriş cevabı	78
6.2.3 Prototip frenin frekans cevabı	79

7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR.....	87
EKLER.....	93
EK 1: T-tipi MR Frenin İteratif Formülasyonla Çözümü.....	94
EK 2: Deney Prosedürleri.....	97
EK 3: Belirsizlik Analizi	98
EK 4: Histeriz Karakteristiği için Yapılan Tüm Deneylein Her Bir Akımda Ortalama Değeri ve Değeriin Standart Sapmaları.....	100
EK 5: Basamak Giriş Deney Sonuçları	103
EK 6: Sinüzoidal Uyarı Cevapları	104



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : MR cihazlar: (a) RD-8040-1 MR sönümleyici 1 kN, (b) RD-8058-1 TFD cihazı 12 Nm [1].....	1
Şekil 1.2 : Önerilen H-tipi MR fren.	4
Şekil 2.1 : MR etki sonucu oluşan zincirli yapı.	10
Şekil 2.2 : MR cihazların çalışma modları: a) Kesme modu b) Vana/Akış modu c) Sıkıştırma modu d) Paralel mod.....	14
Şekil 2.3 : Literatürdeki sıklıkla kullanılan frenler a) disk, b) kampana, c) hibrit, ç) T-tipi, d) çoklu disk, e) ters kampana.	17
Şekil 3.1 : Kampana tipi MR frenin iteratif formülasyon yöntemi için ayrıklaştırılması.....	35
Şekil 3.2 : H-tipi frenin iteratif formülasyon yaklaşımı için ayrıklaştırılması.....	38
Şekil 3.3 : FEMM arayüzünde tasarlanılan kampana tipi frenin görünümü.....	42
Şekil 3.4 : Birinci derece zamanla değişmeyen sistem örneği.....	47
Şekil 3.5 : Birinci derece sistemin basamak girişe cevabı.....	47
Şekil 3.6 : Deney düzeneği.....	51
Şekil 3.7 : Tork sensörü kalibrasyonu için kullanılan düzenek.....	52
Şekil 4.1 : H-tipi MR frenin eksenel simetrik görünümü.....	53
Şekil 5.1 : Optimizasyon algoritması akış şeması.....	61
Şekil 6.1 : Karşılaştırma için kullanılacak frenlerin eksenel simetrik görünümleri ve tasarım değişkenleri a) kampana, b) T-tipi, c) H-tipi MR fren.....	64
Şekil 6.2 : PSO çalışmasında optimum tork yoğunluğu değerlerinin iterasyon sayısı ile değişimi.....	70
Şekil 6.3 : Sonlu elemanlar yaklaşımıyla elde edilen optimum frenlerin manyetik akı yoğunluk dağılımları: kampana tipi MR fren (üstte), T-tipi MR fren (ortada), H-tipi MR fren(altta).	72
Şekil 6.4 : Optimum frenlerin dikdörtgen bobinle tasarımlarının manyetik akı yoğunluk dağılımı.....	74
Şekil 6.5 : Prototip H-tipi MR frenin CAD modeli (solda) ve üretilen parçalar (sağda).	75
Şekil 6.6 : Prototip H-tipi MR frenin montajlanmış hali.....	76
Şekil 6.7 : Farklı açısal hızlarında frenleme torkunun ortalama değerleri.....	77
Şekil 6.8 : Deneysel sonucun SE sonucu ile karşılaştırması.....	78
Şekil 6.9 : Prototip MR frenin 0.5, 1.0 ve 1.5 A basamak giriş cevapları.....	79
Şekil 6.10 : Prototip MR frenin $1.25+0.25\sin(\omega t)$ A akımına frekans cevabı: Tork/Akım oranı (üstte), Faz farkı (altta).....	81
Şekil 6.11 : Prototip frenin frekans cevabının baskın frekansla inşa edilmesinde elde edilen mutlak bağıl hata.....	81

Şekil EK 1.1 : T-tipi MR frenin iteratif formülasyonla ayrıklaştırılması.....	94
Şekil EK 5.2 : Basamak girişe ait bütün deney sonuçları.	103
Şekil EK 6.3 : 0.5 rad/s için frekans dağılımı.	104
Şekil EK 6.4 : 0.5 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	104
Şekil EK 6.5 : 1 rad/s için frekans dağılımı.	105
Şekil EK 6.6 : 1 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	105
Şekil EK 6.7 : 2 rad/s için frekans dağılımı.	106
Şekil EK 6.8 : 2 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	106
Şekil EK 6.9 : 3 rad/s için frekans dağılımı.	107
Şekil EK 6.10 : 3 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	107
Şekil EK 6.11 : 4 rad/s için frekans dağılımı.	108
Şekil EK 6.12 : 4 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	108
Şekil EK 6.13 : 5 rad/s için frekans dağılımı.	109
Şekil EK 6.14 : 5 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	109
Şekil EK 6.15: 6 rad/s için frekans dağılımı.	110
Şekil EK 6.16 : 6 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	110
Şekil EK 6.17 : 7 rad/s için frekans dağılımı.	111
Şekil EK 6.18 : 7 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	111
Şekil EK 6.19 : 8 rad/s için frekans dağılımı.	112
Şekil EK 6.20 : 8 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	112
Şekil EK 6.21 : 9 rad/s için frekans dağılımı.	113
Şekil EK 6.22 : 9 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	113
Şekil EK 6.23 : 10 rad/s için frekans dağılımı.	114
Şekil EK 6.24 : 10 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	114
Şekil EK 6.25 : 20 rad/s için frekans dağılımı.	115
Şekil EK 6.26 : 20 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	115
Şekil EK 6.27 : 30 rad/s için frekans dağılımı.	116
Şekil EK 6.28 : 30 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	116
Şekil EK 6.29 : 40 rad/s için frekans dağılımı.	117
Şekil EK 6.30 : 40 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	117
Şekil EK 6.31 : 50 rad/s için frekans dağılımı.	118
Şekil EK 6.32 : 50 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	118
Şekil EK 6.33 : 60 rad/s için frekans dağılımı.	119
Şekil EK 6.34 : 60 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	119
Şekil EK 6.35 : 70 rad/s için frekans dağılımı.	120
Şekil EK 6.36 : 70 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	120
Şekil EK 6.37 : 80 rad/s için frekans dağılımı.	121
Şekil EK 6.38 : 80 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	121
Şekil EK 6.39 : 90 rad/s için frekans dağılımı.	122
Şekil EK 6.40 : 90 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	122
Şekil EK 6.41 : 100 rad/s için frekans dağılımı.	123
Şekil EK 6.42 : 100 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	123
Şekil EK 6.43 : 500 rad/s için frekans dağılımı.	124
Şekil EK 6.44 : 500 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.....	124

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : MR fren çalışmalarının özet çizelgesi.	31
Çizelge 3.1 : Tork sensörü kalibrasyonunda uygulanan tork değerleri ve tork sensöründen okunan değerler.....	52
Çizelge 6.1 : Tasarım değişkenlerinin alt ve üst değerleri ve iteratif formülasyon ve sonlu elemanlar yaklaşımlarıyla yapılan optimizasyon çalışması sonucu elde edilen frenlerin boyutları (mm cinsinden).....	65
Çizelge 6.2 : Frenlere uygulanan eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları.....	66
Çizelge 6.3 : Optimum frenlerin tork yoğunlukları.	66
Çizelge 6.4 : Optimizasyon çalışmasının aldığı zaman.	68
Çizelge 6.5 : Sonlu elemanlar yaklaşımıyla elde edilen optimum frenlerin performans göstergeleri.....	73
Çizelge 6.6 : Bobin eğilmeden analiz edilen optimum tasarımların sonuçları.	74
Çizelge 6.7 : Prototip H-tipi MR frenin boyutları.....	75
Çizelge EK 4.1 : Farklı açısal hızlarda ve dönme yönlerinde yapılan histerisiz deneylerinin akımlara göre ortalama değerleri.	100
Çizelge EK 4.2 : (devam) Farklı açısal hızlarda ve dönme yönlerinde yapılan histerisiz deneylerinin akımlara göre ortalama değerleri.....	101
Çizelge EK 4.3 : (devam) Farklı açısal hızlarda ve dönme yönlerinde yapılan histerisiz deneylerinin akımlara göre ortalama değerleri.....	102

KISALTMALAR

AWG : Amerikan Tel Ölçeği

ER : Elektroeolojik

İF : İteratif Formülasyon

MR : Manyetoreolojik

PSO : Parçacık Sürü Optimizasyonu

SE : Sonlu Elemanlar

SY : Saat Yönü

SYT : Saat Yönünün Tersi

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Alan
B	Manyetik akı yoğunluğu
\vec{c}	Eşitlik kısıtlarının sağ tarafındaki değerler
d	MRS kanal genişliği
e	Sapma için küçük pozitif sayı
\vec{g}	Eşitsizlik kısıtları
g_{best}	Küresel optimum pozisyon
\vec{h}	Eşitlik kısıtları
H	Manyetik alan şiddeti
I	Akım
l	Uzunluk
m	Kütle
M	Büyüklik
N	Sarım sayısı
R	Manyetik direnç
R_{tel}	Tel direnci
Φ	Manyetik akı
p	Pozisyon
p_{best}	Bireysel optimum pozisyon
r	Yarıçap
T	Tork
\vec{u}	Üst sınır
v	Hız
V	Hacim
w	Atalet
$\Delta\vec{p}$	Pozisyon vektörünün hata miktarı
$\nabla_{\vec{p}}\vec{v}$	Kısıtların konuma göre

$\Delta\vec{V}$	türevi
$\dot{\gamma}$	İhlal mertebesi vektörü
ω	Kesme hızı
μ	Açısal hız
μ_m	Dinamik viskozite
μ_p	Manyetik geçirgenlik
τ	Taşıyıcı sıvının viskozitesi
τ_y	Kayma gerilmesi
	Akma gerilmesi



1. GİRİŞ

Manyetik alana maruz kaldığında reolojik özellikleri değişen akışkanlar Manyetoreolojik (MR) akışkanlar olarak adlandırılır. MR akışkanlar görünür viskozitelerinin kontrol edilebilirliği sebebiyle akıllı malzemeler sınıfına girmektedir. MR cihazlar hızlı tepki süreleri, görece düşük güç tüketimi, basit ve kompakt tasarım gibi özellikleri sebebiyle 1980'den itibaren popüler hale gelmiştir. MR cihazlar önceleri titreşim sönümleme, 2000'den sonra ise fren ve kavrama uygulamalarında birçok çalışmaya konu olmuştur. MR cihazlar otomotiv süspansiyonları, sismik şokların emilmesi, direksiyon arayüzleri, protez bacak eyleyicileri, koltuk sönümleyicileri olarak kendini göstermektedir. Üretilen sistemlerin, kullanım alanına bağlı olarak yüksek kuvvete veya torka sahip olmaları arzulanır. LORD [1] firmasına ait olan Şekil 1.1'deki cihazlar, MR cihazlara örnek olarak gösterilebilir.



Şekil 1.1 : MR cihazlar: (a) RD-8040-1 MR sönümleyici 1 kN, (b) RD-8058-1 TFD cihazı 12 Nm [1].

Tezin temel amacı haptik cihazlarda kullanılabilen boyutlarda yüksek tork yoğunluğuna sahip bir MR fren tasarlamaktır. Literatür incelendiğinde MR fren tasarımlarında yüksek tork yoğunluğuna sahip ürünlerin halen araştırıldığı tespit edilmiştir.

1.1 Amaç ve Kapsam

MR frenler elektronik olarak kontrol edilebildiklerinden varolan ve modern ileri kontrol özelliklerine kolayca uyum sağlayabilmektedirler. Bu özellikleri MR frenlerin otomobillerde fren veya kavrama olarak kullanımının araştırılmasını tetiklemiştir. MR frenlerin kararlı bir cevaba sahip olması ise değişken empedanslı sistemler için ilgi çekicidir. Bu sistemlere örnek olarak sağlık ve haptik uygulamalar verilebilir. MR frenler sağlık sektöründe egzersiz cihazları için frenler ve protez bacak eyleyicileri olarak karşımıza çıkar.

Haptik, dokunma duyusunu araştıran bilim dalıdır. Dokunma duyusuyla etkileşime geçilen nesnenin dokusu, pozisyonu, sıcaklığı vb. özellikleri hakkında bilgi sahibi olunur. Haptik sistemler, buldukları ortama bağlı/bağımsız biçimde el ile uzaktan kontrol yaparak bunu gerçekleştirirler. Cerrahi benzetimler, ciddi oyun ve simülasyonlar, tele-operasyon gibi sistemler haptik sistemlere örnek verilebilir.

Kuvvet geri beslemeli sistemler aktif, pasif ve yarı-aktif olarak kontrol edilmektedirler. Aktif eyleyicilerde elektrik motorları kullanılır. Aktif eyleyiciler hızlı tepki süresine ve iyi bir kontrol performansına sahiptir. Pasif eyleyicilerde ise reolojik fren ve toz frenler kullanılır. Pasif eyleyiciler, aktif eyleyicilere göre daha az güç tüketimine sahiptirler ve böylece güvenli bir kullanım sağlar. Bunun içinse kontrol performansından feragat ederler. Hibrit eyleyiciler ise motor ve freni birleştirerek aktif ve pasif sistemin avantajlı özelliklerini bir araya getirir. Haptik sistemlerde yüksek performans ve kararlı cevap elde etmek hibrit eyleyiciler tercih edilmeye başlanmıştır .

MR akışkanlar mikron mertebedeki ferromanyetik parçacıkların taşıyıcı sıvı içerisinde yüzmeleriyle oluşturulur. MR akışkan içerisindeki ferromanyetik parçacıklar, manyetik alan etkisinde kalındığında manyetik alan doğrultusunda zincirli yapılar oluşturarak akışkanın Bingham akışkan olarak davranmasını sağlar.

Bu davranış hızlı, tersinir ve kuvvetli bir biçimde meydana gelir [2]. MR akışkanın bu özelliğinden faydalanılarak çeşitli MR cihazlar tasarlanmıştır. Bu cihazlar MR fren, MR kavrama, MR sönümleyici olarak literatürde yer edinmiştir [3–5].

Cihazlar dört farklı çalışma moduna sahip olabilir: kesme, vana, sıkıştırma, paralel. MR fren kesme modunda çalışan bir cihazdır. Düşük güç tüketerek elektronik olarak kontrol edilebilmesi ve hızlı tepki süresine sahip olması bu cihazı haptik sistemlerde kullanılmaya itmiştir. Ancak bu sistemler için halen yüksek tork yoğunluğuna sahip cihaz arayışı sürmektedir.

Bu çalışmada frenleme torkunu arttıracak H-tipi bir MR fren tasarımı yapmak amaçlanmaktadır. MR frenin manyetik devresi hem İteratif Formülasyon kullanılarak hem de Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. MR akışkan ise Bingham Plastik Modeli [2] kullanılarak matematiksel olarak modellenmiştir. Tasarım, kampana ve T-tipi MR frenlerle tork yoğunluğu üzerinden karşılaştırılmıştır. Parçacık Sürü Optimizasyon [6] algoritması kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca üretilen prototip bir H-tipi MR fren ile deneyler yapılarak sayısal çalışmaların doğrulanması hedeflenmiştir.

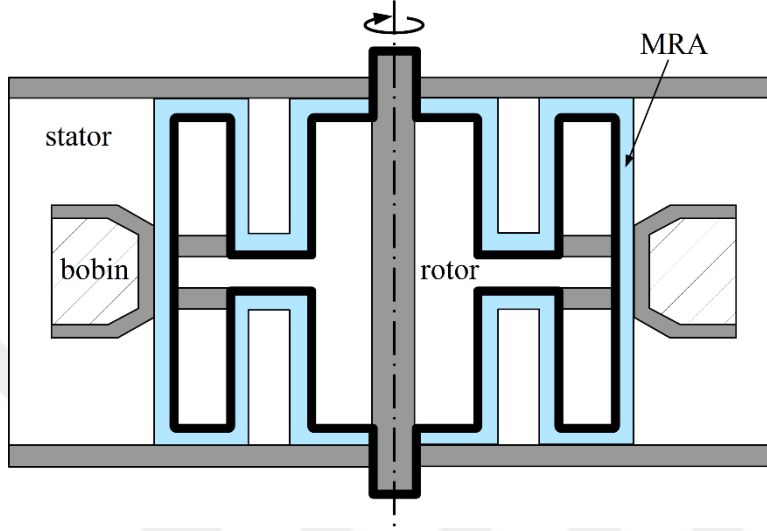
1.2 Önerilen H-tipi MR Fren

Yüksek tork yoğunluğuna sahip bir fren elde etmek için ya torkun artırılması ya da hacmin azaltılması gerekmektedir. Torkun artırılabilmesi için torka etki eden parametrelerin belirlenmesi gerekir. Hacmin azaltılması boyutsal bir mesele olduğundan tork yoğunluğuna hacmin etkisi optimizasyon çalışmasıyla incelenmiştir.

Torka etki eden parametreler şunlardır: MR akışkanın viskozitesi, manyetik alana bağlı akma gerilmesi, MR kanalın kalınlığı ve dairesel ve eksenel olarak kaç farklı konumda bulunduğu, cihazda kullanılan malzemelerin manyetik geçirgenlikleri ve konumları, elektriksel güç.

Önerilen MR fren Şekil 1.2’de verilmiştir. Eksenel simetrik görünümde rotorunun “H” şeklinde görünmesi sebebiyle H-tipi MR fren olarak adlandırılmıştır. Önerilen frenin rotoru statora bağlı bir diskin geçebileceği bir kanala sahiptir. Böylece cihazdaki MR kanal farklı yarıçaplarda dairesel ve eksenel kesitlere sahiptir. Rotor

tek manyetik malzemeden oluşturulmak yerine manyetik ve paramanyetik malzemelerin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Böylece bütün kanallarda yüksek manyetik alana bağlı yüksek akma gerilmesine ulaşmak hedeflenmiştir. Ayrıca, bobine komşu kanalda MR etkiye maruz kalan MR akışkan miktarını arttırmak için bobinin köşelerine eğimli bir yapı kazandırılmıştır.



Şekil 1.2 : Önerilen H-tipi MR fren.

Cihazın tasarımında kullanılan MR akışkan, literatürde [7–11] en sık kullanılan MRF-132DG, manyetik malzemeler AISI 1010 düşük Karbon çeliği, paramanyetik malzemeler 6000 serisi Alüminyum olarak seçilmiştir.

1.3 MR FREN TASARIMINDA DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSUSLAR

MR fren tasarımı küçük boyutlar, daha hafif ve düşük ataletli cihazlar, hızlı tepki süreleri, yüksek tork üretebilme, dayanıklılık ve süreklilik gibi kriterler göz önüne alınarak yapılır.

Bu bölümde, bahsedilen özelliklere sahip bir MR fren tasarlayabilmek için tasarımcıların dikkat etmesi gereken hususlar anlatılacaktır. Bu hususlar şunlardır:

- Elde edilebilecek maksimum torkun arttırılması
- Frenin minimum torkunun azaltılması
- MR akışkan seçimi
- Sızdırmazlık

1.3.1 Elde edilebilecek maksimum torkun arttırılması

MR fren tasarımında yüksek tork elde etmek için MR akışkandan yüksek akma gerilmesi almak gerekir. Bu da manyetik devrede yüksek manyetik akıyı MR akışkan kanallarına yönlendirmekle mümkün olur. Ancak MR akışkan kanallarında yüksek manyetik akı yoğunluğu olması sağlanırken manyetik devredeki diğer malzemelerin de manyetik doyumuna ulaşmaması arzulanır. Aksi takdirde devreden istenilen düzeyde manyetik etki elde edilmez. Ayrıca, Joule ısınması sebebiyle devre fazla ısınır. Manyetik akı yoğunluğu, manyetik akının geçtiği kesit alanıyla ters orantılıdır. Fren tasarımında manyetik ve paramanyetik malzemelerin konumları değiştirilerek istenilen manyetik akı yoğunluğu elde edilebilir. Akının üzerinden geçtiği parçada düşük manyetik akı yoğunluğu istenirse kesit alanı büyütülmeli; yüksek manyetik akı yoğunluğu isteniyorsa kesit alanı küçültülmelidir. Ayrıca, Akının, MR akışkan harici malzemelerdeki aldığı yol kısaltılarak bu parçaların çektiği toplam net akım azaltılabilir.

Manyetik devrede manyetizması en büyük değere sahip olan malzeme MR akışkandır. Küçük boyutlu frenlerde bütün MR akışkan kanallarında aynı manyetik alan şiddeti oluşturulduğu kabulü yapılabilir. Bu değer manyetik akıyı dairesel kesen kanal kalınlıkların toplamı ile çarpıldığında yaklaşık olarak gereken toplam net akım değerine ulaşılır. Devrenin toplam net akımı tasarım aşamasında belirlenmişse MR akışkanın çalışacağı manyetik alan şiddeti yaklaşık olarak belirlenmiş olur. Böylece MR akışkandan elde edilebilecek akma gerilmesi tahmin edilebilir. Ayrıca, MR akışkanın doyma sınırında çalışması için bobinin sağladığı toplam net akımın ne kadar arttırılması gerektiği de çıkartılabilir.

Manyetik devreyi aktif eden toplam net akımı bobin sağlar. Toplam net akım sarım sayısı ile bobine uygulanan akımın çarpılmasıyla bulunur. Sarım sayısı frende bobine ayrılan kısmın geometrisi ve seçilen telin çapı ile ilgilidir. Geometri ne kadar büyükse ve tel çapı ne kadar inceyse o kadar fazla sarım elde edilir. Ancak, seçilen tele göre de uygulanabilecek maksimum akım sınırlıdır. Ayrıca, bobine uygulanan akımın büyümesi Joule ısınmasına da sebep olur. Bu sebeple bobin telinin seçimi belirtilen hususlar göz önüne alınarak yapılmalıdır.

Disk tipi fren tasarımlarında çoklu disk kullanıldığında disk sayısı ile tork arasında doğrusal ilişki gözlenmiştir. Kampana tipi frenlerde ise çoklu silindir kullanımında torkun, silindirlerin buldukları yarıçapların karesiyle orantılı arttığı belirtilmiştir [12]. Bu husus dikkate alınarak tasarım aşamasında çoklu disk veya çoklu silindir seçimi yapılabilir.

1.3.2 Frenin minimum torkunun azaltılması

Viskoplastik reolojik modeller akışkanların kayma gerilmesini iki terimle ifade eder. Birinci terim manyetik alana bağlı bir terimdir. İkinci terimse viskozite, kesme hızı vb. parametrelere bağlı bir terimdir. Kayma gerilmesine ek olarak yarıçapa bağlı ifadeler tork hesabına dahil olur. Viskoz terim frene manyetik alan uygulanmadığında frenin şaftına etki eden direnç olarak da ifade edilebilir. Şeffaf sistemler ortam empedansının sıfır olduğu durumda kullanıcıya iletilen empedansın da sıfır olmasını gerektirir. Bu sebeple viskoz terimin de en aza indirilmesi gerekir. Viskoz tork MR akışkanın viskozitesine, kanal kalınlığına, kanalın bulunduğu yarıçapa ve açısal hıza bağlı olarak değişir. MR akışkanlar, diğer akışkanlara göre genelde yüksek viskozite değerine sahiptir. Ayrıca frende MR akışkan kanal sayısı arttıkça viskoz tork değeri de artar. Kanal kalınlığı ile viskoz tork ters orantılıdır. Bunun dışında, kanalın bulunduğu yarıçapı arttıkça da viskoz tork artar. Açısal hız da viskoz torkla doğru orantılıdır. Bu büyüklüklerden açısal hız frenin bağlı olduğu sistemin parametresi olduğundan genellikle değiştirilemez. Kanalın bulunduğu yarıçap ise manyetik alana bağlı torku da etkilediğinden burada bir değiş tokuş (trade-off) söz konusudur. Kanal kalınlığı da üretim ve montaj kabiliyetine bağlı olarak seçilir. Bunlara göre viskoz torku azaltmak için düşük viskoziteye sahip bir MR akışkan seçilirken kanal sayısı azaltılmalıdır.

1.3.3 MR akışkan seçimi

Piyasada LORD firmasına ait birçok MR akışkan mevcuttur. MR akışkan seçiminde manyetik alan şiddeti ile akma gerilmesi arasındaki ilişki, akışkanın viskozitesi, akışkanın çalışma sıcaklık aralığı, sızması dikkate alınabilir. Torkun daha az güç tüketilerek yükseltilebilmesi için düşük manyetik alan şiddetinde yüksek akma gerilmesi veren akışkan tercih edilmelidir. Viskoz torku azaltmak için akışkan düşük viskoziteye sahip olmalıdır. Akışkanın çalışma sıcaklığı aralığı, çalıştığı sistemle

uyumlu olmalıdır. Ayrıca, akışkanların uzun ömürlülük ve yüksek çökme dayanıklılığı sağlanması tercih edilmelidir. Ayrıca, sızma tehlikesi olan sistemler için akışkanın uçuculuk ve buhar sıcaklığı da göz önüne alınmalıdır. MR akışkanlar histerisiz özelliklere de sahiptirler. Histerisiz davranış ya modellenmeli ya da artık manyetizma manyetik alan kaldırıldıktan sonra ivedilikle kaldırılmalıdır. Artık manyetizma ise bobinin kutupları kısa süre değiştirilerek kaldırılabilir.

1.3.4 Sızdırmazlık

Keçe seçimi ve yerleşimi de MR frenler için hayati önem taşır. MR akışkanların, içindeki ferromanyetik parçacıklar yüzünden bulaşıcı (contaminated) olması keçenin görevini yapamamasına yol açabilir. Ayrıca dinamik keçelerin kullanılması durumunda da MR akışkanların tekrarlı MR etki altında kalmamasına özen gösterilmelidir. Aksi takdirde sızıntı gerçekleşebilir. Bu sorunla karşılaşmamak için dinamik keçeler MR akışkandan uzağa yerleştirilebilir. Ayrıca keçe seçiminde keçenin sürtünme torku da dikkate alınmalıdır. Böylece frende manyetik etki altında değilken oluşan tork azaltılabilir.

1.3.5 Kanal kalınlığı

MR frenlerde kanal kalınlığı kesme hızının belirlenmesinde ve manyetik akı yoğunluğunun kanaldaki dağılımında rol oynar. Kanal kalınlığı ile kesme hızı ters orantılıdır. Kesme hızının büyük olması durumunda ise MR akışkanın reolojik özelliklerini belirleyecek reolojik modelin fren torkunun doğruluğunun artırılması için değişmesi gerekebilir. Ayrıca kanal kalınlığının fazla olduğu otomotiv frenleri gibi örneklerde manyetik akı yoğunluğu ortalama bir değerle ifade edilemeyecek şekilde kanal içerisinde değişiklik gösterebilir. Bu durumlarda frenleme torkunun hesaplanabilmesi için kayma gerilmesinin MR kanallar boyunca integralinin alınmasını gerekir. Bunların dışında kanal kalınlığını belirlerken en büyük kısıtlar üretim ve montajdan kaynaklanır. 0.25'den 2 mm'ye kadar olan kanal kalınlıkları pratik olarak kolaylıkla sağlanır.



2. LİTERATÜR

2.1 Akıllı Malzemeler

Akıllı malzemeler yıllardır çevremizde birçok uygulamada kendine yer edinmiştir. Bu malzemeler 1980’li yıllardan beri akıllı malzemeler olarak anılsa da bazıları on yıllardır hayatımızdadır. Bu malzemelerin birçoğu başlangıçta askeri ve havacılık uygulamaları için devlet kurumları tarafından geliştirilmiştir. Ancak yakın geçmişte akıllı malzemeler özel sektör tarafından benimsenmiş ve inşaat, ulaşım, sağlık, eğlence vb. alanlardaki uygulamalara bütünleşmişler [13].

Akıllı malzemeler çevresindeki olaylara kendiliğinden tepki gösteren malzemeler olarak tanımlanır. Akıllı malzemeler sıcaklık, basınç, pH, elektriksel akım ve manyetik alan vb. etkilere hacimlerini, renklerini veya viskozitelerini değiştirerek tepki verirler. Genellikle gösterdikleri tepkiler tersinirdir. Maruz kaldıkları etki kaldırıldığında malzeme eski haline döner.

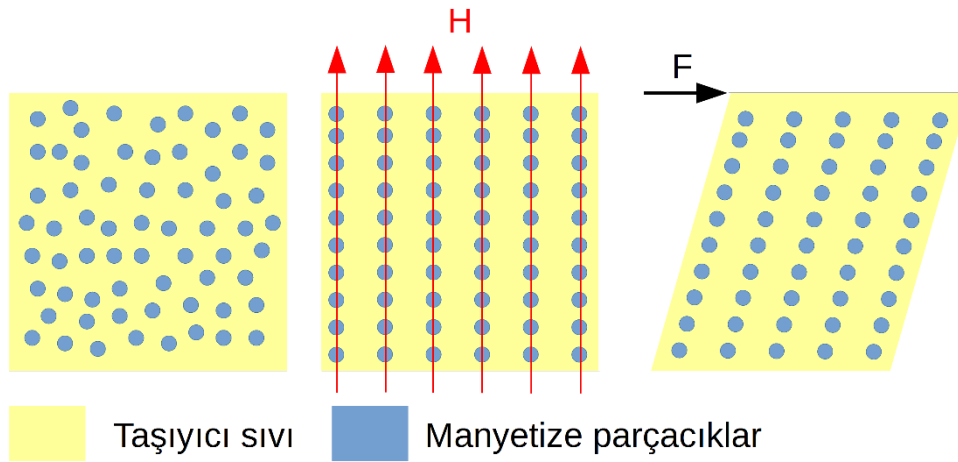
Her biri kendine özgü özelliklere sahip birçok “akıllı” malzeme grubu mevcuttur. Bu malzemelerden yüksek teknoloji gerektiren veya günlük yaşamda kolaylık sağlayabilecek birçok uygulamada faydalanılır. Şekil hafızalı alaşım, piezoelektrik malzeme, elektroeolojik ve manyetoreolojik malzemeler akıllı malzemelere örnek gösterilebilir.

Elektroeolojik (ER) ve manyetoreolojik (MR) akışkanlar akıllı akışkanlardır. ER akışkan mineral yağ ve katı parçacıkların süspansiyon oluşturdukları akışkanlardır. MR akışkanlar ise yine mineral yağ ve manyetize olabilen parçacıkların süspansiyon oluşturdukları akışkanlardır. Akışkanlar, etkilendikleri alana göre adlandırılmıştır. Akışkanların içindeki parçacıklar ilgili alan uygulandığında milisaniyeler içerisinde hizalanır ve birbirlerinden etkilenirler. Bu da viskozitede büyük bir değişime yol açar. MR akışkanın viskozitesindeki değişim ER akışkandaki değişime göre daha büyüktür. Alan kaldırıldığında akışkanlar eski hallerine dönerler.

İnşaat, üretim, robotik, otomotiv ve sağlık uygulamalarında bu akışkanlar kullanılarak tasarlanmış titreşim sönümleyiciler ve tork iletim cihazları bir süredir piyasadadır. MR cihazlar ER cihazlara göre birçok açıdan daha üstün olduğundan MR cihaz uygulamaları daha yaygındır. MR sönümleyicilere inşaatta sismik korumada, otomotiv ve tren yolu uygulamalarında süspansiyon sistemlerinde; MR frenlere otomotivlerde debriyaj ve fren sistemlerinde, robotik ve haptik sistemlerde, sağlık alanında ise egzersiz cihazlarında ve protez diz uygulamalarında rastlanılır. MR sönümleyici tasarımları için hem tasarım hem modelleme için birçok yöntemler tanıtılmış, istenilen kuvvetlerin ulaşıldığı birçok çalışmalar mevcuttur. MR frenler ise özellikle otomotiv uygulamaları başta olmak üzere, sağlık ve robotik uygulamalarında istenilen torku üretmeden uzaktırlar. Bu sebeple torku arttırmaya yönelik her geçen gün yeni bir tasarım ortaya çıkmaktadır.

2.2 MR Akışkanlar

Manyetik alan etkisinde kaldığında akışkan durumdan yarı katı duruma geçerken akma gerilmesi ve buna bağlı olarak görünür viskoziteleri değişen akışkanlar MR akışkan olarak anılır. Manyetik alan uygulandığında MR akışkan içerisinde bulunan mikron mertebesindeki ferromanyetik parçacıklar manyetik alan doğrultusunda Şekil 2.1'deki gibi zincirler oluşturur. Bu durum MR etki olarak adlandırılır. Oluşan zincirli yapının akışa veya basınca mukavemeti MR akışkanın reolojik özelliklerini belirler. MR akışkanın reolojik özelliklerindeki değişim, viskoplastik reolojik modellerle tanımlanabilen Newtonyen olmayan akış biçimindedir.



Şekil 2.1 : MR etki sonucu oluşan zincirli yapı.

MR akışkanlarda taşıyıcı sıvı olarak mineral-yağ, sentetik hidrokarbon-yağ, silikon-yağ, su ve glikol gibi maddeler kullanılır. Karbonil demir, demir/kobalt alaşımları, nikel alaşımları gibi manyetize olabilen ve mikron mertebelerinde boyutlara sahip parçacıklar taşıyıcı sıvı içerisinde askıda kalacak (süspansiyon oluşturacak) şekilde karıştırılmasıyla MR akışkan elde edilmiş olur. Eklenen ferromanyetik parçacıkların hacimsel oranı geleneksel MR akışkanlarda %20-%40 arasındadır. MR akışkan oluşturulurken parçacıkların askıda kalmasını sağlayan katkı maddeleri, uflanmasını geciktirmek için yüzey gerilimini azaltan kayganlaştırıcılar; akışkanın cıvık halde kalmasını sağlayan katkı maddeleri ve paslanmasını önleyici katkı maddeleri de eklenebilir [2].

MR akışkanlar 10 nm boyutlarında parçacıklar kullanılarak oluşturulan geleneksel manyetik sıvıdan şu açıdan farklıdır. Belirtilen boyutlarda Brownian hareketinin etkisi manyetik etkiye üstün gelerek parçacıkların zincirli yapılar kurmasını engeller. Brownian hareket akışkan içerisindeki parçacıkların, akışkandaki hızlı hareket eden moleküllerle çarpışmasına bağlı olarak rastgele hareketini ifade eder [14].

MR akışkanlar manyetik alan etkisi olmadığında taşıyıcı akışkanın reolojik özelliklerine uygun olarak davranırlar. Manyetik alan uygulandığında ise MR akışkan Newtonyen olmayan şekilde davranır. Bu durumda MR akışkanın akma gerilmesi manyetik alan şiddetine bağlı olarak değişir. MR akışkanlar incelen akışkan özelliği gösteren akışkanlardır. Bir başka deyişle, kesme hızı arttırıkça akışkanın viskozitesi azalır. MR akışkanların bu özellikleri viskoplastik reolojik modeller kullanılarak modellenenebilir. Bingham, Herschel-Bulkley, Papanastasiou ve Casson modelleri bu modellerden birkaçıdır [2]. Bu modellerden en kolay modelleneni Bingham modelidir. Düşük kesme hızlarında Bingham modeli MR akışkanı yeterli doğrulukta modelleyebildiği için birçok çalışmada Bingham modeli adapte edilmiştir. Yüksek kesme hızlarında ise Herschel-Bulkley modeli sıklıkla tercih edilmiştir [2,3,9,15–17].

2.3 ER Akışkan ve MR Akışkan Karşılaştırması

ER akışkanlar taşıyıcı sıvı içerisinde parçacıkların süspansiyon oluşturdukları akışkanlardır. ER akışkanlar da MR akışkanlarla benzer özellikler gösterir. ER

akışkanlar ise elektrik alanla aktif olurlar. ER ve MR akışkanlar şu özelliklerine göre karşılaştırılabilir: çökelme, kirlenme, yoğunluk, güç gereksinimleri, reolojik özellikler.

ER akışkanlarda taşıyıcı sıvı ile parçacıkların arasında düşük bir yoğunluk farkı vardır. Bu da yoğunluk uyumsuzluğunun düşük olması anlamına gelir. Bu sebeple parçacıkların çökelme eğilimi düşüktür. MR akışkanlarda ise yoğunluk farkı yüksektir. Parçacıklar çökelmeye daha eğilimlidirler. Ancak ER akışkanlar üretimde ve kullanımda karşılaşılabilen kirliliklerden çok daha kolay etkilenirler. MR akışkanlar ise bunlara karşı duyarsızdırlar. Bu sebeple MR akışkanlara katkı ve kayganlaştırıcı gibi parçacıkların istikrarlı yapılarını korumalarını sağlayan yüzey kimyasalları eklenir. Bu da MR akışkanların çökelme özelliklerini güçlendirir etki sağlar. Aynı durum aşınma için de geçerlidir. ER akışkanlar daha düşük aşınma özelliklerine sahip olsalar da MR akışkanlara yapılan katkılar sayesinde bu özellikleri güçlendirilebilir. Ancak yine de ER akışkanlar daha güvenilirler ve uzun süre bakım gerektirmezler [18,19].

ER akışkanda kullanılan parçacıklar daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan ER akışkan MR akışkana göre de genel olarak düşük yoğunluğa sahiptir. Ayrıca düşük yoğunluklu parçacıklar ER akışkanın daha düşük viskoziteye sahip olmasında da etkilidir. Bu da etkin olmayan durumda MR akışkanlara göre daha iyi sürtünme ve akış kaybı özellikleri anlamına gelir [18,19].

ER akışkanlar voltajla etkin hale gelirken; MR akışkanlar akımla veya doğal mıknatısla etkin hale getirilebilir. ER akışkanları aktive etmek için düşük akımlarda (miliamper) kV mertebesinde voltaj gerekirken; MR akışkanlar için 24 V ve 5 Amper gücün altındaki akımlar yeterlidir. Bu, ER akışkanların aktive edilmesinin daha maliyetli olması anlamına gelir. Ayrıca doğal mıknatıs kullanımıyla bozulma korumalı (fail-safe) bir çalışma MR akışkanlı cihazlarda sağlanabilir [18,19].

ER akışkanların ulaşabilecekleri maksimum akma gerilmesi 2-5 kPa'dır. Bu sebeple yüksek mukavemet sağlayabilmek için büyük miktarda ER akışkan kullanılan büyük cihazlar gerekmektedir. MR akışkanlar ise 50-100 kPa akma gerilmesi değerine sahiptir. Daha az akışkanla ve küçük tasarımlarla istenilen mukavemet sağlanabilir [18,19].

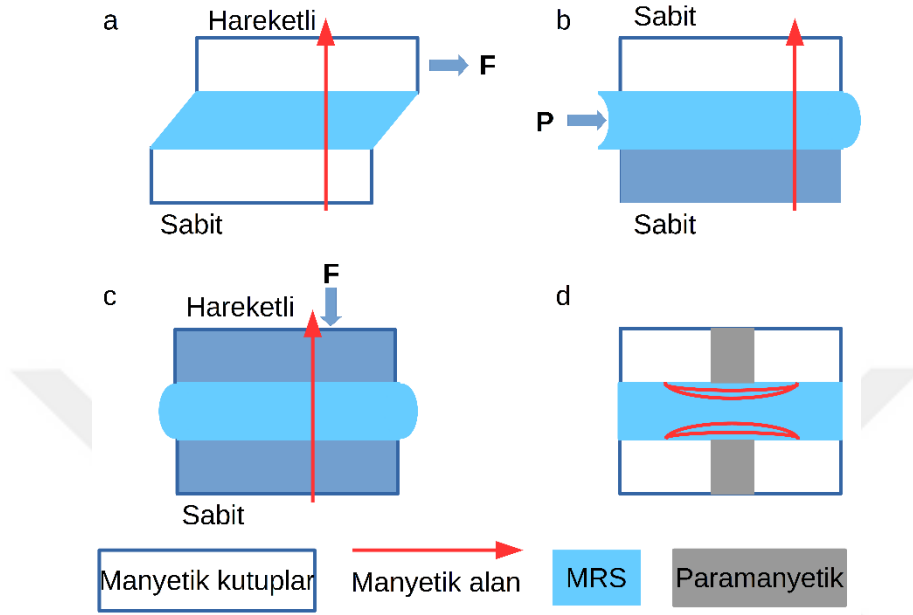
MR akışkanlar ER akışkanlara göre daha geniş sıcaklık aralıklarında çalışabilirler. İki akışkan da tersinir ve kontrol edilebilirdir. İki akışkan da çok hızlı bir şekilde (<10ms) aktive edilebilirler [19]. Belirtilen hususlar göz önüne alındığında MR akışkanın küçük boyutlarda yüksek tork isteri olan haptik uygulamalarda daha avantajlı olduğu görülür.

2.4 MR Frenler

MR akışkan ilk defa Rabinow'un manyetik debriyaj uygulamasında tanıtılmıştır [20]. MR akışkan ile çalışan cihazlara MR cihaz denir. MR cihazlar yarı aktif kontrol sistemi olarak sınıflandırılır. MR cihazlar 10 ms'nin altında tepki sürelerine sahiptir. Kontrol edilebilir yüksek akma gerilmesi sağlayabilirler. Tasarımları basit ve kompakttır. Düşük güç tüketirler; yüksek tork-hacim ve tork-kütle oranlarına sahiptir. Bu özellikleri sayesinde MR cihazlar birçok alanda kendilerine yer edinmişlerdir: inşaat [5,21], otomotiv [22–25], sağlık [16,26–28], haptik [29–31], tren yolu uygulamaları [32,33].

MR cihazlar, MR etkinin oluşma şekline bağlı olarak Şekil 2.2'de gösterilen 4 çalışma modunda çalışırlar: kesme, vana/akış, sıkıştırma, paralel. Kesme modunda MR akışkan birbirlerine göre bağıl hızları 0'dan farklı olan iki paralel plakayla birbirlerinden ayrılır. Manyetik alan paralel plakalara dik olarak uygulanır. Fren ve debriyaj uygulamaları için kullanılan MR cihazlar kayma modunda çalışırlar [17,23,24]. Vana modu akış modu olarak da anılır. Vana modunda MR akışkan iki sabit paralel plaka arasında basınçlandırılarak hareket ettirilmeye zorlanır. Manyetik alan plakaları dik kesecek şekildedir. Sönümleyicilerde veya akışın kontrolü için vana gerektiren uygulamalarda kullanılan MR cihazlar vana modunda çalışır [25,32,34,35]. Sıkıştırma modunun oluşturulabilmesi için MR akışkanın arasına yerleştirildiği paralel plakaların birbirlerine doğru hareketlendirilmesi gerekir. Manyetik alan diğer modlarda olduğu gibi plakaları dik kesecek şekilde uygulanır. Titreşim sönümleme uygulamalarında kullanılan MR cihazlar sıkıştırma modunda işlerler [21,36]. Yakın geçmişte Goncalves ve Carlson [37] paralel modu tanıtmıştır. Bu mod vana moduyla benzerlik gösterir. Bu modu oluşturabilmek için manyetik kutuplar paramanyetik malzeme ile ayrılır. Böylece manyetik alanın, MR akışkanın hareket ettiği kanalı eliptik olarak kesmesi sağlanır. Bu modun öne çıkan

özelliklerinden biri manyetik alanın artırılmasıyla beraber basınç hızı göre çok daha hızlı artar. Vana modunda ise bu ilişki hemen hemen doğrusaldır. Diğer bir özellik ise geniş kanala olanak sağlandığından, MR akışkan oluşturulurken daha büyük boyutlu parçacıklar kullanılabilir [38].



Şekil 2.2 : MR cihazların çalışma modları: a) Kesme modu b) Vana/Akış modu c) Sıkıştırma modu d) Paralel mod.

Döner MR sönümleyici, belirli bir açısal hızla dönen ve bir veya birden fazla akış modunda çalışabilen sönümleyici olarak tanımlanır. Döner MR sönümleyiciler dönme açısının limitine göre ikiye ayrılır: limitli açılı döner MR sönümleyiciler ve sürekli açılı döner MR sönümleyiciler. Limitli açılı MR sönümleyiciler düşük açısal hızlarda çalışabilirler ancak sürekli açılı sönümleyicilere göre yüksek tork üretebilirler. Limitli açılı MR sönümleyicileri anlatan çalışmalar daha yeni olup sayıları kısıtlıdır [39–41]. Sürekli açılı döner MR sönümleyiciler ise sınırsız dönme açısına sahip olduklarından fren ve debriyaj uygulamalarında kullanılırlar. Literatürdeki ilk örneklerinin fren olarak tasarlanması adının da MR fren olarak yerleşmesine yol açmıştır [38].

MR frenler çoğunlukla otomotiv ve haptik uygulamalar için çözümler arayan literatürün bir parçası olmuştur. Otomotivlerdeki klasik frenlerin mekanik olarak tahrik edilmesinden ötürü bazı dezavantajları vardır. Hidrolik boru ve pompalarda

basınçlandırma gerekmesi, frenin tepki süresinin artmasına sebep olur. Hidrolik sıvı kullanılması bazı yardımcı bileşenlerin kullanılmasını zorunlu kılar. Bu sebeple frenler hacimlidir ve büyük ağırlıklara sahiptir. Ayrıca, fren balatası sürtünmeden dolayı aşınır, zamanla değişmesi gerekir. Bunların yanında klasik frenler yüksek hızlarda ve sıcaklıklarda düşük frenleme performansı sergiler [23,24].

MR frenler ise tamamen elektronik olarak kontrol edilirler. Bu sebeple çok daha düşük tepki sürelerine sahiptir. ABS fren sistemi, taşıt denge kontrolü, yerleşik tanılama vb. geçmişte var olan veya modern ileri kontrol özelliklerine daha kolay adapte edilebilirler. Hidrolik bileşenlerin bir kısmını gereksiz kılmasıyla daha hafif bir fren sistemi elde etmek mümkündür. MR fren de bazı dezavantajlara sahiptir. Disk ve kampana frenin yerine geçecek boyuta ve ağırlığa sahip olan MR fren tasarımları otomotivler için gereken torku henüz sağlayamamaktadır. Ayrıca, MR fren manyetik alan etkisinde değilken de bir viskoz sürtünme torkuna sahiptir. MR akışkanların uzun ömürlü olması, reolojik özelliklerinin zamanla ve sıcaklıkla değişmemesi için çalışmalar yapılması gerekmektedir. Ayrıca, MR akışkanların histerisiz davranışının güzel anlaşılıp modellenmesi gerekmektedir. Bunların dışında, MR frenlerde temel problem olan sızmaya otomotiv uygulamaları için tasarlanan frenlerde rastlanılmamıştır [23,24].

Haptik uygulamalarda kullanıcıya dokunma hissi veren bir haptik arayüz kullanılır. Dokunma hissi, hareket ettirilen haptik arayüz aracılığıyla konuma bağlı bir kuvvet olarak kullanıcıya iletilir. Haptik teknolojisi, uzaktan kumandalı robotlarda ve simülatörlerde sıklıkla kullanılır. Robotlarda uzaktaki ortamda bulunan cisimlerden geri besleme alınırken; simülatörlerde ise cisimlere dokunma hissi kullanıcıya hissettirilir.

Haptik uygulamalarda MR frenler doğru akım motorlarının yerini aldıklarından, onlarla karşılaştırılırlar. Haptik cihazların sert cisimleri modelleyebilmesi için yüksek kuvvet/tork üretebilmeleri gerekmektedir. Benzer boyuttaki MR frenler DC motorlara göre daha yüksek tork üretebilmektedirler. Cihazın kullanım kolaylığı sağlaması açısından düşük atalet momentine sahip olması arzulanır. DC motorlarda torkun arttırılması için redüktörler kullanılır. Bu da atalet momentini arttırır. MR frenler ise daha düşük atalet momentine sahiptir. Haptik cihazın düşük ağırlık/tork

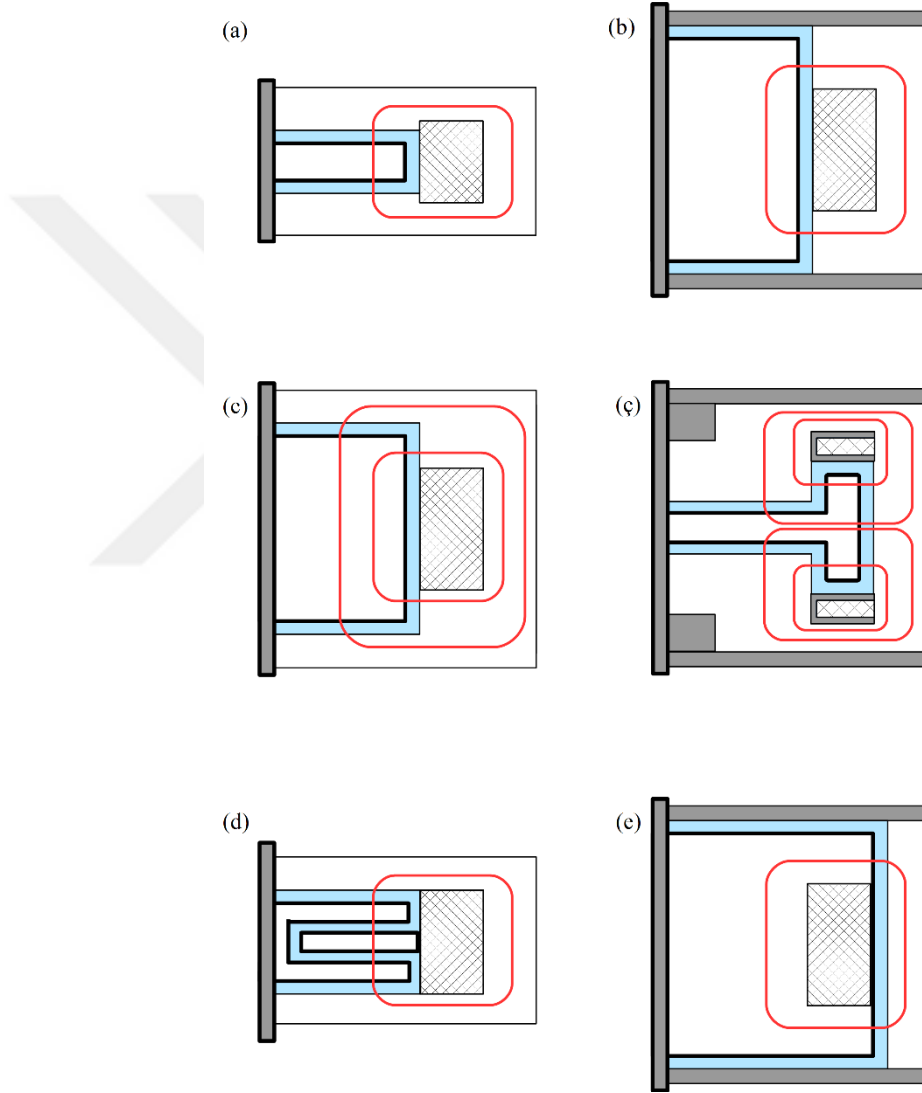
oranına sahip olması kullanıcıya daha makul bir etkileşim sağlar. MR frenler bu açıdan da DC motorlara göre daha üstün performans sergiler [42,43].

Bu sayılan özellikler haptik cihazlar için önemli olsa da haptik cihazlarda şeffaflık ve kararlılık da önem arz etmektedir. Şeffaflık haptik cihazın uzak ortamı kullanıcıya ne kadar iyi yansıttığını ifade eder. Kullanıcıya iletilen empedansın uzak ortamın empedansına oranı olarak tanımlanır. Bir cihaz tasarlandığı frekans bandında şeffaflığını korumalıdır. Cihazın şeffaf olabilmesi için hızlı tepki süresine, düşük ağırlığa ve atalet kuvvetine, düşük minimum torka sahip olması gerekir. Cihaz hızlı tepki vermezse kullanıcıya iletilen empedansta gecikme yaşanacağından kullanım konforu kötüleşir. Düşük ağırlık ve atalet kuvveti ise hem hızlı tepki süresine katkı sağlar hem de ortam empedansının düşük olduğu durumların kullanıcıya düzgün iletilmesini sağlar. Düşük minimum tork da ortam empedansının düşük olduğu durumlar için gereklidir. Bunların dışında histerisiz davranışın kaldırılması ya da düzgün modellenmesi de şeffaflık için önemlidir. Aynı ortam empedansının manyetik akı arttırılırken farklı; azaltılırken farklı şekilde kullanıcıya yansıtılması ergonomik açıdan kötü bir arayüzü kullanıcıya sunmaktır. Kararlılık ise haptik arayüzün pozisyonunu kaybetmemesidir/kararlı şekilde sağlayabilmesidir. MR frenler hem kararlılıkta hem şeffaflıkta DC motorlara göre üstün gelirler. MR frenlerin dezavantajları ise doğrusal olmayan davranış ve sıcaklığa bağlı olmalarıdır. Doğrusal olmayan davranış histerisiz olarak açığa çıkar. Bu da girdi akım ile çıktı tork arasındaki modellemede hatalara sebebiyet verebilir. Sıcaklığa bağlı davranış içinse MR akışkanların özelliklerinin deneylerle belirlenmesi gerekmektedir. Ancak yine de MR frenler haptik arayüzler için birçok uygulamada kullanılmıştır. [42–44].

Literatürdeki frenler birkaç farklı fren tipiyle sınıflandırılabilir. Bu fren tipleri Şekil 2.3'te gösterilmiştir. MR fren tasarımları ilk zamanlarda iki temel frenin geliştirilmesiyle oluşturulmuştur. Temel tasarımlar kayma modunun olduğu yere göre disk tipi MR frenlerde MR etki eksenel kanallarda olurken; kampana tipi MR frenlerde MR etki dairesel kanallarda oluşur. Daha sonra hem eksenel hem de dairesel kanallarda MR etki oluşturmak için hibrit fren tasarlanmıştır. T-tipi fren ise rotorunun "T" şeklinde olmasından bu şekilde adlandırılmıştır. T şekli MR kanalın dairesel kesimde birden fazla sefer yer almasına olanak sağlar. Ayrıca çift bobin kullanılarak MR kanallarda yüksek MR etki oluşmasına neden olur. Çoklu disk

frende birden fazla disk kullanılarak akışkanın MR etkiye maruz kaldığı alanı arttırır. Ters frenlerde ise bobin rotora bağlı olarak tasarlanır.

MR fren tasarımlarında amaç, torku, tork-hacim (tork yoğunluğu) veya tork-kütle oranını arttırmak olmuştur. Bu amaçlarla, MR fren tasarımlarında birçok özelliğe eniyileme çalışması yapılmıştır. Bunların yanında ağırlığı, viskoz torku, güç tüketimini, hacmi, dinamik aralığı ise kısıtlama olarak kullanmışlardır. Dinamik aralık torkun viskoz torka oranını ifade eder.



Şekil 2.3 : Literatürdeki sıklıkla kullanılan frenler a) disk, b) kampana, c) hibrit, ç) T-tipi, d) çoklu disk, e) ters kampana.

2.5 Literatür Araştırması

Bu bölümde kronolojik olarak MR fren tasarımlarındaki yeniliklerden bahsedilecektir. Birçok MR fren disk ve kampana tipinin geliştirilmesi ile tasarlandığından bunlara yapılan değişiklikler ifade edilecektir. Bazı uygulamalarda MR frene elektriksel güç sağlayan elemanlar rotora bağlıdır. Bu tip frenler ters fren olarak anılacaktır.

MR akışkanı tanıttığı çalışmada Rabinow ilk MR fren örneklerini de tanıtmıştır. Bu çalışmada ilk disk tipi ve ilk kampana tipi frenlerin kesit alanlarını göstermiştir. Çalışmasında çok kanallı ve ters çevrilmiş bobinli frenlerin de örnekleri mevcuttur. [20].

Huang vd. [45] kampana tipi bir frenin temel tasarım yöntemini teorik olarak incelemiştir. Torkun Bingham modeliyle hesaplanmasını göstermiştir. Güç tüketimi ve açısız hızı tasarım aşamasında belirtilen bir fren için tork, yarıçap, kanal kalınlığı, MR akışkan hacminin hesabını yapmıştır. Bir MR frenin nasıl tasarlanacağını denklemlerle gösteren ilk çalışmadır.

Li ve Du [46] çalışmalarında yüksek tork üreten, basit yapılı ve uzun süre kararlı olan bir disk tipi freni tasarlayarak üretmeyi amaçlamıştır. Çalışmalarına MR frenlerin tasarımında dikkate alınması gereken hususları anlatarak başlamıştır. MR kanalın kalınlığından ve MR akışkanla doldurulmasından, iç ve dış yarıçapların oranının performansa etkisinden, manyetik devrenin tasarımından, seçilecek malzemelerin manyetik özelliklerinden bahsetmiştir. Frenin montajını nasıl yaptıklarını anlatmıştır. MR akışkanın bulamaç halde kalması için rotora bağlı karıştırma pinleri kullanmıştır. Ayrıca I-şekilli bir bobin tasarlayarak iyi performans elde etmeyi hedeflemiştir. Torkun, manyetik alan şiddeti ile devre doygunluğa ulaşana kadar arttığını bulmuştur. I-şekilli bobinlerinin daha verimli olduğunu belirtmiştir. Dinamik aralığı manyetik alan şiddetini arttırarak veya açısız hızı düşürerek arttırabildiklerini göstermiştir.

Park vd. [22] otomotivlerdeki frenleri elektronik kontrol (drive-by-wire) teknolojisine ayak uydurmak amacıyla MR freni otomotivlerde kullanmayı önermiştir. MR frenlerin elektronik kontrolü sayesinde; ABS, araç kararlılık kontrolü, elektronik park etme freni vb. yeni kontrol özelliklerine kolay uyum

sağladığını bildirmiştir. MR akışkanı seçerken akışkanların sıcaklık direncini dikkate alarak MRF-132AD'yi seçmiştir. MR fren boyutu klasik otomotiv freni boyutunda olduğundan kullanılan MR akışkan miktarı fazladır. Bu da kanal boyunca sabit manyetik akı yoğunluğu varsayımı yapamamalarına neden olmuştur. Böylece ANSYS yazılımını kullanarak manyetostatik, akış ve ısı transferini temel alan multifizik bir analiz yapmıştır. MR akışkanı modellerken yüksek kesme hızlarından ötürü Herschel-Bulkley modelini kullanmıştır. 1 disk ve 2 disk olmak üzere iki ayrı MR fren konfigürasyonunu optimize etmiştir. Benzetimli tavlama algoritmasını kullanarak ağırlığı azaltıp torku arttırmayı amaçlamıştır. 2 disk konfigürasyonunun 27.9 kg ağırlıkla 1013 Nm tork değeri sağladığını bulmuştur. Bu frenin akış analizini yaptıklarında kararlı durumda sıcaklığının MR akışkanın işletme bölgesinde kaldığını göstermiştir. Ancak zamana bağlı analizler yapıldığında seçilen akışkanın bu uygulama için uygun olmadığını belirtmiştir. Çalışmalarında kayma kipli denetleyici tasarlayarak farklı yol koşullarındaki tepkilerini incelemiştir. Denetleyicinin istenilen kayma oranını ve minimum fren mesafesini tutturabildiğini görmüştür. Sonraki çalışmaların yaşam döngüsü testleri yaparak sistemin güvenilirlik ve uzun ömürlülüklerini değerlendirmek üzerine yapılmasını telkin etmiştir.

Zhou vd. [3] çift diskli bir fren tasarlamıştır. Frenin boyutunu küçültmek için bobini frenin dönme eksenine yakınlaştırmıştır. İki diskten birinin bobinin üzerinde diğerinin de bobinin altında yer almasıyla toplamda 4 tane aksel kanalda MR akışkan ve rotor etkileşimi elde etmiştir. MRF-241ES akışkansını Bingham modeliyle modellemiştir. Frenin manyetik devre denklemlerini analitik olarak çıkarsalar da malzemelerin doğrusal olmayan manyetik özellikleri sebebiyle sonlu elemanlar analizine yönelmiştir. ANSOFT'un 2 boyutlu Maxwell yazılımıyla simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. Tasarım değişkenlerinin etkilerini değişkenlerin bir kısmını sabit tutarak belirlemiştir. 38 mm yarıçapa ve 40 mm yüksekliğe sahip fren 1 mm kanalla 3.5 Nm tork üretmiştir.

Nam vd. [15] torkun artırılması için manyetik devre tasarımına önem verilmesi gerektiğini vurgulamıştır. MR akışkan kanalına daha yüksek manyetik akı yoğunluğu etki etmesi için manyetik malzemelerin geometrik tasarımlarını değiştirmiştir. Buradaki tasarım politikalarının manyetik malzemelerdeki kesit alanını manyetik doygunluk olmayacak şekilde küçültmek ve manyetik akı yolunu kısaltmak için

manyetik malzemedeki gereksiz büyüklüğü çıkarmak olduğunu belirtmiştir. Buna bağlı olarak diskin üzerindeki manyetik malzemeyi, dönme eksenine yaklaştıkça kalınlığı azalacak şekilde üretmiş; bobini kaplayan manyetik malzemenin de köşelerindeki gereksiz büyükleri kavisli hale getirmiştir. MR akışkan olarak MRF-132AD kullanmıştır. Tasarladıkları frenin disk tipi frene göre %20 daha fazla torku ağırlığı ve fren yüksekliğini azaltarak ürettiğini göstermiştir. 48.2 mm yarıçapa 28 mm yüksekliğe sahip fren 1 mm kanal genişliğinde 4.2 Nm tork üretmiştir. Akımı sabit tutup açısal hızı arttırdıkları deneylerde, torkun açısal hızdan bağımsız olduğunu; bu sebeple viskoz torkun düşük etkiye sahip olduğu varsayımlarının doğru olduğunu raporlamıştır. Tasarladıkları frenin histerisiz davranışının da disk tipine göre daha iyi olduğunu göstermiştir. Bu sebeple tasarım politikalarının başarıyla uygulanabileceğini söylemiştir.

Karakoc vd. [23] otomotivler için MR fren tasarlamayı hedeflemiştir. Fren tasarlarken dikkat edilmesi gereken hususları yapısal ve ısıl özellikleri, contalama, manyetik akım yoğunluğu ve MR akışkan seçimindeki hususları da ekleyerek anlatmıştır. Disk tipi bir freni MR kanalları labirent şeklinde yaparak tasarlamıştır. Bobine yakın yerlerde statik keçeler; paramanyetik disk üzerinde ve MR akışkana uzak yerlerde ise dinamik keçeleri sızmayı engellemeyi hedefleyerek kullanmıştır. COMSOL programında ağırlığı azaltmayı ve torku arttırmayı hedefleyen amaç fonksiyonunu benzetimli tavlama algoritması kullanarak optimize etmiştir. Global optimumu bulmak için gradyan tabanlı ardışık ikinci derece programlamayı (gradient based sequential quadratic programming) da kullanmıştır. 120 mm yarıçapa ve 50 mm yüksekliğe sahip frende 1 mm kanallarda MRF-132DG kullanarak 23 Nm tork elde etmiştir. Frenin viskoz torkunu 3 Nm olarak belirtmiştir. Belirtilen boyutlarla düşük tork elde etmelerini optimizasyon algoritmasındaki ağırlık ve boyutlardaki kısıtlamalara bağlamıştır. Analizlerine bu kısıtları rahatlatarak devam ettiklerinde daha yüksek torka ulaşabildiklerini göstermiştir. Belli açısal hızlarda akımı arttırarak deneyler yapmıştır. Deney sonuçları ile simülasyon sonuçları arasındaki farkın MR akışkanın reolojik özelliklerinin tam anlamıyla bilinmemesi ve sıcaklığın değişmesi olduğunu belirtmiştir. Sonuç olarak hala otomotivler için gerekli torktan uzakta olduklarını; bu sebeple yeni tasarımların gerekli olduğunu belirtmiştir.

Nam ve Ahn [14] dalga formunda sınıra sahip bir disk tipi fren önermiştir. Bu fren deforme olmuş malzeme işlemlerinden faydalanır. Bu frende MR akışkan, parçacıkların zincirli yapısının bozulmasından değil birbirlerine çarpmasıyla direnç üretir. Üretilen direncin hesaplanması için plastisite teorisinden faydalanılmıştır. Frenlerindeki işletim modunun kesme, valf veya sıkmadan farklı olduğunu belirtmiştir. 2 farklı sınıra sahip fren tasarlamış ve aynı boyuttaki disk frenle sonuçları karşılaştırmıştır. Tasarladıkları frenin disk tipi frene göre %600 daha fazla tork ürettiğini göstermiştir.

Nguyen ve Choi [11] otomobiller için disk tipi, çift disk ve üçlü disk tipi frenleri MRF122-2ED; MRF-132DG ve MRF-140CG kullanarak karşılaştırmıştır. Çalışmalarında Bingham ve Herschel-Bulkley modellerini kullanan Nguyen ve Choi, yolcu arabalarında yüksek kesme hızını ikinci modelin daha iyi temsil ettiğini belirtmiştir. Analizlerinde manyetik alan etkisi altında olmayan frenin 100 kmh süratle giderken kullanılan MR akışkanların uygun sıcaklıkta olup olmadıklarını kontrol etmiştir. ANSYS yazılımında altın oran algoritması kullanarak optimizasyon çalışması yapmıştır. Analizlerinin sonuçlarında MRF-132DG'nin optimum torku verdiğini, üretim ve maliyet açısından da en iyi seçim olduğunu göstermiştir. Konfigürasyonlar arasında ise çift disk tipi frenle en yüksek torka ulaşmıştır. Daha sonra bu konfigürasyonu frenleme torkunu istenilen seviyede kısıtlayarak ağırlık optimizasyonu yapmıştır. 99.5 mm yarıçapa ve 56.5 mm yüksekliğe sahip frenleri 41 kg ağırlığa sahip olurken 1025 Nm tork üretmiştir. Böylece MR frenin, otomotivler için gerekli torka ulaşabileceğini göstermiştir.

Gudmundsson vd. (2010) amputelerin protez dizlerinde kullanılmak üzere bir MR fren tasarlamıştır. Torku arttırmak için hem MR kanal kalınlığını hem de bıçakları mikron mertebesinde tutmuştur. MR frenlerdeki sızmaların yüksek basınçtan kaynaklandığını öne sürerek daha az uçucu ve düşük gaz basıncına sahip bir MR akışkana yönelmiştir. Perfluorinated polyether bazlı MR akışkan kullanıp sızmadan kurtulduklarını ifade etmiştir. Ellerinde bulunan bir MR freni Bingham modeli ile modelleyerek deneyler yapmış ve modellerinin geçerliliğini göstermiştir. Parçacık sürü optimizasyon tekniğini kullanarak torku arttırmayı ve manyetik alan etkisinde olmayan viskoz torku azaltmayı amaçlamıştır. 71 bıçak ve 35 mikron kalınlıkta kanal barındıran MR frenleriyle 60 Nm torka ulaşip viskoz torku 2.4 Nm'ye düşürmüştür.

Böylece ampütelerin protez dizlerinde kullanılan MR freni daha gelişmiş hale getirmiştir [26,47].

Senkal ve Gürocak [29] haptik uygulamalarda kullanmak üzere bir MR fren tasarlarırken manyetik ve paramanyetik malzemeleri stratejik olarak yerleştirmiştir. Böylece manyetik alanın, MR kanallardan birkaç defa geçmesini sağlamıştır. Önerdikleri fren, ters çevrilmiş kampana tipi bir fren olarak sınıflandırılabilir. 31.5 mm yarıçapa ve 63.7 mm yüksekliğe sahip frenlerinde kanal genişliğini 0.25 mm olarak ayarlamıştır. Bingham modeliyle modelledikleri fren 10.8 Nm tork üretmiştir. Bu tasarımlarıyla frenlerinin, LORD firmasının pazarladığı kampana tipi frene göre boyut olarak üçte bir küçük olmasına rağmen 2.7 kat fazla tork ürettiğini belirtmiştir. Karşılaştırmak için kullandıkları diğer birçok frenden de boyut, ağırlık ve güç tüketimi açısından daha verimli olduklarını göstermiştir. Ayrıca ilk defa ferro-fluidic keçe kullanılmıştır. Bu keçe sayesinde MR akışkanın sızmasını engellediklerini, rulmanların sabit tutulduğunu ve şasiyi sabit bir noktaya bağlayabildiklerini belirtmiştir. Histerisiz davranışın sadece kontrol edilebilirliği kötü etkilemediği aynı zamanda viskoz torku da arttırdığını belirtmiştir. Ancak denetleyicinin ters yönde anlık dürtüler vermesiyle artık manyetik alanın kaldırılabilirdiğini rapor etmiştir. Sanal duvar testinin ilk etkileşiminde gevrek tepki (crisp reaction) alsalar da etkileşim sürdükçe yüksek sertlikle (high rigidity) karşılaşmıştır. MR frenlerinin düşük enerjili, sessiz, basit kontrolü ve hızlı tepkimesiyle haptik uygulamalarda kullanılabileceğini göstermiştir.

Avraam vd. [16] literatürdeki çok kullanılan fren tiplerinin kampana, ters kampana, T-tipi rotor fren, disk fren ve çoklu disk fren olduğunu belirlemiştir. Fren tasarımlarının ise dinamik aralık, tork/hacim oranı, rotor yarıçapı ve elektrik güç tüketimi kriterleri ile karşılaştırılabileceğini söylemiştir. Bingham modeli kullanarak 5 frenin performansını belirleyen tüm denklemlerini çıkarmıştır. Rotor yarıçapı, tork/hacim oranı ve dinamik aralık kriterleri için çoklu disk frenin en uygun seçim; tork/hacim oranı yerine güç tüketimi düşünüldüğünde ise T-tipi frenin uygun seçim olduğunu göstermiştir. Yaptıkları sonlu elemanlar analizleriyle de bulgularının uyum içinde olduklarını belirtmiştir. Çoklu disk tipi fren, birçok yönden uygun olmasına rağmen kolay üretim ve düşük güç tüketimi sağlaması sayesinde T-tipi freni bilek rehabilitasyon cihazı uygulaması için seçmiştir. 72.5 mm yarıçap ve 45 mm

yükseklığe sahip frenleri 0.4 mm kanal boşluğuyla 22.5 Nm tork üretmiştir. Üretilen freni seyyar bir rehabilitasyon cihazına entegre etmiştir. Ticari bir cihazla karşılaştırıldığında benzer sonuçlar verdiğini saptamıştır.

Nguyen vd. [17] orta büyüklükteki motosikletler için hibrit yapılı ters çevrilmiş bir fren önermiştir. Çift bobin kullandıkları frende bobinleri, frenin aksel ve radyal kanallarının birleştikleri köşelere yerleştirmiştir. Herschel-Bulkley modeli kullanarak torku hesaplamıştır. ANSYS yazılımında 2 boyutlu aksel simetrik analizlerle altın oran algoritması kullanarak optimizasyon çalışmasını tamamlamıştır. Manyetik alan etkisinde olmadan 100 kmh süratle giderken MR akışkanın kritik sıcaklık değerini aşmamasını kısıt olarak belirtmiştir. MRF-140CG akışkansını kullanarak 68 mm yarıçap ve 80 mm yüksekliğe sahip frenleriyle 1.1 mm kanalda 155 Nm tork elde etmiştir. Bu değerle hedef olarak koydukları 150 Nm değerini sağlamıştır. Optimizasyon çalışması yapılarak torkun kayda değer bir biçimde arttırılabileceğini göstermiştir. Hibrit yapılı frenin ve optimizasyon çalışmalarının, diğer uygulamalara örnek teşkil edebileceğini bildirmiştir.

Assadsangabi vd. [7] otomotiv endüstrisi için disk tipi bir fren tasarlamayı hedeflemiştir. Fren tasarımında dikkat edilmesi gereken hususları sıraladıktan sonra frenlerindeki detayları anlatmıştır. Diskin şafta yakın kısımlarında paramanyetik malzeme kullanarak manyetik akı yoğunluğunun, bobinin bitişiğindeki yüksek yarıçapa sahip yerde yoğunlaşmasını sağlamıştır. Bu kısımda ayrıca bir ayırıcı parça kullanarak akışkanın aksel kanal sayısını arttırmıştır. Ağırlığı azaltmayı ve torku arttırmayı amaç fonksiyonu olarak tanımladıkları optimizasyon için genetik algoritmasını kullanmıştır. 110 mm yarıçapa ve 55 mm yüksekliğe sahip frenleri 1.3 mm kanal genişliğinde MRF-132DG kullanarak 132 Nm tork üretmiştir. MR akışkanı modellerken Bingham modelini kullandıklarını belirtip; bu model sebebiyle üretilen frenin belirttikleri torka ulaşamayacaklarını ifade etmiştir. Böylece otomotivler için yeterli torka ulaşamadıklarını belirtmiştir. Ayırıcı sayısını ve buna bağlı olarak aksel kanal sayısını arttırarak torku arttırılabileceğini göstermiştir. Ancak yine de MR frenlerin otomotivlerde kullanılabilmesi için frenin temel tasarımının ve MR akışkanın üretim teknolojilerinin geliştirilmesi gerektiğini bildirmiştir.

Kikuchi ve Kobayashi [48] kampana tipi frenlerde çoklu bobin kullanmanın torka etkisini incelemiştir. Frenlerinde rotor içte bir silindir ve dışta bir silindir parçanın arasında dönecek şekilde bir tasarımla hareket etmektedir. Böylece rotorla iç silindir arasında bir tane ve rotorla dış silindir arasında bir tane olmak üzere iki dairesel MR kanala sahip olmuştur. Çoklu bobinler için konfigürasyonlar hazırlarken MR kanalların başlangıç yarıçaplarını ve bobinin başlangıç yarıçapını ve frenin toplam yarıçapını sabit tutmuştur. Bobinlerin genişlik ve yüksekliklerini bir optimizasyon çalışması yapmadan kendileri belirlemiştir. Bu konfigürasyonlardan bazılarında düzgün dağılan bir manyetik akı yoğunluğuna ulaşmıştır. 60 mm yarıçapa ve 140 mm yüksekliğe sahip olan frenlerinde kanal genişliklerini 0.5 mm olarak belirlemiştir. MRF-132DG akışkansını kullanarak 10 Nm torku, 1 Nm sürtünme torkuyla üretmiştir. Çoklu bobin kullanımının disk frende olduğu gibi kampana tipi frende de olumlu etkiye sebep olduğunu göstermiştir [48].

Nguyen ve Choi [8] çalışmalarında çift yönlü çalışabilen; bu sayede hem kavrama hem fren olarak kullanılabilen bir fren önermiştir. Frenlerini iki rotor, iki bobin ve bir kapaktan oluşturmuştur. İki manyetik akının birbirlerini etkilememeleri için araya paramanyetik malzeme yerleştirmiştir. Rotorları ters yönlerde dönmeye olanak sağlayacak şekilde ayrı shaftlara bağlamıştır. Kapağın da dönüş yönüne bağlı olarak üretilen tork direnç veya itki sağlayabilir. Böylece tasarımları, direnç gösteren tork üretirse fren; itki sağlayan tork üretirse kavrama olarak çalışır. Çalışmalarında bobinin yerleşimine bağlı olarak üç farklı konfigürasyon önermiştir. MR frenin manyetik devresinin analizi için de yeni bir model önermiştir. Bu model için fren hacmini ayırtmıştır. Birtakım varsayım ve kabuller yaparak, manyetik alan teorisinin 2 temel yasası olan Amper ve Gauss yasalarını, MR kanallardaki manyetik akı yoğunluğunu verecek şekilde çözmüştür. Gradyan temelli kısıt yönetimi metodu kullanarak Parçacık sürü optimizasyon tekniğiyle eniyileme çalışması yapmıştır. Önerdikleri metodun optimizasyonu ile sonlu elemanlar optimizasyonunu süre ve doğruluk açısından karşılaştırmıştır. Metotları 3 dakika gibi bir sürede sonuç verirken sonlu elemanlar analizi 8 saat gibi bir sürede sonuca ulaşmıştır. Metotlarının sonucu sonlu elemanlar analizine göre %4 farklı çıkmıştır. Optimizasyon süresi göz önüne alındığında bu hatanın kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir. 38 mm yarıçapa ve 36

mm yüksekliğe sahip frenleri 1 mm kanal kalınlığında her iki rotorda da 2 Nm tork üretmiştir.

Nguyen ve Choi [49] disk tipi, kampana tipi, ters çevrilmiş kampana tipi, tek bobinli hibrit, ters çevrilmiş tek bobinli hibrit, çift bobinli hibrit ve ters çevrilmiş çift bobinli hibrit frenleri belirli bir hacimde sınırlandırarak bir karşılaştırma çalışması yapmıştır. Frenlerin ürettikleri torkları Herschel-Bulkley modeli kullanarak çıkarmıştır. ANSYS yazılımı kullanarak yaptıkları analizlerin optimizasyon şemasını altın oran algoritması olarak belirlemiştir. Dinamik aralığın kritik bir değerin altına düşmemesini sağlayarak torku arttırmayı amaç fonksiyonu olarak belirlemiştir. MRF-140CG ve MRF-132DG akışkanlarını içeren frenlerin analiz sonuçlarını yüksekliğin yarıçapa oranı 0.5'ten 5'e kadar olacak şekilde 30 mm, 40 mm ve 60 mm yarıçaplar için kıyaslamıştır. Hangi boyutlarda hangi frenin en uygun seçim olduğuna dair birçok bulgu elde etmiştir. Optimum bazı geometrilerin deneylerini de yapmıştır. Deney sonuçlarıyla sonlu elemanlar yaklaşımının uyumlu sonuçlar verdiğini paylaşmıştır.

Nguyen ve Choi [9] orta büyüklükteki motosikletler için çift bobinli T-tipi ters çevrilmiş bir fren önermiştir. Bobinleri T-flanşının sınırlarına konumlandırmıştır. Torku Herschel-Bulkley modelini kullanarak hesaplamıştır. Amaç fonksiyonu en büyük torku üreten fren olarak belirlenirken 120 kmh hızla giderken MR akışkan sıcaklığının kritik sıcaklığı aşmamasını kısıt olarak tanımlanmıştır. Optimizasyon şemasında uygulanan akım yoğunluğunu sabit tutmuştur. MRF-122-2ED, MRF-132DG ve MRF140CG akışkanlarını karşılaştırmıştır. MRF-122-2ED istenilen minimum torku sağlayamamıştır. Diğer akışkanlar ise istenilenin çok üstünde torku sağlayabildiklerinden; torku istenilen değerde sabit tutup ağırlık optimizasyonu yapmıştır. Böylece 18 kg civarında ağırlığa sahip frenler tasarlanmıştır. Ancak MRF-132DG barındıran frenin kanal kalınlığı 1 mm olduğundan daha az akışkana ihtiyaç duymuştur. Bu sebeple bu frenin daha az maliyetle üretilebileceği belirtilmiştir. 99 mm yarıçapa ve 73 mm yüksekliğe sahip frenleriyle 18.6 kg ağırlığa sahip olup; 1 mm kanal kalınlığıyla 430 Nm torku üretebildiklerini göstermiştir. Ürettikleri frenin ağırlığının mevcut motosiklet freninden ağır olduğunu bildirmiştir.

Shiao ve Nguyen [50] torku arttırmak için yüksek akma gerilmesine sahip akışkan seçimi, kanal kalınlığını daraltma, geometrik boyutları büyütme ve manyetik alan

gücünü arttırmaktan başka çareler aramak gerektiğini belirtmiştir. Böylece çok kutuplu MR fren önermiştir. Çalışmalarında ters kutuplar sırasıyla eşit aralıklarla dizilecek şekilde 6 bobin kullanmıştır. MRF-140CG akışkansını Bingham modeliyle modelleyerek torku hesaplamıştır. Silindirik kanalın hemen hemen her yerindeki MR akışkanı aktive ettiklerini belirtmiştir. Tork yoğunluğu açısından disk tipi frenlerden daha iyi olduğunu ve kampana tipiyle de benzer sonuçlar elde ettiklerini göstermiştir. 70 mm yarıçap ve 75 mm yüksekliğe sahip tasarımları 0.5 mm kanal genişliğinde 22.4 Nm tork üretmiştir. Frenlerinin kayda değer avantajlarını şöyle sıralamıştır. Daha hafif ve içi boş bir rotor tasarlanmıştır. MR akışkanının etkilendiği alanı genişletilmiştir. Rotorun aksel veya dairesel boyutlarını arttırarak torkun daha da arttırılabileceği belirtilmiştir.

Rossa vd. [12] insan dostu robotik uygulamalarında kullanılacak frenlerinin tasarım kriterlerini tork yoğunluğu, dinamik aralık ve tepkisellik olarak belirlemiştir. Çoklu disklerde, torkun disk sayısı ile doğru orantılı arttığını; çoklu silindirlerde ise her bir silindirin yarıçapının karesi ile arttığını belirtmiştir. Buna bağlı olarak çok katmanlı bir kampana tipi fren tasarlamıştır. İki aşamalı optimizasyon şemalarında başlangıç değerlerini benzetimli tavlama algoritmasıyla bulup ardışık ikinci derece programlama algoritması kullanarak tork yoğunluğunu maksimize etmeyi amaçlamıştır. 30 mm yarıçapa ve 39 mm yüksekliğe sahip frenleriyle 5.3 Nm tork üretmiştir. Literatürdeki frenlerle yaptıkları karşılaştırmalar sonucunda hem tork hem tork yoğunluğu açısından nispeten daha iyi değerlere ulaştıklarını belirtmiştir. Dinamik aralık açısından çok verimli bir frene sahip olsalar da tepkisellik açısından ortalama bir değer sunmuştur.

Rizzo vd. [51] haptik arayüzler için arıza emniyetli bir tasarıma ihtiyaç duyulduğunu; bunun ise doğal mıknatıslarla sağlanabileceğini belirtmiştir. Motordan ayrılacak bir vakum pompası uygulamasında kavrama olarak çalışacak tasarımlarının sadece aç-kapa işlevi göreceğini söylemiştir. Bu tasarım şaftların tutunduğunda yüksek torklara ulaşmasını sağlarken ayrıldıklarında sıfır tork vermesine olanak sağlamaktadır. Tasarımlarında doğal mıknatısın kutup sayısının ve manyetikleşme yönünün önemli olduğunu belirtmiştir. Bu sebeple farklı kutup sayıları ve manyetikleşme yönlerinde çalışmalar yapmıştır. En yüksek tahriğin 4 tane 90° kutuplu çaptan manyetize olan mıknatıslarla sağladıklarını göstermiştir. Şaftlar arasındaki bağıl dönme hızı 1200

rpm olduğunda en yüksek torku 3 Nm hesaplamıştır. Manyetik alandan bağımsız torkun 0.18 Nm hesaplandığını; bunun 0.08 Nm'sinin viskoz kalanının ise artık manyetik alandan kaynaklandığını belirtmiştir. Kavrama doğal mıknatısların önceden yüklenmiş bir yayla aksel hareket etmesiyle eyleşmektedir. Normal durumlarda şaftların ayrılması dışarıdan pnömatik eyleyicilerle sağlanabilmektedir. Ancak ferromanyetik malzemelerle mıknatıslar arasında doğal olarak oluşan aksel yönde bir manyetik kuvvet vardır. Bu kuvvet mıknatısların eylemsizliklerini korumaya yardımcı olmaktadır. Böylece yay kırılırsa, ki bu sadece kapalı durumda olmaktadır, manyetik kuvvetin kavramayı kapalı durumda tutacağını belirtmiştir. Bunun da bahsedilen cihazın arıza emniyetli olmasının sebebi olduğunu açıklamıştır.

Shiao ve Nguyen [52] disk ve kampana tipi frenlerin torkunun sırasıyla aksel ve dairesel kanalların boyutlarına bağımlı olduğunu; bu sebeple bobinin boyutlarına ve sarım sayısına bağlı manyetik alan şiddetinin artırılmasının bu boyutlarla kısıtlandığının altını çizmiştir. Bu problemi çözmek için altı bobini kutupları ardışık sıralanacak şekilde dairesel olarak yerleştirmiştir. Böylece manyetik alan çizgileri bir bobinin merkezinden çıkarak komşu iki bobinin merkezine gitmektedir ve kapalı döngü manyetik alan oluşmaktadır. Bunun dezavantajı ise bobinlerin arasında torka katkı sağlamayan ölü bir bölge oluşmasıdır. Bu sebeple bobinler arası mesafe, bobin boyutları, bobinle fren dış yarıçapı arasındaki mesafe ve elektriksel güç girdisi için optimizasyon çalışması yapmıştır. Tasarımlarında elektriksel güç girdisinin sınırlandırılmaması; frende MRF-140CG akışkanı ve daha yüksek değerde doygunluğa ulaşan AISI 1018 düşük Karbon çeliğini kullanmayı zorunlu kılmıştır. 140 mm çapa ve 75 mm yüksekliğe sahip frenleri 0.5 mm MR kanal kalınlığında 25.4 Nm tork üretmiştir.

Nguyen vd. [53] gelişen MR fren alanında fren seçiminde en önemli kriterin tork ve ağırlık olduğunu belirtmiştir. Disk tipi, kampana tipi, tek bobinli hibrit, çift bobinli hibrit ve T-tipi frenleri bütün frenlerin belli torku sağlayacak şekilde ağırlıklarını azaltmayı hedefleyerek optimizasyon çalışması yapmıştır. MRF-132DG ve MRF-140CG akışkanlarını karşılaştırmıştır. Frenlerin ürettikleri torkları Herschel-Bulkley modeli kullanarak hesaplamıştır. Kanal kalınlığını 1 mm olarak ayarlamıştır. Optimizasyon algoritması olarak ANSYS yazılımında gradyan düşümünü (gradient descent) kullanmıştır. 50 Nm'ye kadar tork üretebilen frenleri ağırlıkları ve güç

tüketimleri açısından karşılaştırmıştır. Hangi frenin hangi ağırlıklarda veya hangi güç tüketimi değerlerinde daha yüksek tork ürettiğine dair birçok bulgular elde etmiştir. Torkun 15 Nm'den az olduğu durumlarda disk tipi MR frenin en uygun seçim olduğunu; 15 Nm'den çok olduğu durumlarda ise T-tipi frenin en uygun seçim olduğunu bildirmiştir. MRF-140CG akışkanlı frenlerin daha düşük ağırlıklarla ve güç tüketimi ile daha yüksek tork ürettiğini göstermiştir [53].

Moghani ve Kermani [54] doğal mıknatıs ve bobini birlikte kullanan ilk çalışma olduklarını; bunun ağırlığı ve güç tüketimini ciddi anlamda azalttığını vurgulamıştır. Tasarımları ters çevrilmiş çoklu disk olarak sınıflandırılabilir. Ters çevrilmiş çoklu disk tasarımlarında shaftın etrafında bobin bulunurken, bobini de doğal mıknatıs çevrelemektedir. Bu şekil, optimum tork-ağırlık oranını verdiği için seçilmiştir. Doğal mıknatıs, MR kavramaya optimum noktada başlangıç manyetik alan sağlamaktadır. Bobin ise manyetik alanı istenilen değere arttırabilmektedir/düşürebilmektedir. Optimizasyon çalışmaları sonucu 111 mm çapa, 30.6 mm yüksekliğe sahip kavramaları 15.7 Nm tork üretmiştir. Çalışma klasik bir frene göre boyutların azaltıldığını; güç tüketiminin %67, ağırlığın ise %40 düşürüldüğünü göstermiştir.

Rizzo vd. [55] daha önce doğal mıknatıs kullanarak yaptıkları kavramada, [51], aktarım yapacak shaftın manyetik olmayan kısmını bakır levha ile değiştirerek aktarılan torku arttırmayı hedeflemiştir. Bakır levha özellikle shaftlar farklı hızlarda dönerken burgaç akım (eddy current) üretmektedir. Bu akım kavramanın başlaması sırasında oluşan muhtemel statik sürtünmeleri yenmek için MR torka elektromanyetik tork eklemektedir. Shaft hızları eşitlendiğinde elektromanyetik tork sıfırlanmaktadır. Burgaç akım manyetik alanı etkilediğinden MR akışkan kaynaklı torkta düşüş olduğunu bildirilmiştir. Ancak burgaç akımla oluşan torkla beraber toplam torkun önceki çalışmaya göre %27 arttığını açıklanmıştır.

Topçu vd. [56] haptik sistemler için tasarlanan cihazlarda düşük tork bandında şeffaflık açısından iyi sonuçlar veren bir fren tasarlamıştır. Fren, MR akışkanın fren içerisinde hareket ettiği bir peristaltik pompa gibidir. Bu fren vana modunda çalışan bir cihazdır. MR akışkan rotorla direk bağlantıda olmadığından sürtünme torku oluşturan sızdırmazlık elemanlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırmıştır. Kavram kanıtlama testlerinde ürettikleri prototip fren 20-35 Nmm minimum torka sahiptir.

Frenin 4 A akımda sağladığı maksimum tork ise 270 Nmm civarındadır. Frenin FEMM yazılımında sayısal hesaplamasını da gerçekleştirmiştir. Frenin doğası gereği kanallardaki manyetik akı yoğunluğunu Gaussmetre kullanarak ölçebilmiştir. Ölçtükları değer, simülasyonda elde ettikleri değerden ortalama %13.7 düşük çıkmıştır. Bunun da üretimlerdeki toleranslardan, malzemelerdeki kirlilikten ve çift parça demir kaplamadan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Analizde elde ettikleri tork değerlerini belirtilen akı yoğunluğu çıkarılarak tekrar elde ettiklerinde deneydeki tork değerleri ile örtüşüğünü bildirmişlerdir.

MR frenlerde resmin tamamını görebilmek için Çizelge 2.1 oluşturulmuştur. Çizelgede hangi uygulamalarda hangi boyutlarda frenlerin kullanıldığı, hangi algoritmalarla optimizasyon çalışmalarının yapıldığı, bobin özellikleri ve tork çıktısı gibi birçok bilgiye yer verilmiştir. Ayrıca tasarımcıların frenlerin tipleri, çoklu kanal ve bobin kullanımı da okuyucuya canlandırılmaya çalışılmıştır.

Otomotiv uygulamalarında yüksek açısal hız ve buna bağlı olarak yüksek kesme hızlarıyla karşılaşılmaktadır. Bu sebeple bu uygulamalarda genel olarak Herschel-Bulkley akış modeli uygulanmıştır. Haptik uygulamalarda ise düşük açısal hızlar olduğundan Bingham modeli tercih edilmiştir.

Otomotiv uygulamalarında yapılan sonlu elemanlar analizleri genelde ANSYS gibi ticari yazılımlarda tamamlanmıştır. Bunun sebebi kanallardaki manyetik akı yoğunluğunun ortalama bir değerle ifade edilmesinin hataya sebep olmasıdır. Bu yazılımları kullanan çalışmalarda yazılımların içinde bulunan altın oran, genetik algoritma gibi optimizasyon algoritmaları tercih edilmiştir. Bu uygulamalarda MR frenler klasik frenlerin yerini aldığından amaç fonksiyonu torku arttırmanın yanı sıra ağırlığı da azaltmayı içermektedir. Diğer uygulamalarda ise FEMM gibi açık kaynaklı yazılımlar tercih edildiğinden optimizasyon algoritmaları benzetimli tavlama, parçacık sürü en iyemesi gibi kolay kodlanabilir algoritmalarından seçilmiştir. Bu uygulamalarda ise genelde torku arttırmak bazen de tork yoğunluğunu arttırmak amaç fonksiyonu olarak karşımıza çıkar.

Otomotiv uygulamalarındaki birçok çalışmada iki aşamalı optimizasyon çalışmasına rastlanılmıştır. Optimizasyon çalışmasının ilk aşamasında torku arttırmayı hedefleyip

fren tipi ve MR akışkan seçimi yapılır. Yeterli torku üretebilirlerse ikinci aşamada da torku belli değere kısıtlayıp ağırlığı azaltmayı hedefleyerek çalışmaları sonlandırılır.

Bütün uygulamalarda bobine uygulanan akımın ve bobindeki sarım sayısının artmasıyla torkun doğru; kanal kalınlığı ile de ters orantılı olduğu görülmektedir. Ayrıca, otomotiv uygulamalarında tellere daha yüksek akımlar uygulandığı fark edilmektedir. Kanal kalınlıkları mikron mertebeden başlayıp 2.6 mm'lere kadar yükselmekte; en sık kullanılan kanal kalınlıklarının 0.5 ve 1 mm olduğu görülmektedir. Otomotiv uygulamalarında daha büyük kanallar; haptik uygulamalarda daha küçük kanallar göze çarpmaktadır. Tork 20 Nmm ile 1025 Nm arasında değişmektedir.

Otomotiv uygulamalarında çoklu kanal ve bobine daha sık rastlanılmaktadır. Motosikletlerdeki frenin yapısı gereği motosikletlerdeki frenlerde bobinler ters çevrilmiş bir tasarımla karşımıza çıkmaktadır.

Otomotiv uygulamalarında ısınma gerçekleşmesi daha mümkün olduğundan akışkan seçiminde MR akışkanın sıcaklık direncini de göz önünde bulundururlar. Diğer uygulamalarda ise sızıntıyı önlemek ve sürtünme torkunu azaltmak daha ön plandadır. Çünkü otomotiv uygulamalarında kullanılan keçelerle sürtünme torku artsa da maksimum torkun yanında çok küçük kaldığından ihmal edilebilir. Ancak diğer uygulamalarda sürtünme torku, maksimum torka göre ihmal edilemeyecek seviyededir.

MR akışkan olarak genellikle MRF-132DG'nin en iyi çözüm olduğu ortaya çıkmaktadır. Yüksek toplam net akımla çalışan bazı frenlerde doygunluğa daha yüksek değerlerde ulaşması sebebiyle MRF-140CG kullanılmıştır.

Çizelge 2.1 : MR fren çalışmalarının özet çizelgesi.

	Alan	Fonksiyon	Opt	tip	ω	Tel	I	N	Maks.	Min.	d	R	L	Akışkan	Model
					Rpm-rad/s	mm	A		Nm	Nm	mm	mm	mm		
[3]	-	T	-	Çift disk	19 rpm	0.315	0.8	700	3.5	0.55	1	38	40	241ES	B
[15]	-	-	-	Modifiye edilmiş disk	60 rpm	-	5	81	4.2	-	1	48.2	28	132DG	B
[23]	Otomotiv	A&T	SA+SQP	Labirent şekilde kanallı disk	200 rpm	0.77	1.8	236	23	3	1	120	50	132DG	B
[11]	Otomotiv	A&T	-	Çift disk	100 kmh	0.72	5	400	1025	-	~2.6	99.5	56.5	132DG	HB
[47]	-	T	-	Mikron kanallı kampana	8.2 rpm	-	1.5	310	60	2.4	~0.03	31.2	-	*	
[29]	Haptik	-	-	Labirent şekilde kanallı kampana	-	26 gauge	1.5	800	10.8	0.08	0.25	31.5	63.7	132LD	B
[16]	Sağlık	-	-	T-tipi	9.5 rpm	-	1.5	-	22.5	-	0.4	72.5	45	-	B
[17]	Motor	T	AO	Ters çift bobinli, hibrit	100 kmh	0.72	5	-	155	-	1.085	68	80	140CG	HB
[7]	Otomotiv	A&T	GA	Çoklu bobin, kampana	-	AWG 21	-	-	132	5.35	1.3	110	55	132DG	B
[48]	-	T	-	Çift bobin, çift yönlü hareket,	60 rpm	0.7	1.5	500	11.2	1	0.5	60	140	132DG	
[9]	Motosiklet	T	AO	Ters çift bobin, T-tipi	120 kmh	-	1.6	275	430	-	1	99	73	132DG	HB
[50]	-	T	SNLP	Çok kutuplu bobin, kampana	-	AWG 21	1	400	22.4	-	0.5	70	75	140CG	B
[12]	haptik	TY	SA+SQP	Çoklu kampana	-	0.25	0.9	475	5.3	0.03	0.5	30	39	122EG	B
[51]	Haptik	-	-	Doğal mıknatıs, kampana	1200 rpm	-	-	-	3	0.18	1.25	33.5	37		
[54]	robotik	-	-	Ters bobin ve doğal mıknatıs,	-	-	-	-	15.7	0.03	0.2	55.5	30.6		

Kısaltmalar: **Opt**: optimizasyon şeması, **N**: sarım sayısı, **A**: ağırlık, **T**: tork, **TY**: tork yoğunluğu, **SA**: benzetimli tavlama, **SQP**: sequential quadratic programming, **AO**: altın oran, **GA**: genetik algoritma



3. MODELLEME VE BENZETİM

MR frenin tasarımında kullanılan malzemelerin, seçilen boyutların, malzemelerin konumlandırılmasının anlaşılması için birtakım ilişkilerin anlaşılması şarttır. Bu sebeple bu bölümde fren tasarımında kullanılacak manyetik denklemler tanıtılacaktır.

MR fren tasarımında ilk aşama manyetik devrenin anlaşılmasıdır. Manyetik devreler Amper ve Gauss yasalarına uyarlar. Amper yasası herhangi bir kapalı yol boyunca manyetik alan şiddetinin integralinin, bu yol boyunca manyetik devreye nüfuz eden toplam net akıma, NI , eşit olduğunu belirtir:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1)'deki N sarım sayısını, I ise bobine uygulanan akımı ifade eder. Gauss yasası ise manyetik akının uzayda herhangi bir hacimde korunduğunu ifade eder. Bir başka deyişle, bir hacme giren manyetik akı o hacimden çıkan manyetik akıya eşittir:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3.2)$$

Bir maddenin kendi içerisinde manyetik alan oluşturabilme kabiliyeti manyetik geçirgenlik olarak adlandırılır. Manyetik akı yoğunluğu ile manyetik alan şiddeti birbirlerine manyetik geçirgenlikle bağlıdır:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.3)$$

Manyetik relüktans ise manyetik devrenin, üzerinden geçen manyetik akıya karşı gösterdiği direnci ifade eder:

$$\Phi = \frac{NI}{R_{eş}} \quad (3.4)$$

Malzemenin tekil relüktansı ise Eşitlik (3.5)'teki gibi hesaplanır:

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (3.5)$$

Eşitlikteki l , manyetik akının malzeme üzerindeki geçtiği uzunluk; A , ise kesit alanıdır. μ değeri, malzemenin manyetik geçirgenliğini ifade etmekte olup bazı malzemeler için sabit bazı malzemeler içinse manyetik alan şiddetinin bir fonksiyonudur. MR kanallardaki relüktans ise şu şekildedir:

$$R_{MRS} = \frac{d}{\mu_{MRS} A} \quad (3.6)$$

MR kanalların kalınlıkları bu çalışmada sabit alınmıştır ve d ile gösterilmiştir. Kanalin bulunduğu konuma göre A da değişkenlik gösterebilir. MR akışkanının manyetik geçirgenliği, μ_{MRS} , ise sabit değildir ve manyetik alan şiddetinin bir fonksiyonudur.

Manyetik devre, manyetik ve paramanyetik malzemelerin kombinasyonundan oluşur. Seri bağlı konfigürasyonlarda eşdeğer relüktans, malzemelerin relüktanslarının toplamıyla bulunur:

$$R_{MRS} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (3.7)$$

Paralel bağlı konfigürasyonlarda ise eşdeğer relüktans Eşitlik (3.8)'deki gibi hesaplanır:

$$\frac{1}{R_{MRS}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (3.8)$$

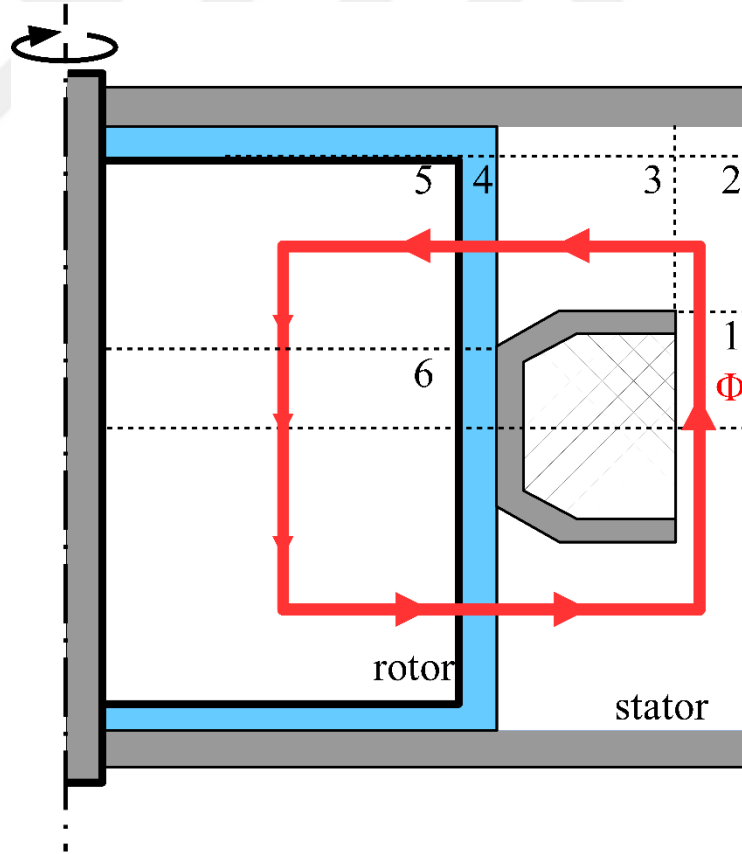
MR frenlerin değerlendirilmesindeki en önemli parametre frenleme torkudur. Frenleme torkunu hesaplayabilmek için MR kanallarda oluşan kayma gerilmesinin bulunması gerekir. Kayma gerilmesindeki büyük etki ise manyetik alana bağlı olan akma gerilmesine aittir. Bu sebeple önce manyetik devrenin analizinin yapılması gerekmektedir.

Manyetik devrenin analizini yapabilmek için Eşitlik (3.1) ve Eşitlik (3.2)'yi çözmek gerekmektedir. Bu çalışmada manyetik devre analizi iki farklı yaklaşımla

çözümüştür. Birinci yaklaşım, belirtilen analitik denklemlerin bazı varsayımlar yapılarak basitleştirilmesiyle elde edilmiştir. Bu yöntemden çalışmanın kalan kısmında İteratif Formülasyon olarak bahsedilecektir. İkinci yaklaşım ise Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanmaktır. Bunun için literatürde sıkça kullanılan bir açık yazılım [57] kullanılmıştır.

3.1 İteratif Formülasyon

MR frenlerin karmaşık geometrilere sahip olması ve malzemelerinin doğrusal olmayan manyetik özelliklere sahip olması sebepleriyle Eşitlik (3.1) ve (3.2)'yi analitik olarak çözmek zor olabilir. Ancak, literatürdeki bazı çalışmalar birtakım basitleştirmeler ve varsayımlar kullanarak sayısal çözümler elde etmiştir [4,8,50]. Bu çalışmada kullanılan İteratif Formülasyon (İF) yöntemi bahsedilen çalışmalara benzerlik göstermektedir. Bu yöntemde önce MR frenin hacmi Şekil 3.1'de görüldüğü gibi elemanlara bölünerek ayrıklaştırılır.



Şekil 3.1 : Kampana tipi MR frenin iteratif formülasyon yöntemi için ayrıklaştırılması.

Ayrıklaştırma yapılırken farklı türden malzemelerin sınırlarından dik çizgiler çizilir. Çizgilerin kapattıkları alanlar ayrılaşmış elemanları gösterir. Manyetik akının bu elemanların her birinin orta noktalarından geçen kapalı bir eğri olduğu varsayılır. Böylece Eşitlik (3.1) ve (3.2) şu formlara basitleştirilir:

$$\sum_{i=1} H_i l_i = NI \quad (3.9)$$

$$B_i A_i = \Phi \quad (3.10)$$

Bu eşitliklerdeki, H_i , i elemanındaki manyetik alan şiddetini; B_i , manyetik akı yoğunluğunu; l_i , uzunluğu; A_i , ise ortalama kesit alanını ifade eder. Ortalama kesit alanı bir elemanın, manyetik akının elemana girdiği ve çıktığı kesit alanlarının ortalaması alınarak hesaplanır. Eşitlik (3.9); elemanların manyetik alan şiddetinin, elemanlar üzerinde manyetik akının geçtiği yol ile çarpımlarının toplamının toplam net akıma eşit olduğunu gösteren doğrusal bir denkleme dönüşmüştür. Eşitlik (3.10) ise aynı yol üzerinde bulunan her bir elemanın sahip olduğu manyetik akının birbirlerine eşit olduğunu ifade eder.

Manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti vektörel büyüklüklerdir. Fren tasarımı aksel simetrik olduğundan bu değişkenlerin r- ve z- bileşenleri vardır. Ancak Şekil 3.1’de görüldüğü üzere manyetik akı yolu belirli bir şekilde çizilmiştir. Örneğin aksel kanallarda manyetik akı hiç çizilmemişken dairesel kanallarda da sadece büyüklüklerin r- bileşeni olacak şekilde çizilmiştir. Bunun sebebi MR akışkanların manyetik geçirgenliğinin, devrede kullanılan diğer malzemelere göre çok düşük (~200 kat) olmasıdır. Bir başka deyişle, bahsedilen kısımlarda manyetik akı yolu uzayacağından (kanal kalınlığının ~10 katı) manyetik alan şiddeti azalır. Bu da genellikle bu alanlarda göz ardı edilebilir manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti olmasına sebep olur. Bu sebeple manyetik akı yolu sadece frenleme torkunu yüksek derecede etkileyebilecek yollar üzerinde çizilmiştir.

Fren yatay eksene göre simetrik olduğundan sadece frenin üst kısmı ayrıklaştırılmış ve numaralandırılmıştır. Üst kısımda elde edilen değerler frenin alt kısmında da kullanılır. Ayrıca frenin yarısı modellendiğinden toplam net akımın da yarısı alınmalıdır. Kampana tipi fren için Eşitlik (3.9) ve (3.10) şu hali alır:

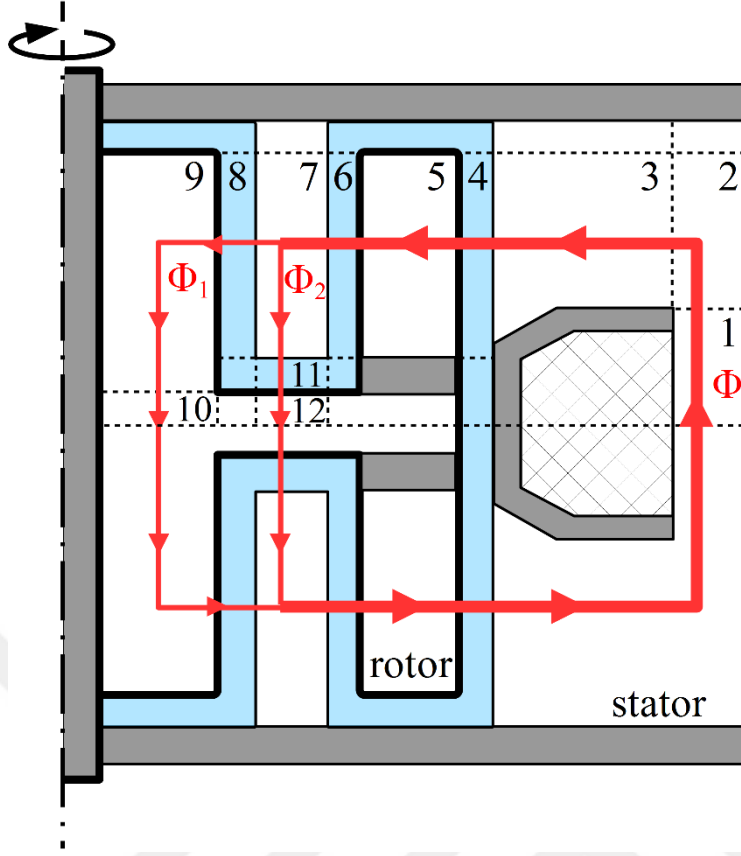
$$\sum_{i=1}^6 H_i l_i = \frac{NI}{2} \quad (3.11)$$

$$B_1 A_1 = B_2 A_2 = B_3 A_3 = B_4 A_4 = B_5 A_5 = B_6 A_6 = \Phi \quad (3.12)$$

Daha önce de bahsedildiği üzere, elemanlar doğrusal olmayan manyetik özellikler sergilemektedirler. Bu sebeple Eşitlik (3.11) ve (3.12)'nin çözümü için doğrudan sayısal yöntem kullanılamamakta; ancak iteratif bir yaklaşımla sonuca ulaşmak mümkün olmaktadır. Bu sebeple yaklaşım İteratif Formülasyon olarak adlandırılmıştır.

Eşitlik (3.11) ve (3.12) çözülerek kampana tipi MR frenin manyetik devre analizi şu şekilde yapılır. Önce elemanlardan birinin manyetik akı yoğunluğunun, farz edelim B_4 , başlangıç tahmini yapılır. Bütün elemanlardaki manyetik akı yoğunlukları, Eşitlik (3.12)'ye B_4 için kullanılan başlangıç tahmini yerleştirilerek bulunur. Sonra, bütün elemanların manyetik alan şiddetleri kendi malzemelerinin manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti arasındaki ilişkiler kullanılarak Eşitlik (3.3)'e göre hesaplanır. Bu değerler Eşitlik (3.11)'e konularak hesaplama yapılır ve sonuç toplam net akıma karşı kontrol edilir. Eğer hesaplanan değer toplam net akımdan az ise başlangıç tahmini arttırılarak, fazla ise azaltılarak hesaplamalar Eşitlik (3.11) sağlanana kadar devam ettirilir. Sonunda devredeki elemanların ortalama manyetik alan yoğunlukları elde edilmiş olur. Torkun hesaplanabilmesi için sadece MR akışkan kanallarındaki manyetik akı yoğunluklarının bilinmesi yeterlidir. Giriş kısmında da bahsedildiği üzere küçük boyutlarda bir fren tasarlanacağından MR akışkan kanallarındaki ortalama manyetik akı yoğunlukları bu çalışma için yeterlidir. Bu sebeple devredeki diğer elemanların manyetik akı yoğunlukları tork hesaplanırken önem arz etmemektedirler. Ancak İteratif Formülasyon ve Sonlu Elemanlar Yaklaşımlarını karşılaştırmak için bu değerler kullanılacaktır.

Bu çalışmada tasarımı önerilen H-tipi MR frenin manyetik akı yolu ve ayrıştırılması ise Şekil 3.2'de gösterilmiştir. H-tipi fren de yatay eksene göre simetrik olduğundan ve hesaplama kolaylığı sağlaması açısından numaralandırma sadece frenin üst kısmında yapılmıştır.



Şekil 3.2 : H-tipi frenin iteratif formülasyon yaklaşımı için ayrıklaştırılması.

Manyetik akı yolu, H-tipi frende iki kola ayrılmaktadır. Kollardaki manyetik akılar Φ_1 ve Φ_2 olarak adlandırılmıştır. Ayrıklaştırmaya göre iki manyetik akı için Eşitlik (3.10) ayrı ayrı şu şekilde dönüşür:

$$B_{7'}A_{7'} = B_8A_8 = B_9A_9 = B_{10}A_{10} = \Phi_1 \quad (3.13)$$

$$B_{7''}A_{7''} = B_{11}A_{11} = B_{12}A_{12} = \Phi_2 \quad (3.14)$$

Manyetik devrenin çözümüne, kampana tipi frende olduğu gibi başlangıç tahminleri yapılarak başlanır. H-tipi rotor için kollara ayrılan manyetik akı yolları üzerinden birer elemanın manyetik akı yoğunluğuna, farz edelim B_{12} ve B_{10} , başlangıç tahmini verilir. Daha sonra Eşitlik (3.13) ve (3.14) kullanılarak Φ_1 ve Φ_2 akı yolu üzerindeki diğer elemanların manyetik akı yoğunlukları hesaplanır. Kullanılan malzemelerin manyetik ilişkilerine göre doğrusal interpolasyon yöntemiyle elemanların manyetik alan şiddetleri hesaplanır. Φ_1 ve Φ_2 akılarının başlangıç ve bitiş noktaları aynı elemanlar üzerinde olduklarından devreden çıktıkları net akım da birbirlerine eşit

olmalıdır. Bu sebeple Eşitlik (3.15)'te hesaplanan net akımlar eşitlenene kadar başlangıç tahminlerinden biri, farz edelim B_{10} , sabit tutulup diğeri, B_{12} , değiştirilir:

$$\sum_{i=7',8,9,10} H_i l_i = \sum_{k=7'',11,12} H_k l_k \quad (3.15)$$

Denklem sağlandığında Φ_1 ve Φ_2 akıları ve bu akılar üzerindeki elemanların ortalama manyetik akı yoğunlukları bulunmuş olur. Dallanan akıların toplamı ana manyetik akıyı, Φ , verir:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (3.16)$$

Eşitlik (3.10), ana akı, Φ , yolu üzerinde bulunan elemanlar için Eşitlik (3.17)'deki gibi basitleştirilir:

$$B_1 A_1 = B_2 A_2 = B_3 A_3 = B_4 A_4 = B_5 A_5 = B_6 A_6 = \Phi \quad (3.17)$$

Eşitlik (3.16)'da bulunan ana akı Eşitlik (3.17)'de yerine konulduğunda devrenin kalan elemanlarının manyetik akı yoğunlukları da hesaplanmış olur. Φ_1 ve Φ_2 akıları üzerindeki elemanların manyetik alan şiddetleri zaten hesaplanmıştı. Ana akı üzerindeki elemanların da manyetik alan şiddetleri doğrusal interpolasyonla hesaplanır. Daha sonra bütün devrenin tükettiği net akım, toplam net akımla karşılaştırılır:

$$\sum_{i=1}^{12} H_i l_i = \frac{NI}{2} \quad (3.18)$$

Eşitlik (3.18) sağlanana kadar, sabit tutulan başlangıç tahmini değiştirilir. Sonunda tüm devredeki elemanların manyetik akı yoğunlukları ve manyetik alan şiddetleri bulunur. Kampana tipi frende olduğu gibi torkun hesaplanabilmesi için MR akışkan kanallarındaki ortalama manyetik akı yoğunluklarının bilinmesi yeterlidir. Belirtilen yaklaşımla da gereken değerler bulunabilmektedir.

3.2 Sonlu Elemanlar - FEMM

Ampere ve Gauss yasalarının yönettiği manyetik devrelerin çözülmesi için literatürde sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS, Maxwell, FEMM (Finite Element Method Magnetics) vb. yazılımlar tercih edilmiştir. Bu çalışmada ücretsiz bir açık kaynak yazılımı olan FEMM tercih edilmiştir [57]. FEMM literatürdeki ve endüstri uygulamalarındaki manyetik devre analizlerinde birçok çalışmada ([12,16,42,43,58]) kullanılmış olup güvenilirliğini kanıtlamıştır.

FEMM, manyetik devrelerde sıklıkla kullanılan malzemelerin manyetik özelliklerini kütüphanesinde barındırır. Bunların arasında düşük karbon çelikleri, bakır, alüminyum ve demir gibi metaller olduğu gibi silikon, kobalt vb. alaşımlar da mevcuttur. MR akışkan gibi özel malzemelerin manyetik özellikleri ise kolaylıkla yazılıma tanımlanabilir. Tanımlama, malzemenin manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti arasındaki ilişki ayrık değerler biçiminde girilerek yapılır. Ayrıca malzemeye ait koersivite, elektrik iletkenliği değerleri de girilir. Özel bir bobin teli kullanılacaksa buna ait katmanlaşma ve tel tipi özellikleri de tanıtılır. Bu çalışmada MRF-132DG akışkanının manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki yazılıma tanıtılmıştır.

FEMM yazılımı kullanıcıya iki farklı kontrol imkanı sağlamaktadır. Birinci yöntemde yazılım, arayüzde bulunan operatörler sayesinde kontrol edilebilir. İkinci yöntem ise arayüzde bulunan bütün operatörleri çalıştıran komutları kullanarak kodlar vasıtasıyla yazılımı kontrol etmektir. Çalışma bir optimizasyon problemi olduğundan ikinci yöntemle kontrol daha kullanıcı dostudur.

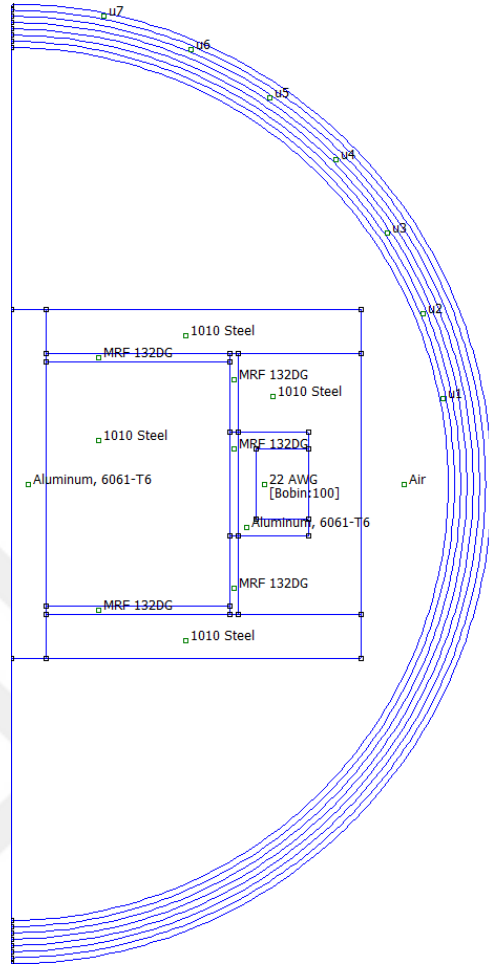
Devrenin analizi FEMM yazılımını ekrana çağıran komutu girmekle başlar. FEMM manyetik analizin yanı sıra elektrostatik ve ısı analizleri de yapabilmektedir. Bu sebeple manyetik devre analizi yapan bir belge açılmak için komut girilir. FEMM artık frenin manyetik devre analizini yapmaya hazırdır. MR frenlerin manyetik devresi aksel simetriktir. Fren boyutu milimetre mertebesindedir. FEMM yazılımında frenin problem tanımı yapılırken manyetik problem, aksel simetri ve milimetre seçenekleri seçilir. Problem tanımındaki diğer parametreler çözücünün doğruluğunu, ağ üreticinin minimum açı kısıtını, frekansı ve alternatif akım için

çözücü tipini ifade eder. Bu parametrelerin varsayılan seçenekleri frenin manyetik devresinin çözümünde yeterli doğruluğu sağladığından değiştirilmemişlerdir.

Fren geometrisi, parametrik olarak ifade edilerek çizilir. Çizgi, dikdörtgen çizme komutları kullanılarak parametrelere göre fren geometrisi Şekil 3.3'teki gibi oluşturulur. Gerçek uygulamada frenin dış kısmı havayla çevrilidir ve sınırlandırılmamıştır. Havayla çevrili bölgeyi modelleyebilmek ise o bölgedeki empedansı modelleyerek olur. Bunun için frenin dış kısmına dairesel kabuklar çizilerek sınır koşulu tanımlanır. MR frende kullanılan malzemeler yazılımın kütüphanesinden çağrılır. MR akışkanın manyetik özellikleri bu aşamada komutla yazılıma tanımlanabilir. Ancak daha öncesinden yazılıma bu özellikler tanımlı kaydedildiği için MR akışkanın özellikleri kütüphanede mevcuttur.

Geometrideki kapalı alanlar birer blok oluşturur. İlgili özelliklerinin tanımlanabilmesi için blokların merkezlerine etiketler yerleştirilir. Her bir blok farklı malzemelerden meydana geldiğinden etiketlerine malzemeleri tanımlanır. Bloklar istenilen şekilde isimlendirilebilir. Blokların ağ yapısı otomatik olarak ya da boyutlarına kısıtlar verilerek tanımlanabilir. Bobinin olduğu bloğa ise ayrıca tel çapı, devreye uygulanan akım ve telin sarım sayısı da tanımlanır. Tel çapı ve uygulanacak akım bu çalışma için önceden seçildiğinden bellidir. Sarım sayısı ise bobinin geometrik özelliklerine ve tel çapına bağlı olarak bulunur. Manyetik devrenin tanımlanması tamamlanmıştır. Hazırlanan belge kaydedilir. Daha sonra ağ yapısı oluşturularak devrenin analizi yapılması sağlanır.

FEMM yazılımı manyetik devre analizinin sonucunu manyetik akı yoğunluğu dağılımıyla gösterir. Blok etiketleri kullanılarak bloklardaki manyetik büyüklüklere ve blokların hacmine ulaşmak mümkündür. MR frende torkun hesaplanabilmesi için gerekli değer MR akışkan kanallarındaki manyetik alan şiddetidir. Manyetik alan şiddetine, MR akışkanın manyetik özellikleri arasındaki ilişkide doğrusal interpolasyon uygulanarak ulaşılır. Manyetik alan şiddeti ile akma gerilmesi arasındaki ilişki kullanılarak da kanallardaki akma gerilmesi değerleri elde edilir. Tork hesaplanırken akma gerilmesi değerinin kullanımı bir sonraki bölümde anlatılacaktır. Bobine ait güç tüketimi, direnç ve voltaj düşümü gibi büyüklüklere de analiz tamamlandıktan sonra yazılımdaki komutlar vasıtasıyla ulaşılabilir.



Şekil 3.3 : FEMM arayüzünde tasarlanılan kampana tipi frenin görünümü.

3.3 Bingham Modeli

MR akışkanlar manyetik alan etkisinde değilken taşıyıcı sıvısının viskoz özelliklerini sergileyerek Newtonyen akışkan olarak davranır. Manyetik alan etkisinde kaldığında ise akışkan, manyetik alan şiddetine bağlı olarak bir akma gerilmesi direnci gösterir. Bu akma gerilmesine bağlı olarak da MR akışkanın görünür viskozitesi artar. MR cihazların kuvvet veya tork performanslarının belirlenmesi için viskozitesinin yüksek doğrulukla belirlenmesi gerekir.

MR akışkanların reolojik özelliklerinin modellenmesinde Bingham modeli sıklıkla kullanılır. Bingham modeli özellikle düşük kesme hızlarında yüksek doğrulukta sonuçlar verdiği için ve diğer modellere göre kolay olmasından Çizelge 2.1'de

görüldüğü üzere birçok çalışmada tercih edilmiştir. Bingham modeli akışkanın kayma gerilmesini iki farklı terimin toplamı ile ifade eder:

$$\tau = \tau_y(B) + \mu_p \dot{\gamma} \quad (3.19)$$

Eşitlikteki ilk terim $\tau_y(B)$ manyetik akı yoğunluğuna bağlı akışkanda oluşan akma gerilmesidir. İkinci terim ise kesme hızına bağlı olarak değişen viskoz etkidir. Bu terim manyetik alandan tamamen bağımsızdır. Viskozite μ_p taşıyıcı sıvının viskozitesidir. Bu değer sıcaklığa bağlı olarak değişse de birçok çalışmada sıcaklık etkisi göz ardı edilir. Çünkü MR akışkanların veri föyünde sıcaklık etkisini gösteren bağıntılar veya şekiller genellikle mevcut değildir. Kesme hızı ise şu şekilde bulunur:

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega r}{d} \quad (3.20)$$

Eşitlikte ω açısal hızı, r yarıçapı, d ise kanal kalınlığını ifade eder. Manyetik alana bağlı akma gerilmesi ve akışkanın viskozitesine ve kesme hızına bağlı terimin de eklenmesiyle akışkanın herhangi bir noktasındaki kayma gerilmesi bulunur. Bu değer MR akışkan kanalları boyunca hesaplanarak torka ulaşılır. Sonraki bölümde frenleme torkunun hesaplanması gösterilmiştir.

3.4 Frenleme Torkunun Hesaplanması

MR fren tasarlayan birçok çalışmada ana performans kriteri frenleme torkunu içerir. Amaç direk torku arttırmak olabileceği gibi; tork yoğunluğu ve tork verimi gibi torku içeren fonksiyonları arttırmak da olabilir. Bu sebeple torkun hassas hesaplanması gerekir.

MR etki disk tipi frenlerde eksenel kanallarda, kampana tipi frenlerde ise dairesel kanallarda gerçekleşir. Diğer fren tiplerinde ise bu kanallardan biri veya ikisi de kullanılır. Torkun hesaplanması eksenel ve dairesel kanallarda farklılık gösterir. Tork kayma gerilmesinin eksenel kanallarda integralinin alınması ile hesaplanır. r_i yarıçapında başlayıp r_o yarıçapına kadar uzanan eksenel kanalda torku hesaplamak için Eşitlik (3.21)'deki gibi integral alınır:

$$\begin{aligned}
dT &= \int r\tau dA = \int_{r_i}^{r_o} r\tau 2\pi r dr = 2\pi \int_{r_i}^{r_o} \tau r^2 dr \\
&= 2\pi \int_{r_i}^{r_o} \left(\tau_y + \mu \frac{\omega r}{d} \right) r^2 dr \\
&= 2\pi \int_{r_i}^{r_o} \tau_y r^2 dr + 2\pi \int_{r_i}^{r_o} \mu \frac{\omega r^3}{d} dr
\end{aligned} \tag{3.21}$$

Küçük boyutlu fren uygulamalarında kanallar içerisindeki manyetik alan büyük değişiklikler göstermez. Bu sebeple manyetik alan ilgili kanalda oluşan manyetik alanın ortalaması alınarak bulunabilir. Böylece akma gerilmesi de sabit bir değer olarak Eşitlik (3.21)'deki integralden çıkarılabilir. Eksenel kanalda tork kanalın başlangıç ve bitiş yarıçapına bağlı olarak aşağıdaki Eşitlik (3.22)'deki gibi elde edilir:

$$T = \frac{2\pi}{3} \tau_y (r_o^3 - r_i^3) + \frac{\pi}{2} \mu \frac{\omega}{d} (r_o^4 - r_i^4) \tag{3.22}$$

h yüksekliğine sahip r yarıçapında yer alan dairesel kanalda torku hesaplamak için Eşitlik (3.23)'teki integral alınır:

$$\begin{aligned}
dT &= \int r\tau dA = \int_0^h r\tau 2\pi r dz = 2\pi r^2 \int_0^h \tau dz \\
&= 2\pi r^2 \int_0^h \left(\tau_y + \mu \frac{\omega r}{d} \right) dz
\end{aligned} \tag{3.23}$$

Ortalama manyetik alan varsayımı burada da yapılırsa dairesel kanallarda tork Eşitlik (3.24)'teki gibi bulunur:

$$T = 2\pi r^2 \tau h = 2\pi r^2 \tau_y h + 2\pi \frac{\omega r^3}{d} h \tag{3.24}$$

Eksenel ve dairesel kanallar barındıran bir frende toplam torkun hesaplanması için kanallarda Eşitlik (3.22) ve (3.24) hesaplanır ve toplanır.

Torktan başka frenin başarımı değerlendirmek için ağırlığa ve güç tüketimine de bakılabilir. Frenin ağırlığını bulmak için frende kullanılan parçaların hacimleri, üretildikleri malzemenin yoğunluğuyla çarpılarak Eşitlik (3.25)'teki gibi toplanır:

$$m = V_{manyetik}\rho_{manyetik} + V_{paramanyetik}\rho_{paramanyetik} + V_{bobin}\rho_{bakır} + V_{MRS}\rho_{MRS} \quad (3.25)$$

Güç tüketimini hesaplamak için tele uygulanan akıma ve bobinde kullanılan telin direncine ihtiyaç vardır. Güç tüketimi akımın karesinin telin direnciyle çarpılmasıyla bulunur:

$$P = I^2 * R_{tel} \quad (3.26)$$

Bobinin direnci ise Eşitlik (3.27) ile hesaplanır:

$$R_{tel} = \frac{\rho_{tel} \cdot l_{tel}}{A_{tel}} \quad (3.27)$$

Eşitlikteki ρ_{tel} , kullanılan telin öz direncini; l_{tel} , telin uzunluğunu; A_{tel} ise telin kesit alanını ifade eder.

Bu bölümde MR frenin manyetik devresinin İF ve SE yaklaşımlarıyla nasıl çözüleceği anlatılmıştır. Manyetik alan şiddeti bilinen devrede Bingham reolojik modeliyle akışkanın kayma gerilmesinin nasıl hesaplanacağı verilmiştir. Frenleme torkunun aksenal ve dairesel kanallarda Bingham modeliyle hesaplanması ayrıntılı şekilde gösterilmiştir. Frenin performansını gösteren ağırlığı ve güç tüketiminin de hesapları paylaşılmıştır.

3.5 MR Frenlerin Deneysel İncelenmesi

3.5.1 Histerisiz karakteristiği

Histerisiz kelime olarak gecikme anlamına gelir. Fizik, kimya, mühendislik vb. birçok alanda histerisiz davranışla karşılaşılabilir. Ancak bu alanlarda gecikmenin ne olduğunun daha iyi ifade edilmesi gerekir. Histerisiz bir sisteme verilen girişlerden sonuncusunun tepkisinin, sistemin geçmişteki durumuna bağlı olarak gecikmesidir. Histerisiz barındıran sistemlerde, sistemin tepkisinin tahmin edilebilmesi için,

sistemin o andaki durumuyla beraber geçmişindeki durumunun da bilinmesi gerekir. MR cihazlar bobinin manyetik alan oluşturmaya tahrik edilir. Uygulanan manyetik alan kaldırıldığında devrede halen artık manyetik alan bulunur. Bu da MR cihazların histerisiz davranış sergilemesine sebep olur.

Birçok çalışma MR frenlerin histerisiz davranışlarını incelemiştir. Histerisizi gözlemek için bobine farklı yaklaşımlarla akım uygulanmaktadır. Birinci yaklaşım, bobine teker teker farklı akımlar uygulanır ve kaldırılır. İkinci yaklaşım, akım rampa giriş şeklinde maksimum değere kadar artırılır ve aynı şekilde azaltılarak kaldırılır. Üçüncü yaklaşımda akım basamaklar halinde maksimum değere kadar artırılır ve yine basamaklar halinde azaltılarak kaldırılır.

3.5.2 Zaman sabiti / Basamak giriş

Birinci derece doğrusal zamanla değişmeyen sistemlerin ana karakteri zaman sabitidir. Zaman sabiti, belirtilen sistemlerin basamak girişe cevaplarının incelenmesiyle bulunur. Şekil Şekil 3.4'te verilen kapalı devre kontrol sistemini ele alalım. Burada $\frac{1}{\tau_z s}$ açık devre transfer fonksiyonu birim negatif geri bildiri ile bağlanmıştır. Bu sistemin transfer fonksiyonu Eşitlik (3.28)'de verilmiştir.

$$H(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \quad (3.28)$$

$G(s) = \frac{1}{\tau_z s}$, Eşitlik (3.28)'de yerine konulursa, sistemin transfer fonksiyonu

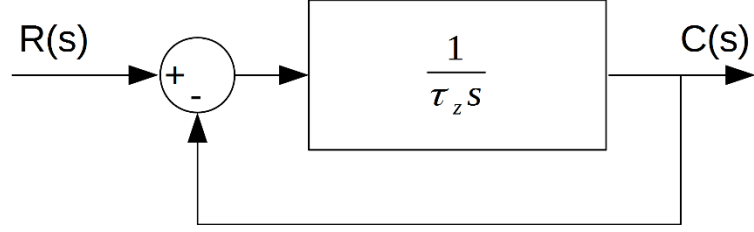
$$H(s) = \frac{1}{\tau_z s + 1} \quad (3.29)$$

şeklinde elde edilir. Bu sistemin, $R(s) = \frac{1}{s}$, basamak girişe cevabı Eşitlik (3.30)'daki gibi olur:

$$C(s) = \frac{1}{s(\tau_z s + 1)} \quad (3.30)$$

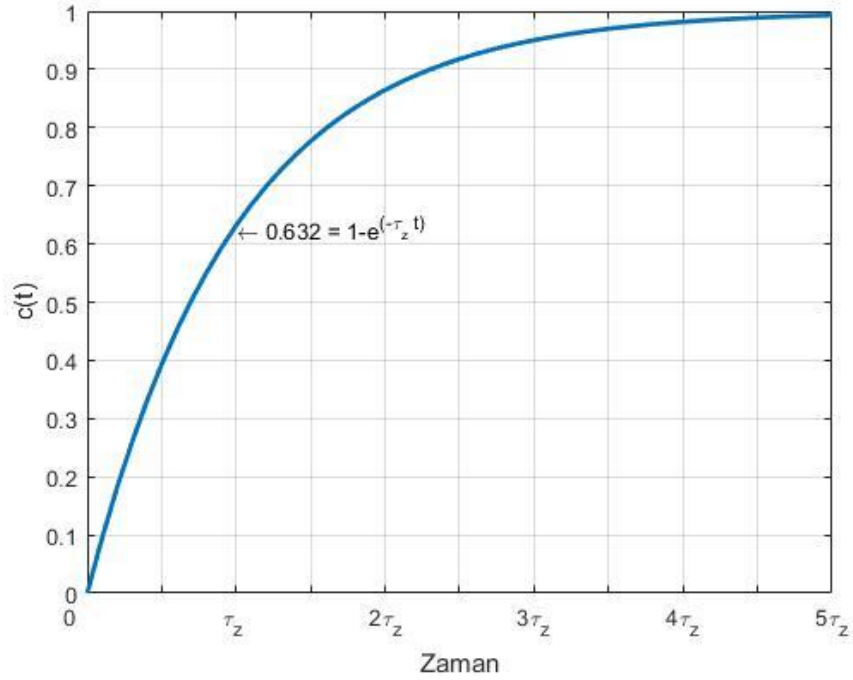
Eşitlik (3.30)'te verilen cevabın kısmi kesirlerle ayrıştırılarak ters Laplace dönüşümü alındığında, sistemin zamana bağlı cevabı Eşitlik (3.31)'deki gibi bulunur.

$$c(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_z}}\right) u(t) \quad (3.31)$$



Şekil 3.4 : Birinci derece zamanla değişmeyen sistem örneği.

Eşitlik (3.31)'deki τ_z zaman sabiti olarak adlandırılır. Sistem cevabı Şekil 3.5'te görüldüğü gibi asimptotik olarak son değerine ulaşır. Zaman sabiti ise; cevabın, son değer %63.2'sine ulaştığı süreyi ifade eder.



Şekil 3.5 : Birinci derece sistemin basamak giriş cevabı.

MR cihazların zaman sabitini denetleyici, bobinin indüktansı, atalet kuvvetleri ve MR akışkan gibi birçok parametre ve bileşen etkileyebilir. Haptik uygulamalar gibi uygulamalarda cihaz boyutu küçük olduğundan, zaman sabiti büyük oranda elektromanyetik devre tarafından belirlenmektedir. Bu sebeple birinci derece sistemleri

ifade etmede kullanılan zaman sabiti MR cihazların tepki süresi hakkında fikir sahibi olmak için kullanılabilir [59].

Kavlicoglu vd. [59] bu konudaki en kapsamlı çalışmayı yapmıştır. Tepki süresinin akıma ve açısal hıza da bağlı olduğunu göstermiştir. Bu iki değişkenin artmasıyla tepki süresinin düştüğünü belirtmiştir. Tasarladığı MR cihazda bilgisayar, kontrolcü, kavrama ve MR akışkanının toplam tepki süresinin akıma ve açısal hıza bağlı olarak 20-65 ms arasında değiştiğini belirtmiştir.

Nam vd. [15] iki farklı fren için aynı dönme hızında farklı akımlarla basamak girişi incelemiş, zaman sabitlerini 42 ve 33 ms olarak bulmuştur. Ancak hangi akım değeri için bu sonuçlara ulaştığını belirtmemiştir.

Nam ve Ahn [14] farklı akımlar için basamak giriş cevaplarını incelemiş, 400 milisaniyede torkun %82'sine ulaştığını, 200 ms'de başlangıç değerine döndüğünü belirtmiştir. Ancak basamak giriş cevapları incelendiğinde başlangıç değere dönüşte histerisiz davranış göze çarpmaktadır. Ayrıca verilen zaman değerlerinin hangi akımı/akımları temsil ettiği bildirilmemiştir.

Nam ve Ahn [60] iki farklı dönme hızında farklı akımlarla basamak giriş cevapları için deneyler yapmış, ancak zaman sabiti hakkında bilgi vermemiştir.

Bunların dışındaki çalışmalar ise şöyledir: Rossa vd. [12] 50 ms, Shiao vd. [61] 70 ms olarak ölçmüştür [61]. Senkal ve Gurocak [29] farklı akımlarda basamak giriş uygulaması da 0.75 A'deki cevabın 60 ms zaman sabitine sahip olduğunu bildirmiştir [29].

3.5.3 Frekans cevabı

Frekans cevabı bir sistemin bir uyarıya verdiği cevabın nicel ölçümüdür ve sistem dinamiğini karakterize etmek için kullanılır. Cevabın girişe göre büyüklük ve faz farkı frekansa bağlı olarak gösterilir. Eğer doğrusal bir sisteme sinüs dalgalı bir giriş uygulanırsa, sistem aynı frekansta belli bir büyüklükte ve giriş sinüs dalgasına göre belli bir gecikmeyle cevap verir. Giriş dalgasının genliği iki katına çıkarılırsa cevap da iki katına çıkar. Giriş sinüs dalgasında bir gecikme eklenirse cevap da aynı oranda gecikir. Zamanla değişmeyen sistemlerde frekans cevabı zamanla değişmez. Bu

sebeple zamanla değişmeyen bir doğrusal sistemin frekans cevabı bilinirse eyleyici tasarımı kolaylaşır.

Nam ve Ahn 0.8-1.7 rad/s frekans aralığında voltaja bağlı bir sinüzoidal giriş vermiştir. Frekans arttıkça büyüklükte keskin düşüş olduğunu göstermiştir [14]. Nam ve ve Ahn 0.2-1.9 rad/s frekans aralığında akıma bağlı bir sinüzoidal giriş vermiştir. Frekans arttıkça büyüklükte keskin düşüş olduğunu bildirmiştir [60]. Nam vd. 1-100 rad/s frekans aralığında akıma bağlı sinüzoidal giriş uygulamıştır. Frenlerinin birinci derece sistemler gibi cevap verdiğini göstermiştir [15].

3.5.3.1 Ayrık Fourier Dönüşümü

Fourier sınırlı bir aralıkta tanımlanan herhangi bir fonksiyonun Fourier serileri ile ifade edilebileceğini ortaya koymuştur [62]. Fourier'in araştırmalarının geliştirilmesiyle Fourier dönüşümü oluşturulmuştur. Fourier dönüşümü; bir fonksiyonu veya sinyali, sinüs ve kosinüs dalgalarıyla şekillenen bir biçime dönüştürür. Dönüşüm sonunda sinyal, farklı genlik, frekans ve fazlarda sinüs ve kosinüs dalgalarının bileşkesi olarak ifade edilir. Dönüşüm herhangi bir dalga formunu çevirmekte kullanılabilir olsa da titreşim ve salınım gibi periyodik olayları yorumlamada daha faydalıdır. Fourier dönüşümü dalga formunu zaman uzayından frekans uzayına Eşitlik (3.32)'yi kullanarak taşır:

$$\hat{F}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2\pi it\xi} dt \quad (3.32)$$

Üstel ifade ile sinüs ve kosinüs arasındaki bağıntı ise Euler formülü kullanılarak hesaplanabilir:

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x \quad (3.33)$$

Eşitlik (3.32)'de frekans uzayındaki bilgiler fonksiyonun içerisindeki baskın frekansları bulmakta kullanılır. Ancak günlük hayattaki uygulamaların birçoğunda sinyaller kesikli zaman aralıklarındaki değerlerden oluşmaktadır. Bu durumlarda sinyal ayrık frekanslardaki sinüs dalgalarının serisi halinde ifade edilir. Bu frekanslar temel frekansın tam sayı katlarından oluşur. N karmaşık sayıdan oluşan x_n dizisi için ayrık Fourier dönüşümü Eşitlik (3.34)'te verilmiştir:

$$\widehat{X}_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn} \quad (3.34)$$

k 'nci frekans, x_n dizisiyle açıkça şöyle hesaplanır:

$$\widehat{X}_k = x_0 e^{-b_0 i} + x_1 e^{-b_1 i} + \dots + x_n e^{-b_n i}; \quad b_n = \frac{2\pi kn}{N} \quad (3.35)$$

Eşitlik (3.33), Eşitlik (3.35)'te yerine konulursa, \widehat{X}_k

$$\widehat{X}_k = x_0 [\cos -b_0 + i \sin -b_0] + \dots \quad (3.36)$$

şeklinde bulunur. \widehat{X}_k içerisindeki her bir frekans ise ayrı ayrı iki sabit kullanılarak ifade edilebilir:

$$X_j = A_j + B_j i; \quad j = 0:k \quad (3.37)$$

Karmaşık X_j sayısı, karmaşık uzayda çizilirse vektörün boyutu ve açısı hakkında bilgi sahibi olunur. Vektörün boyutu, frekansın büyüklüğünü:

$$M = \sqrt{A_j^2 + B_j^2} \quad (3.38)$$

açısı ise faz farkını verir:

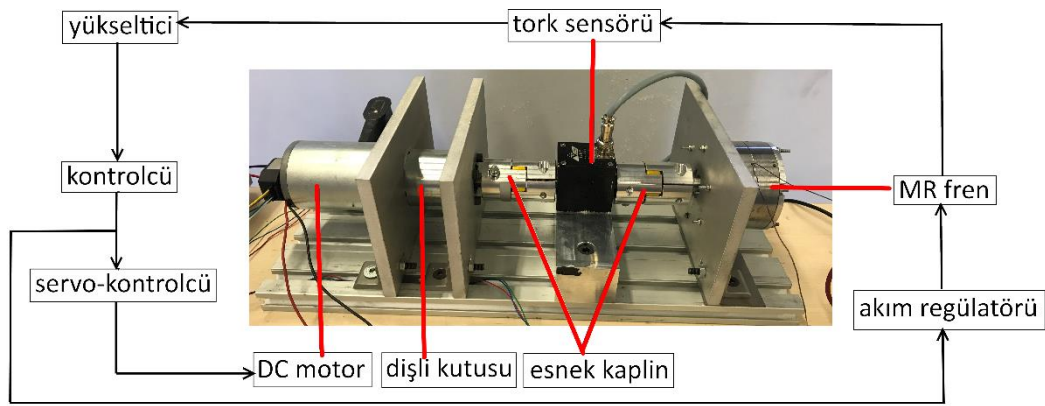
$$\phi = \tan^{-1} \frac{B_j}{A_j} \quad (3.39)$$

Frekans bölümünde belirtilen frekans cevabının oluşturulabilmesi için deney sonuçlarının girdi sinyallere göre genlik ve fazlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bunların belirlenmesi için Ayrık Fourier Dönüşümü kullanılacaktır.

3.5.4 Deney düzeneği

Deney düzeneği Şekil 3.6'da verilmiştir. MR fren, tork sensörü DC motor şaftları esnek kaplinler kullanılarak bağlanmıştır. National Instruments (NI) PCI-6221 çok fonksiyonlu I/O aygıtı kontrolcü olarak kullanılmıştır. Düzenekteki elemanlara bağlantı ise NI SCB-68A devre kartı üzerinden yapılmıştır. Dunkenmotoren 63GR

fırçalı DC motoru şaftı hareket etmek için kullanılmıştır. Motora bağlı dişli kutusu 1/50 redüksiyon oranına sahiptir. Böylece motor 80 rpm hız ve 7 Nm tork sağlayabilmektedir. Motorun kontrolü ESCON 50/5 servo-kontrolcü aracılığıyla sağlanmıştır. MR frenin bobinine akım ise LORD firmasının kontrol kitiyle verilmiştir. Kontrol kiti BNC terminalinden kontrol edilmiştir. Kit 2 A akım sağlayabilmektedir. Tork ölçümü için 10 Nm torka kadar ölçüm yapan CD1095 dinamik döner tork sensörü kullanılmıştır. Tork sensörünün ölçtüğü değer FUTEK model CSG110 yükseltici ile yükseltilmiştir. Ölçümler ileri-işleme için kontrolcüde depolanmıştır.



Şekil 3.6 : Deney düzeneği.

Deneyle başlanmadan önce tork sensörünün kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bunun için Şekil 3.7’de gösterilen düzenek kurulmuştur. Kalibrasyon için kütleleri bilinen ağırlıklar tork sensörünün şaftına bağlı bir çubuğa asılmışlardır. Saat yönünde (SY) ve saat yönünün tersinde (SYT) ağırlıksız durumdan başlanarak tork sensörünün tam ölçeğine kadar önce ağırlıklar arttırılarak asılmış; sonra aynı sırayla kaldırılmışlar ve ağırlıksız duruma dönmüştür. Kalibrasyon için asılan ağırlıklara karşılık gelen tork değerleri ve tork sensöründen okunan voltaj değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bu değerlere En Küçük Kareler Yöntemi (Least Square Method) uygulanarak Eşitlik (3.40)’ta verilen eğriler elde edilmiştir:

$$\begin{aligned} T &= 0.9924 V - 0.0178; SY \\ T &= 0.9973 V + 0.0410; SYT \end{aligned} \quad (3.40)$$



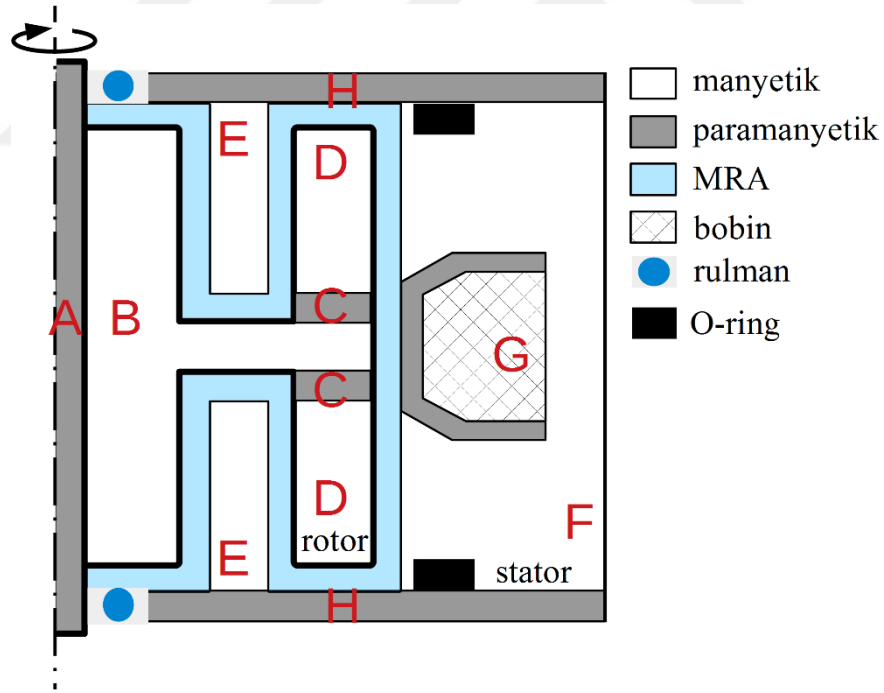
Şekil 3.7 : Tork sensörü kalibrasyonu için kullanılan düzenek.

Çizelge 3.1 : Tork sensörü kalibrasyonunda uygulanan tork değerleri ve tork sensöründen okunan değerler.

Uygulanan Tork [Nm]	SY'de okunan değer [V]	SYT'de okunan değer [V]
0	0.00	0.00
1.78	-1.87	1.84
3.87	-3.95	3.93
5.07	-5.13	5.10
6.17	-6.24	6.24
9.46	-9.49	9.55
6.17	-6.22	6.26
5.07	-5.13	5.08
3.87	-3.93	3.93
1.78	-1.85	1.84
0	0.00	0.00

4. H-TİPİ MR FREN TASARIMI

Bu çalışmada yüksek tork yoğunluğuna sahip bir MR fren tasarımı hedeflenmiştir. Bu sebeple, tasarıma yapılan müdahaleler frenleme torkunu arttırmaya, hacmi azaltmaya yöneliktir. Bu çalışmada önerilen frenin aksel simetrik geometrisi Şekil 4.1’de görülebilir. Bu fren çoklu silindir kullanılarak tasarlanmıştır. Çoklu silindir kullanımının silindirlerin buldukları yarıçapların karesi ile orantılı olarak eklenerek torka katkı yapması beklenilmektedir. Hem aksel hem dairesel kanallarda MR etki oluşturmasından hibrit yapılı bir frendir. Rotorun şeklinin aksel simetrik görünümde “H” harfine benzemesinden H-tipi MR fren olarak adlandırılmıştır.



H-tipi MR fren stator, rotor ve bu ikisinin arasına doldurulan MR akışkandan oluşur. H-tipi rotor altı parçadan oluşur. Bunlardan birincisi merkezdeki “A” ile gösterilen rotor şaftıdır. Şafta, göbek kısmından dairesel olarak dışarı doğru uzanan bir kısım

sahip olan manyetik bir parça (B) bağlıdır. Rotorun dış kısmına önce koyu renkte gösterilen paramanyetik malzemeden oluşturulan bilezikler (C) bağlanır. Bunların üst kısmına ise manyetik malzemeden oluşturulan bilezikler (D) bağlanır. Manyetik malzemeden oluşturulan bilezikler, paramanyetik malzemeden oluşturulan bileziklere göre daha uzundur. Statorun üstteki ve alttaki kısmındaki disk şeklindeki koyu renkte gösterilen parçalar (H) manyetik akı çizgilerinin fren içerisinde durmasını sağlamak amacıyla paramanyetik malzemeden yapılmıştır. Bu iki parçanın şaftla bağlantısı için rulmanlar kullanılacaktır. Bu parçalara bağlı üstten bir alttan bir tane olmak üzere toplam iki tane manyetik malzemeden oluşturulan bilezikler (E) vardır. Bu parçalar rotora açılan kanallara girecek şekilde konumlandırılmıştır. Statorun ortasında ve dairesel olarak en dıştaki kısmı ise bobinden (G) ve onu sarmalayan manyetik malzemeden oluşturulan parçalardan meydana (F) gelir. Bobin etrafı MR akışkana komşu kısmı paramanyetik bir parçadan üretilmiştir.

H-tipi frenin bir başka getirisi de rotorunun düşük atalet kuvvetine sahip olmasıdır. Statora bağlı manyetik malzemelerin geçebilmeleri için rotora açılan kanal buna sebep olur. Ataletin küçük olması özellikle haptik sistemlerde arzulanan sistemin şeffaflığına katkı sağlar.

H-tipi fren hem küçük hem de büyük yarıçaplarda yer alan MR akışkan kanallarına sahiptir. Daha yüksek tork elde etmek için her kanalda yüksek manyetik akı yoğunluğu elde etmek gerekmektedir. Ancak manyetik akı kendisine en az manyetik direnci gösteren yolu tercih eder. Bu sebeple bobinin hemen çevresinde yüksek manyetik akı çizgileri yer alırken bobine uzak kısımlarda daha düşük manyetik akı çizgileri yer almaktadır. Bu tasarımda yüksek manyetik akı çizgilerinin bobinin hemen çevresinde yoğunlaşmaması için rotora paramanyetik bilezikler (C) yerleştirilmiştir. Paramanyetik bilezikler manyetik direnci artırarak manyetik akı yolunun değişmesine sebep olur. Böylece yüksek manyetik akı çizgilerinin sadece bobini çevreleyen kısımda değil şafta yakın iç kısımlarda da bulunması sağlanır.

Bobinin kanala yakın kenarları paramanyetik malzeme ile korunmuştur. Böylece bobinden çıkan manyetik akının tüm freni dolaşarak bobine tekrar dönmesi amaçlanır. Ayrıca MR akışkanın bobini doldurması da engellenir. Ancak bu da bobine komşu olan kanalın bir kısmındaki MR akışkandan yararlanılamamasına

neden olur. Bu kanalda daha fazla MR akışkanının MR etkide kalması için bobinin kanala yakın kısmı eğik olarak tasarlanmıştır.

Frende kullanılan malzemeler seçilirken literatür araştırmasındaki bulgulardan faydalanılmıştır. Bobinde kullanılan manyetik malzemeler AISI 1010 düşük karbon çeliğinden oluşturulmuştur. Paramanyetik malzemeler için ise 6000 serisi alüminyum kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalar da manyetik malzeme olarak düşük karbon çeliklerinden; paramanyetik malzeme olarak alüminyum ve paslanmaz çelikten faydalanmıştır. MR akışkan olarak MRF-132DG seçilmiştir çünkü literatür araştırması bu akışkan kullanılan cihazların daha yüksek tork ürettiğini ve çökme açısından da iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Bobin teli 22 AWG 0.65 mm çaptaki tel seçilmiştir. Tel ayrıca 0.05 mm kaplamayla beraber 0.7 mm çapa sahiptir. Tele uygulanabilecek maksimum akım 1.5 A ile sınırlıdır. Sarım sayısı bobin için ayrılan geometriye %80 paketleme oranı düşünülerek hesaplanmıştır. Bobin telinin çapı seçilirken, MR akışkanı doygunluğa yakın sınırlarda çalıştırmak hedeflenmiştir. Bu sebeple hem yüksek sarım sayısını sağlayabilecek yarıçapa sahip hem de yüksek akımda çalışabilecek 22 AWG tel seçilmiştir.

Bu çalışmada açıl hız olarak 80 rpm seçilmiştir. Maksimum fren yarıçapı 40 mm ve kanal kalınlığı da 0.5 mm olduğuna göre kesme hızının teorik maksimum değeri Eşitlik (3.20)'ye göre 672 s^{-1} olarak hesaplanır. Bu kesme hızı değerinde Bingham modelinin MR akışkanı istenilen doğrulukta modellediği söylenebilir.

Çalışmada frenin manyetik devre boyutları 40 mm yarıçapla ve 40 mm yükseklikle sınırlandırılmıştır. Frenin montajının civatalar kullanılarak yapılması hedeflendiğinden parçaların geometrik alt sınırları civatalara uygun olarak seçilmiştir. Bu sebeple parçaların et kalınlıkları 5 mm'den kısa olamaz. Kanal yarıçapı da 0.5 mm olarak kararlaştırılmıştır. Şaftın çapı 8 mm olarak belirlenmiştir.



5. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU

MR frenlerde kullanılan malzemeler doğrusal olmayan manyetik özelliklere sahip olduğundan en uygun frenin tasarlanması için optimizasyona ihtiyaç duyarlar. Optimizasyon çalışmaları MR frenin torkunu, tork yoğunluğunu, tork kütle oranını arttırmak için yapılabileceği gibi dinamik aralığını genişletmek, güç tüketimini azaltmak için de yapılabilir. Amaç fonksiyonunun tekil veya çoğul olmasına göre tekil amaç veya çoğul amaç optimizasyon çalışması yapılabilir.

MR fren optimizasyon çalışmaları birçok yerel optima içerir. Bu sebeple seçilen algoritmanın global optimum değerini bulması önemlidir. Ayrıca MR frenlerin tork hesabı doğrusal olmayan fonksiyonlarla hesaplandığından algoritmanın bu hususa da uyum sağlaması gerekir. Bunların dışında algoritmanın kısa sürede sonuca ulaşması istenir. Tasarlanan MR fren birçok geometrik kısıtlamaya da sahiptir. Bu sebeple algoritma kısıt yönetmeye de uygun olmalıdır.

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) sosyal etkileşim modelinin benzetimi yapılırken Kennedy ve Eberhart [6] tarafından geliştirilen dağıtılmış davranışsal bir algoritmadır. PSO geliştirilirken kuşların toplanma ve balıkların sosyal bir amaçla beraber hareket etmelerinden (fish schooling) ilham alınmıştır. Benzetim yapılırken Heppner ve Grenander'in kuş sürülerinin mısır tarlasını arama süreçleri üzerine yaptığı çalışmalardan faydalanılmıştır [63]. Bu çalışmada çok sayıda kuşun bir anda sürü oluşturmaları, senkronize bir biçimde sık sık ve aniden yön değiştirmeleri, saçılmaları ve yeniden gruplanmalarının altında yatan sebepleri araştırılıyordu. Hücresel otomasyonla (Cellular Automata) modellenen bölgesel süreçlerin (Local processes) kuşların bu öngörülemez sosyal davranışının sebebi olabileceğini düşündüler. Böylece, bu grupların bireysel üyelerinin yiyecek arayışı sırasında, diğer tüm üyelerin geçmiş keşiflerinden faydalanabileceğini söylediler. Bu ise yiyecek kaynakları arazide dağılmış vaziyetteyken üyelerin rekabete girmesini engelleyen bir

karar mekanizmasıdır. Bu evrimsel avantaj, PSO'nun geliştirilmesinde temel olmuştur.

PSO algoritması doğrusal olmayan sürekli fonksiyonları çözmek için kullanılır. Programlaması çok basittir. Algoritmanın akışı kolayca anlaşılabilir. Basit matematiksel operatörler kullanılarak kodlanabilirken, hafıza gereksinimleri ve hız açısından da bilgisayara fazla yük olmazlar. Birçok yerel optima barındıran problemlerde global optimuma ulaşmıştır. Çoklu amaç optimizasyonu için de uygundur. Algoritma daima daha iyi sonuçlara doğru taramayı sürdürür.

PSO algoritmasında kuşlar, konumları ve hızları olan parçacıklar olarak tanımlanır. MR frenin tasarım değişkenleri parçacıkların konumlarında depolanır. Hız değeri ise konumun iterasyonla nasıl değişeceğini belirlemek için kullanılır. Başlangıç durumunda parçacıklar konumlara rastgele dağıtılır. Parçacık sayısı tasarım değişkenlerinin sayısının 10 katı olacak şekilde belirlenir. Parçacıkların hızları ise sıfır olarak tanımlanır. Maliyet fonksiyonu her konumda değerlendirilir. Her parçacık kendi maliyetini hafızasında tutar. İterasyon aşamasında ise parçacıklar hafızalarındaki maliyetin durumuna göre optimum konumu günceller. Bütün parçacıkların maliyeti hesaplandıktan sonra sürüdeki optimum maliyet, global optimum maliyet olarak ilgili pozisyonla beraber kaydedilir. İterasyon yapılması için hızlar şu şekilde hesaplanır:

$$v_i^{k+1} = w \times v_i + c_1 \times r_1 \times (pbest_i - p_i) + c_2 \times r_2 \times (gbest_i - p_i) \quad (5.1)$$

Bu denklemde w atalet ağırlığı; c_1 ve c_2 pozitif sabitler; r_1 ve r_2 ise sıfır ve bir arasında rastgele numaralardır. Pozitif sabitler öğrenme katsayıları olarak da adlandırılır. Eşitlik (5.1)'deki sabitler sayesinde parçacıkların sürü gibi davranmasını sağlamaktadır. Sürü gibi davranış için parçacığın çevresindeki değişime cevap verebilmesi, arayışını dar bir alanda takılıp yapmaması, çevresindeki küçük değişimlerde kendi konumunda büyük değişikliğe aniden gitmemesi, ancak büyük değişimlerde ise uyumlu davranması gerekir. Bu sebeplerle sabitlerin de büyüklükleri farklıdır. Atalet ağırlığı, öğrenme katsayılarından çok daha büyük ağırlığa sahiptir. Yeni hız değeri hesaplanırken; eski hız değeri yüksek ataletle sahip

olarak kullanılır. Bu değere; parçacığın kendi bireysel optimum konumuna uzaklığı ve global optimum konumuna uzaklığı düşük etkilerle eklenir. Bireysel optimum konum bireysel hafızada basit nostaljiyi temsil eder. Global optimum konum ise tüm parçacıkların ulaşmayı hedefledikleri bir sürüye açık bilgiyi temsil eder. Böylece parçacık optimum konuma ulaşmak için nasıl bir yol izlemesine karar verir ve yeni hız değeri elde edilmiş olur. Bu hız değeri kullanılarak yeni konum ise Eşitlik (5.2)'deki gibi bulunur:

$$p_i^{k+1} = p_i^k + v_i^{k+1} \quad (5.2)$$

Yeni hesaplanmış hız değeri, parçacığın eski konumuna eklenerek yeni konum değeri elde edilir. Algoritma bir iterasyon içerisinde her bir parçacık için önce hız sonra konum değerini hesaplar. Konum değeri maliyet fonksiyonunda değerlendirilir. Hesaplanan maliyet, parçacığın bireysel hafızasındaki optimum maliyetten daha iyi ise parçacık bu değeri bireysel optimum maliyeti olarak konumu ile kaydeder. Bütün parçacıklarda bu işlem yapıldıktan sonra global optimum maliyet değeri belirlenir. Bu değer de sürünün eski global optimum maliyetinden daha iyi ise global optimum maliyet ve ilgili konum kullanılarak güncellenir. Optimizasyon çalışması bu şekilde devam eder. Ancak, analizi yapılacak frenler bazı geometrik kısıtlara sahiptir. PSO algoritması kısıtsız optimizasyon problemleri için geliştirildiğinden bir kısıt yönetme yöntemine ihtiyaç duyulur.

PSO tarzı genetik algoritmaları kısıtlı optimizasyon problemleri çözmeye kullanıldığında kısıt yönetmek büyük bir endişe oluşturur [8]. Bu algoritmalarındaki kısıtları yönetmede en yaygın yöntem olarak ceza ve onarım yöntemleri kullanılır. Ceza yönteminde uygun ceza değeri seçmek bir problem teşkil etmektedir. Onarım yöntemi ise probleme bağlı zaman tüketen bir yöntem olarak anılır. Bu çalışmada kısıt yönetmek için gradyan temelli kısıt yönetme yöntemi [64] kullanılmıştır. Bu yöntem, uygun olmayan çözümleri sistematik olarak onarmak için kısıtlardaki gradyan bilgidan yararlanır. Gradyan bilgi, kısıtların açık ifadelerinden veya sonlu farklar yöntemi yaklaşımlarından faydalanılarak elde edilir.

PSO algoritmasıyla hesaplanan parçacıkların konumları kısıtları ihlal ederse gradyan temelli kısıt yönetimi yöntemiyle uygun hale getirilir. Onarım yöntemi probleme ait eşitsizlik (\vec{g}) ve eşitlik (\vec{h}) kısıtlarını bir \vec{V} vektöründe toplar:

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} \vec{g} \\ \vec{h} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Kısıtların konumlara göre türevleri belirlenir:

$$\nabla_{\vec{p}} \vec{V} = \begin{bmatrix} \nabla_{\vec{p}} \vec{g} \\ \nabla_{\vec{p}} \vec{h} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Ancak MR fren tasarımında kullanılan boyutlar bir fonksiyonun değerleri değil, ayrık elemanlardır. Bu sebeple süreksiz fonksiyon olarak değerlendirilirler. Süreksiz fonksiyonlar içinse ileri sonlu farklar yaklaşımı kullanılır:

$$\nabla_{\vec{p}} \vec{V} = \frac{1}{e} \begin{bmatrix} \vec{g}(\vec{p}|p_i = p_i + e) - \vec{g}(\vec{p}) \\ \vec{h}(\vec{p}|p_i = p_i + e) - \vec{h}(\vec{p}) \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Görüldüğü gibi, kısıtların türevleri kare matris oluşturmayabilir. Bu durumlarda matrisin tersi Moore-Penrose (yalancı ters) kullanılarak hesaplanır. Kısıtların ihlali ve konum vektörünün hata miktarı ilişkisi şu şekildedir:

$$\Delta \vec{V} = \nabla_{\vec{p}} \vec{V} \times \Delta \vec{p} \quad (5.6)$$

Konum vektörünün hata miktarı, kısıtların türevi ve kısıt ihlallerinin büyüklüğü (degree of constraint violation) kullanılarak şu şekilde hesaplanır:

$$\Delta \vec{p} = \nabla_{\vec{p}} \vec{V}^{-1} \times \Delta \vec{V} \quad (5.7)$$

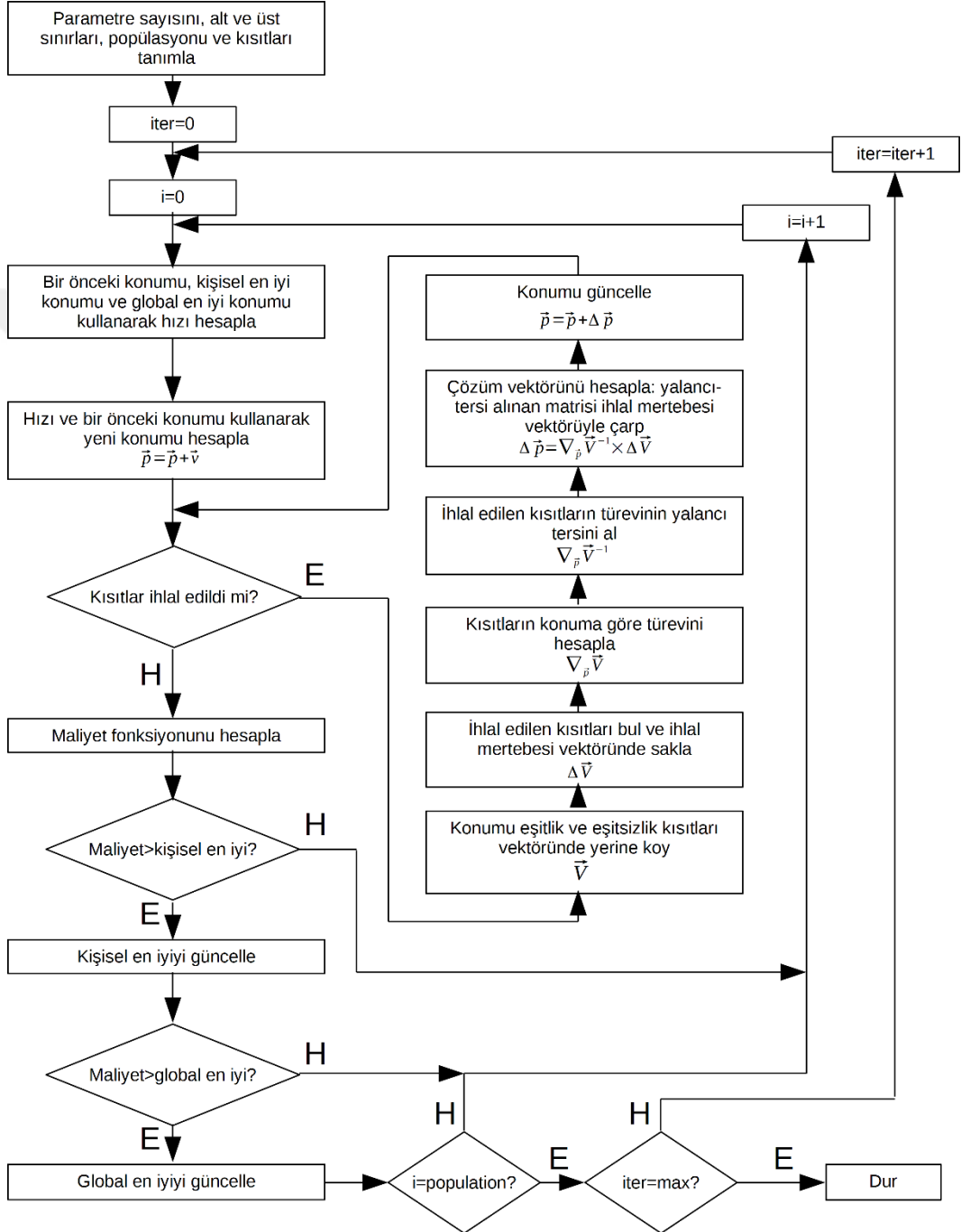
Kısıt ihlallerinin büyüklüğü, eşitsizliklerin alt (\vec{l}) ve üst (\vec{u}) sınırlarının ve eşitliklerin sağ tarafındaki değerler (\vec{c}) kullanılarak hesaplanır:

$$\Delta \vec{V} = \begin{bmatrix} \min\{0, \vec{u} - \vec{g}(\vec{p})\} + \max\{0, \vec{l} - \vec{g}(\vec{p})\} \\ \vec{h}(\vec{p}) - \vec{c} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Bu matris Eşitlik (5.9)'a konularak kısıtları ihlal eden konum sınırlara tekrar entegre edilir:

$$\vec{p}^{n+1} = \vec{p}^n + \Delta \vec{p} \quad (5.9)$$

Kısıtların sayısına bağlı olarak, entegrasyon işlemi birkaç iterasyon sürebilir. Konum sınırlara riayet ettiğinde PSO algoritmasının devamı sağlanarak maliyet hesapları yapılır. Bütün optimizasyon çalışmasının akış şeması Şekil 5.1’de verilmiştir. Çalışmamızda art arda beş iterasyon boyunca tork yoğunluğunda fark olmaması sağlandığında algoritmanın sonlanmasına karar verilmiştir.



Şekil 5.1 : Optimizasyon algoritması akış şeması.



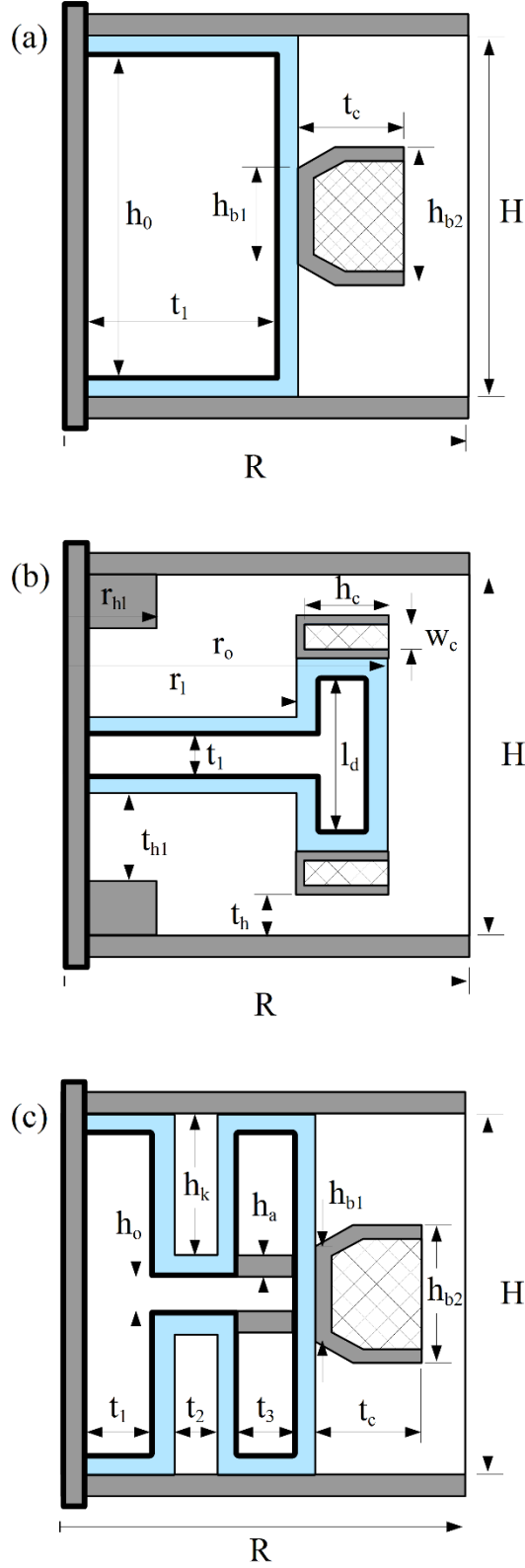
6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölüm iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda İteratif Formülasyon ve Sonlu Elemanlar Yaklaşımları kullanılarak manyetik devreleri çözülen, analitik denklemlerle ve Bingham plastik modeliyle frenleme torkları hesaplanan, gradyan temelli kısıt yönetme tekniğiyle PSO çalışması yapılan kampana tipi, T-tipi ve H-tipi frenlerin analizleri paylaşılacaktır. Analizler sonucunda tork yoğunlukları, frenleme torkları, manyetik devreler, optimizasyon süreleri, hacim ve güç tüketimi gibi parametreler karşılaştırılacaktır. İkinci kısımda ise prototip bir H-tipi MR frenin üretimi, deneyleri ve bilgisayar simülasyonlarıyla karşılaştırmaları verilecektir.

6.1 Benzetim Sonuçları

Literatür Araştırması kısmında birçok MR fren tasarımı gösterilmiştir. Tasarlanan birçok fren yüksek tork üretmeleri sebebiyle kampana ve T-tipi frenlerle karşılaştırılmıştır. Frenin yüksekliği ve çapı için karşılaştırılan değerler göz önüne alındığında kampana tipi ve T-tipi frenlerin yüksek tork ürettikleri de Nguyen ve Choi'nin [49] çalışmasında gösterilmiştir. Bu çalışmada ele alınan kampana, T-tipi ve H-tipi MR frenlerin aksel simetrik görünümü ve tasarım değişkenleri Şekil 6.1'de gösterilmektedir. Tasarım değişkenleri için alt ve üst sınırlar Çizelge 6.1'de verilmiştir. Bu sınırlar, PSO algoritmasında parçacıkların tasarım uzayını ifade eder. Çizelge 6.2 ise frenlere uygulanan eşitlik ve eşitsizlik kısıtlarını içerir. Bu kısıtlarla beraber tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınırları gradyan temelli kısıt yönetme yönteminde parçacıkların konumlarının uyması gereken koşulları belirtir.

İF ve SE yaklaşımları hakkında değerlendirme yapılabilmesi için üç fren tipi Şekil 5.1'de akış şeması verilen PSO algoritmasıyla optimizasyon çalışmasına sokulmuştur. Optimum frenlerin tork yoğunlukları ise Çizelge 6.3'te "İF" ve "SE" sütunlarında gösterilmiştir. Bazı durumlarda İF yaklaşımı, bazı durumlarda ise SE



Şekil 6.1 : Karşılaştırma için kullanılacak frenlerin aksel simetrik görünümleri ve tasarım değişkenleri a) kampana, b) T-tipi, c) H-tipi MR fren.

Çizelge 6.1 : Tasarım değişkenlerinin alt ve üst değerleri ve iteratif formülasyon ve sonlu elemanlar yaklaşımlarıyla yapılan optimizasyon çalışması sonucu elde edilen frenlerin boyutları (mm cinsinden).

Fren	Parametre	Minimum	Maksimum	İF	SE	Fark
Kampana	R	16	40	40	40	0
	H	21	40	34.3	30.5	3.8
	t ₁	5	29	24.2	25	0.8
	t _c	5	29	7.1	7.1	0
	h _o	14	33	33.3	29.5	3.8
	h _{b1}	8	26	6	6	0
	h _{b2}	8	34	22.7	19.5	3.2
T-tipi	R	17.5	40	40	39.4	0.6
	H	26	40	39.7	39.7	0
	r _{hl}	2.5	25	2.5	2.5	0
	r _l	7.5	30	25.9	28.3	2.4
	r _o	12.5	35	30.9	33.3	2.4
	t _h	3	12.5	4.5	4.7	0.2
	t _l	2	19	12.5	10.1	2.4
	t _{hl}	5	10	10	8.4	1.6
	w _c	2	9.5	4.6	5.6	1
	h _c	4	17	17	10.2	6.8
	l _d	6	21	16.5	14.1	2.4
H-tipi	R	34	40	40	40	0
	H	15	40	36.2	40	3.8
	t ₁	8	14	9	11.4	2.4
	t ₂	5	11	9.3	5	4.3
	t ₃	5	11	5	5	0
	t _c	7	13	9.3	9.1	0.2
	h _o	2	16	4.8	2	2.8
	h _a	2	8	2	4.1	2.1
	h _k	6	18.5	15.2	18.5	3.3
	h _{b1}	4	26	23.2	21.6	1.6
	h _{b2}	4	32	27.4	27.8	0.4

yaklaşımı daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak, her iki yaklaşımda da en yüksek tork yoğunluğu önerilen H-tipi MR frende elde edilmiştir. Kampana tipi MR fren ise en düşük tork yoğunluğuna sahiptir.

Çizelge 6.2 : Frenlere uygulanan eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları.

Fren	Eşitlik ve Eşitsizlik Kısıtları
Kampana	$t_1 + t_c - R \leq -6$ $h_{b2} - h_o/2 \leq -3$
T-tipi	$r_{hl} - r_l \leq -5$ $r_l - r_o \leq -5$ $r_o - R \leq -5$ $2t_h + 2w_c - l_d \leq 35$ $t_l - l_d \leq -4$ $t_l + 2t_{hl} \leq 39$ $r_l/2 + r_o/2 - R + h_c/2 \leq -2$ $r_{hl} - r_l/2 - r_o/2 + h_c/2 \leq -3$
H-tipi	$t_1 + t_2 + t_3 + t_c - R \leq -8.5$ $h_{b2} - h_o/2 - h_k \leq -3$ $2 h_k + h_o \leq 39$ $h_o - h_k \leq -4$ $h_a - h_k \leq -1$

Çizelge 6.3 : Optimum frenlerin tork yoğunlukları.

Fren	Tork yoğunluğu (kN/m ²)			Fark (%)
	TF	SE	TF SE ile	SE - TF SE ile
Kampana	27.72	30.84	30.08	2.5
T-tipi	32.96	33.18	25.79	22.3
H-tipi	33.17	37.63	30.39	19.2

Her iki yaklaşımla elde edilen optimum frenlerin boyutları Çizelge 6.1’de verilmiştir. Burada üç fren için de iki yaklaşımda farklı boyutlarda optimum fren tasarımlarına ulaşıldığı görülmektedir. Bazı durumlarda İF yaklaşımıyla elde edilen optimum frenler bazı durumlarda ise SE yaklaşımıyla elde edilen optimum frenler kendilerine tahsis edilen hacmin daha az kısmını kullanmışlardır. Üç fren de her iki yaklaşımda yarıçapın üst limitini kullanırken, İF yaklaşımında kampana ve H-tipi MR fren yükseklikten bir nebze vazgeçmişlerdir. Eşitlik (3.22) ve (3.24)’te görüldüğü üzere manyetik alana bağlı tork yarıçapın küpü ve karesiyle orantılıdır. Bu sebeple daha yüksek tork üretmek için üç fren de maksimum yarıçapı kullanmıştır. Yükseklik olarak kampana tipi fren daha küçük bir yüksekliğe sahiptir. Bu da demektir ki yükseklik artışıyla sağlanacak tork artışının tork yoğunluğu üzerindeki pozitif etkisi, hacmin artmasından kaynaklanan negatif etkiyi telafi edememektedir. Üç frende de yarıçap ve yükseklik dışındaki parametreler genellikle birbirlerine yakındır (fark $< \sim 2$ mm). Aradaki farkın (fark > 2 mm) büyük olduğu parametreler genellikle yükseklikle ilgilidir ki bunun da frenin yüksekliğindeki farklardan kaynaklandığı söylenebilir.

SE yaklaşımıyla yapılan birçok fren çalışması SE yaklaşımının güvenilir olduğunu belirtmiştir. İF yaklaşımının doğruluğunun ise test edilmesi gereklidir. İki yaklaşımın farklı boyutlarda optimum frenleri bulması da sorgulanmalıdır. Bu sebeplerle İF yaklaşımı ile bulunan optimum frenler SE yaklaşımıyla çözdürülmüştür. Elde edilen tork yoğunlukları Çizelge 6.3’te “İF SE ile” sütununda verilmiştir. Daha basit yapılu kampana tipi frende TF yaklaşımıyla SE yaklaşımı arasındaki fark %3’tür. Manyetik devre karmaşıktıkça TF yaklaşımı problemi aşırı basitleştirdiğinden fark %20 mertebelerine kadar çıkmaktadır. Ayrıca, TF yaklaşımıyla elde edilen frenlerin tork yoğunluğu değerleri SE yaklaşımıyla elde edilen değerlerden daha düşüktür. Yani SE yaklaşımı optimizasyon sırasında tasarım uzayında bu boyutları atlamamış; ancak bu boyutlarda optimum tork yoğunluğuna da ulaşamamıştır. Her iki yaklaşımla yapılan optimizasyon çalışmalarının aldığı süre Çizelge 6.4’te gösterilmiştir. İF yaklaşımı kampana tipi frende saniyeler içerisinde optimum değeri bulurken; T-tipi ve H-tipi MR frenlerin optimum değere birkaç dakika içinde ulaşmaktadır. Bunun sebebi manyetik akının T-tipi ve H-tipi frenlerde İF yaklaşımında ayrıklaştırılmış elemanlar

üzerinde kollara ayrılmasıyla açıklanır. Eşitlik (3.9) ve (3.10) kampana tipi MR fren için Eşitlik (3.11) ve (3.12) ile belirtilen iki denklemle çözülebilir. Çözümün yapılabilmesi içinse elemanlardan birine başlangıç manyetik akı yoğunluğu tahmini yapmak yeterlidir. Ancak, T-tipi ve H-tipi MR frenler içinse Eşitlik (3.9) ve (3.10) ikiden fazla denklemle ifade edilir. Örneğin; H-tipi MR frenin manyetik devresinin çözümlenebilmesi için Eşitlik (3.13)-(3.18) arası denklemlerin çözülmesi gerekir. Ayrıca, manyetik akı iki kola ayrıldığından çözümün başlaması için iki ayrı elemanın manyetik akı yoğunluğuna başlangıç tahmini yapılmalıdır. Bu durum T-tipi fren içinse Şekil EK 1.1’de gösterildiği gibi daha karmaşıktır. Bu sebeple MR frenin manyetik akısı ne kadar fazla kola ayrılırsa çözüm için o kadar fazla hesaplama yükü getirir ve süreyi uzatır.

Çizelge 6.4 : Optimizasyon çalışmasının aldığı zaman.

Fren	Süre (s)	
	TF	SE
Kampana	10	2943
T-tipi	363	4384
H-tipi	121	6058

İF ile SE yaklaşımlarının aldığı süreler bakılırsa, İF yaklaşımı dakikalar içerisinde çözüme ulaşırken, SE yaklaşımının bir-iki saat kadar sürdüğü gözlemlenmektedir. Ancak şu unutulmamalıdır ki, İF yaklaşımı için elle yapılan bir ön-işlem söz konusudur. Bu ön-işlem sırasında şunlar yapılır. Frenin elemanlara ayrıklaştırılması sağlanır. Ayrıklaştırılan elemanlar üzerindeki manyetik akı çizgilerinin uzunlukları ve elemanların kesit alanları tasarım değişkenleri cinsinden tanımlanır. Elemanların manyetik akı yoğunlukları, elemanlardan herhangi birinin başlangıç tahminine uygun olarak kesit alanları kullanılarak hesaplanır. Elemanların manyetik alan şiddeti değerleri, malzemelerinin manyetik geçirgenliğine bağlı olarak hesaplanır. Bu değerlerle manyetik akı çizgilerinin uzunlukları kullanılarak devrenin toplam net akımı hesaplanır. Hesaplanan toplam net akım, frenin geometrisinde bobinin alabileceği sarım sayısının uygulanan akımla çarpılmasıyla elde edilen değerle karşılaştırılır. Eğer, manyetik akı çizgisi kollara ayrılıyorsa, aynı başlangıç ve bitiş noktaları arasında yer alan manyetik akı çizgileri için net akımları eşit olacak şekilde manyetik akı yoğunluklarına ulaşana kadar iç-iterasyonlar tanımlanır. Bu ön-işlemin

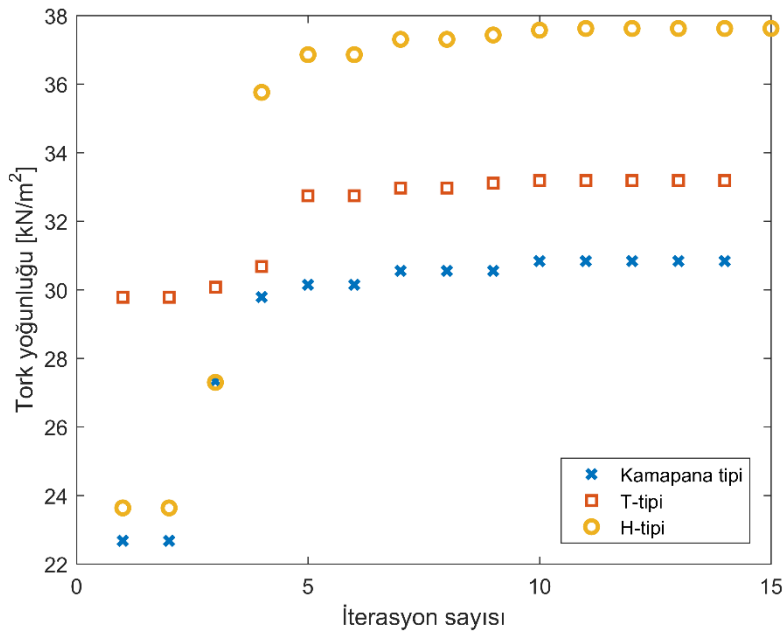
süresi manyetik akı çizgisinin kaç kola ayrılacağına bağlı olarak değişir. Kampana tipi fren için 30 dakikada bu ön-işlem tamamlanırken, T-tipi fren için tamamlanması iki saati bulmuştur. Böylece, İF yaklaşımının SE yaklaşımına süre olarak da ağır basmadığı görülmüştür.

İF yaklaşımıyla elde edilen optimum frenlerin SE yaklaşımıyla çözümünde frenin karmaşıklaşmasıyla farkın arttığını gözlemlenmişti. Optimizasyon çalışmasında da frendeki manyetik akı çizgisinin fazla kola ayrılmasıyla TF yaklaşımında elle yapılan ön-işlem süresinin arttığını ve SE yaklaşımıyla yaklaşık olarak toplam sürelerin karşılaştırılabilir olduğu açıklandı. Bunlar TF yaklaşımının yalnız basit frenler için avantajlı olduğunu gösterir. Bu sebeple bundan sonraki kısımda yapılacak değerlendirmeler için yalnız SE yaklaşımının sonuçları kullanılmıştır.

SE yaklaşımıyla yapılan optimizasyon çalışması sırasında optimum tork yoğunluğunun iterasyon sayısı ile değişimi Şekil 6.2’de verilmiştir. Kampana ve T-tipi frenler 14 iterasyon, H-tipi fren 15 iterasyon sonucu optimum değere ulaşmıştır. Kampana ve H-tipi fren düşük tork yoğunluğuyla iterasyona başlarken üçüncü iterasyondan itibaren dikey yükseliş, beşinci iterasyondan itibaren yatay bir yükseliş davranışı sergiliyor. T-tipi fren optimum değere daha yakın bir değerle iterasyona başlıyor. Dördüncü iterasyonda dikey, beşinci iterasyondan itibaren yatay yükseliş eğimine sahiptir. PSO çalışmasında parçacıklar başlangıçta rastgele konumlara yerleştirildiğinden T-tipi frenin optimuma yakın bir değerde başlaması da rastlantısaldir. Ayrıca, kampana tipi frende üç, T-tipi ve H-tipi frende iki iterasyon boyunca değişim olmayıp daha sonra artış gözlemlenmiştir. Bu gözlem, optimizasyon çalışmasında kullanılan art arda beş iterasyonda değişim olmayınca optimizasyon çalışmasına son vermenin doğru bir karar olduğunu gösterir.

Frenlerin SE yaklaşımıyla optimum sonuca ulaşmaları yaklaşık olarak aynı iterasyon sayısında gerçekleşirken, optimizasyon çalışmasının süreleri Çizelge 6.4’te görüldüğü gibi farklılık göstermektedir. Bunun iki temel sebebi vardır. Birincisi, PSO çalışmasında parçacık sayısı tasarım değişkenlerinin 10 katı olarak belirlenmiştir. Yani altı tasarım değişkenine sahip kampana tipi fren için 60 parçacık kullanılırken, 11’er tasarım değişkenine sahip T-tipi ve H-tipi frenler için 110 parçacık kullanılmaktadır. Bu da her bir iterasyonda kampana tipi frenin diğerlerinin yarısı kadar SE çözümü alınması demektir. Bu özellikle kampana tipi frenle diğer

frenlerin arasındaki zaman farkını açıklar. İkinci sebep ise, MR akışkan kanallarında ortalama manyetik akı yoğunluğu belirlenirken FEMM arayüzü her bir MR akışkan bloğu (MR akışkan kanalının bir kısmı) için yenilenmektedir. Bloklar, manyetik akı yoğunluk değerlerinin birbirine yakın olduğu noktaların ortalama bir manyetik akı yoğunluğuyla ifade edilmesi için MR akışkan kanalları bölünerek oluşturulmuştur. Böylece frenleme torku için daha doğru bir değer elde etmek hedeflenmiştir. Kampana tipi frende altı blok bulunurken; T-tipi frende sekiz blok; H-tipi frende 16 blok bulunmaktadır. Bu ise H-tipi frenle T-tipi frenin arasındaki zaman farkını açıklar.



Şekil 6.2 : PSO çalışmasında optimum tork yoğunluğu değerlerinin iterasyon sayısı ile değişimi.

Optimum fren geometrilerinin manyetik akı yoğunluğu dağılımları aksel simetrik görünümde Şekil 6.3'te verilmiştir. Çizelge 6.5 ise belirtilen frenlerin, frenleme torku, aksel ve dairesel kanalların torka katkıları, hacim, güç tüketimi gibi performans göstergelerini içerir.

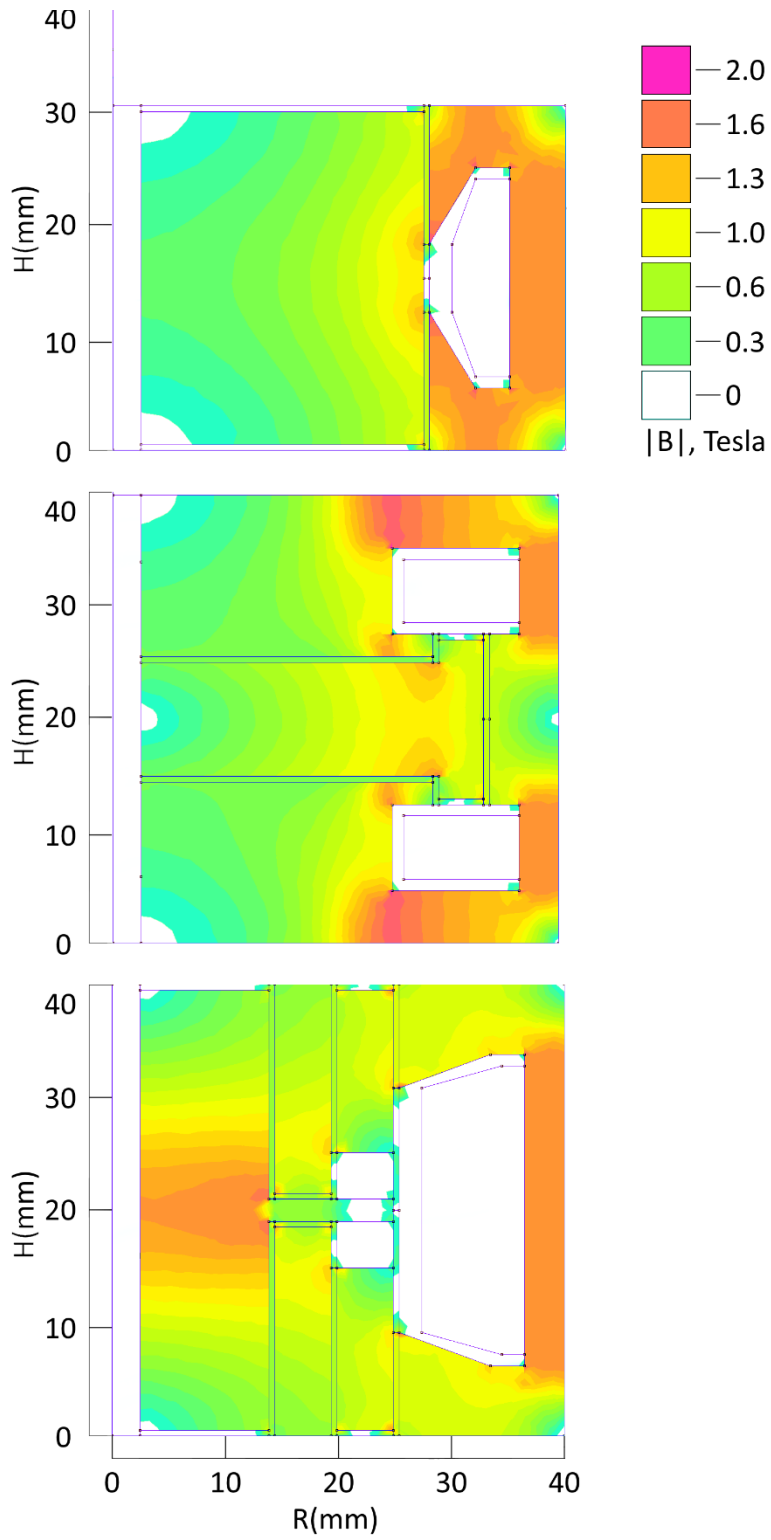
Kampana tipi frende aksel kanallarda manyetik akı yoğunluğu yok denecek kadar azdır. Bu sebeple aksel kanalın torka etkisi de ihmal edilebilir seviyede kalmıştır. Dairesel kanalda bulunan MR akışkan ise manyetik doygunluk sınırından uzakta çalışmaktadır. Ancak, seçilen tele uygulanabilecek maksimum akım uygulandığından

ve sarım sayısı da arttırılamayacağından bu çalışmada MR akışkanın daha doymun bölgede çalışması kampana tipi MR fren için mümkün değildir. Ayrıca dairesel kanalın bobine komşu kısmında da manyetik akı yoğunluğu ihmal edilecek seviyede olduğu belirtilmelidir.

T-tipi MR frende dıştaki dairesel kanalda daha yüksek manyetik akı yoğunluğu göze çarpmaktadır. Bu kanaldaki manyetik akı yoğunluğu kampana tipi MR frendeki manyetik akı yoğunluğundan biraz fazladır. İçteki eksenel ve dairesel kanallarda ise dıştaki dairesel kanala göre düşük bir manyetik akı yoğunluğu mevcuttur. Bobine komşu eksenel kanallardaki manyetik akı yoğunlukları ise çok düşüktür. Dairesel kanallar, eksenel kanallara göre yaklaşık iki kat torca katkı sağlamaktadır. Özellikle dıştaki kanalda yüksek manyetik akı yoğunluğu varken kanalların katkısının karşılaştırılabilir olması içteki eksenel kanalların daha geniş bir alana yayılması ve dairesel kanalların uzunluklarının kısa olmasıyla açıklanabilir. T-tipi MR frenin eksenel kanallarının torca kayda değer katkısı ulaşılan torkun kampana tipi frenden daha fazla olmasının sebebidir.

H-tipi MR fren dıştaki dairesel kanalda en yüksek manyetik akı yoğunluğuna sahip. Bunda bobinin büyük olmasından kaynaklı sarım sayısının çok olması etkilidir. Buradaki manyetik akı yoğunluğu diğer frenlerden daha yüksek olsa da halen MR akışkanın manyetik doymunluğundan uzaktadır. Rotordaki paramanyetik malzeme sayesinde ortadaki eksenel ve dairesel kanallarda da görece yüksek manyetik akı yoğunluğu mevcuttur. Statora komşu eksenel kanallardaki manyetik akı yoğunluğu ihmal edilebilir düzeydedir. Torca sadece ortadaki dar alana yayılmış eksenel kanallar etki ettiğinden, eksenel kanalların torca katkısı %8 civarındadır. Çoklu silindir bir fren olarak tasarlandığından, dairesel kanalların torca katkısının %92 olması şaşırtıcı değildir.

Frenler güç tüketimi açısından karşılaştırıldığında, üretilen torkla güç tüketimi arasındaki eğilimin benzer olduğu görülür. En yüksek torca sahip H-tipi tipi fren en yüksek güç tüketimine de sahiptir. H-tipi fren, kampana tipi frene göre %108, T-tipi frene göre ise %46 daha fazla güç tüketmektedir. Buna karşın torktaki değişim ise sırasıyla %60 ve %18'dir. Ancak, yine de 12 V'luk bir adaptörün bütün frenlerdeki bobinleri besleyebileceği unutulmamalıdır.



Şekil 6.3 : Sonlu elemanlar yaklaşımıyla elde edilen optimum frenlerin manyetik akı yoğunluk dağılımları: kampana tipi MR fren (üstte), T-tipi MR fren (ortada), H-tipi MR fren(alta).

Çizelge 6.5 : Sonlu elemanlar yaklaşımıyla elde edilen optimum frenlerin performans göstergeleri.

Performans göstergesi\Fren		Kampana	T-tipi	H-tipi
Frenleme torku	(Nm)	4.73	6.42	7.56
Eksenel		~0	2.16	0.62
Dairesel		4.73	4.26	6.94
Hacim	(cm³)	153.3	193.6	201.1
Kütle	(g)	1201	1524	1590
Güç tüketimi	(W)	3.56	5.07	7.42
Tork yoğunluğu	(kN/m²)	30.84	33.18	37.63

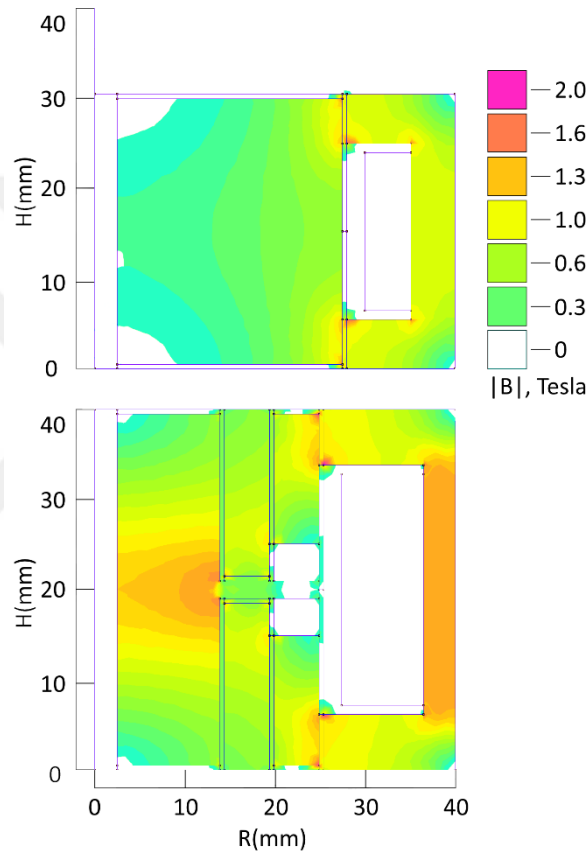
Frenlerin hacimleri incelendiğinde, T-tipi ve H-tipi frenin yaklaşık aynı hacme sahip olduğu ve hacimlerinin kampana tipi frene göre yaklaşık %33 fazla olduğu görülür. Kampana tipi frenin hacminin küçük olması tork yoğunluğu karşılaştırıldığında frenler arasındaki farkın azalmasının sebebidir. Torktaki %60 ve %18'lik farka karşın tork yoğunluğundaki fark % 22 ve % 8'dir.

Frenler kütle açısından karşılaştırıldığında kampana tipi frenin en düşük kütleye sahip olduğu ve T-tipi ve H-tipi frene göre %23-25 daha hafif olduğu görülür. Üç frenin de yarıçapı aynıdır. Yükseklik olarak kampana tipi fren diğer frenlerin ¾'ü kadardır. Bu bilgiler göz önünde bulunursa kütledeki farkın da yükseklikle orantılı olduğu görülür.

Bobinin kenarlarının eğimli olarak tasarlanmasının torka ve buna bağlı olarak tork yoğunluğuna olumlu katkı yaptığı görülmüştür. Şekil 6.4 : Optimum frenlerin dikdörtgen bobinle tasarımlarının manyetik akı yoğunluk dağılımı Şekil 6.4'te görüldüğü üzere MR akışkan daha çabuk doygunluğa ulaşmış ancak yüksek manyetik akı yoğunluklarına sahip kanallarda MR etki altında kalan MR akışkan azalmıştır. Optimum frenlerin bobinlerinin dikdörtgen biçimde tasarlandığında frenlerin performansı Çizelge 6.6'da gösterilmiştir. Buna göre kampana tipi frende güç tüketimi %18 artarken, tork %49 düşmüştür. H-tipi frende ise güç tüketimi %13 artarken tork %21 düşmüştür.

Çizelge 6.6 : Bobin eğilmeden analiz edilen optimum tasarımların sonuçları.

Performans göstergesi\Fren		Kampana	H-tipi
Frenleme torku	(Nm)	2.41	5.95
Eksenel		~0	0.58
Dairesel		2.41	5.37
Hacim	(cm ³)	153.3	201.1
Güç tüketimi	(W)	4.19	8.37
Tork yoğunluğu	(kN/m ²)	15.73	29.57

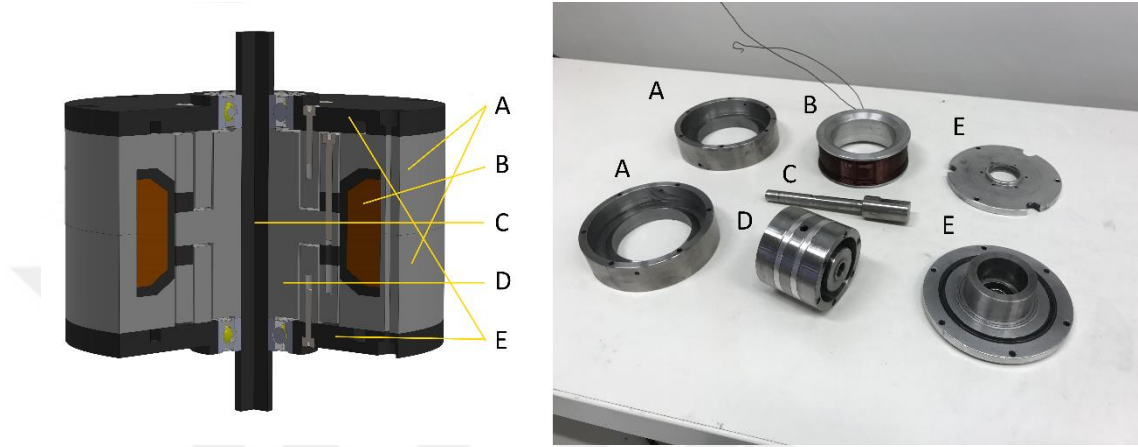


Şekil 6.4 : Optimum frenlerin dikdörtgen bobinle tasarımlarının manyetik akı yoğunluk dağılımı.

6.2 Deneysel Sonuçları

SE yaklaşımının doğrulanması ve frenin kullanılacağı sistemlerdeki karşılaşılabilecek değişik girişlere nasıl tepkiler vereceğinin değerlendirilmesi için H-tipi MR frenin bir prototipi üretilmiştir. Prototipin CAD modeli ve üretilen parçalar Şekil 6.5'te gösterilmiştir. CAD modelindeki koyu renkli parçalar 6000 serisi alüminyumdan;

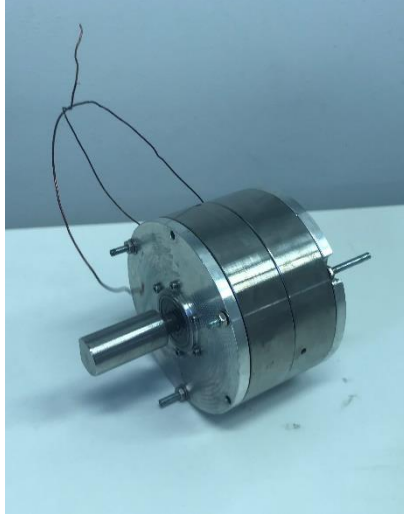
açık renkli parçalar ise AISI 1010 düşük karbon çeliğinden işlenmiştir. Akışkan olarak, LORD firmasına ait MRF-132DG akışkanı kullanılmıştır. Bobin teli 0.05 mm kaplamasıyla 0.7 mm çapa sahip 22 AWG teldir. Sarım sayısı 300'dür. Şaftın yataklanması için iki tane rulman kullanılmıştır. Statorun sızıntıyı engellemek amacıyla iki tane O-ring kullanılmıştır. Prototipin boyutları Çizelge 6.7'de verilmiştir. Şekil 6.6 ise prototip frenin montajlanmış halini göstermektedir.



Şekil 6.5 : Prototip H-tipi MR frenin CAD modeli (solda) ve üretilen parçalar (sağda).

Çizelge 6.7 : Prototip H-tipi MR frenin boyutları.

Parametre	Boyut (mm)
R	40
H	40
t_1	10
t_2	5
t_3	5
t_c	9
h_o	7
h_a	4
h_k	16
h_{b1}	20
h_{b2}	26



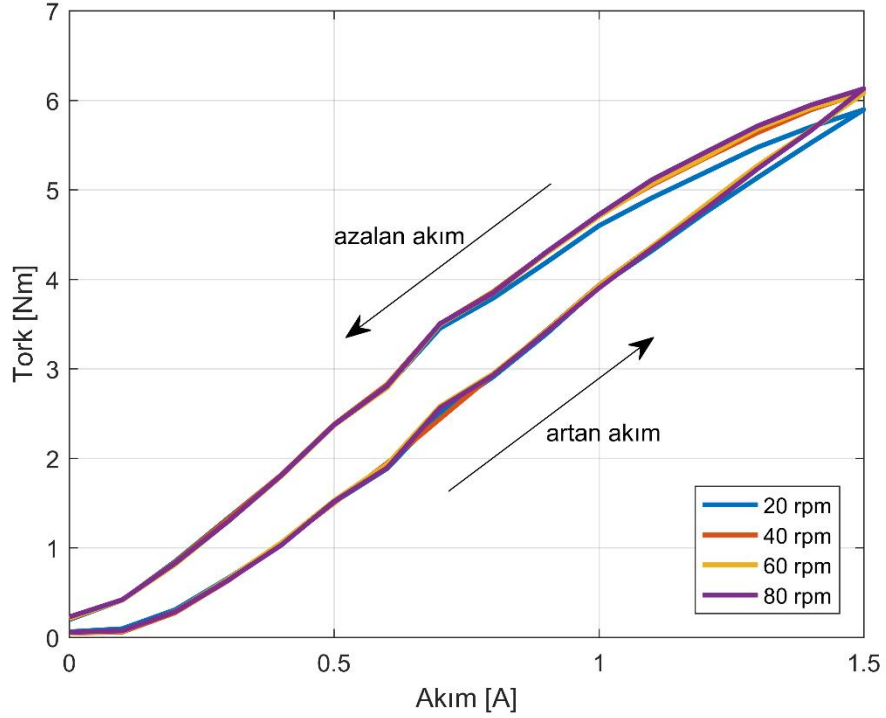
Şekil 6.6 : Prototip H-tipi MR frenin montajlanmış hali.

6.2.1 Prototip frenin histerisiz karakteristiği

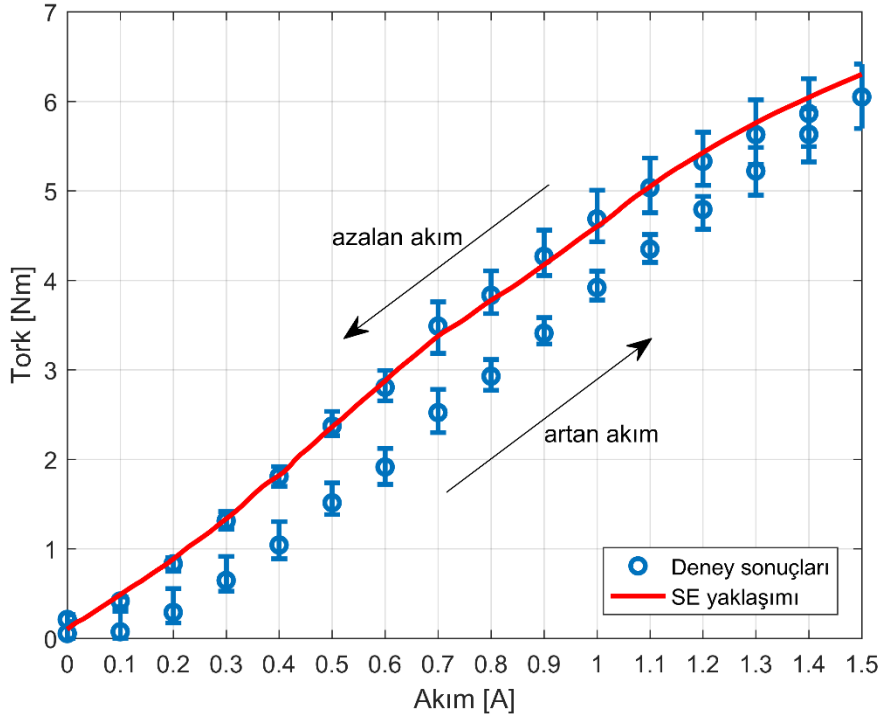
Bu bölümde SE yaklaşımının doğruluğu ve manyetik özelliklerden kaynaklanan histerisiz özelliği değerlendirilecektir. Kullanılan akım regülatörü, bazı akım değerlerinde doğrusal olmayan davranış sergilediğinden; MR frene uygulanan akım 0-1.5 A aralığında 0.1 A adımlarla arttırılarak uygulanmıştır. Akım 1.5 A değerine ulaştığında 0.1 A düşürülerek 0 A değerine ulaşılmıştır. Her bir akım değerinde 15 s beklenilmiştir. Bundan uzun bekleme sürelerinde gözlemlenen tork değerlerindeki değişiklik sıcaklık artışından kaynaklanabileceğinden bu süre belirlenmiştir. DC motor 20, 40, 60 ve 80 rpm açısal hızlarında döndürülmüştür. Deneyler SY ve SYT yönlerinde yapılmış olup; bütün deneyler ikişer defa tekrarlanmıştır (Bknz. EK 2 ve EK 4).

Deney sonuçları her bir açısal hız için ortalama alınarak dönüş yönünden bağımsız biçimde Şekil 6.7’de verilmiştir. Görüldüğü gibi açısal hızın tork üzerinde kaydadeğer bir farkı yoktur. Bunda açısal hızın düşük olması bir etken olarak gösterilebilir. Ancak SE yaklaşımındaki çözümlerde açısal hızın 20 rpm arttırılmasının torku 0.03 Nm arttırdığı belirlenmiştir. Bu sebeple viskoz torkun deney yapılan açısal hızlarda H-tipi MR fren için ihmal edilebilir olduğuna varılabilir. Ayrıca, Bingham modelinin bu koşullarda uygulanabilir olduğunu gösterir. Bir diğer sonuç, belirtilen açısal hızlarda histerisiz davranışta farklılık gözükmemektedir.

SE yaklaşımının doğruluğunu değerlendirmek içinse bütün alınan sonuçların ortalaması alınarak, SE yaklaşımıyla elde edilen çözümle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Deneysel sonuçlar frenin manyetik alan etkisinde olmadığına 0.054 Nm’lik bir viskoz torka sahip olduğunu gösteriyor. SE yaklaşımı ise 0.1 Nm’lik bir viskoz tork hesaplamıştır. SE yaklaşımında düşük manyetik alan şiddeti değerleri için kullanılan akışkanın akma gerilmesi değerleri veri föyünde verilmemiştir. Bu değerler için yapılan doğrusal interpolasyonun SE yaklaşımında deney sonuçlarına göre daha yüksek tork elde edilmesinin sebebi olduğu düşünülmektedir. Akım 1.5 A değerine yaklaşırken sonuçlar arasındaki fark azalmaktadır. 1.5 A akımda sonuçlar arasındaki fark %4’tür.



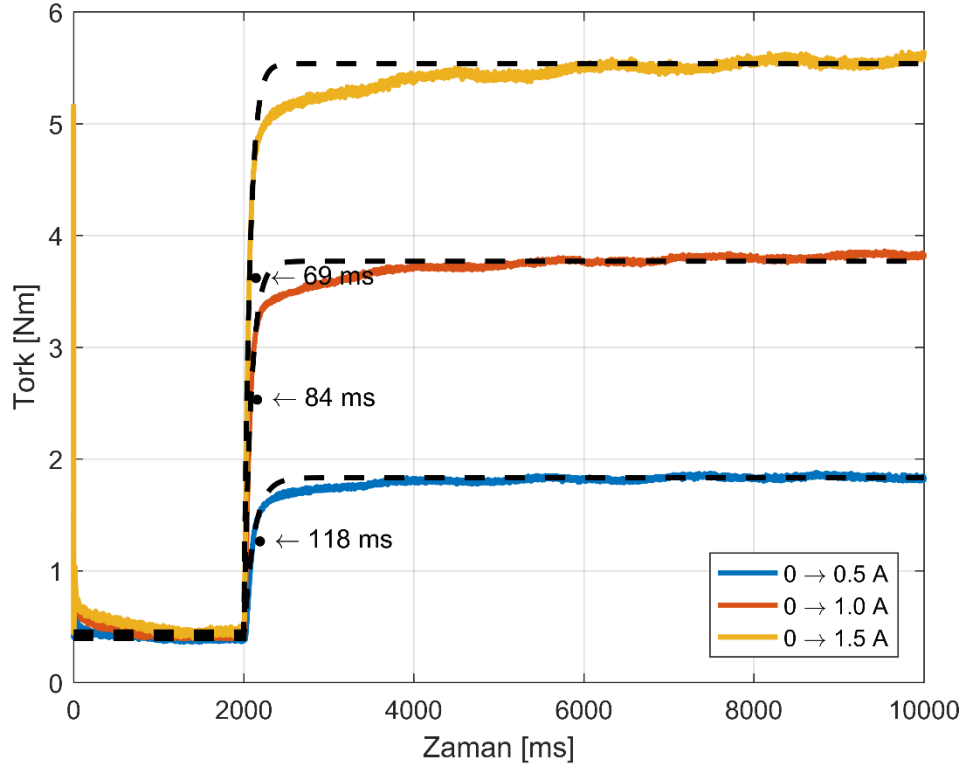
Şekil 6.7 : Farklı açısal hızlarında frenleme torkunun ortalama değerleri.



Şekil 6.8 : Deneysel sonucun SE sonucu ile karşılaştırması.

6.2.2 Prototip frenin basamak giriş cevabı

Prototip frenin tepki süresi hakkında fikir edinebilmek için frene farklı akımlarda basamak giriş verildi. Akım etkisinde olmayan frenlere ikinci saniyede 0.5, 1.0 ve 1.5 A basamak girişler uygulandı. 10 saniye süreyle deney devam ettirildi. Histerisiz deneylerinde açısal hızın tork üzerinde kaydadeğer bir değişime neden olmamasından, basamak giriş deneyinde bütün akım değerlerinde açısal hız 40 rpmde sabit tutuldu. Her bir akım değeri için deney beş defa tekrarlandı (Bknz. EK 2 ve EK 5). Her bir akım için alınan deneylerin ortalamaları alınarak Şekil 6.9 oluşturuldu. Uygulanan akım arttıkça zaman sabitinin azaldığı gözlemlendi. Bu gözlem literatürdeki zaman sabiti ile ilgili yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlarla uyum içerisindedir. 1.5 A basamak girişte frenin zaman sabiti 69 ms olarak bulundu. Belirtilen zaman sabiti değerinde akım regülatörünün zaman sabitinin de olduğu unutulmamalıdır. Bu da frenin tepki süresinin belirtilen değerden bir miktar daha az olduğunu gösterir. Ayrıca, bütün akımlardaki zaman sabiti değerleri literatürdeki frenler için belirtilen tepki süreleri (20-200 ms) aralığındadır.



Şekil 6.9 : Prototip MR frenin 0.5, 1.0 ve 1.5 A basamak giriş cevapları.

6.2.3 Prototip frenin frekans cevabı

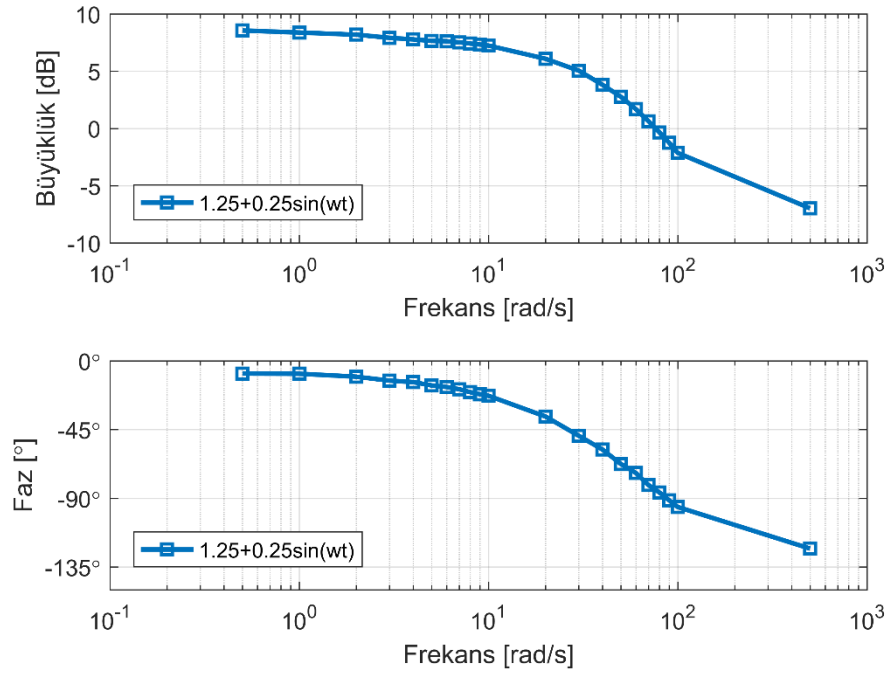
MR frenler doğrusal zamanla değişmeyen birinci derece sistemler gibi davranır. Bu bölümde prototip frenin bu sistemlere uygun davranıp davranmadığı incelenecektir. Bu amaçla frene $1.25 + 0.25\sin(\omega t)$ A akımı 0.5'ten 100 rad/s'ye kadar farklı frekanslarda uygulanmıştır. Deneyler yapılırken fren önce iki saniye 0 A akımla döndürülür. İkinci saniyede frene 1.25 A basamak giriş uygulanarak iki saniye de böyle dönmesi sağlanır. Dördüncü saniyeden itibaren sinüs dalgası eklenerek başta belirtilen dalga frene uygulanmış olur. Bu andan sonra 40 saniye boyunca veri alınır (Bknz. EK 2 ve EK 6).

Prototip frenin uygulanan akıma frekans cevabı Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Frenin frekans cevabının çizilebilmesi için sinüs dalganın uygulandığı süre boyunca tork sensöründen okunan tork değerlerine Ayrık Fourier dönüşümü yapılmıştır. Dönüşüm sonrasında elde edilen en baskın frekansla tork değerleri tekrar inşa edilmiştir. Bu değerlerle deneylerde ölçülen tork değerleri arasında mutlak bağıl hata hesaplanmıştır. Her bir frekans için mutlak bağıl hata hesabı ayrı ayrı yapılmış olup

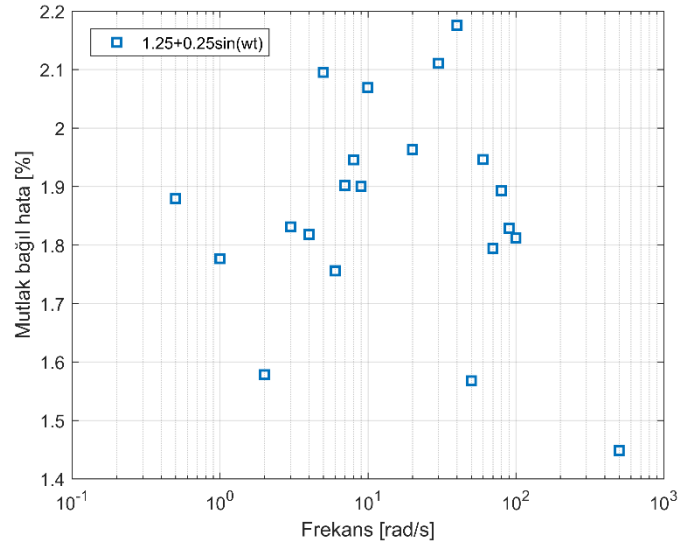
bu değerler de Şekil 6.11'de gösterilmiştir. En yüksek mutlak bağıl hata %2.2 olduğundan frekans cevabının oluŐturulmasında baskın frekans kullanılmıştır. Tork sensörünün belirsizliği tam ölçeğin (10 Nm) %1.16'sı olarak hesaplanmıştır (EK 4). Mutlak bağıl hatanın, belirsizlikten büyük gelmesinin sebebi Şaftlar arasındaki kaplin bağlantılarının genliği yüksek ikincil bir frekansa sebep olmasdır. Ancak, EK 6'daki grafiklerde gözlemlenen baskın frekansla inşa edilen sinyalle ölçülen sinyalin uyumu bu çalışma için yeterli görülmüştür.

Frekans cevabı grafikleri birinci derece sistemlerin cevabına benzer bir eğilim göstermektedir. Frekans arttıa frenin uygulanan akıma karşılık gelen torku vermekte güçlük çektiği; ayrıca faz olarak da geride kaldığı görülmektedir. Bu da frenin değişik tork kontrol uygulamalarında başarıyla kullanılabilceğini gösterir.

ıkıŐ torkunun giriş akıma olan oranını frenin 10 rad/s frekansa kadar girişi izlediği; bundan sonra ise yavaŐ yavaŐ kırılarak 30 rad/s'den sonra dik bir düşüş sergilediği söylenebilir. Frekans cevabı incelendiğinde 3 dB'lik düŐüŐün 20-30 rad/s değerinde olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca 45°'lik faz farkı da bu frekans aralığında oluşmaktadır. Birinci derece sistemlerde bu değerler zaman sabitini ifade eder. Bunun frenin dinamik olarak kullanımında 20-30 ms aralığında zaman sabiti olduğunu gösterir. Yani fren dinamik olarak kullanımında, a-kapa kullanıma (basamak girişe) göre daha hızlı bir tepki vermektedir.



Şekil 6.10 : Prototip MR frenin $1.25+0.25\sin(\omega t)$ A akımına frekans cevabı: Tork/Akım oranı (üstte), Faz farkı (altta).



Şekil 6.11 : Prototip frenin frekans cevabının baskın frekansla inşa edilmesinde elde edilen mutlak bağıl hata.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yüksek tork yoğunluğuna sahip bir MR fren tasarımı amaçlanmıştır. Tasarlanan frenin rotorunun aksenal simetrik görünümde H harfine benzemesinden ötürü fren H-tipi MR fren olarak adlandırılmıştır. Frenin değerlendirilmesi amacıyla haptik ve sağlık arayüzlerine indirgenebilecek boyutlar seçilmiştir. H-tipi MR fren, belirtilen boyutlarda yüksek tork değerleri sağlayan kampana ve T-tipi MR frenlerle karşılaştırılmıştır.

Üç fren için de aynı çap ve yükseklik üst sınır olarak verilmiştir. Üç frende de kullanılan parçaların bağlantılarının, bağlantı elemanlarıyla yapılacağı kararı verilmiştir. Bu sebeple parçaların boyutları bağlantı elemanlarına izin verecek şekilde kısıtlara sahiptir. Frenlerde kullanılan manyetik, paramanyetik, MR akışkan, bobin teli gibi malzemeler aynıdır. Bu koşullar altında frenlere PSO optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimum frenler için elde edilen tork yoğunluğu, hacim, güç tüketimi, tork değerleri ve boyutlar listelenmiştir. H-tipi MR frenin, tork yoğunluğu göz önüne alındığında kampana tipi frene göre %22; T-tipi frene göre %13 daha iyi olduğu görülmüştür.

Frenlerin güç tüketiminin 12 V'luk adaptörle sağlanabilecek düzeyde olduğu görülmüştür. Kampana tipi fren, T-tipi frene göre %30; H-tipi frene göre %52 daha az güç tüketimine sahiptir. Frenler, kapladıkları hacimlere göre karşılaştırıldıklarında T-tipi ve H-tipi MR frenin yaklaşık 200 cm³ olduğu görülürken; kampana tipi fren 150 cm³ hacme sahiptir. Kampana tipi fren 1201 g, T-tipi fren 1524 g, H-tipi fren ise 1590 g kütleye sahiptir. Sağlayabildikleri tork açısından H-tipi MR fren; kampana tipine göre %60; T-tipine göre %22 daha fazla tork sağlar. H-tipi MR frenin torku 7.56 Nm'dir.

Frenin sağladığı torkun bulunabilmesi için frendeki parçaların manyetik akı yoğunluklarının bilinmesi gerekir. Manyetik devrenin çözülmesinde iki farklı yöntem kullanılmıştır. Birinci yöntem iteratif formülasyon olarak adlandırılmıştır. Bu yöntem

için frenler elemanlara ayrıklaştırılır. Manyetik devreyi yöneten Amper ve Gauss yasaları, ayrıklaştırılmış elemanlar için dört işlemle çözülebilecek şekilde basitleştirilir. Bu sayede devredeki malzemelerin manyetik akı yoğunlukları bulunur. İkinci yöntem ise sonlu elemanlar yaklaşımı kullanarak malzemelerin manyetik akı yoğunluklarını elde etmektir.

Birinci yöntemle yapılan PSO çalışması dakikalar içerisinde sonuçlanırken; ikinci yöntem bir-iki saat sürmektedir. Ancak, birinci yöntem frenin manyetik akı çizgisinin kaç kola ayrıldığına bağlı olarak artan bir elle yapılan ön-işlem sürecine sahiptir. Ön-işlem süreci kampana tipi fren için 30 dakikada tamamlanırken; T-tipi fren için iki saati bulmuştur. Bu da optimum freni bulmak için gereken toplam zamanı sonlu elemanlar yöntemi kadar uzatmıştır. Ayrıca, fren karmaşıklıkça İF yaklaşımıyla elde edilen çözümle SE yaklaşımıyla elde edilen çözüm arasındaki farkın arttığı görülmüştür. Kampana tipi frende %3 olan fark; T-tipi frende %20 mertebelerine çıkmaktadır. Bu sebeple fren tasarımlarında iteratif formülasyon yönteminin ancak basit yapıları için kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminin doğrulanması için prototip bir H-tipi MR fren üretilmiş ve test edilmiştir. Testler sonucunda maksimum akımda mutlak bağıl hata %4 olarak bulunmuştur. Düşük akım değerlerinde hata daha yüksek çıkmaktadır.

Prototip frenin histerisiz karakteristiği, basamak giriş cevabı ve frekans cevabı da incelenmiştir. Histerisiz karakteristiğinin açısal hızla değişmediği gözlemlenmiştir. Basamak giriş testlerinde frenin zaman sabitinin yükselen akımla azaldığı; 1.5 A basamak girişinde 69 ms zaman sabitine sahip olduğu bulunmuştur. Frekans cevabı testi ise frenin, doğrusal zamanla değişmeyen birinci derece bir sistem olarak ele alınabileceğini göstermiştir.

Sonuçlar göz önüne alındığında tasarlanan frenle hem tork hem de tork yoğunluğu açısından kazanç sağlanmıştır. Ancak bu kazancın daha fazla arttırılabileceği açıktır. Çünkü fren geometrisine kısıtlar uygulanırken cıvata kullanılarak montaj yapıldığı belirtilmiştir. Bu parçaların geometrik boyutlarının alt limitlerini belirleyen en önemli kıstas olmuştur. Ayrıca, parçaların üretilmesi için kullanılan üniversitemize ait üretim atölyesindeki teknik kabiliyet ve ekipman dolayısıyla parça boyutları belli

kısıtlara tabi tutulmuştur. Örneğin, köşeleri eğimli tasarlanan bobinde, bobinin kanala komşu kısmında çok küçük bir kısım kalması arzulanırken bu mümkün olmamıştır. Civatasız bir tasarım ve gelişmiş teknik kabiliyet ve ekipman kullanılarak boyutların tasarım uzayında daha özgür olmaları sağlanabilir. Böylece tork ve tork yoğunluğu açısından daha yüksek değerler elde edilmesi muhtemeldir.

Bundan sonraki süreçte tasarlanacak olan frenin haptik cihazlara entegre edilecek boyutlarda olması; civatasız bir montaja elverişli olması ve boyutların daha özgür olduğu bir tasarım uzayı planlanmaktadır. Ayrıca frende doğal mıknatısın tek başına veya bobinle birlikte kullanımının torka ve deneylerde ölçülen zaman sabiti ve histerisiz karakteristiği gibi diğer değişkenlere etkisinin araştırılması önerilmektedir. Piyasadaki diğer akışkanların ve düşük karbon çeliklerinin manyetik devreye ve torka olan etkisinin araştırılması arzulanmaktadır. Ayrıca, frende ve özellikle akışkandaki sıcaklığın deneyler sırasında ölçümünün yapılarak torka ve histerisiz davranışa etkisinin araştırılması önerilmektedir. Son olarak bütün bahsedilen tecrübeler kullanılarak bir kontrolcü tasarlanması ve haptik bir cihaza entegre edilerek haptik cihaz testlerinin yapılması arzulanmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] **LORD MR Products**, <http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products>, alındığı tarih: 27.07.2017
- [2] **Ghaffari, A., Hashemabadi, S.H. ve Ashtiani, M.** (2015). A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 26, 881-904.
- [3] **Zhou, W., Chew, C. ve Hong G.,** (2007). Development of a compact double-disk magneto-rheological fluid brake, *Robotica*, 25, 493-498.
- [4] **Bucchi, F., Forte, P. ve Frendo, F.,** (2017). Geometry optimization of a magnetorheological clutch operated by coils, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, 231, 100-112.
- [5] **Yang, G., Spencer, B., Carlson, J. ve Sain, M.,** (2002). Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations, *Eng. Struct.*, 24, 309-323.
- [6] **Kennedy, J. Ve Eberhart, R.,** (1995). Particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE Int. Conf.*, 4, 1942-1948.
- [7] **Assadsangabi, B., Daneshmand, F., Vahdati, N., Eghtesad, M. ve Bazargan-Lari, Y.,** (2011). Optimizastion and design of disk-type MR brakes, *Int. J. Automot. Technol.*, 12, 921-932.
- [8] **Nguyen, P. ve Choi, S.,** (2011). A new approach to magnetic circuit analysis and its application to the optimal design of a bi-directional magnetorheological brake, *Smart Mater. Struct.*, 20(12), 125003.
- [9] **Nguyen, P. ve Choi, S.,** (2012). Optimal design of a novel hybrid MR brake for motorcycles considering axial and radial flux, *Smart Mater. Struct.*, 21, 55003
- [10] **Hung, N. ve Bok, C.,** (2012). Optimal design of a T-shaped drum-type brake for motorcycle utilizing magnetorheological fluid, *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, 40(2), 153-162.
- [11] **Nguyen, Q. ve Choi, S.,** (2010). Optimal design of an automotive magnetorheological brake considering geometric dimensions and zero-field friction heat, *Smart Mater. Struct.*, 19(11), 115024.
- [12] **Rossa, C., Jaegy, A., Micaelli, A. ve Lozada, J.,** (2014). Development of a multilayered wide-ranged torque magnetorheological brake, *Smart Mater. Struct.*, 23(2), 25028.
- [13] **Goddard, N., Kemp, R. ve Lane, R.,** (1997). Smart Materials, *Packag. Technol. Sci.*, 10, 129-143.
- [14] **Nam, T. ve Ahn, K.,** (2009). A new structure of a magnetorheological brake with the waveform boundary of a rotary disk, *Smart Mater. Struct.*, 18(11), 115029.
- [15] **Nam, Y., Moon, Y. ve Park, M.,** (2007). PErformance improvement of a rotary MR fluid actuator based on electromagnetic design, *J. Intell. Mater.*

Syst. Struct., 19(6), 695-705.

- [16] **Avraam, M., Horodincu, M., Romanescu, I. ve Premount, A.,** (2010). Computer controlled rotational MR-brake for wrist rehabilitation device, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 21(15), 1543-1557.
- [17] **Nguyen, Q., Jeon, J. ve Choi, S.,** (2011). Optimal design of an hybrid magnetorheological brake for middle-sized motorcycles, *Appl. Mech. Mater.*, 52-54, 371-377.
- [18] **Delivorias, R.,** Research on smart materials: application of ER and MR fluid in an automotice crash energy absorber, *M.Sc. thesis*, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2004.
- [19] **Parlak, Z.,** Manyeto-reolojik sıvılı yarı-aktif bir sönümleyici tasarımı ve analizi, *Doktora tezi*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, (2010).
- [20] **Rabinow, J.,** (1948). The magnetic fluid clutch, *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, 67(2), 1308-1315.
- [21] **Dyke, S., Spencer B., Sain, M. ve Carlson, J.,** (1998). An experimental study of MR dampers fro seismic prtoection, *Smart Mater. Struct.*, 7, 693-703.
- [22] **Park, E., Stoikov, D., Falcao de Luz, L. ve Suleman, A.,** (2006). A performance evaluation of an automotive magnetorheological brake design witha sliding mode controller, *Mechatronics*, 16(7), 405-416.
- [23] **Karkaoc, K., Park,, E. ve Suleman, A.,** (2008). Design considerations for an automotive magnetorheological brake, *Mechatronics*, 18(8), 434-447.
- [24] **Park, E., Falcao de Luz, L. ve Suleman, A.,** (2008), Multidisciplinary desing optimizatioon of an automotive magnetorheological brake design, *Comput. Struct.*, 86(3-5), 207-216.
- [25] **Nguyen, Q. Ve Choi, S.,** (2008). Optimal design of a vehicle magnetorheological damper considering the damping force and dynamic range, *Smart Mater. Struct.*, 18(1), 15013.
- [26] **Gudmundsson, K.,** Design of a magnetorheological fluid for an MR prosthetic knee actuator with an optimal geometry, *Ph. D. Thesis*, University of Iceland, Reykjavik, (2011).
- [27] **Clemente, A., Caballero, A., Rojas, D. Copaci, D. Ve Lorente, L.,** (2011). Elbow functional compensation using a lightweight magnetorheological clutch, *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS*, 5215-5218.
- [28] **Najmaei, N. Asadian, A., Kermani, M. ve Patel, R.,** (2015). Desing and performance evaluation of a prototype MRF-based haptic interface for medical applications, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics, Mechatronics*, 21(1), 110-121.
- [29] **Senkal, D. ve Gurocak, H.,** (2010). Serpentine flux path for high torque MRF brakes in haptic applications, *Mechatronics*, 20(3), 377-383.
- [30] **Bullion, C. ve Gurocak, H.,** (2009). Haptic glove with MR brakes for distributed finger force feedback, *Presence TEleoperators Virtual Environ.*, 18(6), 421-433.
- [31] **Fernández, M. Ve Chang, J.,** (2016). Development of magnetorheological fluid clutch for robotic arm applications, *2016 IEEE 14th Int. Work. Adv. Motion Control. AMC*, 510-515.
- [32] **Allotta, B., Pugi, L. ve Bartolini, F.,** Design and Simulation of Magneto-Rheological Dampers for railway applications, 1-10.

- [33] **Liao, W. ve Wang, D.,** (2003). Semiactive Vibration Control of Train Suspension Systems via Magnetorheological Dampers, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 14, 161–172.
- [34] **Grunwald, A. ve Olabi, A.,** (2008). Design of magneto-rheological (MR) valve, *Sensors Actuators, A Phys.*, 148, 211-223.
- [35] **Yoo, J. ve Wereley, N.,** (2002). Design of a High-Efficiency Magnetorheological Valve, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 13(10), 679–685.
- [36] **Goldasz, J. Ve Sapiński, B.,** (2015). Application of cfd to modeling of squeeze mode magnetorheological dampers, *Acta Mech. Autom.*, 9(3), 129–134.
- [37] **Goncalves, F. ve Carlson, J.,** (2009). An alternate operation mode for MR fluids—magnetic gradient pinch, *J. Phys. Conf. Ser.*, 149, 12050.
- [38] **Imaduddin, F., Mazlan, S. ve Zamzuri, H.,** (2013). A design and modelling review of rotary magnetorheological damper, *Mater. Des.*, 51, 575–591.
- [39] **Yang, L., Chen, S., Zhang, B. ve Feng, Z.,** (2011). A Rotary Magnetorheological Damper for a Tracked Vehicle, *Adv. Mater. Res.*, 328–330, 1135–1138.
- [40] **Giorgetti, A., Baldanzini, N., Biasiotto, M. ve Citti, P.,** (2010). Design and testing of a MRF rotational damper for vehicle applications, *Smart Mater. Struct.*, 19(6), 65006.
- [41] **Zhang, J., Feng, Z., ve Jing, Q.,** (2009). Optimization analysis of a new vane MRF damper, *J. Phys. Conf. Ser.*, 149, 12087.
- [42] **Najmaei, N., Yadmellat, P., Kermani, M. ve Patel, R.,** (2014). Application of Magneto-Rheological Fluid based clutches for improved performance in haptic interfaces, *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 832–837.
- [43] **Najmaei, N., Kermani, M. ve R. V. Patel,** Suitability of Small-Scale Magnetorheological Fluid-Based Clutches in Haptic Interfaces for Improved Performance, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 20(4), 1863–1874.
- [44] **Başer, Ö.,** Transparency and Stability Improvement in Haptic Devices, *Ph. D. Thesis*, Middle East Technical University, Ankara, (2012).
- [45] **Huang, J., Zhang, J., Yang, Y. ve Wei, Y.,** (2002). Analysis and design of a cylindrical magneto-rheological fluid brake, *J. Mater. Process. Technol.*, 129(1–3), 559–562.
- [46] **Li, W. ve Du, H.,** (2003). Design and Experimental Evaluation of a Magnetorheological Brake, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 21, 508–515.
- [47] **Gudmundsson, K., Jonsdottir, F. ve Thorsteinsson, F.,** (2010). A geometrical optimization of a magneto-rheological rotary brake in a prosthetic knee, *Smart Mater. Struct.*, 19(3) , 35023.
- [48] **Kikuchi, T. ve Kobayashi, K.,** (2011). Design and Development of Cylindrical MR Fluid Brake with Multi-Coil Structure, *J. Syst. Des. Dyn.*, 5(7), 1471–1484.
- [49] **Nguyen, Q. ve Choi, S.,** (2011). Selection of magnetorheological brake types via optimal design considering maximum torque and constrained volume, *Smart Mater. Struct.*, 21, 15012.
- [50] **Shiao, Y. ve Nguyen, Q.,** (2013). Development of a multi-pole magnetorheological brake, *Smart Mater. Struct.*, 22(6), 65008.

- [51] **Rizzo, R., Musolino, A., Bucchi, F., Forte, P. ve Frenzo, F.,** (2014). Magnetic FEM design and experimental validation of an innovative fail-safe magnetorheological clutch excited by permanent magnets, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 29(3), 628–640.
- [52] **Shiao, Y. ve Nguyen, Q.,** (2013). Torque enhancement for a new magnetorheological brake, *Procedia Eng.*, 76, 12–23.
- [53] **Nguyen, Q., Lang, V. ve Choi, S.,** (2015). Optimal design and selection of magneto-rheological brake types based on braking torque and mass, *Smart Mater. Struct.*, 24(6), 67001.
- [54] **Moghani, M. ve Kermani, M.,** (2016). Design and development of a hybrid Magneto-Rheological clutch for safe robotic applications, *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 3083–3088.
- [55] **Rizzo, R., Musolino, A. ve Lai, H.,** (2017). An Electrodynamic/Magnetorheological Clutch Powered by Permanent Magnets, *IEEE Trans. Magn.*, 53(2), 1-7.
- [56] **Topçu, O., Taşcıoğlu, Y. ve Konukseven, E.,** (2018). Modeling and experimental evaluation of a rotary peristaltic magnetorheological fluid device with low off-state torque for haptic interfaces, *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, 40(1), 1-9.
- [57] **Meeker, D.,** <http://www.femm.info/wiki/HomePage>, Finite Element Method Magnetics, alındığı tarih: 27.07.2017.
- [58] **Bucchi, F., Forte, P. ve Frenzo, F.,** (2017). Geometry optimization of a magnetorheological clutch operated by coils, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, 231(1–2), 100–112.
- [59] **Kavlicoglu, N., Kavlicoglu, B., Liu, Y. ve Gordaninejad, F.,** (2007). Response time and performance of a high-torque magneto-rheological fluid, *Smart Mater. Struct.*, 16, 149-159.
- [60] **Nam, T. ve Ahn, K.,** (2009). New approach to designing an MR brake using a small steel roller and MR fluid, *J. Mech. Sci. Technol.*, 23(7), 1911–1923.
- [61] **Shiao, Y., Ngoc, N. ve Lai, C.,** (2016). Optimal design of a new multipole bilayer magnetorheological brake, *Smart Mater. Struct.*, 25(11), 115015.
- [62] **Asmar, N.,** Partial Differential Equations with Fourier Series and Boundary Value Problems, *Courier Dover Publications*, 2nd edition, (2004).
- [63] **Heppner, F. ve Grenander, U.,** (1990). A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks, *The Ubiquity of Chaos*, 223, 233–238.
- [64] **Chootinan, P. ve Chen, A.,** (2006). Constraint handling in genetic algorithms using a gradient-based repair method, *Comput. Oper. Res.*, 33(8), 2263–2281.



EKLER

EK 1: T-tipi MR Frenin İteratif Formülasyonla Çözümü

EK 2: Deney Prosedürleri

EK 3: Belirsizlik Analizi

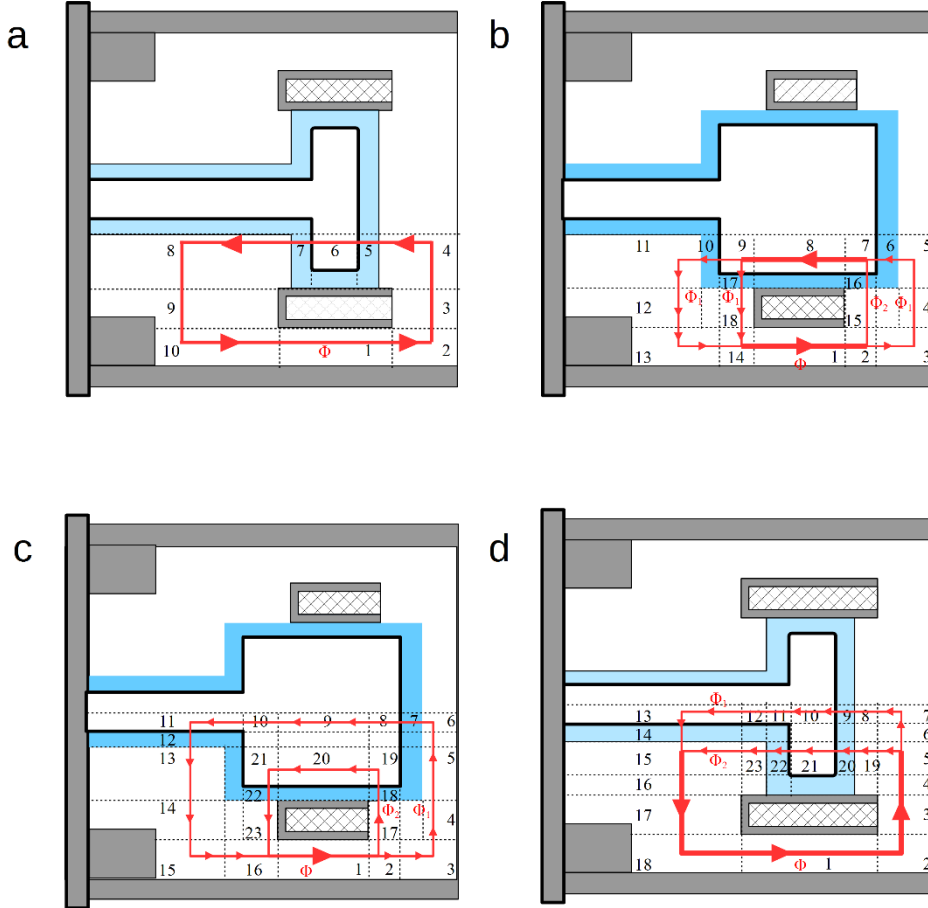
EK 4: Histeriz Karakteristiği Elde Etmek için Yapılan Tüm Deneylerin Her Bir Akımda Ortalama Değeri ve Değerlerin Standart Sapmaları

EK 5: Basamak Giriş Deney Sonuçları

EK 6: Frenin Farklı Frekanslarda Uyarıtıya Verdiği Cevap

EK 1: T-tipi MR Frenin İteratif Formülasyonla Çözümü

T-tipi MR frenin İF yaklaşımıyla ayrıklaştırılması Şekil EK 1.1’de verilmiştir. Ayrıklaştırma, manyetik akı yoğunluğunun “ t_j ” ve dairesel kanalların bobinin kapladığı alanın içinde bulunup bulunmamasına bağlı olarak değişiklik göstermesinden 4 farklı şekilde yapılmıştır. Çözüm için gereken denklemler her bir ayrıklaştırma için



Şekil EK 1.1 : T-tipi MR frenin iteratif formülasyonla ayrıklaştırılması.

Şekil EK 1.1’de verilen “a” konfigürasyonu için:

$$B_i A_i = \Phi, i = 1, 2, 3, \dots, 10$$

$$\sum_{i=1}^{10} H_i l_i = \frac{NI}{2}$$

Şekil EK 1.1’de verilen “b” konfigürasyonu için:

$$\sum_{i=2',3,4,5,6,7'} H_i l_i = \sum_{k=2'',15,16,7''} H_k l_k$$

$$B_{2'}A_{2'} = B_3A_3 = B_4A_4 = B_5A_5 = B_6A_6 = B_{7'}A_{7'} = \Phi_1$$

$$B_{2''}A_{2''} = B_{15}A_{15} = B_{16}A_{16} = B_{7''}A_{7''} = \Phi_2$$

$$\sum_{i=9',10,11,12,13,14'} H_i l_i = \sum_{k=9'',17,18,14''} H_k l_k$$

$$B_{9'}A_{9'} = B_{10}A_{10} = B_{11}A_{11} = B_{12}A_{12} = B_{13}A_{13} = B_{14'}A_{14'} \\ = \Phi_3$$

$$B_{9''}A_{9''} = B_{17}A_{17} = B_{18}A_{18} = B_{14''}A_{14''} = \Phi_4$$

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$$

$$\Phi = \Phi_3 + \Phi_4$$

$$B_1A_1 = B_8A_8 = \Phi$$

$$\sum_{i=1}^{18} H_i l_i = \frac{NI}{2}$$

Şekil EK 1.1’de verilen “c” konfigürasyonu için:

$$B_{5'}A_{5'} = B_6A_6 = B_7A_7 = B_8A_8 = B_9A_9 = B_{10}A_{10} = B_{11}A_{11} \\ = B_{12}A_{12} = B_{13}A_{13} = B_{14}A_{14} = B_{15'}A_{15'} = \Phi_1$$

$$B_{5''}A_{5''} = B_{19}A_{19} = B_{20}A_{20} = B_{21}A_{21} = B_{22}A_{22} = B_{23}A_{23} \\ = B_{15''}A_{15''} = \Phi_2$$

$$\sum_{i=5',6,7,8,9,10,11,12,13,14,15'} H_i l_i = \sum_{k=5'',19,20,21,22,23,15''} H_k l_k$$

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$$

$$B_1A_1 = B_2A_2 = B_3A_3 = B_4A_4 = B_5A_5 = B_{16}A_{16} = B_{17}A_{17} \\ = B_{18}A_{18} = \Phi$$

$$\sum_{i=1}^{18} H_i l_i = \frac{NI}{2}$$

Şekil EK 1.1’de verilen “d” konfigürasyonu için:

$$B_{2'}A_{2'} = B_3A_3 = B_4A_4 = B_5A_5 = B_6A_6 = B_7A_7 = B_8A_8 = B_9A_9 \\ = B_{10}A_{10} = B_{11}A_{11} = B_{12}A_{12} = B_{13}A_{13} \\ = B_{14}A_{14} = B_{15}A_{15} = B_{16'}A_{16'} = \Phi_1$$

$$B_{2''}A_{2''} = B_{17}A_{17} = B_{18}A_{18} = B_{19}A_{19} = B_{20}A_{20} = B_{21}A_{21} \\ = B_{22}A_{22} = B_{23}A_{23} = B_{16''}A_{16''} = \Phi_2$$

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$$

$$\sum_{i=1}^{23} H_i l_i = \frac{NI}{2}$$

EK 2: Deney Prosedürleri

Deneyleerde bu bölümde anlatılan prosedürlerle uyulmuştur.

Histerisiz deneyleri:

- 1- DC motor 20 rpm açısıl hıza ayarlanır.
- 2- Frene 30 sn boyunca 0 A akım uygulanır.
- 3- Akım 0.1 A adımlarla her bir akım değerinde 30 sn ölçüm yapılacak şekilde 1.5 A akıma kadar çıkartılır. Daha sonra aynı şekilde 0 A akıma düşülür.
- 4- Açısıl hız 40, 60 ve 80 rpm yapılarak ikinci ve üçüncü adımlar tekrarlanır.
- 5- DC motorun dönme yönü SYT olarak güncellenerek 1-4. adımlar tekrarlanır.
- 6- 1-5. adımlar uygulanarak bir set daha ölçüm yapılır.

Basamak giriş deneyleri:

- 1- DC motor SY'de 40 rpm açısıl hıza ayarlanır.
- 2- Frene iki sn boyunca 0 A; ikinci saniyeden itibaren 0.5 A akım sekiz sn boyunca uygulanır.
- 3- Birinci ve ikinci adımlar beşer kez tekrarlanır.
- 4- İkinci adımdaki akım değeri 1 A ve 1.5 A olarak güncellenerek 1-3. adımlar tekrarlanır.

Frekans cevabı deneyleri:

- 1- DC motor 40 rpm açısıl hıza ayarlanır.
- 2- Frene uygulanacak sinüzoidal akımın frekansı 0.5 rad/s değerine ayarlanır.
- 3- Frene iki sn boyunca 0 A; iki-dört sn arası 1.25 A; dördüncü saniyeden itibaren $1.25+0.25*\sin(\omega t)$ akımı uygulanır. 40 sn boyunca ölçüm yapılır.
- 4- İkinci adımdaki frekans değeri sırasıyla şu değerlere ayarlanarak 1-3. adımlar tekrarlanır: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 500 rad/s

EK 3: Belirsizlik Analizi

Tork sensörünün:

- Tam ölçek: 10 Nm
- Sıfır kayma hatası: Tam ölçeğin %0.5'i
- Hassaslık: Okunan değerin %1'i
- Histerisiz: Tam ölçeğin %0.25'i

Elektrik karakteristiği:

- Voltaj: 10 V
- Hassaslık: 2mV/V
- Sıfır sapması: 1 mV

Belirsizlik hesabında Karelerin Toplamının Karekökü (Root-sum-squares) yöntemi kullanılmaktadır:

$$u_x = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_k^2}$$

Sıfır kayma hatası:

$$u_1 = 10 * \frac{0.5}{100} = 0.05 \text{ Nm}$$

Hassaslık (tam ölçek için):

$$u_2 = 10 * \frac{1}{100} = 0.1 \text{ Nm}$$

Histerisiz:

$$u_3 = 10 * \frac{0.25}{100} = 0.025 \text{ Nm}$$

Voltaj hassaslık:

$$u_4 = 10 \text{ V} * 2 \frac{\text{mV}}{\text{V}} * 0.9973 \frac{\text{Nm}}{\text{V}} = 0.02 \text{ Nm}$$

Voltaj sıfır sapma:

$$u_5 = 1 \text{ mV} * 0.9973 \frac{\text{Nm}}{\text{V}} = 0.001 \text{ Nm}$$

Belirsizlik:

$$u_x = \sqrt{0.05^2 + 0.1^2 + 0.025^2 + 0.02^2 + 0.001^2} = 0.116 \text{ Nm}$$

Belirsizlik (%):

$$u_x = \frac{0.116}{10} * \%100 = 1.16\%$$



EK 4: Histeriz Karakteristiği için Yapılan Tüm Deneylerin Her Bir Akımda Ortalama Değeri ve Değerlerin Standart Sapmaları

Çizelge EK 4.1'de "akım" uygulanan akımı; "20", "40", "60" ve "80" motorun açılal hızını; açılal hızın önündeki "S" motorun saat yönünde döndürüldüğünü; üstteki ve "1" ve "2" ise birinci ve ikinci deneyi ifade etmektedir. Bütün değerler Nm cinsindedir.

Çizelge EK 4.1 : Farklı açılal hızlarda ve dönme yönlerinde yapılan histerisiz deneylerinin akımlara göre ortalama değerleri.

Akım[A]	20 ¹	40 ¹	60 ¹	80 ¹	S20 ¹	S40 ¹	S60 ¹	S80 ¹	20 ²	40 ²	60 ²	80 ²	S20 ²	S40 ²	S60 ²	S80 ²	σ
0.0	0.19	0.09	0.08	0.08	0.02	0.01	0	0	0.08	0.1	0.1	0.11	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05
0.1	0.3	0.09	0.12	0.12	0.02	0	0.01	0.01	0.09	0.11	0.11	0.12	0.02	0.03	0.03	0.05	0.08
0.2	0.56	0.31	0.39	0.36	0.17	0.23	0.22	0.23	0.3	0.32	0.3	0.31	0.2	0.25	0.25	0.25	0.09
0.3	0.92	0.68	0.78	0.74	0.53	0.6	0.58	0.59	0.67	0.64	0.63	0.64	0.53	0.61	0.62	0.59	0.10
0.4	1.31	1.08	1.18	1.12	0.9	1.01	0.97	0.96	1.07	1.05	1.03	1.02	0.89	1.05	1.04	1.01	0.10
0.5	1.74	1.55	1.65	1.65	1.4	1.47	1.49	1.44	1.52	1.49	1.47	1.46	1.38	1.5	1.5	1.52	0.09
0.6	2.12	1.93	2.06	2.03	1.8	1.96	1.88	1.83	1.9	1.93	1.88	1.85	1.72	1.96	1.91	1.86	0.10
0.7	2.78	2.63	2.72	2.72	2.3	2.32	2.55	2.47	2.54	2.38	2.49	2.51	2.39	2.44	2.56	2.54	0.14
0.8	3.11	2.98	3.08	3.09	2.88	2.95	2.89	2.84	2.87	2.86	2.91	2.89	2.77	2.95	2.91	2.89	0.10
0.9	3.58	3.46	3.55	3.56	3.37	3.47	3.38	3.32	3.31	3.33	3.39	3.37	3.29	3.44	3.35	3.37	0.09
1.0	4.1	4.02	4.02	4.02	3.96	3.97	3.93	3.85	3.81	3.79	3.87	3.88	3.78	3.95	3.89	3.86	0.09
1.1	4.5	4.43	4.51	4.5	4.35	4.42	4.34	4.29	4.2	4.23	4.28	4.28	4.23	4.38	4.32	4.31	0.10

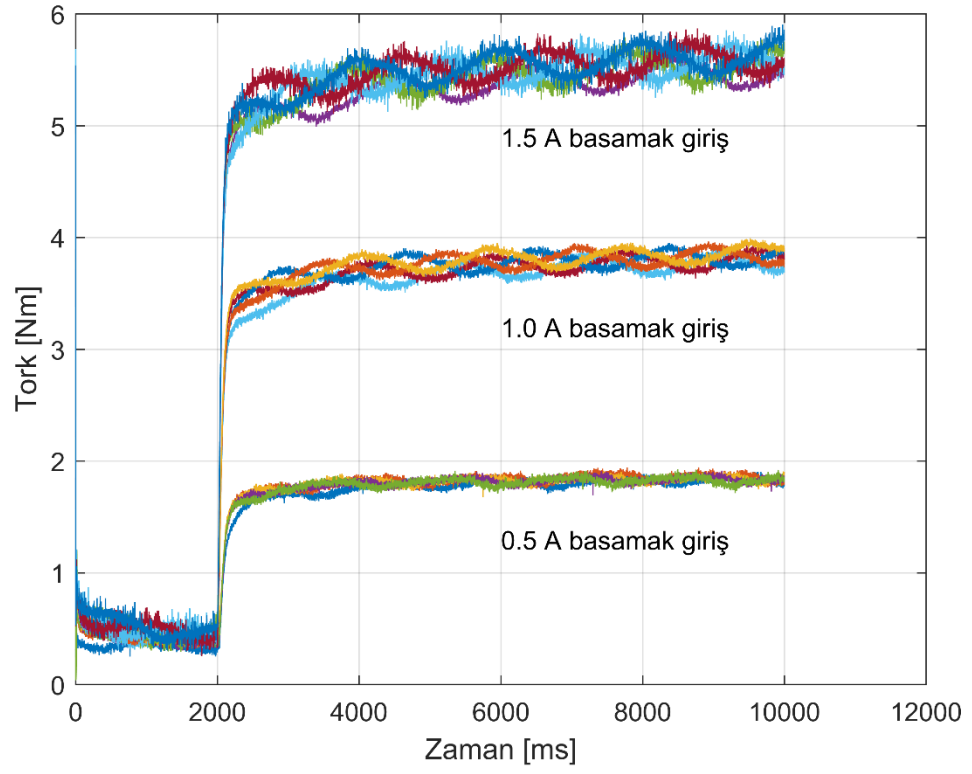
Çizelge EK 4.2 : (devam) Farklı açısız hızlarda ve dönme yönlerinde yapılan histerisiz deneylerinin akımlara göre ortalama değerleri.

1.2	4.94	4.93	4.93	4.93	4.81	4.87	4.83	4.7	4.57	4.63	4.75	4.77	4.65	4.84	4.78	4.72	0.11
1.3	5.35	5.39	5.45	5.49	5.22	5.3	5.3	5.12	4.95	5	5.1	5.17	5.04	5.27	5.23	5.17	0.16
1.4	5.71	5.82	5.88	5.92	5.63	5.77	5.7	5.57	5.33	5.44	5.48	5.56	5.42	5.65	5.6	5.58	0.17
1.5	6.13	6.34	6.37	6.42	5.97	6.2	6.11	6.03	5.7	5.77	5.86	6.02	5.78	6.05	5.97	6.06	0.21
1.4	5.93	6.17	6.23	6.25	5.76	5.97	5.96	5.85	5.5	5.62	5.67	5.83	5.63	5.8	5.8	5.85	0.22
1.3	5.69	5.95	5.99	6.02	5.52	5.73	5.75	5.54	5.29	5.32	5.43	5.62	5.4	5.56	5.57	5.68	0.22
1.2	5.44	5.65	5.64	5.65	5.2	5.42	5.41	5.26	5.06	5.07	5.18	5.34	5.06	5.26	5.22	5.4	0.20
1.1	5.1	5.37	5.34	5.36	4.95	5.14	5.14	4.96	4.75	4.76	4.83	5.03	4.83	4.94	4.95	5.1	0.20
1.0	4.82	5.01	4.95	4.95	4.6	4.8	4.75	4.55	4.46	4.43	4.53	4.7	4.51	4.63	4.58	4.69	0.18
0.9	4.37	4.56	4.54	4.52	4.21	4.39	4.34	4.17	4.07	4.06	4.08	4.25	4.09	4.19	4.18	4.27	0.17
0.8	3.96	4.11	4.07	4.04	3.81	3.94	3.86	3.68	3.69	3.63	3.68	3.82	3.69	3.76	3.76	3.84	0.15
0.7	3.64	3.76	3.71	3.67	3.5	3.61	3.5	3.29	3.28	3.18	3.36	3.5	3.39	3.45	3.41	3.56	0.17
0.6	2.93	2.99	2.96	2.92	2.79	2.87	2.77	2.66	2.73	2.7	2.7	2.79	2.73	2.74	2.72	2.87	0.11
0.5	2.48	2.54	2.53	2.47	2.37	2.4	2.34	2.28	2.31	2.26	2.27	2.32	2.31	2.32	2.32	2.42	0.09
0.4	1.9	1.92	1.92	1.86	1.8	1.82	1.76	1.7	1.78	1.75	1.74	1.79	1.77	1.77	1.77	1.88	0.07
0.3	1.41	1.42	1.39	1.35	1.33	1.33	1.26	1.22	1.31	1.27	1.28	1.28	1.28	1.28	1.26	1.32	0.06
0.2	0.9	0.9	0.88	0.86	0.83	0.82	0.76	0.75	0.86	0.83	0.82	0.83	0.8	0.81	0.79	0.87	0.04

Çizelge EK 4.3 : (devam) Farklı açısal hızlarda ve dönme yönlerinde yapılan histerisiz deneylerinin akımlara göre ortalama değerleri.

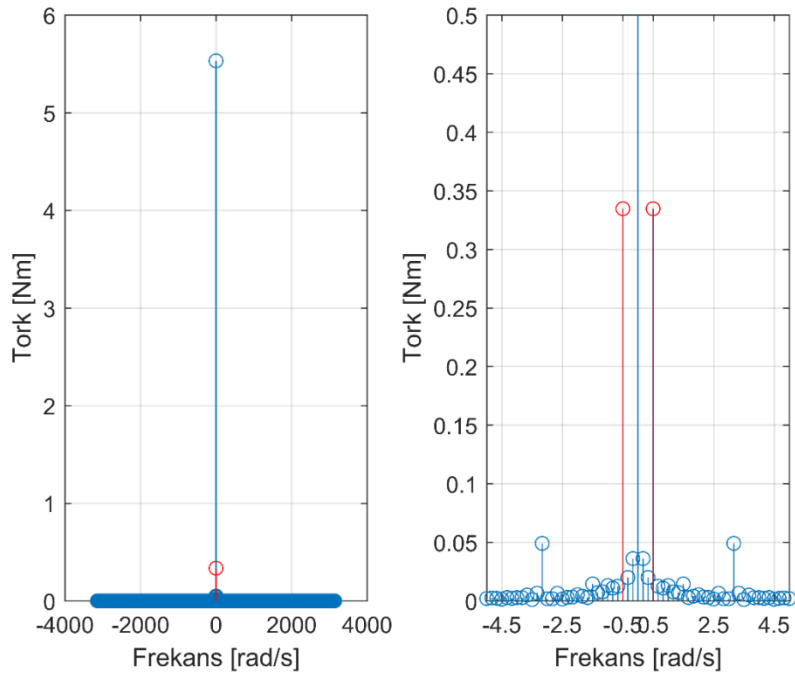
0.1	0.46	0.46	0.46	0.45	0.39	0.38	0.36	0.35	0.45	0.43	0.45	0.45	0.36	0.39	0.39	0.43	0.04
0	0.24	0.24	0.25	0.24	0.16	0.17	0.16	0.16	0.24	0.24	0.25	0.25	0.15	0.18	0.19	0.27	0.04

EK 5: Basamak Giriş Deney Sonuçları

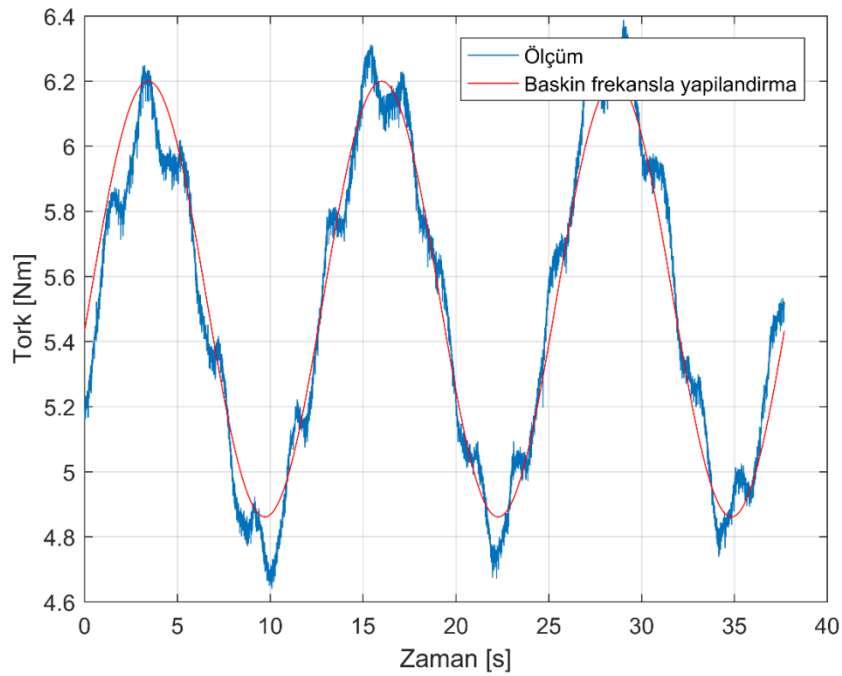


Şekil EK 5.2 : Basamak girişe ait bütün deney sonuçları.

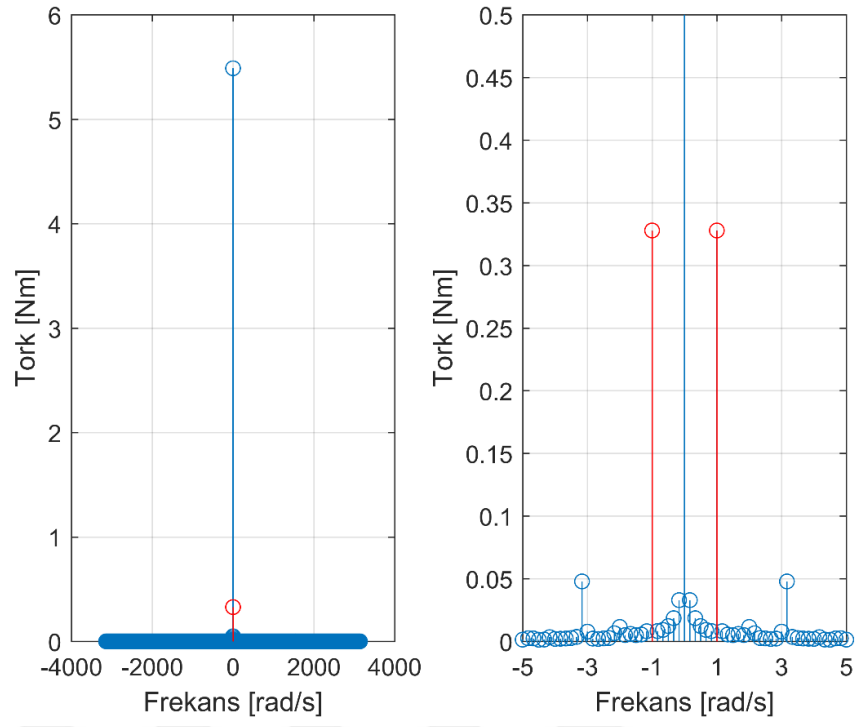
EK 6: Sinüzoidal Uyartı Cevapları



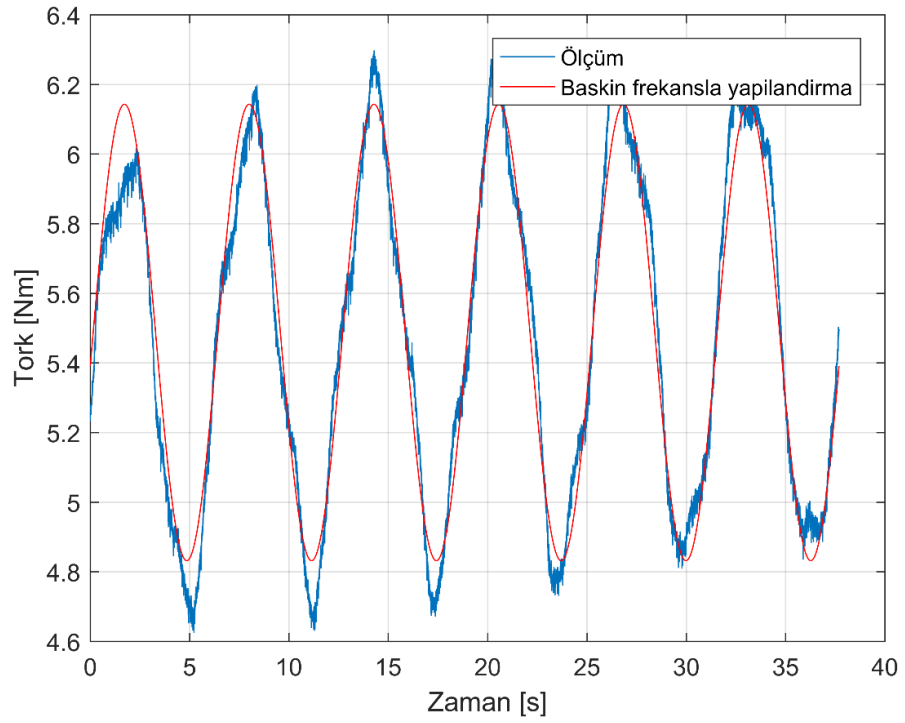
Şekil EK 6.3 : 0.5 rad/s için frekans dağılımı.



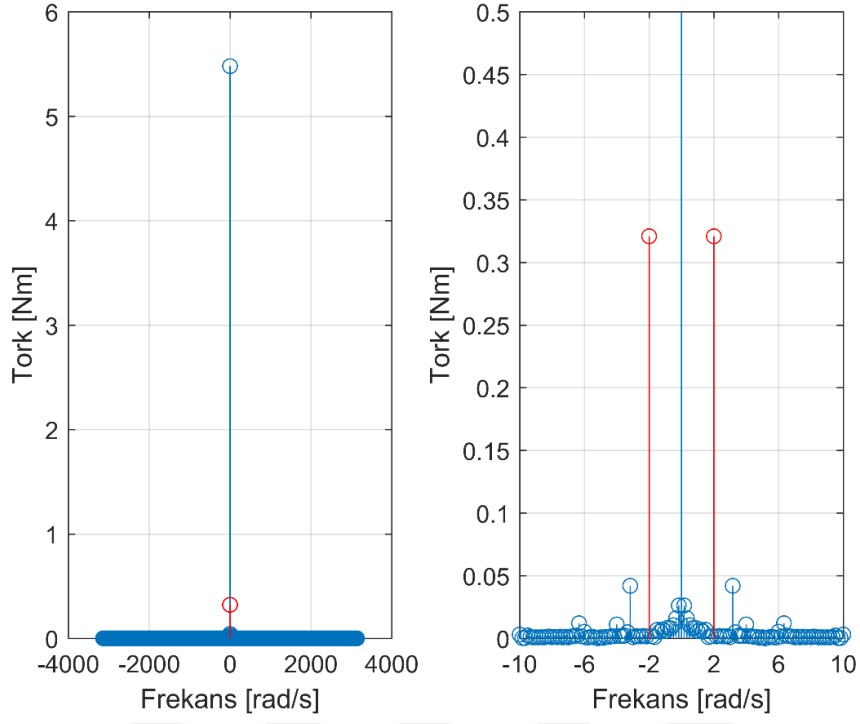
Şekil EK 6.4 : 0.5 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



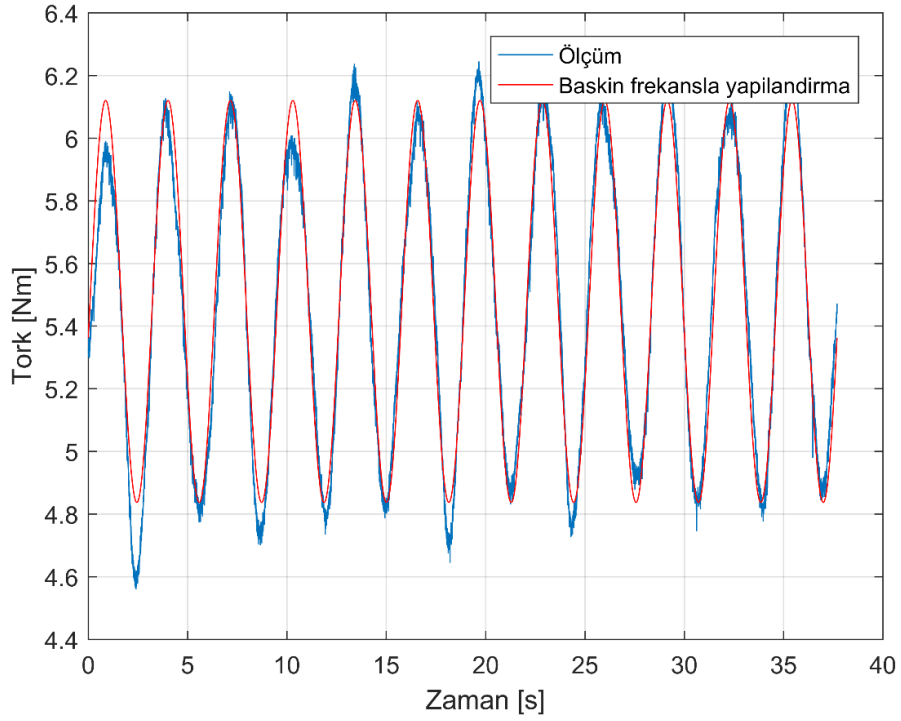
Şekil EK 6.5 : 1 rad/s için frekans dağılımı.



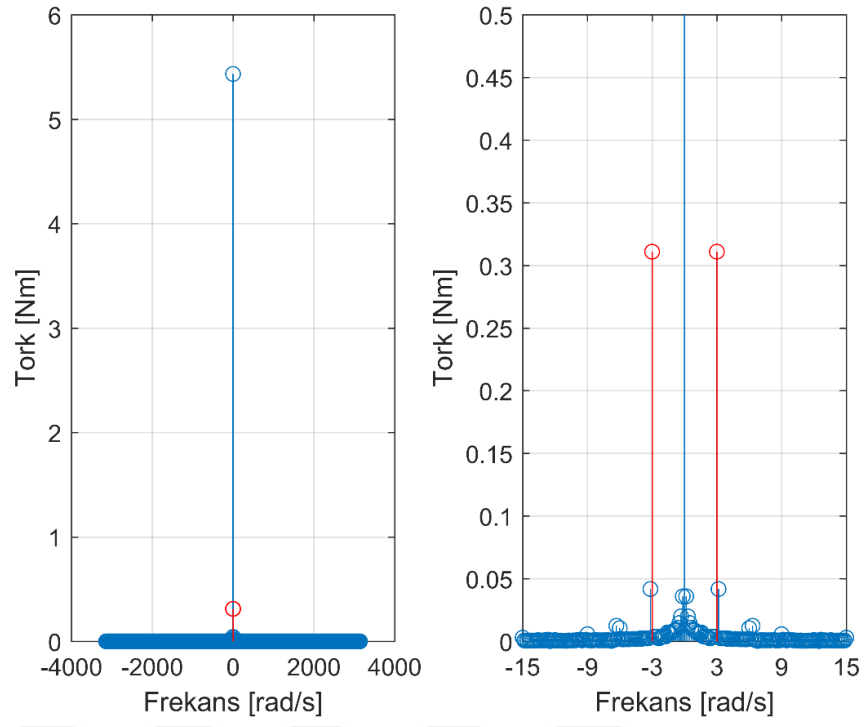
Şekil EK 6.6 : 1 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



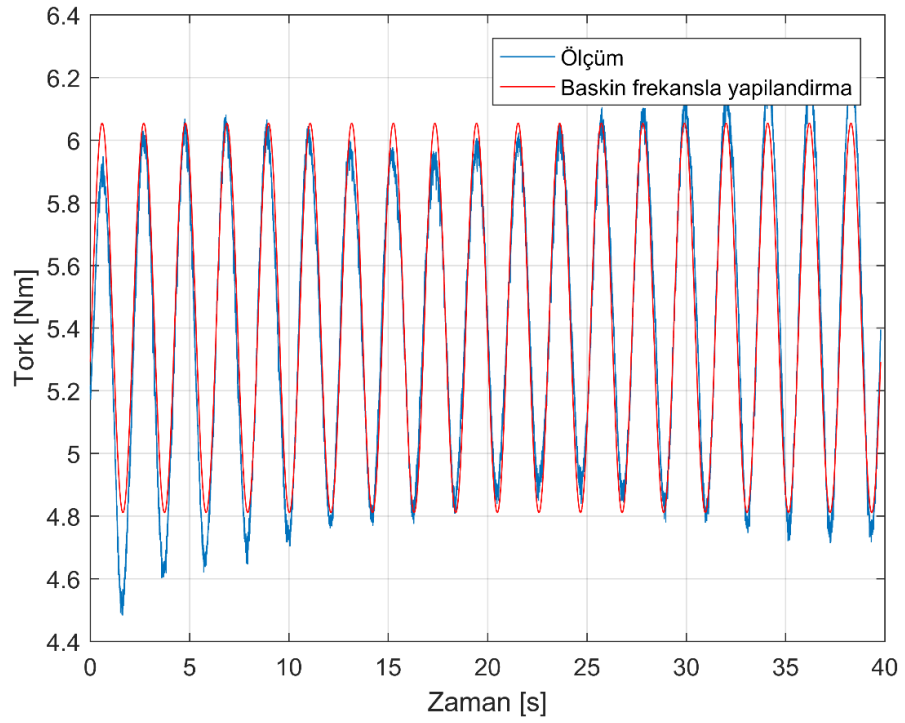
Şekil EK 6.7 : 2 rad/s için frekans dağılımı.



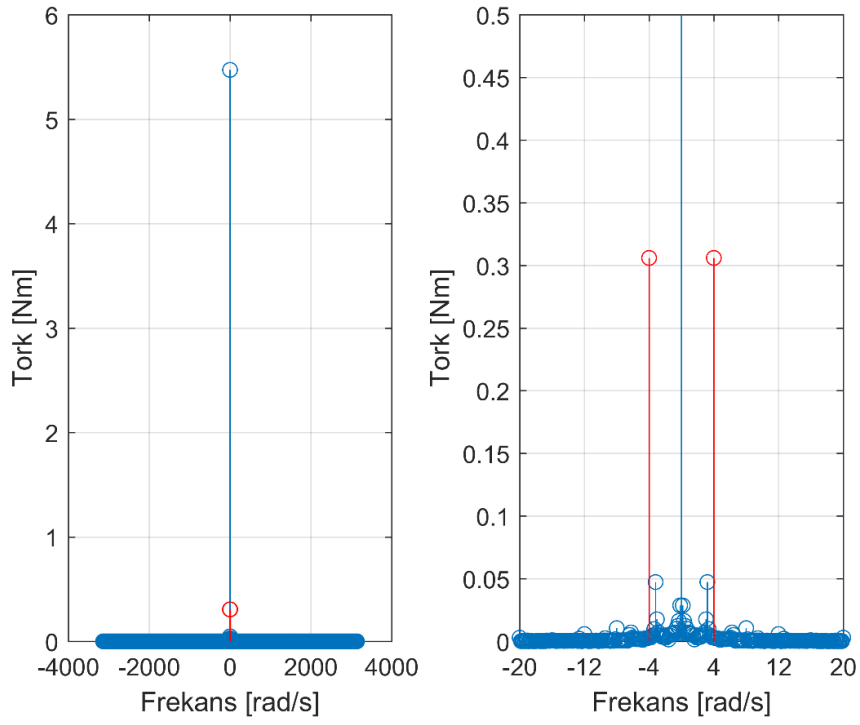
Şekil EK 6.8 : 2 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



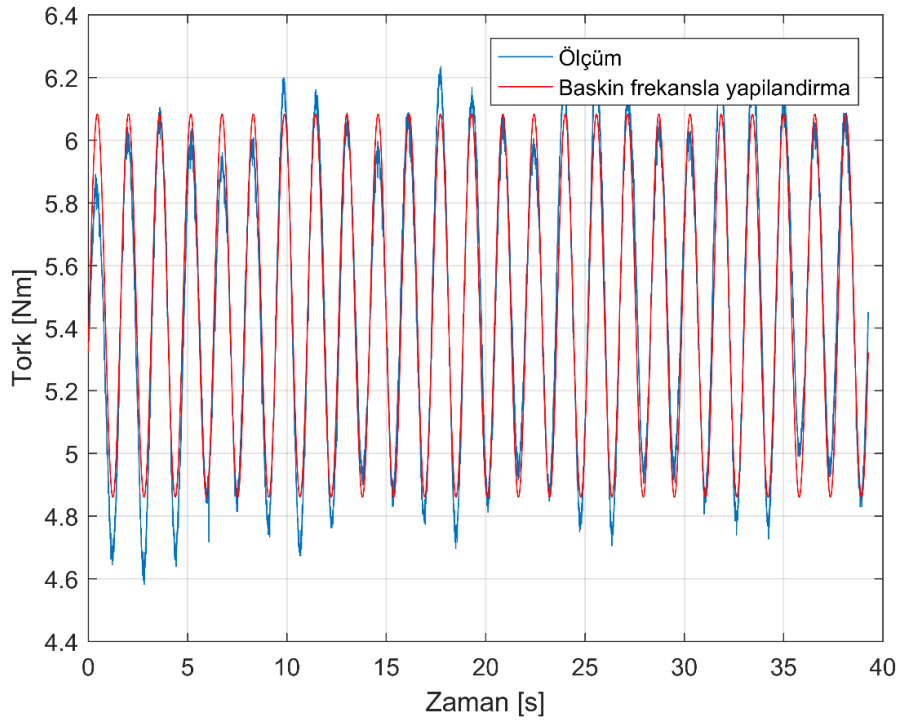
Şekil EK 6.9 : 3 rad/s için frekans dağılımı.



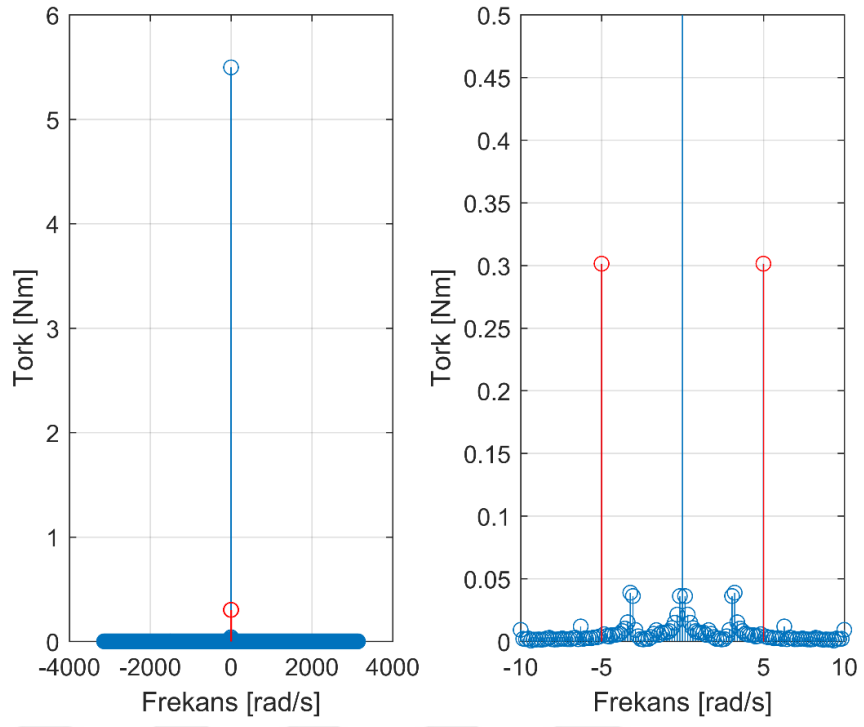
Şekil EK 6.10 : 3 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



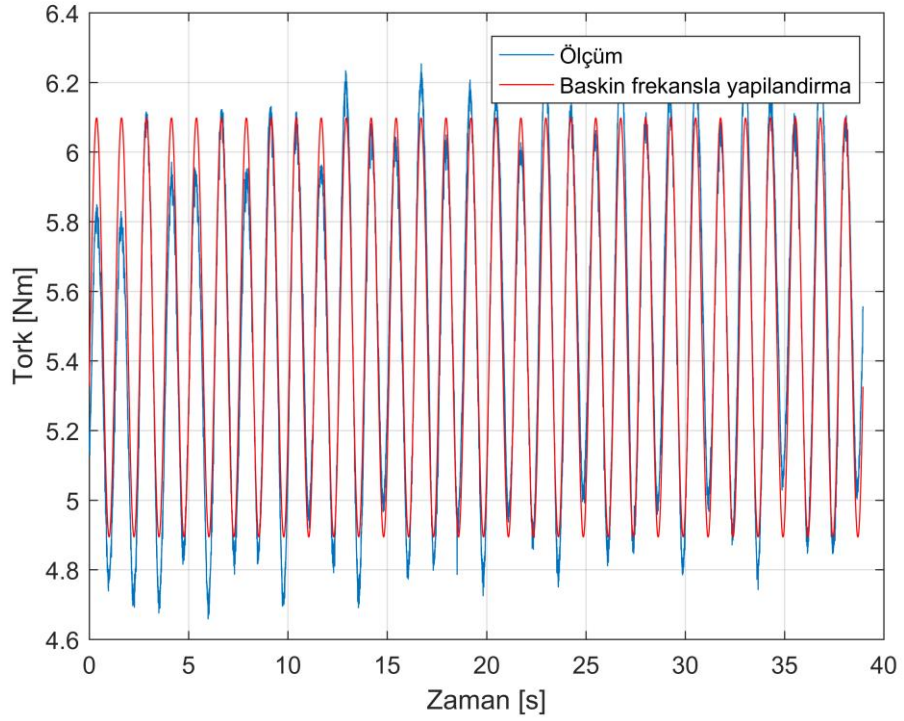
Şekil EK 6.11 : 4 rad/s için frekans dağılımı.



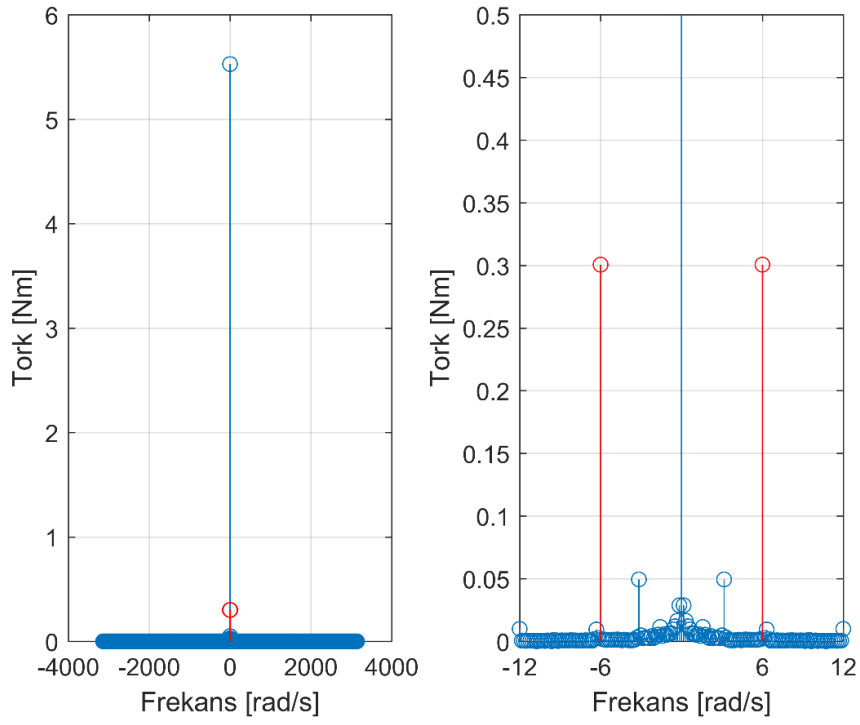
Şekil EK 6.12 : 4 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



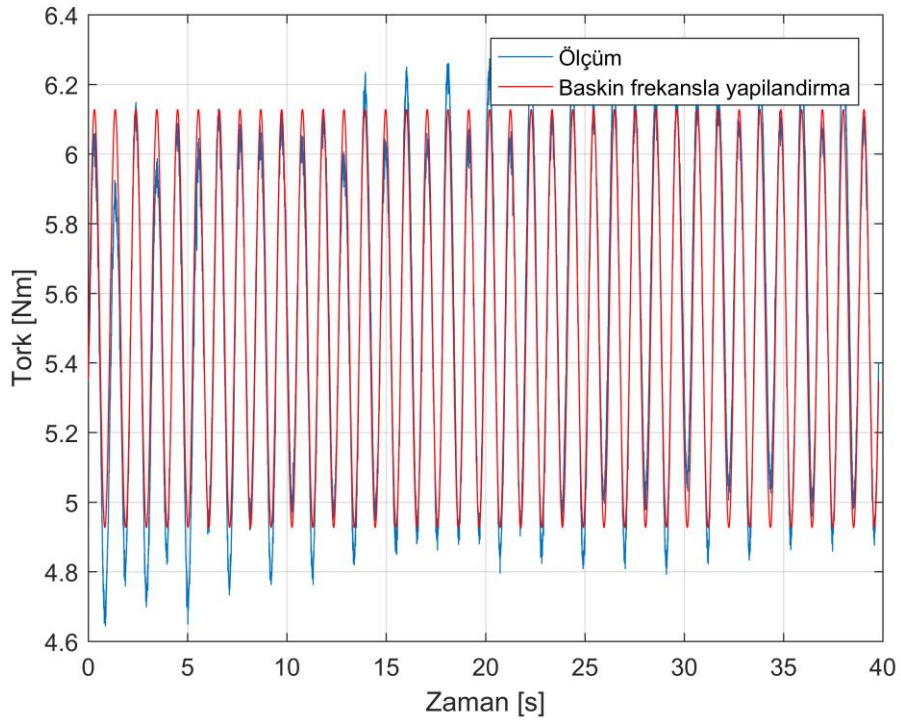
Şekil EK 6.13 : 5 rad/s için frekans dağılımı.



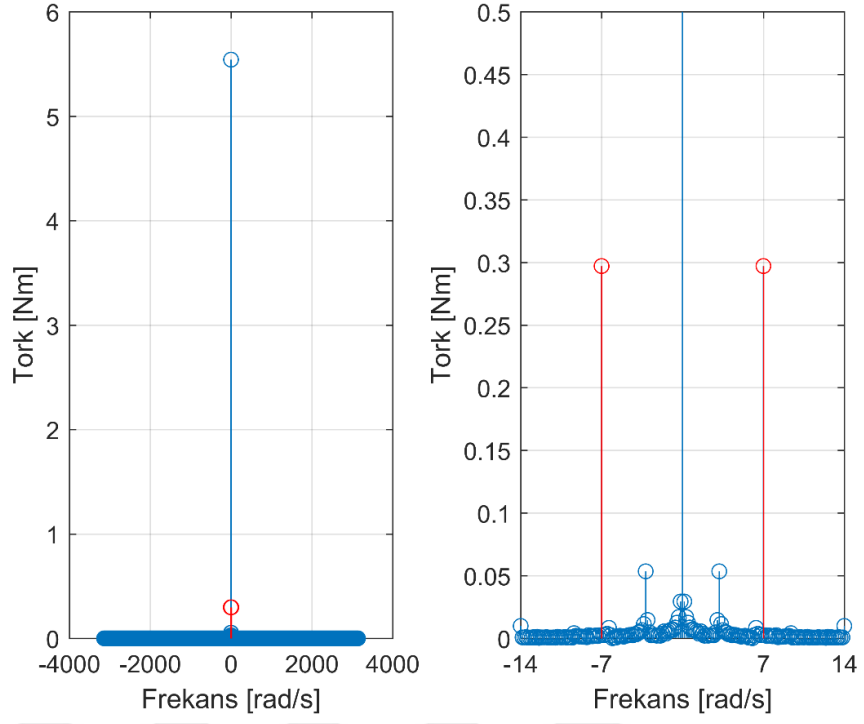
Şekil EK 6.14 : 5 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



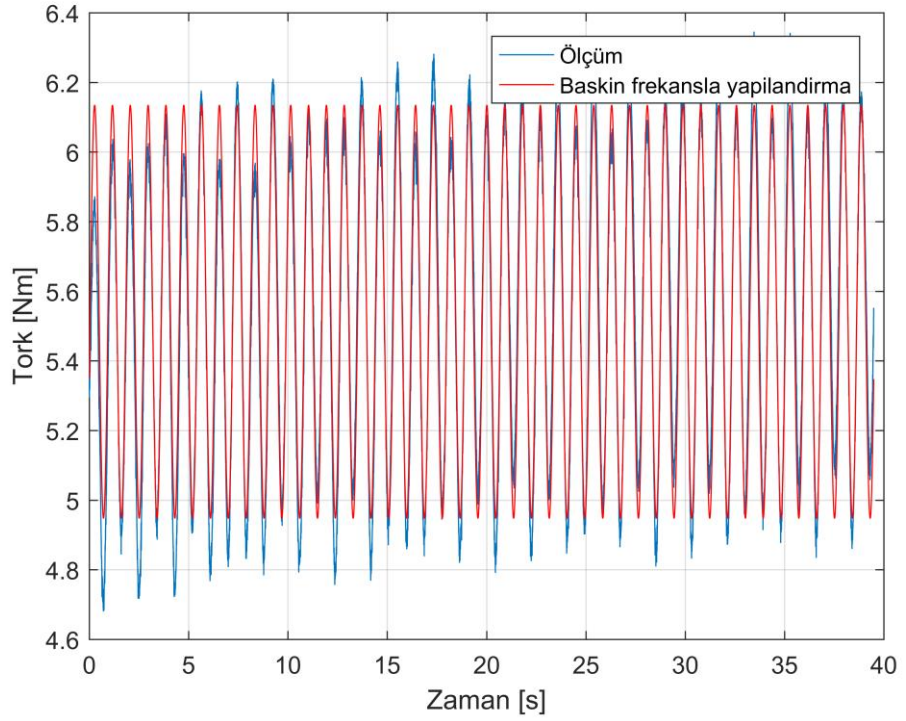
Şekil EK 6.15: 6 rad/s için frekans dağılımı.



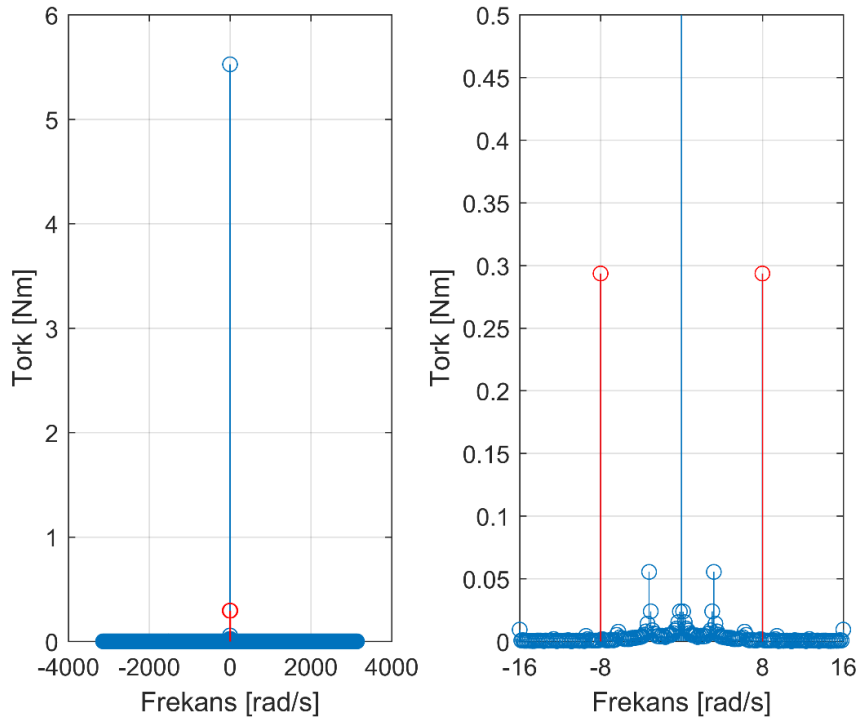
Şekil EK 6.16 : 6 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



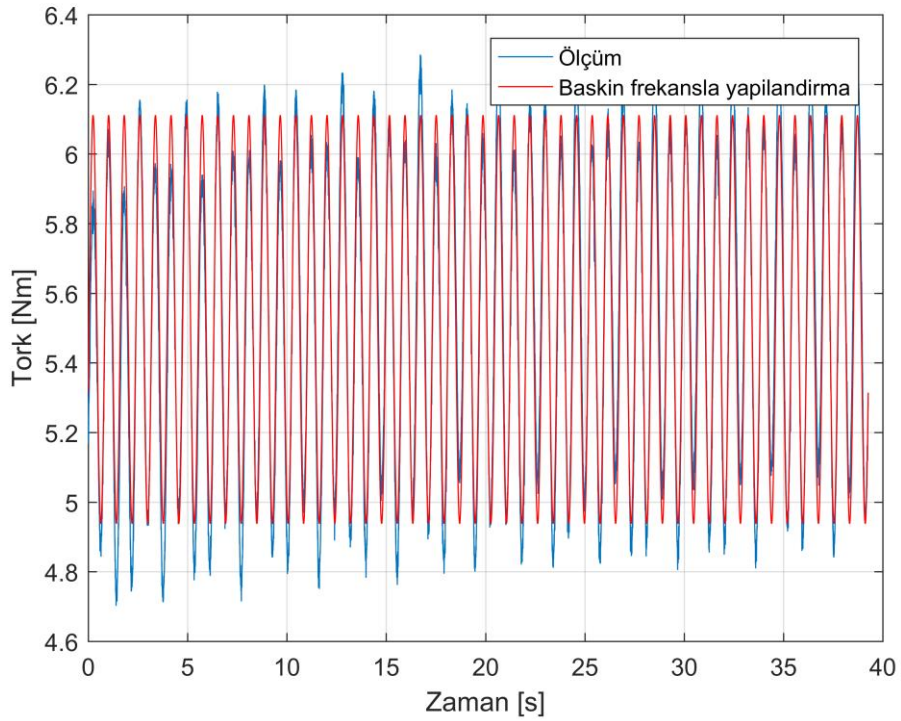
Şekil EK 6.17 : 7 rad/s için frekans dağılımı.



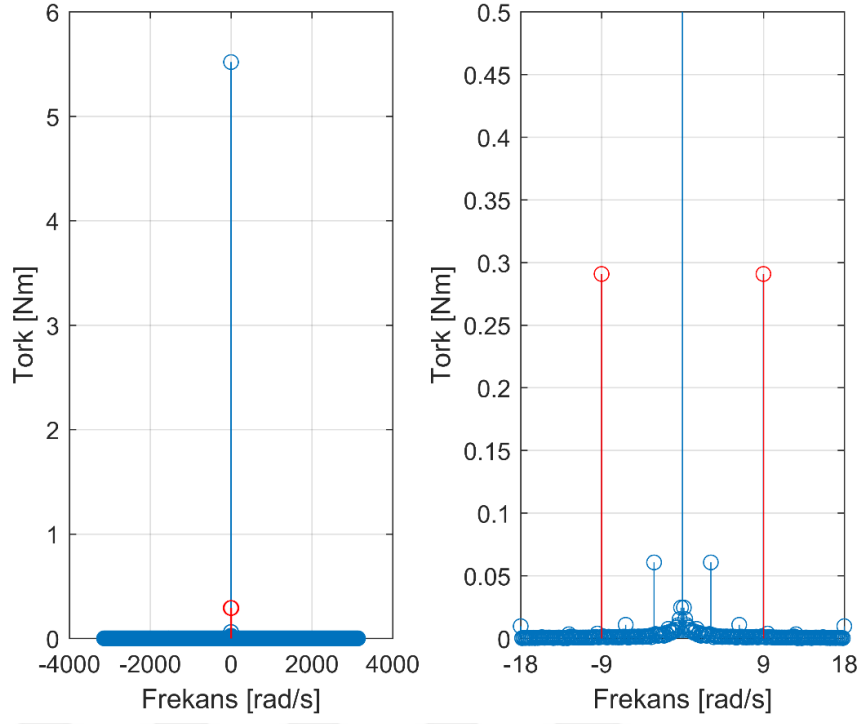
Şekil EK 6.18 : 7 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



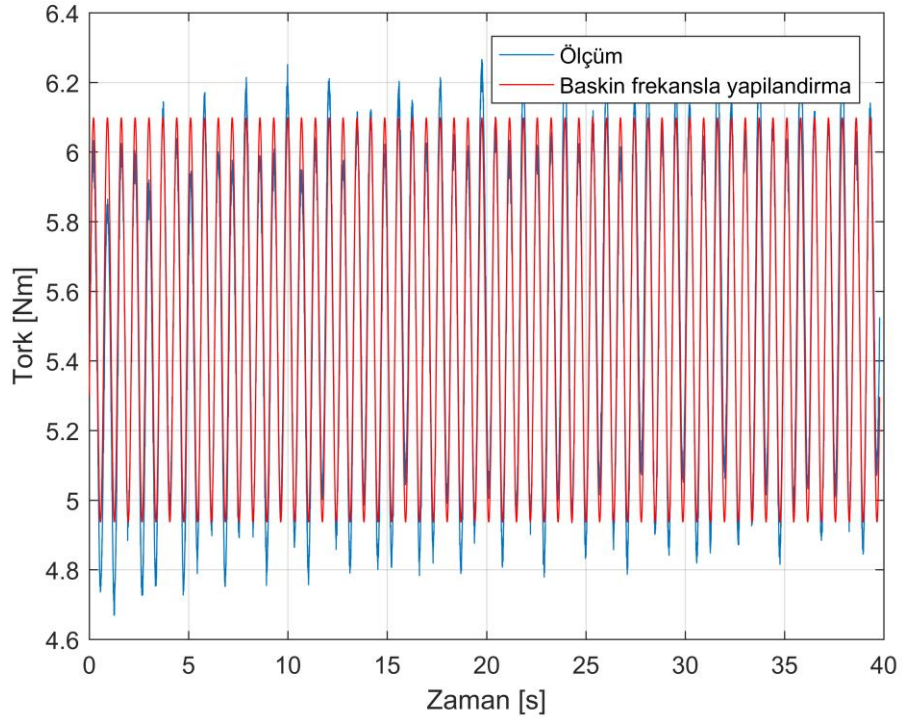
Şekil EK 6.19 : 8 rad/s için frekans dağılımı.



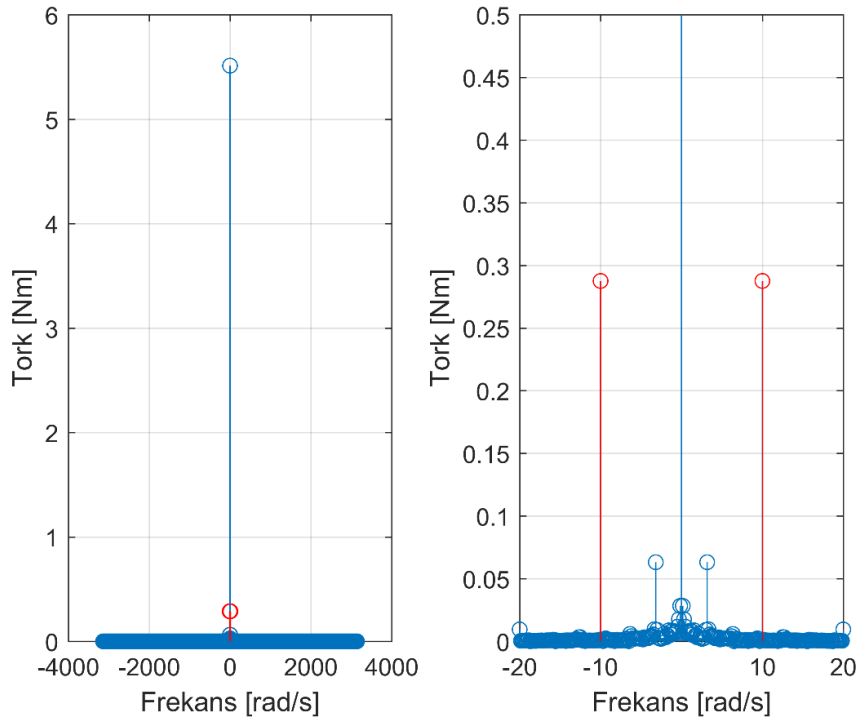
Şekil EK 6.20 : 8 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



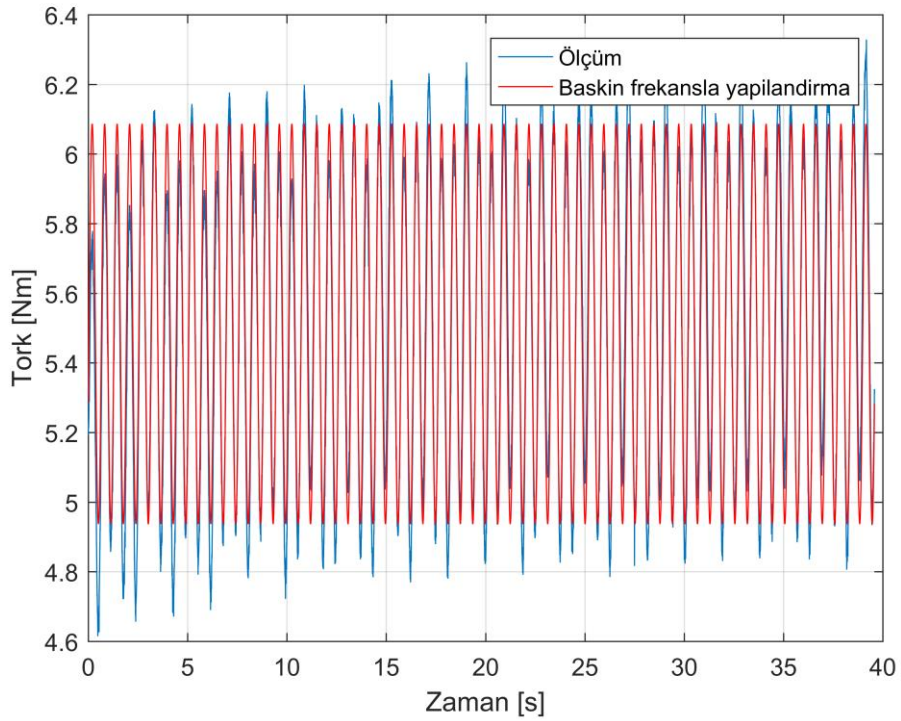
Şekil EK 6.21 : 9 rad/s için frekans dağılımı.



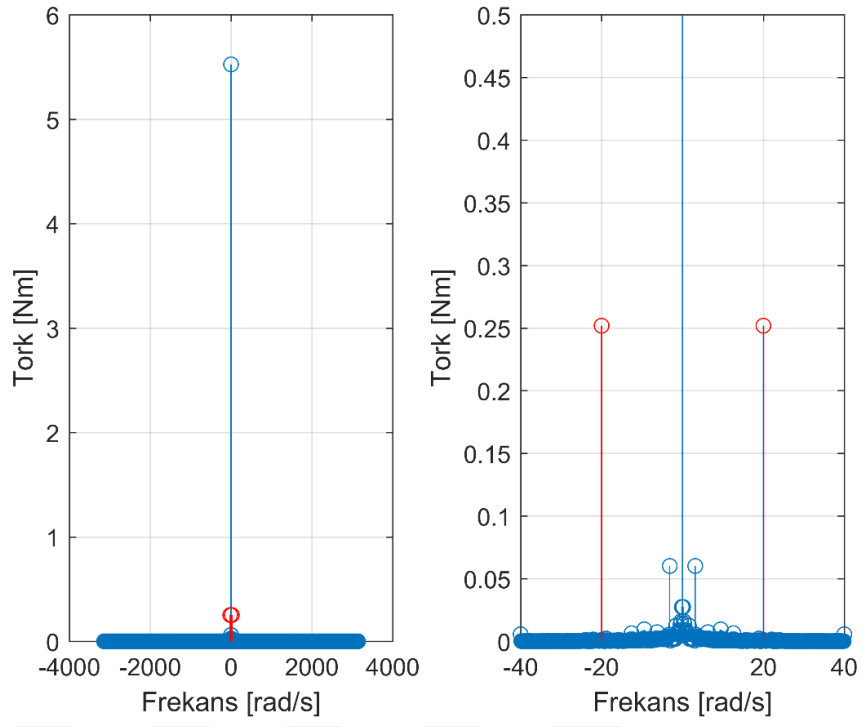
Şekil EK 6.22 : 9 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



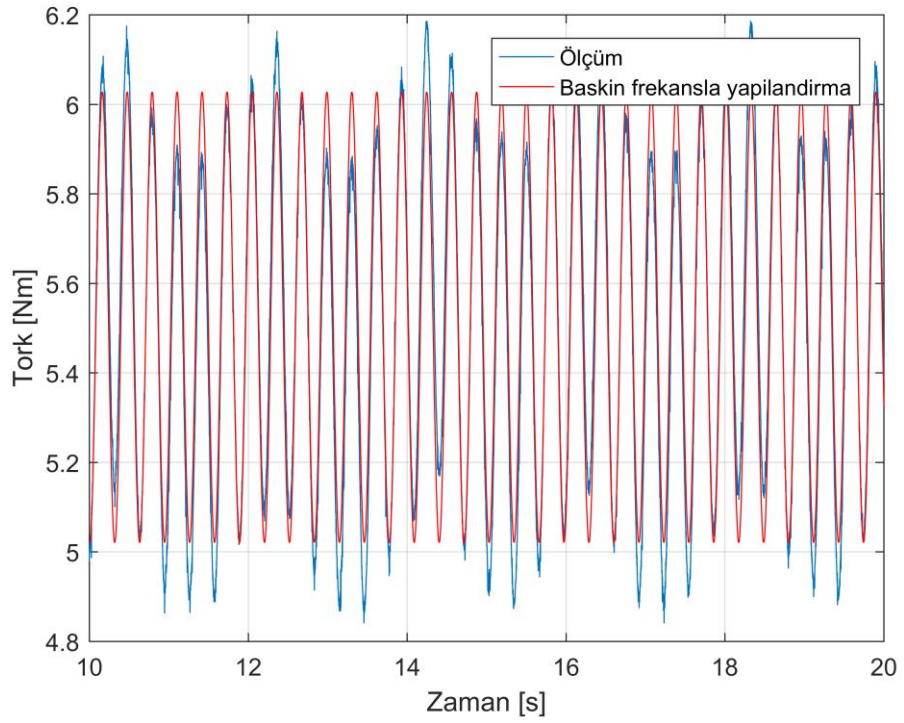
Şekil EK 6.23 : 10 rad/s için frekans dağılımı.



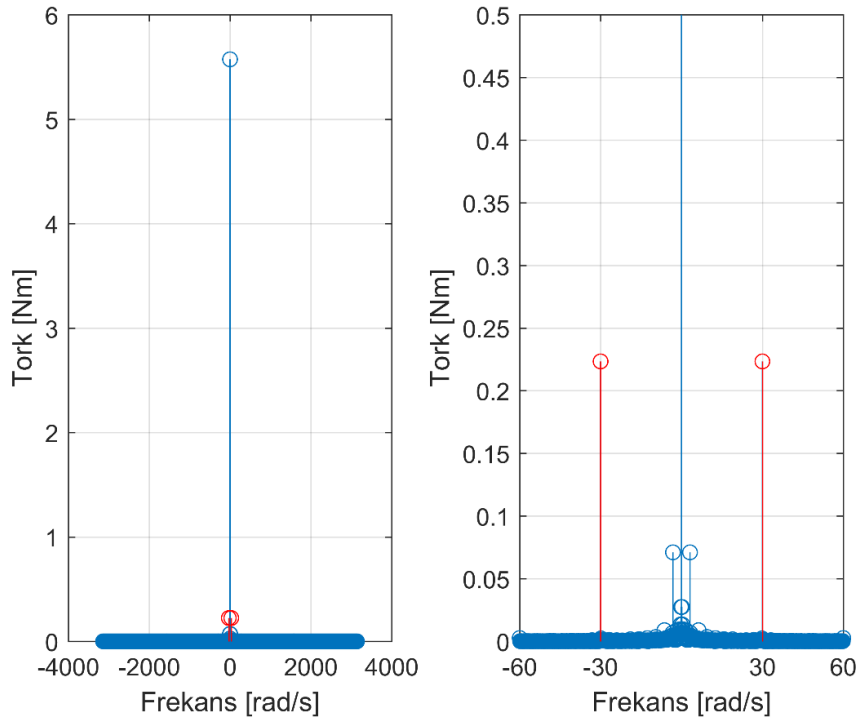
Şekil EK 6.24 : 10 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



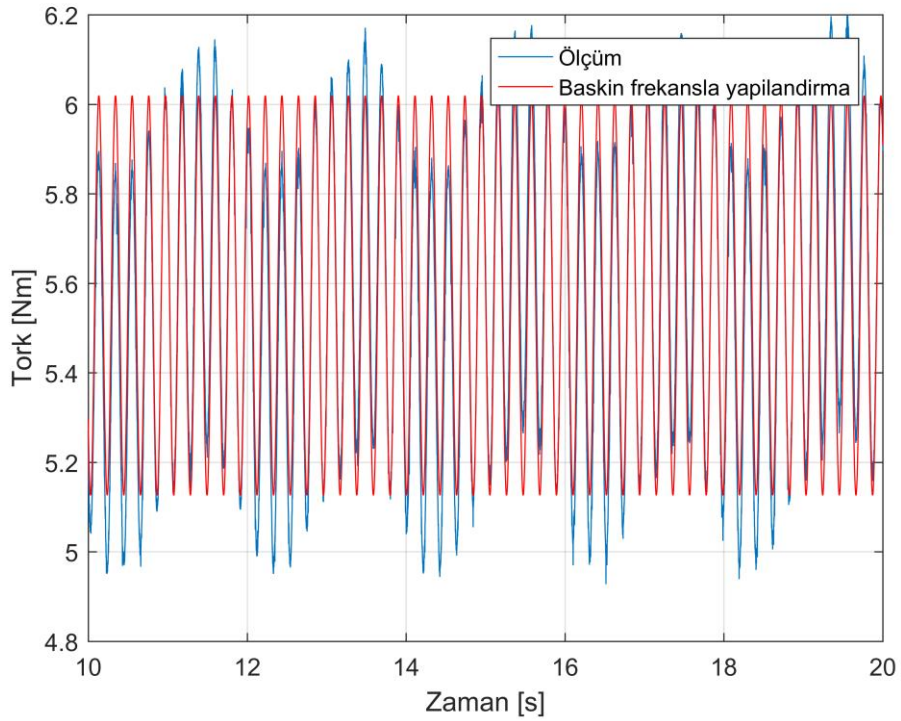
Şekil EK 6.25 : 20 rad/s için frekans dağılımı.



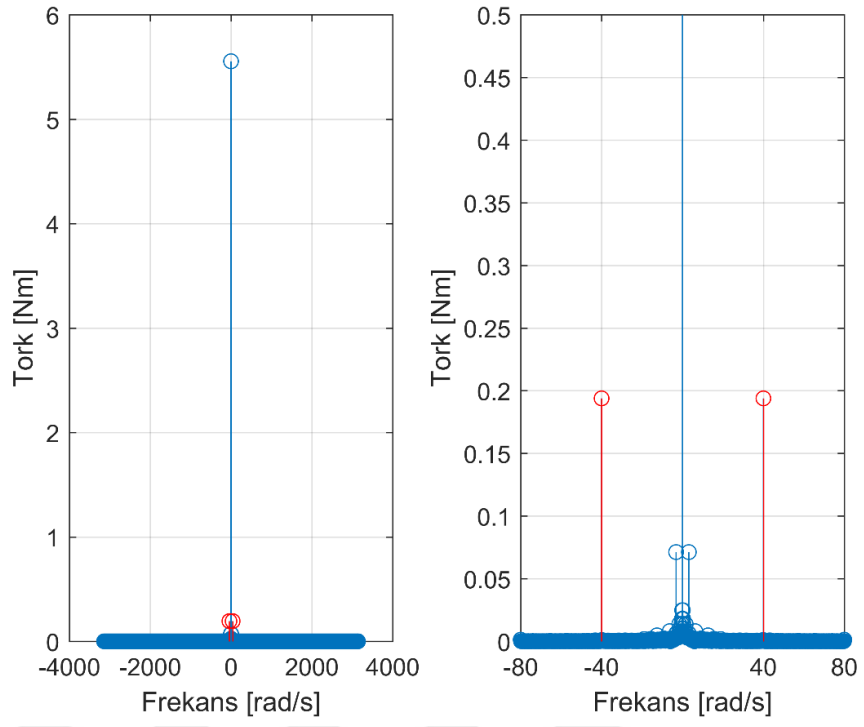
Şekil EK 6.26 : 20 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



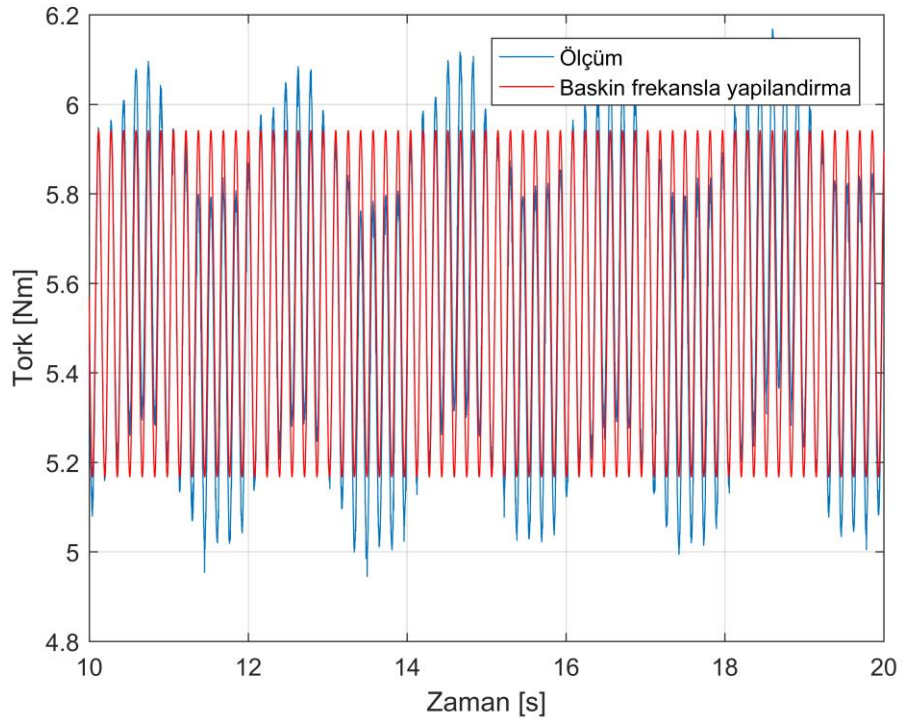
Şekil EK 6.27 : 30 rad/s için frekans dağılımı.



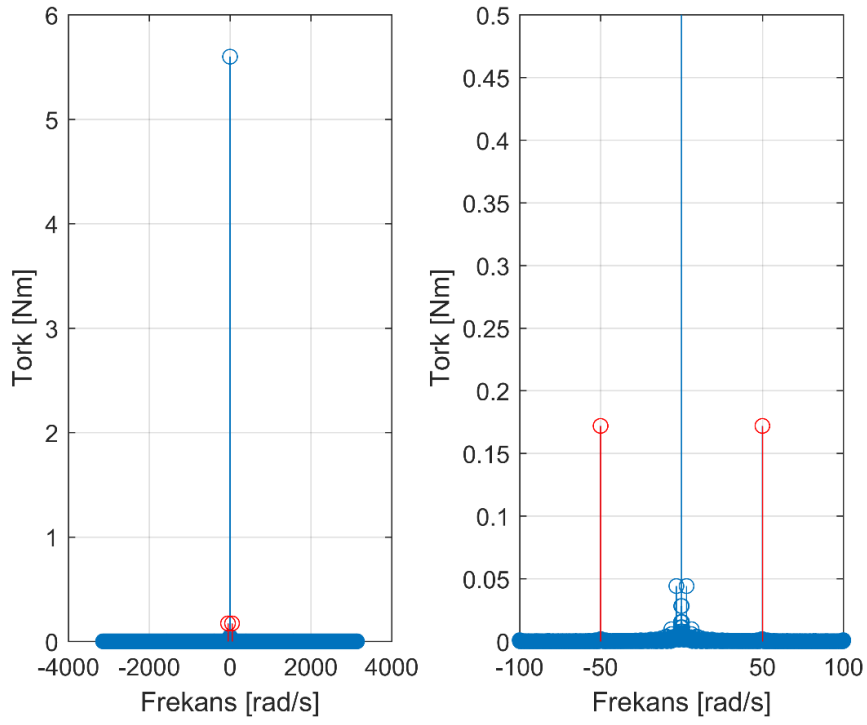
Şekil EK 6.28 : 30 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



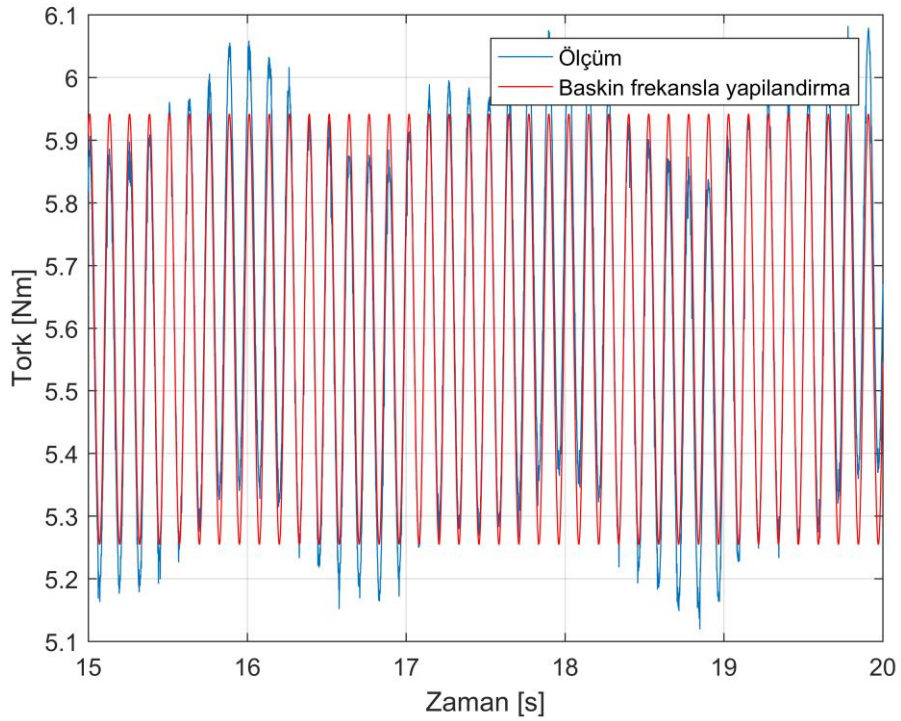
Şekil EK 6.29 : 40 rad/s için frekans dağılımı.



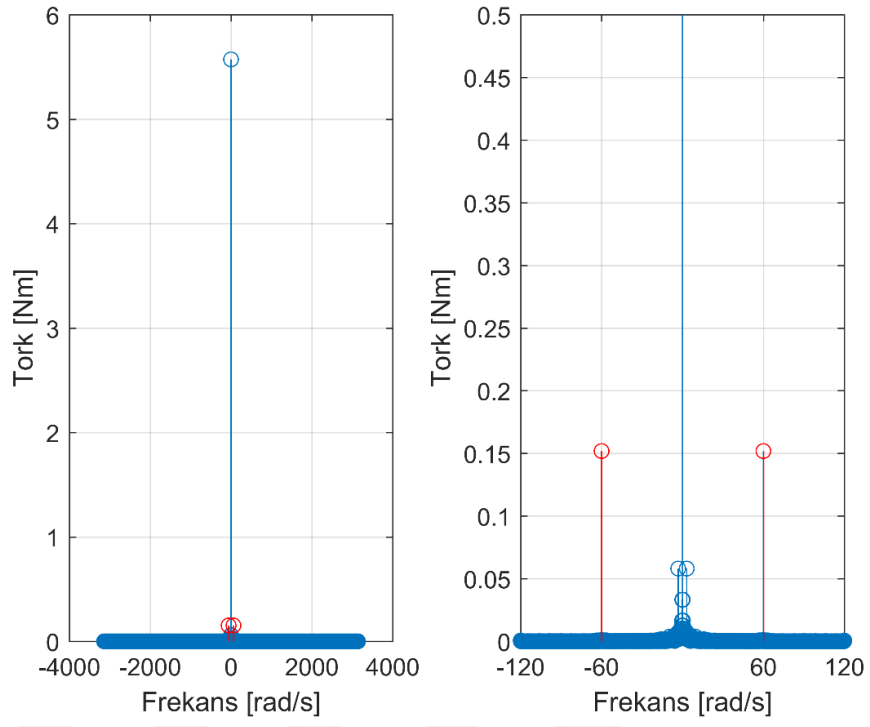
Şekil EK 6.30 : 40 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



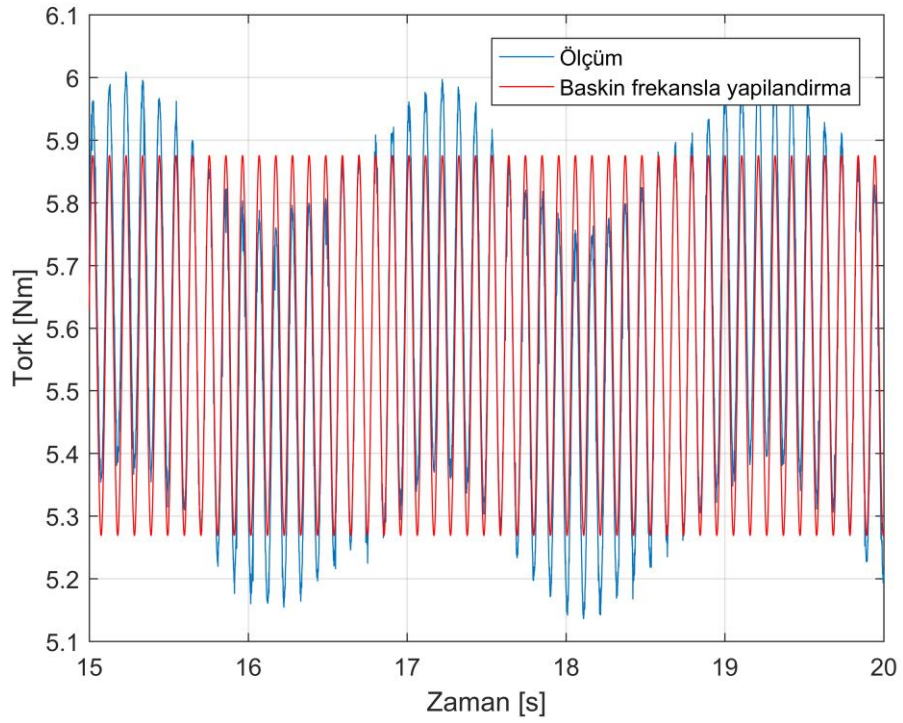
Şekil EK 6.31 : 50 rad/s için frekans dağılımı.



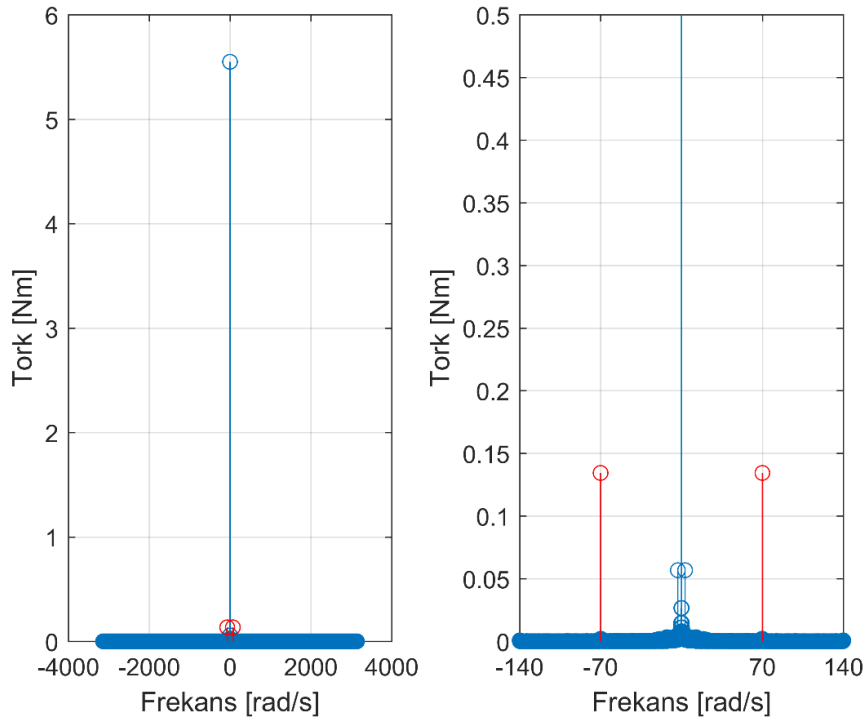
Şekil EK 6.32 : 50 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



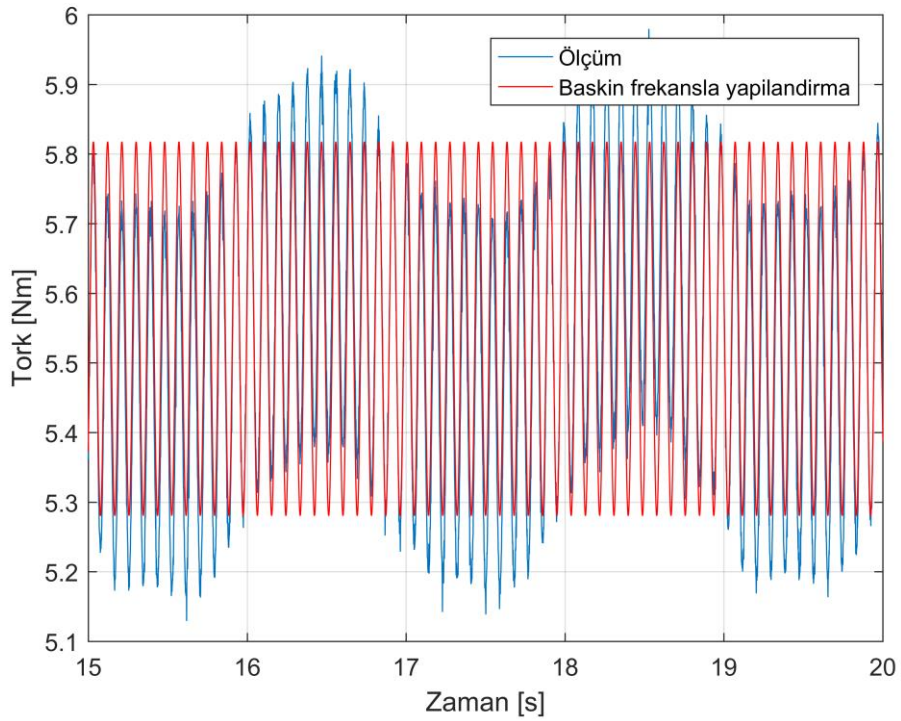
Şekil EK 6.33 : 60 rad/s için frekans dağılımı.



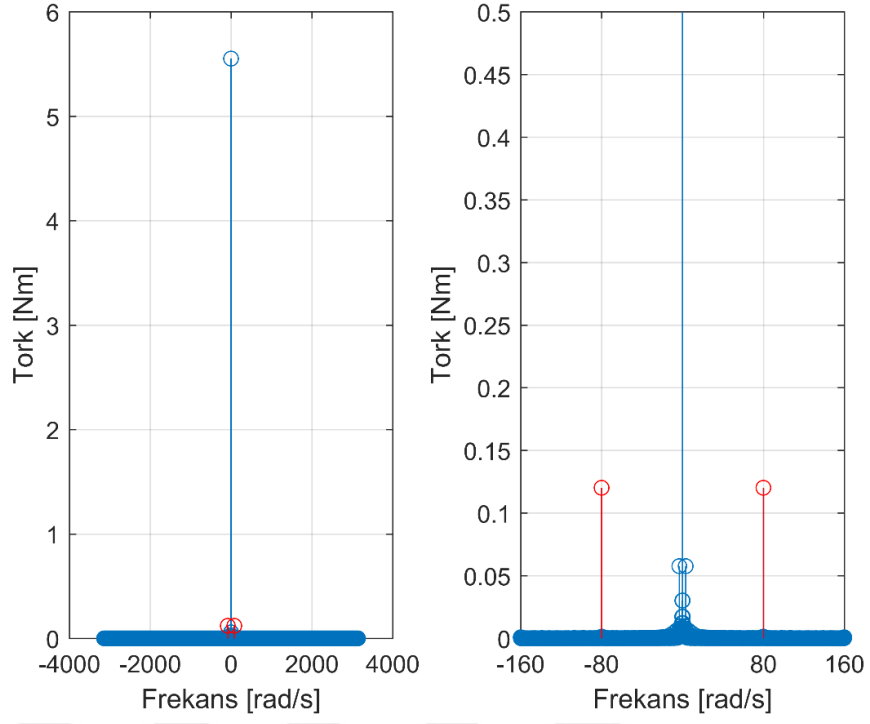
Şekil EK 6.34 : 60 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



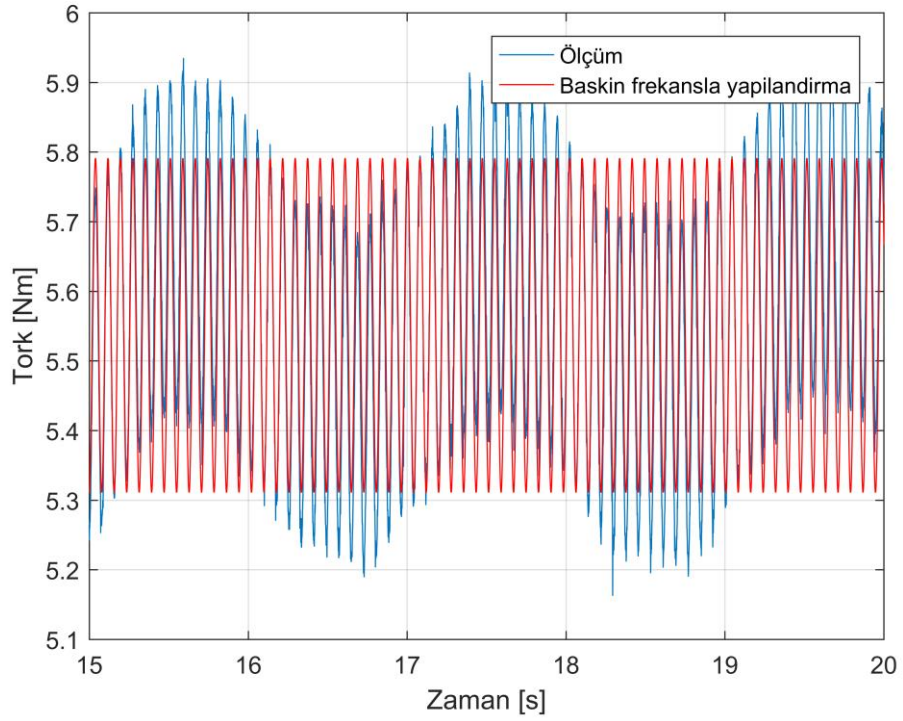
Şekil EK 6.35 : 70 rad/s için frekans dağılımı.



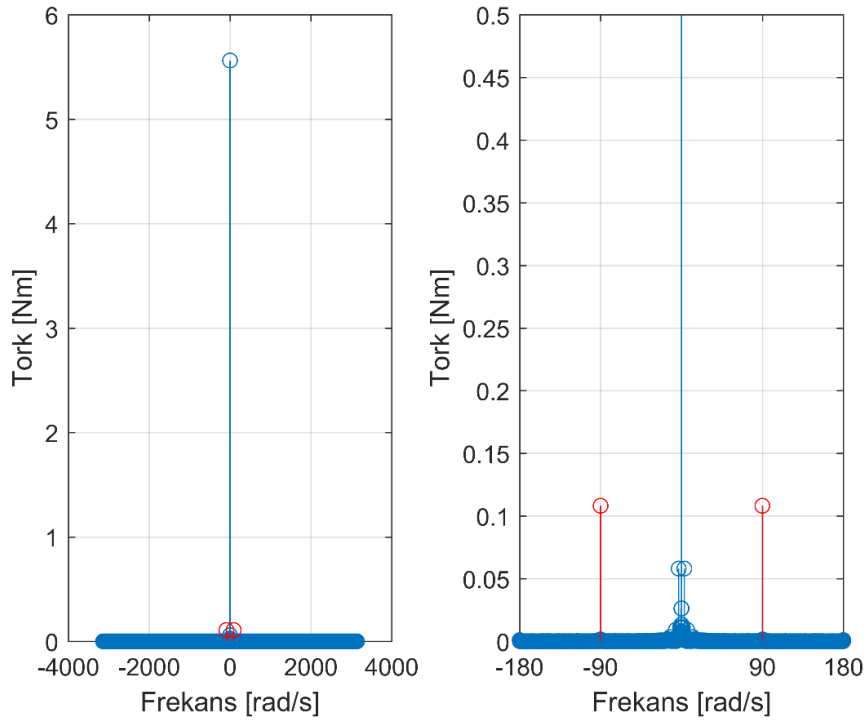
Şekil EK 6.36 : 70 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



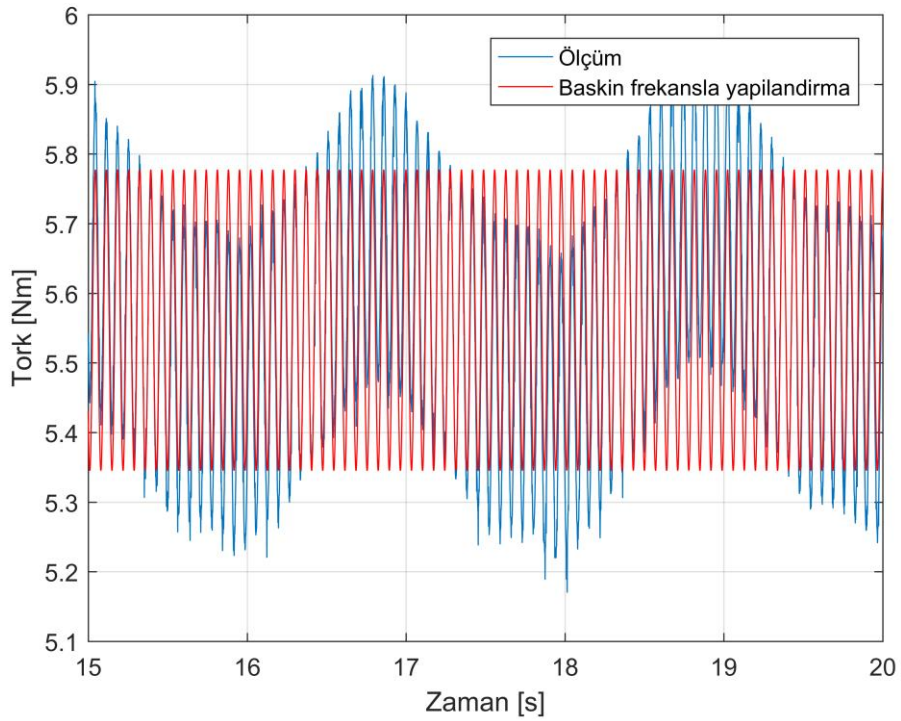
Şekil EK 6.37 : 80 rad/s için frekans dağılımı.



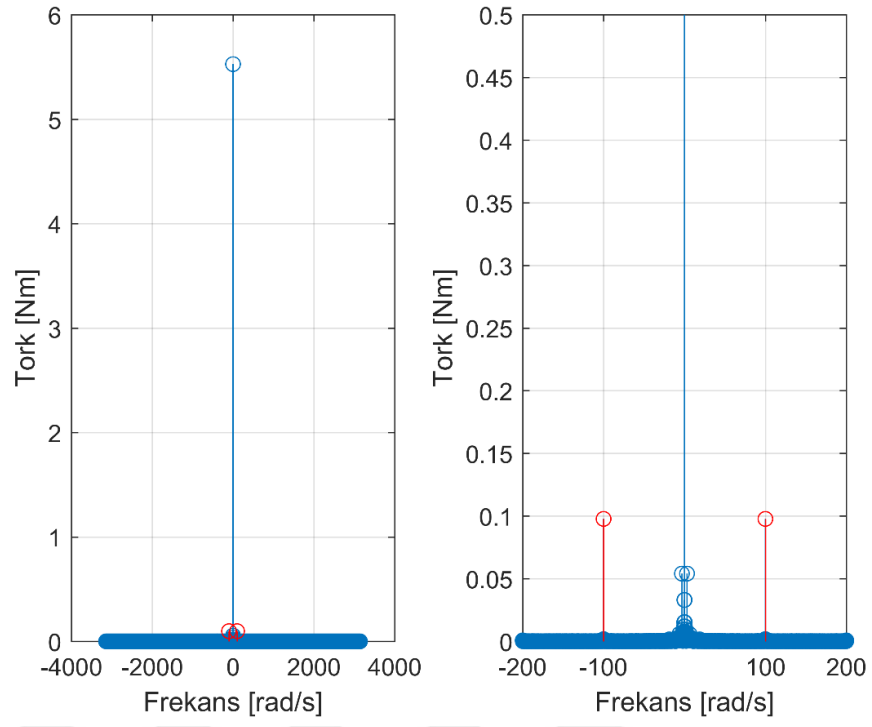
Şekil EK 6.38 : 80 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



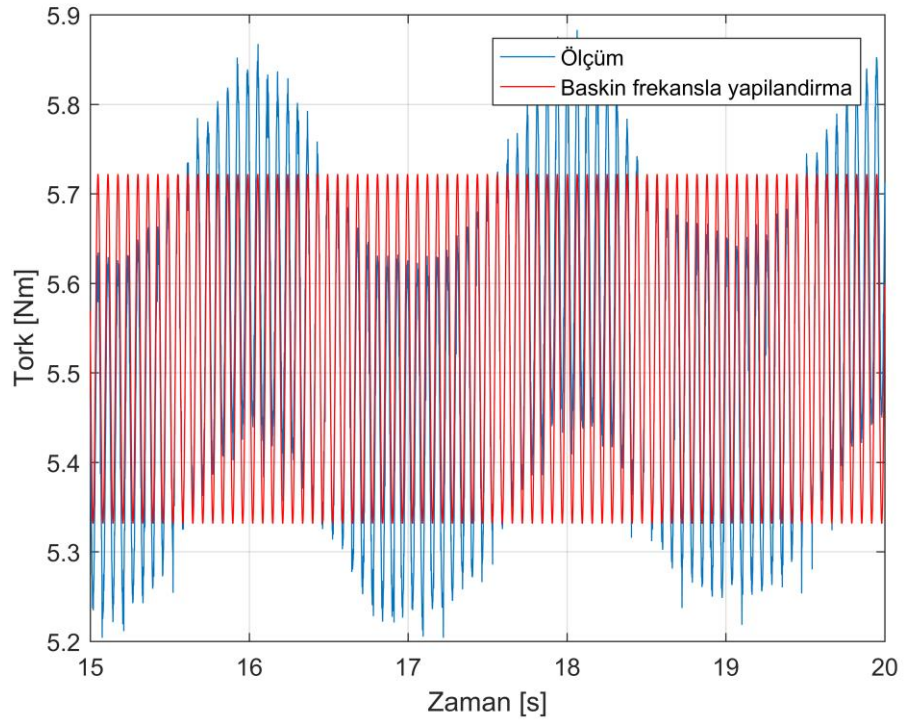
Şekil EK 6.39 : 90 rad/s için frekans dağılımı.



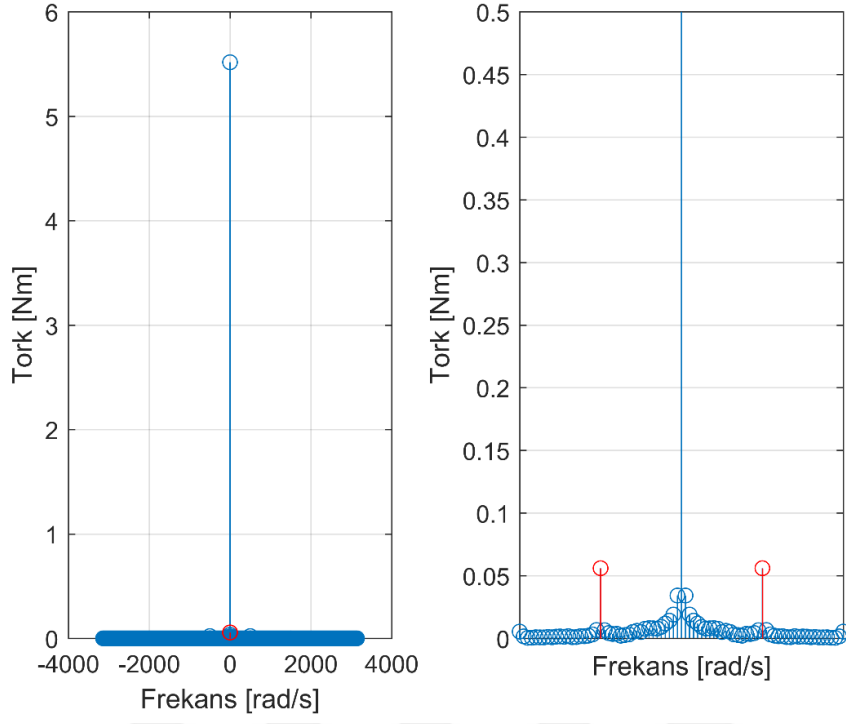
Şekil EK 6.40 : 90 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



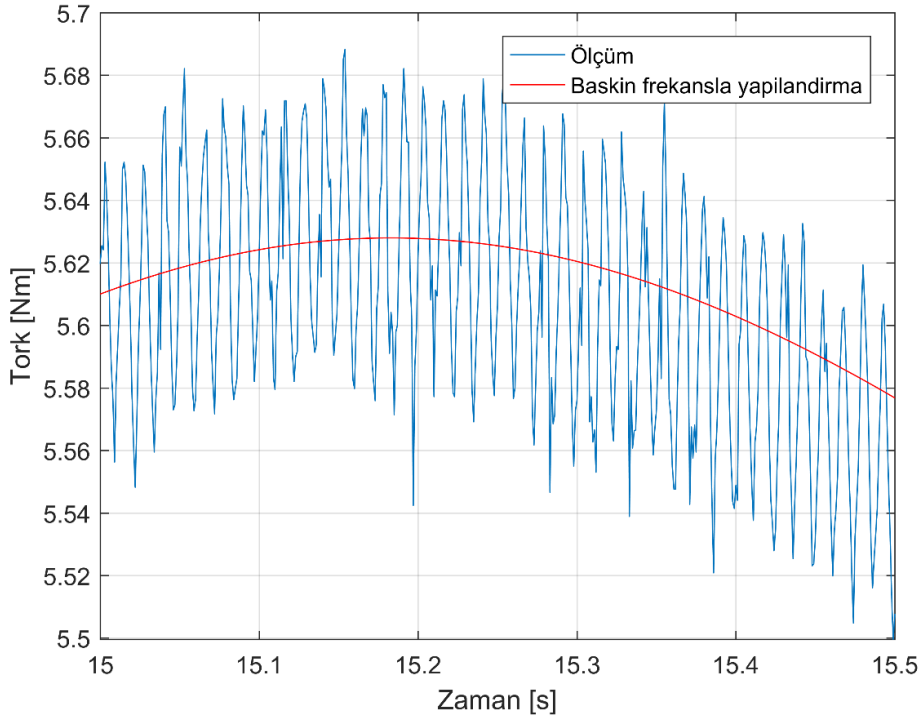
Şekil EK 6.41 : 100 rad/s için frekans dağılımı.



Şekil EK 6.42 : 100 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.



Şekil EK 6.43 : 500 rad/s için frekans dağılımı.



Şekil EK 6.44 : 500 rad/s için baskın frekansla inşa edilen sinyal.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Kasım Enes Kalın
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 1992 Almanya
E-posta : kasimeneskalin@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2015, Bilkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
Yüksek lisans : 2018, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2015-2017	TOBB ETÜ	Tam burslu Yüksek lisans öğrencisi
2017-	ODTÜ	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kalin, K. E.**, Taşcıoğlu, Y. Aradag, S., 2017. Design Optimization of a New Hybrid MR Brake, International Conference on Mechatronics Systems and Control Engineering 2017, Kayseri, Turkey.