



ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN GELİŞTİRİLEN DIŞ ROTORLU FIRÇASIZ

DOĞRU AKIM MOTORU TASARIM VE ANALİZİ

FAZİLET AKIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DOÇ. DR. MEHMET AKAR

Haziran - 2019

Her hakkı saklıdır

T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN GELİŞTİRİLEN DIŞ ROTORLU FIRÇASIZ
DOĞRU AKIM MOTORU TASARIM VE ANALİZİ

FAZİLET AKIN

TOKAT
HAZİRAN - 2019

Her hakkı saklıdır

Fazilet Akın tarafından hazırlanan “**Elektrikli Araçlar İçin Geliştirilen Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarım ve Analizi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 12 HAZİRAN 2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Doç. Dr. Mehmet AKAR

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Üye
Dr. Öğr. Üyesi Zafer DOĞAN
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Üye
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet EKİCİ
Amasya Üniversitesi

.....
.....
.....

ONAY

.....
Prof. Dr. Çetin ÇEKİCİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.



FAZİLET AKIN

HAZİRAN, 2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN GELİŞTİRİLEN DIŞ ROTORLU FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU TASARIM VE ANALİZİ

FAZİLET AKIN

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. MEHMET AKAR)

Günümüzde artan nüfus ile birlikte ulaşım sektörüne katılan bireysel araç ve toplu taşımacılığın kullanım oranı hızla artmaktadır. Buna paralel olarak fosil yakıt kullanım oranında oldukça yükselmektedir. Fosil yakıtlar ulaştırma sektöründeki kullanımının yanı sıra, enerji üretimi, binalarda ve endüstri sektöründe de yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu durumun farkındalığı elektrikli araçlara yönelik araştırmalara ve gelişime olanak sağlamıştır. Bu tez çalışmasında günümüz ulaşım araçlarının yerini alan elektrikli araçlarda kullanılması hedeflenen fırçasız doğru akım motoru tasarımına yer verilmiştir. Motor tasarım çalışmalarına elektrikli araç sistemlerinin incelenmesi ile başlanmıştır. Motor parametrelerinin ve kullanılacak malzemelerin belirlenmesinden sonra, ANSYS RMxprt programında analitik çözümlene yapılarak motor geometrileri oluşturulmuş ve motorun tasarım optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Motor tasarımı moment, verim, hız gibi parametreler açısından değerlendirilmiş olup 51/46 oluk/kutup oranına sahip motor prototipi üretilmeye karar verilmiştir. Tasarlanan motorun sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır. Daha sonra yapılan sürüş denemelerinde motorun hedeflenen performansta ve sorunsuz çalıştığı görülmüştür.

2019, 86 SAYFA

ANAHTAR KELİMELER: Elektrikli Araç, Fırçasız Doğru Akım Motoru, Sonlu Elemanlar Yöntemi.

ABSTRACT

MASTER THESIS

ELECTRIC VEHICLES DEVELOPED FOR EXTERNAL-ROTOR BRUSHLESS DC MOTOR DESIGN AND ANALYSIS

FAZİLET AKIN

**TOKAT GAZIOSMANPASA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

DEPARTMENT OF MECHATRONICS ENGINEERING

In these days, with the increasing population, the rate of usage of individual vehicles and public transportation that has joined the transportation sector is increasing rapidly. Parallel to this, the rate of fossil fuel use is increasing considerably. In addition to its use in the transportation sector, fossil fuels are also used extensively in power generation, buildings and industry. Awareness of this situation has enabled research and development of electric vehicles. In this thesis, brushless direct current, DC motor design which is aimed to be used in electric vehicles which replaces today 's transportation vehicles is given. DC motor design studies started with the examination of electric vehicle systems. After the determination of the motor parameters and materials to be used, ANSYS RMXprt program made analytical analysis and motor geometries were created and design optimization studies of the motor were realized. Motor design was evaluated in terms of parameters such as moment, efficiency and speed and it was decided to produce motor prototype with 51/46 groove / pole ratio. The results obtained by the finite element method of the motor were compared with the experimental results. In subsequent driving trials, it was found that the motor was operating at its intended performance and without any problems.

2019, 86 PAGE

KEYWORDS: Electric Vehicle, Brushless Direct Current Motor, Finite Element Method

ÖNSÖZ

Lisans eğitimim sürecinde ve yüksek lisans çalışmam boyunca her türlü konuda yardımlarını ve desteğini esirgemeyen, değerli fikirleriyle çalışmama yön veren kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet AKAR' a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Eğitim hayatım boyunca varlığını ve desteğini hep yanımda hissettiğim aileme sonsuz teşekkür ederim.

FAZİLET AKIN

HAZİRAN, 2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGE VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
3.1. Motor Giriş Parametrelerinin Seçilmesi.....	15
3.2. Fırçasız Doğru Akım Motoru Ve Önemi	17
3.2.1. Fırçasız doğru akım motoru.....	18
3.2.2. Fırçasız doğru akım motorunun yapısı.....	19
3.2.3. Fırçasız doğru akım motorunun sınıflandırılması.....	21
3.3. Fırçasız Doğru Akım Motoru Çalışma Prensipleri.....	27
3.3.1. Fırçasız doğru akım motorunun komütasyonu.....	28
3.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	29
3.4.1. Simülasyon yazılımı: ANSYS... ..	30
3.4.2. Maxwell denklemleri.....	32
3.5. Analitik Hesaplamalar	35
3.6. Araç İçin Motor Hesap Formülleri.....	41
3.7. Fırçasız Doğru Akım Motoru' nun Prototip Üretimi	43
3.8. Fırçasız Doğru Akım Motoru' nun Denet Düzenliği	47
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	52
4.1. Fırçasız Doğru Akım Motor Tasarımının Geliştirilmesi.....	52
4.2. Maxwell Rmxprt ve Maxwell 2D Analizi.....	57
4.3. Analiz ve Yorumlar	58
4.4. Fırçasız Doğru Akım Motoru Termal Analiz Sonuçları.....	67

4.5. Tutma (Cogging) Tork Analizi.....	68
4.6. Fırçasız Doğru Akım Motoru Deneysel Sonuçları.....	70
4.6.1. Performans deneyleri.....	70
4.6.2. Isınma deneyleri.....	77
4.7. Motorun Araca Entegrasyonu.....	78
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	80
6. KAYNAKLAR.....	82
7. ÖZGEÇMİŞ.....	86



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
M_N	Anma momenti
B_n	Akı yoğunluğunun normal bileşenini
B_t	Akı yoğunluğunun teğetsel bileşenini
F_R	Yuvarlanma kuvveti
F_{Total}	Toplam kuvvet
L_{stk}	Makinenin paket boyu uzunluğunu
P_{in}	Motor giriş gücü
P_{Out}	Motor çıkış gücü
ϵ_o	Serbest uzaydaki elektriksel geçirgenlik
ϵ_r	Göreceli geçirgenlik
μ_o	Serbest boşluğun geçirgenliği
μ_r	Malzemenin manyetik göreceli geçirgen.
$2p$	Kutup sayısını
A	Kesit alanı
A	Manyetik vektör potansiyeli
B	Manyetik akı yoğunluğu
B_{cs}	Stator nüve akı yoğunluğu
B_g	Spesifik manyetik yükleme
B_g	Hava aralığı akı yoğunluğunu
b_{ss1}	Stator oluğunun üst oluk genişliği
b_{ss2}	Stator oluğunun alt oluk genişliği
B_{ts}	Stator dişi akı yoğunluğu
b_{ts}	Nüvenin dış genişliğini
C	Sabiti makinenin rotor hacmi
C_0	Çıkış katsayısı
D	Sürüklenme kuvveti
D	Manyetik akı yoğunluğu
D	Stator dış çapını

D_i	Statorun iç çapını
D_{is}	Hava aralığı çapı
D_{is}	Stator iç ve rotor dış çapı
D_{rc}	Rotor iç çapı
E	Elektrik alan şiddeti
E_m	İndüklenen emk
f	Çalışma frekansını
H	Manyetik alan şiddeti
h_{ss}	Oluk boyunu
h_{sw}	Stator nüvesinin dış kalınlığını
h_{sy}	Etkin nüve kalınlığını
I_s	Stator faz akımının
J_{con}	Akım yoğunluğu
k_f	Form faktörü
K_{fill}	Oluk doluluk faktörlerini
K_w	Sargı faktörü
kW	KiloWatt
L	Eşdeğer nüve uzunluğunu
L_m	Mıknatıslanma endüktansı
l_m	Mıknatıs kalınlığını
mNm	MiliNewtonmetre
n	Rotor devir sayısı
η	Verim
Nm	Newton metre
N_s	Mıknatıs uzunluğu
P_i	Aktif gücü
Q_s	Stator oluk sayısını
S_{gap}	Hava aralığı görünür gücünü
S_i	Görünür gücü
T	Tork
V	Volt
v	Hız

W	Faz başına spir (sarım) sayısı
α	Akı yoğunluğu şekil faktörü
αB_δ	Hava aralığındaki akı yoğun. ortalama.
δ	Hava aralığının uzunluğunu
ρ	Hacim yük yoğunluğu
Φ	Kutup akısı
l	Stator uç kenar uzunluğunu
J	Yüzey akım yoğunluğu
ε	Elektriksel geçirgenlik
μ	Manyetik geçirgenlik
ρ	Kütle
σ	Elektrik iletkenliği

Kısaltmalar

Açıklama

2D	İki Boyutlu
3D	Üç Boyutlu
DA	Doğru Akım
DSP	Sayısal İşaret İşleme
EA	Elektrikli Araç
Emk	Elektro Manyetik Kuvvet
FDAM	Fırçasız Doğru Akım Motoru
İYM	İçten Yanmalı Motor
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SM	Sabit Mıknatıs
SMSM	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Motor tiplerinin iç yapısı.....	3
Şekil 2.1. 1894 Electrobats.....	8
Şekil 2.2. London Electrical Cab Company Aracı.....	8
Şekil 2.3. 1967 Ford Comuta aracı.....	10
Şekil 2.4. Geçmişten günümüze EA.....	11
Şekil 3.1. Aracın boyutlandırılması.....	15
Şekil 3.2. FDAM' nin yapısı.....	19
Şekil 3.3. İç rotorlu FDAM yapısı.....	22
Şekil 3.4. Dış rotorlu FDAM yapısı.....	24
Şekil 3.5. (a)Gömülü (b)Yüzey montaj mıknatıslı dış rotor tasarımları.....	25
Şekil 3.6. Komütasyon bölgesinde faz akımları.....	28
Şekil 3.7. Ansoft Maxwell programının arayüzü.....	31
Şekil 3.8. Dış rotorlu FDAM' ler için bazı geometrik parametrelerin tanımlanması.....	35
Şekil 3.9. Stator oluk geometrisi.....	38
Şekil 3.10. Polyester film malzemenin stator oluklarına yerleştirilmesi.....	44
Şekil 3.11. Stator sarımı.....	44
Şekil 3.12. Sarılmış stator.....	45
Şekil 3.13. Prototip motor rotor üretim ve mıknatıs yerleşimi.....	46
Şekil 3.14. Montaj aşamaları.....	47
Şekil 3.15. Deney düzeneği.....	48
Şekil 3.16. Motor kontrol panosu.....	48
Şekil 3.17. Güç panosu.....	49
Şekil 3.18. Test standı.....	50
Şekil 3.19. i-LAB yazılımı arayüzü.....	51
Şekil 4.1. 51 oluk, 46 kutuplu motor yapısı.....	52
Şekil 4.2. FDAM geometrisi.....	53
Şekil 4.3. Stator oluğu geometri değişkenleri.....	54
Şekil 4.4. Stator sarımların görünümü.....	55

Şekil 4.5. N45SH' nin B - H eğrisi	56
Şekil 4.6. Akış diyagramı	57
Şekil 4.7. Motor hızına (rpm) karşılık motor akımındaki (A) değişim.....	58
Şekil 4.8. Motor hızına (rpm) karşılık verimdeki (%) değişim	59
Şekil 4.9. Motor hızına (rpm) karşılık mil gücündeki (W) değişim	60
Şekil 4.10. Motor gücüne (W) karşılık verim (%),mil torku (Nm) ve hız (rpm) değişimi.....	61
Şekil 4.11. Mesh işleminin görüntüsü	62
Şekil 4.12. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı	63
Şekil 4.13. Devir-Pmil grafiği	64
Şekil 4.14. Devir-Tork grafiği	65
Şekil 4.15. Devir-Verim grafiği	66
Şekil 4.16. Termal analiz grafiği	67
Şekil 4.17. Motor 3D modeli	69
Şekil 4.18. Tutma torku grafiği.....	69
Şekil 4.19. Motor performans deneyi bağlantı şeması.....	70
Şekil 4.20. 51/46 Motor Devri – Verim grafiği	71
Şekil 4.21. 51/46 Motor Devri – Pmil grafiği	72
Şekil 4.22. 51/46 Motor Devri – Tork grafiği.....	73
Şekil 4.23. 51/46 Motor Akım – Tork grafiği	74
Şekil 4.24. 51/46 Motor Devir - Akım grafiği.....	75
Şekil 4.25. 51/46 Motor Akım – Pmil grafiği.....	76
Şekil 4.26. Motorun araca entegre edilmesi	79

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1. EA' ların avantaj ve dezavantajları	2
Çizelge 1.2. Elektrik motor türlerinin avantaj ve dezavantajları	4
Çizelge 1.3. FDAM' nin diğer motorlarla karşılaştırılması.....	5
Çizelge 3.1. Aracın boyutları.....	16
Çizelge 3.2. FDAM ve SMSM' nin karşılaştırılması	26
Çizelge 3.3. Farklı elektrik makinaları için nüve uzunluğu/hava aralığı çapı oranı	37
Çizelge 3.4. Stator iç ve dış çap oranı.....	39
Çizelge 3.5. Motor parametreleri.....	42
Çizelge 4.1. Stator oluğu geometri değişken değerleri.....	54
Çizelge 4.2. Rotor özellikleri.....	56
Çizelge 4.3. Motor sargı yalıtım sınıfları ve çalışma sıcaklıkları.....	77

1. GİRİŞ

Ulaşım, insanoğlunun eski çağlardan beri temel ihtiyaçlarından biridir. Mevcut taşıt teknolojilerinin büyük bir kısmı fosil kökenli yakıtlarla çalışmaktadır. Fosil kökenli yakıtların bu derece kullanılmaya devam edilmesi halinde gelecekte insan hayatı için büyük zararlara yol açacağı düşünülmektedir. Petrol, doğal gaz gibi yakıtların rezervlerinin azalmasıyla birlikte maliyetlerin artması ve sonucunda ise sosyal ve ekonomik etkilerin büyüklüğü ve bu yakıtların kullanılmasıyla etrafa yayılan emisyonlar ve sera gazları çevreye zarar vermektedir.

Egzoz gazıyla çevreye yayılan kurşun elementi, petrol türevleri yakıldığında ortaya çıkan zehirli gazlar önemli ölçüde çevre kirliliğine yol açmaktadır. Son yıllarda motorlu araç sayısının hızlı artışı ve petrol kaynaklarının tükenme noktasına gelmesiyle farklı tahrik sistemleri kullanarak araçlar hareket ettirilme araştırmaları hızla artmaktadır (Hori, 2004; Ünlü ve ark., 2003).

Gelecekte Elektrikli Araç (EA)'ların daha çok tercih edileceği öngörülmektedir. EA'ların

- Ulaşım maliyetlerini azaltması,
- Fosil kökenli yakıt kullanımını azaltması,
- Yoğun yaşam alanlarında hava kirliliğini azaltması,
- Dünya genelinde sera gazı oluşumunun bertaraf edilmesi (Ünlü ve ark., 2003)

gibi özelliklerden dolayı kullanımları artmıştır.

Günümüzde kullandığımız otomobillerin tarihi sanayi devrimine dayanmaktadır. İçten Yanmalı Motorların (İYM) icat edilmesiyle birlikte buharlı motorlarla çalışan araçlarda hızla yükselişe geçmiştir. Otomobillerin artan performans ve konfor değerleriyle beraber buna paralel olarak insanlara ve doğaya verdiği zarar da artmıştır. EA'lar fosil yakıtlı araçlara alternatif olarak geliştirilmiş ve bu araçların doğaya verdiği zarar minimum düzeyindedir. Bundan dolayı EA üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Günümüzde çok sayıda elektrikli, hafif elektrikli ve hibrit araçları avantajlarından

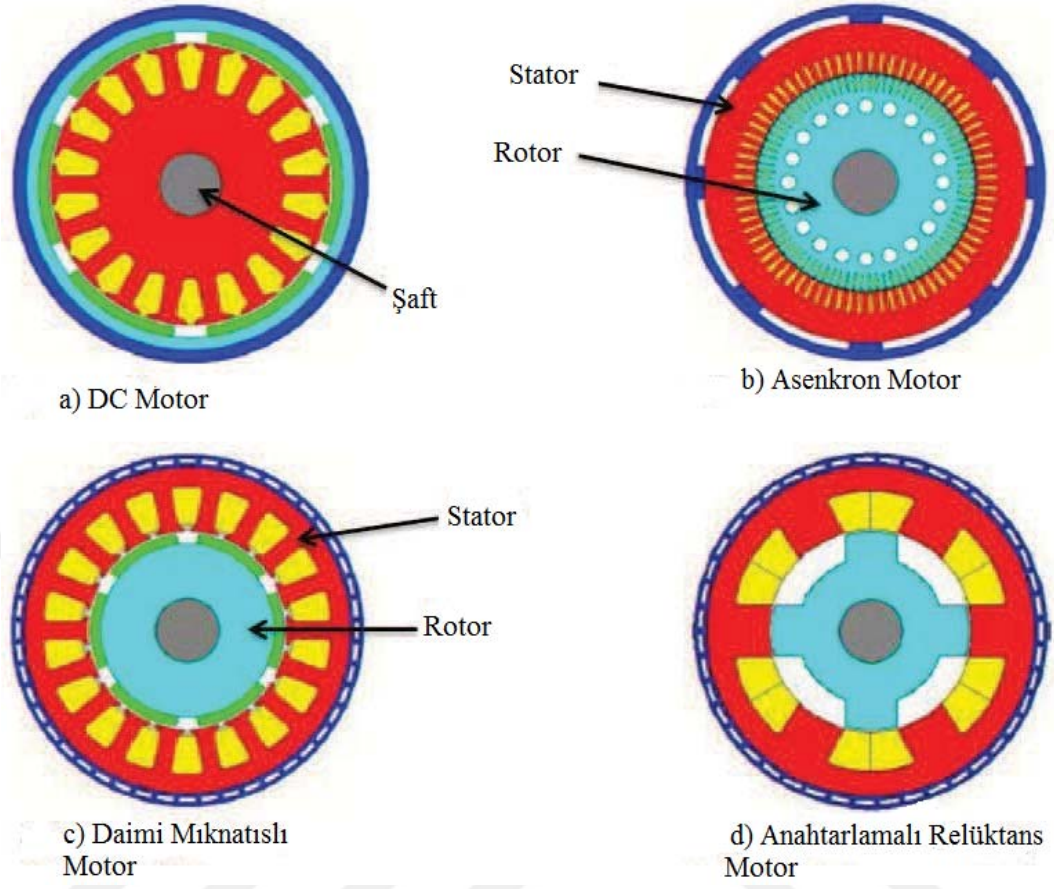
dolayı yollarda görmek mümkün olmuştur (Ustun ve ark., 2009; Tutelea ve I. Boldea, 2007; Zarko ve ark., 2007).

EA'lar da moment ve akının kontrolü birlikte yapılabilir. Bu kontrol yöntemi "iyileştirilmiş doğrudan moment kontrolü" ile kolayca yapılabilir. Çizelge 1.1'de görüldüğü gibi EA'ların birçok avantajı olmasıyla birlikte beraberinde dezavantajları da getirmektedir.

Çizelge 1.1. EA'ların avantaj ve dezavantajları (Korkut, 2011)

EA'ların avantajları	EA'ların dezavantajları
Kullanım anında emisyon salınımı yoktur	Üretim maliyeti yüksektir
Sessiz çalışmaktadır	Servis olanakları sınırlıdır
Kilometre başına ulaşım maliyeti düşüktür	Batarya dolun istasyonları henüz yaygınlaşmamıştır
Rejeneratif frenleme ile kaybolan enerji, geri kazanılabilmektedir	Taşıt menzili kısadır, taşıt ağırlığı (bataryalardan dolayı) fazladır
Hareketli parçaların az olmasından dolayı, bakım maliyetleri düşüktür	Batarya şarj süreleri uzundur

EA'ların tahrik sistemi için birbirinden farklı tipte motor kullanılmaktadır. Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmek için kullanılan motorlar elektrik motorlarıdır. Elektrikli araçlar için gerekli olan motorların seçiminde tercih edilen unsurlar elektrik motorunun verimi, performansı, özgül gücü, maliyeti ve bakım sıklığıdır. Elektrikli motorların günümüzde en sık kullanılanları Doğru Akım (DA) motorlar, Asenkron motorlar, Daimi mıknatıslı motorlar ve Anahtarlamalı relüktans motorlarıdır (Karaoğlan, 2014). Motor tiplerinin iç yapısı Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Motor tiplerinin iç yapısı (Çimen, 2010)

Son yıllarda yapılan çalışmalarda Fırçasız Doğru Akım Motor (FDAM)ları; motorun dezavantajları ortadan kaldırıldığında birçok yerde kullanılacak motor olarak piyasada kendilerine yer bulabilecekleri, bunun yanı sıra maliyet ve güvenilirlik yönünden çok daha iyi olabilecekleri görülmektedir. Gürültüsüz olması, fazla güç tüketmemesi, fırça ve fırça kayıplarının olmaması, uyarma akımına ihtiyaç duymaması gibi avantajlarından dolayı en çok tercih edilen motor çeşidi FDAM'lerdir. Çizelge 1.2'de Elektrik motor türlerinin avantaj ve dezavantajları gösterilmiştir.

Çizelge 1.2. Elektrik motor türlerinin avantaj ve dezavantajları (Korkut, 2011)

Motor Tipi	Avantajları	Dezavantajları
DA Motor	Basit hız kontrolü	Fırça ve kolektör grubu için bakım gereksinimi, Orta derece ömür,
Asenkron Motor	Düşük maliyet, Uzun ömür, Yüksek güçlerde imal edilebilme, Standartlaşma ve yaygın kullanım,	İlk kalkışta anı akım yüksekliği, Hız kontrolü için frekans değiştiricilere ihtiyaç duyması,
Fırçasız Doğru Akım Motoru	Uzun ömür, Düşük bakım gereksinimi, Yüksek verim,	İlk yatırımın yüksek olması, Motor sürücüsüne ihtiyaç duyması,
Anahtarlamalı Relüktans Motor	Uzun ömür, Düşük bakım gereksinimi, Yüksek verim, Kalıcı mıknatıs olmaması, Basit yapısı, Düşük maliyet,	Motor sürücüsüne ihtiyaç duyması,

Elektronik malzeme ve kontrol teknolojisindeki gelişmeler, elektrik makineleri ile ilgili çalışmalarda yeni tip motorlar planlamaya ve üreticileri de bu tip motorları üretmeye yöneltmiştir. Kalıcı mıknatıslı motorların üretilmesindeki başlıca sebep, bu motorların çok verimli, ucuz ve seri üretime uygun oluşudur. FDAM'lerin diğer motorlarla karşılaştırılması Çizelge 1.3'te verilmiştir.

Çizelge 1.3. FDAM nin diğer motorlarla karşılaştırılması (Uygun, 2012)

	Asenkron Motor	Senkron Motor	DA Motoru	FDAM	Anahtarlama Relüktans Motor
Beslenme Şekli	Alternatif Gerilim	Alternatif Gerilim	Doğru Gerilim	Doğru Gerilim	Doğru Gerilim
Uyarma Durumu	Uyarma Gerekmez	Doğru Gerilimle Uyarma	Doğru Gerilimle Uyarma	Uyarma Gerekmez	Uyarma Gerekmez
Dönüştürücü	Değişken Hız Uygulaması Gerekir	Değişken Hız Uygulaması Gerekir	Değişken Hız Uygulaması Gerekir	Daima Gerekir	Daima Gerekir
İşletme ve Bakım Masrafı	Yok Denebilir	Kısmen Bakım Gerekir	Bakım Gerekir	Yok Denebilir	Yok Denebilir
Motor Maliyeti	Ucuz	Pahalı	Pahalı	Pahalı	Ucuz
Dönüştürücü Maliyeti	Pahalı	Pahalı	Orta	Pahalı	Pahalı
Verim	Orta	Orta	Orta	İyi	İyi
Çalışma Ortamı	Her Ortamda Çalışır	Her Ortamda Çalışır	Patlayıcı Ortamlarda Kullanılmaz	Her Ortamda Çalışır	Her Ortamda Çalışır
Stabilite	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi

Bu tez çalışmasında verimlerinin yüksek olması, sessiz çalışmaları, fırçaların bulunmaması ve kolektör yapılarının olmaması, elektriksel arkların oluşmaması, sargı sıcaklığının dışarıya kolayca aktarılması, elektriksel kayıpların en aza indirilmesi, stator çaplarına bağlı olarak yüksek moment üretme, düşük güçlerde diğer motorlara oranla daha iyi verim ve daha yüksek güç/hacim oranına sahip olmaları gibi avantajlardan dolayı FDAM tasarımı ve prototip üretimi üzerinde durulmuştur.

Bu çalışmada FDAM yapısı ve çalışması, matematiksel modeli ve motor tasarım hesaplamaları, Sonlu elemanlar ile modellenmesi ve motorun analizleri yer almaktadır. Daha sonra optimal olarak tasarlanan Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile modelin prototipi üretilerek deneysel olarak ta doğrulanmıştır.

Beş bölümden oluşan bu tez çalışmasında 1. Bölüm “ GİRİŞ ” bölümüdür. Bu bölümde prototip üretimi gerçekleştirilen motor hakkındaki bilgilere yer verilmiştir. 2. Bölüm “ KAYNAK ÖZETLERİ ” bölümüdür ve çalışmayla ilgili araştırma yapılmıştır. “MATERİYAL ve YÖNTEM ” bölümü 3. Bölüm olup FDAM yapısı ve çalışması, Sonlu elemanlar yöntemi, Araç için motor hesap formülleri ve Analitik hesaplamalara yer verilmiştir. 4. Bölüm “ BULGULAR ve TARTIŞMA ” bölümüdür. Bu bölümde ise FDAM için yapılacak olan tasarıma ait bilgilere, yapılan tasarım ve analizler anlatılmıştır. 5. Bölüm ise “ SONUÇ ” bölümüdür. Bu bölümde tez çalışmasında elde edilen verilerin ve sonuçların yorumuna yer verilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde EA'lar ve EA'larda kullanılacak olan FDAM hakkında daha önceden yapılmış olan çalışmalara yer verilmiş olup bu çalışmalar kısaca anlatılmıştır.

19. yüzyılda ilk kez EA fikri ortaya çıkmıştır. Hollanda' da 1835 yılında Profesör Stratingh EA modelini yapmıştır. Daha sonra ise Thomas Davenport ABD' de 1834 - 1836 yılları arasında EA'yı geliştirdiği ve üretiminin gerçekleştirildiğini bildirmiştir. Bu araçta üç tekerlek ve tek kullanımlık bataryalarla kullanılmıştır.

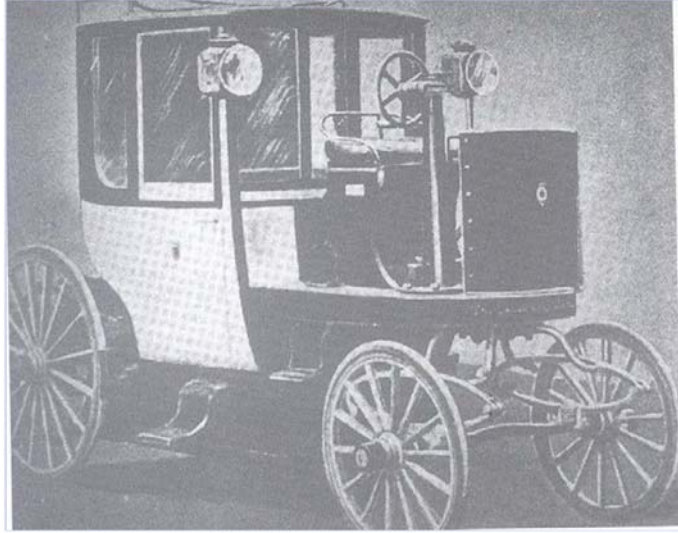
1882 yılında da William Ayrton ve John Perry İngiltere'de 3 tekerlekli diğer bir EA' nın uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Uygulaması gerçekleştirilen araçta batarya olarak 1859 yılından sonra geliştirilen kurşun-asit bataryalar kullanılmıştır. Aracın kullanıldığı yola göre değişen aracın menzili 16-20 km arasında olup azami hızı değeri ise 14 km/saattir. Carl Benz ise aradan 3 yıl geçtikten sonra 3 tekerlekli aracı geliştirmiştir (Ünlü ve ark., 2003). Almanya' da Carl Benz tarafından tanıtılan Motor Wagen isimli İçten Yanmalı Motor (İYM) teknolojisine sahiptir. Bu dönemden itibaren İYM ve EA'lar daha çok tercih edilmeye ve satılmaya başlanmıştır. İYM'nin ilk zamanlarda kötü koku yaymaları, aşırı gürültülü çalışmaları ve başlatılması için krank kolu kullanılması gibi zorlukları vardı. EA'lar da yaşanan sıkıntıların en başında bataryaların ağırlıkları nedeniyle menzil problemi ve yavaş olmaları gelmektedir (Uğur, 2011).

19. yüzyılın son dönemlerine doğru Amerika, İngiltere ve Fransa'da buluna çoğu fabrika EA üretimine başlamıştır. Morris ve Salomon'a ait Electric Carriage and Wagon Company adlı fabrika bu üreticilerin en önemlisidir. Morris ve Salomon 1895 yılında Şekil 2.1' de gösterilen "Electrobats" isimli elektrikli aracı geliştirmişlerdir.



Şekil 2.1. 1894 Electrobats (Tırıs, 2003)

1897 yılında İngiltere’de Şekil 2.2’de gösterilen “Londra Elektrikli Taksi Şirketi” (London Electrical Cab Company) tarafından üretilen araç taksi kullanılmaya başlanmıştır (Ünlü ve ark., 2003).



Şekil 2.2. London Electrical Cab Company aracı (Tırıs, 2003)

Performansı arttırmak amacıyla 1900 yılında French Electroautomobile ve 1903 yılında Krieger elektrikli-içten yanmalı araçları geliştirmiştir. Araçta elektrik motoru ve içten yanmalı motor birlikte kullanılmıştır. Ferdinand Porsche hibrid elektrikli aracın ilk deneysel tasarımını bu dönemde yapmıştır.

Hibrid elektrikli araç Woods tarafından 1916 yılında üretilmiştir. Bu araçta 4 silindri küçük benzinli motor direkt olarak elektrik motoru/jeneratör grubuna ve sonrada konvansiyonel itici şaft ile ön tahrik aksına bağlanmıştır. Sistemin karmaşık yapısına rağmen ilk başlarda ilgi ile karşılanan hibrit araç daha sonraları varlığını devam ettirememiştir (Kabaktepe, 2012).

1920'ler de EA üreticileri İYM kullanarak üretimlerini devam ettirmişlerdir. (Kabaktepe, 2012). 1960'lı yıllarda İYM'li araçlar dünyada üstünlük kurmayı başarmıştır. Tüm üstünlüklerine rağmen 1960'lı yıllarda EA'lara olan ilgi tekrardan artmaya başlamıştır. İYM'lerin hava kirliliğine sebep olmaları bu araçların üretim aşamasına geçmesine engel oluşturmuş ve birkaç üretici hava kirliliğine karşı EA'ların üretimine geçmiştir. İYM'li araçları elektrikli araç olarak sunan bazı otomotiv firmaları EA'yı yeniden tasarlamaya başlamışlardır.

1966 yılında Ford firması bir EA tasarlamıştır. Tasarlanan bu araç düşük emisyon, kolay çalışma, kullanım maliyeti ve satın alınması düşük, az park alanı kaplayacak kadar küçük olmaları gibi özellikleri taşımaktadır. 1967 yılında Şekil 2.3'te gösterilen ilk prototip yapılmış ve "Comuta" adı verilmiştir (Comuta her bir ön tekeri tahrik eden iki adet DA motora sahiptir. Aracın elektriksel beslemesi dört adet kurşun asit batarya ile sağlanmıştır. Araç 40km/saat hız ve 64 km menzile sahip olup; azami hızı 64 km/saattir (Tırıs, 2003).).



Şekil 2.3. 1967 Ford Comuta aracı (Tırıs, 2003)

General Electric 1968 yılında GE Delta aracının ilk uygulamasını gerçekleştirmiştir. (Ünlü ve ark., 2003).

Petrol krizinin 1970'lerde başlamasıyla beraber başta Amerika, İngiltere, Fransa, Almanya, İtalya ve Japonya gibi ülkelere EA araştırmalarına tekrardan hız vermişlerdir. 1973'te Electricite de France 80 aracı elektrik tahrikli hale dönüştürmüştür. Almanya'da Daimler – Benz ve Volkswagen ise deneysel ilk EA yapmışlardır. 1975 yılında ise İtalya'da Fiat X1/23 B isimli deneysel prototip araç geliştirmiştir. Japonya'da 1970'li yıllar boyunca Daihatsu, Toyota, Mazda ve Mitsubishi birlikte prototip EA üzerine çalışmışlardır (Kabaktepe, 2012).

İlk araçlarda kurşun-asit bataryalarıyla birlikte DA tahriki kullanmıştır ve 1980'lerden itibaren AA tahrikinin kullanılmaya başlandığı görülmektedir. 200 V'luk kurşun-asit bataryaları, 300 A AA güç üreten darlington transistör bazlı evirici ile birlikte 37 kW'lık 2 kutuplu indüksiyon motorunu tahrik etmek için kullanılmıştır. 1988 yılında Ford ve GE birlikte ETX-1 isimli aracın AA tahrikli sistemini geliştirmiş ve sodyum-sülfür bataryaları kullanmışlardır (Ünlü ve ark., 2003).

1988'de Japonya'da AA sistemleri DA sistemlerinin yerini almış ve kurşun- asit ile birlikte nikel-demir bataryaları kullanılmıştır (Ünlü ve ark., 2003).

1990'ların gelmesiyle yarı iletken teknolojisi ve yeni kontrol yöntemleri bulmuş ve geliştirilmiştir. Bununla birlikte DA sistemleri yerini AA sistemlerine bırakmaya başlamıştır. Böylelikle asenkron, senkron, FDA ve anahtarlamalı relüktans motorlar EA'larda kendilerine yer bulmaya başlamıştır.

1990'lar dan sonra ise elektrikli araçlar üzerine çalışmalar artmıştır. Bunlara örnek olarak Peugeot 106 Electric, Toyota RAV4, GM EV1, Ford Think City ve Nissan Hipermini gibi modeller gösterilebilmektedir. Prototip ve deneysel amaçlı olarak üretilen birçok EA bulunmaktadır. Şekil 2.4'te geçmişten günümüze EA modellerindeki büyük değişimi görülebilmektedir. Yeni nesil EA'ların çoğunda Asenkron Motor veya FDAM kullanılmıştır (Ünlü ve ark., 2003).



Şekil 2.4. Geçmişten günümüze EA (Ünlü ve ark., 2003)

EA'larda, tahrik kuvvetinin oluşturulması için, İYM yerine elektrik motoru kullanılmaktadır. Dolayısıyla EA'lar da performans tamamıyla motorun moment-hız ve güç-hız karakteristiğine bağlıdır. Elektrik motoru esasen elektrik makinası gibi çalışmaktadır yani elektrik enerjisi mekanik enerjiye çevrilmesi yanında rejeneratif frenleme esnasında oluşan mekanik enerji, elektrik enerjisine çevrilmektedir (Ünlü ve ark., 2003).

Fırça aşınması ve motor hızını sınırlandırması gibi problemlerinden dolayı FDAM'leri tasarlanmıştır. FDAM'lerde bobin stator üzerine sarılmakta ve rotorda daimi mıknatıs kullanılmaktadır. FDAM'ler, fırçalı doğru akım motorlarına göre, daha verimli, daha yüksek hıza sahip, torku daha yüksek, daha sessiz çalışmakta, uzun ömürlü ve bakımları kolaydır. Ancak motor kontrolü daha zor, harici güç elektroniği gerektirir ve maliyeti

daha yüksektir. FDAM'leri, yüksek güç istenen uygulamalarda kullanmak için doğrudan sürüş yöntemi ile EA'larda ve sanayide kullanılmaktadırlar (Ünlü ve ark., 2003).

Elektrikli araçlar 1885 yılında üretildi, ancak son 100 yıl boyunca EA gelişiminde çok az ilerleme kaydedilmiştir. Günümüzde EA konsepti yerini hibrit elektrikli araca bırakmıştır. Bunun sebebi ise hibrit aracın güvenliğinin EA'lardan daha iyi olduğunun düşünülmesidir. Diğer yandan güç elektroniği teknolojisinin desteğiyle elektrik motoru tasarımı hızla gelişmiştir. FDAM genellikle EA'lar için kullanılan bir elektrik motoru olmuştur. Gelişmiş kontrol teknikleri, düşük ağırlık ve yüksek verime sahip olmaktadır. Bu nedenle, FDAM'ler EA'lar için iyi bir alternatif sağlamaktadırlar (Rahim ve ark.,2006).

EA'lara artan ilgiden yüksek performanslı elektrik makinelerine olan talep artmaktadır. Bu nedenle yüksek kesintisiz ve maksimum moment yoğunluğu, yüksek verimlilik ve sabit güç aralığının genişliği ve bunların iyileştirilmesi elektrik makinesi tasarımcılarının sınırlarını zorlamaya başlamıştır. Bunun için, gömülü kalıcı mıknatıslı, yüzeyde kalıcı mıknatıslı, akı değişen (flux-switching) ve kalıcı mıknatıs destekli senkron relüktans makineleri gibi çeşitli elektrik makinesi çeşitleri ortaya çıkmıştır (Li ve ark., 2018).

Elektrikli araçlar için tasarlanan elektrik motorlarında, düşük hızda yüksek moment, geniş sabit güç aralığına ve düşük moment istenilen alanlarda da yüksek verimlilik istenmektedir. Yüksek hızlara ulaşıldığında yüksek manyetik akı yoğunluğu sebebiyle artan demir kayıplarını azaltmak vb. isteklerden dolayı değişen akı motorlar ya da parametreleri değişebilen motorlar tasarlanmaktadır. Örneğin, tüm istekleri karşılayabilmek için Ogawa ve arkadaşları 2017'de değişen akı hibrit motor yapmışlardır. Doğru akım alan sargısı akımı pozitif iken hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu artırıcı, doğru akım alan sargısı akımı negatif iken hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu azaltıcı bir etki yapmaktadır. Yüksek moment istendiğinde doğru akım alan sargısı ile alan güçlendirilmiş olup, yüksek hız istendiğinde ise alan zayıflatılarak istenilen değerlere verimlilik de yüksek tutularak ulaşımları sağlanmaktadır (Ogawa ve ark., 2017).

Fukami ve arkadaşları, 2017 yılında yaptıkları çalışmada, ferrit mıknatıslar ve alan sargısı kullanarak iki hava aralıklı motor tasarlamış ve DA alan sargısını ikinci bir statora yerleştirmişlerdir. Dolayısıyla fırça gereksinimini ortadan kaldırarak değişen akıllı bir motor tasarlanmışlardır (Fukami ve ark, 2017).

Mıknatıs bulunan elektrik makinelerinde, yüksek sıcaklıklarda çalıştığında dikkat edilmesi gereken nokta mıknatısların bulunulan sıcaklıkta demagnetize olup olmayacağıdır. Raminosa ve arkadaşları ise 2017 yılında yaptıkları çalışmada, sargıları 280 °C'ye dayanabilecek kadar yüksek sıcaklık izolasyonu sağlayan malzeme ile kaplamış ve aynı statora doğru akım alan sargısını da yerleştirerek motoru yüksek sıcaklıklarda da çalıştırıp %43 güç artışı sağlamışlardır. Motorun rotorunu ise anahtarlamalı relüktans motoru gibi tasarlayarak istenilenlere ulaşmışlardır (Raminosa ve ark., 2017).

Doğru akım motorları birçok yerde kullanıldığı gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. FDAM'lerin daha çok tercih edilmesi fırçalı motor modellerinin kullanım alanlarının kısıtlı olmasından kaynaklanmaktadır. Fırçalı motorların devamlı olarak bakıma ihtiyaç duymaları, değişen durumlarda ve devamlı kullanılan yerlerde dezavantaj sağlamaktadır. Bu FDAM'lerin geniş kullanım alanları vardır. FDAM'lerin bu denli ön plana çıkıp geniş kullanım alanı bulması yüksek performans değerlerine sahip olmasında kaynaklanmaktadır. Yüksek tork ve eylemsizlik gerektiren uygulamaların birçoğunda, dış rotorlu tipi olan fırçasız doğru akım motorları kullanılmaktadır (Yedemale, 2003). Dış rotorlu uygulamalarda motor momentinin doğrudan aktarımını gerçekleştirmesi ve aktarım için başka elemanlara gerek duymamaları diğer motorlarla karşılaştırıldığında yüksek verim istenilen uygulama alanlarında (özellikle EA'larda) kullanılmaktadırlar. Bunun yanı sıra dış rotorların koruması ve sarsıntılara karşı görülen direnç gibi çeşitli dezavantajları da vardır

3. MATERYAL VE YÖNTEM

EA'larda tekerlere iletilen moment değerini, elektrik motoru ürettiğinden EA'nın performansı tahrik motorunun moment-hız veya güç-hız karakteristiği ile belirlenmektedir. Bundan dolayı kullanılacak olan elektrik makinasının seçimi çok önem olmaktadır. Elektrik motorları elektrik enerjisini mekanik enerjiye ve rejeneratif frenlemeden meydana gelen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmektedir. Bu özellikler elektrik motorlarının EA'larda kullanılmasını sağlamaktadır (Xue ve ark., 2008; Grunditz and Jansson, 2009).

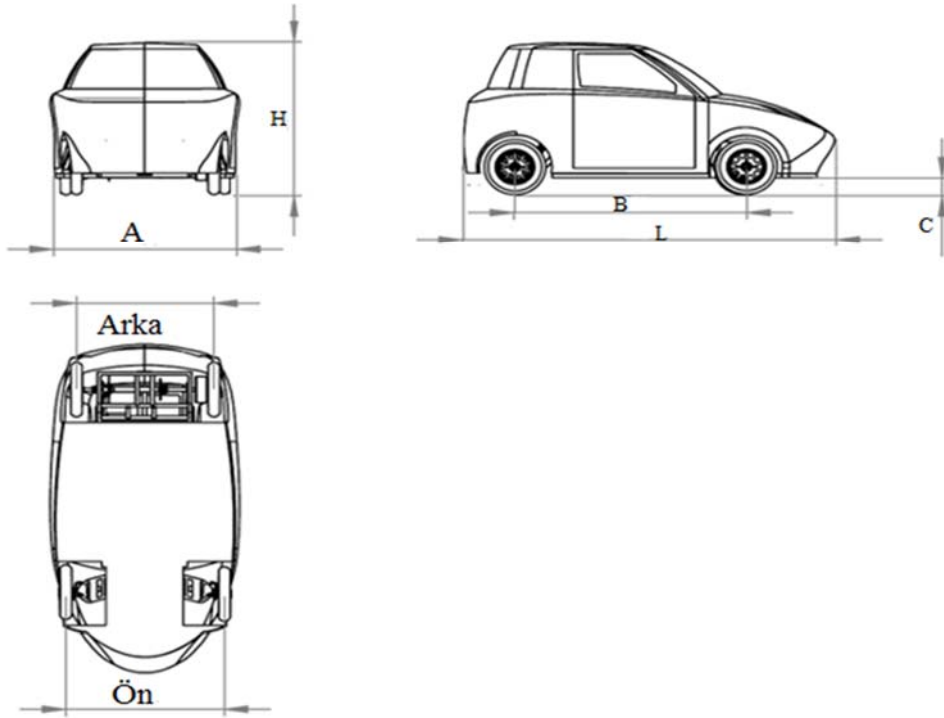
Fırçalı tip elektrik makineleri (AA senkron motor, DA motor) maliyetleri yüksek olmasına rağmen basit ve bağımsız dinamik davranışlara sahiptir. Bu nedenle pek çok endüstriyel uygulamada fırçasız elektrik makinelerinin yerine tercih edilmiştir. Fırçasız tip elektrik makinelerinin çok değişken ve doğrusal olmayan dinamikleri düzenlenerek sabit hız elde edilmesi ile meydana gelen motorlara günümüzde FDAM'leri denilmektedir (Krause ve ark.,1994). FDAM aslında sürekli mıknatıslı bir senkron motordur. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM) DA kaynağından beslenen bir evirici tarafından sürüldüğünde, meydana gelen makine karakteristiği DA şönt motorun karakteristiğine benzemektedir. Bundan dolayı bu tip motorlar FDAM olarak adlandırılmıştır (Krause, 1986; Kenjo, 1991).

Endüstriyel uygulamalarda, düzgün tork ve yüksek verim için genellikle DA fırçalı, senkron veya AA indüksiyon motorlardan biri tercih edilmektedir (Kenjo ve Nagamori,1985). Bu motorlarda uyarımın fırça ve kolektörlerle sağlanmasından dolayı, rotor kayıpları artmakta, sürekli bakım gerektirmekte ve motorun ömrünü azaltmaktadır (Pillay ve ark.,1989). Ayrıca bu motorlarda komütatör hızı sınırlıdır, gürültülü çalışır, aşınma mevcuttur ve oluşan RFI sinyali çevreyi rahatsız etmektedir. Bu motorlarda sargıları taşıyan ve sargıları oluşturan rotorun soğutulması da kolay değildir (Miller, 1983).

Klasik DA motorlarının, ısınma ve aşınmadan dolayı arıza meydana gelmesi, fırça ve komütasyona ihtiyaç duymaları ve devamlı olarak bakıma ihtiyaç duymaları sebebiyle endüstriyel uygulamalarda kullanım alanları giderek azalmaktadır. Bu motor yerlerini bakıma ihtiyaç duymayan FDAM ler almaktadır (Sen, 1990; Chan ve ark., 1998).

3.1. Motor Giriş Parametrelerinin Seçilmesi

Motor tasarım sürecinde iken bazı parametrelerin tasarımın başlangıcında seçilmesi gerekmektedir. Bu aşamalardan önce motorun uygulanması gereken araca ait parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Referans olarak alınıp motorun uygulanması için planlanan araç ElektroGOP isimli elektrikli yarış aracıdır. Aracın boyutları Şekil 3.1’de ve Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Aracın boyutlandırılması

Çizelge 3.1. Aracın boyutları

	Minimum (cm)	Değeri (cm)	Maksimum (cm)
A	120	124	180
B	130	158	-
C	10	10	-
H	100	118	-
L	200	259	425
ÖN	100	107	-
ARKA	80	106.5	-

Aracın hava direncini temsil eden sürüklenme kuvveti CFX-Post'ta da hesaplanmıştır. Z eksenini akış eksenidir ve bu eksenindeki kuvvet 68.3 N' dir. Buna göre 55 km/s' de 43 cm çapında tekerlek üzerinde elde edilecek olan tork değeri 66 Nm olarak hesaplanmıştır. Sürtünme kuvveti altındaki C_D Eşitlik 3.1' de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$C_D = \frac{2 \cdot D}{\rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (3.1)$$

$$= \frac{2 \cdot 68.3}{1.185 \cdot 15^2 \cdot (1.16 \cdot 1.18)}$$

$$= 0.374 \text{ Nm}$$

Eşitlik 3.1'de verilen D sürüklenme kuvveti, ρ kütle, v hız ve A kesit alanını ifade etmektedir. Eşitliğe göre 68.3 N sürüklenme kuvvetinde 1.165 x 1.18 m alanda 15 km/s' de 1.185 kg/m³ lük hava sürüklenmesinin 0.374 C_D sürüklenme kuvvetine sahip olduğu görülmüştür.

Araç üzerine düz bir yolda sürüklenme kuvveti ve yuvarlanma kuvveti uygulanmaktadır. Yuvarlanma kuvveti Eşitlik 3.2'de ve Toplam uygulanan kuvvetler ise Eşitlik 3.3'te gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$F_R = C_R * N = 0.015*250*9.81 \cong 37 \text{ N} \quad (3.2)$$

$$F_{Total} = D + F_R = 68.3+37 = 105.3 \text{ N} \quad (3.3)$$

Motorun torku ise tekerlek yarıçapı ve F_{Total} ile Eşitlik 3.4' te gösterildiği gibi hesaplanır.

$$T = F_{Total} * R_W = 105.3*0.215 = 22.64 \text{ Nm} \quad (3.4)$$

Hesaplanan değerler motor tasarımı için uygun bulunmuştur. Sürüş testlerinden sonra en uygun sürüş koşulları belirlenecektir.

3.2. Fırçasız Doğru Akım Motoru ve Önemi

Günümüzün gelişen teknolojisinde güç elektroniği, mikro elektronik, sürekli mıknatıslar, kontrol ve mikroişlemciler, Sayısal İşaret İşleme (DSP) ile birlikte DA makinesinin çalışma prensibine uyum sağlayan endüstriyel uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Ancak kollektörsüz ve fırçasız, elektronik anahtarlamalı makina uygulamalarında çok daha fazla kullanılmıştır. Kalıcı mıknatıs malzemelerinin günümüzdeki teknolojisi ile ulaştığı seviye, kalıcı mıknatıslı motorların diğer motorlardan daha üstün özellikte olmalarına yardımcı olmuştur. FDAM'ler yüksek moment/akım ve moment/eylemsizlik oranı, sorunsuz yapı, yüksek verim ve güvenilirlik gibi özelliklerinden dolayı birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır (Yılmaz, 2005).

FDAM, statoru üzerinde üç faz sargıları, rotora entegre sabit mıknatısları bulunan ve zıt elektro manyetik kuvvet (emk) şekli trapezoidal olan sabit hızlı senkron motorlardır. FDAM'ler yapısal olarak, Sabit Mıknatıslı (SM) motorların içten dışa terslenmesi ile oluşmaktadırlar (Aydoğdu, 2006).

Fırçasız motorlarda stator ve rotordan oluşmaktadır. Stator, sabit, çok veya tek kutuplu, elektromanyetik alan üreten bobinlerden, rotor ise sürekli mıknatısları üzerinde bulunduran hareketli parçadan oluşmaktadır. Rotor ve stator arasında aralık bulunmaktadır ve bu aralık hava aralığı bölgesi olarak adlandırılmaktadır. FDAM'lerde rotor içeride veya statorun dış kısmında olabilmektedir. Stator çekirdeğindeki motor sargıları olukların içinde bulunur. İki oluk arasındaki bölgeye stator dışı adı verilmektedir. Stator dışına sarılı sarım sargıları sarım sayısı açısından makine için önemli olmaktadır. FDAM'ler tek ya da üç faz beslemeli tasarlanabilmektedir. Motorun parametre değerlerinden mıknatıs sayısı kutup sayısını vermektedir. Motordaki kutuplar en az iki kutup olmalı ve kutup sayısı çift sayıya sahip olduğu zaman motora istenilen sayıda kutup tasarlanabilmektedir (Krause ve ark., 2002).

3.2.1. Fırçasız doğru akım motoru

FDAM'ler genel olarak manyetik kutuplardan meydana gelen yüzey mıknatısları ve yoğunlaştırılmış stator sargıları olan makinelerdir. Motor tasarımında stator fazlarının sargı yoğunluğundaki gibi hava aralığı akı yoğunluğunun kare dalga form dağılımı olması üzerine kuruludur (Ooi, 1981).

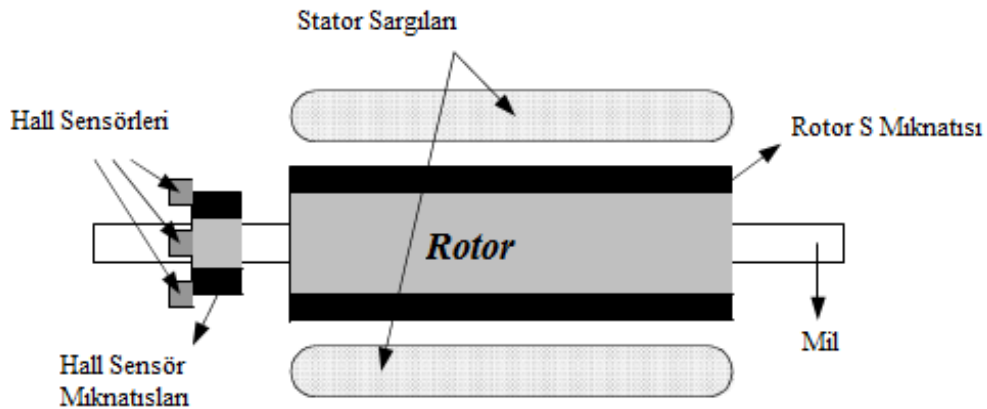
FDAM'ler yüksek verim, sessiz çalışma, fırça ve kollektör yapılarının olmaması gibi özelliklerinden dolayı avantajlı olmaktadır. Bu avantajlardan dolayı bakım işlemlerinin basit ve masrafsız olması, patlayıcı ortamlarda dahi bu motorların tehlike meydana getirmeden kullanılmasını sağlamaktadır. Sargı sıcaklığı kolayca dışarıya aktarılmaktadır. Aktarımın bu denli kolay olmasını sağlayan etken elektriksel arkların meydana gelmemesi ve endüvi sargılarının statorda bulunmamasındandır. Rotor üzerinde sargı bulunmadığı için elektriksel kayıplar minimum düzeye inmektedir. FDAM'ler, düşük güçlerde dahi diğer motorlarla kıyaslandığında verim ve güç/hacim oranlarının daha yüksek olduğu söylenebilmektedir. Motor boyutları aynı olsa bile daha yüksek çıkış gücü sağlamaktadır (Aydoğdu, 2006).

FDAM'lerin kontrol edilmesinde DA anahtarlama için anlık rotor pozisyon bilgisi, motorun çalıştırılmasında başlatma, yol alma ve daimi çalışma durumlarında ise farklı kontrol algoritmalarının uygulanması, rotor üzerindeki sabit mıknatısların zamanla manyetik özelliklerini kaybetmeleri bu motorların dezavantajlarından sayılmaktadır. Manyetik malzemelerde meydana gelen gelişmelere kıyasla, boyut-fiyat oranlarına bakıldığında, kalıcı mıknatıslı uyarım sistemlerinin genel olarak 20 kW dan daha küçük motor uygulama alanlarında çok daha iyi olmaktadır (Toliat ve Gopalarathnam, 2002).

3.2.2. Fırçasız doğru akım motor yapısı

Bu makinelerde, hava aralığında kare dalga formunda akı dağılımı oluşturmak için statora sarılan sargılar ve sabit mıknatıslı rotor kutupları istenen formda yerleştirilmektedir. Fırçasız DA motorları tek veya çok fazlı olarak yapılmaktadır. Çok fazlı motorlar, yüksek güçlü (MW mertebesindeki) sürücüler için tercih edilmektedir. Tek fazlı motorlar, çok fazlı motorlara göre kararsız hareket ederler ve güç tüketimine bakıldığı zaman çokta tasarruflu olmayan motorlardır (Toliat ve Gopalarathnam 2002).

Şekil 3.2'de gösterilen FDAM'ler de temel yapı olarak, stator, rotor ve hall sensörleri bulunmaktadır. Stator sargılara ve rotor sabit mıknatıslara sahiptir. Ayrıca hall sensörleri sayesinde elektronik komütatör için rotor pozisyonunu ölçmektedirler (Yedamale, 2003).



Şekil 3.2. FDAM'nin yapısı (Yedamale 2003)

FDAM'nin statorunun yüzeyi yalıtılan çelik sacların preslenmesiyle elde edilmektedir. FDAM sargılarında, yıldız veya üçgen bağlanabilmektedir. FDAM'ler stator oluk sayısı,

- rotor kutup sayısı
- faz sayısı
- sargı şekline

bağlı olarak seçilmektedir. Tasarımda tutma (cogging) torkunu minimum düzeyde olması için oluk/kutup oranı kesirli olarak seçilmektedir (Yedamale, 2003).

FDAM'ler SM doğru akım motorlarıdır. Fırçalı DA motorlarda elektriksel güç motora fırça ve kolektörlerle verilirken, FDAM'lerde elektriksel güç aktarımı elektronik anahtarlarla yapılmaktadır. Kolektörün olmaması rotorun hafif, ataletinin düşük endüvi boyunun daha kısa ve sargıların statorunda olması sağlamaktadır. FDAM'nin hız aralığı geniş olup, motorun boyutuna ve hız-yük durumuna bağlı olarak değişmektedir. FDAM'lerde hız DA bir kaynaktan beslenen evirici ile stator sargılarına akım verilerek ayarlanmaktadır (Yazıcı, 2008).

FDAM'nin yapısı SMSM olarak da bilinen mıknatıslı AA motora benzemektedir. FDAM ile SMSM arasında sargıların statordaki oluklara yerleşmesi farklılıklar göstermektedir. SMSM'de sargılar stator boyunca sinüzoidal olarak dağılmaktadır. Böylelikle sinüzoidal formda zıt emk endüklenmesi sağlanmaktadır. Bununla beraber FDAM'de indüklenen zıt emk dalga şekli trapezoidal olmaktadır. Bunu sağlamak için stator sargıları kutup ayaklarına toplu olarak yerleştirilmektedir. SMSM'lerde stator fazlarına sinüzoidal formda gerilim uygulanırken FDAM'de sargı akımları adım motorlarında olduğu gibi elektronik olarak anahtarlanmaktadır (Çınar, 2002).

FDAM'de tek veya çok faz sargıları AA makinalara benzemektedir. Sargılar çift katmanlı (iki sargının birer kenarları bir oyuğa) ve paralel (bükümlü) sarım olurken, tek katmanlı toplu sarımlar da olmaktadır. Sargılar tek tek kendi aralarında bağlanarak bir faz grubu meydana getirmektedirler. Faz grupları ise kendi aralarında seri veya paralel olarak uygun şekilde bağlanıp yıldız, üçgen, zikzak, iki-faz veya basit bir faz sargıları oluşturmaktadırlar. Sargılarda üretilen harmonik gerilimleri azaltmak için AA sargıları genellikle kısa çizgi adımları ile sarılmaktadır. Sargılar, faz grupları ve faz oyuklarının

dışında kalan kısımdan yalıtılmaktadır. Oyukların içerisindeki teller yalıtımı güçlendirmek için verniklenip, fırınlanmaktadır (Bal, 2006).

Statorda toplu ve dağıtımlı sarım olmak üzere iki tip sarım kullanılmaktadır.

Toplu (yoğunlaştırılmış) sarım

Toplu sarım tipinde sargılar toplu biçimde stator kutupları üzerine sarılmaktadır. Motorun devir yönünü değiştirebilmek için en az üç kutup (sargı) olması gerekmektedir. Her bir faz sargısı bir kutup üzerine yerleştirilmektedir. Toplu tip sarım kullanıldığında motor yapısı basit ve işçiliği kolay olmaktadır. Ancak üretilen moment dalgalı olmakta ve düşük hızlarda hareket düzgün olmamaktadır. Düzgün moment elde etmek için klasik DA motorlarda yapıldığı gibi sargı sayısını arttırmak ve sargıların kontrolünde kullanılan güç yarıiletkenlerinin sayısını arttırmak gerekmektedir (Bal, 2006).

Dağıtımlı sarım

Dağılımlı sarım tipi sincap kafesli asenkron motorlara benzemektedir. Bu sarım şeklinde sargılar stator sargılarına dağılmaktadır. Genellikle sargılar statora 120 elektriksel derece aralıklarla dağılmaktadırlar (Bal, 2006).

3.2.3. Fırçasız doğru akım motorunun sınıflandırılması

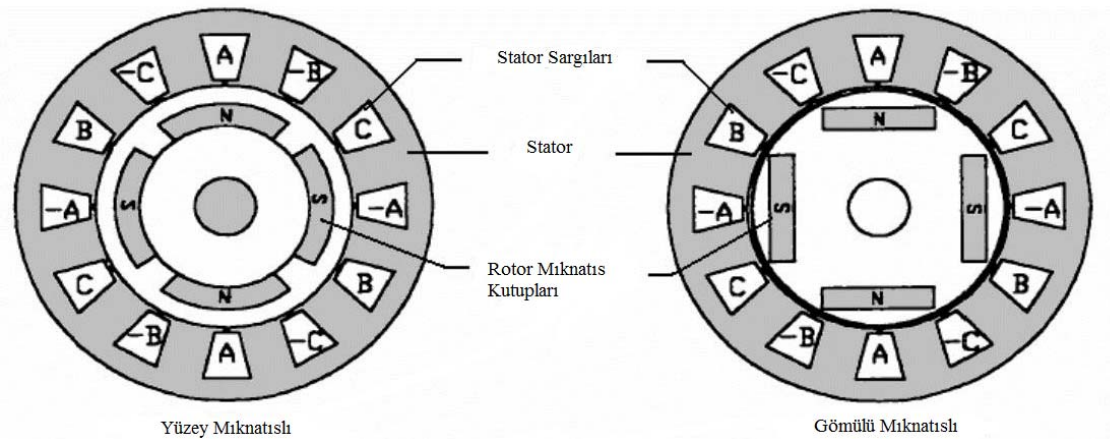
FDAM'ler, mıknatıslar statorun iç kısmında veya dış kısmında bulunmasına göre stator, stator sargılarında indüklenen zıt emk dalgasına göre sınıflandırılmaktadır. Rotor statorun iç kısmında yer alıyor ise iç rotorlu, dış kısmında yer alıyor ise dış rotorlu olarak isimlendirilmektedirler. Ayrıca sargılardaki zıt emk geriliminin şekline göre sinüzoidal (sinüs dalga uyarmalı) ve trapezoidal (kare dalga uyarmalı) olarak sınıflandırılmaktadır. Fırçasız motor yapısında farklı mıknatıs seviyelerinin bulunması, dönen mıknatıs ve sabit bobinleri olmasından dolayı kendilerine geniş uygulama alanı bulmaktadırlar (Ying ve Ertuğrul, 1999).

Trapezoidal yapıdaki alternatif akım FDAM moment dalgalanmalarının fazla olması nedeniyle motorun yüksek performanslı uygulamalarda kullanılmasını güçleştirmiştir. FDAM'lerden sonra geliştirilen sabit mıknatıslı sinüzoidal makinelere vektör kontrol yöntemleri daha kolay uygulanabilmektedir (Ying ve Ertuğrul, 1999).

Mıknatıs boyutlarının küçük olması eylemsizlik değerinin de minimum seviyede kalması sağlanmaktadır. Bundan dolayı uygulamalarda performans/maliyet'e göre yüksek enerji yoğunluğuna sahip mıknatıslar seçilmektedir. Hız kararlılığının yüksek olması istenen uygulamalarda dış rotorlu motor iç rotorlu motora nazaran yüksek eylemsizlik değerine sahip olduğundan dış rotorlu motor kullanılmaktadır (Yılmaz, 2005).

3.2.3.1. İç rotorlu fırçasız doğru akım motoru

İç rotorlu FDAM yapısal olarak senkron ve asenkron motor yapısına benzemektedir. Şekil 3.3'te iç rotorlu FDAM'nin yapısı gösterilmiştir. Dış taraftaki stator, sabit endüvi sargılarını taşımaktadır. İç rotorlu FDAM'ler de sabit mıknatıslar ya ince şeritler halinde rotora gömülü ya da rotorun dışına yapıştırılmaktadır. Sabit mıknatıslar rotorun yüzeyine yapıştırıldığından mıknatıslar merkezkaç kuvvetine karşı mukavemetin zayıf olmasına neden olmaktadır (Yılmaz, 2005).



Şekil 3.3. İç rotorlu FDAM yapısı (Yılmaz, 2005)

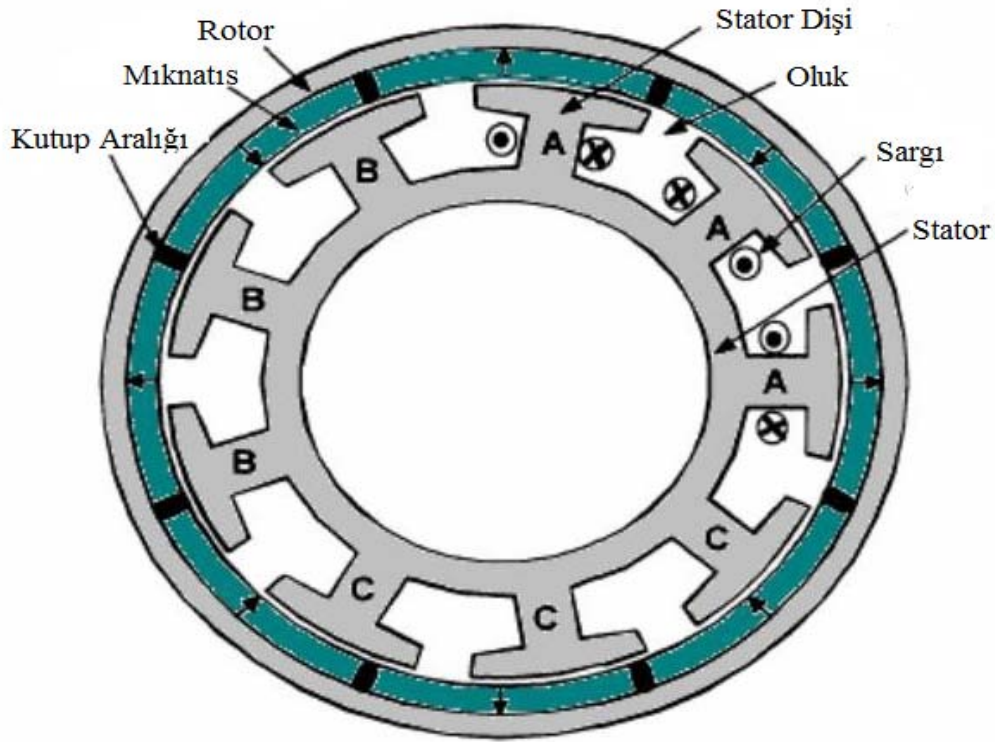
İç rotorlu FDAM'ler endüstride kompresör ve servo motor uygulamalarında ve yüksek performanslı motor olarak CNC tezgahlarında kullanılmaktadır (Liu ve Cheng 1993). Bu yapının en belirgin üstün özelliği yüksek moment/eylemsizlik oranı sayesinde eylemsizlik değerlerinin düşük olmasıdır.

Yüksek hızlarda ise sabit mıknatıslar rotorda bulunan yerlerinden çıkıp motora zarar verme ihtimali (elektriksel direnci yüksek olan metal şeritler ile rotor sarılarak bu durumu önlemek mümkündür), stator yapısının seri üretime uygun olmaması ve işçiliği fazla olması gibi özellikleri bu yapının en belirgin dezavantajlarıdır (Özçira, 2007).

Dış rotorlu fırçasız motorlara göre üretim maliyetleri yüksek olup yüksek performans istenen uygulamalarda kullanılmaktadır (Karakaş, 2016).

3.2.3.2. Dış rotorlu fırçasız doğru akım motoru

FDAM'ler de kullanımı en çok tercih edilen yapı dış rotorlu FDAM yapılarıdır. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi iç kısımda bulunan stator endüvi sargılarını taşımaktadır. Sabit mıknatısları taşıyan rotor ise dış kısımda bulunmaktadır ve serbest olarak dönmektedir (Aydoğdu, 2006).



Şekil 3.4. Dış rotorlu FDAM yapısı (Yılmaz, 2005)

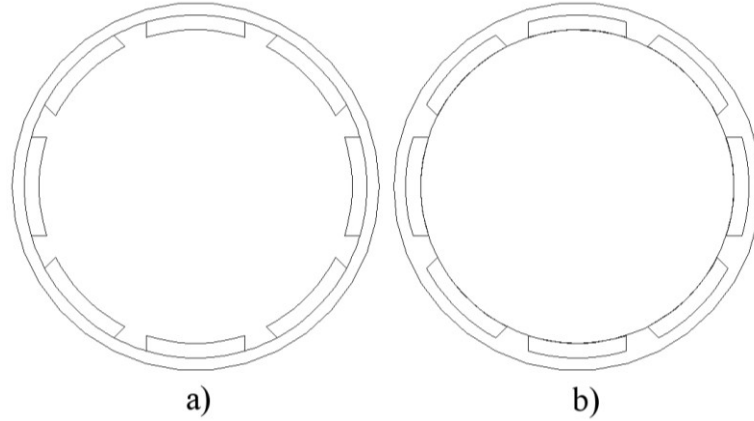
Mıknatıslar rotorun iç kısmında kaldığından yüksek hızlarda bile mıknatıslar rotordan ayrılmamaktadır. Fakat mıknatıslar dış kısımda kaldığı için mıknatısların kırılma problemleri oluşmaktadır. Stator olukları ise dış kısımda olduğu için seri üretimde büyük kolaylık sağlamaktadır (Yenil, 2016).

Dış rotorlu yapıda karşılaşılan en büyük problem, rotordaki dengesizlik ve bu dengesizliğin oluşturduğu etkilerdir. Rotordaki dengesizlikler (anma hızında dahi) iç rotorlu yapıya göre daha büyük olan eylemsizlik etkisi ile titreşimlere neden olmaktadır. Bu tip motorlar, yüksek eylemsizlik sebebiyle aniden meydana gelen yük değişimlerinde hıza ait sabit değerini korumaktadırlar. Bu yüzden, fan ve çamaşır makinesi uygulamalarında kendilerine geniş kullanım alanı bulmuşlardır (Kim ve ark., 2003).

Dış rotorun avantajlar (Halselman, 1994):

- Yüksek eylemsizlik ve daha az vuruntu momenti etkisi
- Çıkış torkunun artırılması
- Tork değişimi
- Düşük hız gerektiren uygulamalarda yüksek performans etkisi
- Sessiz çalışma

Dış rotorlu motorlarda rotorun dönmesi ile oluşan kuvvetler mıknatısları rotora sabitleme yönünde kuvvet uyguladığından az maliyet ve kolay montaj imkânı sağlayan yüzey mıknatıslı yapı daha çok tercih edilmektedir. Şekil 3.5'te, dış rotorlu bir FDAM yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı rotor kesitleri gösterilmiştir. Gömülü mıknatıslı yapıda laminasyonlu rotor boyunduruğu kullanılması gerekmektedir. Fakat laminasyonlu rotor boyunduruğu motoru mekanik açıdan zayıflatırken, üretim maliyetlerini de arttırmaktadır. Kütleli rotor boyunduruğu ve yüzey mıknatıslar kullanılarak, laminasyonlu rotor boyunduruğu ve gömülü mıknatıslara göre montaj kolaylığı, fiziksel dayanıklılığı ve düşük maliyet gibi birçok avantaj sağlamaktadır (Turhan, 2014).



Şekil 3.5: (a)Gömülü (b)Yüzey montaj mıknatıslı dış rotor tasarımları (Turhan 2014).

3.2.3.3. İndüklenen gerilimin şekline göre rotorlu fırçasız doğru akım motorları

FDAM'ler sargılarında indüklenen gerilimin şekline bağlı olarak trapezoidal ve sinüzoidal olarak sınıflandırılmaktadır. Sinüzoidal FDAM literatürde SMSM olarak bilinmektedir. Çizelge 3.2'de FDAM ve SMSM'nin özellikleri karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. FDAM ve SMSM' nin karşılaştırılması (Yılmaz, 2005)

	SMSM	FDAM
Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	Sinüzoidal Dağılım	Kare Dağılım
İndüklenen Gerilim	Sinüzoidal	Trapezoidal
Stator Akımı	Sinüzoidal	Kare
Toplam Güç	Sabit	Sabit
Moment	Sabit	Sabit

Motorda indüklenen gerilim ve akım uyarmasının saf sinüzoidal olduğunda daha düzgün ve titreşimsiz sürekli moment üretimi yapılmaktadır. Stator sargıları bu tip motorlarda sinüzoidal olarak dağılmıştır. Rotora yerleştirilen mıknatısların ürettiği manyetik akı yoğunluğu ise hava aralığı boyunca sinüs fonksiyonunu izleyecek şekilde değişmektedir.

FDAM'ler, SMSM'lerden özellik olarak farklılık göstermektedir. Bu motorlar her faz sargısında trapezoidal gerilim üretmek için tasarlanmışlardır. Bu özelliğe sahip motorlar bir periyotta 60° elektriksel aralıklarla 120° lik yarı kare dalga uyarma akım ile beslenmektedirler. SMSM'lerde hız ve konum kontrolünün olması için hassas konum bilgisi gerektirmektedir. Ancak FDAM'lerde her bir periyotta 6 komütasyon anının algılanması kontrol için önemli ölçüde kolaylık sağlamaktadır. FDAM'lerde moment daha dalgalı bir yapıda olmaktadır (Yenil, 2016).

3.3. Fırçasız Doğru Akım Motorunun Çalışma Prensibi

FDAM, sabit mıknatıslı bir rotora sahip ve elektronik komütasyon için rotor pozisyonu bilinmesi gereken senkron bir motordur. FDAM'lerde stator sargıları ile döner manyetik alanlar oluşmaktadır. Rotorun pozisyonuna göre anahtarlanan yarı iletken elemanlar anahtarlanarak Döner Manyetik Alan oluşturmaktadır. Rotor hızı ile stator döner alanı arasında kayma olmamaktadır. Bu özellikleri ile senkron motorlara benzemektedir.

FDAM'larda kutup değişimi, fırça ve komütatörlerle mekaniksel şekilde yapılmaktadır. Mekanik komütatör, rotora sabit olduğundan anahtarlama, değişen manyetik alanın etkisiyle otomatik olarak ayarlanmaktadır. Ancak FDAM' ler de kutup değişimi elektronik olarak yarı iletken anahtarlarla yapılmaktadır.

FDAM'ler, trapezoidal zıt emk sahiptir ve sabit moment üretebilmek amacıyla kare dalga akımla çalışacak şekilde tasarlanmışlardır.

Bu motorlar;

- Hava aralığında trapezoidal dağılımlı mıknatıs akısı,
- Trapezoidal akım şekli,
- Konsantre stator sargıları,
- SMSM göre daha düşük maliyet ve basit kontrol,
- Komütasyon anlarında moment dalgalanması,

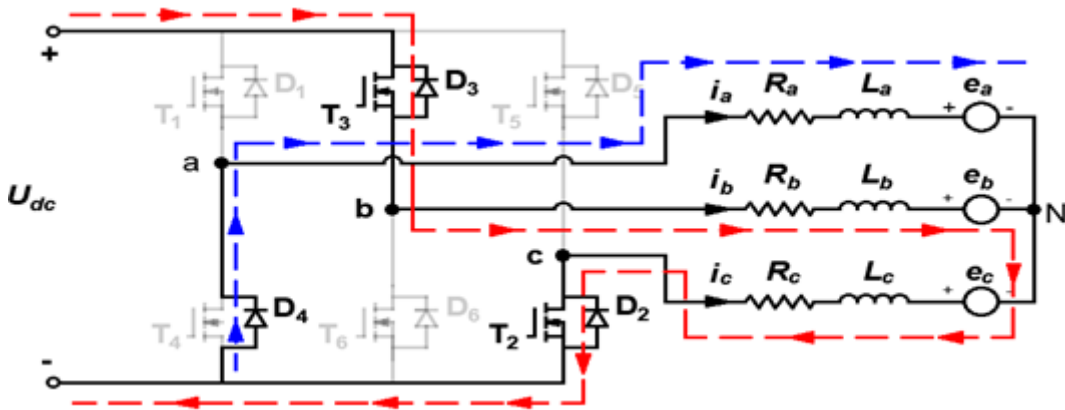
gibi özelliklere sahiptirler. FDAM' lerin bu şekilde olanlarında uyarım akımı, kare dalga şeklinde olup her faz sargısından bir periyod içerisinde 120° süreyle iki kez geçmektedir (Aydoğdu, 2006).

3.3.1. Fırçasız doğru akım motorlarının komütasyonu

FDAM'lerde dekomütasyon altı adımdan oluşmaktadır. Her adımın elektriksel aralıkları 60° ar dereceye denk gelir ve iki sargı enerjilendirilmektedir. Anahtarlama adımlarının sırasını rotor konumu belirlemektedir. Bundan dolayı FDAM'ler de rotor konumunun belirlenmesi kontrol için şart olmaktadır. Sensörlü ve sensörsüz algılama yöntemleriyle rotor konumu belirlenmektedir. Sensörlü algılama yöntemi ile rotora bağlanan enkoder veya rotorda bulunan sabit mıknatıslardan yararlanılarak konumu belirleyen hall sensörleri kullanılmaktadır (Karakaş, 2016). Sıklıkla kullanılan rotor konum tespiti yöntemi zıt emk yöntemiyle yapılmaktadır. Zıt emk yöntemi ile kullanılan donanımsal eleman sayısı az olduğu için genellikle düşük güçlü motorlarda kullanılmaktadır. Ancak kullanılan bu yöntemin en büyük olumsuzluğu düşük hızlarda konum tespitinin çok zor yapılmasıdır.

Sensörsüz kontrol yöntemiyle motor faz akımlarından elde edilen dönüşümler neticesinde motor akılarının elde edilmesi ve elde edilen akılar ile rotor pozisyonun tespit edilmesidir. Bu kontrol yöntemleri ile makinanın hız ve moment kontrolleri yapılabilmektedir (Aydoğdu, 2006).

FDAM'nin anahtarlama durumları Şekil 3.6'da gösterildiği gibidir. Rotor konumlarına göre oluşan stator sargılarının enerjilendirilmesi 60 derecelik aralıklarla yapılmaktadır. Rotorun dönme hızı ile statorda oluşturulan manyetik alan hızı birbirine eşittir. (Aydoğdu, 2006).



Şekil 3.6. Komütasyon bölgesinde faz akımları (Çorapsız, 2018)

3.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi ilk kez yapı analizinde kullanılmıştır. Hrennikoff (1941) ve Mc Henry (1943) tarafından yarı analitik analiz yöntemleri geliştirilmiştir. 1960'lı ve 1970'li yıllarda, bükülmüş düzlem yüzeylerde, basınçlı kaplarda ve üç boyutlu problemlerin yapısal, akışkan ve ısı analizlerinde genel olarak kullanılmaya başlanmıştır (Okur, 2007).

Sonlu elemanlar yöntemi, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin çözümlenmesinde en çok tercih edilen sayısal yöntemdir. Yöntemin mühendislik alanlarında sıklıkla kullanılmasının nedeni bilgisayar programında yalnızca giriş parametrelerinin değiştirilerek herhangi bir özel problemin çözümü için kullanılabilmesindedir. Sonlu elemanlar yöntemindeki ana hedef, karmaşık bir problemi basite indirgeyerek bir çözüm bulmaktır. Problemin daha basit bir probleme indirgenmesiyle kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmektedir. Karmaşık matematiksel denklemlerde kesin sonuç hatta yaklaşık sonuç dahi bulunmaması durumunda "Sonlu Elemanlar Yöntemi" kullanılabilir tek yöntem olmaktadır (Akgün, 2013).

SEY'in temelinde çözüm bölgesinin küçük bölümlere parçalanarak çözümlene işlemine dayanmaktadır.

SEY, manyetik alanların analizinde, elektrik makinelerinin performans hesaplarında, termik ve hidrolik problemlerin çözümünde, eğilme, burulma ve kırılma analizlerinde, mekanik dayanım ve kuvvet hesaplamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Elektrik makinalarının temelleri, elektromanyetik alanla etkileşim halinde bulunma prensibine dayanmaktadır. Diğer bir ifadeyle, elektromanyetik olaylar Maxwell'in elektromanyetik denklemleri matematiksel formu ile ifade edilebilmektedir. Maxwell denklemleri, analitik veya sayısal yöntemlerle çözülebilmektedir. Analitik yöntemlerle eşdeğer devre modeli, sonlu elemanlar yöntemi ile elektrik makinalarının ve karmaşık geometrilerin modeli verilebilmektedir. SEY kullanılarak endüvi reaksiyonu, sargı endüktans, demir kayıpları, FDAM'deki etkileşim momenti, oldukça hızlı ve yaklaşık sonuçlarla hesaplanabilmektedir (Dönmezer, 2009).

Elektrik makinesinin doğru üretilebilmesi için tasarımı sırasında yapılan manyetik alan analizinin doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. Ayrıca makine karakteristiklerinin de doğru olarak hesaplanması gerekmektedir. FDAM'lerde motor değerlerinin hesaplanmasında kullanılan manyetik malzemelerin özensiz, karmaşık geometride ve doğrusal olmaması, manyetik alan analizi ile beraber motor değerlerinin hesabını da zorlaştırmaktadır. Değerlerin ve karışık diferansiyel denklemlerin çözümlenmesini kolaylaştırabilmek için uygulanan matematiksel yöntemlerden biri olan ve en çok tercih edilen SEY kullanılmaktadır (Turhan, 2014).

3.4.1 Simülasyon yazılımı: ANSYS

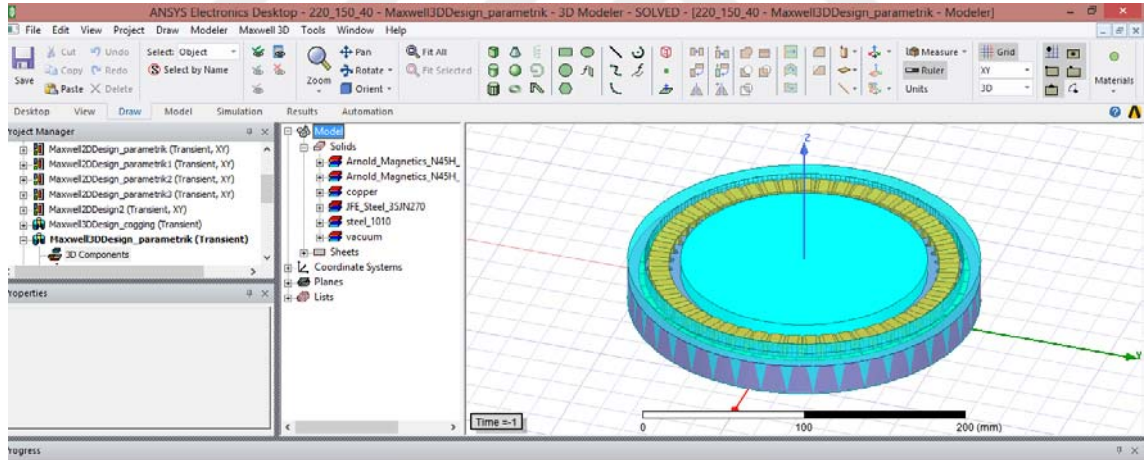
ANSYS programı fiziksel olayların çözümünde kullanılan sonlu elemanlar paket programıdır. Bir fiziksel olayın sonlu elemanlar analizi şu adımları içermektedir (Dönmezer, 2009);

Fiziksel bir olayın sonlu elemanlar analizi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır (Dönmezer, 2009);

- Sistemin matematiksel modeli
- Sonlu elemanların model üzerine yerleştirilmesi
- Malzeme özelliklerinin belirlenmesi
- Kaynak belirlenmesi
- Sınır koşullarının belirlenmesi
- Sonlu elemanlara göre eşitliklerin elemanlarının belirlenmesi ve matris formuna getirilmesi
- Bilinmeyen değişken eşitliklerinin çözümü
- Sonuçların analizi

Gerçekleştirilen çözümün doğruluğu hacmin veya alanın ayrıldığı sonlu elemanın sayısına ve yük altındaki sistemin davranışlarının modellenmesine göre değişir. ANSYS programı ile sonlu eleman sayısı yapılan mesh işleminin sonrasında oluşan bölge sayısı olarak adlandırılmaktadır. Oluşan mesh sayısının fazla olması yapılan analizin doğruluk oranını artırmaktadır. Ancak sonlu eleman sayısı yani mesh sayısının artması çözüm süresini (zamanını) uzatmaktadır. Süreyi iyileştirmek ve çözümü kolaylaştırmak için gerçekleştirilen işlemler çözüm sonucunun hatalı olma olasılığını artırmaktadır (Ge, 2014; Sahin, 2001).

Elektrik makinalarının tasarım analizlerinin, analitik modelinin ve uygulamalarının yapıldığı Ansoft Maxwell programının arayüzü Şekil 3.7' de verilmiştir. Fırçasız doğru akım motorunun analitik modeli oluşturulur ve tasarım aşamaları gerçekleştirilir. Daha sonra RMXprt' de model oluşturulduktan sonra analitik modelleme için gerekli adımlar izlenerek modelleme çalışması yapılır.



Şekil 3.7. Ansoft Maxwell programının arayüzü

3.4.2. Maxwell denklemleri

Aşağıda denklemler verilmiştir.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.5)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.6)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.7)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3.8)$$

Eşitliklerde yer alan, E elektrik alan şiddeti $\frac{V}{m}$, B manyetik akı yoğunluğu $\frac{Wb}{m^2}$, H manyetik alan şiddeti $\frac{A}{m}$, J yüzey akım yoğunluğu $\frac{A}{m^2}$, D manyetik akı yoğunluğu $\frac{C}{m^2}$ ve ρ ise hacim yük yoğunluğunu $\frac{C}{m^3}$ ifade etmektedir. Yarı durağan ve durağan elektromanyetik alan dağılımı durumunda yer değiştirme akım yoğunluğu $\frac{\partial D}{\partial t}$ yok sayılırsa (Ge, 2014);

$$\nabla \times H \quad (3.9)$$

denklemleri elde edilmektedir.

Üç boyutta, vektör alanının kıvrılmasının diverjansı sıfıra eşit olduğunda, Eşitlik 3.10' da elde edilebilmektedir (Ge, 2014).

$$\nabla \cdot J = \nabla \cdot (\nabla \times H) = 0 \quad (3.10)$$

Makroskopik malzemenin özellikleri Eşitlik 3.11, 3.12 ve 3.13' te gösterilen eşitliklerle verilebilmektedir (Ge, 2014);

$$J = \sigma E \quad (3.11)$$

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (3.12)$$

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (3.13)$$

σ elektrik iletkenliği, $\epsilon_0 * \epsilon_r$ olarak gösterilen ϵ elektriksel geçirgenlik, ϵ_0 serbest uzaydaki elektriksel geçirgenlik ve ϵ_r izolatrlerdeki alan czmn belirleyen göreceli geçirgenliktir. μ manyetik geçirgenlik, μ_0 serbest boşluğun geçirgenliği ve μ_r malzemenin manyetik özelliklerini belirleyen manyetik göreceli geçirgenlik katsayısıdır (Ge, 2014).

Manyetik ve elektrikli geçici czcler farklı geçici alanları czmemektedir. Manyetik geçici czc zamanla değişen manyetik alanları czmemektedir. Zamanla değişen manyetik alanın kaynakları, hareketli daimi mıknatıs, hareketli kaynaklar ve zaman içerisinde farklılık gösteren akım veya gerilim kaynakları olabilir. Elektrik geçici czc ise zamanla değişen gerilimlerin, yük dağılımları ve homojen olamayan malzemelerde uygulanan akım uyarılarının sebep olduğu elektrik alanlarını hesaplamaktadır. Manyetik vektör potansiyeli A, Eşitlik 3.14'teki gibi olmaktadır (Ge, 2014).

$$\nabla X A = B \quad (3.14)$$

Elektriksel skaler potansiyel V ile birleştirilerek Eşitlik 3.15 elde edilmektedir (Ge, 2014);

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V \quad (3.15)$$

Elektrik skaler potansiyeli için, iletken bölgenin iki ucunda farkı olarak V' nin bir alçak değeri ve bir yüksek değeri tanımlanmaktadır. Ancak iletken olmayan bir bölgede V sifıra eşit olmaktadır. Bu yüzden, Eşitlik 3.9, 3.11, 3.13, 3.14 ve 3.15 birleştirilerek, manyetik akı yoğunluğu B ve akın yoğunluğu J hesaplanmaktadır (Ge, 2014).

$$J = \sigma E = -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) = \nabla X H = \nabla X \frac{B}{\mu} = \frac{1}{\mu} \nabla (\nabla X H) \quad (3.16)$$

Coulomb Gauge den yola çıkılarak (Ge,2014);

$$\nabla \cdot A = 0 \quad (3.17)$$

Elektromanyetik alan için geçici durum formülleri Eşitlik 3.18' de gösterilmiştir.

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla X A \right) = \nabla X H_c - \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) + \frac{1}{\mu} \nabla (\nabla \cdot A) \quad (3.18)$$

H_C giderici manyetik alan şiddetidir. Elektrik makinesinde üç farklı manyetik kuvvet bulunmaktadır.

- Lorentz Kuvveti
- Manyetostriktif Kuvvet
- Relüktans Kuvvet

Elektrikli motorun relüktans gücü, radyal ve teğetsel bileşen olan elektromanyetik kuvvettir. İki boyutlu SEY' de malzeme sınırları, stator ucunun kenarı olarak seçilmektedir. Kuvvetin bileşenleri (Ge, 2014);

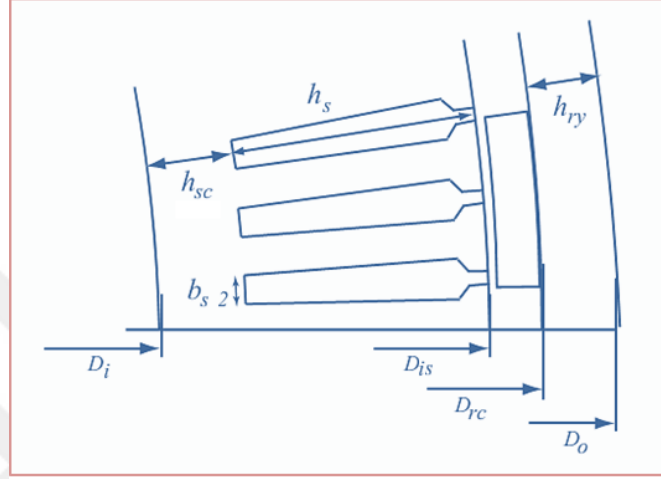
$$F_{rad} = \frac{L_{stk}}{2\mu_o} \oint (B_n^2 - B_t^2) dl \quad (3.19)$$

$$F_{tan} = \frac{L_{stk}}{\mu_o} \oint B_n^2 \cdot B_t^2 \quad (3.20)$$

B_n akı yoğunluğunun normal bileşenini, B_t akı yoğunluğunun teğetsel bileşenini, l stator uç kenar uzunluğunu ve L_{stk} makinenin paket boyu uzunluğunu ifade etmektedir.

3.5. Analitik Hesaplamalar

Elektrik makinelerinin boyutlandırma tasarımı için birçok yazılım bulunmaktadır. Bu yazılımlar genellikle analiz çalışmaları için kullanılmaktadır. Şekil 3.8’ de dış rotorlu FDAM’ lerin geometrik parametreleri gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Dış rotorlu FDAM’ ler için bazı geometrik parametrelerin tanımlanması

Elektrikli makinenin makine sabiti C de makinenin rotor boyutu tasarımındaki gibi benzer bir temel ile elde edilebilmektedir. C sabiti makinenin rotor hacmi ile verilen iç görünür gücü S_i veya aktif gücü P_i ifade etmektedir. Bu gücü etkileyen diğer bir sabitse $D_{is}^2.L$ çarpımıdır (Kim, 2003). Gerçek makine tasarımı, makinenin ana boyutları, stator nüve çapı veya hava aralığı çapı (D_{is}) ve eşdeğer nüve uzunluğunu (L)’ nin seçimi ile başlamaktadır. Bu seçimi yapabilmek için makinanın gücü ve performansı ile $D_{is}^2.L$ arasındaki ilişkiyi açıklamak gerekmektedir. Makinanın hava aralığı görünür gücünü S_{gap} ’ ı hesaplırsak :

$$S_{gap} = mE_m I_s \quad (3.21)$$

I_s stator faz akımının ve fazın mıknatıslanma endüktansı L_m üzerinde indüklenen emk’ in E_m kullanılması ile senkron hızda $n = f / p$ dönen makinanın görünür gücü elde edilmektedir. Hava aralığı kutup akısının bir fonksiyonu olarak endüklenen emk’ sı:

$$E_1 = 4f_1 k_f W_1 K_{w1} \phi \quad (3.22)$$

Burada k_f 1.02-1.11 değer aralığındaki form faktörüdür, W faz başına spir (sarım) sayısı, K_w sargı faktörü ve Φ ise kutup akısıdır. Faz sargılarına etki eden maksimum akı, kutup yüzeyindeki akı yoğunluğu ile bulunabilmektedir.

$$\phi_m = \int_{S_p} B_\delta dS_p \quad (3.23)$$

Kutup yayı üzerindeki hava aralığı akı yoğunluğu sinüsoidal bir dağılıma sahipse ve makinenin uzunluğu ile ilgili olarak herhangi bir değişiklik yoksa yüzey integrali aşağıdaki gibi basitleştirilebilmektedir.

$$\phi_m = \int_0^{\tau_p} l' B_\delta \sin \frac{x\pi}{\tau_p} dx = l' \tau_p \alpha B_\delta \quad (3.24)$$

Buradaki αB_δ bileşkesi hava aralığındaki akı yoğunluğunun ortalama değerini ifade etmektedir. α dişdeki manyetik doyum katsayısına bağlı akı yoğunluğu şekil faktörüdür. Sinüsoidal dağılım durumunda $\alpha = 2/\pi$ 'dir. Diğer bir durumda uygun α değeri, kutup yüzeyi boyunca akı yoğunluğunu dahil ederek bulunmalıdır. Örneğin yüzey yerleştirmeli mıknatıslı rotor yapısında hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı sinüsoidal değildir. Bu gibi bir durumda hava aralığı akı yoğunluğu için ortalama α değeri bağlı mıknatıs genişliği α_{pm} kullanılarak tanımlanabilmektedir.

Kutup yayı τ_p ;

$$\tau_p = \frac{\pi D_{is}}{2p_1} \quad (3.25)$$

Sonuç olarak S_{gap} ;

$$S_{gap} = K_f \alpha_i K_{w1} \pi^2 D_{is}^2 L \frac{n_1}{60} A_1 B_g \quad (3.26)$$

Doğrusal akım yoğunluğunun etkin değeri (spesifik elektrik yüklenme) (A/m) 35-65 kA/m değer aralığında alınabilmektedir;

$$A_1 = \frac{6W_1 I_{ln}}{\pi D_{is}} \quad (3.27)$$

Eşitlik 3.26'dan, hacim yararlanma faktörü (Esson sabiti) makine sabiti ve çıkış katsayısı, olarak bilinen katsayıyı belirtirsek C_0 (Boldea and Nasar, 2001);

$$C_0 = K_f \alpha_i K_{wl} \pi^2 A_1 B_g = \frac{60 S_{gap}}{D_{is}^2 L n_1} \quad (3.28)$$

Burada B_g , spesifik manyetik yükleme olarak ta bilinen NdFeB kalıcı mıknatis senkron makinalar için 0.65-0.85 T değer aralığında ortalama manyetik akı yoğunluğu olmaktadır (Tapia ve ark., 2013). Böylelikle diğer bir önemli katsayı olan $D_{is}^2.L$ çarpımını aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir;

$$D_{is}^2 L = \frac{1}{C_0} \frac{60}{n_1} \frac{K_e P_n}{\eta_n \cos \phi_{in}} \quad (3.29)$$

Burada K_e , çıkış gücünün bir fonksiyonu olarak E_{pm}/V_a katsayısı ve kalıcı mıknatıslı senkron makinada yaklaşık olarak $E_{pm} = 0.9-1.1 V_a$ olmaktadır (Boldea and Nasar, 2001).

Hesaplamalardaki diğer önemli bir adım da bu çarpımın D_{is} ve L bileşenlerine ayrılmasıdır. Literatürde bu bileşenlerin ayrılması için nüve uzunluğu/kutup yayı ve nüve uzunluğu/ hava aralığı çapı (stator iç çapı) gibi çeşitli oranlar kullanılmaktadır. Diğer bir çalışmada ise $L=D_{is}/4$ oranı kullanılmıştır nüve uzunluğu/ hava aralığı çapı (Rostami ve ark.,2012) λ nüve uzunluğu/kutup yayı oranı;

$$\lambda = \frac{L}{\tau} = \frac{2L_{p1}}{\pi D_{is}}; \quad 0.6 < \lambda < 3.0 \quad (3.30)$$

Farklı elektrik makinaları için nüve uzunluğu/ hava aralığı çapı oranı Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Farklı elektrik makinaları için nüve uzunluğu/ hava aralığı çapı oranı

Asenkron Makina	Senkron Makinalar(p>1)	Senkron Makinalar(p=1)	DA Makinaları
$\chi = \frac{L}{D} = \frac{\pi}{2p} \sqrt[3]{p}$	$\chi = \frac{L}{D} = \frac{\pi}{4p} \sqrt{p}$	$\chi = \frac{L}{D} = 1 - 3$	$\chi = \frac{L}{D} = \frac{0,8 - 1,6}{p}$

Böylelikle stator nüve iç çapı Eşitlik 3.29 ve 3.30 kullanılarak elde edilebilir

$$D_{is} = \sqrt[3]{\frac{D_{is}^2 L 2p}{\pi \lambda}} = \sqrt[3]{\frac{D_{is}^2 L}{x}} \quad (3.31)$$

Burada D_{is} genellikle stator iç ve rotor dış çapı olarak kullanılmaktadır ($D \approx D_r \approx D_s$).

Nüve uzunluğu ise;

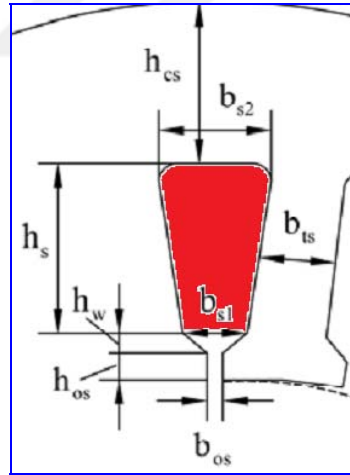
$$L = \frac{D_{is}^2 L}{D_{is}^2} \quad (3.32)$$

Eşitlikler 3.31 ve 3.32 makine tasarımında kullanılan standart eşitlikler verilmiştir. Ancak bunlar makinanın toplam hacmini vermek için yeterli değildir (Boldea and Nasar, 2001).

Bunun için stator dış çapı (D_{out});

$$D_o = D_{is} + 2(h_s + h_{cs}) \quad (3.33)$$

Burada h_s ve h_{cs} Şekil 3.9’de görüldüğü gibi sırasıyla stator oluk derinliği ve stator nüve (oluk harici) yüksekliğidir.



Şekil 3.9. Stator oluk geometrisi

Stator oluk derinliği;

$$h_s = \frac{6W_1 I_n}{\frac{B_g}{B_{ts}} j_{con} K_{fill}} \frac{1}{\pi D_{is}} = \frac{A_1}{\frac{B_g}{B_{ts}} j_{con} K_{fill}} \quad (3.34)$$

Stator nüve (oluk harici) yüksekliği;

$$h_{cs} = \frac{\phi}{2LB_{cs}} = \frac{\alpha_i}{2} \left(\frac{\pi D_{is}}{2p_1} \right) \frac{B_g}{B_{cs}} \quad (3.35)$$

Burada, B_{is} , B_{cs} ve B_g sırasıyla stator dişi akı yoğunluğu, stator nüve akı yoğunluğu ve hava aralığı akı yoğunluğunu göstermektedir. J_{con} akım yoğunluğu, K_{fill} ise oluk doluluk faktörlerini göstermektedir. Eksenel veya radyal hava soğutmalı makineler için akım yoğunluğu $3,5-8 \times 10^3$ A/m² aralığında değişmektedir. Spesifik elektrik yüklenme A 35-65 kA/m gibi büyük bir aralık boyunca değişirken oluk yüksekliği ve oluk genişliği oranı, oluk kaçak endüktansını sınırlandırmak için $K_{aspect}=h_s/b_s=3-6$ değer aralığında tutulmalıdır (Boldea and Nasar, 2001). Oluk yüksekliği tekrar düzenlenirse,

$$h_s = K_{aspect} b_s = K_{aspect} \frac{\pi D_{is}}{N_s} \left(1 - \frac{b_t}{\tau_{slot}} \right) = K_{aspect} \frac{\pi D_{is}}{N_s} \left(1 - \frac{B_g}{B_{is}} \right) \quad (3.36)$$

Ayrıca;

$$\frac{D_o}{D_{is}} \approx 1 + \frac{2K_{aspect}\pi}{N_s} \left(1 - \frac{B_g}{B_{is}} \right) + \frac{\alpha_i}{2} \frac{\pi}{p_1} \frac{B_g}{B_{cs}} \quad (3.37)$$

Elde edilen bu oran Eşitlik 3.38' de görüldüğü gibi kutup çifti sayısı, oluk derinliği, nüve derinliği, mıknatıs uzunluğu ve oluk sayısının (N_s) bir fonksiyonudur.

$$\lambda_o = \frac{D_o}{D_{is}} = f(h_s, h_{cs}, L_{pm}, D_{is}, p, N_s) \quad (3.38)$$

Bu oran, sıcaklık etkilerini, kayıp ve verimlilik gereksinimleri karşılamak için Çizelge 3.4'te verilen değerler uygulanabilmektedir.

Çizelge 3.4. Stator iç ve dış çap oranı

$2p_1$	2	4	6	8	≥ 10
$\frac{D_{out}}{D_{is}}$	1.65 – 1.69	1.46 – 1.49	1.37 – 1.40	1.27 – 1.30	1.24 – 1.26

Bununla birlikte iç ve dış rotorlu motorlarda ortaya çıkan farklar da göz önüne alınarak hesaplar dış rotorlu makineler için aşağıdaki gibi düzenlenmektedir.

Dış rotorlu FDAM' ler stator dış çapı;

$$D = D_{rc} - 2l_m - 2\delta \quad (3.39)$$

Eşitlikteki D stator dış çapını, D_{rc} rotor iç çapını, l_m mıknatıs kalınlığını ve δ hava aralığının uzunluğunu göstermektedir. Motor tasarımında oluk tasarımı sargı konfigürasyonu ve yapısına bağlı olarak çok önemlidir. Stator oluğunun üst oluk genişlik parametresi b_{ss1} aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$b_{ss1} = \pi \frac{D - 2h_{sw}}{Q_s} - b_{ts} \quad (3.40)$$

h_{sw} stator nüvesinin dış kalınlığını, b_{ts} nüvenin dış genişliğini ve Q_s stator oluk sayısını göstermektedir. b_{ss2} ise stator oluğunun alt oluk genişlik parametresi olup aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$b_{ss2} = \pi \frac{D - 2h_{ss}}{Q_s} - b_{ts} \quad (3.41)$$

Eşitlikteki h_{ss} oluk boyunu ifade etmektedir. h_{sy} etkin nüve kalınlığını ifade etmektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$h_{sy} = \frac{1}{2}(D - D_i - 2h_{ss}) \quad (3.42)$$

Statorun iç çapını belirten D_i sadece dış rotorlu FDAM' ye ait bir parametredir. Benzer şekilde rotorda manyetik akının akışını sağlayacak olan ve ST-37 çeliğinden seçilecek olan nüvenin kalınlığı aşağıdaki gibi ile elde edilebilmektedir.

$$h_{ry} = \frac{1}{2}(D_0 - D_{rc}) \quad (3.43)$$

Toplam oluk alanı A_{sl} ise;

$$A_{sl} = \frac{1}{2}(b_{ss1} + b_{ss2})(h_{ss} - h_{sw}) \quad (3.44)$$

Kutup sayısının seçimi

Sürekli mıknatıslı makinalarda kutup sayısının seçimi tasarımda belirleyici faktör olan rotor hızına göre şekillenmektedir. Aynı hız değeri için kutup sayısındaki artış komütasyon frekansında artışa dolayısıyla anahtarlama elemanlarında frekansa bağlı oluşan anahtarlama kayıplarında artışa ve stator nüvesinde meydana gelen demir kayıplarında artışa neden olmaktadır (Boldea and Nasar, 2001). Kutup sayısı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$2p = 120 \cdot f / n \quad (3.45)$$

Eşitlikteki $2p$ kutup sayısını, f çalışma frekansını ve n rotor devir sayısını göstermektedir.

3.6. Araç İçin Motor Hesap Formülleri

Anma gücü 1.5 kW olan motorun verimi \sim %86 olarak elde edilmiştir. Buradan yola çıkarsak;

$$\% \eta = \frac{P_{Out}}{P_{In}} \quad (3.46)$$

$$P_{in} = \frac{1.5}{0.86}$$

$P_{in} = 1.74 \text{ kW}$ olarak hesaplanır.

Eşitlik 3.47'de verilen f çalışma frekansını ve $2p$ kutup sayısını göstermektedir.

$$\text{Devir sayısı} = \frac{120 \cdot f}{2p} \quad (3.47)$$

Devir sayısı 680 rpm ve kutup sayısı ($2p$) ise 46 olarak belirlenmiştir. Eşitlikte yerine yazarsak çalışma frekansı aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$680 = \frac{120 \cdot f}{46}$$

$$f = \frac{680 \cdot 46}{120}$$

$$f = 260,67 \text{ Hz}$$

Anma momenti (M_N) anma frekansında ve anma devir hızında çalışan motorun milinden elde edilen değeridir. Eşitlik 3.48'de gösterildiği gibi elde edilmektedir.

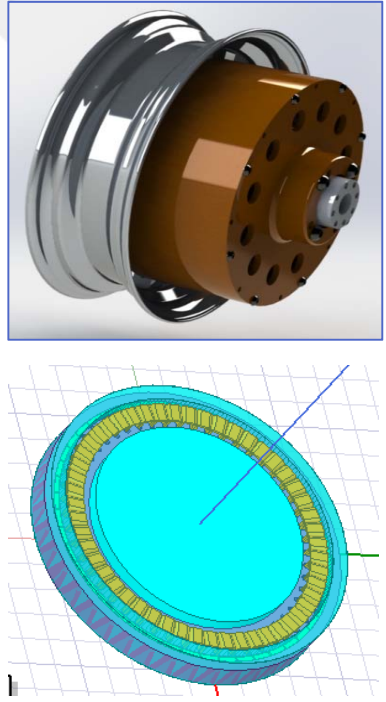
$$M_N = 9550 * \frac{\text{Anma gücü (kW)}}{\text{Rotor anma hızı (d/dk)}} \text{ Nm} \quad (3.48)$$

$$M_N = 9550 * \left(\frac{1.5}{680} \right)$$

$M_N = 21.07 \text{ Nm}$ olmaktadır.

1.5 kW bir FDAM'nin ortalama değerlerinden yaklaşık olarak alınan, üzerinde hesaplama yapılarak elde edilen değerler Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Motor parametreleri

Tasarım Parametreleri	Motor Verileri	
Mil Gücü	1.5 KW	
Mil Hızı	680 rpm	
Besleme Gerilimi	48 V	
Verim	~ %86	
Kutup Sayısı	46	
Kaynak Frekansı	50-300 Hz	
Nominal Momenti	21.07 Nm	
Rotor malzemesi	ST37 Çelik	
Stator İç Çapı	154 mm	
Rotor Dış Çapı	220 mm	
Paket kalınlığı	40 mm	
Çalışma Türü	Direct Drive	
Mıknatıs Demagnetizasyon Sıcaklığı	150 °C	
Mıknatıs Tipi	Nikel Kaplamalı N45SH	
Rulman Tipi	SKF/FAG Ring	

3.7. Fırçasız Doğru Akım Motoru'nun Prototip Üretimi

Prototip motorun üretiminde mekanik işçilik elde edilen verilen doğrulanması için önemlidir. Bu nedenle prototip üreticim süreci en zor aşamalardan biridir. Prototip üretimi sırasında mekanik işlemlerde oluşabilecek hata veya aksaklıklar motorda dezavantajları da beraberinde getirir.

Stator, elektrik motorlarının en önemli parçalarından biridir. Stator nüvesinin oluklarına yerleştirilen sargılar gücün üretilmesini sağlamaktadır. Girdap akımı kayıplarının en aza indirilmesi için stator silisli saclardan yapılmaktadır. Prototipte kullanılan silisli saclar JFE_Steel_35JN250 çeliğinden yapılmıştır. Manyetik devrede göz önüne alınarak sacların tutturulmasında kullanılacak olan kaynakta dikkatli yapılmalı ve olukların açılacağı yerlere kaynak yapılmaması gerekmektedir. Yüksek elektriksel iletkenliği ve mekanik özelliklerinden dolayı elektrik makinalarının sargılarının sarılmasında bakır sıklıkla kullanılmaktadır (Ocak, 2013). Üretilen prototipte sarım malzemesi olarak bakır iletken kullanılacaktır.

Prototip motorun stator oluklarına sargıların yerleştirilmesi de çok önemlidir. Motorda oluşan güç bu sargılarda oluşmaktadır. Bu sargılar zıt emk ve tutma torku ile de ilişkilidir. Prototip motor 51 oluk 46 kutup olarak tasarlanmış olup üretimi gerçekleştirilmiştir. Prototip motora ait stator üretimi Şekil 3.10 – Şekil 3.12’te verilmiştir.



Şekil 3.10. Polyester film malzemenin stator oluklarına yerleştirilmesi



Şekil 3.11. Statorun sarımı



Şekil 3.12. Sarılmış stator

Üretilen prototip motorunda rotor malzemesi olarak Steel 1010 çeliğinden kullanılmıştır. Torna tezgahında işlenen çelikten üretilen rotor son halini almıştır. Sonrasında ise tasarlanan mıknatıslar CNC teknolojisi ile işlenmiş olan gövdeye yerleştirilmiştir. Sabit mıknatıslar doğru akımda uyarılan elektromıknatıslar gibi elektrik makinalarında uyarımın sağlanmasında kullanılmaktadır (Ocak, 2013). Mıknatıslar çekme kuvvetlerine karşı mekanik koruma olmaksızın yapıştırılmıştır. Mıknatıslar için epoksi, akrilik ve silikon bazlı yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Üretilen prototipte mıknatısları yapıştırmak için orta ve yüksek viskoziteli yapıştırıcı kullanılmıştır. Prototip motora ait rotor üretimi ve mıknatıs yerleşimi Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13. Prototip motor rotor üretim ve mıknatıs yerleşimi

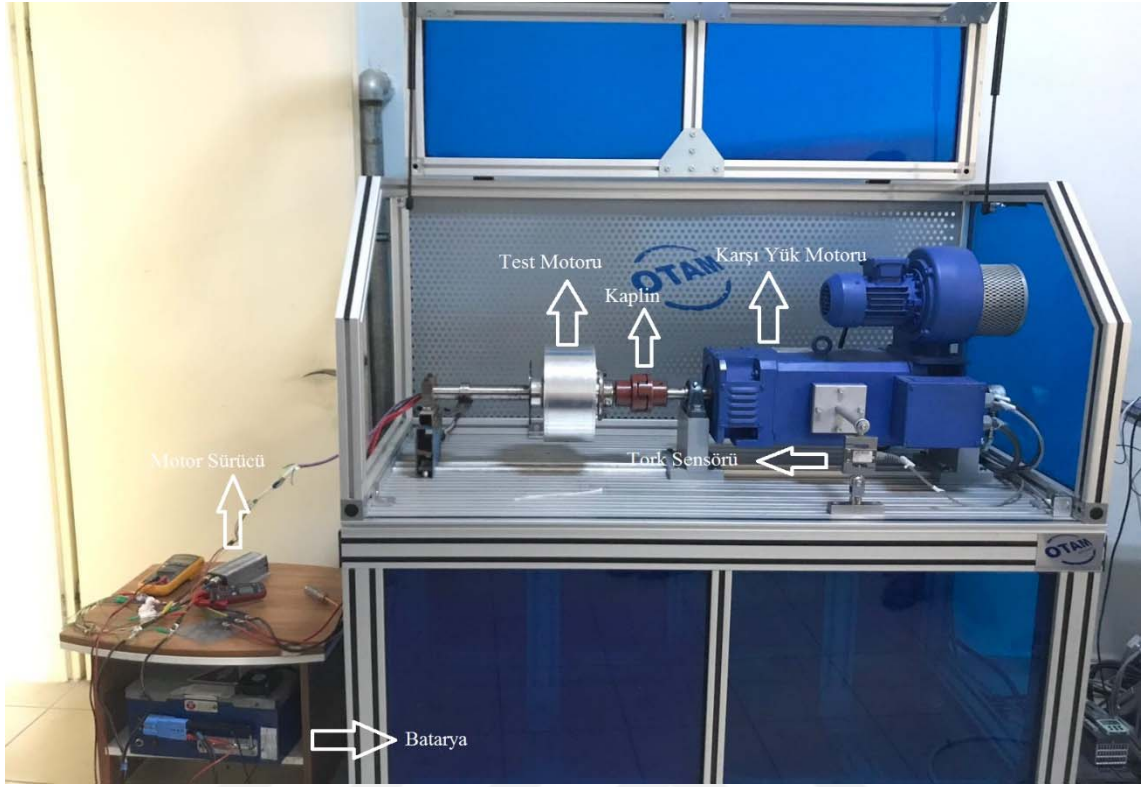
Prototip stator ve rotor üretim aşaması tamamlanıp bittikten sonra motorun şaft ve dış kabuk üretimi gerçekleştirilmiştir. Motor prototipindeki şaft paslanmaz çelik malzemedan üretilmiştir. Montaj ve kabuk üretimi yapılarak prototip motor üretimi gerçekleştirilmiştir. Montaj işlemleri Şekil 3.14’te verilmiştir.



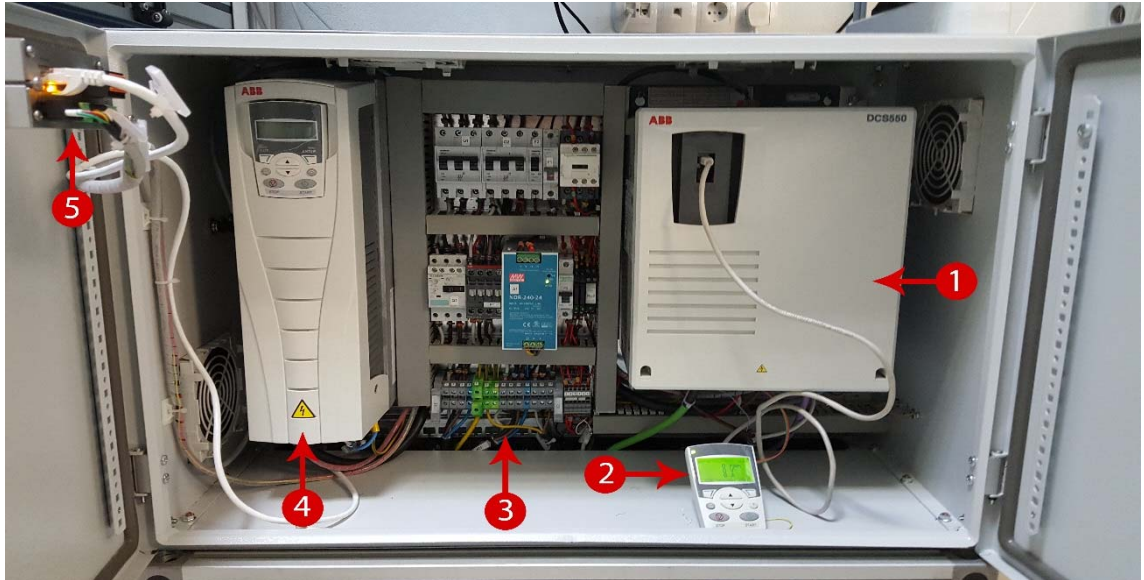
Şekil 3.14. Montaj aşamaları

3.8. Fırçasız Doğru Akım Motoru'nun Deney Düzeneği

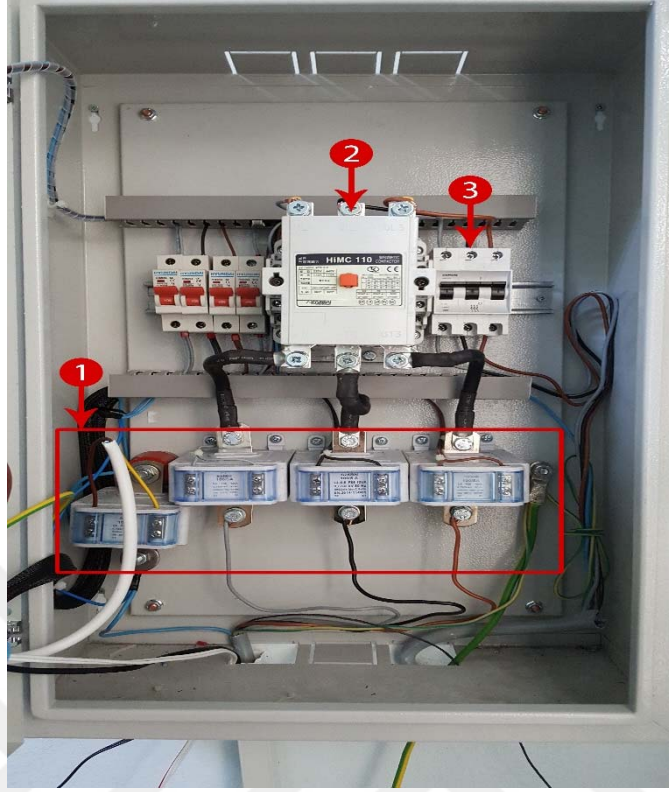
Prototip üretimi gerçekleştirilen motorun performansını hesaplayabilmek için motor parametrelerinin belirlenmesi ve ölçümü gerçekleştirilmelidir. Motor performansının doğru şekilde belirlenmesi için elde edilecek verilerin de doğru olması gerekmektedir. Bunun için deney test düzeneği oluşturularak prototip motordan elde edilecek olan veriler ve bu verilerin doğruluğunun test edilmesi gerekmektedir. FDAM' nin deneysel çalışmaları için oluşturulan deney düzeneği Şekil 3.15' de verilmiştir.



Şekil 3.15. Deney düzeneği

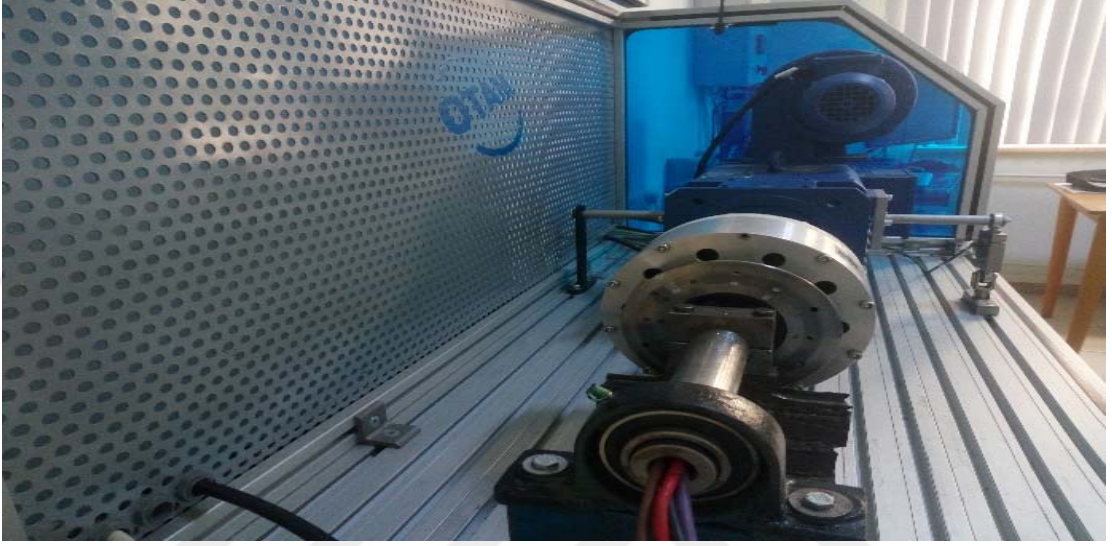


Şekil 3.16. Motor kontrol panosu (1- DA motor sürücü, 2- DA motor sürücü EASY kontrol modülü, 3-şalt malzemeleri, 4- AA motor sürücü, 5- BX11 ölçüm ünitesi) (Eker, 2017)



Şekil 3.17. Güç panosu (1- akım trafoları, 2- kontaktör, 3- sigorta) (Eker, 2017)

Şekil 3.18’de gösterilen test standında tasarımı yapılan motor görülmektedir. Motorun hız ölçümünde kullanılması için Baumer EIL580 1024 devir/darbe kodlayıcı enkoder kullanılmıştır. Tork ölçümünü yapabilmek için yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresinden elde edilen verileri toplamak Baykon BX11 ölçüm ünitesi kullanılmıştır.

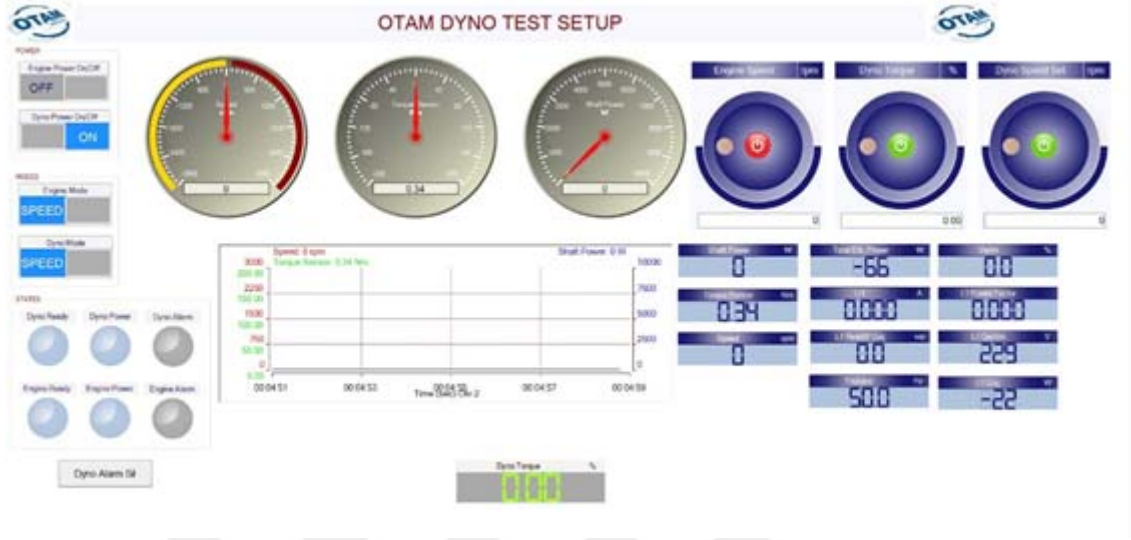


Şekil 3.18. Test standı

Elde edilen verileri toplamak ve verileri analiz etmek için LabVIEW 2011 yazılımından yararlanılmıştır. Güç analizörüyle üretilen prototip motorun şebekeden aldığı akım, voltaj, güç faktörü gibi parametreler elde edilmiştir. 3 faz akım değeri, faz ve hat gerilim değerleri, her faz ve toplam güç değerleri, güç faktörü değerleri güç analizöründen alınarak test yazılımına aktarımı sağlanmıştır. Sistemde kullanılan test yazılımı OTAM A.Ş. tarafından geliştirilmiş olan i-LAB yazılımıdır. Test sistemini kontrol etmek i-LAB yazılımı özel olarak tasarlanmış ve geliştirilmiştir. i-LAB yazılımı;

- Ayarlanan senaryo ile test,
- Kanal ekleme/çıkarabilme,
- Yüklenen sürücülerin bağlantı durumlarını görebilme,
- PID ile kullanılan dış ünitelerin regülasyonu,
- Açık kaynak kod yapısı sayesinde istenilen formülleri ekleyebilme,
- Test motoruna %0 - %125 yükler arasında yol verme

gibi özelliklere sahiptir (Eker, 2017). i-LAB yazılımına ait arayüz Şekil 3.19’ de verilmiştir.

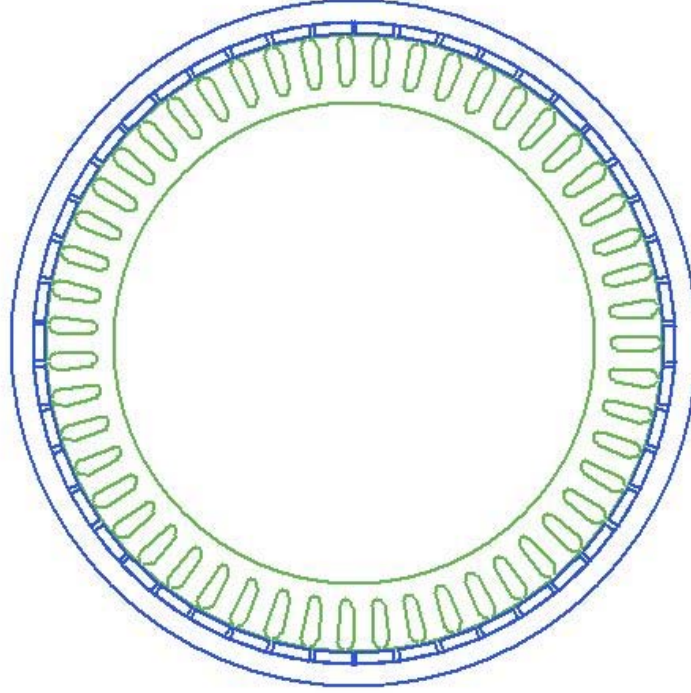


Şekil 3.19. i-LAB yazılımı arayüzü (Eker, 2017)

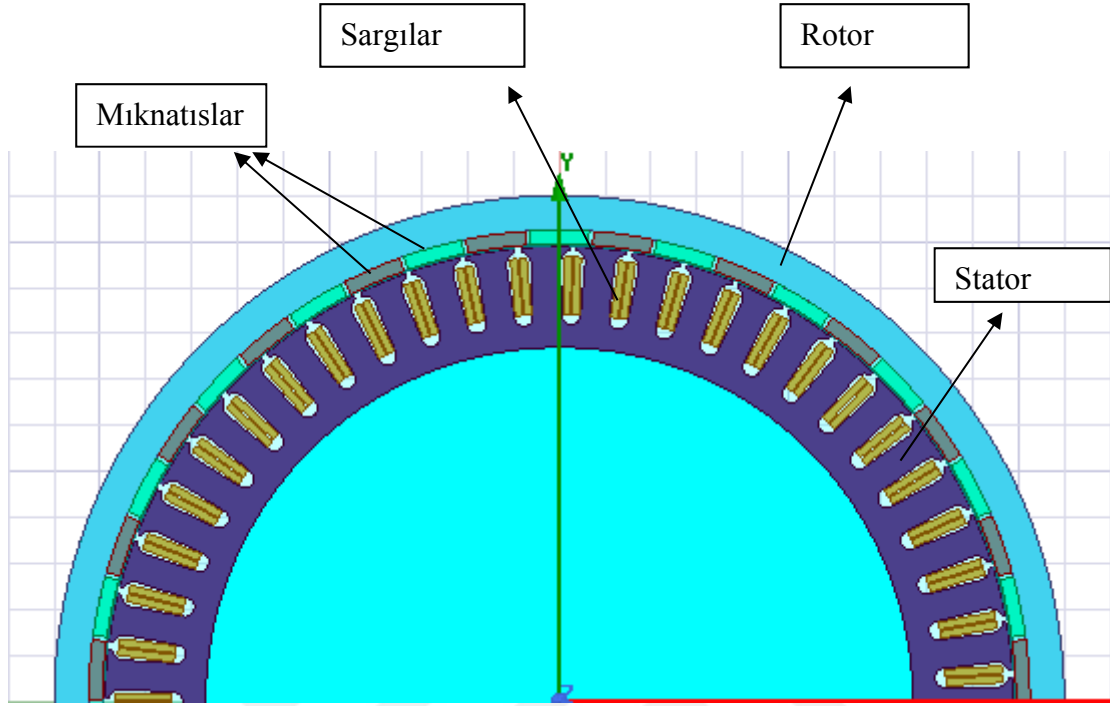
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarımının Geliştirilmesi

Bu bölümde tasarımı gerçekleştirilen 1.5 kW güç değerine sahip FDAM' nin tasarım sonuçları ve termal özelliklerinin SEY ile elde edilmesi sonucunda üretilen prototip motora ait deneysel sonuçlar verilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen motor 46 kutup ve 51 stator oluğuna sahiptir. Şekil 4.1' de motor yapısı ve Şekil 4.2' de İki boyutlu geometrisi verilmiştir.



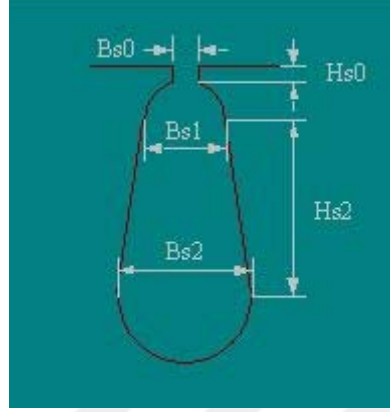
Şekil 4.1. 46 Kutup, 51 Oluklu motor yapısı



Şekil 4.2. FDAM geometrisi

Motor tasarımında stator ve stator sargılarının yerleştirileceği stator oluk yapısı önemli bir parametredir. Stator, laminasyonlardan, stator oluklarında ve oluklara sarılan sargı bobinlerinden meydana gelmektedir. Uygun geometride kesilen stator sac paketleri stator oluklarının oluşmasını sağlamaktadır. Statorda meydana gelen akı oluklarının arasında bulunan dişlerden geçer ve manyetik devresini tamamlarlar. Hava aralığında meydana gelen akı dağılımının sinüzoidal olması istenmektedir. Ancak stator – rotor bulunan açıklıklar, sargı harmonikleri gibi etkenler akı dağılımında harmoniklere neden olmaktadır. Stator – rotor oluk seçiminin uygunluğu makina performansında harmonik etkisinin azaltılmasına yardımcı olmaktadır (Gürdal, 2015).

Motorda tasarımı gerçekleştirilen stator oluk geometri değişkenleri Şekil 4.3'te ve değişkenlerin değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

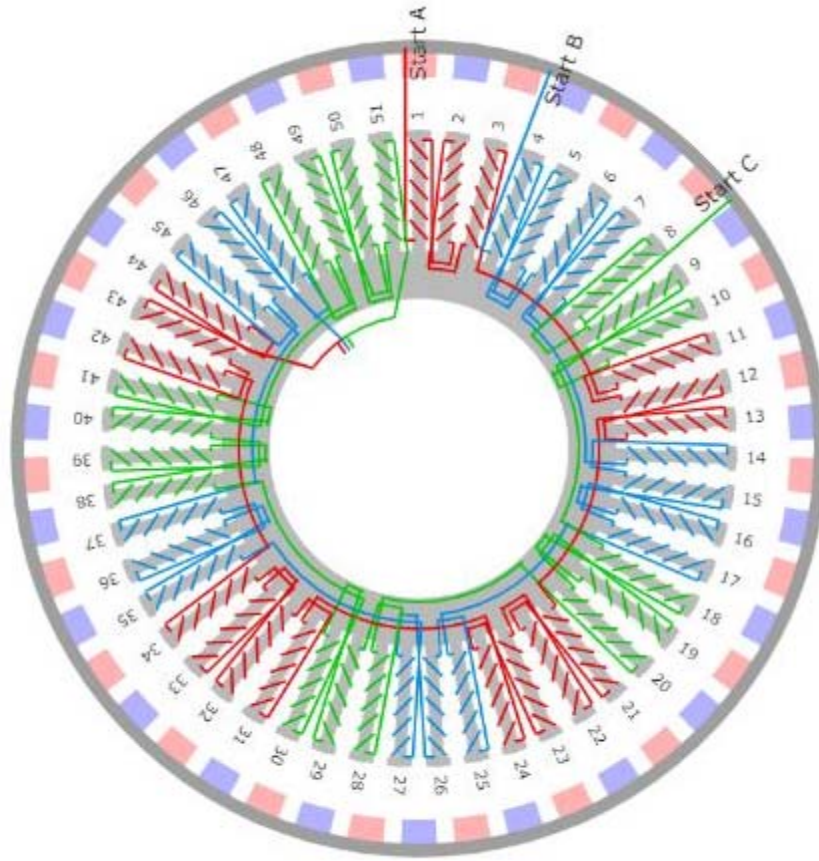


Şekil 4.3. Stator oluğu geometri değişkenleri

Çizelge 4.1. Stator oluğu geometri değişken değerleri

SEMBOL	DEĞER	BİRİM
H_{s0}	0.8	mm
H_{s2}	11.5	mm
B_{s0}	1.5	mm
B_{s1}	5.47	mm
B_{s2}	4.05	mm

Oluklar içerisindeki, statorda yalıtılmış sargılar bulunmaktadır. Motora bir gerilim uygulanmakta ve uygulanan gerilimin neticesinde sargılardan akım akmaktadır. Ayrıca bu gerilim sayesinde hava aralığında döner alan oluşturmaktadırlar. Elektrik makinalarında hava aralığının küçük değerlerde seçilmesi sonucunda stator ve rotorun birbirine sürtünmektedir. Sürtünme motor gürültülü çalışması ve motorun aşırı ısınması gibi problemleri beraberinde getirmektedir (Boldea, ve ark., 2009). Şekil 4.4'te Statordaki sarımların görüntüsü verilmiştir.



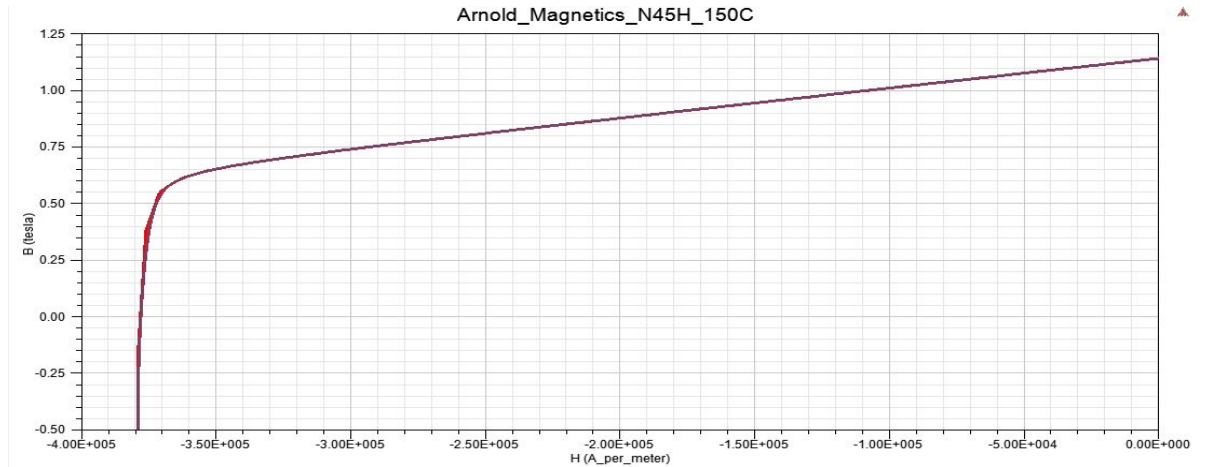
Şekil 4.4. Stator sarımlarının görünümü

Motor tasarımında önemli olan bir diğer parametreler ise rotor, gövde ve gövdeye yerleştirilmiş olan mıknatıslardır. Rotor motorun döner kısmı olup, merkezden bir mile bağlanmaktadır. Motorun ürettiği tork mil yardımıyla tahrik edilecek elemana aktarılmaktadır. Rotor gövdesine yerleştirilen sabit mıknatısların ürettiği akının hava aralığına geçişi motorun verimini etkilemektedir. Motorun veriminin yüksek olması ve hava aralığında hedeflenen akı dağılımının oluşabilmesi için enerji değeri yüksek olan mıknatısların kullanımı tercih edilmektedir. Rotor olukları motorun dinamik çalışması sırasında akım taşımaktadır. Böylece motorun dönmesini sağlamaktadırlar (Fırat, 2006). Çizelge 4.2’de Üretilen prototipte kullanılan rotor özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Rotor özellikleri

AD	DEĞER	BİRİM
Rotor dış çapı	220	mm
Rotor iç çapı	199	mm
İstifleme faktörü	1	
Sac tipi	Steel_1010	
Mıknatıs tipi	N45SH	

Elektrik motorlarının yapısındaki mıknatıs malzemesi, dış manyetik alan tarafından mıknatıslandırılmaktadırlar. Daha sonrasında ise bu dış manyetik alan kaldırılrsa dahi mıknatıs malzemesi kendiliğinden manyetik alan oluşturmaya devam etmektedir (Temnykh, 2007). Sabit mıknatıs seçimi için özelliklerin değerlendirilmesinde histerezis eğrisi yol göstermektedir. Sürekli bir mıknatısın, akı üretme özelliğinin belirlenmesinde mıknatısın maksimum enerji ürettiği nokta belirlemektedir. Bu nokta histerezis eğrisinde BH çarpımının maksimum olduğu noktaya denk gelmektedir. Maksimum enerjinin üretileceği yerde hava aralığının istenilen akı değerini üretmesi için gerekli olan tek koşul malzeme hacminin en küçük olmasını sağlamaktadır. Sürekli mıknatıslar, kullanılan motor çeşidine ve ulaşılmak istenen akıya göre farklı tiplerde seçilebilmektedir (Dönmezer, 2009). Tasarımı gerçekleştirilen motorda yüksek enerjili NdFeB (neodyum-demir-bor) mıknatıs sınıfına ait N45SH mıknatısı tercih edilmiş ve motora uygun bir şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 4.5'te N45SH mıknatısına ait B-H eğrisi verilmiştir.



Şekil 4.5. N45SH' nin B-H eğrisi

4.2. Maxweell RMxpirt ve Maxwell 2D Analizi

Maxwell RMxpirt ve Maxwell 2D programlarının yardımıyla motora uygulanan analizler incelenmiştir. Bu çalışmada Ansoft Maxwell programı yardımıyla RMxpirt ile analitik çözümler yapılmış olup sonrasında ise Maxwell 2D de yardımıyla elde edilen analitik veriler sonlu elemanlar yöntemiyle analizleri yapılmıştır.

Çalışması yapılan motorun bilgileri RMxpirt üzerinden tasarlanmış olup motor bilgileri doğrultusunda makinenin modeli oluşturulmuştur. RMxpirt üzerinden makinaya ait parametre bilgileri girildikten sonra makinenin hız, tork, güç ve verim gibi değerleri hesaplanmıştır. Ancak hesaplanan parametrelere ait değerlerde oluşan en küçük hatadan dolayı her zaman sonuçlar istenilen gibi olmayabilir. Yapılan bu tez çalışmasında da motor parametreleri Maxwell RMxpirt programında oluşturularak tasarımı yapılmıştır. Daha sonrasında bu parametreler doğrultusunda Maxwell 2D programı oluşturulmuştur. Oluşturulan programda tasarım için istenen düzenlemeler yapılarak Maxwell 2D programında sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Yapılan çalışmaya ait akış diyagramı Şekil 4.6'da verilmiştir.

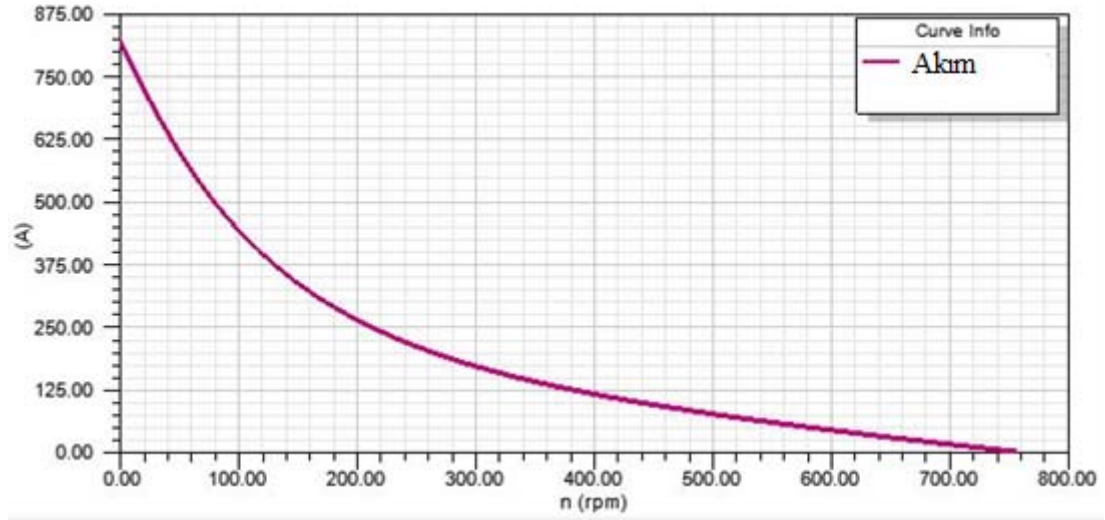


Şekil 4.6. Akış diyagramı

4.3. Analiz ve Yorumlar

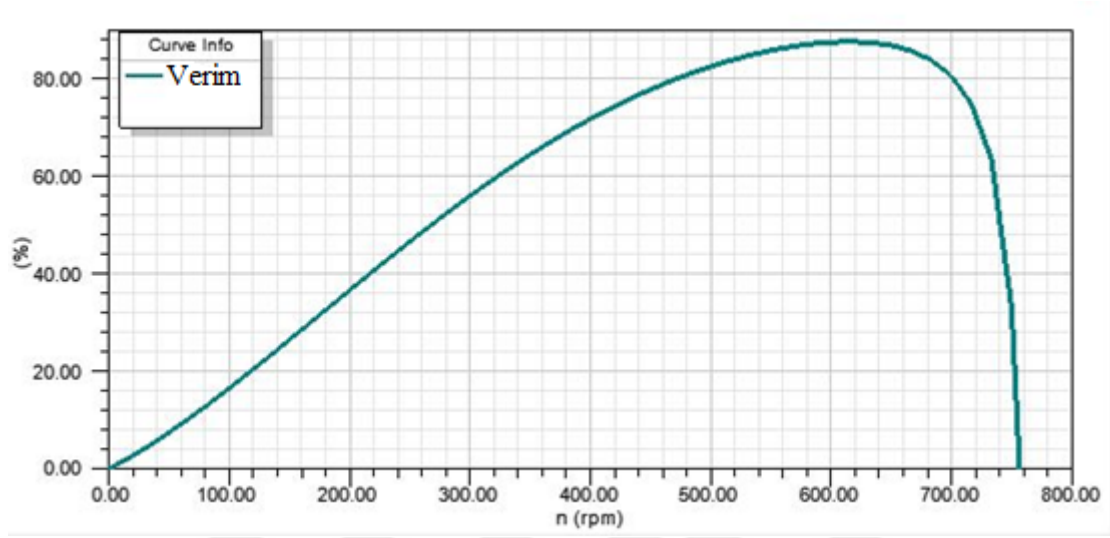
Bu bölümde Ansoft Maxwell programıyla tüm boyutlandırma ve optimizasyon çalışmalarının sonucunda verimlilik ve diğer çıkış parametrelerinin istenen değerlerde kalması için parametrik çözümler kullanılmış ve 1.5 kW'lık motor modeli son halini almıştır.

Aşağıda RMXprt ile elde edilmiş önemli parametrelere ait grafiklere yer verilmiştir. Şekil 4.7'de motor hızının değişimine bağlı olarak elde edilen motor akımındaki değişim grafiği verilmiştir. Motor hızı arttıkça motor akımındaki değişimin azaldığı gözlemlenmektedir.



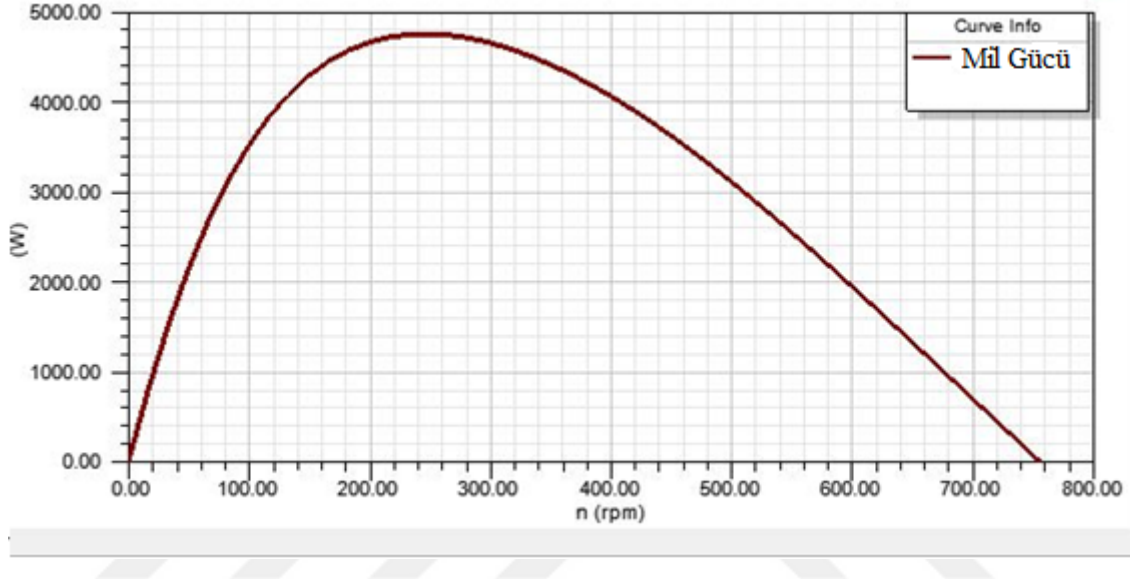
Şekil 4.7. Motor hızına (rpm) karşılık motor akımındaki (A) değişim

Şekil 4.8’de motor hızının değişimine bağlı olarak elde edilen verim değişimine ait grafik verilmiştir. En yüksek verim değerleri motorun anma değerine yakın olan 580 d/d ile 680 d/d aralığında elde edilmiştir. Motor hızı arttıkça verim değerinin arttığı ancak 680 d/d dan sonra verim değerinin azaldığı görülmektedir.



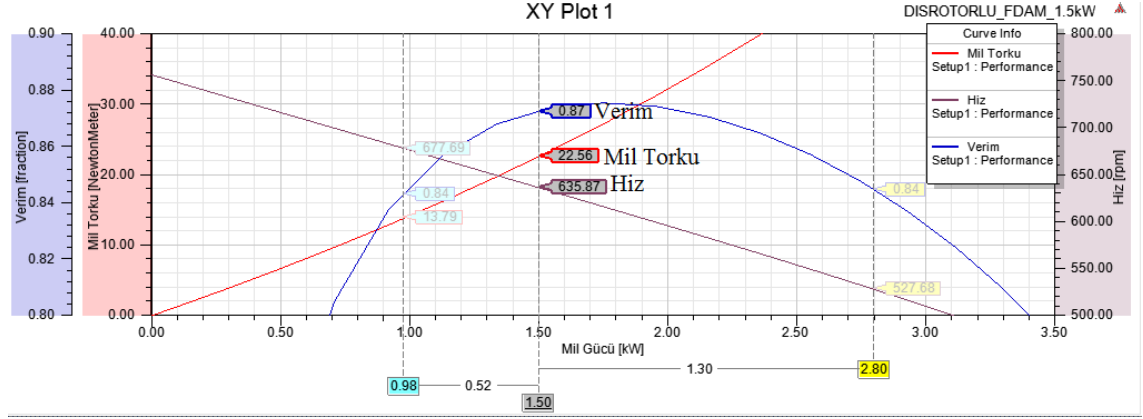
Şekil 4.8. Motor hızına (rpm) karşılık verimdeki (%) değişim

Şekil 4.9’da motor hız değişimine bağlı olarak elde edilen mil gücünün değişimine ait grafik verilmiştir. Motor gücü önemli parametrelerdendir. Anma hızına yakın bölgelerde motorun yaklaşık 0.6–0.8 kW arasında çıkış verdiği görülmektedir. Eğride mil gücünün 4.7 kW’lara çıktığı görülse de akım yoğunluğu yükseleceği için motorun bu bölgede çalıştırılmaması gerekmektedir.



Şekil 4.9. Motor hızına (rpm) karşılık mil gücündeki (W) değişim

Şekil 4.10’da motor gücünün değişimine bağlı olarak verim, tork ve hız değişimlerine ait grafik verilmiştir. Motor gücünün 1.5 kW olarak ölçülen noktada verim değeri %87, tork değeri 22.56 ve hız değeri 635.87 olarak elde edilmiştir. Grafikten de anlaşıldığı gibi motor gücüne doğru orantılı olarak tork değeri de artmaktadır. Ancak verim ve hız değerleri içinde aynı durumun olmadığı görülmektedir.

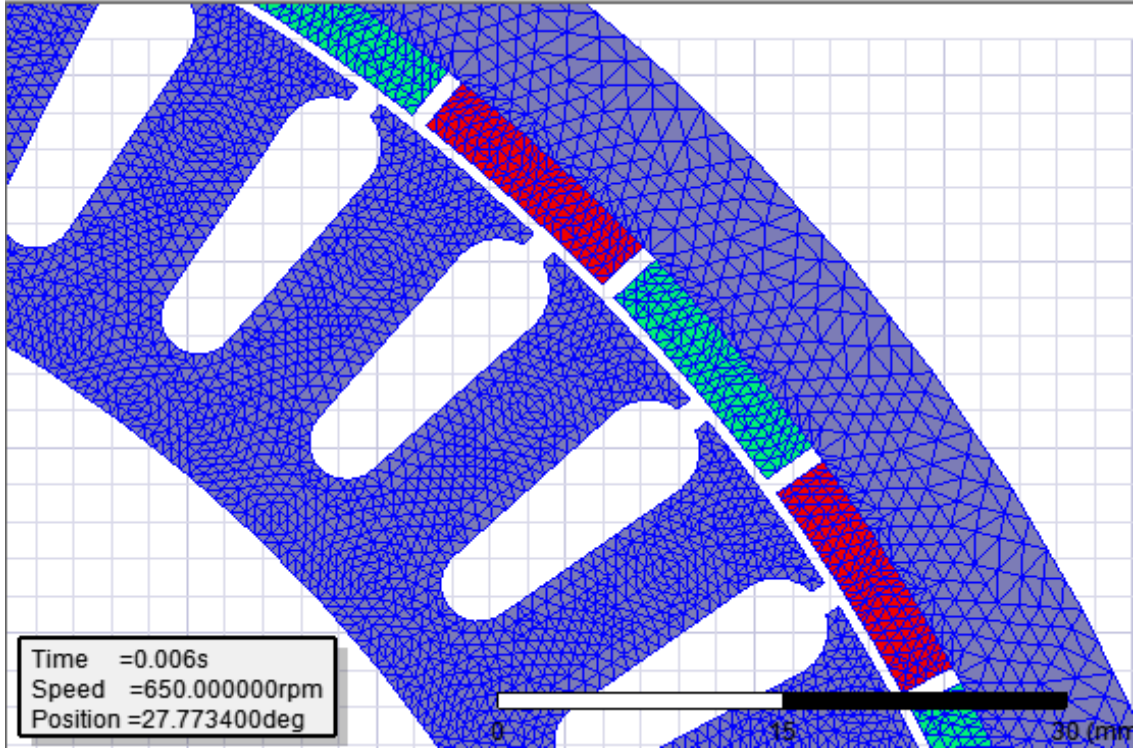


Şekil 4.10. Motor gücüne (W) karşılık verim (%), mil torku (Nm) ve hız (rpm)değişim

Tasarımı gerçekleştirilmiş olan motor modelinin stator, rotor ve mıknatıs gibi parçalarının geometrik değerleri ve kullanılan malzemelerin özellikleri programa aktarılmıştır. Mıknatısa ait kalınlıkları değiştirilerek motor yapısına göre tekrar entegre edilen ve değişen sonuçlar incelenerek karşılaştırma yapılmıştır. Prototip üretim için hedeflenen değerler elde edilerek motorun optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir. Analizler tamamlanmadan önce tasarımı gerçekleştirilmiş olan motor modeli küçük ağ elemanlarına bölünmüştür. Bir başka değişle modele mesh işlemi uygulanmıştır.

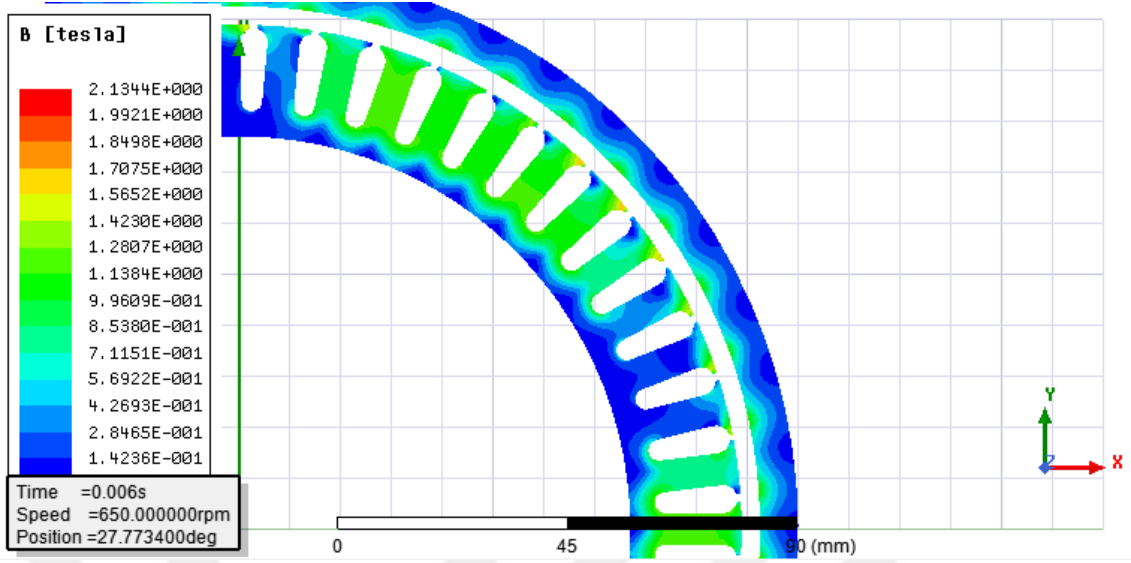
SEY ile yapılan çözümlerinde ve çözümlerinin sonuçlarının doğru sonuçlara yakınlığı ağ (düğüm) sayısı ile doğru orantılıdır. Ancak ağ sayısındaki artış çözüm sürecini de artırmaktadır.

Modelin ağlara b6l6nm6ř g6r6nt6ř6 şekil 4.11’de verilmiştir. Analizi ger6ekleştirilen modelde rotor 9292, stator 42252, sargılar 816 ve mıknatıslar 7744 adet ve diğer parametrelerle birlikte toplam 73230 adet ağ oluşturulmuştur.



şekil 4.11. Mesh işleminin g6r6nt6ř6

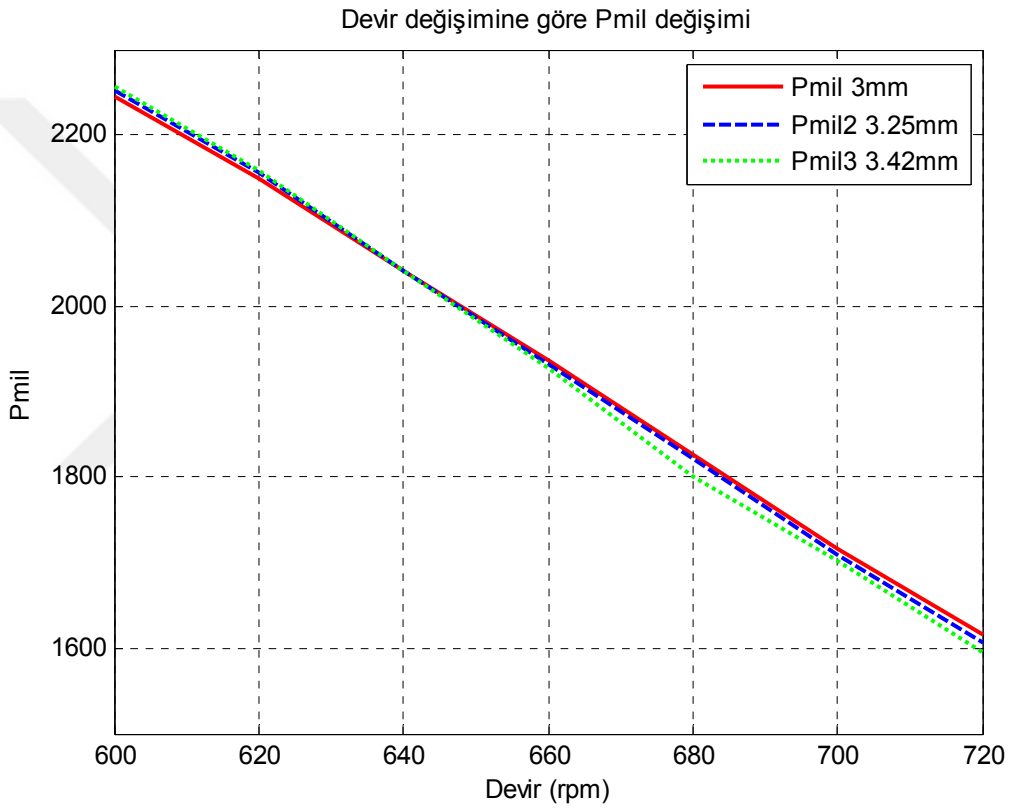
Motor tasarımında, motorun performansını etkileyen 6nemli olan değerlerinden bir diğeri de manyetik akı yoğunluğudur. Motor malzemelerinde meydana gelen manyetik akı yoğunlukları motor parametrelerinin değerlerini etkilemektedir. Dolayısıyla malzemede oluşan doyumlar motorda g66 kaybına neden olur ve bu durumda verimi etkilemektedir. Manyetik akı yoğunluğu motor g6vdesinde kullanılan malzemelerin 6zelliğine g6re değişmektedir. Maxwell programında oluşturulan motor modelinin manyetik akı dağılımı şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı

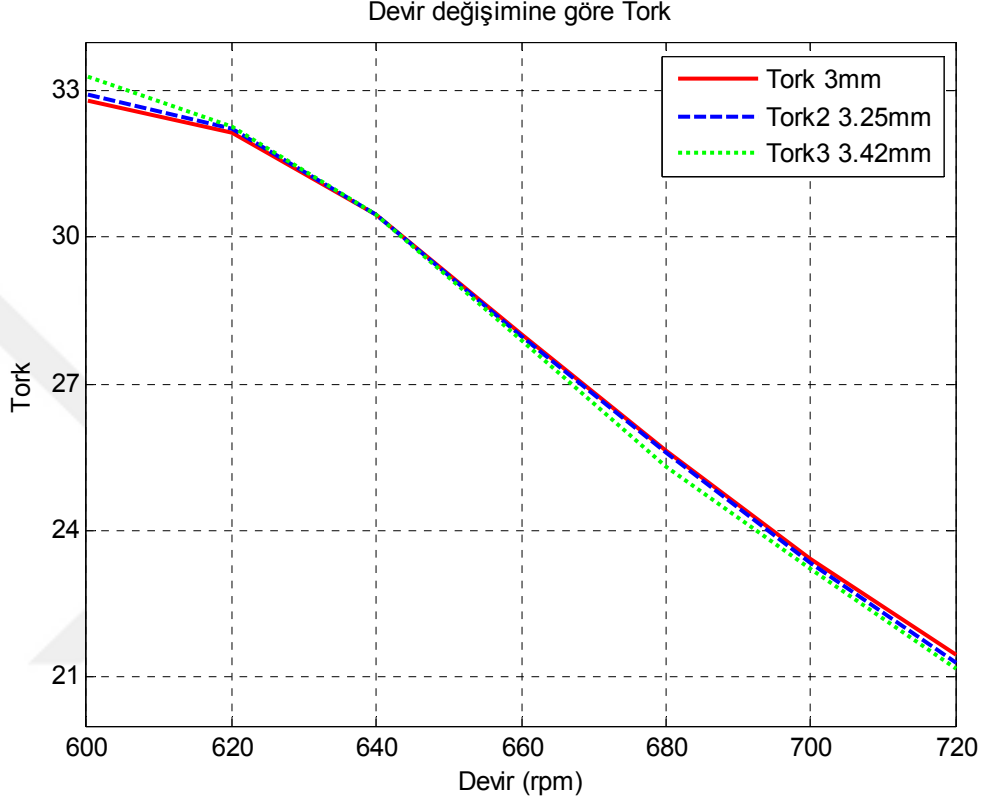
Şekil 4.12 incelendiğinde meydana gelen akı dağılımının homojen olarak gerçekleştiği görülmektedir. Analiz sonucu meydana gelen akı dağılımının maksimum değeri 2.13 T iken ortalama akı yoğunluğunun değeri ise 1.2 T civarında elde edilmiştir.

Maxwell RMXprt' de farklı mıknatıs kalınlıkları hesaplanarak elde edilen Pmil, Tork, ve Verim değerlerinin karşılaştırılması Matlab programında yapılarak aşağıdaki grafikler elde edilmiştir. Şekil 4.13'te Devir değişimine göre Pmil ait grafik verilmiştir. Motor devrinin 600 rpm olduğu değerde Pmil gücünün 2200W'dan daha yüksek olduğu görülmüştür. Grafiğe bakıldığında motor devri arttıkça motor mil gücünün de azaldığı gözlenmiştir. Motor devrinin 700 rpm olduğu değere bakıldığında ise Pmil gücünün 1600-1800 W aralığında olduğu görülmüştür.



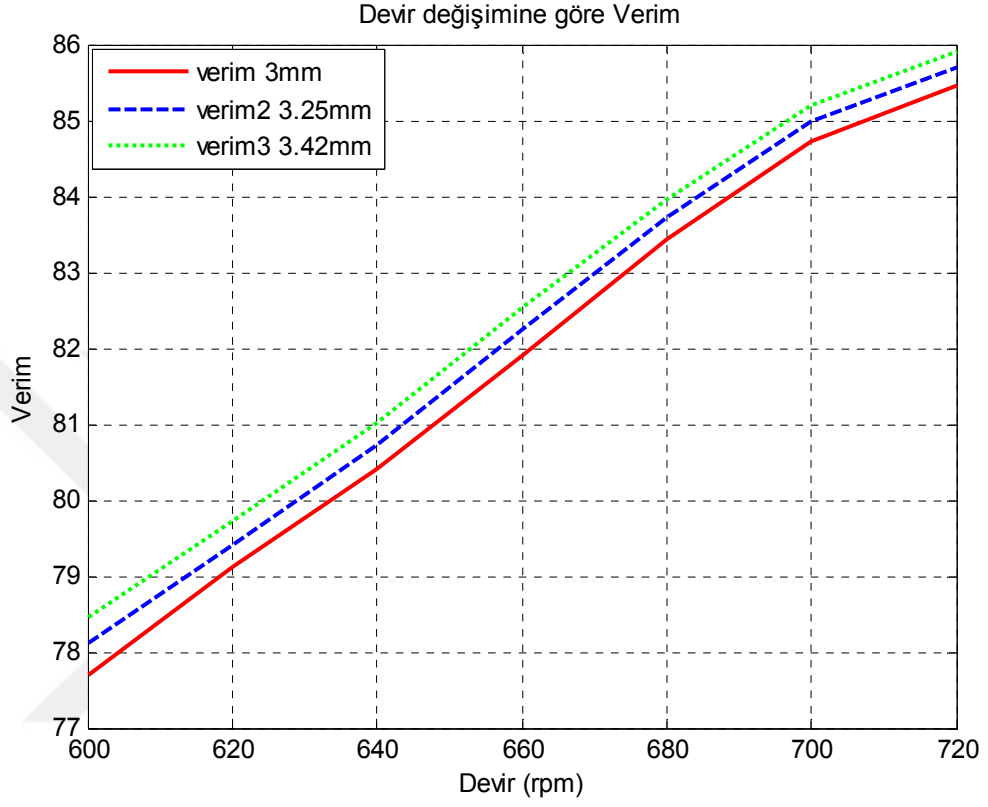
Şekil 4.13. Devir-Pmil grafiği

Şekil 4.14'te Devir değişimine göre Tork'a ait grafik verilmiştir. Grafiğe bakıldığında motor devri arttıkça tork değerinin azaldığı gözlenmiştir. Tork değerinin ulaştığı maksimum değer 33 Nm'dir. Motor devrinin 700 rpm olduğu değerde ise torkun 22-24 Nm olduğu görülmüştür.



Şekil 4.14. Devir-Tork grafiği

Şekil 4.15'te Devir değişimine göre Verim'e ait grafik verilmiştir. Motor devrinin 700 rpm olduğu değerlerde Verim değerinin %85– %86 aralığında olduğu görülmüştür. Grafikten de anlaşıldığı gibi devir arttıkça verimde artmaktadır.

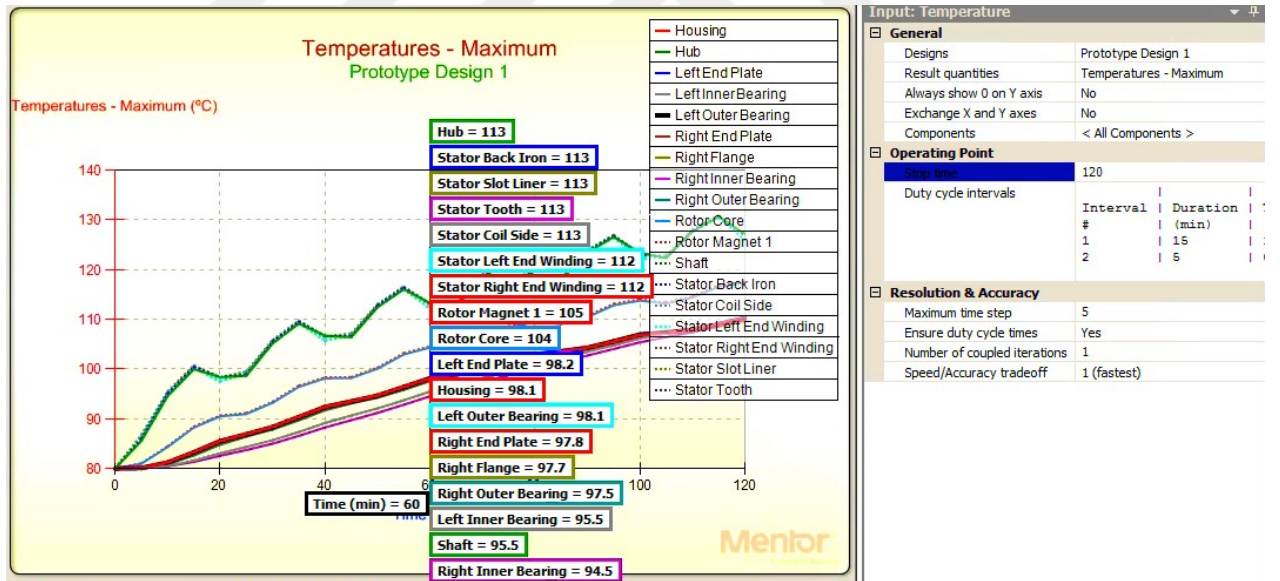


Şekil 4.15. Devir - Verim grafiği

4.4. Fırçasız Doğru Akım Motoru Termal Analiz Sonuçları

Elektrik motorlarının tasarım aşamasında termal analiz ve bu analizlerin motorda meydana getirdiği sonuçları önemlidir. Mıknatıs bulunduran motorlarda termal analiz sonuçları çok önemli olmaktadır. Çünkü mıknatıstaki aşırı ısınmalar neticesinde mıknatısların yapısında bozulmalar oluşmaktadır. Mıknatısların yapısında meydana gelen bozulmalar ise mıknatısların ürettiği akılarda kayıplara neden olmaktadır. Bunun sonucunda ise manyetik akı yoğunlukları azalmaktadır. Manyetik akı yoğunluğundaki azalma motor için gerekli olan akı miktarını karşılayamazsa motor veriminin düşmesine neden olacaktır.

SEY ile tasarımı gerçekleştirilen 1.5 kW'lık prototip motor için Infolytica MotorSolve programında gerekli tanımlamalar yapılarak termal analiz yapılmıştır. 120 dakika boyunca elde edilen Termal analiz için yapılan sonuçlar Şekil 4.16'da verilmiştir.



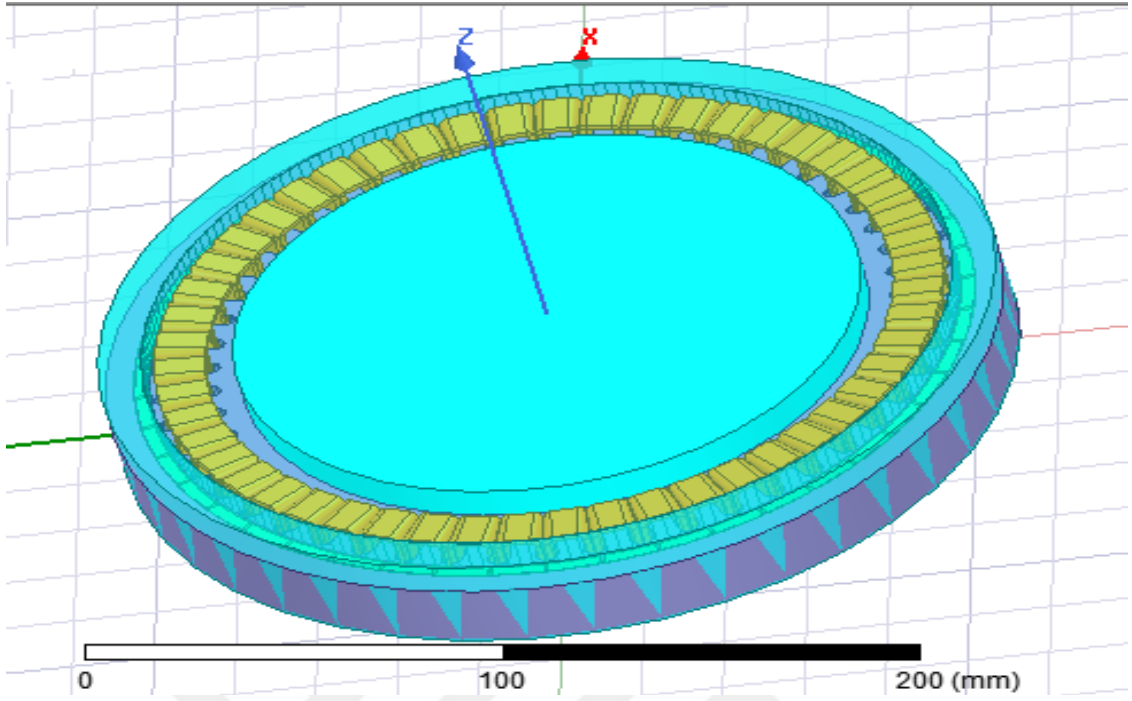
Şekil 4.16. Termal analiz grafiği

Grafik sonuçları incelendiğinde mıknatısın termal analiz sonucu 105°C olduğu görülmüştür. Prototip motorda kullanılan mıknatıs N45SH tipi olup bu mıknatısın demagnetize olma sıcaklığı 150°C'dir. Stator sargısı 113°C, sargı boyunduruk 113°C, diş 113°C, rotor nüve 104°C ve mil 95.5°C olarak elde edilmiştir. Bu değerler sınır değerleri içerisinde olup seçilen tasarımın termal olarak motoru zorlamayacağı görülmüştür.

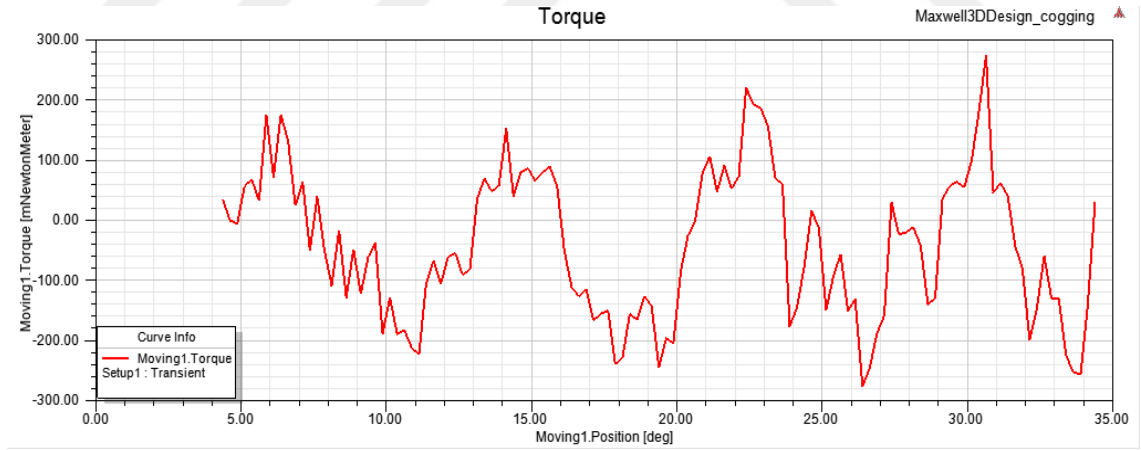
4.5. Tutma (Cogging) Tork Analizi

Tutma torku mıknatıslardan kaynaklanan elektromotor kuvveti harmonikleri ile oluklardan kaynaklanan manyetik iletkenlik harmoniklerinin etkileşimlerinden meydana gelmektedir ve yüke herhangi bir etkisi olmamaktadır. Ancak hız dalgalanmalarına ve titreşime neden olmaktadır (Ayçiçek, 2012). Bir motorun tutma tork profili, rotordaki sabit mıknatısların sayısına ve statordaki dişlerin sayısına bağlıdır. Tutma torku verimin azalmasına neden olduğu için minimum seviyede etkili olması için azaltıcı tedbirler alınması gerekmektedir. Stator dişlerinde yardımcı oluklar açmak, farklı oluk açıklıkları veya oluk açıklığının kaydırılması gibi tedbirler alınırken rotorda ise mıknatıs adımlarını değiştirmek, rotorun diğer rotora göre dairesel olarak hareket ettirilmesi, mıknatıs veya kutupların kaydırılması gibi tedbirler alınmaktadır. Tutma torku, fırçalı ve fırçasız DA motorları ve senkron AA motorları dahil olmak üzere sabit mıknatıslı motorlarda oluşmaktadır.

Tutma torku analizinin daha doğru yapılabilmesi için motor modelini Şekil 4.17' de gösterildiği gibi 3 boyutlu olarak oluşturulmuştur. Oluşturulan model SEY yardımıyla rotorun her bir açısal pozisyonu için hesaplanan tutma torku analizi yapılmıştır. Tutma torkuna ait grafik Şekil 4.18' de verilmiştir. Tutma torku grafiği incelendiğinde tepe değerlerinin 0-200 mNm (0.2 Nm) aralığında olduğu görülmüştür. 3D SEY kullanılarak hesaplanan tutma torkunun elde edilen verilerden yola çıkılarak prototip motor üretimi için bir engel olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.17. Motor 3D modeli

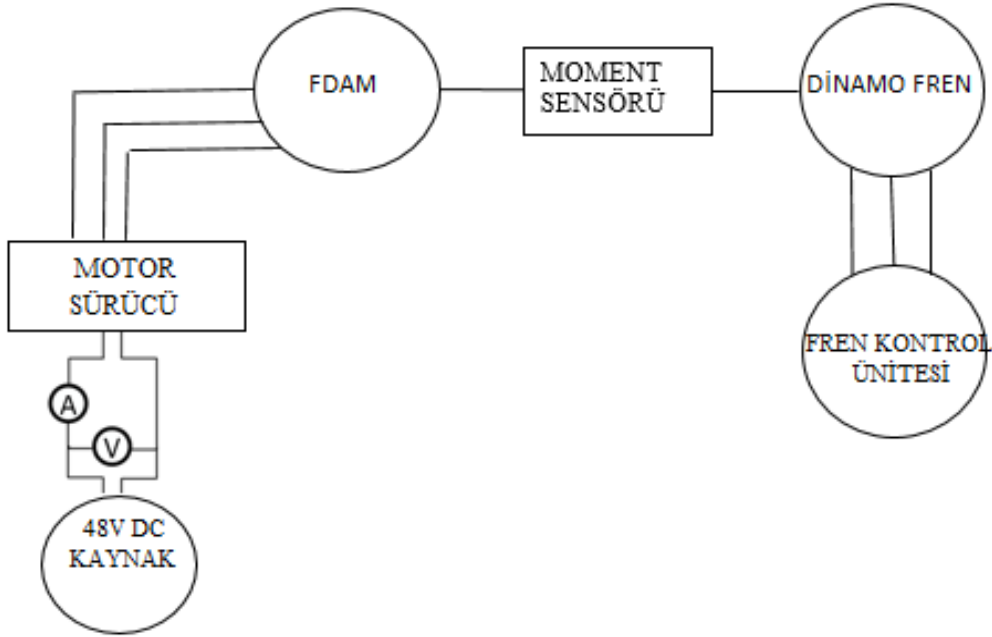


Şekil 4.18. Tutma torku grafiği

4.6. Fırçasız Doğru Akım Motorunun Deneysel Sonuçları

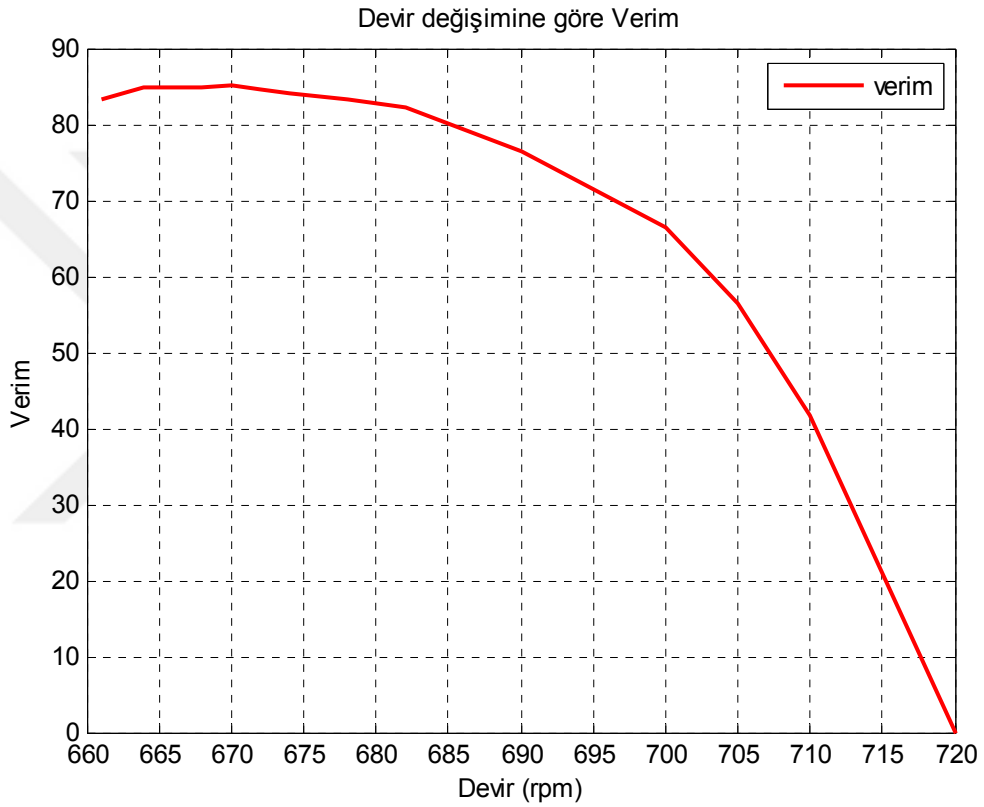
4.6.1. Performans deneyleri

Prototipi üretilen motorun performans deneylerini gerçekleştirmek için deney düzeneği hazırlanmış olup Şekil 4.19’da deney düzeneğine ait şema verilmiştir. Motor, generatör ile yüklenmiş ve generatör çıkışına fren kontrol ünitesi bağlanmıştır. Değişen yük ile birlikte motorun performansı ölçülmüştür. Motor ve generatör milleri arasına yerleştirilen moment sensöründen kaydedilen anlık moment değerleri ve ölçülen motor hız değerleri kaydedilerek, motor mil gücü farklı yükler altında hesaplanmıştır. Motor giriş akım ve gerilim değerleri de kaydedilmiştir. Bu deney ile elde edilmek istenen, prototip motorun farklı çalışma koşullarındaki davranışı ve davranışların tasarım değerlerine olan yakınlığı ile belirlenip karşılaştırılmasıdır.



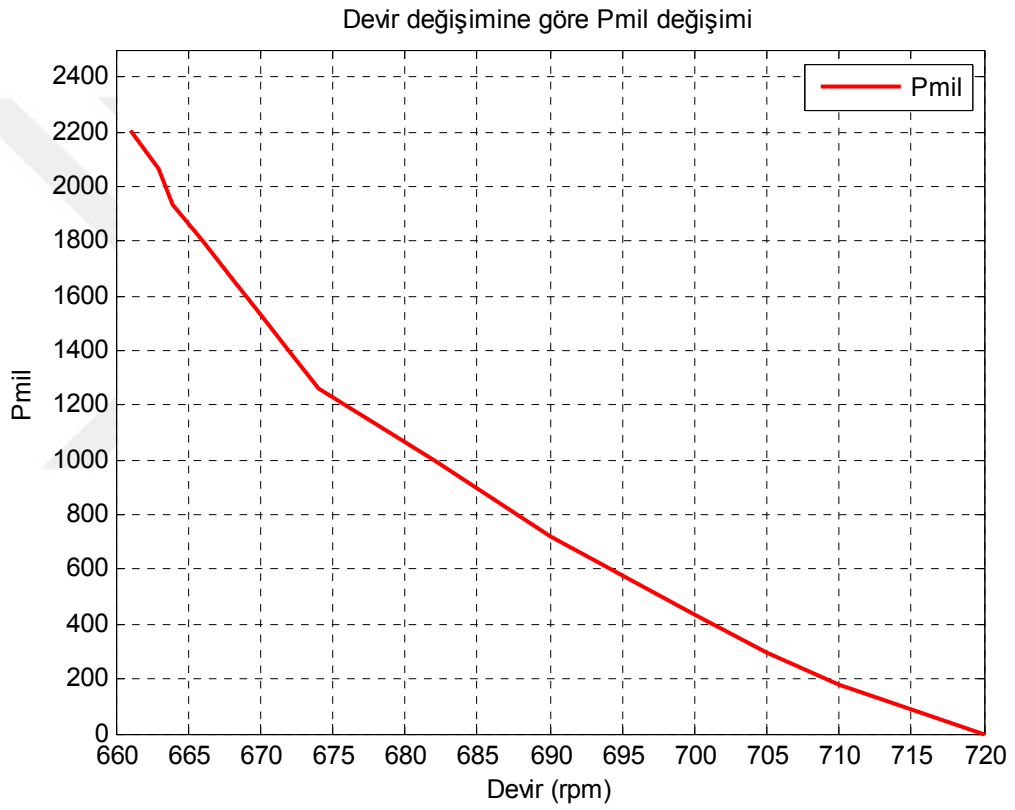
Şekil 4.19. Motor performans deneyi bağlantı şeması

Şekil 4.20'ye bakıldığında motorun verim grafiği görülmektedir. Motorun 700 rpm hızda çalıştırılırken elde edilen verim değeri 66.39'dur. Üretilen prototip motor 670 rpm hızda iken maksimum verim %85 değerine ulaşmıştır. Simülasyonda elde edilen maksimum verim %85 olarak elde edilmiştir. Prototipi üretilen motorun performansı sonucu simülasyon sonucu elde edilen grafikler karşılaştırıldığında sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.



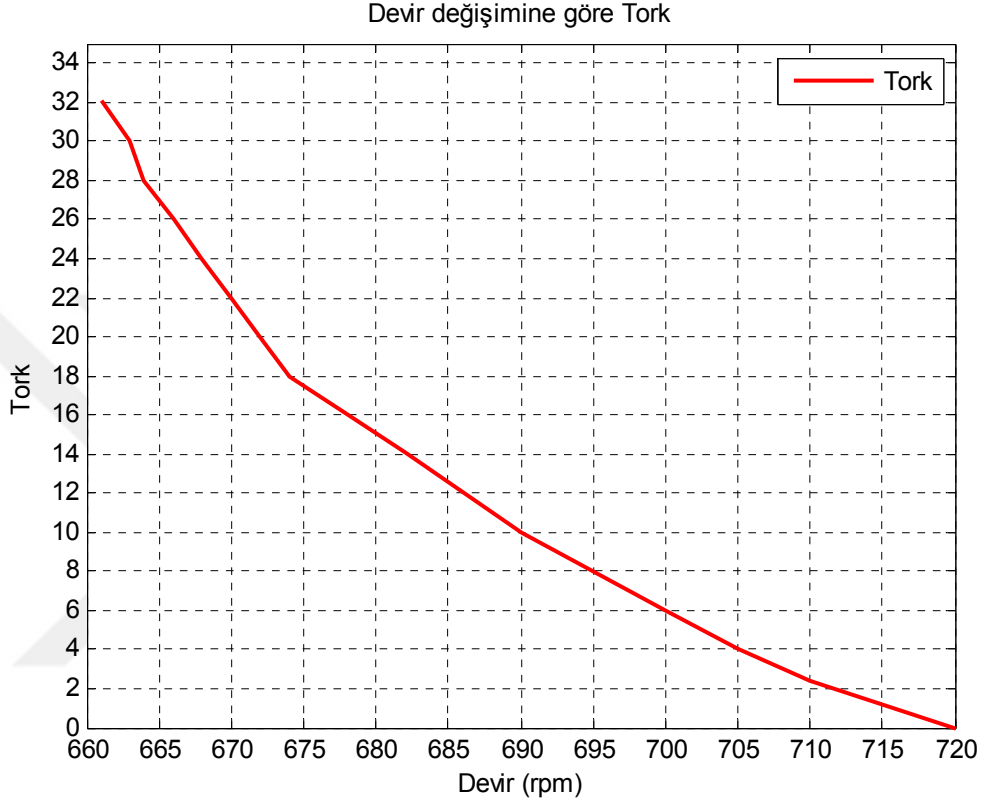
Şekil 4.20. 51 / 46 Motor Devir - Verim grafiği

Şekil 4.21'e bakıldığında motorun Pmil grafiği görülmektedir. Motor devri arttıkça Pmil gücünün azaldığı görülmektedir. Motor devrinin 700 rpm olduğu değerde Pmil gücünün 400 – 500 W aralığında olduğu görülmüştür. Üretilen prototip motorun 661 rpm hızda iken maksimum Pmil gücünün 2206.68 W değerine ulaşmıştır. Simülasyonda elde edilen maksimum Pmil gücü 2257.71 W olup 600 rpm de bu değere ulaştığı görülmüştür. Pmil maksimum değerleri birbirine yakın olsa da bu motor bu değerlere farklı hızlarda ulaşmıştır.



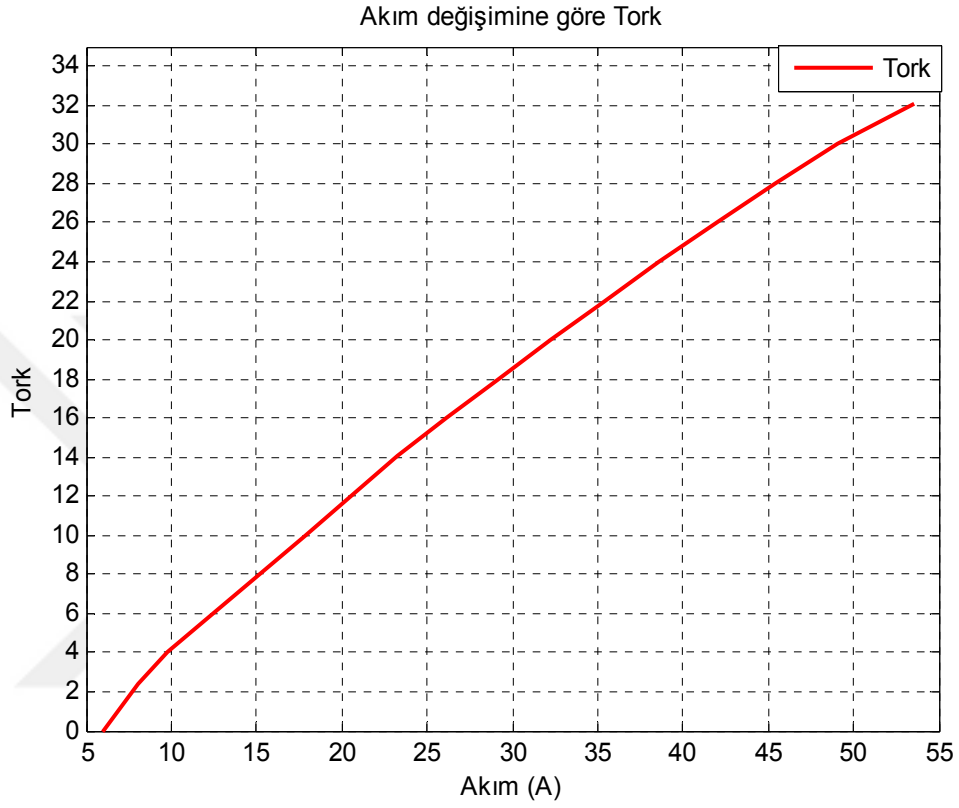
Şekil 4.21. 51 / 46 Motor Devir - Pmil grafiği

Şekil 4.22' ye bakıldığında motorun Tork grafiği görülmektedir. Motor devri arttıkça Tork değerinin azaldığı görülmektedir. Üretilen prototip motorun 661 rpm hızdayken 32.1 Nm ile maksimum Tork değerine ulaşmıştır. Simülasyonda elde edilen maksimum Tork değeri olan 38.32 Nm'ye 600 rpm de ulaştığı görülmüştür.



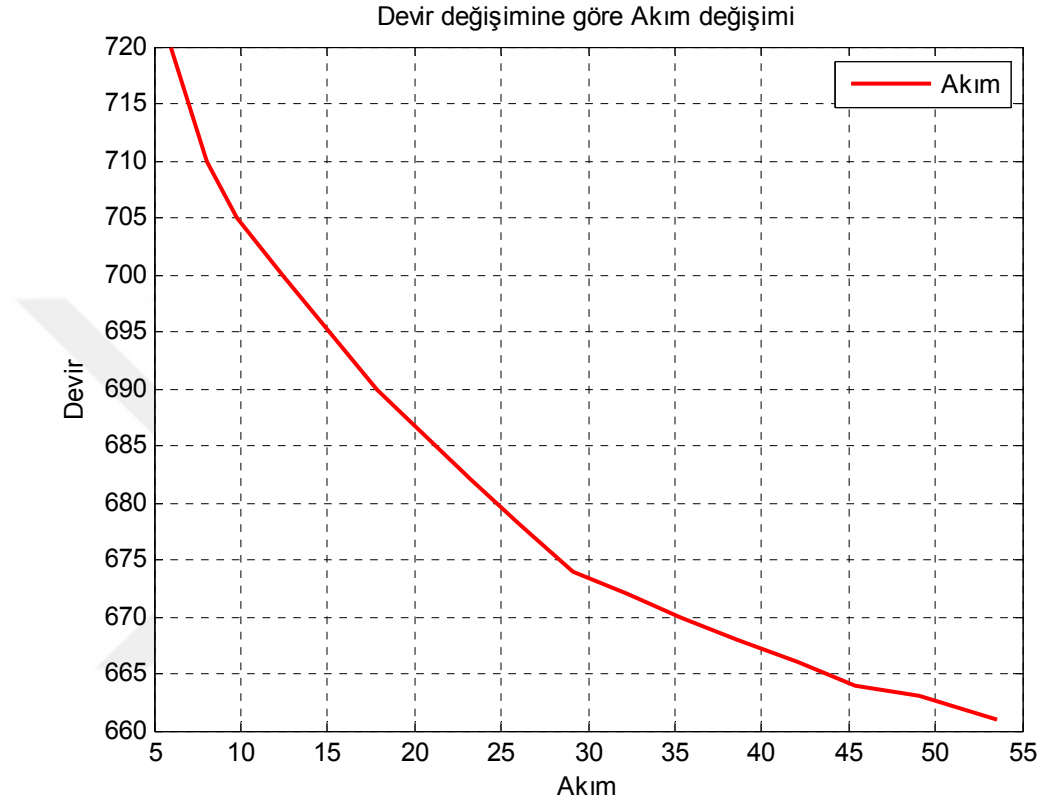
Şekil 4.22. 51 / 46 Motor Devir - Tork grafiği

Şekil 4.23'e bakıldığında motorun Akım değişimine göre Tork grafiği görülmektedir. Akım değeri arttıkça tork artmıştır. Ulaşmak istediğimiz 22 Nm'lik tork değerine motorun akım değeri 30–35 A aralığında iken elde edilmiştir.



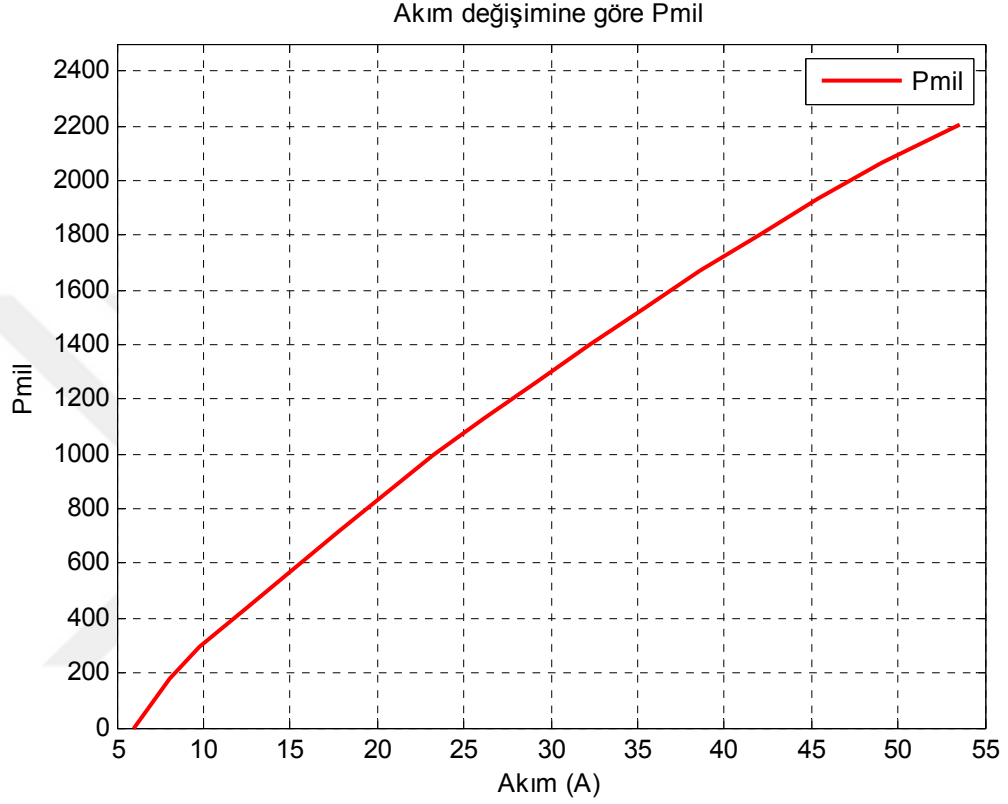
Şekil 4.23. 51 / 46 Motor Akım - Tork grafiği

Şekil 4.24'e bakıldığında motorun Devir değişimine göre motorun Akımını gösteren grafik verilmiştir. Motor devrinin azaldığında akım değerinin hızında arttığı görülmüştür. Motor devrinin 680 rpm olduğu değerde motorun akım değerinin 23 A' lik değere sahip olmuştur.



Şekil 4.24. 51 / 46 Motor Devir – Akım grafiği

Şekil 4.25' e bakıldığında motorun Akım değişimine göre Pmil grafiği verilmiştir. Akım değeri arttıkça doğrusal olarak Pmil değerinde arttığı görülmektedir. Pmil değerinin 1.5 kW olduğu değerdeki 30–36 A aralığında elde edildiği görülmüştür.



Şekil 4.25. 51 / 46 Motor Akım – Pmil grafiği

4.6.2. Isınma deneyi

Anma gücü, elektrik motorunun normal şartlar altında iken verebileceği en yüksek güç olarak tanımlanmaktadır. EN 60034-1 standardında belirtilmiş olan ve motorlar için geçerli olan çeşitli yüklenme sürelerinde sahip oldukları performans ölçüleri Çizelge 4.3' te ki gibi verilmiştir (Tanç, 2014). Aşırı yük altında çalışan motor belli bir zaman sonra ısınmaya başlar. Isınan motor arızalar oluşturabilmektedir. Oluşabilecek arızalarda sargı yalıtkanları zarar görebilir, motor sargıları yanabilir ve mıknatıslar özelliklerini kaybedebilirler. Motor sargılarında kullanılan yalıtkanların özellikleri ve yalıtım sınıfları farklıdır. Bu yalıtım sınıflarının dayanabileceği sıcaklık değerleri de farklılık göstermektedir. Motor sargıları için yalıtım sınıflarına ait Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Motor sargı yalıtım sınıfları ve çalışma sıcaklıkları (Tanç, 2014)

Yalıtım Sınıfı	İzin Verilen Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	En Yüksek Çevre Sıcaklığı (°C)	Güvenlik Payı (K)	İzin Verilen En Yüksek Isınım (K)
A	105	40	5	60
E	120	40	5	75
B	130	40	10	80
F	155	40	15	100
H	180	40	15	125

Deneysel çalışmada veri toplama işlemi gerçekleştirilmeden önce motor tam yükünde yaklaşık 30 dakika çalıştırılarak, ortam sıcaklığındaki (yaklaşık 25°C) sargı sıcaklığı 65°C ye çıkartılmıştır. Daha sonra performans eğrilerinin elde edilmesi için yaklaşık 30 dakika boyunca yapılan deney sonucunda elde edilen eğrilerde sargı sıcaklığının maksimum 108°C olduğu ölçülmüştür. Yani başlangıç itibariyle yaklaşık 120 dakika çalıştırılan motorun sargı sıcaklığı 108°C yi geçmemiştir. Bu değer termal analiz sonuçları ile kıyaslandığında yaklaşık 5°C'lik bir fark olduğu görülmüştür. Bu fark modelleme esnasında yapılan kabullerden ve üretimde kullanılan motor kasasının havalandırma deliklerinden kaynaklanmaktadır. Hem simülasyon hem de deneysel çalışma sonuçlarına göre motorun termal yükünün sargı izolasyonu ve mıknatısın güvenli çalışma sıcaklığı açısından sınır değerleri içerisinde kaldığı görülmüştür.

4.7. Motorun Araca Entegrasyonu

Tasarımı ve prototip üretimi gerçekleştirilen motorun yapılan deneyleri sonucunda motorun araca entegre edilmesi için çalışmalara başlanmıştır. Öncelikle, tasarımın parametrelerine ve hedefine uygun olarak motor 10" janta monte edilerek entegrasyon sağlanmıştır. Motor yataklar vasıtasıyla araç şasesine sabitlenmiştir. Fren diski, fren klapeleri ve hidrolik hortumları da bağlanarak yol testleri için hazır hale getirilmiştir. Gerçekleştirilen sürüş denemelerinde hedeflenen tork ve hız değerlerine ulaşıldığı ve sorunsuz bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Araca monte edilmiş motor Şekil 4.26' da verilmiştir.





Şekil 4.26. Motorun araca entegre edilmesi

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Elektrikli araçlar günümüzde ulaşım araçlarının arasında hızlı bir şekilde kendilerine yer bulmaktadır. Tasarımı ve prototip üretimi gerçekleştirilen 48 V, 680 d/d'lık motorun tasarım giriş parametreleri oluşturan motorun fiziksel, manyetik ve termal ihtiyaçlarına göre belirlenen tasarımın parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen bu değerler neticesinde tasarlanacak olan motorun giriş parametrelerinin hesaplanması için pek çok makale ve akademik çalışmalardan yararlanılarak araca ait bilgiler ile gerekli hesaplamalar yapılmış ve tasarım giriş parametreleri oluşturulmuştur.

Tasarım aşamasında motora ait parçaların özellikleri ve malzemelerin seçimi aşamasında kolaylık sağlayabilecek bilgilere yer verilmiştir. Motorda kullanılan stator, rotor, sac, mıknatıs ve diğer malzemelerin Manyetik değerleri göz önünde bulundurularak incelemeler yapılmıştır. Bu bilgiler ile günümüzdeki kullanılan modern yöntemler birleştirilerek tasarlanan motorun sonuçları incelenmiş ve gerekli çıkarımlar yapılmıştır.

Giriş parametrelerinin belirlenmesinden sonra bu parametreler Ansys Maxwell RMXprt tasarım programına aktarılmıştır. Motor boyutları, tork, güç ve hız gibi değerlerin yanında motora ait oluk-kutup sayısı, sarım modelinin seçilmesi, bazı değişken parametrelerinin ve sabit değerlerin verilmesi ile birlikte ilk örnek tasarım ortaya çıkarılmıştır. Bilgisayar ortamında SEY ile deneyler yapılmıştır.

Analizlerin incelenmesi ve optimizasyon sürecinin devam edebilmesi için tasarım aşamasında özellikleri belirlenen değerlerden sarım sayısı, mıknatıs tipi ve mıknatıs kalınlığı gibi değişkenlerinin farklılaştırılması neticesinde ortaya çıkan tasarımın etkileri incelenmiştir. Bu değişkenlerin değişmeleri sonucunda ortaya çıkaran değerler incelenmiştir. Sonuç değerleri kullanılan malzemelerin doyum noktalarını karşılayıp karşılamadığı referans olarak kabul edilen değerleri karşılayabilme durumu incelenmiştir.

Tasarımı gerçekleştirilip üretilen 1.5 kW gücünde 51 oluk 46 kutuplu motorun deneylerinin yapılması için motor sürücüsü ile motorun entegrasyonu sağlanmış ve deney düzeneği oluşturulmuştur. Yapılan deneyler ile üretilen motorun çalışma değerlerinin, tasarım değerlerine olan yakınlık derecesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Motora ait performans deneyleri ile motora ait grafikler MATLAB programı yardımıyla oluşturulmuştur. Elde edilen grafiklerin tasarım için belirlenen parametre değerlerine belirli bir toleransla hedeflenen performansı sağladığı görülmüştür. Motorun analitik, benzetim ve deneysel çalışmalardan alınan sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

Üretilen prototip motorun istenilen çalışma performansına uygun olup olmadığına karar verebilmek için yapılacak olan test kontrolü öncesinde motora 10" jant elektrikli aracın arka tekerleğine montaj işlemi gerçekleştirilmiştir. Aracın için mekanik ve elektriksel bağlantı işlemleri tamamlanarak aracın yol testleri yapılmıştır.

Entegrasyonu tamamlanan ve yol testleri yapılan aracın hedeflenen performans değerleri içerisinde çalıştığı görülmüştür. Testlerin istenen performansa sahip olduğuna karar verilmiş olup “Elektrikli Araçlar İçin Geliştirilen Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarım ve Analizi” çalışması tamamlanarak farklı çalışmalar için akademik çalışmalara referans olması amaçlanmaktadır.

Gelecekte prototip üretimi gerçekleştirilen motorun doğrusal olmayan durumlar için iyileştirme çalışmaları yapılabilir bu çalışmalara ilk önce motora ait parametreleri geliştirmekle başlanabilir, kayıpları en az seviyeye indirmek için sarım özellikleri, tasarım gibi konulara yoğunlaşılabilir. Tasarlanacak olan motor için yeni termal model ve hız kontrolü (hall sensörleri yerine sensörsüz) geliştirilebilir. Geliştirilen bu yeni model ile motorun ısı kayıplarını azaltmaya, verimi ve performansını arttırmaya yardımcı olmayı amaçlanmalıdır.

6. KAYNAKLAR

- Akgün G., 2013. 2x400 Ton Portal Kren Tasarımı ve Sayısal Yöntemle Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Atmel Corporation, “AVR194: Brushless DC Motor Control using ATmega32M1[online]”, <http://www.atmel.com/images/doc8138.pdf> - (07.11.2015).
- Ayçiçek, E., 2012. Vuruntu Momenti Azaltılmış Eksenel Akıllı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydoğdu, Ö., 2006. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Genetik Tabanlı Bulanık Denetleyici İle Sensörsüz Kontrolü, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Bal, G., 2006. Özel Elektrik Makinaları, Seçkin Yayıncılık A.Ş., Ankara.
- Boldea, I. ve Nasar, S.A., 2009. The Induction Machines Design Handbook Second Edition. Taylor and Francis Group, 824p, United States of America.
- Boldea, I. ve Nasar, S.A., 2001. The Induction Machines Handbook, CRC Press.
- Chan, C.C., Xia, W., Jiang, J.Z., Chau, K.T. ve Zhu, M.I., 1998. Permanent Magnet Brushless Drives, IEEE Industry Applications Magazine, pp. 16-22.
- Çağlar, A.S., 2018. Elektrikli Araçlar İçin Fırçasız Doğru Akım Motor Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çimen, M.A. 2010. Elektrikli ve Seri Hibrit Elektrikli Araçlarda Simülatör Kullanarak Kalıcı Mıknatıslı Senkron Tahrik Motoru Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği ABD, İstanbul.
- Çınar, M. A., 2002. Sürekli Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorunun Modellenmesi ve Bilgisayar Destekli Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Çorapsız. M.R., 2018. Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Komütasyon Moment Dalgalanmalarının Azaltılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Dönmezer, Y., 2009. Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Moment Titreşimlerinin Azaltılması, Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, İstanbul.
- Eker, M., 2017. Şebeke Yol Vermeli Eksenel Akıllı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı, Doktora Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat.
- Fırat, A., 2006. Tek fazlı şebeke kalkışlı sürekli mıknatıslı senkron motor. (Yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Fukami, T., Motoki, K., Kirihata, R., Shima, K., Koyama, M., Mori, T., ve Nakano, M., 2017. An Electromagnet-Assisted Ferrite Magnet Motor, IEEE Transactions on Magnetics, 53(11), 1-4.
- Ge, X., 2014. Simulation Of Vibrations In Electrical Machines For Hybrid-Electric Vehicles, Master's Thesis, Chalmers University Of Technology Göteborg, Sweden.
- Gürdal, O., 2015. Elektrik Makinalarının Tasarımı. Nobel Akademik Yayıncılık, 518s, Bursa.
- Gürdal, O., 2015. Elektromanyetik Alan Teorisi. Bursa Orhangazi Üniversitesi Yayınları, 534s, Bursa.

- Grunditz, E. ve Jansson, E., 2009. Modelling And Simulation Of A Hybrid Electric Vehicle For Shell Ecomarathon And An Electric Gokart, M.Sc. Thesis, Chalmers University of Technology Electric Power Engineering, Göteborg, 10-12.
- Hori, Y., 2004. Future Vehicle Driven By Electricity And Control-Research On Four-Wheel- Motored, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 51 (5): 1-14.
- Halselman, D. C, 1994. Brushless Permanent-Magnet Motor Design. Mc Graw- Hill, ABD.
- Ion Boldea ve Syed A . Nasar, 2001. The Induction Machine Handbook, CRC Press.
- Kabaktepe, B., 2012. A Methodology to Analyze Short Term Impacts of Electric Vehicles on Costs, Emissions and Energy Consumption: Case of Turkey, Master Thesis, Koc University, Istanbul.
- Karakaş, E., 2016. Elektrikli Araçlar İçin Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Sensörsüz Doğrudan Moment Kontrolünün Güç Geri Kazanımlı Olarak Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Karaoğlan, M.U. 2014. Elektrik Tahrikli Bir Binek Otomobilin Tahrik Sisteminin Matematiksel Modellenmesi ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kenjo, T., ve Nagamori, S., 1985. Permanent Magnet and Brushless DC Motors, Clarendon Press, Oxford, UK, pp. 57-102.
- Kenjo, T., 1991. Electrical Motors and Their Controls, Oxford University Press, USA.
- Kim, S., Choi, J. ve Lee, J., 2003. Magnet shape optimization for high performance single-phase line start synchronous motor. Journal of Applied Physics, Vol. 93, No. 10, 8695-8697
- Krause, P.C., Wasynczuk, O., ve Sudhoff, S.D., 1994. Analysis of Electric Machinery, IEEE Power Engineering Society, New York, USA.
- Krause, P.C., 1986. Analysis of Electrical Machinery, McGraw-Hill Inc., pp. 498-558, New York, USA.
- Krause, P., Wasynczuk, O. ve Sudhoff, S.D., 2002. Analysis Of Electric Machinery And Drive Systems. 2nd ed., IEEE Press.
- Korkut, E., 2011. Elektrik Tahrikli Kanguru Tipi Engelli Aracı Tasarımı ve Prototip İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Li, Y., Bobba, D. ve Sarlioglu, B., 2018. Design and Optimization of a Novel Dual-Rotor Hybrid PM Machine for Traction Application. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65(2), 1762-1771.
- Liu, T.H. ve Cheng, C.P., 1993. Controller Design for A Sensorless Permanent Magnet Synchronous Drive System. IEE Electric Power Applications 140: 369-378.
- Microchip Technology Inc, 2003. "AN885 Brushless DC Motor Fundamentals [online], <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>. 25.10.2015.
- Miller, T.J.E., 1983. Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives, Oxford University Press, pp. 55-75, New York.
- Ocak. C., 2013. Elektrikli Araçlar İçin Üç Kademeli Yeni Bir Fırçasız DA Motoru Tasarımı, Analizi ve Uygulaması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Ogawa, T., Takahashi, T., Takemoto, M., Ogasawara, S., ve Daikoku, A. (2017, May). The examination of pole geometry of consequent pole type ferrite PM axial gap motor with field winding. In *Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017 IEEE International* (pp. 1-7). IEEE.
- Okur, M., 2007. Dört Zamanlı, Tek Silindirli, Buji İle Ateşlemeli Bir Benzin Motorunun Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Tasarımı Ve İmali, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Ooi, B.T., Brissoneau, P.ve Bruggel, L., 1981. Optimal winding design of permanent magnet motor for self-controlled inverter operation, *Electric Mach. Electromech.*, 6, 381-389.
- Özçira, S., 2007. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Kontrol Yöntemleri ve Endüstriyel Uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Pillay, P. ve Krishnan, R., 1989. Modelling, Simulation and Analysis of Permanent Magnet Motor Drives: Part 1, 2, *IEEE Trans. on Ind. Applications*, 25, 2, pp. 265-279.
- Rahim, N., Ping, H. W. ve Tadjuddin, M., 2006. Design of an in-wheel axial flux brushless DC motor for electric vehicle, *The 1st International Forum on Strategic Technology*, Ulsan, South Korea, pp. 16 –1.
- Raminosa, T., El-Refaie, A. M., Torrey, D. A., Grace, K., Pan, D., Grubic, S., ve Huh, K. K. 2017. Test Results for a High Temperature Non- Permanent-Magnet Traction Motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), 3496-3504.
- Rostami N., Feyzi M.R., Pyrhönen J., Parviainen A. ve Behjat V., 2012. Genetic Algorithm Approach for Improved Design of a Variable Speed Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator, *IEEE Transactions On Magnetics*, 48:12, 4860-4865.
- Sahin, F., 2001. Design and development of a High-speed axial-flux permanent Machine. Ph. D. Thesis, Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- Sen, P.C., 1990. Electric Motor Drives and Control Past, Present and Future, *Transactions on Industrial Electronics*, 37, 6, pp. 562-575.
- Tanç. G., 2014. Elektrikli Bisikletler İçin Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarımı ve Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tapia J.A., Pyrhönen J., Puranen J., Lindh P. ve Nyman S., 2013. Optimal Design of Large Permanent Magnet Synchronous Generators, *IEEE Transactions On Magnetics*, 4:1, 642 – 650.
- Temnykh, A., 2007. Vakuum baking test of NdFeB permanent magnet material for ERL undulators. CBN 07-4, Cornell University.
- Tırıs, M., 2003. Elektrikli Araçlar, TÜBİTAK-MAM Yayını, Kocaeli.
- Toliyat H.A. ve Gopalarathnam T., 2002. *The Power Electronic Handbook.*, Skvarenina T. L. (ed) pp.78-100, CRC Press LLC, New York.
- Turhan, E., 2014. Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Moment İyileştirmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tutelea, L. ve I. Boldea, I., 2007. Optimal Design of Residential Brushless D.C. Permanent Magnet Motors with FEM Validation, *Aegean Conference on Electric Machines, Power Electronics and Electromotion (ACEMP '07)*, 435-439.

- Uğur, E., 2011. Prototip Bir Elektrikli Araç Üzerinde Enerji Yönetim Sisteminin Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uygun, D., 2012. 5-Fazlı U-Tipi Segmental Rotorlu Bipolar Uyarımlı 10/8 Anahtarlama Relüktans Motorun Tasarımı ve Uygulanması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10–15.
- Ustun, O., Yilmaz, M., Gokce, C., Karakaya, U. ve Tuncay, R. N., 2009. Energy Management Method for Solar Race Car Design and Application, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 804-811.
- Ünlü, N., Karahan, Ş. ve Turhan L., 2003. Elektrikli Araçlar, Gebze :TÜBİTAK – Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü.
- Ünlü, N., Karahan, Ş. ve Tür, O., 2003. Uçarol, O., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F., Tırıs, M., Elektrikli Araçlar, Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Kocaeli.
- Xue, X. D., Cheng, K. W. E. ve Cheung, N. C., 2008. Selection Of Electric Motor Drives For Electric Vehicles, Australasian Universities Power Engineering Conference, Hong Kong, 170-175.
- Yazıcı, Y., 2008. Fırçasız Doğru Akım Motorunun Sayısal Sinyal İşlemci (DSP) ile Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yedamale, P. 2003. Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, Microchip Technology Inc. App. Note, USA.
- Yenil, V., 2016. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Doğrudan Moment Kontrolünde Akı ve Moment Dalgalanmasının Azaltılması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Ying, L. ve Ertugrul, N., 1999. The Dynamic Simulation of the Three-Phase Brushless Permanent Magnet AC Motor Drives with LabVIEW, Australasian Universities Power Engineering Conference AUPEC'99, Darwin, 11-16.
- Yılmaz, M., 2005. Fırçasız Doğru Akım Motorunun Algılayıcısız Kontrolünde Dalgacık Tekniğinin Uygulanması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zarko, D., Ban, D., ve Lipo, T.A., 2007. Analytical Solution for Cogging Torque in Surface Permanent-Magnet Motors Using Conformal Mapping, IEEE Transactions on Magnetics, 44(1), 52-64.

7. ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Fazilet AKIN
Doğum Tarihi ve Yeri : 22.06.1993 - SİVAS
Medeni Hali : Bekar
Telefon : 5543960406
e-mail : faziletakin9358@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üni. İş Sağlığı ve Güvenliği	2018
Lisans	Gaziosmanpaşa Üni. Mekatronik Mühendisliği	2016
Lise	Mehmet Gökhan Ay Anadolu Lisesi / Sivas-Merkez	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Devam ediyor	CRS DENİM TOKAT	Otomasyon Mühendisi

Yayın

Akın, F., Eker M. Ve Akar M. (2017). BLDC Motor Design for Electrical Vehicle. ISMSIT2017- International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies,

