

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

MEKANİK DOLAŞIM DESTEK SİSTEMLERİ İÇİN EKSENEL
AKILI MOTOR TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ

Yiğit KARABULUT

Danışman: Prof. Dr. Erkan MEŞE

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Doktora Programı

İzmir
2024

Yiğit KARABULUT tarafından doktora tezi olarak sunulan “MEKANİK DOLAŞIM DESTEK SİSTEMLERİ İÇİN EKSENEL AKILI MOTOR TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 15.01.2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri üyeleri

İmza

Jüri Başkanı : PROF. DR. ERKAN MEŞE

Raportör Üye : PROF. DR. MUTLU BOZTEPE

Üye : DOÇ. DR. MURAT AYAZ

Üye : DOÇ. DR. YAVUZ ÖZTÜRK

Üye : DR. ÖĞR. ÜYESİ HİLMİ GÜRLEYEN

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “MEKANİK DOLAŞIM DESTEK SİSTEMLERİ İÇİN EKSENEL AKILI MOTOR TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarımı ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

15/01/2024

İmzası

Yiğit karabulut

ÖZET**MEKANİK DOLAŞIM DESTEK SİSTEMLERİ İÇİN EKSENEL
AKILI MOTOR TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ**

KARABULUT, Yiğit

Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erkan MEŞE

15.01.2024, 126 sayfa

Bu tezde mekanik dolaşım destek (MDD) sistemleri için bir eksenel akıllı kalıcı mıknatıs senkron motoru (EAKMSM) tasarımı ve gerçekleştirilmesi yapılmıştır. MDD sistemlerinde genel olarak radyal akıllı geleneksel elektrik motorları kullanılmaktadır. Radyal akıllı motorların kullanımı, sıvı akış performansı gibi açılardan MDD sistemine dezavantajlar sağlamaktadır. EAKMSM'lerin MDD sistemleri içine gömülü olarak yerleştirilmesi sıvı akış performansını düzelterek hemoliz gibi MDD sistemlerin en büyük sorunlarından birine karşı alternatif bir pompa tasarımı sağlamaktadır. EAKMSM'lerin gömülü olarak yerleşiminin bir diğer avantajı iki adet olarak sisteme entegre edilerek MDD sisteminin güvenilirliğini arttırmakta ve ölüm oranını aşağı çekmektedir.

Tez kapsamında ilk olarak mevcut MDD sistemin güç ve akış hızı gibi gereksinimleri belirlenmiş ardından analitik hesaplamalar yapılmıştır. Yaklaşık fiziki motor büyüklükleri bulunarak bilgisayar ortamında sonlu elemanlar analizi programları ile optimizasyon analizi yapılarak EAKMSM'ler için gerekli nihai fiziksel büyüklükler, oluk/kutup sayısı ve sarım sayısı gibi değerler ortaya çıkarılmıştır. Bunun yanında eksenel akıllı motorların üretiminde kullanılacak malzemeler araştırılmıştır. Çünkü radyal akıllı elektrik motorlarda girdap akım kayıplarına karşı kullanılan lamine çelik malzemeler ile EAKMSM üretimi sağlanamamaktadır. Bu konuda yumuşak manyetik kompozit (YMK) ve tane yönlendirilmiş lamine çelik (TYLÇ) olmak üzere iki farklı malzeme seçilmiştir. Bu malzemeler kullanılarak aynı özelliklere sahip iki farklı

EAKMSM fiziki olarak üretilmiştir. Her iki EAKMSM laboratuvar ortamında test edilerek performans verileri elde edilmiştir. Farklı malzemelerin motor gücü, kaçak endüktans değerleri ve ters elektromotor kuvveti gibi durumlar üzerine olan etkileri incelenmiştir. Son olarak mevcut MDD sistemi içine EAKMSM yerleştirilerek gerekli testler yapılmıştır.

Anahtar sözcükler:Mekanik dolaşım destek sistemi, eksenel akılı kalıcı mıknatıs senkron motoru, elektrik makinesi tasarımı, sonlu elemanlar yöntemi, biyomedikal.



ABSTRACT**AXIAL FLUX MOTOR DESIGN AND IMPLEMENTATION
FOR MECHANICAL CIRCULATION SUPPORT SYSTEMS**

KARABULUT, Yiğit

PhD. in Electrical-Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Erkan MEŞE

15.01.2024, 126 pages

This thesis presents the design and implementation of an axial flux permanent magnet synchronous motor (AFPMSM) for mechanical circulatory support (MCS) systems. Generally, MCS systems are constructed using radial flux conventional electric motors. However, this configuration poses disadvantages for the MCS system, especially in terms of liquid flow performance. Embedding AFPMSMs within MCS systems addresses one of the major issues, such as hemolysis, and offers an alternative pump design that improves liquid flow performance. Another advantage of embedding AFPMSMs is the enhancement of system reliability and reduction of mortality rates through the integration of two units.

Initially, the requirements of the existing MCS system, such as power and flow rate, were determined. Subsequently, analytical calculations were conducted. Approximate physical motor dimensions were estimated, and optimization analysis using finite element methods was performed in a computer environment to determine the final physical dimensions of AFPMSMs, including groove/pole numbers and winding counts. Additionally, materials suitable for the production of axial flux motors were investigated, as the laminated steel materials used for radial flux electric motors are not suitable for AFPMSM production due to eddy current losses. In this context, two different materials were selected: Soft Magnetic Composite (SMC) and Grain-Oriented Laminated Steel (GOLS). Using these materials, two distinct AFPMSMs with

identical specifications were physically manufactured. Both AFPMSMs were tested in a laboratory environment to collect performance data. The effects of different materials on motor power, leakage inductance values, and back electromotive force were studied. Finally, an AFPMSM was integrated into the existing MCS system, and necessary tests were conducted.

Keywords: Mechanical circulatory support system, axial flux permanent magnet synchronous motor, electric machine design, finite element method, biomedical.



ÖNSÖZ

Mekanik dolaşım destek (MDD) sistemleri kardiyovasküler tıp alanında önemli bir rol oynamaktadır. Bu cihazlar, şiddetli kalp yetmezliği yaşayan bireyler için bir köprü görevi görerek kalp nakli için bir geçiş veya bazen kalp naklinin alternatifi olarak hizmet vermektedir. MDD sistemlerinin önemi, ileri düzeyde kalp yetmezliği yaşayan hastaların yaşamını sürdürmelerine ve yaşam kalitesini artırmalarına yardımcı olma yeteneklerinde yatar.

Bu çalışmada mevcut bir MDD sistemini tahrik edebilecek düzeyde bir eksenel akıllı kalıcı mıknatıs senkron motoru (EAKMSM) önerilmiştir. Mevcut tahrik sistemlerinin radyal yapıda olması ve kan akış durumunu etkileyerek cihaz ömrünü ve performansını etkilemektedir. Önerilen yeni dizaynda mekanik yapı korunmakta ve tahrik sistemi MDD içine gizlenebilmektedir. Bu alanda EAKMSM'ların kullanımı ve gömülü tahrik yapısı MDD sistemleri açısından oldukça yenilikçidir. Farklı malzemelerden üretilen EAKMSM performansı deneysel olarak test edilmiştir. Gömülü EAKMSM yapısının MDD'ler üzerinde detaylı olarak analiz ve tasarımının anlatıldığı bu çalışmanın, ülkemize ve insanlığa faydalı olması dilerim.

İZMİR

15/01/2024

Yiğit KARABULUT

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇ KAPAK	ii
KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
TABLolar DİZİNİ	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Motivasyon	1
1.2 Tez Katkısı	3
1.3 Organizasyon Planı	4
2 LİTERATÜR İNCELEMESİ	7
2.1 Mekanik Dolaşım Destek Sistemleri	7
2.2 Eksenel Akıllı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar	14
2.3 Yumuşak Manyetik Kompozitler	18
3 MEVCUT MDD SİSTEMİ YAPISI	24
4 EAKMSM TASARIMI	27
4.1 EAKMSM Malzeme Tipleri	27
4.1.1 YMK Malzeme Özellikleri	27
4.1.2 TYLÇ Malzeme Özellikleri	29
4.1.3 Kalıcı Mıknatıs Malzeme Özellikleri	30
4.2 EAKMSM Anma Gücü Analitik Modeli	31
4.3 EAKMSM Kayıpları Analitik Modeli	35

4.4	EAKMSM kaçak endüktans analitik modeli	37
4.5	EAKMSM Termal Analitik Modeli	43
4.6	EAKMSM Temel Boyutlarının Analitik ve Tecrübi Yöntemlerle Parametrik Olarak Belirlenmesi	45
4.6.1	Hava Aralığı Uzunluğunun Belirlenmesi	46
4.6.2	EAKMSM Sargı Özelliklerinin Belirlenmesi	47
5	SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE DİNAMİK MODEL BEN- ZETİMİ İLE ANALİTİK MODELİN DOĞRULANMASI	51
5.1	EAKMSM Dinamik Benzetim	57
5.2	EAKMSM'nin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Termal Analizi	66
6	EAKMSM PROTOTİP ÜRETİMİ	68
7	DENEYSEL DOĞRULAMALAR	82
7.1	Test Düzenegi ve Ölçüm Sistemi	82
7.2	Deney Sonuçları	86
7.2.1	Zıt EMK Ölçüm Testleri	86
7.2.2	Moment ve Çekirdek Kaybı Ölçüm Testleri	88
7.2.3	Endüktans Ölçüm Testleri	96
7.2.4	Termal Ölçüm Testleri	103
8	SONUÇLAR	106
9	ÖNERİLER	110
	KAYNAKLAR DİZİNİ	111
	TEŞEKKÜR	124
	ÖZGEÇMİŞ	125

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Örnek mekanik dolaşım sistemi (Chusri et al., (2013)).	2
1.2 Mekanik dolaşım sistemlerinin sınıflandırılması.	3
2.1 Amerika Bileşik Devletleri'ndeki 2008-2015 arasındaki SVDC kul- lanım sayısı (Gustafsson et sl., (2017)).	8
2.2 İlk nesil SVDC'ler. (A) Thoratec Intracorporeal (IVAD), (B) Thoratec Paracorporeal, (C) Berlin Heart EXCOR, ve (D) HeartMate XVE. (Garbade et sl., (2011)).	9
2.3 Sürekli döner SVDC konfigürasyonları. Eksenel akışlı pompa (sol) ve Santrifüj akışlı pompa (sağ) (Ahmed et sl., (2020)).	10
2.4 İkinci nesil SVDC'ler (A) HeartAssist 5, (B) RotaFlow, (C) Heart- Mate II, ve (D) EvaHeart. (Goodman et sl., (2022)).	11
2.5 Sol: Eksenel akışlı makine Sağ: Radyal akışlı makine (Parviainen et sl., (2005)).	15
2.6 EAKMSM'nin manyetik akı yolu, (a) 2 boyutlu ve (b) 3 boyutlu (Cetin and Daldaban, (2018)).	16
2.7 Tek stator çift rotor EAKMSM (Parviainen et sl., (2005)).	17
2.8 Çift stator tek rotor EAKMSM (Parviainen et sl., (2005)).	18
2.9 Çoklu stator çoklu rotor EAKMSM (Parviainen et sl., (2005)).	19
2.10 YMK malzeme ile manyetik nüve üretimi.	20
3.1 MDD sistemi ile entegre edilmiş EAKMSM'lerin gösterimi.	26
4.1 Somaloy 700-3P YMK malzemesine ait B-H grafiği.	28
4.2 Somaloy 700-3P YMK malzemesine ait relatif manyetik geçirgenlik grafiği.	29
4.3 Somaloy 700-3P YMK malzemesine ait çekirdek kayıpları grafiği.	30
4.4 TYLÇ malzemesine ait B-H grafiği.	31
4.5 TYLÇ malzemesine ait relatif manyetik geçirgenlik grafiği.	32

4.6	N52 kalıcı mıknatısına ait B-H grafiği.	32
4.7	Somaloy 700-3P YMK malzemenin histeresis katsayı grafiği.	36
4.8	TYLÇ malzemenin histeresis katsayı grafiği.	37
4.9	EAKMSM manyetik akı yolu.	38
4.10	EAKMSM oluk kaçak akı yolu.	39
4.11	EAKMSM dış ucu kaçak akı yolu.	40
4.12	EAKMSM sargı sonu kaçak akı yolu.	41
4.13	EAKMSM hava aralığı harmonik kaçak endüktans katsayıları (Ponomarev et al., (2013)).	42
4.14	EAKMSM eşdeğer termal ağ modeli.	44
4.15	Stator dışlarındaki manyetik akı yoğunluğu, farklı mıknatıs ve hava aralığı mesafesi.	48
4.16	EAKMSM boyutları.	49
4.17	EAKMSM ve MDD entegrasyonu.	50
5.1	EAKMSM sonlu elemanlar modeli.	51
5.2	EAKMSM katı modeli.	52
5.3	EAKMSM manyetik akı yoğunluğu (YMK) üst.	53
5.4	EAKMSM manyetik akı yoğunluğu (YMK) yan.	53
5.5	EAKMSM manyetik akı yoğunluğu (TYLÇ) üst.	54
5.6	EAKMSM manyetik akı yoğunluğu (TYLÇ) yan.	54
5.7	EAKMSM farklı hız değerleri için endüklenen gerilim grafiği.	55
5.8	EAKMSM farklı akım değerleri için tork grafiği.	56
5.9	EAKMSM hava aralığındaki manyetik alan dağılımı karşılaştırılması.	56
5.10	EAKMSM von mises stres dağılımı.	57
5.11	EAKMSM 6 adımlı motor kontrol simülink bloğu.	58
5.12	EAKMSM 6 adımlı motor kontrol hız grafiği.	59
5.13	EAKMSM 6 adımlı motor kontrol faz akım grafiği.	59
5.14	EAKMSM 6 adımlı motor kontrol tork grafiği.	60
5.15	EAKMSM alan yönlü kontrol motor kontrol simülink bloğu.	61
5.16	EAKMSM alan yönlü kontrol motor kontrol hız grafiği.	61
5.17	EAKMSM alan yönlü kontrol motor kontrol faz akım grafiği.	62

5.18	EAKMSM alan yönlü kontrol motor kontrol tork grafiği.	62
5.19	İki EAKMSM için yapının sonlu elemanlar modeli.	63
5.20	İki EAKMSM için 6 adımlı motor kontrol simülink bloğu.	64
5.21	İki EAKMSM için 6 adımlı motor kontrol tork grafiği.	64
5.22	iki EAKMSM için alan yönlü kontrol motor kontrol simülink bloğu.	65
5.23	4000 dev/dk ve 500 mA faz akımı için tek EAKMSM tork-zaman grafiği.	65
5.24	4000 dev/dk ve 500 mA faz akımı için çift EAKMSM tork-açı grafiği.	66
5.25	EAKMSM stator sargı termal analizi.	67
5.26	EAKMSM stator nüve termal analizi.	67
6.1	TYLÇ ve YMK malzemesi ile üretilen EAKMSM stator çekirdekleri.	69
6.2	YMK stator çekirdeklerin üretim sürecinin termal görüntülemesi.	69
6.3	EAKMSM stator sargılarının üretimi.	71
6.4	EAKMSM 8 kutuplu halka mıknatıs ve çizimi.	72
6.5	EAKMSM YMK stator üretiminde hatalı işlenen nüveler.	72
6.6	EAKMSM ilk laboratuvar test prototipi tasarımı.	73
6.7	EAKMSM ilk laboratuvar test prototipi dış kasa üretimi.	74
6.8	EAKMSM ilk laboratuvar test prototipi üretimi.	75
6.9	EAKMSM ilk laboratuvar test prototipi mil sorunu ve çözümü.	75
6.10	EAKMSM YMK ve TYLÇ ikinci laboratuvar prototipleri.	76
6.11	EAKMSM YMK ve TYLÇ ikinci laboratuvar prototipleri iç görünüm.	76
6.12	MDD sistemi tasarımı.	78
6.13	MDD sistemi patlak gösterimi.	78
6.14	MDD sisteminin difüzer kısmı.	79
6.15	MDD sisteminin indüser kısmı.	80
6.16	MDD sisteminin rotor kısmı.	80
6.17	MDD sistemi son hali.	81
7.1	EAKMSM endüklenen gerilim ölçüm test düzeneği.	83
7.2	EAKMSM tork ölçüm test düzeneği.	83
7.3	EAKMSM prototipe ait mekanik kayıplar.	84
7.4	EAKMSM tek faz eş değer devresi.	85

7.5	EAKMSM tek faz eş değer fazör diagramı.	86
7.6	EAKMSM YMK nüve için 5000 dev/dak'da ölçülen zıt EMK değeri.	87
7.7	4000 dev/dk hızda faz-nötr arası akım, gerilim değerleri ve faz gücü ölçüm sonuçları.	88
7.8	EAKMSM YMK nüve için farklı hızlardaki zıt EMK değerlerinin grafığı.	89
7.9	EAKMSM TYLÇ nüve için 5000 dev/dak'da ölçülen zıt EMK değeri.	90
7.10	EAKMSM TYLÇ nüve için farklı hızlardaki zıt EMK değerlerinin grafığı.	91
7.11	EAKMSM zıt EMK sabitlerinin hıza göre değişim grafığı.	91
7.12	EAKMSM YMK1 dinamik tork ölçümü.	92
7.13	EAKMSM YMK1 dinamik akım ölçümü.	92
7.14	EAKMSM YMK1 farklı hızlardaki tork ölçüm grafığı.	93
7.15	EAKMSM TYLÇ1 farklı hızlardaki tork ölçüm grafığı.	93
7.16	EAKMSM tork sabitlerinin hıza göre değişim grafığı.	94
7.17	EAKMSM farklı hızlardaki çekirdek kayıpları grafığı.	95
7.18	EAKMSM farklı hızlardaki çekirdek kayıplarlarının oranı grafığı.	96
7.19	Hız ve tork değerlerinde ölçülen TYLÇ nüveli EAKMSM verim haritası.	97
7.20	Farklı hız ve tork değerlerinde ölçülen TYLÇ nüveli EAKMSM verim grafığı.	98
7.21	Farklı hız ve tork değerlerinde ölçülen YMK nüveli EAKMSM verim haritası.	99
7.22	Farklı hız ve tork değerlerinde ölçülen YMK nüveli EAKMSM verim grafığı.	99
7.23	EAKMSM analitik endüktans bileşenleri değerleri.	100
7.24	TYLÇ ve YMK statorlar için relatif manyetik geçirgenlik değerinin faz akımına göre değişimi.	100
7.25	EAKMSM YMK oluk başına endüktans değerleri.	101
7.26	EAKMSM TYLÇ oluk başına endüktans değerleri.	101
7.27	EAKMSM YMK ve TYLÇ endüktans oranları grafığı.	102

7.28 EAKMSM bakır kayıp grafiği.	104
7.29 EAKMSM stator sargı sıcaklık değişim grafiği.	104
7.30 EAKMSM stator dış gövde sıcaklık değişim grafiği.	105



TABLOLAR DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 Malzemelerin termal özellikleri.	44
4.2 EAKMSM tasarım isterleri tablosu.	46
4.3 EAKMSM geometrik boyutlar tablosu.	47
4.4 EAKMSM sargı özellikleri tablosu.	49
6.1 EAKMSM YMK stator çekirdeklerin işleme parametreleri.	70
6.2 EAKMSM YMK prototip faz direnç ve endüktansları.	77
6.3 EAKMSM TYLÇ prototip faz direnç ve endüktansları.	77
7.1 Prototip EAKMSM'ların ortalama zıt EMK sabiti değerleri.	89
7.2 Prototip EAKMSM'ların ortalama tork sabiti değerleri.	94
7.3 Kaçak endüktans satürasyon katsayıları.	97
7.4 Prototip EAKMSM'ların analitik, simülasyon ve deneysel faz endüktans- larının karşılaştırılması.	98
7.5 Prototip EAKMSM'ların analitik endüktans bileşenleri.	102
8.1 MDD sistemlerin karşılaştırılması.	108

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
D_{out}	EAKMSM dış çap
D_{in}	EAKMSM iç çap
P_{out}	EAKMSM çıkış gücü
k_d	EAKMSM çap oranı
k_w	Sargı faktörü
n_s	Açısal hız
A_m	Elektriksel yük
η	EAKMSM verimi
E_f	Elektromotor kuvveti
N	Faz başına sarım sayısı
$Slot_f$	Oluk etkisi
g_{air}	Hava aralığı
PM_h	Mıknatıs yüksekliği
μ_r	Mıknatıs geçirgenliği

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
B_{mg}	Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun maksimum değeri
D	Ortalama çap
B_o	Temel harmonik değeri
b_p	Oluk açıklık uzunluğu
t	Zaman
x	Mesafe
τ	Kutup periyodu
v	Harmonik numarası
T_D	Elektromanyetik tork
ϕ	Akı yoğunluğu
m	Faz sayısı
p	Kutup sayısı
I_a	Faz akımı
K_T	Tork sabiti

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
l_{av}	Ortalama sargı uzunluğu
a_w	Paralel iletken sayısı
a_p	Paralel akım sayısı
σ	Armatür sargı iletkenliği katsayısı
s_a	İletken alanı
R_a	Faz direnci
P_w	Sargı kaybı
B_{mx}	Dönme eksenine paralel olan temel harmonik bileşeni
B_{mz}	Dönme eksenine dik olan temel harmonik bileşeni
m_{Fe}	Laminasyonlu çelik kütle oranı
ρ_{Fe}	Kütle başına düşen yoğunluk
d_{Fe}	Laminasyon kalınlığı
σ_{Fe}	Elektriksel iletkenlik
ϵ	Histeresis kayıp katsayısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
L_m	Mıknatıslama endüktansı
L_σ	Kaçak endüktans
L_u	Oluk kaçak endüktansı
L_t	Diş ucu kaçak endüktans
L_{end}	Sargı sonu kaçak endüktans
L_h	Hava aralığındaki harmonik kaçak endüktansı
k_1	Oluk kaçak endüktans sabiti
μ_0	Vakum geçirgenliği
μ_r	Rölatif geçirgenlik
Q_s	Toplam oluk sayısı
L_{eff}	Etkin stator uzunluğu
h_s	Oluk yüksekliği
b_s	Oluk genişliği
y_q	Oluk başına kutup periyodu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
q	Faz başına oluk sayısı
k_2	Diş ucu kaçak endüktans sabiti
t_{ave}	Ortalama oluk periyodu
g_{eff}	Etkin hava aralığı
σ	Harmonik kaçak sabiti
E_{pm}	Mıknatıs akısı kaynaklı zıt EMK
U_{ph}	Faz gerilimi
ω_s	Elektriksel açısal hız
Δ	Yük açısı
φ	Faz açısı
T_n	Normalleştirilmiş tork
R_i	Yarıklardaki reçine izolasyonunun iletken direnci
s_i	Eşdeğer izolasyon genişliği
λ_i	İzolasyonun iletkenliği

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
R_t	Diş başları ile sızan hava arasındaki konvektif termal direnç
R_p	Mıknatıs yüzeyleri ile hava arasındaki konvektif termal direnç
R_c	Stator gövde içi ile hava arasındaki ısı konvektif termal direnç
Q_{pm}	Mıknatıs sıcaklık artış değeri
Q_g	Hava aralığındaki sıcaklık artış değeri
Q_{fe}	Stator çekirdeğindeki sıcaklık artış değeri
Q_{cu}	Sargılardaki sıcaklık artış değeri
MDD	Mekanik dolaşım destek
$EAKMSM$	Eksenel akıllı kalıcı mıknatıs senkron makine
YMK	Yumuşak manyetik kompozit
$TYLÇ$	Tane yönlendirilmiş lamine çelik
EMK	Elektromotor kuvveti
$SVDC$	Sol ventriküler destek cihazı
k_{slot}	Oluk sızıntı endüktansının doyma katsayısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
w	Sargı periyodu
R_w	Stator yatağı ile çevresel hava arasındaki konvektif termal direnç
L_{slot}	Oluk aızıntı akı yolunun uzunluğu
μ_s	Oluk sızıntı akı yolunun ortalama geçirgenliği
k_{tooth}	Diş ucu sızıntı endüktansının doyma katsayısı
L_{tooth}	Diş ucu sızıntı akı yolunun uzunluğu
k_{end}	Uç sızıntı endüktansının doyma katsayısı
L_{end}	Uç sızıntı akı yolunun uzunluğu
k_m	Mıknatıslama endüktansının doyma katsayısı
L_m	Mıknatıslama akı yolunun uzunluğu
α	Mıknatıs oranı
L_s	Faz başına senkron endüktansı
S_{elm}	Elektromanyetik güç

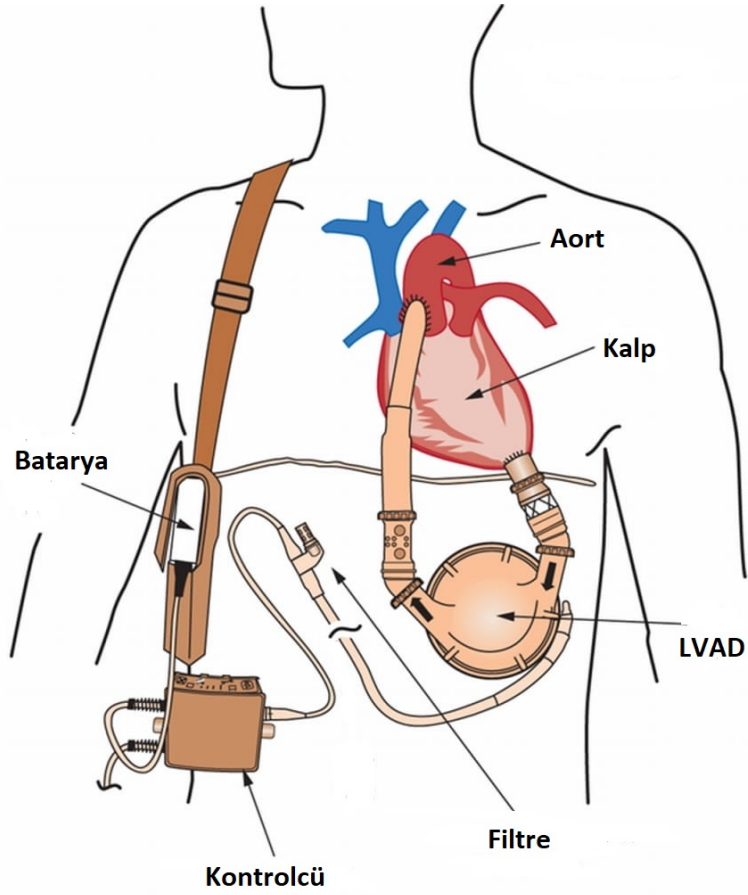
1 GİRİŞ

1.1 Motivasyon

2012 yılında gerçekleştirilen bir araştırma, dünya çapında kalp ve damar hastalıklarına bağlı ölümlerin, bulaşıcı olmayan hastalıklar arasında önemli bir paya sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu oran yüzde 46.2 gibi büyük bir dilimi kapsamaktadır, yani yaklaşık olarak 17.5 milyon insanı içermektedir. Geleceğe dair tahminlere göre, 25 yıl sonra bu hastalık nedeniyle gerçekleşen ölümler 22.2 milyona ulaşacaktır (T.C. Sağlık Bakanlığı Temel Sağlık Hizmetleri Genel Müdürlüğü, (2010)). Türkiye dahil birçok ülkede, yetişkinler arasında en yaygın ölüm sebebi, kalp ve damar hastalıklarına bağlı olarak gelişmektedir. Bu hastalıklar içinde kalp yetmezliği, öne çıkan sorunlardan biridir. Kalp yetmezliği, kalbin yeterli kanı pompalayamadığı ve kasılma gücünün azaldığı bir durumu ifade eder. Kalp destek cihazlarının temel amacı, kalbin kanı yeterince pompalayamadığı durumlarda sürekli veya kısmi destek sağlamaktır. Bu mekanik destek cihazlarında kan pompaları kullanılmaktadır. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi örnek bir mekanik dolaşım destek (MDD) sistemi verilmiştir.

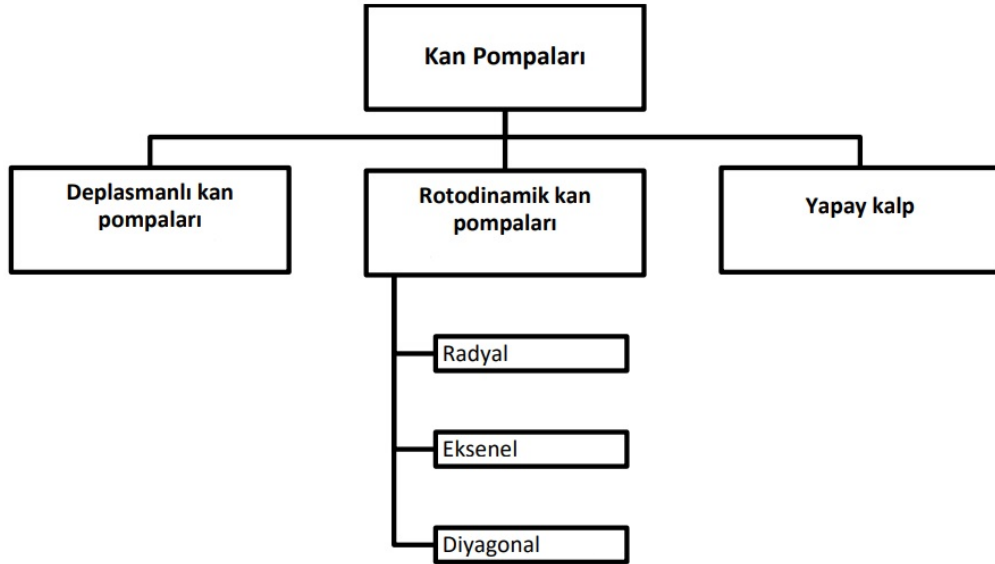
Kan pompaları genellikle üç temel sınıfa ayrılmaktadır: rotodinamik, deplasmanlı ve yapay kalp. Sürekli akışlı rotodinamik kan pompaları da çark tiplerine göre radyal, eksenel ve karışık (diyagonal) akışlı olarak üç kategoriye ayrılır (Arvand et al., (2004)). İlk başlarda, kalbe yardımcı olmak için deplasmanlı kan pompaları kullanılmıştır; ancak zamanla, rotodinamik pompa sistemleri sahip oldukları avantajlar nedeniyle daha yaygın hale gelmiştir (İncebay, (2017)). Şekil 1.2’de pompa sınıfları gösterilmiştir.

Kalp destek cihazlarındaki en önemli zorluklardan biri, kan pompasına ait rotorun yataklandırılmasıdır. Döner kan pompalarında bir dizi yatak tasarımı konsepti kullanılmıştır. Geçmişteki yataklama uygulamalarında, mil ile temas eden contalı ve rulmanlı yataklar tercih edilmiştir. Zaman içinde, contalardan



Şekil 1.1: Örnek mekanik dolaşım sistemi (Chusri et al., (2013)).

kaçınılması gerekmiş ve rotorun miline doğru hizalanması için daha küçük pivot yatakları kullanılmıştır. Daha sonraki dönemlerde ise hidrodinamik ve manyetik yatak tasarımları öne çıkmıştır. Pivot yatakların aşınma, sürtünme ve ısı artışı gibi sorunlarından ötürü dezavantajları bulunmaktadır. Manyetik yataklar ise karmaşık yapıları, ekstra elektrik bobini gereksinimi ve yüksek güç tüketimi gibi dezavantajlar taşımaktadır (Walowit et al., (1997)). Bu gibi nedenlerle MDD sistemlerinin kan akışının düzeltilerek rulmanlı yatakların olumsuz etkilerinin minimuma indirilmesi gerekmektedir. Genel olarak MDD sistemlerinde radyal tipte motorlar kullanılmaktadır (Chusri et al., (2013)). Bu tipteki motorlu pompalarda rotor yerleşimi pompa kanatları üzerinde yapılmaktadır. Bu durum neticesinde pompa içinden geçen kan akışı bozulmaktadır çünkü rotor bıçakları kesintisiz olarak devam edememektedir. Bir diğer husus ise radyal motorların stator kısmı pompa dışında bulunmaktadır.



Şekil 1.2: Mekanik dolaşım sistemlerinin sınıflandırılması.

Bu nedenle pompa boyutlarının radyal yönde büyümesi gerekmektedir. Mevcut MDD sistemlerinin küçültülmesi ve cihaz içindeki alanın daha efektif kullanılması gerektiği görülmektedir. Ayrıca önerilen yeni motor yapısı ve pompa dizaynının sadece hacimsel anlamda bir kazanımı yaratması değil aynı zamanda kan akışının düzgün bir şekilde yapılabilmesine olanak vermesi gerekir.

1.2 Tez Katkısı

Bu çalışmada küçük boyutlarda eksenel akıllı kalıcı mıknatıs senkron motoru (EAKMSM) ve mevcut bir MDD sistemine entegrasyonu önerilmiştir. Önerilen motor yapısının mevcut literatüre katkısı şu şekilde sıralanabilir.

- Mevcut MDD sistemlerinde kullanılan radyal tipteki motorlara alternatif olarak eksenel tipte bir elektrik motoru kullanılmıştır. Eksenel tipteki motorlar güç yoğunluğu bakımından radyal motorlara göre daha yüksek bir performans sağlamasından dolayı önemli bir alternatif haline gelmiştir. Bu sayede daha küçük yapıda motorların MDD sistemlere entegrasyonu sağlanarak hacimsel olarak daha küçük yapılar oluşturulabilir.

- Önerilen EAKMSM dizaynının MDD sistemi içine gömülü bir şekilde entegre edilmesi ile motor yapısındaki rotor ve stator bileşenlerinin mekanik etkileri yok edilecektir. Bu sayede kan akışı gibi etmenlerde iyileştirme sağlanacak hemoliz gibi durumlar en aza indirilecektir.
- Mevcut MDD sistemlerinde radyal tipteki motorlar kullanıldığı takdirde sistem tek bir tahrik sisteminin entegrasyonuna izin vermektedir. Fakat önerilen EAKMSM yapısının kullanılması durumunda iki motorlu bir sisteme olanak vermektedir. Bu durumda hasta yaşam süresi yedek motorun mevcudiyeti ile arttırılarak MDD sistemlerde önemli bir gelişme sağlanabilmektedir. Bu konu özellikle MDD sistemler gibi hastanın doğrudan hayati fonksiyonları üzerinde etkisi olan cihazlar bakımından oldukça önemlidir.
- EAKMSM dizaynı sırasında malzeme seçimi oldukça önemlidir. Özellikle stator ve rotor laminasyonunun yapılamadığı eksenel tipteki motorlarda manyetik geçirgenliği yüksek fakat elektriksel iletkenliği düşük malzemelerin kullanılması gerekmektedir. Bu konuda yumuşak manyetik kompozit (YMK) ve tane yönlendirilmiş lamine çelik (TYLÇ) gibi iki adet farklı malzeme ön plana çıkmaktadır. Bu malzemeler arasında bir seçim yapılabilmesi için manyetik özellikleri ve üretim kolaylığı bakımından testler yapılmıştır. Özellikle nüve kayıpları ve kaçak endüktans değerleri bu çalışmada ayrıca ele alınarak incelenmiştir. Her iki malzemenin bu bakımdan karşılaştırılması literatür açısından oldukça önemlidir.
- Bu çalışmada önerilen EAKMSM boyutları açısından bazı termal avantajları bulunmaktadır. EAKMSM termal özellikleri detaylı bir şekilde tez kapsamında anlatılmış ve bu konuda literatür bazında oldukça önemli sonuçlar elde edilmiştir.

1.3 Organizasyon Planı

Bu tez giriş bölümü dahil toplam dokuz bölümden oluşmaktadır;

- İkinci bölüm olan "LİTERATÜR İNCELEMESİ" bölümünde ilk olarak

genel hatları ile MDD sistemlerine ait literatürde bulunan çalışmalar incelenmiştir. Ardından EAKMSM tasarımlarına ait çalışmalar özetlenmiştir. Son olarak yumuşak manyetik kompozit (YMK) ve tane yönlendirilmiş lamine çelik (TYLÇ) malzemelere ait çalışmalar verilmiştir.

- Üçüncü bölüm olan "MEVCUT MDD SİSTEM YAPISI ve EAKMSM TASARIM GEREKÇELERİ" bölümünde ise EAKMSM'lerin entegre edileceği pompa yapısından bahsedilmiştir. İlk olarak pompa tasarımı ve boyutları verilmiştir. Buradan elde edilecek fiziki boyut verileri EAKMSM tasarımı için kısıtlayıcı değerler olarak kullanılacaktır. Ardından sistem için gerekli olan devir sayısı ve moment değerlerinden bahsedilmiştir.
- Dördüncü bölüm olan "EAKMSM TASARIMI" bölümünde ise bir önceki bölümden elde edilen boyut, nominal moment ve hız değerleri referans alınarak bir tasarım yapılmıştır. İlk olarak EAKMSM'ye ait boyut, güç ve moment denklemleri ardından hava aralığı miktarının belirlenebilmesi için gerekli denklem setleri bu bölümde tanıtılmıştır. Bunun yanında kullanılacak nüve malzemeleri olan YMK ve TYLÇ'nin manyetik özellikleri verilmiştir. EAKMSM'ye ait genel güç denklemlerinin yanında malzeme kayıp denklemleri, kaçak endüktans ve termal özelliklerin analitik olarak modellenmeside bu bölümde verilmiştir.
- Beşinci bölüm olan "SONLU ELEMANLAR ANALİZİ ile EAKMSM ANALİTİK MODELİN DOĞRULANMASI" bölümünde ise daha önceki bölümlerde verilen denklem setleri kullanılarak EAKMSM ait parametreler ortaya çıkarılmıştır. Ardından sonlu elemanlar analizi ile analitik hesaplara dayanan sonuçlar karşılaştırılarak verilmiştir.
- Altıncı bölüm olan "EAKMSM PROTOTİP ÜRETİMİ" bölümünde ise daha önceki bölümlerde tasarlanan EAKMSM'ler için gerekli üretim teknikleri tartışılmıştır. Ardından farklı malzemelerden imal edilen prototiplerden bahsedilmiştir.

- Yedinci bölüm olan "DENEYSEL DOĞRULAMALAR" bölümünde ise ilk olarak kurulan test düzenegi ve ölçüm sistemi tanıtılmıştır. Test düzenekleri kullanılarak üretilen farklı nüve malzemeli EAKMSM'lara ait zıt EMK, çıkış mil momenti, verim ve makina kayıpları ölçülmüştür. Ardından daha önceki bölümlerde bahsedilen analitik ve simülasyon verileri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Sonraki bölümler ise çalışmada ulaşılan genel sonuçları, tezin literatüre olan katkısını ve ilgili konularda çalışacak kişilere yapılan önerileri kapsamaktadır.

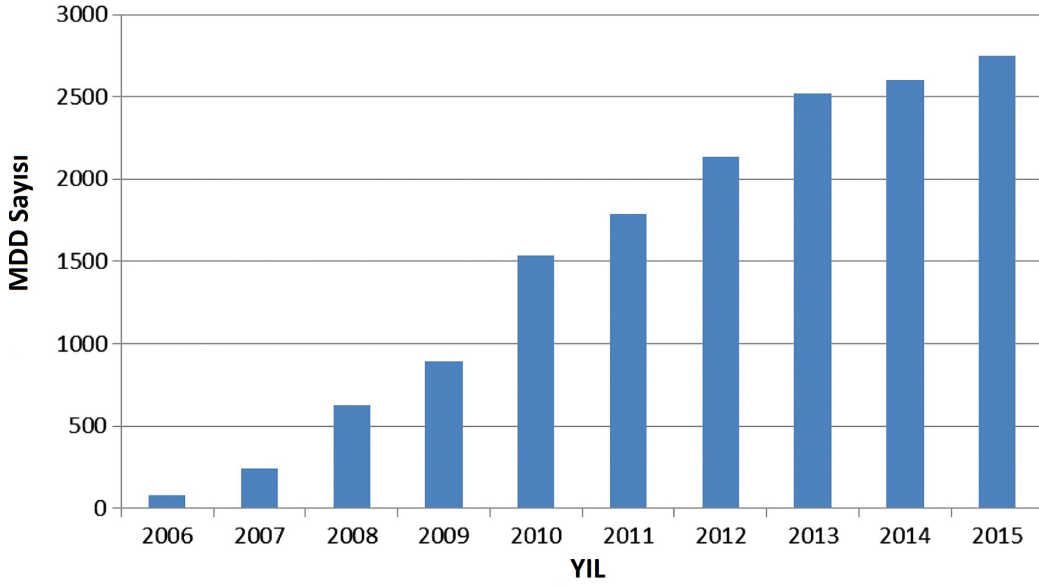


2 LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1 Mekanik Dolaşım Destek Sistemleri

Son verilere göre Dünya genelinde yaklaşık 100 milyon insanın kalp yetmezliği ile ilişkili hastalıklara sahip olduğu ve bu sayının gelecekte daha da artmasının beklendiği görülmektedir (Lippi and Gomar, (2020)). Donörlerden elde edilen kalp organlarının yetersiz sayıda olmasında dolayı, son evre kalp yetmezliği hastalarında MDD sistemleri sıkça kullanılmaktadır. Birçok bilinen MDD sistemi arasında, sürekli akışlı sol ventriküler destek cihazları (SVDC) kalp yetmezliği tedavisinde en yaygın kullanılan cihazlar arasındadır (Molina et sl., (2020); Mohacsi et sl., (2017)). SVDC, kanı doğrudan sol ventrikülden aorta pompalayan bir cihaz olarak işlev görmektedir (Mohacsi et sl., (2017)). SVDC, hastanın kaburgalarına kolayca yerleştirilebilen ve uzun süreli kullanılabilen bir cihazdır. Cihazın kardiyovasküler sistem içine girmesine ve çıkmasına izin vermek için uygun giriş ve çıkış kanülleri gereklidir. Şekil 2.1’de SVDC’lerin Amerika Birleşik Devletler’indeki kullanım oranı görülmektedir. Bu artış hızı Dünya’daki artış hızı ile paralel olarak gerçekleşmektedir.

Sürekli akış tipine sahip SVDC’ler temelde iki türden oluşmaktadır. Bunlar eksenel veya radyal akış tipine sahip döner kan pompalarıdır. Elektrik tahrik sistemi ise genel olarak kalıcı mıknatıslı senkron motorlardan oluşmaktadır (Chusri et al., (2013)). Bu motor yapılarındaki stator sargılarının enerjilendirilmesiyle oluşturulan elektromanyetik yapı, rotor içindeki kalıcı mıknatıslarla etkileşime girer ve pompadaki kanatçığı döndürür. Bu, kan akışını doğrudan aorta iletmeye olanak tanır. Geleneksel elektrik motorlarında shaft döndürülürken, SVDC sistemlerinde pompanın içindeki kanatçık döndürülür. Tipik olarak santrifüj bir kan pompasının dönme hızı 2.000-4.000 dev/dk arasındayken (Song et sl., (2004); Chua et sl., (2005)) , eksenel bir kan pompasının dönme hızı 6.000-12.000 dev/dk arasında olabilmektedir (Mitamura et sl., (1999); Throckmorton et sl., (2007)).



Şekil 2.1: Amerika Bileşik Devletleri'ndeki 2008-2015 arasındaki SVDC kullanım sayısı (Gustafsson et sl., (2017)).

1960'ların sonlarında ortaya çıkan öncü MDD sistemleri, kalp sorunları yaşayan hastalara yeni bir umut sunmuştur. Dr. Kantrowitz'in 1963'te (National Institutes of Health, (2011)) geliştirdiği genişletilebilir odacık ve Dr. DeBakey'in 1966'da (DeBakey, (1971)) tasarladığı gazla çalışan senkronize sol ventrikül pompası gibi cihazlar, kalp yetmezliği olan hastalar için bir umut olmuştur. Bu ilk cihazların geliştirilmesi sırasında klinik deneyler başlangıçta akademik tıp merkezleri tarafından düzenlenirken daha sonraki araştırmalarda ise federal gıda bürosu gibi bölümlerin tıbbi cihaz araştırmalarını denetlemeye başlamıştır. (Holman, (2012); Kirklin and Naftel, (2008)). İlk başarılı SVDC nakil işlemi ise 1978 yılında gerçekleştirilmiştir (Norman et sl., (1978)). Bu tarihten 1990'ların sonlarına kadar, kalp pompalarının gelişimi büyük bir hızla ilerlemiştir. SVDC'lerin evrimi, farklı gelişim dönemlerine ayrılmış ve her dönem kendi özgün işleyiş prensibine sahip olmuştur.

Birinci nesil SVDC'ler, nabız benzeri bir hacim değiştirme mekanizmasına sahiptir. İşleyiş prensibi, bir dışsal pnömatik veya elektriksel kuvvetin, iki yönlü akış valfi bulunan çöktürülebilir bir kan odacığına uygulanması üze-

rine kuruluydu. Bu valflerden biri odacığın girişinde, diğeri ise çıkışında bulunuyordu. Bu mekanizma ile, gerçek bir kalbin pompalama hareketini taklit eden nabzımsı bir etki yaratılabilmektedir (Gregory et sl., (2017)). Birinci nesil pompalar, üreticinin tasarımına bağlı olarak vücut içi veya vücut dışına implante edilebilmektedir. Şekil 2.2’de bazı birinci nesil yer değıştirme pompaları gösterilmiştir.

A.



B.



C.



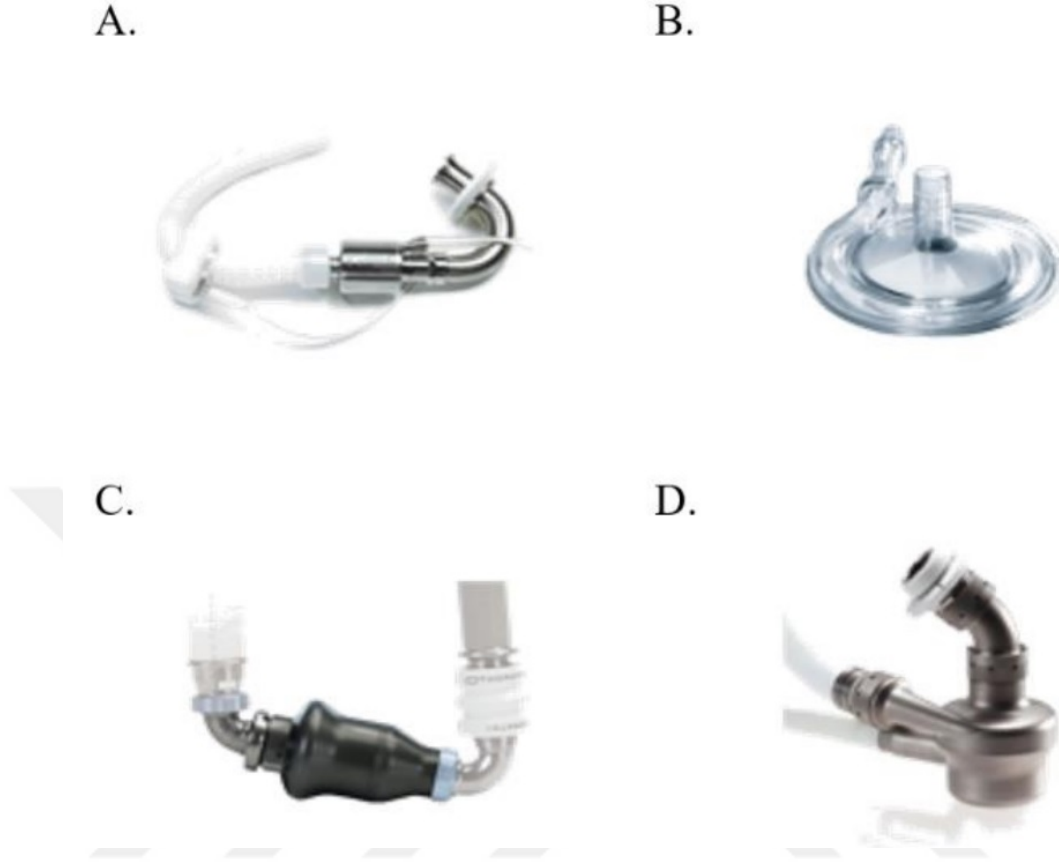
D.



Şekil 2.2: İlk nesil SVDC’ler. (A) Thoratec Intracorporeal (IVAD), (B) Thoratec Paracorporeal, (C) Berlin Heart EXCOR, ve (D) HeartMate XVE. (Garbade et sl., (2011)).

İlk nesil SVDC’lerin klinik faydalarını kanıtlayan bir deneme (Rose et sl., (2001)) ancak 2001 yılında gerçekleşmiştir. Bu çalışmada kalp yetmezliği olan iki hasta grubunu karşılaştırıldı. İlk grup, 68 hastadan oluşuyordu ve bu gruba SVDC nakil tedavisi uygulandı, diğeri grup ise 61 hastadan oluşuyordu ve geleneksel tedaviler ile tedavi edildiler. Çalışmanın sonucuna göre, SVDC tedavisiyle 12 ay sonra ölüm riskinde yüzde 48’lik bir azalmanın tespit edilmiştir. Bu sayede tedavilerde kullanılması onaylanmıştır. Fakat SVDC

nenin dönme ekseninin dik yönüne doğru boşaltır (Peng, (2008)). Şekil 2.4’de, ikinci nesil sürekli döner SVDC’lerin bazı örneklerini göstermektedir.



Şekil 2.4: İkinci nesil SVDC’ler (A) HeartAssist 5, (B) RotaFlow, (C) HeartMate II, ve (D) EvaHeart. (Goodman et sl., (2022)).

İkinci nesil SVDC’lerin üretiminin başlamasından yaklaşık yirmi yıl sonra, ikinci nesil bir SVDC ile birinci nesil bir SVDC’nin karşılaştırıldığı bir çalışma yapılmıştır (Slaughter et sl., (2009)). Çalışma, rastgele olarak seçilen birinci veya ikinci nesil SVDC’ye sahip 200 hasta içeriyordu. Çalışmanın sonuçları, her iki cihazın da fonksiyonel kapasiteyi ve yaşam kalitesini artırdığını, ancak ikinci nesil cihaza sahip hastalarda daha yüksek oranlarda bir iyileşme oranı görülmüştür. İki yıl boyunca süren bu çalışmada yeni nesil SVDC’lerin ilk nesil SVDC’lere göre daha az cihaz başarısızlığına sahip olduğu ve sağ kalım oranlarında ciddi bir iyileşme sağladığı görülmüştür. Çalışma, ileri düzeyde

kalp yetmezliği olan hastalar için sürekli akışlı SVDC'lerin, birinci nesil SVDC tedavisi ve geleneksel medikal yöntemlerle karşılaştırıldığında en yüksek sağkalım oranlarına sahip olduğunu göstermiştir.

SVDC'lerin üçüncü ve en son nesli, küçük boyutları ve rotoru pompa muhafazasının içinde merkezlemek için rulmanların olmaması nedeniyle diğer önceki nesillere göre büyük avantajlara sahiptir (Mihalj et sl., (2022)). Üçüncü nesil SVDC'lerde sabit kanat parçası ile kan akışının mekanik olarak temasını önlemek için manyetik rulmanlar kullanılmaktadır. Bu sayede önceki nesillere göre cihaz dayanım oranları geliştirilmiş ve hastalar üzerinde ileri vadede olumlu sonuçlar alınmıştır.

Bazı önemli SVDC modelleri ve bu cihazlara ait pompa özellikleri şu şekildedir. Jarvik-2000, ikinci nesli olarak bilinen bir SVDC'dir ve bu cihaz Jarvik Heart Inc. tarafından New York, ABD'de geliştirilmiştir. Bu implante edilebilir cihaz, sol ventriküler içine yerleştirilen sürekli bir aksiyel akış pompasıdır (Westaby et sl., (2006)). Jarvik-2000, küçük bir pompadır; cihazın uzunluğu 5.5 cm, çapı 2.4 cm, ağırlığı 85 g ve hacmi 30 cc'dir. Tüm kan temas ile eden bileşenler titanyumdan üretilmiştir. Cihaz uzun süreli kullanım için tasarlanmıştır. Pervane (rotor) dönüşü için, iki adet seramik rulman tarafından kullanılmıştır. Ayrıca, Jarvik-2000'in pervanesinde güçlü kalıcı mıknatıslar bulunmaktadır. Jarvik-2000, 3-7 L/dak akış hızında kan transferi yapabilmektedir ve 8000 ila 12000 dev/dak arasındaki hızlarda, 10 W güç kullanarak çalışabilir. Jarvik-2000 sistemi doğru akım güç kaynağına sahiptir. Pompa gücünü vücut dışındaki kontrol ünitesinden almaktadır.

HeartMate II SVDC, Nimbus, Inc. ve Pittsburgh Üniversitesi ekiplerinin işbirliği projesi olarak 1990'ların başında Pleasanton, Kaliforniya, ABD'de bulunan Thoratec Corp. tarafından üretilmiştir (Burke et sl., (2001)). Bu implante edilebilir pompa, sürekli aksiyel akış pompası olan ikinci nesil bir SVDC'dir. HeartMate II, tam dolaşım desteği sağlayabilir (pompa akış hızı yaklaşık 5 L/dak). Giriş kanülü sol ventrikülün içine implante edilirken, çıkış

kanülü inen aortaya bağlanır. HeartMate II SVDC uzunluğu 70 mm'dir. Bu küçük implante edilebilir pompanın ağırlığı 290 g, çapı 4.0 cm ve hacmi 63 ml'dir. Pompa kanül tüpü titanyum alaşımından yapılmıştır. Rotor yüzeyi ise titanyum ile kaplanmıştır. Pompanın maksimum akışı 10L/dak'dır. Pompa hız aralığı 6,000 ile 15,000 dev/dak arasında çalışmaktadır. HeartMate II genel olarak beş yıldan fazla kullanım süresine sahiptir.

Synergy SVDC uzun süreli dolaşım desteği için tasarlanmıştır. Synergy'nin akış tipi "Hybrid pompa" olarak adlandırılır, bu da aksiyel akış ve santirifüj akışın bir araya getirilerek tasarlandığı anlamına gelir (Agarwal et sl., (2012)). Synergy, küçük bir pompadır ve boyutları bir adet kalem piile yaklaşık aynıdır. Pompanın uzunluğu 49 mm, çapı 14 mm, ağırlığı 25 g ve hacmi 1.5 ml'dir. Pompa muhafazası titanyumdan yapılmış olup, işlevsel hız 20,000-28,000 dev/dak arasındadır. Bu hızlar yaklaşık olarak 2.5 - 3 L/dak akış oluşturabilmektedir. Synergy implantasyon işlemi diğer SVDC'lere göre yapısından dolayı daha basittir, bu nedenle hastanın iyileşme süreci daha hızlı olur ve cerrahi risk azalır. Cihazın güç sistemi 1 kg ağırlığındadır ve pil ömrü 6-8 saate kadar çıkabilmektedir.

HeartWare HVAD, ABD merkezli HeartWare Inc. tarafından geliştirilen üçüncü nesil bir SVDC sistemidir. HeartWare HVAD'ın küçük boyutu, ventriküler boşluğa yerleştirilen entegre bir giriş kanülü ile kanın boşaltıldığı perikardiyal boşluğa implante edilir (Strueber et sl., (2010)). HeartWare HVAD, 50 mm çapında ve 160 g ağırlığında küçük boyutlu ve hafif bir cihazdır. HeartWare HVAD'ın akış tipi santirifüj akıştır ve 1,800 ile 4,000 dev/dak arasında dönmektedir. HeartWare HVAD'ın akış hızı 10 L/dak'a kadar ulaşabilir. HeartWare'ın rotor pervanesi için ise hidrodinamik bir rulman kullanılmıştır.

DuraHeart SVDC, ABD merkezli Terumo Heart Inc. tarafından geliştirilen bir cihazdır. Bu SVDC uzun süreli destek için implante edilebilir bir pompadır. DuraHeart, motorla tahrik edilen aksiyel yükseltme sistemi ile sürekli akış

santrifüj kan pompası olan üçüncü nesil SVDC'lerin ilk sistemi olarak kabul edilir. Cihaz, aksiyel manyetik yatakla temas etmeyen bir pervane süspansiyon sistemi içerir (Hoshi et sl., (2006); Morshuis et sl., (2010)). Manyetik yatak sayesinde ise kan travması büyük ölçüde azalmaktadır. DuraHeart SVDC'nin ağırlığı 540 g, yüksekliği 45 mm ve genişliği 72 mm'dir (Nishinaka et sl., (2006)). Kan akış hızı en fazla 8 L/dak ve hız aralıkları 1,200 ile 2,600 dev/dak arasında olabilmektedir. Cihazın yüzeyi tromboz oluşumunu engellemek için heparin ile kaplanmıştır. Bu cihazda pervane manyetik yükseltme sistemi ile desteklenmiştir (Morshuis et sl., (2009)).

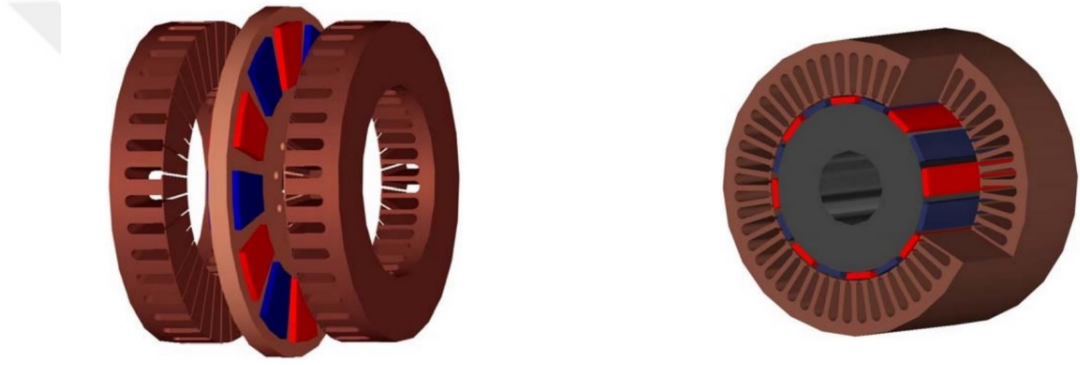
Incor SVDC, Almanya merkezli Berlin Heart Inc. adlı üretici tarafından geliştirilmiştir. Incor SVDC, manyetik yükseltme prensibiyle çalışan, üçüncü nesil bir SVDC olan ilk döner kan pompasıdır (Arndt et sl., (2008)). Incor SVDC, 12 cm uzunluğunda, 30 mm çapında ve 200 g ağırlığındaki aksiyel akışlıdır. Incor SVDC'lerin akış hızı maksimum 7 L/dak kadar çıkabilir. Rotor dönüş hızı ise maksimum 10,000 dev/dk olmaktadır. Cihaz, pervanenin konumunu korumak için manyetik yatak teknolojisini kullanır.

2.2 Eksenel Akılı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar

Kalıcı mıknatıslı elektrik makineleri, yüksek enerjili kalıcı mıknatısların rekabetçi maliyetiyle giderek daha baskın hale gelmektedir (Aydın et sl., (2004)). Bu makineler birçok benzersiz özellikle sunmaktadırlar. Genellikle daha verimlidirler, çünkü alan uyarılma kayıpları ortadan kaldırılarak önemli ölçüde rotor kaybı azaltılmıştır. Bu sayede motor verimliliği büyük ölçüde artar ve daha yüksek güç yoğunluğu elde edilebilir. Ayrıca, bu makineler küçük mıknatıs kalınlığına sahiptir, bu da küçük makine boyutları anlamına gelir. Eksenel akışlı mıknatıs makineleri açısından, radyal akışlı makineler üzerinde birkaç belirgin avantajları bulunmaktadır. En önemli avantajı daha yüksek güç-ağırlık oranına sahip olabilmeleridir. Düzlemsel ve kolayca ayarlanabilir hava aralıkları vardır. Gürültü ve titreşim seviyeleri geleneksel makinelerden daha düşüktür. Ayrıca, ana hava aralığı akımının yönü değiştirilebilir, bu

sayede birçok farklı topolojide makine türetilir. Bu avantajlar, eksenel akışlı makineleri çeşitli uygulamalarda geleneksel radyal akışlı makinelerin karşısında avantajlı kılar.

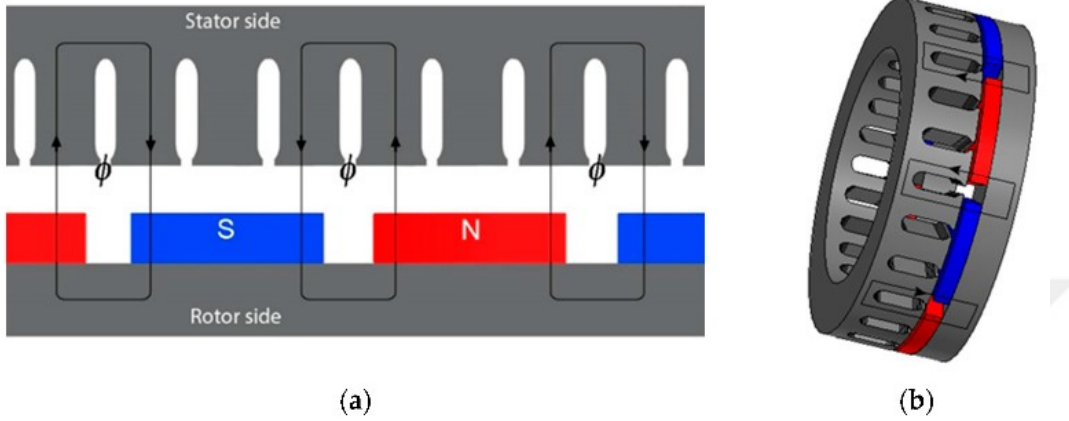
Elektrik makineleri, akı geçiş yönüne göre iki gruba ayrılmaktadır. Bunlar eksenel akışlı ve radyal akışlı makinelerdir Şekil 2.5. Ayrıca eksenel hava aralığı ve radyal hava aralığı makineleri olarak da adlandırılmaktadırlar (Jang and Chang, (2002); Mirzaei et sl., (2007)). Ayrıca yatay akışlı makineler de vardır; ancak düşük güç yoğunluklarından dolayı yaygın olarak kullanılmadıkları için bu sınıflamaya dahil edilmezler (Polinder et sl., (2013)).



Şekil 2.5: Sol: Eksenel akışlı makine Sağ: Radyal akışlı makine (Parviainen et sl., (2005)).

Radyal ve eksenel akışlı makineler arasındaki temel farklar şu şekilde belirtilebilir. Eksenel akışlı makinelerin ekseni boyunca olan uzunluğu kısa olmasına rağmen çap uzunluğu büyüktür, oysa radyal akışlı makinelerin ekseni boyunca olan uzunluğu daha büyük ve çapı uzunluğu kısadır. Büyük çapları nedeniyle, eksenel akışlı makineler daha yüksek tork yoğunluğuna sahiptir. Radyal akışlı makinelerin dönme simetrisi nedeniyle rotor ve stator üzerinde net çekme kuvveti bulunmaz. Ancak eksenel akış makinelerinde, topolojiye bağlı olarak rotor veya stator üzerinde eksenel yönde net olarak sıfır olmayan bir çekme kuvveti olabilir. Bu durum, hava aralığında sapmaya neden olabilir

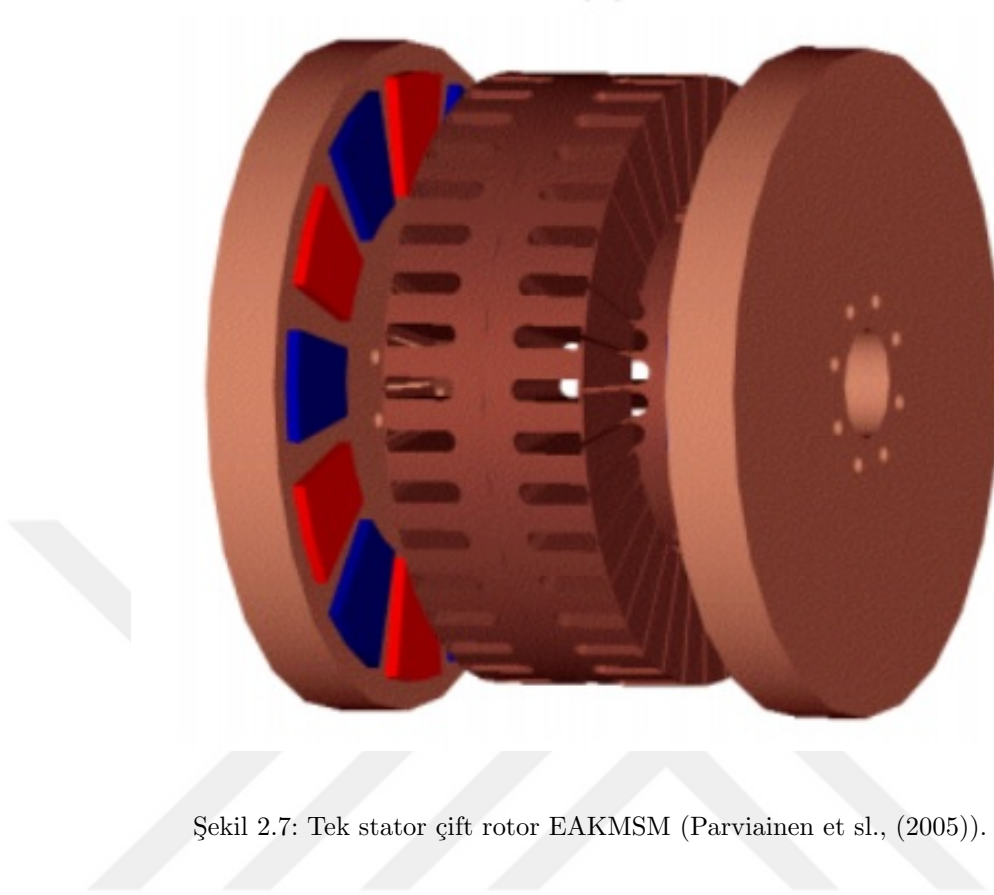
ve eksenel akılı makineler için mekanik tasarımı zorlaştırmaktadır. Bu çekim zamanla yataklarda eksenel yönde gerilime neden olarak mekanik arızalara yol açabilir (Tongle et sl., (2010)). Eksenel akılı makineler, eksenel yönde birden fazla stator ve rotor olacak şekilde arttırılma avantajına sahiptir. Bu şekilde, makinenin modülerliği yüksek olmaktadır. Tek statorlu ve tek rotorlu EAKMSM Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6: EAKMSM'nin manyetik akı yolu, (a) 2 boyutlu ve (b) 3 boyutlu (Cetin and Daldaban, (2018)).

EAKMSM'lar stator ve rotor yapıları itibari ile farklı çeşitlerine sahiptir. Bu çeşitler sırası ile şu şekildedir. Tek statorlu tek rotorlu eksenel akılı sabit mıknatıslı motorlar, basit bir yapıya sahip olmalarına rağmen genellikle düşük moment kapasitesine sahiptirler. Bu tür motorlarda rotor ile stator arasında net olarak sıfır olmayan eksenel kuvvetler vardır (Mahmoudi et sl., (2011)). Bu nedenle, daha dengeli eksenel kuvvetlere sahip motorların aksine, daha karmaşık yatak düzenlemelerine ve daha kalın bir rotor diski sahiptirler. Bu tip motorlar oluklu veya oluksuz olarak tasarlanabilir. Oluksuz yapılardaki güç yoğunluğu nispeten daha düşük olmaktadır. Tek statorlu çift rotorlu eksenel akılı sabit mıknatıslı motorlarda Şekil 2.7'de gösterildiği gibi iki rotor arasında iki taraflı bir stator kullanılmaktadır. Bu tür makineler aynı zamanda TORUS olarak da bilinir (Aydın et sl., (2004)). Bu motorlar yüksek moment kapasitesine sahiptir ve her iki tarafta da eksenel kuvvetler dengelemiştir.

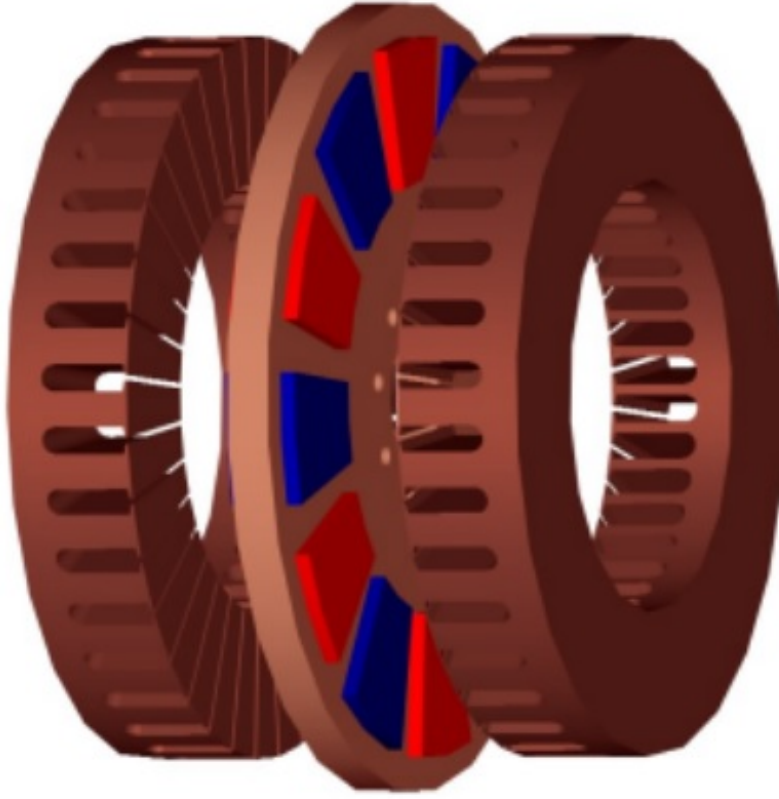
Bu nedenle aksel kuvvet dengesi ve bakımından motorun ömrü daha uzun olabilmektedir.



Şekil 2.7: Tek stator çift rotor EAKMSM (Parviainen et sl., (2005)).

Şekil 2.8’de görülen ve AFIR olarak da adlandırılan çift statorlu tek rotorlu EAKMSM yapısı, iki stator arasında yer alan tek bir rotordan oluşur. Bu yapılar, rotorunda manyetik bir nüve içermediği için son derece yüksek bir güç-atalet oranına sahiptir. Bu nedenle, düşük atalet gerektiren uygulamalarda bu tipteki EAKMSM yapıları tercih edilebilir (Mahmoudi et sl., (2011)).

Şekil 2.9’de çok rotorlu ve çok statorlu EAKMSM yapısı gösterilmiştir. Bu tür makinelerde stator ve rotor sayıları artırılarak moment ve güç değerleri belli bir ölçüye kadar arttırılabilir. Ancak, stator ve rotor sayısının artması motorun kompakt yapısını bozabileceğinden tasarım aşamasında bu duruma dikkat edilmelidir. Motorun gücünü artırmak için motor çapını büyütmek yerine stator ve rotor sayısını artırmak, aksel kuvvetleri azaltabilir. Bu durum üretim açısından kolaylık sağlamaktadır. Pompa ve alternatör gibi

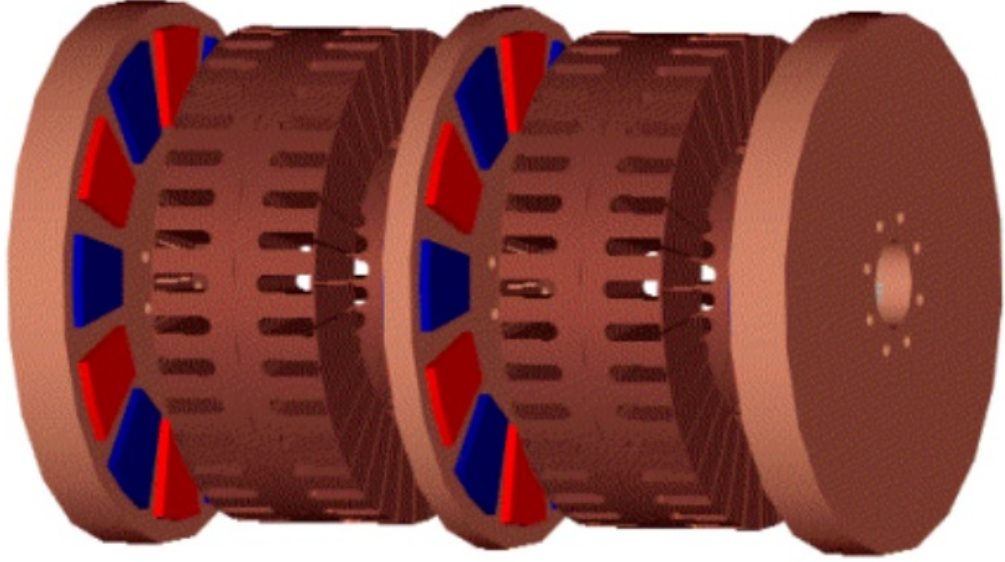


Şekil 2.8: Çift stator tek rotor EAKMSM (Parviainen et sl., (2005)).

uygulamalarda kullanılabilirler. Bu tip EAKMSM’lerde genellikle N sayıda stator ve $N+1$ sayıda rotor bileşeni kullanılmaktadır. Stator sargıları istenirse paralel veya seri olarak bağlanabilmektedir. Bunun yanında daha önceki yapılarıdaki gibi oluklu veya oluksuz modeller bulunmaktadır (Mahmoudi et sl., (2011)).

2.3 Yumuşak Manyetik Kompozitler

Yumuşak manyetik kompozitler (YMK), elektriksel olarak izole ferromanyetik tozlardan oluşmaktadır. YMK, temel olarak demir tozları ile epoksi reçine birleştirilerek üretilmektedir (Périgo et sl., (2018)). YMK materyallerinin geçirgenliği, elektromanyetik bileşenlerde enerji kaybını azaltmaya yardımcı olabilen önemli bir kavramdır. Elektrik makinelerinde kullanılan sert ve yumuşak manyetik bileşenler, metalurji ve malzeme biliminin ilerlemeleri



Şekil 2.9: Çoklu stator çoklu rotor EAKMSM (Parviainen et sl., (2005)).

sayesinde önemli ölçüde geliştirilmiştir. YMK üretimi toz metalurjisi tekniklerine dayanmaktadır ve elektriksel olarak izole edilmiş demir tozlarını içerir. Bu durum malzemenin işlenmesini daha kolay hale getirerek karmaşık yapılar oluşturma önünü açmaktadır. Son çalışmalar, YMK'nın lamine çeliklere göre önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir; bu avantajlardan bazıları, orta ve yüksek frekansta düşük girdap akım kayıpları ve yüksek manyetik geçirgenliktir. Bu nedenle YMK malzeme motorlar, alternatörler ve transformatörler gibi elektrik uygulamaları için çekici bir seçenek olmaktadır. Şekil 2.10'de YMK bir malzeme ile üretilen manyetik nüveler görülmektedir.

Geleneksel lamine çeliklere göre, YMK elektrik motorları, manyetik performans, verimlilik, maliyet ve malzeme özellikleri açısından birçok avantaj sunar ve elektromanyetik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir olmaktadır (Ishikawa et sl., (2012); Guo et sl., (2002)). YMK'nın kalıcı mıknatıslı makinelerde kullanımı, malzeme mühendisliğindeki ilerlemeler nedeniyle makine tasarımcıları ve üreticileri için daha çekici hale gelmiştir. Ayrıca, önceki çalışmalar göstermektedir ki, YMK malzeminin girdap akım kayıplarının daha



Şekil 2.10: YMK malzeme ile manyetik nüve üretimi.

düşük olması nedeniyle yüksek hızlı EAKMSM uygulamaları için yeterince uygun olduğunu görülmektedir (Przybylski et sl., (2010); Zhang et sl., (1996)). YMK çekirdek üretimi genel olarak karmaşık stator şekilleri için daha uygundur. Ayrıca, YMK malzemesinin diğer çelik malzemelere göre daha düşük manyetik geçirgenliği ve daha yüksek çekirdek kayıpları vardır. Bazı çalışmalar, lamine çelik ve YMK malzemelerin sadece girdap akım kaybı ve çekirdek kaybı açısından incelemiştir fakat makine performansı üzerindeki etkileri hakkında yeterli çalışmalar bulunmamaktadır (Scheerlinck et sl., (2015)).

YMK ve lamine elik malzeme elektrik makineleri üzerine birçok çalışmalar yapılmıştır. Bazı alışmalar, YMK'nın lamine çelikle karşılaştırıldığında histerzis kayıpları açısından daha zayıf bir performans sergilediğini göstermiştir, ancak her iki malzeme de elektromanyetik alan dağılımı ve geçirgenlik açısından benzer sonuçlar vermektedir (Sun et sl., (2017); Wang et sl., (2017); Gumbleton-Wood et sl., (2019)).Yine de, YMK malzeme yüksek elektriksel dirence sahip olduğu için düşük girdap akım kayıpları yaratmaktadır. Bu durumda daha karmaşık yapılı elektrikli makineleri retilabilir (Schoppa et sl., (2013); Liu et sl., (2019)). YMK, geleneksel EAKMSM'nin ötesinde birçok farklı elektrikli makineye de uygulanır. Örneğin, stator dişleri ve yataklarının üretiminde maliyetleri azalttığı ve elektriksel performans açısından geleneksel alternatör üretimine alternatif olarak kullanılabileceğini ortaya konan bazı çalışmalar vardır (Khan et sl., (2006)). YMK tabanlı elektrik makinesi üretimi için genel olarak kalıp tekniği yöntemi kullanılmaktadır. (Pyo et sl., (2020)). YMK, elektrik motoru topolojilerinde ve özellikle 20.000 devir/dakikanın üzerindeki hızlara sahip olan yüksek hızlı motorlarda geniş uygulamalara sahiptir, bu bölümde demir kayıpları açısından lamine çeliğe göre oldukça yüksek performans göstermektedir (Huang et sl., (2007)).

Bunun yanında incelenmesi gereken bir diğer husus EAKMSM zerindeki kaçak akı dağılımının ortaya konmasıdır. Elektrik makinesinin tasarım aşamasında, tüm kaçak endüktanslar ve senkron endüktanslar hesaplanmalı ve daha iyi moment kapasitesi için optimize edilmelidir. Senkron endüktans iki farklı bileşenden oluşmaktadır: biri tork üretimi ile ilgili olan manyetizasyon endüktansı ve diğeri tork üretimi için kullanışsız olan kaçak endüktansdır Kaçak endüktans dört bileşene ayrılabilir. Oluk kaçak endüktansı, diş ucu kaçak endüktansı, uç sarma kaçak endüktansı ve hava aralığında harmonik kaçak endüktansıdır. Hava aralığı harmonik kaçak endüktansının değeri EAKMSM'nin oluk/kutup kombinasyonuna bağlıdır (Ponomarev et sl., (2013)). Hava aralığı kaçak harmonik endüktansı, oluk/kutup seçiminden elde edilen katsayı ile manyetizasyon endüktansının çarpımı ile

bulunur. Bir faz ve kutup başına düşen oluk sayısı 0,5'ten düşük olduğunda, senkron endüktansa göre yüksek harmonik kaçak endüktansı elde edilir, bu nedenle uygun kutup ve oluk sayılarını seçmek önemlidir. Oluk, dış ucu ve oluk ucu kaçak endüktansları, oluk boyutları, bir oluk içindeki toplam iletken sayısı ve uç sargı uzunluğu seçimi ile belirlenmektedir (Pyrhönen et al., (2008)). Bu bileşenler farklı mekanik özelliklerle değiştirilebilir. Oluk kaçak endüktansı doğrudan oluk derinliği ile orantılıdır ancak genişliği ile ters orantılıdır. Dış ucu kaçak endüktansı büyük ölçüde hava aralığı uzunluğuna ve oluk genişliğine bağlıdır.

Etkili hava aralığı büyük olduğunda (Yang and Peng, (2019); Ping et al., (2018); Prieto et al., (2015)), yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı makinelerinde diğer endüktanslar arasında oluk kaçak bileşeni önemli hale gelir ve bu durum oluk kaçak endüktansının hesaplanmasını gerektirir. Makine topolojileri ve oluk geometrisine bağlı olarak oluk sızıntı endüktansını belirlemek için kullanılabilen birkaç analitik yöntem bulunmaktadır (El-Refaie et al., (2008); Tassarolo, (2015)). Bununla birlikte, bu yöntemler karmaşık denklemlere dayanır ve matematiksel analiz yazılımı gerektirmektedir. Alternatif olarak, daha pratik analitik yöntemler (Cavagnino, (2017); Madariaga et al., (2019); Wallace et al., (2012)) sunulmuştur. Oluk kaçak endüktansının önemi, özellikle yüksek performans için yarı kapalı oluklar kullanıldığında artar. Geleneksel analitik yöntemler, oluk kaçak akı eğrisinin oluk tabanına paralel olarak ilerlediği varsayımını yapar, bu varsayım açık oluklar için yeterlidir Wang and Howe ((2004)); Arumugam et al. ((2012)). Ancak bu varsayım, yarı kapalı oluklar söz konusu olduğunda kaçınılmaz hatalara yol açar.

EAKMSM'ler, elektrik, manyetik ve termal süreçlerin sıkı bir şekilde iç içe geçtiği son derece karmaşık sistemlerdir (Vilar et al., (2005)). Bu makinelerin içindeki sıcaklık dağılımı fiziksel geometri ve makine kayıplarına bağlıdır. Kalıcı mıknatıslı makinelerin mekanik yapıları nedeniyle karmaşık bir termal sistem oluşmaktadır. Örneğin, yalıtım ve mıknatıslar gibi farklı malzemelerin farklı sıcaklık limitleri vardır. Ayrıca, farklı makine geometrileri farklı ısı dağılımına

yol açar, bu da genel makine sıcaklığını farklı yollarla etkiler. Bu nedenle, makine tasarımı sırasında mühendislerin kalıcı mıknatıslı makineleri kapsamlı bir termal analizi yapmaları gerekmektedir(Ferreira and Costa, (2012); Chai et sl., (2019)).

EAKMSM'lerin termal analizi makine geometrisi nedeniyle geleneksel makinelere göre daha zordur (Vansompel et sl., (2019)). Tipik olarak, EAKMSM'ler rotor ve stator sistemlerinin birleşimi olarak varsayırlar. Isı dağılımının stator ve rotor yüzeyi üzerindeki konveksiyonunu belirlemek için analitik ve deneysel bağıntılar kullanılır (Boutarfa and Harmand, (2005); Vansompel et sl., (2015)). Araştırmacılar, makine yüzeyinin çapı (Howey et sl., (2012)), yüzeyler arası mesafe (Rasekh et sl., (2017)) ve kalıcı mıknatısların çıkıntıları (Rasekh et sl., (2016)) gibi geometrik parametrelerin akışı ve ısı konveksiyonunu nasıl etkilediğini incelemek için bilgisayar destekli akışkanlar dinamiği modellemesini (Marignetti et sl., (2008)) incelemek için analitik (Camilleri et sl., (2016); Rostami et sl., (2013)) ve deneysel (Howey et sl., (2011)) yöntemleri kullanırlar. Bu konuda, EAKMSM sistemler için akışkan analizi ve termal modelleme çalışmaları bulunmaktadır (Airoldi, (2010); Chin Hong, (2010); Latoufis et sl., (2018)).

3 MEVCUT MDD SİSTEMİ YAPISI

Mevcut MDD sistemi içine yerleştirilebilecek boyutlarda bir elektriksel tahrik mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, boyut olarak küçük ve güç yoğunluğu olarak yüksek bir tahrik sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda EAKMSM tipteki makineler sahip oldukları özellikler nedeniyle kullanılabilirler.

İndüktör, MDD sisteminin giriş kısmında bulunan bir bileşendir. Görevi, dolaşım sisteminden gelen kanı cihaza iletmektir. İndüktör, kanın rotor bölümüne iletiildiği noktadır ve bu aşamada kanın akışını başlatır. Rotor, MDD sisteminin kalbin yerine kanı pompalamak için kullandığı merkezi bir parçadır. İndüktör tarafından çekilen kanı emer ve döndürür. Bu dönme hareketi, kanın cihazın çıkışına doğru itilmesini sağlar. Rotor, sisteminin mekanik gücünü oluşturan ana bileşendir. Difüzör, rotor tarafından döndürülen kanın akışını düzenlemek ve cihazın çıkışına yönlendirmek için kullanılır. Kanın düzgün ve etkili bir şekilde pompalanmasını sağlar. Aynı zamanda kanın vücuda zarar vermeden akmasını sağlayan bir bileşen olarak da işlev görür. Bu üç ana bileşen, pompanın temel işlevselliğini sağlar.

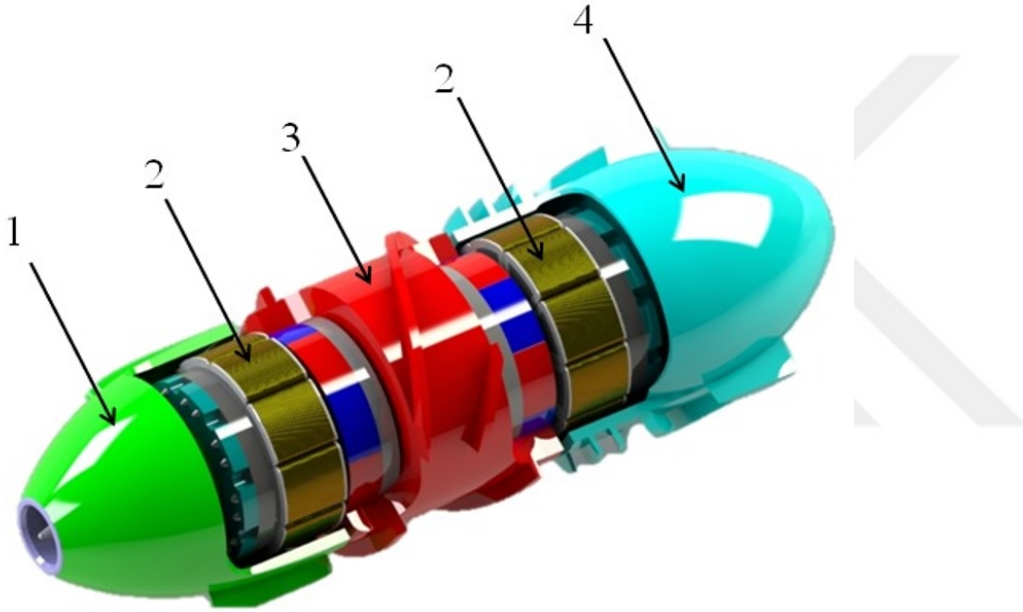
MDD sistemi kalp yetmezliği olan hastaların sol ventrikül işlevini desteklemek veya yerine koymak amacıyla kullanılan bir tıbbi cihazdır. SVDC, kalbin yetersiz pompalama kapasitesini telafi etmek için tasarlanmıştır. Bu cihaz, kalbin vücuda yeterince kan pompalayamadığı durumlarda kullanılır ve dolaşımı sürdürerek hastanın yaşam kalitesini artırmayı hedefler. MDD sisteminde genel olarak bir pompa, bir kontrol ünitesi, bir güç kaynağı ve bir tahrik bileşeninden oluşur. İç pompa, hastanın vücudu içine yerleştirilir ve kanı kalpten çekerek arterlere pompalamaktadır. Kontrol ünitesi pompanın çalışmasını yönetir ve gerekli ayarlamaları yapar. Güç kaynağı, cihazın çalışması için gereken elektrik enerjisini sağlar. Tahrik hattı, cihazın dış bir kaynaktan güç çekmesini sağlar ve taşınabilirliğine katkıda bulunur.

MDD sisteminin farklı perfüzyon desenlerine yol açan iki temel tasarımı bulunmaktadır. Yaklaşık %10'luk bir SVDC sisteminde bulunan darbe pompası, doğal kan akışını taklit etmeyi amaçlar. Birinci nesil cihazlar, darbeye benzer pozitif yer değiştirme pompalarını içerir, ancak sınırlı dayanıklılık, karmaşık implantasyon cerrahileri, büyük dış bileşenler ve duyulabilir pompa sesi gibi faktörleri gibi dezavantajlara sahiptirler (Trinquiero, (1996); Brady, (2018)). İkinci nesil cihazlar sürekli akış mekanizmalarını içerir. Üçüncü nesil cihazlar, uzun ömürleriyle bilinen santrifüj pompalarını kullanır. Sürekli akışlı cihazlar, perfüzyon sağlamak için kalp kasılmalarına dayanıklı bir şekilde çalışırlar. Sürekli akışlı cihazlar, daha doğal olan pulsasyonlu pompa tasarımına göre organ perfüzyonu sağlamada üstündürler (Robertson, (2016); Kirklin, (2017)). Ayrıca, sürekli akışlı MDD'ler daha dayanıklı ve kompaktlardır. Sürekli akışlı MDD'ler, genellikle sol ventrikül uç noktasına yerleştirilen giriş kılavuzu ile MDD sistemi pompalama odasına kan akışını yönlendirir. Pompa odası, perfüzyondan sorumlu olup MDD modeline bağlı olarak farklı bir konumda bulunabilir. Bu oda, dakikada 2500 ile 9800 devir arasında dönen neredeyse sürtünmesiz bir rotor yapısı barındırır. Bu rotor tasarımları dakikada 10 litreye kadar kan akışı sağlayabilirler. Çıkış kılavuzu, pompalama odasını hastanın doğal kardiyovasküler sistemine yeniden bağlar ve çıkış kılavuzu yoluyla aort damarı ile bağlantı kurar.

Dakikada devir sayısı, bir sağlık profesyoneli tarafından belirlenip programlanır. Akış hızı, pompa hızı ve güç tüketimi kullanılarak hesaplanır. Özellikle birçok mevcut sürekli akışlı MDD'ler, uzun vadeli güvenilirlik endişeleri nedeniyle akış sensörlerinden yoksundur. HeartMate-II (aksiyal akış), HeartMate-III ve HVAD (santrifüj akış) SVDC akış değişkenliği, pulsasyon endeksi kullanılarak ölçülür. Bu boyutsuz ölçüm, maksimum ve minimum akış arasındaki vuruş başına ortalama değeri 10 ile 15 saniyelik bir süre boyunca hesaplar. Ticari MDD sistemleri ve literatürde bulunan boyut ve performans verileri dikkate alındığında, önerilen MDD sisteminin dakikada 4 litre akış hızı ve ortalama %20-25 verimlilik aralığında bir performansla çalışması

amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, pompa devir hızı 5000 devir/dakika olarak ortalama 6-7 mNm arasında bir tork değeri sağlaması gerekmektedir.

Şekil 3.1’de, geliştirilen MDD sisteminin iç yapısını göstermektedir. Tasarlanan EAKMSM’ler pompa içine yerleştirilmiştir. Şekilde sırasıyla stator çekirdeği, stator sargıları, rotor mıknatısı ve rotor çekirdeği görülmektedir. Pompa içinde iki EAKMSM bulunmaktadır. Bu motorlar istenirse birlikte kullanılabilir veya birbirlerinin yedekleri olarakda bulunabilirler. MDD sistemi yapısında induktor (1), EAKMSM stator (2), MDD rotoru (3) ve difüzör (4) bulunmaktadır.



Şekil 3.1: MDD sistemi ile entegre edilmiş EAKMSM’lerin gösterimi.

Kullanılacak MDD sisteminin verimlilik oranı %21.44’dür. Bu değere göre 5000 dev/dak dönüş hızı ve 4 L/dak akış hızı için gerekli tork değeri ise 6.71 mNm olarak belirlenmiştir.

4 EAKMSM TASARIMI

EAKMSM tasarımı için ilk olarak yapılması gerekenler manyetik nüve ve kalıcı mıknatıs için gerekli malzemelerin seçilmesidir. Ardından bu malzemelerin özelliklerinin ortaya konması gerekmektedir. Mevcut MDD yapısına entegre edilebilecek bir boyutta stator ve rotor geometrisi belirlenmelidir. Seçilen stator boyutlarına uygun olarak oluk/kutup kombinasyonu ve sarım sayısı belirlenir. Bu noktada makina anma gücü ve tork değeri hesaplanarak MDD için gerekli güç ve hız değerleri karşılaştırılır. Ardından hava aralığı değeri tasarıma göre optimize edilmelidir. Son olarak EAKMSM'ye ait çekirdek ve sargı kayıpları belirlenir. Her aşamada EAKMSM tasarım değerleri belirlenen kıstaslara göre tekrar gözden geçirilmiştir.

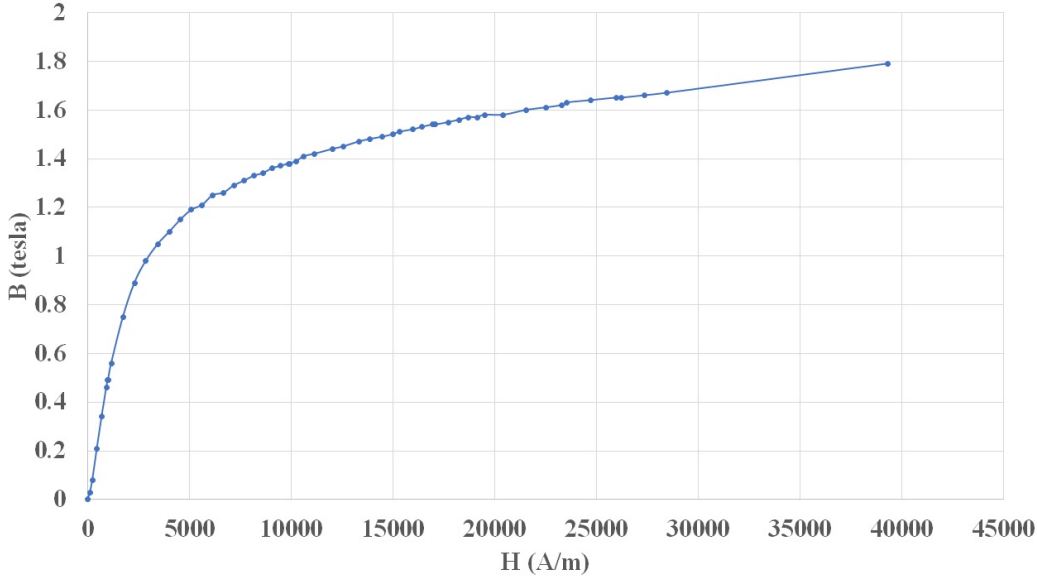
4.1 EAKMSM Malzeme Tipleri

4.1.1 YMK Malzeme Özellikleri

EAKMSM tasarımı için manyetik nüvede kullanılacak YMK malzemesi Somaloy 700-3P olarak belirlenmiştir. Bu malzeme, transformatörler ve alternatörler gibi elektromanyetik cihazlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Somaloy YMK, manyetik olarak iletken olan demir tozunu içeren bir kompozit malzemedir. Bu bileşen, malzemenin elektriksel özelliklerini optimize etmek ve enerji kayıplarını azaltmak için kullanılır. Somaloy YMK, geleneksel laminasyonlu çeliklere göre bir dizi avantaj sunar. Bu avantajlar arasında düşük girdap akım kayıpları, yüksek manyetik geçirgenlik ve termal izotropi bulunur. Bu özellikler, enerji verimliliğini artırmak ve cihazların daha kompakt tasarlanmasına yardımcı olmaktadır.

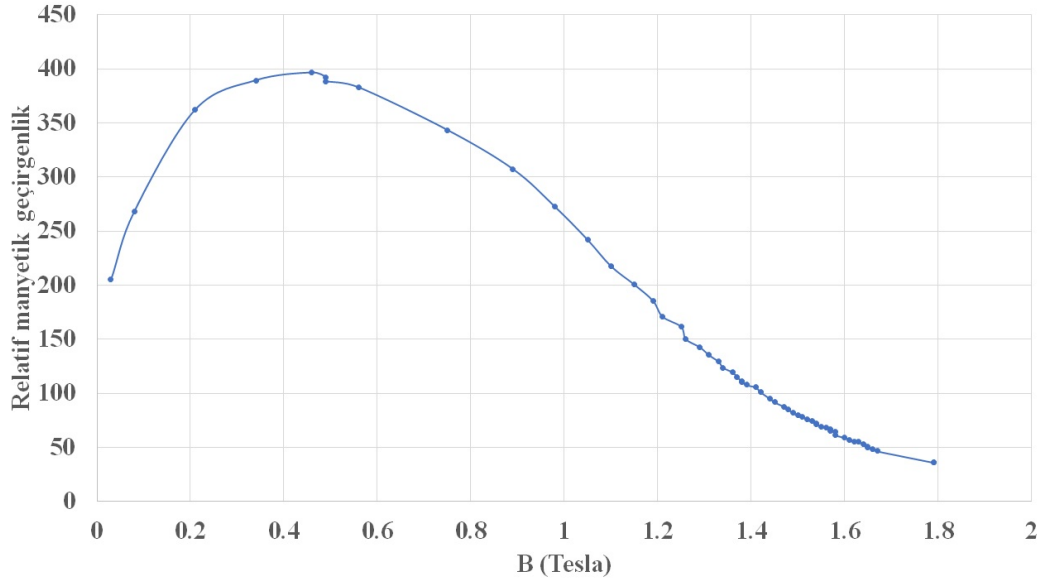
Somaloy 700-3P malzemesi için yoğunluğunun 7.57 g/cc ve özgül direncinin 200 mikrohm/m olduğu bilgisi üretici tarafından üretim kataloglarında belirtilmiştir. Verilen bilgilere göre girdap akım kayıpları için katsayısı bu durumda $0.000027 \text{ m}^4/(\text{H} \cdot \text{kg})$ olmaktadır. Bu malzemenin histerezis kaybı, histerezis kaybı katsayısına, manyetik akı yoğunluğuna ve elektriksel frekansa

bağlıdır. Şekil 4.1’de, B-H karakteristiklerini göstermektedir. Görüldüğü gibi 1.2 Tesla civarından malzeme doygunluk durumuna gelmektedir. Lamine çelikle karşılaştırıldığında doygunluk değeri değeri düşük olsa bile sahip olduğu yüksek elektriksel direnç ile birlikte girdap akım kayıpları düşük olmaktadır.Şekil 4.2’da YMK malzemesine ait relatif manyetik geçirgenlik değerleri verilmektedir. Görüldüğü gibi maksimum relatif manyetik geçirgenlik değerleri 0.5 Tesla manyetik akı yoğunluğu uygulandığında 400 olarak bulunmaktadır.



Şekil 4.1: Somaloy 700-3P YMK malzemesine ait B-H grafiği.

Somaloy 700-3P YMK malzemesinin kilogram başına düşen çekirdek kaybı miktarı, farklı frekans seviyelerine ve manyetik akı yoğunluğuna göre Şekil 4.3’de verilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi, elektriksel frekansın ve manyetik alan yoğunluğunun artması çekirdek kayıplarını arttırmaktadır. Özellikle 0.5, 1 ve 1.5 Tesla manyetik akı yoğunluğunda alınan bu veriler EAKMSM çekirdek kayıplarının hesaplanmasında hem analitik hem de simülasyon çalışmalarına referans veri olarak kullanılmaktadır. Şekildeki verilere göre 1 Tesla üzerindeki manyetik akı yoğunluğu değeri için nüve

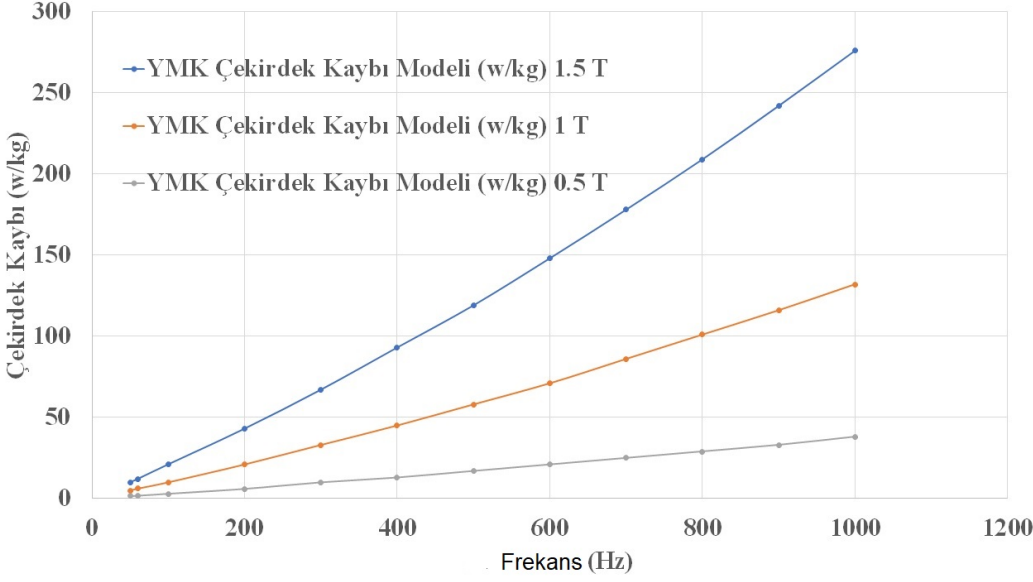


Şekil 4.2: Somaloy 700-3P YMK malzemesine ait relatif manyetik geçirgenlik grafiği.

kayıp miktarları oldukça yüksektir. Bu durum tasarımda göz önünde bulundurulmuştur.

4.1.2 TYLÇ Malzeme Özellikleri

EAKMSM tasarımı için manyetik nüvede kullanılacak bir diğer malzeme ise TYLÇ olarak belirlenmiştir. TYLÇ elektrikli cihazların çekirdeklerinin yapımında kullanılan bir çelik türüdür. TYLÇ, belirli uygulamalar için optimize edilmiş manyetik özelliklere sahip özel bir çelik türüdür. Temel özelliği, çelik yüzeyindeki tanelerin belirli bir yönde hizalanmış olmasıdır. Bu durum manyetik malzemenin yüksek performanslı olmasını sağlar. TYLÇ özellikle transformatörler ve elektrikli motorların çekirdeklerinin yapımında yaygın olarak kullanılır. Manyetik alanı etkili bir şekilde yönlendirmek ve manyetik kayıpları en aza indirmek için tasarlanmıştır. Bu malzemenin, yüksek manyetik geçirgenliği ve düşük manyetik kayıpları en temel özelliğidir. TYLÇ yüksek kaliteli silikon içeriğine sahiptir ve çelik üretim süreci sırasında taneler belirli bir yönde hizalanır. Bu işlem, manyetik özelliklerin optimize edilmesine yardımcı olur.

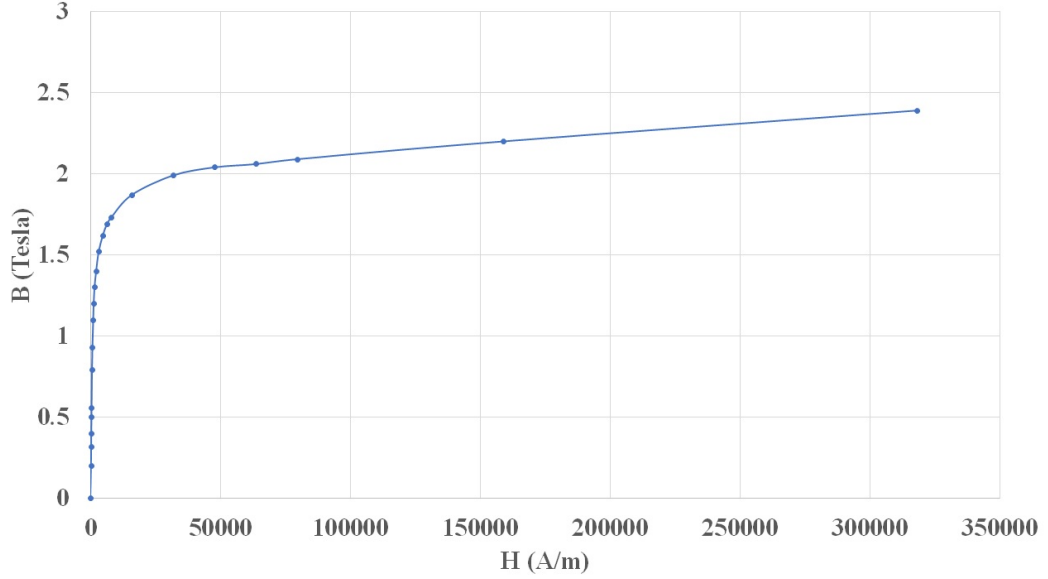


Şekil 4.3: Somaloy 700-3P YMK malzemesine ait çekirdek kayıpları grafiği.

TYLÇ malzeme kalınlığı 0.1mm olarak belirlenmiştir. Bu malzeme, 400 Hz frekansta ve 1.5 Tesla manyetik alan şiddetinde 15 W/kg maksimum özgül toplam kayba sahiptir. Manyetik davranışını açıklayan B-H karakteristiği Şekil 4.4'de görülebilir. Bu malzeme için manyetik doygunluk, yaklaşık 1.6-1.7 Tesla manyetik alan şiddetlerinde gerçekleşir. Ayrıca, TYLÇ maksimum relatif geçirgenliği, 0.7-0.8 Tesla manyetik alan aralığında 1000 olmaktadır. Daha yüksek relatif geçirgenlik değerleri genellikle verimli manyetik akı yollarının önemli olduğu uygulamalarda istenen özelliklerdir. Şekil 4.5'da TYLÇ malzemesine ait relatif manyetik geçirgenlik değerleri verilmektedir.

4.1.3 Kalıcı Mıknatıs Malzeme Özellikleri

EAKMSM tasarımında seçilmesi gereken bir diğer önemli malzeme ise rotor üzerine yerleştirilecek kalıcı mıknatıslardır. Bu konuda neodim mıknatısların kullanılması güç yoğunluğu bakımından oldukça önemlidir. Bu tip mıknatıslar, neodim-demir-bor adı verilen yüksek performanslı bir manyetik bileşik kullanılarak üretilmektedir. Neodim demir bor mıknatısları, özellikle yüksek manyetik performansları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda tercih edil-



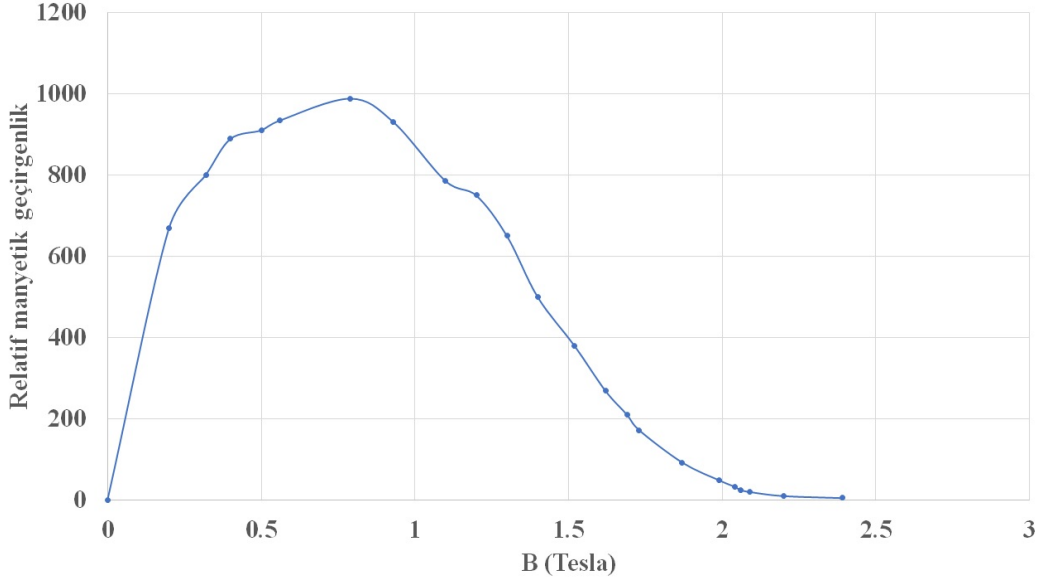
Şekil 4.4: TYLÇ malzemesine ait B-H grafiği.

mektedir. Seçilen kalıcı mıknatıs modeli ise N52 olarak kataloglarda yer almaktadır. Seçilen mıknatısın ortalama kalıcı manyetik akı yoğunluğu değeri 1.45 Tesla olmaktadır. Bu değer oldukça yüksektir ve motor güç yoğunluğunun artırılmasında kilit bir rol oynamaktadır. Kalıcı mıknatısın manyetik davranışını açıklayan B-H karakteristiği Şekil 4.6’de görülebilir.

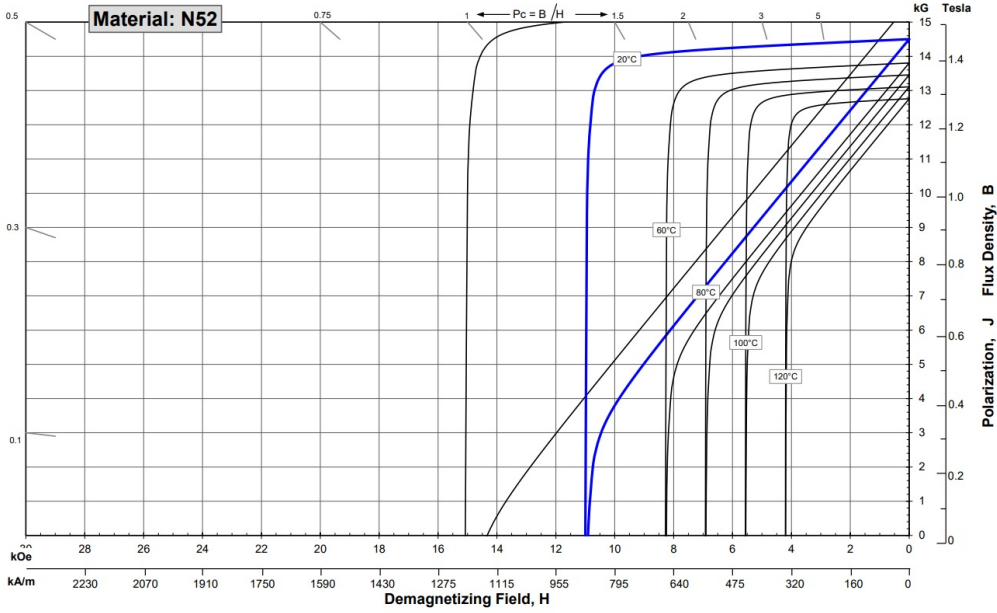
4.2 EAKMSM Anma Gücü Analitik Modeli

EAKMSM’nin boyutları, önceki çalışmalarda bahsedilen boyutlandırma denklemlerine dayalı olarak hesaplanmıştır (Huang et sl., (1999); Gieras et sl., (2008)). EAKMSM’nin dış çap ve iç çap gibi ana boyutları, belirli bir çalışma hızı ve çıkış gücü için istenen elektriksel ve manyetik yüklere dayalı olarak belirlenmiştir. EAKMSM’nin boyutlandırma ifadeleri denklem 4.1 ve denklem 4.2’de aşağıda verilmiştir.

$$k_d = D_{in}/D_{out} \quad (4.1)$$



Şekil 4.5: TYLÇ malzemesine ait relatif manyetik geçirgenlik grafiği.



Şekil 4.6: N52 kalıcı mıknatısına ait B-H grafiği.

$$D_{out} = \sqrt[3]{\frac{P_{out}}{\pi^2 * k_d * k_w * n_s * B_{mg} * A_m * \eta}} \quad (4.2)$$

Rotorda bulunan kalıcı mıknatıslar tarafından stator sargısında indüklenen ters EMK , aşağıdaki denklem 4.3'de gösterilmiştir.

$$E_f = \frac{\pi}{8} * \sqrt{2} * n_s * N * k_1 * B_{mg} * D_{out}^2 * (1 - k_d^2) \quad (4.3)$$

EAKMSM hava aralığındaki manyetik alan dağılımının analitik alan çözümü, önceki çalışmalarda ifade edilmiştir (Barriere et sl., (2012); Zhilicev, (1998)) . Makinenin oluk etkisi yukarıdaki alan çözümüne eklenmiştir ve hava aralığındaki nihai dağılım hesaplanmıştır (Zhu and Howe, (1993)). Denklemler 4.4 - 4.12'de aşağıda görülebilir. Oluklu armatürün hava aralığı EAKMSM sistemlerinde nispeten küçük olmaktadır. Hava aralığındaki ortalama manyetik akı yoğunluğu, her oluk varlığı ile artan manyetik direnç nedeniyle azalır. Oluk açıklıklarının neden olduğu ortalama manyetik akı yoğunluğundaki değişiklik, etkin hava aralığı uzunluğunu arttırmaktadır.

$$Slot_f(x) = \left(g_{air} + \left(\frac{PM_h}{\mu_r} \right) \right) / \left(g_{air} + \left(\frac{\pi}{2} \right) * x + \left(\frac{PM_h}{\mu_r} \right) \right) \quad (4.4)$$

$$B_{airgap}(x) = B_{PM}(x) * Slot_f(x) \quad (4.5)$$

$$B_z(x, t) = B_o * \sum b_v * \cos(w_v * t + \beta_v * x) \quad (4.6)$$

$$\tau = \frac{\pi * D}{2 * p} \quad (4.7)$$

$$\beta_v = v * \frac{\pi}{\tau} \quad (4.8)$$

$$w_v = b_v * v = b_v * \pi * Dn \quad (4.9)$$

$$b_v = \frac{4}{\tau} \left[\frac{c_p}{c_p^2 + \beta_v^2} * \sinh(\alpha) - 6 * \left(\frac{1}{\beta_v} \right)^4 * \frac{1}{b_t^3} * \cosh(\alpha) + 3 * \left(\frac{1}{\beta_v} \right)^2 * \frac{2}{\tau - b_v} \right] \quad (4.10)$$

$$b_t = \frac{\tau - b_p}{2} \quad (4.11)$$

$$c_p = 2 * \frac{\alpha}{b_p} \quad (4.12)$$

Yukarıdaki denklem kümesi, hava aralığındaki herhangi bir noktadaki manyetik akı yoğunluğunu belirlemek için kullanılabilir. EAKMSM'ne ait elektromanyetik alan analizi daha önceki çalışmalarda tartışılmıştır (Furlani, (1994)). EAKMSM'ye ait elektromanyetik tork ifadeleri aşağıdaki denklemlerde görülebilir.

$$\phi_f = \alpha * B_{mg} * \pi / 8p * (D_{out}^2 - D_{in}^2) \quad (4.13)$$

$$T_D = \frac{m_1}{\sqrt{2}} * p * N * k_w * \phi_f * I_a \quad (4.14)$$

Tork sabiti ve görünür elektromanyetik güç ifadeleri aşağıda görülebilir.

$$K_T = \frac{m}{\sqrt{2}} * p * N_1 * k_w * \phi_f \quad (4.15)$$

$$S_{elm} = \pi^2 * k_D * k_w * n_s * B_{mg} * A_m * D_{out}^3 \quad (4.16)$$

Carter katsayısı, stator ve rotor arasındaki etkin hava aralığı uzunluğunu hesaplamak için kullanılır. Carter katsayısı, stator ile rotoru arasındaki etkin hava aralığının uzunluğunu hesaplamak için kullanılan bir terimdir. Bu katsayı, motorun elektriksel ve manyetik performansını etkileyen önemli bir parametredir.

$$y = \frac{4}{\pi} * \left[\frac{t}{2g} * \tan\left(\frac{t}{2g}\right) - \log\left(\sqrt{1 + \left(\frac{t}{2g}\right)^2}\right) \right] \quad (4.17)$$

$$t_{ave} = \pi * ((D_{out} + D_{in})) / (2 * g) \quad (4.18)$$

$$KC = t_{ave} / (t_{ave} - y * g) \quad (4.19)$$

$$g_{eff} = KC * g \quad (4.20)$$

4.3 EAKMSM Kayıpları Analitik Modeli

Çekirdek Kaybı: EAKMSM manyetik çekirdeği, çoğunlukla manyetik bir malzeme içerir ve manyetik alanların üretildiği bölümdür. Manyetik çekirdek, değişen manyetik alanlar tarafından etkilendiğinde enerji kaybı yaşamaktadır. Bu kayıp, iki ana bileşenden oluşur:

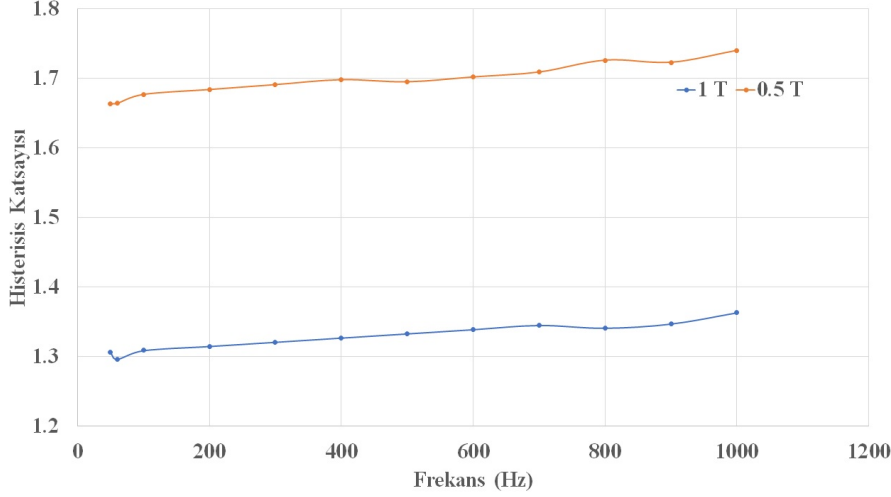
Histerezis Kayıp: Manyetik çekirdek içindeki manyetik alanın yönü değiştirildiğinde, moleküler düzeninin yeniden yapılandırılması nedeniyle enerji kaybeder. Bu kayıp, manyetik çekirdeğin histerezis döngülerinden kaynaklanmaktadır. EAKMSM için histerezis kaybı aşağıdaki denklem 4.21’de verilmiştir. Histerezis katsayısı malzeme seçimine bağlı olarak 1 ile 5 m⁴/(H·kg) arasında değişir.

$$P_{hFe} = \epsilon * \frac{f}{100} * m_{Fe} * (B_{mx}^2 + B_{mz}^2) \quad (4.21)$$

Histerezis katsayısı seçilen YMK’nın katalog verilerine göre hesaplanabilir. Şekil 4.7’de, histerezis katsayısı, denklem 4.21 kullanılarak kayıp değerleri üzerinden belirlenir. Elde edilen değer, doğrudan manyetik akı yoğunluğuna ve elektriksel frekansa bağlıdır. Katsayının 1 Tesla için eğimi, denklem 4.22 ile ve 0.5 Tesla için ise denklem 4.23 hesaplanmıştır.

$$\epsilon_{1T} = 0.00006 * f + 1.3431 \quad (4.22)$$

$$\epsilon_{0.5T} = 0.00007 * f + 1.71 \quad (4.23)$$



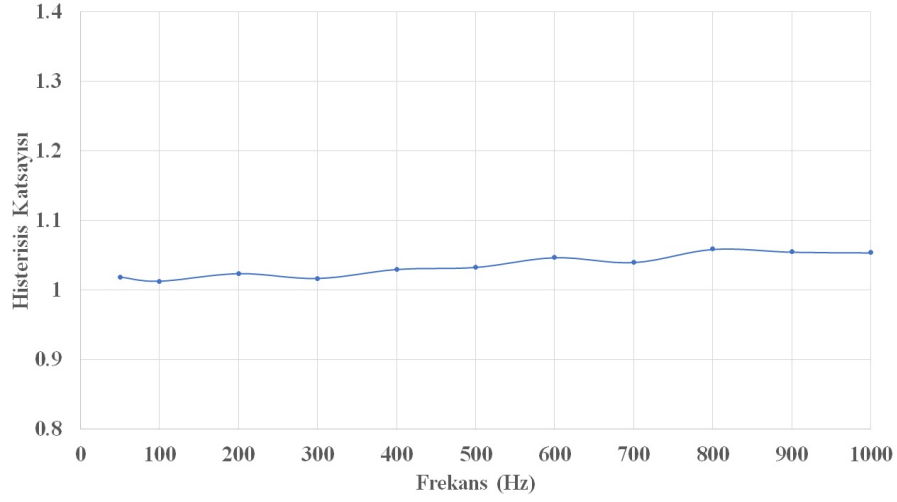
Şekil 4.7: Somaloy 700-3P YMK malzemenin histeresis katsayı grafiği.

Seçilen TYLÇ malzemesinin kayıplarına dair üretim verileri üretici katalog verilerinden alınmıştır. Ortalama histerezis katsayısı, üretim verilerinden doğrudan 1 Tesla manyetik akı yoğunluğunda 1.035 olarak hesaplanır. Katsayının 1 Tesla için frekansa bağlı değeri denklem 4.24 ile verilmiştir.

$$\epsilon_{1T} = 0.00005 * f + 1.0114 \quad (4.24)$$

Girdap Akım Kaybı: Manyetik çekirdekteki metal levhaların içinde, manyetik alan değişikliklerine karşı akımlar üretilir. Bu akımlar, elektriksel direnç nedeniyle enerji kaybına yol açar. EAKMSM için girdap akım kaybı aşağıdaki denklem 4.25’de verilmiştir.

$$P_{eFe} = \frac{\pi^2}{6} * \frac{\sigma_{Fe}}{\rho_{Fe}} * f^2 * d_{Fe}^2 * m_{Fe} * (B_{mx}^2 + B_{mz}^2) \quad (4.25)$$



Şekil 4.8: TYLÇ malzemenin histeresis katsayı grafiği.

Sargı Kaybı: Motorun sarımları, enerjiyi dönüştüren ve taşıyan kısımlardır. Sargılarda da enerji kaybı meydana gelir. Sargılardaki teller, elektrik akımı geçtikçe bir dirençle karşılaşır ve bu direnç nedeniyle enerji kaybı yaşanır. Bu kayıp, bakırın elektriksel direncine bağlıdır. EAKMSM için sargı kaybı aşağıdaki denklemler 4.26 ve 4.27’de verilmiştir.

$$R_a = \frac{N * l_{av}}{a_p * a_w * \sigma * s_a} \quad (4.26)$$

$$P_{1w} = m_1 * I_a^2 * R_a \quad (4.27)$$

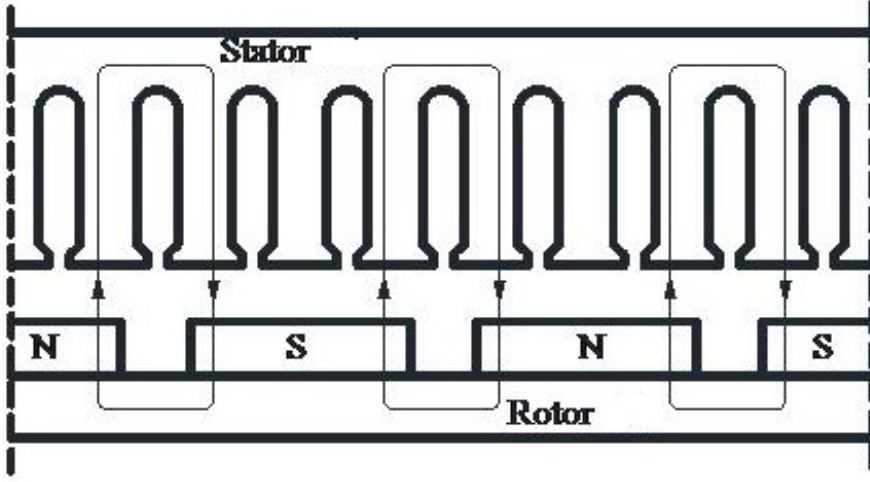
4.4 EAKMSM kaçak endüktans analitik modeli

Bu bölümde EAKMSM için kaçak endüktans modellemelerine ait denklemler verilmiştir. Denklemler 4.28 ve 4.29’de belirtilen endüktans bileşenlerinin hesaplaması gösterilmiştir.

$$L_s = L_m + L_\sigma \quad (4.28)$$

$$L_\sigma = L_u + L_t + L_{end} + L_h \quad (4.29)$$

Tek statorlu tipteki bir EAKMSM ait manyetik akı yolu şekil 4.9’de gösterilmiştir



Şekil 4.9: EAKMSM manyetik akı yolu.

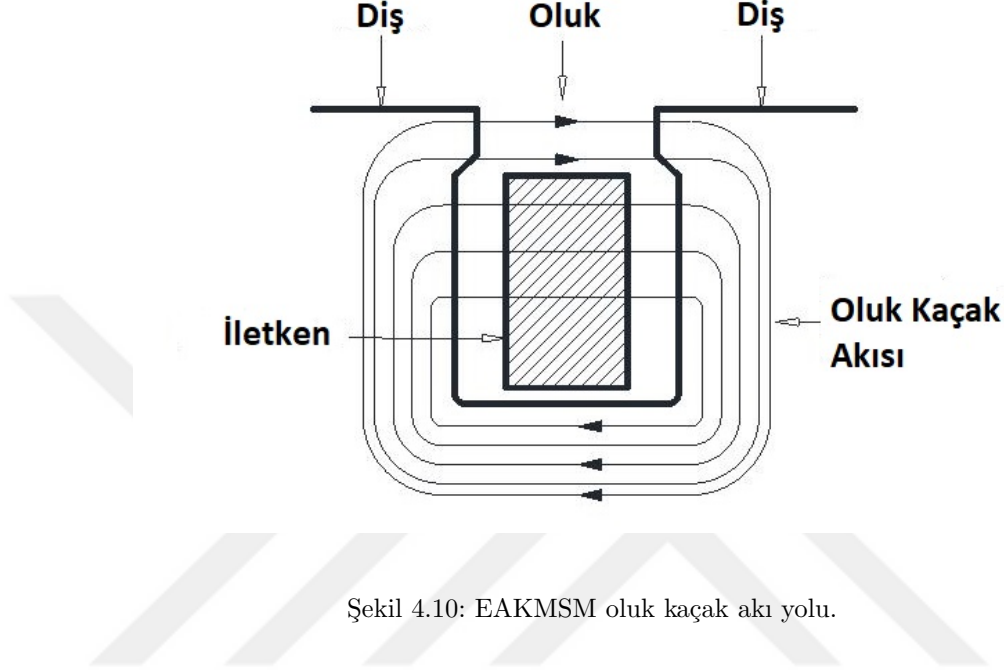
Oluk kaçak endüktansı genellikle oluk şekline göre tanımlanır. Oluk iletkenleri tarafından oluşturulan akının bir kısmı rotor tarafına geçemez. Şekil 4.10’de gösterilen dikdörtgen oluk konfigürasyonu için, denklemler 4.30 - 4.33 ile verilen oluk kaçak endüktansı hesaplaması yapılır (Pyrhönen et al., (2008)). Denklem 4.31 üzerinde durmak gerekirse, nüve içindeki manyetik doygunluk oranı arttıkça, manyetik geçirgenlik katsayısı azalmaktadır. Bu durumda yüksek manyetik doygunluk için nüve içinden manyetik akı endüktans seviyesini arttırmaktadır. Ortaya atılan kaçak endüktans manyetik doygunluk katsayısı ile nüve üzerinden geçen akı miktarında analitik olarak ifade edilmektedir. Bu değer akının nüve içindeki toplam yol uzunluğu ve boşluktaki toplam uzunluğuna bağlıdır. Ayrıca manyetik geçirgenlik katsayısı da bu değeri doğrudan etkilemektedir.

$$l_{eff} = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} \quad (4.30)$$

$$k_{slot} = \frac{\mu_S * b_s}{\mu_S * b_s + L_{slot}} \quad (4.31)$$

$$L_{slot} = k_{slot} * k_1 * \mu_0 * \frac{Q_s}{m} * l_{eff} * N_s * \frac{h_s}{3 * b_s} \quad (4.32)$$

$$k_1 = 1 - \frac{3}{16} * \frac{y_q - w}{q} \quad (4.33)$$



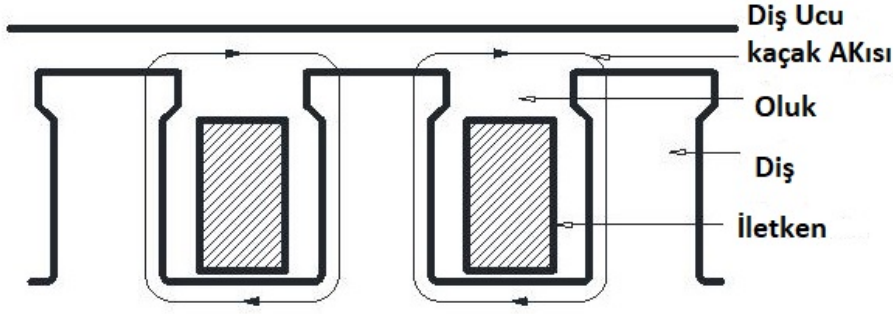
Şekil 4.10: EAKMSM oluk kaçak akı yolu.

Oluk kaçak endüktansı gibi, diş ucu kaçak endüktansı da büyük ölçüde diş tipi yapısı tarafından belirlenir. Diş ucu kaçak manyetik akı yolları şekil 4.11’de gösterilmiştir. Dikdörtgen oluk konfigürasyonu için denklemler 4.34 - 4.36 aşağıda verilmiştir (Wang et sl., (2014); Madariaga et sl., (2019)). Denklem 4.35 özellikle yüksek manyetik doygunluğa sahip diş ucu kaçak endüktansını ifade etmekte oldukça önemlidir. Diğer kaçak endüktans değerlerinde olduğu gibi dolaşan manyetik akının geçtiği yolların uzunluğu ve manyetik geçirgenliğine göre bir katsayının ortaya konması oldukça önemlidir.

$$k_2 = 1 - \frac{1}{4} * \frac{y_q - w}{q} \quad (4.34)$$

$$k_{tooth} = \frac{\mu_S * b_s}{\mu_S * b_s + L_{tooth}} \quad (4.35)$$

$$L_t = k_{tooth} * k_2 * 2 * \mu_0 * \frac{N_s^2}{p * q} * l_{eff} * \frac{5 * g/b_s}{5 + 4 * g/b_s} \quad (4.36)$$



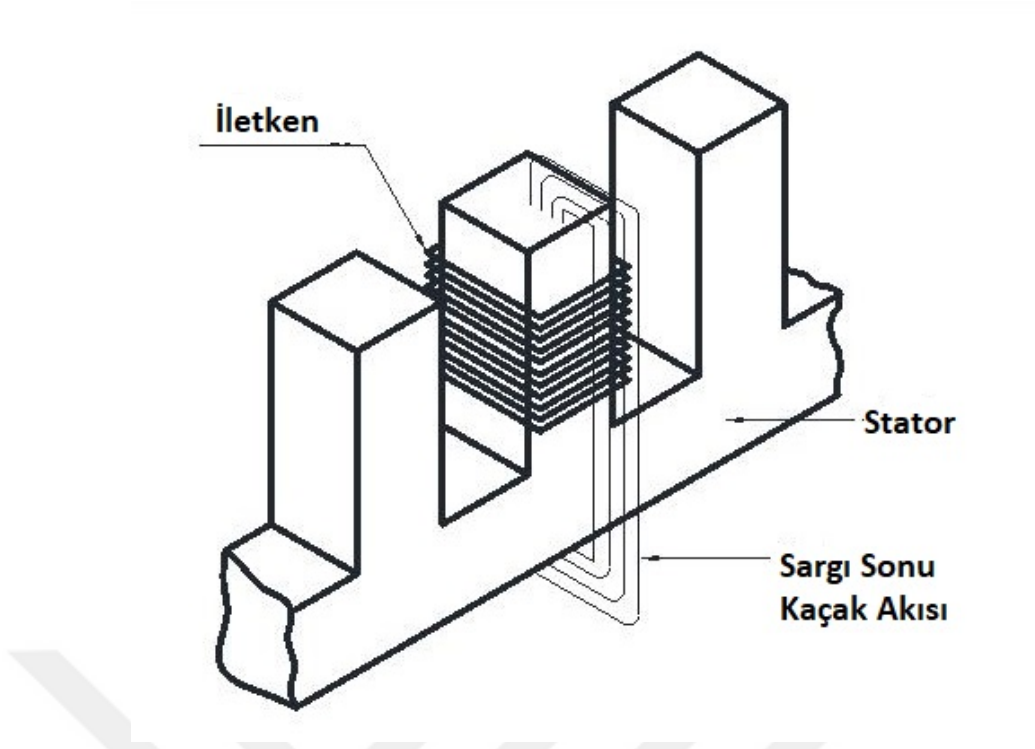
Şekil 4.11: EAKMSM diş ucu kaçak akı yolu.

Sargı sonu kaçak endüktansının bazı akı yolları hem demir hem de hava içerir. Genellikle hava yolu, demir yol uzunluğundan daha uzundur, bu da hesaplama sırasında bazı karmaşıklıklara neden olur. Sargı sonu şekline bağlı olarak literatürde bulunan bazı deneysel hesaplamalar bulunmaktadır (Gieras et al., (2008)). Ortalama oluk adımı hesaplamada EAKMSM için kullanılabilir. Denklemler 4.37 - 4.39 aşağıda verilmiştir. Sargı sonu kaçak manyetik akı yolları şekil 4.12’de gösterilmiştir. Denklem 4.38 yer alan ifade nüve üzerindeki kaçak akılardan dolayı oluşan endüktans ifadesini denklemlere dahil etmektedir. Bu katsayının hesabı için boşluktaki ve nüve üzerindeki akı yollarının uzunluğu bulunmalıdır. Ayrıca nüvenin manyetik geçirgenlik katsayısı önceki tüm katsayıların hesabında olduğu gibi kullanılmıştır.

$$t_{ave} = \frac{\left(\frac{D_{out} - D_{in}}{2} * \pi \right)}{Q_s} \quad (4.37)$$

$$k_{end} = \frac{\mu_S * h_s}{\mu_S * h_s + L_{end}} \quad (4.38)$$

$$L_{end} = \frac{k_{end} * \mu_0}{2 * p * q} * N_s^2 * \left[t_{ave} * \ln \left\{ \frac{\pi * t_{ave}^2}{4 * A} \right\} \right] \quad (4.39)$$



Şekil 4.12: EAKMSM sargı sonu kaçak akı yolu.

Hava aralığındaki harmonik kaçak endüktansı, hava aralığı bölgesinde oluşan manyetik alan harmoniklerinden dolayı oluşmaktadır. Manyetik alan harmonikleri yarattıkları kaçak akılar nedeniyle toplam endüktans değerini artırır. Kaçak endüktansının değeri, hesaplanmış harmonik sargı faktörüne bağlı bir katsayı ile manyetizasyon endüktansının çarpılmasıyla elde edilir (Tommaso et al., (2013)). Bu katsayı, kesirli oluklu makinelerde oluşmaktadır. Belirli bir harmonik için dağılım faktörü, aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir. Şekil 4.13’de verilen tabloda her oluk/kutup kombinasyonu için harmonik katsayıları verilmiştir. Denklemler 4.40 - 4.46 aşağıda verilmiştir.

$$S = \frac{Q_s}{t} \quad (4.40)$$

$$k_{dv} = \frac{\sin(v * S * \frac{\pi p}{Q_s})}{S * \sin(v * \frac{\pi p}{Q_s})} = \frac{\sin(v * \frac{\pi}{2m})}{q * \sin(v * \frac{\pi}{2mq})} \quad (4.41)$$

$$k_{pv1} = -\sin\left(v * \frac{\pi}{2}\right) * \sin\left(v * \frac{\pi}{2} * \frac{2pw}{Q_s}\right) \quad (4.42)$$

2p \ Qs		4	6	8	10	12	14	16	18	20
6	q k_{w_syn} σ_{δ}	1/2 0.866 0.462		1/4 0.866 4.85	1/5 0.5 40.1		1/7 0.5 79.6	1/8 0.866 22.4		1/10 0.866 35.5
9	q k_{w_syn} σ_{δ}		1/2 0.866 0.462	3/8 0.945 2.15	3/10 0.945 3.92	1/4 0.866 4.85	3/14 0.617 21.7	3/16 0.328 104		3/20 0.328 162
12	q k_{w_syn} σ_{δ}			1/2 0.866 0.462	2/5 0.933 1.95		2/7 0.933 4.79	1/4 0.866 4.85		1/5 0.5 40.1
15	q k_{w_syn} σ_{δ}				1/2 0.866 0.462		5/14 0.951 2.51	5/16 0.951 3.59		1/4 0.866 4.85
18	q k_{w_syn} σ_{δ}					1/2 0.866 0.462	3/7 0.902 1.75	3/8 0.945 2.15		3/10 0.945 3.92
21	q k_{w_syn} σ_{δ}						1/2 0.866 0.462	7/16 0.890 1.69		7/20 0.953 2.67
24	q k_{w_syn} σ_{δ}							1/2 0.866 0.462		2/5 0.933 1.95
27	q k_{w_syn} σ_{δ}								1/2 0.866 0.462	9/20 0.877 1.63

integral product of number of phases, not applicable
 magnetic pull is unbalanced

Şekil 4.13: EAKMSM hava aralığı harmonik kaçak endüktans katsayıları (Ponomarev et sl., (2013)).

$$k_{pv2} = -\cos\left(v * \frac{\pi}{2}\right) * \sin\left(v * \frac{\pi}{2} * \frac{2pw}{Q_s}\right) \quad (4.43)$$

$$k_{wv} = k_{pv} * k_{dv} \quad (4.44)$$

$$\sigma = \sum_{v=1}^{p-1} \left(\frac{k_{wv}}{v * k_{wp}}\right)^2 + \sum_{v=p+1}^{v_x} \left(\frac{k_{wv}}{v * k_{wp}}\right)^2 \quad (4.45)$$

$$L_h = \sigma * L_m \quad (4.46)$$

Mıknatıslama endüktansı, makinenin tork üretimi açısından hayati bir rol oynar. Mıknatıslama endüktansı hesaplanması aşağıdaki denklemlerde ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Denklemler 4.47 - 4.51 aşağıda verilmiştir.

$$y_q = \frac{4}{\pi} * \left[\frac{t}{2g} * a * t * a * n \left(\frac{t}{2g} \right) - \log \left(\sqrt{1 + \left(\frac{t}{2g} \right)^2} \right) \right] \quad (4.47)$$

$$K_c = \frac{t_{ave}}{t_{ave} - y_q * g} \quad (4.48)$$

$$g_{eff} = g * K_c \quad (4.49)$$

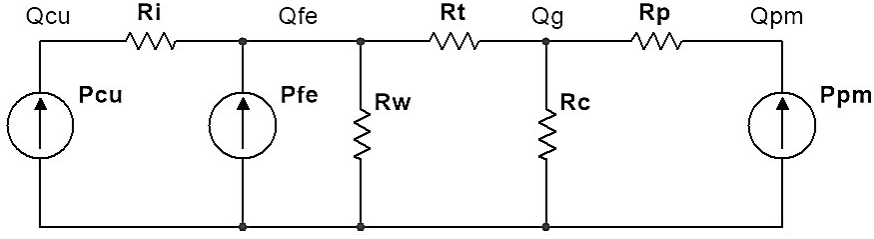
$$k_m = \frac{\mu_S * g}{\mu_S * g + L_m} \quad (4.50)$$

$$L_m = k_m \frac{4 * e * m * b * m}{p * g_{eff}} * \frac{\mu_0}{\pi} * y_q * l_{eff} * (k_w * N_s)^2 \quad (4.51)$$

4.5 EAKMSM Termal Analitik Modeli

Bu bölümde, EAKMSM'ue ait termal modelleme gösterilecektir. EAKMSM 3D modeli oldukça karmaşıktır ve bu nedenle eksende bulunan manyetik nüveli rotoru sınırlayan bir dizi temel varsayımı içeren teorik bir termal modelin geliştirilmesine yol açmıştır. Demir çekirdek birim hacmi başına üretilen ısı, çekirdek içinde homojen bir şekilde dağıldığı kabul edilmiştir. Benzer şekilde, bakır bobinlerde üretilen ısı, sargılar içinde homojen bir şekilde dağılır. Sargı izolasyonundaki dielektrik kaybının, iletkenlerdeki bakır kayıplarıyla karşılaştırıldığında ihmal edilebilir olduğu düşünülebilir. Bu nedenle, sargı izolasyonu göz ardı edilir ve sargılar katı nesneler olarak modelde ele alınmıştır. Simülasyon zorlukları nedeniyle, sargı sonundaki epoksi analizde dikkate alınmaz. Radyasyon yoluyla iletilen ısı, genellikle diğer ısı transfer mekanizmalarına kıyasla çok küçük bir değerde olduğu varsayılır. Deneyler sırasında ölçülen ortam sıcaklık değerleri her zaman dikkate alınır ve motor bileşenlerinin

başlangıç sıcaklıkları ortam sıcaklığına eşit kabul edilir. EAKMSM'nin eşdeğer termal ağ modeli şekil 4.14'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14: EAKMSM eşdeğer termal ağ modeli.

Tablo 4.1'de görüldüğü gibi, EAKMSM'ye ait malzemelerin 20 derece selsiyus için termal özellikleri gösterilmiştir.

Materyal	p(kg/m ³)	k(w/m C)
Hava	1.177	0.0267
Epoksi reçine	1400	0.5
Bakır	8950	360
Alüminyum	2700	237
YMK	7500	0.7
NdFeB	7600	9

Tablo 4.1: Malzemelerin termal özellikleri.

Eşdeğer termal ağ dirençleri, aşağıda gösterilen denklemler 4.52 - 4.63 kullanılarak hesaplanabilir.

$$L_t = \frac{(1 - k_d) * D_{out}}{2} \quad (4.52)$$

$$b_e = \frac{\pi * (1 + k_d) * (D_{out} / 2)}{N_s} \quad (4.53)$$

$$b_m = \frac{\pi * (1 + k_d) * (D_{out} / 2)}{p} \quad (4.54)$$

$$R_t = \frac{1}{2 * \alpha_i * N_s * L_t * b_e} \quad (4.55)$$

$$R_p = \frac{1}{2 * \alpha_i * p * L_t * b_m} \quad (4.56)$$

$$R_i = \frac{s_i / \lambda_i}{2 * (b_e + 2h_c - b_t) * L_t * N_s} \quad (4.57)$$

$$R_c = \frac{1}{\alpha_{ce} * L_{ax} * \pi * D_{out}} \quad (4.58)$$

$$R_w = \frac{1}{2 * \alpha_w * \left(\frac{\pi}{4}\right) * D_{out}^2 * (1 - k_d^2)} \quad (4.59)$$

$$Q_{fe} = \frac{k * R_c * R_w * P_{pm}}{R_c + R_t + R_w} + \frac{k * R_w * (R_c + R_t) * P_s}{R_c + R_t + R_w} \quad (4.60)$$

$$Q_g = \frac{k * R_c * (R_w + R_t) * P_{pm}}{R_c + R_t + R_w} + \frac{k * R_c * R_w * P_s}{R_c + R_t + R_w} \quad (4.61)$$

$$Q_{cu} = Q_{fe} + R_i * P_{cu} \quad (4.62)$$

$$Q_{pm} = Q_g + R_p * P_{pm} \quad (4.63)$$

4.6 EAKMSM Temel Boyutlarının Analitik ve Tecrübi Yöntemlerle Parametrik Olarak Belirlenmesi

Bu bölümde bir önceki bölümlerde verilen denklemler ışığında EAKMSM'ye ait tüm tasarım sonuçları verilecektir. Temel kıstasımız bir önceki mevcut MDD sisteminde anlatılan pompa ebatları ve istenen tork değeri olacaktır. Tablo 4.2'de MDD sistemi isterlerine ait parametreler görülmektedir.

MDD sistemi içine yerleştirilecek maksimum gücü sağlayabilen EAKMSM parametrelerini bulmak gerekmektedir. MDD sistemine ait geometrik boyutlar bilinmektedir. Temel olarak bulunması gereken özellikler, hava aralığı uzunluğu, stator uzunluğu, stator dış genişliği ve mıknatıs yüksekliği olarak seçilir. EAKMSM dış çapı fiziksel sınırlamalar nedeniyle 20 mm olarak belirlenirken iç çapı 10 mm'dir. EAKMSM'nin oluk/kutup kombinasyonu, tork dalgalanmalarını en aza indirmesi nedeniyle 9/8 olarak seçilmiştir (Hendershot, (2010)). Tablo 4.3'de MDD sistemi isteklerine göre belirlenen geometrik boyutlar parametreleri görülmektedir.

Verilen MDD sistemi boyutlarına göre hava aralığı uzunluğu minimum 0.85 mm ve maksimum 1.25 mm arasında olmalıdır. YMK ve TYLÇ malzemesinin doygunluk değeri hesaplamalara dahil edilmiştir. Toplam dış alanı 42.26 mm^2 'dir ve her oluk için açıklık alanı 8 mm^2 'dir. YMK malzemesinin maksimum manyetik akı yoğunluğu 1.0 Tesla - 1.2 Tesla değerleri arasında belirlenmelidir. Aksi takdirde manyetik doygunluk meydana gelmektedir. Bu durum makine verimini ciddi oranda etkilemektedir.

Parametre	Değer
Çıkış Gücü	10 W
Anma Torku	10 mNm
Çalışma Hız Aralığı	1000-10000 rpm
Faz Akımı	1 A rms
Akım Yoğunluğu	20 A/mm ²

Tablo 4.2: EAKMSM tasarım istekleri tablosu.

4.6.1 Hava Aralığı Uzunluğunun Belirlenmesi

Hava aralığı mesafesinin belirlenmesinde bazı analitik hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Bu mesafenin değeri ve mıknatıs yüksekliğinin birbirleri ile olan ilişkisinin bulunması gerekmektedir. Eğer doğru bir şekilde belirlenmez ise özellikle YMK malzemede manyetik doyum yaşanabilir. Mıknatıs

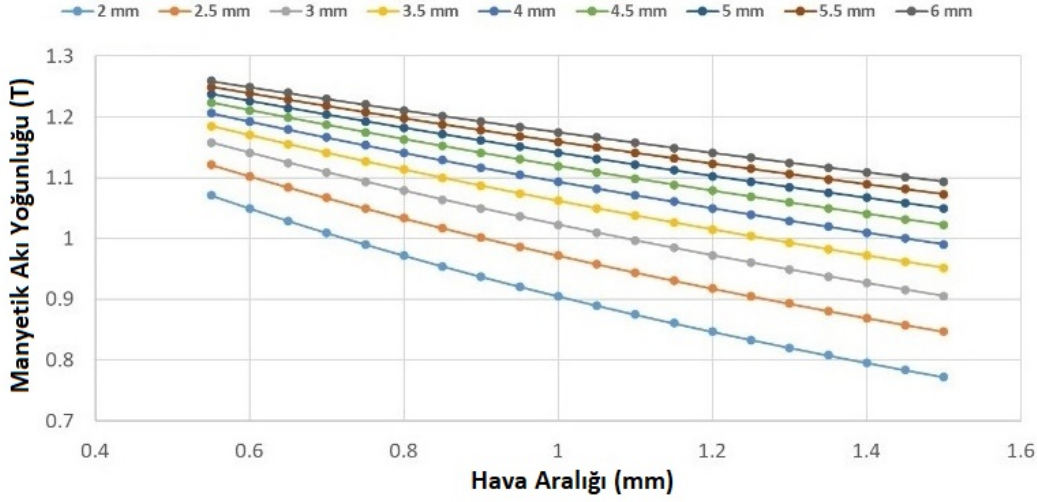
Parametre	Değer
Faz Sayısı	3
Stator Dış Çap	20 mm
Stator İç Çap	10 mm
Oluk Sayısı	9
Kutup Sayısı	8
Hava Aralığı	1 mm
Mıknatıs Yüksekliği	4 mm
Stator Diş kalınlığı	7.5 mm
Mıknatıs Kutup Oranı	0.8
Mıknatıs Akı Yoğunluğu	1.45 Tesla

Tablo 4.3: EAKMSM geometrik boyutlar tablosu.

yüksekliği 2 mm ile 6 mm arasında ve hava aralığı uzunluğu 0.5 mm ile 1.5 mm arasındaki tüm değerler için stator dişlerindeki ortalama manyetik akı yoğunluğu hesaplanmıştır. Burada ayrıca seçilen geometrik özelliklere göre daha önce bahsedilen denklemler 4.17 - 4.20 ile birlikte bir katsayı hesaplanır. Bu değer 1.0944 olarak bulunmaktadır. Seçilen hava aralığı mesafesi bu değer ile çarpılarak şekil 4.15 grafiği elde edilir. Seçilen YMK malzemesi için ortalama maksimum manyetik akı yoğunluğunun 1.1-1.2 Tesla olarak seçilmesi uygun görünmektedir. Mıknatıs yüksekliği 4 mm ve hava aralığı uzunluğu 1 mm olduğunda en iyi seçim elde edilir. Ayrıca, üretimi kolaylaştırmak için 1 mm hava aralığı uzunluğunun avantajlı olduğu düşünülmektedir. Tablo 4.4'de EAKMSM sargı özelliklerine ait parametreler görülmektedir.

4.6.2 EAKMSM Sargı Özelliklerinin Belirlenmesi

Stator genişliği 2 mm olup çift katlı sarım kullanıldığından toplam genişlik her diş için 1 mm olmaktadır. Oluk genişliği nedeniyle sargı çapını 0.25 mm olarak seçebiliriz. Üzerindeki izolasyon hesaba katıldığında toplam çap yaklaşık 0.3 mm olur. Toplam oluk başına sargı sayısı 46'dır ve bu, 5000

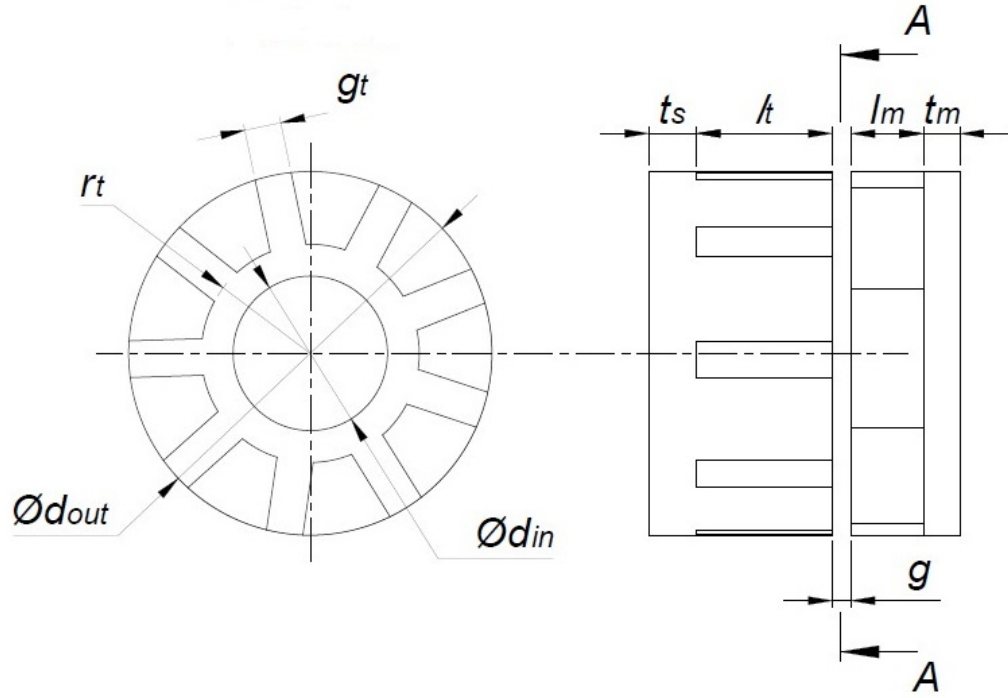


Şekil 4.15: Stator dişlerindeki manyetik akı yoğunluğu, farklı mıknatıs ve hava aralığı mesafesi.

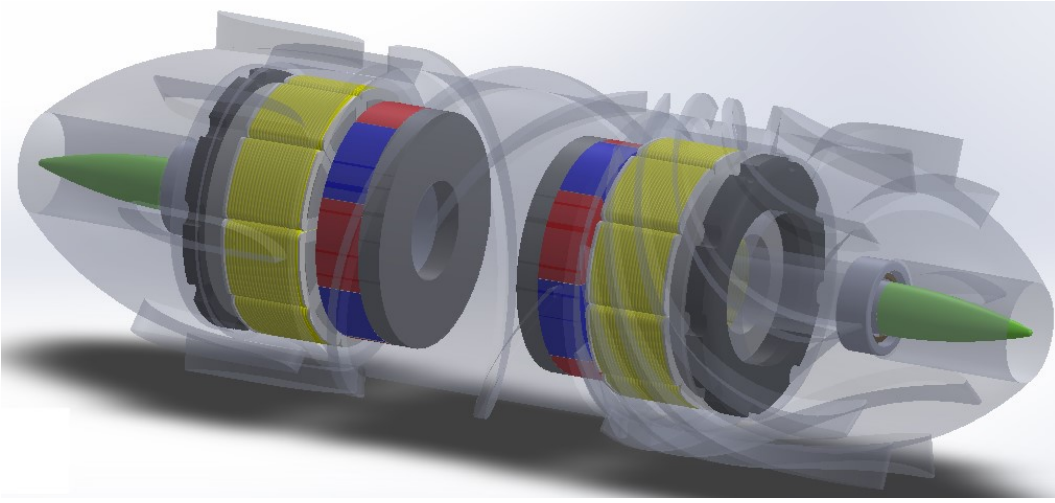
devir/dakika hızında 6.13 V bir gerilim üretir. Bu değer, 12 V sürücü gerilimi için uygun bir değerdir. Doluluk faktörünün hesaplanması durumunda ise oluktaki toplam alan 15 mm^2 ve oluk içine giren iletken alanı 6.5 mm^2 olur. Bu durumda doluluk faktörü %43.33 olarak bulunur. Oluk derinliği 7.5 mm olarak seçilir. Bu ölçü MDD sistemi içine yerleştirilebilecek en büyük stator uzunluğunun 9.5 mm olmasında dolayı seçilmiştir. Bu durumda, YMK malzemesinin manyetik doygunluğunu önlemek için 2 mm stator arka nüve uzunluğu olacaktır. Ayrıca, YMK malzeme TYLÇ'e göre daha düşük sertlik değerine sahip olduğu için arka nüve uzunluğu değerinin sağlamlık açısından daha büyük yapılması gerekmektedir. Şekil 4.16'de EAKMSM boyutlarına ait çizimler görülmektedir. Şekil 4.17'de EAKMSM ve MDD sistemleri entegre edilmiş tasarım çizimleri görülmektedir.

Parametre	Değer
Oluk Başına Sarım Sayısı	46
İletken Çapı	0.25 mm
Oluk İçi Alanı	15 mm ²
Oluk İçi İletken Alanı	6.5 mm ²
Doluluk Faktörü	%43.33

Tablo 4.4: EAKMSM sargı özellikleri tablosu.



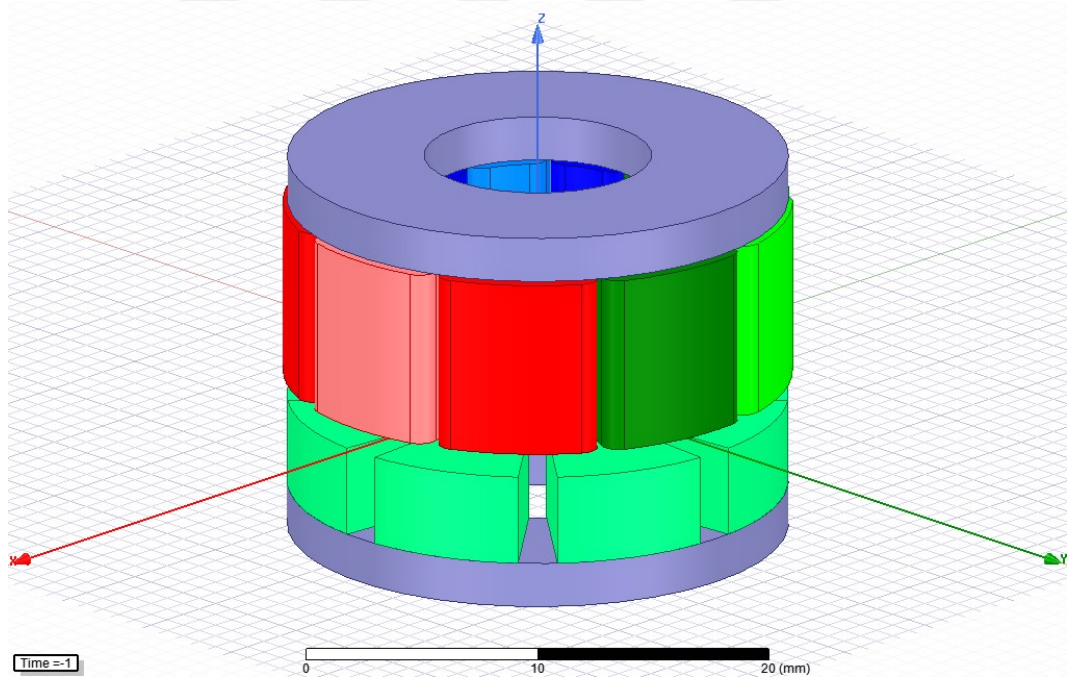
Şekil 4.16: EAKMSM boyutları.



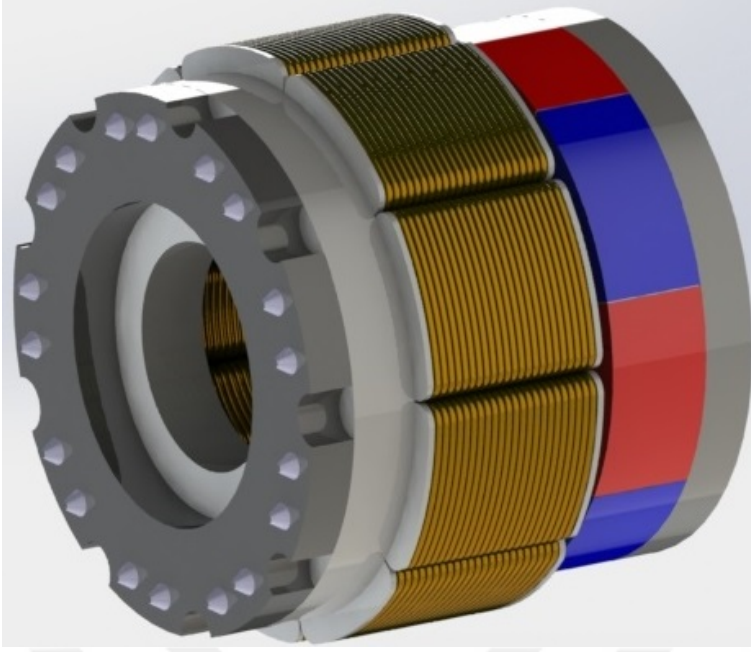
Şekil 4.17: EAKMSM ve MDD entegrasyonu.

5 SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ VE DİNAMİK MODEL BENZETİMİ İLE ANALİTİK MODELİN DOĞRULANMASI

Analitik denklemlerden elde ettiğimiz endüklenen gerilim değeri, manyetik akı yoğunluğu ve EAKMSM çalışma momenti gibi parametreler sonlu elemanlar analizi ile bilgisayar ortamında simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.1’de ANSYS maxwell programında yapılan simülasyon modeli görülmektedir. Simülasyon eleman sayısı stator ve rotor için toplam maksimum 10.000’dir ve elemanların maksimum uzunluğu 1 mm olarak belirlenmiştir. Mıknatıslardaki eleman sayısı 3000’dir. Hava aralığı 1.2 mm uzunluğunda olduğu için buradaki elemanların maksimum uzunluğu 0.3 mm olarak seçilmiştir. Başlangıç ortamı vakum olarak belirlenmiştir. EAKMSM’nin simülasyon modelinde analiz sınırı, 40 mm kenar uzunluğuna sahip bir küp olarak seçilmiştir.



Şekil 5.1: EAKMSM sonlu elemanlar modeli.

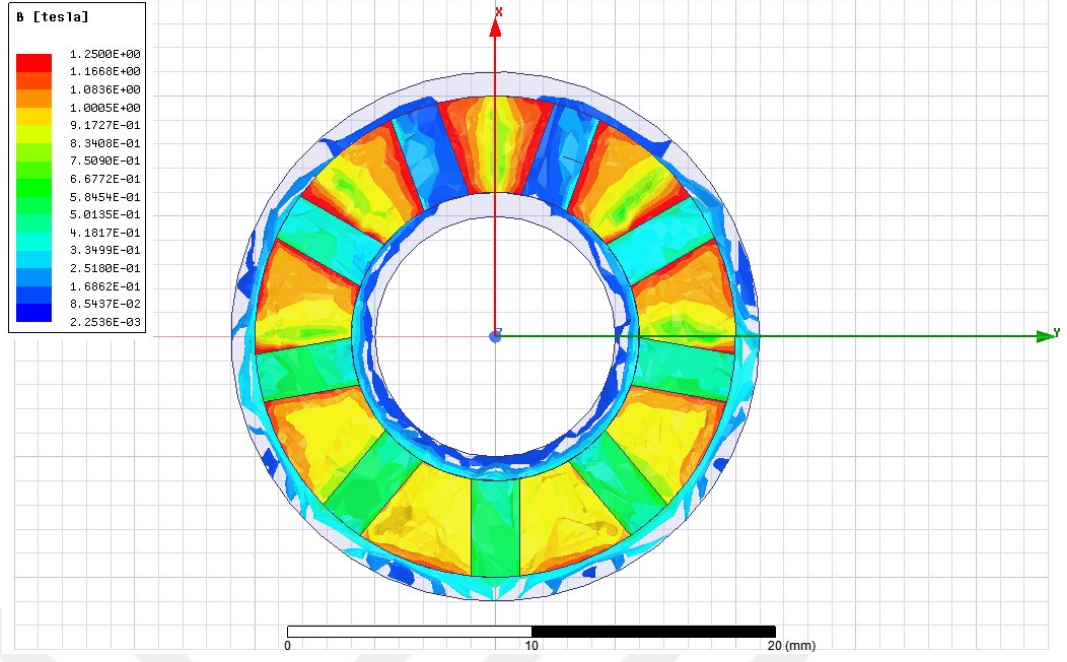


Şekil 5.2: EAKMSM katı modeli.

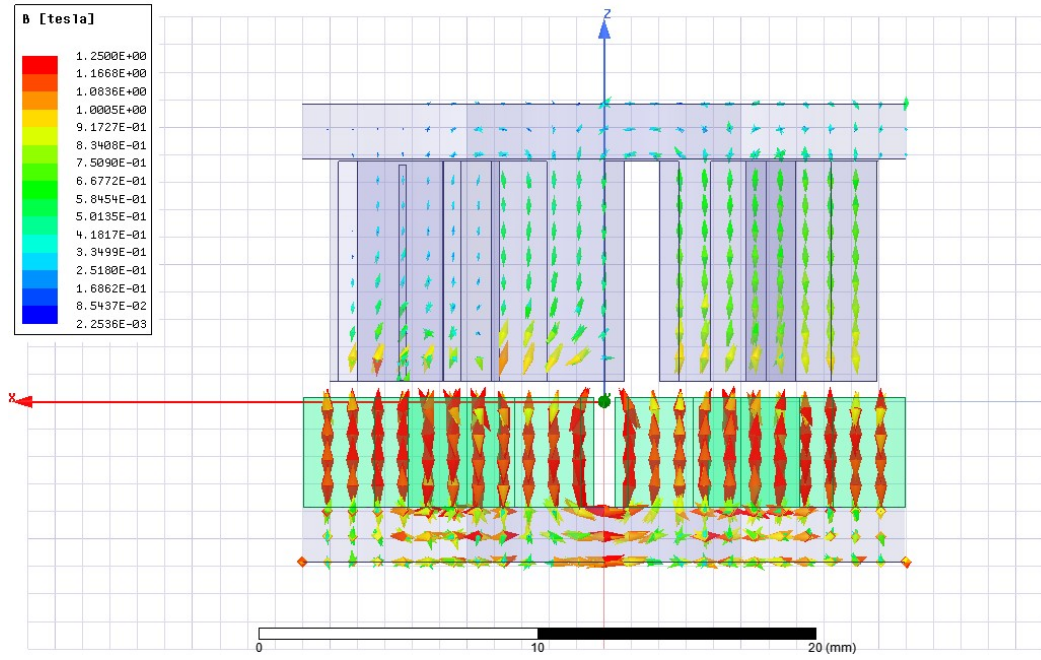
Şekil 5.3’de ve şekil 5.4’de , YMK malzemesi ile EAKMSM’nin stator çekirdek manyetik akı yoğunluğu ve akı yolları gösterilmektedir. Gözlemlenebileceği gibi, özellikle oluk ve dış uçlarında yüksek bir doyum seviyesi vardır. Bu durum, malzemenin dış uçlarında relatif geçirgenlik değerini azaltır ve oluk etrafında meydana gelen kaçak akıları sınırlar. Bu nedenle, düşük doyum manyetik akı yoğunluğuna sahip YMK malzemesinde oluk etrafında meydana gelen kaçak akı seviyesi, TYLÇ malzemedeki olduğundan daha düşüktür.

Şekil 5.5’de ve şekil 5.6’de verilen simulasyon sonuçlarına bakıldığında, TYLÇ nüveli stator üzerindeki manyetik alan yoğunluğu görülmektedir. TYLÇ malzemenin doyum değerleri yaklaşık olarak 1.8 Tesla civarında olduğundan, EAKMSM stator dişlerindeki manyetik doyum miktarı sınırlıdır. Bu nedenle, stator dişlerinin relatif geçirgenlik değeri oldukça yüksektir. Ayrıca oluk ve dış ucu etrafında yüksek miktarda kaçak akı bulunmaktadır.

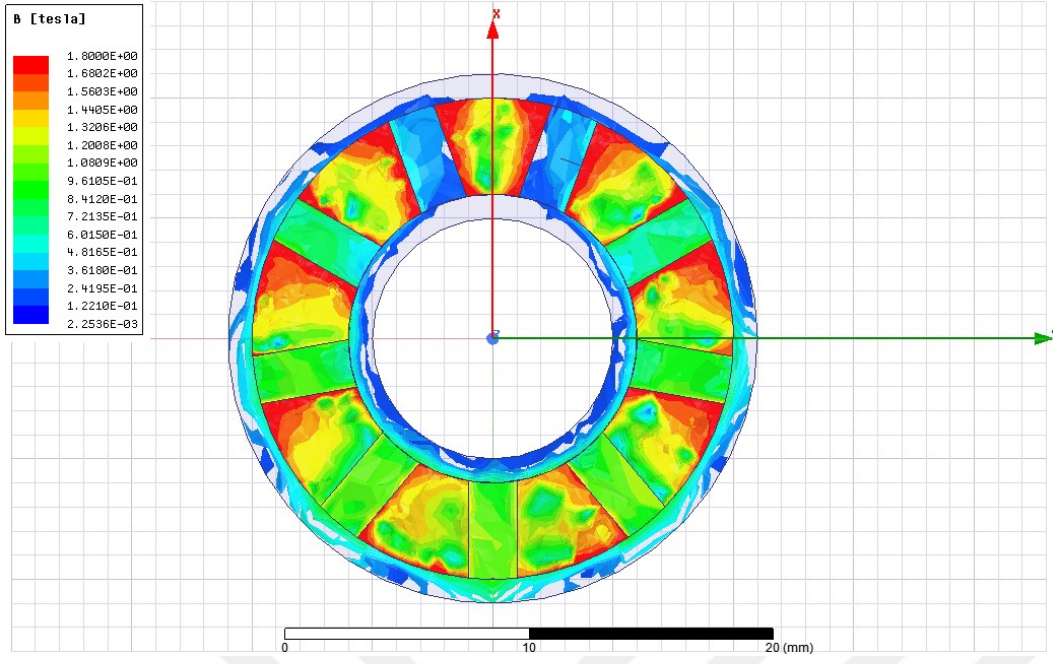
Hız aralığı 1000 dev/dk ile 10000 dev/dk arasında olan endüklenen gerilim değerleri için analitik hesaplamalar ve 3 boyutlu sonlu eleman yöntemi ile elde edilen sonuçların karşılaştırıldığı bir grafik şekil 5.7’de verilmiştir.



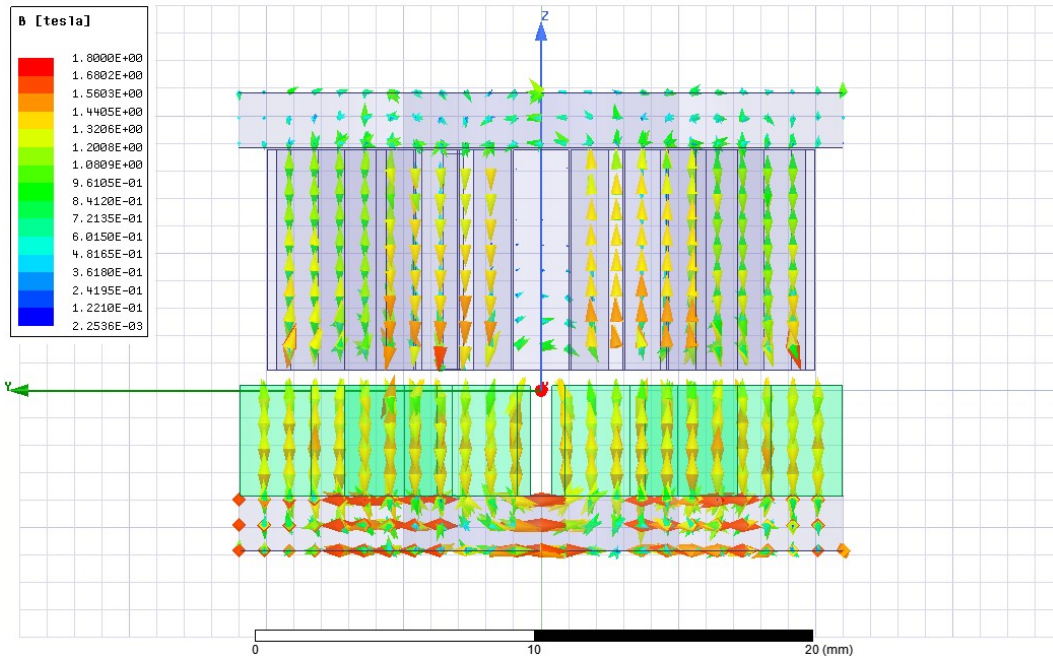
Şekil 5.3: EAKMSM manyetik akı yoğunluğu (YMK) üst.



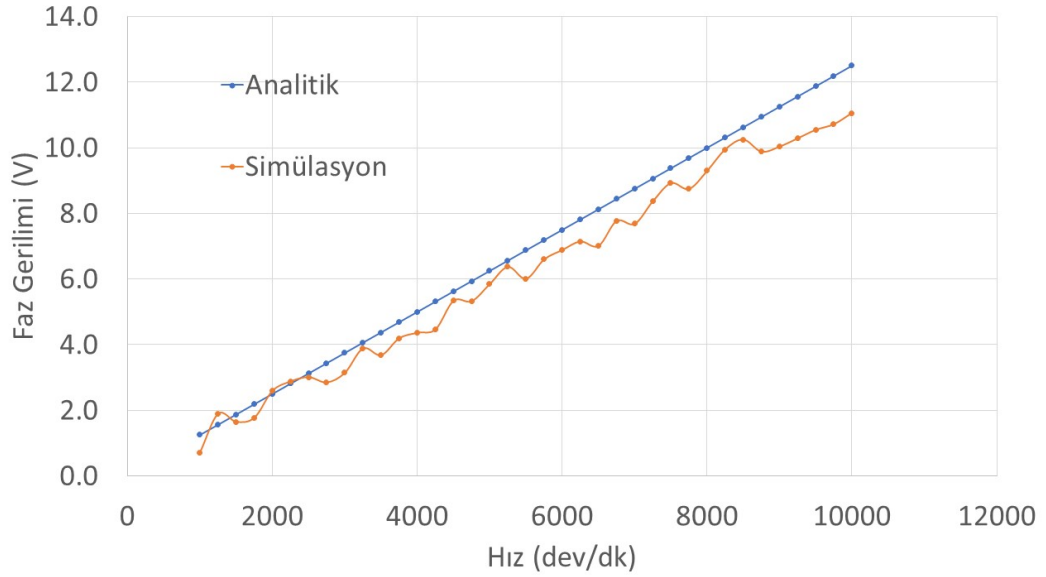
Şekil 5.4: AKMSM manyetik akı yoğunluğu (YMK) yan.



Şekil 5.5: EAKMSM manyetik akı yoğunluğu (TYLÇ) üst.



Şekil 5.6: EAKMSM manyetik akı yoğunluğu (TYLÇ) yan.

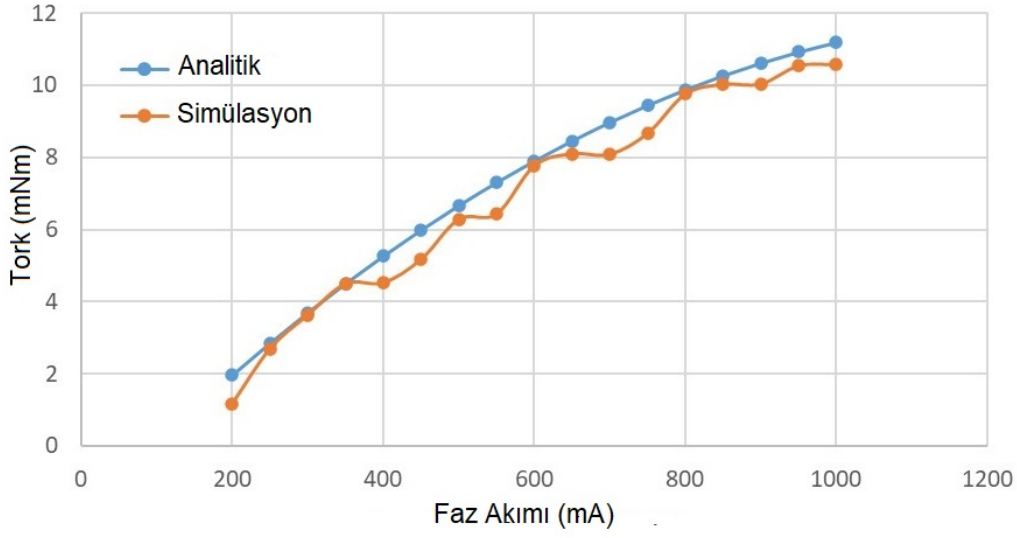


Şekil 5.7: EAKMSM farklı hız değerleri için endüklenen gerilim grafiği.

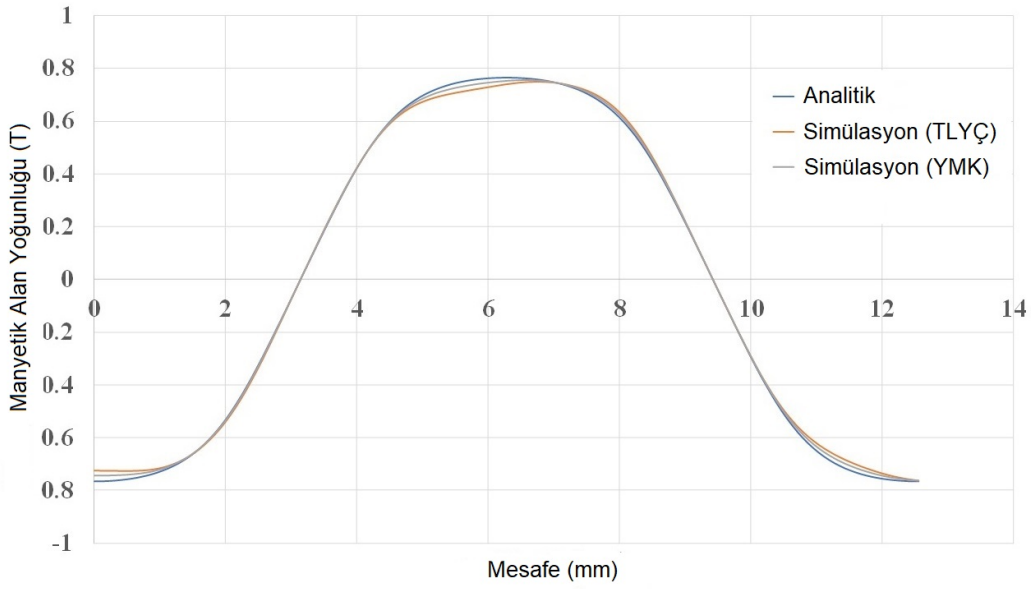
Görüldüğü gibi sonuçlar birbirlerine oldukça yakın çıkmaktadır.

Hız aralığı 1000 dev/dk ile 10000 dev/dk arasındaki tork değerleri için analitik hesaplamalar ve 3D sonlu eleman yöntemi ile elde edilen sonuçların karşılaştırıldığı bir grafik şekil 5.8’de verilmiştir.

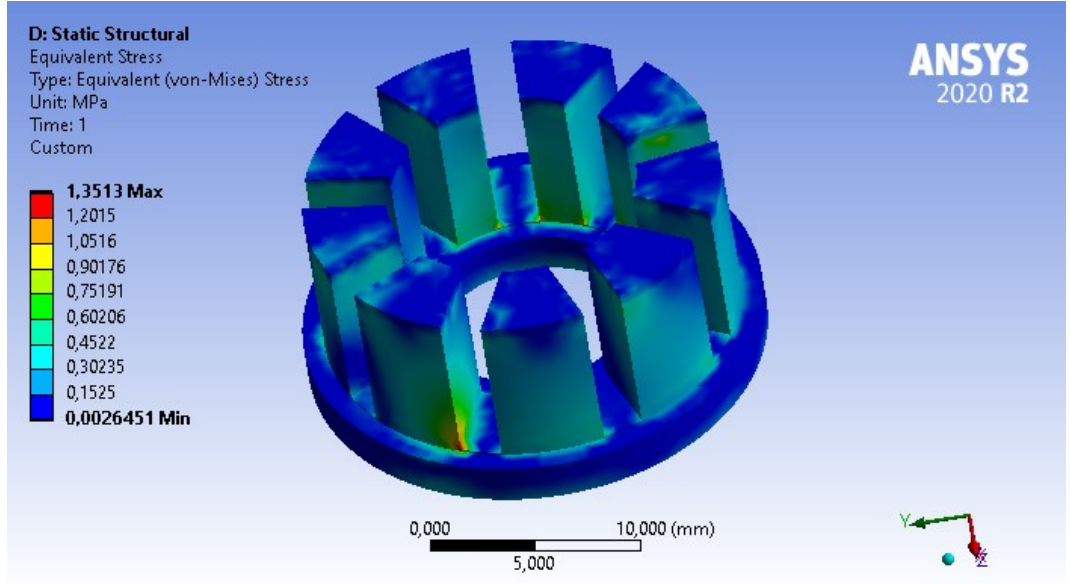
Hava aralığında bulunan manyetik akı yoğunluğu, denklemler kullanılarak analitik olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar için ilk 13 harmonik seçilmiştir. Harmonik sayısını artırmak, hesaplanan sonuçlar üzerinde sınırlı bir etkiye sahiptir. Bir elektriksel periyot şekil 5.9’da gösterilmiştir. ANSYS analiz sonucu manyetik alanın ortalama değeri için 0.615 T olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakın olarak bulunmuştur. TYLÇ nüveli stator’daki doyum daha az olduğu için bu değerler oldukça iyi tahmin edilmiştir. Hesaplamalarda hava aralığı içindeki manyetik alan yoğunluğuna olan oluk etkisi göz ardı edilmiştir. Manyetik alan dağılımı YMK tabanlı EAKMSM için oldukça benzerdir.



Şekil 5.8: EAKMSM farklı akım değerleri için tork grafiği.



Şekil 5.9: EAKMSM hava aralığındaki manyetik alan dağılımı karşılaştırılması.

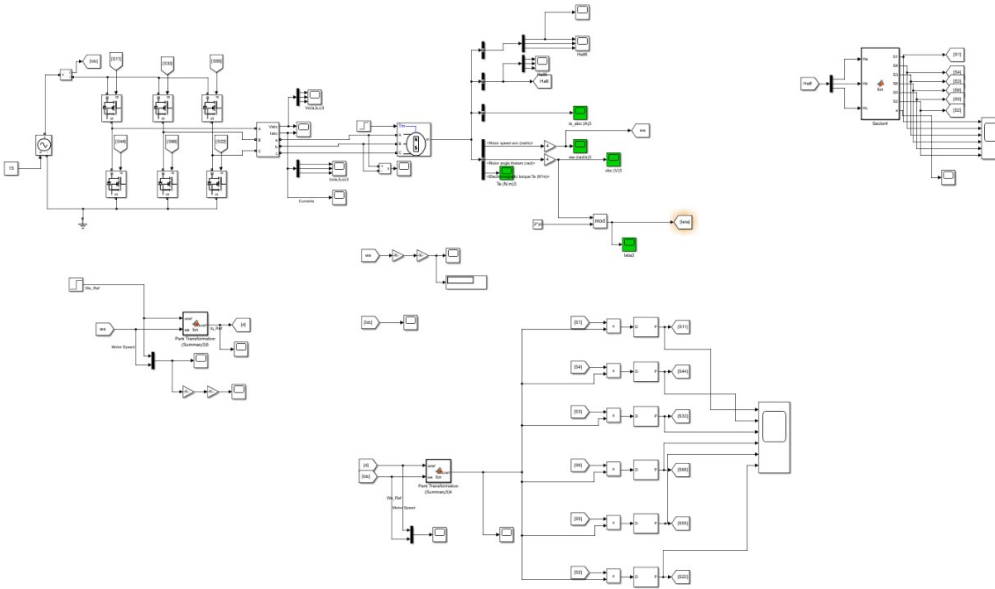


Şekil 5.10: EAKMSM von mises stres dağılımı.

Stator dişindeki mekanik ve elektromanyetik kuvvet kaynaklı stresler sonlu elemanlar analizi ile hesaplanmıştır. Analizde, stator üzerindeki dişlere etkiyen elektromanyetik kuvvetleri uygulayarak dişin eşdeğer (von Mises) kuvvet dağılımı belirlenmiştir. Şekil 5.10’de gösterildiği gibi, en yüksek eşdeğer gerilim, dişin yatayda çıkıntı yaptığı köşede 1.35 MPa olmaktadır. Üretici tarafından stator üretiminde kullanılan YMK malzemesi için belirlenen 121 MPa’lık mukavemet değeri, simülasyon sonucu olarak hesaplanan stator dişinde oluşan 1.35 MPa değerinin oldukça üzerindedir. Bu durum, stator diş geometrisinin işlem sırasında elektromanyetik kuvvetlere dayanabileceğini göstermektedir.

5.1 EAKMSM Dinamik Benzetim

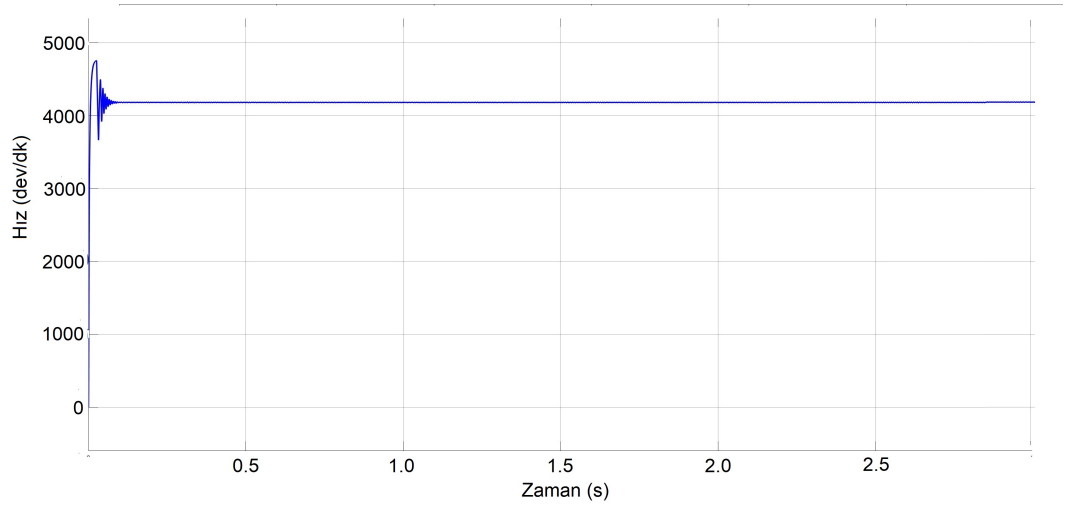
Ansyes profram analizinden elde edilen EAKMSM parametreleri ile belirli tork değeri için MATLAB/Simulink ortamında motor sürme teknikleri denenmiştir. Basit algoritması nedeniyle ilk olarak 6 adımlı motor kontrol tekniği kullanılmıştır. 6 adımlı motor kontrolü, adım motorlarını altı farklı adımda sürme stratejisini ifade eder. Bu adımlar, motorun her adımda belirli bir miktar dönmesini sağlar ve adımlar belirli bir sırayla tekrarlanır. Bu yöntem, adım



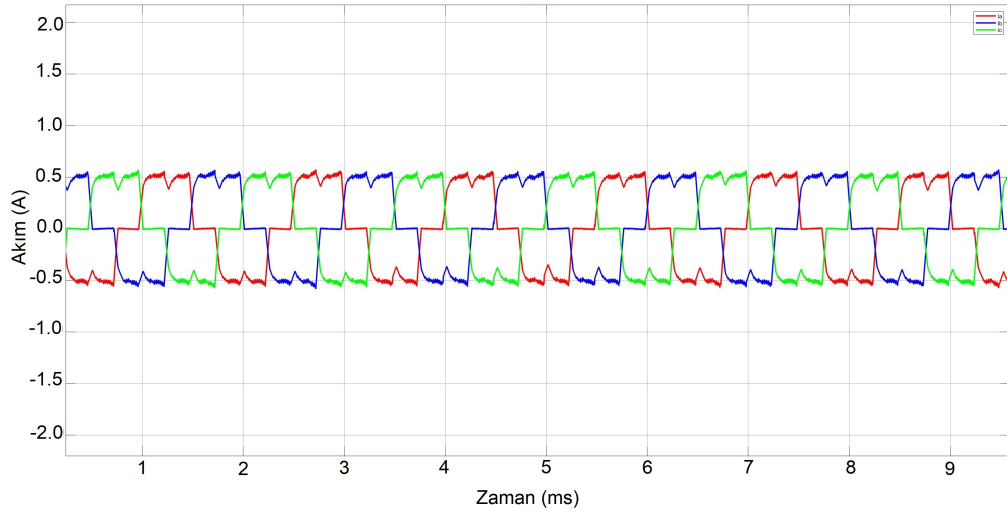
Şekil 5.11: EAKMSM 6 adımlı motor kontrol simülink bloğu.

motorlarının basit bir şekilde kontrol edilmesini sağlar. Şekil 5.11- 5.14’de simulink simülasyon blokları ve sonuçları görülmektedir. 4200 dev/dk motor hızında 0.5 A faz akımı tepe değeri için elde edilen tork miktarı ortalama olarak 5 mNm olmaktadır. Fakat tork dalgalılığının çok fazla olmasından dolayı bu teknik tercih edilmemiştir.

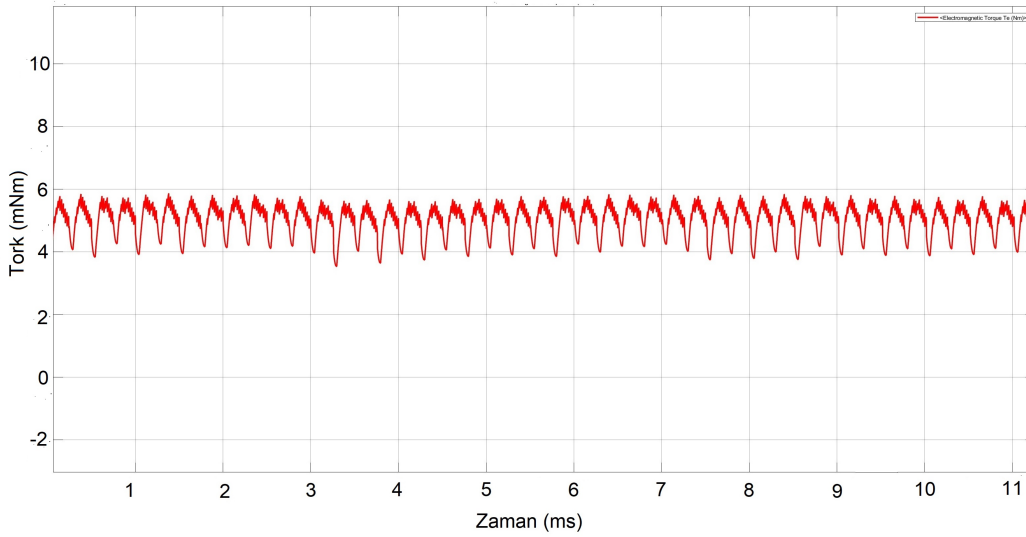
Bir sonraki motor kontrol yöntemi algoritması alan yönlü kontrol, özellikle elektrik motorları ve motor tahrik sistemlerinde kullanılan bir kontrol stratejisidir. Bu kontrol stratejisi, motorun manyetik alanını belirli bir yönde yönlendirmeyi ve kontrol etmeyi amaçlar. Alan yönlü kontrol, bir elektrik motorunun manyetik alanını ve dönme hareketini bir durağan ve bir dönen koordinat sistemi olarak iki ayrı bileşen olarak ele alır. Bu sayede motorun kontrolü daha hassas bir şekilde gerçekleştirilebilir. Alan yönlü kontrol, özellikle yüksek performanslı motor uygulamalarında, hassas hız kontrolü ve enerji verimliliği gerektiren sistemlerde kullanılır. Şekil 5.15- 5.18’de simulink simülasyon blokları ve sonuçları görülmektedir. 4200 dev/dk motor hızında 0.5 A faz akımı tepe değeri için elde edilen tork miktarı ortalama olarak



Şekil 5.12: EAKMSM 6 adımlı motor kontrol hız grafiği.



Şekil 5.13: EAKMSM 6 adımlı motor kontrol faz akım grafiği.

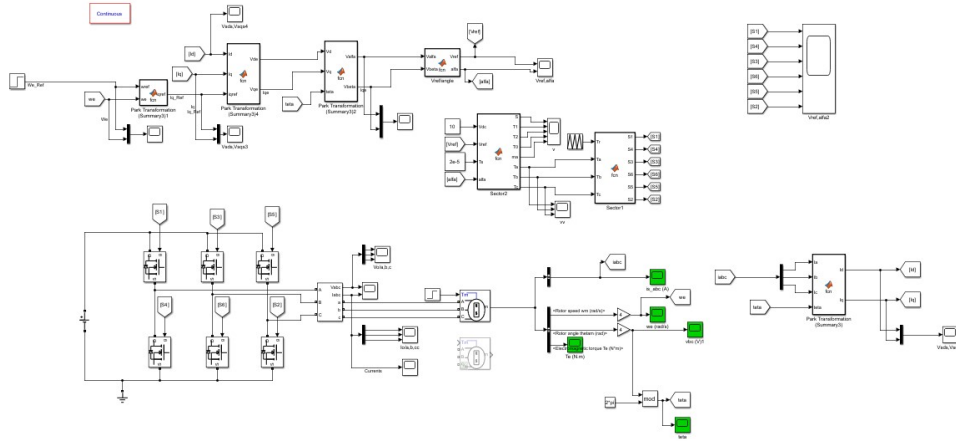


Şekil 5.14: EAKMSM 6 adımlı motor kontrol tork grafiği.

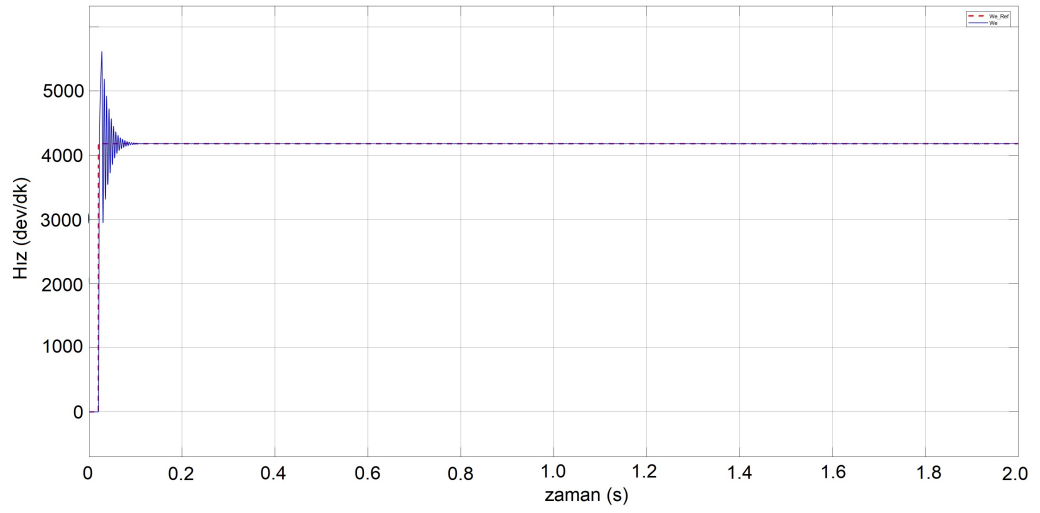
5 mNm olmaktadır. Tork dalgalılığı minimum seviyededir. Bunun yanında akım dalga şeklinin sinüsoidal bir yapıda olduğu görülmüştür. Tez kapsamında kullanılması düşünülen algoritma alan yönlü kontrol olarak belirlenmiştir.

Tasarlanacak MDD sistemi gözönüne alındığında iki motorlu bir yapının olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu yapının tek motorlu duruma göre avantajları incelenmelidir. İlk olarak iki adet EAKMSM bulunan sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonunun yapılması gerekmektedir. Şekil 5.19’de simülasyon modeli görülmektedir.

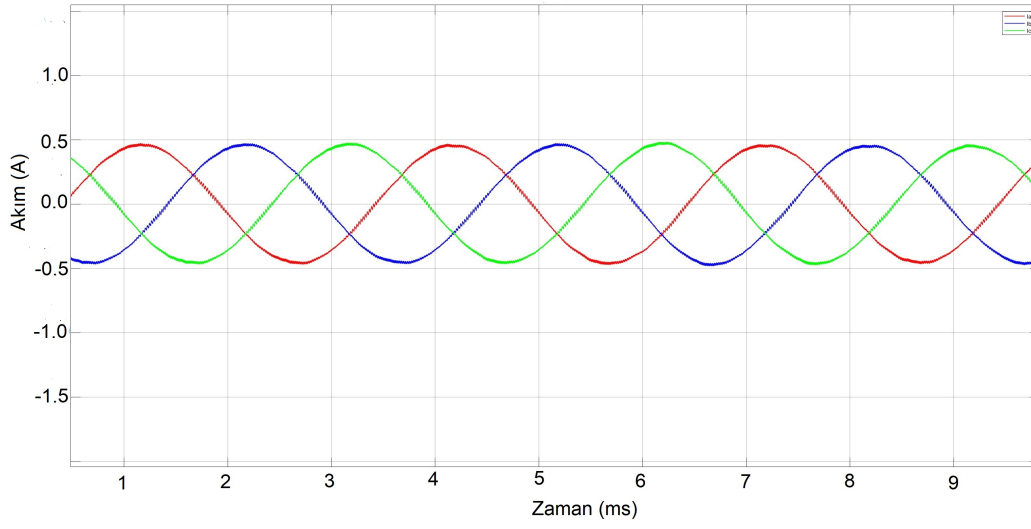
Ansys analizinden elde edilen iki motorlu EAKMSM için belirli tork değerine göre MATLAB/Simulink ortamında motor sürme teknikleri denmiştir. 6 adımlı motor kontrolü için Şekil 5.20- 5.21’de simulink simülasyon blokları ve sonuçları görülmektedir. Sürücü her EAKMSM için paralel bir şekilde motorlara bağlanmıştır 4200 dev/dk motor hızında tek motorun 0.5 A faz akımı tepe değeri için elde edilen tork miktarı ortalama olarak 9.8 mNm olmaktadır. Görüldüğü gibi tek bir sürücü ile birbirine şaft üzerinde bağlı eş EAKMSM’lerin paralel olarak sürülmesi durumunda motor momenti pratik



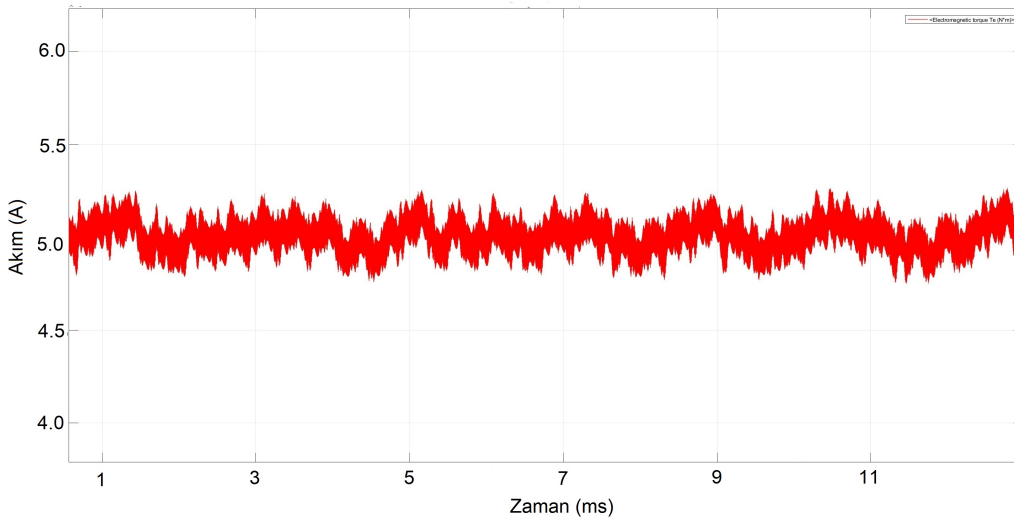
Şekil 5.15: EAKMSM alan yönlü kontrol motor kontrol simülink bloğu.



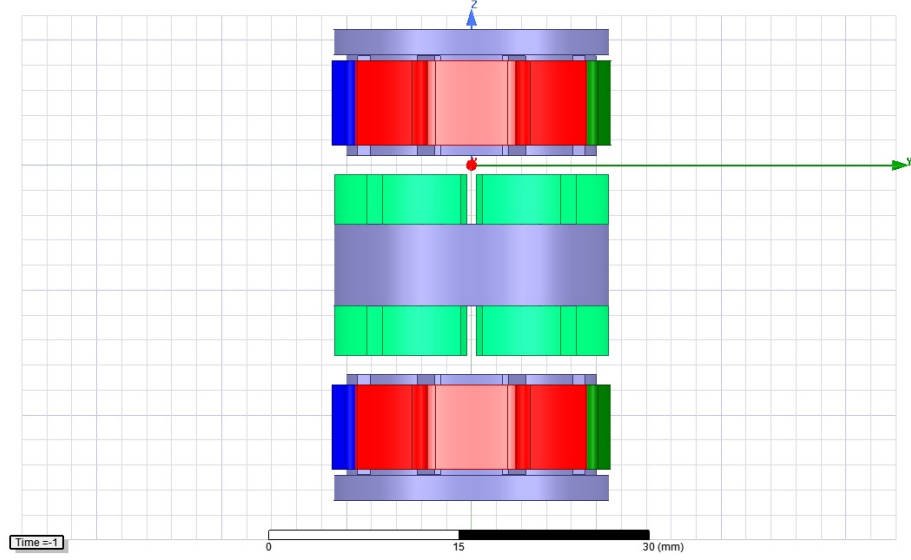
Şekil 5.16: EAKMSM alan yönlü kontrol motor kontrol hız grafiği.



Şekil 5.17: EAKMSM alan yönlü kontrol motor kontrol faz akım grafiği.



Şekil 5.18: EAKMSM alan yönlü kontrol motor kontrol tork grafiği.

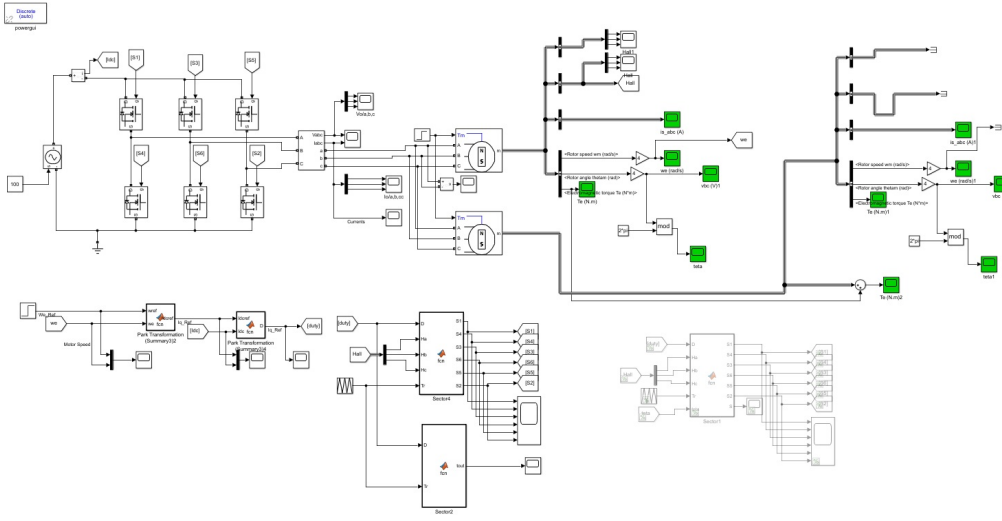


Şekil 5.19: İki EAKMSM için yapının sonlu elemanlar modeli.

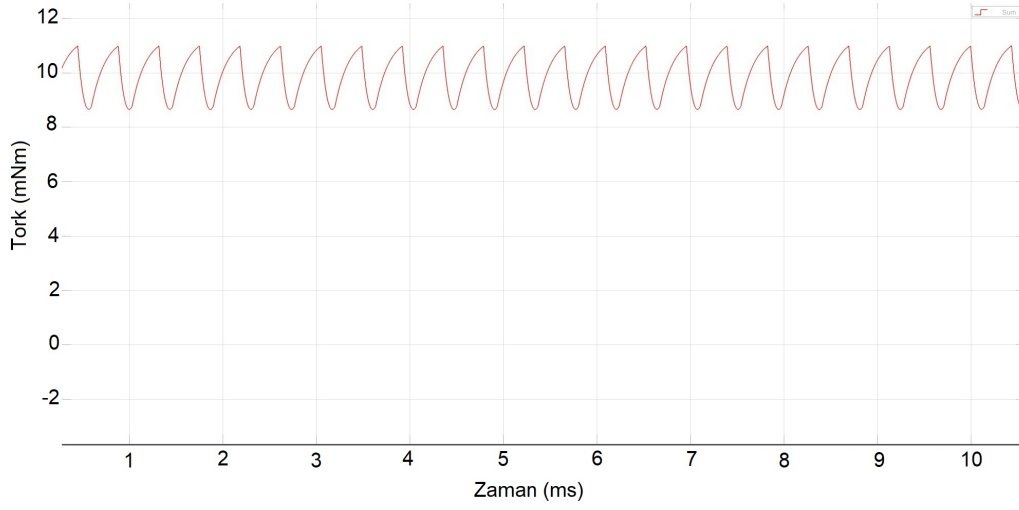
olarak iki katına çıkmaktadır.

Bir diğer motor kontrol algoritması alan yönlü kontrol tekniği ile iki EAKMSM sisteme paralel bağlanmıştır ve bu duruma ait sonuçlar Şekil 5.22’de verilmiştir. Görüldüğü gibi toplam tork değeri her iki motorun ürettiği tork değerine eşittir ve 0.5 A faz akımı için toplamda 10 mNm yakın bir değerde tork elde edilmektedir. EAKMSM pozisyonları ve parametrelerinin eş olmasından dolayı tek bir sürücü ile simülasyon ortamında paralel bir şekilde motor kontrolü sağlanabilmektedir.

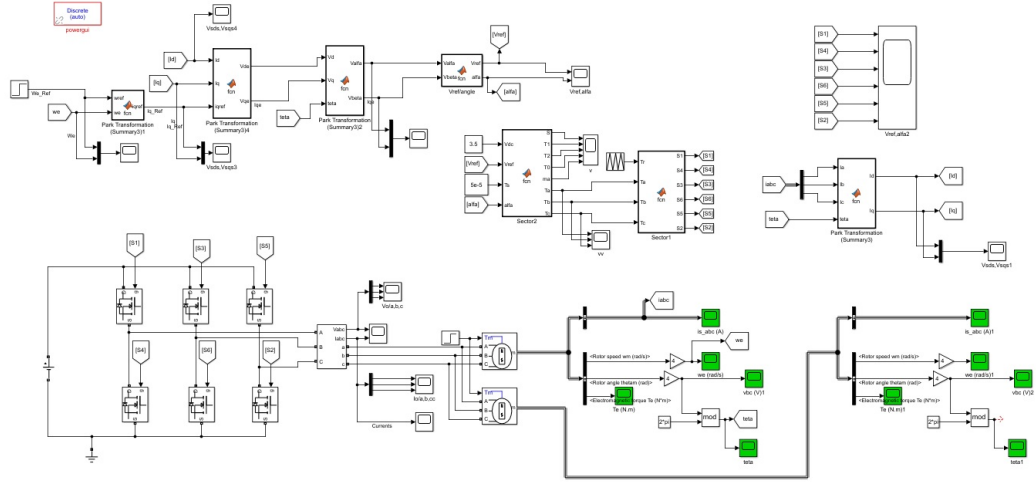
Şekil 5.24’de simülasyon sonuçları görülmektedir. Her iki motor birbirlerine göre mekanik anlamda açı farkı olacak şekilde kaydırılmıştır ve simülasyon ortamında tork dalgalılık analizi yapılmıştır. Açı farkı değerinin 0 olması durumunda yaklaşık %22 değerinde bir dalgalılık oluşurken belirli açılarda örneğin 34.6 derecelik bir mekanik açı farkı ile birlikte moment dalgalılığı %12.6 değerine gelmektedir.



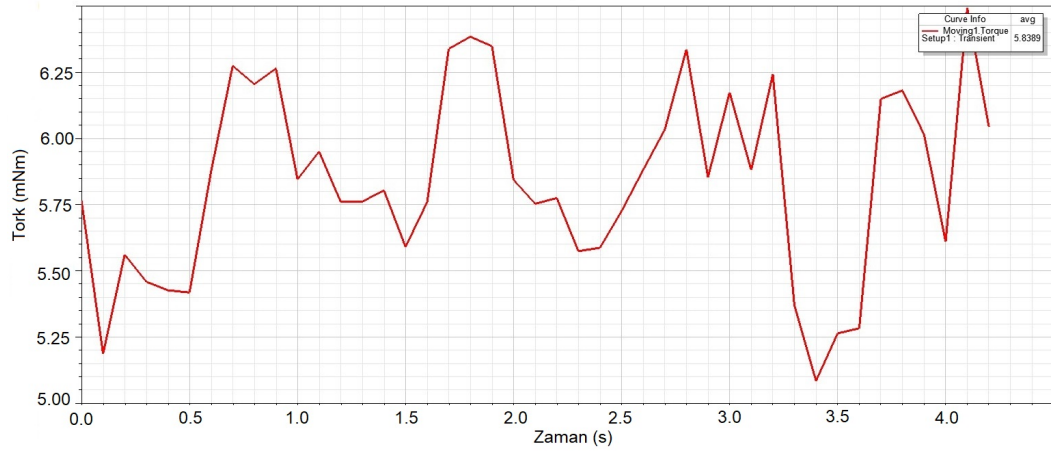
Şekil 5.20: İki EAKMSM için 6 adımlı motor kontrol simülink bloğu.



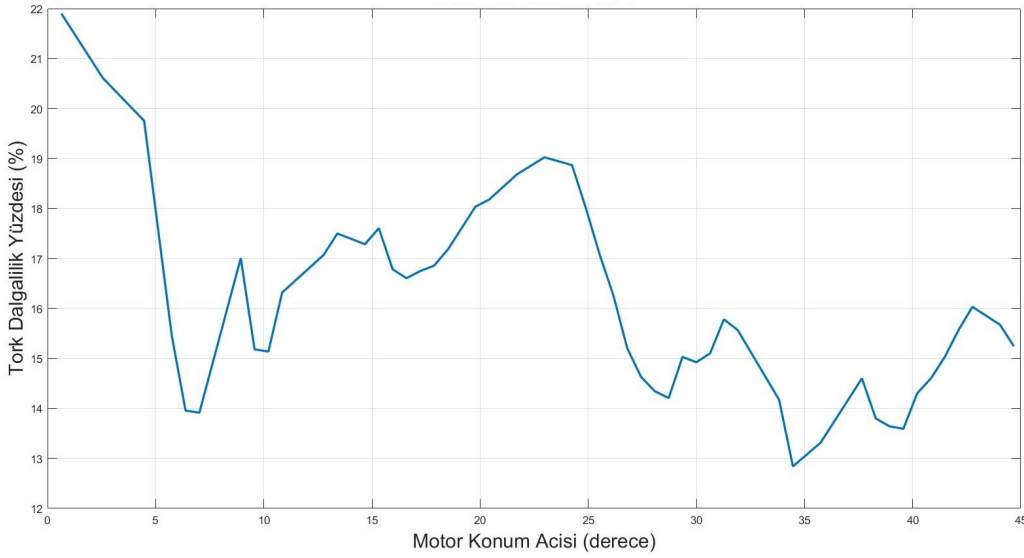
Şekil 5.21: İki EAKMSM için 6 adımlı motor kontrol tork grafiği.



Şekil 5.22: iki EAKMSM için alan yönlü kontrol motor kontrol simülink bloğu.



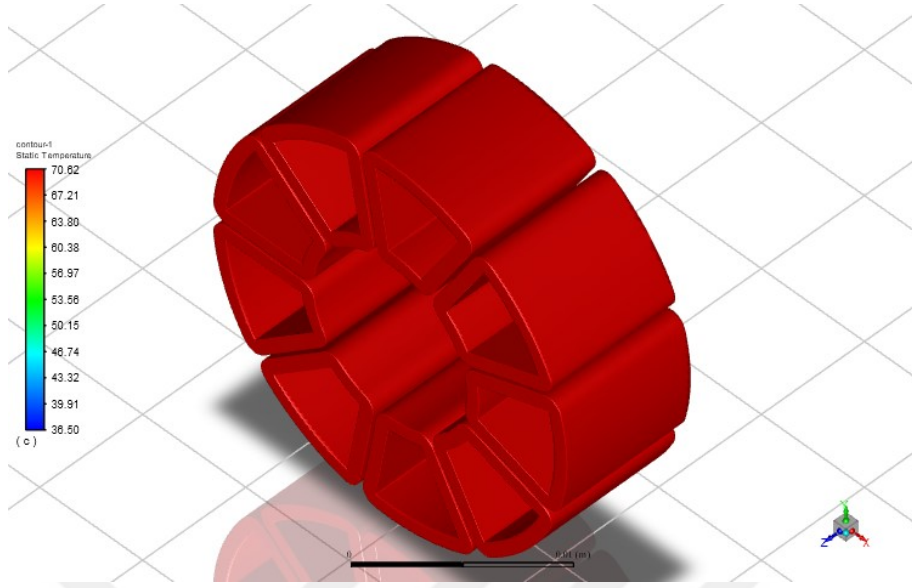
Şekil 5.23: 4000 dev/dk ve 500 mA faz akımı için tek EAKMSM tork-zaman grafiği.



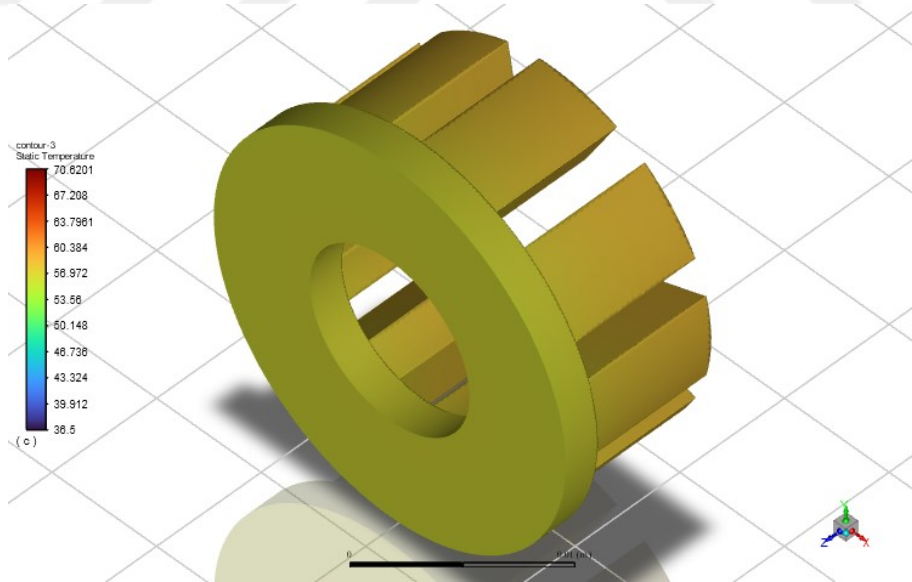
Şekil 5.24: 4000 dev/dk ve 500 mA faz akımı için çift EAKMSM tork-açı grafiği.

5.2 EAKMSM'nin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Termal Analizi

Farklı hızlar ve yükler altında ısı dağılımını incelemek için motor sargısı, stator ve rotor için termal analiz gerçekleştirilmiştir. Ansys programı kullanılarak gerçekleştirilen termal analiz Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'de sunulmuştur. 5000 dev/dk ve 1 A faz akımı ile çalışan EAKMSM'nin stator nüvesi ve sargıları üzerinde 3 boyutlu termal analiz yapılmıştır. Analiz sırasında çevresel sıcaklık 36.5 derece Selsiyus olarak ayarlanmıştır.



Şekil 5.25: EAKMSM stator sargı termal analizi.



Şekil 5.26: EAKMSM stator nüve termal analizi.

6 EAKMSM PROTOTİP ÜRETİMİ

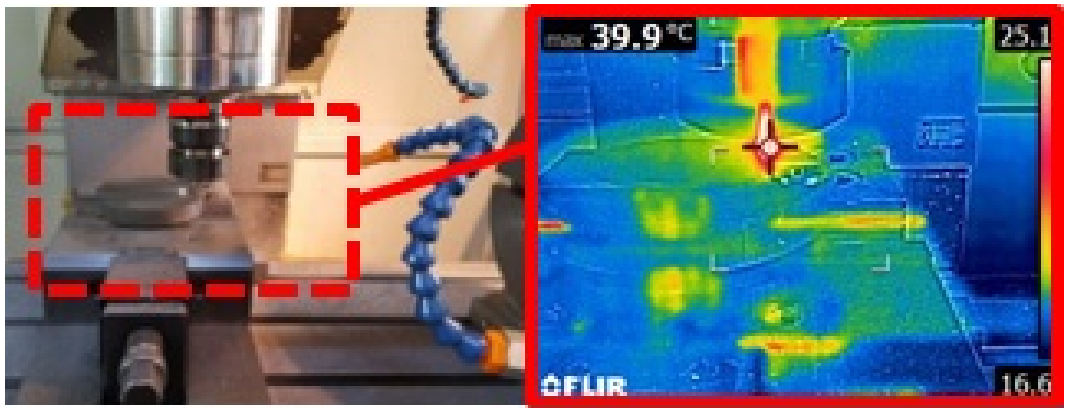
Bu bölümde deneysel çalışmalar üretilen EAKMSM ve üretim şekilleri anlatılmıştır. EAKMSM stator çekirdekleri, tasarım ve optimizasyon çalışmaları sonrasında belirlenen boyutlara sahip küçük boyutlu EAKMSM performans karşılaştırmasının deneysel olarak yapılabilmesi için hem YMK hem de TYLÇ malzemelerinden üretilmiştir. YMK malzemedan stator çekirdekleri üretmek için kalıplama ve işleme teknikleri kullanılmıştır. Kalıplama kullanarak üretim, işleme kullanarak üretime göre oldukça yüksek maliyetlidir. Ayrıca, statorun küçük boyutu nedeniyle kalıp üretimi zordur. Bu durumda işleme tekniği daha uygun bir tekniktir. Bu nedenle bu çalışmada, hem YMK hem de TYLÇ malzemelerinden stator çekirdekleri bu teknik kullanılarak üretilmiştir. Şekil 6.1’de ham malzemeler ve işlenmiş malzemeler gösterilmektedir.

YMK malzemesinin kırılgan bir mikro yapıya sahip olması, stator üretim sürecini zorlaştırmaktadır. Örneğin, uygun olmayan işleme parametrelerinin kullanılması stator çekirdeğinde küçük çatlaklara neden olabilir ve bu durum çekirdeğin elektromanyetik özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir. Ayrıca, mikroyapıdaki demir tozlarının yalıtımı, işleme sırasında sıcaklık artışının YMK malzemesinin sertleşme sıcaklığını aştığı durumlarda zarar görebilir ve mekanik özellikler bozulabilmektedir. Şekil 6.2’de gösterildiği gibi, işleme sürecinde en yoğun talaş çıkarılmasının gerçekleştiği işlem sırasında oluşan sıcaklık dağılımı, termal bir kamera ile görüntülenmiştir. Maksimum sıcaklık 39.9 derece selsius olarak ölçülmüştür. YMK malzemesinin sertleşme sıcaklığının 300 derece civarında olduğu düşünüldüğünde, işleme süreci sırasında oluşan sıcaklığın malzemenin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini etkilemediği söylenebilir.

Şu an için, YMK malzemedan küçük boyutlu statorların üretimi için gereken işleme parametreleri hakkında sınırlı veri bulunmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada belirtilen sınırlamalara uygun olarak çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Stator çekirdeği yüzey frezeleme, delme ve kontur frezeleme



Şekil 6.1: TYLÇ ve YMK malzemesi ile üretilen EAKMSM stator çekirdekleri.



Şekil 6.2: YMK stator çekirdeklerin üretim sürecinin termal görüntülemesi.

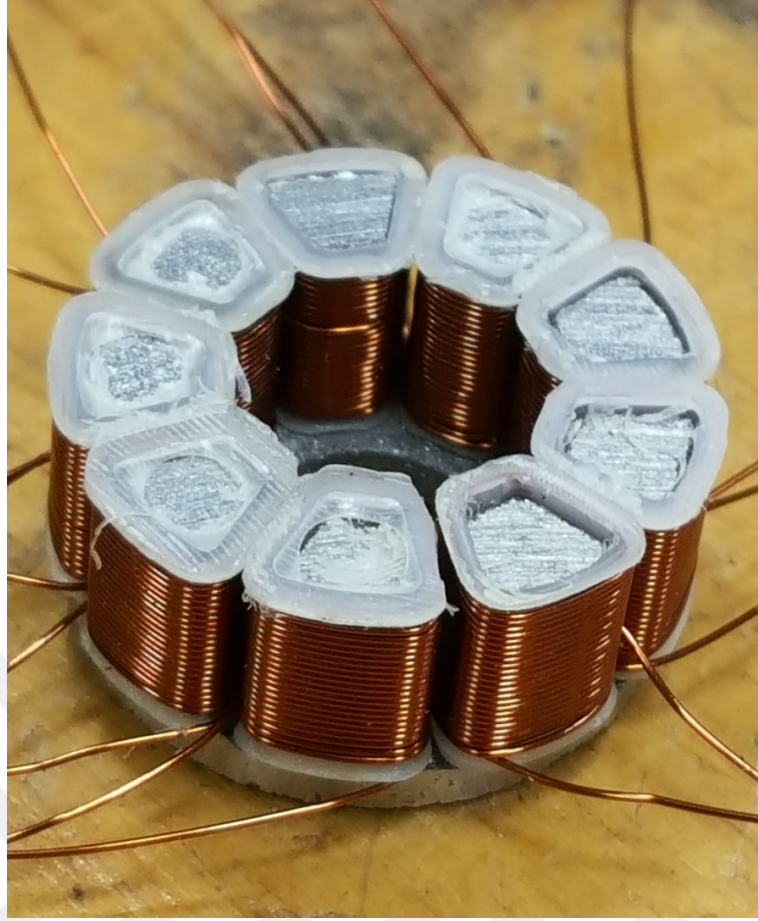
yöntemleri kullanılarak işlenmiştir. Tüm işlemler hava soğutma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece, tablo 6.1’de verilen işleme parametrelerine dayalı olarak YMK malzemesinden küçük boyutlu stator çekirdekleri üretilmiştir.

İşlem	Kesici Takım	Kesme Hızı (m/dak)	İlerleme Hızı (mm/dak)
Yüzey Frezeleme	Karbür yüzey freze	100	120
Delme	HSS spiral matkap	12	10
Kontur Frezeleme	Karbür uçlu freze	30	40

Tablo 6.1: EAKMSM YMK stator çekirdeklerin işleme parametreleri.

Radyal makinelere ait çekirdeklerin seri üretimi, lamine sac çekirdekler üzerinde lazer kesim ve kesim kalıp teknikleri kullanılarak kolayca ve uygun maliyetli bir şekilde yapılabilir. Çalışmanın konusu olan EAKMSM üretimi için manyetik çekirdeğin bir rulo şeklinde laminasyona sahip olması gerekmektedir. Bu gereklilik bahsedilen yöntemlerin kullanımını önemli ölçüde sınırlamaktadır. TYLÇ çekirdeklerin üretimi için hem işleme hem de tel erozyon teknikleri kullanılabilir ancak tel erozyon tekniği çalışmada olduğu gibi tek sayıda stator dişi olan durumlarda kullanılamaz. Bu nedenlerle TYLÇ çekirdek üretimi için işleme tekniği kullanılmıştır. Doğrudan stator dişlerine bakır teller sarılmıştır. Stator bobinleri stator diş uçlarına kolayca sabitlenebilir. Ancak, bu çalışmada olduğu gibi uçsuz stator dişleri için farklı çözümler bulunmalıdır. Makinenin küçük boyutlu olması ve uçsuz stator dişleri nedeniyle teflon malzemedan bir makara üretilmiştir. Bobinler, şekil 6.3’de gösterildiği gibi makaralar kullanılarak yerleştirilmiştir.

Rotor yapısı için bir halka mıknatıs tercih edilmiştir. Mıknatıs malzemesi için ise N52 tipi bir kalıcı mıknatıs kullanılmıştır. Rotor mıknatısının ortalama Br değeri 1.45 Tesla, kalınlığı 4 mm, dış çapı 20 mm ve iç çapı 10 mm’dir.

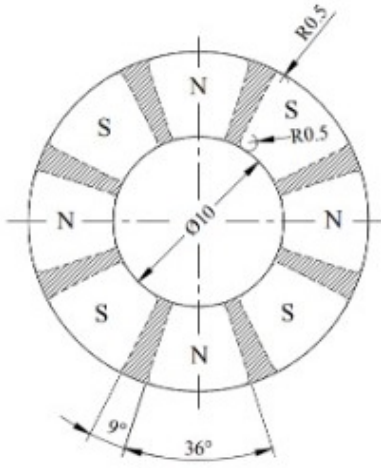


Şekil 6.3: EAKMSM stator sargılarının üretimi.

8 kutbu vardır ve mıknatıs kutup oranının değeri 0.8'dir. Mıknatıs üretimi sırasında, mıknatısın manyetikleştirilmiş bölgelerin konumlarını gösteren manyetik bir kağıt ile doğrulama sağlanmıştır. Şekil 6.4'de, EAKMSM için kullanılan halka kalıcı mıknatısı görülmektedir.

Talaşlı üretim sırasında ısınan nüveyi soğutmak için kullanılan yağ sebebiyle malzeme dayanımı azalmış ve malzeme aşağıdaki Şekil 6.5'de görüldüğü gibi kırılmıştır.

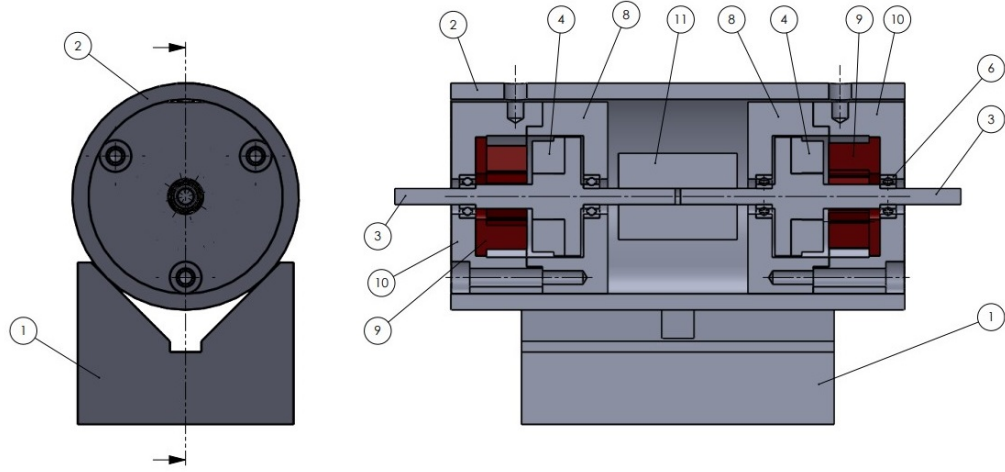
Bu sorunu çözmek için yeni bir üretim düzenneği kurulmuştur, bu yeni düzeneğe hava soğutması kullanılmıştır, bu yeni düzeneğe ile nüve üretimi yavaş bir şekilde gerçekleşmiştir. Her iki nüve tipinde ikişer adet stator üretimi yapılmıştır ve sarımları tamamlanmıştır. 9/8 oluk-kutuplu olan stator



Şekil 6.4: EAKMSM 8 kutuplu halka mıknatıs ve çizimi.



Şekil 6.5: EAKMSM YMK stator üretiminde hatalı işlenen nüveler.



Şekil 6.6: EAKMSM ilk laboratuvar test prototipi tasarımı.

yapısında, konsantre sargı tekniği kullanılmıştır. Sonuç olarak TYLÇ ve YMK nüveli olarak 2 adet EAKMSM üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında her iki EAKMSM için de birer adet stator nüvenin gövde üretimi yapılmıştır.

İlk aşamada üretilen EAKMSM prototiplerin pompa yapısına benzemesi için bir gövde içine konularak birbirlerine motor milinde bağlanarak testlerin yapılması düşünülmüştür. Şekil 6.6-6.8’de üretilen EAKMSM ve gövdeleri görülebilir.

Fakat ilk prototip tasarımında içi boş olarak üretilen motor mili nedeniyle bazı sorunlar oluşmuştur. Özellikle üretilen tüm EAKMSM’lerin motor milinin nominal yük altında kırılması laboratuvar testlerinin yapılabilmesini engellemiştir. Şekil 6.9’de kırılan parçalar ve bu soruna geliştirilen çözüm görülmektedir.

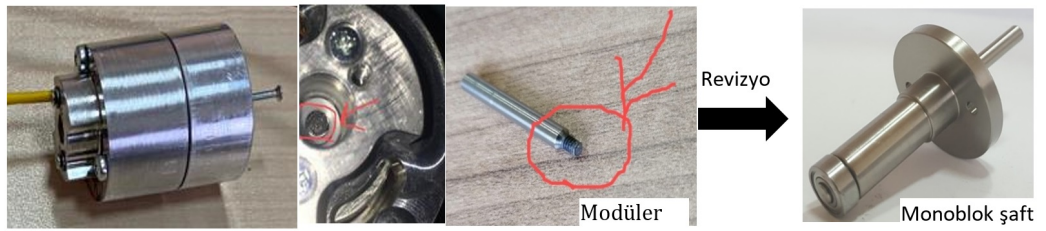
Laboratuvar tasarımını daha basit hale getirmek ve güçlendirmek için aşağıdaki ikinci laboratuvar prototipleri tasarlanmış ve üretilmiştir. Toplamda 4 adet olmak üzere 2 adet YMK ve 2 adet TYLÇ nüveli versiyonları yapılmıştır. Şekil 6.10 ve şekil 6.11’de görülmektedir.



Şekil 6.7: EAKMSM ilk laboratuvar test prototipi dış kasa üretimi.



Şekil 6.8: EAKMSM ilk laboratuvar test prototipi üretimi.



Şekil 6.9: EAKMSM ilk laboratuvar test prototipi mil sorunu ve çözümü.



Şekil 6.10: EAKMSM YMK ve TYLÇ ikinci laboratuvar prototipleri.



Şekil 6.11: EAKMSM YMK ve TYLÇ ikinci laboratuvar prototipleri iç görünüm.

El ile üretilen 4 adet prototip EAKMSM faz doğrulaması yapılması gerekmektedir. Bu nedenle üretilen her bir EAKMSM ait faz direnç ve endüktans değerleri aşağıdaki tablo 6.2 ve tablo 6.3’de verilmiştir. Görüldüğü gibi tüm fazlar birbirine çok yakın çıkmaktadır. Bu nedenle EAKMSM üretiminin başarılı olduğu söylenebilir.

	YMK1		YMK2	
	L(uH)	R(ohm)	L(uH)	R(ohm)
Faz-1	209.4	1.4	188.9	1.37
Faz-2	208.1	1.38	182.4	1.39
Faz-3	197.1	1.4	193.1	1.42
Ortalama	204.86	1.39	188.13	1.39

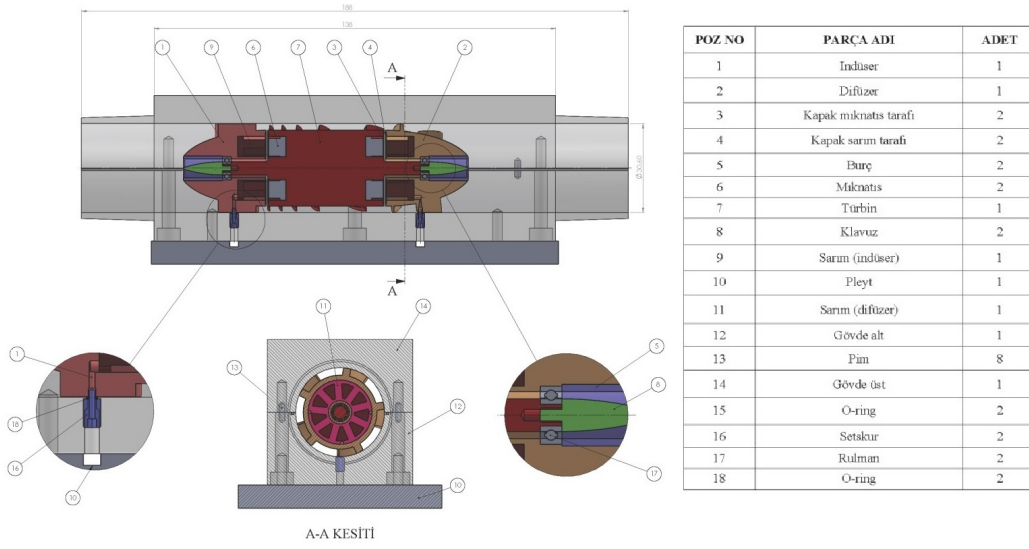
Tablo 6.2: EAKMSM YMK prototip faz direnç ve endüktansları.

	TYLÇ1		TYLÇ2	
	L(uH)	R(ohm)	L(uH)	R(ohm)
Faz-1	287.4	1.41	295.9	1.36
Faz-2	290.3	1.39	283.4	1.36
Faz-3	299.1	1.39	287.4	1.37
Ortalama	292.26	1.39	288.9	1.36

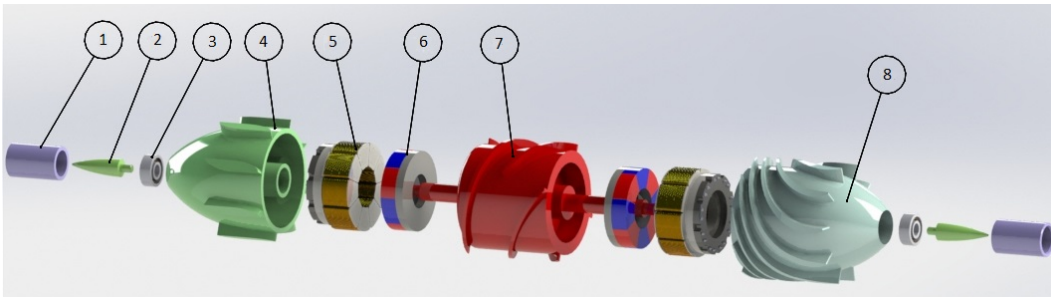
Tablo 6.3: EAKMSM TYLÇ prototip faz direnç ve endüktansları.

Üretilen prototipler laboratuvar ortamında EAKMSM’leri test etmek için kullanılacaktır. Bunun yanında tez kapsamında üretilen EAKMSM’lerin mevcut MDD sistemine entegre edilmesi gerekmektedir. Şekil 6.12’de tasarlanan MDD sistemi ve EAKMSM’lerin yerleşimi görülmektedir.

Şekil 6.13- 6.17’de üretilen MDD sistemi parçaları ve sistemin son hali detaylı olarak görülmektedir.



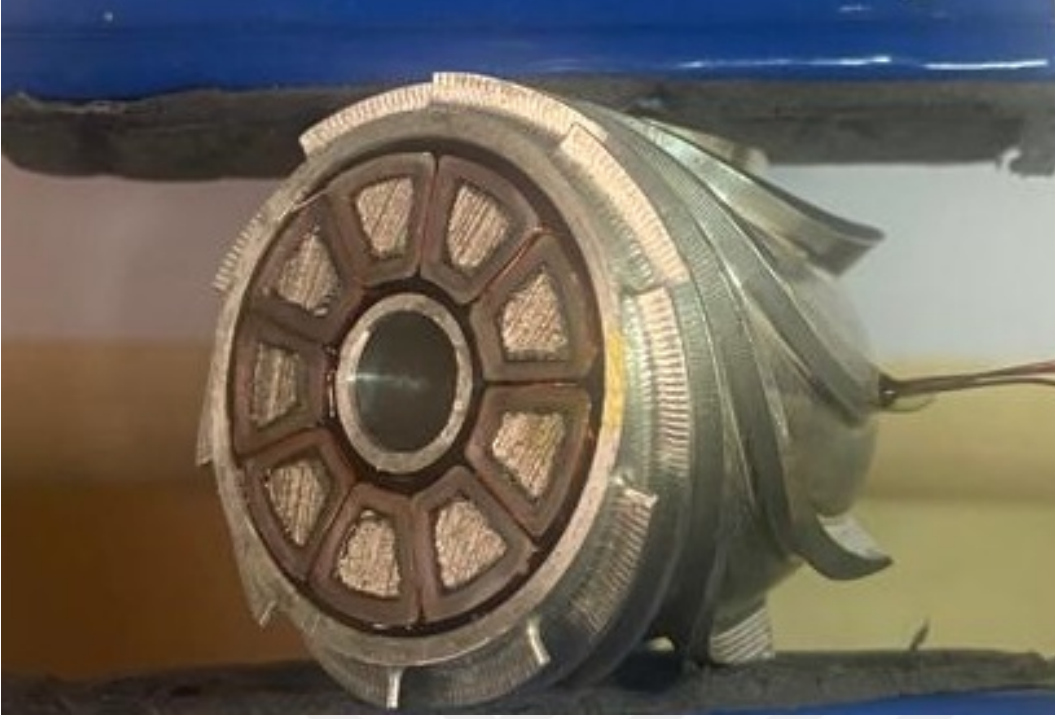
Şekil 6.12: MDD sistemi tasarımı.



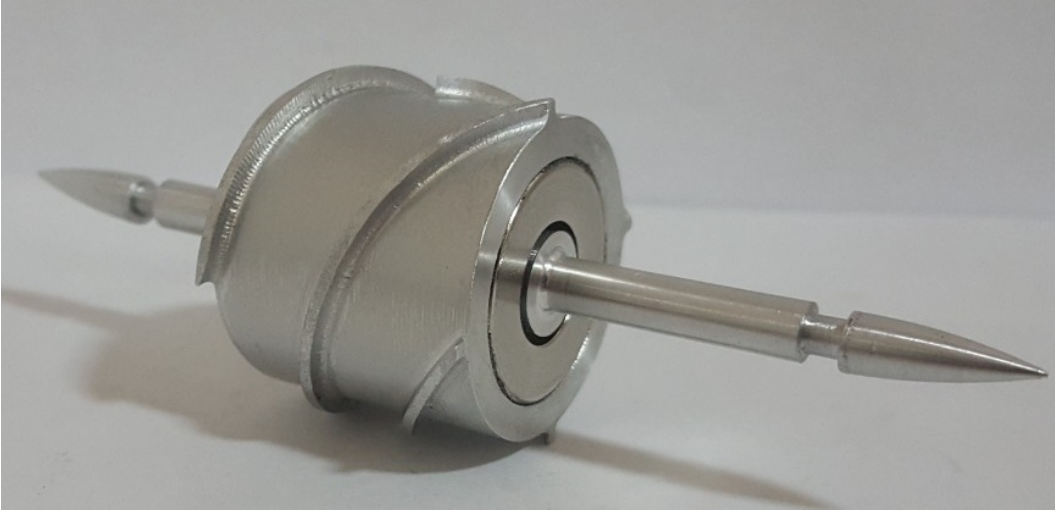
Şekil 6.13: MDD sistemi patlak gösterimi.



Şekil 6.14: MDD sisteminin difüzer kısmı.



Şekil 6.15: MDD sisteminin indüser kısmı.



Şekil 6.16: MDD sisteminin rotor kısmı.



Şekil 6.17: MDD sistemi son hali.

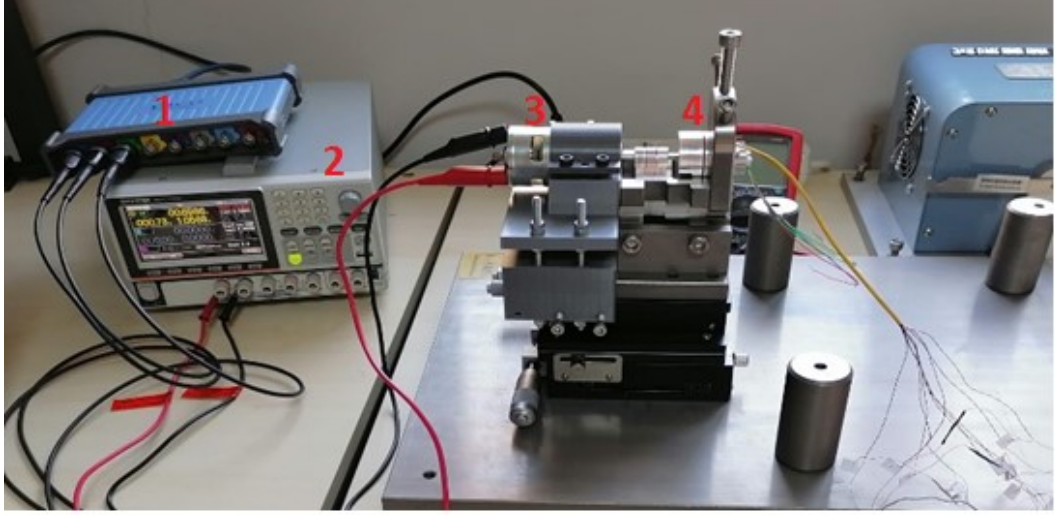
7 DENEYSEL DOĞRULAMALAR

7.1 Test Düzenegi ve Ölçüm Sistemi

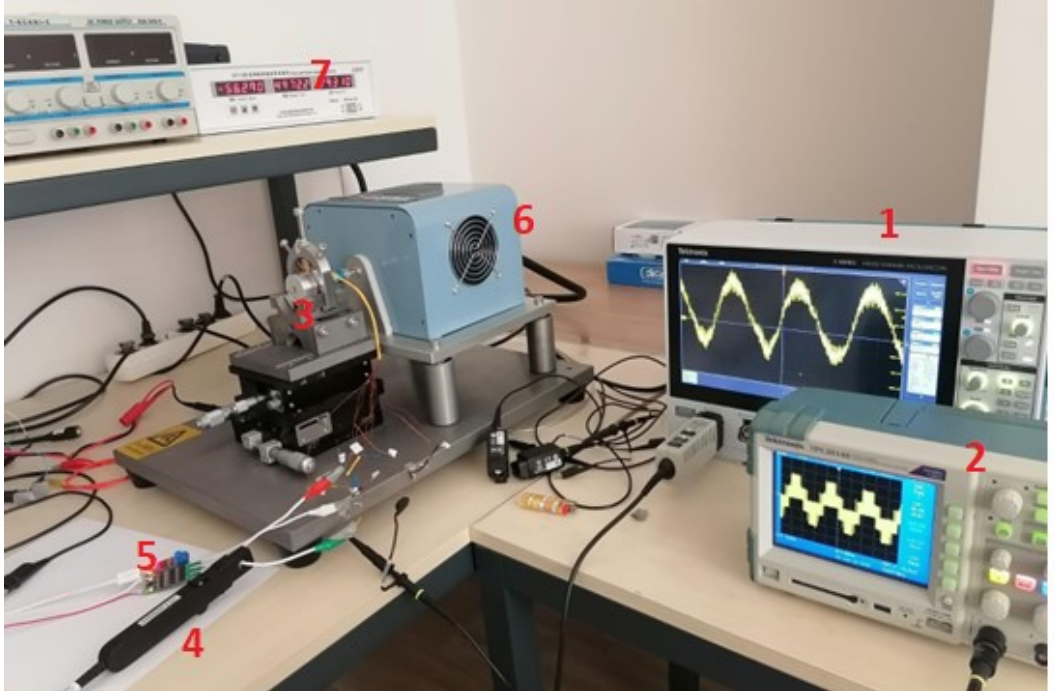
Bu bölümde tasarlanan test düzenekleri anlatılmıştır. İlk olarak EAKMSM için endüklenen gerilimi test edecek bir düzenek tasarlanmıştır. Bu sayede farklı çekirdek tiplerine sahip EAKMSM'lerin faz başına endüklenen gerilimleri ölçülebilecektir. Şekil 7.1'de verilen ekipmanlar sırası ile şu şekildedir; prototip EAKMSM'ler (4), güç kaynağı (2), DC motor (3) ve PicoScope® 4000 (1) bir osiloskop. Bu test kısaca şu şekilde olmaktadır. İlk olarak DC motor istenen hızlara getirilerek prototip EAKMSM'ler tahrik edilmektedir. Ardından her motor fazına ait gerilimler ölçülerek kaydedilir. Bu çalışma 4 prototip içinde yapılmıştır.

Şekil 7.2'de bir başka test düzenegi tanıtılmaktadır. Bu düzenek ile yüksek hassasiyetle EAKMSM tork ve kayıp değerleri ölçülebilmektedir. Prototip EAKMSM (3) Lanmec firmasına ait HZC-0.01 modeli bir histerezis dinamometre (6) ile sisteme bağlanmıştır. Bu cihazın maksimum ölçebileceği tork değeri 10 mNm ve maksimum hızı 30000 dev/dk olarak üretici katalog bilgilerinden edinilmiştir. Histerezis dinamometreden alınan değerler veri toplama kartı (7) ile okunabilmektedir. EAKMSM kontrolü, B-G431B-ESC1 (5) modelinde bir sensörsüz motor kontrol kartı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Giriş akımı, osiloskop (1) kullanılarak akım probu (4) ile gözlemlenmiştir. Giriş gerilimi başka bir osiloskop (2) ile ölçülmüştür.

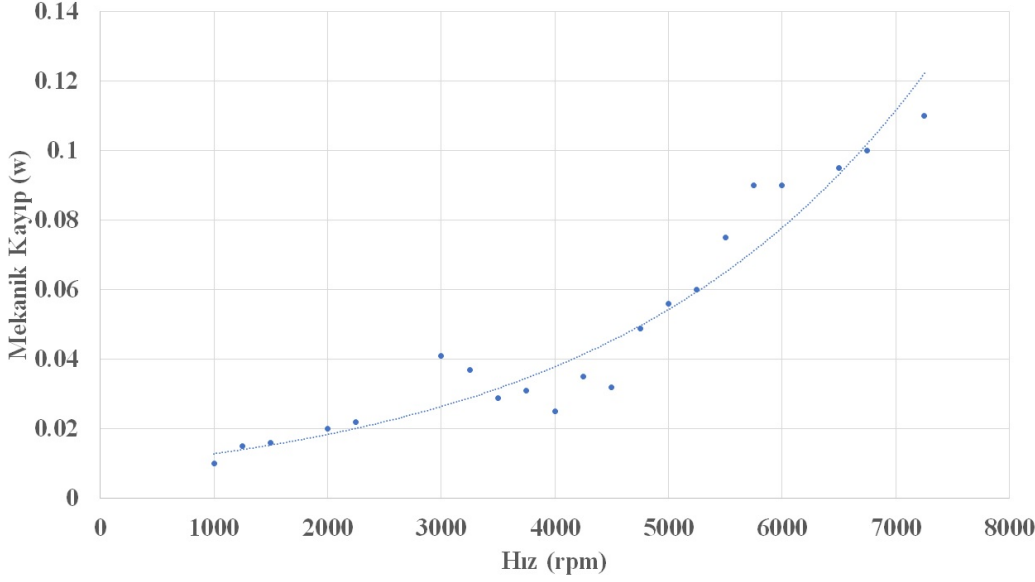
EAKMSM'ler üzerinde çekirdek kaybı doğrudan ölçülemediği için aşağıdaki adımlar izlenerek kayıplar hesaplanmıştır. İlk olarak, DC kaynaktan elde edilen doğru akım ve gerilim değerleri kullanılarak giriş gücü hesaplanır. Tüm iletkenlerdeki dirençler hassas bir şekilde ölçüldüğü için buradaki direnç değeri bilinmektedir. Ardından, iletim elemanları üzerindeki iletim kayıpları, giriş gücünden çıkarılarak EAKMSM'nin giriş gücü elde edilir. Mekanik çıkış gücünü elde etmek için çıkış tork değeri ve dönme hızı doğrudan histerezis



Şekil 7.1: EAKMSM endüklenen gerilim ölçüm test düzeneği.



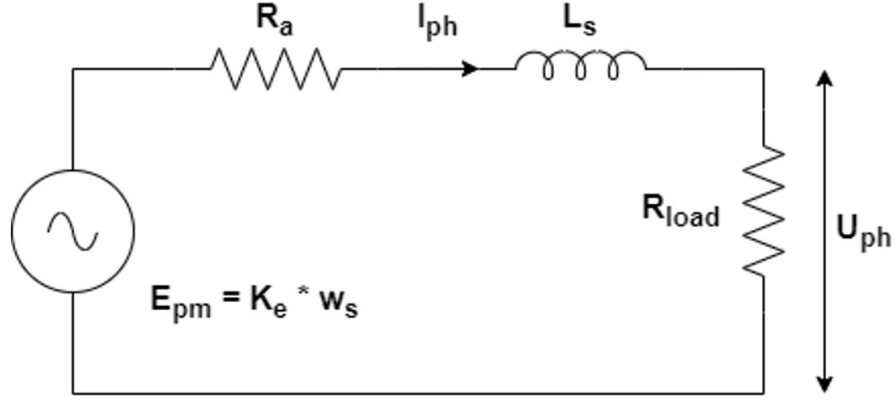
Şekil 7.2: EAKMSM tork ölçüm test düzeneği.



Şekil 7.3: EAKMSM prototipe ait mekanik kayıplar.

dinamometre kullanılarak ölçülür. Bu iki değer arasındaki fark, bakır, mekanik, histerezis ve girdap akım kayıpları da dahil olmak üzere toplam kayıpları verir. EAKMSM'lerin girdap akım kaybı, manyetik nüvenin yüksek elektriksel direnci değeri nedeniyle ihmal edilir. Mekanik kayıplar, şekil 7.3'de gösterildiği gibi, mıknatıs içermeyen bir rotorla donatılmış EAKMSM'nin dış bir kaynak tarafından döndürülerek ve çıkan güç mekanik kayıp olarak kaydedilerek deneysel olarak ölçülebilir. Toplam kayıplardan bakır ve mekanik kayıpları çıkarıldığı takdirde, histerezis kaybı hesaplanır. Sonuç olarak çekirdek kaybı, toplam kayıplardan bakır ve mekanik kayıpların çıkarılmasıyla belirlenebilir.

Üretilen prototip EAKMSM'lerin faz endüktanslarının ölçülmesi için farklı bir deney seti kurulmuştur. Bu test düzeneği sayesinde ölçülen endüktans değerleri simülasyon sonuçları ve analitik hesaplardan alınan sonuçlar ile karşılaştırılabilecektir. Doğrudan EAKMSM üzerinde çalışma esnasında endüktans ölçümünün yapılması zor olacağı için ölçülen endüktans değeri farklı tipteki nüveler arasında karşılaştırılmıştır. Her iki farklı nüveli EAKMSM'nin endüktans değerlerinin oranı, deneysel verilerin analizi yoluyla belirlene-

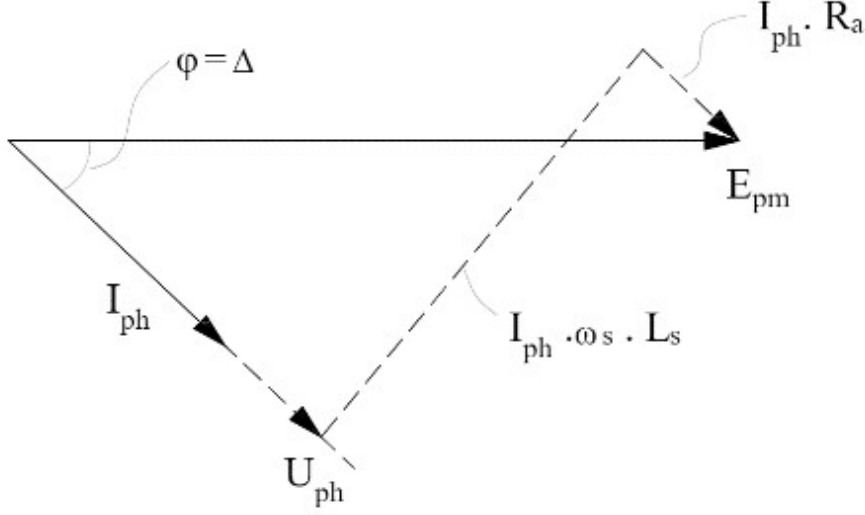


Şekil 7.4: EAKMSM tek faz eş değer devresi.

bilir. Bu amaçla, çeşitli hızlarda zıt EMK değerlerine orantılı ölçümler alınabilir. Denklemler (7.1 - 7.5), tork, zıt EMK ve faz endüktansı arasındaki bağlantıyı kurmak için kullanılmaktadır. Deneysel verileri kullanarak, her iki EAKMSM'nin endüktans değerleri arasındaki gerçek ilişki tespit edilebilir. Ayrıca, faz endüktanslarının oranı denklemler (7.1 - 7.5) kullanılarak analitik olarak türetilir. Endüktans değerlerini deneysel olarak ölçerken, EAKMSM DC motorla tahrik edilerek alternatör modunda çalıştırılır. Ardından yük dirençleri faz çıkışlarına yıldız şekilde bağlanır. Alternatör modu, EAKMSM'lerde hem faz akımı hem de faz gerilimi değerlerinin sinüzoidal bir dalga formunda çıkmasını sağlar, bu da daha kesin ölçümlere olanak tanır. Öte yandan, motor modunda voltaj dalga formu üzerinden gerilim okuma güvenilir değildir. Şekil 7.4'de ve şekil 7.5'de gösterildiği gibi, elektriksel dirençle yüklenmiş EAKMSM'yi alternatör modunda çalıştırarak sabit bir faz akımı oluşturulmuştur. Sabit faz akımını 2000 dev/dak ile 10000 dev/dak arasında korumak için değişken dirençli yük değerleri ile deneyler yapılmıştır. Belirli hız değerlerinde yük üzerinde elde edilen zıt EMK ve gerilim değerleri, denklemlerde kullanılarak endüktans ölçümüne olanak sağlamaktadır.

$$T = \frac{3 * k_e * U_{ph}}{\omega_s * L_s} * \sin \Delta = \frac{3 * (E_{pm} - I_{ph} * R_a) * I_{ph}}{\omega_s} * \cos \varphi \quad (7.1)$$

Rezistif yükler için aşağıdaki varsayım yapılabilir.



Şekil 7.5: EAKMSM tek faz eş değer fazör diagramı.

$$\Delta = \varphi \quad (7.2)$$

$$\Delta = \arccos \left(\frac{U_{ph}}{E_{pm} - \frac{I_{ph} * R_a}{\cos \varphi}} \right) \quad (7.3)$$

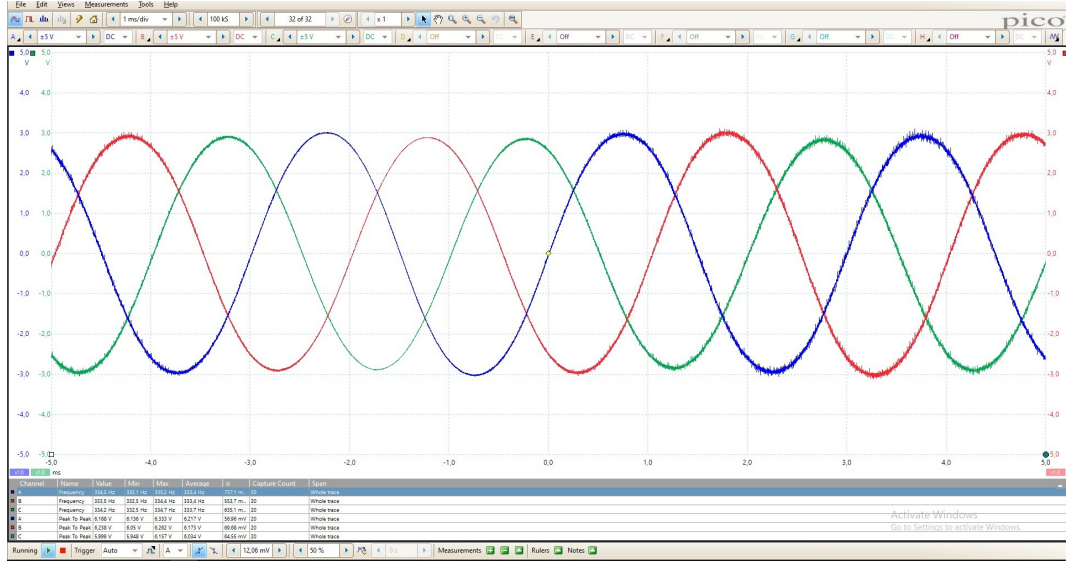
$$\Delta = \arccos \left(\frac{U_{ph} + I_{ph} * R_a}{E_{pm}} \right) \quad (7.4)$$

$$\frac{L_{smc}}{L_{go}} = \frac{\tan(\Delta_{smc})}{\tan(\Delta_{go})} \quad (7.5)$$

7.2 Deney Sonuçları

7.2.1 Zıt EMK Ölçüm Testleri

Şekil 7.6’de, 5000 dev/dak hızında YMK nüveli EAKMSM için osiloskop ile ölçülen endüklenen gerilimin dalga formlarını göstermektedir. 3 fazlı sistem için tepe-tepe rms gerilim değeri 5.81 Volt olarak çıkmaktadır. Toplam harmonik bozulma değeri 5000 dev/dak’da %2.1 olarak ölçülmüştür ve daha düşük hızlarda %4.05’e kadar yükselmektedir.

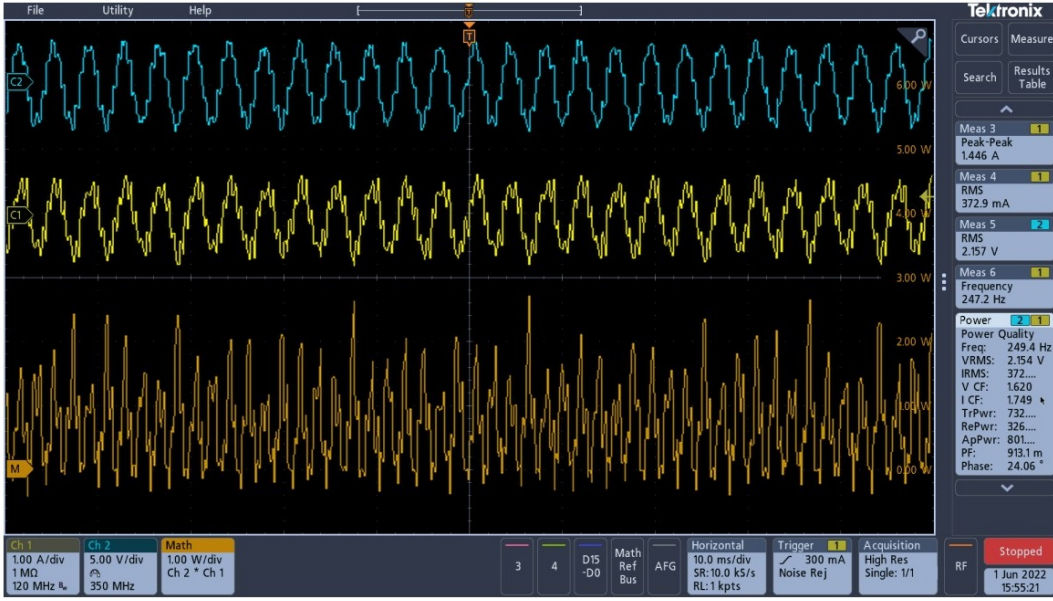


Şekil 7.6: EAKMSM YMK nüve için 5000 dev/dak'da ölçülen zıt EMK değeri.

Şekil 7.8'de verilen grafikte ise zıt EMK verisi farklı hızlar için ölçülmüştür ve önceki bölümlerde verilen analitik ve simülasyon değerleri ile karşılaştırılmıştır. Hız aralığı 1000 ve 10000 dev/dak arasında olacak şekilde belirlenmiştir. Her bir hız artışında 250 dev/dak'lık adımlar kullanılmıştır. Deneysel testlerde zıt EMK 1000 dev/dak'da 1.135 V ve 10000 dev/dak'da 11.31 V olarak ölçülmüştür.

Şekil 7.9'de, 5000 dev/dak hızında TYLÇ nüveli EAKMSM için osiloskop ile ölçülen indüklenen gerilimin dalga formlarını göstermektedir. 3 fazlı sistem için tepe-tepe ortalama gerilim değeri 6.03 Volt olarak çıkmaktadır. Toplam harmonik bozulma değeri 5000 dev/dak'da %2.4 olarak ölçülmüştür.

Şekil 7.10'de TYLÇ manyetik çekirdekli EAKMSM bir fazının tepe-tepe zıt EMK değişimi verilmiştir. Zıt EMK, 10000 dev/dak'da devir hızında 14.47 V olarak ölçülmektedir. Analitik analiz sonucu, hız ve gerilim değişiminin doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Deneysel test sonuçları, TYLÇ çekirdekli EAKMSM'de endüklenen zıt EMK değerinin YMK çekirdekli EAKMSM'den daha yüksek olduğunu göstermektedir.

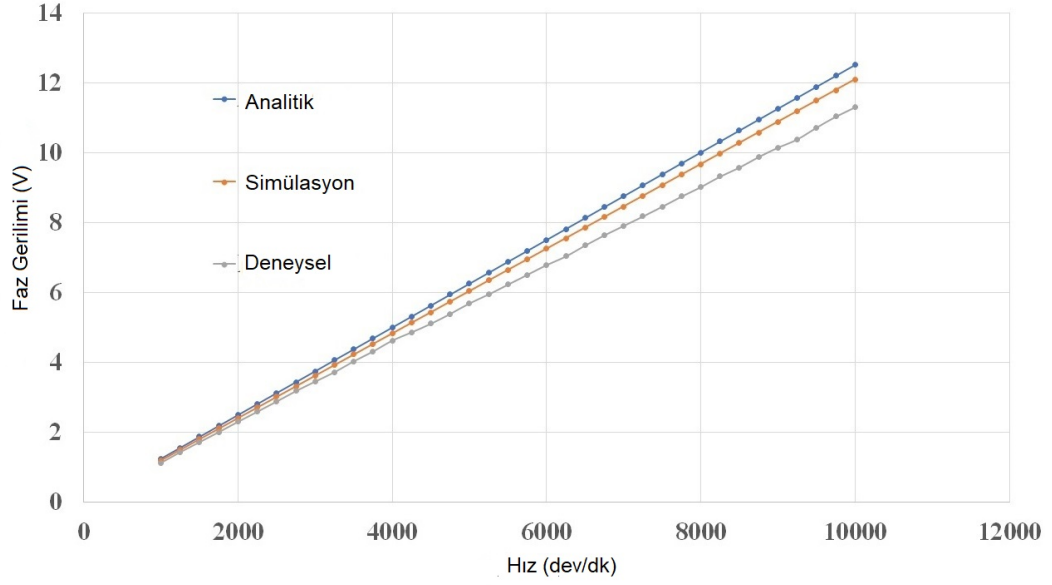


Şekil 7.7: 4000 dev/dk hızda faz-nötr arası akım, gerilim değerleri ve faz gücü ölçüm sonuçları.

Şekil 7.11’de tüm prototip makinelere ait zıt EMK sabitleri bulunmuştur. Düşük hızlar için zıt EMK sabiti daha yüksek iken makine hızlandıkça bu değerler belli bir seviyede sabit kalmaktadır. Aşağıdaki tablo 7.1’da görüldüğü gibi özellikle YMK1 ve TYLÇ1 değerleri birbirlerine oldukça yakın çıkmaktadır. Fakat YMK2 prototipinde ise olması gereken hava aralığı uzunluğu miktarı üretim zorlukları nedeniyle daha yüksek olmaktadır. Bu yüzden geri kalan deneylerde YMK1 ve TYLÇ1 kullanılmıştır. Bunun yanında analitik olarak YMK1 için 11.94 mV/rad değerine karşılık simülasyon sonucu bulunan değer ise 10.84 mV/rad olmaktadır. Ölçülen gerçek değer ile analitik sonuç arasında %6.22 ve simülasyon sonucunda ise %3.55’lik bir hata oranı bulunur. Bu durumda deneysel verilerin hem analitik hem simülasyon sonuçları ile örtüştüğü söylenebilir.

7.2.2 Moment ve Çekirdek Kaybı Ölçüm Testleri

Bu bölümde ilk olarak deneysel anlık ölçüm ile tork değeri ve dalgalanması gösterilecektir. Ardından YMK1 ve TYLÇ1 prototipleri özelinde farklı hızlar ve akım değerleri için tork ölçümü yapılacaktır. Ardından bulunan tork değerleri



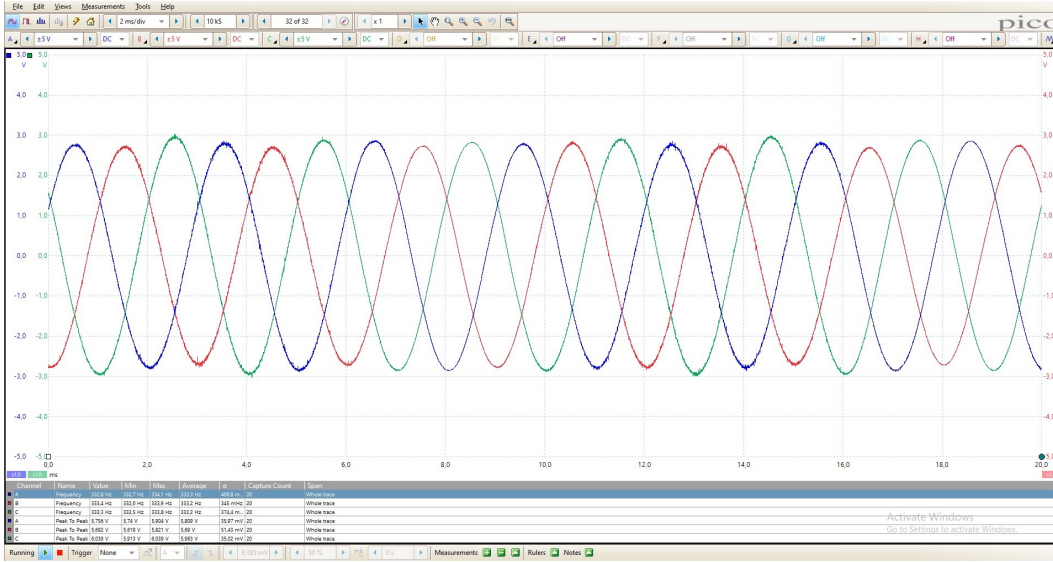
Şekil 7.8: EAKMSM YMK nüve için farklı hızlardaki zıt EMK değerlerinin grafiği.

Ortalama (mV/rad)	YMK1	YMK2	TYLÇ1	TYLÇ2
Deneysel	11.24	9.55	11.79	10.93
Simülasyon	10.84	9.22	11.54	10.63
Analitik	11.94	9.78	12.03	11.22

Tablo 7.1: Prototip EAKMSM'ların ortalama zıt EMK sabiti değerleri.

ve hız bilgisi üzerinden çıkış gücü bulunarak EAKMSM ait histeresis kayıp değerleri elde edilerek, analitik sonuçlar ile karşılaştırılacaktır.

Anlık olarak tork dalgalılığını ölçmek için YMK1 prototipi üzerinde testler yapılmıştır. Şekil 7.12'de akım probundan alınan akım bilgisi görülmektedir. Akım probu 1 mA faz akımı için 1 mV üretecek şekilde kalibre edilmiştir. Prototip hızı 2500 dev/dak olarak belirlenmiştir. Bunun yanında tork değeri 100 ms aralıklarla dinamik olarak ölçülerek şekil 7.13'da gösterilmiştir. Bu ölçüm değerleri için tork dalgalanmasının yaklaşık %4.1 olduğu gözlemlenmiştir. Görüldüğü gibi üretilen prototipler boyutları göz önüne alındığında tork dalgalılığı oldukça düşük düzeydedir.

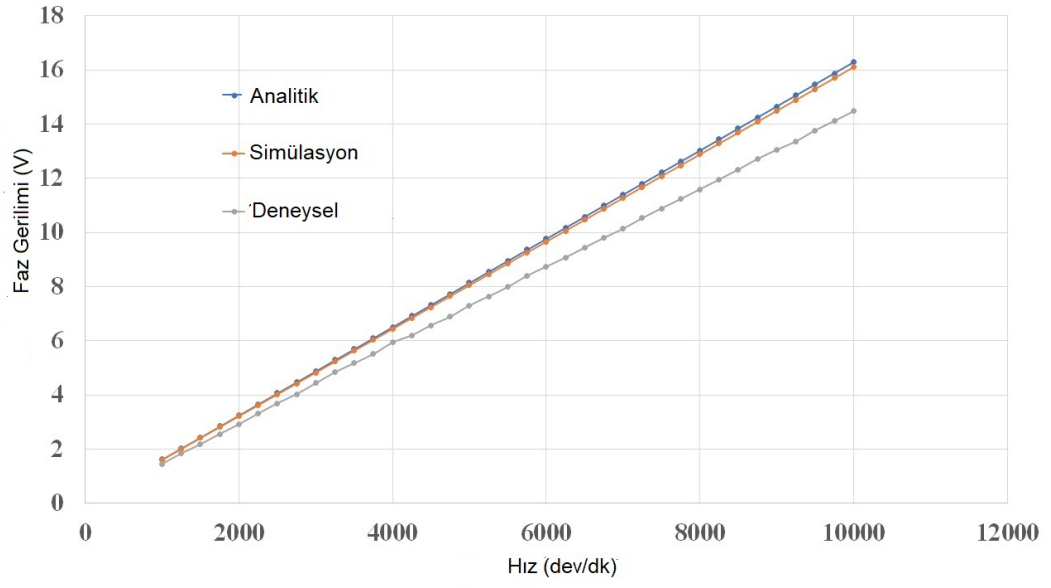


Şekil 7.9: EAKMSM TYLÇ nüve için 5000 dev/dak'da ölçülen zıt EMK değeri.

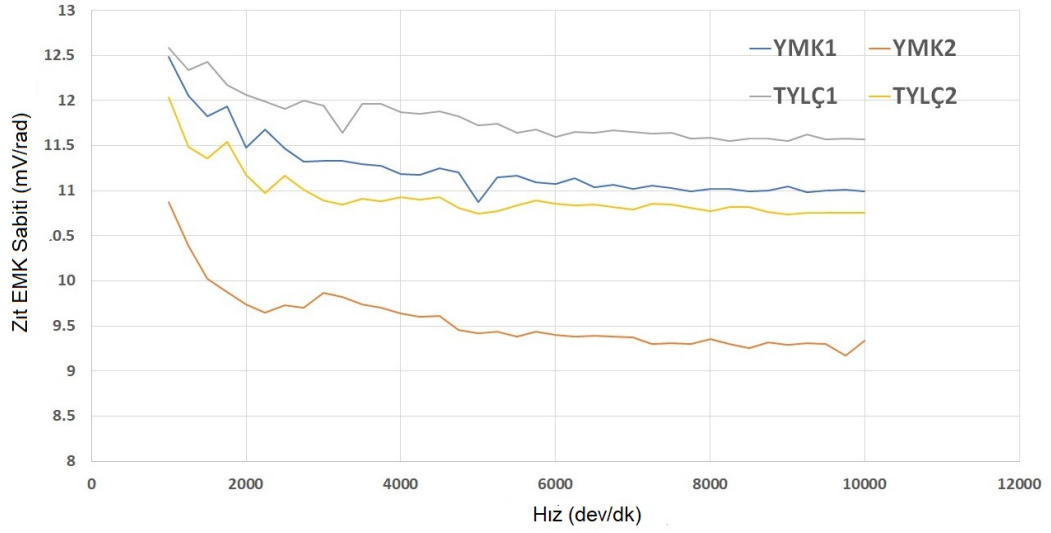
YMK malzemesi ile yapılan EAKMSM için deneysel olarak ölçülen tork değerleri şekil 7.14'da verilmiştir. EAKMSM çıkış torku için yapılan analitik hesaplar, deneysel sonuçlarla uyumludur. YMK EAKMSM tork sabiti, deneysel test sonuçlarına göre yaklaşık 9.58 mNm/Arms olarak bulunmuştur. Analitik sonuçlara göre tork sabiti yaklaşık 9.89 mNm/Arms olarak hesaplanmaktadır. Deneysel tork sabiti, analitik olandan %3.13 daha düşüktür.

Şekil 7.15'de TYLÇ1 prototipine ait farklı hızlarda deneysel olarak ölçülen tork değerleri gösterilmektedir. Deneysel sonuçlar kullanılarak hesaplanan tork sabiti 11.28 mNm/Arms olmaktadır. Analitik olarak bulunan değer ise 10.45 mNm/Arms'e karşılık gelmektedir. Bu değer %7.35 daha yüksektir. Her iki nüve karşılaştırıldığında TYLÇ'den yapılan EAKMSM, YMK olana göre ortalama %15.07 daha fazla tork üretmektedir.

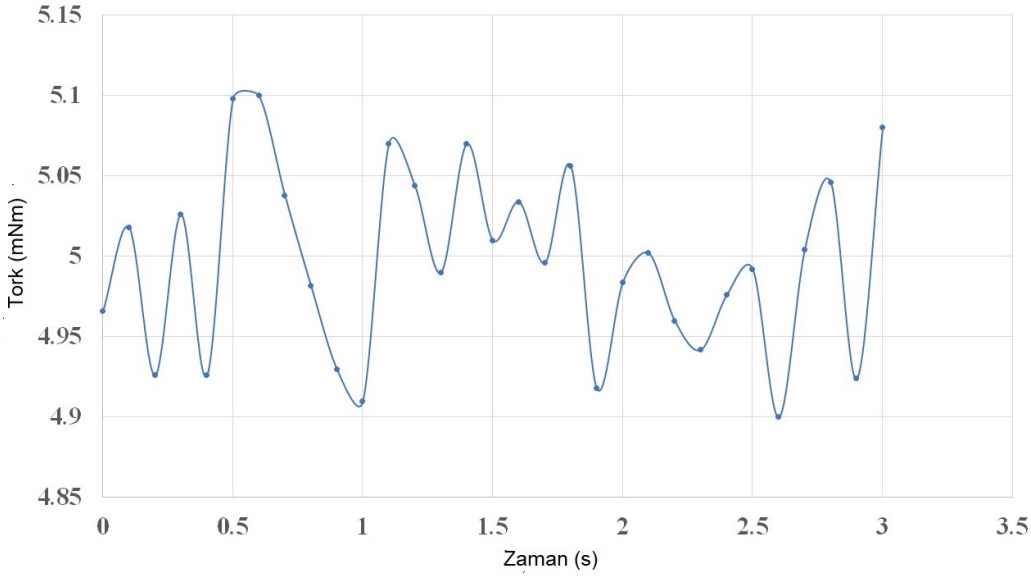
Şekil 7.16'de YMK1, TYLÇ1 ve TYLÇ2 EAKMSM ait tork sabitlerinin hıza göre değişimi verilmektedir. Her bir sabit 1 A'lık faz akımı altında elde edilen tork değerlerine göre hesaplanmıştır.



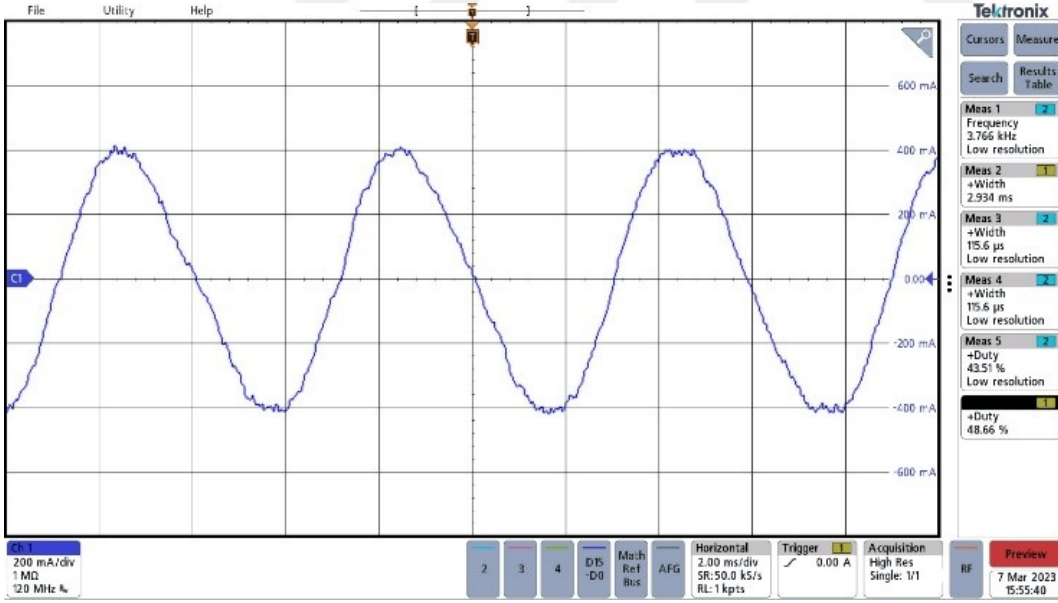
Şekil 7.10: EAKMSM TYLÇ nüve için farklı hızlardaki zıt EMK değerlerinin grafiği.



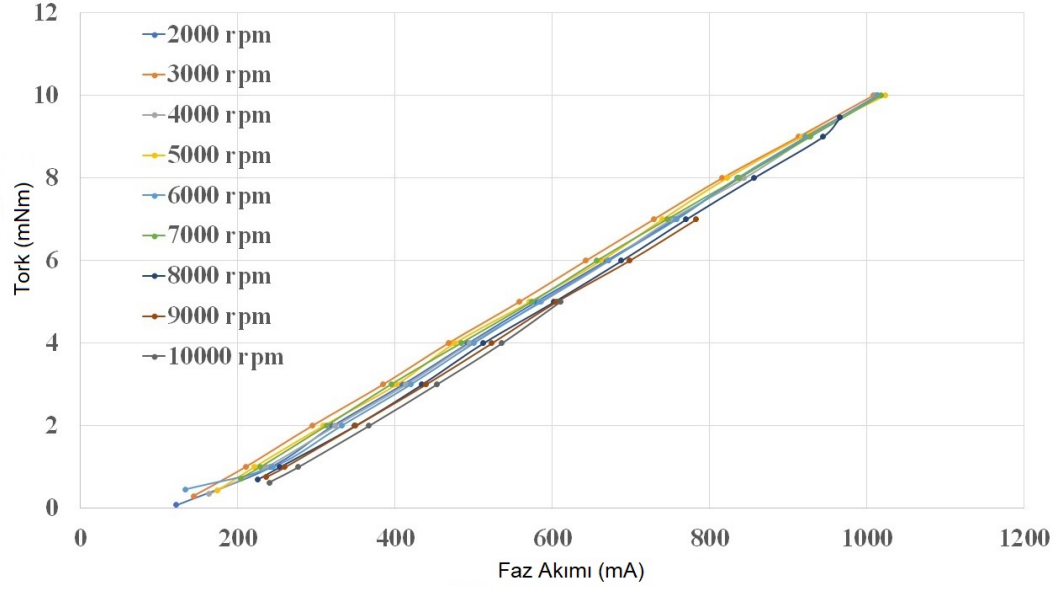
Şekil 7.11: EAKMSM zıt EMK sabitlerinin hıza göre değişim grafiği.



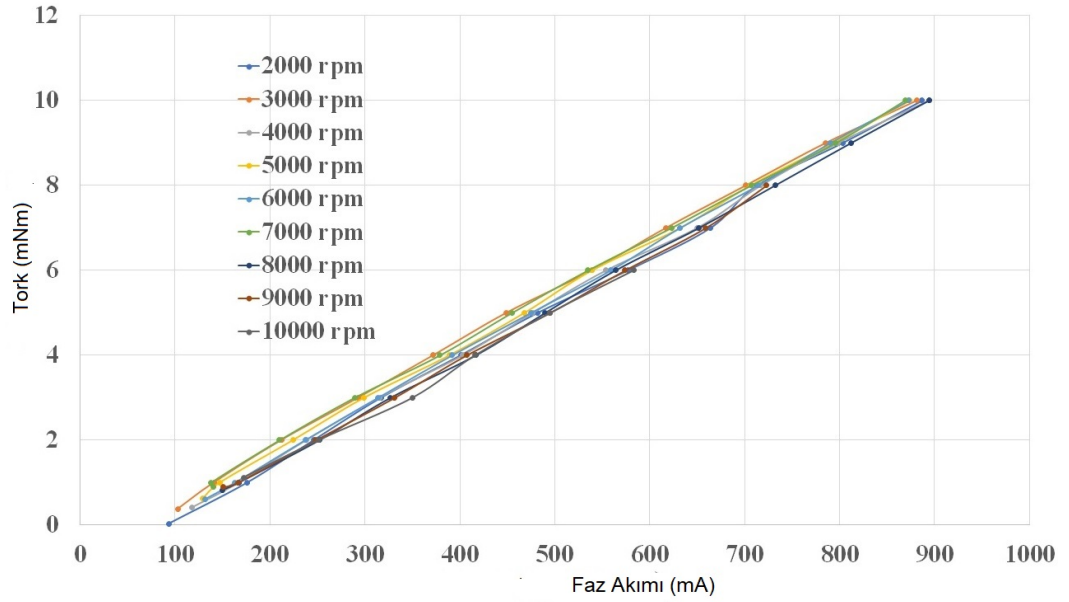
Şekil 7.12: EAKMSM YMK1 dinamik tork ölçümü.



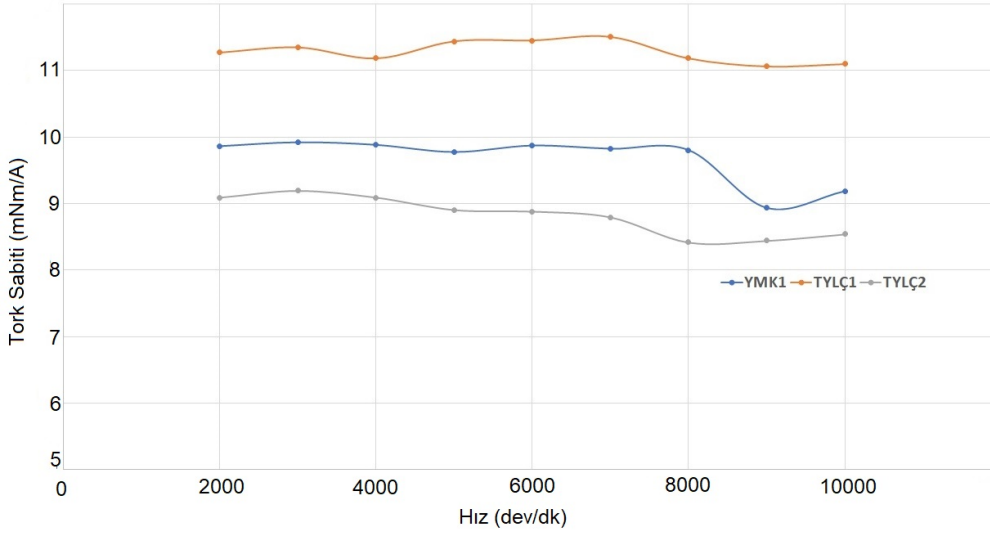
Şekil 7.13: EAKMSM YMK1 dinamik akım ölçümü.



Şekil 7.14: EAKMSM YMK1 farklı hızlardaki tork ölçüm grafiği.



Şekil 7.15: EAKMSM TYLÇ1 farklı hızlardaki tork ölçüm grafiği.



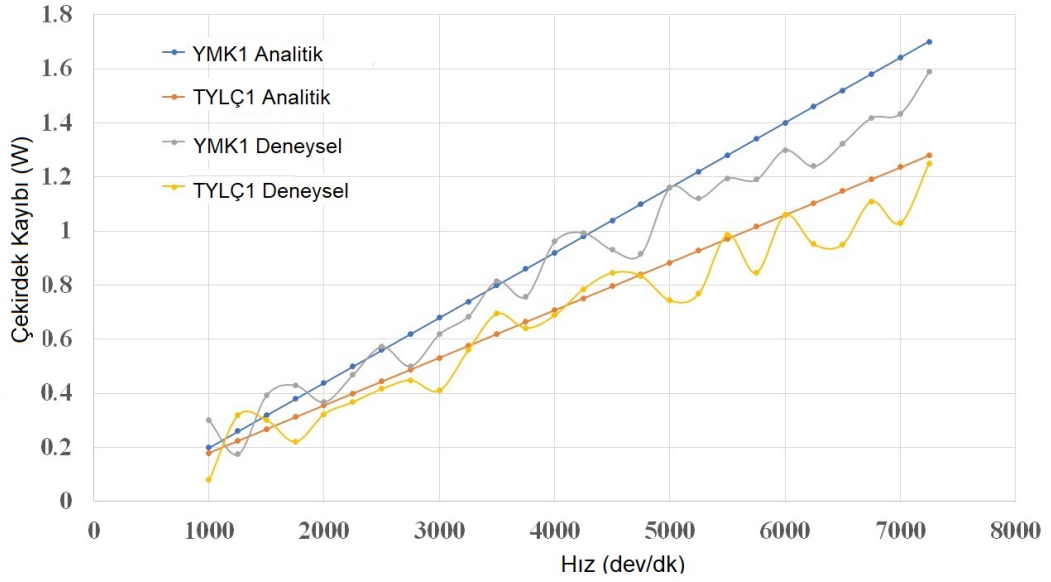
Şekil 7.16: EAKMSM tork sabitlerinin hıza göre değişim grafiği.

	YMK1	TYLÇ1	TYLÇ2
Ortalama (mNm/A)	9.67	11.28	8.81

Tablo 7.2: Prototip EAKMSM'ların ortalama tork sabiti değerleri.

Bu bölümde EAKMSM TYLÇ ve YMK malzemeleri ile yapılan prototiplerin çekirdek kayıpları ve çıkış torku karşılaştırılmış ve ölçülmüştür. Deneysel sonuçlara göre, TYLÇ malzemesi YMK malzemesine göre ortalama %20.33 daha az demir kaybına sahip ve ortalama %15.07 daha fazla tork üretebilmektedir. Bu durum TYLÇ malzemenin manyetik akı yoğunluğu açısından daha yüksek doyma değerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

EAKMSM çekirdek kaybı test sonuçlarına göre histerezis kaybının doğrudan hızla orantılı olmasında dolayı daha baskın olduğu anlaşılmaktadır. Çıkan deneysel sonuç analitik çekirdek kaybı modelimize de aynı zamanda uymaktadır. Deneysel testde hız aralığı EAKMSM için 1000 dev/dak ve 7250 dev/dak arasında tutulmuştur. Farklı tork değerleri için deneylerin ortalama deneysel çekirdek kaybı değerleri belirlenmiştir ve ardından analitik değerlerle

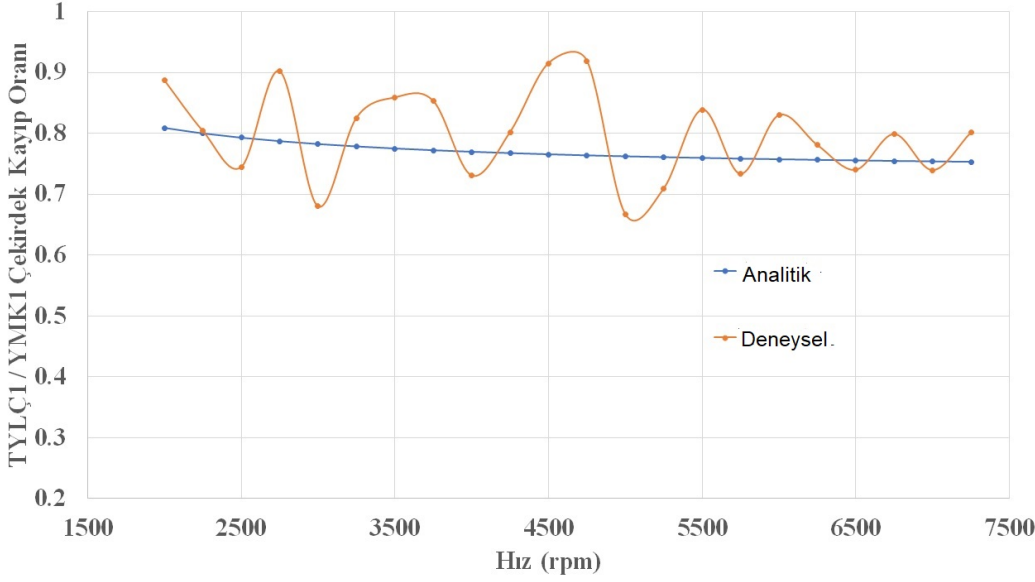


Şekil 7.17: EAKMSM farklı hızlardaki çekirdek kayıpları grafiği.

karşılaştırılmıştır. Hızın arttığı durumda YMK çekirdek kayıpları TYLÇ prototipinden daha yüksek olmaktadır. Şekil 7.17’de analitik sonuçların deneysel sonuçlarla başarılı bir şekilde eşleştiğini görülmektedir.

Her iki malzemenin aynı hızda çekirdek kayıplarının oranları Şekil 7.18’de verilmiştir. Kayıplar oranı, TYLÇ çekirdek kaybının YMK çekirdek kaybına bölünerek hesaplanmıştır. Analitik sonuçlar, kayıp oranının farklı hız seviyelerinde yaklaşık olarak aynı olduğunu göstermektedir. Analitik değerlere göre TYLÇ çekirdek kaybı, YMK’ya göre %21.17 daha azdır. Deneysel sonuçlara göre, TYLÇ, ortalama %20.33 daha az çekirdek kaybına sahiptir. Bununla birlikte, çekirdek kaybının ölçülmesi, daha düşük mekanik kayıp ve zıt EMK değerleri nedeniyle düşük hızlarda oldukça zor olmaktadır. Bu nedenle yüksek hızlardaki sonuçlar daha doğru bir sonuç vermektedir.

Deney sonuçları kullanılarak hesaplanan tork sabiti 11.28 mNm/Arms olarak bulunmuştur ve analitik değer olan 10.45 mNm/Arms göre %7.35 daha yüksektir. Bu nedenle, TYLÇ çekirdek, YMK çekirdeğe göre ortalama olarak %15.07 daha fazla tork üretir.

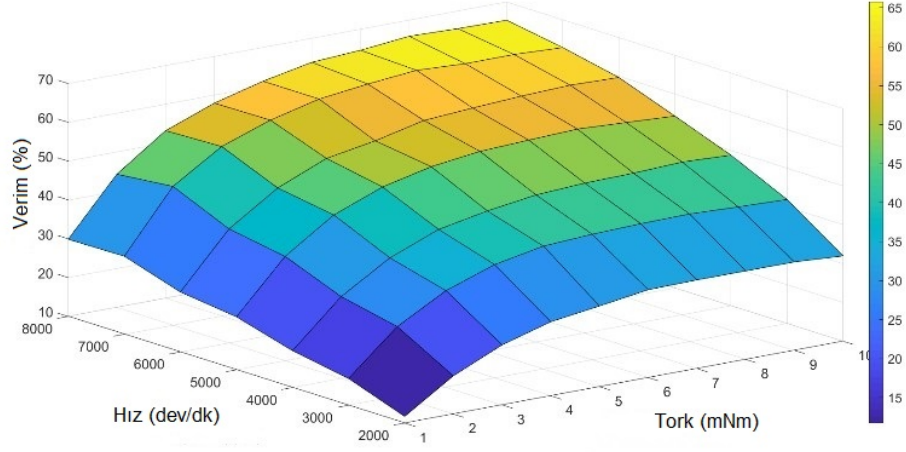


Şekil 7.18: EAKMSM farklı hızlardaki çekirdek kayıplarının oranı grafiği.

Şekil 7.19'de, TYLÇ nüveli EAKMSM için verimlilik grafiklerini gösterilmektedir. Maksimum verimlilik, 8000 dev/dk ve 10 mNm'de %65.40 olarak kaydedilmiştir. Hız ve yük değerlerinin artmasıyla birlikte EAKMSM'nin verimliliği de artmaktadır. Şekil 7.21'de, YMK nüveli EAKMSM için verimlilik grafiklerini gösterilmektedir. Maksimum verimlilik, 8000 dev/dk ve 10 mNm'de %58.25 olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, aynı yük ve hızda TYLÇ çekirdek, YMK çekirdeğe göre %12.27 daha yüksek verimliliğe sahiptir.

7.2.3 Endüktans Ölçüm Testleri

Bu bölümde analitik, simülasyon ve deneysel verilerden elde edilen faz endüktansı karşılaştırılması yapılmıştır. Hem analitik hem de simülasyon verilerinde endüktans bileşenleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Deneysel verilerde ise bu ayırım yapılamadığı için LCR metre kullanımı ile dinamik ölçüm testleri yapılmıştır. YMK ve TYLÇ prototiplerine ait tüm kaçak endüktans bileşenleri ve toplam faz endüktansı, daha önce bahsedilen denklemler kullanılarak analitik olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar aşağıdaki şekil 7.23'de gösterilmektedir. Malzemelere ait akıma bağlı göreceli manyetik geçirgenlik değişiklikleri



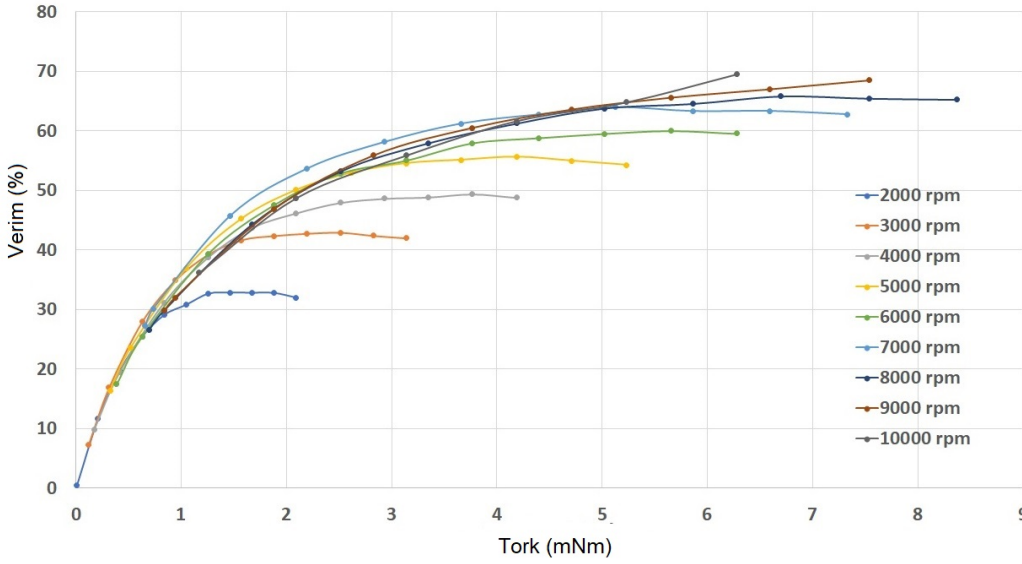
Şekil 7.19: Hız ve tork değerlerinde ölçülen TYLÇ nüveli EAKMSM verim haritası.

şekil 7.24’da görülebilir. Stator sargılarındaki sinüzoidal akım nedeniyle, sıfır faz akımındaki değer analitik hesaplamalarda kullanılabilir. Faz endüktansı TYLÇ için analitik olarak 288.34 uH ve YMK malzemesi için 217.04 uH olarak bulunmaktadır. Kaçak endüktans hesaplamalarında kullanılacak katsayılar tablo 7.3’de hesaplanmış ve verilmiştir. Görüldüğü gibi yüksek manyetik doyma altında YMK malzemesi azalan manyetik geçirgenliği ile birlikte katsayı anlamında TYLÇ malzemeye göre daha fazla etkilenmektedir.

Coefficient	TYLÇ	YMK
k_{slot}	0.944	0.537
k_{tooth}	0.941	0.525
k_{end}	0.998	0.975
k_m	0.979	0.770

Tablo 7.3: Kaçak endüktans satürasyon katsayıları.

YMK prototipi için her sargı için sonlu elemanlar simülasyonu ve ölçülen değerler şekil 7.25’de verilmiştir. Toplamda 9 oluk bulunmaktadır. Analitik ortalama değer 46.4 uH’dır. Ancak simülasyonunda 52.16 uH ve deneyde 53.05 uH olarak bulunmuştur.



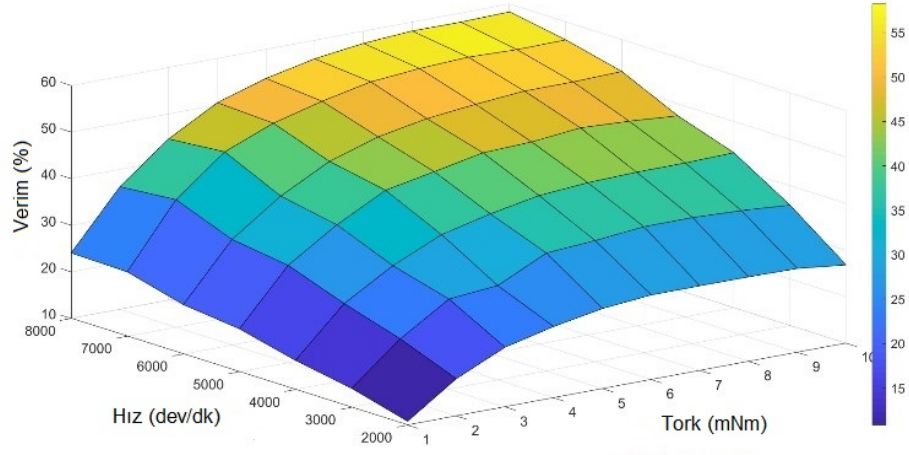
Şekil 7.20: Farklı hız ve tork değerlerinde ölçülen TYLÇ nüveli EAKMSM verim grafiği.

Şekil 7.26'de, EAKMSM TYLÇ için her sargının sonlu elemanlar simülasyonu ve ölçülen değerler verilmektedir. Analitik ortalama değer 65.51 uH'dir. Ancak simülasyon sonucunda 69.97 uH ve deneysel sonuçlarda 70.34 uH olarak bulunmuştur. Deney ve simülasyon sonuçlarında bulunan değerler birbirine oldukça yakındır. Her iki çekirdek türü için hesaplanmıştır. Ölçülen faz endüktans değerleri tablo 7.4'de verilmiştir. Bu sonuca göre, YMK malzemesinin faz endüktans değeri TYLÇ kullanılan prototipe daha düşüktür.

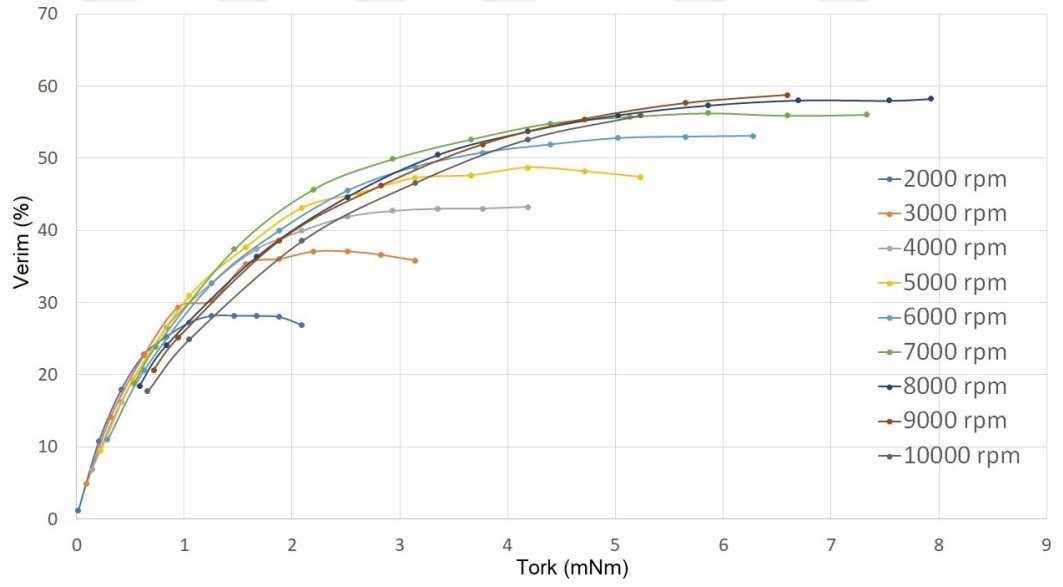
	TYLÇ (uH)	YMK (uH)
Analitik	288.34	217.04
Simülasyon	296.97	225.45
Deneysel	288.9	204.86

Tablo 7.4: Prototip EAKMSM'ların analitik, simülasyon ve deneysel faz endüktanslarının karşılaştırılması.

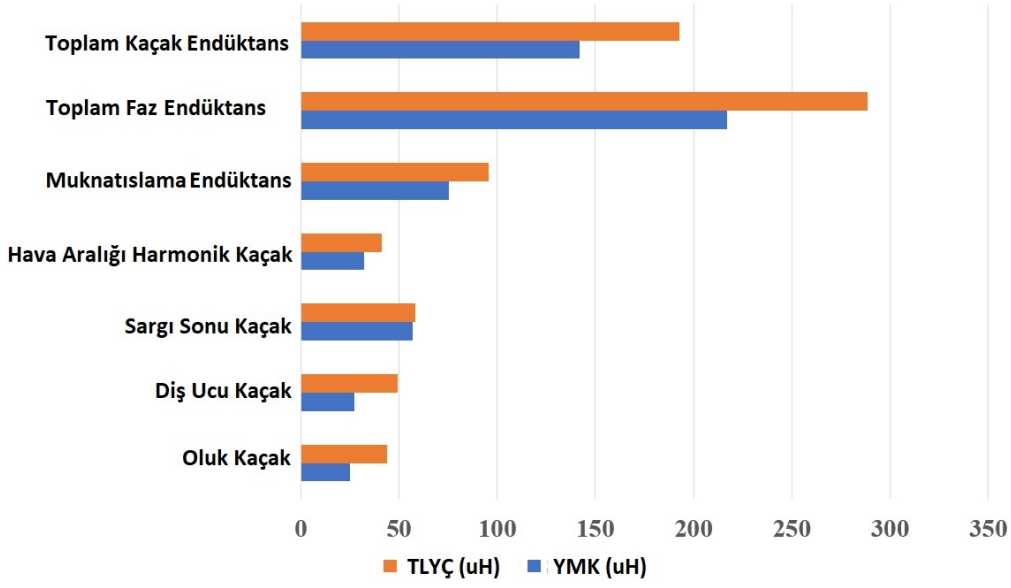
Şekil 7.27'de, YMK ve TYLÇ çekirdeklerinin faz endüktanslarının, farklı hızlarda ölçülen tork ve faz voltajlarına göre oranı verilmektedir. Ortalama endüktans oranı değerleri, zıt EMK ve tork ölçüm deneylerine göre deneysel



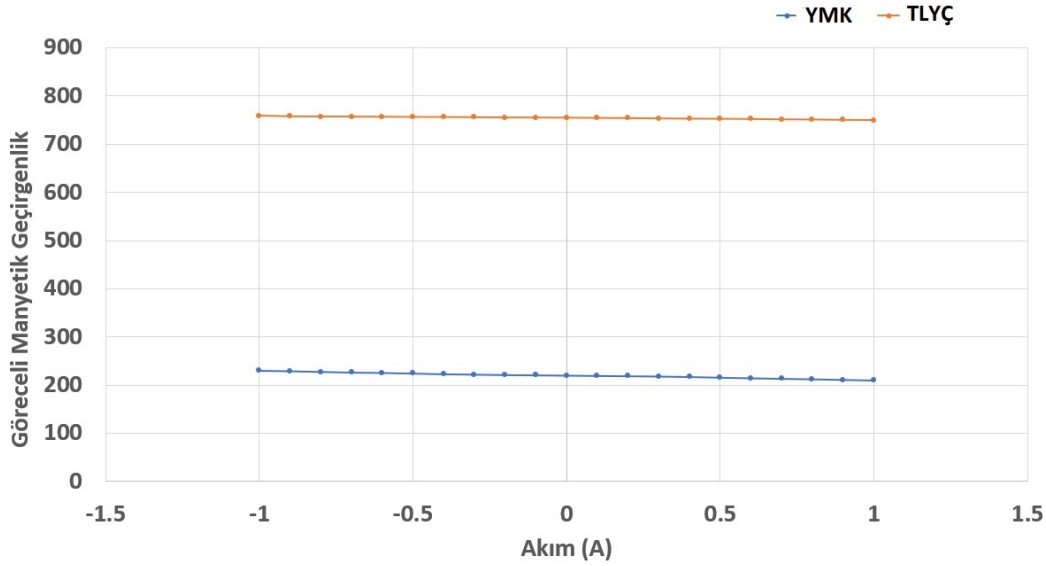
Şekil 7.21: Farklı hız ve tork değerlerinde ölçülen YMK nüveli EAKMSM verim haritası.



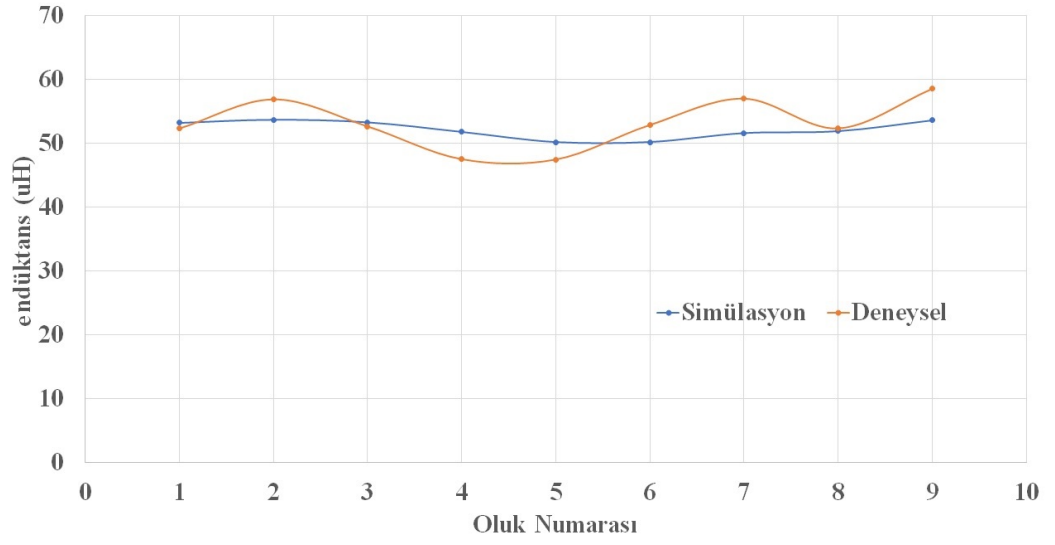
Şekil 7.22: Farklı hız ve tork değerlerinde ölçülen YMK nüveli EAKMSM verim grafiği.



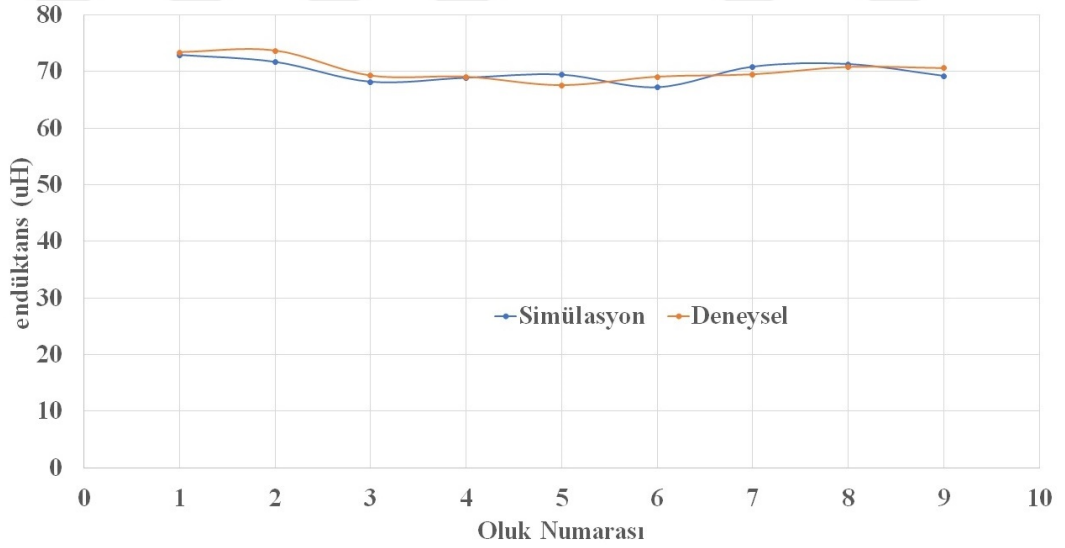
Şekil 7.23: EAKMSM analitik endüktans bileşenleri değerleri.



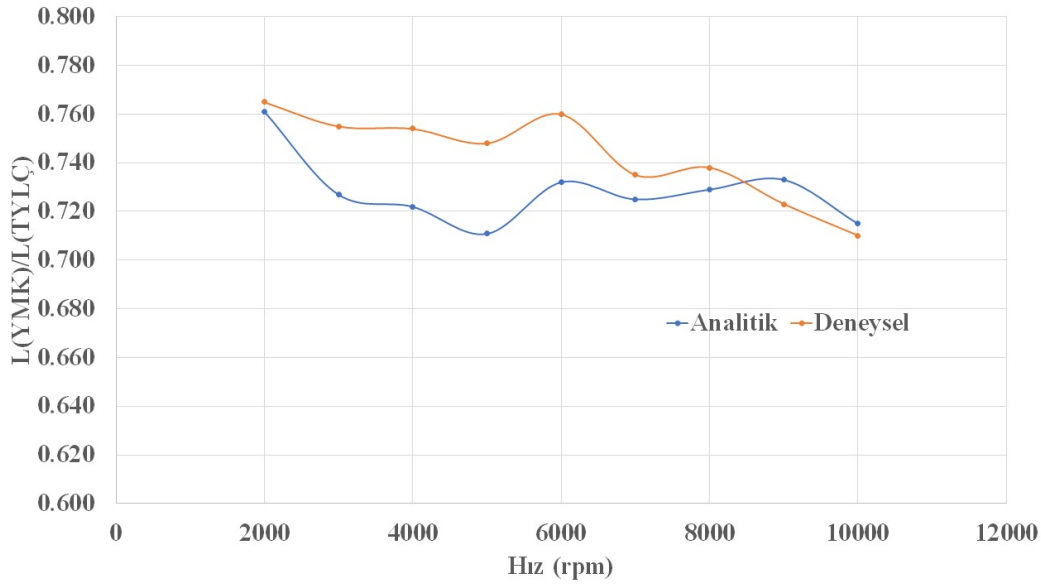
Şekil 7.24: TLYÇ ve YMK statörler için relatif manyetik geçirgenlik değerinin faz akımına göre değişimi.



Şekil 7.25: EAKMSM YMK oluk başına endüktans değerleri.



Şekil 7.26: EAKMSM TYLÇ oluk başına endüktans değerleri.



Şekil 7.27: EAKMSM YMK ve TYLÇ endüktans oranları grafiği.

değerler için 0.743 ve analitik değerler için 0.728'dir. LCR metre ölçüm cihazına göre 1 kHz'de ölçülen endüktans oranı 0.709'dur.

Farklı çekirdek türleri için faz endüktansının bileşenleri analitik olarak ortaya çıkarılmıştır. Tablo 7.5'de, her iki malzemeli EAKMSM için endüktans bileşenlerinin değerlerini göstermektedir. Toplam faz endüktansı YMK için 217.04 uH iken, TYLÇ için 288.34 uH'dir. Bu değer TYLÇ için analitik hesaplamadan %32.85 daha yüksektir.

	TYLÇ (uH)	YMK (uH)
Mıknatıslama	95.63	75.18
Hava aralığı harmonik kaçak	41.25	32.42
Sargı sonu kaçak	58.19	56.86
Oluk kaçak	44.09	25.12
Diş ucu kaçak	49.15	27.44
Toplam	288.34	217.04

Tablo 7.5: Prototip EAKMSM'ların analitik endüktans bileşenleri.

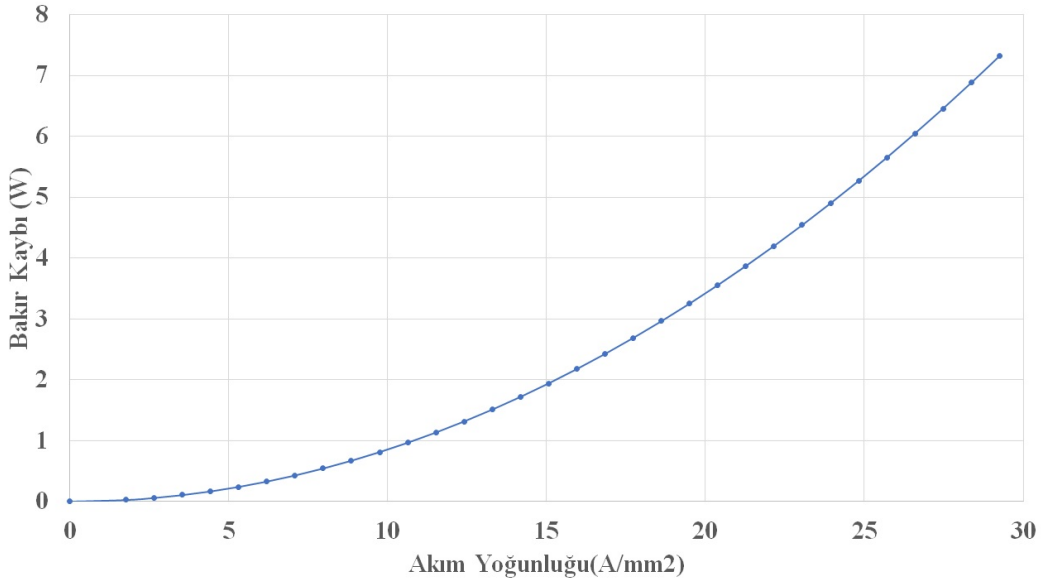
Her oluk için deneysel olarak ölçülen endüktans değerleri, sonlu elemanlar analizi yardımıyla yapılan simülasyon sonucu bulunan endüktans değeri ile büyük ölçüde eşleşmektedir. YMK için simülasyon ile deneysel ölçüm arasındaki oluk kaçak endüktansı oranı %99.4'tür ve TYLÇ için bu oran %97.2'tür. Faz endüktansı açısından, TYLÇ çekirdek için analitik ve simülasyon sonuçları birbirine çok yakındır, ancak deneysel olarak ölçülen endüktans değeri analitik olarak hesaplanan değerden %2.77 daha düşüktür. YMK malzemesi dikkate alındığında, simülasyon değeri analitik olarak ölçülen faz endüktans değerinden %3.875 daha yüksektir. Ancak ölçülen endüktans değeri sadece %6.373 daha düşüktür.

7.2.4 Termal Ölçüm Testleri

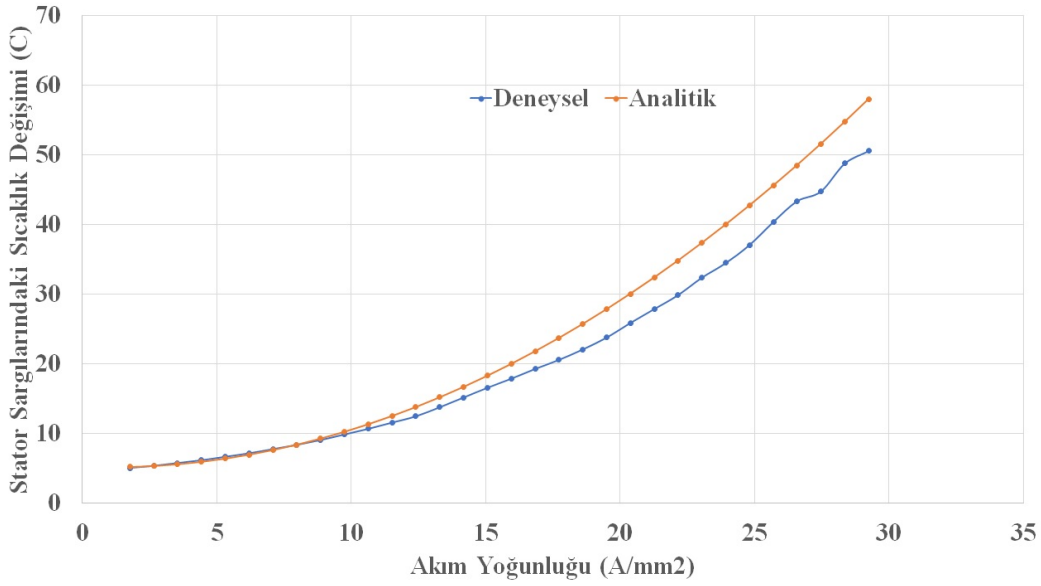
Bu bölümde üretilen prototip EAKMSM'lere ait termal analiz yapılmıştır. İlk olarak daha önceki bölümlerde elde edilmiş olan termal eşdeğer devresi ile analitik hesaplamalar yapılmış ardından ise kurulan deney düzeneği vasıtası ile sargılara ve dış gövdeye ait moment-sıcaklık ilişkisi kaydedilmiştir.

Şekil 7.28'de ve Şekil 7.29'de, yük değişikliğine bağlı olarak stator sargılarının sıcaklık değişimi, akım yoğunluğu 30 A/mm^2 olduğu değere kadar analitik denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Ardından deneysel olarak termokuplolar kullanılarak aynı yük değerleri için sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Analitik ve deneysel değerler arasındaki hata oranının nedeni, ölçümler sırasında sargıların tek bir noktasından veri alınmasıdır. Gerçek durumda sargılardaki sıcaklık değeri homojen olarak dağılmamaktadır. Bakır kaybı ile ilişkili sıcaklık değişimi stator sargıları boyunca homojen olarak dağılmadığı için bu konuda belli bir hata meydana gelmektedir. Her iki analiz arasındaki ortalama hata oranı %7.6'dır.

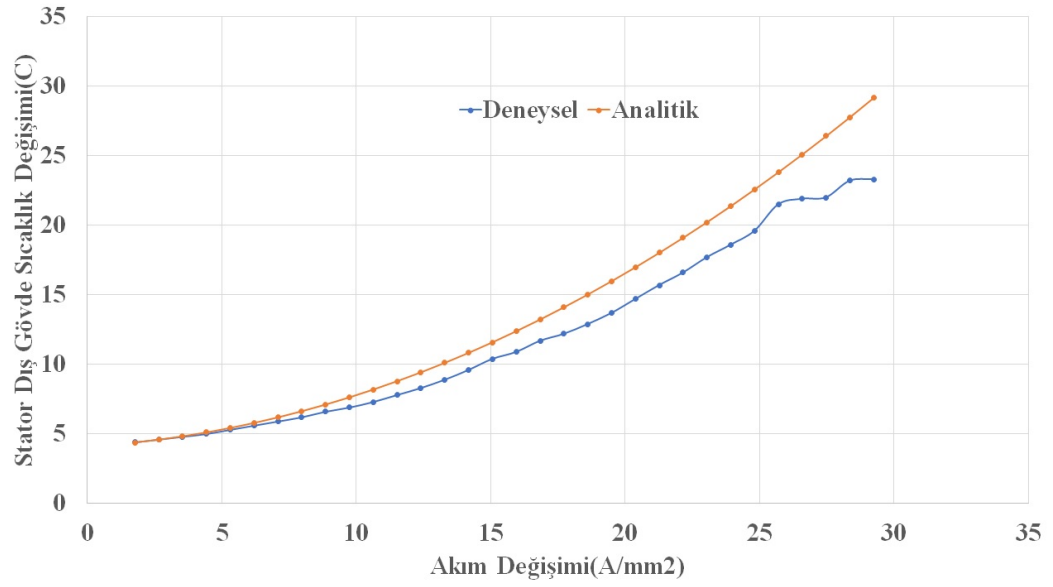
Şekil 7.30'de stator dış gövde sıcaklık değişimi gösterilmiştir. Hem analitik hem de deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Stator dış gövdesindeki sıcaklık dağılımı daha dengeli ve homojendir, bu da ölçümler sırasında önemli ölçüde



Şekil 7.28: EAKMSM bakır kayıp grafiği.



Şekil 7.29: EAKMSM stator sargı sıcaklık değişim grafiği.



Şekil 7.30: EAKMSM stator dış gövde sıcaklık değişim grafiği.

daha düşük hata oranlarına yol açar. Akım yoğunluğu 30 A/mm^2 olduğunda hata oranı %6.7 iken ortalama hata oranı %1.3'tür.

8 SONUÇLAR

Tez kapsamında EAKMSM tasarımı analitik olarak gerçekleştirildikten sonra sırası ile simülasyon ve prototip üretimi gibi çalışmalar yapılarak deneysel çalışmalara zemin hazırlanmıştır. Üretilen prototipler laboratuvar ortamında EAKMSM testleri için kullanılmıştır. Özellikle iki farklı malzeme olan YMK ve TYLÇ üzerinde durularak hem tasarım hem üretim anlamında incelenmiştir. Ardından elektriksel olarak birçok performans parametresine ait testler gerçekleştirilmiştir. EAKMSM'lerde kullanılan YMK ve TYLÇ malzemeleri, demir kayıpları ve çıkış torku açısından kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçlar, TYLÇ malzemesinin YMK malzemesine göre ortalama %20.33 daha düşük demir kaybına sahip olduğunu ve aynı zamanda ortalama %15.07 daha fazla tork üretebildiğini göstermektedir. Ayrıca, her iki malzeme için analitik olarak hesaplanan zıt EMK değerleri aynı olmasına rağmen, yüksek hızlarda özellikle TYLÇ çekirdeğinin deneysel olarak %27.94 daha fazla gerilim üretebildiği görülmüştür. Bu durum, TYLÇ malzemesinin manyetik akı yoğunluğu açısından daha yüksek doyuma değerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, düşük hızlarda, örneğin 2000 dev/dk gibi, her iki malzemeli nüve için zıt EMK değerleri yaklaşık olarak eşittir. Bakır kayıpları konusunda, TYLÇ malzemesi, aynı torku sağlayabilmesi için daha düşük bir akım gerektirdiğinden, bakır kayıplarını %27.75 azaltmaktadır. TYLÇ malzemesi, daha düşük demir kayıpları sayesinde makinanın daha yüksek bir termal yük kapasitesine sahip olmasını sağlamaktadır. Bu da daha fazla akım ve tork üretme potansiyelini işaret etmektedir. Aynı boyuttaki makineler için TYLÇ malzemesi, EAKMSM'lerin çeşitli performans ölçütlerinde YMK malzemesini geride bırakmaktadır.

Zıt EMK açısından TYLÇ çekirdek, YMK çekirdeğe göre ortalama olarak %4.89 daha fazla gerilim üretmektedir. Öte yandan, ölçümler tork açısından incelendiğinde, aynı faz akımıyla karşılaştırıldığında TYLÇ çekirdek %16.64 daha fazla tork üretebilmektedir. Diğer yandan, her iki EAKMSM'de maksimum torka dayalı olarak analiz edildiğinde, aynı faz gerilimi ve aynı hızda YMK

çekirdekli EAKMSM diğer malzemeye göre %41.04 daha fazla tork kapasitesine sahiptir.

EAKMSM prototiplerin entegre edilmesi beklenen MDD sistemi açısından incelenmesi şu şekildedir. Seçilen tasarıma göre belirlenen en yüksek MDD sistemi verimliliği %21.44 olduğu görülmektedir. 5000 dev/dak'da 4 L/dak debi için istenen tork değeri 6.71 mNm olmaktadır. Bu tork değeri, pompa tasarımına eklenecek iki gömülü EAKMSM tarafından sağlanacaktır. Her bir EAKMSM sisteme 10 mNm'lik bir tork değerini kolayca sağlayabilmektedir. Bu durumda her iki EAKMSM da eşzamanlı olarak çalıştırıldığında her bir EAKMSM'nin yaklaşık olarak 3.35 mNm tork üretmesi yeterli olacaktır. Bu tork değeri her EAKMSM için 0.35 Arms faz akımına karşılık gelmektedir ve motorların nominal akım değerinden çok daha düşüktür. Bu durumda termal olarak EAKMSM ısınması ve MDD sistemine etkinin olması gibi bir durum söz konusu olmayacaktır. Her iki farklı malzemede EAKMSM üretimi için kullanılabilir, fakat TYLÇ malzeme verim anlamında YMK'ye göre daha yüksek bir sonuç vermektedir. Eğer TYLÇ malzeme nüvede kullanılırsa 5000 dev/dak hızında toplam 2.46 W kayıp ile %65.4 verim elde edilebilir. Bu nominal çalışma noktasında, armatür sargısı sıcaklığı incelendiğinde, kayıplardan dolayı makinede ciddi bir ısınma olmadığı görülmektedir. Motor performansı istenen tork değerine göre yeterince yüksek olduğundan, her iki EAKMSM da birbirlerinin yedekleri olarak kullanılabilir. Bu durumda tek bir EAKMSM, 0.7 Arms faz akımı ile istenen debide MDD sistemini çalıştırabilir.

MDD sisteminin boyutları baz alındığında EAKMSM'ler, MDD geometrisinden dolayı oldukça küçük boyutlarda tasarlanmıştır. Sonuç olarak, EAKMSM kayıpları güç yoğunluğunun fazla olmasından dolayı geleneksel motorlara göre daha yüksek olmaktadır. EAKMSM verimliliği en yüksek olarak %65.4 olarak ölçülmüştür. Bu, özellikle bakır ve demir kayıpları gibi makine kayıplarının, çıkış gücüne göre baskın olmasından kaynaklanmaktadır. Sargı akım yoğunluğu, 1 Arms için 20.37 Arms/mm² olarak hesaplanmıştır. Bu değer geleneksel elektrikli motorlar için yüksek olsa da, anormal bir sıcaklık durumu

yaratmamaktadır. Sonuç olarak, tasarlanan EAKMSM ve entegre edilen MDD sistemi performansı diğer ticari pompalara göre umut vericidir.

Mevcut MDD sistemlerinin karşılaştırmalı bir listesi Tablol 8.1’da verilmiştir, burada tüm ana performans verileri görülebilir. Önerilen EAKMSM ve entegre edilen MDD sisteminin boyut ve hacim göz önüne alındığında mevcut sistemler ile rekabet edebilecek düzeydedir. Bunun yanında EAKMSM’lerin yüksek güç yoğunluğu ve geleneksel sistemlere göre fazladan bir motor bulunması MDD sistemini avantajlı hale getirmektedir.

Model	Ağırlık (gr)	Hacim (cc)	Hız (dev/dk)
Jarvik-2000	85	30	8000-12000
HeartMate II	290	63	6000-15000
HeartMate III	200	110.8	3000-9000
HeartWare	160	50	1800-4000
DuraHeart	540	180	1200-2600
Berlin Heart	200	84.8	1000-10000
Önerilen Sistem	190	66.44	2000-10000

Tablo 8.1: MDD sistemlerin karşılaştırılması.

Alınan sonuçlara göre her iki YMK ve TYLÇ malzemeleri manyetik nüve yapımında kullanılabilir. Bu sayede EAKMSM’ler için alternatif malzemelerin kullanımı başarılı olmaktadır. YMK ve TYLÇ malzemelerin küçük boyutlu EAKMSM’ler ile karşılaştırılması literatüre yeni katkılar sağlamaktadır. İlk olarak her iki malzemenin çekirdek kayıpları anlamında karşılaştırılması araştırılmıştır ve bu anlamda literatüre katkı sağlanmıştır. TYLÇ malzemenin YMK malzemeye göre yüksek hızlarda çekirdek kayıpları anlamında daha avantajlı olduğu söylenebilir. Bunun yanında literatürde farklı malzemeler kullanılarak EAKMSM’lerin kaçak endüktansları arasında karşılaştırma yapılan yayınlara rastlanmamıştır. Özellikle manyetik doygunluk durumunda malzemelerin kaçak akılar karşısında incelemesi literatürde bulunmamaktadır.

Daha önceki bölümlerde bahsedilen kaçak endüktans deneyleri ve analitik hesapları her iki malzemenin farklı davranışlarını ortaya koymuştur. Özellikle YMK malzemesi yarattığı düşük kaçak endüktans ile birlikte EAKMSM sahip olduğu maksimum tork miktarında avantajlı bir hale gelmektedir. Bu bakımdan EAKMSM'ler özelinde her iki malzemenin karşılaştırılması literatüre büyük bir katkı sağlayacaktır.

Her iki malzemenin karşılaştırılmasının yanında yenilikçi MDD tasarımı ile EAKMSM'lerin entegre edilmesi literatürde oldukça yeni bir konudur. Genel olarak radyal tipteki elektrikli tahrik sistemlerini kullanan mevcut sistemlere göre yeni tasarımın artıları bulunmaktadır. İlk olarak gömülü tipte olan tahrik sistemi ile 2 adet EAKMSM sisteme entegre edilmiştir. Böylece MDD sistemi gibi hayati cihazlara yedek bir tahrik sistemi kazandırılmıştır. Bunun yanında entegre edilen EAKMSM tek başına yeterli gücü istenen hızda üretebilmektedir. Çünkü EAKMSM'lerin güç yoğunluğu radyal tahrik sistemlerine göre oldukça yüksektir. Bir başka önemli özellik ise mekanik yapının elektrikli tahrik sisteminin yerleşimi dolayısı ile akış yönünden bozulmaması çok önemlidir. Önerilen yeni MDD sistemi ile bu sorunun önüne geçilmiştir.

Termal anlamda küçük boyutlu EAKMSM'lerin incelenmesi literatür anlamında yeni bir konudur. Yapılan deneyler ve hesaplamalar neticesinde EAKMSM'lerin çok yüksek akım yoğunluğu değerlerine kolayca çıkabildiği görülmüştür. Bu durumun incelenmesi ve ortaya konması literatürde yeni durum olacaktır.

9 ÖNERİLER

Tez kapsamında yenilikçi bir MDD sistemine entegre olabilecek EAKMSM tasarımı detaylı bir şekilde anlatılmıştır. EAKMSM üretiminde kullanılabilecek YMK ve TYLÇ malzemeleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Bunun yanında her iki malzeme için EAKMSM özelinde farklı konularda karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu konular sırasında çekirdek kayıpları, kaçak indüktans ve termal bölümleri öne çıkmaktadır. Bu konular incelendiğinde literatüre yapacağı katkı sayesinde ayrı ayrı önemli çalışmalar olacaktır. Bunun yanında tez kapsamında verilen EAKMSM tasarımı ve MDD sistemi entegrasyonunu ayrıntılı olarak anlatan bir çalışma yapılabilir. Bu sayede MDD sistemi konusunda yapılan yeniliklerden bahsedilebilir.

Bir başka çalışma konusu ise farklı malzemeleri olan YMK ve TYLÇ ile yapılan EAKMSM'lerin üretim tekniklerinden bahsedilebilir.

Tez kapsamında elde edilen verilere göre MDD sistem boyutları küçültülebilir. Bu sayede daha rekabetçi bir tasarım yapılabilir. Bunun yanında küçük boyutlu EAKMSM'lerin farklı kontrol teknikleri ile sürülmesi yeni bir çalışma konusu olabilir.

Kaynaklar

- T.C. Sağlık Bakanlığı Temel Sağlık Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Türkiye Kalp ve Damar Hastalıklarını Önleme ve Kontrol Programı 2010-2014, Basım (2010) Ankara.
- Arvand, A., Hahn, N., Hormes, M., Akdis, M., Martin, M. & Reul, H. (2004). Comparison of Hydraulic and Hemolytic Properties of Different Impeller Designs of an Implantable Rotary Blood Pump by Computational Fluid Dynamics. *Artificial Organs*, 28, 892–898. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2004.07379.x>
- İncebay, Ö. (2017). Santrifüj kalp destek pompası tasarımı ve nümerik analizinin yapılması, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 56.
- Walowit, J. A., Malanoski, S. B., Horvath, D., Golding, L. R. & Smith, W. A. (1997). The analysis, design, and testing of a blood lubricated hydrodynamic journal bearing, *Asaio Journal*, 43 (5), M556-559.
- Chusri, Y., Diloksumpan, P. & Naiyanetr, P. (2013). Current left ventricular assist device. *BMEiCON 2013 - 6th Biomedical Engineering International Conference*. 1-4. [10.1109/BMEiCon.2013.6687730](https://doi.org/10.1109/BMEiCon.2013.6687730).
- Lippi, G. & Sanchis-Gomar, F. (2020). Global epidemiology and future trends of heart failure. *AME Medical Journal*. 5. [10.21037/amj.2020.03.03](https://doi.org/10.21037/amj.2020.03.03).
- Molina, E., Shah, P., Kiernan, M., Cornwell, W., Copeland, H., Takeda, K., Fernandez, F., Badhwar, V., Habib, R., Jacobs, J., Koehl, D., Kirklin, J., Pagani, F. & Cowger, J. (2021). The Society of Thoracic Surgeons Intermacs 2020 Annual Report. *The Annals of Thoracic Surgery*. 111. [10.1016/j.athoracsur.2020.12.038](https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2020.12.038).
- Mohacsi, P., Gahl, B., Zittermann, A., Krabatsch, T., Gustafsson, F., Lep-rince, P., Meyns, B., Netuka, I., Caliskan, F., Castedo, E., Musumeci, F., Vincentelli, A. & Hetzer, R. (2017). The European Registry for Patients with Mechanical Circulatory Support (EUROMACS) of the European

- Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS): second report. European Journal of Cardio-Thoracic Surgery. 53. 1-8. 10.1093/ejcts/ezx320.
- Song, X., Throckmorton, A., Wood, H., Antaki, J. & Olsen, D. (2004). Quantitative Evaluation of Blood Damage in a Centrifugal VAD by Computational Fluid Dynamics. Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme - J FLUID ENG. 126. 10.1115/1.1758259.
- Chua, L, Song, G, Yu, S. & Lim, T. (2005). Computational Fluid Dynamics of Gap Flow in a Biocentrifugal Blood Pump. Artificial organs. 29. 620-8. 10.1111/j.1525-1594.2005.29099.x.
- Mitamura, Y., Nakamura, H., Okamoto, E., Ryohei, Y., Kawada, S. & Kim, D. W. (1999). Development of the Valvo Pump: An Axial Flow Pump Implanted at the Heart Valve Position. Artificial Organs. 23. 566 - 571. 10.1046/j.1525-1594.1999.06404.x.
- Throckmorton, A., Untaroiu, A., Allaire, P., Wood, H., Lim, D., McCulloch, M. & Olsen, D. (2007). Numerical Design and Experimental Hydraulic Testing of an Axial Flow Ventricular Assist Device for Infants and Children. ASAIO Journal. 53. 754-61. 10.1097/MAT.0b013e31815581ea.
- National Institutes of Health (2011). The Adrian Kantrowitz Papers, Replacing Hearts: Left Ventricle Assist Devices and Transplants, 1960-1970: Documents, from <https://profiles.nlm.nih.gov/ps/retrieve/Narrative/GN/pnid/315>.
- DeBakey, M. (1971). Left ventricular bypass pump for cardiac assistance. The American Journal of Cardiology, 27(1), pp. 3-11.
- Holman, W. (2012). Interagency Registry for Mechanically Assisted Circulatory Support (INTERMACS). Circulation Journal, 126(11), pp. 1401-1406.
- Kirklin, J. & Naftel, D. (2008). Mechanical circulatory support: registering a therapy in evolution. Circulation Journal: Heart failure, 1(3), pp. 200-205.

- Norman, J., Brook, M., Cooley, D., Klima, T., Kahan, B., Frazier, O., Keats, A., Hacker, J., Massin, E., Duncan, J., Solis, R. T., Dacso, C., Luper, W., Winston, D. & Reul, G. (1978). Total support of the circulation of a patient with post-cardiotomy stone-heart syndrome by a partial artificial heart (ALVAD) for 5 days followed by heart and kidney transplantation. *The Lancet Journal*, 1(8074), pp. 1125-1127.
- Gustafsson, F., & Rogers, J. (2017). Left ventricular assist device therapy in advanced heart failure: patient selection and outcomes: LVAD therapy in HF. *European Journal of Heart Failure*. 19. 10.1002/ejhf.779.
- Gregory, S., Stevens, M. & Fraser, J. (2017). *Mechanical circulatory and respiratory support*, Academic Press, London, UK.
- Garbade, J. , Bittner, H. , Barten, M. & Mohr, F. (2011). Current Trends in Implantable Left Ventricular Assist Devices. *Cardiology research and practice*. 2011. 290561. 10.4061/2011/290561.
- Rose, E., Gelijns, A., Moskowitz, A., Heitjan, D., Stevenson, L., Dembitsky, W., Long, J. W., Ascheim, D. D., Tierney, A. R., Levitan, R. G., Watson, J. T., Meier, P., Ronan, N. S., Shapiro, P. A., Lazar, R. M., Miller, L. W., Gupta, L., Frazier, O. H., Desvigne-Nickens, P., Oz, M. C. & Poirier, V. L. (2001). Long-term use of a left ventricular assist device for end-stage heart failure. *The New England Journal of Medicine*, 345(20), pp. 1435-1443.
- Ahmed, A. , Wang, X. & Yang, M. (2020). Biocompatible materials of pulsatile and rotary blood pumps: A brief review. *REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE*. 59. 322-339. 10.1515/rams-2020-0009.
- Goodman, D., Stulak, J., & Rosenbaum, A. N. (2022). Left ventricular assist devices: A historical perspective at the intersection of medicine and engineering. *Artificial organs*, 46(12), 2343–2360. <https://doi.org/10.1111/aor.14371>

- Frazier, O., Wampler, R., Duncan, J., Dear, W., Macris, M., Parnis, S., & Fuqua, J. (1990). First human use of the Hemopump, a catheter-mounted ventricular assist device. *The Annals of Thoracic Surgery*, 49(2), pp. 299-304.
- Peng, W. (2008). *Fundamentals of turbomachinery*. John Wiley and Sons, Inc, New Jersey, US.
- Slaughter, M., Rogers, J., Milano, C., Russell, S., Conte, J., Feldman, D., Sun, B., Tatooles, A., Delgado, R., Long, J., Wozniak, T., Ghumman, W., Farrar, D., & Frazier, H. (2009). Advanced Heart Failure Treated with Continuous-Flow Left Ventricular Assist Device. *New England Journal of Medicine*, 361(23), pp. 2241-2251.
- Mihalj, M., Heinisch, P., Schober, P., Wieser, M., Martinelli, M., By, T., Schefold, J., Luedi, M., Kadner, A., Carrel, T., Mohacsi, P., Hunziker, L. & Reineke, D. (2022). Third-generation continuous-flow left ventricular assist devices: a comparative outcome analysis by device type. *ESC Heart Failure*. 9. 10.1002/ehf2.13794.
- Westaby, S., Frazier, O. H., & Banning, A. (2006). Six years of continuous mechanical circulatory support. *The New England journal of medicine*, 355(3), 325–327. <https://doi.org/10.1056/NEJMc060715>
- Burke, D. J., Burke, E., Parsaie, F., Poirier, V., Butler, K., Thomas, D., Taylor, L., & Maher, T. (2001). The Heartmate II: design and development of a fully sealed axial flow left ventricular assist system. *Artificial organs*, 25(5), 380–385. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1594.2001.06770.x>
- Agarwal, S., & High, K.M. (2012). Newer-generation ventricular assist devices. *Best practice & research. Clinical anaesthesiology*, 26 2, 117-30 .
- Strueber, M., Meyer, A. L., Malehsa, D., & Haverich, A. (2010). Successful use of the HeartWare HVAD rotary blood pump for biventricular support. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 140(4), 936–937. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2010.04.007>

- Hoshi, H., Shinshi, T., & Takatani, S. (2006). Third-generation blood pumps with mechanical noncontact magnetic bearings. *Artificial organs*, 30(5), 324–338. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2006.00222.x>
- Morshuis, M., Schoenbrodt, M., Nojiri, C., Roefe, D., Schulte-Eistrup, S., Boergemann, J., Gummert, J. F., & Arusoglu, L. (2010). DuraHeart magnetically levitated centrifugal left ventricular assist system for advanced heart failure patients. *Expert review of medical devices*, 7(2), 173–183. <https://doi.org/10.1586/erd.09.68>
- Nishinaka, T., Schima, H., Roethy, W., Rajek, A., Nojiri, C., Wolner, E., & Wieselthaler, G. M. (2006). The DuraHeart VAD, a magnetically levitated centrifugal pump: the University of Vienna bridge-to-transplant experience. *Circulation journal: official journal of the Japanese Circulation Society*, 70(11), 1421–1425. <https://doi.org/10.1253/circj.70.1421>
- Morshuis, M., El-Banayosy, A., Arusoglu, L., Koerfer, R., Hetzer, R., Wieselthaler, G., Pavie, A., & Nojiri, C. (2009). European experience of DuraHeart magnetically levitated centrifugal left ventricular assist system. *European journal of cardio-thoracic surgery: official journal of the European Association for Cardio-thoracic Surgery*, 35(6), 1020–1028. <https://doi.org/10.1016/j.ejcts.2008.12.033>
- Arndt, A., Nüsser, P., Graichen, K., Müller, J., & Lampe, B. (2008). Physiological control of a rotary blood pump with selectable therapeutic options: control of pulsatility gradient. *Artificial organs*, 32(10), 761–771. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2008.00628.x>
- Aydin, M., Huang, S., Lipo, T.A. (2004). Axial flux permanent magnet disc machines: A review. *Conf. Record of SPEEDAM*.
- Jang, G. & Chang, J.H.. (2002). Development of an axial-gap spindle motor for computer hard disk drives using PCB winding and dual air gaps. *Magnetics, IEEE Transactions on*. 38. 3297 - 3299. [10.1109/TMAG.2002.802292](https://doi.org/10.1109/TMAG.2002.802292).

- Mirzaei, M., Mirsalim, M., & Abdollahi, S.E. (2007). Analytical Modeling of Axial Air Gap Solid Rotor Induction Machines Using a Quasi-Three-Dimensional Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43, 3237-3242.
- Polinder, H., Ferreira, J.A., Jensen, B.B., Abrahamsen, A.B., Atallah, K., & McMahon, R.A. (2013). Trends in Wind Turbine Generator Systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1, 174-185.
- Tongle, X., Xinyi, Z., & Qingxuan, J. (2010). Rolling bearing fault analysis and wavelet thresholding research. *International Conference on Advanced Technology of Design and Manufacture (ATDM)*, pp. 185–189, 2010.
- Parviainen, A., Niemela, M., Pyrhonen, J.J., & Mantere, J. (2005). Performance comparison between low-speed axial-flux and radial-flux permanent-magnet machines including mechanical constraints. *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, 2005., 1695-1702.
- Cetin, E., & Daldaban, F. (2018). Analyzing the Profile Effects of the Various Magnet Shapes in Axial Flux PM Motors by Means of 3D-FEA. *Electronics*, 7, 13.
- Mahmoudi, A., Rahim, N., & Hew, W. (2011). Axial-flux permanent-magnet machine modeling, design, simulation, and analysis. *Scientific Research and Essays*, 6(12), 2525-2549.
- Périgo, E.A., Weidenfeller, B., Kollár, P., & Füzer, J. (2018). Past, present, and future of soft magnetic composites. *Applied Physics Reviews*.
- Ishikawa, T., Takahashi, K., Ho, Q.V., Matsunami, M., & Kurita, N. (2012). Analysis of Novel Brushless DC Motors Made of Soft Magnetic Composite Core. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48, 971-974.
- Guo, Y., Zhu, J., Watterson, P.A., & Wu, W. (2002). Comparative study of 3D flux electrical machines with soft magnetic composite cores. *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344)*, 2, 1147-1154 vol.2.

- Przybylski, M., Slusarek, B., & Gromek, J. (2010). Brushless DC motor with a bonded permanent magnet and powder magnetic core. The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, 1-4.
- Zhang, Z., Profumo, F., & Tenconi, A. (1996). Axial Flux versus Radial Flux PM Motors. *Electromotion*, Vol. 3, No. 3, pp. 23-29, 1996.
- Scheerlinck, B., de Gersem, H., & Sergeant, P. (2015). 3-D Eddy Current and Fringing-Flux Distribution in an Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Machine With Stator in Laminated Iron or SMC. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51, 1-4.
- Sun, S., Yang, K., Zhang, H., Jiang, F., & Tang, L. (2017). A study on a novel multistage-AFPM with modular stator core made of different materials of silicon steel and SMC. 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 1-4.
- Wang, B., Xu, Y., Xu, L., & Xin, F. (2017). A novel PMSM with 3-dimensional magnetic circuit using SMC core. 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 1-5.
- Gumbleton-Wood, D., Atkinson, G.J., & Sjoberg, L. (2019). Electromagnetic Properties of Soft Magnetic Composites and Electrical Steels at High Frequencies Considering Material Manufacturing Techniques. 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2027-2034.
- Schoppa, A., Delarbre, P., Holzmann, E., & Sigl, M. (2013). Magnetic properties of soft magnetic powder composites at higher frequencies in comparison with electrical steels. 2013 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC), 1-5.
- Liu, C., Wang, Y.H., Lei, G., Guo, Y., & Zhu, J. (2019). Comparative Study of Axial Flux Vernier Machine with SMC Cores for Electric Vehicle Application. 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 1-5.

- Morimoto, M. (2012). Efficiency improvement of induction motor by 3-D core made of SMC. 2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), LS1b.3-1-LS1b.3-5.
- Khan, M.A., Pillay, P., Batane, N.R., & Morrison, D.J. (2006). Prototyping a Composite SMC/Steel Axial-flux PM Wind Generator. Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, 5, 2374-2381.
- Pyo, H., Jeong, J.W., Yu, J., Nam, D., Yang, S., & kim, W. (2020). Eddy Current Loss Reduction in 3D-Printed Axial Flux Motor Using 3D-Printed SMC Core. 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 1121-1125.
- Huang, Y., Hu, Q., Zhao, J., Zhu, J., & Guo, Y. (2007). Comparative Study of High-Speed PM Motors with Laminated Steel and Soft Magnetic Composite Cores. 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting, 67-72.
- Ponomarev, P., Lindh, P.M., & Pyrhönen, J.J. (2013). Effect of Slot-and-Pole Combination on the Leakage Inductance and the Performance of Tooth-Coil Permanent-Magnet Synchronous Machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60, 4310-4317.
- Pyrhonen, J.J., Jokinen, T., & Hrabovcová, V. (2009). Design of Rotating Electrical Machines.
- Yang, Y., & Peng, M. (2019). A Surface-Mounted Permanent-Magnet Motor With Sinusoidal Pulsewidth-Modulation-Shaped Magnets. IEEE Transactions on Magnetics, 55, 1-8.
- Ping, J., Shuhua, F., & Ho, S.L. (2018). Distribution Characteristic and Combined Optimization of Maximum Cogging Torque of Surface-Mounted Permanent-Magnet Machines. IEEE Transactions on Magnetics, 54, 1-5.
- Prieto, B., Martínez-Iturralde, M., Fontan, L., & Elósegui, I. (2015). Analytical Calculation of the Slot Leakage Inductance in Fractional-Slot Concentrated-

Winding Machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62, 2742-2752.

El-Refaie, A.M., Zhu, Z.Q., Jahns, T.M., & Howe, D. (2008). Winding Inductances of Fractional Slot Surface-Mounted Permanent Magnet Brushless Machines. 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1-8.

Tessarolo, A. (2015). Leakage Field Analytical Computation in Semiclosed Slots of Unsaturated Electric Machines. IEEE Transactions on Energy Conversion, 30, 431-440.

Cavagnino, A. (2017). Accuracy-Enhanced Algorithms for the Slot Leakage Inductance Computation of Double-Layer Windings. IEEE Transactions on Industry Applications, 53, 4422-4430.

Madariaga, C., Jara, W., Tapia, J.A., Pyrhönen, J.J., Lindh, P.M., & Riedemann, J.A. (2019). Closed-Form Solution for the Slot Leakage Inductance of Tooth-Coil-Winding Permanent Magnet Machines. IEEE Transactions on Energy Conversion, 34, 1572-1580.

Wallace, R., Alexandrova, J., Vera, B.S., Tapia, J.A., Pyrhonen, J.J., & Linhdh, P. (2012). P.M synchronous generator design analytical method. International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 625-631.

Wang, J., & Howe, D. (2004). Design optimization of radially magnetized, iron-cored, tubular permanent-magnet machines and drive systems. IEEE Transactions on Magnetics, 40, 3262-3277.

Arumugam, P., Hamiti, T., & Gerada, C. (2012). Modeling of Different Winding Configurations for Fault-Tolerant Permanent Magnet Machines to Restrain Interturn Short-Circuit Current. IEEE Transactions on Energy Conversion, 27, 351-361.

Vilar, Z., Patterson, D., & Dougal, R.A. (2005). Thermal analysis of a single

- sided axial flux permanent magnet motor. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005., 5 pp.-.
- Ferreira, A.P., & Costa, A.F. (2012). Thermal analysis of an Axial Flux Permanent Magnet machine. 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, 1482-1487.
- Chai, F., Bi, Y., & Chen, L. (2019). Thermal Investigation and Cooling Enhancement of Axial Flux Permanent Magnet Motors for Vehicle Applications. 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 1-5.
- Vansompel, H., Yarantseva, A., Sergeant, P., & Crevecoeur, G. (2019). An Inverse Thermal Modeling Approach for Thermal Parameter and Loss Identification in an Axial Flux Permanent Magnet Machine. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 66, 1727-1735.
- Boutarfa, R., & Harmand, S. (2005). Local convective heat transfer for laminar and turbulent flow in a rotor-stator system. Experiments in Fluids, 38, 209-221.
- Vansompel, H., Hemeida, A., Rasekh, A., Sergeant, P., & Vierendeels, J.A. (2015). Coupled electromagnetic and thermal analysis of an axial flux PM machine. 2015 IEEE Magnetics Conference (INTERMAG), 1-1.
- Howey, D.A., Childs, P.R., & Holmes, A.S. (2012). Air-Gap Convection in Rotating Electrical Machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59, 1367-1375.
- Rasekh, A., Sergeant, P., & Vierendeels, J.A. (2017). Fully predictive heat transfer coefficient modeling of an axial flux permanent magnet synchronous machine with geometrical parameters of the magnets. Applied Thermal Engineering, 110, 1343-1357.
- Rasekh, A., Sergeant, P., & Vierendeels, J.A. (2016). Development of Correlations for Windage Power Losses Modeling in an Axial Flux Permanent

Magnet Synchronous Machine with Geometrical Features of the Magnets. *Energies*, 9, 1-17.

Marignetti, F., Colli, V.D., & Coia, Y. (2008). Design of Axial Flux PM Synchronous Machines Through 3-D Coupled Electromagnetic Thermal and Fluid-Dynamical Finite-Element Analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55, 3591-3601.

Camilleri, R., Howey, D.A., & McCulloch, M.D. (2016). Predicting the Temperature and Flow Distribution in a Direct Oil-Cooled Electrical Machine With Segmented Stator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63, 82-91.

Rostami, N., Feyzi, M.R., Pyrhonen, J.J., Parviainen, A., & Niemela, M. (2013). Lumped-Parameter Thermal Model for Axial Flux Permanent Magnet Machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49, 1178-1184.

Howey, D.A., Holmes, A.S., & Pullen, K.R. (2011). Measurement and CFD Prediction of Heat Transfer in Air-Cooled Disc-Type Electrical Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47, 1716-1723.

Airoldi, G. (2010). Numerical investigations of air flow and heat transfer in axial flux permanent magnet electrical machines.

Lim, C.H. (2010). Thermal Modelling of the Ventilation and Cooling inside Axial Flux Permanent Magnet Generators.

Latoufis, K., Rontogiannis, A., Karatasos, V., Markopoulos, P., & Hatziaargyriou, N.D. (2018). Thermal and Structural Design of Axial Flux Permanent Magnet Generators for Locally Manufactured Small Wind Turbines. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 1001-1007.

Huang, S., Luo, J., Leonardi, F., & Lipo, T.A. (1999). A comparison of power density for axial flux machines based on general purpose sizing equations. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14, 185-192.

- Gieras, J.F., Wang, R., & Kamper, M.J. (2005). Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines.
- Barriere, O.D., Hlioui, S., Ahmed, H.B., Gabsi, M., & LoBue, M. (2012). 3-D Formal Resolution of Maxwell Equations for the Computation of the No-Load Flux in an Axial Flux Permanent-Magnet Synchronous Machine. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48, 128-136.
- Zhilichev, Y. (1998). Three-dimensional analytic model of permanent magnet axial flux machine. *IEEE Transactions on Magnetics*, 34, 3897-3901.
- Zhu, Z.Q., & Howe, D. (1993). Instantaneous magnetic field distribution in permanent magnet brushless DC motors. IV. Magnetic field on load. *IEEE Transactions on Magnetics*, 29, 152-158.
- Furlani, E.P. (1994). Computing the field in permanent-magnet axial-field motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 30, 3660-3663.
- Pyrhonen, J.J., Jokinen, T., & Hrabovcová, V. (2009). Design of Rotating Electrical Machines.
- Ni, R., Wang, G., Gui, X., & Xu, D. (2014). Investigation of d and q Axis Inductances Influenced by Slot-Pole Combinations Based on Axial Flux Permanent-Magnet Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61, 4539-4551.
- Madariaga, C., Jara, W., Tapia, J.A., Pyrhönen, J.J., Lindh, P.M., & Riedemann, J.A. (2019). Closed-Form Solution for the Slot Leakage Inductance of Tooth-Coil-Winding Permanent Magnet Machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34, 1572-1580.
- Di Tommaso, A.O., Genduso, F., & Miceli, R. (2013). A software for the evaluation of winding factor harmonic distribution in high efficiency electrical motors and generators. 2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 1-6.

Hendershot, J., & Miller, T.J. (2010). Design of Brushless Permanent-Magnet Machines.

Trinquero, P., Pirotte, A., Gallagher, L., Iwaki, K.M., Beach, C., & Wilcox, J.E. (1996). Left Ventricular Assist Device Management in the Emergency Department. *Western Journal of Emergency Medicine*, 19, 834 - 841.

Brady, W., Weigand, S., & Bergin, J.D. (2018). Ventricular assist device in the emergency department: Evaluation and management considerations. *American Journal of Emergency Medicine*, 36, 1295–1299.

Robertson, J.J., Long, B., & Koyfman, A. (2016). The emergency management of ventricular assist devices. *The American journal of emergency medicine*, 34 7, 1294-301 .

Kirklin, James K., Francis D. Pagani, Robert L. Kormos, Lynne Warner Stevenson, Elizabeth D. Blume, Susan L. Myers, Marissa A. Miller, J. Timothy Baldwin, James B. Young and David C. Naftel. “Eighth annual INTERMACS report: Special focus on framing the impact of adverse events.” *The Journal of heart and lung transplantation: the official publication of the International Society for Heart Transplantation* 36 10 (2017): 1080-1086 .

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında bana yol gösteren, büyük bir bilgi birikimi ve deneyimiyle çalışmama rehberlik eden, her görüşmemizde merakımı artıran, Prof. Dr. Erkan MEŞE hocama, danışmanım olduğu için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesinde yer alan ve değerli yorum ve görüşleriyle katkılar sağlayan Prof. Dr. Mutlu BOZTEPE hocama ve Dr. Öğr. Üyesi Hilmi GÜRLEYEN hocama, , doktora çalışmamın tüm zorlu aşamalarında maddi ve manevi her yönden yardımcı olan Doç. Dr. Murat AYAZ hocama ve Dr. Öğr. Üyesi Serkan AKTAŞ hocama ve lisansüstü eğitimimde emeği geçen tüm hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışması, 118S176 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Verdikleri desteklerden ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Son olarak, beni her zaman destekleyen ve sevgisiyle hep yanımda olan eşim Rana Ece KARABULUT'a, sevgili oğullarım Aslan ve Noyan'a ve hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve akrabalarım yürekten teşekkür ederim.

../../20..

İmzası

Yiğit Karabulut

ÖZGEÇMİŞ

Yiğit Karabulut ortaöğretimini İzmir Atatürk Anadolu Lisesi'nde tamamlamıştır. Lisans eğitimini 2011 yılında Ege Üniversitesi, yüksek lisans eğitimini 2016 yılında Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümlerinde tamamlamıştır. 2017 yılında Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde doktora eğitimine başlamıştır. 2015 yılından itibaren araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

YAYINLAR;

- Y. Karabulut and E. Meşe, "Torque Performance Comparison Between Slotted and Non-Slotted Axial Flux PCB Winding Machine," 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Gliwice, Poland, 2021, pp. 519-523
- Y. Karabulut and E. Meşe, "Influence of Rotor Magnet Step Shifting on Torque Ripple of Multiphase Axial Flux Permanent Magnet Machines," 2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey, 2019, pp. 190-194
- Çakır, Engin & Aygun, İkbâl & Yazgi, Arzu & KARABULUT, Yigit. (2016). Determination of in-row seed distribution uniformity using image processing. Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 2016. 874-881. 10.3906/tar-1604-110.
- Taşkın, S. , Karabulut, Y. , Bakbak, A. , Kale, Ö. F. & Geren, E. (2017). Kablo Uzunluğu Ölçümleri için Zaman Uzayında Yansımaölçer Sisteminin Mikrodenetleyici ile Gerçekleştirilmesi . Celal Bayar University Journal of Science , 13 (2) , 441-444 . DOI: 10.18466/cbayarfbe.319914
- Karabulut, Yiğit & Muhammet, Enes & Akpınar, & Yıldız, Sadık & Yıldırım, Mehmet Sinan & Oztürk, Ali. (2016). A NEW APPROACH TO DETERMINATION OF READY MIXED CONCRETE CONSISTENCY: IMAGE PROCESSING METHOD.

- Akpınar, Enes & Yıldız, Sadık & Karabulut, Yiğit & Doğan, Erkan. (2017). Simulation Optimization for Transportation System: A Real Case Application. TEM Journal. 6. 10.18421/TEM61-14.
- KARABULUT, Y., YILDIRIM, M. S., & YILDIZEL, S. A. (2016). Hazır Beton Çökme Değerinin Görüntü İşleme Yöntemleriyle Tayini. Presented at the International Symposium on Multidisciplinary Studies (ISMS), belgrad
- ÇAKIR, E., YAZGI, A., AYGÜN, İ., & KARABULUT, Y. (2014). Determination of in Row Seed Distribution Uniformity Using Image Processing. Presented at the 12th International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture, Nevşehir.

PROJELER;

- 118S176 numaralı TÜBİTAK 1003 Projesi, Bursiyer.
- TÜBİTAK 1512 - Girişimcilik Destek Programı, Proje Yürütücüsü.
- 639 STZ 2014 numaralı SANTEZ Projesi, Bursiyer