

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YAPAY SİNİR AĞLARI İLE FIRÇASIZ DOĞRU AKIM
MOTORLARININ PERFORMANS PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa ESEN

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Barış BORU

NİSAN 2025

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YAPAY SİNİR AĞLARI İLE FIRÇASIZ DOĞRU AKIM
MOTORLARININ PERFORMANS PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa ESEN

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 08/04/2025 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Prof. Dr. Devrim AKGÜN	BAŞARILI
Üye: Prof. Dr. Sezgin KAÇAR	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Barış BORU	BAŞARILI

BEYAN

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

Mustafa ESEN

08/04/2025

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Barış BORU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Akademik hayatım boyunca bana yol gösteren ve her zaman yanımda olarak yardımcı olan Öğr. Gör. Sedat Ünlü'ye teşekkürlerimi sunarım.

2022 yılında elektronik birim sorumluluğunu, 2023 yılında ise takım kaptanlığını yaptığım SUBÜ-TETRA ailesine, birlikte çalışmanın yanı sıra bana kattıkları değerli deneyimler ve yol arkadaşlığımız için teşekkür ederim. Bu ailenin bir parçası olmak, bana yalnızca mühendislik anlamında değil, aynı zamanda yaşam boyu sürecek kıymetli bir bağ kazandırmıştır.

Bugünlere gelmemde emeği geçen tüm öğretmenlerime ve her zaman yanımda olan, başta Annem, Babam ve Ablam olmak üzere tüm aileme, bana gösterdikleri koşulsuz destek için ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR	iv
SİMGELER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	10
1.2. Tezin Amacı	17
1.3. Tezin İçeriği	18

BÖLÜM 2.

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI VE YAPISI.....	20
2.1. FDAM'lerin Yapısı ve Temel Çalışma Prensipleri	23
2.2. FDAM'lerin Avantaj ve Dezavantajları	25
2.3. FDAM'lerin Diğer Motor Türleri ile Karşılaştırılması ve Kullanım Alanları	27
2.4. FDAM'lerde Kullanılan Sensör Tipleri	29
2.4.1. Hall etkili sensörler	31
2.4.2. Optik kodlayıcılar (Encoder)	33
2.4.3. Resolver (Çözücü).....	36
2.5. FDAM'lerin Sınıflandırılması.....	37
2.5.1. Manyetik akı yönüne göre sınıflandırma	37
2.5.2. Besleme gerilimlerine göre sınıflandırma.....	40
2.5.3. Sabit mıknatısların konumuna göre sınıflandırma	42
2.6. Dıştan Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Yapısı	43
2.6.1. Stator	44
2.6.2. Rotor.....	49
2.6.3. Sürekli (kalıcı-daimi) mıknatıslar	51
2.6.4. FDAM'nin manyetik devre modeli.....	56
2.6.5. Oluk-kutup oranının belirlenmesi	59
2.6.6. Sargı bağlantı modelinin belirlenmesi ve tercih nedenleri.....	64

2.6.6.1. Tek katmanlı sarım.....	64
2.6.6.2. Çift Katmanlı Sarım.....	65
2.6.7. Embrace oranının belirlenmesi	67

BÖLÜM 3.

MATERYAL VE YÖNTEM.....	68
3.1. Elektrikli Araçlar İçin Güç ve Tork Parametrelerinin Belirlenmesi	68
3.1.1. Hava sürtünme kuvveti (F_{ad})	68
3.1.2. Yuvarlanma direnci (F_r)	69
3.1.3. İvmelenme kuvveti (F_{iv})	69
3.1.4. Yokuş direnci	70
3.2. Motor Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi.....	71
3.3. FDAM'lerin Matematiksel Modellenmesi	71
3.3.1. Stator boyutlandırması	73
3.3.2. Stator sargısı.....	74
3.3.3. İletken kesitinin belirlenmesi	75
3.3.4. Stator Oluk Boyutlandırması	76
3.3.5. Rotor Boyutlandırması	77
3.3.6. Motor mıknatıs modeli	77
3.4. Ansys Maxwell Yazılımı.....	78
3.5. Analitik Motor Hesaplamaları ve Sonlu Eleman Analizleri (RMxpvt)	79
3.5.1. Giriş parametreleri belirlenmesi.....	80
3.5.2. Stator ölçülerinin belirlenmesi	81
3.5.2.1. Stator oluk tipi ve ölçüleri.....	82
3.5.2.2. Stator sarım tasarımı.....	83
3.5.3. Rotor ölçülerinin belirlenmesi	86
3.5.4. Mıknatıs ölçülerinin belirlenmesi	86
3.5.5. RMxpvt Analiz Parametrelerinin Belirlenmesi	88
3.6. RMxpvt Simülasyon Sonuçları ve Sonlu Elemanlar Analizi ve Sonuçları (Maxwell 2D)	89
3.6.1. Motor (A) simülasyon sonuçları	89
3.6.2. Motor (B) simülasyon sonuçları	99
3.6.3. Motor (C) simülasyon sonuçları	104

BÖLÜM 4.

YAPAY SİNİR AĞI MODEL ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI	109
4.1. Veri Setlerinin Elde Edilmesi ve Veri Ön İşleme	111
4.2. Yapay Sinir Ağı Modelinin Oluşturulması ve Testleri	118
4.3. YSA Modelinin Tahmin Sonuçları	120

BÖLÜM 5.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	127
-------------------------------------	------------

KAYNAKLAR	131
------------------------	------------

KISALTMALAR

AC	: Alternating Current (Alternatif Akım)
AlNiCo	: Alüminyum Nikel Kobalt
ANN	: Artificial Neural Networks (Yapay Sinir Ağları)
AWG	: American Wire Gauge (Amerikan Tel Ölçüsü)
BLDC	: Brushless Direct Current (Fırçasız Doğru Akım Motoru)
CCC	: Current Cutoff Control (Akım Kesme Kontrolü)
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayar Sayısal Kontrol)
CO ₂	: Karbondioksit
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DYSA	: Dinamik Yapay Sinir Ağları (Dynamic Artificial Neural Networks)
EBOB	: En Büyük Ortak Bölen
EKOK	: En Küçük Ortak Kat
EMF	: Electromotive Force (Elektromotor Kuvvet)
FEM	: Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
FDAM	: Fırçasız Doğru Akım Motor
GA	: Genetik Algoritma
GES	: Güneş Enerjili Sistemler
GE	: General Electric
GMR	: Giant Magnetoresistive (Dev Manyetorezistif)
Hp	: Beygir gücü
IC	: Integrated Circuit (Entegre Devre)
KMSM	: Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor
kW	: Kilovat (Güç birimi)
LED	: Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
LEARNGDM	: Learning Gradient Descent with Momentum (Momentum ile Gradient Descent'i Öğrenme)
LEV	: Light Electric Vehicles (Hafif Elektrikli Araçlar)
MAE	: Mean Absolute Error (Ortalama Mutlak Hata)

MAPE	: Mean Absolute Percentage Error (Mutlak Ortalama Yüzde Hata)
MGOe	: Mega Gauss Oersted (Maksimum enerji ürünü)
MOSFET	: Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (Metal-Oksit-Yarıiletken Alan Etkili Transistör)
MSE	: Mean Squared Error (Ortalama Karesel Hata)
MR	: Magnetoresistive (Manyetorezistif)
M	: Manyetik geçirgenlik
μV	: MikroVolt
NdFeB	: Neodimyum-Demir-Bor
Nm	: Newton-meter (Tork)
Nm/A	: Tork/Ampere
PMSM	: Permanent Magnet Synchronous Motor (Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor)
PI	: Proportional-Integral (Oransal İntegral Denetleyici)
PID	: Proportional-Integral-Derivative (Oransal İntegral Türevsel Denetleyici)
PPR	: Pulse Per Revolution (Tur Başına Puls)
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
ReLU	: Rectified Linear Unit (Düzeltik Doğrusal Birim)
RMSE	: Root-mean-square error (Kök Ortalama Kare Hata)
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SmCo	: Samaryum Kobalt
SMSM	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
SOC	: State of Charge (Şarj Durumu)
T	: Tesla
TANSIG	: Tangent Sigmoid
TRAINLM	: Levenberg-Marquardt
TRV	: Torque and rotor volume (Tork ve Rotor Hacmi)
YSA	: Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network)
2D	: İki dimensional (İki Boyutlu)

SİMGELER

a	: İvme
B_d	: Stator dişi manyetik akı yoğunluğu
B_g	: Rotor manyetik akı yoğunluğu
$B-H$	: Manyetik alan yoğunluğu (B) - Manyetik akı yoğunluğu (H)
D	: Stator paketinin çapı
D_i	: Rotor iç çapı
F	: Manyetik Kuvvet
F_{hg}	: Yokuş direnci
F_{iv}	: İvmelenme kuvveti
F_r	: Yuvarlanma direnci
H_0	: Stator dişi yüksekliği
H_b	: Stator dişi yüksekliği ile ilgili bir parametre
H_c	: Koersivite
I	: Elektrik Akımı
J	: Akım yoğunluğu
K_d	: Dağılma faktörü
K_{fe}	: Sargı faktörü
k_p	: Kirişleme faktörü
k_w	: Sargı faktörü
kg	: Kilogram
L	: Stator paketinin uzunluğu
M	: Araç ağırlığı
N	: Motor devir sayısı (RPM)
N_s	: Statorun toplam oluk sayısı
R	: Elektrik Direnci
R_g	: Hava Aralığı
R_m	: Rotor Manyetik Direnci

R_s	: Stator Manyetik Direnci
T	: Motor torku
T_c	: Curie sıcaklığı
V	: Araç hızı
V	: Gerilim
Z	: Toplam tel sayısı
Z_0	: Oluk başına düşen iletken sayısı
M	: Manyetik geçirgenlik
P	: Hava yoğunluğu
T_0	: Temel kutup adımı
T_p	: Kutup adımı
Φ	: Manyetik Akı (Magnetic Flux)
Ω	: Direnç (Ohm)
Cd	: Hava sürtünme katsayısı
D	: Tekerlek dış çapı
FT	: Toplam kuvvet
PT	: Toplam güç
α	: Yokuşun eğim açısı

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1 : L sınıfı araç kategorileri.....	6
Tablo 1.1 (devam) : L sınıfı araç kategorileri.....	7
Tablo 2.1 : Anahtarlama sırası.....	24
Tablo 2.2 : FDAM'lerin avantajları ve nedenleri.....	27
Tablo 2.3 : FDAM'lerin dezavantajları ve nedenleri.....	27
Tablo 2.4 : FDAM'lerin kullanım alanları ve nedenleri.....	29
Tablo 2.5 : Silisli sacların özellikleri.....	47
Tablo 2.6 : NdFeB mıknatısların manyetik özellikleri.....	55
Tablo 2.7 : Manyetik eşdeğer devresindeki sembollerin açıklaması.....	58
Tablo 2.8 : Oluk kutup oranı sargı faktörü çizelgesi.....	61
Tablo 2.9 : Oluk/kutup sayısı kombinasyonlarının en küçük ortak katları.....	62
Tablo 2.10 : Oluk ve kutup sayısı kombinasyonlarının en büyük ortak bölenleri....	63
Tablo 2.11 : Tasarımları yapılan motorların batarya paketlerinin değerleri.....	71
Tablo 3.2 : Tel kesit tablosu.....	76
Tablo 3.3 : Motor (A) simülasyon sonuçları.....	89
Tablo 3.4 : Motor (B) simülasyon sonuçları.....	99
Tablo 3.5 : Motor (C) simülasyon sonuçları.....	104
Tablo 4.1 : Girdi seti.....	113
Tablo 4.2 : Çıktı seti.....	114
Tablo 4.3 : Yapay sinir ağı parametreleri.....	118
Tablo 4.4 : Motorların performans değerleri.....	124
Tablo 4.5 : YSA modelinin motor performans değeri tahmin sonuçları.....	124
Tablo 4.6 : Hata analiz sonuçları.....	126
Tablo 4.7 : Hesaplanan motorun girdi parametreleri.....	126
Tablo 4.8 : Hesaplanan ve tasarlanan motorun YSA sonucu ile ANSYS Maxwell simülasyon sonucunun karşılaştırılması.....	126

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 : Thomas Parker tarafından üretilen elektrikli araba / 1884.....	1
Şekil 1.2 : 1967 yılında üretilen Comuta elektrikli aracı (a), 1968 yılında üretilen GE Delta elektrikli aracı (b).....	3
Şekil 1.3 : 1975 yılında üretilen Fiat X1/23 B elektrikli aracı.....	3
Şekil 1.4 : 1988 yılında üretilen ETX-2 elektrikli aracı (a), ve 1990 yılında satışa sunulan Fiat Panda Electra elektrikli aracı (b).....	4
Şekil 1.5 : Elektrikli araç filosunun dünya üzerindeki dağılımı.....	5
Şekil 2.1 : Elektrik motorlarının sınıflandırılması.....	20
Şekil 2.2 : FDAM'nin çalışma prensibi.....	23
Şekil 2.3 : Hall effect sensörlere göre anahtarlama sıralaması.....	25
Şekil 2.4 : Hall etkili sensör.....	31
Şekil 2.5 : Hall etkili sensör çalışma prensibi.....	32
Şekil 2.6 : Dijital çıkış hall effect sensörü blok diyagramı.	32
Şekil 2.7 : Hall effect sensör sinyallerine göre FDAM sargılarının enerjilendirme durumu.....	33
Şekil 2.8 : Enkoder.....	34
Şekil 2.9 : İki farklı disk yapısına sahip enkoderin iç yapıları (a) artımsal enkoder, b) mutlak enkoder)	34
Şekil 2.10 : Tipik bir enkoder çıkış sinyali.....	36
Şekil 2.11 : Resolver yapısı.....	36
Şekil 2.12 : Fırçasız doğru akım motorlarının sınıflandırılması.....	37
Şekil 2.13 : Eksenel akıllı FDAM yapısı.....	38
Şekil 2.14 : İçten rotorlu FDAM yapısı (a) ve içten rotorlu fdam'u (b).....	39
Şekil 2.15 : Dıştan rotorlu FDAM yapısı (a) ve dıştan rotorlu FDAM'u (b).....	40
Şekil 2.16 : Trapezoidal zıt EMK dalga şekli.....	41
Şekil 2.17 : Sinüsoidal zıt EMK dalga şekli.....	41
Şekil 2.18 : Yüzeye monte mıknatıs şekilleri (a: yüzeye yapışık, b: yüzeye gömülü, c:kutup çarıklı)	42
Şekil 2.19 : Rotora gömülü mıknatıs şekilleri (a:teğetsel gömülü, b:radyal gömülü, c:kutup başına iki mıknatıs gömülü, d:relüktans rotor).....	43
Şekil 2.20 : Dış rotorlu FDAM yapısı (1:rotor, 2:kalıcı mıknatıslar, 3:stator/statordışı, 4:bobin/sargı)	43
Şekil 2.21 : Stator sacının tane görüntüsü (a) ve paketlenmiş görüntüsü (b).....	44
Şekil 2.22 : Sargılı ve sargısız stator.....	45
Şekil 2.23 : Presbant yerleşimi.....	45
Şekil 2.24 : Rulo ve 1m ² silisli sac.....	46
Şekil 2.25 : Silisli sacların lazer kesimi görüntüsü.....	48
Şekil 2.26 : Stator paketinin telerezyon kesimi görüntüsü.....	49
Şekil 2.27 : Dıştan rotorlu FDAM rotor görüntüsü.....	50
Şekil 2.28 : Mıknatısların geçmişten günümüze olan kullanımları.....	52
Şekil 2.29 : FDAM'un manyetik eşdeğer devresi.....	58

Şekil 2.30 : Tek katmanlı sarım.....	65
Şekil 2.31 : Çift katmanlı sarım.....	65
Şekil 2.32 : FDAM'de üçgen bağlantı (a), FDAM'u yıldızbağlantı (b).....	66
Şekil 2.33 : Farklı değerlerde embrace oranında mıknatısların rotor üzerine dağılımı.....	67
Şekil 3.1 : Eğimli bir yolda araç üzerine etkiyen kuvvetler.....	68
Şekil 3.2 : Motor tasarımı akış şeması.....	72
Şekil 3.3 : S-N ve N-S polarizasyonlu mıknatısların katı modeli.....	78
Şekil 3.4 : RMxprrt modülü elektrik makinesi model seçimi arayüzü.....	79
Şekil 3.5 : FDAM RMxprrt modelinin yönetim penceresi.....	79
Şekil 3.6 : FDAM'lerin makine özellikleri a)Motor (A), b)Motor (B), c) Motor (C).....	80
Şekil 3.7 : FDAM'lerin stator parametreleri a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).....	81
Şekil 3.8 : Oluk tipi.....	82
Şekil 3.9 : Stator oluklarının ölçüleri, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).....	83
Şekil 3.10 : Stator görüntüleri, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C)	83
Şekil 3.11 : RMxprrt sarım bilgileri, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).....	83
Şekil 3.12 : Tam (a) ve yarım (b) sargı tipi.....	84
Şekil 3.13 : RMxprrt sarım şemaları, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).....	85
Şekil 3.14 : Stator sargı şemaları, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).....	85
Şekil 3.15 : RMxprrt Rotor bilgileri, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).....	86
Şekil 3.16 :RMxprrt mıknatıs yerleşim tipi.....	86
Şekil 3.17 : RMxprrt mıknatıs bilgileri, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C)....	87
Şekil 3.18 : FDAM'lerin embrace görüntüsü, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).....	88
Şekil 3.19 : RMxprrt motor kesitleri, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).....	88
Şekil 3.20 : RMxprrt analiz parametreleri, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).....	88
Şekil 3.21 : RMxprrt hız-verim grafiği (a), RMxprrt hız-çıkış gücü grafiği (b).....	90
Şekil 3.22 : RMxprrt hız-tork grafiği (a), RMxprrt hız-akım grafiği (b).....	91
Şekil 3.23 : Motor (A) karakteristik eğrisi.....	91
Şekil 3.24 : FDAM'nin hız-zaman grafiği - Motor (A)	93
Şekil 3.25 : FDAM'nin tork-zaman grafiği - Motor (A)	94
Şekil 3.26 : FDAM'nin faz akımları-zaman grafiği - Motor (A)	95
Şekil 3.27 : FDAM'nin manyetik akı yoğunluğu dağılımı -Motor (A).....	96
Şekil 3.28 : FDAM'nin elektrik akım yoğunluğu – Motor (A)	97
Şekil 3.29 : FDAM'nin manyetik akı hatları – Motor(A)	98
Şekil 3.30 : FDAM 'nin manyetik alan kuvveti -Motor (A)	98
Şekil 3.31 : RMxprrt hız-verim grafiği (a), RMxprrt hız-çıkış gücü grafiği (b).....	100
Şekil 3.32 : RMxprrt hız-tork grafiği (a), RMxprrt hız-akım grafiği (b)	100
Şekil 3.33 : Motor (B) karakteristik eğrisi.....	101
Şekil 3.34: FDAM'nin hız-zaman grafiği - Motor (B)	101
Şekil 3.35 : FDAM'nin tork-zaman grafiği - Motor (B)	102
Şekil 3.36 : FDAM'nin faz akımları-zaman grafiği - Motor (B)	102
Şekil 3.37 : FDAM'nin manyetik akı yoğunluğu dağılımı -Motor (B).....	103
Şekil 3.38 : FDAM'nin elektrik akım yoğunluğu – Motor (B)	103
Şekil 3.39 : FDAM'nin manyetik akı hatları – Motor(B)	103
Şekil 3.40 : FDAM 'nin manyetik alan kuvveti -Motor (B)	104
Şekil 3.41 : RMxprrt hız-verim grafiği (a), RMxprrt hız-çıkış gücü grafiği (b).....	105
Şekil 3.42 : RMxprrt hız-tork grafiği (a), RMxprrt hız-akım grafiği (b)	105
Şekil 3.43 : Motor (C) karakteristik eğrisi.....	106
Şekil 3.44: FDAM'nin hız-zaman grafiği - Motor (C)	106

Şekil 3.45 : FDAM'nin tork-zaman grafiği - Motor (C).....	107
Şekil 3.46 : FDAM'nin faz akımları-zaman grafiği - Motor (C).....	107
Şekil 3.47 : FDAM'nin manyetik akı yoğunluğu dağılımı -Motor (C).....	108
Şekil 3.48 : FDAM'nin elektrik akım yoğunluğu – Motor (C).....	108
Şekil 3.49 : FDAM'nin manyetik akı hatları – Motor(C).....	108
Şekil 4.1 : Yapay sinir ağı yapısı.....	109
Şekil 4.2 : Box-plot (kutu grafiği) görselleştirilmesi.....	112
Şekil 4.3 : Nominal hız ve tork parametrelerinin box-plot analizi sonucu.....	112
Şekil 4.4 : Eğitim setinin çıktıları (a) ve test setinin çıktılarının (b) histogram grafikleri.....	115
Şekil 4.5 : Yapay sinir ağı modeli.....	116
Şekil 4.6 : Nntool yapay sinir ağı yapısı.....	119
Şekil 4.7 : Eğitim, doğrulama, test ve tüm durumlar için tahmin başarısı.....	119
Şekil 4.8 : Nominal hız değerleri için simülasyon verileri ile YSA sonucu karşılaştırması.....	121
Şekil 4.9 : Tork değerleri için simülasyon verileri ile YSA sonucu karşılaştırması..	121
Şekil 4.10 : Faz akımı değerleri için simülasyon verileri ile YSA sonucu karşılaştırması.....	122
Şekil 4.11 : Ortalama giriş akımı değerleri için simülasyon verileri ile YSA sonucu karşılaştırması	123
Şekil 4.12: Çıkış gücü değerleri için simülasyon verileri ile YSA sonucu karşılaştırması.....	123
Şekil 4.13 : Motorların performans değerleri ile YSA sonucunun karşılaştırması...	125

YAPAY SINIR AĞLARI İLE FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARININ PERFORMANS PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Günümüzde çevreci ulaşım çözümleriyle birlikte elektrikli araçlar, fosil yakıtlı araçların yerini almaya başlamış ve bu dönüşüm artan ivme ile devam etmektedir. Özellikle kısa mesafeli ulaşım, mobilite ve bireysel taşıma alanlarında hafif elektrikli araçlar giderek daha fazla tercih edilmekte; düşük enerji tüketimi, sıfır emisyon salınımları, kompakt yapıları ve sürdürülebilirlikleri ile ön plana çıkmaktadır. Hafif elektrikli araçların güç ve enerji tüketim dengesinin en önemli unsuru motorlarıdır. Hafif elektrikli araçlarda en yaygın şekilde kullanılan dıştan rotorlu fırçasız doğru akım motorlarının (FDAM) hem tasarımı hem de performans analizine yönelik akademik çalışmalar büyük önem taşımaktadır. Dıştan rotorlu FDAM'ler, yüksek tork yoğunluğu ve kompakt yapılarıyla büyük avantaj sunsalar da, tasarım ve analiz süreçleri oldukça karmaşık, zaman alıcı ve çok parametrelili hesaplamalar gerektiren mühendislik problemleri içermektedir. Bu noktada, yapay zeka ve özellikle yapay sinir ağları (YSA), motor tasarım süreçlerine önemli bir katkı sağlayarak, karmaşık analizlerin yerine hızlı, doğru ve veri temelli tahmin potansiyeli sunmaktadır.

Bu tezde, hafif elektrikli araçlar için dıştan rotorlu FDAM performans değerlerinin tahmini için YSA modeli geliştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, FDAM'lerin yapısı, çalışma prensipleri ve tasarım parametreleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Motor performansını etkileyen temel unsurlar analiz edilerek alt bileşenlerinin etkileri, hedef aracın özellikleri ve teknik isterler ile birlikte motorun tasarım süreci oluşturulmuştur. İlerleyen bölümlerde, motorların matematiksel hesaplamaları gerçekleştirilerek ,Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak, üç adet farklı motor tasarımlarına ait simülasyonlar yapılmış ve motorların performans değerleri elde edilmiştir. ANSYS Maxwell yazılımından elde edilen simülasyon verileri ile oluşturulan 10000 farklı motor değerleri içeren veri seti, MATLAB ortamında eğitilen yapay sinir ağı modeli ile analiz edilmiştir. Modelin doğruluğu, farklı tasarım parametrelerine sahip motorlar üzerinde test edilerek doğrulanmış ve en az %96,14 başarı oranı ile sonuç ürettiği görülmüştür. Geliştirilen Yapay Sinir Ağı modeli tarafından yüksek doğrulukla tahmin edilen motor performans değerleri , bu tahminler doğrultusunda gerçekleştirilen motor tasarımı ile doğrulanarak tez çalışması ile elde edilen YSA modelinin, motor tasarım süreçlerini önemli ölçüde hızlandırabilecek bir yöntem olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektrik motor tasarımı, Yapay zeka, Dıştan rotorlu motor, Yapay sinir ağları, ANSYS Maxwell.

DETERMINATION OF PERFORMANCE PARAMETERS OF BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTORS WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

ABSTRACT

In today's world, electric vehicles due to their environmentally friendly transportation solutions have started to supplant fossil fuel vehicles and this transformation continues in an increasing momentum. Especially in the fields of short-distance transportation, mobility and individual transportation, light electric vehicles are increasingly preferred; they stand out with their low energy consumption, zero emission emissions, compact structure and sustainability. The most important element of the power and energy consumption balance of light electric vehicles is their motors. Academic studies on both the design and performance analysis of external rotor brushless direct current motors (FDAM), which are the most widely used in light electric vehicles, are of great importance. Although external rotor FDAMs offer great advantages with their high torque density and compact structure, their design and analysis processes involve complex, time-consuming engineering problems that require multi-parameter calculations. Herein, artificial intelligence and especially artificial neural networks (ANNs) provides an important contribution to motor design processes, offering the potential for fast, accurate and data-driven prediction rather than complex analysis.

In this thesis, it is aimed to develop an ANN model for the prediction of external rotor FDAM performance values for light electric vehicles. In the first part of the study, the structure, operating principles and design parameters of FDAMs are analyzed in detail. The main factors affecting the engine performance are analyzed and the design process of the engine is established together with the effects of its subcomponents, target vehicle characteristics and technical requirements. In the following sections, the mathematical calculations of the engines are performed, simulations of three different engine designs are performed using ANSYS Maxwell software and the performance values of the engines are obtained. The data set containing 10000 different engine values created with the simulation data obtained from ANSYS Maxwell software is analyzed with an artificial neural network model trained in MATLAB environment. The accuracy of the model was verified by testing on motors with different design parameters and it was seen that it produced results with at least 96.14% success rate. The engine performance values predicted with high accuracy by the developed Artificial Neural Network model were verified with the engine design realized in line with these predictions and it has been found out that the ANN model obtained in this thesis is a method that can significantly accelerate the engine design processes.

Keywords: Electric motor design, Artificial intelligence, Outer rotor motor, Neural networks, ANSYS Maxwell.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Dünya genelinde konvansiyonel enerji kaynaklarının azalması ve çevresel problemlerin oluşarak bu konudaki kaygıların daha da artması, enerji verimliliği yüksek olan çevre dostu teknolojilere yönelimi hızlandırmaktadır. Bununla birlikte dünya üzerinde fosil yakıtların yüksek miktarda kullanılması ile yeryüzünün belirgin bir şekilde kirlenmesi ve buna bağlı olarak dünya atmosferindeki sera gazı salınımları gün geçtikçe çoğalmaktadır. Sera gazı salınımı, küresel ısınmayı ve tabiatın/ekosistemin dengesinin bozulmasının başlıca sebeplerindendir [1-3].

Konvansiyonel yakıt şeklinde tabir edilen fosil yakıtların kullanımının en çok tercih edilen yerlerden birisi de içten yanmalı motorlardır. Günümüzde kara araçlarının neredeyse tamamında içten yanmalı motorlar kullanılmaktadır. Araştırmalar, benzinli motorların elektrikli motor türlerine göre iki kattan daha fazla miktarda CO₂ yaydığını göstermektedir. Durum bu şekilde olunca insanlar ulaşım konusunda bir gelişim sağlayarak dönüşüme öncülük etmiştir. Bu dönüşümde elektrikli araçlar önemli bir rol oynamış olup, gelişen teknolojiyle birlikte popülerlik kazanarak insanlar tarafından kullanımı giderek artış göstermiştir [4]. Tarihsel olarak incelendiğinde, elektrikli araçların üretimi ve kullanımının, içten yanmalı motorlu taşıtlardan daha önceye dayandığı görülmektedir [5]. Kaydedilen ilk elektrikli araba 1837'de İskoçya'nın Aberdeen kentinden kimyager Robert Davidson tarafından yapılmıştır [6]. Şekil 1.1'de yer alan fotoğrafta ise Thomas Parker tarafından 1884'te Wolverhampton'da üretilen elektrikli araba gösterilmektedir.



Şekil 1.1 : Thomas Parker tarafından üretilen elektrikli araba / 1884 [7].

Robert Davidson 1841 yılında Royal Scottish Society of Arts Sergisi'nde sergilenen Galvani adlı daha büyük bir tren motoru üretimi gerçekleştirmiştir. Lokomotif yedi ton ağırlığında olup iki adet doğrudan tahrikli relüktans motorundan oluşmaktadır. Motorlar, her bir pivotta tahta bir namluya bağlı demir direkleri etkileyen sabit elektromıknatıslara ve basit fırçalara sahiptir [7].

Bunların dışında 1835 yılında Straitingh tarafından Hollanda'da geliştirilen, daha sonra Avrupa ve Amerikalı firmalar tarafından üretilip satılan elektrikli araçların sayısının, 1900'lü yılların başında Amerika'daki benzinli araç sayısından daha fazla olduğu tespit edilmiştir [8]. Ancak gerek ilk elektrikli araçların menzil problemi, gerekse içten yanmalı motorların ve fosil yakıt şirketlerinin küresel pazarda baskın bir rol alması, elektrikli araçların macerasını 1930'lu yıllarda sona erdirmiştir [9]. Gerçek mücadele, günümüz motor sürücülerinde kullanılan yüksek verimli elektronik parçaların ve yüksek kapasiteli pillerin eksikliği idi. Teknoloji eksikliği nedeniyle elektrikli araç projeleri onlarca yıl beklemek zorunda kalmıştır. Fakat 1960 lı yıllarda, fosil yakıt kullanımının zararları belirgin hale gelince elektrikli araç üretimi ve kullanımının artması tekrardan gündeme gelmiştir. Aynı zamanda, birçok gelişmiş ülkede fosil yakıtların ve türevlerinin temininde giderek artan zorluklar yaşanmaya başlamış, içten yanmalı motorların sebep olduğu hava kirliliği de belirgin bir şekilde artmıştır. Bu durum, elektrikli araçların üretimine geçiş fikrini güçlendirmiş ve bazı küçük üreticiler bu alandaki ilk adımlarını atmıştır [10].

Üretilen elektrikli araçların büyük bir kısmı, geleneksel araçların elektrikli versiyona dönüştürülmesiyle ortaya çıkmıştır. İçten yanmalı motorlu araçları elektrikliye çeviren bazı önde gelen otomotiv firmaları, bu dönemde elektrikli araçları sıfırdan tasarlamak için çalışmalara başlamıştır. Bu firmalara bir örnek olarak İngiltere'deki Ford Motor gösterilebilmektedir. 1967 yılında ilk prototip üretilmiş ve Comuta adı verilmiştir. Comuta, her biri ön tekeri hareket ettiren iki adet DC motoruna sahiptir. Her motorun ağırlığı 18 kg olup çapı 14 cm'dir. Motor titreşimlerini kontrol etmeye yönelik bir sistem geliştirilmiştir. Aracın enerji kaynağı, toplam ağırlığı 170 kg olan dört adet kurşun-asit bataryasıdır. Araç, 40 km/saat hız ile 64 km menzile sahipken, maksimum hızı ise 64 km/saattir [11].

1968 yılında General Electric, GE Delta adlı aracı geliştirmiştir. Bu araç 64 km menzile ve 89 km/saate ulaşan azami bir hıza sahiptir. Aracın enerji kaynağı olarak nikel-demir bataryalar tercih edilmiştir. Aynı yıl Ford, deneysel E-Car aracının

prototipini üretmiş ve bu araçta nikel-kadmiyum bataryalar kullanmıştır [11]. Şekil 1.2’de 1967 ve 1968 yıllarında üretilen elektrikli araçlar gösterilmektedir.



Şekil 1.2 : 1967 yılında üretilen Comuta elektrikli aracı (a) [12], 1968 yılında üretilen GE Delta elektrikli aracı (b) [13].

1970'lerin ortalarına doğru yaşanan petrol kriziyle birlikte, Amerika, İngiltere, Fransa, Almanya, İtalya ve Japonya başta olmak üzere birçok ülke elektrikli araç araştırmalarını hızlandırmıştır. Amerika'daki bazı küçük şirketler, geleneksel araçları elektrikli hale dönüştürme çabalarına girişmiştir. Avrupa'da ise 1970'li yıllar bu alanda oldukça aktif bir dönem olmuştur. Örneğin, 1973 yılında Electricite de France 80 adet geleneksel aracı elektrikle çalışan araçlara dönüştürmüştür. Almanya'da Daimler-Benz ve Volkswagen, deneysel elektrikli araç projelerine odaklanmıştır. 1975 yılında İtalya'da Fiat, X1/23 B adlı iki kişilik deneysel bir prototip geliştirmiştir. Bu araç, kurşun-asit bataryalarla çalışmakta ve DC elektrik motoru ile hareket etmektedir. Menzili 48 km, azami hızı ise 64 km/saatin altındadır. Japonya'da ise 1970'ler boyunca Daihatsu, Toyota, Mazda ve Mitsubishi, elektrikli araç prototipleri üzerinde iş birliği yapmıştır [14]. Şekil 1.3'te 1975 yılında Fiat tarafından üretilen elektrikli araç gösterilmektedir.



Şekil 1.3 : 1975 yılında üretilen Fiat X1/23 B elektrikli aracı [15].

1980'li yıllarda devletler, elektrikli araçların çevreye olan faydalarını fark ederek bu araçlara ilgi göstermeye başlamış ve resmi kaynaklardan elektrikli araç programlarına mali destek sağlamışlardır [16]. Bu sayede, 1980'lerin ortasında ABD Enerji Bakanlığı'nın desteğiyle, Ford ve General Electric tarafından ETX-1 aracı geliştirilmiştir. Ayrıca, 160 km menzile ve 96 km/saat azami hıza sahip iki adet ETX-2 prototipi üretilmiştir [17]. Almanya'da ise 1970'lerin sonlarında geliştirilen deneysel araçlar daha da iyileştirilmiş ve 1988'de GES City Stromer aracının dönüştürülmesi tamamlanmıştır. Bu taşıt, o dönemdeki Avrupa Güvenlik Standartlarına uygun şekilde tasarlanmıştır [14]. Aynı yıllarda, İtalya'da Fiat, Panda Elettra modelini elektrikli bir araca dönüştürmüştür [18]. Şekil 1.4'te 1988 ve 1990 yıllarında üretilen elektrikli araçlar gösterilmektedir.



a)

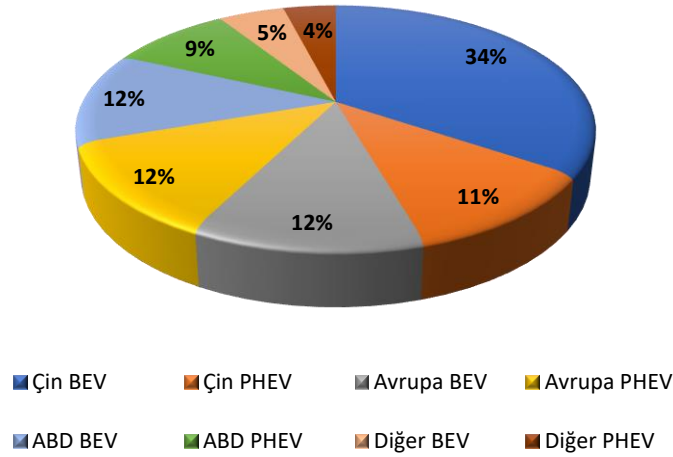


b)

Şekil 1.4 : 1988 yılında üretilen ETX-2 elektrikli aracı (a) [17] , ve 1990 yılında satışa sunulan Fiat Panda Electra elektrikli aracı (b) [18].

Özetle, 1800'lü yıllarda icat edilen elektrikli araçlar, 1900-1912 yılları arasında en parlak dönemini yaşamış, ancak 1921-1960 yılları arasında içten yanmalı motorlu araçların yaygınlaşması ile neredeyse tamamen ortadan kalkmıştır. 1960-1990 yılları arasında ise sınırlı sayıda yeniden ortaya çıkmıştır. Elektrikli araçlar, 1990 sonrasında yakıt tasarrufu ve çevre koruma ihtiyaçları doğrultusunda gelişen yeni batarya teknolojileriyle tekrar önem kazanmaya başlamıştır [14].

Elektrikli otomobillerin yaygınlaşması 2010'lu yıllardan itibaren hız kazanmıştır ve küresel elektrikli binek araç stoku, 2018 yılında bir önceki yıla göre %63 artarak 5 milyonun üzerine çıkmıştır [19]. 2018 yılı itibarıyla yollardaki elektrikli otomobillerin yaklaşık %45'i Çin'de bulunurken, Avrupa küresel filonun %24'ünü, ABD ise %22'sini oluşturmaktadır [20]. Şekil 1.5'te elektrikli araç filosunu dünya üzerindeki dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 1.5 : Elektrikli araç filosunun dünya üzerindeki dağılımı [20].

Elektrikli otomobil pazarı henüz gelişim aşamasında olsa da 21. yüzyılda elektrikli araçlar daha güçlü bir şekilde yeniden dikkatleri üzerine çekmiştir [21].

Elektrikli araçlar çevre dostu olmaları, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmaları ve yakıt tasarrufu sağlamaları gibi birçok avantaj sunmaktadır. Bu avantajlar elektrikli araçların birçok ülke tarafından tercih edilmesinin başlıca sebeplerindendir. Şu anda sayıları sınırlı olsa da belirtilen nedenlerden dolayı elektrikli araçların giderek daha fazla kullanıcı tarafından tercih edilmesi beklenmektedir. 2040 yılına gelindiğinde trafikteki toplam araç sayısının %58'inin elektrikli araçlar tarafından oluşturulacağı öngörülmektedir [22]. Bu hızlanma elektrikli araçların günümüzde birçok alanda kullanılmasının önünü açmaktadır. Özellikle hafif elektrikli araçların kullanımı da yavaş yavaş artış göstermektedir. Literatürde hafif elektrikli araçlar genellikle "Light Electric Vehicles" (LEV) olarak adlandırılmaktadır. Bu terim, genellikle elektrikle çalışan, düşük hızda hareket eden ve çoğunlukla elektrikli araçlardan daha hafif yapıya sahip ve daha düşük güçlerde motorlar ile çalışabilen araçları tanımlamaktadır. LEV'ler arasında elektrikli bisikletler, scooterlar, küçük elektrikli araçlar (elektrikli araba prototipleri vb.), golf arabaları, kargo dağıtım araçları ve benzeri taşıma araçları yer almaktadır. Bu araçlar genellikle şehir içi ulaşımında ve kısa mesafelerde tercih edilmektedir. Avrupa Birliği ve çok sayıdaki diğer ülkelerde de, çevre dostu, düşük hızda çalışan ve küçük motorlu taşıtları tanımlamak için bir sınıflandırma sistemi geliştirmiştir (L sınıfı). L sınıfı araçlar, belirli özelliklere göre farklı alt kategorilere ayrılmaktadır [23]. Bu kategorilendirme Tablo 1.1'de gösterilmektedir.

Tablo 1.1 : L sınıfı araç kategorileri [24].

Araç Kategorisi	L1e		L2e		L3e	L4e
Alt Kategoriler	Hafif iki tekerlekli motorlu araç		Üç tekerlekli moped		İki tekerlekli motosiklet	Yan römorklu iki tekerlekli motosiklet
	L1e-A	L1e-B	L2e-P	L2e-U	L3e-A1/A2/A3	L4e
	Güç destekli bisiklet	İki tekerlekli moped	Yolcu taşımak için üç tekerlekli moped	Ticari kullanım için üç tekerlekli moped	Düşük/ Orta/ Yüksek performanslı motosiklet	Yan römorklu iki tekerlekli motosiklet
					  	

Tablo 1.1 (devam) : L sınıfı araç kategorileri [24].

Araç Kategorisi	L5e		L6e		L7e	
	Motorlu üç tekerlekli araç		Hafif dört tekerlekli araç		Ağır dört tekerlekli araç	
Alt Kategoriler	L5e-A	L5e-B	L6e-A	L6e-BU/BP	L7e-A1/B2	L7e-CU/CP
	Yolcu taşımak için üç tekerlekli araç	Yük taşımak için ticari üç tekerlekli araç	Hafif yol aracı	Hafif ticari/Yolcu taşımak için dört tekerlekli araç	Ağır yol aracı/ Arazi tipi dört tekerlekli araç	Ticari kullanım için /Yolcu taşımak için araç
				 	 	 

Bu tez çalışmasının tasarım bölümünde, L7e-A1 sınıfına ait hafif elektrikli araçlar için bir fırçasız doğru akım motor tasarımı gerçekleştirileceği için bu araçların özellikleri dikkate alınarak çalışmalar yapılmıştır.

L7e-A1 sınıfındaki hafif elektrikli araçlar, elektrikli araçların genel tarihine dayanan bir kökene sahiptir. Ancak bu araçları elektrikli araçlardan ayıran en büyük fark, bataryalarının ve tahrik motorlarının güç değerlerinin düşük olmasıdır. 21. yüzyılda artan çevresel kaygılar, fosil yakıt rezervlerindeki azalma ve yenilenebilir enerjiye yönelme çabaları, elektrikli araçların yaygın biçimde kabul görmesini sağlamaktadır. Ancak günlük kullanım ve kısa mesafe sürüşlerde elektrikli araçların performans seviyesi istenilenden fazla olabilmektedir. Bu tür durumlarda L7e gibi hafif elektrikli araçların kullanımı avantaj sağlamaktadır [25].

L7e sınıfı araçlar, ilk kez 2000'li yıllarda Avrupa Birliği tarafından belirlenen düzenlemelerle tanımlanmıştır. Avrupa Komisyonu'nun "LEV" (Light Electric Vehicles - Hafif Elektrikli Araçlar) olarak adlandırdığı bu araçlar, hafif yapıları, kompakt boyutları ve düşük enerji tüketimleriyle mikro mobilite alanında büyük bir potansiyel taşımaktadır. L7e kategorisi, genellikle 15 kW (20 hp) motor gücüyle çalışan, 400 kg sınırını aşmayan ağırlıkta ve küçük boyutları sayesinde, şehir içi ulaşımında büyük kolaylıklar sunan elektrikli araçları içermektedir [26].

2000'li yılların başında, bu tür araçlar sınırlı menzilleri ve yüksek batarya maliyetleri nedeniyle daha çok niş bir pazarın ürünü olarak görülüyordu [27]. Ancak, lityum-iyon bataryaların gelişimi, maliyetlerin düşmesi ve enerji yoğunluğunun artması, L7e sınıfı araçların daha geniş bir kullanıcı kitlesine ulaşmasını sağlamıştır. Özellikle hızla artan kentleşme, trafik sıkışıklığı ve yükselen çevresel farkındalık, bu araçların daha yaygın bir şekilde kullanılmasına olanak tanımıştır. Güncel zaman diliminde, L7e sınıfı araçlar, özellikle Avrupa ve Asya'da, şehir içi ulaşım ve mikro mobilite çözümleri konusunda önemli bir rol oynamaktadır [28]. Paylaşımlı araç hizmetlerinin yaygınlaşması, bu araçları daha tercih edilebilir hale getirmiş; düşük işletme maliyetleri ve çevre dostu özellikleri sayesinde bireysel kullanıcılar arasında da popüler olmuştur. Örneğin, Asya'da bu tür araçlar genellikle ticari taşımacılıkta kullanılırken, Avrupa'da ise sürdürülebilir şehir projelerinin bir parçası olarak teşvik edilmektedir.

İleriye dönük olarak, L7e sınıfı elektrikli araçların, şehirlerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında hayati bir rol oynaması beklenmektedir. Bu araçlar, yalnızca bireysel ulaşımında değil, aynı zamanda kentsel lojistik, gıda teslimatı ve küçük ölçekli ticari faaliyetler için de mükemmel bir çözüm sunmaktadır. Akıllı şehir projelerine entegre edilen bu araçların, ulaşımın çevreye etkisini büyük ölçüde azaltacağı ve yeni bir mobilite paradigması oluşturacağı öngörülmektedir.

L7e sınıfı hafif elektrikli araçların satışlarına yönelik kesin veriler sınırlı olmakla birlikte, genel elektrikli araç pazarındaki büyüme, bu segmentin de benzer bir hızla ilerlediğini göstermektedir. 2023 yılı itibarıyla, dünya çapında elektrikli araç satışları, 2022'ye göre %55 artarak 13,6 milyon adede ulaşmıştır. Türkiye'de ise aynı yıl elektrikli araç satışları, %844'lük bir artışla 80.043 adete yükselmiştir [29]. Bu genel satış artışı, L7e sınıfındaki araçların pazar payının da arttığını göstermektedir. Özellikle şehir içi ulaşım ve son kilometre taşımacılığı alanında tercih edilen L7e araçları, kompakt tasarımları ve çevreci özellikleriyle öne çıkmaktadır. Türkiye'deki bu segmentte üretim yapan yerli firmalar arasında; Amperino, Beemobs, Musoshi, Pilotcar gibi girişimler de yer almaktadır. Ayrıca, 2024 yılı itibarıyla Türkiye'de L7 sınıfı yerli elektrikli araçların 590 bin TL fiyatla piyasaya sunulduğu bilinmektedir. Bu bilgiler, L7e sınıfı elektrikli araçların hem küresel ölçekte hem de Türkiye'de giderek daha fazla ilgi gördüğünü ve pazar paylarının hızla arttığını göstermektedir.

Uluslararası tahminlere göre, dünyadaki mevcut ve bilinen petrol rezervlerinin ömrünün yaklaşık 50 yıl civarında olduğu öngörülmektedir [30]. Son elli yıl boyunca içten yanmalı araçlar kullanılmaya devam edilse de benzinli araçların verimliliği %25-28 arasında, dizel araçların verimliliği ise %34-38 arasında değişmektedir [30]. Literatürde, içten yanmalı motorların verimliliğini artırmaya yönelik birçok çalışma bulunmasına rağmen, verimlilik hala %40 seviyesinin üzerine çıkamamıştır. Bu verimsizliğe rağmen, dünya genelinde tüketilen yakıtın yaklaşık %62'si taşımacılık sektöründe kullanılmaktadır. Azalan rezervler ve artan talep nedeniyle, petrol fiyatlarının önümüzdeki 20 yıl içinde 200 \$ seviyelerine çıkması beklenmektedir [31]. Kısaca, içten yanmalı motorların verimliliği oldukça düşüktür ve bu motorlar insan sağlığına ve çevreye zararlı gaz emisyonlarına yol açmaktadır [32].

Elektrikli araçların yaygınlaşması ile birlikte bahsedilen bütün bu verimsizliklerin önüne geçilebilecek bir ortam meydana gelmiştir. Bu durum beraberinde elektrikli araçlarda kullanılan motor teknolojilerine duyulan ilgiyi ve teknolojik gelişmeleri

artırmıştır. Özellikle verimli ve yüksek performanslı motorların geliştirilmesi, elektrikli araçların performansında belirleyici bir etkiye sahiptir. Güncel teknolojiye doğru akım motorları, özellikle fırçasız modelleri ile elektrikli araçlarda ön plana çıkmaktadır. Fırçasız doğru akım motorları (FDAM), yüksek tork-hız performansı, düşük bakım maliyetleri ve uzun ömürlü yapısı sayesinde çevresel ve ekonomik avantajlar sunarak elektrikli araçların temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir.

FDAM'ler, geleneksel fırçalı motorlarda yaşanan mekanik sürtünme kaynaklı kayıpların önüne geçerek, daha yüksek verim elde edilmesine olanak tanımaktadır. Fırçaların yokluğu, motorların daha sessiz çalışmasını, daha uzun ömürlü olmasını ve daha düşük bakım maliyetleri gibi birçok kullanım avantajı sağlar. Bu özellikler, özellikle hızlı gelişen elektrikli araç sektöründe FDAM'lerin tercih edilme nedenini ve oranını artırmaktadır. Günümüz elektrikli araçlarının ihtiyaç duyduğu yüksek verim, dayanıklılık ve hızlı tepki gereksinimlerini karşılamak için FDAM'ler, ideal bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

Elektrikli araçların gelişiminde bir diğer önemli faktör ise motorların dayanıklılığı ve performansının optimize edilmesi amacıyla, ileri simülasyon teknikleri ve optimizasyon algoritmalarının kullanılmasıdır. FDAM'ler, elektronik komütasyonun sağladığı avantajlar sayesinde daha hassas kontrol imkanı sunmaktadır. Bu özellik, motorun verimliliğini en üst seviyeye çıkararak elektrikli araçların daha uzun menzil ve daha yüksek performans sunmasını sağlamaktadır. Ayrıca, yapay zeka algoritmaları yardımıyla motorun anlık koşullara göre kendi parametrelerini uyarlayabilmesi, kullanıcı deneyimini iyileştirmekte ve enerji kullanımını optimize etmektedir [33].

1.1. Literatür Araştırması

Tez konusu olan “Yapay Sinir Ağları İle Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Performans Parametrelerinin Belirlenmesi” fikri; elektrikli araçlar konusunda yapılan ayrıntılı literatür araştırmaları ve hafif elektrikli araçların kullanımının farklı sektörlerde girişi sonucu ortaya çıkmıştır. Elektrikli araçlarda kullanılan motorların büyük bir bölümünün FDAM olması dolayısıyla literatür araştırmasının ilk bölümünde FDAM tasarımları ile ilgili araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

İlyas Aladağ, tez çalışmasında Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun (KMSM) verim ve ağırlık özelliklerini iyileştirmek amacıyla Genetik Algoritma (GA) kullanmıştır.

Çalışmada, dağıtılmış ve toplu sargı düzenlerine sahip, etiket değerleri bilinen bir motorun verim ve ağırlık amaç fonksiyonları GA tabanlı bir optimizasyon algoritması ile optimize edilmiştir. Motor tasarımı, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ve web tabanlı Emetor gibi yazılımlar aracılığıyla gerçekleştirilmiş olup, sonuç olarak verimin arttığı ve ağırlığın azaldığı gözlemlenmiştir [34].

Meier (2002), yüzey mıknatıslı senkron makineler (SMSM) için MATLAB yazılımını kullanarak bir analitik tasarım aracı geliştirmiştir. Bu araç, eşdeğer relüktans devresi modeline dayanarak statorun çeşitli bölgelerindeki manyetik akı dağılımlarını öngörebilmekte ve demir kayıplarını hesaplamaya olanak tanımaktadır. Programın doğruluğu, Flux 2D (2019) yazılımıyla gerçekleştirilen SEA simülasyonları aracılığıyla doğrulanmıştır [35].

Meier (2008), iç ve dış rotora sahip SMSM'lerin karşılaştırılması, tasarım optimizasyonları, motorun üretim aşamaları ve sarım süreçleri üzerinde detaylı bir analiz gerçekleştirmiştir. Üretilen prototip motorun test sonuçları, analitik ve SEA modellerinin doğruluğunu kanıtlamıştır. Geliştirilen analitik model, günümüzde hâlâ web tabanlı bir platform olan Emetor (2008) uygulamasında kullanılmaktadır [36].

Tuncay R.N. ve ekibi, hibrit ve elektrikli araçlar için tekerlek içi FDAM tasarımlarının performansını araştırmıştır. Bu çalışmada, dış rotorlu bir yapı tercih edilerek NdFeB sabit mıknatısları kullanılmıştır. Yüksek verimlilik, düşük güç-ağırlık oranı ve kolay kontrol sağlamak amacıyla tam kalıp sarımlı bir tasarım uygulanmış ve PWM kontrollü bir modelleme gerçekleştirilmiştir. Tasarımın analizi, sonlu elemanlar yöntemiyle Maxwell 2D yazılımı kullanılarak yapılmış ve üretilen motorun yol test sonuçları da incelenmiştir. Elde edilen bulgular, tekerlek içi sabit mıknatıslı FDAM tasarımının hibrit ve elektrikli araçların çekiş sistemleri için uygun bir seçenek olduğunu göstermiştir [37].

Günümüzde çevre dostu araçlara olan talep artışı, elektrik motorlu araçların önemini artırmıştır. Bu kapsamda, Rahim N.A. ve ekibi, eksenel açılı iç statorlu sabit mıknatıslı motor kullanarak elektrikli araçlara yönelik bir analiz gerçekleştirmiştir. Elektromanyetik analiz, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmış ve motorun üretiminde NdFeB_N35 sabit mıknatıs malzemesi tercih edilmiştir. Tasarlanan motorun moment testleri yapılmış ve elektrikli araçlar için uygun bir seçenek olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak bu çalışmada hava aralığı, sarım çapı ve mıknatıs yapısı gibi

unsurlar detaylı şekilde ele alınmamıştır. Bu parametrelerin dahil edileceği gelecekteki bir araştırmanın, daha yüksek performanslı bir motor tasarımı sunabileceği değerlendirilmiştir [38].

Şenol S. ve Üstün Ö., kesirli oluk yapısına sahip, konsantrik sarımlı ve dış genişlikleri birbirinden farklı bir yapı üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarında, moment dalgalanmasının hesaplanan değerlerle ölçülen değerler arasında yüksek bir uyum gösterdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, hesaplanan diğer parametrelerin deneysel verilerle de tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, söz konusu yapının hafif elektrikli araçların tahrik sistemlerinde kullanılabilecek uygun bir çözüm olabileceğini ortaya koymuştur [39].

Ifedi ve ekibinin 2012 yılında yayınlanan “A High Torque Density, Direct Drive In-Wheel Motor for Electric Vehicles” başlıklı çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılmak üzere tekerlek içi fırçasız doğru akım motorları için ideal oluk ve kutup kombinasyonları incelenmiştir. 54 kW anma gücüne ve 475 Nm anma momentine sahip bir tekerlek içi motor tasarımı yapılmıştır. Yüksek moment ihtiyacını karşılamak amacıyla, yüksek kutup sayısına sahip motor tercih edilmiştir. Tasarım sırasında, dış etkisi momenti, moment dalgalanmaları ve dengesiz manyetik kuvvetlerin kabul edilebilir sınırlar içinde tutulması hedeflenmiştir. Değerlendirme sonuçlarına göre, tasarım hedeflerine en uygun yapı olarak 72 oluk ve 64 kutup kombinasyonuna sahip bir motorun elektrikli araç uygulamaları için ideal olduğu önerilmiştir [40].

F. Cupertino ve ekibi, çalışmalarında yüksek hızlı uygulamalara yönelik Yüzeye Monteli Kalıcı Mıknatıslı elektrik makinelerinin tasarımına odaklanmış ve güç yoğunluğunu maksimize etmeyi hedeflemiştir. Tasarım sürecini sadeleştirmek ve hesaplama yükünü azaltmak için manyetostatik analizden faydalanılmış ve rotor yüzeyindeki mıknatısın yerinden çıkmasını önlemek amacıyla basitleştirilmiş bir mekanik analitik model ile manşon kalınlığı boyutlandırılmıştır. Çıkış gücünü en üst düzeye çıkarmak için adımli bir yöntem uygulanmış ve güç yoğunluğu, güç faktörü ve mıknatıs miktarı arasındaki en uygun dengeyi sağlamak adına çok amaçlı bir meta-sezgisel optimizasyon algoritması tercih edilmiştir [41].

Ch. Schatzer ve ekibi, çalışmalarında 4 kutuplu Yüzeye Monteli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun (KMSM) tasarımını, maksimum güç çıkışı ile minimum mıknatıs hacmini hedef alarak optimize etmiştir. Bu problem, bir vektör optimizasyon sorunu

olarak ele alınmış ve herhangi bir skaler dönüşüm uygulanmadan, stokastik bir arama algoritmasıyla doğrudan çözüme ulaşılmıştır. Çalışmada, stator sargısının kısa devre durumunda rotor yüzeyindeki mıknatısların demanyetizasyon limitleri ve rotor bandajının mekanik dayanım gibi tasarım sınırlamaları dikkate alınmıştır. Bu sınırlamalar çerçevesinde manyetik makine tasarımı için Pareto optimal çözümler elde edilmiş ve sonuç olarak %16 daha az mıknatıs hacmine sahip bir rotor tasarımı gerçekleştirilmiştir [42].

M. Mutluer ve O. Bilgin, çalışmalarında 16 kutuplu ve 18 oluklu Yüzeye Monteli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun (KMSM) optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Stator dış çapı, rotor dış çapı, mıknatıs kalınlığı, stator oluk ağzı yüksekliği, hava aralığı mesafesi ve stator oluk dış genişliği gibi parametreleri değişken olarak ele almış ve optimizasyon işlemi için Genetik Algoritma (GA) ile Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) tekniklerini kullanmışlardır. Başlangıçta %93,73 verimle çalışan motorun, optimizasyon sonucunda veriminin GA ile %95,3'e, PSO ile ise %95,64'e yükseldiği gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca, PSO tekniğinin GA'ya kıyasla daha hızlı ve etkili sonuçlar verdiği, aynı zamanda daha basit bir yapıya ve daha az koda sahip olduğu için gelecekteki çalışmalarda tercih edilebileceği vurgulanmıştır [43].

Erhan Tuncel'in "Elektrikli Bisikletler için Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru (KMFDAM) Tasarımı ve Optimizasyonu" başlıklı tez çalışmasında, aynı stator iç ve dış çapları, hava aralığı mesafesi ve mıknatıs kalınlığı gibi özelliklere sahip, farklı oluk/kutup sayılarından oluşan topolojiler (24/18, 24/20, 36/24, 36/28, 36/30, 36/38, 33/42, 48/40, 48/50) analiz edilmiştir. Motor performansını etkileyen sargı yapısı, oluk/kutup oranı, hava aralığındaki akı yoğunluğu, vuru moment ve kayıplar gibi parametreler, ANSYS RMxprt ve ANSYS Maxwell yazılımları kullanılarak incelenmiştir. Analiz sonuçları, düşük sargı faktöründe direnç kayıplarının arttığını ve yüksek sargı faktörüne sahip tasarımların daha üstün performans sergilediğini göstermiştir. Ayrıca, oluk/kutup oranının birbirine yakın olduğu durumlarda vuru momentinin daha düşük olduğu, oluk sayısının artışıyla birlikte sargı kayıplarının da arttığı ve belirli bir sıcaklık artışının motorun anma gücünü olumsuz etkilediği vurgulanmıştır. Bu topolojiler arasında en uygun modelin, 36 oluk ve 38 kutuplu yapı olduğu belirtilmiştir [44].

Ali Sinan Çubuk ve ekibi, çalışmalarında tekerlek içi Fırçasız Doğru Akım Motorunun (FDAM) güç, gerilim, anma hızı, tekerlek çapı, sürekli mıknatıs ve oluk doluluk oranı

gibi parametrelerin sabit tutulduğu bir ortamda, farklı oluk/kutup kombinasyonlarının (24/18, 24/20, 36/24, 36/28 ve 36/30) motorun bakır ve demir kayıpları ile verim üzerindeki etkilerini Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanarak incelemişlerdir. Benzetim sonuçlarına göre, 24/20 oluk/kutup oranına sahip modelin diğer topolojilere kıyasla daha yüksek verime sahip olduğu ve toplam kayıplarının daha düşük olduğu belirlenmiştir [45].

Gamze Tanç, yüksek lisans tez çalışmasında oluk/kutup oranının motor performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. 36/34 ve 36/38 oluk/kutup kombinasyonlarına sahip motorlarda hedeflenen vuruş momenti, hafiflik ve yüksek verim gibi özelliklere başarıyla ulaşılmıştır. Bu motorların performanslarının birbirine oldukça yakın olduğu, ayrıca çift katlı sargı yapısının tek katlı sargıya göre daha verimli olduğu ve üretim sırasında oluklarda daha az taşma olacağı için 36/34 oluklu motorun aynı performansı daha az sayıda mıknatısla sağladığı sonucuna varılmıştır [46].

Cemil Ocak, doktora tez çalışmasında elektrikli araçlar için çok kademeli yeni bir fırçasız doğru akım motoru (FDAM) tasarımı geliştirmiştir. Çalışma sonuçları, bu yeni tasarımın elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan geleneksel fırçasız motorlara kıyasla daha yüksek verim ve moment sunduğunu ortaya koymuştur [47].

Fazilet Akın, yüksek lisans tez çalışmasında elektrikli araçlar için 15 kW güç çıkışı sağlayan 51 oluklu ve 46 kutuplu dış rotorlu fırçasız doğru akım motoru (FDAM) tasarımını Maxwell RMxprt programında oluşturmuş, ardından bu parametrelerle Maxwell 2D programı kullanarak iki boyutlu analizler yapmıştır. Gerçekçi sonuçlar elde edildikten sonra, motorun prototipi üretilmiştir. Yapılan benzetimle uyumlu olarak, prototip motorun 670 rpm hızındaki veriminin doğruluğu kanıtlanmış ve motor elektrikli araca entegre edildikten sonra, aracın hedeflenen performans değerlerinde çalıştığı gözlemlenmiştir [48].

Yapılan bu çalışmalara ek olarak literatürde az sayıda örneği bulunan yapay zeka ve yapay sinir ağlarından faydalanılarak oluşturululan tasarımların incelenmesi ise literatür araştırmasının ikinci bölümünde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, mevcut literatür dikkate alınarak araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak yapay sinir ağları kullanılarak, FDAM'lerin tasarım parametrelerinin tahmini ile ilgili çok fazla kaynağa ulaşılamamıştır. Literatürde daha çok asenkron motorların PID ve yapay sinir ağı ile hız kontrolü uygulamaları mevcuttur.

Porselvi T. ve ekip arkadaşları, yayınladıkları makalede motorun hız kontrolü için gerçekleştirilen simülasyonların genellikle MATLAB/Simulink ortamında yapıldığını belirtmişlerdir. Bu simülasyonlarda elektromotor kuvvet (EMF) sinyalleri, rotor hızı, elektromanyetik tork ve Hall etkisi sinyalleri gibi parametreler elde edilmekte; bu veriler kullanılarak motorun davranışı modellenmektedir. Yapılan çalışmalarda, motorun hız kontrolü PI denetleyicisi ile başarıyla sağlanmış ve motorun çeşitli performans parametreleri simülasyonlar ile test edilmiştir. Ayrıca, elde edilen veriler, yapay sinir ağları (ANN) ile daha ileri analizler için kullanılmıştır. Yapay sinir ağları, ikili veri setlerini daha doğru bir şekilde işleyebilmesi nedeniyle bu tür sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. BLDC motorlarının hız kontrolü ve performans parametreleri, ANN modellerine beslenmiş ve bu modeller, simülasyon sonuçlarına yakın tahminler yapabilmektedir. Bu yöntem, matematiksel simülasyonlarla elde edilen sonuçlarla uyumlu sonuçlar verdiği için başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Hem matematiksel tabanlı simülasyonlar hem de yapay sinir ağı tabanlı veri tahminleri tatmin edici sonuçlar sunmuş ve motor performansının optimize edilmesine olanak tanımıştır [49].

DC motorlar, genellikle BLDC motorlarda görülen doğrusal olmayan dinamik yapılar ve tork dalgalanmaları ile başa çıkmak zorundadır. Krishnan ve arkadaşları çalışmalarında, uyarlanabilir öğrenme kapasitesine sahip ve doğrusal olmayan durumları etkin bir şekilde yönetebilen bir YSA tabanlı denetleyicinin uygulanmasıyla bu kısıtlamaları ele almayı hedeflemiştir. Sunulan yöntem, yükselme süresi, aşım, eğim hızı ve yerleşme süresi açısından üstün bir performans sergileyerek geleneksel bulanık mantık denetleyicileriyle kıyaslanmıştır. MATLAB/SIMULINK ortamında gerçekleştirilen simülasyon sonuçları, YSA denetleyicisinin BLDC motorun dinamik yanıtını ve kararlılığını büyük ölçüde iyileştirdiğini ve hassasiyet ile dayanıklı hız kontrolüne ihtiyaç duyulan endüstriyel uygulamalar için potansiyel bir çözüm sunduğu ortaya koyulmuştur [50].

Motor hızını kontrol etmek için birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Örneğin, yüksek doğruluk sağlamak amacıyla, orantısal, integral ve türev (PID) denetleyicisi ile bir kontrol döngüsü geri besleme mekanizması kullanılabilir. Ancak, PID denetleyicisinin en büyük dezavantajlarından biri, yük torkundaki ani değişimler sonucu meydana gelen istenmeyen hız aşımalarıdır. Jeeva Bharathi K. ve arkadaşları, makale çalışmalarında YSA'yı BLDC motorlar için geliştirilmiş bir hız kontrol

algoritması ile entegre etmişlerdir. YSA, kararlı bir hız sağlamak amacıyla Python kullanılarak makine öğrenmesi yöntemiyle eğitilmiştir. YSA kullanımıyla gerçekleştirilen hız kontrolünün performansı incelenmiş ve sonuçların, gürültü veya bozulmalara rağmen diğer PID denetleyicileriyle kıyaslandığında istenen çıkış dalga formuna uyum sağladığı görülmüştür. Bu sonuçlar, MATLAB-Simulink platformu aracılığıyla elde edilmiştir [51].

Sofiane Ben Abdi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, yapay sinir ağları (YSA) kullanarak BLDC motorunun hızını düzenlemek ve optimum tepki performansına ulaşmayı hedeflemiştir. İlk olarak, istenen hız sinyalinin takip edilmesi sırasında kararlılığı sağlamak için hata azaltımı ve optimum parametre değerlerine erişim amacıyla, kapalı döngüde parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) algoritmasıyla klasik PID kontrolörünün kazanç değerleri optimize edilmiştir. Ardından, PID kontrolörünün giriş ve çıkış verileri toplanarak MATLAB çalışma alanında saklanmıştır. Daha sonra, bu veriler kullanılarak yapay sinir ağı (YSA) ile eğitilen yeni bir kontrolör tasarlanmış ve SIMULINK-MATLAB'daki BLDC motor modeline entegre edilmiştir. Sonuçlar, YSA ile eğitilen kontrolörün motor hızını etkili bir şekilde düzenlediğini göstermiştir [52].

Patrice Wira ve arkadaşları yayınladıkları makalede, fırçasız bir DC motorun klasik PI kontrolü ile Yapay Sinir Ağı (YSA) tabanlı kontrolünün karşılaştırmalı bir analizini sunmaktadır. BLDC motorlar, büyük yük torku gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir ve bu motorlar, doğrusal olmayan yapıları nedeniyle sağlam bir kontrol mekanizması gerektirmektedir. Geleneksel PI kontrolörlerinin doyma karakteristiği, sistemin kararsızlaşmasına yol açabilmektedir. Bu durumu iyileştirmek ve daha iyi bir dinamik performans ile hızlı tepki elde etmek amacıyla, yapay sinir ağı tabanlı bir kontrolör uygulanmıştır. Böylelikle, bir BLDC motorun hız kontrolü ve tork dalgalanmalarının azaltılması sağlanmıştır. MATLAB/SIMULINK kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon sonuçları, YSA tabanlı denetleyicinin performansının, standart PI kontrolörünün elde ettiği sonuçlardan daha üstün olduğunu ortaya koymaktadır [53].

Asenkron motorların hız kontrolü için gereken hız ve konum bilgisi, motor miline yerleştirilen mekanik sensörlerden elde edilmektedir. Ancak bu sensörlerin motorun hız kontrol sistemine ekstra maliyet getirmesi ve mekanik etkiler nedeniyle arızalanma riski oluşturması gibi olumsuzluklar söz konusudur. Bu nedenle, motorun akım ve

gerilim verilerinden yararlanarak motorun hızını ve konumunu tahmin edebilen bir gözlemleyiciye duyulmaktadır. Motorun hız ve konum bilgisi, doğrudan motorun hız kontrol performansını etkileyen faktörler olduğundan, yük ve parametre değişimlerine karşı dayanıklı bir gözlemleyici tasarımı gereklidir. Ahmet Özmen'in tez çalışmasında, asenkron motorlar için sensörsüz bir kontrol sistemi geliştirmek amacıyla YSA kullanılarak motor hızını tahmin eden bir gözlemleyici önerilmiştir. YSA gözlemleyici, motorun gerçek akımları ve gerilimleri ölçülerek motor akımlarını ve akılarını tespit etmeyi ve akım ile akı hatalarından yararlanarak motor hızını tahmin etmeyi hedeflemiştir. YSA'nın yapısı ve başlangıç ağırlıkları, motor modelinden elde edilen bilgilerle belirlenmiştir. Parametre değişiklikleri altında, YSA'nın eğitimi akım hatalarından faydalanılarak yapılmıştır. Eğitilen YSA gözlemleyicisi ile, asenkron motorun sensörsüz hız kontrol sistemi MATLAB-Simulink ortamında simüle edilmiştir. Yük ve parametre değişimlerine karşı YSA tabanlı sensörsüz hız kontrolünden elde edilen simülasyon sonuçları sunulmuştur [54].

Koray Şahin tez çalışmasında, Dinamik Yapay Sinir Ağları (DYSA) kullanılarak asenkron motorların hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Motor hızı ve hız değişimi, YSA'ya giriş olarak sunulmuş, motorun tork akımı ise çıkış olarak elde edilmiştir. YSA'nın eğitimi, hız hatası verileri kullanılarak yapılmıştır. YSA, hız kontrolörü olarak, yöresel geri besleme temelli dinamik bir ağ yapısı olarak tercih edilmiştir ve bununla birlikte ileri beslemeli YSA ile asenkron motorun hız kontrol performansları karşılaştırılmıştır. Eğitilmiş YSA ile hız kontrol sistemi, MATLAB-Simulink ortamında simüle edilmiştir [55].

1.2. Tezin Amacı

Sektörde kullanılan motorların performansını artırmak için güncel teknolojide yapay sinir ağları devreye girmekte ve bu motorların çalışma parametrelerini optimize etmektedir. Yapay zeka destekli kontrol sistemleri, motor parametrelerinin daha hassas şekilde optimize edilmesini sağlamakta ve motorların anlık çalışma koşullarına uyum sağlamasını mümkün kılmaktadır. Böylelikle motorlar, elektrikli araçlar için daha dayanıklı ve yüksek performanslı olmaktadır. Bu bağlamda, yapay zeka destekli motorların elektrikli araçlar için sunduğu avantajlar arasında düşük enerji tüketimi, yüksek tork ve hız performansı, uzun ömür ve düşük bakım maliyetleri bulunmaktadır. Elektrikli araçların sürdürülebilir bir çözüm sunabilmesi için enerji verimliliği ve

dayanıklılık temel parametreler arasında yer almaktadır. Fırçasız Doğru Akım Motorları (FDAM'ler), bu gereksinimlere büyük ölçüde karşılık vererek özellikle şehir içi kullanımda hızlı ivmelenme ve yavaşlama ihtiyaçlarını karşılayabilecek hassas kontrol imkanı sunmaktadır. Bu avantajlar, FDAM'lerin tasarım ve üretim süreçlerinde önemli bir artışa neden olmuştur. Ancak sıfırdan tasarlanan veya optimize edilen bir motorun hesaplama ve tasarım süreçleri oldukça zaman alıcıdır. Bu bağlamda, FDAM üretiminde en fazla zaman harcanan aşamanın tasarım süreci olduğu dikkate alınarak çeşitli çalışmalar yürütülmüştür.

Bu tez çalışmasında, mevcut literatürdeki eksiklikler göz önünde bulundurularak, hafif elektrikli araçlar için YSA kullanılarak FDAM'lerin performans parametrelerinin belirlenmesi gerçekleştirilecektir. Ancak bu tasarım, geleneksel yöntemlerden farklı olarak YSA kullanılarak yapılacaktır. Literatür taraması sonucunda, elektrikli araçlar ve bileşenleri üzerine birçok araştırma ve uygulama bulunmasına rağmen, FDAM'lerin YSA tabanlı performans değeri tahminiyle tasarımına yönelik yeterli akademik çalışmanın olmadığı tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, FDAM'lere yönelik ayrıntılı bir performans analizi yapılacak ve simülasyon çalışmaları gerçekleştirilecektir. Motor tasarımında verimlilik, tork-hız performansı ve uzun ömür gibi kritik faktörler öncelikli olarak ele alınacaktır. Tasarlanan motorların simülasyonları gerçekleştirilerek, performans parametrelerinin (etiket değerleri) yüksek doğrulukla tahmin edilmesini sağlayan YSA tabanlı bir model oluşturulacaktır.

1.3. Tezin İçeriği

Bu tezde, hafif elektrikli araçlar için dıştan rotorlu FDAM tasarımları gerçekleştirilmiş ve bu tasarımlar sonucunda elde edilen çıktılar değerlendirilmiştir. Ardından bu çıktılar kullanılarak, dıştan rotorlu FDAM'lerin performans değerlerini tahmin eden bir yapay sinir ağı modeli oluşturulmuş olup elde edilen sonuçlar, geliştirilen motor tasarımları ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda tez organizasyonu aşağıda özetlenen beş bölümden oluşmaktadır.

Bölüm 1'de, elektrikli araçların tarihi kronolojik olarak ele alınmış ve zamanla değişen koşulların elektrikli araç piyasasına etkileri incelenmiştir. Bu bağlamda, hafif elektrikli araçların ve bu araçlarda kullanılan FDAM'lerin önemi vurgulanmıştır. Ayrıca, literatürde yer alan FDAM tasarımları detaylı bir şekilde incelenmiş, YSA'lar ile

FDAM tasarımlarına ve tahminlerine yönelik çalışmalar değerlendirilmiş olup bu çalışmaların tez ile olan farklılıkları ortaya konmuştur.

Bölüm 2’de FDAM’lerin temel yapısı, çalışma prensipleri, avantajları ve dezavantajları ele alınmıştır. FDAM’lerin diğer motor türleriyle karşılaştırılması ve kullanım alanları incelenmiş, bu motorlarda kullanılan farklı sensör tipleri detaylandırılmıştır. Ayrıca, tez çalışmasında tasarlanacak olan dıştan rotorlu FDAM’lerin yapısal özellikleri incelenerek stator, rotor, mıknatıslar ve manyetik devre modeli hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

Bölüm 3’te dıştan rotorlu FDAM tasarımı yapabilmek için gerekli olan adımlar açıklanmıştır. Başlangıçta elektrikli araçlar için güç ve tork parametrelerinin belirlenmesi süreci ele alınmıştır. Ardından FDAM tasarımında kullanılan temel parametreler ve bu motorların matematiksel modellenmesi açıklanmıştır. Bu kapsamda stator, rotor ve mıknatıs boyutlandırmaları ile ilgili hesaplamalar sunulmuştur. Motor tasarımında kullanılan Ansys Maxwell yazılımı tanıtılmış ve analitik motor hesaplamaları ile sonlu eleman analizleri hakkında bilgi verilmiştir. RMxpert analizleri kapsamında giriş parametreleri, stator ve rotor ölçüleri, mıknatıs boyutları ve analiz parametreleri belirlenmiş; farklı motor tasarımları için simülasyon sonuçları paylaşılmış ve yorumlanmıştır.

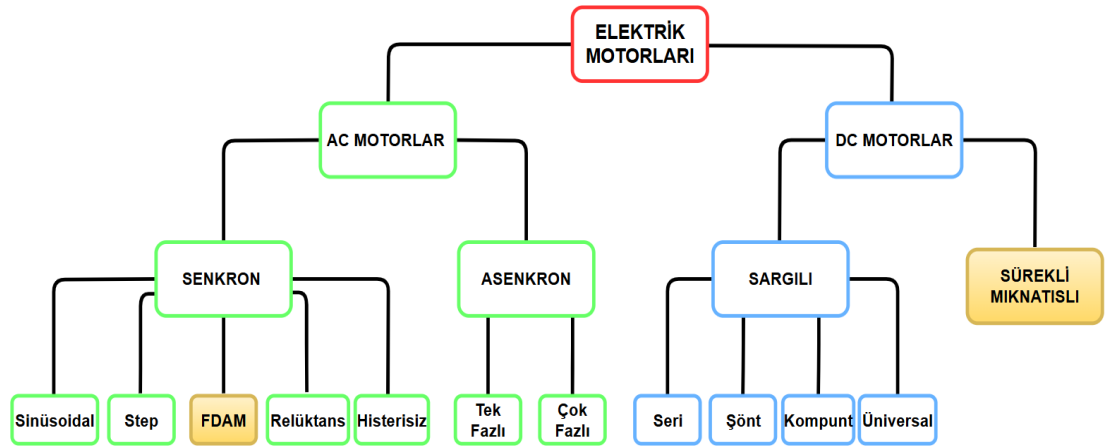
Bölüm 4’te FDAM tasarım parametrelerini kullanarak motor performans değerlerini tahmin eden bir yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Veri setlerinin elde edilme süreci açıklanmış, yapay sinir ağı modelinin oluşturulması ve test aşamaları detaylandırılmıştır. Modelin tahmin sonuçları değerlendirilerek oluşturulan motor tasarımlarıyla karşılaştırılmıştır.

Son bölüm olan beşinci bölümde ise tez çalışmasının genel değerlendirmesi yapılmış ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. Yapılan çalışmaların bulguları yorumlanarak FDAM tasarımları, analiz sonuçları ve YSA tahmin performansı hakkında çıkarımlar yapılmıştır. Çalışmanın sektörel ve akademik katkıları değerlendirilmiş, gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI VE YAPISI

Motorlar temelde bir elektrik makinasıdır. Manyetik alan ve indüksiyon yardımıyla elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektrik makinalarına elektrik motoru adı verilmektedir [56-57]. Aynı zamanda mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmektedirler, bu duruma da elektrik makinasının generatör/dinamo gibi çalışması denilmektedir.

Günümüzde, elektrik motorları çoğu endüstriyel alanda çeşitli yükleri taşıyabilmek veya bir aracı veya yükü belirli bir konumdan farklı bir konuma götürmek amacıyla kullanılmaktadır. İnsanlığın kullanımına sunulmuş milyarlarca elektrik motoru, farklı uygulama ve çalışmalar doğrultusunda sabit veya değişken çalışma parametrelerine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Çoğunlukla, yüksek güçlü elektrik motorları büyük iş makinalarında, küçük güçlü elektrik makinalarının ise ev aletlerinde kullanımı tercih edilmektedir [57]. Elektrik motorlarının ihtiyaç türlerine göre pek çok çeşidi bulunmaktadır. Şekil 2.1’de elektrik motorlarının sınıflandırılması gösterilmektedir.



Şekil 2.1 : Elektrik motorlarının sınıflandırılması [58].

Endüstriyel anlamda ve günlük kullanımda DA motorları maliyetli oldukları için çok fazla tercih edilmemektedir. Bakım ihtiyacı az olan alternatif akım motorları ve fırçasız doğru akım motorları daha çok tercih edilmektedir. Bunun başlıca sebebi, hem

motorun kendi çalışma aralığında daha verimli olması hem de bakım maliyetlerinin az olmasıdır [59].

Elektrikli araçlarda güç aktarma sistemlerinin sağlıklı bir şekilde çalışması için elektrikli motorların kullanılması gerekmektedir. Şekil 2.1'den de anlaşılacağı üzere çok farklı tiplerde elektrik motorları geliştirilmiştir. Bu farklılıklar, temelde farklı uygulama ve kullanım ihtiyaçlarına cevap verebilmek için oluşmuştur. Aynı zamanda motorların tasarımında çeşitli teknik özelliklerin optimize edilmeside bu çeşitliliği arttırmıştır. Bu çeşitlilik, motorların çalışma prensipleri, yapısal tasarımı, malzeme seçimi ve kontrol yöntemleri gibi pek çok faktöre dayanır. Bu nedenlere dayanarak şu bilgi elde edilmiştir; her motor tipi belirli bir uygulama alanına özgü avantajlar sunar ve kullanıcı gereksinimlerine uygun olarak geliştirilir. Elektrikli araçlarda da bu durum tam olarak böyledir. İçerisinde bulunan zamanın teknolojik imkanlarına göre, elektrikli araçlarda birçok farklı tipte elektrik motor türü denemeleri gerçekleştirilmiştir. Elektrikli araçların ilk piyasaya sürüldüğü zamanlarda güç elektroniği teknolojileri çok fazla gelişim göstermediği için, o zamanın en basit taşınabilir enerji kaynağı olan bataryalar kullanılmıştır. Bataryalar en basit doğru akım kaynağı oldukları için araçlarda da doğru akım motorları kullanılmıştır. Gün geçtikçe gelişen teknoloji DC/AC çevrimini mümkün kıldığından alternatif akım motorları da tercih edilmiştir [56].

Elektrikli araçlarda kullanılacak olan motorun türü ne olursa olsun bir elektrikli araç için motor seçiminde dikkat edilen özellikler şunlardır:

İlk olarak, motorun güç yoğunluğu ve tork yoğunluğu büyük önem taşımaktadır. Elektrikli araçlar sınırlı alanlara sahip olduklarından, kompakt bir tasarımda yüksek güç ve tork üretebilen motorlar tercih edilmektedir. Verimlilik, motor seçiminde kritik bir rol oynar, çünkü enerji verimli motorlar, batarya ömrünü uzatarak araç menzilini artırmaktadır. Motorun hem düşük hem de yüksek hızlarda iyi performans göstermesi gerektiğinden, geniş bir hız aralığına sahip olması beklenmektedir. Ağırlık ve boyut, aracın toplam kütesini etkileyerek enerji tüketimine doğrudan katkı sağlamaktadır; bu nedenle, hafif ve kompakt motorlar önceliklidir [60].

Motorun uzun süreli kullanımda aşırı ısınmasını önlemek için etkili bir ısı yönetimi ve soğutma sistemi gereklidir. Ayrıca, motorun hassas bir şekilde kontrol edilebilir olması, sürüş deneyimini iyileştirir ve enerji tüketimini optimize etmektedir. Elektrikli

araçlarda sessiz bir sürüş deneyimi önemli olduğundan, akustik performans, yani düşük gürültü ve titreşim seviyesi de dikkate alınmaktadır. Dayanıklılık ve güvenilirlik, motorun çevresel koşullara karşı dayanıklı olması ve uzun ömürlü bir performans sunması açısından kritik öneme sahiptir.

Bununla birlikte, motorun ve sürücülerinin rejeneratif frenleme yeteneği ile kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek bataryayı şarj edebilmesi, enerji verimliliğini arttırmaktadır. Motorun, aracın batarya gerilim seviyesi ve kapasitesi ile uyumlu olması da bir diğer önemli kriterdir. Son olarak, motor seçiminde maliyet de göz önünde bulundurulmaktadır; genellikle yüksek performans ile uygun maliyet arasında bir denge kurulmaktadır. Tüm bu özellikler göz önüne alındığında, FDAM (Fırçasız Doğru Akım Motoru), PMSM ve AC indüksiyon motorları elektrikli araçlarda yaygın olarak tercih edilen motor türleridir.

FDAM'ler, bazı kaynaklarda çalışma prensipleri nedeniyle senkron motorlar kategorisinde değerlendirilirken, belirli türlerinin karakteristik özellikleri dikkate alındığında farklı bir sınıflandırmaya tabi tutulabilmektedir. Örneğin, bazı FDAM'ler, trapezoidal bir karşı elektromotor kuvvet (karşı EMK) üretirken, sürücü devrelerinde kare dalga formunda akımlar kullanılmaktadır. Bu özellikler, belirli literatürlerde bu motorların doğru akım motorları grubunda yer almasına yol açmıştır. Ancak, FDAM'lerin yapısal ve işlevsel özelliklerinin senkron motorlarla büyük ölçüde örtüştüğü göz önünde bulundurulduğunda, bu motorların senkron motorlar altında sınıflandırılmasının daha isabetli olacağı sonucuna varılmaktadır.

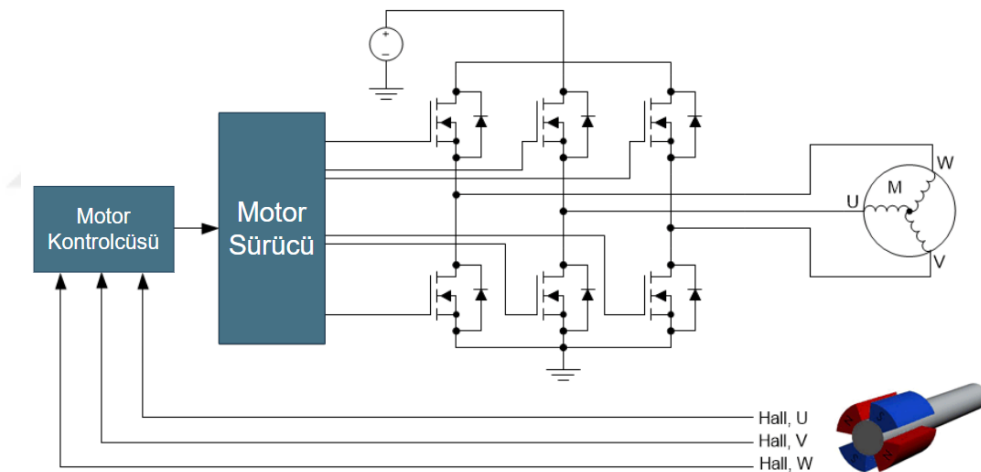
FDAM'ler, yüksek verimlilikleri, uzun ömürleri ve sessiz çalışmaları nedeniyle elektrikli araçlar ve hidrojenle çalışan araçlar gibi modern ulaşım teknolojilerinde kritik bir role sahiptir.

Fırçasız Doğru Akım Motorları (Brushless Direct Current Motors- BLDC), sabit mıknatıslı rotora ve elektronik olarak kontrol edilen stator sargılarına sahip olan bir elektrik motoru türüdür. Geleneksel fırçalı DC motorlarda, mekanik komütasyon ve fırçalar aracılığıyla gerçekleştirilen enerji aktarımı, BLDC motorlarda elektronik komütasyon devreleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu sayede fırçalı motorlarda görülen sürtünme kaynaklı enerji kayıpları, aşınma problemleri ve bakım ihtiyacı ortadan kalkmaktadır [61].

2.1. FDAM'lerin Yapısı ve Temel Çalışma Prensibi

FDAM diğer motorlarda olduğu gibi genel olarak bir rotor ve bir stator olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bu motorda rotor döner kısım, stator sabit kısım olarak tanımlanmaktadır. FDAM'lerde geleneksel DC motorların aksine, rotor genellikle iki veya daha fazla kutba sahip sabit mıknatıslardan oluşurken, stator döner manyetik alanı oluşturmak için kullanılan üç fazlı sargılara sahiptir. Bu temel fark, fırçalara ve mekanik komütasyona olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. FDAM'lerde mekanik komütasyon yerine elektronik komütasyon kullanılır. FDAM'ler bu sayede daha yüksek güvenilirlik ve daha az bakım ihtiyacı sunmaktadır.

Bahsedildiği gibi FDAM'lerin çalışma prensibi elektronik komütasyona dayanmaktadır. Üç fazlı bir FDAM klasik asenkron motorlar gibi direkt olarak güç kaynağına bağlanarak çalışmamaktadır. Bundan dolayı Şekil 2.2'de gösterildiği gibi bir sürücü sistemine ihtiyaç duymaktadır [62].



Şekil 2.2 : FDAM çalışma prensibi [63].

Hall etkili sensörler, enkoder veya geri EMF algılama mekanizmaları gibi sensörler yardımı ile rotorun konumu belirlenerek elektronik kontrol devresinin (motor sürücünün) stator sargılarını sırayla enerjilendirmesine olanak tanımaktadır. Stator sargılarının enerjilendirilmesiyle oluşan akım, motor içerisinde döner bir manyetik alan meydana getirmektedir. Bu manyetik alan, rotorda yer alan sabit mıknatıslarla etkileşerek elektromanyetik bir kuvvet oluşturur ve bu kuvvet rotorun dönme hareketini oluşturmasını sağlamaktadır. Fakat oluşan bu dönme hareketinin ve torkun sürekliliği için statorda oluşan manyetik alanın da bir nevi dönmesi gerekmektedir. Rotor ileri veya geri yön fark etmeksizin hareket ettikçe, pozisyon algılayıcılarından

alınan veriler sürekli olarak yenilenmektedir. Bu sayede her bir faz sırasıyla enerjilendirilir ve kesintisiz olarak verimli bir döner hareket sağlanmaktadır.

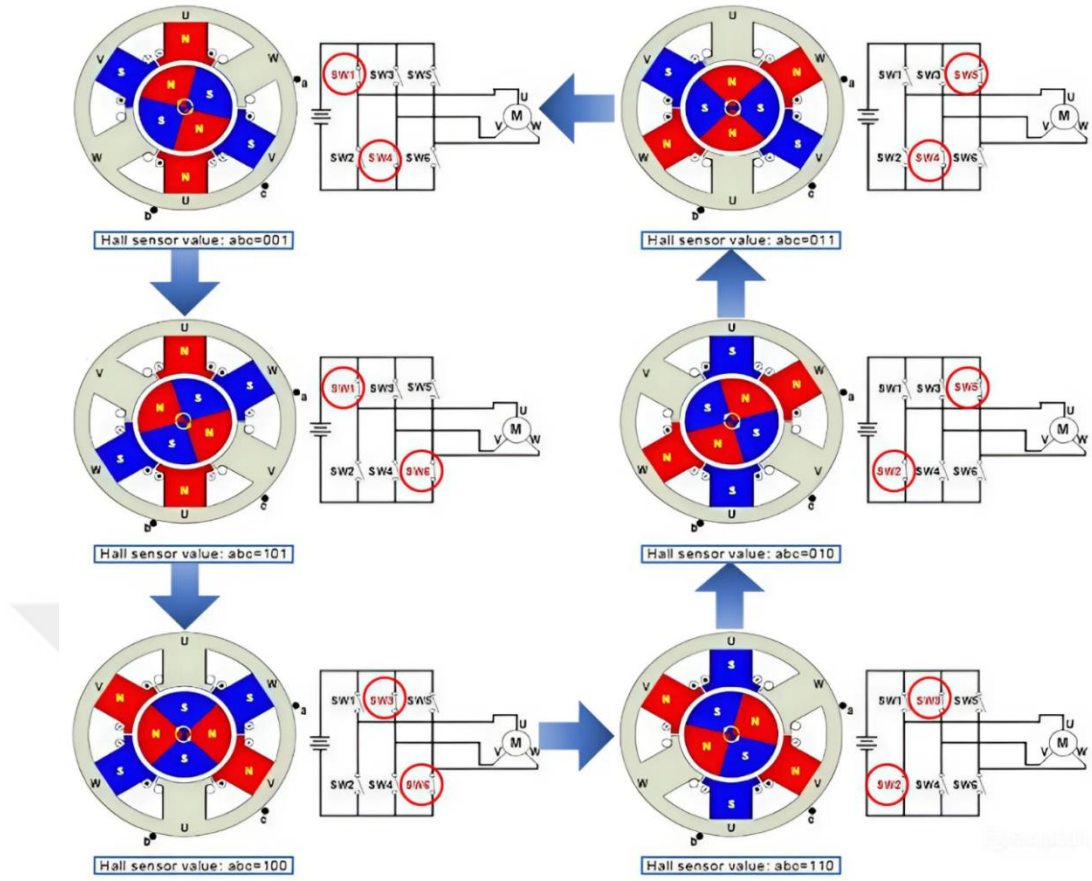
Bir FDAM'nin kontrol sistemi üç yarım köprü devresine sahip bir güç devresi, konum sensörleri, kontrol elektronığı (mikrodenetleyici veya özel motor kontrolörü IC'si) ile güç aşaması arasında arayüz oluşturan bir sürücü devresi dahil olmak üzere birkaç kritik bileşenden oluşmaktadır. Motorun kullanılacağı ortam ve şartlara bağlı olarak, kontrol yöntemleri farklılık gösterebilmektedir. Her yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları vardır. Tipik bir üç fazlı (A-B-C) BLDC motorda, komütasyon altı adımlı bir sırayı izler ve A'dan B'ye, A'dan C'ye, B'den C'ye, B'den A'ya, C'den A'ya ve C'den B'ye sırayla fazlar arasında geçiş yapmaktadır. Her adımda, üçüncü faz enerjilendirilmemiş halde kalırken iki faz enerjilendirilir. Bu sıra, manyetik alanın rotorun alanını 90 elektrik derecesi önde tutarak tork üretimini en üst düzeye çıkarmaktadır. Bahsedilen bu altı adımlı kontrol yönteminin anahtarlama sırası Tablo 2.1'de gösterilmektedir.

Tablo 2.1 : Anahtarlama sırası [64].

Anahtarlama Aralığı	Sekans Sırası	Alan Etkili Sensör			Açılacak Anahtarlar	Faz Akım Bilgisi		
		Ha	Hb	Hc		Ia	Ib	Ic
0°-60°	0	1	0	0	Q1, Q4	+	-	NC
60°-120°	1	1	1	0	Q1, Q6	+	NC	-
120°-180°	2	0	1	0	Q3, Q6	NC	+	-
180°-240°	3	0	1	1	Q3, Q2	-	+	NC
240°-300°	4	0	0	1	Q5, Q2	-	NC	+
300°-360°	5	1	0	1	Q5, Q4	NC	-	+

Elektronik komütasyonun sağladığı hassasiyet sayesinde fırçasız doğru akım motorlarının hız ve tork kontrolü kolaylıkla yapılabilir, bu da onları yüksek verimlilik, uzun ömür ve sessiz çalışma gereksinimlerinin ön planda olduğu elektrikli ve hidrojenli araçlar gibi uygulamalar için ideal hale getirmektedir.

Manyetik alanın dönüşünün kontrolünde, pozisyon bilgisinin Hall etkili sensörler aracılığıyla mikroişlemciye iletildiği varsayıldığında; bu sensörlerden alınan konum bilgileri mikroişlemci tarafından işlenir. İşleme sonucunda, güç devresindeki anahtarlama elemanları uygun sırayla tetiklenerek yıldız bağlı stator sargılarında sürekli döner bir manyetik alan oluşturulur. Bu temel çalışma prensibi ile Tablo 2.1'in görselleştirilmiş hali, Şekil 2.3'te gösterilmektedir. [65].



Şekil 2.3 : Hall effect sensörlere göre anahtarlama sıralaması [66].

Motorun ters yönde döndürülmesi, anahtarlama sırasının tersine uygulanmasıyla sağlanmaktadır. Sıranın, bobinlerdeki akım akışının yönünü ve dolayısıyla bireysel bobinler tarafından üretilen manyetik alanı tanımladığı anlaşılmalıdır. Akımın yönü, bobin tarafından üretilen manyetik alanın yönünü belirlemektedir. Manyetik alan, rotorun sürekli mıknatıslarını çeker ve iter. Bobinlerdeki akım akışını ve dolayısıyla manyetik alanların polaritesini doğru anda ve doğru sırada değiştirerek motorun dönme hareketi sağlanmaktadır. Rotoru döndürmek için bobinlerden geçen akım akışının değişmesi, komütasyon olarak adlandırılır. Üç fazlı bir FDAM'nin altı komütasyon durumu vardır. Komütasyon dizisindeki altı durumun tümü gerçekleştirildiğinde, dönüşe devam etmek için dizi tekrarlanmalıdır [62].

2.2. FDAM'lerin Avantaj ve Dezavantajları

FDAM'ler geleneksel elektrik motorlarına kıyasla önemli teknik ve operasyonel üstünlükler sunmaktadır. Bu motorların yapısal özellikleri, çalışma prensipleri ve performans karakteristikleri, modern endüstriyel uygulamalarda tercih edilmelerinin

temelini oluşturmaktadır. Ancak bu avantajların yanı sıra bazı sınırlamaları da bulunmaktadır.

Fırçasız doğru akım motorların başlıca avantajları arasında, yüksek moment/hacim oranı ve gelişmiş verimlilik değerleri ön plana çıkmaktadır. Elektronik komütasyon sisteminin kullanılması, mekanik fırça-kolektör düzeneğinin elimine edilmesini sağlamış, bu sayede sürtünme kayıpları minimize edilmiştir. Motorun yapısal tasarımında rotor sargılarının bulunmaması, rotordaki bakır kayıplarını ortadan kaldırırken, toplam atalet momentini de düşürmektedir. Bu özellik, sistemin dinamik tepki süresini iyileştirmekte ve hızlanma-yavaşlama performansını optimize etmektedir.

Termal yönetim açısından değerlendirildiğinde, FDAM'ler etkin bir soğutma karakteristiği sergilemektedir. Stator yapısındaki ısı transferinin optimize edilmiş olması, motorun yüksek güç yoğunluğunda çalışabilmesine olanak tanımaktadır.

Bununla birlikte, FDAM'lerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Kontrol sisteminin karmaşıklığı, özellikle yüksek hassasiyetli uygulamalarda önemli bir tasarım zorluğu oluşturmaktadır. Rotor pozisyonunun hassas tespiti için gerekli olan sensör sistemleri ve güç elektroniği devreleri, toplam sistem maliyetini artırmaktadır. Ayrıca, kalıcı mıknatısların yüksek sıcaklıklarda demagnetizasyon riski ve mekanik dayanım gereksinimleri, tasarım sürecinde dikkat edilmesi gereken kritik faktörlerdir.

Yüksek hızlı uygulamalarda, özellikle yüzey montajlı mıknatısların mekanik bütünlüğünün korunması, önemli bir mühendislik problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Mıknatısların zaman içerisinde maruz kaldığı çevresel ve termal etkiler, manyetik özelliklerinde degradasyona yol açabilmekte, bu da sistem performansını olumsuz etkileyebilmektedir.

FDAM'lerin alan zayıflatma bölgesindeki performans karakteristikleri, sabit mıknatıslı rotor yapısı nedeniyle belirli sınırlamalara tabidir. Bu durum, özellikle geniş hız aralığında çalışması gereken uygulamalarda dikkat edilmesi gereken bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmelidir [57].

Yukarıda bahsedilen avantaj (Tablo 2.2) ve dezavantajların (Tablo 2.3) ne olduğu ve sebebi aşağıdaki tablolarda açıklanmaktadır.

Tablo 2.2 : FDAM'lerin avantajları ve nedenleri.

Avantajlar	Nedenleri
Yüksek moment/hacim oranı	Kompakt tasarımı ve rotor üzerindeki mıknatısların etkili kullanımı.
Gelişmiş verimlilik	Mekanik fırça ve kolektör sisteminin olmaması sürtünme kayıplarını azaltır
Rotor sargılarının bulunmaması	Bakır kayıplarını önler ve motorun ataletini azaltır
Düşük bakım gereksinimi	Fırçasız tasarımın daha az aşınma ve parça değişimi gerektirmesi.
Yüksek dinamik tepki	Azaltılmış atalet ve elektronik komütasyonun hızlı kontrol sağlaması
Uzun kullanım ömrü	Fırça ve kolektör sisteminin olmaması, mekanik aşınmayı en aza indirmektedir.
Yüksek güç yoğunluğu	Optimizasyonlu soğutma yapısı, yüksek ısı transfer performansı sağlamaktadır.
Daha düşük işletme maliyetleri	Bakım sıklığının azalması ve enerji verimliliği sayesinde maliyetlerin düşmesi.
Termal yönetimin etkinliği	Stator üzerindeki ısı dağılımı optimize edilmiştir, böylece aşırı ısınma riski azalmaktadır.
Geniş hız aralığı	Hassas kontrol sistemleri, motorun çok farklı hızlarda verimli çalışmasını sağlamaktadır.

Tablo 2.3 : FDAM'lerin dezavantajları ve nedenleri.

Dezavantajlar	Nedenleri
Kontrol sisteminin karmaşıklığı	Elektronik komütasyon ve hassas sensör gereksinimi.
Yüksek sistem maliyeti	Pozisyon sensörleri ve güç elektroniği devrelerinin maliyeti
Mıknatısların demagnetizasyon riski	Yüksek sıcaklıkların mıknatısların manyetik özelliklerini bozması.
Mekanik dayanım sorunları	Yüksek hızlı uygulamalarda yüzey montajlı mıknatısların bütünlüğünü koruma zorlukları.
Alan zayıflatma performansındaki sınırlamalar	Sabit mıknatısların hız aralığında belirli kısıtlamalara neden olması.
Sensörsüz kontrol zorlukları	Sensörsüz sistemlerde rotor pozisyonu tahmini, performansı sınırlayabilmektedir.
Yüksek voltaj geçişleri	Komütasyon sırasında oluşan ani voltaj değişimleri izolasyon sorunlarına neden olabilmektedir.

2.3. FDAM'lerin Diğer Motor Türleri ile Karşılaştırılması ve Kullanım Alanları

Modern endüstriyel uygulamalarda elektrik motorları seçimi, sistemin performans gereksinimleri ve operasyonel kısıtlamalar göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Elektrik motorları arasında, senkron, asenkron ve geleneksel doğru akım motorları

yaygın kullanım alanına sahip olmakla birlikte, her birinin kendine özgü avantaj ve kısıtlamaları bulunmaktadır.

Geleneksel doğru akım motorlarının kontrol sistemleri, basit yapıları ve doğrusal karakteristikleri sayesinde uygulama kolaylığı sunmaktadır. Ancak, bu motorların yapısal özellikleri, özellikle fırça-kolektör mekanizması, çeşitli operasyonel sorunları beraberinde getirmektedir. Mekanik aşınma problemleri, periyodik bakım gereksinimleri ve buna bağlı maliyet artışları, bu motorların kullanım alanlarını sınırlandıran önemli faktörlerdir. Özellikle, patlayıcı ortamlarda fırça-kolektör sisteminden kaynaklanan kıvılcım riski, bu motorların kullanımını imkansız hale getirmektedir. Fırçasız doğru akım motorları (BLDC), geleneksel elektrik motorlarının kısıtlamalarını aşmak üzere geliştirilmiş modern motor teknolojisini temsil etmektedir.

FDAM'lerin endüstriyel uygulamalardaki başarısı, özellikle yüksek güç yoğunluğu ve optimize edilmiş enerji tüketimi özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu motorlar, hassas pozisyon kontrolü gerektiren robotik sistemlerden, yüksek hızlı fan uygulamalarına, medikal cihazlardan elektrikli araç tahrik sistemlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde tercih edilmektedir. Elektronik komütasyon sisteminin sağladığı operasyonel avantajlar, özellikle tehlikeli ve patlayıcı ortamlarda güvenli çalışma imkanı sunmaktadır.

FDAM'lerin endüstriyel otomasyon sistemlerindeki artan kullanımı, bu motorların gelecekteki elektrik tahrik sistemlerinin vazgeçilmez bileşenleri olacağını göstermektedir. Özellikle, endüstri 4.0 kapsamında akıllı üretim sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, FDAM'lerin sunduğu hassas kontrol kabiliyeti ve yüksek verimlilik özellikleri, bu teknolojinin adaptasyonunu hızlandırmaktadır.

FDAM'lerin endüstriyel kullanım alanlarını incelediğimizde, bu motorların çok geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduğu görülmektedir. Özellikle otomotiv sektöründe elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte, yüksek verimlilikleri ve hassas kontrol özellikleri sayesinde tercih edilmektedirler. FDAM'lerin kullanım alanları, hangi sebeplerle kullanıldığı ve örnek uygulamalar aşağıda yer alan Tablo 2.4'de gösterilmiştir.

Tablo 2.4 : FDAM'lerin kullanım alanları ve nedenleri.

Sektör	Uygulama Alanı	Kullanım Nedeni	Örnek Uygulamalar
Otomotiv	Elektrikli Araç Sistemleri	-Yüksek verimlilik - Hassas hız kontrolü - Düşük bakım ihtiyacı	- Ana tahrik motorları - Elektrikli direksiyon sistemleri - Elektrikli cam sistemleri
Endüstriyel Otomasyon	Fabrika Sistemleri	- Hassas pozisyon kontrolü - Uzun ömür - Güvenilir çalışma - Düşük gürültü	- CNC tezgahları - Konveyör sistemleri - Endüstriyel robotlar - Cerrahi robotlar
Medikal Ekipmanlar	Tıbbi Cihazlar	- Yüksek güvenilirlik - Hassas kontrol	- MR cihazları - Hasta yatakları
Havacılık ve Uzay	Uçak Sistemleri	- Yüksek güvenilirlik - Düşük ağırlık - Yüksek performans - Enerji verimliliği	- Kanat kontrol sistemleri - Kokpit kontrolleri - İniş takımı sistemleri - Çamaşır makineleri
Ev Aletleri	Beyaz Eşya	- Sessiz çalışma - Uzun ömür - Düşük gürültü	- Bulaşık makineleri - Buzdolapları - Hard disk sürücüler
Bilgisayar Sistemleri	Soğutma Sistemleri	- Kompakt boyut - Hassas hız kontrolü	- Fan sistemleri - Soğutma pompaları
Yenilenebilir Enerji	Enerji Sistemleri	-Yüksek verimlilik - Düşük bakım - Uzun ömür	- Rüzgar türbinleri - Hidroelektrik kontrol sistemleri
Laboratuvar Ekipmanları	Hassas Cihazlar	- Hassas hız kontrolü - Düşük titreşim - Yüksek doğruluk	- Santrifüj sistemleri - Mikroskopi sistemleri - Test ekipmanları
Robotik	Robot Sistemleri	-Hassas pozisyon kontrolü - Yüksek dinamik performans	- Endüstriyel robotlar - Servis robotları - Eğitim robotları

2.4. FDAM'lerde Kullanılan Sensör Tipleri

Daha önceden de bahsedildiği üzere FDAM'ler elektronik komütasyona sahip doğru akım motorlarıdır. Bu özellik, FDAM'leri geleneksel fırçalı motorlardan ayıran en önemli faktörlerden biridir. FDAM'lerin dönme hareketini sağlayabilmesi için, rotorun pozisyonuna bağlı olarak stator sargılarının sıralı bir şekilde enerjilendirilmesi gereklidir. Bu süreçte rotor pozisyonu bilgisi kritik bir rol oynar, çünkü bu bilgi

sayesinde motorun optimum performans gösterebilmesi için, stator sargılarının rotor pozisyonuna bağlı olarak uygun sırayla enerjilendirilmesi sağlanmaktadır.

Konum algılayıcı seçiminde birçok önemli kriter göz önünde bulundurulmalıdır. Öncelikle uygulamanın gerektirdiği konum algılama hassasiyeti, sensör seçiminde belirleyici rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra, sıcaklık, nem, titreşim gibi çevresel faktörler de sensör seçimini etkileyen önemli parametrelerdir. Maliyet faktörü hem sensörün kendi maliyeti hem de toplam sistem maliyetine etkisi açısından değerlendirilmelidir. Boyutsal kısıtlamalar, sensörün motor yapısına entegrasyonu açısından önem taşımaktadır. Ayrıca, sensör çıkışlarının işlenmesi için gereken donanım ve yazılım gereksinimleri de göz önünde bulundurulması gereken faktörlerdir [67].

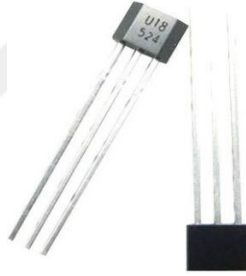
Modern FDAM sistemlerinde konum algılama, sensörlü ve sensörsüz olmak üzere iki temel yaklaşımla gerçekleştirilmektedir. Her iki yaklaşımın da kendine özgü avantajları ve uygulama alanları bulunmaktadır. Sensörlü sistemlerde Hall etkili sensörler, kodlayıcılar ve çözücüler gibi çeşitli konum algılayıcılar kullanılmaktadır. Hall etkili sensörler, manyetik alan değişimlerini algılayarak pozisyon bilgisi sağlamaktadırlar. Kodlayıcılar, genellikle daha hassas uygulamalarda tercih edilir ve genlik ya da faz bilgisine dayalı sinyaller üretmektedirler. Çözücüler ise rotor pozisyonunu analog sinyallerle ileten, daha yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalar için uygundur. Bu sensörlerin her biri, doğruluk, hassasiyet, boyut ve çıkış sinyal türleri gibi faktörler açısından farklı avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır.

Sensörsüz çözümler, özellikle motor yapısında sensör yerleştirmenin mümkün olmadığı durumlarda önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Sensörsüz yöntemlerde, rotor pozisyonu motor sargılarında oluşan gerilim ve akım gibi elektriksel büyüklüklerin analizi yoluyla tahmin edilmektedir. Mikroelektronik ve entegre devre teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte sensörsüz yöntemlerin uygulama alanları artmış olsa da sensörlerin maliyetlerinin düşmesi ve minyatürizasyonun da gelişmesi nedeniyle sensörlü çözümler günümüzde daha yaygın kullanılmaktadır. Bu bilgiler ışığında aşağıda yer alan başlıklarda yaygın olarak kullanılan konum sensörleri açıklanmıştır.

2.4.1. Hall etkili sensörler

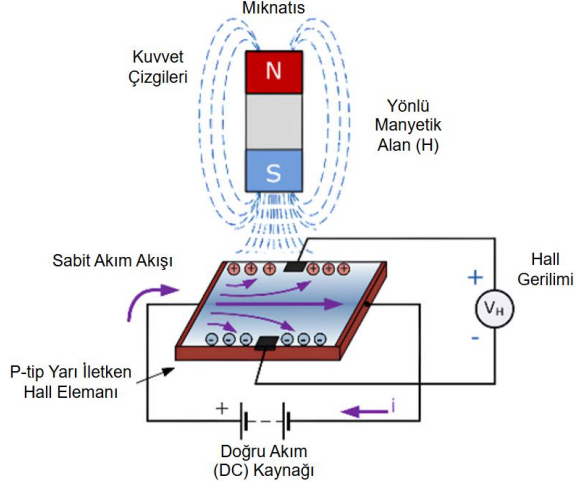
Hall etkili sensörler, 1879 yılında Edwin Hall tarafından keşfedilen Hall etkisi prensibine dayanmaktadır. Hall, iletken bir malzemeden akım geçerken manyetik alan uygulandığında, iletkenin kenarları arasında potansiyel fark oluştuğunu gözlemlemiştir. Bu keşif, modern Hall sensörlerinin temelini oluşturmuştur. 1950'lerde yarı iletken teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, Hall etkisi sensörleri pratik uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır [68].

Hall sensörlerinin yapısı, temel olarak ince bir yarı iletken malzemeden oluşmaktadır. Bu malzeme genellikle galyum arsenit, indiyum antimonit veya indiyum arsenit gibi yarı iletkenlerden seçilmektedir. Sensörün dört kenarında elektriksel kontaklar bulunur; bunlardan ikisi akım besleme, diğer ikisi ise Hall gerilimini ölçmek için kullanılmaktadır. Sensör yapısı, genellikle silikon tabanlı bir entegre devre içerisine yerleştirilir ve koruyucu bir kılıfla kaplanmaktadır [56]. Şekil 2.4'te Hall etkili sensör gösterilmektedir.



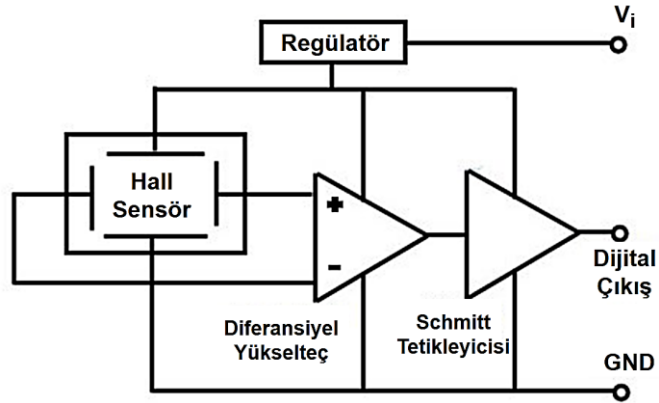
Şekil 2.4 : Hall etkili sensör.

Çalışma prensibi açısından Hall sensörleri, manyetik alan şiddetine bağlı olarak çıkış voltajı üretmektedir. Bu durumu açıklayan görsel Şekil 2.5'te gösterilmiştir. FDAM uygulamalarında, rotor üzerindeki mıknatısların oluşturduğu manyetik alan, Hall sensörü üzerinden geçen akımı etkiler ve sensör çıkışında bir gerilim oluşturmaktadır. Bu gerilim, manyetik alanın yönüne ve şiddetine bağlı olarak değişmektedir. Modern Hall sensörleri, analog çıkış yerine genellikle dijital çıkış sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2.5 : Hall etkili sensör çalışma prensibi [69].

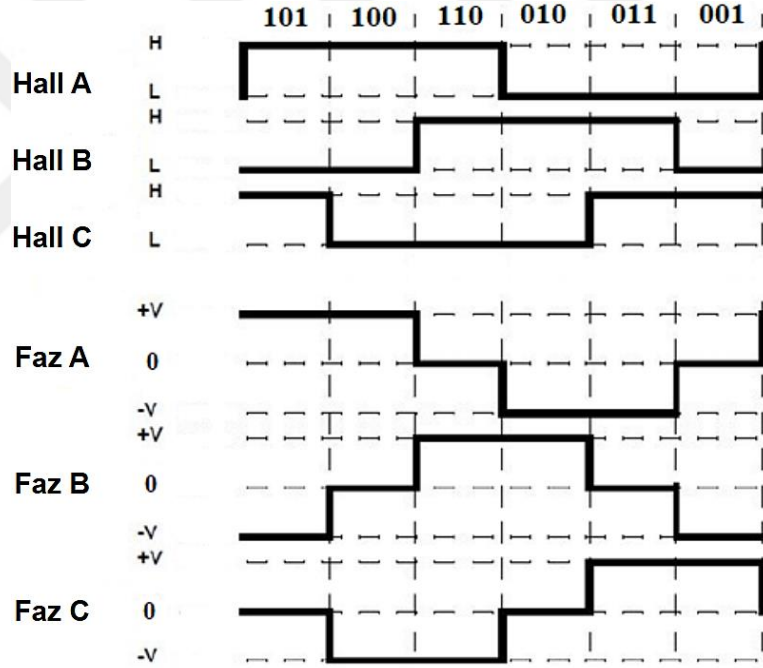
Piyasada bulunan bazı Hall etkili sensörlerden elde edilen çıkış sinyali, oldukça düşük genlikli olup mikroVolt (μV) seviyesindedir. Bu denli düşük seviyedeki sinyallerin endüstriyel uygulamalarda doğrudan kullanılması mümkün değildir. Sinyal işleme sürecinde, öncelikle bu zayıf sinyalin güçlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla tasarlanan özel amplifikatör devreleri, Hall gerilimini anlamlı ve kullanılabilir seviyelere yükseltmektedir. Güçlendirme aşamasından sonra, analog formattaki sinyal henüz sayısal sistemlerde kullanıma uygun değildir. Bu nedenle, sinyalin dijital forma dönüştürülmesi için Schmitt Trigger devresi kullanılmaktadır. Bu devre, girişteki analog sinyali belirli bir eşik seviyesine göre değerlendirerek, çıkışta net bir mantıksal '0' veya '1' seviyesi oluşturmaktadır. Böylece Hall elemanı, amplifikatör ve Schmitt Trigger devrelerinin entegrasyonu ile oluşturulan kompakt bir yapı, endüstriyel uygulamalarda kullanıma hazır Hall effect sensörünü meydana getirmektedir [65]. Bahsedilen bu blok diyagram olarak aşağıda yer alan Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6 : Dijital çıkış hall effect sensörü blok diyagramı [70].

Hall sensörlerinden gelen üç bitlik kod, güç elektroniği devresindeki anahtarlama elemanlarını (genellikle MOSFET'ler) kontrol eden sürücü devresine iletilmektedir. Her bir kod kombinasyonu için, üç fazlı stator sargılarından ikisi enerjilendirilirken, üçüncü sargı enerjisiz bırakılmaktadır. Bu altı adımlı komütasyon sekansı, rotorun sürekli ve düzgün bir şekilde dönmesini sağlamaktadır.

Örneğin, Hall sensörlerinden alınan '101' kodu, A fazının pozitif, B fazının enerjisiz ve C fazının negatif olması gerektiğini göstermektedir. Bu durumda ilgili MOSFET'ler tetiklenerek A fazından C fazına doğru bir akım yolu oluşturulmaktadır. Rotor döndükçe Hall sensör çıkışları değişir ve yeni kod kombinasyonuna göre farklı fazlar enerjilendirilmektedir. Bu süreç, motorun dönüş yönüne ve hızına bağlı olarak belirli bir sırayla devam etmektedir. Hall etkili sensörden alınan sinyallere göre motor fazlarının enerjilendirilme durumu aşağıda yer alan Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7 : Hall effect sensör sinyallerine göre FDAM sargılarının enerjilendirme durumu [71].

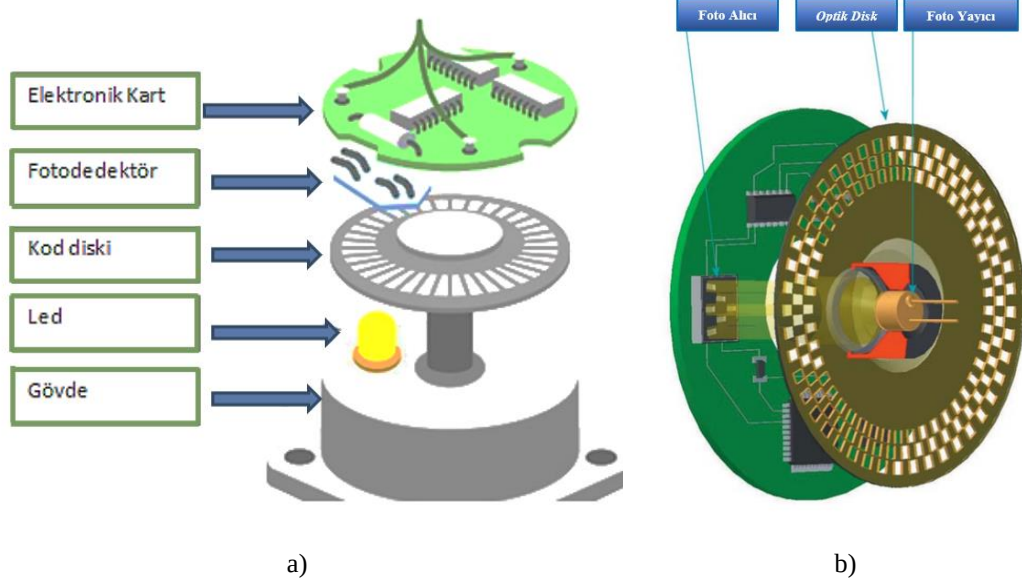
2.4.2. Optik kodlayıcılar (Encoder)

Optik kodlayıcılar, 1960'ların başında geliştirilmiş olup, ilk olarak askeri ve uzay uygulamalarında kullanılmıştır. Baldwin Electronics tarafından geliştirilen ilk ticari optik kodlayıcı, endüstriyel otomasyon alanında devrim yaratmıştır. Günümüzde kullanılan modern optik kodlayıcılar, bu temel tasarımın geliştirilmiş versiyonlarıdır [72]. Şekil 2.8'de örnek bir enkoder gösterilmektedir.



Şekil 2.8 : Enkoder.

Yapısal olarak optik kodlayıcılar, ışık kaynağı (genellikle LED), ışık dedektörü (fototransistör veya fotodiyot) ve aralarında dönen bir kodlanmış disk veya şeritten oluşmaktadır. Disk üzerinde, ışığın geçmesine izin veren şeffaf ve engel olan opak bölgeler bulunmaktadır. Artımlı (incremental) kodlayıcılarda disk üzerinde eşit aralıklı çizgiler, mutlak (absolute) kodlayıcılarda ise Gray kodu benzeri özel kodlama desenleri kullanılmaktadır. Aşağıda yer alan Şekil 2.9’da encoderlerin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.9 : İki farklı disk yapısına sahip enkoderin iç yapıları, (a) artımsal enkoder [73], (b) mutlak enkoder [74].

Çalışma prensibi, ışık kaynağından gelen ışının kodlanmış disk üzerinden geçerek dedektöre ulaşması esasına dayanmaktadır. Disk döndükçe, şeffaf ve opak bölgeler ışık yolunu kesintili olarak engellemektedir. Bu kesintiler, dedektör tarafından elektrik

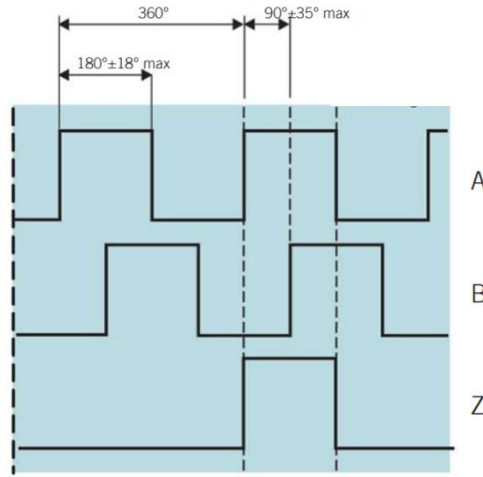
sinyallerine dönüştürülmektedir. Artımlı kodlayıcılarda genellikle A ve B olmak üzere 90 derece faz farklı iki sinyal üretilir, bu sayede hem konum hem de dönüş yönü belirlenmektedir.

Optik enkoderler, uygulama alanlarına göre iki ana kategoride sınıflandırılır: döner (rotary) ve doğrusal (linear) enkoderler. Her iki tip de aynı temel çalışma prensibine sahip olmakla birlikte, mekanik yapıları ve kullanım alanları farklılık göstermektedir. Bu ana kategoriler kendi içlerinde artımsal (incremental) ve mutlak (absolute) olarak iki alt gruba ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma, pozisyon bilgisinin kodlanma yöntemi ve referans noktasının belirlenmesi açısından önemli farklılıklar içermektedir.

Artımsal enkoderler, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu tercihte, maliyet etkinliği ve uygulama kolaylığı önemli rol oynamaktadır. Artımsal enkoderlerin çalışma prensibi, kodlayıcı disk üzerindeki eşit aralıklı şeffaf ve opak bölgelerin sayılmasına dayanmaktadır. Sistemin çözünürlüğü, bir tam turda üretilen darbe sayısı ile belirlenmektedir. Örneğin, 1000 PPR (Pulse Per Revolution) değerine sahip bir enkoder, her tam turda 1000 adet darbe üretir. Bu da açısal pozisyonun 0.36 derecelik hassasiyetle ölçülebilmesini sağlamaktadır.

Mutlak enkoderler ise daha karmaşık bir kodlama sistemine sahiptir. Kodlayıcı disk üzerinde, her bir açısal pozisyon için benzersiz bir kod deseni bulunmaktadır. Bu özellik, sistemin enerji kesintisi durumunda bile pozisyon bilgisini koruyabilmesini sağlamaktadır. Gray kodu gibi özel kodlama sistemlerinin kullanılması, okuma hatalarının minimize edilmesine yardımcı olmaktadır. Mutlak enkoderler, yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda ve pozisyon kaybının kritik sorunlara yol açabileceği sistemlerde tercih edilmektedir.

Enkoder çıkış sinyallerinin (A, B ve Z) her biri farklı bir işlevi yerine getirir ve motor kontrolünde hayati öneme sahiptir. A sinyali, açısal hızın belirlenmesinde kullanılır ve darbe frekansı ile doğrudan orantılıdır. B sinyali, A sinyaline göre 90 derece faz farklı olup, dönüş yönünün tespitini sağlamaktadır. Z sinyali ise her turda bir kez üretilen referans darbesidir ve hassas pozisyon kontrolü için başlangıç noktası olarak kullanılmaktadır. Modern uygulamalarda, bu sinyallerin dijital işlenmesi ile hız, ivme ve pozisyon bilgileri yüksek hassasiyetle elde edilebilmektedir. Şekil 2.10'da bir enkoderin çıkış sinyalleri gösterilmektedir.



Şekil 2.10 : Tipik bir enkoder çıkış sinyali [75].

2.4.3. Resolver (Çözücü)

Resolver teknolojisi, İkinci Dünya Savaşı sırasında radar sistemlerinin geliştirilmesi sürecinde ortaya çıkmıştır. İlk resolverlar, analog bilgisayarlarda açısal konum bilgisini işlemek için kullanılmıştır. 1950'lerden itibaren endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Yapısal olarak resolver, bir transformatöre benzer şekilde tasarlanmıştır (Şekil 2.11). Primer sargı rotor üzerinde, iki adet sekonder sargı ise stator üzerinde 90 derece açıyla yerleştirilmiştir. Rotor sargısı genellikle bir referans sinüsoidal sinyal ile uyarılmaktadır. Stator sargılarında, rotorun açısal konumuna bağlı olarak sinüs ve kosinüs formunda gerilimler indüklenmektedir [76].



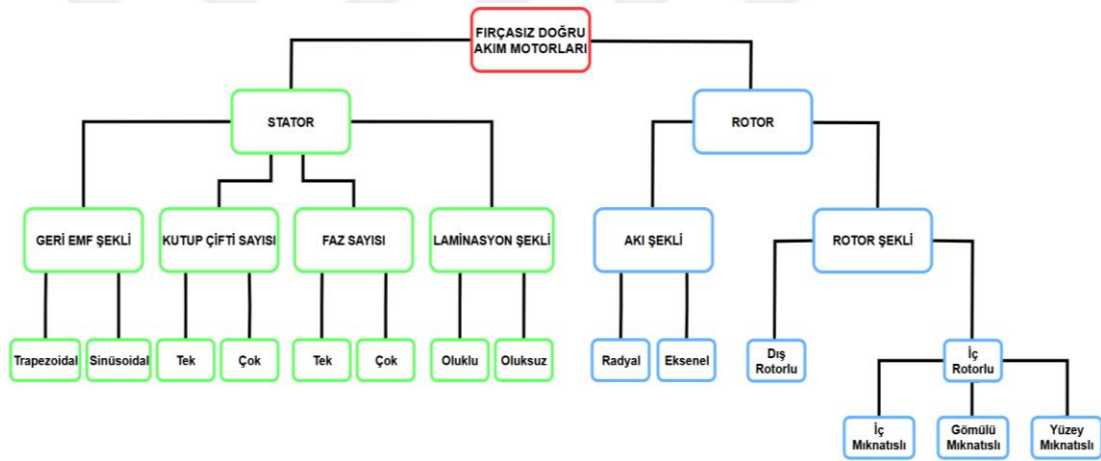
Şekil 2.11 : Resolver yapısı [76].

Çalışma prensibi, elektromanyetik endüksiyon yasasına dayanmaktadır. Rotor döndükçe, stator sargılarında indüklenen gerilimler, rotorun açısal konumunun sinüs ve kosinüs fonksiyonları ile orantılı olarak değişir. Bu sinyaller işlenerek rotorun

mutlak konumu yüksek hassasiyetle belirlenebilmektedir. Resolverlar, sağlam yapıları ve zorlu çevre koşullarında çalışabilmeleri nedeniyle özellikle ağır sanayi uygulamalarında tercih edilmektedir [76].

2.5. FDAM'lerin Sınıflandırılması

Fırçasız doğru akım (FDAM) motorları, tasarım ve uygulama alanlarındaki çeşitliliği nedeniyle farklı başlıklar altında sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmaların zamanla artmasının başlıca sebepleri arasında uygulama alanlarının artması ve daha önce tasarlanan motorlar üzerinden alınan test sonuçlarına göre yapılan optimizasyonlar yer almaktadır. Sınıflandırma, motorun özelliklerini anlamada ve belirli bir uygulamaya uygun motor seçmede önemli bir rehber niteliğindedir. Şekil 2.12'de FDAM'lerin sınıflandırılması gösterilmektedir.



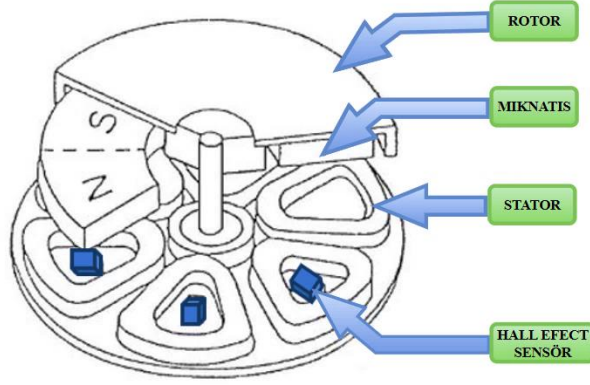
Şekil 2.12 : Fırçasız doğru akım motorlarının sınıflandırılması [58, 77].

Aşağıda yer alan üç temel başlık altında FDAM'lerin sınıflandırılması incelenmiştir.

2.5.1. Manyetik akı yönüne göre sınıflandırma

Eksenel akılı fırçasız doğru akım motorlarında, manyetik akı motor milinin eksenel boyunca hareket etmektedir. Bu yapının en dikkat çekici özelliği disk tipi tasarıma sahip olmasıdır; motor uzunluğu radyal akılı motorlara göre çok daha kısadır. Yüksek kutup sayısı elde edilebilmesi, düşük hızlarda yüksek tork üretimini mümkün kılmaktadır. Güç/ağırlık oranı oldukça yüksektir, bu da özellikle hafifliğin önemli olduğu uygulamalarda büyük avantaj sağlamaktadır. Eksenel akılı motorlarda hava aralığı ayarı kritiktir ve üretim sürecinde özel dikkat gerektirmektedir. Çoklu disk

yapısına imkan tanınması sayesinde, aynı hacimde daha yüksek güç yoğunluğu elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, eksenel yöndeki manyetik çekim kuvvetleri nedeniyle yatak tasarımı özel önem arz etmektedir. Ayrıca sargı yerleşimi ve soğutma sistemi tasarımı da radyal akıli motorlara göre daha karmaşıktır [78]. Şekil 2.13'te eksenel akıli FDAM'nin yapısı gösterilmektedir.



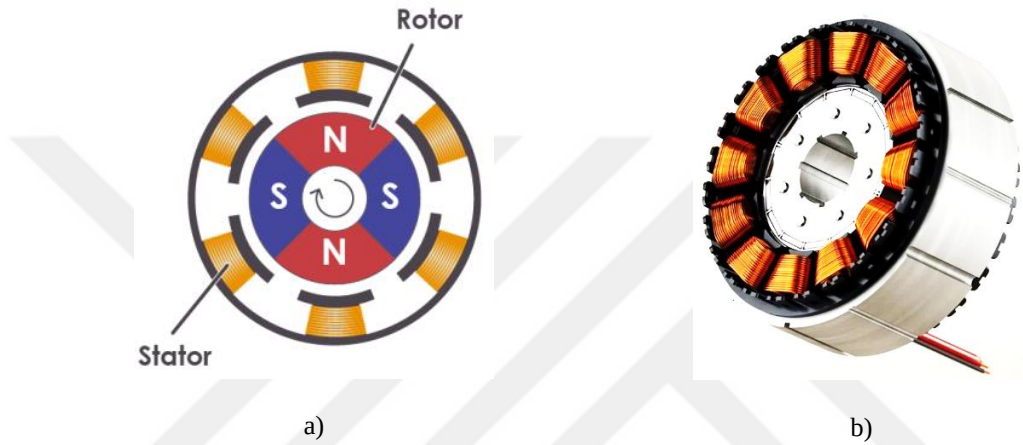
Şekil 2.13 : Eksenel akıli FDAM yapısı [79].

Radyal akıli FDAM'lerde manyetik akı, rotor miline dik yönde yani radyal olarak yönlendirilmiştir. Bu yapı endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan motor tipidir. Silindirik yapısı sayesinde üretimi göreceli olarak kolay ve maliyeti düşüktür. Hava aralığı kontrolü eksenel akıli motorlara göre daha kolaydır ve üretim toleransları daha geniştir. Standart üretim yöntemleriyle imal edilebilmeleri, seri üretime uygun olmalarını sağlar. Soğutma sistemi tasarımı daha basittir ve geleneksel soğutma yöntemleri rahatlıkla uygulanabilmektedir. Manyetik devre tasarımı açısından optimize edilmesi daha kolaydır ve manyetik malzeme kullanım verimliliği yüksektir. Bununla birlikte, disk tipi yapıya göre daha uzun bir motor boyuna sahiptir ve güç/hacim oranı eksenel akıli motorlara göre daha düşük olabilmektedir.

➤ İçten rotorlu FDAM (Inner rotor)

İçten rotorlu fırçasız doğru akım motorlarında, rotor yapısı motorun merkezinde konumlandırılmış olup, stator sargıları dış kısımda yer almaktadır. Bu yapının en önemli avantajı düşük rotor atalet momenti sayesinde yüksek dinamik performans elde edilmesidir. Hızlanma ve yavaşlama karakteristikleri oldukça iyidir, bu nedenle hassas pozisyon kontrolü gerektiren uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Termal açıdan değerlendirildiğinde, stator sargılarında oluşan ısının dış yüzeyden kolaylıkla atılabilmesi büyük avantaj sağlamaktadır. Bu sayede sürekli çalışma durumlarında bile

aşırı ısınma problemi minimum seviyededir. Motor boyutları açısından bakıldığında, içten rotorlu yapı daha kompakt bir tasarıma olanak tanımaktadır. Özellikle yüksek hız gerektiren uygulamalarda tercih edilir çünkü rotor çapının küçük olması merkezkaç kuvvetlerinin etkisini azaltmaktadır [1]. Ayrıca, hava aralığının kontrolü ve üretimi dıştan rotorlu yapıya göre daha kolaydır. Ancak, bazı uygulamalarda, özellikle tekerlek içi gibi özel kullanım alanlarında, bu tasarımlar tercih edilmemektedir. Şekil 2.14'te içten rotorlu FDAM'nin yapısı ve örnek bir içten rotorlu FDAM gösterilmektedir.

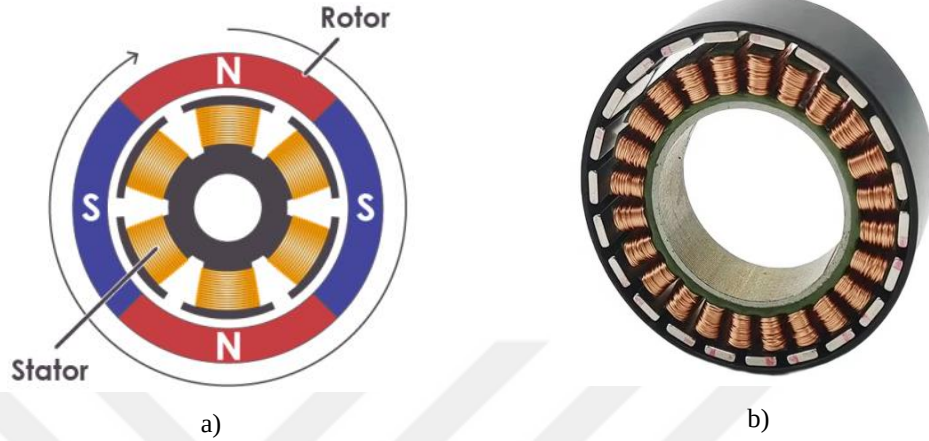


Şekil 2.14 : İçten rotorlu FDAM yapısı (a) [80] ve içten rotorlu FDAM (b) [81].

➤ Dıştan rotorlu FDAM (Outer rotor)

Dıştan rotorlu fırçasız doğru akım motorlarında, rotor yapısı motorun dış kısmında, stator ise iç kısımda yer almaktadır. Şekil 2.15'de dıştan rotorlu FDAM'nin yapısı ve ise örnek bir dıştan rotorlu FDAM gösterilmektedir. Bu tasarımın en belirgin özelliği, rotor çapının büyük olması sayesinde yüksek tork/hacim oranı elde edilebilmesidir. Yüksek atalet momenti nedeniyle hız regülasyonu oldukça iyidir ve hız dalgalanmaları minimum seviyededir. Fan uygulamalarında özellikle tercih edilir çünkü fan kanadı direkt olarak rotora monte edilebilir, bu da ekstra mekanik bağlantı elemanlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. İç rotorlu motorlarda rotorun her iki ucunu desteklemek için iki rulman kullanılması gerekirken, dış rotorlu motorlarda yalnızca bir rulman yeterli olmaktadır. Termal açıdan değerlendirildiğinde, stator sargılarının iç kısımda olması soğutma açısından bazı dezavantajlar oluşturabilmektedir. Bu nedenle yüksek güç yoğunluğu gerektiren uygulamalarda özel soğutma çözümleri gerekebilir [82]. Mekanik yapı olarak daha robust bir tasarıma sahiptir ve dış etkilere karşı daha dayanıklıdır. Elektrikli araçlarda BLDC motorların tercih edilmesinde

önemli etkenlerden biri, aktarım organlarının kullanım şeklidir. Eğer bir aktarım organı ile entegre bir yapı söz konusuysa, içten rotorlu fırçasız doğru akım motorları tercih edilmektedir. Bu motor, elektrikli araçlarda kullanılırken gerekli mekanik bileşenlerle güç aktarımını sağlayarak yeterli momenti üretebilmektedir.

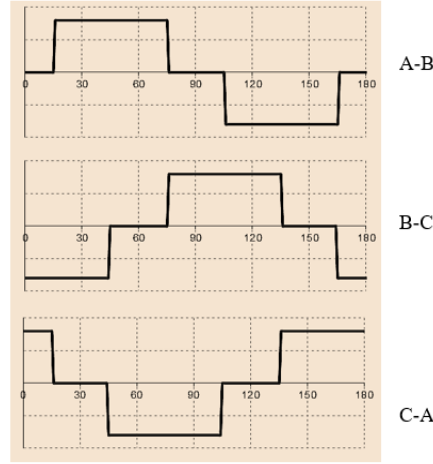


Şekil 2.15 : Dıştan rotorlu FDAM yapısı (a) [83] ve dıştan rotorlu FDAM (b).

2.5.2. Besleme gerilimlerine göre sınıflandırma

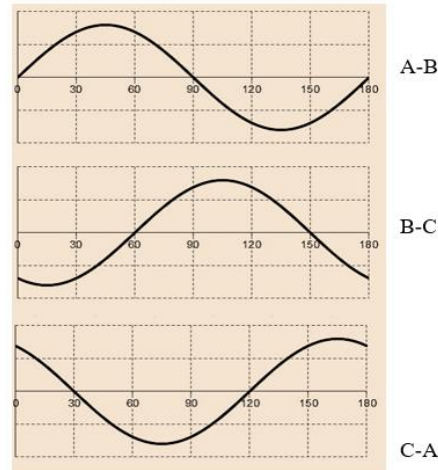
Fırçasız doğru akım motorları, sargılarında oluşan endükleme geriliminin formuna göre trapezoidal (kare dalga uyarımlı) ve sinüsoidal (sinüs dalga uyarımlı) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Literatürde, sinüsoidal fırçasız doğru akım motorları, sürekli mıknatıslı senkron motor olarak da adlandırılmaktadır [57].

Trapezoidal EMK'lı fırçasız doğru akım motorlarında, faz sargılarında indüklenen EMK trapezoidal forma sahiptir. Bu motorların kontrolü için kullanılan algoritmaları göreceli olarak basittir, bu da kontrol devresinin maliyetini düşürmektedir. Hall sensörleri ile rotor pozisyonu 60° elektriksel açı hassasiyetinde belirlenir, bu da çoğu uygulama için yeterli hassasiyeti sağlamaktadır. Motor sürüş devresinde genellikle altı adımlı komütasyon kullanılmaktadır [57]. Bu yapının en önemli dezavantajı, komütasyon anlarında oluşan tork dalgalanmalarıdır. Tork dalgalanmaları özellikle düşük hızlarda belirgin hale gelir ve bazı hassas uygulamalarda problem oluşturabilmektedir. Üretim maliyeti düşüktür ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle yüksek hassasiyet gerektirmeyen, maliyet odaklı uygulamalar için ideal bir seçim olarak karşımıza çıkmaktadır. Aşağıda yer alan Şekil 2.16'da trapezoidal zıt EMK dalga şekli gösterilmektedir.



Şekil2.16 : Trapezoidal zıt EMK dalga şekli [84].

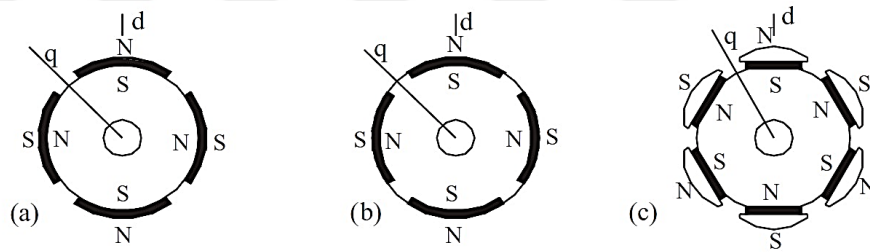
Sinüsoidal EMK'lı fırçasız doğru akım motorlarında, faz sargılarında indüklenen EMK sinüsoidal forma sahiptir. Bu motorların kontrolü için daha karmaşık algoritmalar gerekir ve genellikle alan yönlendirmeli kontrol (FOC) gibi gelişmiş kontrol teknikleri kullanılmaktadır. Rotor pozisyonu yüksek hassasiyetle ve sürekli olarak belirlenir, bu da hassas hız ve pozisyon kontrolüne imkan tanımaktadır. Tork dalgalanması trapezoidal EMK'lı motorlara göre çok daha düşüktür, bu da daha düzgün bir çalışma karakteristiği sağlamaktadır. Verim değeri daha yüksektir ve özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Bununla birlikte, kontrol devresi daha karmaşık ve maliyetlidir. Pozisyon sensörü olarak genellikle resolver veya enkoder kullanılmaktadır. Servo sistemler, hassas pozisyonlama sistemleri ve yüksek performans gerektiren endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [85,86]. Aşağıda yer alan Şekil 2.17'de sinüsoidal zıt EMK dalga şekli gösterilmektedir.



Şekil 2.17 : Sinüsoidal zıt EMK dalga şekli [84].

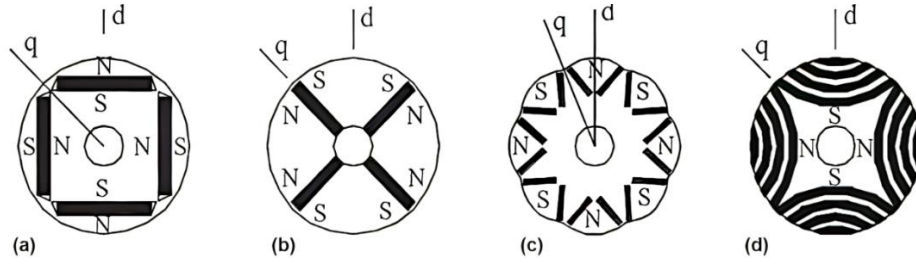
2.5.3. Sabit mıknatısların konumuna göre sınıflandırma

Yüzeye monte mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarında, kalıcı mıknatıslar rotor yüzeyine monte edilmiştir. Bu yapının en önemli avantajı üretim kolaylığı ve düşük maliyettir. Manyetik devrede saçılma akısı düşüktür, bu da motor verimini olumlu etkiler. D ve q eksenini endüktansları birbirine yakındır, bu nedenle relüktans torku ihmal edilebilir seviyededir. Mıknatıslar yüzeye monte edildiği için, yüksek hızlarda merkezkaç kuvvetlerine karşı özel koruma gerektirir. Bu genellikle karbon fiber veya özel metal bandajlar kullanılarak sağlanır. Manyetik akı yoğunluğu direkt olarak mıknatısların özelliklerine bağlıdır. Yüksek artık manyetik akı yoğunluğuna sahip NdFeB gibi mıknatıslar kullanılarak yüksek tork yoğunluğu elde edilebilmektedir [87]. Ancak yüksek sıcaklıklarda mıknatısların demagnetizasyon riski vardır. Şekil 2.18’de yüzeye monte mıknatıs şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 2.18 : Yüzeye monte mıknatıs şekilleri (a: yüzeye yapışık, b: yüzeye gömülü, c: kutup çarıklı) [88].

Gömülü mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarında, kalıcı mıknatıslar rotor içine gömülü şekilde yerleştirilmiştir. Bu yapı mekanik açıdan çok daha dayanıklıdır ve özellikle yüksek hız uygulamalarında tercih edilmektedir. Mıknatıslar rotor içine gömülü olduğundan, merkezkaç kuvvetlerine karşı doğal bir koruma sağlanır. D ve q eksenini endüktansları arasındaki fark belirgindir, bu da ek bir relüktans torku bileşeni oluşturmaktadır. Bu özellik, özellikle sabit güç bölgesinde çalışma aralığının genişletilmesine imkan tanımaktadır. Üretim süreci daha karmaşık ve maliyetlidir. Manyetik devre tasarımı, saçılma akısı ve manyetik köprülerdeki doyma etkilerinin göz önünde bulundurulması gerektiği için daha karmaşık hale gelmektedir. Rotordaki manyetik köprüler nedeniyle manyetik akı yoğunluğu yüzeye monte yapıya göre bir miktar düşük olabilmektedir [84]. Buna rağmen, relüktans torku katkısı ve yüksek hızlarda güvenli çalışma özelliği nedeniyle özellikle elektrikli araç uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.19’da rotora gömülü mıknatıs şekilleri gösterilmektedir.

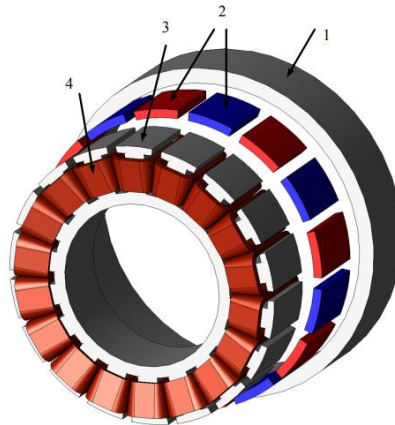


Şekil 2.19 : Rotor gömülü mıknatıs şekilleri (a:teğetsel gömülü, b:radyal gömülü, c:kutup başına iki mıknatıs gömülü, d:relüktans rotor) [88].

Gömülü mıknatıs tasarımı ayrıca manyetik kaçakları azaltarak motorun genel verimliliğini artırmaktadır. Bu özellikleriyle bu topoloji, otomotiv ve enerji sektörü gibi yüksek hız ve tork gerektiren uygulamalar için ideal bir çözüm sunmaktadır. Görselde yer alan bu farklı topolojiler, FDAM tasarımlarının uygulamaya özel gereksinimlere uygun şekilde optimize edilebileceğini göstermektedir. Her bir yapı, motorun hız, tork ve verimlilik performansını doğrudan etkileyerek, belirli kullanım alanlarına yönelik avantajlar sunmaktadır [84]. Bu tez çalışmasında tasarımı ve yapay zeka destekli olarak optimizasyonları yapılacak olan motor türü dıştan rotorlu fırçasız doğru akım motoru olarak belirlenmiştir. Bundan sonraki adımlarda bu motor özelinde bilgiler verilerek tasarım aşamasına geçilmiştir.

2.6. Dıştan Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Yapısı

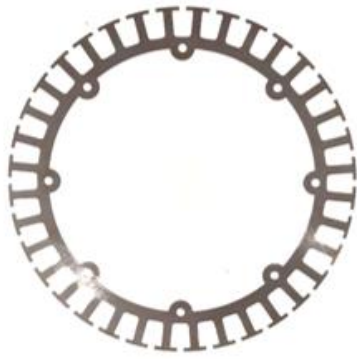
Bundan önceki bölümlerde de görüldüğü üzere birçok fırçasız doğru akım motoru çeşidi olduğu gözlemlenmiştir. Bu bölümde sadece dıştan rotorlu fırçasız doğru akım motorunun parçaları hakkında bilgiler verilmiştir (stator, rotor, sabit mınatıslar vb.) ve bu parçaların malzeme seçimleri incelenmiştir. Şekil 2.20’de dıştan rotorlu FDAM’nin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.20 : Dış rotorlu FDAM yapısı (1:rotor, 2:kalıcı mıknatıslar, 3:stator/statordışı, 4:bobin/sargı) [89].

2.6.1. Stator

FDAM’lerde stator, motorun sabit ve hareket etmeyen kısmını oluşturan temel bileşenlerden biridir. Stator, elektromanyetik alan oluşturarak rotorun dönmesini sağlayan bir yapıdır ve motorun performansını, verimliliğini ve çalışma karakteristiklerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle stator tasarımı, FDAM’lerin geliştirilmesinde kritik bir öneme sahiptir. Stator genellikle silisli çelik levhalardan (laminasyonlar) oluşmaktadır. Bu levhalar, manyetik akının yoğunlaştırılmasını sağlamakta ve girdap akımı (eddy current) kayıplarını azaltmaktadır. Çekirdek, ince laminasyon tabakalarının bir araya getirilmesiyle oluşturulur ve her bir tabaka yalıtılarak enerji kayıpları en aza indirgenmektedir. Aşağıdaki şekillerden 2.21’de bir tane stator sacı görüntüsü ve stator saclarının paket olarak tamamlanmış halinin bir görseli gösterilmektedir.



(a)

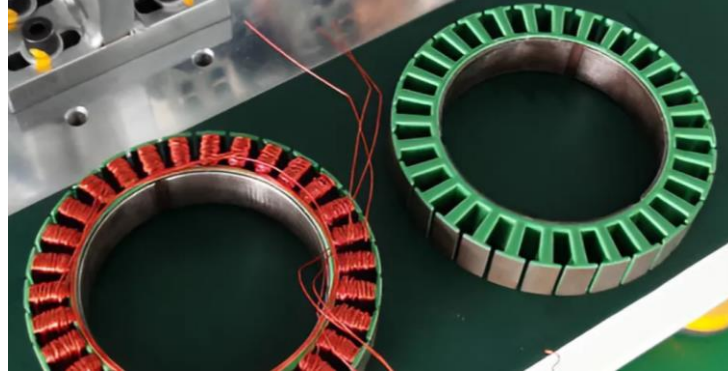


(b)

Şekil 2.21 : Stator sacının tane görüntüsü (a) ve paketlenmiş görüntüsü (b) [90].

Statorun iç yüzeyinde, rotorun karşısına gelecek şekilde düzenlenmiş oluklar (slot) bulunmaktadır. Bu oluklar, sargıların yerleştirilmesi için tasarlanmıştır. Olukların geometrisi ve düzeni, motorun titreşim, ses ve elektromanyetik performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. FDAM’lerde sargılar genellikle üç fazlı bir düzende (A, B, C fazları) düzenlenmiştir. Üç fazlı yapı, rotorun düzgün ve sürekli bir hareket gerçekleştirmesine olanak tanır. Sargılar, genellikle konsantrik ya da dağıtılmış (distributed) sarım yapılarında tasarlanır ve bu tasarımlar motorun verimliliğini doğrudan etkiler. Sargıların konumlandırılması, motorun moment ve performansını

doğrudan etkileyen kritik bir unsurdur. Şekil 2.22’de statorun sargılı ve sargısız durumları gösterilmektedir.



Şekil 2.22 : Sargılı ve sargısız stator [91].

Stator sargıları ile çekirdek arasındaki yalıtım, elektriksel güvenliği sağlamakta ve enerji kayıplarını önlemektedir. Yalıtım malzemesi, özellikle yüksek akım ve gerilim uygulamalarında kritik bir öneme sahiptir. Şekil 2.23’te stator paketine yerleştirilmiş olan presbant malzemesinin görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 2.23 : Presbant yerleşimi.

FDAM’lerde statorun tasarımı, motorun genel performansını, enerji verimliliğini ve çalışma ömrünü doğrudan etkilemektedir. Özellikle elektrikli ve hidrojen yakıtlı araçlar gibi yüksek verimlilik ve kompakt tasarım gereksinimlerinin bulunduğu uygulamalarda, stator tasarımının optimize edilmesi kritik bir öneme sahiptir.

Stator sargılarında kullanılan malzemenin seçimi, elektromanyetik kayıpların, termal sorunların ve manyetik doyum etkilerinin azaltılması açısından önemlidir. Ayrıca, yüksek frekanslı uygulamalarda sargı ve çekirdek tasarımındaki detaylar, motorun performansına önemli katkılar sağlamaktadır.

Silisli saclar, modern mühendisliğin en önemli malzeme teknolojisi uygulamalarından biridir. Bu özel saclar, yüksek silisyum içeriğine sahip düşük karbonlu çeliklerden üretilir ve elektromanyetik performansı optimize etmek için geliştirilmiş kritik bir bileşendir. Şekil 2.24'te rulo ve kesilmiş halde bulunan silisli saclar gösterilmektedir.



Şekil 2.24 : Rulo [92] ve 1m² silisli sac

Silisli sacların temel bileşimi, %3 ile %4,5 arasında değişen silisyum oranı içeren özel alaşımlı çeliklerden oluşmaktadır. Bu kimyasal bileşim, malzemenin manyetik özelliklerini belirgin şekilde iyileştirmektedir. Silisyum oranının artması, çeliğin manyetik geçirgenliğini yükseltirken, histeresis kayıplarını da önemli ölçüde azaltmaktadır. Böylece motor, daha az enerji kaybıyla daha verimli bir şekilde çalışabilmektedir.

Üretim sürecinde, silisli saclar ince levhalar halinde ve birbirinden yalıtılmış şekilde üretilmektedir. Tipik kalınlıkları 0.35 mm ile 0.5 mm arasında değişmektedir. Bu ince katmanların birbirinden yalıtılması, öğütülmüş cam veya özel organik kaplamalarla sağlanmaktadır. Yalıtım katmanı, gövdeler arasındaki akım dolaşımını engeller ve böylece döngüsel (eddy) akım kayıplarını minimize etmektedir [93].

Sacların dizilim şekli de son derece önemlidir. Genellikle radyal veya dairesel bir düzende istiflenirler ve her bir sac katmanı, motorun manyetik akısını optimize edecek şekilde hassasiyetle konumlandırılmaktadır. Bu dizilim, statorun manyetik alan üretme kapasitesini artırırken, mekanik dayanımı da korumaktadır.

Silisli sacların kullanımı, elektrik motorlarında birçok önemli avantaj sağlamaktadır. Başlıca avantajları şunlardır:

- Düşük manyetik kayıplar
- Yüksek manyetik geçirgenlik

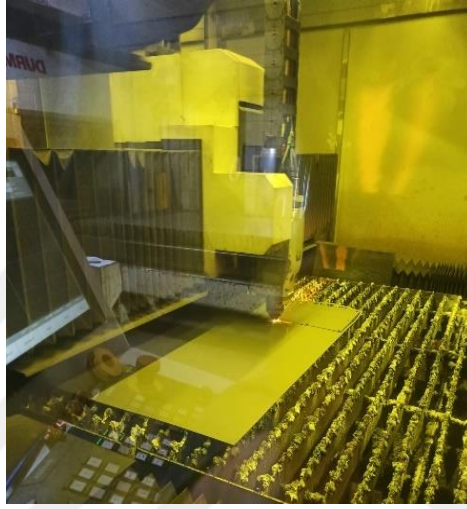
- Gelişmiş ısı yönetimi
- Daha düşük enerji tüketimi
- Uzun ömürlü motor performansı

Mühendislik uygulamalarında, silisli sacların seçimi titiz bir çalışma gerektirmektedir. Farklı silisyum oranları ve üretim teknikleri, motorun çalışma koşullarına göre optimize edilmektedir. Örneğin, yüksek hızlı motorlarda daha ince ve daha yüksek silisyum oranlı saclar tercih edilirken, yüksek moment gerektiren uygulamalarda farklı özelliklerde saclar kullanılmaktadır. Günümüz teknolojisinde, silisli sac üretimi sürekli gelişmektedir. Nano-kristal kaplamalı saclar, gelişmiş manyetik özelliklere sahip yeni nesil malzemeler ve gelişmiş üretim teknikleri, elektrik motorlarının performansını sürekli olarak artırmaktadır. Aşağıda yer alan Tablo 2.5'te bazı silisli sacların özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.5 : Silisli sacların özellikleri [94].

Cinsi	Sac Kalınlığı (mm)	50 Hz'deki Maksimum Spesifik Toplam Kayıp		50 Hz'deki Minimum Manyetik Polarizasyon			Yoğunluk
		B=1.5T	B=1.0T*	H=250 0	500 0	10000 A/m	
		W/kg	W/kg	T	T	T	
	mm						kg/dm ³
M210-35A	0.35	2.1	0.9	1.49	1.6	1.7	7.6
M230-35A	0.35	2.3	0.95	1.49	1.6	1.7	7.6
M235-35A	0.35	2.35	0.95	1.49	1.6	1.7	7.6
M250-35A	0.35	2.5	1	1.49	1.6	1.7	7.6
M270-35A	0.35	2.7	1.1	1.49	1.6	1.7	7.65
M300-35A	0.35	3	1.2	1.49	1.6	1.7	7.65
M330-35A	0.35	3.3	1.3	1.49	1.6	1.7	7.65
M230-50A	0.5	2.3	1	1.49	1.6	1.7	7.6
M250-50A	0.5	2.5	1.05	1.49	1.6	1.7	7.6
M270-50A	0.5	2.7	1.1	1.49	1.6	1.7	7.6
M290-50A	0.5	2.9	1.15	1.49	1.6	1.7	7.6
M310-50A	0.5	3.1	1.25	1.49	1.6	1.7	7.65
M330-50A	0.5	3.3	1.35	1.49	1.6	1.7	7.65
M350-50A	0.5	3.5	1.5	1.5	1.6	1.7	7.65
M400-50A	0.5	4	1.7	1.53	1.63	1.73	7.7
M470-50A	0.5	4.7	2	1.54	1.64	1.74	7.7
M470-50HP	0.5	4.7	2.2	1.63	1.71	1.81	7.7
M530-50A	0.5	5.3	2.3	1.56	1.65	1.75	7.7

Elektrik motorlarında kritik bir bileşen olan silisli sacların kesimi, modern mühendisliğin hassasiyet gerektiren bir uygulamasıdır. Endüstriyel üretimde farklı kesim teknolojileri kullanılmakta olup, her yöntemin kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Lazer kesim teknolojisi, son derece hassas (± 0.05 mm tolerans) ve minimal ısıl etkili kesimler sunarak ön plana çıkmaktadır. Özellikle ince ve hassas silisli sacların işlenmesinde tercih edilen bu yöntem, yüksek mühendislik standartlarını karşılamaktadır. Şekil 2.25'te sisli sacın lazer kesimi görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 2.25 : Silisli sacların lazer kesimi görüntüsü.

Mekanik kesim yöntemi, geleneksel ancak hala yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Düşük maliyeti ve yüksek üretim hızı nedeniyle endüstriyel ölçekli imalatlarda tercih edilmektedir. Waterjet kesim teknolojisi ise su basıncı kullanarak sacların kesilmesini sağlayan ve minimum ısıl deformasyon yaratan bir yöntemdir. Plazma kesim ise hızlı ve ekonomik olmasına karşın, kesim kenarlarında biraz daha kaba bir görünüm oluşturabilmektedir.

Telerezyon yöntemi ise en hassas kesim teknolojilerinden biri olup, özellikle yüksek mühendislik gerektiren özel uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu yöntem, ± 0.02 mm gibi son derece dar toleranslarda kesim yapabilme yeteneğine sahiptir. Kesim sırasında minimum ısıl etki ve mükemmel kenar kalitesi sağlanması, elektro-erozyonu diğer yöntemlerden ayıran temel özellikleridir. Şekil 2.26'da birtane stator paketinin telerezyon kesimi görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 2.26 : Stator paketinin telerezyon kesimi görüntüsü.

Kesim yöntemi seçiminde, sacın kalınlığı, üretim adedi, maliyet, istenen hassasiyet ve kenar kalitesi gibi faktörler belirleyici olmaktadır. Modern mühendislik uygulamalarında, genellikle üretim gereksinimlerine en uygun kesim teknolojisi seçilmekte ve sürekli olarak yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Silisli sac kesim teknolojileri, elektrik motorları performansını doğrudan etkileyen kritik bir mühendislik alanıdır.

2.6.2. Rotor

Rotor, FDAM'nin hareketli bileşenini oluşturur ve statorun ürettiği döner manyetik alanla etkileşime girerek mekanik dönüş hareketini sağlamaktadır. FDAM'lerde rotor, motorun performansı, tork üretimi ve verimliliği üzerinde doğrudan etkili olan kritik bir elemandır. Rotorun tasarımı ve malzeme seçimi, motorun çalışma karakteristiklerini önemli ölçüde belirlemektedir.

Dıştan rotorlu FDAM tasarımlarında, mıknatısların konumlandırılması motorun yapısal ve termal performansını doğrudan etkilemektedir. Bu konfigürasyonda, mıknatıslar dış taraftaki rotorun iç yüzeyinde konumlandırılır, bu durum içten rotorlu motorlarda karşılaşılan merkezkaç kaynaklı savrulma riskini önemli ölçüde azaltmaktadır. İçten rotorlu tasarımlarda sargıların ısısı statordan motor gövdesine kolaylıkla transfer olurken, dıştan rotorlu motorlarda bu ısı transferi daha karmaşık bir hal almaktadır [95]. Şekil 2.27'de dıştan rotorlu FDAM rotoru gösterilmektedir.



Şekil 2.27 : Dıştan rotorlu FDAM rotor görüntüsü.

Dıştan rotorlu motor konfigürasyonunda, stator iç kısımda yer aldığından, ek bir soğutma mekanizması olmaksızın sargılardaki ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılması zorlaşmaktadır. Bu yapısal özellik, stator sargılarının aşırı ısınmasına ve motorun toplam ısı dağılım performansının düşmesine neden olmaktadır. Sargıların konumlanış biçimi, bu motor tipinin çalışma parametrelerini sınırlandırmakta ve daha düşük devir aralığında ve düşük nominal akım değerlerinde çalışmasını gerekli kılmaktadır.

FDAM’lerde rotor, mekanik enerjinin üretilmesinden doğrudan sorumludur ve bu nedenle motorun toplam verimliliği ve performansında kilit bir rol oynamaktadır. Elektrikli ve hidrojenli araçlar gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda, rotorun mıknatıs yerleşimi ve tasarım optimizasyonu motorun enerji verimliliğini artırmaktadır. Ayrıca, rotor tasarımı, motorun boyutunu ve ağırlığını etkileyerek kompakt tasarım gerektiren uygulamalarda önemli bir belirleyici faktör olmaktadır. Özellikle gömülü mıknatıslı tasarımlar, bu tür uygulamalarda yüksek tork yoğunluğu ve verimlilik avantajları sağlamaktadır.

Rotorun yapısal temeli, genellikle düşük kayıplı silisyum çelik malzemelerden oluşan bir çekirdek üzerine inşa edilmektedir. Bu çekirdek, kalıcı mıknatısların monte edildiği ve mekanik hareketin gerçekleştiği ana taşıyıcı yapıdır. Fakat modern mühendislik uygulamalarında, dıştan rotorlu motor tasarımlarında geleneksel silisli sac yapısına alternatif olarak, entegre tek parça rotor yapıları da kullanılabilmektedir. Bu yenilikçi yaklaşım, motor üretiminde malzeme ve tasarım açısından farklı bir perspektif sunmaktadır. Tek parça rotor yapısı, klasik lamine sac yapılarına kıyasla daha kompakt ve bütünleşik bir dizayn imkânı sağlamakta, aynı zamanda motor üretim süreçlerinde bazı mühendislik avantajları da beraberinde getirmektedir. Bu alternatif rotor tasarımı, özellikle hassas mühendislik uygulamalarında ve belirli performans gereksinimlerinde tercih edilebilmektedir. Tek parça rotor yapısı, geleneksel çok

katmanlı silisli sac yapılarına kıyasla daha az parça sayısı ve daha az montaj gereksinimi sunarak üretim verimliliğini artırabilmektedir.

Rotorlarda, kullanılan kalıcı mıknatıs malzemeler motorun performansını belirleyen bir diğer hayati bir bileşendir. Nadir toprak elementlerinden elde edilen NdFeB (Neodyum Demir Bor) ve SmCo (Samaryum Kobalt) mıknatıslar, yüksek manyetik akı yoğunluğu ve koersivite özellikleriyle öne çıkmaktadır. Bu mıknatısların seçimi, motorun verim, moment, hız ve sıcaklık dayanımı gibi temel performans parametrelerini doğrudan etkilemektedir [96].

Rotorun mekanik tasarımı da son derece önemlidir. Dengeli bir rotor tasarımı, titreşimleri azaltır, mekanik dayanımı artırır ve motorun ömrünü uzatmaktadır. Rotor, hassas dinamik dengeleme gerektiren bir bileşendir. Üretim sırasındaki en ufak dengesizlik bile motor performansında önemli sapmalara neden olabilmektedir. Bu nedenle, rotor imalatında yüksek hassasiyet ve kalite kontrol mekanizmaları kritik öneme sahiptir.

2.6.3. Sürekli (kalıcı-daimi) mıknatıslar

Mıknatıs teknolojisinin evrimsel süreci, bilim ve mühendislik alanlarında sürekli bir gelişim ve inovasyon sürecini yansıtmaktadır. Sabit mıknatıs malzemelerin tarihsel gelişimi, 1930'lu yıllarda Tokyo Üniversitesi'ndeki araştırmacıların AlNiCo (Alüminyum-Nikel-Kobalt) alaşımlarını keşfetmesiyle önemli bir dönüm noktası yakalamıştır. Bu dönemde geliştirilen mıknatıs malzemeleri, yüksek manyetik akı yoğunluğu ve optimize edilmiş enerji parametreleri ile karakterize edilmiştir [97].

1950'li yıllarda seramik ve sert ferrit mıknatıs malzemelerin bilimsel ve teknolojik gelişimi, sabit mıknatıs uygulamalarının endüstriyel ve akademik spektrumunu genişletmiştir. Bu süreç, malzeme bilimi ve manyetik özellikler arasındaki kompleks ilişkinin daha derinlemesine anlaşılmasına katkı sağlamıştır [97].

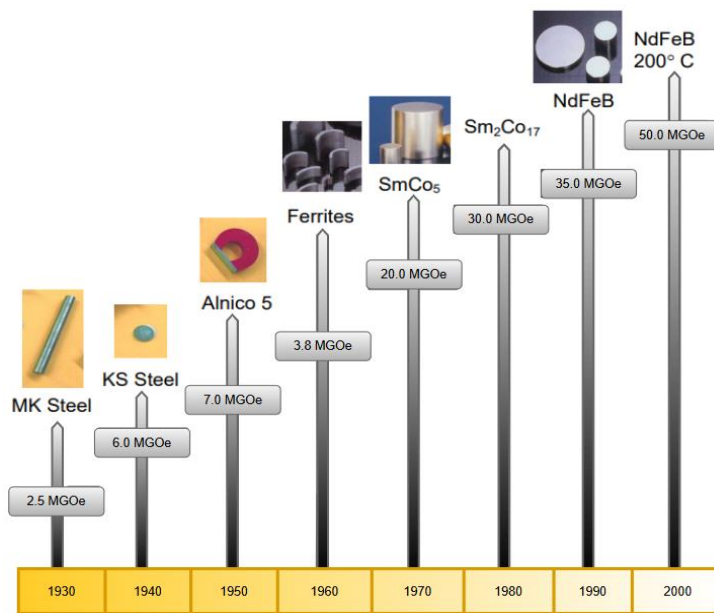
Nadir toprak elementlerinin mıknatıs teknolojisine entegrasyonu, 1960'lı yıllarda SmCo (Samaryum-Kobalt) alaşımlarının ticari ölçekte üretilmesiyle ivme kazanmıştır. Söz konusu gelişme, manyetik malzemelerin performans ve verimlilik kriterlerinde önemli bir sıçrama sağlamıştır. Bilimsel araştırmaların en son aşamasında ise NdFeB (Neodmiyum-Demir-Bor) alaşımları, öncül nadir toprak mıknatıs malzemelerinin

teknik özelliklerini korurken, maliyet etkinliği açısından daha optimize bir çözüm olarak öne çıkmıştır [57].

Sürekli mıknatıslar, üretildikleri malzemelerin özelliklerine, performans seviyelerine ve üretim maliyetlerine bağlı olarak farklı sınıflara ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma, mıknatısların kullanım amacına ve uygulama alanlarına göre en uygun seçimin yapılmasına olanak tanımaktadır.

FDAM’lerde rotorun üzerine yerleştirilen sabit mıknatıslar, motorun çalışmasında kritik bir role sahiptir. Bu mıknatıslar, statorun ürettiği manyetik alanla etkileşim sağlayarak rotorun dönmesini mümkün kılar. Rotor tasarımında kullanılan sabit mıknatısların uzun süreli ve kararlı bir manyetik alan üretebilmesi büyük önem taşır. Özellikle sıcaklık gibi çevresel koşulların etkisiyle mıknatısların manyetik özelliklerinin azalması, motor performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle, seçilecek mıknatısın termal dayanıklılığı ve manyetik kararlılığı tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır.

Sabit mıknatıs malzemelerin karakterizasyonu, mühendislik ve malzeme bilimi perspektifinden kritik bir inceleme alanı oluşturmaktadır. Mıknatısların manyetik ve termal özelliklerinin detaylı bilimsel parametreleri, teknolojik uygulamalarda optimize tasarım ve malzeme seçimi için temel bir epistemolojik çerçeve sağlamaktadır. Aşağıdaki şekilde mıknatısların kullanımı kronolojik olarak gösterilmektedir (Şekil 2.28).



Şekil 2.28 : Mıknatısların geçmişten günümüze olan kullanımları [98].

Sabit mıknatısların özellikleri incelenmeden önce belirli başlı parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Bu özellikler aşağıda açıklanmıştır.

➤ *Kalıcı mıknatıslanma (Remanans - Br)*

Kalıcı mıknatıslanma, kapalı bir manyetik devre içerisinde tam doygunluk durumundaki artık manyetik akı yoğunluğunun kantitatif bir göstergesidir. Uluslararası birim sisteminde Tesla (T) ve Gauss (G) sisteminde ölçümlenen bu parametre, mıknatısın manyetik performans potansiyelini karakterize etmektedir. Modern nadir toprak mıknatıs malzemelerde tipik remanans değerleri yaklaşık 1,5 T seviyesinde gözlemlenmektedir. Br parametresi, mıknatısın enerji transfer kapasitesi ve manyetik moment karakteristiklerinin doğrudan bir fonksiyonu olarak yorumlanabilmektedir [57].

➤ *Koersivite (Hc)*

Koersivite, mıknatısın manyetik polarizasyonunu nötralize etmek için gerekli ters yönlü manyetik alan şiddeti parametresidir. Bilimsel olarak kA/m (kiloamper/metre) biriminde nicelendirilmektedir. Yüksek koersivite değeri, mıknatısın manyetik yapısının dış manyetik alan etkileşimlerine karşı gösterdiği direncin bir göstergesidir. Bu parametre, özellikle ekstrem termal ve mekanik yük koşullarında mıknatısın kararlılığını belirleyen kritik bir metriktir [57].

➤ *Manyetik geçirgenlik (μ)*

Manyetik geçirgenlik, malzemelerin manyetik akı iletkenliğini tanımlayan temel bir fiziksel özelliktir. Sabit mıknatıs malzemelerin manyetik geçirgenliği, boşluğun manyetik geçirgenliğine kıyasla minimal farklılıklar göstermektedir. Demir gibi ferromanyetik malzemelerin manyetik geçirgenliği ise boşluğunkinden yaklaşık 1000 kat daha yüksektir. Bu parametre, manyetik devre analizlerinde ve malzeme karakterizasyonunda temel bir hesaplama bileşenidir [57].

➤ *Maksimum enerji çarpanı (BH):*

Maksimum enerji çarpanı, mıknatısın birim hacimde depolayabileceği manyetik enerji miktarını tanımlayan bütünleşik bir performans metrisidir. kJ/m³ (kilojoule/metreküp) biriminde ifade edilen bu parametre, mıknatısın enerji dönüşüm verimliliğinin

kantitatif bir göstergesidir. Yüksek BH değeri, daha kompakt geometrilerde üstün manyetik performans elde edilmesine olanak sağlamaktadır [57].

➤ *Curie sıcaklığı (T_c):*

Curie sıcaklığı, malzemenin ferromanyetik özelliklerinden paramanyetik duruma geçiş noktasını tanımlayan termodinamik bir sınır değeridir. °C birimiyle nicelendirilir ve mıknatısın yapısal manyetik kararlılığının termal davranış sınırını belirlemektedir. Yüksek Curie sıcaklığına sahip mıknatıs malzemeleri (örneğin SmCo alaşımları), yüksek sıcaklık performansı gerektiren mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir [57].

Bu bilimsel parametreler, sabit mıknatıs malzemelerin performans karakterizasyonunda bütünleşik bir analitik çerçeve oluşturmaktadır. Özellikle fırçasız doğru akım (BLDC) motorları gibi yüksek hassasiyet gerektiren teknolojik uygulamalarda, söz konusu parametrelerin sistematik değerlendirilmesi kritik bir mühendislik yaklaşımı oluşturmaktadır.

FDAM’lerde sabit mıknatıs malzemesi olarak genellikle Alnico (AlNiCo), Samaryum Kobalt (SmCo) ve Neodimyum-Demir-Bor (NdFeB) kullanılmaktadır. Bu malzemeler, mıknatısın uygulama alanına ve motorun gereksinimlerine bağlı olarak tercih edilmektedir. Alnico, yüksek sıcaklık dayanımıyla öne çıkarken, SmCo ve NdFeB, yüksek manyetik akı yoğunluğu ve enerji ürününe sahip olmaları nedeniyle daha kompakt ve verimli tasarımlar için sıklıkla tercih edilmektedir. Bahsedilen bu mıknatıslar aşağıda açıklanmaktadır.

➤ *Neodyum (NdFeB) mıknatıslar*

Nadir toprak element grubunun en gelişmiş manyetik malzemesi olan Neodyum mıknatıslar, Neodimyum-Demir-Bor (NdFeB) alaşımından oluşmaktadır. Bu mıknatıs tipi, günümüz teknolojisinde en yüksek manyetik enerji çarpanına (maksimum 52 MGOe) sahip ticari mıknatıs sınıfını temsil etmektedir. Moleküler yapısındaki nadir toprak elementlerin varlığı, olağanüstü manyetik performans sağlamakla birlikte, yapısal olarak korozyon ve yüksek sıcaklık hassasiyeti gibi sınırlayıcı özellikleri de beraberinde getirmektedir. Aşağıda yer alan Tablo 2.6’da NdFeB mıknatıs çeşitlerinin bazılarının manyetik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.6 : NdFeB mıknatısların manyetik özellikleri [99].

Sınıfı	Üretilen Maksimum Enerji		Kalıcılık		Zorlayıcı Kuvvet				Sıcaklık Katsayısı		Curie Sıcaklığı	Maksimum Çalışma Sıcaklığı
	(BH) maksimum		B _r		H _c		H _{ci}		B _d	H _d	T _c	T _w
	MGOe	kJ/ m ³	kg	mT	koe	kA/m	koe	kA/m	%/°C	%/°C	°C	°C
N30	28-31	223-247	11	1100	>10,2	>812	>12,0	>955	-0,12	-0,60	310	80
N33	31-33	247-263	11,5	1150	>10,5	>836	>12,0	>955	-0,12	-0,60	310	80
N35	33-36	263-287	12	1200	>10,9	>868	>12,0	>955	-0,12	-0,60	310	80
N38	36-39	287-310	12,4	1240	>11,3	>899	>12,0	>955	-0,12	-0,60	310	80
N40	38-41	302-326	12,7	1270	>11,4	>907	>12,0	>955	-0,12	-0,60	310	80
N42	40-43	318-342	13	1300	>11,5	>915	>12,0	>955	-0,12	-0,60	310	80
N45	43-46	342-366	13,5	1350	>11,6	>923	>12,0	>955	-0,12	-0,60	310	80
N48	46-49	366-390	14	1400	>11,6	>923	>12,0	>955	-0,12	-0,60	310	80
N50	48-51	382-406	14,3	1430	>10,3	>820	>12,0	>955	-0,12	-0,60	310	80
N52	50-53	398-422	14,5	1450	>10,3	>820	>11,0	>877	-0,12	-0,60	310	80
N33M	31-33	247-263	11,5	1150	>10,5	>836	>14,0	>1114	-0,12	-0,59	320	100
N35M	33-36	263-287	12	1200	>10,9	>868	>14,0	>1114	-0,12	-0,59	320	100
N38M	36-39	287-310	12,4	1240	>11,4	>907	>14,0	>1114	-0,12	-0,59	320	100
N33H	31-34	247-271	11,5	1150	>10,5	>836	>17,0	>1353	-0,11	-0,58	320-350	120
N35H	33-36	263-287	12	1200	>10,9	>868	>17,0	>1353	-0,11	-0,58	320-350	120
N38H	36-39	287-310	12,4	1240	>11,4	>907	>17,0	>1353	-0,11	-0,58	320-350	120
N40H	38-41	302-326	12,7	1270	>11,6	>923	>17,0	>1353	-0,11	-0,58	320-350	120
N42H	40-43	318-342	13	1300	>12,0	>955	>17,0	>1353	-0,11	-0,58	320-350	120
N45H	43-46	342-366	13,5	1350	>12,5	>999	>17,0	>1353	-0,11	-0,58	320-350	120
N48H	46-49	366-390	14	1400	>12,9	>1027	>17,0	>1353	-0,11	-0,55	340-360	120
N30SH	28-31	223-247	11	1100	>10,2	>812	>20,0	>1592	-0,11	-0,55	340-360	150
N33SH	31-34	247-271	11,5	1150	>10,6	>844	>20,0	>1592	-0,11	-0,55	340-360	150
N35SH	33-36	263-287	12	1200	>11,0	>876	>20,0	>1592	-0,11	-0,55	340-360	150
N38SH	36-39	287-310	12,4	1240	>11,4	>907	>20,0	>1592	-0,11	-0,55	340-360	150
N40SH	38-41	302-326	12,7	1270	>11,8	>939	>20,0	>1592	-0,11	-0,55	340-360	150
N42SH	40-43	318-342	13	1300	>12,4	>987	>20,0	>1592	-0,11	-0,55	340-360	150
N45SH	43-46	342-366	13,5	1350	>12,6	>1003	>20,0	>1592	-0,11	-0,51	350-380	150
N28UH	26-29	207-231	10,6	1060	>9,6	>764	>25,0	>1990	-0,11	-0,51	350-380	180
N30UH	28-31	223-247	11	1100	>10,2	>812	>25,0	>1990	-0,11	-0,51	350-380	180
N33UH	31-34	247-271	11,5	1150	>10,8	>860	>25,0	>1990	-0,11	-0,51	350-380	180
N35EH	33-36	263-287	12	1200	>11,1	>884	>30,0	>2388	-0,11	-0,51	350-380	200
N38EH	36-39	287-310	12,4	1240	>11,5	>915	>30,0	>2388	-0,11	-0,51	350-380	200
N28AH	26-29	207-231	10,7	1070	>9,8	>780	>35,0	>2786	-0,11	-0,51	350-380	220
N30AZ	28-31	223-247	11,1	1110	>10,2	>812	>35,0	>2786	-0,11	-0,51	350-380	220
N33AH	31-34	227-271	11,5	1150	>10,8	>860	>35,0	>2786	-0,11	-0,51	350-380	220
N35AH	33-36	263-287	12	1200	>11,1	>884	>35,0	>2786	-0,11	-0,51	350-380	220

➤ *Samaryum kobalt (SmCo) mıknatıslar*

SmCo mıknatıslar, nadir toprak element grubunun bir diğer önemli üyesi olup, termal kararlılık ve korozyon direnci açısından üstün özellikler sergilemektedir. Samaryum-Kobalt alaşımları, 300°C'ye kadar manyetik özelliklerini koruyabilme kapasitesine sahiptir. Bu özellik, havacılık, askeri sistemler ve ekstrem çevre koşullarında çalışan endüstriyel uygulamalar için kritik bir avantaj oluşturmaktadır [100].

➤ *AlNiCo mıknatıslar*

Alüminyum, Nikel ve Kobalt elementlerinin alaşımından oluşan AlNiCo mıknatıslar, geleneksel manyetik malzeme teknolojisinin önemli bir bileşenidir. Yüksek sıcaklık toleransları ve kararlı manyetik özellikleri, sensör teknolojileri ve elektromanyetik cihazlarda yaygın kullanım alanı bulmalarını sağlamıştır. Bununla birlikte, modern nadir toprak mıknatıslarına kıyasla daha düşük manyetik performans göstermektedirler. Yaygın kullanım alanları ölçüm aletleri ve ısıtma işlem fırınlarındaki tutucu gibi yüksek sıcaklık işlemleridir [100].

➤ *Seramik (Ferrit) mıknatıslar*

Demir oksit bazlı seramik mıknatıslar, ekonomik ve üretim açısından optimize edilmiş manyetik malzemelerdir. Düşük maliyet, yüksek korozyon direnci ve geniş üretim toleransları, bu mıknatıs tipini elektronik ve elektrik mühendisliği uygulamalarında cazip kılmaktadır. Ancak düşük manyetik performans ve kırılgan mekanik yapıları, kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Başlıca sınıfları C1, C5 ve C8'dir. Çoğunlukla motorlar ve sensörlerde kullanılmaktadırlar [100].

2.6.4. FDAM'nin manyetik devre modeli

Manyetik alan, elektriksel enerjinin mekanik enerjiye dönüştürülmesinde kritik bir rol oynayan temel bir kavramdır. Motorlar, jeneratörler ve transformatörler gibi enerji dönüşüm sistemlerinde manyetik alanın kullanımı, çeşitli fiziksel ilkelerle açıklanabilmektedir [101]. Bu ilkeler, manyetik alanın nasıl meydana geldiğini ve bu alanın elektriksel ve mekanik enerjiyi nasıl dönüştürdüğünü anlamamıza yardımcı olmaktadır.

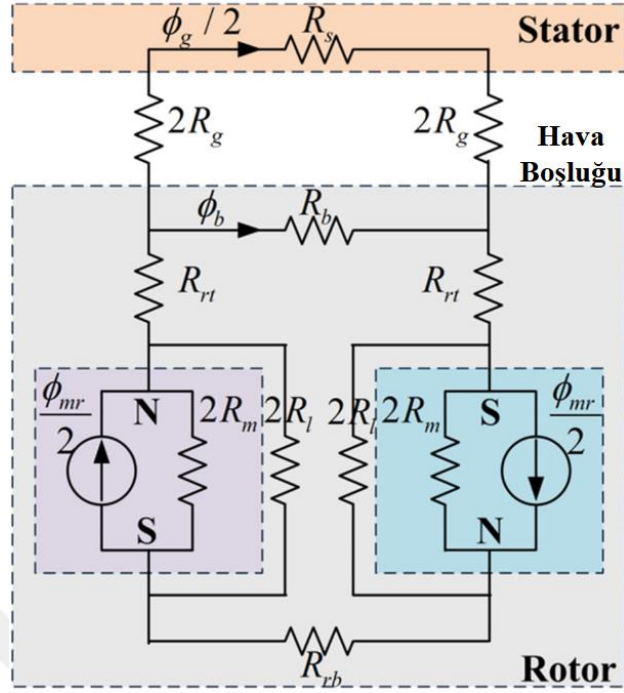
Birinci ilkeye göre, bir iletken tel üzerinden elektrik akımı geçtiğinde çevresinde bir manyetik alan meydana gelmektedir. Bu ilke, Amper Yasası olarak bilinir ve elektrik akımının manyetik alan oluşturma özelliğini tanımlamaktadır [101].

İkinci ilkeye göre, bir iletkenin üzerinden akım geçtiği sırada, bu iletkenin manyetik alan içinde bir kuvvet etkisiyle karşılaştığı gözlemlenmektedir. Biot-Savart Yasası olarak bilinen bu ilke, motorların temel çalışma prensiplerinden biridir. Motorların çalışması, manyetik alanla etkileşen bir akım taşıyan iletkenin hareketinden kaynaklanan kuvvetler sayesinde gerçekleşir [101].

Üçüncü ilke, manyetik alan içerisinde hareket eden bir iletkende gerilim indüklendiğini belirtmektedir. Bu prensip, jeneratörlerin çalışma ilkesini oluşturmaktadır ve manyetik alan ile hareketin etkileşimiyle elektrik enerjisi üretimini açıklamaktadır [101].

Dördüncü ve son ilke ise zamanla değişen bir manyetik alanın etkisinde kalan bir bobinde gerilim indükleneceğini belirtmektedir. Bu ilke, transformatörlerin çalışma prensibini tanımlar ve enerji iletimi veya dönüşümü için önemlidir. FDAM'ler, bu temel manyetik ilkelere dayanan sistemlerdir. FDAM'lerin, stator ve rotoru arasında oluşan manyetik alanlar arasındaki etkileşim, motorun dönmesini sağlar. Stator, elektrik akımını taşıyan bobinlerden oluşurken, rotor ise sabit mıknatıslar kullanılarak manyetik alan oluşturmaktadır. Akım, stator bobinlerinde yön değiştirilerek rotor üzerinde bir manyetik alan oluşturur ve bu alan rotorun dönmesini sağlayacak kuvveti üretmektedir. Bu süreç, Biot-Savart Yasası'na dayanarak manyetik alan içinde hareket eden iletkenin üzerine etki eden kuvvetler sayesinde gerçekleşmektedir [101]. Ayrıca, FDAM'lerin verimliliği, zamanla değişen manyetik alanların etkisinde kalan bobinlerdeki gerilim indüksiyonu gibi ilkelere dayalı olarak yüksek performans sergilemektedir.

FDAM'lerin çalışması, motorun manyetik devresindeki kompleks etkileşimler tarafından yönlendirilmektedir. Bu nedenle, manyetik devrenin modellenip analiz edilmesi, FDAM'lerin tasarımı ve performansı için kritik önem taşımaktadır. Şekil 2.29'da sunulan şematik gösterim, FDAM'nin manyetik devre yapısını ve işleyişini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 2.29 : FDAM'nin manyetik eşdeğer devresi [102].

Modelin temel bileşenleri, stator ve rotor yapılarıdır. Stator, manyetik akının yönlendirilmesinden ve motorun hareketinin desteklenmesinden sorumlu elektromanyetik bir yapıdır. Rotor ise sabit mıknatıslar içeren, manyetik alanın üretildiği kısımdır. Stator ve rotor arasındaki boşluk, "hava aralığı" olarak adlandırılır ve manyetik devrenin en kritik elemanlarından biridir. Hava aralığının genişliği, manyetik akı yolundaki direnci (R_g) belirler ve motor performansını doğrudan etkilemektedir. Aşağıdaki yer alan Tablo 2.7'de, Şekil 2.29'da yer alan manyetik eşdeğer devrede bulunan sembollerin açıklaması bulunmaktadır.

Tablo 2.7 : Manyetik eşdeğer devresindeki sembollerin açıklaması.

Sembol	Açıklama
Φ_g	Hava aralığı akısı
Φ_b	Rotor kutupları arasındaki rotor kaçak akısı
$\Phi_{mr}/2$	Mıknatıs tarafından üretilen akı
R_g	Hava aralığı relüktansı
R_b	Rotor kaçak relüktansı
R_m	Mıknatısın iç kaçak relüktansı
R_s	Stator çekirdeğin relüktansı
R_{rt}	Rotor boyunduruğunun relüktansı

Manyetik akı (Φ), rotor üzerindeki sabit mıknatıslardan kaynaklanır ve kuzey (N) ile güney (S) kutupları arasında bir döngü oluşturmaktadır. Akı, rotordaki manyetik dirençle (R_m) karşılaşır, ardından hava aralığından (R_g) geçerek stator devresine ulaşmaktadır. Stator içinde akı, statorun manyetik direnci (R_s) tarafından yönlendirilir ve devresini tamamlamak üzere geri dönüş yapmaktadır.

Rotor üzerindeki sabit mıknatıslar, manyetik akının kaynağını oluşturmaktadır. Bu mıknatısların özellikleri, motorun performansını belirleyen kritik parametrelerdir. Mıknatısların enerji çarpanı, kalıcı mıknatıslık değeri ve manyetik alanları, motorun güç yoğunluğu, verim ve diğer karakteristikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir.

Manyetik devre modeli, elektrik devrelerinin bir analogudur. Manyetik akı (Φ) ile elektrik akımı (I), manyetik kuvvet (F) ile gerilim (V), manyetik direnç (R) ile elektrik direnci (R) arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Bu analogi sayesinde, manyetik devrelerdeki akışkanlık ve kayıplar, elektrik devrelerinin matematiksel yöntemleriyle analiz edilebilmektedir. Görseldeki devre modeli, bu elektriksel-manyetik analogiye dayalı olarak tasarlanmıştır ve manyetik devre analizini kolaylaştırmaktadır [85].

2.6.5. Oluk-kutup oranının belirlenmesi

Elektrik motoru tasarımında oluk-kutup oranının doğru seçilmesi, motorun verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Oluk-kutup oranı, motorun statorundaki oluklar ile rotorundaki kutupların sayısı arasındaki ilişkiyi tanımlar ve bu oran, motorun manyetik alanının düzenini ile akım taşıyan sargıların yerleşimini etkilemektedir. Yanlış bir oluk-kutup oranı seçildiğinde, stator olukları ve rotor kutupları arasında oransız bir yerleşim meydana gelir, bu da manyetik kuvvetlerin dengesiz bir şekilde dağılmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak, motorun verimliliği düşer, titreşimler, gürültü ve aşırı ısınma gibi istenmeyen yan etkiler ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca, manyetik kuvvetlerin düzgün dağılmaması, enerji kayıplarına neden olarak motorun ömrünü kısaltabilmektedir. Bu bağlamda, doğru oluk-kutup oranının seçilmesi, motorun verimli, güvenilir ve uzun ömürlü bir şekilde çalışmasını sağlamada kritik bir rol oynamaktadır. Tasarım aşamasında, motorun çalışma koşulları ve performans gereksinimlerine göre uygun bir oran belirlenmeli, böylece motorun optimum verimlilikle çalışması sağlanmalıdır [46].

Yukarıda bahsedilen kriterler göz önüne alınarak yapılan çalışmalar sonucunda bir motorun verimli bir şekilde tasarlanması için birkaç parametre ön plana çıkmaktadır. İlk olarak dengesiz manyetik kuvvetlerin oluşması engellenmelidir. Faz başına düşen oluk sayısının tek olması, stator olukları ve sargılarının asimetrik bir yerleşime yol açarak belirgin dengesiz manyetik kuvvetlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, oluk sayısının çift sayılı olması gerektiğine dikkat edilmelidir. Düşük sargı faktörüne sahip bazı kesirli oluk sargılı fırçasız doğru akım motorlarının, ısınma, ek kayıplar ve vibrasyon gibi sorunlara yol açan harmonikler ürettiği bilinmektedir. Bu nedenle, motor tasarımı yapılırken sargı faktörü önemli bir seçim kriteri olacaktır [46]. Uygun Nssp ve kw değerlerine sahip motor kombinasyonları Tablo 2.8’de gösterilmiştir.

Tablodaki bilgiler, FDAM tasarımı için oluk ve kutup sayılarını belirlerken kritik öneme sahiptir. Bir FDAM’nin performansı, verimliliği, tork dalgalanmaları, harmonik bozulmaları ve genel çalışma kararlılığı doğrudan oluk ve kutup sayısının seçimine bağlıdır. Tabloda farklı oluk ve kutup kombinasyonlarına karşılık gelen oluk/kutup oranları ve elde edilen sargı faktörleri (kw) gösterilmektedir. Sargı faktörü, motor sargılarının oluşturduğu manyetik alanın ideal dairesel yapıya ne kadar yakın olduğunu ifade etmektedir. Sargı faktörü değeri 1’e yaklaştıkça motor verimi artmaktadır ve tork üretimi daha düzgün gerçekleşmektedir. Genellikle 0.866 ve üzerindeki sargı faktörleri kabul edilirken, 0.866 altındaki değerler daha fazla harmonik, daha düşük verim ve düzensiz tork anlamına gelmektedir. Tablo, renk kodları kullanılarak görsel bir kolaylık sağlamaktadır; koyu renkli alanlar tasarıma uygun olmayan kombinasyonları, açık renkli alanlar ise uygun kombinasyonları temsil etmektedir. Özellikle FDAM tasarımında, hangi oluk sayısı (Ns) ve kutup sayısı (2p) kombinasyonunun seçilmesi gerektiğini belirlerken doğrudan referans alınmaktadır. Yüksek verimli ve düşük tork dalgalanmalı bir motor hedeflendiğinde, sargı faktörü yüksek olan kombinasyonlar ön plana çıkmaktadır. Yanlış bir slot-pole kombinasyonu seçildiğinde motor istenilen performansı veremez, aşırı ısınabilir veya elektriksel gürültü oluşabilmektedir. Tablo üzerinden doğru kombinasyon seçilerek, motorun üretim maliyetleri azaltılırken performansı da maksimum seviyeye çıkarılabilir. BLDC motorların endüstriyel, otomotiv ve tüketici elektroniği gibi hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılacağı düşünüldüğünde, detaylı tasarım tabloları mühendislik çalışmalarında vazgeçilmez bir rehber niteliği taşımaktadır.

Tablo 2.8 : Oluk kutup oranı sargı faktörü çizelgesi [46].

Nssp, kw																				
Ns\2p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
6	0.5 0.866		0.25 0.866				0.125 .866		0.1 0.866				0.07 0.866		0.062 0.866				0.05 0.866	
9		0.5 0.866	0.375 0.945	0.3 0.945	0.25 0.866						0.125 0.866	0.115 0.945	0.107 0.945	0.1 0.866						0.07 0.866
12			0.5 0.866	0.4 0.966		0.285 0.966	0.25 0.866								0.125 0.866	0.117 0.933		0.105 0.933	0.1 0.866	
15				0.5 0.866		0.357 0.951	0.31 0.951		0.25 0.866										0.125 0.866	
18					0.5 0.866	0.42 0.902	0.375 0.945		0.3 0.945	0.27 0.902	0.25 0.866									
21						0.5 0.866	0.437 0.870		0.35 0.953	0.318 0.953		0.269 0.89	0.25 0.866							
24							0.5 0.866		0.4 0.966	0.36 0.958		0.307 0.95	0.285 0.966		0.25 0.866					0.19 0.943
27								0.5 0.866	0.45 0.877	0.36 0.958	0.375 0.945	0.346 0.954	0.321 0.954	0.3 0.945	0.281 0.915	0.264 0.877	0.25 0.866			
30									0.5 0.866	0.45 0.874		0.384 0.936	0.357 0.951		0.312 0.951	0.294 0.936		0.263 0.874	0.25 0.866	
33										0.5 0.866		0.423 0.903	0.392 0.928		0.343 0.954	0.323 0.954		0.289 0.928	0.275 0.903	
36											0.5 0.866	0.46 0.867	0.428 0.902	0.4 0.966	0.375 0.945	0.35 0.953		0.315 0.953	0.3 0.945	0.285 0.966



Tasarımı uygun olmayan kombinasyonlar

Nssp ≤ 0.866

Tablo 2.8’de yer alan oluk/kutup kombinasyonları, genişletilerek yeni motor ve oluk kombinasyonlarına ulaşılabilir [46]. Çizelgeyi incelediğimizde, N_{ssp} değeri 0.5 ve daha düşük olan motorların sargı faktörlerinin istenen yüksek seviyelere ulaştığı gözlemlenmiştir.

Oluk/kutup sayısının belirlenmesinde, dış etkisi momenti önemli bir rol oynamaktadır. Motorun düzgün bir mekanik hareket üretebilmesi için, parazitik moment bileşenlerinin mümkün olduğunca düşük tutulması gerekmektedir. Motor üzerinde parazitik etki oluşturan relüktans momentinin birçok bileşeni bulunmakla birlikte, en belirgin etkiyi dış etkisi momenti oluşturmaktadır. Dış etkisi momenti, rotordaki sürekli mıknatısların ürettiği manyetik akı ile stator çekirdeği arasındaki manyetik direnç etkileşimi sonucu oluşmaktadır. Sargıların bu moment üzerinde doğrudan bir etkisi yoktur; ancak motorun geometrisi ve rotordaki mıknatısların yerleşim açısı bu momenti etkileyen faktörlerdir. Servo motorlarda dış etkisi momentinin, anma momentinin %1-2’sinden düşük olması gerektiği ifade edilmektedir [46].

Dış etkisi momentini azaltmak için çeşitli yöntemler mevcuttur. Kesirli oluk sargılı motor kullanmak, hava aralığını artırmak, oluk/kutup oranını yüksek tutmak ve oluk açıklığını minimumda tutmak, dış etkisi momentini azaltan etkenlerdir [46].

Tablo 2.9’da oluk kutup oranının en küçük ortak katları gösterilmiştir.

Tablo 2.9 : Oluk/kutup sayısı kombinasyonlarının en küçük ortak katları [46].

EKOK($N_s, 2p$)																				
$N_s \backslash 2p$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
6	12		24				48		60				84		96				120	
9		18	72	90	36						72	234	252	90						126
12			24	60		84	48								96	204		228	120	
15				30		210	240		60										120	
18					36	126	144		180	198	72									
21						42	336		420	462		546	588							
24							48		120	264		312	168		96					168
27								54	540	594	216	702	756	270	864	918	108			
30									60	330		390	420		480	510		570	120	
33										66		858	924		1056	1122		1254	1320	
36											72	468	252	180	288	612		684	360	252
Tasarımı uygun olmayan kombinasyonlar														$N_{ssp} \leq 0.866$						

Diş etkisi momentinin frekansı, oluk ve kutup sayısının en küçük ortak katı (EKOK) ile orantılıdır . Diş etkisi momentinin frekansının yüksek olması, genliğinin düşük olması anlamına gelmektedir. Motorun diş etkisi momentini minimize etmek için, N değeri büyük olan oluk/kutup kombinasyonları tercih edilmelidir [46].

Motorun simetrik olması ve net radyal kuvvetinin düşük olması gerekmektedir. Motordaki radyal kuvvetin ana kaynağı, stator çeliği ile rotor mıknatısı arasındaki etkileşimdir. "t" değeri, motorun oluk ve kutup sayılarının en büyük ortak böleni (EBOB) olarak tanımlanmaktadır. Bu değer, motorun simetrisi ve radyal kuvvetler hakkında bilgi vermektedir. Eğer t değeri 1'e eşit veya tek sayıda ise, motorun net radyal kuvveti yüksek olur; ancak t değeri birden büyük ve çift sayı olduğunda, motorun net radyal kuvveti daha düşük olmaktadır. Bu nedenle, tasarlanan motorun t değerinin çift sayıya sahip olması gerekmektedir. Tablo 2.10'da oluk kutup oranının en büyük ortak bölenleri gösterilmiştir.

Tablo 2.10 : Oluk ve kutup sayısı kombinasyonlarının en büyük ortak bölenleri [46].

		t=EBOB(N _s ,2p)																		
N _s /2p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
6	2		2				2		2				2		2				2	
9		3	1	1	3						3	1	1	3						3
12			4	2		2	4								4	2		2	4	
15				5		1	1		5										5	
18					6	2	2		2	2	6									
21						7	1		1	1		1	7							
24								8		4	2		2	4		4				
27							9	1	1	3	1	1	3	1	1	9				
30										10	2		2	2		2	2		2	10
33											11		1	1		1	1		1	1
36													12	2	4	6	4	2		2
Tasarımı uygun olmayan kombinasyonlar													N _{ssp} ≤ 0.866							

Yapılan tablo analizlerine göre, 12/10, 12/14, 18/16, 18/20, 24/20, 24/22, 24/26, 30/28, 36/30, 36/34, 36/38 ve 36/42 motor oluk/kutup kombinasyonları, belirlenen tüm tasarım kriterlerini başarıyla karşılamakta olup, bu kombinasyonlar özellikle piyasada en çok tercih edilen seçenekler arasında yer almaktadır. Bu kombinasyonlar, motor

performansını artıran, verimliliği yüksek ve güvenilir çalışma koşullarını sağlayan özellikleriyle dikkat çekmektedir.

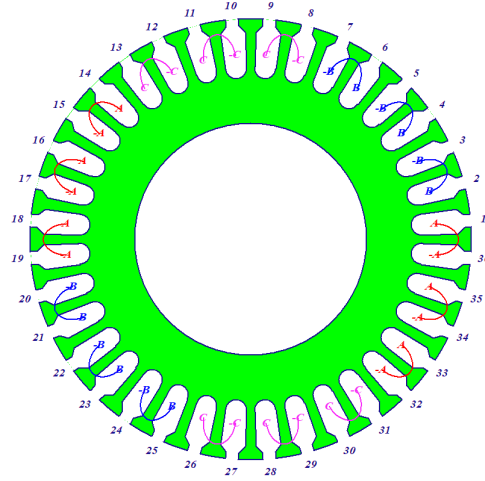
2.6.6. Sargı bağlantı modelinin belirlenmesi ve tercih nedenleri

Sarım işlemi sırasında, sargı yönlerine özel dikkat gösterilmesi büyük önem taşımaktadır. Akım yönünü sağ elin dört parmağıyla gösterebilirken, baş parmak stator dişlerindeki manyetik akının yönünü belirtmektedir. Manyetik alanın düzgün ve sıralı bir şekilde üretilmesi için, ardışık stator dişlerindeki akı yönlerinin karşıt yönde olması gerekmektedir. Bu nedenle, stator sargıları da bu düzenlemeye uygun bir şekilde yerleştirilmelidir. Yanlış yapılan sarım işlemleri, akı yönlerinin belirlenen düzene uymamasına yol açabilir ve motorun çalışma prensibinde sorunlara neden olabilir. Bu sebeple, sargı yönlerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, motorun düzgün bir şekilde çalışabilmesi için kritik öneme sahiptir.

Sarım katmanı, her oluk başına yerleştirilen bobin yüzeyini tanımlar ve bu işlem iki farklı modelde uygulanabilir. Bu modeller, tek katlı ve çift katlı sarım olarak adlandırılmaktadır. Çift katlı sarımda, her oluk başına iki farklı bobin tarafı yerleştirilirken, tek katlı sarımda her oluk başında yalnızca bir bobin tarafı bulunur.

2.6.6.1. Tek katmanlı sarım

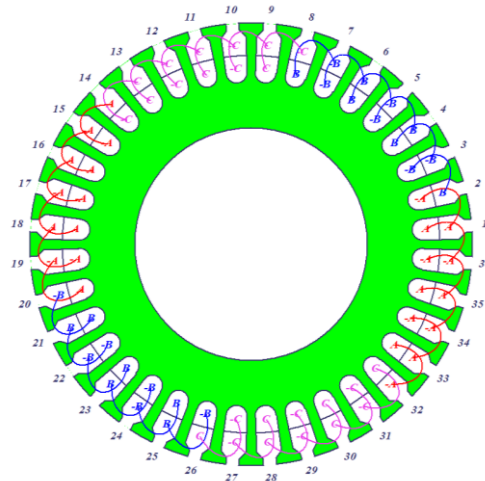
Tek katmanlı sarımda, motor oluklarında bulunan tüm iletkenler, seri olarak bağlanarak tek katmanlı bir bobin oluşturmaktadır. Bu tip sarımda her bir bobin, tek bir oluk başına yerleştirilirken, bobin sayısı çift katmanlı sarım tipine göre yarı yarıya azalmaktadır. Tek katmanlı sarım, katmanlar arası izolasyona gerek duyulmadığı için, oluk doldurma oranı daha yüksek olabilmektedir. Bu da genellikle küçük kapasiteli makinelerde, özellikle düşük güç gereksinimleri olan uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmesini sağlar. Tek katmanlı sarım, basit yapısı nedeniyle daha düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir olup, aynı zamanda daha yüksek verimlilik sağlamaktadır. Şekil 2.30'da, 36 oluk sayısına sahip bir üç fazlı stator örneği verilmektedir ve bu tasarım tek katmanlı sarımın tipik bir uygulamasıdır.



Şekil 2.30 : Tek katmanlı sarım.

2.6.6.2. Çift Katmanlı Sarım

Çift katmanlı sarımda, her olukta alt ve üst katmanlar olmak üzere iki ayrı katman bulunmaktadır. Bu katmanlardan birisi bir olukta alt kısımda, diğer tarafı ise bir başka olukta üst kısımda yer almaktadır [103]. Bu tür bir sarımda, bobin sayısı, tek katmanlı sarım ile karşılaştırıldığında iki katına çıkmaktadır. Ancak, katmanlar arasında izolasyon malzemesi kullanılması gerektiğinden, oluk doldurma oranı tek katmanlı sarıma göre daha düşük olacaktır. Çift katmanlı sarım, yüksek güç gereksinimlerine sahip motorlarda, özellikle daha büyük motor uygulamalarında tercih edilmektedir. Ancak, fazlar arasındaki elektriksel riskler daha yüksektir çünkü her katmanın birbirine yakın olması, olası kısa devre ve diğer elektriksel sorunları tetikleyebilmektedir. Şekil 2.31'de, 36 oluk sayısına sahip bir üç fazlı stator örneği gösterilmiştir ve bu, çift katmanlı sarımın bir örneğidir.

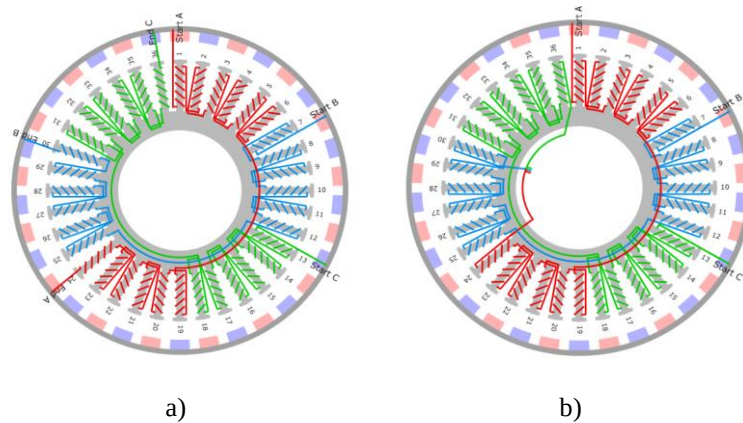


Şekil 2.31 : Çift katmanlı sarım.

Sonuç olarak motor sarımı, motorun performansını belirleyen kritik bir faktördür. Tek katmanlı ve çift katmanlı sarım türleri, motorun güç kapasitesine göre seçilmelidir. Tek katmanlı sarım, düşük güçlü ve verimli uygulamalar için uygunken, çift katmanlı sarım daha yüksek güç gereksinimlerine sahip motorlar için tercih edilmelidir. Bobin bağlantı tipi de motorun verimliliğini ve performansını doğrudan etkileyen bir faktördür. Tam sarmal ve yarım sarmal bağlantı tipleri, motorun ihtiyaçlarına göre seçilerek motorun genel verimliliği ve güvenilirliği üzerinde önemli etkiler yaratacaktır.

Motorun çalışma prensibini anlamak için, sarım türlerinin yanı sıra üçgen bağlantı ve yıldız bağlantı tiplerinin de önemli olduğunu belirtmek gerekmektedir. Üçgen bağlantı, genellikle yüksek güç gereksinimleri olan motorlarda tercih edilen bir bağlantı şeklidir. Bu bağlantı tipinde her fazın uçları birbirine bağlanarak bir üçgen oluşturulur, bu da motora yüksek tork sağlamaktadır. Üçgen bağlantı, motorun başlangıç akımını artırmasına rağmen, yüksek verim ve güçlü performans sağlamak için idealdir.

Yıldız bağlantı ise, özellikle daha düşük güç gereksinimlerine sahip motorlar için kullanılmaktadır. Bu bağlantı tipinde her fazın uçları, merkezde birleştirilir ve her faz, yıldızın bir dalı gibi çalışmaktadır. Yıldız bağlantı, başlangıç akımını düşük tutarak motorun daha verimli çalışmasını sağlar, ancak üçgen bağlantıya kıyasla daha düşük tork üretmektedir. Yıldız bağlantı, düşük güç uygulamaları için daha ekonomiktir ve genellikle büyük motorların düşük hızlarda çalışması gereken durumlar için tercih edilmektedir. Hem üçgen hem de yıldız bağlantı tipleri, motorun tasarımına göre seçilerek, sistemin genel verimliliğini ve performansını optimize etmektedir. Aşağıda yer alan Şekil 2.32'de üçgen ve yıldız bağlantı türleri gösterilmektedir.



Şekil 2.32 : FDAM'de üçgen bağlantı (a), FDAM'de yıldız bağlantı (b).

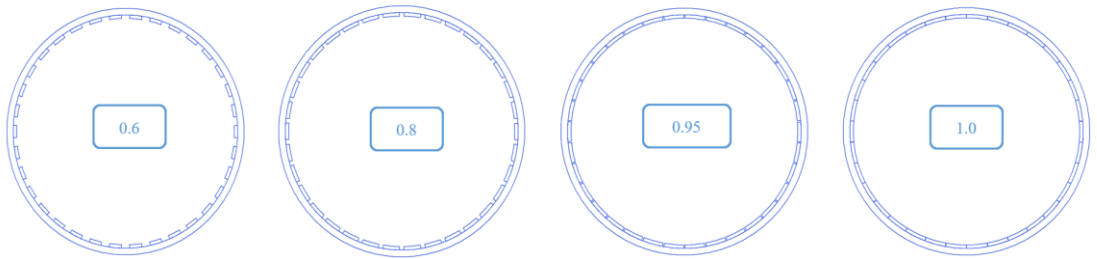
2.6.7. Embrace oranının belirlenmesi

FDAM’lerde, manyetik akının rotor ve stator arasında optimum bir şekilde bağlanmasını sağlayan önemli bir parametre, embrace oranıdır. Embrace oranı, rotordaki mıknatısların stator kutup açıklığına göre kaplayış oranıdır ve motorun performansını doğrudan etkilemektedir.

Embrace oranının doğru belirlenmesi, BLDC motorun verimli çalışması için kritiktir. Çok düşük bir embrace oranı, manyetik akının etkin bir şekilde iletilmesini önler ve motor verimliliğini düşürmektedir. Diğer yandan, çok yüksek bir embrace oranı da istenen performans seviyesine ulaşılmasını engellemektedir.

Embrace oranı, tork ve hız arasındaki ilişkiyi de doğrudan etkilemektedir. Rotor ve stator arasındaki manyetik etkileşimden elde edilen tork, motorun verimliliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Embrace oranı doğru belirlenmiş bir motor, yüksek tork üretimi sağlarken, düşük hızda bile verimli bir şekilde çalışabilmektedir. Yüksek tork gerektiren uygulamalarda, iyi bir Embrace oranı, motorun daha verimli çalışmasını sağlamaktadır.

Embrace oranı, motorun termal performansını da etkilemektedir. Motorun manyetik alanının daha düzgün dağıtılması, aşırı ısınma riskini azaltmaktadır. Embrace oranı optimize edilmiş bir motor, düşük kayıplarla çalışarak daha az ısınmaktadır. Bu, motorun ömrünü uzatırken, enerji tüketimini de minimuma indirmektedir. Aşağıda yer alan Şekil 2.33’te farklı embrace oranlarında mıknatıs yerleşimini gösterilmektedir.

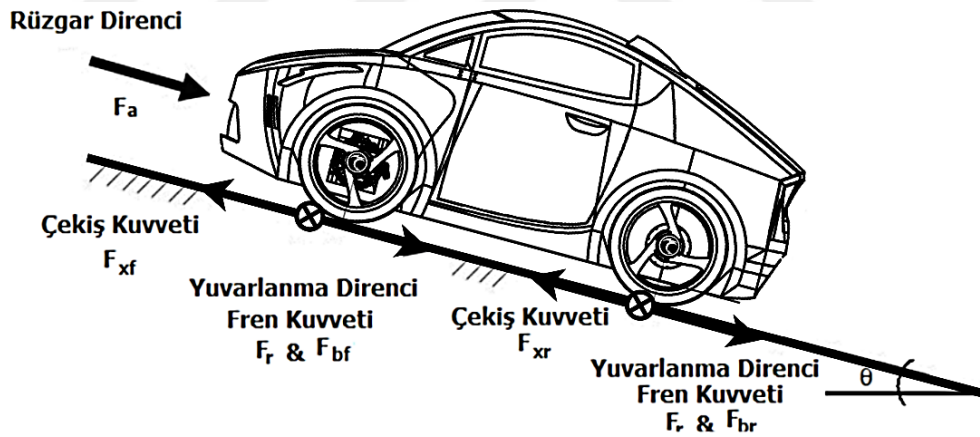


Şekil 2.33 : Farklı değerlerde embrace oranında mıknatısların rotor üzerine dağılımı.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Elektrikli Araçlar İçin Güç ve Tork Parametrelerinin Belirlenmesi

Tez kapsamında tasarlanacak olan FDAM'ler, elektrikli araçlarda kullanılmak üzere planlanmış olup, tasarım adımları da bu amaca uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu durum göz önüne alınarak motorun temel parametrelerinin belirlenmesi, aracın maruz kalacağı zorluklar değerlendirilerek hesaplanmalıdır. Araca etkiyen kuvvetler aracın bulunduğu duruma göre değişiklik göstermektedir. Bu hesaplamalar, motorun aracı en zorlu koşullar altında güvenli bir şekilde harekete geçirebilmesi için maksimum yol eğimi ve rüzgâr direnci düşünülerek yapılmaktadır. Aşağıdaki şekilde bir elektrikli aracın maruz kalacağı etkiler gösterilmektedir (Şekil 3.1). Bu etkiler aşağıdaki başlıklarda incelenmektedir.



Şekil 3.1: Eğimli bir yolda araç üzerine etkiyen kuvvetler.

3.1.1. Hava sürtünme kuvveti (F_{ad})

Bir araç, hava içerisinde belirli bir hızla hareket ederken, hareketi sırasında karşılaştığı direnç aerodinamik direnç olarak adlandırılmaktadır. Bu direnç, iki ana faktörden kaynaklanmaktadır, bunlar yüzey basıncı ve yüzey sürtünmesidir. Yüzey basıncı, aracın hareket yönündeki yüzey alanına bağlı olarak değişir ve araç hızı arttıkça bu basınç da artmaktadır. Hızın artmasıyla birlikte aracın etrafındaki hava molekülleri daha yoğun bir şekilde aracın yüzeyine çarparak basıncın yükselmesine yol

açmaktadır. Diğer taraftan, yüzey sürtünmesi, aracın hareketi sırasında hava moleküllerinin yüzeyinde düşük basınç bölgeleri oluşturmasıyla başlar. Bu düşük basınç bölgeleri, hava moleküllerinin hareketini sürüklemeye çalışır ve hareket eden moleküller ile sabit kalan moleküller arasında sürtünme meydana gelmektedir. Bu sürtünme, kayıplara yol açar ve aracın hareketini zorlaştırır. Her iki faktör de aerodinamik direnci artırır ve aracın hızını olumsuz şekilde etkilemektedir. Bu kuvvet, 3.1'deki denklemde de görüldüğü üzere araç ön yüzey alanı (A), hava sürtünme katsayısı (C_d), hava yoğunluğu (ρ) ve araç hızının karesi (V) ile orantılıdır [104,105].

$$F_a = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (3.1)$$

3.1.2. Yuvarlanma direnci (F_r)

Yuvarlanma direncinin temel nedeni, sert bir zemin üzerinde yuvarlanan lastiğin yük altında sürekli olarak şekil değiştirmesiyle ortaya çıkan histerisiz kayıplardır [105]. Bu kayıplar, lastik karkasında sehimlerin oluşmasına yol açar. Yuvarlanma direnci denklem 3.2'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$F_r = f_r mg \cos \alpha \quad (3.2)$$

İleri doğru hareket eden bir lastiğe etki eden tepki kuvveti, lastikte meydana gelen sehim nedeniyle, tepki kuvveti ile ağırlık eksenlerinin çakışmamasına sebep olmaktadır. Sonuç olarak, bu durum lastiğin hareketine zıt yönde bir moment oluşturmaktadır. Ayrıca, eğimli bir yolda aracın karşılaştığı yuvarlanma direnci, tekerleklerin yol ile temas alanının artması sonucu ortaya çıkan bir direnç kuvvetidir. Bu yuvarlanma direnci kuvveti, aracın ağırlığı (m) ile tekerleklerin lastik tipi ve basıncına bağlı olarak değişen yuvarlanma direnci katsayısının (f_r) bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır [104].

3.1.3. İvmelenme kuvveti (F_{iv})

Araç, hızlanma veya yavaşlama durumlarında ivmelenebilmesi için ilave bir kuvvete ihtiyaç duymaktadır. İvmelenme kuvveti denen bu kuvvet araç hızlanırken pozitif değer alırken yavaşlaması durumunda negatif değer almaktadır. İvmelenme kuvveti denklem 3.3'de gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$F_{iv} = ma \quad (3.3)$$

3.1.4. Yokuş direnci

Yokuş direnci, aracın yokuş yukarı yönde hareket ederken, ağırlık merkezinin yer aldığı eksenin açısı değişimi nedeniyle aracın hareketine zıt yönde oluşan dirençtir [105]. Bu direnç, aracın hareketini engelleyen ve genellikle yokuş çıkarken karşılaşılan bir kuvvet olarak tanımlanmaktadır. Yokuş direnci, aracın ağırlığı ve yokuşun eğim açısına bağlı olarak değişmektedir ve denklem 3.4'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Yokuşun eğimi arttıkça, aracın karşılaştığı direnç de artmaktadır, bu da aracı hareket ettirebilmek için daha fazla güç gerektirmektedir.

$$F_{hg} = mg \sin(\theta) \quad (3.4)$$

➤ Toplam kuvvet (F_T)

Araca etki eden net kuvvet, denklem 3.5'te verilen hava sürtünme kuvveti (F_a), yuvarlanma direnci kuvveti (F_r), ivmelenme kuvveti (F_{iv}) ve yokuş direnci kuvvetinin (F_{hg}) toplamı ile elde edilmektedir.

$$F_T = F_a + F_r + F_{iv} + F_{hg} \quad (3.5)$$

➤ Toplam güç (P_{top})

Elde edilen toplam kuvvet ile daha önceden belirlenmiş referans hız değerinin çarpılmasıyla, aracın ihtiyaç duyduğu güç miktarı denklem 3.6'da hesaplanmaktadır.

$$P_T = F_T V \quad (3.6)$$

➤ Motor torku (T)

Elektrik motorunun ürettiği dönme kuvveti olarak tanımlanan motor torku, motorun dakikadaki devir sayısı (RPM) ve kW türünden gücüne bağlı olarak değişen bir parametredir. Denklem 3.8'e göre yapılan hesaplama sonucu motorun tork değeri bulunmaktadır. Tasarıma başlamadan önce aracın ulaşabileceği hız km/sa olarak belirlenip, gerekli hesaplamalar denklem 3.7'de yapıp devir sayısı hesaplanmaktadır.

$$n = \frac{\text{Araç Hızı} \left(\frac{m}{s} \right) \times 60}{\pi \times \text{Tekerlek Dış Çapı}} \quad (3.7)$$

$$T = \frac{P \times 9550}{\text{Motor Hızı} (n)} \quad (3.8)$$

3.2. Motor Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

FDAM'nin matematiksel modellemesi yapılmadan önce bu modellemeyi sağlıklı bir şekilde gerçekleştirmek için belirlenmesi gereken bazı parametreler bulunmaktadır. FDAM'ler belirli bir gerilim ve akım değerinde çalışmaktadır. Bu değerleri elektrikli araçlarda sağlayacak olan batarya sisteminin önceden belirlenmiş olması gerekmektedir. Aşağıda yer alan tabloda bilinmesi gereken değerler üç farklı değerlerde olan batarya paketi üzerinden gösterilmektedir (Tablo 3.1). Tasarımları yapılacak olan motorlarda aşağıdaki batarya paketlerinin değerleri kullanılmıştır.

Tablo 3.1 : Tasarımları yapılan motorların batarya paketlerinin değerleri.

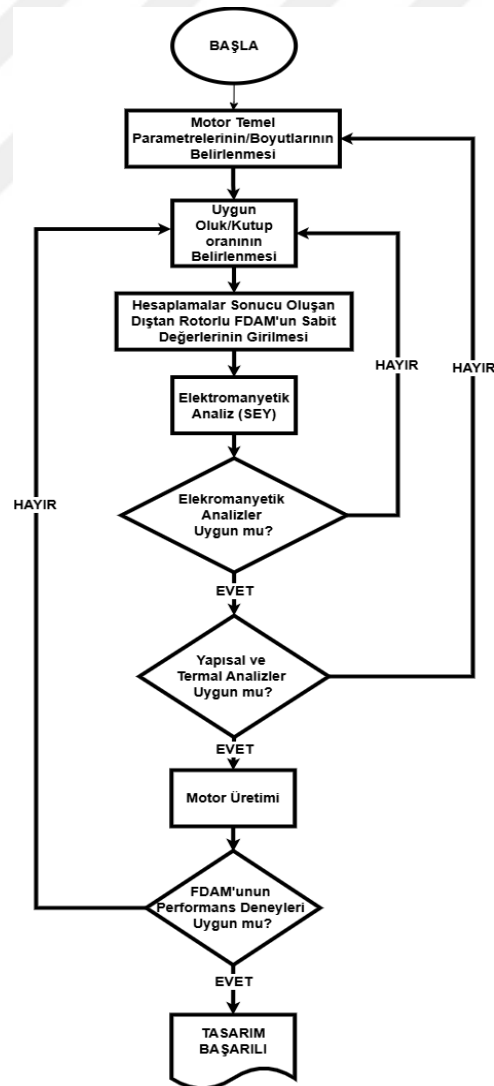
Parametreler	1. Batyarya	2.Batarya	3.Batarya
Batarya nominal gerilimi(V)	48V	72V	88 V
Batarya Akımı (A)	20.8	24 A	32 A
Batarya gücü (W)	998.4 W	1728 W	2816 W

3.3. FDAM'lerin Matematiksel Modellenmesi

Elektrikli araçlarla ilgili yapılan literatür taramasında, yüksek performanslı elektrikli araçlarda tekerlek içi fırçasız doğru akım motorlarının tercih edildiği gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, fırçasız doğru akım motorlarının teknik özellikleri detaylı bir şekilde analiz edilerek en uygun motor yapısının seçilmesi hedeflenmiştir.

Motor tasarım sürecinde izlenecek yöntemin belirlenmesi, analiz araçlarının kullanımı ve tasarım kararlarının sistematik olarak oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda; seçilen motor için farklı boyut ve oluk tasarımları denenerek, bu modeller üzerinde elektromanyetik analizler gerçekleştirilmelidir. ANSYS Maxwell programında yer alan RMXprt yazılımı kullanılarak oluşturulan modeller, sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan 2D elektromanyetik analiz yazılımına aktarılarak daha doğru sonuçların elde edilmesi hedeflenmelidir. Gerçekleştirilen analizlerin karşılaştırılması sonucunda en uygun olan tasarımlar belirlenmelidir. Bu işlemler yapılırken zaman ve maliyet kaybı yaşamamak adına motorun üretim aşamasına gidilmeden önce isterler, boyutlar ve malzeme seçimleri konusunda net kararlara varılması gerekmektedir. Motorun tasarım sürecinde doğru bir yol haritası çizilebilmek adına bir akış şeması hazırlanmış olup, oluşturulan akış şeması referans alınarak tasarım süreci gerçekleştirilmiştir. Akış şeması Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bu akış

şeması, bir ürün geliştirme sürecinin sistematik ve aşamalı bir şekilde ilerlemesini sağlayan bir yöntemdir. Süreç, tasarımın temel parametrelerinin belirlenmesiyle başlamaktadır ve her aşamada analizler ve testler yapılarak doğrulama sağlanmaktadır. Bu doğrulamalar, tasarımın teknik gerekliliklere uygunluğunu kontrol ederken aynı zamanda performansın optimize edilmesine de olanak tanımaktadır. Herhangi bir aşamada sorun tespit edilmesi durumunda, süreç önceki adımlara geri dönerek gerekli iyileştirmelerin yapılmasını sağlamaktadır. Bu yöntem, mühendislik projelerinde sürdürülebilir ve güvenilir çözümler üretmek için oldukça önemlidir. Sürecin adım adım ve kontrollü bir şekilde ilerlemesi, olası hataların erken aşamalarda tespit edilmesine yardımcı olarak zaman ve kaynak kaybını en aza indirmektedir. Ayrıca, tekrarlı analizler sayesinde ürünün kalitesi ve performansı artırılır, böylece nihai tasarım daha sağlam ve güvenilir hale gelmektedir. Bu yaklaşım, karmaşık projelerde verimliliği artırarak başarılı sonuçlar elde etmek için kritik bir rol oynamaktadır.



Şekil 3.2 : Motor tasarımı akış şeması.

Bütün elektrik makinalarının tasarımlarında gerçekleştirildiği gibi bir elektrik motorunun tasarımına başlamadan önce, motorun çalışacağı sisteme göre bazı parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Bu parametreler Tablo 3.1’de belirtilmiştir. İlk olarak tablodaki bu değerler yardımı ile elektrikli araca göre tasarlanacak olan motorun isterlerinin hesaplanması için aracın toplam torku ve motor gücü hesaplanmıştır. Motor tasarımında motor tipi ve oluk/kutup oranı belirlendikten sonra stator ve rotorun ölçüleri ile malzeme yapılarının belirlenmesi gerekmektedir. Motor statorunun tasarımında genel olarak kullanılan üç ana büyüklük vardır. Bunlar stator paketinin çapı (D), stator paketinin uzunluğu (L) ve hava aralığıdır. Aşağıda yer alan başlıklarda tasarlanacak olan fırçasız doğru akım motorlarının temel parametrelerinin nasıl hesaplanması gerektiği ve bu hesaplamalar yapılırken nelere dikkat edilmesi gerektiği açıklanmıştır.

3.3.1. Stator boyutlandırması

Statorun paket çapı ve paket uzunluğunu en doğru şekilde bulmak için TRV değeri FDAM türüne göre en ideal olarak 20KN/m^3 (Bu değer mıknatısları rotorda olan motorlar için 20kNm/m^3 alınmaktadır.) olarak alınmıştır. Statorun temel boyutları, denklem 3.9’dan yararlanılarak belirlenmektedir.

$$\text{TRV} = \frac{T}{\frac{\pi \times D^2 \times L}{4}} \quad (3.9)$$

Denklem 3.9’un yardımıyla, stator paketinin çapı (D) ve stator paketinin uzunluğu (L) hesaplanmaktadır.

Stator boyutlandırılmasında en önemli değişkenlerden biri sargıların sarılacağı oluk alanlarıdır. Oluk alanları hesaplanırken stator dişlerinin ve diş uçlarının da doyuma girmeyecek şekilde optimum kalınlıkta seçilmesi gerekmektedir [104]. Bulunan stator ölçü değerlerin ardından stator paketinin uzunluğunun, kutup adımı ile oranı (λ) denklem 3.10’dan yararlanılarak hesaplanmaktadır. Bu oran genel olarak istenen motor türüne göre değişiklik göstermektedir. Yüksek verimli motorlar için bu oran 1.4 ile 1.6 arasında seçilmektedir. Tasarlanan motorlarda λ değeri 1.4 seçilmiştir.

$$\lambda = \frac{L}{\tau_p} \quad \tau_p = \frac{\pi \times D}{2p} \quad (3.10)$$

Üç fazlı motorlarda genel olarak motor balansının istenen seviyede tutabilmek için dağılma faktörünün 1 olması gerekmektedir. Sargı faktörü kırıleme faktörü ile dağılma faktörünün çarpımı ile hesaplanmaktadır. Bu işlem denklem 3.11’de yapılmaktadır.

$$k_w = k_d \times k_p \quad (3.11)$$

3.3.2. Stator sargısı

Stator paketinin kalınlığı hesaplandıktan sonra sırasıyla V_{RMS} , motor frekansı, kutup başına akı, faz başına akı, toplam iletken sayısı ve oluk başına düşen iletken sayısı hesaplanmaktadır. Bu hesaplamaları yapmak için öncelikle oluk/kutup sayısı ve batarya geriliminin belirlenmiş olması gerekmektedir. Batarya geriliminin rms değeri denklem 3.12’ de bulunan denklemden elde edilmiştir.

$$V_{RMS} = \frac{\text{Batarya Gerilimi}}{\sqrt{3} \times \sqrt{2}} \quad (3.12)$$

Motorun boşa çalışma durumundaki devri, yük altındaki devrinin 1,25 katıdır. Bu bilgiye göre motorun dönüş frekansı aşağıdaki denklem 3.13 ile hesaplanabilmektedir.

$$f = \frac{p \times n \times 1.25}{60} \quad (3.13)$$

Kutup başına akı, motorun stator ile rotoru arasındaki hava boşluğundaki manyetik akı yoğunluğunu, kutup adımını ve stator paket boyunu kullanarak denklem 3.14’te hesaplanmaktadır. Kutup başına akı bulunurken B_g (hava aralığında oluşması beklenen akı) değeri genellikle 0,85 T seçilmektedir.

$$\phi = \left(\frac{2}{\pi}\right) \times B_g \times \left(\frac{\pi \times D}{2p}\right) \times L \quad (3.14)$$

Denklem 3.12’de hesaplanan rms değeri, dönüş frekansı, kutup başına akı ve sargı faktörü kullanılarak faz başına sarım sayısı denklem 3.15’te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$w_a = \frac{E}{(2\pi/\sqrt{2}) \times k_{w1} \times f \times \phi} \quad (3.15)$$

Toplam iletken sayısı, faz başına sarım sayısı (w_a) ve motor faz sayısı kullanılarak denklem 3.16’da hesaplanmaktadır.

$$Z = 2 \times m \times w_a \quad (3.16)$$

Oluk başına düşen iletken sayısı, statorun kaçtane oluktan oluştuğu dikkate alınarak denklem 3.17’de hesaplanmaktadır.

$$Z_0 = \frac{Z}{N_s} \quad (3.17)$$

Oluk içindeki tel sayısı çift olmak zorunda olduğu için sonuç en yakın çift sayıya yuvarlanmalıdır. Motor üretimi ve tasarımı yapılırken çift katmanlı sargı yapısı ya da tek katmanlı sargı yapısının kullanımına göre bu sayı değişmektedir.

3.3.3. İletken kesitinin belirlenmesi

Oluk başına düşen sarım sayısı hesaplandıktan sonra iletken kesiti ve oluk alanı hesaplanmaktadır. Statora sarımı yapılacak olan telin kesitinin belirlenmesi için ilk olarak akım yoğunluğunun (J) belirlenmesi gerekmektedir. Bu değer kapalı makineler için 1 -5 A/mm², hava soğutmalı makinelerde ise 5 -10 A/mm² arasında seçilmektedir. Faz akımı denklem 3.18’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$I_f = \frac{\text{Motor Gücü}}{3 \times \text{Hedeflenen verim} \times V_{RMS}} \quad (3.18)$$

$$q_{cu} = \frac{I_f}{J} \frac{A}{mm^2} \quad (3.19)$$

Kullanılacak olan iletkenin kesiti alanı denklem 3.19’da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, iletkenin kesit alanı çoğu zaman yüksek değerlerde çıkabilmektedir. Bu tarz durumlarda sargı için birden fazla tel kullanılarak sarım işlemi uygulanmaktadır. Aşağıda bulunan Tablo 3.2’de emaye teller için tel kesit tablosu gösterilmektedir. Bu tablo, hedeflenen elektriksel değerlere uygun iletken seçiminin yapılmasına olanak tanımakta ve sarım konfigürasyonlarının farklı kombinasyonlarla uygulanabilmesini sağlamaktadır.

Tablo 3.2 : Tel kesit tablosu [106].

AWG	Çap [inç]	Çap [mm]	Alan [mm ²]	Direnç [Ohm/1000 ft]	Direnç [Ohm/km]	Max. Akım (A)	Max. Frekans (Hz)
AWG 0000	0.46	11.7	107	0.049	0.16072	302	125 Hz
AWG 000	0.4096	10.4	85	0.0618	0.202704	239	160 Hz
AWG 00	0.3648	9.26	67.4	0.0779	0.255512	190	200 Hz
AWG 0	0.3249	8.25	53.5	0.0983	0.322424	150	250 Hz
AWG 1	0.2893	7.35	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
AWG 2	0.2576	6.54	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
AWG 3	0.2294	5.83	26.7	0.197	0.64616	75	500 Hz
AWG 4	0.2043	5.19	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
AWG 5	0.1819	4.62	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
AWG 6	0.162	4.11	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
AWG 7	0.1443	3.66	10.5	0.4982	2.604096	30	1300 Hz
AWG 8	0.1285	3.26	8.37	0.6282	2.590888	24	1650 Hz
AWG 9	0.1144	2.91	6.63	0.7921	2.590888	19	2050 Hz
AWG 10	0.1019	2.59	5.26	0.9989	3.276392	15	2600 Hz
AWG 11	0.0907	2.3	4.17	1.258	3.473392	12	3200 Hz
AWG 12	0.0808	2.05	3.31	1.588	5.20864	9.3	4150 Hz
AWG 13	0.072	1.83	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
AWG 14	0.0641	1.63	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
AWG 15	0.0571	1.45	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
AWG 16	0.0508	1.29	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 kHz
AWG 17	0.0453	1.15	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 kHz
AWG 18	0.0403	1.02	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
AWG 19	0.0359	0.912	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
AWG 22	0.0254	0.644	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
AWG 23	0.0226	0.573	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz
AWG 24	0.0201	0.511	0.205	25.67	84.1976	0.577	68 kHz
AWG 25	0.0179	0.455	0.162	32.37	106.1736	0.457	85 kHz
AWG 26	0.0159	0.405	0.129	40.81	133.8568	0.361	107 kHz
AWG 27	0.0142	0.361	0.102	51.47	168.8216	0.288	130 kHz
AWG 28	0.0126	0.321	0.081	64.9	212.872	0.226	170 kHz
AWG 29	0.0113	0.28702	0.0642	81.83	268.4024	0.182	210 kHz
AWG 30	0.01	0.254	0.0509	103.2	338.496	0.142	270 kHz

3.3.4. Stator Oluk Boyutlandırması

Stator oluk alanı ve oluk alanı hesaplandıktan sonra sırasıyla; stator dış genişliği (3.20), oluk üst genişliği (3.21), oluk yüksekliği (3.22), boyunduruk yüksekliği (3.23) ve bulunan bu değerler yardımıyla statorun iç çapı (3.24) hesaplanmaktadır.

$$b_d = \frac{\tau_0}{k_{fe} \times B_d} \times B_g \quad (3.20)$$

$$b_0 = \tau_0 - b_d \quad (3.21)$$

$$h_0 = \frac{A_{sl}}{b_0} \quad (3.22)$$

$$h_b = \frac{\tau_p}{2 \times k_{fe} \times B_b} \times B_g \quad (3.23)$$

$$D_i = D - 2h_0 - 2h_b \quad (3.24)$$

3.3.5. Rotor Boyutlandırması

Statorun boyutlandırılması tamamlandıktan sonra rotor kısmının boyut hesaplamaları yapılmaktadır. Rotor boyutlandırılmasında ilk olarak stator ile rotor arasındaki hava aralığı denklem 3.25 yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$\delta = 0.2 \times 2\sqrt{D \times L} \quad (3.25)$$

Hava aralığı, teorik olarak hesaplanan değerden sapmalar gösterebilir; bu nedenle FDAM’de tanımlanan rulman toleransları ile üretimden kaynaklı muhtemel hatalar dikkate alınarak, hava aralığı belirli sınırlar içerisinde optimize edilebilir.

Rotor dış çapının (3.27) hesaplanabilmesi için rotor boyunduruk yüksekliği ve mıknatıs kalınlığı denklem 3.26 yardımı ile hesaplanmıştır.

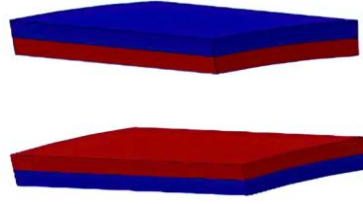
$$h_{rb} = \frac{\tau_p}{2 \times k_{fe} \times B_{rb}} \times B_g \quad (3.26)$$

$$D_o = D + 2g + 2d_{mag} + 2h_{rb} \quad (3.27)$$

3.3.6. Motor mıknatıs modeli

Mıknatıs boyutlarının belirlenmesi, istenilen çıkış torku değerlerinin elde edilmesi ve yüksek verim sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır [104]. Çıkış torku dalgalanmaları ve sistem verimi, mıknatıs kalınlığı ile doğrudan ilişkilidir. Ancak mıknatıs kalınlığını gereğinden fazla arttırmak, doyum noktasına ulaşıldığında

herhangi bir ek fayda sağlamamaktadır. Genel olarak, mıknatıs kalınlığı, stator ve rotor arasındaki hava aralığının en fazla 10 katına kadar seçilebilir. Şekil 3.3'te mıknatısların N-S ve S-N polarizasyonunda çizimleri görülmektedir.



Şekil 3.3 : S-N ve N-S polarizasyonlu mıknatısların katı modeli.

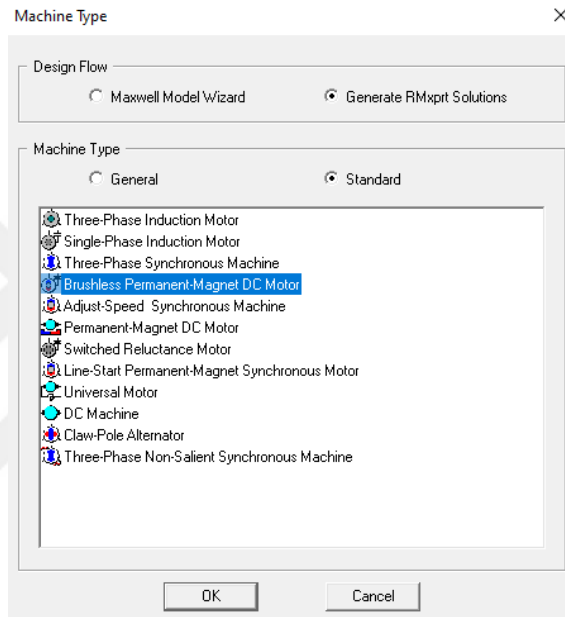
3.4. Ansys Maxwell Yazılımı

Sonlu elemanlar yöntemi, elektrik makinelerinin tasarımında en yaygın kullanılan tekniklerden biridir ve sayısal elemanlar analizi (SEA) ile birlikte sıkça tercih edilmektedir. SEA, doyma hesaplamalarında yüksek bir doğruluk sağlamakla birlikte, performans hesaplamalarında da detaylı ve hassas sonuçlar sunmaktadır. Maxwell ise sonlu elemanlar yöntemini temel alan bir yazılımdır. Analitik hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda, motorun elektromanyetik modeli ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

RMxpert arayüzü kullanılarak, analitik motor teorisi ve eşdeğer manyetik devre yöntemlerine dayalı olarak fırçasız doğru akım motorlarının temel tasarım parametreleri ile özellikleri belirlenmiştir. RMxpert aracılığıyla tasarlanan bu motorlarda, çeşitli tasarım değişikliklerinin etkileri hızlı ve etkili bir şekilde incelenmiştir. Yapılan analizlerin ardından, RMxpert'den elde edilen sonuçlar ANSYS Maxwell'in iki boyutlu elektromanyetik simülasyon modülüne aktarılmıştır. ANSYS Maxwell ile RMxpert'nin entegrasyonu, elektrik makinelerinin tasarım süreçlerini daha verimli hale getirirken, mühendislerin daha doğru ve güvenilir analizler yapmalarını mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde tasarım sürecinin hızı artmış ve üretilen motorun performansı optimize edilmiştir. Bu çalışmada, tasarlanan motorlar için farklı parametre değerlerine sahip simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, yapay sinir ağı tabanlı bir yapay zeka modelinin eğitilmesinde kullanılmış olup, bu modelden elde edilen sonuçlara dayanarak, tasarlanan motorların performans değerleri belirlenmiş ve bir adet FDAM tasarımı gerçekleştirilmiştir. Toplamda üç adet farklı özelliklere sahip FDAM tasarımı gerçekleştirilmiş olup, bu motorların çalışma parametreleri değiştirilerek sonuçlar incelenmiştir.

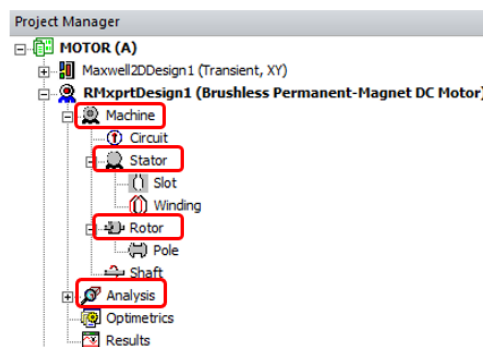
3.5. Analitik Motor Hesaplamaları ve Sonlu Eleman Analizleri (RMxpirt)

RMxpirt, farklı türlerdeki elektrik makinelerinin tasarımı için özel olarak geliştirilmiş şablonlar içermektedir. DC motorlar, senkron motorlar, asenkron motorlar ve fırçasız doğru akım (BLDC) motorlar gibi çeşitli makine tipleri için özelleştirilmiş giriş parametreleri ve varsayılan değerler sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, fırçasız doğru akım motoru tercih edilerek, tasarım süreci ve elektromanyetik analizler detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4'te RMxpirt modülünün elektrik makinelerinin seçim arayüzü gösterilmektedir.



Şekil 3.4 : RMxpirt modülü elektrik makinesi model seçimi arayüzü.

RMxpirt elektrik makinesi model seçimi arayüzünden istenilen elektrik makinesi seçildikten sonra, modül o makineye ait olan proje ekini oluşturmaktadır. Seçilen FDAM için RMxpirt modülü tarafından sunulan dört temel parametre bulunmaktadır, bunlar Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5 : FDAM RMxpirt modelinin yönetim penceresi.

İlerleyen bölümlerde gerçekleştirilecek karşılaştırmaların daha anlaşılır ve düzenli bir şekilde sunulabilmesi amacıyla, üç farklı FDAM tasarımı sırasıyla Motor (A), Motor (B) ve Motor (C) olarak adlandırılmış olup, bu sıralama soldan sağa doğru sabit tutulacaktır.

3.5.1. Giriş parametreleri belirlenmesi

RMxprt analitik hesaplama modülünde simülasyona başlamak için ilk olarak makine tipi, kutup sayısı, rotor pozisyonu, sürtünme ve rüzgar kayıpları, referans devir hızı, kontrol yöntemi ve devre türü gibi parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 3.6'da analizlerinin yapılacağı üç motorun da değerleri gösterilmektedir. bu parametrelerin belirlendiği ekran görüntüsü sunulmuş olup, bu değerlerin açıklamaları yapılmıştır.

Name	Value	Unit	Name	Value	Unit	Name	Value	Unit
Machine Type	Brushless Permanent-Magnet DC Motor		Machine Type	Brushless Permanent-Magnet DC Motor		Machine Type	Brushless Permanent-Magnet DC Motor	
Number of Poles	20		Number of Poles	26		Number of Poles	32	
Rotor Position	Outer Rotor		Rotor Position	Outer Rotor		Rotor Position	Outer Rotor	
Frictional Loss	0	W	Frictional Loss	0	W	Frictional Loss	0	W
Windage Loss	0	W	Windage Loss	0	W	Windage Loss	0	W
Reference Sp...	450	rpm	Reference Sp...	600	rpm	Reference Sp...	550	rpm
Control Type	DC		Control Type	DC		Control Type	DC	
Circuit Type	Y3		Circuit Type	Y3		Circuit Type	Y3	

(a)
(b)
(c)

Şekil 3.6 : FDAM'lerin makine özellikleri a)Motor (A), b)Motor (B), c) Motor (C)

Tasarlanan üç motorun da oluk-kutup oranları birbirinden farklı olacak şekilde seçilmiştir. Şekil 3.6'da görüldüğü üzere; Motor (A) 20, Motor (B) 26 ve Motor (C) ise 32 kutup sayısına sahiptir. Tasarımların bu şekilde olması sayesinde farklı oluk kutup oranlarının motor çıkış parametreleri üzerine etkileri incelenmiştir.

FDAM'lerde kontrol yöntemi olarak DC (Doğru Akım) veya CCC (Akım Kesme Kontrolü) seçenekleri bulunmakta olup, bu çalışmada tasarlanan tüm motorlarda sabit akım sağlayan DC kontrol tipi tercih edilmiştir. Bu seçim, sistemin daha kararlı çalışması ve kontrol devresinin sadeleştirilmesi açısından uygun görülmüştür.

Motor tasarımının bu aşamasında, sürtünme ve sarım kayıpları göz ardı edilmiştir. Bu nedenle, bu kayıpların değerleri 0 W olarak kabul edilmiştir. Böylece, motorun temel performansı ve parametreleri üzerinde odaklanılabilmiş ve daha karmaşık kayıp faktörlerinin analizlerine ilerleyen çalışmalarda yer verilmesi planlanmıştır.

Motorların referans hız değerleri sırasıyla 450 RPM, 600 RPM ve 550 RPM olarak seçilmiştir.

3.5.2. Stator ölçülerinin belirlenmesi

Temel makine bilgileri tanımlandıktan sonra, motorun stator bölümüne ait bilgilerin belirlenip tanımlanması gerekmektedir. Şekil 3.7'de bu parametrelerin belirlendiği ekran görüntüsü sunulmuş olup, değerlerin seçilme nedenleri aşağıda detaylandırılmıştır.

Name	Value	Unit	Name	Value	Unit	Name	Value	Unit
Outer Diameter	187	mm	Outer Diameter	213.56	mm	Outer Diameter	224	mm
Inner Diameter	125	mm	Inner Diameter	165	mm	Inner Diameter	145	mm
Length	43	mm	Length	24.84	mm	Length	55	mm
Stacking Factor	0.95		Stacking Factor	0.95		Stacking Factor	0.95	
Steel Type	M19_24G		Steel Type	M19_24G		Steel Type	M19_24G	
Number of Slots	24		Number of Slots	27		Number of Slots	36	
Slot Type	4		Slot Type	4		Slot Type	4	
Skew Width	0		Skew Width	0		Skew Width	0	

(a) (b) (c)

Şekil 3.7 : FDAM'lerin stator parametreleri a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C)

Motor tasarımında, her bir motorun minimum hacim gereksinimlerini karşılayacak şekilde bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu doğrultuda, FDAM'lerin dış çapları sırasıyla Motor (A) için 187 mm, Motor (B) için 213,56 mm ve Motor (C) için 224 mm olarak belirlenmiştir.

Stator dişlerindeki akı yoğunluğunu uygun seviyede tutmak, demir kayıplarını en aza indirmek ve hedeflenen güç, tork, verim gibi parametrelere ulaşabilmek amacıyla en doğru şekilde belirlenmesi gereken stator iç çapı, sırasıyla motorlarda 125mm, 165mm ve 145mm olarak belirlenmiştir.

Motor tasarımında stator uzunluğundaki değişiklikler, motorun tork ve devir hızı performansını doğrudan etkiler. Stator uzunluğunun artırılması, motorun üretebileceği manyetik alanın büyümesine ve dolayısıyla tork üretme kapasitesinin artmasına neden olabilir. Ancak, statorun uzunluğunun artması aynı zamanda motorun rotorunun hızlanmasını zorlaştırabilir, çünkü daha uzun bir stator daha fazla direnç ve manyetik zorluk yaratmaktadır, bu da devir hızını düşürmektedir. Kısacası, motorun tork kapasitesinin artırılması amacıyla stator uzunluğu uzatıldığında, motorun devir hızı düşebilir. Aksine, stator uzunluğu kısaldığında motorun devir hızı artabilir, ancak tork üretme kapasitesi azalacaktır. Bu nedenle, stator uzunluğunun doğru seçilmesi, motorun hedeflenen tork ve devir hızı performansını optimize edebilmek için kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda, hedeflenen özelliklerin sağlanabileceği stator paketinin uzunluk değerleri sırasıyla 43mm, 24.84mm, 55mm olarak belirlenmiştir.

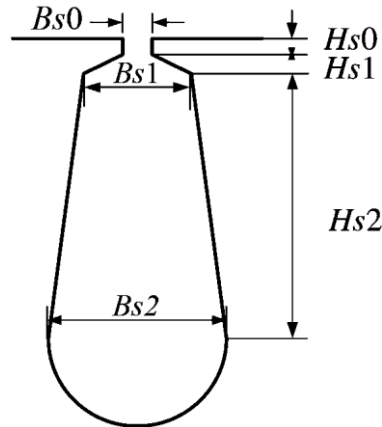
FDAM'lerin stator gövdeleri, silisli sacların şekillendirilip kesilmesi ile oluşturulmaktadır. Silisli sacların uygun stator şekline getirilmesinde lazer kesim, panç, su jeti ve telerezyon gibi çeşitli kesim teknikleri kullanılmaktadır. Bu sacların paketleme veya birleşim aşamasında, tasarıma uygunluklarını gösteren ve "istifleme faktörü" olarak adlandırılan bir parametre göz önünde bulundurulur. Tasarlanan motorların istifleme faktörü %95 olarak belirlenmiştir.

Sac tipi, RmXprt modülünün kendi malzeme kütüphanesinden seçilebileceği gibi, elde edilen sacın B-H diyagramları ve malzeme kayıplarına dair verilerle kütüphaneye yeni bir malzeme olarak da eklenebilmektedir. Üç motorun tasarımında da, yazılımın kendi kütüphanesinde bulunan M19_24G tipi sac kullanılmıştır.

Daha önceden de bahsedildiği gibi tasarlanan üç motorunda oluk kutup oranları birbirlerinden farklı seçilmiştir. Şekil 3.7'de de gözüktüğü üzere Motor (A) 24 , Motor (B) 27 ve Motor (C) tasarımı 36 oluk sayısına sahiptir.

3.5.2.1. Stator oluk tipi ve ölçüleri

RmXprt yazılımı, FDAM tasarımı için kullanıcının hızlıca seçebileceği çeşitli oluk türleri sunmaktadır. Ayrıca, kullanıcıya farklı oluk türleri oluşturma olanağı da sağlamaktadır. Doluluk oranının daha düşük olması ve oluklar arasındaki bağlantıyı sağlayan dış alanlarındaki manyetik akı yoğunluğunun fazla olmaması sebebiyle motorun ideal sıcaklık seviyelerinde kalmasını sağlamak için en uygun oluk tipi seçilmelidir. Seçilen oluk tipi Şekil 3.8'de gösterilmektedir. Oluk şekli ve boyutları, oluk tipi belirlendikten sonra tanımlanmaktadır. Tasarlanan üç motorda da, RmXprt arayüzünde tanımlı olan 4 numaralı oluk yapısı tercih edilmiştir.



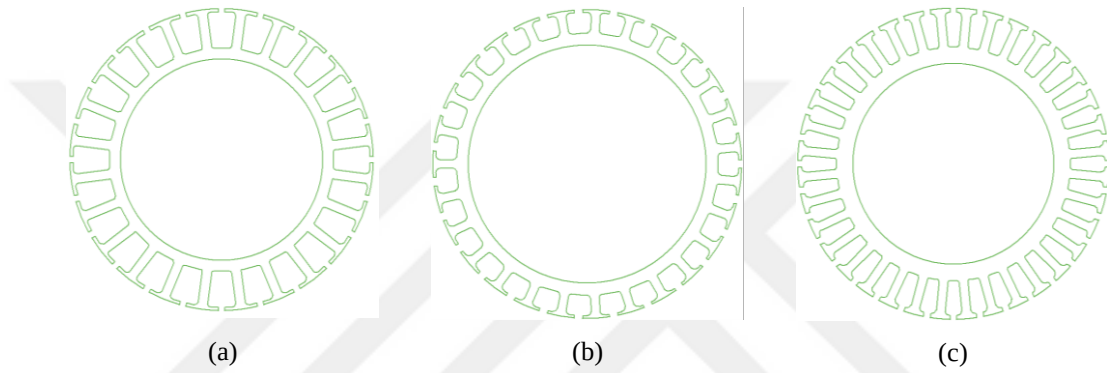
Şekil 3.8 : Oluk tipi.

Şekil 3.9’da sırasıyla üç motorunda oluk ölçüleri verilmektedir.

Name	Value	Unit	Name	Value	Unit	Name	Value	Unit
Auto Design	☐		Auto Design	☐		Auto Design	☐	
Parallel Tooth	☒		Parallel Tooth	☒		Parallel Tooth	☒	
Tooth Width	5.84	mm	Tooth Width	6	mm	Tooth Width	6.3	mm
Hs0	2.32	mm	Hs0	2	mm	Hs0	3	mm
Hs1	1.84	mm	Hs1	3	mm	Hs1	3	mm
Hs2	19.39	mm	Hs2	9.4	mm	Hs2	21	mm
Bs0	4.062	mm	Bs0	6	mm	Bs0	5	mm
Rs	1	mm	Rs	2	mm	Rs	1	mm

Şekil 3.9 : Stator oluklarının ölçüleri, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).

Şekil 3.10’da ise üç motorun da statorunun görüntülerinin son halleri gösterilmektedir.



Şekil 3.10 : Stator görüntüleri, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).

3.5.2.2. Stator sarım tasarımı

Stator bölümüne ait veriler tanımlandıktan sonra, motorun sarım bilgileri belirlenip tanımlanmaktadır. Stator sargısının ölçüleri ve sargı düzeni, bir elektrik motorunun performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu parametrelerin belirlendiği ekran görüntüsü Şekil 3.11’de gösterilmiş olup, bu değerlerin tercih edilme nedenleri aşağıda açıklanmıştır.

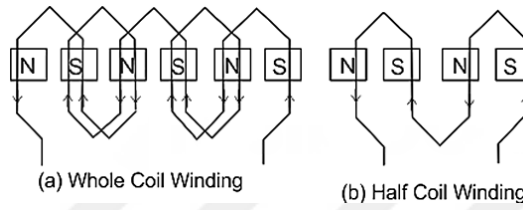
Name	Value	Unit	Name	Value	Unit	Name	Value	Unit
Winding Layers	2		Winding Layers	2		Winding Layers	2	
Winding Type	Whole-Coiled		Winding Type	Whole-Coiled		Winding Type	Whole-Coiled	
Parallel Branches	1		Parallel Branches	1		Parallel Branches	1	
Conductors per Slot	30		Conductors per Slot	32		Conductors per Slot	12	
Coil Pitch	1		Coil Pitch	1		Coil Pitch	1	
Number of Strands	1		Number of Strands	1		Number of Strands	12	
Wire Wrap	0.1	mm	Wire Wrap	0.1	mm	Wire Wrap	0.1	mm
Wire Size	Diameter: 1.938mm		Wire Size	Diameter: 0mm		Wire Size	Diameter: 0.8mm	

Şekil 3.11 : RMxprt sarım bilgileri, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).

Bu aşamada, sargının katman sayısı (tek /çift), sargının tipi (tam/yarım), paralel tel sayısı, her bir oluktaki iletken sayısı, bobin adımı, her bir iletkene düşen tel sayısı, iletken telin yalıtım kalınlığı ve iletken telin kalınlığı belirlenmektedir.

Sargı tasarımı yapılırken, stator oluk doldurma faktörünün uygulanabilir sınırlar içinde kalması ve armatür bakır kayıplarının minimum seviyeye düşürülmesi amaçlanmalıdır.

FDAM'nin statorunda iki farklı tipte sargı tipi uygulanabilmektedir, bunlar tam ve yarım sargı tipleridir. Sargı tipleri Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 : Tam (a) ve yarım (b) sargı tipi [107].

Tam kalıp ve yarım kalıp bobin sargıları arasındaki temel fark, bobinlerin uç bağlantılarının düzenlenme şeklidir. Tam bobin sargılarında, her bobin tüm kutupları kapsayacak şekilde bağlanmaktadır. Yarım bobin sargılarında ise bobinler yalnızca kutupların yarısını kapsayacak şekilde bağlanmaktadır, bu da bağlantıların daha farklı bir düzenle yapılmasını gerektirmektedir.

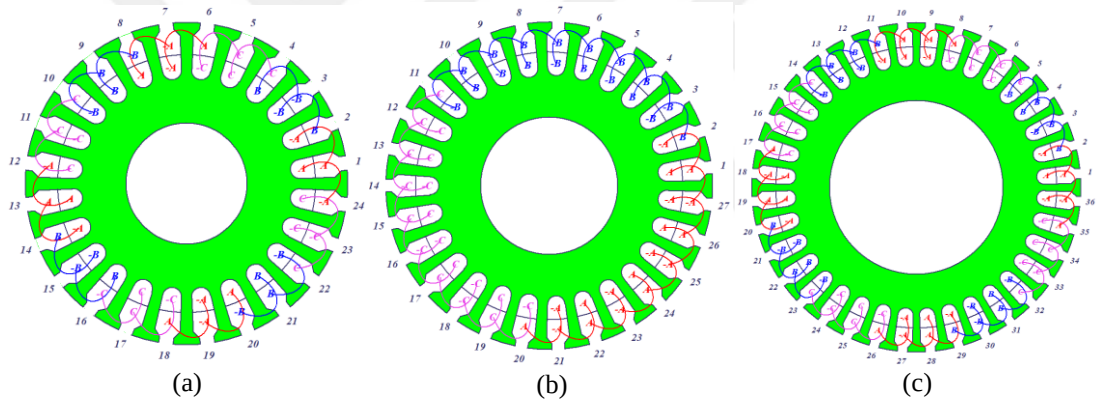
Oluklardaki iletken tel sayısı, stator gövdesinde yer alan slotlar arasındaki dış bölümlerine yapılan sarım sayısının iki katı olarak ifade edilmektedir. Başka bir deyişle, oluk içinde bulunan iletken kablo kesitlerinin toplam sayısını belirtmektedir. Bu sayı, motor parametrelerini karşılayacak şekilde belirlenmektedir.

Sarım işleminde kullanılacak telin kalınlığı tasarlanacak olan motorun giriş parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. İlk olarak, ilgili parametreler doğrultusunda hesaplanan değer kullanıcı tarafından isteğe bağlı olarak 0 bırakıldığında, RMxpri yazılımı motorun kararlı bir şekilde çalışabilmesi için bu parametreyi otomatik olarak uygun bir değerde belirlemektedir. Şekil 3.11'de yer alan Motor (B)'de bu durum uygulanmıştır. Motor (A) ve Motor (C) tasarımlarında ise bu değerler 1.93mm ve 0.8 mm olarak hesaplanmıştır.

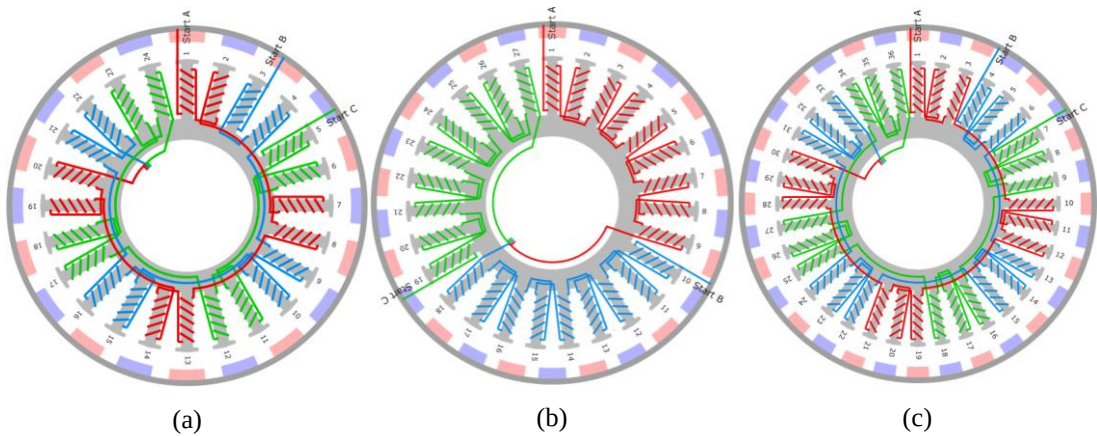
Motor (A) ve Motor (B)'de paralel tel sayısı 1 iken Motor (C)'de bu değer 12 olarak belirlenmiştir. Sarım sayıları ise sırasıyla 30, 32 ve 12 tur olarak hesaplanmıştır. Paralel tel sayısı, sarım başına düşen toplam iletken kesit alanını artırarak motorun

akım taşıma kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Paralel tel sayısının artırılması, iletken başına düşen akımın azalmasına ve dolayısıyla sargıların ısınmasının sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu durum, motorun termal performansını iyileştirerek daha yüksek akım değerlerinde güvenli çalışmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca toplam sarım direncinin düşmesiyle birlikte bakır kayıplarında azalma gözlemlenecektir. Bunun sonucunda motor verimliliği artacak ve daha yüksek tork üretimi mümkün hale gelecektir. Ancak, paralel tel sayısındaki artış aynı zamanda sargı düzeninin karmaşıklığını ve üretim sürecindeki zorlukları da beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla, paralel tel sayısının seçimi, termal yönetim, üretim kabiliyeti ve hedeflenen performans gereksinimleri dikkate alınarak optimize edilmelidir.

Aşağıda yer alan Şekil 3.13'te RMxprrt sarım şemaları Şekil 3.14'te ise sarım şeklinin detaylı şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.13 : RMxprrt sarım şemaları, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).



Şekil 3.14 : Stator sargı şemaları, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).

3.5.3. Rotor ölçülerinin belirlenmesi

FDAM'lerin sarım bilgileri yazılıma tanımlandıktan sonra, rotor parametrelerinin belirlenip tanımlanması gerekmektedir. Bu parametrelere ilişkin ekran görüntüsü Şekil 3.15'te sunulmuş, bu değerlerin seçilme nedenleri ise aşağıda detaylandırılmıştır.

Name	Value	Unit	Name	Value	Unit	Name	Value	Unit
Outer Diameter	213	mm	Outer Diameter	236.16	mm	Outer Diameter	253	mm
Inner Diameter	188.6	mm	Inner Diameter	215.16	mm	Inner Diameter	226	mm
Length	43	mm	Length	24.84	mm	Length	55	mm
Steel Type	steel_1010		Steel Type	steel_1010		Steel Type	steel_1010	
Stacking Factor	0.95		Stacking Factor	0.95		Stacking Factor	0.95	
Pole Type	1		Pole Type	1		Pole Type	1	

(a) (b) (c)

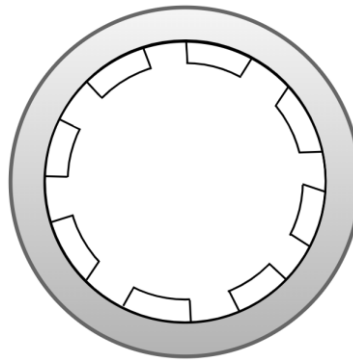
Şekil 3.15 : RMxprt Rotor bilgileri, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C)

Rotor dış çapı, stator dış çapı ile doğrudan ilişkilidir. Statorun dış çapı ile rotorun iç çapı birbirine ne kadar yakın olursa aradaki hava boşluğu o kadar küçük olacaktır. Bu sayede kaybedilecek akı yoğunluğu miktarı o kadar az olacaktır. Ancak çok dar hava aralığı, üretim toleransları açısından zorluk oluşturacak ve rotorun statora temas etme riskini artıracaktır.

FDAM'ler HUB motor olarak tasarlanmıştır. Bu yüzden rotor dış çapı belirlenirken tekerlek ölçüleri referans alınmıştır. Bu değerlerin kabul edilebilir sınırlar içinde kalmasına özellikle dikkat edilmiştir.

3.5.4. Mıknatıs ölçülerinin belirlenmesi

FDAM'nin dış rotor tasarımı nedeniyle, yalnızca RMxprt modülünde yer alan kutup tipi 1 kullanılabilmektedir. Bu model Şekil 3.16'da gösterilmektedir.



Şekil 3.16 :RMxprt mıknatıs yerleşim şekli.

Rotor parametrelerinin tanımlanmasından sonra, mıknatıs özelliklerinin yazılıma tanımlanması gerekmektedir. Bu parametrelere ait ekran görüntüsü Şekil 3.17’de sunulmuş olup, değerlerin seçilme gerekçeleri aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Name	Value	Unit
Embrace	0.9	
Offset	0	mm
Magnet Type	NdFe35	
Magnet Thick...	3.2	mm

(a)

Name	Value	Unit
Embrace	0.65	
Offset	0	mm
Magnet Type	NdFe35	
Magnet Thick...	3.5	mm

(b)

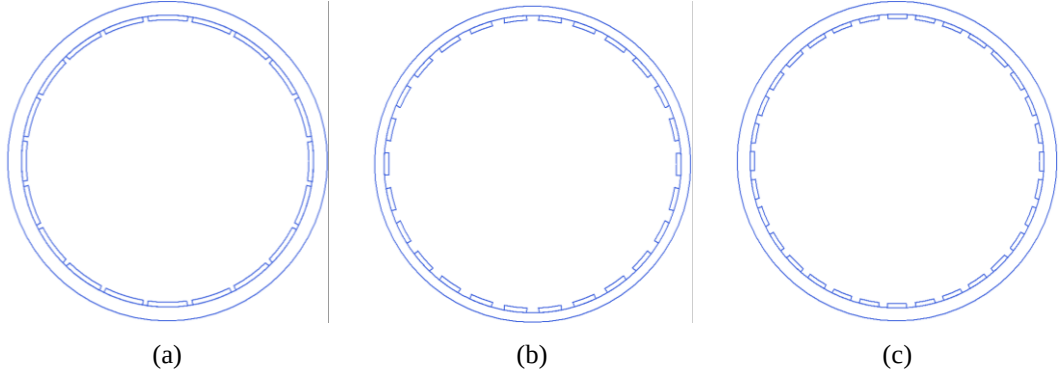
Name	Value	Unit
Embrace	0.7	
Offset	0	mm
Magnet Type	NdFe35	
Magnet Thick...	3.5	mm

(c)

Şekil 3.17 : RMXprt mıknatıs bilgileri, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).

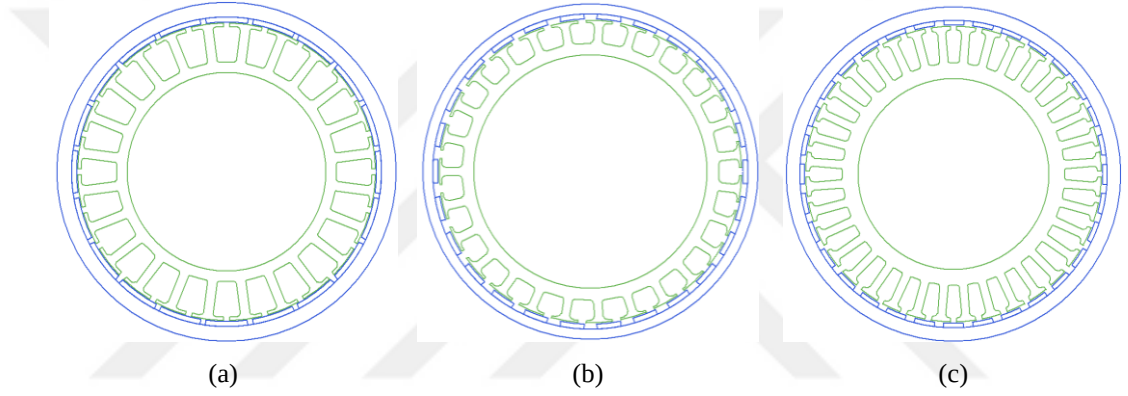
Analizde, mıknatıslar arası kutup oranı olan embrace değerleri Motor (A)’da 0.9, Motor (B)’de 0.65 ve Motor (C)’de 0.7 olarak belirlenmiştir. Embrace oranı arttıkça, rotor-stator arasında iletilen manyetik akı yoğunluğu artmakta, bu da motorun çıkış torkunu ve güç kapasitesini yükseltmektedir. Ancak embrace oranının aşırı yüksek seçilmesi, hava aralığına giren mıknatıs yüzeyinin artmasına bağlı olarak cogging torkunun (dalgalanma torkunun) büyümesine neden olmaktadır. Bu durum özellikle düşük hızlarda istenmeyen tork salınımlarına ve titreşimlere yol açabilmektedir. Diğer yandan, embrace oranının düşük seçilmesi ise mıknatısların yeterli manyetik akı üretmesini engelleyerek motor verimini düşürmekte ve istenilen torkun elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda embrace oranı, motorun hem elektromanyetik verimliliği hem de mekanik kararlılığı açısından optimum bir aralıkta seçilmelidir. Bu değerlerin seçilmesini ardından rotor gövdesinde meydana gelen görünüm farklılığı ise Şekil 3.18’de gösterilmektedir. Üç motorda da mıknatıs tipi olarak, elektrik motorlarında yaygın şekilde kullanılan N45SH modeli tercih edilmiştir.

Mıknatıs kalınlıkları ise tasarımlarda hesaplanan tork, güç değerlerini sağlayabilecek şekilde belirlenmektedir. Bu değerler sırasıyla 3.2mm, 3.5mm ve 3.5 mm seçilmiştir. Mıknatıs kalınlığının artırılması, motorun manyetik alan üretme kapasitesini yükselterek tork üretimini artırırken, motorun fiziksel boyutlarını ve ağırlığını da artırmaktadır. Bu durum, motorun verimliliği ve dinamik yanıtı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Ayrıca daha kalın mıknatıslar, motorun termal yönetimini zorlaştırarak soğutma kapasitesini artırma gerekliliği doğurmaktadır. Öte yandan, çok ince mıknatıslar ise yeterli manyetik akıyı sağlayamayarak tork kapasitesini sınırlamaktadır.



Şekil 3.18 : FDAM'lerin embrace görüntüsü, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).

Tüm bu hesaplamalar tamamlandıktan sonra, RMxpirt modülüne girilen tanımlamalar ile oluşturulan motor tasarımının kesitleri Şekil 3.19'da gösterilmektedir.



Şekil 3.19 : RMxpirt motor kesitleri, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C).

3.5.5. RMxpirt Analiz Parametrelerinin Belirlenmesi

RMxpirt modülünde bir FDAM'nin analitik hesaplamalarının yapılabilmesi için belirlenmesi gereken tüm parametreler nedenleriyle birlikte yukarıdaki başlıklarda detaylı olarak açıklanmıştır. Parametrelerin tamamlanmasının ardından, hesaplamaların en uygun koşullarda gerçekleştirilebilmesi için analiz ayarlarının da doğru şekilde yapılması önemlidir. Motorun nominal çalışma durumuna ilişkin giriş ve çıkış parametreleri Şekil 3.20'de sunulmuştur.

Name	Value	Unit
Name	Setup1	
Enabled	☒	
Operation Type	Motor	
Load Type	Const Power	
Rated Output ...	500	W
Rated Voltage	48	V
Rated Speed	450	rpm
Operating Tem...	75	cel

(a)

Name	Value	Unit
Name	Setup1	
Enabled	☒	
Operation Type	Motor	
Load Type	Const Power	
Rated Output ...	1000	W
Rated Voltage	72	V
Rated Speed	600	rpm
Operating Tem...	75	cel

(b)

Name	Value	Unit
Name	Setup1	
Enabled	☒	
Operation Type	Motor	
Load Type	Const Power	
Rated Output ...	2000	W
Rated Voltage	72	V
Rated Speed	550	rpm
Operating Tem...	75	cel

(c)

Şekil 3.20 : RMxpirt analiz parametreleri, a) Motor (A), b) Motor (B), c) Motor (C)

Tasarımları tamamlanan üç motorun güç değerleri sırasıyla 500W, 1kW ve 2kW olarak belirlenmiştir. Bütün analizler sabit güç modunda yapılmıştır. FDAM'lerin gerilim değerleri Tablo 3.1'deki değerlere göre belirlenmiştir. Motorların anma hızları sırasıyla 450rpm, 600rpm ve 550 rpm olarak belirlenmiş olup, simülasyon sonuçlarında hesaplanan performans parametrelerine ulaşılmaya çalışılmıştır.

3.6. RMxpirt Simülasyon Sonuçları ve Sonlu Elemanlar Analizi ve Sonuçları (Maxwell 2D)

Bu tez çalışmasında ilk olarak motorların referans değerlerinde yani hesaplanan değerlerinde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu motorların farklı gerilim değerlerinde, farklı oluk tiplerinde, farklı sarım sayısında, farklı embrace oranlarında, farklı silisli sac kullanımında ve farklı mıknatıs kalınlıklarında çıkan sonuçlar incelenmiştir. RMxpirt analizi sonucunda elde edilen FDAM'nin bazı önemli çıktı parametreleri ve ilgili grafikler bu başlık altında belirtilmiştir.

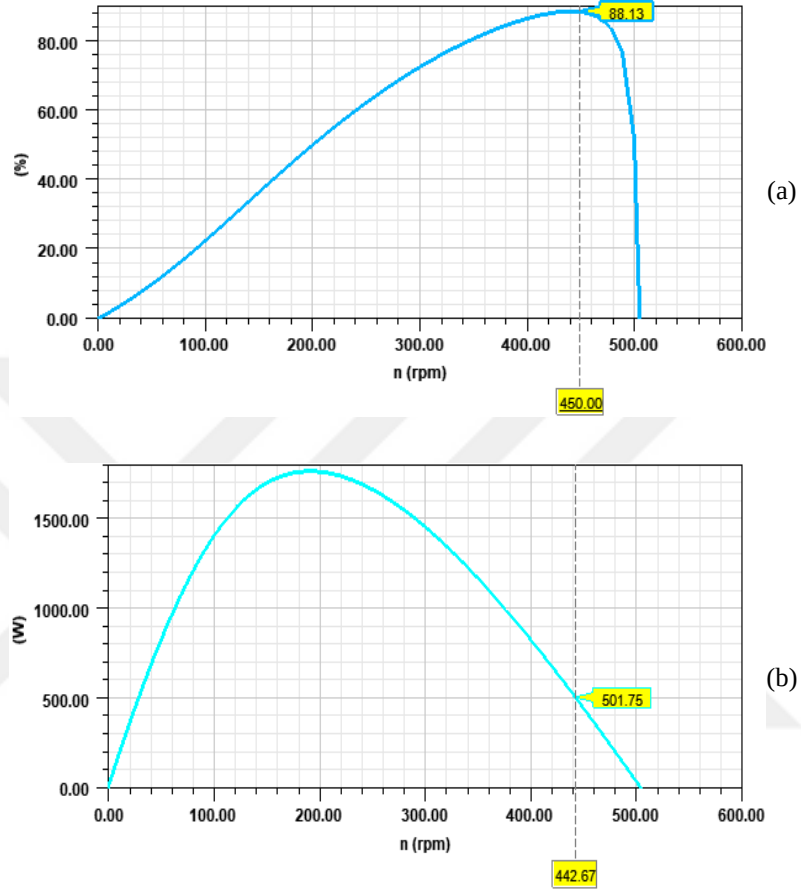
3.6.1. Motor (A) simülasyon sonuçları

Aşağıda yer alan Tablo 3.3'te Motor (A)'nın simülasyon sonuçları paylaşılmaktadır.

Tablo 3.3 : Motor (A) simülasyon sonuçları.

Parametreler	Değerler
Armatür Akımı (RMS)	9.7052 A
Toplam Kayıp	65.83 W
Çıkış Gücü	500.54 W
Giriş Gücü	565.884 kW
Verimlilik	88.3669 %
Nominal Hız	442.891 RPM
Nominal Tork	10.7818 Nm
Yüksüz Hız	552.241 RPM
Stator Oluk Doldurma Faktörü	40.8409 %
Geri EMK Sabiti (K_E)	0.902409 V/rad
Nominal Tork Sabiti	0.91546 Nm/A
Armatür Akım Yoğunluğu	3.2908 A/mm ²
Kilitli Rotor Torku	173.065 Nm
Kilitli Rotor Akımı	230.543 A
Stator Dış Akı Yoğunluğu	1.91433 T

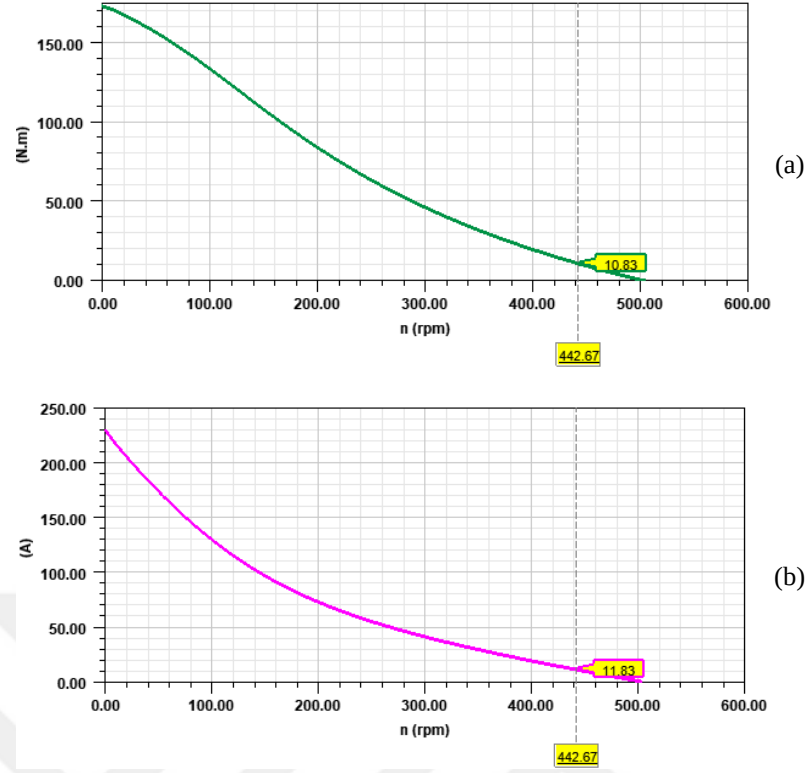
Tablodan da anlaşılabileceği gibi, RMxpert yazılımında talep edilen nominal değerlerin uygun sınırlar içerisinde yer aldığı gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre; çıkış gücü 500.5 W, giriş gücü 565.8 W, akım değeri 9.7 A, nominal devri 442.8 rpm, nominal moment 10.7 Nm ve verimi %88 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.21 : RMxpert hız-verim grafiği (a), RMxpert hız-çıkış gücü grafiği (b).

Şekil 3.21 a’da görülebileceği gibi, talep edilen nominal RPM değeri, %88 gibi en yüksek verim oranında elde edilmektedir. Bu uyumun sağlanabilmesi sayesinde, hedeflenen hızlarda motordan daha düşük seviyede enerji çekilmesi mümkün olacak ve böylece enerji tasarrufu ile verimlilik artırılmış olacaktır.

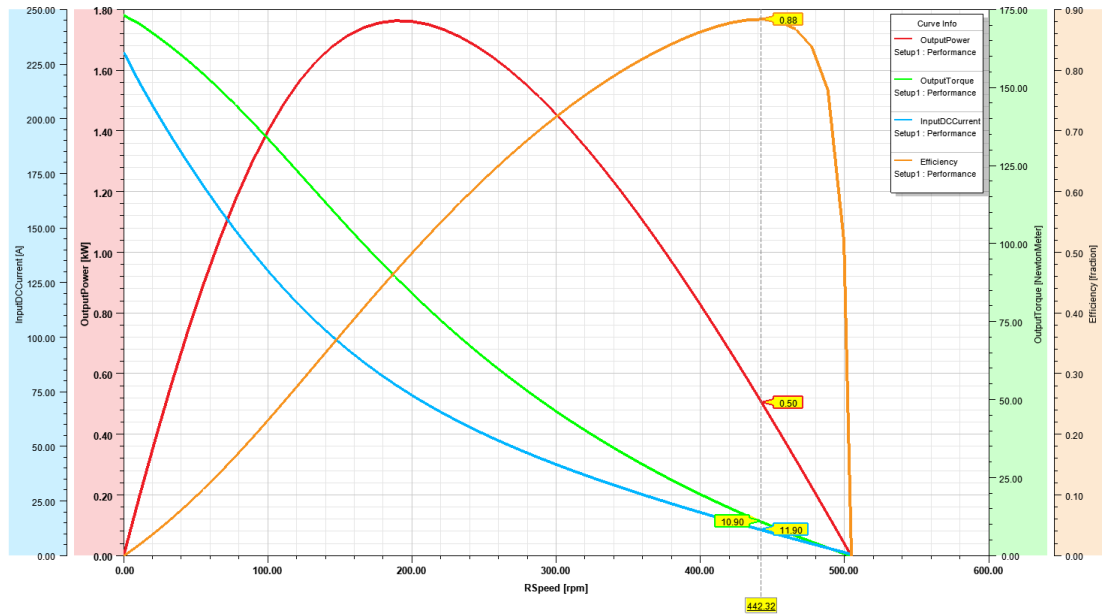
Şekil 3.21 b’den anlaşılabileceği üzere, hedeflenen nominal RPM değeri ile istenilen nominal güç seviyesi birbiriyle uyum göstermektedir.



Şekil 3.22 : RMxpirt hız-tork grafiği (a), RMxpirt hız-akım grafiği (b).

Şekil 3.22 a'da ise hedeflenen hızlarda ve verimde ulaşılabilecek tork değerleri gösterilmiştir. Şekil 3.22 b'den anlaşılacağı üzere, hedeflenen nominal RPM değerinde motordan en düşük seviyede akım çekilmektedir.

Şekil 3.23'te Motor (A) tasarımının karakteristik eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 3.23 : Motor (A) karakteristik eğrisi.

Motor (A)'nın karakteristik eğrisi incelendiğinde şu sonuçlara ulaşılmaktadır:

Düşük hızlarda (0-100 RPM) motorun çektiği akım oldukça yüksektir. Başlangıç akımının yüksek olması, başlangıç momentinin gereksinimleri ile ilişkilendirilmektedir. Hız arttıkça çekilen akım azalma eğilimi gösterir ve yüksek hızlarda minimum seviyeye ulaşmaktadır. Bu durum, motorun daha az zorlandığını ve enerji verimliliğinin hızla iyileştiğini göstermektedir.

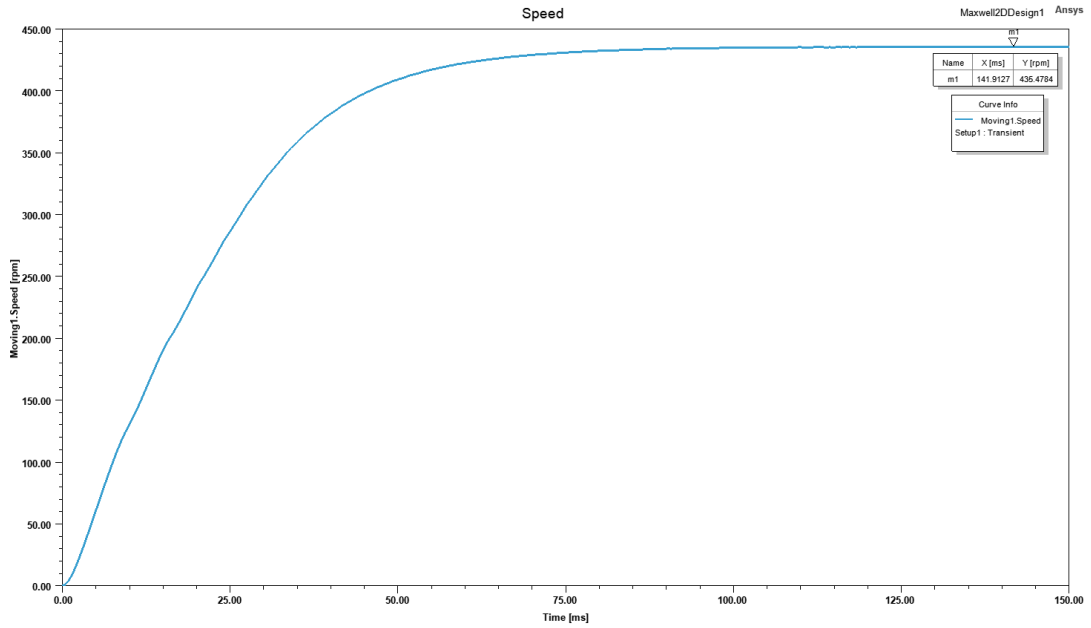
Verim, düşük hızlarda oldukça düşük seviyelerde seyretmektedir. Bunun temel nedeni, başlangıçtaki kayıpların yüksek olması ve akımın fazla çekilmesidir. Orta hız aralıklarında (yaklaşık 400 RPM) motor verimi maksimum seviyeye (%93) ulaşmaktadır. Bu hız aralığı, motorun en verimli şekilde çalıştığı ve enerji tasarrufunun optimum olduğu bölgeyi temsil etmektedir. Ancak, hızın daha da artmasıyla birlikte verim azalmaya başlamaktadır. Bu azalma, elektriksel ve mekanik kayıpların hızla artmasından kaynaklanmaktadır.

Tork, düşük hızlarda oldukça yüksek değerlere sahiptir. Bu, motorun başlangıç momentini sağlama kapasitesini ortaya koymaktadır. Ancak hız arttıkça tork değerleri belirgin bir şekilde azalmaktadır. FDAM'lerde bu durum karakteristik bir özellik olup, yüksek hızlarda torkun azalması yerine güç ve verime odaklanılmaktadır.

Motor gücü, düşük hızlarda sıfıra yakın değerlere sahiptir. Bu durum, hızın düşük olmasından kaynaklanmaktadır, çünkü güç, hız ve torkun çarpımı ile ifade edilmektedir. Hız arttıkça güç de yükselmekte ve yaklaşık 400 RPM'de maksimum seviyesine ulaşmaktadır. Ancak bu noktadan sonra hızın artışıyla birlikte torkun düşmesi, gücün de azalmaya başlamasına neden olmaktadır.

Analiz sonucu, FDAM'nin orta hızlarda çalışmasının ideal olduğunu ve bu çalışma koşullarında enerji verimliliği ile performansın optimize edildiğini ortaya koymaktadır.

RMxprt'te incelenen model, bu aşamadan sonra motorun manyeto-statik ve geçici analiz denklemlerini çözümlmek amacıyla kullanılan ağ modelleme algoritmalarını ve sadeleştirilmiş bir harici elektronik devre düzenleyicisini içeren Maxwell 2D modelini oluşturulmak üzere dışa aktarılabilir hale gelmiştir. Aşağıda yer alan şekillerde Motor (A) tasarımının 2D analiz sonuçları gösterilmektedir.



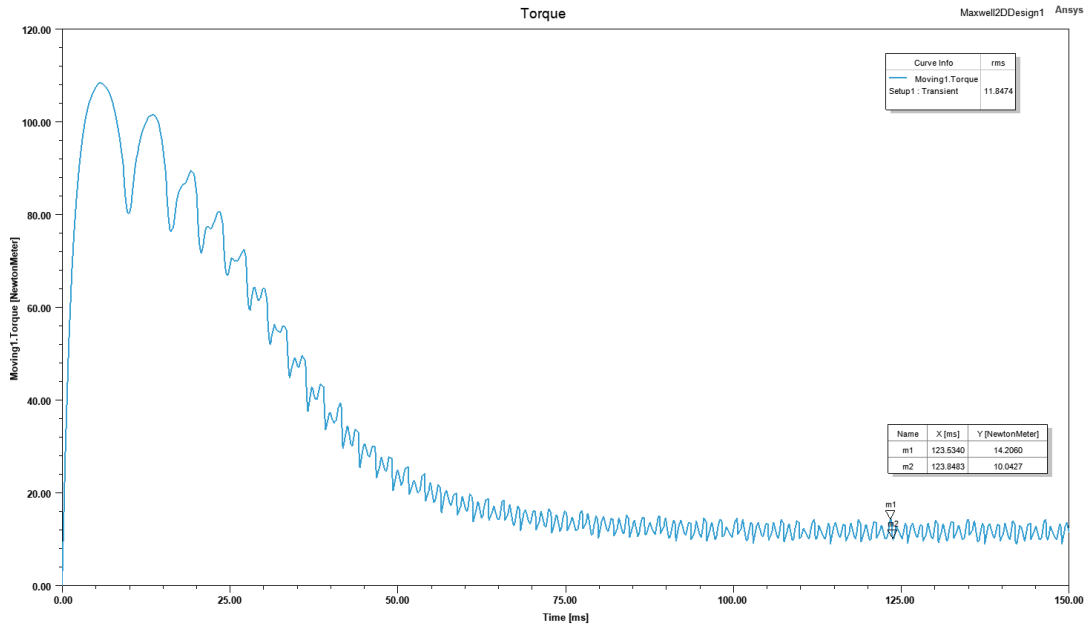
Şekil 3.24 : FDAM'nin hız-zaman grafiği - Motor (A).

Şekil 3.24'te yer alan grafikte yatay eksen zamanı (ms), dikey eksen ise hız değerini (RPM) temsil etmektedir. Mavi çizgi, motorun hızının zamana bağlı değişimini göstermektedir.

Başlangıç (0-25 ms arası) anında hızın oldukça hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu durum, motorun ilk kalkış anında maksimum tork üreterek hızlanmaya başladığını göstermektedir. Kalkış sırasında motorun momenti, ataleti yenmek ve hızlanmayı sağlamak için oldukça yüksektir.

Orta bölümde (25-75 ms arası) hız artışı yavaşlamış ve eğri giderek düzleşmeye başlamıştır. Bu, motorun hızlanma sürecinin sonlarına yaklaştığını ve hızın kararlı bir seviyeye ulaşmak üzere olduğunu ifade etmektedir. Bu aşamada, yük kayıpları ve motor karakteristikleri hızlanmayı sınırlamaya başlar.

Son bölümde (75 ms sonrası) motor hızı sabit bir değere (yaklaşık 450 RPM) ulaşmıştır ve çizgi yatay bir seyir izlemektedir. Bu, motorun nominal çalışma hızına ulaştığını ve kararlı bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Bu noktada tork gereksinimi sabitlenmiş ve enerji tüketimi dengelenmiştir.

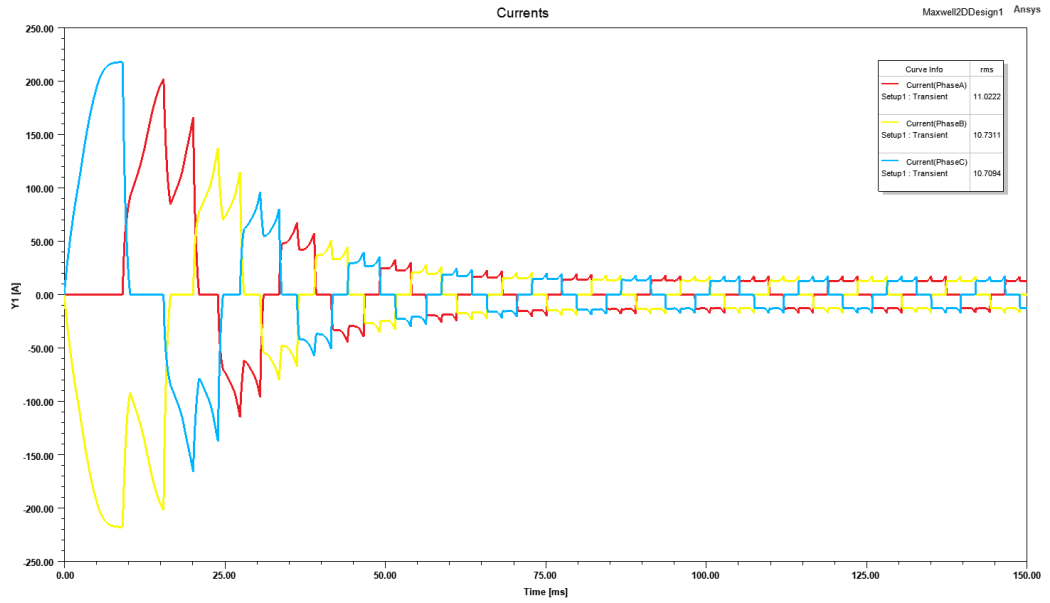


Şekil 3.25 : FDAM'nin tork-zaman grafiği - Motor (A).

Şekil 3.25'te yatay eksen zamanı (ms), dikey eksen ise tork değerini (Nm) temsil etmektedir. Mavi çizgi, motor torkunun zamana bağlı olarak değişimini göstermektedir.

Motorun çalıştırıldığı ilk anda torkta ani bir artış gözlemlenmektedir. Bu, motorun statik atalet momentini yenmek ve hareketi başlatmak için ihtiyaç duyduğu başlangıç torkunu ifade etmektedir. İlk tepe değerindeki ani artış, motorun dinamik bir sistem olarak hızlı bir tepkime kabiliyeti olduğunu göstermektedir.

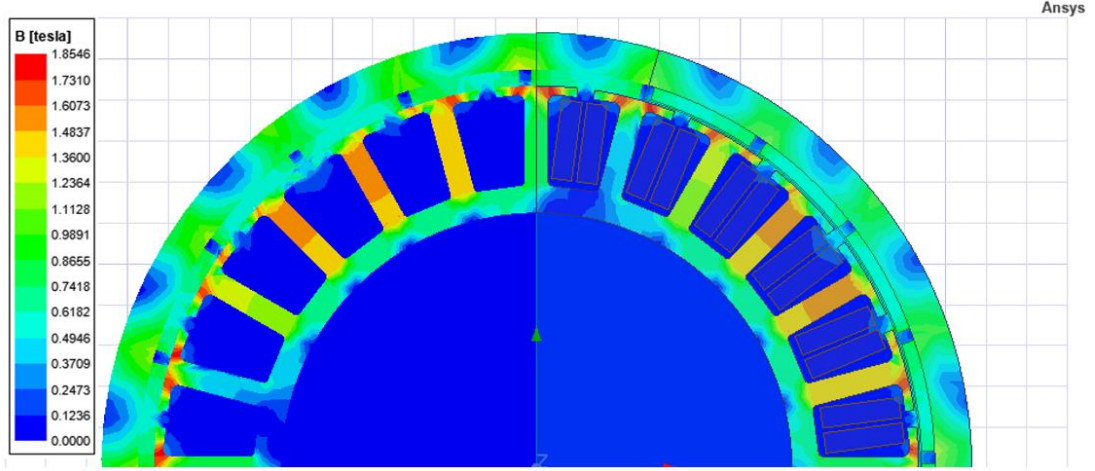
Başlangıçtaki maksimum tork değerinden sonra, torkun zamanla azaldığı ancak bu süreçte belirgin bir şekilde salınımlar içerdiği görülmektedir. Bu salınımlar, motorun elektromekanik doğasından kaynaklanmaktadır ve genellikle kontrol algoritmaları, rotorun manyetik simetrisi, moment dalgalanmaları veya yük dinamiklerinden etkilenmektedir. FDAM'lerde görülen bu tür dalgalanmalar, özellikle PWM kontrolü ile sürülen sistemlerde yaygındır ve motorun manyetik akı harmonikleri veya sürücü devresindeki geçici durum tepkilerinden etkilenebilmektedir. Zaman ilerledikçe tork salınımlarının genliği azalarak daha kararlı bir duruma yaklaştığı gözlemlenmektedir. Bu durum, motorun kararlı bir çalışma rejimine ulaştığını ve denge tork seviyesinde çalıştığını göstermektedir. Durağan duruma geçişteki tork dalgalanmalarının düşük genlikte olması, motorun yüksek verimle çalıştığına işaret etmektedir. Bununla birlikte, dalgalanmaların genliğinin fazla olduğu durumlarda, kontrol algoritmalarının yeniden optimize edilmesi veya mekanik sistemin incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 3.26 : FDAM'nin faz akımları-zaman grafiği - Motor (A).

Şekil 3.26'da yer alan grafik, bir FDAM'nin üç fazına (A, B ve C) ait akımların zaman içerisindeki davranışını göstermektedir. Fazlar renkler ile temsil edilmektedir. Kırmızı A fazı, sarı B fazı, ve mavi C fazıdır. Grafik, motorun faz akımlarının zamanla nasıl değiştiğini ve motorun çalışma karakteristiğini detaylı olarak inceleme imkanı sunmaktadır.

Grafik başlangıcında (ilk 20-30 ms aralığında), faz akımlarının genliklerinin oldukça büyük olduğu ve belirgin bir şekilde salınımlar gösterdiği görülmektedir. Bu, motorun çalıştırıldığı andaki geçici rejimdir ve sistemin henüz kararlı bir duruma ulaşmadığını ifade etmektedir. Bu geçici durum, rotorun harekete geçirilmesi ve motorun dinamik yükleri karşılaması sırasında ortaya çıkan bir davranıştır. Salınımların büyüklüğü ve sönüm oranı, motorun kontrol algoritması (örneğin, PWM sürücüsü veya faz akımı kontrolü) ile ilişkilidir. Düşük sönüm oranı, kontrolcü parametrelerinin optimize edilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Faz akımlarının zamanla birbirine göre simetrik olması, motorun dengeli bir şekilde çalıştığını ve rotorun manyetik akışıyla uyumlu bir kontrol sağlandığını göstermektedir. 50 ms'den sonra, faz akımları sabit bir genlikte dalgalanma göstermekte ve birbirini tamamlayan trapezoidal dalgalar oluşturmaktadır. Bu, motorun nominal çalışma rejimine geçtiğini ve yük altında dengeli bir şekilde çalıştığını ifade etmektedir. Kararlı durumdaki akımların genliği, motorun moment üretimi ile doğrudan ilişkilidir. Faz akımları arasındaki faz farkının doğru olması, rotorun düzgün bir şekilde döndüğünü ve elektromanyetik dengenin sağlandığını göstermektedir.

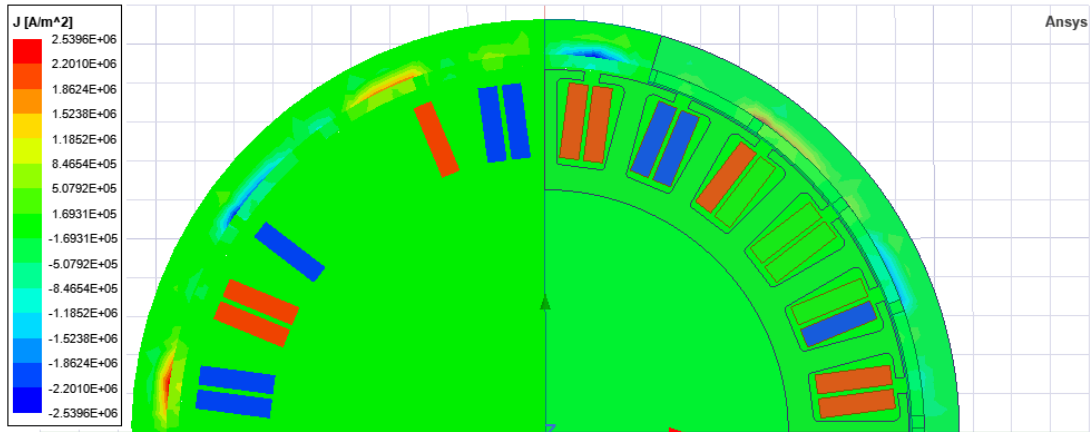


Şekil 3.27 : FDAM'nin manyetik akı yoğunluğu dağılımı -Motor (A).

Şekil 3.27’de gösterilen görsel, bir FDAM’nin manyetik akı yoğunluğunu (B:Tesla) temsil eden simülasyon sonucunu göstermektedir. Sol tarafta yer alan renk skalası, manyetik akı yoğunluğunun farklı seviyelerini ifade etmektedir; kırmızı alanlar maksimum manyetik akı yoğunluğunu (1.8546 Tesla), mavi alanlar ise minimum yoğunluk değerlerini (0 Tesla) temsil etmektedir.

Motorun rotor ve stator bölgeleri arasındaki manyetik akı dağılımı dikkat çekicidir. Rotor bölgesi, genellikle sabit mıknatıslar ile manyetik alanı oluşturan elemanları içerirken, stator bölgesi sarımlar ve manyetik devre elemanlarını barındırmaktadır. Rotor mıknatısları üzerinde daha yüksek yoğunlukta manyetik akı gözlemlenmektedir; bu durum, motorun manyetik kutuplarının performansına doğrudan etki eden bir özellik olarak değerlendirilmektedir. Aynı zamanda stator dişlerinde de manyetik yoğunluk değişimi görülmekte olup, bu, sarımlardan geçen akım ile manyetik etkileşimi yansıtmaktadır.

Simülasyon sonucundaki simetrik yapı, motor tasarımının analiz doğruluğunu artırmakta ve performans hesaplamaları için önemli bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Ancak, analiz sonuçları incelendiğinde, bazı bölgelerdeki yüksek akı yoğunluğu (kırmızı alanlar) manyetik devrede doyum etkisine veya enerji kayıplarına yol açabilecek bir potansiyele işaret etmektedir. Buna karşın, düşük yoğunluklu mavi bölgeler, manyetik devrenin tam olarak verimli bir şekilde kullanılmadığını göstermektedir. Bu bağlamda, motor tasarımının optimize edilmesi, manyetik akı yoğunluğunun homojen dağılımını sağlamak ve motorun genel performansını artırmak adına önem arz etmektedir.

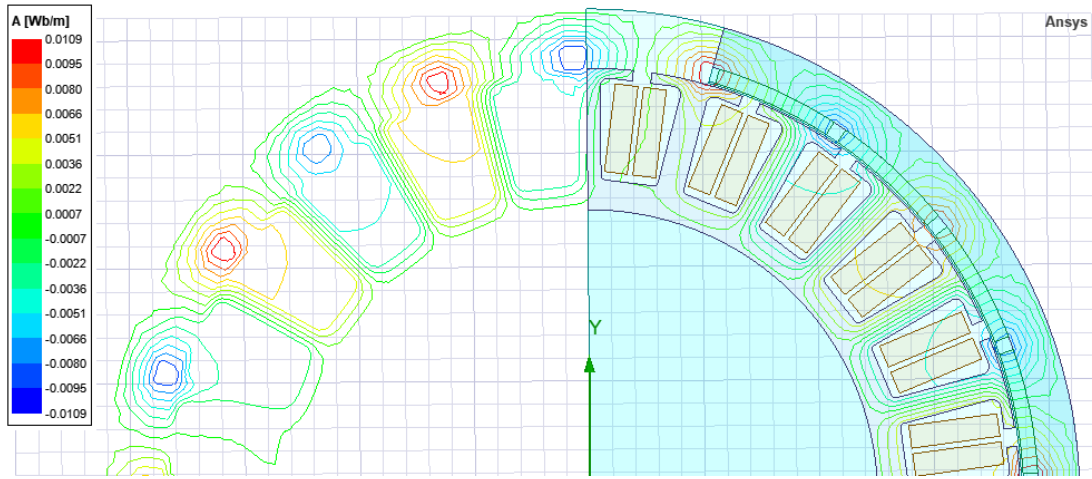


Şekil 3.28 : FDAM'nin elektrik akım yoğunluğu – Motor (A).

Şekil 3.28’de gösterilen görsel ise , bir FDAM’ nin elektrik akım yoğunluğunu ($J:A/m^2$) temsil eden simülasyonu göstermektedir. Sol tarafta yer alan renk skalası, elektrik akım yoğunluğunun büyüklüğünü ifade etmektedir; kırmızı alanlar maksimum akım yoğunluğunu, mavi alanlar ise negatif/düşük yoğunluklu akımı temsil etmektedir.

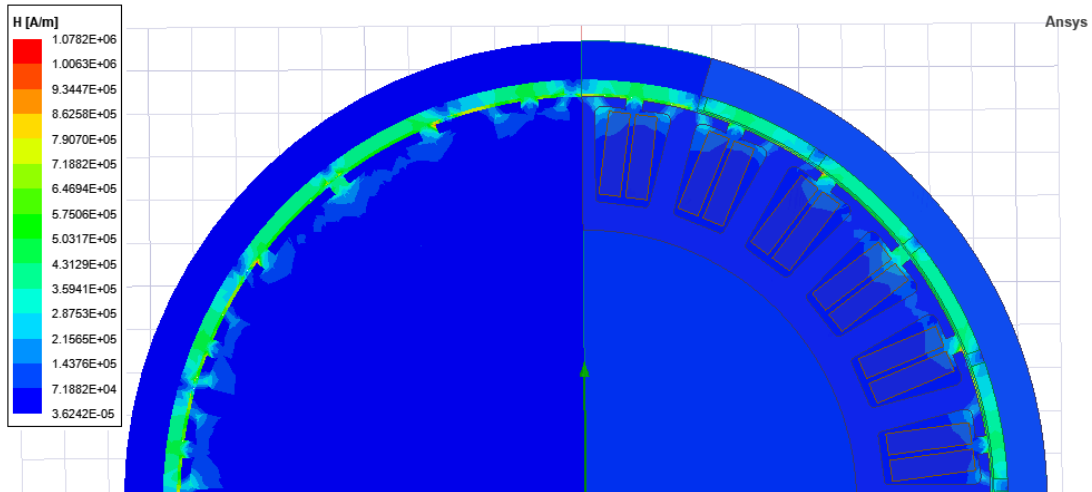
Tasarlanan motorun stator dişlerinde ve sargılarında belirgin akım yoğunluğu farklılıkları gözlemlenmektedir. Kırmızı ve mavi renklerle gösterilen yüksek yoğunluklu bölgeler, motorun manyetik alan üretimi için sargılardan geçen akımın büyüklüğünü ve yönünü belirtmektedir. Analiz sonuçları incelendiğinde, yüksek akım yoğunluğuna sahip bölgelerde (kırmızı alanlar) elektriksel kayıplar ve termal sorunların ortaya çıkabileceği görülmektedir. Ancak yapılan analiz sonucu ortaya çıkan elektrik akım yoğunluğunun maksimum değerinin $2.53 A/m^2$ çıkması bu sorunların karşımıza çıkma ihtimalini oldukça düşürmektedir. Ayrıca, negatif akım yoğunluğunu ifade eden mavi bölgeler, faz farklarının veya geri dönüş akımlarının bir göstergesidir.

İletkenin kesit alanının küçük olması, akım yoğunluğunu artırırken sargıların dirençlerini de yükseltmekte ve dolayısıyla bakır kayıplarını artırmaktadır. Akım yoğunluğunun sınır değerlerini aşması, motor içinde ısının artmasına ve sargıların zarar görmesine yol açmaktadır. Öte yandan, iletken kesit alanının büyük seçilmesi durumunda akım yoğunlukları ve bakır kayıpları azalmaktadır. Ancak, büyük kesitli iletken kullanımı tur sayısının azalmasına neden olmakta ve bu durum istenen çalışma verimliliğini yakalamayı zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, iletken kesit alanı, akım yoğunluğunun sınır değerleri aşılmayacak kadar büyük, aynı zamanda optimum tur sayılarını elde edecek kadar küçük olacak şekilde dikkatlice belirlenmelidir.



Şekil 3.29 : FDAM'nin manyetik akı hatları – Motor(A).

Yukarıda yer alan Şekil 3.29'da FDAM'nin manyetik akı çizgilerinin motor içerisindeki dağılımını göstermektedir. Sol tarafta yer alan renk skalası, manyetik vektör potansiyel değerlerini ($A:Wb/m$) ifade etmektedir. Görselde yer alan manyetik akı çizgileri, rotor mıknatıslarından başlayarak hava aralığı üzerinden stator dişlerine doğru ilerlemekte ve manyetik devreyi tamamlamaktadır. Akı çizgilerinin yoğunlaştığı bölgeler, manyetik akının daha yüksek yoğunlukta biriktiği alanlara işaret etmektedir. Rotor ve stator arasındaki bu etkileşim, motorun elektromanyetik moment üretim mekanizmasını destekleyen temel bir olgu olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, akı çizgilerinin düzenli ve simetrik bir şekilde dağılım göstermesi, motorun tasarımında geometrik ve manyetik simetriye dikkat edildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 3.30 : FDAM 'nin manyetik alan kuvveti -Motor (A).

Şekil 3.30, bir FDAM'nin manyetik alan kuvvetinin dağılımını göstermekte ve manyetik yoğunluğun stator dişleri ile rotor mıknatıslarında yoğunlaştığını ortaya

koymaktadır. Yüksek yoğunluklu bölgeler elektromanyetik kuvvet üretimi için avantaj sağlarken, aşırı yoğunluk çekirdek doygunluğuna ve enerji kayıplarına yol açmaktadır. Simetrik tasarım manyetik akının dengeli dağılımını sağlasa da düşük yoğunluklu bölgelerdeki akı dağılımının iyileştirilmesi ve genel tasarım optimizasyonu motorun performansını artırabilmektedir.

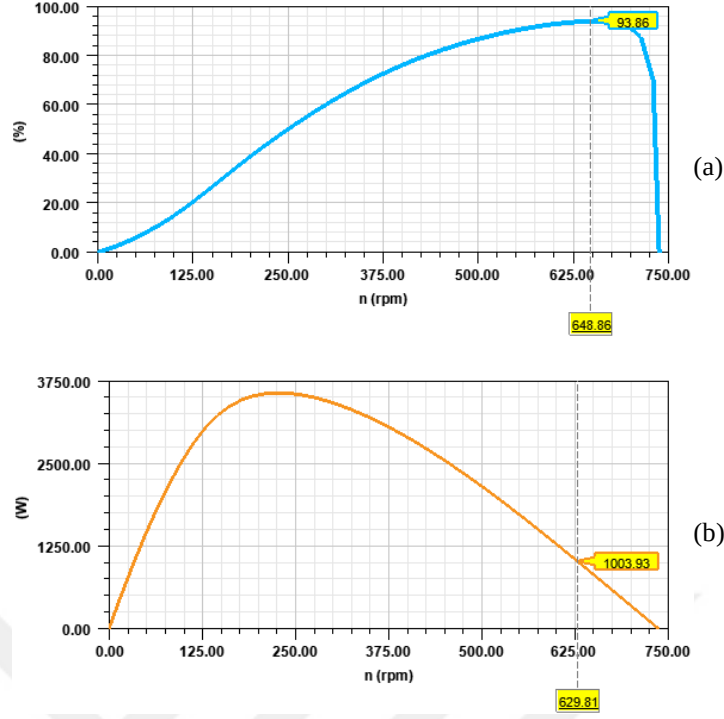
3.6.2. Motor (B) simülasyon sonuçları

Aşağıda yer alan Tablo 3.4'te Motor (B)'nin simülasyon sonuçları paylaşılmıştır.

Tablo 3.4 : Motor (B) simülasyon sonuçları.

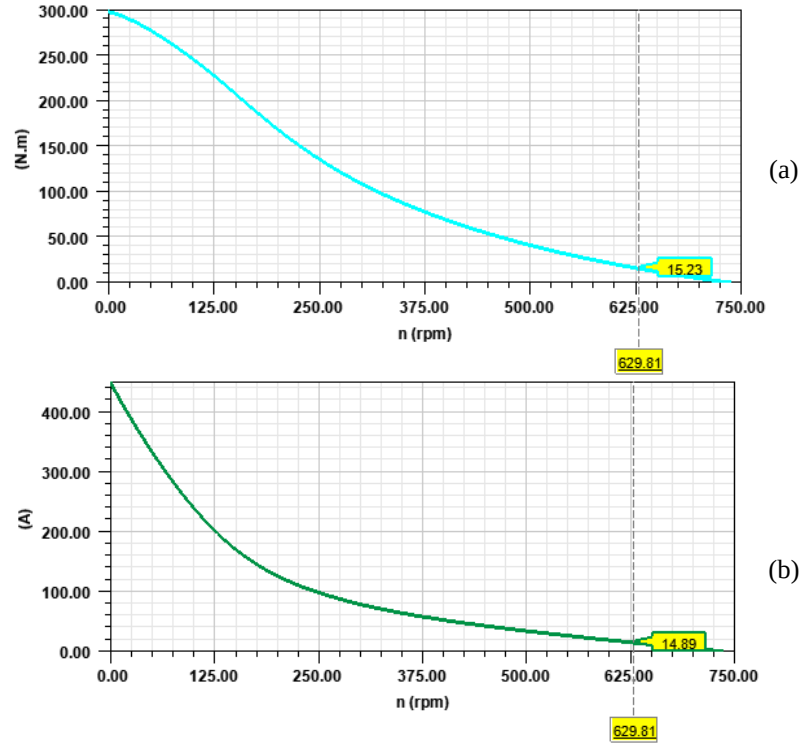
Parametreler	Değerler
Armatür Akımı (RMS)	13.232 A
Toplam Kayıp	67.912 W
Çıkış Gücü	1000 W
Giriş Gücü	1067.9 kW
Verimlilik	93.6408 %
Nominal Hız	630.232 RPM
Nominal Tork	15.1525 Nm
Yüksüz Hız	745.306 RPM
Artık Akı Yoğunluğu (Rotor)	1.23 T
Stator Oluk Doldurma Faktörü	47.6722 %
Armatür Faz Direnci-R1	0.0800426 Ω
Geri EMK Sabiti (K_E)	0.930392 V/rad
Nominal Tork Sabiti	1.02157 Nm/A
Armatür Akım Yoğunluğu	3.82032 A/mm ²
Kilitli Rotor Torku	297.731 Nm
Kilitli Rotor Akımı	448.928 A
Stator Dış Akı Yoğunluğu	1.97629 T

Yukarıdaki tabloda da görüldüğü gibi, RMXprt yazılımında talep edilen nominal değerlerin uygun sınırlar içerisinde yer aldığı gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre; çıkış gücü 1000 W, giriş gücü 1068 W, akım değeri 13.2 A, nominal devri 630 rpm, nominal moment 15 Nm ve verimi %93.64 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.31 : RMXprt hız-verim grafiği (a), RMXprt hız-çıkış gücü grafiği (b).

Şekil 3.31 a'dan anlaşılağı üzere, hedeflenen RPM değeriinde motorun verim grafiği gösterilmektedir. Şekil 3.31 b'den de anlaşılağı üzere, hedeflenen nominal RPM değeri ile istenilen nominal güç seviyesi birbiriyle uyum göstermektedir.

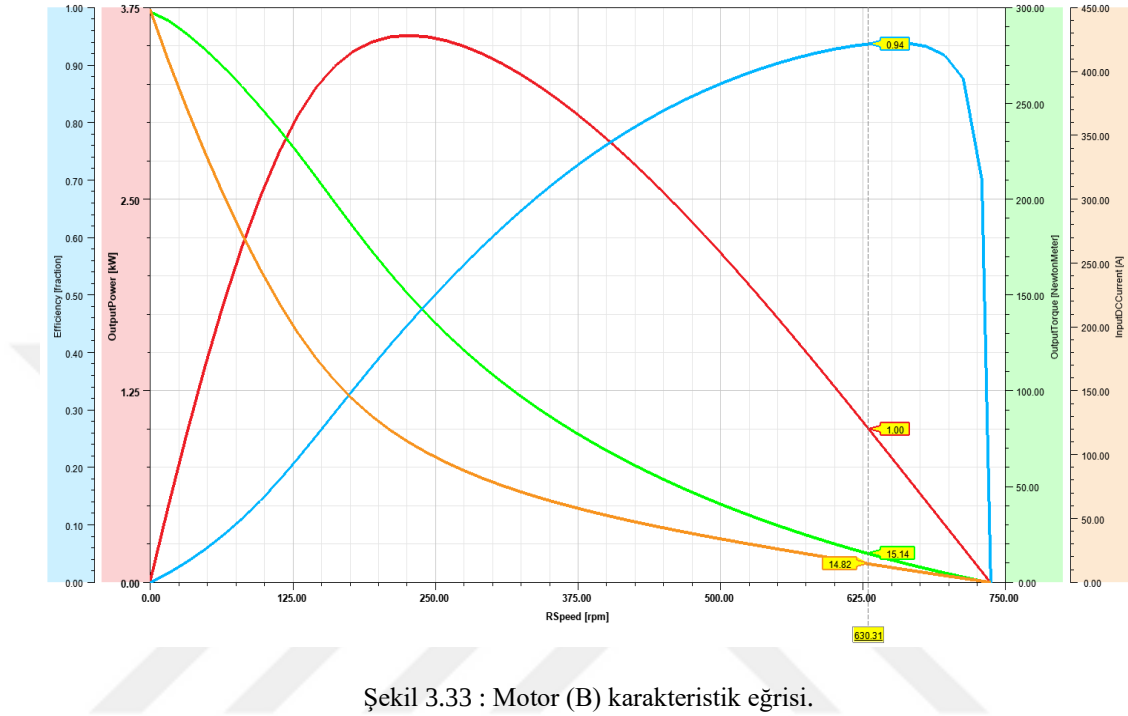


Şekil 3.32 : RMXprt hız-tork grafiği (a), RMXprt hız-akım grafiği (b).

Şekil 3.32 a’da ise hedeflenen hızlarda ulaşılabilecek tork değerleri gösterilmiştir.

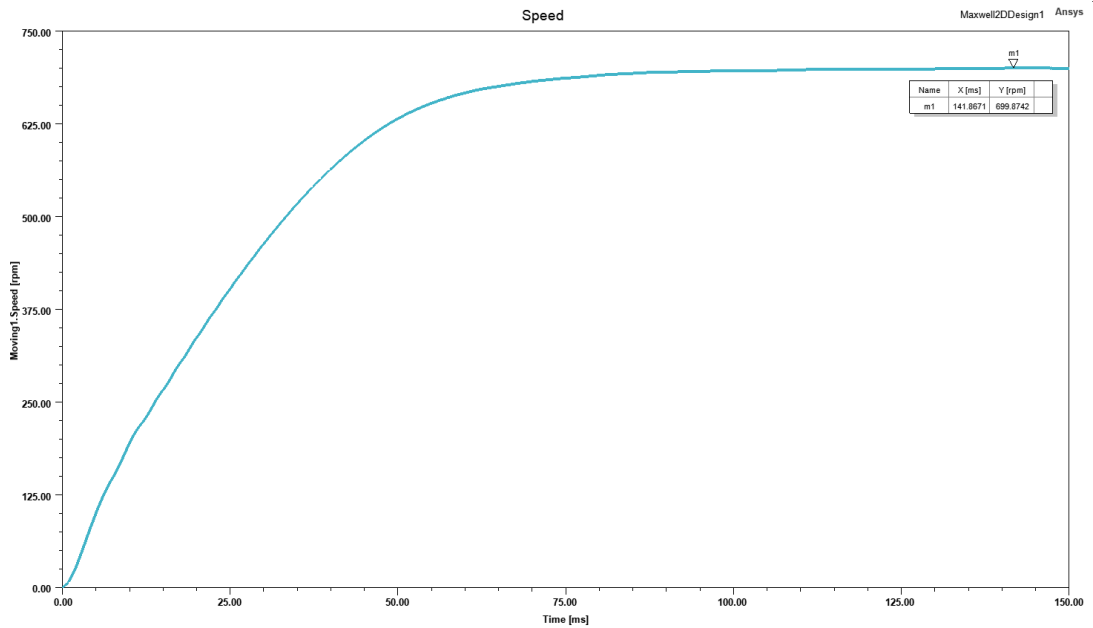
Şekil 3.32 b’den de anlaşılacağı üzere, hedeflenen nominal RPM değerinde motordan en düşük seviyede akım çekilmektedir.

Şekil 3.33’te Motor (B) tasarımının karakteristik eğrisi gösterilmektedir.



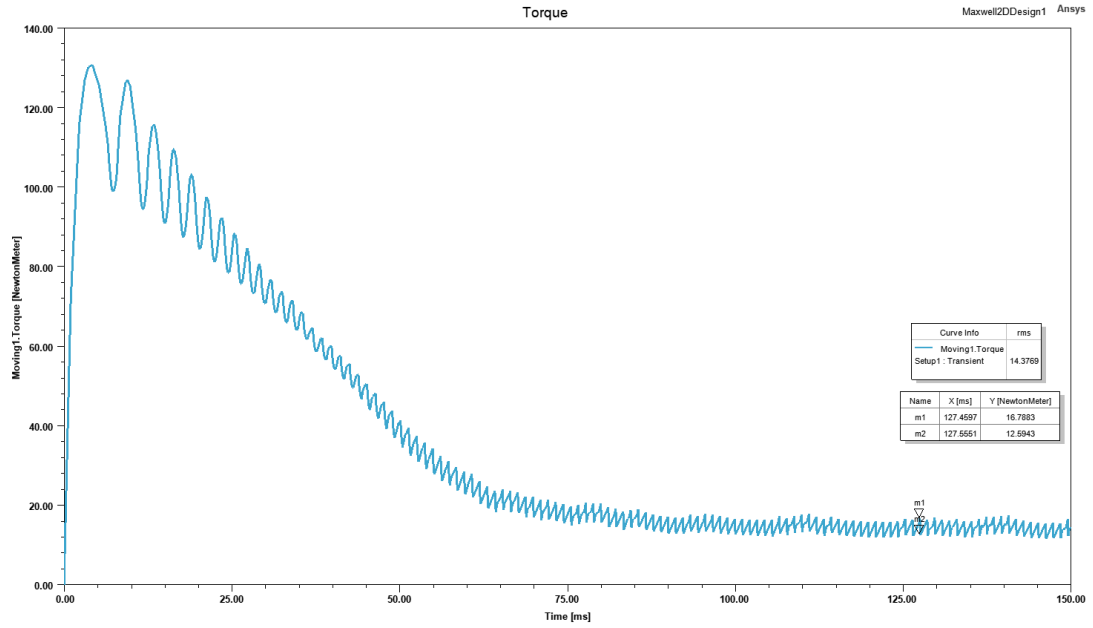
Şekil 3.33 : Motor (B) karakteristik eğrisi.

Aşağıda yer alan Şekil 3.34’te Motor (B) tasarımının hız-zaman grafiği gösterilmektedir.



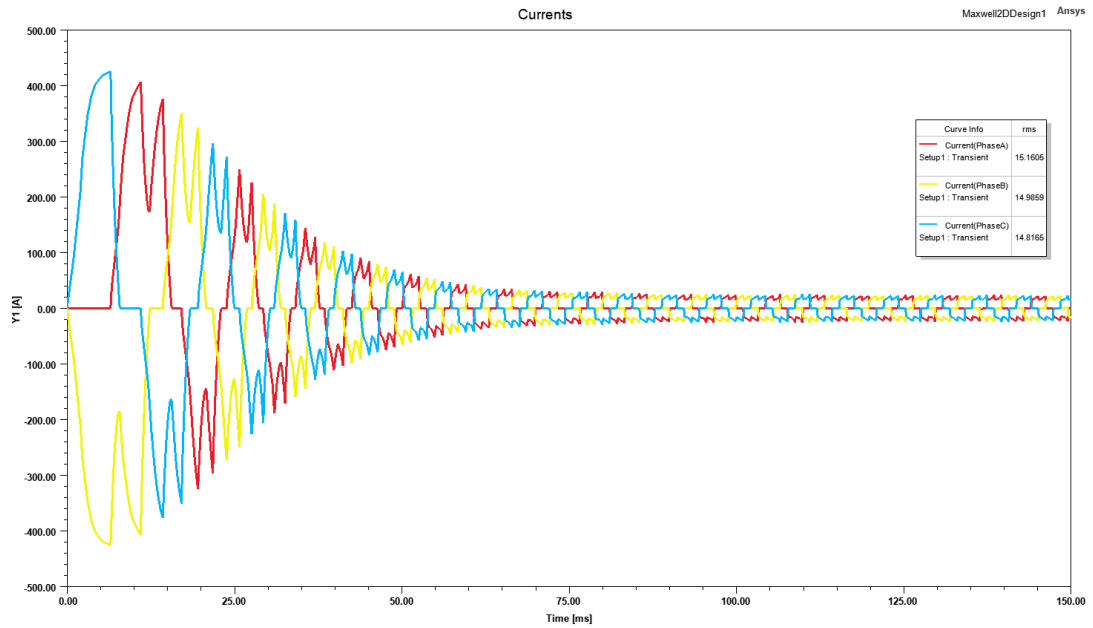
Şekil 3.34: FDAM'nin hız-zaman grafiği - Motor (B).

Şekil 3.35'te Motor (B) tasarımının tork-zaman grafiği gösterilmektedir.



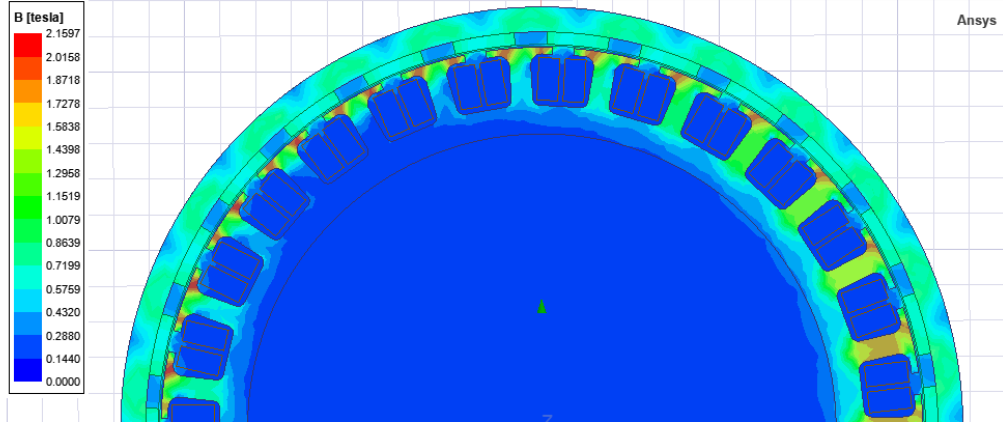
Şekil 3.35 : FDAM'nin tork-zaman grafiği - Motor (B).

Şekil 3.36'da Motor (B) tasarımının faz akımları-zaman grafiği gösterilmektedir.



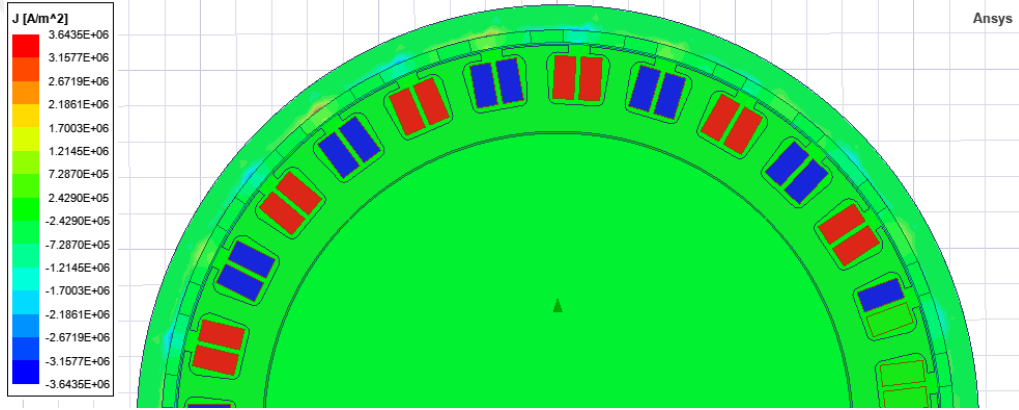
Şekil 3.36 : FDAM'nin faz akımları-zaman grafiği - Motor (B).

Şekil 3.37'de Motor (B) tasarımının manyetik akı yoğunluğu dağılımı (B:Tesla) gösterilmektedir.



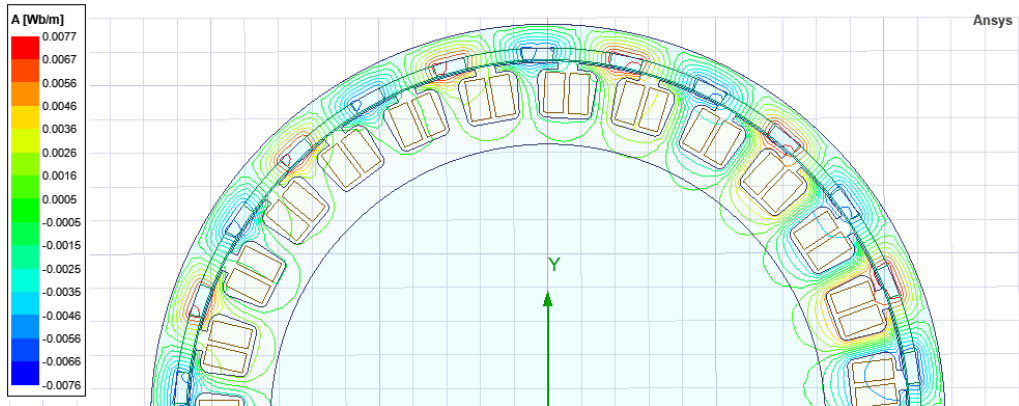
Şekil 3.37 : FDAM'nin manyetik akı yoğunluğu dağılımı -Motor (B).

Şekil 3.38'de Motor (B) tasarımının elektrik akım yoğunluğu ($J:A/m^2$) gösterilmektedir.



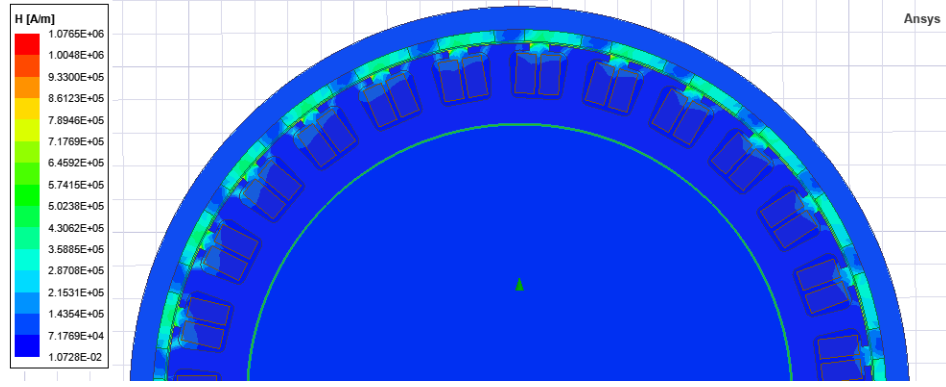
Şekil 3.38 : FDAM'nin elektrik akım yoğunluğu – Motor (B).

Şekil 3.39'da Motor (B) tasarımının manyetik akı hatları ($A:Wb/m$) gösterilmektedir.



Şekil 3.39 : FDAM'nin manyetik akı hatları – Motor(B).

Şekil 3.40'da Motor (B) tasarımının manyetik alan kuvveti ($H:A/m$) gösterilmektedir.



Şekil 3.40 : FDAM 'nin manyetik alan kuvveti -Motor (B).

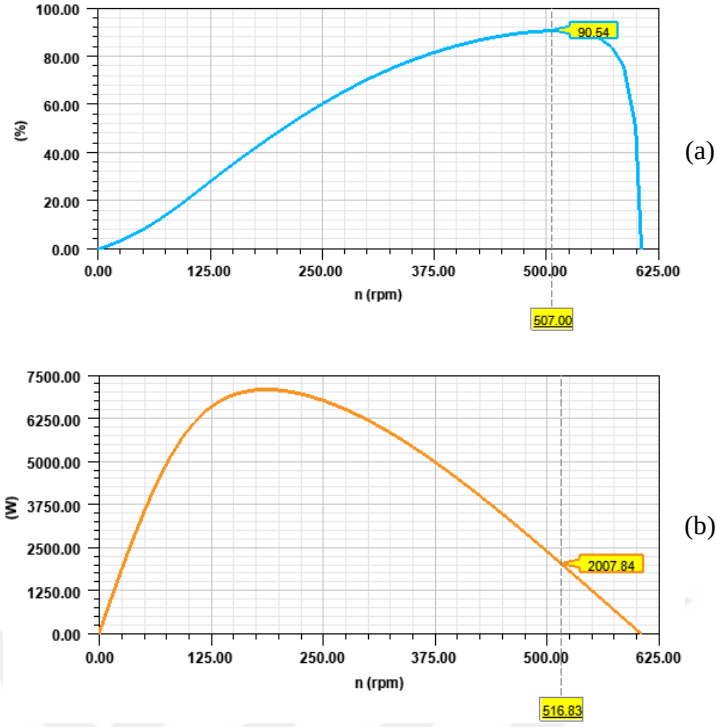
3.6.3. Motor (C) simülasyon sonuçları

Aşağıda yer alan Tablo 3.5'te Motor (C)'nin simülasyon sonuçları paylaşılmaktadır.

Tablo 3.5 : Motor (C) simülasyon sonuçları.

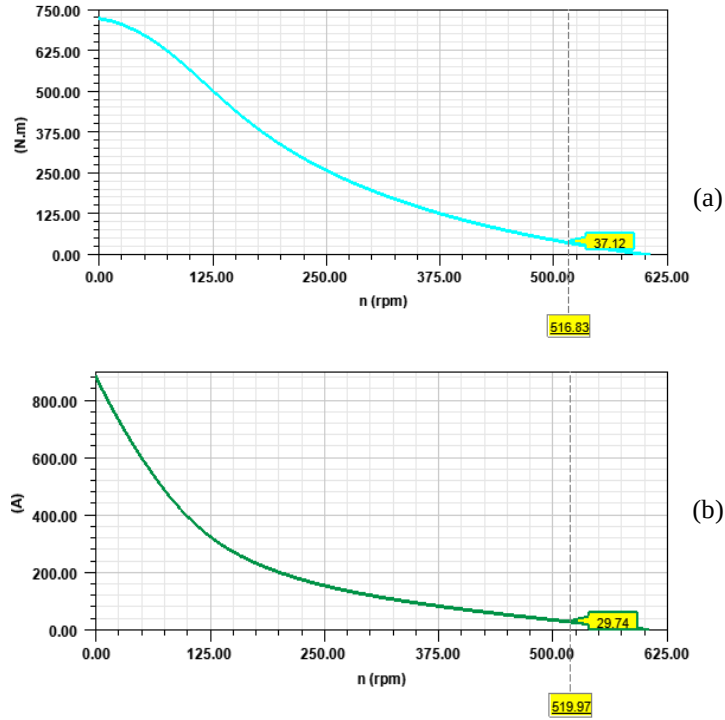
Parametreler	Değerler
Armatür Akımı (RMS)	26.572 A
Toplam Kayıp	209.69 W
Çıkış Gücü	2000 W
Giriş Gücü	2209.7 kW
Verimlilik	90.5105 %
Nominal Hız	517.176 RPM
Nominal Tork	36.9295 Nm
Yüksüz Hız	611.97 RPM
Artık Akı Yoğunluğu (Rotor)	1.23 T
Stator Oluk Doldurma Faktörü	50.3975 %
Armatür Faz Direnci-R1	0.0403988 Ω
Geri EMK Sabiti (K_E)	1.13009 V/rad
Nominal Tork Sabiti	1.2037 Nm/A
Armatür Akım Yoğunluğu	4.40531 A/mm ²
Kilitli Rotor Torku	722.259 Nm
Kilitli Rotor Akımı	887.03 A
Stator Dış Akı Yoğunluğu	1.90432 T

Tablodan da anlaşılacağı gibi, RMXprt yazılımında talep edilen nominal değerlerin uygun sınırlar içerisinde yer aldığı gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre; çıkış gücü 2000 W, giriş gücü 2209.7 W, akım değeri 26.5A, nominal devri 517rpm, nominal moment 37Nm ve verimi %90 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.41 : RMXprt hız-verim grafiği (a), RMXprt hız-çıkış gücü grafiği (b).

Şekil 3.41 a'dan anlaşılabacağı üzere, hedeflenen RPM değerinde motorun verim grafiği gösterilmektedir. Şekil 3.41 b'den de anlaşılabacağı üzere, hedeflenen nominal RPM değeri ile istenilen nominal güç seviyesi birbiriyle uyum göstermektedir.

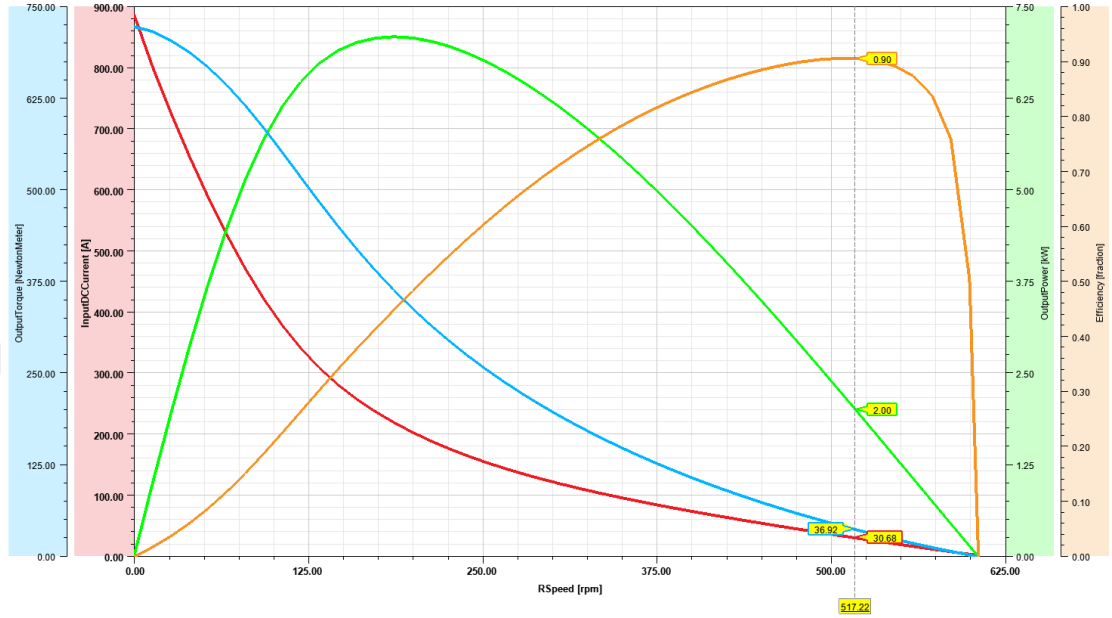


Şekil 3.42 : RMXprt hız-tork grafiği (a), RMXprt hız-akım grafiği (b).

Şekil 3.42 a’da ise hedeflenen hızlarda ulaşılabilecek tork değerleri gösterilmiştir.

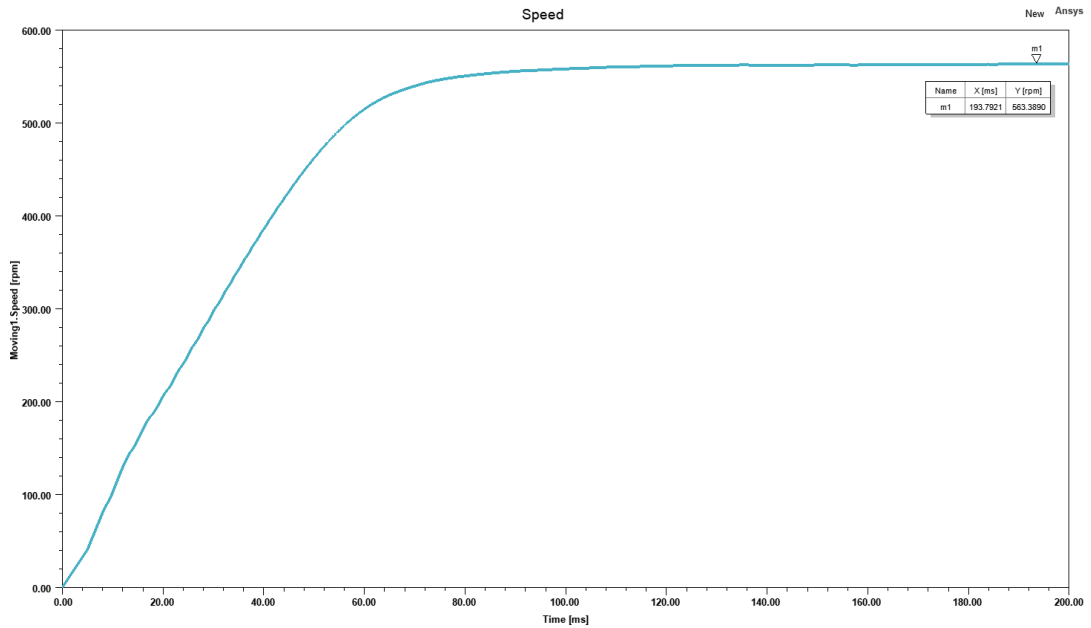
Şekil 3.42 b’den de anlaşılacağı üzere, hedeflenen nominal RPM değerinde motordan en düşük seviyede akım çekilmektedir.

Şekil 3.43’te Motor (C) tasarımının karakteristik eğrisi gösterilmektedir.



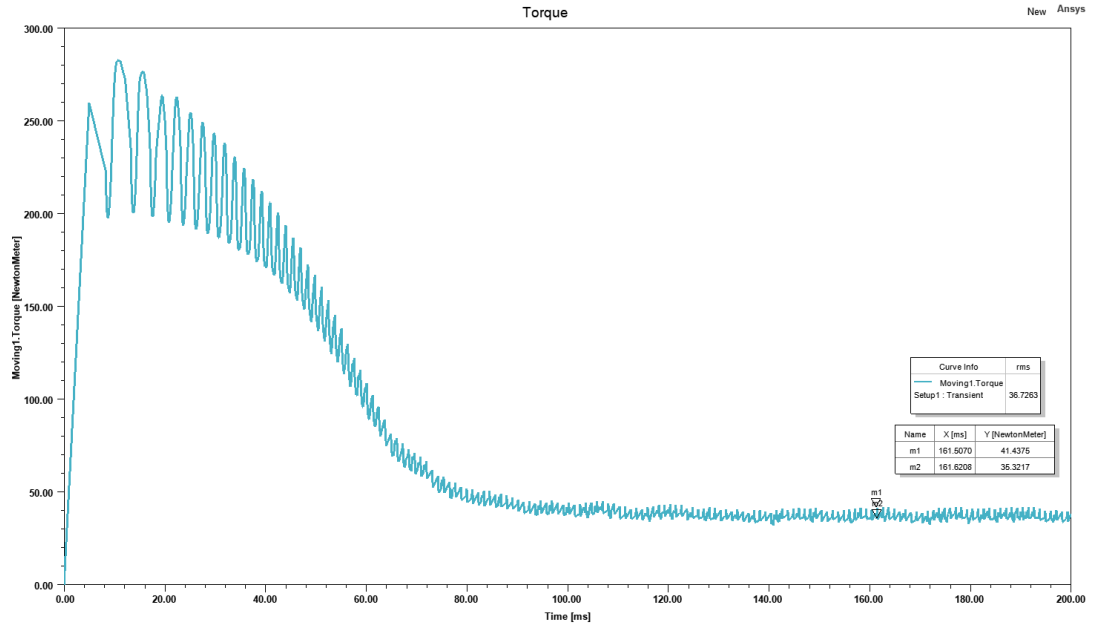
Şekil 3.43 : Motor (C) karakteristik eğrisi.

Aşağıda yer alan Şekil 3.44’te Motor (C) tasarımının hız-zaman grafiği gösterilmektedir.



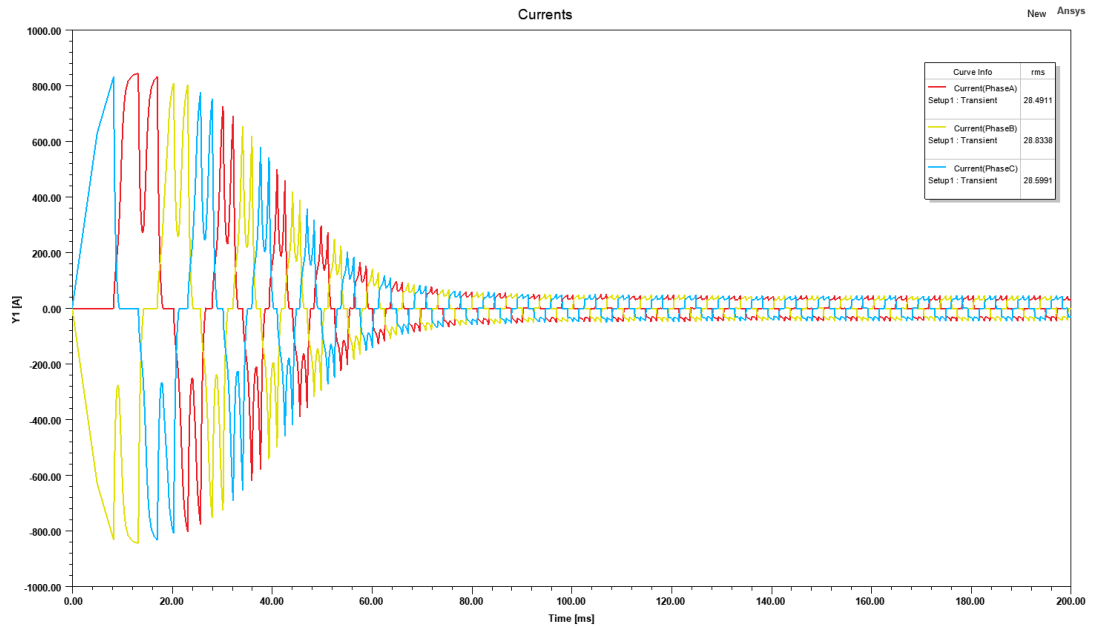
Şekil 3.44: FDAM'nin hız-zaman grafiği - Motor (C).

Şekil 3.45'te Motor (C) tasarımının tork-zaman grafiği gösterilmektedir.



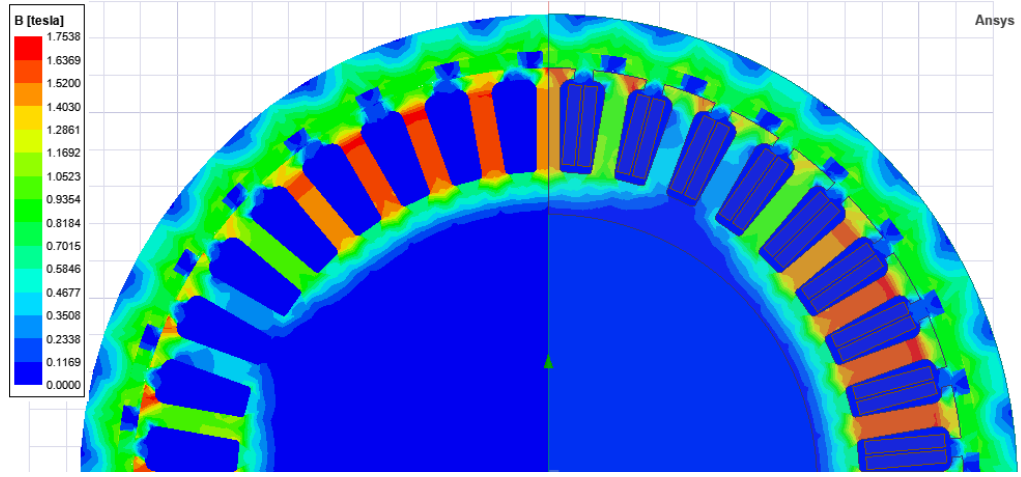
Şekil 3.45 : FDAM'nin tork-zaman grafiği - Motor (C).

Şekil 3.46'da Motor (C) tasarımının faz akımları-zaman grafiği gösterilmektedir.



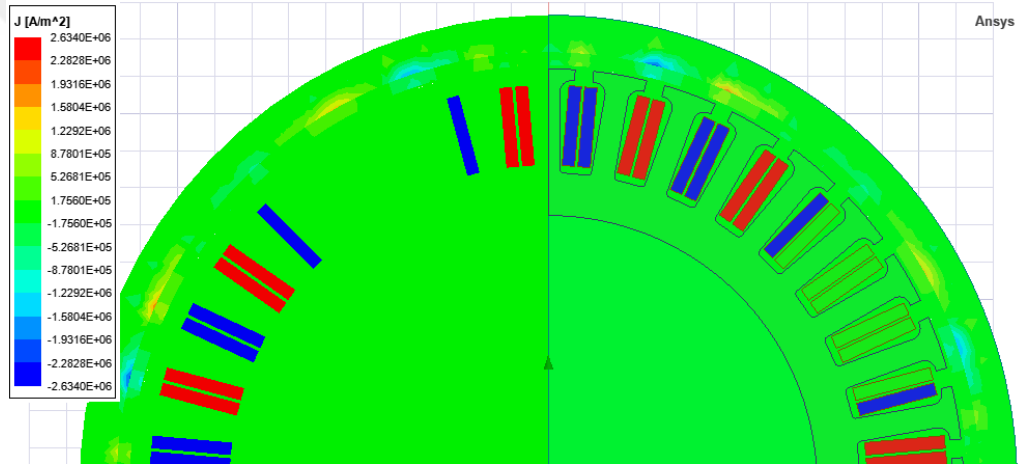
Şekil 3.46 : FDAM'nin faz akımları-zaman grafiği - Motor (C).

Şekil 3.47'de Motor (C) tasarımının manyetik akı yoğunluğu dağılımı (B:Tesla) gösterilmektedir.



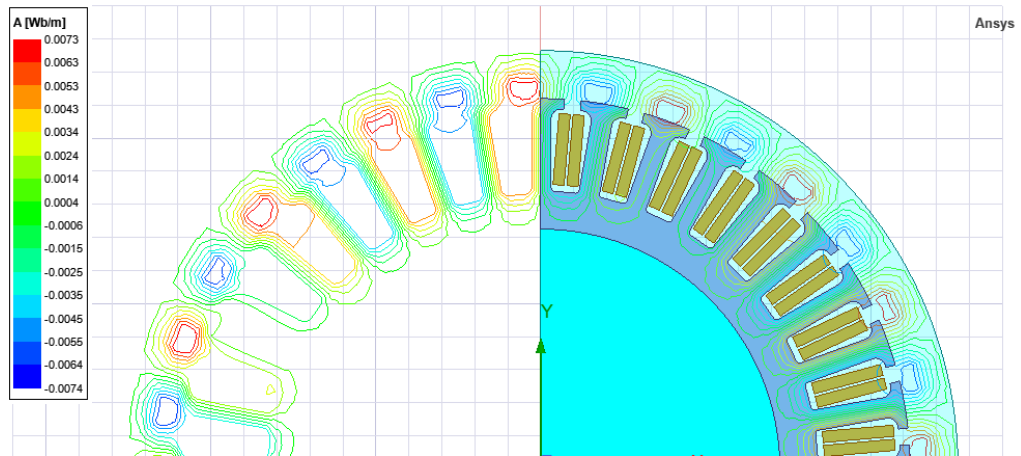
Şekil 3.47 : FEM'nin manyetik akı yoğunluğu dağılımı -Motor (C).

Şekil 3.48'de Motor (C) tasarımının elektrik akım yoğunluğu ($J: A/m^2$) gösterilmektedir.



Şekil 3.48 : FEM'nin elektrik akım yoğunluğu – Motor (C).

Şekil 3.49'da Motor (C) tasarımının manyetik akı hatları ($A: Wb/m$) gösterilmektedir.



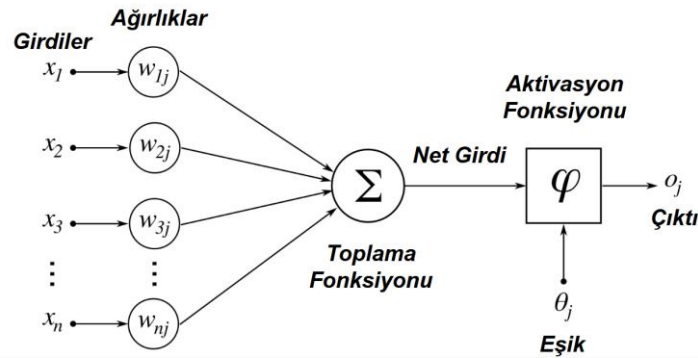
Şekil 3.49 : FEM'nin manyetik akı hatları – Motor(C).

BÖLÜM 4. YAPAY SİNİR AĞI MODEL ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI

Yapay sinir ağları genel anlamda insan beyninin işleyişini taklit etmeyi amaçlayan bir bilgi işleme tekniğidir. Bu ağlar birbirine paralel şekilde bağlanan işlem elemanları (yapay sinir hücreleri, nöronlar, birimler, düğümler) ve bu elemanların hiyerarşik bir düzenlenmesinden oluşmaktadır. Yapay sinir ağlarının paralel bir yapıya sahip olması, bilgisayarları geleneksel yöntemlerden oldukça farklı şekillerde kullanmalarına olanak tanımaktadır. Özellikle seri bilgisayarlarda klasik yöntemlerle gerçekleştirilmesi imkânsız ya da oldukça zor olan bazı işlemleri (örneğin ses ve görüntü tanıma) kolaylıkla yerine getirebilmeleri, yapay sinir ağlarının üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

Yapay sinir ağlarının temel mantığı ile insan beyninin işlevleri arasında bazı benzerlikler bulunmaktadır. Her ne kadar yapay sinir ağlarının temel yapısı insan beyninin fiziksel özelliklerinden ilham alınarak geliştirilmiş olsa da mevcut halleriyle insan beyninin tam bir modeli ya da ona yakın bir temsilcisi olarak görülmesi mümkün değildir.

Yapay sinir ağları, biyolojik sinir ağlarına benzer şekilde, yapay sinir hücrelerinin veya işlem elemanlarının bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Şekil 4.1’de gösterildiği gibi her bir işlem elemanı altı temel bileşenden meydana gelmektedir. Bu bileşenler; girdiler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, eşik (dürtü veya çıktı) fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktıdan oluşmaktadır [108].



Şekil 4.1 : Yapay sinir ağı yapısı [109].

Ağlarda kullanılan yapay sinirler biyolojik sinirlerin özelliklerini andıran prensiplere dayanmaktadır. Biyolojik sinir hücrelerinde olduğu gibi bir işlem elemanına birden fazla girdi gelir ve yalnızca bir çıktı oluşturulmaktadır. Girdiler, dendritlere benzer şekilde diğer yapay hücrelerden bağlantılar aracılığıyla işlem elemanına bilgi iletmektedir [55]. Bazı durumlarda, işlem elemanları kendi çıktısını geri besleme yoluyla tekrar kendisine yönlendirebilir. Bu bilgiler, işlem elemanları arasındaki bağlantı hatlarında saklanmaktadır. Her bağlantı, işlem elemanları arasındaki etkinin derecesini belirleyen bir ağırlık değerine sahiptir. Ağırlık arttıkça etkinin büyüdüğü, sıfır olduğunda ise etkinin ortadan kalktığı görülür. Negatif bir ağırlık, etkinin ters yönde olduğunu ifade etmektedir. Bu ağırlıklar hem sabit hem de değişken olabilmektedir.

Toplama fonksiyonu, işlem elemanına gelen toplam girişi hesaplayan bir yapıdır. Bu toplam giriş, genellikle bağlantı ağırlıklarıyla gelen verilerin çarpılıp sonrasında toplanmasıyla elde edilir. Bu yüzden, bu işleme "toplama fonksiyonu" denilmektedir. Eşik fonksiyonu ise, toplama fonksiyonundan gelen toplam girişi alarak işlem elemanının çıkışını belirler. Genellikle türevlenmesi mümkün bir fonksiyon olarak tasarlanması tercih edilir. Toplama ve eşik fonksiyonları, çözülmekte olan probleme bağlı olarak farklı yapılandırmalar alabilir. İşlem elemanının çıkış ünitesi, çıktı fonksiyonunun ürettiği sinyali diğer işlem elemanlarına veya dış dünyaya iletme görevini üstlenir. İşlem elemanları, ağırlık topolojik yapısına bağlı olarak birbirinden bağımsız ve paralel bir şekilde çalışabilir. Şekil 4.1'de gösterilen yapay sinir hücresine $x_1, x_2, x_3...$ giriş işaretleri uygulanır. Her bir giriş işareti, $w_1, w_2, w_3, ...w_n$ ağırlık değerleriyle çarpılarak ve basit sinir modeli kullanılarak o_j çıkışı elde edilmektedir [55].

Yapay zeka modelinin eğitimi, belirli bir görevi yerine getirebilmesi için yapılan öğretim sürecidir. Bu süreç, modelin doğru sonuçlar üretebilmesi için bir algoritma geliştirilmesini ve modelin bu algoritmayı öğrenmesini kapsamaktadır. Yapay zeka modellerinin eğitimi, çoğunlukla makine öğrenimi teknikleriyle gerçekleştirilmektedir. Makine öğrenimi, bilgisayarların verilerden öğrenmesini sağlayan bir araştırma alanıdır. Yapay zeka modelleri, veriler üzerinde eğitim alarak bu verilerdeki desenleri ve ilişkileri kavramaktadır. Bu desenleri ve ilişkileri kullanarak, yeni verileri daha önce karşılaştıkları verilerle benzer şekilde sınıflandırmak, tahmin yapmak veya işlemek gibi görevleri yerine getirmektedirler.

Yapay zeka modelinin eğitim sürecinin temel aşamaları şunlardır:

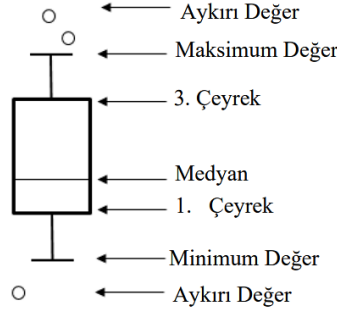
- Veri toplama
- Veri ön işleme
- Model oluşturma
- Model eğitimi
- Model değerlendirme

4.1. Veri Setlerinin Elde Edilmesi ve Veri Ön İşleme

Yapay zeka modelinin eğitilmesi için modelin öğreneceği verilere ihtiyaç vardır. Bunlar, modelin eğitileceği görevi temsil eden verilerdir. Örneğin, bir görüntü tanıma modelinin eğitilmesi için, çeşitli nesnelerin görüntülerine ihtiyaç vardır.

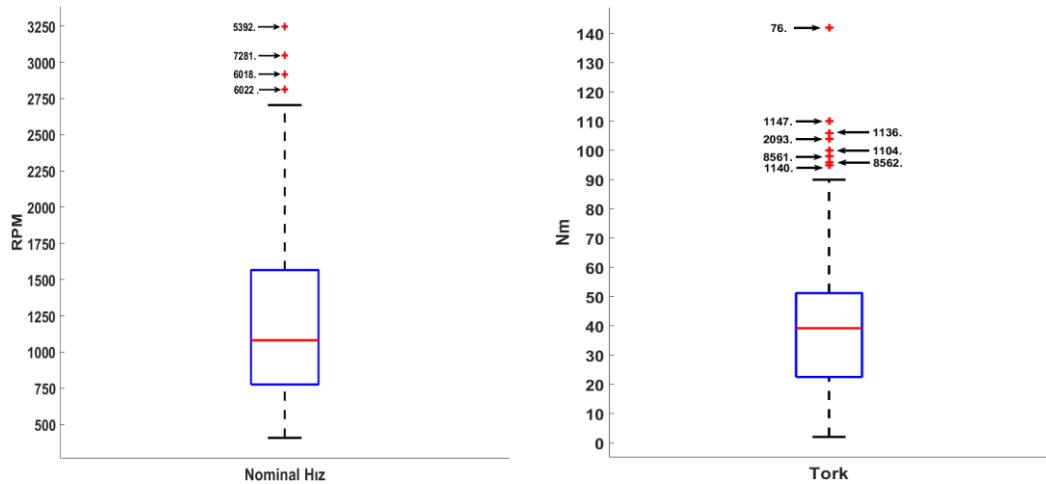
Tez çalışmasında, yapay sinir ağları kullanılarak FDAM'nin motor performans değerleri ve örnek tasarım tahmini yapılmıştır. Bu kapsamda analitik motor hesaplamaları ve sonlu eleman yöntemi kullanılarak yapılan analizlerin detaylı incelemesi yapılarak yapay sinir ağına verilecek olan girdiler belirlenmiştir. Belirlenen girdilerin FDAM'yi doğrudan etkileyen parametreler olduğu analiz çalışmalarında görülmüştür. Bu değerler FDAM'lerde yüksek maliyetlere sebep olabilecek olan temel bileşenler (mıknatıs, rotor çeliği ve stator sacı) dışarda bırakılarak seçilmiştir. Başta referans hız değeri, referans güç değeri, anma gerilimi olmak üzere, tel kalınlığı, paralel tel sayısı, sarım sayısı, oluk/kutup oranı, mıknatıs kalınlığı ve embrace oranı yapay sinir ağına girdi olarak verilmiştir. Böylece, tasarım çalışmalarında birçok farklı kombinasyonun denenebileceği parametreler seçilmiştir. Elde edilen veri setleri, Ansys Maxwell programından bir dizi parametrik optimizasyon yapılarak elde edilmiştir. Yapılan bu optimizasyon sayesinde, verilerin doğruluğu matematiksel olarak ispatlanmıştır. Yapay sinir ağı modeli için, kullanılacak olan girdi değerleri ve çıktı değerleri, tasarımları gerçekleştirilen Motor (A), Motor (B) ve Motor (C)'nin RMxprt ve 2D analiz simülasyonu sonuçlarından hazırlanmıştır. Elde edilen veriler modelin çalışma performansını doğrudan etkilemektedir. Çalışmanın performansı bu denli hassas olduğu için eğitim ve test seti içerisinde yer alan aykırı verilerin belirlenip, modelde kullanılmasının önüne geçilmelidir. Literatürde bu çalışmaya “Aykırı Veri Analizi” adı verilmektedir. Bahsedilen analiz çalışmasında; standart sapma yöntemi,

box- plot grafiği, Rosner testi, Weisberg testi, Dixon testi ve Grubbs testi gibi birçok farklı yöntemler kullanılabilmekeedir [110]. Bu çalışmada aykırı verilerin belirlenmesi için box-plot yöntemi kullanılmıştır. Box-Plot (Kutu Grafiği), verilerin dağılımını görselleştirmek ve aykırı değerleri belirlemek için kullanılan, istatistiksel bir yöntem olup, yöntemin görselleştirilmiş hali şekil 4.2’de gösterilmektedir.



şekil 4.2 : Box-plot (kutu grafiği) görselleştirilmesi [111].

şekil 4.2’de görüldüğü üzere veriler küçükten büyüğe sıralanarak ortanca değer belirlenir ve bu değer kutu grafiğinin merkez çizgisini oluşturmaktadır. Kutunun alt kenarı birinci çeyreği, st kenarı ise üçüncü çeyreği temsil etmektedir. Kutunun dışına uzanan çizgiler minimum ve maksimum değerleri gösterirken, bu çizgilerin uzunluğu belirli bir kurala göre hesaplanmaktadır. 1. eyrek değerin 1,5 katı kadar uzatılarak belirlenmektedir. Bu sınırların dışına çıkan veriler aykırı olarak kabul edilir ve genellikle ayrı bir nokta olarak gösterilmektedir. Aykırı değerlerin veri setinden çıkarılması, yapılan analizin doğruluk derecesini artıracaktır [111]. Modelde yer alan bütün çıkış parametreleri üzerinde ayırık veri analizi gerçekleştirilmiştir. şekil 4.3’te nominal hız ve tork parametrelerinde belirlenen ayırık veriler, örnek olması adına box-plot grafiği ile gösterilmiştir.



şekil 4.3 : Nominal hız ve tork parametrelerinin box-plot analizi sonucu.

Bu yöntem veri setine uygulandıktan sonra simülasyonlardan toplamda 10.000 adet veri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler, hem girdi seti hemde bu girdilerin sonucu olarak ortaya çıkan çıktı seti olarak programdan dışarı aktarılmıştır. Tasarlanan üç motorunda sonuçları veri seti için kullanılmıştır. Girdi setinde ve çıktı setinde bulunan parametreler, bu üç motorun asıl parametrelerinden farklı değerlerdeki simülasyonları sonucunda ortaya çıkartılmıştır. Geliştirilen model bu veriler kullanılarak eğitilmiştir. YSA çalışmasında veri setinin %90'ı modelin eğitimi için kullanılırken kalan %10'luk kısım test seti için kullanılmıştır. Girdi seti 9000×10 ölçülerine sahiptir. Çıktı seti ise 9000×6 ölçülerine sahiptir. Girdi setinin bir bölümü Tablo 4.1'de, çıktı setinin bir bölümü ise Tablo 4.2'de gösterilmektedir.

Tablo 4.1 : Girdi seti.

Oluk	Kutup	Gerilim (V)	Güç (mW)	Referans Hız (RPM)	Embrace	Mıknatıs Kalınlığı (mm)	Paralel Tel Sayısı	Sarım Sayısı	Tel Kalınlığı (mm)
24	20	48	5000	450	0.9	3.2	1	20	1
36	32	48	2000000	550	0.7	3.5	4	4	0.6
27	26	48	1000000	600	0.65	3.5	1	10	1
24	20	48	500000	450	0.9	3.2	2	20	1.2
36	32	48	2000000	550	0.7	3.5	8	10	0.8
27	26	48	1000000	600	0.65	3.5	3	12	1.4
24	20	48	500000	450	0.9	3.2	1	22	1.4
36	32	48	2000000	550	0.7	3.5	11	4	1.2
27	26	48	1000000	600	0.65	3.5	4	14	1.6
24	20	48	500000	450	0.9	3.2	3	26	1.8
36	32	48	2000000	550	0.7	3.5	12	6	1.4

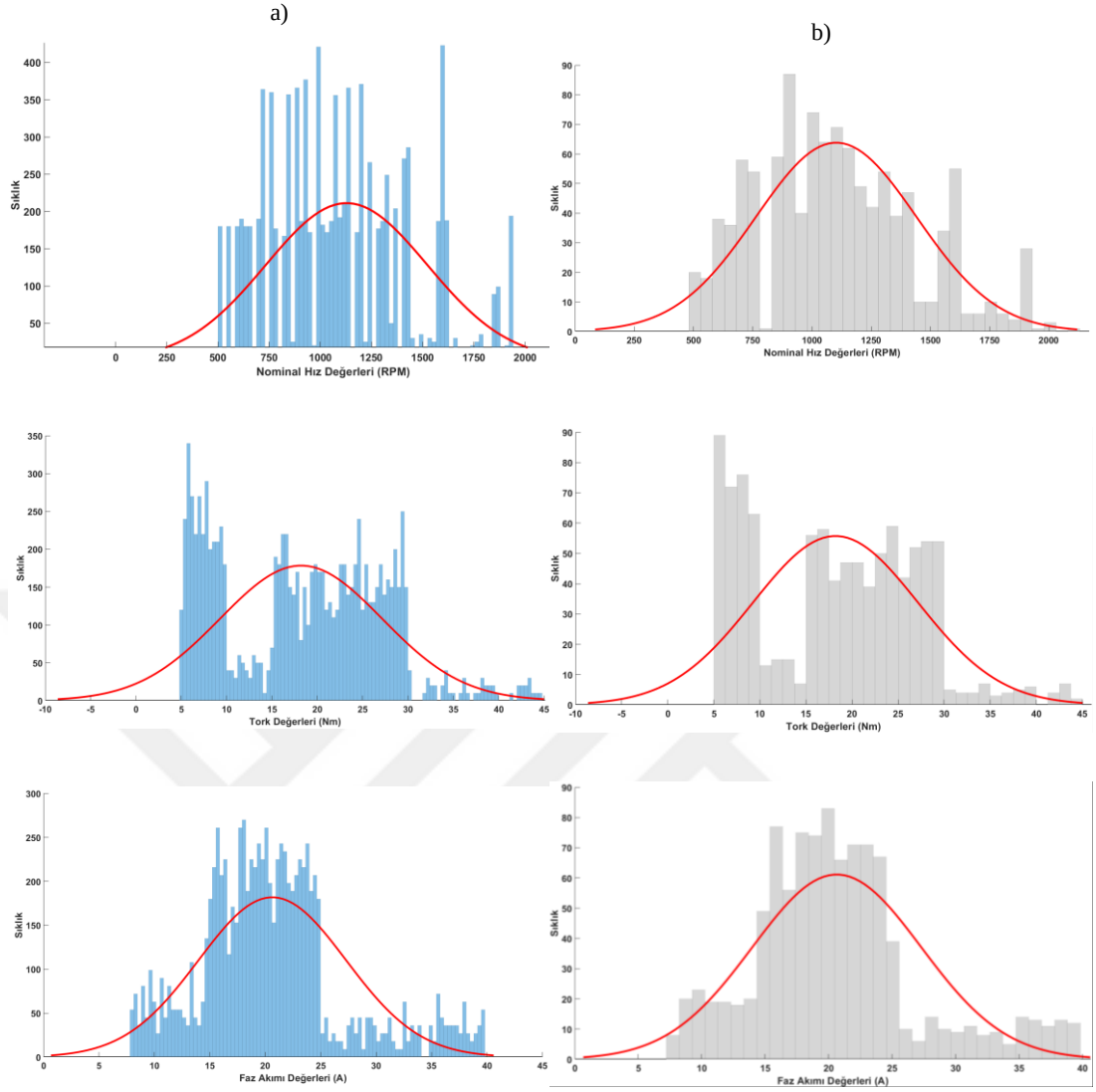
Tablo 4.1'deki veriler YSA modelinde eğitildikten sonra aşağıdaki Tablo 4.2'de yer alan motor performans değerlerine ulaşılacaktır. Bu parametreler motorun yüksüz hızı, nominal hızı, torku, faz akımları, giriş akımı ve çıkış gücüdür. Tablo 4.2'de yer alan değerler, Tablo 4.1'deki giriş parametreleri kullanılarak YSA modeli ile elde edilen sonuçlardır.

Tablo 4.2 : Çıktı seti.

Yüksüz Hız (RPM)	Nominal Hız (RPM)	Tork (Nm)	Faz Akımı (mA)	Giriş Akımı (mA)	Çıkış Gücü (mW)
765.362	618.607	7.721	10431	13336	500188
1222.2	188.41	101.4	21932	259385	2000780
1589.9	177.9	53.66	151530	179235	999801
765.362	688.135	6.942	9385.5	12228	500255
488.89	364.26	52.44	45219	49916	2000440
993.74	849.49	11.24	19642	22947	1000270
695.784	633.351	7.543	9271.6	11904	500342
814.82	676.29	28.24	40645	49360	2000470
2082.1	1956.1	4.880	9767.9	12759	999795
1405.8	1340.8	3.561	4820.1	7387.5	500047
611.11	522.09	36.58	39486	45621	1999990

Daha önceden bahsedildiği gibi test seti, veri setinin %10 luk kısmını oluşturmaktadır. Seçilen bu %10'luk verinin ise modelin doğruluğu açısından eğitim seti ile bir uyum içerisinde olması gerekmektedir. Test verisi seçme işlemi, modelin gerçek dünya senaryolarında doğru tahminler yapabilme yetisinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Eğer test veri seti, ana veri kümesini yeterince temsil etmezse, model yalnızca belirli bir veri aralığında başarılı olacaktır ve genelleme yeteneği zayıflayacaktır. Bu nedenle veri setinin dağılımı analiz edilmiş ve test verisinin bu dağılımı doğru bir şekilde yansıttığı histogram grafikleri aracılığıyla doğrulanmıştır. Histogram analizi sayesinde, test verisinin tüm veri aralığını kapsayıp kapsamadığı ve belirli bir bölgede yoğunlaşıp yoğunlaşmadığı incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, test setinin modelin performansını nesnel bir şekilde ölçebilecek nitelikte olup olmadığı değerlendirilmiş ve bu doğrultuda seçim işlemi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.4'te yer alan grafiklerde eğitim setinin çıktısı olan motor performans değerleri (a) ile test setinin çıktısı olan motor performans değerlerinin (b) dağılımlarını karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



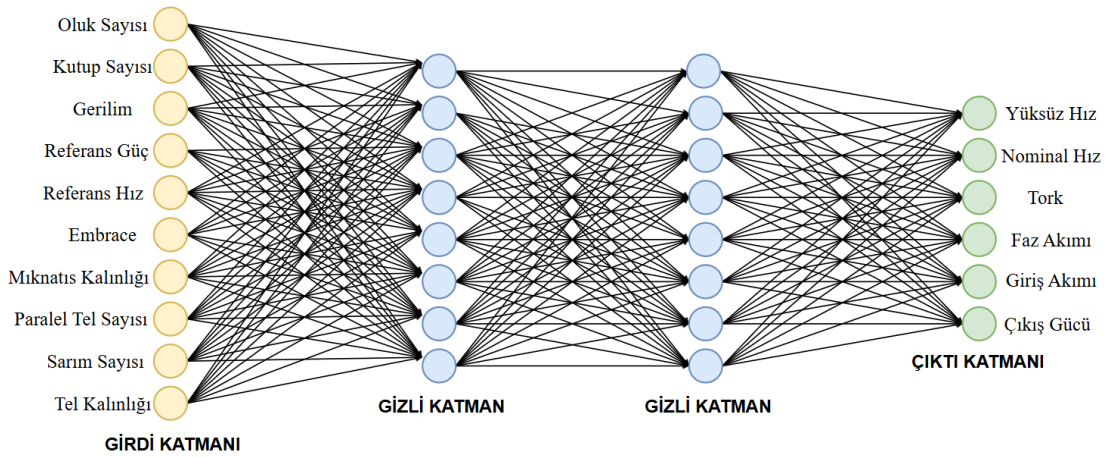
Şekil 4.4 : Eğitim setinin çıktıları (a) ve test setinin çıktılarının (b) histogram grafikleri.

Geleneksel olarak, eğitim ve test setlerinin istatistiksel olarak benzerliğini göstermek için girdi değişkenleri üzerinden histogram analizleri gerçekleştirilir. Ancak, bu çalışmada gözlemlenen en önemli bulgulardan biri, girdi değişkenlerinin dağılımının histogram grafikleri üzerinden yeterince sezgisel ve açık bir şekilde temsil edilememesi olmuştur. Bunun temel nedeni, girdi değişkenlerinin birbirine yakın aralıklarda değişim göstermesi ve çok boyutlu bir uzayda dağılmasıdır. Tek boyutlu histogramlar, bu yüksek boyutlu yapıyı yeterince temsil edemediği için eğitim ve test setleri arasında belirgin bir fark olup olmadığını doğrudan göstermek konusunda yetersiz kalmaktadır. Öte yandan, çıktı değişkenleri olan hız, tork, akım ve güç gibi büyüklükler, motorun fiziksel ve elektriksel dinamikleri sonucunda belirgin bir dağılım sergilemektedir. Bu çıktılar, motor tasarımına dair farklılıkları daha net bir

şekilde yansıttığı için, eğitim ve test setlerinin istatistiksel benzerliğini değerlendirmede daha anlamlı bir gösterge sunmaktadır. Bu bağlamda, eğitim ve test setlerinin benzer dağılıma sahip olduğunu göstermek için çıktı değişkenleri üzerinden histogram analizleri gerçekleştirilmiş ve her iki veri seti arasında anlamlı bir fark bulunmadığı gözlemlenmiştir.

Test seti; veri setinin %10'luk kısmı, tasarımı yapılan üç motorun asıl parametreleri ve üretimi gerçekleştirilen Motor (D) adlı motorun tasarım parametreleri kullanılarak oluşturulmuştur. Ayrıca, YSA modeline daha önce hiç tanımlanmamış bir motorun tasarım parametreleri de eklenmiş ve YSA modelinden elde edilen sonuçlar, Ansys Maxwell programından çıkan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tüm bu verilerin eklenmesiyle birlikte, test verisi toplamda 1005×10 boyutlarına ulaşmıştır.

Tasarlanan yapay sinir ağı modeli Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5 : Yapay sinir ağı modeli.

Oluşturulan yapay sinir ağı modelinin giriş katmanı, FDAM'nin yapısal ve elektriksel özelliklerini temsil eden 10 adet parametreden oluşmaktadır. Bu katmanda motorun fiziksel ve elektriksel tasarımını belirleyen kritik değişkenler bulunmaktadır. Bu bilgiler, oluşturulan modelde motor tasarımına dair geniş bir perspektif sunmasına olanak tanımaktadır. Yapay sinir ağlarında, tahmin problemleri sebep-sonuç ilişkisine dayanılarak çözülür ve bu süreçte giriş nöronu sayısı, giriş vektöründeki değişken sayısına göre belirlenmektedir. Bu durumda, giriş nöronlarının sayısı değişken sayısı ile aynı olmaktadır.

Gizli katmanlar, yapay sinir ağının temel hesaplama birimleri olup, giriş verilerindeki karmaşık ilişkileri öğrenmektedir. Giriş katmanı ile çıkış katmanı arasındaki ilişki,

gizli katmandaki ağırlar tarafından bulunur ve gizli katmanların sayısı, problemin zorluğuna bağlı olarak artırılabilir. Modelde iki adet gizli katman bulunmaktadır ve bu katmanlar, sekiz adet nörondan oluşarak, girdi ile çıktı arasındaki ilişkileri detaylı bir şekilde öğrenmeyi mümkün kılmaktadır. Gizli katmanlarda kullanılan aktivasyon fonksiyonları (örneğin, ReLU veya sigmoid), modelin doğrusal olmayan ilişkileri öğrenebilmesini sağlamaktadır. Böylece, sinir ağı, giriş parametrelerinin motor performansı üzerindeki karmaşık etkilerini anlamlandırmaktadır.

Çıktı katmanı, FDAM'nin performansını değerlendirmek için tahmin edilen değerleri sunmaktadır. Bu modelde, çıktı katmanı 6 farklı performans parametresini içermektedir. Bu parametreler, motorun çalışma sırasında ortaya çıkan verimlilik ve performansı değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Çıktı katmanındaki her bir nöron, modelin tahmin ettiği bir performans parametresini temsil etmektedir.

İleri beslemeli geri yayılım sinir ağı, iki geçişten oluşur: bir ileri geçiş ve ardından geri geçiş. İlk olarak, giriş veri seti ağ modeline giriş katmanında sunulur ve bu giriş verileri, ağırlıklarla birlikte gizli katmanlara aktarılmaktadır. Çıkış katmanında, bir nöronun giriş verileri, toplam ağırlıklı çıktı ile bir eşik (bias) eklenerek üretilmektedir. Her nöronun transfer fonksiyonu, bias ve ağırlıkları yoluyla sinyal, ağ boyunca giriş katmanından çıkış katmanına ve gizli katmanlardan geçerek iletilmektedir. Veri sinyalleri çıkış katmanına ulaştığında, bu sinyaller deneysel verilerle karşılaştırılarak fark hesaplanmaktadır. Hesaplanan fark veya hata sinyali, doğrudan çıkış katmanından giriş katmanına, gizli katmanlar üzerinden geri gönderilmektedir. Veri sinyallerinin geri yayılımı sırasında, hata sinyalini minimize etmek için katmanlardaki nöronların bias ve ağırlıkları yeniden düzenlenmektedir. Bu yinelemeli işlem, ileri ve geri geçişlerin dahil olduğu maksimum epoch (dönem) sayısına ulaşana kadar devam etmektedir.

Yapay sinir ağı, eğitim sürecinde büyük bir veri seti kullanarak, FDAM'nin tasarım parametreleri ile performans çıktıları arasındaki ilişkileri öğrenmektedir. Eğitim süreci boyunca model, veri setindeki hataları minimize ederek daha yüksek doğrulukta tahminler yapmayı öğrenmektedir.

Bu modelin en önemli avantajlarından biri, FDAM'lerin performans analizini hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirebilmesidir. Geleneksel yöntemlerde, motor

performansını tahmin etmek için fiziksel prototipler veya karmaşık matematiksel modeller gereklidir. Ancak bu YSA modeli, tasarım sürecinde hızlı geri bildirim sağlayarak, tasarımcıların farklı senaryoları test etmelerine ve motor parametrelerini optimize etmelerine olanak tanımaktadır.

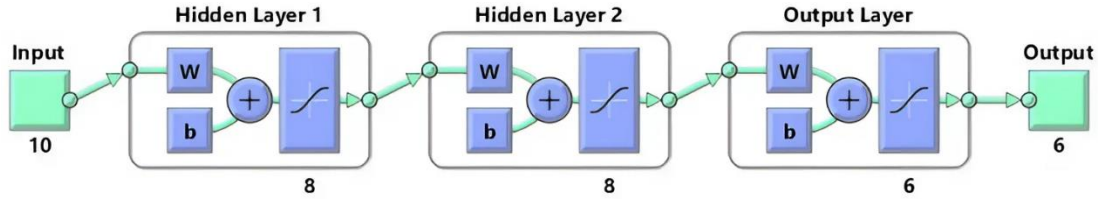
4.2. Yapay Sinir Ağı Modelinin Oluşturulması ve Testleri

YSA modellemesi MATLAB programında çözümlenmiştir. Elde edilen veriler eğitim ve test dosyası olarak hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan yöntem kadar, verilerin doğruluğu da büyük önem taşımaktadır. Verilerdeki tutarsızlıklar, çalışmanın sonuçlarını ciddi şekilde etkileyebilir ve hatalı çıkarımlara yol açabilmektedir. Bu tür hataların önüne geçmek için, veriler işleme alınmadan önce gerekli veri ön işleme adımları uygulanmıştır. Bu doğrultuda, veriler belirli kriterlere göre düzenlenmiş ve analiz için uygun hale getirilmiştir. Yapay sinir ağı tasarımında, veriler işlenmeden önce tüm verilerin aynı türde olması sağlanmıştır. Bu amaçla, verilere normalizasyon uygulanmıştır. Matlab YSA aracı satır matrisine göre işlem yaptığı için veriler çalışma sayfasına yüklendikten sonra oluşturulan veri matrisler transpoze edilmiştir. Bu işlem yapıldıktan sonra nntool aracı açılır ve belirlenmiş veriler bu yapay sinir ağı aracına tanımlanmıştır. Nntool arayüzünde input data kısmına, “girdi” ve “testgirdi” adındaki giriş değerleri, target data bölümüne ise “çikti” ve “testçikti” matrisleri atanmıştır. Matris atamaları tamamlandıktan sonra networks kısmında YSA modeli oluşturulmaya başlanmıştır. Tablo 4.3'te, oluşturulan sinir ağına ait özellikler gösterilmektedir. Bu aşamada, giriş ve hedef veriler tanımlandıktan sonra, en iyi sonuca ulaşmak amacıyla eğitim fonksiyonu, öğrenme fonksiyonu, performans fonksiyonu, katman sayısı, nöron sayısı ve transfer fonksiyonu üzerinde değişiklikler yapılabilmektedir.

Tablo 4.3 : Yapay sinir ağı parametreleri.

Yapay Sinir Ağı Parametreleri	
Ağ Tipi	İleri beslemeli geri yayımlı
Transfer fonksiyonu	TANSIG
Performans Fonksiyonu	MSE
Adaptif Öğrenme Fonksiyonu	LEARNGDM
Eğitim Fonksiyonu	TRAINLM
Gizli Hücre Sayısı	2 (8*8)

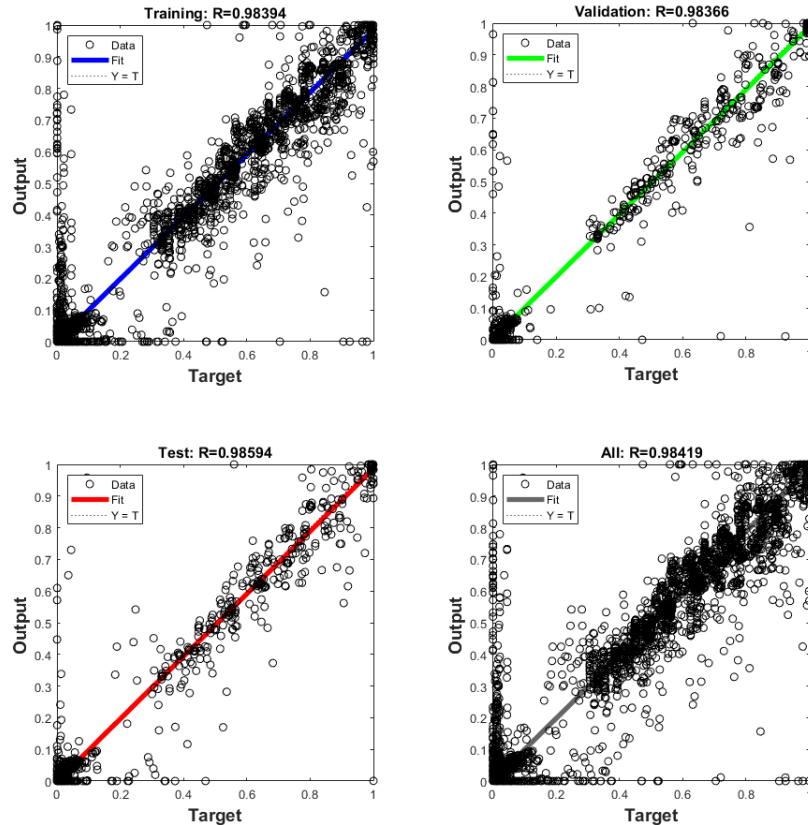
Çeşitli denemeler sonucunda en iyi eğitim ile test sonuçlarını sunan 10*8*8*6 yapısına sahip YSA mimarisi tercih edilmiştir. YSA modeli oluşturulurken karşılaşılan en temel sorun, gizli katman sayısı, gizli katmanlardaki nöron sayısı ve transfer fonksiyonunun doğru bir şekilde seçilmesi olmuştur. Tasarlanan bu yapı Şekil 4.6’da gösterilmektedir.



Şekil 4.6 : Nntool yapay sinir ağı yapısı.

Test sonuçları “Output Data” bölümünde, hata verileri ise “Error Data” kısmında gösterilmektedir. Bu bilgiler, istenilirse ileride kullanılmak üzere kaydedilebilmektedir.

Çalışmada, gerçek değerler ile YSA yöntemiyle hesaplanan değerler arasında korelasyon katsayısı (R) eğitim, doğrulama ve test seti için 0.98 çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar, YSA yönteminin etkili ve başarılı bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.7 : Eğitim, doğrulama, test ve tüm durumlar için tahmin başarısı.

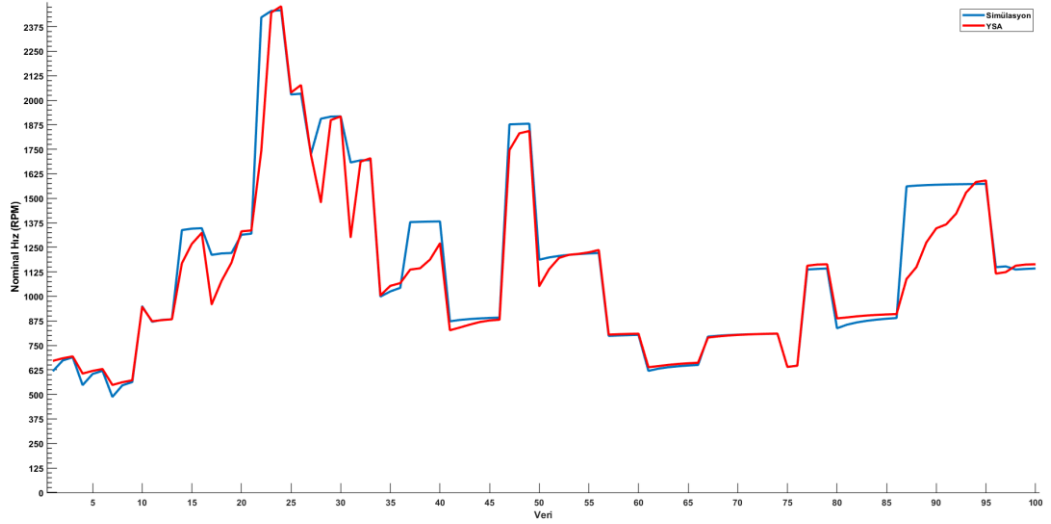
Şekil 4.7’de, yapay sinir ağının eğitim, doğrulama ve test verilerindeki tahmin başarısı ile genel başarı oranı gösterilmektedir. Bu sonuç, açıklanan fonksiyonlar ve diğer parametrelerde yapılan değişikliklerle oluşturulan farklı ağ modelleri arasından elde edilen en iyi performanstır. Artık nntool aracında yer alan “export” seçeneği kullanılarak, eğitimi tamamlanmış YSA sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmak üzere incelenmiştir.

4.3. YSA Modelinin Tahmin Sonuçları

YSA modelinin farklı veri grupları üzerindeki performansını değerlendirebilmek için test verisi üç bölüme ayrılmıştır. İlk bölüm, 1-1000 arasındaki verileri içermekte ve genel test verisi olarak kullanılmaktadır. İkinci bölümde, daha önce modele tanıtılmamış 1001-1004 arasındaki test verileri ve ayrıca üretimi gerçekleştirilen bir motorun tasarım parametreleri yer almaktadır. Üçüncü bölüm ise 1005. veri olup, bağımsız olarak hesaplanan ve veri setine eklenen yeni bir test verisidir.

İlk bölümde MATLAB ortamında gerçekleştirilen YSA modelinin sonuçları dışarı aktarıldıktan sonra test verisinin bu bölümünde yer alan 1000 tane veriden rastgele seçilen 100 adet çıkış parametresi teker teker simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmadan önce, normalize edilen veriler, orijinal ölçeklerine döndürülmesi için denormalizasyon işleminden geçirilmiştir. Aşağıda yer alan bu grafiklerde 0-19 ve 67-85 verileri Motor (A)’nın, 20-34 ve 86-99 verileri Motor (B)’nin, 35- 66 ve 100 verileri Motor (C)’nin çıkış parametrelerini göstermektedir. Bütün grafiklerde mavi çizgi simülasyon sonuçlarını kırmızı çizgi ise YSA sonuçlarını göstermektedir.

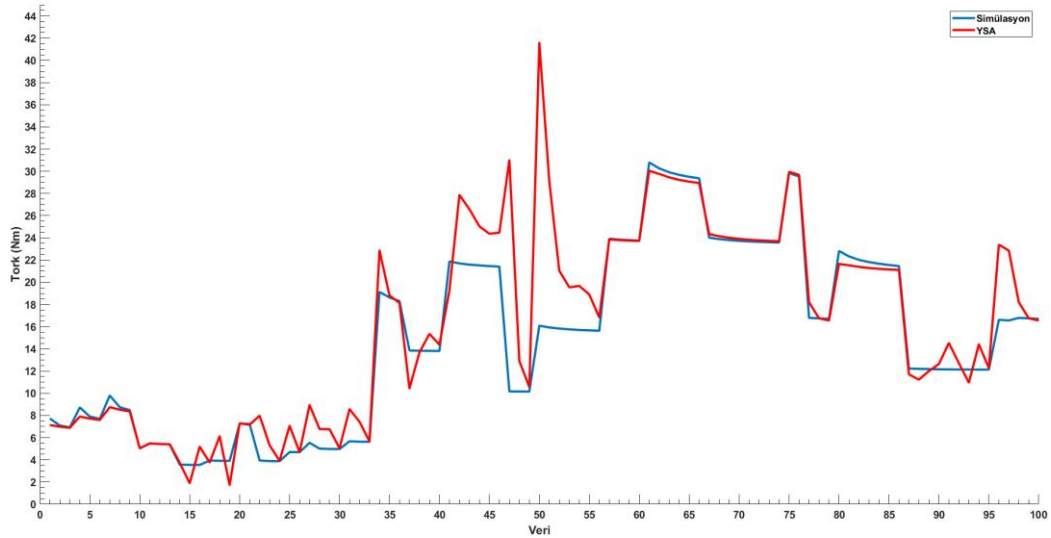
Şekil 4.8’de nominal hız değerlerinin simülasyon ve YSA sonucu karşılaştırılmaktadır. Grafikte, YSA modelinin simülasyon verilerini genel olarak başarılı bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Motor (B) verilerinde belirgin dalgalanmalar mevcut olup, YSA modeli bu değişimlere tam anlamıyla uyum sağlayamamıştır. Motor (A) ve Motor (C) için ise genel eğilim benzer olsa da, 45-55 ve 70-75 gibi keskin değişimlerin olduğu bölgelerde çok küçük sapmalar gözlemlenmektedir. Bununla birlikte 55-80 ve 95-100 gibi veri aralıklarında YSA modeli simülasyon sonuçlarına oldukça yakın tahminler üretmiştir.



Şekil 4.8 : Nominal hız değerleri için simülasyon verileri ile YSA sonucu karşılaştırması.

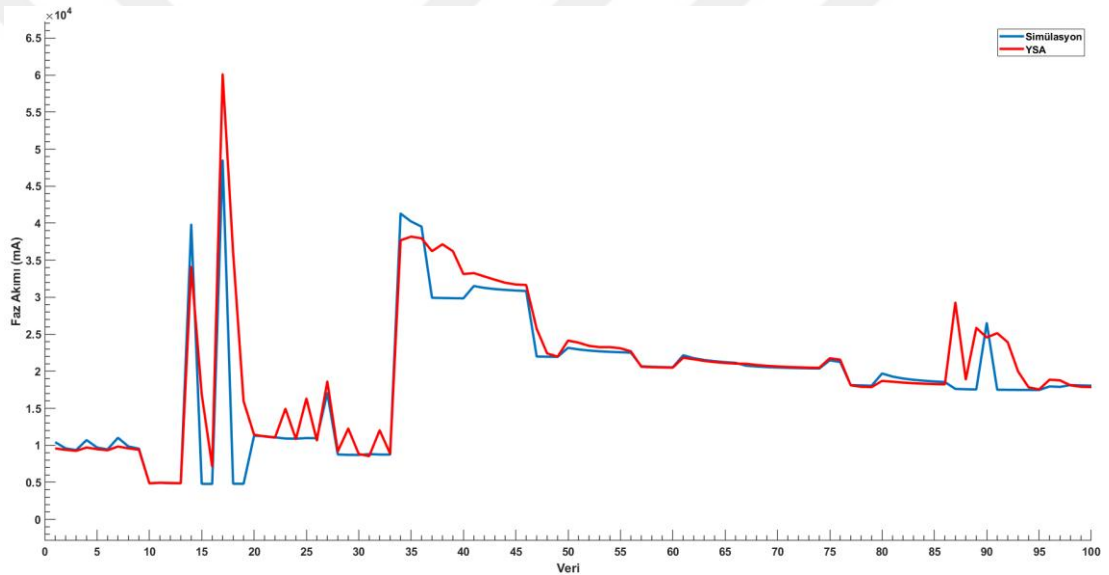
Şekil 4.9’da tork değerlerinin simülasyon ve YSA sonucu karşılaştırılmaktadır. Genel olarak YSA modeli, simülasyon verilerini takip etse de belirli verilerde önemli sapmalar gözlemlenmektedir. Özellikle 42-55 veri aralığında YSA modelinin bazı keskin sapmalar oluşturduğu dikkat çekmektedir.

50. veri noktasında YSA modelinde belirgin sapma meydana gelirken, simülasyon sonucu daha düşük bir tork değeri göstermektedir. Bunun dışında, 55-85 arasında model ve simülasyon birbirine oldukça yakın seyretmektedir. 85. Veriden sonra sonra küçük ölçekli dalgalanmalar devam etmekle birlikte, genel eğilim benzer görülmektedir.



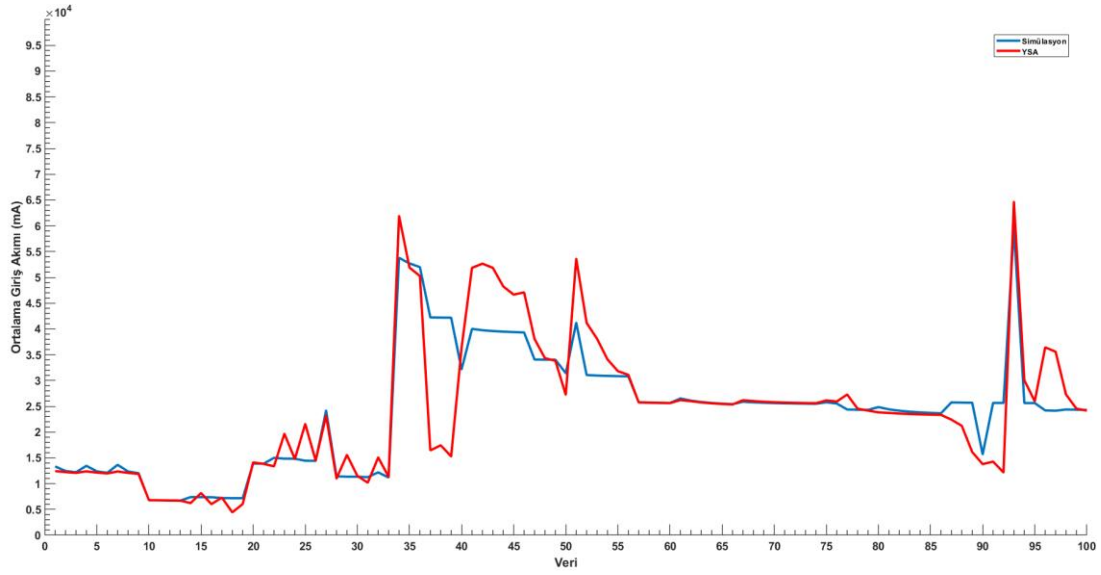
Şekil 4.9 : Tork değerleri için simülasyon verileri ile YSA sonucu karşılaştırması.

Şekil 4.10'da faz akımı değerlerinin simülasyon ve YSA sonucu karşılaştırılmaktadır. Bu grafikte ilk 20 veri noktasında ve 67-85 aralığında Motor (A)'ya ait değerler görülmektedir. Bu bölgede, simülasyon ve YSA sonuçları genel olarak birbirine yakın ilerlese de, özellikle 10-20 aralığında belirgin farklar ve ani değişimler gözlenmektedir. YSA modeli bazı verilerde simülasyona kıyasla daha yüksek genlikli tahminler yapmıştır. 20-34 ve 86-99 aralığında, Motor (B)'nin çıkış parametreleri bulunmaktadır. Burada, YSA ve simülasyon sonuçları genel olarak birbirine yakın ilerlese de, özellikle 30-35 aralığında farkların arttığı görülmektedir. 35-66 ve 100. veri noktaları, Motor (C)'ye aittir. Bu bölgede YSA tahminleri ve simülasyon sonuçları birbirine daha yakın seyretmektedir. Ancak 35-45 arasında YSA'nın simülasyondan biraz daha yüksek değerler ürettiği gözlemlenmektedir.



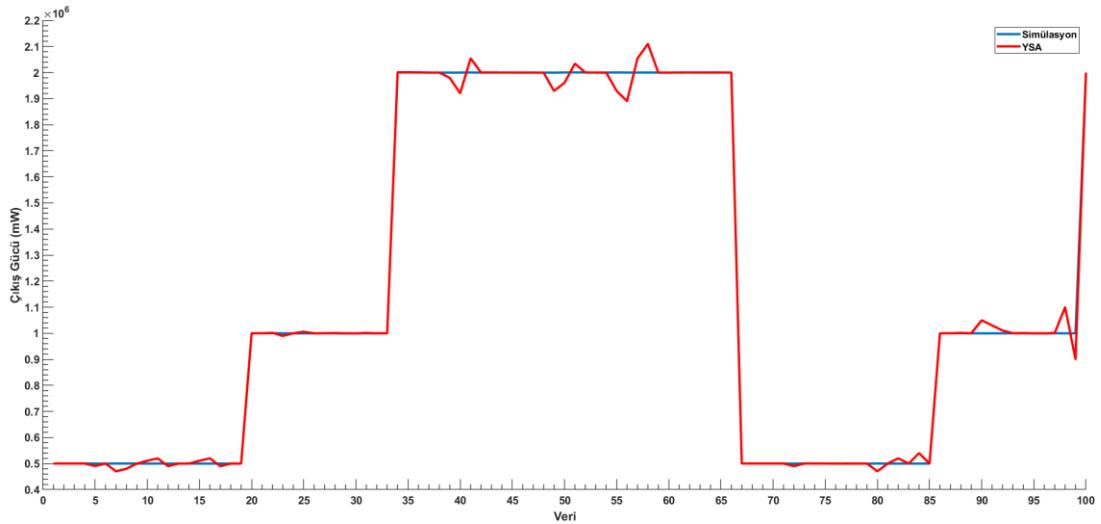
Şekil 4.10 : Faz akımı değerleri için simülasyon verileri ile YSA sonucu karşılaştırması.

Şekil 4.11'de ortalama giriş akımı değerlerinin simülasyon ve YSA sonuçları karşılaştırılmaktadır. Başlangıçta iki eğri benzer seyrete de, 15-30 ve 40-55 aralıklarında YSA modelinin simülasyon verisinden belirgin şekilde sapmalar gösterdiği gözlemlenmektedir. Grafiğin ilerleyen kısmında ise iki veri setinin genel olarak örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 4.11 : Ortalama giriş akımı değerleri için simülasyon verileri ile YSA sonucu karşılaştırması.

Şekil 4.12’de ortalama çıkış gücü değerlerinin simülasyon ve YSA sonucu karşılaştırılmaktadır. Grafiğin başlangıcında YSA ve simülasyon eğrileri birbirine yakın ilerlemektedir. 20. veri noktasından itibaren çıkış gücü artmakta, 40-65 aralığında yüksek seviyede sabit kalmakta, ardından 65. noktada ani bir düşüş yaşanmaktadır. 75. noktadan sonra çıkış gücü tekrar yükselirken, YSA ve simülasyon sonuçları büyük ölçüde örtüşmektedir



Şekil 4.12 : Çıkış gücü değerleri için simülasyon verileri ile YSA sonucu karşılaştırması.

Test için ayrılan veri setinin YSA testi başarıyla tamamlandıktan sonra test verisinin ikinci bölümünün sonuçları incelenmiştir. Bu kısımdaki sonuçlar daha önceden de bahsedildiği gibi tasarımları yapılan Motor (A), Motor (B), Motor (C)’nin asıl çıkış

parametreleri ile karşılaştırılarak yapılmıştır. Tasarımları yapılan motorlar dışında daha önceden üretilmiş ve aktif olarak kullanılan Motor (D) adlı bir fırçasız doğru akım motoru parametreleri test setine eklenmiştir. Bu sayede girdi setinde yer alan motor verilerine benzer değerlere sahip olmayan bir verinin testi gerçekleştirilmiştir. Bu model sonucunda özellikle eğitim setinde hiç olmayan, yani son eklenen motor parametrelerinin doğruluğuna bakılacaktır. Motorların çıkış parametreleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 : Motorların performans değerleri.

Parametreler	Motor (A)	Motor (B)	Motor (C)	Motor (D)
Yüksüz Hız (RPM)	552.24	745.3	611.97	756.48
Nominal Hız (RPM)	442.891	630.232	517.17	621
Tork (Nm)	10.78	15.15	36.92	17.18
Faz Akımı (mA)	9705	13232	26572	15260
Giriş Akımı (mA)	11830	14890	29740	17102
Çıkış Gücü (mW)	500000	1000000	2000000	1120000

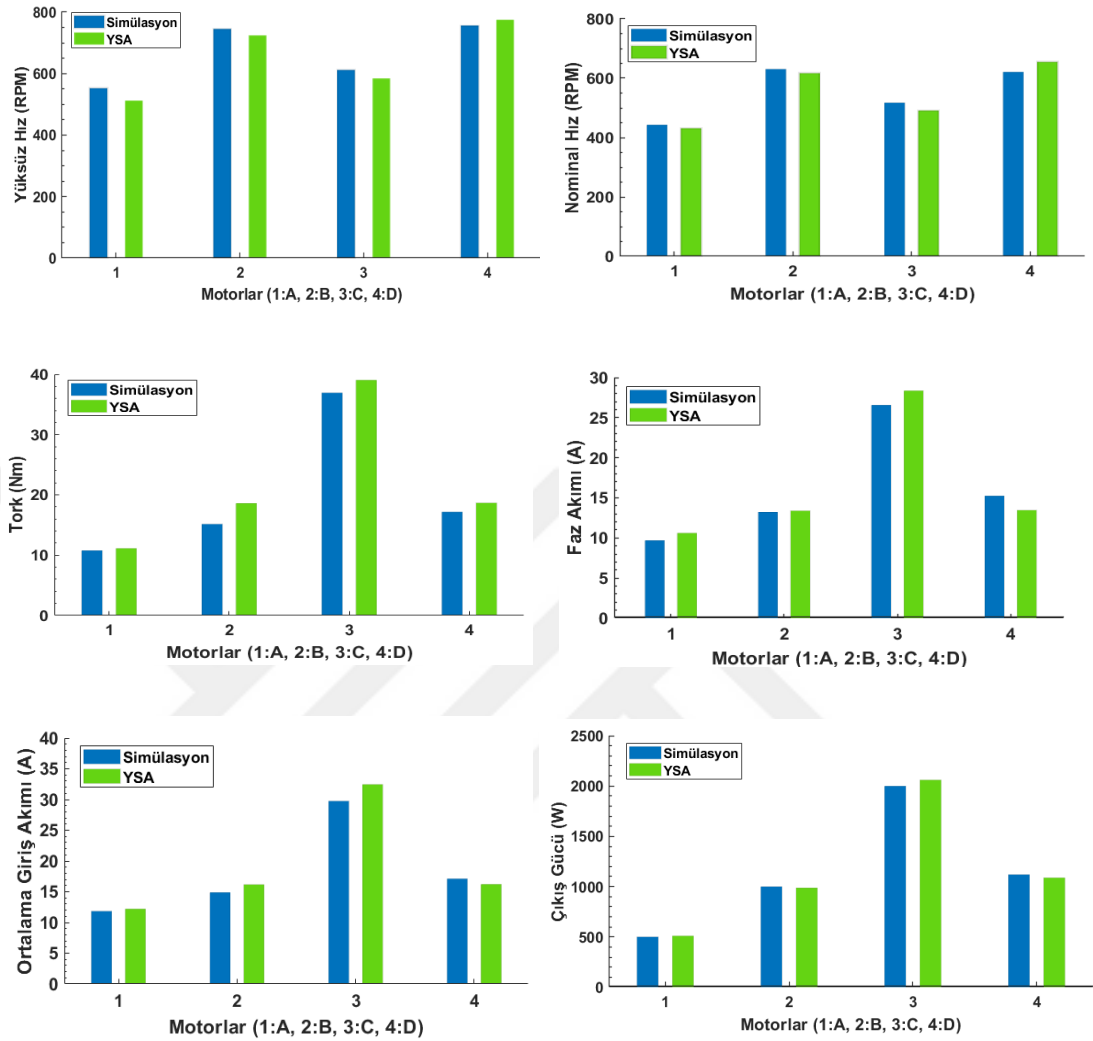
YSA modelinin tahmin ettiği motor performans değerleri ise Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5 : YSA modelinin motor performans değeri tahmin sonuçları.

Parametreler	Motor (A)	Motor (B)	Motor (C)	Motor (D)
Yüksüz Hız (RPM)	512.385	724.587	584.672	775.458
Nominal Hız (RPM)	430.990	616.561	490.787	654.875
Tork (Nm)	11.129	18.619	39.035	18.661
Faz Akımı (mA)	10.607	13.389	28.356	13.457
Giriş Akımı (mA)	12.192	16.147	32.451	16.220
Çıkış Gücü (mW)	509891	988185	2060086	1088189

Şekil 4.13'te test setinin ikinci bölümünün YSA modeli sonucu gösterilmektedir. Bu şekilde motor performans değerleri ile yapay sinir ağı sonucunun karşılaştırması yapılmaktadır. Bu yapay sinir ağı modelinin sonucunda, girdi setinde yer alan Motor (A), Motor (B) ve Motor (C) tasarımlarının performans değerlerinin yanı sıra bu girdi setinde herhangi bir parametresi bulunmayan Motor (D) tasarımının da performans değerlerine başarılı bir şekilde ulaşıldığı görülmüştür. Yapay sinir ağı modeline test seti eklenip sonuçları incelendiği zaman en yüksek hata oranı % 4,67 olarak

hesaplanmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda YSA modelinin ve yapısının başarısı ile uygulamada kullanılabilir nitelikte olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.13 : Motorların performans değerleri ile YSA sonucunun karşılaştırması.

Literatür incelemesi sonucunda, YSA modelinin tahmin performanslarının MSE, MAE, RMSE, ve yüzde hata analiz yöntemleri ile değerlendirildiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada da aynı hata analiz yöntemleri kullanılarak modelin doğruluğu ölçülmüştür. Bu hata analizleri çıktı parametrelerinin hepsi için teker teker uygulanmıştır. Uygulanan hata analizlerinin sonuçları Tablo 4.6’da gösterilmektedir.

Tablo 4.6 : Hata analiz sonuçları.

Çıkış Parametreleri	Ortalama Mutlak Hata (MAE)	Ortalama Kare Hata (MSE)	Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)	Mutlak Ortalama Yüzde Hata (MAPE)
Yüksüz Hız	0.0251	0.0026	0.0509	0.039
Nominal Hız	0.0248	0.0028	0.0529	0.047
Tork	0.0596	0.0142	0.1191	0.105
Faz Akımı	0.0485	0.0074	0.0860	0.126
Giriş Akımı	0.0443	0.0068	0.0827	0.114
Çıkış Gücü	0.0136	0.0015	0.0387	0.028

Test verisinin ikinci bölümünün sonuçları ve hata analizi incelendikten sonra test verisinin üçüncü bölümü olan YSA modelinin sonucu ile ANSYS Maxwell programının sonuçlarının karşılaştırılmasına geçilmiştir. Bu bölümde diğer test aşamalarından farklı olarak sıfırdan bir motor hesabı yapılmış olup yapılan hesaptaki giriş parametreleri ilk önce YSA'ya test verisi olarak eklenip motor performans değerlerinin tahmini yapılmıştır. Daha sonra ise ANSYS Maxwell programında analiz edilmiştir. Elde edilen her iki sonuçta karşılaştırılmıştır. Tablo 4.7'de motor giriş parametreleri, Tablo 4.8'de ise YSA modelinin motor performans değerlerinin tahmini ile ANSYS Maxwell programının çıktıları ve yüzdelik olarak hata değerleri verilmiştir.

Tablo 4.7 : Hesaplanan motorun girdi parametreleri.

Oluk	Kutup	Gerilim (V)	Güç (mW)	Referans Hız (RPM)	Embrace	Mıknatıs Kalınlığı (mm)	Paralel Tel Sayısı	Sarım Sayısı	Tel Kalınlığı (mm)
36	32	48	3000000	800	0.7	5	8	12	1

Tablo 4.8 : Hesaplanan ve tasarlanan motorun YSA sonucu ile ANSYS Maxwell simülasyon sonucunun karşılaştırılması.

Parametreler	YSA	ANSYS Maxwell	% Hata
Yüksüz Hız (RPM)	990.345	978.059	1.26
Nominal Hız (RPM)	814.562	807.962	0.82
Tork (Nm)	38.048	35.64	6.76
Faz Akımı (mA)	48.043	44.187	8.73
Giriş Akımı (mA)	66.112	62.689	5.46
Çıkış Gücü (mW)	3002608	3000000	0.086

BÖLÜM 5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, hafif elektrikli araçlarda kullanılan dıştan rotorlu fırçasız doğru akım motorlarının tasarımları gerçekleştirilmiş ve bu tasarımlar sonucunda elde edilen çıktılar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda FDAM'lerin tasarım parametrelerini kullanarak, motor performans değerlerini tahmin eden bir yapay sinir ağı modeli oluşturulmuş olup elde edilen sonuçlar, geliştirilen motor tasarımları ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda, yapay sinir ağları kullanılarak doğrudan dıştan rotorlu fırçasız doğru akım motorlarının performans (etiket) değerlerinin tahminine ve tasarımına yönelik herhangi bir akademik çalışmaya rastlanmamıştır. Bu yönüyle çalışma, dıştan rotorlu FDAM'lerin yapay sinir ağı ile performans değerlerinin tahminine dayalı olarak tasarlanmasına imkan tanıyan bir yöntem önerisiyle akademik literatüre katkı sunmaktadır.

Tez içeriğinde öncelikle hafif elektrikli araçlarda kullanılan fırçasız doğru akım motorlarının (FDAM) yapısı, çalışma prensipleri ve tasarım parametreleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Literatür araştırmaları kapsamında FDAM'ler üzerine yapılan önceki çalışmalar değerlendirilmiş, bu motorların elektrikli araçlardaki kullanımına dair güncel bilgiler ortaya konulmuştur. Bu doğrultuda, FDAM'lerin geleneksel motor tiplerine kıyasla, sunduğu avantajlar ve dezavantajlar ele alınarak kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır. Daha sonra, FDAM'lerin yapısı ve temel çalışma prensipleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiş, stator, rotor ve mıknatıs gibi temel bileşenlerin işlevleri açıklanmıştır. Bu incelemeler doğrultusunda, farklı motor türleri ile karşılaştırmalar yapılmış ve özellikle dıştan rotorlu tasarımın sağladığı avantajlar vurgulanmıştır. Motor performansını etkileyen unsurlardan biri olan konum algılama sensörleri de göz önünde bulundurularak, Hall etkili sensörler, optik kodlayıcılar (enkoder) ve resolverler gibi farklı sensör tipleri değerlendirilmiş ve avantaj-dezavantajları karşılaştırılmıştır.

Elektrikli araçlarda kullanılan FDAM'lerin verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için gerekli tasarım parametreleri belirlenmiş ve bu parametrelerin motor performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu kapsamda, hava sürtünme kuvveti, yuvarlanma direnci, ivmelenme kuvveti ve yokuş direnci gibi dış etkenler dikkate alınarak motorun performans istekleri detaylandırılmıştır. Ardından, motor bileşenlerinin boyutlandırılması üzerine çalışmalar yapılarak stator ve rotor ölçümleri, sarım yapıları, mıknatıs modelleri ve manyetik devre analizleri gerçekleştirilmiştir.

Motor tasarımlarına ait hesaplamaların doğruluğunu test etmek ve motorların performansını değerlendirmek amacıyla Ansys Maxwell yazılımı kullanılmıştır. Yapılan analitik hesaplamalar ve sonlu elemanlar analizi sonucunda Motor (A), Motor (B) ve Motor (C) tasarımlarına ait simülasyon sonuçları elde edilmiş, bu motorların performans değerleri bulunarak değerlendirilmiştir.

Yapay sinir ağı modelinin oluşturulması için gerekli olan veri setleride yine ANSYS Maxwell programından elde edilmiştir. Motor (A), Motor (B) ve Motor (C) şeklinde belirtilen birbirinden farklı üç motorun tasarım parametreleri değiştirilerek analiz sonuçları bir excel dosyasında toplanmıştır. 10.000 adet veri seti toplanan yapay sinir ağı modeli MATLAB programında oluşturulmuştur.

Girdi seti ile eğitilen yapay sinir ağı modelinin test edilmesi için gerekli olan test verisi, bu tez kapsamında tasarlanan üç motorun kendi özgün parametreleri baz alınarak oluşturulmuştur. Tasarlanan üç motorun dışında, çalışmada "Motor (D)" olarak adlandırılan ve tasarımıyla birlikte üretimi tamamlanan FDAM ile tamamen sıfırdan hesaplanan yeni bir tasarımın parametreleri, doğrudan girdi setine eklenmeden değerlendirilmiş ve performans değerleri tahmin edilmiştir. Üç bölümden oluşan test aşamasında, bütün motorların çıktı parametreleri ilk olarak ANSYS Maxwell'de yapılan simülasyon sonuçlarından elde edilmiştir. Ardından bu parametreler ile yapay sinir ağı modelinin çıktı parametreleri karşılaştırılarak modelin doğruluğu ispatlanmıştır.

Test sonuçları incelendiğinde, geliştirilen yapay sinir ağı modelinin motor performans değerlerini yüksek doğrulukla tahmin edebildiği görülmüştür. Model, yalnızca eğitim verilerinde bulunan Motor (A), Motor (B) ve Motor (C) tasarımlarının performans değerlerini doğru bir şekilde öngörmekle kalmamış, aynı zamanda eğitim setinde yer almayan Motor (D) tasarımının performans değerlerini ve YSA modelinin eğitim

setinde yer almayan ayrı bir hesaplama ile tasarlanan bir başka motorun da performans değerlerini başarılı bir şekilde tahmin etmiştir. Yapılan testler modelin doğruluğunu ispatlamak için birçok hata analizine tabi tutulmuştur (MAE, MSE, RMSE, MAPE ve yüzde hata). Bu analizler sonucunda başarı oranı %96.14 olarak hesaplanmış ve modelin güvenilirliği kanıtlanmıştır. Bu bulgular, yapay sinir ağı modelinin dıştan rotorlu fırçasız doğru akım motorlarının performans değerlerini tahmin etmede etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Tez çalışması, dıştan rotorlu fırçasız doğru akım motorlarının hem fiziksel tasarımı hem de yapay zeka destekli performans tahminine dayalı modellemesi açısından, literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Literatürde fırçasız doğru akım motorlarına dair pek çok çalışma bulunmasına rağmen, dıştan rotorlu konfigürasyona sahip FDAM'lerin doğrudan yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak performans değerlerinin tahmininin yapıldığı kapsamlı ve bütüncül bir çalışmaya rastlanmamaktadır. Bu tez çalışmasında ise yalnızca teorik bir model ortaya koymakla kalmamış, aynı zamanda motorların elektromanyetik simülasyonları (Ansys Maxwell), ve YSA modelleme aşamalarını bir arada ele alarak çok yönlü bir mühendislik süreci gerçekleştirmiştir. Bu yönüyle tez, dıştan rotorlu FDAM'lerin YSA ile analizine dayalı ilk akademik tezlerden biri olma niteliği taşımakta ve bu özgünlük, çalışmanın bilimsel katkısını ön plana çıkarmaktadır.

Aynı zamanda geliştirilen YSA modeli sayesinde, saatler süren elektromanyetik analizler saniyeler içinde öngörülebilir hale getirilmiştir. Bu durum, hem zaman hem de kaynak tasarrufu açısından sektörel anlamda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Özellikle hafif elektrikli araçlar gibi sürekli optimize edilmesi gereken sistemlerde, bu model sayesinde daha hızlı prototip geliştirme ve karar verme süreçleri mümkün hale gelecektir. Bu kapsamda, elektrikli araçlarda kullanılmak üzere geliştirilen yüksek verimli FDAM'lerin hem tasarımı hem de yapay zeka destekli analizleri, elektrikli araç teknolojilerine doğrudan katkı sunmaktadır. Sürdürülebilir ulaşım hedeflerine yönelik bu çalışma, yalnızca akademik düzeyde değil, aynı zamanda endüstriyel Ar-Ge projelerinde de değerlendirilebilecek pratik bir altyapı sağlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında yer almayan konular dikkate alındığında gelecek çalışmalara yön verebilecek öneriler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Mevcut çalışmada, endüstride en çok tercih edilen oluk/kutup kombinasyonları tercih edilmiş olup üç motor tasarımı üzerinden veri toplanmış ve bu verilere dayalı bir model geliştirilmiştir. Daha fazla tasarım varyasyonu ile oluşturulacak geniş veri setleri, modelin tahmin başarımını artırabilir ve daha genelleştirilebilir sonuçlar elde edilmesine imkan tanınması beklenmektedir.
- Yapay sinir ağı modelinin, tez kapsamında tasarlanan üç motorun performans değerlerini başarıyla tahmin etmesi dikkate alındığında, motor verimliliğinin bu çalışma kapsamında dolaylı olarak değerlendirildiği söylenebilmektedir. Gelecekte, motorun enerji verimliliği doğrudan optimize edilerek araç menziline katkısı, batarya tüketimi üzerindeki etkisi gibi akademik çalışmalar yapılabilir.
- YSA modeli bir adet üretimi tamamlanan gerçek motor ile test edilmiş olup genel olarak simülasyon verileriyle test edilmiştir. Gelecekte, farklı motor prototipleri üzerinde yapılan deneysel testlerden elde edilen verilerle modelin performansı karşılaştırılarak, gerçek dünya koşullarındaki önerilen yöntemin doğruluğu arttırılması potansiyeli bulunmaktadır.
- Bu tezde yapay sinir ağı modeli tercih edilmiş olsa da, genetik algoritmalar, destek vektör makineleri veya derin öğrenme tabanlı modeller gibi diğer yapay zeka yöntemlerinin kullanımı gelecek çalışmalarda değerlendirilerek kazanımların artmasına sebep olabilecektir.
- Tez çalışmasındaki analizler ağırlıklı olarak sabit referans değerlerine göre yapılmıştır. Gerçek kullanım senaryolarında değişken yük ve hız koşulları altında motor davranışları farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle, gelecek çalışmalarda zamanla değişen yük profilleri altında motor performansının değerlendirilmesi faydalı olacaktır.
- Motor sürücü devresi ve kontrol algoritmaları bu çalışmada kapsam dışında bırakılmıştır. Ancak özellikle elektrikli araçlar gibi dinamik sistemlerde, motor kontrolü büyük önem taşımaktadır. Gelecekte geliştirilecek çalışmalarda, FDAM'lerin performansına yönelik yapay zeka destekli kontrol algoritmalarının anlaşılır bir şekilde modellenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Aydın, İ., (2023), *Hafif Elektrikli Araçlar İçin Sıralı Kutuplu Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarımı ve Analizi*, (Yüksek Lisans Tezi), Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Giresun.
- [2] Bouguerra, S., ve Layeb, S.B., (2019), Determining Optimal Deployment Of Electric Vehicles Charging Stations: Case Of Tunis City, Tunisia, *Case Studies On Transport Policy*, 7(3), 628-642, <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.06.003>
- [3] Bakogiannis, E., Siti, M., Tsigdinos, S., Vassi, A., ve Nikitas, A., (2019), Monitoring The First Dockless Bike Sharing System in Greece: Understanding User Perceptions, Usage Patterns and Adoption Barriers, *Research In Transportation Business ve Management*, 33, 100432, <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100432>
- [4] Kocabey, S. (2018). Elektrikli Otomobillerin Dünü, Bugünü ve Geleceği, *Akıllı Ulaşım Sistemleri Ve Uygulamaları Dergisi*, 1(1), 16-23.
- [5] Kerem, A. (2014), Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentileri, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(1), 1-13.
- [6] Tören, M., ve Mollahasanoglu, H., (2022), Elektrikli ve Hibrit Araçlardaki Elektrik Motorlarının İçten Yanmalı Motorlarda Oluşan CO₂ Emisyonunda Meydana Getireceği Değişimin Tahmini ve Verimliliğe Etkisi: Türkiye Örneklemesi, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 9, 3, pp. 1082–1097, <https://doi:10.31202/ecjse.1107454>
- [7] Kılıçoğlu, Ahmet Süha., (2018), *Design and Implementation Of A Bldc Hub Motor Powered Road Marking Machine*, (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü, Giresun.
- [8] Şenlik, İ., (2015), Uyuyan Devrim: Elektrikli Araçlar, *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 455, 64-67.
- [9] Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A. ve Tırıs, M. (2003). Elektrikli Araçlar, *Tübitak Yayınları*.
- [10] Çakmak, R., ve Turan, A., (2022), Türkiye’de İller Bazında Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Altyapısı: Ölçevler Aracılığıyla Analizi, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 246-268, 2022, <https://doi:10.31466/kfbd.1029677>
- [11] Larminie J., ve Lowry J., (2003), Electric Vehicle Technology Explained, *John Wiley&Sons Ltd*.
- [12] Story Cars, (2022, 2 Haziran), 1967 Ford Comuta Concept, Erişim: 14 Şubat 2025, <https://www.story-cars.com/1967-ford-comuta-concept>

- [13] Story Cars, (2022, 2 Haziran), This Early Electric Car Built By Ge Proved That Evs Still Had A Long Way To Go, Erişim: 14 şubat 2025, <https://www.slashgear.com/1325461/ge-delta-electric-car/>
- [14] Ustabaş, A., (2015), Mikro ve Makro Etkileri Yönerinden Elektrikli Otomobiller (Türkiye Ekonomisi Örneği), *Marmara Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi*, 36(1), 269-291, <https://doi:10.14780/iibdergi.201417548>
- [15] Dyer, (2022, 21 Mart), Fiat X1/23: The Concept of Child-size Electric Car, Erişim: 14 şubat 2025, <https://dyler.com/blog/349/flat-x1-23-the-concept-of-child-size-electric-car>
- [16] Civlez, M., ve Kasımay, Z.İ., (2018), Elektrikli Araçlar, *Dünya Enerji Konseyi Türkiye Yeni Enerji Teknolojileri Çalışma Grubu*.
- [17] Svebas, (2020, 1 Temmuz), The Ford ETX-1, Erişim: 14 şubat 2025, <https://cars.svebas.com/the-ford-etx-1/>
- [18] FCA Heritage, Fiat Panda Elettra, Erişim: 14 şubat 2025, <https://www.stellantisheritage.com/en-uk/heritage/stories/flat-panda-elettra>
- [19] Ari, Y.O., (2020), Küresel Elektrikli Otomobil Piyasasına Genel Bakış, *Kırklareli Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 4(2), 193-203, <https://doi:10.47140/kusbder.714905>
- [20] IEA, (2019, 1 Mayıs), Global EV Outlook 2019, Erişim: 14 şubat 2025, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>
- [21] Solar Çatı, (2023, 2 Kasım), Elektrikli Araçların Geleceği, Erişim: 14 şubat 2025, <https://solarcati.com/yazi/elektrikli-araclarin-gelecegi>
- [22] Çelik, H., ve Öztürk, A., (2020). Elektrikli Araç şarj İstasyonlarının Genetik Algoritma İle Optimizasyonu, *In International Marmara Sciences Congress IMASCON 2020-Autumn*, (p. 249).
- [23] Brost, M., Ehrenberger, S., Dasgupta, I. ve Hahn, R., (2022) The Potential of Light Electric Vehicles for Climate Protection through Substitution for Passenger Car Trips - Germany as a Case Study, *DLR Institute of Transport Research*.
- [24] Pavlovic, A. ve Fragassa, C., (2015), General Considerations On Regulations and Safety Requirements for Quadracycles, *International Journal for Quality Research*, 9(4), 657–674, ISSN 1800-6450.
- [25] Edwards, M., Seidl, M., Carroll, J. ve Nathanson, A., (2014) Provision Of Information And Services To Perform An Initial Assessment Of Additional Functional Safety And Vehicle Construction Requirements For L7e-A Heavy On-Road Quads, *Transport Research Laboratory*.
- [26] Sektörüm Akıllı İşler Dergisi, (2023, 7 Ağustos), Elektrikli L Kategorisindeki Araçlar (Light Electric Vehicle) (Yazar: Dr. Seda Kül), Erişim: 14 şubat 2025, <https://www.sektorumdergisi.com/elektrikli-l-kategorisindeki-araclar-light-electric-vehicle/>
- [27] Özcan, Ö. F., Karadağ, T., Altuğ, M., Özgüven, Ö. (2021). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması, *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8(2), 276-298.

- [28] Önder, H., & Akdemir, F., (2022), Sürdürülebilir Ulaşım Altyapısının Pandemi Döneminde Yeniden Kurgulanması: Mikromobilite Trendleri ve Türkiye, *IDEALKENT*, 13(36), 748-770, <https://doi.org/10.31198/idealkent.1039996>
- [29] EV Sanlab Learning, (2023), 2023 Elektrikli Araç Satış Rakamları, Erişim: 14 Şubat 2025, <https://ev.sanlablearning.com/2023-elektrikli-arac-satis-rakamlari/>
- [30] Jannatkah, J., Najafi, B. ve Ghaebi, H., (2020), Energy And Exergy Analysis Of Combined ORC–ERC System For Biodiesel-Fed Diesel Engine Waste Heat Recovery, *Energy Conversion and Management*, 209, 112658.
- [31] Bottery, M., (2008), Educational Leadership, The Depletion Of Oil Supplies And The Need For An Ethic Of Global Sustainability, *School Leadership and Management*, 28(3), 281-297.
- [32] Khan, S.A. ve Bohnsack, R., (2020), Influencing The Disruptive Potential Of Sustainable Technologies Through Value Proposition Design: The Case Of Vehicle-To-Grid Technology, *Journal of Cleaner Production*, 254, 120018.
- [33] Acar, F., (2015), *Elektrikli Araçlar İçin Motor Sürücü Devresinin Yüksek Çözünürlükte Verim Analizi*, (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [34] Aladağ, İ., (2017) *Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Genetik Algoritma İle Verim Ve Ağırlık Amaç Fonksiyonlarının İyileştirilmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [35] Meier, S., (2002), *Theoretical Design Of Surface-Mounted Permanent Magnet Motors With Field-Weakening Capability*, (Yüksek Lisans Tezi), KTH Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering-Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm, İsveç.
- [36] Meier, F., (2008), *Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications*, (Doktora Tezi), KTH Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering-Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm, İsveç.
- [37] Tuncay, R.N., Üstün, O., Yılmaz, M., Gökce, C. ve Karakaya, U. (2011, 6 Eylül), Design And Implementation Of An Electric Drive System For In-Wheel Motor Electric Vehicle 113 Applications, *7th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC'11)*.
- [38] Rahim, N. A., Hew Wooi Ping, H. W., Tadjuddin, M., (2007, Haziran). Design of Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Direct Drive of Electric Vehicle. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 24-28.
- [39] Şenol, S. ve Üstün, O., (2011, Kasım). Design, Analysis and Implementation of a Subfractional Slot Concentrated Winding BLDCM with Unequal Tooth Widths, *37th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON'11)*, 7-10.
- [40] Ifedi, C. J., Mecrow, B. C., Widmer, J. D., Atkinson, G. J., Brockway, S. T. M. ve Kostic-Perovic, D., (2012), A High Torque Density, Direct Drive In-Wheel Motor For Electric Vehicles, *6th IET International Conference on Power Electronics*, , pp. 1-6.

- [41] Cupertino, F., Leuzzi, R., Monopoli, V. G., ve Cascella, G. L., (2018), Maximisation Of Power Density İn Permanent Magnet Machines With The Aid Of Optimisation Algorithms, *IET Electric Power Applications*, (12, 8), 1067-1074.
- [42] Schatzer, C., ve Binder, A., (2000), Design Optimization Of A High-Speed Permanent Magnet Machine With The VEKOPT Algorithm, *Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy*, 1, 439-444.
- [43] Mutluer, M. ve Bilgin, O., (2012), Design Optimization Of PMSM By Particle Swarm Optimization And Genetic Algorithm, *2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*, (pp. 1-4).
- [44] Tuncel, E., (2017), *Elektrikli Bisikletler İçin Sabit Mıknatıslı Doğru Akım Motoru Tasarımı Ve Optimizasyonu*, (Yüksek Lisans Tezi), Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- [45] Çabuk, A. S., Sağlam, Ş., Tosun, G., ve Üstün, Ö., (2016), Investigation Of Different Slot Pole Combinations Of An İn-Wheel BLDC Motor For Light Electric Vehicle Propulsion, *2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)*, (pp. 298-302).
- [46] Tanç, G., (2014), *Elektrikli Bisikletler İçin Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarımı Ve Üretimi*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [47] 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.
- [48] Akin, F., (2019), *Elektrikli Araçlar İçin Geliştirilen Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarım Ve Analizi*, (Yüksek Lisans Tezi), Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- [49] Porselvi T., Sai Ganesh C.S., ve Aouthithiye Barathwaj S.R.Y., (2021) Artificial Neural Networks Based Control and Analysis of BLDC Motors, *IETE Journal of Research*.
- [50] Sumathi S., Krishnan, S., (2021), Artificial Intelligence for Smart Solar Power Irrigation– Comprehensive Review, *International Journal of Advanced Science and Engineering*, doi: <https://doi.org/10.29294/IJASE.7.3.2021.1894-1903>
- [51] Jeeva Bharathi K., Mega S., Subhasri P. L., Sharmitha D., (2023), A Novel ANN Controller for Speed Control of BLDC Motor using MATLAB Environment, *IEE, 2023 2nd International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC)*.
- [52] Abdi, S., Debilou, A., Guergazi, A. ve Samsar, Y., (2024), Mahdi LabeledSpeed Control of BLDC Quadrotor Motor Using an ANN Trained with PID Controller Data Optimized by PSO Algorithm, *IEE, 2024 8th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA)*.
- [53] Wira, P., Beladjine, D. E., Boudana, D., Moualdia, A., Hallouz, M., (2021), A Comparative Study of BLDC Motor Speed Control Using PI and ANN Regulator, *IEE, 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*.

- [54] Özmen, A., (2006), *Asenkron Motorların Algılayıcısız Kontrolü İçin Yapay Sinir Ağları İle Hız Ve Konum Tahmini*, (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [55] Şahin, K., (2006), *Asenkron Motorların Dinamik Yapay Sinir Ağları İle Hız Kontrolü*, (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [56] Yavuzarslan, Ü., (2019), *Fırçasız Doğru Akım Motorları İçin Sürücü Devre Tasarımı ve Geliştirilmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- [57] Çabuk, A. S., (2016), *Tekerlek İçeri Fırçasız Doğru Akım Motorlarının En İyi Tasarımı İçin Yeni Bir Yaklaşım*, (Doktora Tezi), Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [58] Güney, M. Z., (2024), *Akıllı Sogutma Fan Uygulamaları İçin BLDC Motor Tasarımı*, (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [59] Karaca, A., (2023), *Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Yüksek Güçlü Pan&Tilt Birimlerinde Kullanılması ve Alan Yönlendirmeli Metodu İle Kontrolü*, (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [60] Yenipınar, B., (2024), *Elektrikli Araçlar İçin Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motorun Tasarımı, Optimizasyonu Ve Uygulaması*, (Doktora Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [61] Tören, M., Mollahasanoğlu, H., (2023), Gömülü Kalıcı Mıknatıslı-Fırçasız Doğru Akım Motorda (IPMBLDC) Kullanılan Farklı Güç Dereceli Ndfeb Mıknatısların Motor Performansına Etkisinin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2023-Cilt: 38 - Sayı: 3
- [62] İbiş, M. M., (2022), *Planet Redüktörlü Spoke Tipi Fırçasız Doğru Akım Motor*, (Yüksek Lisans Tezi), Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tokat.
- [63] TI, (2022), *Brushless DC Motor Commutation Using Hall-Effect Sensors, Application Brief*.
- [64] Muralidhar, J.E. ve Varanası, P., (2014), Torque Ripple Minimization & Closed Loop Speed Control Of BLDC Motor With Hysteresis Current Controller, *2nd International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS)*, 1-7.
- [65] Dereli, U., (2020), *Fırçasız Doğru Akım Motoru (BLDC) ve Sürücüsü Tasarımı*, (Yüksek Lisans Tezi), Yozgat Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat.
- [66] Zhao, J. ve Yu, Y., (2011), *Brushless DC Motor Fundamentals Application Note. MPS Proprietary Information*
- [67] Kaya, M., (2020), *Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlarda Gözlemci Temelli Sensörsüz Vektör Alan Kontrol Tekniklerinin Uygulamalı Karşılaştırması*, (Yüksek Lisans Tezi), Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- [68] Mechtex, *Understanding the Hall Effect Sensors in BLDC Motors*, Erişim: 14 Ocak 2025, <https://mechtex.com/blog/understanding-the-hall-effect-sensors-in-blcd-motors>

- [69] Patel, J., Mohammed, S. J., (2020), Smart Raspberry Pi Bank Safety Deposit box With Facial Recognition: Fintech Case Study, *ResearchGate*, doi:<http://dx.doi.org/10.36227/techrxiv.12061632.v1>
- [70] Sood, R., Kaur, M., Lenka, H., (2013), Design and Development Of Automatic Water Flow Meter, *International Journal of Computer Science*.
- [71] Hasan, M., Bhuiya, F., Tasneem, Z., Uddin, M. R., (2018), Code Generation and Simulation of a BLDC Motor Controller usuuing PIC Microcontroller, *International Conference on Recent Innovations in Electrical*.
- [72] Ellin, A. ve Dolsak, G., (2008), The Design And Application Of Rotary Encoders, *Sensor Review*.
- [73] Encoder Products Company, (2024, 8 Ocak), The Basics of How an Encoder Works, Erişim: 14 Ocak 2025, <https://www.encoder.com/wp2011-basics-how-an-encoder-works>
- [74] Eltra Trade, (2021, 26 Eylöl) What is a rotary encoder. Types and definition, Erişim: 14 Ocak 2025, <https://eltra-trade.com/blog/what-is-a-rotary-encoder-types-and-definition>
- [75] Eltra Encoder, (2019, 21 Ekim), Eltra Hall Effect Optical Incremental Encoders, Erişim: 14 Ocak 2025 , <https://eltra-encoder.eu/news/hall-effect-optical-incremental-encoders>
- [76] Makyap Elektronik, (2025, 15 Ocak), Resolver Nedir, Nasıl Çalışır ?, Erişim: 18 Ocak 2025 , <https://www.makyapelektronik.com/blog/resolver-nedir-nasil-calisir/>
- [77] şahin, İ., (2010), *Measurement of Brushless DC Motor Charactristics and Parameters and Brushless DC Motor Design*, (Yüksek Lisans Tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Ve Mühendislik Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [78] Özsoy, M., (2023), *Elektrikli Araçlar İçin Eksenel Akılı Asenkron Motor Tasarımı, Mekanik Ve Isıl Analizi*, (Doktora Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [79] Yılmaz, M., (2005), *Fırçasız Doğru Akım Motorunun Algılayıcısız Kontrolünde Dalgacık Tekniğinin Uygulanması*, (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [80] ABLIC, BLDC Motors, Erişim: 19 Ocak 2025, <https://www.ablic.com/en/semicon/applications/bldc-motor/various-motor-features/>
- [81] Magnetic İnnovations, Direct Drive PMSM, Erişim: 19 Ocak 2025 , <https://www.magneticinnovations.com/products/>
- [82] Yıldız, H., (2012), *Tekerlek İçi Sabit Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorun Bulanık Mantık İledenetimi*, (Yüksek Lisans Tezi), Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [83] High Magnets, (2023, 17 Ağustos), İç Rotorlu Motorlar Ve Dış Rotorlu Motorlar Nelerdir?, Erişim: 19 Ocak 2025 , <https://tr.highmagnets.com/info/what-are-inner-rotor-motors-and-outer-rotor-86467618.html>

- [84] Aydın, M., (2012), Brushless Permanent Magnet Servomotors, İçinde: Editör: Küçük, S. Serial and Parallel Robot Manipulators: Kinematic Dynamics Control and Optimization, *First Edition, InTech, Rijeka*, pp. 275-294.
- [85] Hanselman, D., (2003), Brushless Permanent Magnet Motor Design, *2nd Edition, Magna Physics Publishing*.
- [86] Miller, T.J.E., (1989), *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*, Oxford University Press.
- [87] Kurnaz Araz, H., (2018), *Elektrikli Araçlar İçin Gömülü Mıknatıslı Senkron Motor Tasarım Metodolojisi ve Gerçeklenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [88] Pyrhonen, J., Jokinen, T., ve Hrabovcova, V., (2013), *Design Of Rotating Electrical Machines*, John Wiley & Sons.
- [89] Ye, X., Zeng, Q., Sun, R., Zhang, T., (2024), Torque Optimization Strategy For Outer Rotor Permanent Magnet Brushless DC Motor Based On Metamodel And CRITIC-TOPSIS Method, *Springer-Verlag GmbH Germany*, doi: <https://10.1007/s00202-024-026071>
- [90] Nystator, Stator Bonding, Erişim: 20 Ocak 2025, <http://www.nystator.com/col.jsp?id=155>
- [91] Mohanraj, D., Arul david, R., Verma, R., Sathiyasekar, K., Barnawi, B. A., Chokkalingam, B., (2022), A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications, *IEEE*, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175011>
- [92] HC Yassı Metal, Silisli Sac, Erişim: 20 Ocak 2025, <https://www.hcyassimetal.com/silisli-sac>
- [93] Yıldız, T., (2009), *Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Modellenmesi Ve Kontrolü*, (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [94] JFE Steel, Electrical Steel Sheets Jfe G-Core, Jfe N-Core, Erişim: 21 Ocak 2025, https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/electrical/product/n_core.php
- [95] Soyaslan, M., (2020), *Asansör Tahrik Sistemleri İçin Dıştan Rotorlu Sürekli Mıknatıslı Bir Senkron Motor Tasarımı*, (Doktora Tezi), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.
- [96] Çaylak, Y., (2024), *Endüstriyel Fan Sistemlerinde Kullanılan Fırçasız Doğru Akım Motorunun Nötrosofik Bulanık Mantık Pı Denetleyici İle Hız Denetimi*, (Yüksek Lisans Tezi), Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tokat.
- [97] Nasar, S.A., Boldea, I. ve Unnewehr, L.E., (1993), Permanent Magnet Reluctance And Self-Synchronous Motor, *CRC Press*.
- [98] Kül, S., (2015), *Doğrudan Yol Vermeli Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Tasarım Optimizasyonu*, (Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [99] MMC Magnetics, (2017), Typical Magnetic Properties of Sintered NdFeB Magnets, Erişim: 22 Ocak 2025, www.mmcmagnetics.com/ourproducts/main_NdFeB.html

- [100] Miller, T.J.E., (1989), Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives, *Oxford University Press*.
- [101] Chapman S.J., (2017), Elektrik Makinalarının Temelleri (Akin E., Orhan A. Çeviri), *Çağlayan Yayıncılık*, ss. 8-15.
- [102] Dang, K., Atallah, H. K., (2019), Rapid Sizing Concept Of Interior Permanent Magnet Machine For Traction Applications, *The Journal of Engineering*.
- [103] Çağışlar, A. S., (2018), *Elektrikli Araçlar İçin Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarımı*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [104] Bazazian, M., (2022), *Elektrikli Araçlarda Kullanılan Dıştan Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motorunun Tasarımı*, (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.
- [105] Şahin, Y., (2017), *Fırçasız Doğru Akım Elektrik Motoru Karakteristiği Ölçüm Sistemi Tasarımı ve Uygulanması*, (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [106] METERS UK, (2019, 16 Ekim), American Wire Gauge (AWG) Cable / Conductor Sizes, Erişim Tarihi: 24 Ocak 2025, <https://www.metersuk.co.uk/american-wire-gauge-awg-cable-conductorsizes/>
- [107] Tutors Globe, (2023) Half Coil Winding, Erişim Tarihi: 26 Ocak 2025, <https://www.tutorsglobe.com/homework-help/electrical-engineering/half-coilwinding-71554.asp>
- [108] Taşkafa, Ş., (2006), *Asenkron Motorların Yapay Sinir Ağları İle Vektör Kontrolü*, (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [109] Haykin, S., (1999), Neural Networks A Comprehensive Foundation, Second Edition, *Prentice Hall International, Inc., Upper Saddle River, NJ*, s.11.
- [110] Kurtgeri, B., (2024), *Yapay Sinir Ağları ve Makine Öğrenmesi İle Otomobil Satış Tahmininin Yapılması ve Zaman Serileri Analizi İle Karşılaştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [111] Keskin, S., Aydın, F., & Yurdugül, H. (2019). Eğitsel Veri Madenciliği ve Öğrenme Analitikleri Bağlamında E-Öğrenme Verilerinde Aykırı Gözlemlerin Belirlenmesi, *Eğitim Teknolojisi Kuram Ve Uygulama*, 9(1), 292-309. <https://doi.org/10.17943/etku.475149>