T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI SOĞUTMA FAN UYGULAMALARI İÇİN BLDC MOTOR TASARIMI

Muhammed Zübeyir GÜNEY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı

Danışman
Doç. Dr. Sibel ZORLU PARTAL

Ağustos, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI SOĞUTMA FAN UYGULAMALARI İÇİN BLDC MOTOR TASARIMI

Muhammed Zübeyir GÜNEY tarafından hazırlanan tez çalışması 29.08.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Sibel ZORLU PARTAL
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Sibel ZORLU PARTAL, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Selin ÖZÇIRA ÖZKILIÇ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üye. Ali AĞÇAL, Üye
Süleyman Demirel Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Sibel ZORLU PARTAL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Akıllı Soğutma Fan Uygulamaları için BLDC Motor Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Muhammed Zübeyir GÜNEY

İmza

Bu çalışma, “Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı’nın Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı TÜBİTAK-Bideb 2210-C” numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Sevgili eşim Gülten
ve oğlumuz Kürşad'a

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım boyunca vermiş oldukları maddi ve manevi her türlü desteklerinden ötürü başta annem Pakize GÜNEY'e, babam Abdülkadir GÜNEY'e, ablam Rabia GÜNEY'e ve kardeşim Nesibe GÜNEY'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Hayatım boyunca vermiş oldukları karşılıksız sevgi, sabır ve destekleri için değerli aileme en içten sevgilerimi sunuyorum.

Bu tez çalışmamı tamamlamamda bana kılavuzluk eden ve değerli yönlendirmeleriyle beni destekleyen tez danışmanım sayın Doç. Dr. Sibel ZORLU PARTAL'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Yüksek lisans sürecimdeki her adımda bana ilham veren, sabrıyla beni motive eden ve değerli bilgi birikimini paylaşarak çalışmama katkı sağlayan, başta tez danışmanım sayın Doç. Dr. Sibel ZORLU PARTAL olmak üzere tüm akademisyenlere teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı ve yüksek lisans eğitimimi tamamlarken desteklerini esirgemeyen GAMAK Makina AŞ'ye içtenlikle teşekkür ediyorum.

Ayrıca TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı'nın (BİDEB) 2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında, 1649B022205052 numaralı projeme verdikleri destekten ötürü TÜBİTAK-BİDEB'e teşekkürlerimi sunarım.

Muhammed Zübeyir GÜNEY

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ ix

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xiv

ÖZET xvi

ABSTRACT xviii

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1

1.2 Tezin Amacı 7

1.3 Hipotez 10

2 FAN UYGULAMALARINDA KULLANILAN ELEKTRİK MOTORLARI 12

2.1 Alternatif Akım (AC) Motorları 12

2.1.1 Bir Fazlı Asenkron Motorlar 13

2.1.2 Üç Fazlı Asenkron Motorlar 19

2.1.3 Çift Hızlı Asenkron Motorlar 28

2.2 Fırçalı Doğru Akım (DC) Motorları 34

2.2.1 Fırçalı Doğru Akım Motorlarının Çalışma Prensibi 35

2.2.2 Fırçalı Doğru Akım Motorlarının Yapısı 36

2.2.3 Fırçalı Doğru Akım Motorlarının Çeşitleri 39

2.2.4 Fırçalı Doğru Akım Motorlarının Avantaj ve Dezavantajları 41

2.2.5 Fırçalı Doğru Akım Motorlarının Uygulama Alanları 42

2.3 Elektronik Komütasyonlu (EC) Motorlar 43

3 FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI 45

3.1 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Yapısı 47

3.1.1 Stator 48

3.1.2 Rotor 49
3.1.3 Elektronik Devre Kartı 50
3.2 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Çalışma Prensibi 52
3.3 Fırçasız Doğru Akım Motor Çeşitleri 56
3.3.1 İç Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru 56
3.3.2 Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru 58
3.3.3 Disk Tipi (Eksenel Akılı) Fırçasız Doğru Akım Motoru . . . 61
3.4 Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Kullanılan Malzemeler 63
3.4.1 Silisyumlu Saclar 63
3.4.2 Sargı Sistemleri 65
3.4.3 Daimi Mıknatıslar 68
3.5 Fırçasız DA Motorlarının Avantaj ve Dezavantajları 70
3.5.1 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Avantajları 70
3.5.2 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Dezavantajları 71
3.6 Fan Uygulamalarında Kullanılan Motor Tiplerinin Karşılaştırılması 72
3.7 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Uygulama Alanları 74
3.7.1 Otomativ Endüstrisi 74
3.7.2 Havacılık ve Uzay 74
3.7.3 Tıp Cihazları 74
3.7.4 Endüstriyel Otomasyon 75
3.7.5 Tüketici Elektroniği 75
3.7.6 Yenilenebilir Enerji Sistemleri 75
3.7.7 Pompa Sistemleri 75
3.7.8 Drone Uygulamaları 75
3.7.9 Ev Uygulamaları 76
3.7.10 HVAC (Isıtma, Havalandırma ve Klima) Uygulamaları . . . 76

4 REFERANS ASENKRON MOTORUN TASARIMI VE ANALİZİ 77
4.1 ANSYS RMxprt Arayüzü 77
4.1.1 RMxprt Elektrik Makinesi Seçim Penceresi 78
4.1.2 RMxprt Proje Yönetim Penceresi 79
4.1.3 Makine Özelliklerinin Penceresi 80
4.1.4 Stator Özelliklerinin Penceresi 81
4.1.5 Oluk Şekli ve Boyutlarının Tanımlanması 81
4.1.6 Stator Sargı Özelliklerinin Belirlenmesi 82
4.1.7 Rotor Özellikleri Penceresi 83
4.1.8 Mil Özelliklerinin Penceresi 84
4.1.9 Analiz Kurulum Penceresi 84
4.2 250 W İç Rotorlu Asenkron Motor Tasarımı 85

4.2.1 24 Oluk ve 4 Kutuplu Asenkron Motor Tasarımı 85

5 FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNUN TASARIMI, ANALİZİ VE KARŞILAŞTIRILMASI 93

5.1 250 W Dış Rotorlu FDAM için Elektromanyetik Tasarım 93

5.1.1 12 Oluk ve 8 Kutuplu FDAM'nin ANSYS Maxwell RMxprt Çalışması 93

5.1.2 FDAM'nin ANSYS Maxwell RMxprt Analizinden Elde Edilen Sonuçlar 97

5.1.3 12 Oluk ve 8 Kutuplu FDAM'nin ANSYS Maxwell 2D Çalışması 101

5.2 250 W, 8 kutuplu Dış Rotorlu FDAM Tasarımının Mıknatıs Optimizasyonu ile Performans ve Maliyet Analizi 105

5.2.1 NdFe35 Mıknatıs Tipi ile Analiz 105

5.2.2 SmCo28 Mıknatıs Tipi ile Analiz 107

5.3 Farklı Mıknatıs Çeşitlerinin Kullanıldığı FDAM Tasarımları ile Referans Asenkron Motorun Performans ve Maliyet Karşılaştırması 109

6 FAN SİSTEMLERİNDE GÜÇ TÜKETİM ANALİZİ 112

7 SONUÇ 119

KAYNAKÇA 122

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 126

SİMGE LİSTESİ

Gton	Ağırlık Birimi
A	Akım Birimi
A/mm^2	Akım Yoğunluğu Birimi
n	Devir Sayısı
Ω	Direnç Birimi
d/d	Dönme Hızı Birimi
kWh	Enerji Birimi
V	Gerilim
P	Güç
W	Güç Birimi
W/kg	Güç Yoğunluğu Birimi
kg	Kilogram
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
Wb/m	Manyetik Akı Yoğunluğu Birimi
A^2/mm^3	Manyetik Akı Yoğunluğu Birimi
H	Manyetik Alan Şiddeti
M	Moment
Nm	Newton-metre
T	Tesla
mm	Uzunluk Birimi
Δ	Üçgen
Y	Yıldız

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternating Current (Alternatif Akım)
Al-Ni-Co	Alüminyum-Nikel-Kobalt
BEMF	Back Electromotive Force (Geri Elektromotor Kuvvet)
BLDC	Brushless Direct Current (Fırçasız Doğru Akım)
CCC	Current Chopping Control (Akım Kesme Kontrolü)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
DSP	Digital Signal Processing (Dijital Sinyal İşleme)
EC	Electronically Commutated (Elektronik Komütasyonlu)
ECM	Electronically Commutated Motor (Elektronik Komütasyonlu Motor)
EMF	Electromotive Force (Elektromotor Kuvvet)
FDAM	Fırçasız Doğru Akım Motoru
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Hibrit Elektrikli Araç)
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning (Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme)
MÖ	Milattan Önce
MS	Milattan Sonra
NdFeB	Neodyum-Demir-Bor
PM	Permanent Magnet (Daimi Mıknatıs)
PMBLDC	Permanent Magnet Brushless Direct Current (Daimi Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru)
PWM	Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
SmCo	Samaryum Kobalt
VFD	Variable Frequency Drive (Değişken Frekans Sürücüsü)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Crocker-Wheeler fan motoru 2
Şekil 1.2 Diehl elektrik fanları tavan vantilatörü 3
Şekil 1.3 Hava işleme cihazı patenti 4
Şekil 1.4 Dünya genelinde elektrik tüketimi / Endüstriyel motor sistemleri elektrik tüketimi 8
Şekil 1.5 Ocak 2020-Aralık 2023 arası faturalanan toplam elektrik enerjisinde, sanayi sektörünün aylara göre elektrik enerjisi tüketim oranları 9
Şekil 1.6 VFD'li geleneksel fan ve EC fan 11
Şekil 2.1 Stator laminasyonu ve stator paketi 14
Şekil 2.2 Rotor laminasyonu ve kısa devre edilmiş rotor baraları 15
Şekil 2.3 Milli rotor yapısı 15
Şekil 2.4 Merkezkaç anahtarı 16
Şekil 2.5 Daimi devre kondansatörlü motor 17
Şekil 2.6 Kalkış ve daimi devre kondansatörlü motor 17
Şekil 2.7 Gölge kutuplu motor 18
Şekil 2.8 Asenkron motor yapısı 20
Şekil 2.9 Asenkron motor kesiti 21
Şekil 2.10 Asenkron motor parçaları 21
Şekil 2.11 Sargılı stator 22
Şekil 2.12 Rotor laminasyon sacı ve milli rotor yapısı 23
Şekil 2.13 Alüminyum gövde ve alüminyum takma ayak 24
Şekil 2.14 Pik gövde 24
Şekil 2.15 Alüminyum kapak 25
Şekil 2.16 Pik kapak 25
Şekil 2.17 Rulmanlar 26
Şekil 2.18 Yataklar 27
Şekil 2.19 Pervane 27
Şekil 2.20 Seri üçgen - Paralel yıldız bağlantılı 30
Şekil 2.21 Seri üçgen - Paralel yıldız Bağlantılı 30
Şekil 2.22 Seri yıldız - Paralel yıldız bağlantılı 30
Şekil 2.23 Seri üçgen düşük hızlı bağlantı 31

Şekil 2.24 Paralel yıldız yüksek hızlı bağlantı 31
Şekil 2.25 Δ - YY bağlantılı dahlender sargılı motorun klemens kutusu bağlantısı 31
Şekil 2.26 Y - YY bağlantılı dahlender sargılı motorun klemens kutusu bağlantısı 32
Şekil 2.27 Sabit moment ve değişken moment grafikleri 33
Şekil 2.28 Fırçalı DC motor 35
Şekil 2.29 Stator 36
Şekil 2.30 Rotor 37
Şekil 2.31 Fırça ve fırça yatağı 38
Şekil 2.32 Kollektör 38
Şekil 2.33 Seri uyartımlı DC motor 39
Şekil 2.34 Paralel uyartımlı DC motor 40
Şekil 2.35 Bileşik uyartımlı DC motor 41
Şekil 3.1 Elektrik motorlarının sınıflandırılması 46
Şekil 3.2 Elektronik komütasyonlu motor yapısı 47
Şekil 3.3 Fırçasız doğru akım motoru stator yapısı 48
Şekil 3.4 Fırçasız doğru akım motoru rotor yapısı 49
Şekil 3.5 Fırçasız doğru akım motoru elektronik devre kartı yapısı 51
Şekil 3.6 Fırçasız doğru akım motorlarının enerjilendirilmesi 53
Şekil 3.7 Fırçasız doğru akım motorlarının sürülmesi 53
Şekil 3.8 Fırçasız doğru akım motorlarının 6 adımdaki rotor pozisyonları . 54
Şekil 3.9 Fırçasız doğru akım motorlarının 6 adımdaki akım dalga formları 55
Şekil 3.10 6 adımda sürme yöntemi ile rotor ve stator pozisyonları 55
Şekil 3.11 İç rotorlu fırçasız doğru akım motor yapıları 57
Şekil 3.12 Dış rotorlu fırçasız doğru akım motor yapıları 59
Şekil 3.13 Disk tipi fırçasız doğru akım motoru 61
Şekil 3.14 Fırçasız doğru akım motor tipleri 62
Şekil 3.15 M400-50A sacının spesifik özellikleri 64
Şekil 3.16 Konsantrik sargı tipi 65
Şekil 3.17 Dağıtılmış sargı tipi 66
Şekil 3.18 Geri-EMF gerilimi dalga formu 67
Şekil 3.19 Mıknatıs tipleri ve özellikleri 69
Şekil 4.1 RMxprt elektrik makinesi seçim arayüzü 78
Şekil 4.2 Proje yönetim penceresi 79
Şekil 4.3 Makine özellikleri 80
Şekil 4.4 Stator bilgi girişi penceresi 81
Şekil 4.5 Oluk şekli ve oluk boyutları 81
Şekil 4.6 Stator sargı özellikleri ve sargı yapısı 82

Şekil 4.7 Tam kalıp ve yarım kalıp sargı tipleri 82
Şekil 4.8 Rotor bilgi girişi penceresi 83
Şekil 4.9 Kutup özellikleri 83
Şekil 4.10 Kutup yayı oranı 83
Şekil 4.11 Mil özellikleri 84
Şekil 4.12 Analiz kurulum penceresi 84
Şekil 4.13 Oluk tipi 86
Şekil 4.14 Stator sargısı 87
Şekil 4.15 Rotor laminasyonu 88
Şekil 4.16 Oluk tipi 89
Şekil 4.17 24 oluk, 4 kutup, asenkron motor kesiti 90
Şekil 5.1 Oluk tipi 94
Şekil 5.2 Stator sargısı 95
Şekil 5.3 12 oluk, 8 kutup, FDAM kesiti 97
Şekil 5.4 DC giriş akımı'nın (A) ve hız'a (d/d) 100
Şekil 5.5 Verim'in (%) ve hız'a (d/d) 100
Şekil 5.6 Çıkış gücü'nün (W) ve hız'a (d/d) 100
Şekil 5.7 FDAM'nin 2B gösterimi a) 2B tam kesiti, b) 2B yakın plan 1/4 kesiti 101
Şekil 5.8 Tork ve zaman 101
Şekil 5.9 Sargı akımları ve zaman 102
Şekil 5.10 Çıkış gücü ve zaman 102
Şekil 5.11 Akım yoğunluğu (A/mm^2) 103
Şekil 5.12 Akı çizgileri (Wb/m) 103
Şekil 5.13 Manyetik alan şiddeti (A/m) 104
Şekil 5.14 Manyetik akı yoğunluğu dağılımı (T) 104

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Uygulama özelinde tasarruf potansiyeli 10
Tablo 3.1 Rotor ve stator pozisyonları ile akım yönü 55
Tablo 3.2 İç ve dış rotorlu yapıların karşılaştırılması 60
Tablo 3.3 Konsantrik ve dağıtılmış sargı tipinin özellikleri 67
Tablo 3.4 Elektrik motorlarının yapısal karşılaştırılması 72
Tablo 3.5 Aynı güçteki asenkron motor, fırçalı DC motor ve fırçasız DC motorların özelliklerinin karşılaştırılması 73
Tablo 4.1 Asenkron motor makine parametreleri 85
Tablo 4.2 Stator özellikleri 86
Tablo 4.3 Oluk boyutları 86
Tablo 4.4 Sargı ve izolasyon bilgileri 87
Tablo 4.5 Rotor özellikleri 88
Tablo 4.6 Oluk boyutları ve sincap kafesi bilgileri 89
Tablo 4.7 Analiz bilgileri 90
Tablo 4.8 24 oluk, 4 kutup, 250 W asenkron motor analiz sonuçları 91
Tablo 4.9 250 W 4 kutuplu motor için 50 Hz verimlilik değerleri 92
Tablo 4.10 Birim fiyat bilgisi 92
Tablo 4.11 Referans asenkron motorun temel malzemelerinin toplam ağırlık ve fiyat bilgisi 92
Tablo 5.1 FDAM'nin makine ve devre parametreleri 93
Tablo 5.2 Stator özellikleri 94
Tablo 5.3 Oluk boyutları 95
Tablo 5.4 Sargı ve izolasyon bilgileri 96
Tablo 5.5 Rotor ve kutup bilgileri 96
Tablo 5.6 Analiz bilgileri 97
Tablo 5.7 12 oluk, 8 kutup, 250 W FDAM analiz sonuçları 98
Tablo 5.8 Birim fiyat bilgisi 99
Tablo 5.9 250 W FDAM'de temel malzemelerin toplam ağırlık ve fiyat bilgisi 99
Tablo 5.10 NdFe35 tip mıknatıs ile FDAM analiz sonuçları 105
Tablo 5.11 Birim fiyat bilgisi 106
Tablo 5.12 NdFe35 tip mıknatıs ile temel malzemelerin toplam ağırlık ve fiyat bilgisi 106

Tablo 5.13 SmCo28 tip mıknatıs ile FDAM analiz sonuçları 107
Tablo 5.14 Birim fiyat bilgisi 108
Tablo 5.15 SmCo28 tip mıknatıs ile temel malzemelerin toplam ağırlık ve fiyat bilgisi 108
Tablo 5.16 250 W çıkış gücü değerindeki asenkron ve fırçasız doğru akım motorlarının analiz sonuçları 110
Tablo 5.17 250 W çıkış gücü değerindeki asenkron ve fırçasız doğru akım motorlarının maliyet karşılaştırılması 111
Tablo 6.1 Farklı soğutma gereksinimleri için hava performansını on/off operasyonlu açma kapama ile ayarlayan AC fanlar 113
Tablo 6.2 Farklı soğutma gereksinimleri için hava performansını modülasyon çalışma ile ayarlayan EC fanlar 113
Tablo 6.3 EC fanlar ile güç tüketimindeki azalma 114
Tablo 6.4 AC ve EC fanların yıllık bazda enerji tüketim miktarları 114
Tablo 6.5 EC fan kullanımının yıllık bazda potansiyel enerji tasarruf miktarları 114
Tablo 6.6 Farklı soğutma gereksinimleri için hava performansını on/off operasyonlu açma kapama ile ayarlayan AC fanlar 115
Tablo 6.7 Farklı soğutma gereksinimleri için hava performansını modülasyon çalışma ile ayarlayan EC fanlar 115
Tablo 6.8 EC fanlar ile güç tüketimindeki azalma 116
Tablo 6.9 AC ve EC fanların yıllık bazda enerji tüketim miktarları 116
Tablo 6.10 EC fan kullanımının yıllık bazda potansiyel enerji tasarruf miktarları 117
Tablo 6.11 Üç zamanlı tarifeye göre AC ve EC fanların yıllık bazda enerji tüketim miktarları 117
Tablo 6.12 EC fan kullanımının üç zamanlı tarifeye göre yıllık bazda hesaplanmış potansiyel enerji tasarruf miktarları 118
Tablo 6.13 EC fan kullanımının tekli tarifeye göre yıllık bazda hesaplanmış potansiyel enerji tasarruf miktarları 118

ÖZET

Akıllı Soğutma Fan Uygulamaları için BLDC Motor Tasarımı

Muhammed Zübeyir GÜNEY

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Sibel ZORLU PARTAL

Dünya genelinde enerjinin büyük kısmının elektrik motorlu sistemler tarafından tüketildiği göz önüne alındığında, özellikle sanayide kullanılan motor sistemlerinin enerji verimliliği üzerine odaklanmak kritik bir öneme sahip olmuştur. Sanayide tüketilen elektrik enerjisinin büyük bir kısmı ise asenkron motorlar tarafından kullanılmaktadır. Özellikle fan uygulamalarında kullanılan asenkron motorlar hem verimsiz çalışmakta hem de farklı soğutma gereksinimleri için hızları kontrol edilmemektedir. Bu durum fan sistemlerindeki enerji verimliliği ve kontrol edilebilir akıllı sistem uygulamaları üzerine çalışmaların önemini daha da arttırmıştır. Farklı soğutma gereksinimleri için geleneksel uygulamalarda, hava performansını ayarlamada AC fanlar kullanılmaktadır. Ancak geleneksel uygulamalarda bu fanların kontrolü, basit bir şekilde açma kapamaya dayanan yani "on/off operasyon" şeklinde, kontrolsüz olarak yapılmaktadır. Modern uygulamalarda ise optimum soğutma performansını elde etmek için, sistemde bulunan tüm fanların çalışır durumda kaldığı, hızlarının sürekli olarak hem kapalı çevrim hem de açık çevrim kontrol edildiği, EC teknolojili fanlar kullanılmaktadır. EC teknolojisi için günümüzde PM (Daimi Mıknatıslı Motor), ECM (Elektronik Komütasyonlu Motor) ve FDAM (Fırçasız Doğru Akım Motoru) terminolojileri sık sık kullanılmaktadır. EC fanların kontrolü ise "modüler çalışma" denilen bir sistem olan ve fanların ayrı ayrı hızlarının kontrol edildiği modüler çalışma ile yapılmaktadır. Modüler çalışma ile sistemdeki fanların en optimum ve en verimli noktalarında çalışması sağlanarak, enerji tüketim bedellerinde tasarruf

yapılabilmektedir. Bu amaçla fan sistemlerinde kullanılan fırçasız doğru akım motorları, geleneksel alternatif akım motorlarına göre daha yüksek verimlilik sağlar ve sistemin elektronik olarak kontrol edilebilmesine olanak sağlar. Bu özellikleri sayesinde, motorun hızı ve torku hassas bir şekilde ayarlanabilir ve farklı soğutma gereksinimleri için gerekli enerji tüketimi optimize edilebilir. Akıllı kontrol algoritmaları ve sensörlerin kullanımı, FDAM çalışma koşullarına dinamik olarak adapte olabilir ve en uygun çalışma modu seçilerek, enerji tasarrufu sağlanabilir.

Bu tez çalışmasında bu sebeple, mevcut soğutma fan sistemlerinde kullanılan geleneksel AC motorların yerine kullanılması amacıyla, 250 W çıkış gücü değerindeki dış rotorlu bir FDAM tasarlanmış, analizleri yapılmış ve sonuçlar asenkron motorla karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çıkış gücü sabit tutularak, asenkron motor ve farklı mıknatısların kullanıldığı FDAM'ler ile performans ve maliyet karşılaştırmaları yapılmıştır. Tasarım ve analiz çalışmaları için Ansys Electronics Desktop programı kullanılmıştır. Ansys RMxprt yazılımı ile FDAM'nin tasarım parametreleri analitik olarak hesaplanmış ve motor geometrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu geometri Ansys Maxwell yazılımına aktarılıp FDAM'nin iki boyutlu elektromanyetik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fırçasız doğru akım motoru, EC motor teknolojisi, Ansys Maxwell ile elektromanyetik analiz, enerji verimliliği, asenkron motorlar.

ABSTRACT

BLDC Motor Design for Smart Cooling Fan Applications

Muhammed Zübeyir GÜNEY

Department of Electrical Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sibel Zorlu PARTAL

Considering that a significant portion of global energy is consumed by electric motor systems, especially those used in industrial applications, focusing on the energy efficiency of motor systems has become critically important. A large share of the electricity consumed in industry is used by asynchronous motors. In fan applications, asynchronous motors are particularly inefficient and their speeds are not controlled for different cooling requirements. This situation has increased the importance of studies on energy efficiency and controllable smart system applications in fan systems. In conventional applications, AC fans are used to adjust air performance for different cooling requirements. However, in these applications, the control of these fans is typically based on simple "on/off operations" without any control over their speeds. In modern applications, EC (Electronically Commutated) fans are used to achieve optimal cooling performance, where the speeds of all fans in the system are continuously controlled in both closed-loop and open-loop control systems. In the context of EC technology, terminologies like PM (Permanent Magnet Motor), ECM (Electronically Commutated Motor), and BLDC (Brushless DC Motor) are frequently used. The control of EC fans is achieved through a "modular operation" system, where the speeds of the fans are individually controlled. With modular operation, the fans in the system can operate at their most optimal and efficient points, resulting in energy cost savings. For this purpose, brushless DC motors used in fan systems offer higher efficiency compared to traditional AC motors and enable electronic control of the system. These characteristics allow the motor's speed and torque to be precisely adjusted,

optimizing energy consumption for different cooling requirements. The use of smart control algorithms and sensors allows BLDC motors to dynamically adapt to operating conditions and select the most suitable operating mode, achieving energy savings.

In this thesis, a 250 W outer rotor BLDC motor has been designed, analyzed, and the results are presented in comparison with an asynchronous motor to replace the conventional AC motors used in existing cooling fan systems. By keeping the output power constant, performance and cost comparisons were made between the asynchronous motor and BLDC motors using different magnets. The design and analysis studies were conducted using Ansys Electronics Desktop software. The design parameters of the BLDC motor were analytically calculated using Ansys RMxprt software, and the motor geometry was created. This geometry was then transferred to Ansys Maxwell software for two-dimensional electromagnetic analyses of the BLDC motor.

Keywords: Brushless DC motor, EC motor technology, Electromagnetic analysis with Ansys Maxwell, energy efficiency, asynchronous motor.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

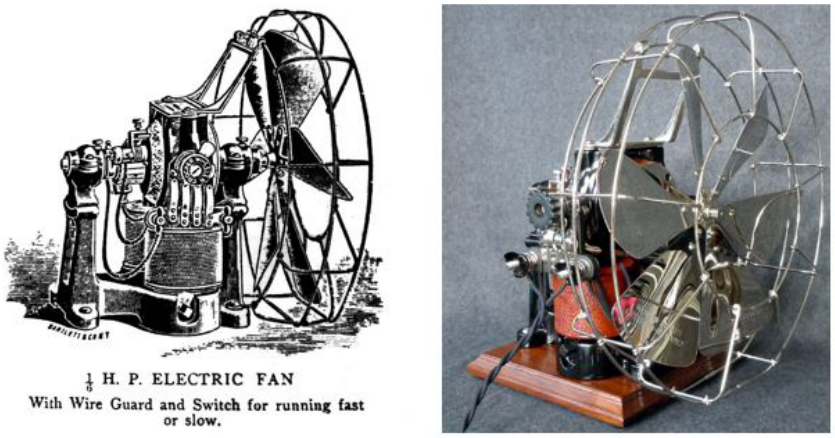
İnsanoğlu tarih boyunca gerek serinlemek gerekse hava kalitesini arttırmak gibi ihtiyaçları doğrultusunda çeşitli icatlar geliştirmişlerdir. Örneğin ilk insanlar, kişisel konforlarını sağlamak ve vücut ısılarının dengesini koruyabilmek amacıyla hayvan derilerini kullanmış, Antik Mısır'ın yönetici sınıfı ise palmiye dallarıyla serinleyebilmek için esirleri kullanmışlardır. Romalılar ise ünlü hamamlarında konforu arttırmak için vantilasyon ve ısıtma sistemleri kurmuşlardır. Tarihsel bu gelişiminden de anlşılmaktadır ki, havalandırma ve fan sistemleri insan hayatında önemli bir yere sahiptir ve HVAC (Isıtma, Havalandırma ve Klima) sistemleri hayatın ayrılmaz bir parçasını oluşturmaktadır. Bu sistemler sadece bina, okul, hastane gibi yapılarda değil, aynı zamanda havacılık, aviyonik, otomotiv ve bir çok endüstriyel alanda da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Havalandırma sistemleri, iç mekanda hava dolaşımı sağlayarak taze hava akışını arttırırken, fanlar bu dolaşımın etkili bir şekilde olmasını ve hızını ayarlar. HVAC sistemleri ise hem sıcaklık hem de nem kontrolünü sağlayarak konforlu bir ortam oluşturur. Bu teknolojiler, insanların yaşam kalitesini arttırmak ve çalışma ortamlarını daha verimli hale getirmek için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan fan ve havalandırma sistemleri, araç içi iklim kontrolünü sağlayarak, sürücü ve yolcuların konforunu arttırırken, motor ve elektronik sistemlerin daha verimli çalışmasını sağlayarak ömürlerini uzatır. Bu nedenle, havalandırma ve fan sistemleri modern yaşamın vazgeçilmez unsurlarıdır ve sürekli olarak geliştirilmekte ve iyileştirilmektedir.

Günümüzde "fan" olarak isimlendirdiğimiz cihazların kökeni, çok eski zamanlara kadar uzanmaktadır. Çin'de MÖ 206 - MS 220 yılları arasında hüküm süren Han Hanedanlığı döneminde, Ding Huan adındaki bir zanaatkar soğutma sistemleri üzerine çalışmalar yapmıştır. MS 2. yüzyılda tarihte ilk kez bir pervaneyi döndürerek ortamı serinleten üç metre çapında bir fan sistemini icat etmiştir [1]. Bu fan, günümüzdeki tavan pervanelerine benzemekle birlikte, insan gücüyle

çalışıyor olmasıyla farklılık gösteriyordu. Daha sonra 747 yılında Tang Hanedanlığı devrinde, İmparator Xuanzong'un emriyle Serin Salon adı verilen bir imparatorluk sarayı inşa edilmiştir. Bu sarayda su gücüyle çalışan fan tekerlekleri kullanılmış ve çeşmelerden su buharı püskürtülerek iklimlendirme sağlanmıştır. Böylece Çinliler, el gücünün yerine hidrolik güç kullanmaya başlamışlardır [2].

15.Yüzyılda italyan mühendis ve ressam Leonardo Da Vinci, Milano dükü patronu Ludovico Sforzanın eşinin odasını serinletmek amacıyla bir sistem icat etmiştir. Bu sistem, insan gücü kullanılarak çalıştırılan bir pervane ile soğuk su buharını ortama yayarak, ortamın serinlemesini sağlamıştır. Bu icat tarihteki kapalı bir ortamın koşullarını değiştirmeye yönelik ilk girişim olarak kabul edilmektedir [2].

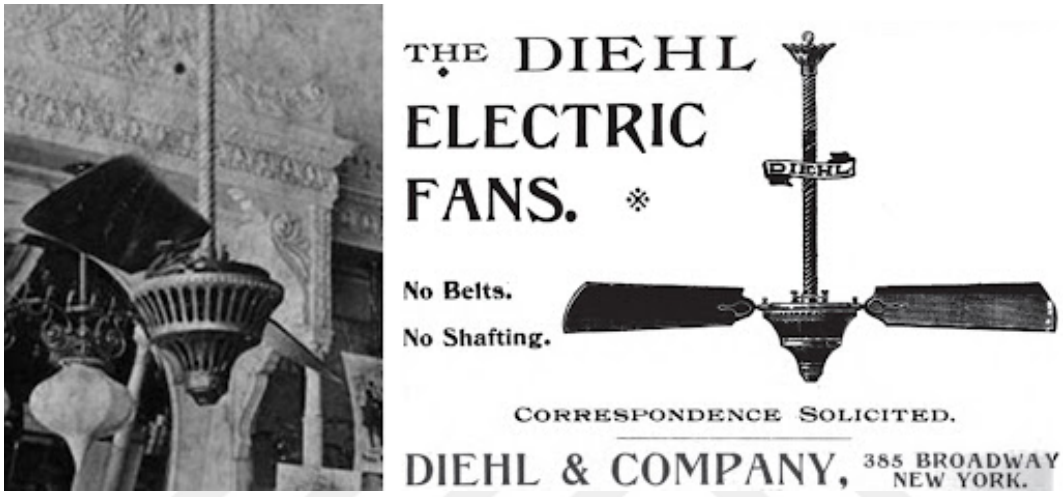
1882 yılında, Amerikali elektrik mühendisi Schuyler Skaats Wheeler, doğru akım motorunu kullanarak çalıştırdığı bir fan üretmiştir. 100-110V DC besleme gerilimine sahip 2 kutuplu bu fan motorunun 6 adet fan kanadı bulunmasına rağmen, fan kafesi opsiyonel olarak sunulmaktaydı. Fan motorunun üzerindeki anahtarla fan, 2 farklı hız seçeneği ile çalışmaktaydı. Anahtar ilk konumundayken bobinlerden biri enerjilendirilmiş ve fan 900 d/d hızla çalıştırılmış, anahtar ikinci konumuna getirildiğinde ise bobinlerin ikisi birden enerjilendirilerek, fanın 1800 d/d hızla dönmesi sağlamıştır. Daha sonra güvenlik açısından pek çok eksiği bulunan bu fanı, Crocker Curtis Electric Motor firması markalaştırıp satmaya başlamıştır. Schuyler Skaats Wheeler, 1890 Yılında bu icadının patentini [3] almıştır. Bu icadı ile 1904 yılında, John Scott madalyası olarak bilinen ve Franklin Institute tarafından insanlığın daha rahat ve mutlu yaşamasına katkı sunan icatlar yapan mucitlere verilen bir ödülü almıştır.



Şekil 1.1 Crocker-Wheeler fan motoru

Şekil 1.1, S. S. Wheeler tarafından patenti alınan fan motorunu göstermektedir [4].

Alman göçmeni Philip H. Diehl, tüm mal varlığını Chicago'daki yangında kaybetmiş ve hayatını sıfırdan kurabilmek için New York'a gitmiştir. Philip H. Diehl New York'ta Singer dikiş makinaları şirketinde çalışmaya başlamış ve burada bir pervaneyi dikiş makinesinin motoruna bağlayıp tavana monte ederek, tarihte bilinen ilk tavan vantilatörünü geliştirmiştir. Bu icat, tarihte endüksiyon motor kullanılarak tasarlanan ilk fan olarak kabul edilebilir. Philip H. Diehl, bu tavan vantilatörünün patentini [5] 1887 yılında almış ve zamanla daha da geliştirmiştir. Örneğin 1904 yılında fana aydınlatma sistemi eklemiştir.



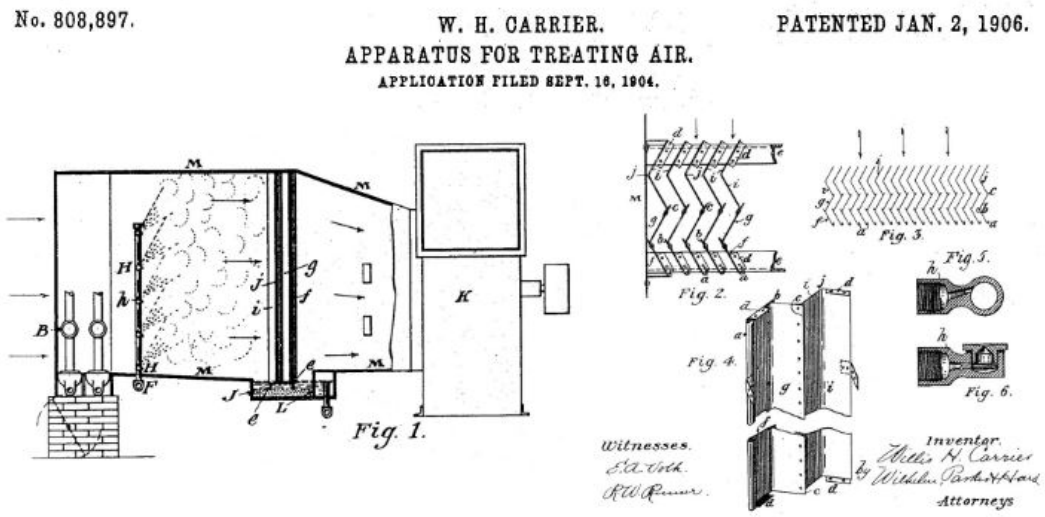
Şekil 1.2 Diehl elektrik fanları tavan vantilatörü

Şekil 1.2, Philip H. Diehl tarafından patenti alınan tavan vantilatörünü göstermektedir [6].

Nicola Tesla 1888 yılında asenkron motoru icat etmiş ve patentini almıştır. Bu icattan sonra, fan üreticisi firmalar asenkron motoru ürettikleri fanlarda kullanmaya başlamışlardır. 20. yüzyılın başlarına kadar fanlar sadece motor ve pervaneden oluşmaktaydı. Ancak, fanlar boşta çalışırken yüksek hızlara çıkacağında, bu durumlarda meydana gelebilecek kazaları önlemek amacıyla koruma kafesi de takılmaya başlanmıştır.

Modern klima Teknolojisi üzerine çalışmalar 20. yüzyılın ilk çeyreğinde başlamıştır. Willis Carrier, Michael Faraday, William Rankine, Reuben Trane ve Sadi Carnot isimli bilim insanları bu teknolojiyi icat ederek, gelişimine katkı sağlamışlardır. İlk modern iklimlendirme uygulaması, Brooklyn, New York'ta son derece yetenekli bir mühendis olan Willis Haviland Carrier tarafından 1902 yılında bir matbaa tesisi için geliştirilmiştir. Willis Haviland Carrier'ın geliştirdiği sistem, taze havayı soğutulmuş su dolu bir hazneden geçirerek iç mekana vermiş ve aynı zamanda havadaki nemin büyük bir kısmını suya tutarak iç mekanın nem seviyesini düzenlemiştir. Bugünkü iklimlendirme uygulamaları hala bu temel prensipler

üzerine kuruludur. Carrier, "Hava İşleme Cihazı" adlı icadıyla, hem sıcaklık ve nemi kontrol etmek için hem de havanın temizliği ve dolaşımı için mekanik bir yöntem oluşturmuş ve 1906 yılında bu icadının patentini almıştır [7, 8].


No. 808,897. W. H. CARRIER. PATENTED JAN. 2, 1906.
APPARATUS FOR TREATING AIR.
APPLICATION FILED SEPT. 16, 1904.
Fig. 1.
Fig. 2.
Fig. 3.
Fig. 4.
Fig. 5.
Fig. 6.
Witnesses.
Inventor.
Attorneys

Şekil 1.3 Hava işleme cihazı patenti

Şekil 1.3, Willis Haviland Carrier tarafından patenti alınan hava işleme cihazını göstermektedir.

Rajagopal ve Sathaiah yaptıkları çalışmada tavan vantilatörü uygulamalarında kullanılmak üzere, 8 kutup ve 9 stator oluğundan oluşan, 15.5 mm paket boyuna sahip 30 W gücünde bir dış rotorlu BLDC motor modeli tasarlanmışlardır. Çalışmada, stator oluk sayısı, paket boyu ve kutup sayısı gibi değişkenlerin optimizasyonu yapılarak, 6 kutup ve 27 stator oluğundan oluşan, 14 mm paket boyuna sahip bir motor modeli oluşturulmuş ve bu optimizasyon sonucunda motor verimi %78.72'den, %82.65'e çıkartılabilmiştir [9].

Choi ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada 42 V'luk otomotiv uygulamaları için motor soğutma fanı sistemlerinde kullanılmak üzere, 4 kutup ve 12 stator oluğundan oluşan, 25 mm paket boyuna sahip bir iç rotorlu BLDC motor tasarlamışlardır. Daha sonra önerilen BLDC motor ve sürücüsünün prototipleri üretilmiş, laboratuvar testleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Deneysel sonuçlarda, mevcut sistemlerde kullanılan 14 V fırçalı DC motorla karşılaştırıldığında, BLDC motorlu sistemle verimde yaklaşık %20 artış sağlandığı sonucuna varılmıştır [10].

Liu ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada asenkron motorlu geleneksel tavan vantilatörü ile BLDC motorlu tavan vantilatörünü üç farklı hız seçeneğinde çalıştırarak, karşılaştırma yapmışlardır. Tasarlanan dış rotorlu BLDC motor, 8 kutup ve 12 stator oluğundan oluşmaktadır. Test sonuçları, BLDC motorlu tavan

vantilatörünün en az %50 oranında tasarruf sağlayabileceğini göstermiştir [11].

Fazil ve Rajagopal, yaptıkları çalışmada, tavan vantilatörlerinde sıklıkla kullanılan ve %30 sistem verimliliğinde çalışan tek fazlı asenkron motorlara alternatif olarak BLDC motor kullanımının sistem verimliliğini %50'ye çıkaracağını göstermişlerdir. Tasarlanan BLDC motor, 8 kutuplu olup, 20 W çıkış gücünde ve 360 d/d hızındadır. BLDC motorun rotorunda, NdFeB mıknatıslar kullanılmıştır [12].

Castano ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada otomotiv klima uygulamasında kullanılan mevcut BLDC motorla karşılaştırmak amacıyla yeni bir BLDC motor tasarımı yapmışlardır. Tasarlanan BLDC motor, farklı kutup sayıları, farklı oluk sayıları, farklı paket boyları, farklı sarım sayıları, farklı kutup adımları ve farklı hava aralıkları için verimlilik açısından karşılaştırılmıştır. Nihai model olarak SmCo24 mıknatısların kullanıldığı, iç rotorlu, 4 kutup ve 12 stator oluğundan oluşan bir BLDC motor tasarlanmıştır. Aynı uygulamada kullanılmak üzere 56 W çıkış gücüne sahip ve %5 daha verimli bir motor tasarladıklarını göstermişlerdir [13].

Lee ve Jung, yaptıkları çalışmada, BLDC motorlarda kullanılan mıknatısların maliyet karşılaştırmasını yapmışlardır. Gömülü daimi NdFeB mıknatıslı BLDC motor ile yüzey daimi ferrit mıknatıslı, 20 W gücündeki iki farklı tasarım karşılaştırılmış ve ferrit mıknatıslı tasarımın %50 daha ucuz olduğu gösterilmiştir. Ancak, ferrit mıknatıslı tasarımın bir dezavantaj olarak yaklaşık 3 kat daha fazla tork dalgalanmasına sahip olduğu da belirtilmiştir [14].

Saxena'nın yaptığı çalışmada, 22 W çıkış gücüne sahip bir tavan vantilatörü için NdFeB ve ferrit mıknatıslar kullanılarak iki farklı PMBLDC motor tasarlanmış ve performans ile maliyet karşılaştırması yapılmıştır. Tasarlanan iki farklı modelden biri 18 stator oluğu ve 16 kutuptan, diğeri ise 12 stator oluğu ve 16 kutuptan oluşmaktadır. Ferrit mıknatıs kullanılarak tasarlanan modelin, NdFeB mıknatıs kullanılarak tasarlanan modele göre %47.2 daha ağır olmasına rağmen, NdFeB mıknatıs kullanılan motor modelinin %77.8 daha pahalı olduğu gösterilmiştir [15].

Parasiliti ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, davlumbaz fanlarında sıklıkla kullanılan gölge kutup motorları ve tek fazlı kondansatörlü indüksiyon motorlarına alternatif olarak, 100 W çıkış gücünde yüksek verimli bir dış rotorlu PMBLDC motor tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan BLDC motor, 60 mm paket boyutunda, 12 stator oluğu ve 10 kutuptan oluşmaktadır. Simülasyon sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmış ve BLDC motorların ev tipi davlumbaz fanı uygulamaları için yüksek verimli, düşük tork dalgalanmalı ve değişken hızlı bir çözüm sunduğu gösterilmiştir [16].

Hashim ve arkadaşları, eksenel bir fanın güç kayıplarını deneysel ve hesaplamalı olarak incelemişlerdir. Dış rotorlu BLDC motorlar için mekanik, elektriksel, termal ve elektromanyetik kayıplar modellenmiştir. Çalışmada, 2 kutup ve 6 stator oluğuna sahip 36 W gücündeki BLDC motor, 6000 - 18500 rpm aralığında analiz edilmiştir. Motorun toplam kayıplarının %59'undan fazlasını elektromanyetik kayıpların, yaklaşık %24'ünü invertör kayıplarının ve %16'sını sürtünme kayıplarının oluşturduğu belirtilmiştir [17].

Renaud ve arkadaşları, ev tipi motorlu bir fan sisteminde kullanılmak üzere genetik algoritmayı kullanarak hem maliyet hem de performans açısından optimum bir tasarım çalışması yapmışlardır. 30 W çıkış gücü için verimlilik değeri minimum %80 olacak şekilde çeşitli çözümler sunulmuştur [18].

Hsiao ve arkadaşları, küresel ölçekteki enerji tüketim maliyetlerine elektrik motorlarının katkısını ele almışlardır. Ev tipi küçük fanlar için kullanılan geleneksel asenkron motorların yerine, yüksek verimli bir PMBLDC motor modeli tasarlamışlardır. Tasarlanan BLDC motor, 9 stator oluğu ve 4 kutuptan oluşmaktadır. Çalışmada, asenkron motorlu fan, ferrit mıknatıslı BLDC motor ve NdFeB mıknatıslı BLDC motor ile karşılaştırılmıştır. BLDC motorlu fanların verimliliğinin asenkron motora göre çok daha yüksek olduğu gösterilmiştir [19].

Nakuçi ve Spahiu, düşük güçlü fan uygulamalarında asenkron motorların BLDC motorlarla değiştirilerek enerji verimliliğini arttırmanın önemini vurgulamışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, fan uygulamalarında kullanılan BLDC motorların, üç fazlı asenkron motorlara kıyasla %35'e kadar enerji tasarrufu sağlayarak verimliliği artırabileceği açıkça gösterilmiştir. Ayrıca, aynı güç seviyesindeki asenkron motorlar, DC motorlar ve BLDC motorlar için bir karşılaştırma tablosu da hazırlanmıştır. Bu tablo, BLDC motorların fan uygulamalarında tercih edilmesinin enerji verimliliği açısından ne kadar önemli olduğunu göstermektedir [20].

Leitner ve arkadaşları, düşük güçlü fan uygulamaları için vuruntu momentini azaltıp rulman ömrünü artıracak bozucu kuvvetleri gidermeyi amaçlamışlardır. 1 W gücünde ve 5500 rpm hızında çalışan pençe kutuplu bir dış rotor tasarlamışlardır. V şekilli pençe kutuplar sayesinde vuruntu momentinin %50 azalacağını ve eksenel kuvvetlerin dengeleneceğini göstermişlerdir [21].

Reddy ve arkadaşları, tavan vantilatörlerinde kullanılan 1 fazlı asenkron motorlara alternatif olarak BLDC motor tasarımı yapmışlardır. 30 W gücünde, 12 stator oluğundan ve 14 kutuptan oluşan bir BLDC motor tasarlamışlardır. Çalışmalarında, tavan vantilatörlerinde kullanılan fanların BLDC motorlarla değiştirilmesi

durumunda güç tüketiminde %50 oranında bir düşüş sağlanabileceğini ve bu sayede enerji tasarrufu elde edilebileceğini belirtmişlerdir [22].

Shastri ve arkadaşları, tavan vantilatörleri için üç fazlı dış rotorlu bir BLDC motorun tasarımını analitik hesaplamalar kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Analitik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar, Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır [23].

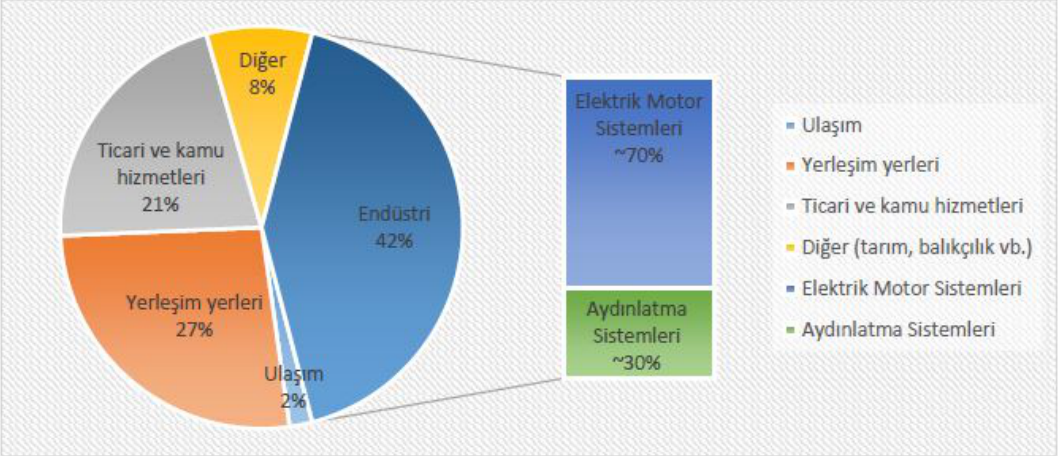
Chakraborty ve arkadaşları, tavan vantilatörlerinde düşük maliyetler ve üretim kolaylığı nedeniyle yaygın olarak kullanılan tek fazlı asenkron motorlara dikkat çekmişlerdir. Bu verimsiz motorlara alternatif olarak, BLDC motorlara göre daha uygun maliyetli olan üç fazlı asenkron motor tasarımını ele almışlardır. 50 W gücünde, 18 mm paket boyutuna sahip, 24 stator oluğundan ve 8 kutuptan oluşan bir motor modeli tasarlanmıştır. İç içe iki farklı konsantrik sargı düzenine sahip olan dış rotorlu asenkron motor tasarımı ile hem verimli hem de ekonomik bir motor modeli önerilmiştir [24].

Hsiao ve arkadaşları, 26 W gücündeki dış rotorlu bir BLDC fan motorunun tasarımı ve optimizasyonunu ele almışlardır. Motor, 12 stator oluğu ve 10 kutuptan oluşmaktadır. Çalışmalarında, Taguchi yöntemi kullanılarak oluk ve mıknatıs boyutlarının optimizasyonu yapılarak, motorun verimlilik değerinin %12,5 oranında arttırılabileceğini göstermişlerdir [25].

1.2 Tezin Amacı

Hızlı nüfus artışı ve sanayileşmenin yaygınlaşmasıyla birlikte enerji tüketiminin de giderek arttığı bilinen bir gerçektir. Artan enerji talebini karşılayabilmek amacıyla yenilenebilir enerji kaynakları veya fosil yakıtlı kaynaklar kullanılarak yeni üretim tesislerinin kurulması veya enerji ithalatının arttırılması gerekmektedir. Ancak, kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlı kaynakların kullanılarak enerjinin üretilmesi, karbon salınım miktarını her geçen gün biraz daha arttırmakta ve küresel ısınmayı da tetiklemektedir. Enerjide dışa bağımlılık ise küresel ölçekli hastalık, ülkeler arası savaş gibi dış etmenlere de bağlı olduğu için enerji temininde problemlerle karşılaşılabilmektedir. Özellikle pandemi sonrası hammadde temininde yaşanan ciddi sıkıntılar ile Ukrayna-Rusya krizinden kaynaklı doğalgaz teminindeki problemler, bu duruma örnek verilebilir. Tüm bu nedenlerden dolayı, mevcut kurulu gücün en iyi ve en verimli şekilde kullanılarak enerji tüketim miktarlarının azaltılmasına yönelik çalışmalara daha çok önem verilmelidir. Aslında bu bağlamda, enerji verimliliğini, günümüzün saklı enerji kaynağı olarak gösterebiliriz.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın yayınladığı rapora göre [26] Dünya genelinde tüketilen enerjinin %53'ünü (12100 TWh/yıl) elektrik motorlu sistemler harcamaktadır ve bu da 6 Gton CO2 emisyonuna neden olmaktadır. Endüstri sektöründe tüketilen elektrik enerjisinin ise diğer tüm sektörlere oranı %40'ın üzerinde olmakta ve bu sektörde tüketilen enerjinin %70'lik büyük bir kısmını (6700 TWh/yıl) (Şekil 1.4) elektrik motorları oluşturmaktadır [26, 27].



Şekil 1.4 Dünya genelinde elektrik tüketimi / Endüstriyel motor sistemleri elektrik tüketimi

Şekil 1.4, Dünya genelindeki elektrik tüketiminin sektörel bazlı dağılımını ve endüstri sektöründeki elektrik motor sistemlerinin elektrik tüketimi yüzdesini göstermektedir.

Ülkemizde de buna paralel olarak, EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu)'nın son dört yılda açıkladığı raporlara göre, faturalandırılan elektrik tüketiminin tüketici türlerine göre dağılımı incelendiğinde, sanayide tüketilen elektrik enerjisi ortalama olarak 2020 yılında %42.725, 2021 yılında %44.131, 2022 yılında %42.858, 2023 yılında %41.071 olarak verilmiştir [28]. Son dört yılda faturalanan elektrik enerjisinin sanayi sektörü bazındaki aylara göre dağılımı Şekil 1.5'de gösterilmiştir. Elektrik motorları ise bu sektörde tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık %70'ini oluşturmaktadır [29].



Şekil 1.5 Ocak 2020-Aralık 2023 arası faturalanan toplam elektrik enerjisinde, sanayi sektörünün aylara göre elektrik enerjisi tüketim oranları

Şekil 1.5, Ocak 2020-Aralık 2023 arası faturalanan toplam elektrik enerjisinde, sanayi sektörünün aylara göre elektrik enerjisi tüketim oranlarını yüzdesel olarak göstermektedir.

2017 yılında Türkiye'de, Stratejik Araştırmalar ve Verimlilik Genel Müdürlüğü (SAVGM) sorumluluğu altında, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (STB) ve Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı (UNDP) Türkiye iş birliğinde yürütülecek TEVMOT (Türkiye'de Enerji Verimli Motorların Teşvik Edilmesi) projesinin lansman tanıtımı yapılmıştır [30]. KOSGEB'in (T.C. Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeleri Geliştirme ve Destekleme İdaresi Başkanlığı) İşletme Geliştirme Destek Programı altında "Enerji Verimli Elektrik Motorları Değişimi Desteği" 2 Ocak 2020 tarihinde yürürlüğe girmiştir. TEVMOT projesi kapsamında sanayide kullanılan verimsiz elektrik motorlarının enerji verimliliği yüksek olan motorlarla değiştirilerek, Türkiye ekonomisine yıllık 34 Milyar kWh enerji tasarrufu katkı sağlaması amaçlanmaktadır. 2024 yılı için elektrik tüketim birim fiyatı 2.25 TL/kWh olarak kabul edilirse Türkiye ekonomisine yıllık 76.5 milyar TL katkı sağlaması anlamına gelmektedir [31]. Proje aynı zamanda enerji sistem verimliliğini teşvik ederek "Küresel Isınma ve iklim Değişikliğini Önleme" amacına, Türkiye'nin iklim değişikliği ile mücadele çabalarına da hizmet etmektedir. Rekabetçiliğin, ekonomik ve sürdürülebilir kalkınmanın en önemli bileşenlerinden biri olan enerji verimliğine yapılan yatırımların teşvik edilmesi, hem sera gazı emisyonlarının doğrudan veya dolaylı olarak azaltılarak karbon ayak izini düşürmesine hem de enerji tasarrufu sağlayarak Türkiye ekonomisine katkı sağlamaktadır.

Sanayide, özellikle de fan uygulamalarında kullanılan asenkron motorlar hem verimsiz çalışmakta hem de farklı soğutma gereksinimleri için hızları kontrol edilememektedir. Bu da bu sistemlerde enerji verimliliği ve kontrol edilebilir akıllı sistem uygulamaları üzerine çalışmaların önemini daha da arttırmaktadır. Bu

sebeple yapılan bu tez çalışmasında, fan uygulamalarında yaygın olarak kullanılan asenkron motorların bu dezavantajlarını ortadan kaldıracak, daha yüksek verimli bir FDAM (Fırçasız Doğru Akım Motoru) tasarımı geliştirilmiştir. FDAM tasarımı ve elektromanyetik analizler için Ansys Maxwell yazılımı kullanılmıştır. Bu tez çalışması ile, artık çağımızın gerekliliği olan enerji verimli fırçasız doğru akım fan motorlarının kullanımını arttırmak, fan üreticisi firmaların ürün gamına FDAM seçeneğini de ekleyerek milli ürün yelpazesine katkı sağlamak amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Elektrik motorları, şebekeden çekilen elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektrik motorlarıdır. Endüstride fanlar, pompalar, presler, kompresörler, taşıma sistemleri gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı(IEA)'nın 2011'de yayınladığı rapora göre motor sistemlerindeki enerji verimliliği uygun teknolojiler kullanılarak %20 ile %30 oranında arttırılabilmektedir [32].

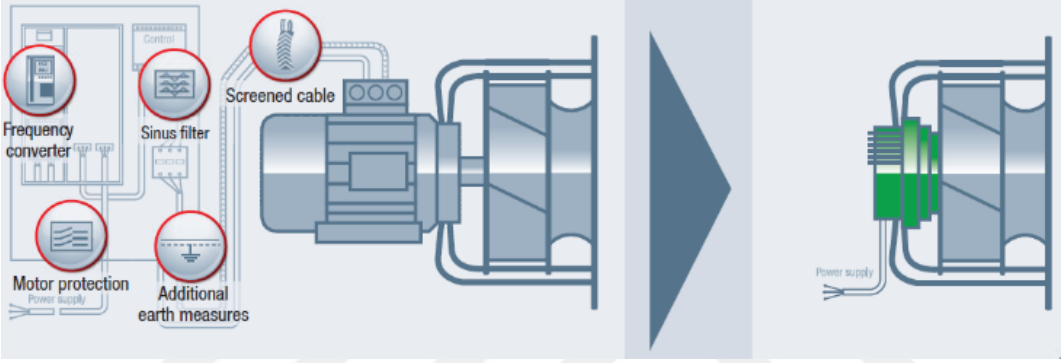
Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Verimlilik Genel Müdürlüğünün 2015 yılında yayımladığı rapora göre uygulama özelinde enerji tasarruf potansiyeli Tablo 1.1'de verilmiştir [33].

Tablo 1.1 Uygulama özelinde tasarruf potansiyeli

Uygulama Tipi	**Potansiyel Yüzdesi (%)**
Basınçlı hava sistemleri	33
Soğutma sistemleri	20
Fan uygulamaları	22
Pompa uygulamaları	20
Diğer motor uygulamaları	10

Fan uygulamalarında kullanılan motorların tamamını yakınını asenkron motorlar oluşturmaktadır. Bu motorların uygulamalarda yoğun olarak tercih edilmesinin sebepleri arasında sağlam yapısı, üretim kolaylığı ve ucuz olmaları sayılabilir. Ancak bu motorların verimlilik seviyesi TS EN 60034-30 standartlarına göre IE1 ve IE2 sınıf verimlilik düzeyinde kalmaktadır. Tablo 1.1'den görüldüğü üzere, basınçlı hava sistemleri, soğutma sistemleri ve fan uygulamalarında kullanılan motorlarda enerji tasarrufu potansiyelinin yüzdesi yüksektir. Bu uygulamalarda kullanılan asenkron motorları kontrol edilebilir EC (BLDC) motorlarla değiştirdiğimiz zaman, motorların IE1 ve IE2 olan verimlilik düzeyinin, IE4 ve üstü verimlilik düzeyine çıkması olasıdır. Bu uygulamalarda motor verimliliği kadar sistem verimliliği de çok önemlidir. Hem motor verimliliğini hem sistem verimliliğini arttırabilmenin yolu da kontrol edilebilir BLDC motorların

kullanımının arttırılmasından geçmektedir. BLDC motorlar hem asenkron motorlara göre daha verimli bir çalışma sağlarken hem de akıllı elektroniği ile değişken hız kontrolü imkânı sağlamaktadır. Klasik uygulamalarda fan hızının kontrolü inverterli asenkron motorlarla sağlanırken BLDC motorlarda motora entegre edilmiş elektronik kartla sağlanarak daha az yer işgal eden kompakt bir yapı oluşturulmaktadır. Şekil 1.6'da klasik uygulamalarda kullanılan VFD'li (Değişken Frekanslı Sürücü) geleneksel fan uygulaması ile modern uygulamalarda kullanılan EC (Elektronik komütasyonlu) fan uygulaması gösterilmiştir. Ayrıca BLDC motorlar, ortam sıcaklığı, debi ve basınç gereksinimlerine göre çalışmalarını ek bir sistem gerektirmeden düzenlerken, sistem verimliliğini de en uygun seviyede tutabilirler.



Şekil 1.6 VFD'li geleneksel fan ve EC fan

Şekil 1.6, Klasik uygulamalarda kullanılan VFD'li (Değişken Frekanslı Sürücü) geleneksel fan uygulaması ile modern uygulamalarda kullanılan EC (Elektronik komütasyonlu) fan uygulamasını göstermektedir [34].

Bu çalışmada standart uygulamalarda kullanılan AC fan motorlarının yerine elektronik olarak kontrol edilebilen (EC) ve enerji tüketimini önemli oranda azaltabilecek bir BLDC motoru fan uygulamaları için tasarlanmıştır. BLDC motor seri üretime uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Cıkış gücü değeri sabit tutularak, farklı tipte mıknatıslar kullanılarak tasarımı yapılan BLDC motorlar ile asenkron motorun performans ve maliyet açısından karşılaştırmaları yapılmıştır. Bu çalışma ile BLDC motorlu fanların enerji tüketimindeki avantajları ortaya konulup, endüstriyel uygulamalarda kullanımın arttırılmasına yönelik katkı sağlanması amaçlanmıştır.

2
FAN UYGULAMALARINDA KULLANILAN ELEKTRİK MOTORLARI

Fanlar, endüstriyel tesislerden ev klimalarına kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Fan uygulamalarında farklı motor türleri kullanılır ve bu motor tipleri, belirli ihtiyaçlara ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak seçilir. Alternatif akım motorları genellikle düşük maliyet ve dayanıklılık arayan uygulamalar için idealdir. Fırçalı doğru akım motorları ise hassas hız kontrolü gerektiren durumlar için tercih edilir. Elektronik Komütasyonlu motorlar ise enerji verimliliği ve kontrol kabiliyeti ön planda olan modern fan uygulamaları için önemli bir seçenektir. Bu motor tipleri, fan sistemlerinin performansını artırmak ve enerji verimliliğini optimize etmek için önemli rol oynarlar.

2.1 Alternatif Akım (AC) Motorları

Asenkron motorlar, basit ve sağlam yapıları, uzun ömürleri, ekonomik olmaları ve üretimlerinin kolay olması gibi nedenlerle günümüzde hala sanayi, otomotiv, savunma, konut gibi birçok sektörde yoğun olarak tercih edilmektedir. Ülkemizdeki fan üreticisi firmalar incelendiğinde, fanlarında kullanacakları elektrik motorlarını üreten firmalar da, yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı asenkron motor üretimi yapmakta ve kullanmaktadır. Farklı tip uygulamalarda kullanılmak üzere, gölge kutuplu motorlar, bir fazlı asenkron motorlar, üç fazlı asenkron motorlar ve çift hızlı asenkron motorlar dış rotorlu veya iç rotorlu dediğimiz rotor yapılarıyla kullanılmaktadır. Fan uygulamalarında kullanılan bu motorların neredeyse tamamına yakınını, IE2 verimlilik sınıfındaki üç fazlı asenkron motorlar oluşturmaktadır.

2.1.1 Bir Fazlı Asenkron Motorlar

Üç fazlı asenkron motorlarda, faz sargıları statora 120° elektriksel açı farkıyla yerleştirildiği için döner bir manyetik alan oluşur. Ancak, bir fazlı asenkron motorlarda tek bir sargı kullanılarak döner bir manyetik alan oluşturulamayacağından ötürü, bu motorlarda ana sargıya ek olarak bir de yardımcı sargı bulunur. Ana sargı ile yardımcı sargı, birbirine paralel olarak bağlanır ve aralarında 90° elektriksel açı farkı olan oluklara yerleştirilir. Bu sargılara bir fazlı alternatif gerilim uyguladığımız zaman, hem ana hem de yardımcı sargılarda manyetik alan oluşur. Oluklar arasında 90° elektriksel açı farkı olsada, sargılara uyguladığımız gerilimler benzer fazdadır, bu nedenle manyetik alanlar da aynı fazda oluşmaktadır. Bu durumda, iki sargı arasında manyetik bir döner alan oluşmaz. Bu yüzden sargılar arasında faz farkı oluşturmak gerekmektedir.

İki sargı arasında meydana gelen manyetik alan arasında bir faz farkı oluşturmak için, sargılardan geçen akımların farklı fazlarda olması sağlanır. Bunun içinde;

- Sürekli olarak devrede kalan ana sargı, kalın kesitli tellerle çok sipirli olarak sarılırken, ana sargıya paralel olarak bağlanan yardımcı sargı ise ince kesitli tellerle daha az sipir sayısıyla sarılır. Uygulamalarda genellikle, yardımcı sargıdaki sıpir sayısı ana sargıya göre yaklaşık olarak yüzde 25 daha az olup, iletkende kesit oranı genellikle 1/3 veya 1/4 oranında daha küçüktür. Böylece, ana sargının omik direnci düşük, endüktif reaktansı ise yüksek olacak şekilde tasarlanır ve akım gerilimden 90°'ye yakın bir faz açısıyla geri kalır.
- Yardımcı sargıdaki akımın gerilimden ileride olmasını sağlamak için, yardımcı sargıya seri olarak bir kondansatör bağlanır. Bu düzenleme sayesinde ana sargı ile yardımcı sargı arasında 90°'lik bir faz farkı oluşur, bu da düzgün bir döner alanın oluşmasına katkı sağlar.

Statorda oluşan döner manyetik alan, sincap kafesli rotorun kısa devre çubuklarını keserek EMK endüklenmesini sağlar. Rotor çubukları her iki taraftan da kısa devre edildiğinden, endüklenen gerilim rotor iletkenlerinden kısa devre akımlarının geçmesine neden olur ve bu akım rotorda bir manyetik alan oluşturur. Stator döner manyetik alanı, rotor manyetik alanını peşinden sürükler ve böylece rotor da dönmeye başlar. Motorun kalkış anında, yardımcı sargı ana sargının manyetik alanını destekler. Ancak rotor devri nominal değere yaklaştıkça, yardımcı sargı hem ana sargıyı hem de rotor sargısını olumsuz etkileyebilir. Bu durum, motorun nominal çalışmasını engelleyebilir, bu yüzden yardımcı sargı devre dışı bırakılır. Eğer motor, nominal devir sayısına ulaştığı halde yardımcı sargı devre dışı

bırakılmazsa, ince kesitli tellerden oluşan yardımcı sargıdan aşırı akım geçer ve sargılar ısınarak kısa sürede yanabilir.

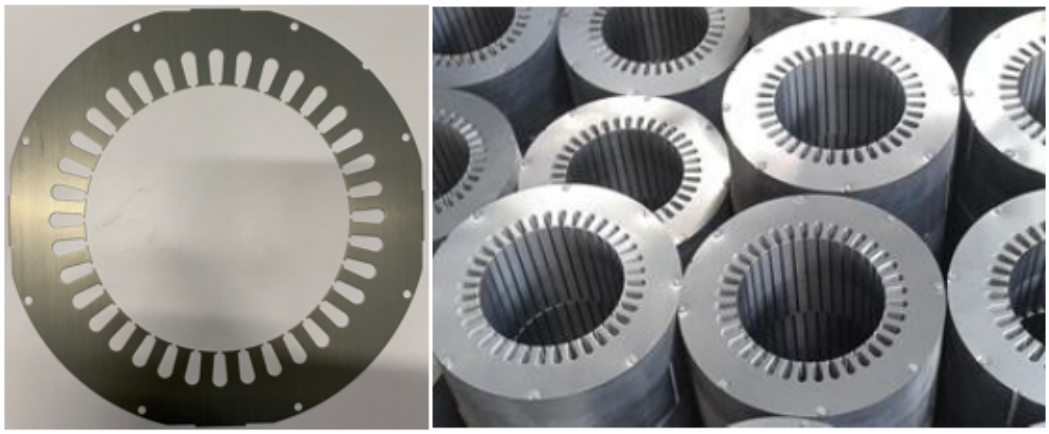
Bir fazlı asenkron motorlar, genellikle düşük güçlü tesisat ve küçük ölçekli havalandırma sistemlerinde kullanılır. Evsel havalandırma sistemlerinde ve küçük işletmelerde çok yaygın kullanılırlar. Aspiratörler, vantilatörler, kompresörler ve çamaşır makinası motorları gibi uygulamalarda da sıklıkla tercih edilirler.

2.1.1.1 Bir Fazlı Asenkron Motorların Yapısı

Bir fazlı asenkron motorlar; sargılı stator, milli rotor ve merkezkaç anahtarı olarak üç temel kısımdan oluşmaktadır.

- Stator

  Üç fazlı asenkron motorlarda olduğu gibi bir fazlı asenkron motorlarda da stator, ince silisli sacların oluklar açılarak üst üste presle paketlenmesiyle oluşturulur. Oluklar içerisine, birbirlerine ve statora karşı izole edilmiş olarak ana ve yardımcı sargı bobinleri sarılır. Ana sargı bobinleri kalın tel ve çok sipirli olarak üretilirken yardımcı sargı bobinleri ince tel ve daha az sipirli olarak üretilir. Bu iki sargı birbirine paralel olarak bağlanır. Motor ilk çalıştığında hem ana sargı hem de yardımcı sargı devrede olur. Motor normal devrinin %75–80' ine ulaştığında yardımcı sargı, merkezkaç anahtarı ile devreden çıkartılır. Daha sonra motor ana sargı ile çalışmasına devam eder.

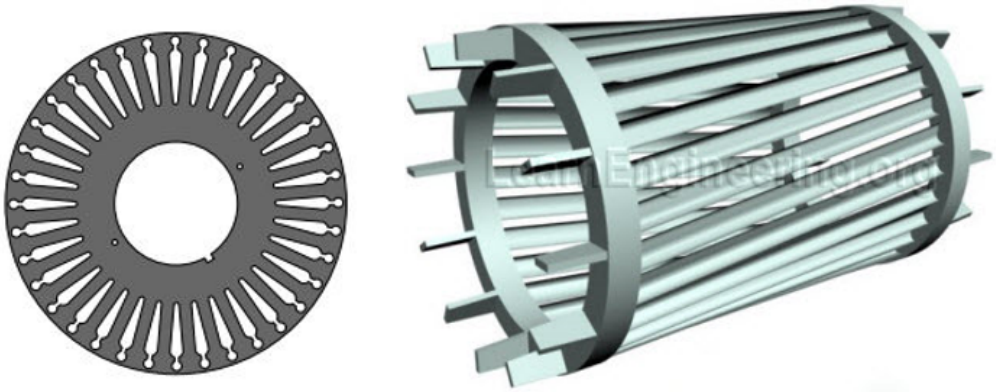


Şekil 2.1 Stator laminasyonu ve stator paketi

Şekil 2.1, Stator laminasyonunu ve preslenmiş stator paketi ile sargısını göstermektedir.

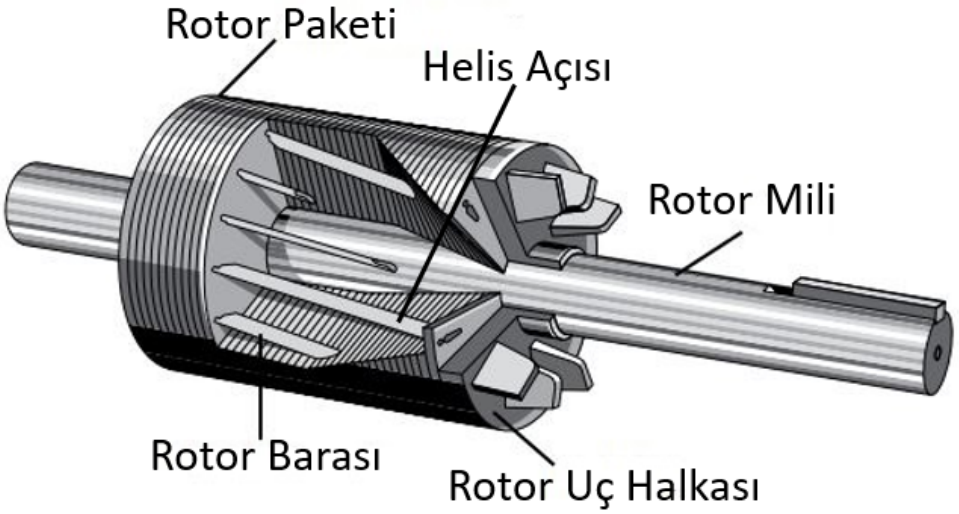
- Rotor

İnce silisli sacların olukları açıldıktan sonra üst üste preslenmesiyle rotor paketi oluşturulur. Rotor oluklarına, iki ucundan kısa devre edilmiş alüminyum rotor çubukları enjeksiyon yöntemi ile yerleştirilir. Daha sonra bu sac paketin, bir mil üzerine sıkıca yerleştirilmesiyle rotor yapısı oluşturulur.



Şekil 2.2 Rotor laminasyonu ve kısa devre edilmiş rotor baraları

Şekil 2.2, Rotor laminasyonunu ve kısa devre edilmiş alüminyum döküm rotor baralarını göstermektedir.

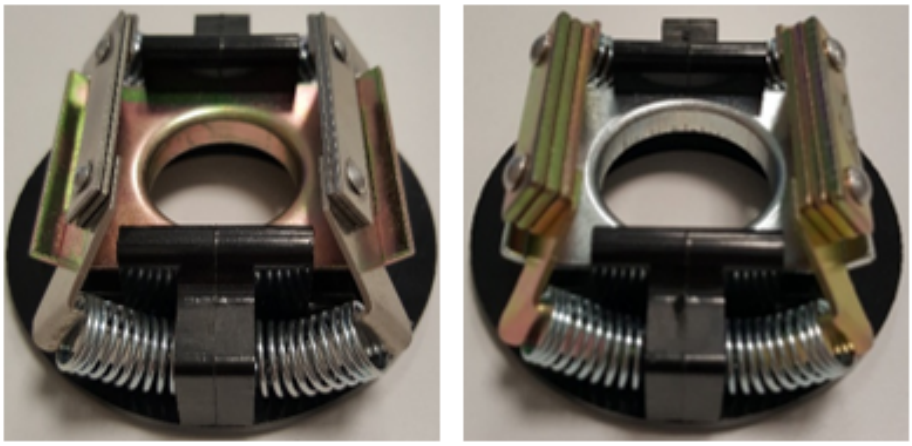


Şekil 2.3 Milli rotor yapısı

Şekil 2.3, milli rotor paketini göstermektedir.

- Merkezkaç Anahtarı

  Motor içine yerleştirilen merkezkaç anahtarı, motor nominal devrinin %75'ine ulaştığında yardımcı sargıyı devre dışı bırakır. Bu anahtarın sabit kısmı motor gövdesine, hareketli kısmı ise rotor miline monte edilir. Sabit kısımda bulunan iki temas noktası, motor durduğunda kapalı konumda olup yardımcı sargıyı aktif hale getirir. Motor nominal devir hızının %75'ine ulaştığında, hareketli parça merkezkaç kuvvetinin de etkisiyle dışarıya doğru itilir. Bu durum, temasın üzerindeki basıncı azaltır ve temas açılarak yardımcı sargı devreden çıkarılır. Motor durduğunda, yayın etkisiyle hareketli parça eski konumuna dönerek teması kapatır.



Şekil 2.4 Merkezkaç anahtarı

Şekil 2.4, 2 kutuplu ve 4 kutuplu merkezkaç anahtarının yapısını göstermektedir.

2.1.1.2 Bir Fazlı Asenkron Motor Çeşitleri

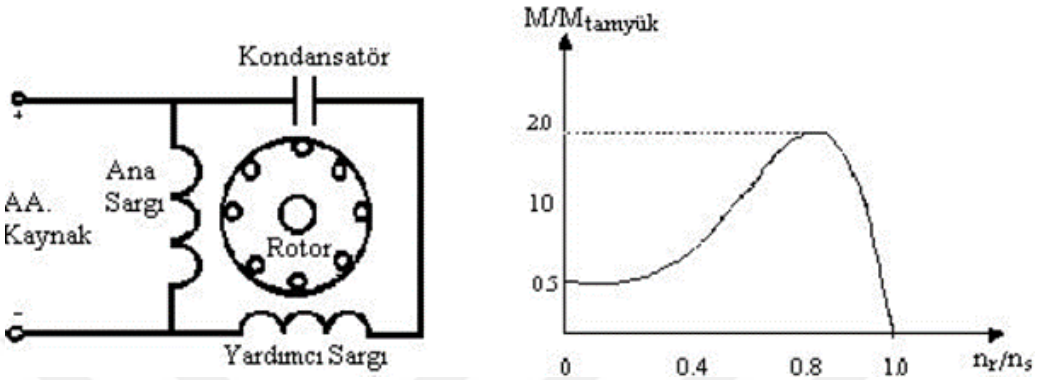
- Daimi Devre Kondansatörlü Motorlar

  Daimi kondansatörlü motorların yapısında, sürekli olarak devrede kalan bir kondansatör bulunur. Bu kondansatör yol verme bobinine seri bağlıdır ve değeri, yol verme kondansatörünün 1/10'u kadardır. Bu durumda yol verme bobini, motorun nominal çalışma hızına ulaşmasıyla yardımcı bobin olarak çalışmaktadır.

  Daimi kondansatör, sürekli olarak devrede kalacağı için bu duruma uygun olarak tasarlanması gerekmektedir. Yol verme kondansatörü gibi kısa süre içinde yüksek bir güç veremezler. Bu sebeplerle daimi kondansatörlü motorların kalkış momentlerinin aralığı sınırlıdır. Kalkış momenti, nominal moment değerinin %30'u ile %150'si kadar olabilir. Yüksek kalkış moment

ihtiyacı olan uygulamalarda kullanılması uygun değildir. Kalkış akımı ise genellikle yük akımının %200'ü kadar olabilir. Yüksek devir gerektiren uygulamalarda ideal bir motordur.

Kalkış moment ihtiyacı nispeten düşük olan havalandırma sistemleri ve doğrudan tahrikli fan sistemleri için ideal bir uygulamadır.

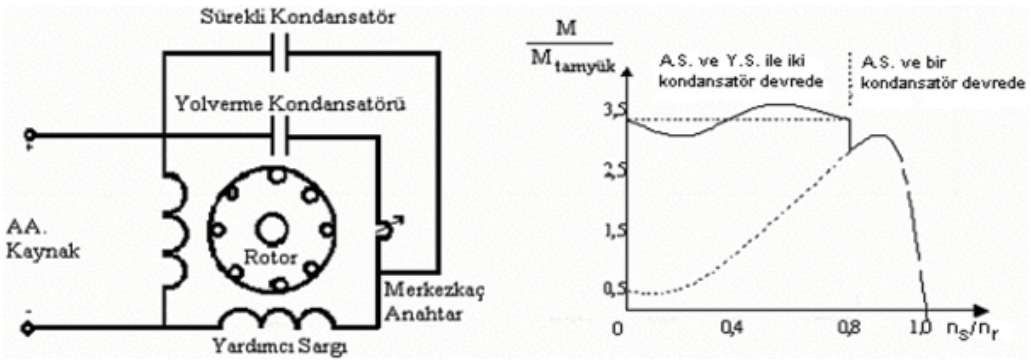


Şekil 2.5 Daimi devre kondansatörlü motor

Şekil 2.5, daimi kondansatör yol vermeli motorun eş değer devresi ve hız-moment eğrisini göstermektedir [35].

- Kalkış ve Daimi Devre Kondansatörlü Motorlar

  Bu motorlar, kondansatör yol vermeli asenkron motorlar ile daimi kondansatörlü motorların en iyi özelliklerini bir arada taşımaktadır. Bu motorlarda, yüksek kalkış momenti sağlayan bir yol verme kondansatörü ile bir daimi kondansatör, yardımcı sargıya seri olarak bağlanmıştır. Yol verme kondansatörü, motor nominal hızının %75'ine ulaştığında devreden çıkar. Hava kompresörleri, vakum pompaları veya yüksek basınç yaratan su pompaları gibi yüksek moment gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.6 Kalkış ve daimi devre kondansatörlü motor

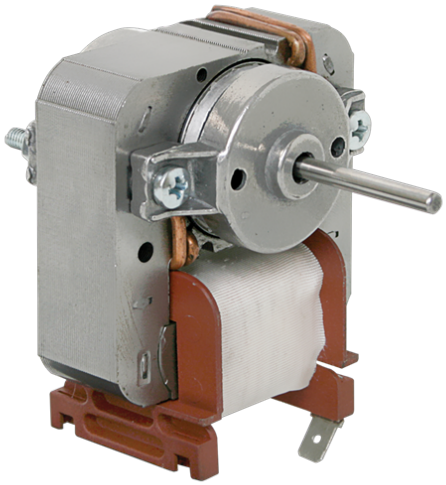
Şekil 2.6, Kalkış ve daimi kondansatör yol yermeli motorun eş değer devresi ve hız-moment eğrisini göstermektedir [35].

- Gölge Kutuplu Motorlar

  Bu motorlar, tipik olarak 50 W'a kadar geniş bir kullanım alanına sahiptirler, ancak 200 W'a kadar da üretilebilirler. Genellikle 2, 4 veya 6 kutuplu yapıda olabilirler. Nominal momentleri genellikle %10 ile %25 arasında değişen kayma değerlerinde oluşur ve maksimum momentleri nominal momentlerinin 1,25 katıdır. Verim değerleri, küçük güçlerde %5 ve büyük güçlerde %35'e kadar çıkabilir. Gölge kutuplu motorların yapısı oldukça basittir ve küçük güçlü motorların en ucuz olanıdır. Daha çok düşük güçlü olarak üretilir ve sessiz çalışma özellikleri nedeniyle tercih edilirler, ayrıca yapımı kolay ve maliyeti düşüktür.

  DC makinelerinde olduğu gibi, gölge kutup motorlarında da kutup ayakları bulunur ve bu kutupların bir ucu, yarık içindeki kısa devre edilmiş bakır halkaya kadar uzanır. Kutbun diğer 2/3 kısmına ise kutup sargıları sarılır. Kutup ayakları üzerindeki yarıkla ayrılan kısma yerleştirilen bakır halkaya gölge kutup veya yardımcı kutup denir. Bu motorlarda kutup sargıları bir fazlı AC ile beslenir ve rotor, tipik olarak üç fazlı asenkron motorlarda olduğu gibi sincap kafeslidir.

  Şekil 2.7'de gösterilen bu motorlar [36], üç fazlı motorlarda olduğu gibi döner manyetik alan prensibiyle çalışır. Ancak döner alan statorun etrafında dönmek yerine, kutupların bir ucundan diğerine doğru ilerleer. Bu sebeple bu tür motorlarda moment sürekli olarak değişir ve kalkış momentleri düşüktür. Çünkü kalkış momentleri, bakırla kaplanan yarık kutup parçasının genişliğine bağlıdır. Endüstride aspiratörler, ısıtıcı vantilatör, kompresörler olmak üzere düşük güçlü uygulamalarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.7 Gölge kutuplu motor

2.1.2 Üç Fazlı Asenkron Motorlar

Üç fazlı asenkron motorun statorunda, sargı eksenleri arasında uzayda 120°'lik açı olan üç adet bir fazlı sargı bulunur. Bu üç sargı, kendi içerisinde yıldız veya üçgen olarak bağlanır. Faz sargılarını oluşturan bobinler, stator oluklarına yerleştirilir. Bu bobinler, birbirleriyle seri veya paralel bağlanarak faz sargılarını oluştururlar. Rotor, üç fazlı sargılı veya sincap kafesli türden olabilir.

3 fazlı asenkron motorlar, mil ekseninin yerden yüksekliğine göre belirlenen 56 yapı büyüklüğünden 450 yapı büyüklüğüne kadar imal edilebilmektedir. Yapı büyüklüğüne göre gövde malzemesi alüminyum veya pik döküm olabilmektedir.

Asenkron motorların stator sargılarından geçen alternatif akım, manyetik devrede periyodik olarak değişen bir stator döner alanı meydana getirir. Motora ilk gerilim uygulandığı anda, durmakta olan rotor iletkenlerini, senkron hızla dönmekte olan stator döner alanı keser ve rotorda alternatif gerilim oluşturur. Oluşan bu alternatif gerilimle iletkenlerden akım geçer ve "bir manyetik alan içerisinde bulunan iletkenden akım geçerse, iletken hareket eder" prensibine göre motorda döndürme momenti oluşur. Elektrik motorunda oluşan döner manyetik alan kutup sayısına göre belirli bir senkron hızda döner. Asenkron motorlarda, rotordaki manyetik alan statorda oluşan döner alandan sonra oluştuğu için arada belirli bir kayma miktarı olacaktır ve motor devri senkron devre eşit olmayacaktır. Rotor senkron devrin altında bir hızda dönecektir. Bu nedenle, bu motorlara asenkron motor adı verilir. Eğer rotor, senkron devir hızında dönecek olsaydı, senkron devirde dönen stator döner alanı rotor iletkenlerini kesmeyecek ve rotorda alternatif gerilim dolayısıyla akım oluşmayacaktı. İletkenden akım geçmeyince de döndürme momenti sıfır olacaktı. Döndürme momenti, döner alan ile sargıda döner alanı endükleyen akımlar tarafından üretildiğinden, bu makinelere endüksiyon makineleri de denir.

Asenkron motorlar sürekli bakım istemezler, yük altında devir sayıları çok değişmez ve güç elektroniği devreleriyle devir sayıları kolayca kontrol edilebilir. Ayrıca diğer elektrik motorlarına göre daha ucuzdurlar ve daha az bakım gerektirirler. Çalışmaları sırasında elektrik arkı (kıvılcım) meydana gelmez. Bu özellikler, asenkron motorların özellikle endüstri ve sanayi söktüründe en çok tercih edilen elektrik motoru olmalarına sebep olmuştur. Üç fazlı asenkron motorlar, daha büyük ölçekli havalandırma sistemlerinde kullanılır. Sanayi tesislerinde, ticari binalarda ve büyük alışveriş merkezlerinde bulunan havalandırma sistemlerinde sıklıkla tercih edilirler.

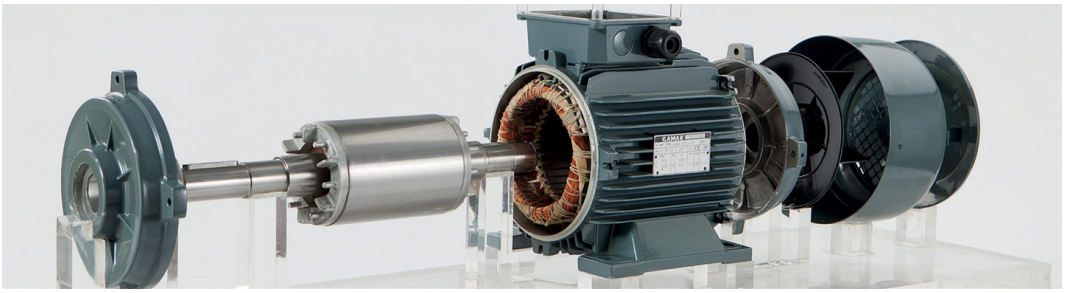
2.1.2.1 Üç Fazlı Asenkron Motorların Yapısı

Üç fazlı asenkron motorları oluşturan ana parçalar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Sargılı Stator
- Milli Rotor
- Gövde
- Kapaklar
- Rulmanlar ve Yataklar
- Soğutucu Pervane

Bu ana parçalar da dahil olmak üzere üretilen tüm motor parçaları, bir dizi işlemden geçirilerek toplandıktan sonra motor yapısı oluşturulmaktadır. Bu işlemler, parçaların döküm, işleme, montaj ve test süreçlerini içerir. Motorun performansını ve verimliliğini sağlamak için her adım dikkatle kontrol edilir ve kalite standartlarına uygun hale getirilir. Motor montajı sırasında, stator ve rotor düzgün bir şekilde yerleştirilir ve hizalanır. Daha sonra, gerekli bağlantılar yapılır ve motorun elektriksel ve mekanik özellikleri test edilir. Bu testler, motorun istenen performans kriterlerini karşıladığını ve güvenli bir şekilde çalışacağını doğrular.

Motor yapısının tamamlanmasının ardından, motor boyanır ve son bir kalite kontrolünden geçirilir. Bu aşamada, herhangi bir kusur veya hata tespit edilirse, gerekli düzeltici işlemler yapılır. Son olarak, motor paketlenir ve sevkiyata hazır hale getirilir. Müşteriye ulaştığında, motorun kurulum ve çalıştırma talimatlarına uygun şekilde monte edilmesi ve bakımlarının düzenli olarak yapılması gerekmektedir. Bu, motorun uzun ömürlü ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar. Şekil 2.8, asenkron motorun genel yapınısı göstermektedir.

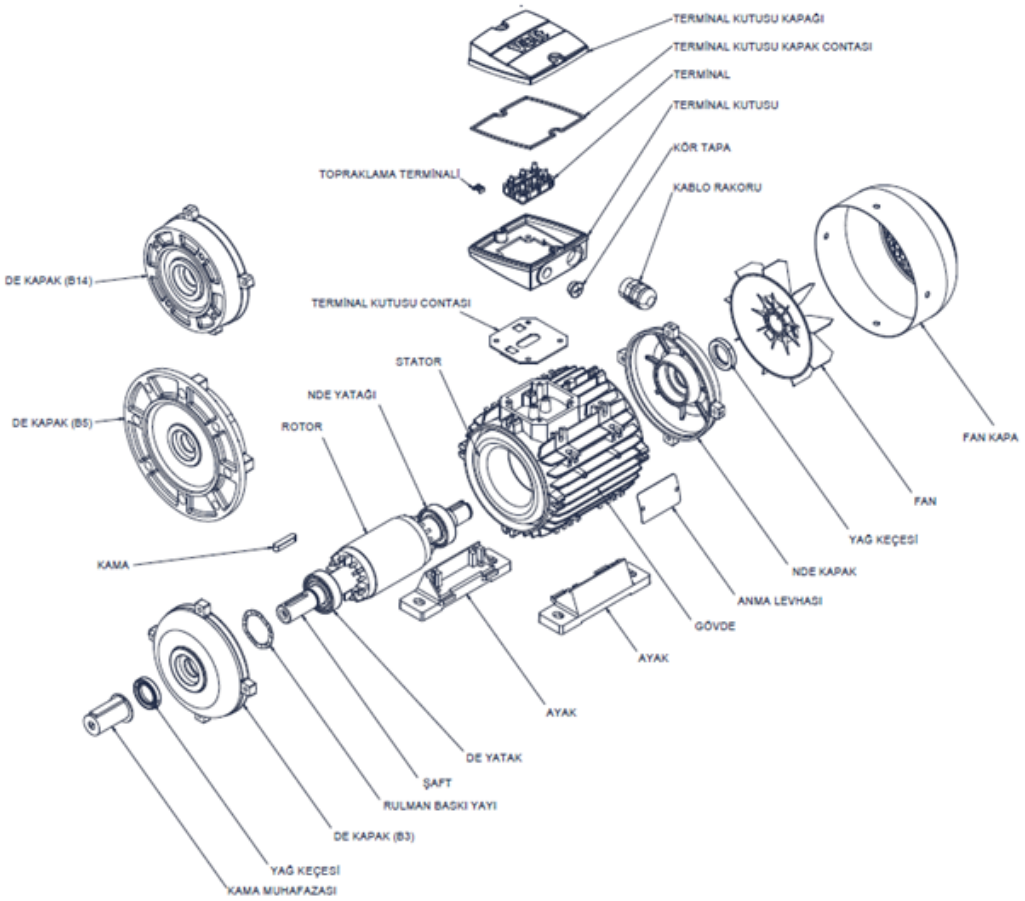


Şekil 2.8 Asenkron motor yapısı

Şekil 2.9, montajı yapılmış üç fazlı asenkron motorun kesit yapısını gösterirken şekil 2.10, asenkron motoru oluşturan parçaları göstermektedir.



Şekil 2.9 Asenkron motor kesiti

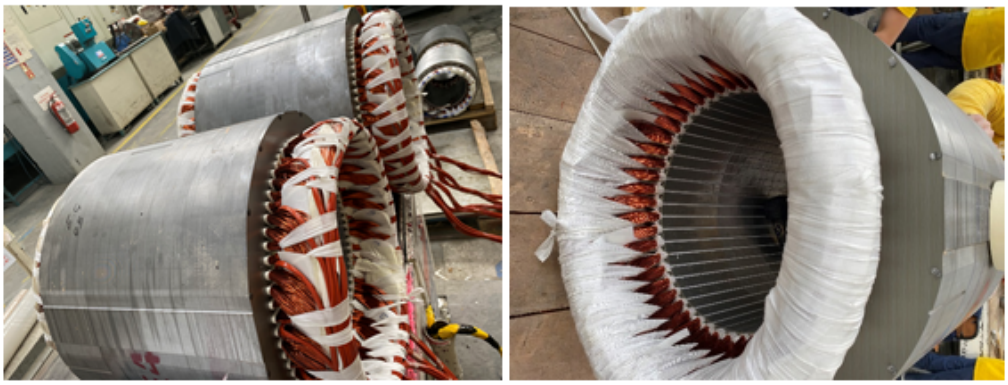


Şekil 2.10 Asenkron motor parçaları

- Stator

  Sincap kafesli asenkron motorların stator laminasyon paketleri motorların elektriksel açıdan en önemli bölümleridir. 0.25 mm, 0.8 mm gibi bir tarafı yalıtılmış ince silisli sacların oluklar açılarak üst üste presle paketlenmesiyle oluşturulan stator, asenkron motorun hareketsiz parçasıdır. Dilimler (rondel) halinde kesilmiş olan sacların perçinlenerek birleştirilmesiyle oluşan stator paketleri gövdeye presle çakılır. Stator paketlerinde kullanılan saclar iki türdür; yarı işlenmiş ve tam işlenmiş (silisli) saclar. Yarı işlenmiş olarak gelen saclar, büyük doldurma katsayısına sahip, düşük karbonlu ve soğuk haddelenmiş bir çelikten imal edilir. Bu çelik sacların preste rondeller halinde kesilmesi sırasında oluşan iç gerilimlerinin giderilmesi, karbon miktarının en aza indirilmesi ve doku kristallerinin türdeş olarak büyütülüp düzeltilmesi, HNX koruyucu gaz altında çalışan tavlama fırınında uygulanan özel bir işlemle sağlanır. Tam işlenmiş (silisli) sacın ise tavlama fırınında işleme tabi tutulması, pratik olarak sacın elektriksel özelliklerinde önemli bir değişikliğe neden olmamaktadır.

  Stator oluklarının içerisine, emayeli bakır tellerden oluşan sargılar yerleştirilmektedir. Bu sargılara üç fazlı alternatif gerilimin uygulanmasıyla, statorda zaman göre değişen döner bir manyetik alan meydana gelir. Oluşan bu manyetik alan, ferromanyetik malzeme olan stator sac paketinde histerizis ve fuko olarak adlandırdığımız demir kayıplarının oluşmasına neden olur. Demir kayıplarının fazla olması, nüve üzerinde aşırı ısınmalara sebep olabilir. Bu yüzden statorda geçirgenliği yüksek ve histerisiz kayıpları küçük olan saclar kullanılarak demir kayıpları azaltılmalıdır. Geçirgenliği yüksek ince yapıdaki ve W/kg değeri düşük olan sacların kullanılması demir kayıplarını azaltacaktır.



Şekil 2.11 Sargılı stator

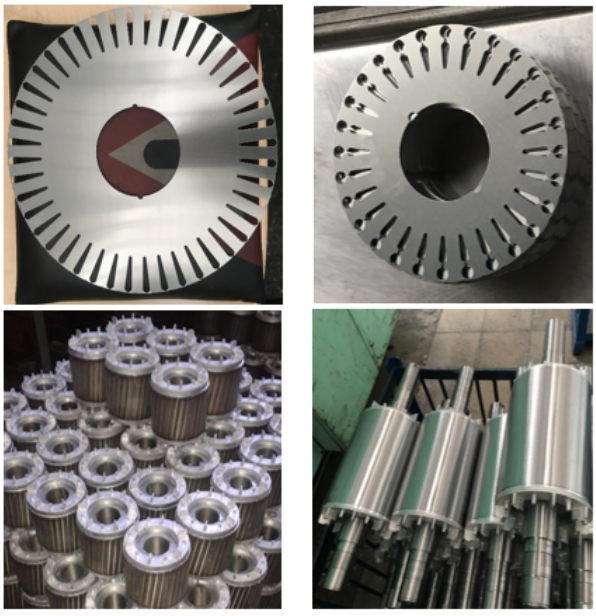
Şekil 2.11, Sargılı stator yapısını göstermektedir.

- Rotor

  Asenkron motorun statorunda meydana gelen manyetik alanın etkisiyle dönme hareketinin gerçekleştiği kısımdır. Sincap kafesli asenkron motorların rotorları, genellikle saf alüminyumla basınçlı pres döküm yöntemiyle üretilir ve bu rotorlar kafes rotorlar olarak adlandırılır. Rotorun dış çapında, üzerinde soğutma ve balans pimleri bulunan bir kısa devre halkası da rotorla beraber dökülür. Bazı özel durumlarda, direnci artırmak için saf alüminyum yerine alaşımlı alüminyum kullanılabilir. Ayrıca, rotor iletken çubukları bakır veya pirinçten yapılabilir ve kaynak yöntemiyle rotorla birleştirilebilir.

  Asenkron motorun elektriksel karakteristiklerini belirleyen önemli unsurlardan biri de rotor oluklarının dizaynıdır. Oluklar (ankoşlar) tek ve çift kafesli olarak iki ana gruba ayrılabilir. Kalkış anında olukların üst kısmı devreye girdiği için, farklı kalkış momentleri için farklı dizaynlar yapılabilir. Rotor oluk sayısı ile stator oluk sayıları eşit olmamalıdır. Farklı oluk sayılarına sahip olmaları durumunda, rotor olukları stator oluk dişlerine denk gelerek motorun kalkış ve çalışma karakteristikleri düzelir. Rotor oluk sayısı, stator oluk sayısının %70 ile %80'i veya %115 ila %120'si kadar olmalıdır.

  Rotor iletken çubuklarına döküm sırasında bir eğim (helis) verilir. Bu eğimin amacı, manyetik alan harmoniklerini, manyetik titreşimi ve gürültüyü azaltmaktır.



Şekil 2.12 Rotor laminasyon sacı ve milli rotor yapısı

Şekil 2.12, Rotor laminasyon saclarının preslenerek oluşturulan ham rotor yapısını ve milli rotor yapısını göstermektedir.

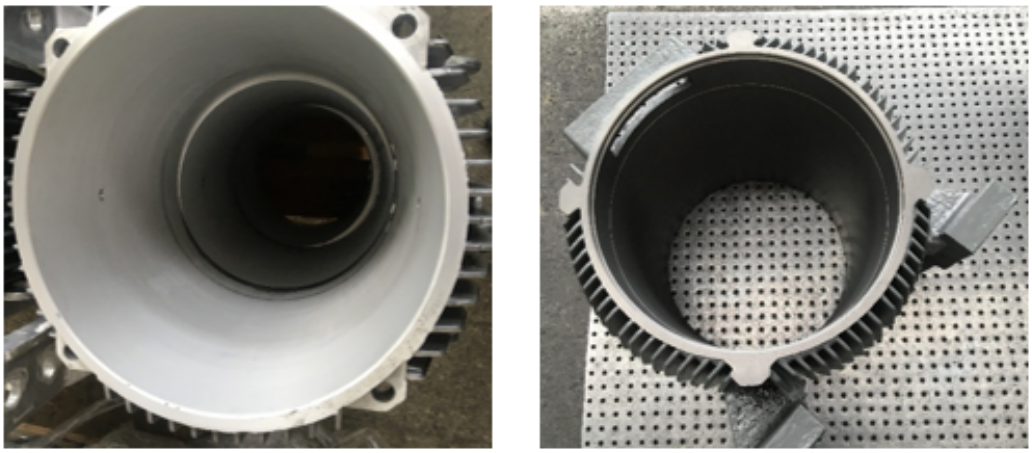
- Gövde

  Asenkron motorun stator ve rotorunu içinde barındırır. Gövde ve kapaklar, alüminyum veya dökme demir (pik demir) olarak yapılmaktadır. Motorun sargılarını dış etkenlerden koruma görevini üstlenir. Asenkron motorun gövdesi üzerinde çıkıntılar bulunur. Bu çıkıntılar, kanatçık olarak adlandırılır ve gövdenin hava ile temasını artırarak soğumasını kolaylaştırır. Gövdede kullanılan malzeme, motorun yapı büyüklüğüne bağlı olarak değişir. Alüminyum, dökme demire göre daha hafif olup daha iyi ısı iletimi sağlar, bu nedenle ısı düşürme açısından avantajlıdır. Büyük yapı büyüklüklerinde ise dökme demir tercih edilir, çünkü bu malzeme gürültü çıkaran titreşimleri daha iyi bastırır. Korozyona karşı dayanıklılık açısından alüminyum ve dökme demir arasında pratik olarak önemli farklar yoktur.

  Şekil 2.13 alüminyum gövde ve Şekil 2.14 pik gövde yapısnı göstermektedir.



Şekil 2.13 Alüminyum gövde ve alüminyum takma ayak

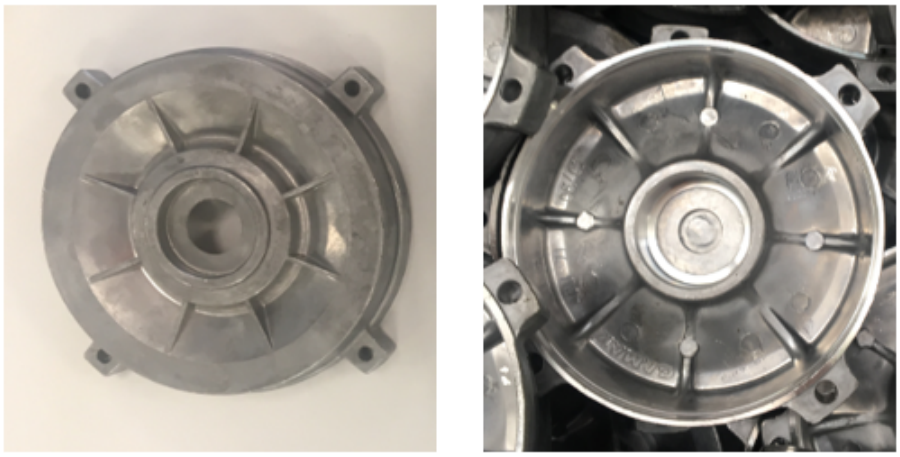


Şekil 2.14 Pik gövde

- Kapaklar

  Motorun statoru, iki kapak ile dış ortamdan ayrılır. Stator ve rotor arasındaki hava aralığının küçük olmasında, statorun önüne ve arkasına konan dairesel kapaklar etkilidir. Kapakların tam merkezinde, rotoru tutan rulmanlar veya yataklar bulunur. Küçük güçlü motorların kolayca dönmesini sağlamak için metal yataklar kullanılırken, büyük güçlü motorlarda rulmanlar tercih edilir. Kapak ve flanşlar, alüminyum enjeksiyon veya dökme demirden kum kalıplama yöntemiyle üretilir. Kapak ve flanşların oturma yüzeyleri, çok hassas toleranslarla işlenir. Bu hassas işleme, stator ve rotor arasındaki hava aralığının eş merkezliliğini koruyarak motorun verimli ve düzgün çalışmasını sağlar. Alüminyum kapaklar, hafiflik ve iyi ısı iletimi özellikleri nedeniyle tercih edilirken, büyük motorlarda dökme demir kapaklar titreşim ve gürültü azaltma avantajları sağlar. Kapak ve flanş malzemesinin seçimi, motorun genel performans ve dayanıklılık gereksinimlerine göre yapılır.

  Şekil 2.15 alüminyum kapak ve Şekil 2.16 pik kapak yapısnı göstermektedir.



Şekil 2.15 Alüminyum kapak



Şekil 2.16 Pik kapak

- Rulmanlar ve Yataklar

  Asenkron motorlarda kullanılan yataklar motorun güvenilir ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için önemlidir. Genellikle yuvarlamalı ve kaymalı olmak üzere iki temel yatak türü bulunmaktadır. Günümüzde, kaymalı yataklar genellikle küçük güçlü motorlarda (örneğin, gölge kutuplu motorlar) tercih edilirken, yuvarlamalı yatakların gresle yağlama sayesinde az bakım gerektirmesi ve kompakt ölçülerde olması avantaj sağlar.

  Yataklarda kullanılan rulmanlar genellikle statik yük ve dinamik yük olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır. Statik yük, motor durduğunda rulmanın taşıdığı yüktür, dinamik yük ise motorun dönüşü sırasında etkilenen yüktür. Bu yükler eksenel ve radyal yükler olarak da sınıflandırılabilir. Eksenel yükler, itme ve çekme kuvvetlerinin bileşkesidir ve yatay olarak kurulmuş bir motorda önemli rol oynar; radyal yükler ise bir düzlem üzerinde her yöne doğru oluşan kuvvetlerdir.

  Yuvarlamalı yataklarda rulman seçimi yaparken, motorun tahrik ettiği sistemin ihtiyaç duyduğu eksenel ve radyal kuvvetler göz önünde bulundurulmalıdır. Asenkron motorlarda genellikle sabit bilyalı rulmanlar ve büyük radyal yüklere dayanabilen silindirik makaralı rulmanlar kullanılır. Motorun hizaya alınma şekline göre doğru rulman seçimi yapılmalıdır; örneğin, kayış kasnakla bağlamada oluşabilecek büyük radyal kuvvetler dikkate alınarak uygun rulman seçilmelidir. Aynı şekilde, doğrudan akuple edilme veya kavrama ile bağlamada oluşabilecek eksenel kuvvetlere göre de rulman seçimi yapılmalıdır. Motorun dikey kurulumunda milin aşağı veya yukarı gelecek olması da ek eksenel kuvvetlerin hesaba katılmasını gerektirir.

  Sabit bilyalı rulmanlarda yatak boşluğu, iç ve dış bileziğin birbirine göre uzaklaşabilme ölçüsünü verir; bu nedenle gürültü ve titreşimleri önlemek için en uygun boşluk seçilmelidir. Makaralı rulmanlarda ise makara sayısı ile rulmanın taşıyabileceği radyal kuvvetler doğru orantılıdır; makara sayısının artması rulmanın daha yüksek radyal yükleri taşıyabilmesini sağlar.

  Şekil 2.17 sabit bilyalı ve silindirik makaralı rulmanları göstermektedir.



Şekil 2.17 Rulmanlar

Yatakların yağlanması genellikle gres veya sıvı yağ ile yapılır. Asenkron motorlarda genellikle gresle yağlama tercih edilir çünkü sıvı yağın kullanımı, yuvanın karmaşıklığı nedeniyle zordur ve genellikle yüksek hızlara dayanabilmesine rağmen tercih edilmez. Yatakların doğru yağlanması ve uygun rulman seçimi, motorun verimli ve uzun ömürlü bir şekilde çalışmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Şekil 2.18 yatak yapısını ve yatakların yağlanmasını göstermektedir.

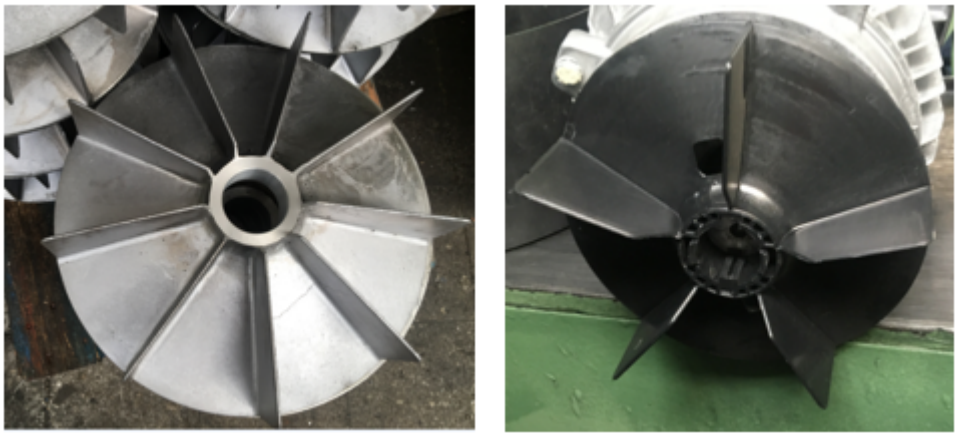


Şekil 2.18 Yataklar

- Soğutucu Pervane

  Asenkron motorların çalışma sırasında sargılarının aşırı ısınması tehlikeli durumlar yaratabilir. Bu nedenle, motorun gövdesini soğutmak amacıyla plastik veya alüminyum malzemeden yapılmış fanlar kullanılır.

  Şekil 2.19 alüminyum ve plastik pervane modellerini göstermektedir.



Şekil 2.19 Pervane

2.1.3 Çift Hızlı Asenkron Motorlar

Asenkron motorlarda, tek bir yapı boyutundan farklı güç ve devir sayıları elde edilebilen motorlar "çok hızlı motorlar" olarak isimlendirilir. Bu motorlar, iki farklı hız seviyesinde çalışabilen indüksiyon motorlarıdır. Stator sargılarında meydana gelen kutup sayısı ve motora uygulanan gerilimin frekans değerine göre asenkron motorların devir sayısı değişmektedir. Eğer frekans sabit tutulursa, farklı hızlar farklı kutup sayılı ayrı sargılardan veya aynı sargı üzerinde yapılan farklı kutup sayılı bağlantıdan elde edilir. Genellikle, statora sarılan tek sargı veya iki ayrı sargı kullanılarak elde edilen iki farklı güç ve devirde imal edilirler. Havalandırma sistemlerinde ve değişken hız gereksinimleri olan uygulamalarda tercih edilirler. Örneğin, hava sirkülasyonu veya basınç farklılıklarına bağlı olarak değişen hızlarla çalışan sistemlerde kullanılabilirler. Bu doğrultuda, çift hızlı motorları iki grupta inceleyebiliriz.

- İki Farklı Sargısı Bulunan Çift Devirli Motorlar
- Tek Sargısı Bulunan Çift Devirli Motorlar (Dahlander Bağlantılı Motorlar)

2.1.3.1 İki Farklı Sargısı Bulunan Çift Devirli Motorlar

Birbiri ile bağımsız olacak şekilde, 2 ayrı devir sayısı için farklı kutup sayısına sahip iki farklı sargı sarılırsa, bu tip motorlara iki sargılı çift devirli motor denir. Bu sargıların birbirleriyle elektriksel teması yoktur. Bu tasarım genellikle kutup oranlarının uygunsuz olduğu durumlarda kullanılır (örneğin 6/4 veya 12/4 kutuplu motorlar iki ayrı sargılı motorlardır). Bu motorda, hangi kutup sayısına ait sargıya üç fazlı gerilim uygulanırsa, o sargıya ait devir hızı elde edilecektir. Bu tür sargıların üçgen (Δ) veya yıldız (Y) bağlantısı stator içerisinde yapılır. Klemens kutusuna, tüm sargılara ait uçlar çıkarılır. Örneğin, 8/6 kutuplu iki farklı sargılı çift devirli motor için, 8 kutuplu sargı uçları 8U - 8V - 8W olurken, 6 kutuplu sargı uçları 6U - 6V - 6W şeklindedir.

Iki farklı sargılı çift devirli motorların bir dezavantajı ucuz olmamasıdır. Bunun nedeni, stator oluklarına normalde bir faz sargısı sarılırken, bu motorlarda iki farklı sargının yerleştirilmesidir. Bu durum, dahlander bağlantılı motorlara kıyasla daha düşük güç elde edilmesine neden olur. Aynı çıkış gücü değeri için daha yüksek güç tükettiklerinden verimlilikleri de daha düşüktür. Bu nedenle, iki farklı sargısı bulunan çift devirli motorların üretimi sınırlıdır çünkü ekonomik değillerdir. Ancak, kutup sayısı birbirinin katı olmayan motorların tasarımı ve bağlantısı kolay olduğundan bazı özel durumlarda tercih edilebilirler.

2.1.3.2 Tek Sargısı Bulunan Çift Devirli Motorlar (Dahlander Bağlantılı Motorlar)

Bu motorların tasarımı ve üretimi kolaydır. Dahlander bağlantılı motorlarda kutup sayıları birbiriyle orantılıdır. 4/2 kutuplu veya 8/4 kutuplu motorlar örnek olarak verilebilir.

Eğer tek bir sargı kullanılarak yapılan bir bağlantıda, birbirinin katı olacak şekilde iki farklı kutup sayısı elde edildiyse, bu tip motorlara "dahlander bağlantılı motorlar" denmektedir. Dahlander bağlantısında düşük devir sayısına (büyük kutup sayısına) göre sargı tasarımı yapılır. Faz sargılarının orta uçları bulunmaktadır. Faz sargılarının giriş uçları 1X - 1Y - 1Z olarak işaretlenirken, orta uçlar 2X - 2Y - 2Z şeklinde belirlenir. Bu 6 adet uç klemens kutusuna çıkartılır. Dahlander bağlantısında dönüş yönü, her iki hız değeri içinde aynı olmalıdır.

Bu motorlar tam kalıp olarak sarılmaktadır. Yarım kalıp olarak sarılan motorlarda, çalışma esnasında yüksek harmonikler meydana gelmektedir. Bu harmonikler, özellikle motorun kalkış anında olmak üzere performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, yarım kalıp dahlander sargıları genellikle tercih edilmez.

Bu hız kontrol yöntemi ile herhangi bir motor için dörtten fazla hız elde etmek mümkün değildir. Ayrıca, bu yöntem kademeli hız kontrolü de sağlamaz. Bu nedenle, bu yöntem genel amaçlı hız kontrol uygulamaları için kullanılmaz. Ancak, havalandırma fanları, konveyörler, takım tezgahları gibi yaklaşık iki veya dört sabit hızda çalışması gereken diğer uygulamalar için idealdir. Bu yöntem basittir, her ayar için iyi hız ayarı sağlar, yüksek verimliliğe sahiptir ve uygun maliyet ve bakım avantajları sunar.

Dahlander bağlantılı motorlar, güç ve moment ihtiyacına göre farklı şekillerde yapılabilir. Bu motorların stator bağlantısı, klemens kutusunda üçgen (Δ) veya yıldız (Y) olacak şekilde yapılabilir. Klemens kutusuna iki farklı hız seçeneği için de sargı uçları çıkarılır. Motorun sabit momentli mi, sabit güçlü mü yoksa değişken güç ve moment özelliklerine mi sahip olduğunu belirlemek için klemens kutusu incelenir. Aşağıda Dahlander motor çeşitleri ve bağlantı şekilleri gösterilmiştir.

- Sabit Güçlü ve Çift Hızlı Motorlar (Seri Üçgen - Paralel Yıldız Bağlantılı)

  Şekil 2.20'de gösterilen bu motorların gücü sabit olduğundan etiketine tek bir güç değeri yazılır. Motor bağlantısı stator içerisinde üçgen olarak (Δ) yapılır. Moment formülünden anlaşılacağı üzere (M=975*P/n), motor devri artarsa momenti azalır.

KUTUP(2P)	DEVİR (n)	ŞEBEKEYE	BİRBİRİNE	BAĞLANTI ŞEKLİ
4	Düşük hız	1U-1V-1W	2U-2V-2W	İkili Paralel Yıldız
2	Yüksek hız	2U-2V-2W	----------	Seri Üçgen

Şekil 2.20 Seri üçgen - Paralel yıldız bağlantılı

- Sabit Momentli ve Çift Hızlı Motorlar (Seri Üçgen - Paralel Yıldız Bağlantılı)

  Şekil 2.21'de gösterilen bu motorların etiket bilgilerinde iki farklı güç ve devir sayısı yazılır. Motor bağlantısı (Δ-YY) olarak yapılır. Klemenste yapılan bağlantı, sabit güçlü motor için yapılan bağlantının tersidir. Moment formülüne göre (M=975*P/n), devir sayısı arttıkça motorun gücü de artmaktadır. Bu nedenle moment değeri değişmemektedir.

KUTUP(2P)	DEVİR (n)	ŞEBEKEYE	BİRBİRİNE	BAĞLANTI ŞEKLİ
4	Düşük hız	1U-1V-1W	----------	Seri Üçgen
2	Yüksek hız	2U-2V-2W	1U-1V-1W	İkili Paralel Yıldız

Şekil 2.21 Seri üçgen - Paralel yıldız Bağlantılı

- Değişken Momentli ve Değişken Güçlü Motorlar (Seri Yıldız - Paralel Yıldız Bağlantılı)

  Şekil 2.22'de gösterilen bu motorların stator bağlantısı, motor içerisinde yıldız (Y) olarak yapılmaktadır. Etiketinde her iki devir ve güç bilgisi için değerler yazılmaktadır. Sargıların bağlantısı (Y-YY) olarak yapılmaktadır. Düşük devir için moment ve güç değerleri düşük olurken, yüksek devirde güç ve moment değerleri yüksek olmaktadır.

KUTUP(2P)	DEVİR (n)	ŞEBEKEYE	BİRBİRİNE	BAĞLANTI ŞEKLİ
4	Düşük hız	1U-1V-1W	----------	Seri Yıldız
2	Yüksek hız	2U-2V-2W	1U-1V-1W	İkili Paralel Yıldız

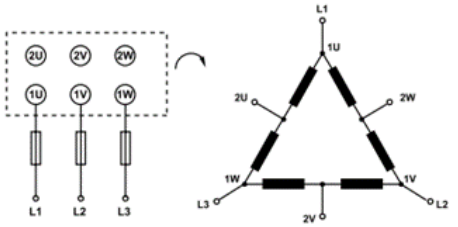
Şekil 2.22 Seri yıldız - Paralel yıldız bağlantılı

- Seri Üçgen- Paralel Yıldız (Δ - YY) Bağlantı ve Sarım Şemaları

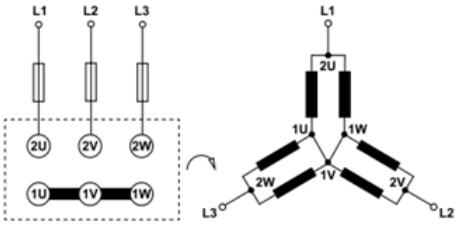
  Dahlander sargılı motorlarda en yaygın kullanılan bağlantı türüdür. Motorun gücü ve akımı her iki hızda da değişir. Yüksek hızda güç artar. Pistonlu pompalar, kompresörler, bant konveyörleri ve benzeri uygulamalarda sıkça tercih edilen sabit momentli motorlardır. Şekil 2.25'te klemens bağlantısı gösterilmiştir.

  Moment değeri sabit olduğunda, düşük hızda güç de düşük olmalıdır. Güç düşük olduğunda akım değeride düşük olacaktır. Bu duruma uygun bağlantı, Şekil 2.23'te gösterilen seri üçgen bağlantıdır. Faz bobinleri seri bağlı olduğunda, faz direncide büyük olur. Böylece faz akımı da azalmış olur.

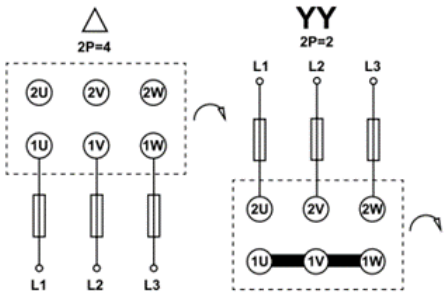
  Yüksek hızda ise motorun gücü artar. Gücü artırmak için faz akımını yükseltmek ve faz direncini azaltmak gereklidir. Bu duruma uygun bağlantı, Şekil 2.24'te gösterilen paralel yıldız bağlantısıdır.



Şekil 2.23 Seri üçgen düşük hızlı bağlantı



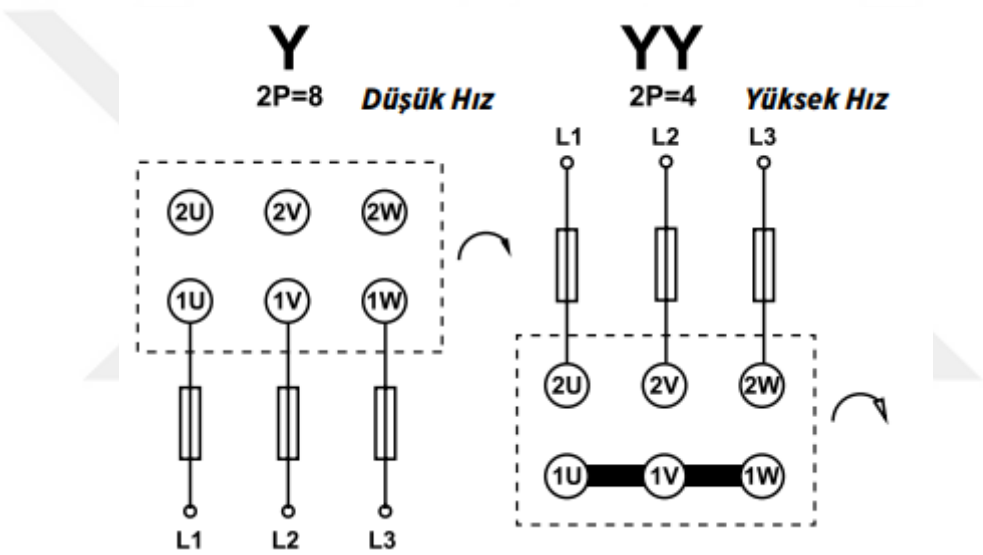
Şekil 2.24 Paralel yıldız yüksek hızlı bağlantı



Şekil 2.25 Δ - YY bağlantılı dahlender sargılı motorun klemens kutusu bağlantısı

- Seri Yıldız - Paralel Yıldız (Y-YY) Bağlantısı ve Sarım Şeması

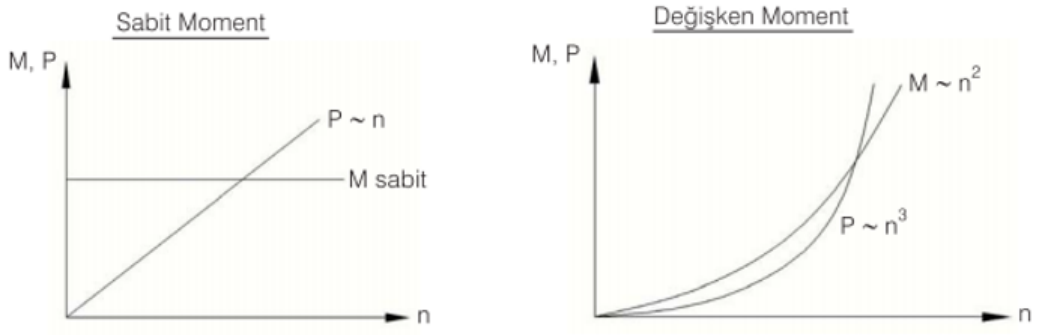
  Dahlander sargılı motorlarda kullanılan bir diğer bağlantı, seri yıldız - paralel yıldız (Y/YY) bağlantısıdır. Stator içinde, her faz grubunun çıkış uçları birleştirilerek yıldız (Y) bağlantısı oluşturulur. Bu bağlantı türünde, motor gücü ve momenti devir sayısıyla orantılı olarak değişir. Şekil 2.26'da gösterilen seri yıldız - paralel yıldız (Y/YY) bağlantılı motorlar, değişken momentli dahlander sargılı motorlar olarak adlandırılır. Bu bağlantı tipi vantilatörlerin, körüklerin, santrifüj pompaların ve benzeri cihazların tahrikinde kullanılır. Momentin hızın karesi ile doğru orantılı olması istenen pompa ve vantilatör uygulamalarında bu tip bağlantı kullanılır. Ayrıca, fanların çıkışında değişik hava akışı elde etmek için de bu bağlantı tercih edilir.



Şekil 2.26 Y - YY bağlantılı dahlender sargılı motorun klemens kutusu bağlantısı

Çok hızlı motorlar genellikle iki farklı uygulamaya göre tasarlanırlar;

- Sabit Yük Momenti (Sabit Moment)
- Hızın Karesiyle Orantılı Değişen Yük Momenti (Değişken Moment)



Şekil 2.27 Sabit moment ve değişken moment grafikleri

Şekil 2.27'de [37] gösterilen sabit momentli uygulamalar, ilk kalkış anında yüksek moment gerektiren ve düşük devirlerde sabit bir moment ihtiyacı olan kompresörler, takım tezgahları ve vinçler gibi uygulamaları kapsar. Bu tür uygulamalara göre tasarlanan motorlar, düşük devirlerdeki çıkış gücünü olabildiğince yüksek tutarak gereken yüksek momenti sağlar. Sabit moment için yüksek hız bağlantısının kilitli rotor akımı da daha büyük olacaktır. Düşük hızlarda sargılar seri üçgen bağlantıyla bağlanırken, yüksek hızlar için paralel yıldız bağlantısı kullanılmalıdır.

Şekil 2.27'de [37] gösterilen değişken momentli uygulamalar, kalkış anında yüksek moment gerektirmeyen ve düşük devirlerde moment ihtiyacı devir karesi ile azalan pompa ve vantilatör gibi uygulamaları içerir. Bu tür uygulamalar için tasarımı yapılan motorlarda, devir oranı 1/2 olduğunda moment oranı 1/4 ve güç oranı 1/8, devir oranı 3/2 olduğunda ise moment oranı 9/4 ve güç oranı 27/8 olmaktadır. Değişken moment uygulamaları için de yüksek hız bağlantısının kilitli rotor akımı daha büyük olacaktır. Düşük hızlarda her fazdaki sargılar seri olarak yıldız bağlanırken, yüksek hızlar için paralel yıldız bağlantısı kullanılmalıdır.

Dahlender sargılı motorlarda, sabit moment ihtiyacı gerektiren uygulamalar için Δ/YY, değişken moment gerektiren uygulamalar için ise Y/YY bağlantısı yapılır. İki farklı sargılı motorlarda ise Y/YY bağlantısı her iki uygulama için de kullanılır. Değişken moment gerektiren uygulamalarda, başlangıç akım karakteristiğine bağlı olarak, çift devirli motorlara ilk olarak düşük hızda başlatma sağlanmalıdır. Nominal devir hızına ulaşıldıktan sonra motor daha yüksek hıza geçiş yapabilir.

2.2 Fırçalı Doğru Akım (DC) Motorları

Fırçalı doğru akım (DC) motorları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren temel elektrik makineleridir. Bu motorlar, doğru akım kullanılarak oluşturulan bir manyetik alan sayesinde çalışır ve bu manyetik alan ile elektrik alanın etkileşimi sonucunda mekanik kuvvet üretirler.

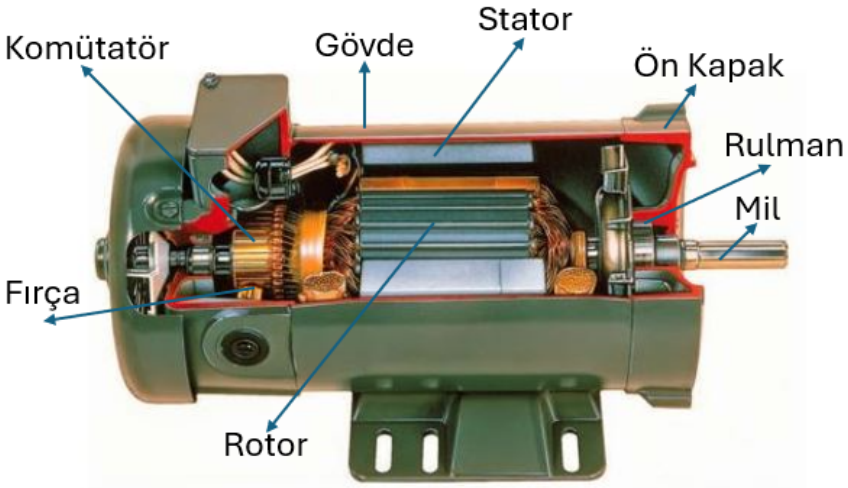
Fırçalı DC motorlar, DC motorların en basit ve en eski tiplerinden biridir. Fırçalı doğru akım motorları genellikle sabit kısım stator, döner kısım rotor, mekanik komütasyonun sağlandığı fırça ve kollektör yapısı olmak üzere 3 ana yapıdan meydana gelmektedir. Stator, motorun sabit kısmıdır ve genellikle bir daimi mıknatıs veya elektromıknatıs kullanılarak oluşturulan sabit bir manyetik alan sağlar. Rotor ise stator içinde dönebilen bobinlerden veya sarımlı çekirdekten oluşur ve genellikle statordaki mıknatıslarla etkileşim halindedir.

Fırçalı DC motorlarda, rotorun dönüşü sırasında komütatörler mil etrafında hareket eder. Komütatörler, her biri bir bobine bağlı olan fırçalarla temas halindedir. Fırçalar bir DC güç kaynağına bağlıdır ve komütatöre gelen akım, bobinlere iletilerek manyetik alan içinde mekanik hareket oluşturulur.

Fırçalı DC motorların, basit ve sağlam yapıları sayesinde üretimi ve bakımı kolay olup kompakt bir tasarımı bulunmaktadır. Bu motorların hızı ve torku kolayca kontrol edilebilir, bu da onları çeşitli uygulamalar için ideal kılar. Ayrıca, düşük hızlarda yüksek başlangıç torku üretebilmeleri ve hızlı tepki verebilme özellikleri avantajları arasındadır. Ancak, fırçalar ve komütatör zamanla aşındığından düzenli bakım gerektirirler. Fırçaların sürtünmesi nedeniyle enerji kaybı ve ısı oluşur, bu da motorun verimliliğini düşürebilir. Komütatörün çalışması sırasında oluşan kıvılcımlar ise elektriksel gürültüye ve parazitlere neden olabilir. Ayrıca, DC motorlarının AC motorlara göre maliyetleri genellikle daha yüksektir.

Fırçalı DC motorlar, düşük voltajlı uygulamalar ve hız kontrolünün gerektiği durumlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bu motorlar, oyuncaklar, elektrikli araçlar, ev aletleri, fanlar, pompalama sistemleri ve otomotiv uygulamaları gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılır. Özellikle fan uygulamalarında, hız kontrolü önemli bir faktördür ve fırçalı DC motorlar bu tür uygulamalar için ideal bir çözümdür.

Özetle, fırçalı DC motorlar, güvenilirlikleri, kontrol edilebilirlikleri ve performansları ile birçok uygulamada tercih edilen motor tiplerindendir. Ancak, bakım gereksinimleri ve verimlilik kayıpları göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 2.28 Fırçalı DC motor

Şekil 2.28 fırçalı doğru akım motorunun kesit yapısını göstermektedir [38].

2.2.1 Fırçalı Doğru Akım Motorlarının Çalışma Prensibi

Fırçalı doğru akım (DC) motorlarının çalışma prensibi, elektromanyetik indüksiyon ilkesine dayanır. Bu motorlar, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek çeşitli uygulamalarda hareket sağlar. Fırçalı DC motorlar, basit yapıları ve etkili performansları nedeniyle birçok endüstriyel ve tüketici uygulamasında yaygın olarak kullanılır.

Fırçalı DC motorların temel bileşenleri stator, rotor, komütatör ve fırçalardır. Stator, motorun sabit kısmıdır ve sabit bir manyetik alan sağlar. Bu manyetik alan, genellikle daimi mıknatıslar veya elektromıknatıslar tarafından oluşturulur. Rotor ise statorun içindeki dönebilen kısımdır ve genellikle sargılar (bobinler) veya sarımlı çekirdeklerden oluşur. Rotor, statorun manyetik alanı içinde dönerek mekanik hareket oluşturur.

Komütatör, rotorun miline bağlı döner bir anahtardır ve rotorun dönüşü sırasında akımın yönünü değiştirir. Bu değişim, rotorun sürekli olarak statorun manyetik alanına çekilmesini ve dönmesini sağlar. Komütatörün bu özelliği, rotorun sürekli hareket etmesini ve kesintisiz bir döngü oluşturmasını mümkün kılar. Fırçalar ise komütatörle elektriksel temas sağlayan parçalardır. Genellikle grafit veya metalden yapılmış olan fırçalar, elektrik akımını güç kaynağından komütatöre ve oradan da rotor sargılarına iletir.

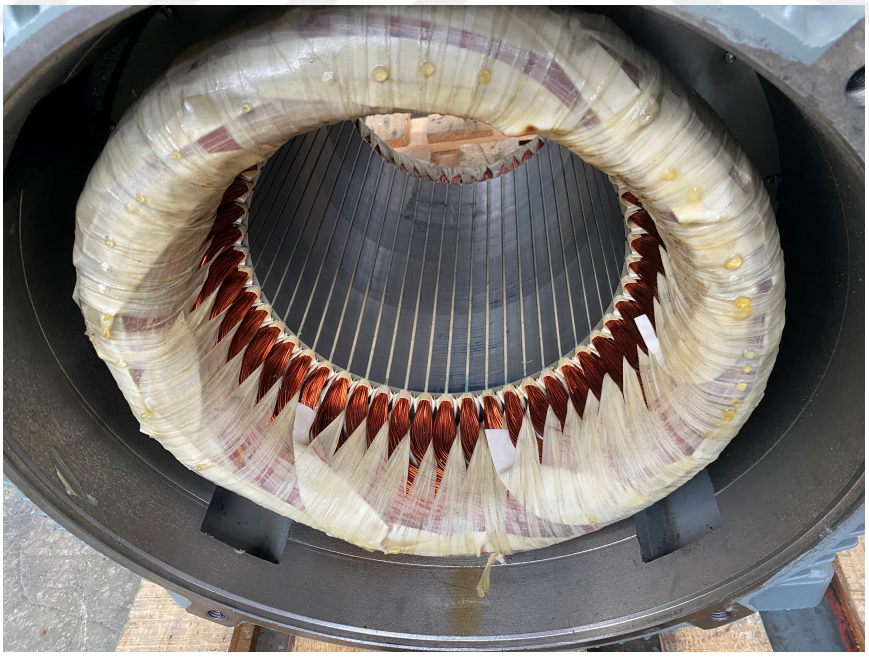
Fırçalı DC motorların çalışma prensibi, elektrik akımının fırçalar aracılığıyla komütatöre iletilmesiyle başlar. Komütatör, akımı rotor sargılarına ileterek bu sargılarda bir manyetik alan oluşturur. Rotor sargılarında oluşan manyetik alan, statorun sabit manyetik alanı ile etkileşime girer ve bu etkileşim, rotor üzerinde bir kuvvet oluşturur. Manyetik alanlar arasındaki bu etkileşim sonucu oluşan kuvvet, rotorun dönmesini sağlar. Rotor dönerken, komütatör akımın yönünü değiştirir, böylece rotor sürekli olarak statorun manyetik alanına çekilir ve kesintisiz bir döngü oluşturur. Bu süreç, elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesini sağlar.

2.2.2 Fırçalı Doğru Akım Motorlarının Yapısı

Fırçalı doğru akım motorları stator, rotor, fırçalar ve kollektörler olmak üzere temel olarak 3 ana bileşenden meydana gelmektedir.

2.2.2.1 Stator (Endüktör)

Stator, motorun sabit kısmıdır ve genellikle motorun dış gövdesini oluşturur. Stator, sabit bir manyetik alan sağlar ve bu manyetik alan, genellikle daimi mıknatıslar veya elektromıknatıslar tarafından oluşturulur. Statorun ana görevi, rotorun dönmesi için gerekli manyetik alanı üretmektir.



Şekil 2.29 Stator

Şekil 2.29 fırçalı doğru akım motorunun stator (endüktör) yapısını göstermektedir.

2.2.2.2 Rotor (Endüvi)

Rotor, motorun dönen kısmıdır ve statorun manyetik alanı içinde hareket eder. Rotor, genellikle sarılmış bakır tel bobinleri (sargılar) veya sarımlı çekirdeklerden oluşur. Rotor, elektrik akımı aldığında, statorun manyetik alanı ile etkileşime girer ve dönme hareketi üretir.



Şekil 2.30 Rotor

Şekil 2.30 fırçalı doğru akım motorunun rotor yapısını göstermektedir [39].

2.2.2.3 Fırçalar ve Kollektörler

Fırçalar, komütatör ile elektriksel temas sağlayan parçalardır. Genellikle grafit veya metalden yapılmış olan fırçalar, elektrik akımını güç kaynağından komütatöre ve oradan da rotor sargılarına iletir. Fırçalar, komütatör segmentlerine temas eder ve rotor döndükçe komütatör üzerindeki farklı segmentlerle temas ederek akımın yönünü değiştirirler.

Komütatör, rotorun miline bağlı döner bir anahtardır. Komütatörün ana görevi, rotorun sargılarındaki elektrik akımının yönünü düzenli aralıklarla değiştirmektir. Bu, rotorun sürekli olarak statorun manyetik alanına doğru çekilmesini ve dolayısıyla sürekli bir dönme hareketi oluşturmasını sağlar. Komütatör, segmentlere ayrılmış bakır halkalardan oluşur ve bu segmentler, rotorun sargılarına bağlıdır.



Şekil 2.31 Fırça ve fırça yatağı

Şekil 2.31 fırçalı doğru akım motorunun fırça ve fırça yatağı yapısını göstermektedir [39].



Şekil 2.32 Kollektör

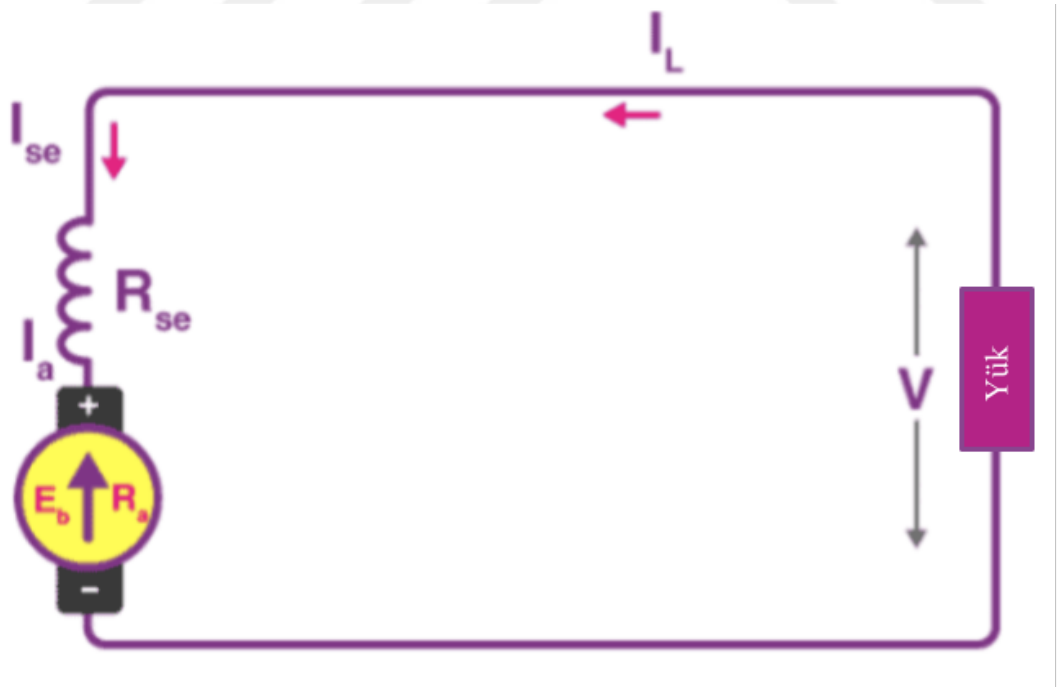
Şekil 2.32 fırçalı doğru akım motorunun kollektör yapısını göstermektedir [39].

2.2.3 Fırçalı Doğru Akım Motorlarının Çeşitleri

Fırçalı doğru akım (DC) motorlar, çeşitli uygulamalar ve performans gereksinimlerine göre farklı türlerde tasarlanmıştır. Fırçalı DC motorlar genellikle üç ana kategoriye ayrılır; seri uyartımlı DC motorlar, paralel uyartımlı (şönt) DC motorlar ve kompound (bileşik) DC motorlar. Bu çeşitlilik, fırçalı DC motorların geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasını sağlar. Her motor türünün kendine özgü özellikleri ve avantajları olup belirli performans gereksinimlerine ve çalışma koşullarına uygun olarak seçilir. Fırçalı DC motorlar, çeşitli endüstriyel ve tüketici uygulamalarında güvenilir ve etkili performans sunar.

2.2.3.1 Seri Uyartımlı DC Motorlar

Seri uyartımlı DC motorlarda, stator sargıları ve rotor sargıları seri olarak bağlanmıştır. Bu motorlar, akımın tamamının hem stator hem de rotor sargılarından geçtiği bir yapıya sahiptir. Bu özellik, yüksek başlangıç torku sağlar ve değişken hız performansı sunar; yük arttıkça motorun hızı azalır. Seri uyartımlı motorlar, düşük hızlarda yüksek tork üretebilme kapasitesine sahiptir, ancak hız kontrolü zordur ve aşırı yük altında motor hızı önemli ölçüde düşebilir. Bu motorlar, elektrikli trenler, vinçler, asansörler ve ağır iş makineleri gibi yüksek başlangıç torku gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

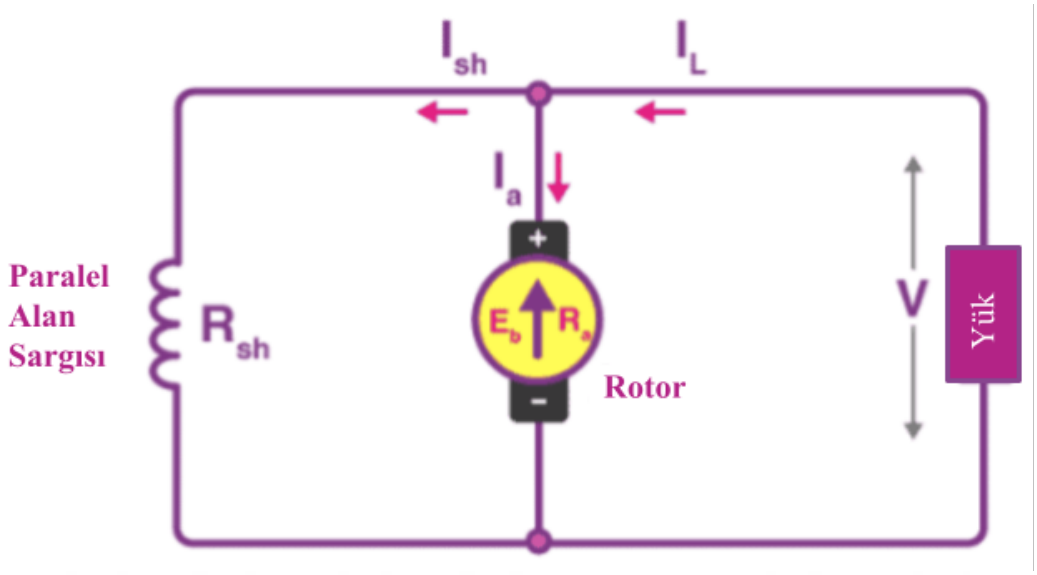


Şekil 2.33 Seri uyartımlı DC motor

Şekil 2.33 seri uyartımlı doğru akım motorunun devre şemasını göstermektedir [40].

2.2.3.2 Paralel Uyartımlı (Şönt) DC Motorlar

Paralel uyartımlı DC motorlarda ise stator sargıları ve rotor sargıları paralel olarak bağlanmıştır. Bu motorlar, stator ve rotor sargılarının bağımsız olarak beslenmesine izin verir, bu da sabit hız performansı sunar ve yük değişikliklerine karşı kararlı bir çalışma sağlar. Paralel uyartımlı motorlar, yüksek hızda çalışma yeteneğine sahiptir, ancak başlangıç torku seri uyartımlı motorlara göre daha düşüktür. Hız kontrolü daha kolay olan bu motorlar, sabit hız gerektiren uygulamalar, endüstriyel makineler, sabit hız pompaları ve fanlar gibi alanlarda kullanılır.

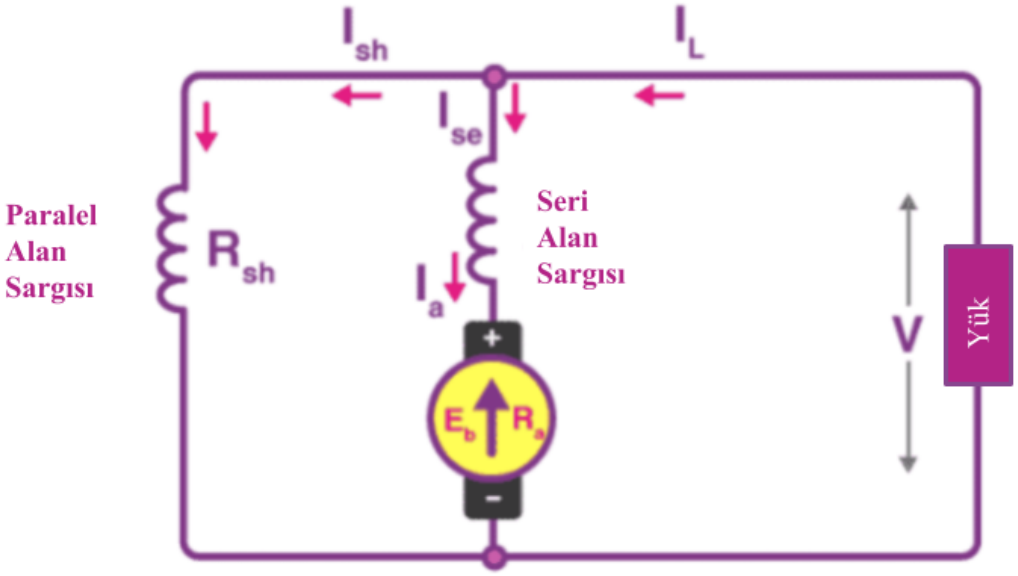


Şekil 2.34 Paralel uyartımlı DC motor

Şekil 2.34 paralel uyartımlı doğru akım motorunun devre şemasını göstermektedir [40].

2.2.3.3 Bileşik Uyartımlı (Kompound) DC Motorlar

Bileşik uyartımlı DC motorlar, seri ve paralel uyartımlı motorların kombinasyonudur ve her iki motor türünün avantajlarını bir araya getirir. Bu motorlar, hem yüksek başlangıç torku hem de sabit hız performansı sunar. Yük değişikliklerine karşı daha kararlı olan kompound motorlar, hem düşük hızlarda yüksek tork hem de yüksek hızda kararlı performans sağlar. Ancak, yapısı daha karmaşık olduğu için maliyetleri diğer motor türlerine göre daha yüksek olabilir. Kompound DC motorlar, endüstriyel uygulamalar, yüksek tork ve hız kontrolü gerektiren makineler, kaldırma makineleri ve çeşitli ağır iş uygulamalarında kullanılır.



Şekil 2.35 Bileşik uyartımlı DC motor

Şekil 2.35 bileşik uyartımlı doğru akım motorunun devre şemasını göstermektedir [40].

2.2.4 Fırçalı Doğru Akım Motorlarının Avantaj ve Dezavantajları

Fırçalı DC motorlar, basit yapıları, kolay hız ve tork kontrolü ve düşük voltajda çalışma yetenekleri nedeniyle birçok uygulamada tercih edilir. Ancak, aşınma, sürtünme kayıpları ve elektriksel gürültü gibi dezavantajlar, bu motorların kullanımını bazı durumlarda sınırlayabilir. Bu nedenle, fırçalı DC motorların avantajları ve dezavantajları, belirli bir uygulamanın gereksinimlerine göre dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

2.2.4.1 Avantajları

- Basit Yapı: Temel olarak stator, rotor, komütatör ve fırçalardan oluşur. Üretim maliyetlerini düşürür ve bakımını kolaylaştırır. Küçük ve orta ölçekli uygulamalar için idealdir.
- Yüksek Başlangıç Torku: Bu motorlar, yüksek başlangıç torku sağlarlar, bu da ağır yüklerin kolayca hareket ettirilebilmesini sağlar.
- Kolay Hız ve Tork Kontrolü: Hız kontrolü, uygulanan voltajın değiştirilmesiyle basitçe yapılabilir. Hız kontrolünün kritik olduğu uygulamalarda büyük avantaj sağlar.

- Doğrudan DC Güç Kaynaklarıyla Çalışabilme: Bataryalar veya DC güç kaynaklarıyla doğrudan çalışabilir. Güç kaynağı gereksinimlerini basitleştirir. Düşük voltajlı uygulamalarda etkili performans gösterir.
- Geniş Kullanım Alanı: Fırçalı DC motorlar, düşük voltajlı uygulamalardan yüksek güçlü endüstriyel kullanımlara kadar geniş bir yelpazede kullanılabilirler.

2.2.4.2 Dezavantajları

- Bakım Gerektirir: Fırçalar ve komütatör sürekli temas eder ve zamanla aşınır. Aşınan parçalar motor performansını düşürebilir ve düzenli bakım gerektirir. Bakım maliyetlerini artırır ve sürekli bakım gerektirir.
- Sürtünme ve Kıvılcım: Fırçalar ve komütatörler arasındaki sürtünme, enerji kaybına ve kıvılcım oluşumuna neden olabilir. Bu durum, motorun verimliliğini azaltabilir ve gürültüye neden olabilir.
- Verimlilik: Fırçalar ve komütatör arasındaki sürtünme ısı üretir ve enerji kaybına yol açar. Bu enerji kaybı motorun verimliliğini düşürür ve daha fazla enerji tüketimine neden olur. Bu sürtünme, motorun ömrünü de kısaltabilir.
- Elektriksel Gürültü: Komütatör ve fırçalar arasındaki kıvılcımlanma elektriksel gürültü üretir. Elektromanyetik parazitlere (EMI) neden olabilir ve diğer elektronik cihazların performansını olumsuz etkileyebilir. Hassas elektronik sistemlerin bulunduğu uygulamalarda sorun teşkil edebilir.

2.2.5 Fırçalı Doğru Akım Motorlarının Uygulama Alanları

Fırçalı DC motorlar, basit tasarımları ve yüksek başlangıç torkları nedeniyle geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılırlar. Yaygın uygulama alanları şunlardır:

- Elektrikli araçlar ve bisikletler
- Endüstriyel makineler ve aletler
- Ev aletleri (elektrikli süpürgeler, çamaşır makineleri)
- Oyuncaklar ve hobi elektroniği
- Havacılık ve savunma uygulamaları
- Medikal cihazlar

Fırçalı DC motorlar, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürme konusunda güvenilir ve etkili bir çözümdür. Çeşitli tipleri ve uygulama alanları ile endüstriyel ve tüketici elektroniğinde önemli bir rol oynamaktadırlar. Ancak, fırçaların aşınması ve bakım gereksinimi gibi dezavantajları nedeniyle, modern teknolojilerde fırçasız DC motorlar gibi alternatif çözümler de yaygınlaşmaktadır. Bu motorlar, özellikle düşük maliyetli ve kolay kontrol edilebilir motor çözümleri arayan uygulamalar için ideal olmaya devam etmektedir.

2.3 Elektronik Komütasyonlu (EC) Motorlar

EC (Elektronik Komütasyonlu) motorlar, elektronik kart sistemleri tarafından kontrol edilen fırçasız doğru akım motorlarıdır. Fırçalı doğru akım motorlarına kıyasla komütasyon fırça ve kollektör yapısıyla değil elektronik olarak sağlanmaktadır. Bu motorlar, daimi mıknatısların yer aldığı rotor, sargıların yer aldığı stator ve güç dönüştürücülerin yer aldığı ve elektronik olarak komütasyonun sağlandığı elektronik devre kartı olmak üzere 3 ana kısımdan oluşmaktadır.

Bu motorların EC olarak isimlendirilmesinin nedenleri arasında, uzun yıllar boyunca DC motor pazarını domine eden fırçalı tasarımlar ile fırçasız tasarımlar arasında oluşabilecek kafa karışıklığını önlemek yer almaktadır. "Fırçasız DC" yerine "elektronik komütasyonlu" teriminin kullanılması, modern, yüksek verimliliğe sahip ve uzun ömürlü motorları fırçalı tasarımlardan ayırt etmeyi kolaylaştırır. Bu sayede kullanıcıların düşük verimli, sık bakım gerektiren ve kısa kullanım ömrüne sahip fırcalı doğru akım motorlarıyla karıştırma olasılığı azaltılmış olur.

Son yıllarda, enerji verimliliği ve kontrol kabiliyeti nedeniyle EC motorları fan uygulamalarında popülerlik kazanmıştır. EC motorları, AC motorların ve DC motorların avantajlarını bir araya getirir. Bu motorlar, yüksek verimlilik, düşük enerji tüketimi ve geniş hız aralığında çalışabilme özellikleri sunarlar. Ayrıca, entegre elektronik kontrol sistemleri sayesinde fan performansını optimize etme imkanı sağlarlar.

Fırçasız yapıları nedeniyle, EC motorlar kıvılcım çıkarmaz ve fırçalardan kaynaklanan kısa bir ömre sahip değildir. Diğer avantajları arasında, güç elektroniği devreleriyle stator sargılarının kontrol edilmesiyle güç tüketimini düşürmeleri, daha iyi performans ve kontrol edilebilirlik sağlamaları bulunur. Ayrıca, asenkron motorlara göre sargı sıcaklık artışları da daha düşüktür.

Boyut açısından, EC motorlar geleneksel DC veya AC motorlarıyla aynı çıkış gücünü sağlarken daha az yer kaplarlar. Daha küçük motor ile alan tasarrufu sağlanırken, milli motor yerine dış rotor yapısı kullanılıyorsa, daha fazla yer tasarrufu yapmak mümkündür.

EC motorların entegre elektronik kontrol sistemleri sayesinde güç tüketimleri, asenkron motorlara göre daha verimli ve stabil bir şekilde sağlanabilmektedir. Fırçasız DC motorlar, hem asenkron motorlara göre daha verimli bir çalışma sağlarken hem de akıllı elektroniği ile değişken hız kontrolü imkânı sağlamaktadır. Klasik uygulamalarda motor hızınının kontrolü inverterli asenkron motorlarla sağlanırken fırçasız doğru akım motorlarında, motora entegre edilmiş elektronik kartla sağlanarak daha az yer işgal eden kompakt bir yapı oluşturulmaktadır. Ayrıca, fırçasız DC motorlar şebekeye direkt olarak bağlı olmadıkları için gerilimdeki veya frekanstaki küçük değişikliklerden etkilenmezler.

Asenkron motorlar, harici bir hız kontrol cihazıyla (inverter) birden fazla hızda çalışabilir. Ancak bu cihazlar, motorun sinüs dalga şeklini değiştirir ve motor ömrünü olumsuz etkileyebilir. EC motorlar ise hız kontrolü açısından daha çeşitli ve hassas seçenekler sunar. EC motorlarda, komütasyon devreleri 4 ila 20 mA ve 0 ila 10 V aralığında darbe genişlik modülasyonu (PWM) sinyalleri ile kontrol edilir. Bu sayede, motor hızını %10 ila %100 aralığında hassas bir şekilde kontrol etmek mümkündür. Ayrıca, EC motorların izlenmesi ve geribildirim sağlanması entegre devreler ile kolayca yapılabilir.

Son olarak, EC motorlar kademeli ve kontrollü bir biçimde kalkış yapar, daha sessiz çalışır ve daha düşük bir motor sıcaklığına sahiptir. HVAC ve soğutma sistemleri pazarında, özellikle fanlar, üfleyiciler ve kompresörler gibi ekipmanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu motorlar, kontrol edilebilir geniş bir hız aralığında çalışırken aynı zamanda yüksek performans ve enerji verimliliği de sağlayabildikleri için tercih edilmektedir.

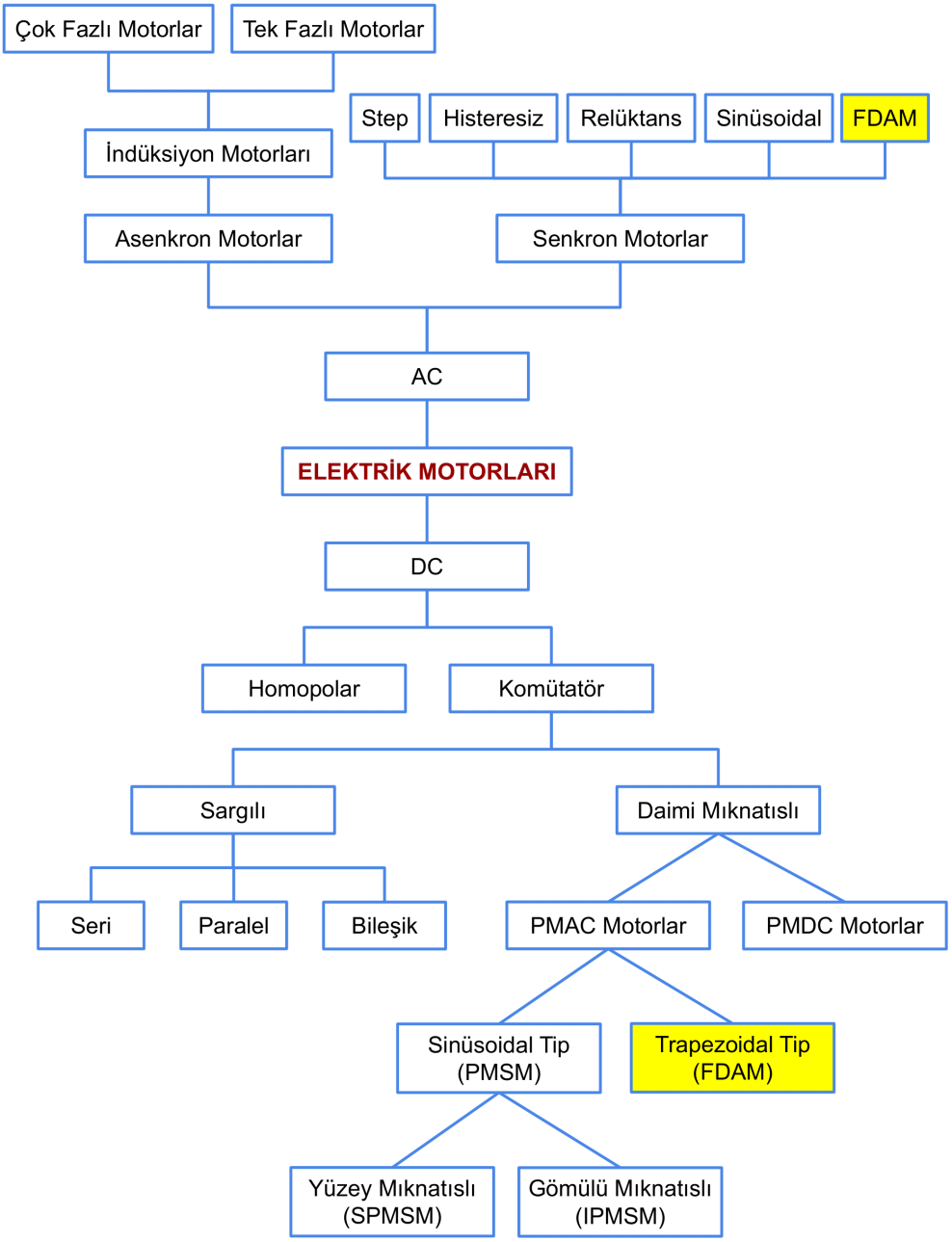
Fırçasız doğru akım motorları (EC) bölüm 3'te dataylı olarak ele alınacaktır.

3
FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI

Asenkron motorlar, basit ve sağlam yapıları, uzun ömürleri, ekonomik olmaları gibi nedenlerden ötürü günümüzde hala sanayi, otomotiv, savunma, konut gibi sektörlerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Ancak güç elektroniği, entegre devreler, mikrodenetleyiciler ve manyetik malzeme teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak farklı yapılarda motor tasarımlarının endüstriyel uygulamalarda kullanılması giderek yaygınlaşmaktadır. Bu uygulama alanlarından birisi de asenkron motorların sıklıkla kullanıldığı fan uygulamalarıdır.

Birkaç fanın birlikte çalıştığı soğutma fan uygulamalarında kullanılan klasik asenkron motorların hızları adaptif olmadığından, ortamın gerekliliğine göre çalışan fanlardan bir veya birkaçı devreden çıkartılarak kontrol edilir. Bu durum, fan sistemlerindeki sistem verimliliğinin düşmesine yol açar. EC (Elektronik komütasyonlu) motorlu fan sistemlerinde ise sistemde bulunan tüm fanlar çalışırken hızları sürekli olarak hem kapalı çevrim hem de açık çevrim olarak kontrol edilir.

Fırçasız Doğru Akım Motorları (FDAM), içerisinde sargıların yer aldığı stator, mıknatısların yer aldığı rotor ve güç dönüştürücülerin yer aldığı ve elektronik olarak komütasyonun sağlandığı sürücü kartı sistemlerinden oluşmaktadır. Bu motorlarda akım ve gerilim kontrol edilerek tork ve devir kontrolü yapılabilmektedir. Bu kontrol ilişkisinin doğrusal oluşu, FDAM'nin sadece havalandırma fanlarındaki kullanımını değil, otomotiv, sanayi gibi diğer sektörlerde de kullanımını kolaylaştırmakta ve yaygınlaştırmaktadır. Elektronik komütasyonlu akıllı kontrol yöntemlerinin uygulanması özellikle fan sistemlerindeki performans ve verimliliği doğrudan arttırmaktadır.

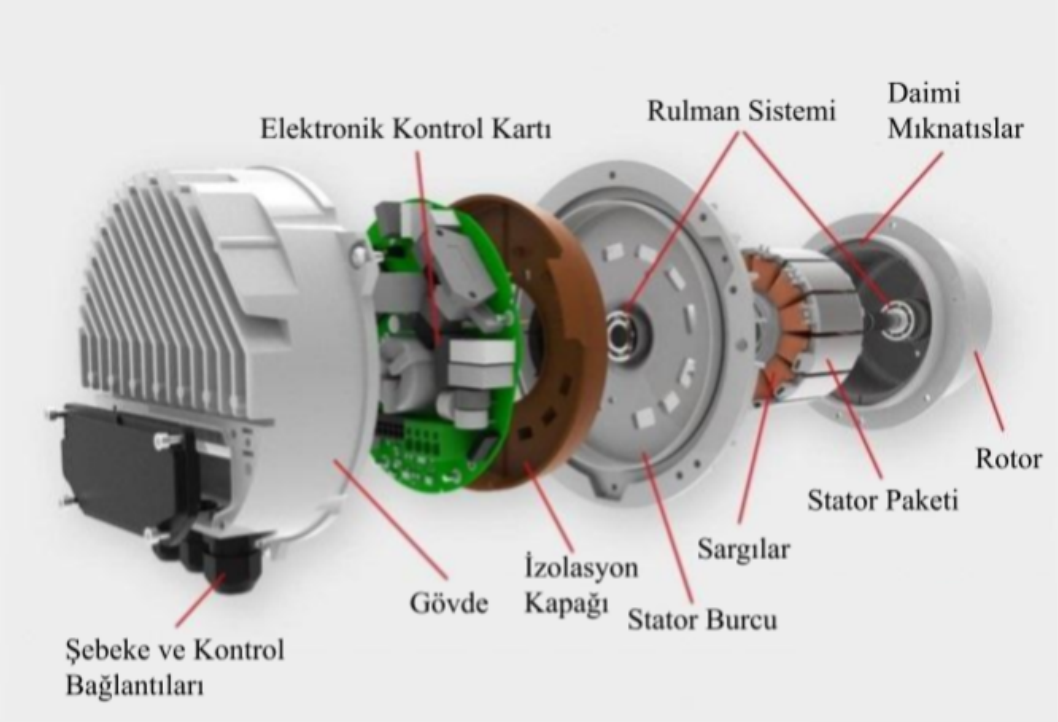


Şekil 3.1 Elektrik motorlarının sınıflandırılması

Şekil 3.1 elektrik motorlarının ve daimi mıknatıslı elektrik motorlarının sınıflandırılmasını göstermektedir.

3.1 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Yapısı

Fırçasız doğru akım motorları, motor sınıflandırmasında yapısında daimi mıknatısların yer aldığı senkron motorlar gurubunda yer almaktadır. Genel olarak bir fırçasız doğru akım motoru sabit kısım stator, döner kısım rotor ve elektronik olarak komütasyonun sağlandığı elektronik devre kartı sisteminden oluşmaktadır.



Şekil 3.2 Elektronik komütasyonlu motor yapısı

Şekil 3.2 elektronik komütasyonlu (EC) motor yapısını göstermektedir [41].

Genel olarak üç ana bölümden oluşan fırçalı doğru akım motorunda;

- Stator: Sargıların yer aldığı kısımdır.
- Rotor: Daimi mıknatısların yer aldığı kısımdır.
- Elektronik Devre Kartı: Elektronik olarak komütasyonun sağlandığı ve güç dönüştürücülerin yer aldığı kısımdır.

3.1.1 Stator

Fırçasız doğru akım motorlarının stator yapısı, verimlilik ve performans açısından kritik öneme sahiptir. Stator, sargıların yerleştirildiği ve manyetik iletken kayıplarını minimize eden silisyumlu sac nüvelerden oluşur. Sac nüveler, belirlenen kalıplara göre kesilip preslenir ve sargıların statora temasını ve kısa devreyi önlemek amacıyla toz kaplama veya plastik izolatörler kullanılır. Stator, bir nüve ve içindeki oyuklara yerleştirilen üç fazlı sargılardan oluşur ve sargılar genellikle motor içerisinde yıldız veya üçgen bağlantı olacak şekilde imal edilir. Rotor kutup sayısı, faz sayısı ve bobin sayısına bağlı olarak stator oluk sayısı belirlenir. Fırçasız doğru akım motorlarda, sargılar asenkron motorlara benzer şekilde dağıtılır ancak yapılandırmaları farklılık gösterebilir. Motorun gücü arttıkça stator paketinin boyu ve kablo kesitleri de artar, bu da motorun genel performansını ve verimliliğini doğrudan etkiler. Bu nedenle, fırçasız doğru akım motorların tasarımında statorun yapısal özellikleri ve malzeme seçimi büyük önem taşır.



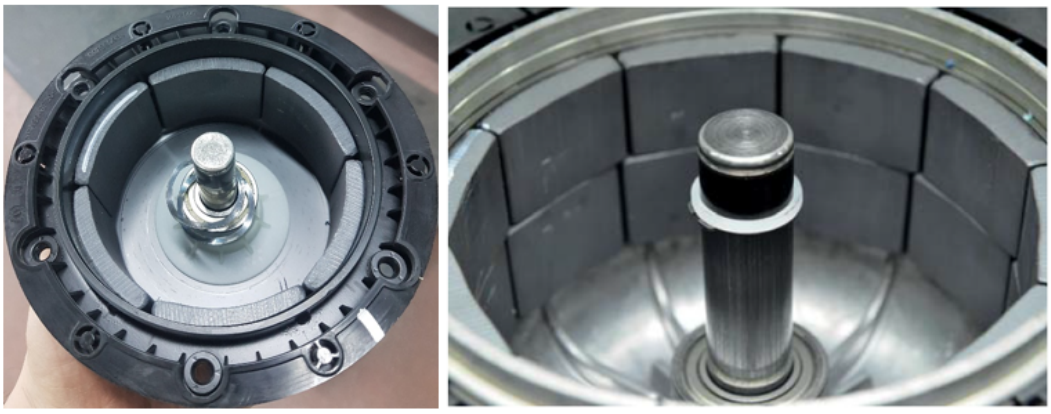
Şekil 3.3 Fırçasız doğru akım motoru stator yapısı

Şekil 3.3 fırçasız doğru akım motorlarında kullanılan farklı tipteki stator yapılarını göstermektedir.

Elektrik motorlarının statorunda, konsantrik veya dağıtılmış olarak adlandırılan farklı tipte sargı yapıları kullanılmaktadır. Bu sargı tipleri, hava aralığında meydana gelen manyetik akı yoğunluğunun şeklini, akımın dalga formunu, elektromotor kuvvetinin şeklini etkilediğinden, elektrik motorunun performans ve verimini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, akımın ve elektromotor kuvvetinin dalga formu da elektrik motorunun sürme yöntemini etkilediğinden, sargı yapısı dolaylı olarak motor tipini de şekillendirmektedir. Fırçasız doğru akım motorlarının stator sargılarında ise genellikle konsantrik dediğimiz sargı yapısı kullanılmaktadır.

3.1.2 Rotor

Fırçasız doğru akım motorlarının döner kısmı olan rotor, yapısında daimi mıknatısların yer aldığı kısımdır. Stator sargılarında üretilen manyetik alandan etkilenerek rotorun dönmesi için gerekli olan manyetik alanı üretmek amacıyla, mıknatıslar kullanılır. Rotorda fırça ve kollektör yapısı bulunmadığı için elektrik arkı oluşmaz, bakım ihtiyacı azalır ve sürtünmeden kaynaklanan ısı ve enerji kaybı minimuma indirilir. Daimi mıknatıslar genellikle ferrit mıknatıslar veya nadir toprak elementi mıknatıslardan oluşur. Fırçasız doğru akım motorlarında kullanılan daimi mıknatıslar, rotor yapısında farklı şekillerde yerleştirilebilir. Rotorun yerleştirildiği konuma göre bu motorların rotorları, iç rotorlu veya dış rotorlu olarak isimlendirilmektedir. İç rotorlu fırçasız doğru akım motorlarında, rotor kısmı stator sargılarına göre motorun iç kısmında yer alırken dış rotorlu fırçasız doğru akım motorlarında daimi mıknatıslar stator sargılarını çevreleyerek motorun dış kımını oluşturmaktadır. Mıknatısların yerleştirilme biçimine göre de bu motorlar, yüzey montajlı veya gömülü mıknatıslı motorlar olarak sınıflandırılmaktadır.



Şekil 3.4 Fırçasız doğru akım motoru rotor yapısı

Şekil 3.4 fırçasız doğru akım motorlarında kullanılan farklı tipteki rotor yapılarını göstermektedir.

3.1.3 Elektronik Devre Kartı

Fırçasız doğru akım motorları, enerji dönüşümünü stator sargılarında üretilen elektrik akımı ile rotora yerleştirilen daimi mıknatısların manyetik alanlarının etkileşimi sonucu endüklenen moment ile gerçekleştirmektedir. Fırçalı doğru akım motorlarında tek yönlü düzgün moment, rotor akımının kollektör tarafından değiştirilmesi ile sağlanırken, fırçasız doğru akım motorlarında bu işlem elektronik devre kartları aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu yapı, fırça ve kollektör düzeneğini ortadan kaldırarak elektronik komütasyonlu bir doğru akım makinası oluşturur.

Fırçasız doğru akım motorlarının çalışma prensibinde, rotordaki mıknatısın her kutup değişiminde statordaki iletkenlerin akım yönleri, güç elektroniği anahtarları tarafından değiştirilir. Bu elektronik komütasyon süreci, motorun verimliliğini ve performansını artıran önemli bir faktördür. Fırçalı ve fırçasız doğru akım motorlarında komütasyon olayı benzer olup, moment/hız karakteristikleri ve performans eşitlikleri bakımından benzerlik gösterirler. Ancak, fırçasız doğru akım motorlarının fırçalı doğru akım motorlarına göre en önemli üstünlüğü, fırça ve kollektörden kaynaklanan dezavantajların ortadan kaldırılmış olmasıdır.

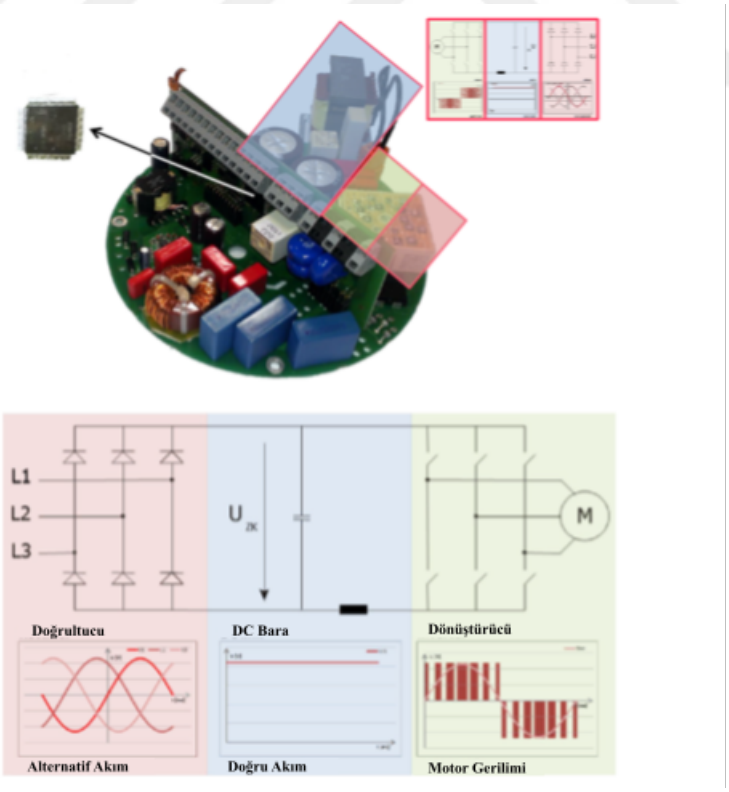
Elektronik devre kartları, fırçasız doğru akım motorlarının performansında kritik bir rol oynar. Bu kartlar, motorun hızını, torkunu ve yönünü kontrol ederken aynı zamanda akım ve voltaj dalgalanmalarını da düzenler. Elektronik devre kartları, AC-DC dönüştürücüler, DC-DC dönüştürücüler ve DC-AC dönüştürücüler olmak üzere farklı tiplerde güç elektroniği devrelerini de içerisinde barındırır. Elektronik devre kartlarının temel bileşenleri şunlardır:

- Mikrodenetleyici veya DSP (Digital Signal Processor): Motorun hız, tork ve yön kontrolünü sağlayan ana kontrol birimidir. Bu bileşen, rotorun pozisyonunu ve hızını belirlemek için Hall sensörlerinden gelen verileri işlemektedir. Sensörlü tekniklerin yanında sensözsüz hız kontrolü teknikleride kullanılmaktadır.
- Güç Elektroniği Anahtarları: Bu anahtarlar, MOSFET'ler veya IGBT'ler (Insulated Gate Bipolar Transistor) gibi yarı iletken cihazlar kullanılarak yapılır. Güç elektroniği anahtarları, stator sargılarındaki akımın yönünü ve büyüklüğünü kontrol eder.
- Hall Sensörleri veya Encoder: Rotor pozisyonunu belirlemek için kullanılır. Hall sensörleri, rotorun manyetik alanındaki değişimleri algılar ve bu verileri mikrodenetleyiciye iletir. Encoderlar, rotorun kesin pozisyonunu ve hızını belirlemek için daha yüksek hassasiyet sağlar.

- Sürücü Devreleri: Güç elektroniği anahtarlarını kontrol eden sürücü devreleridir. Bu devreler, mikrodenetleyiciden gelen düşük voltajlı sinyalleri, güç elektroniği anahtarlarını açıp kapatacak seviyeye yükseltir.
- Koruma Devreleri: Motoru aşırı akım, aşırı voltaj ve termal aşırı yüklenme gibi durumlardan koruyan devrelerdir. Bu devreler, motorun uzun ömürlü ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar.

Elektronik devre kartları, fırçasız doğru akım motorlarının kollektör ve fırça düzeneklerinden kaynaklanan sorunları ortadan kaldırarak, motorun daha hafif, daha verimli ve daha güvenilir olmasını sağlar. Ayrıca, bu kartlar sayesinde motorun endüvi boyu kısalır ve rotorun ataletinin daha düşük olması sağlanır. Bu özellikler, fırçasız doğru akım motorlarını endüstriyel uygulamalar için ideal hale getirir.

Sonuç olarak, fırçasız doğru akım motorlarının elektronik devre kartları, motorun performansını ve verimliliğini artıran önemli bileşenlerdir. Bu kartlar, motorun hız, tork ve yön kontrolünü sağlarken, aynı zamanda akım ve voltaj dalgalanmalarını düzenler ve motoru korur. Bu nedenle, fırçasız doğru akım motorlarının tasarımında elektronik devre kartlarının dikkatle seçilmesi ve uygulanması büyük önem taşır.



Şekil 3.5 Fırçasız doğru akım motoru elektronik devre kartı yapısı

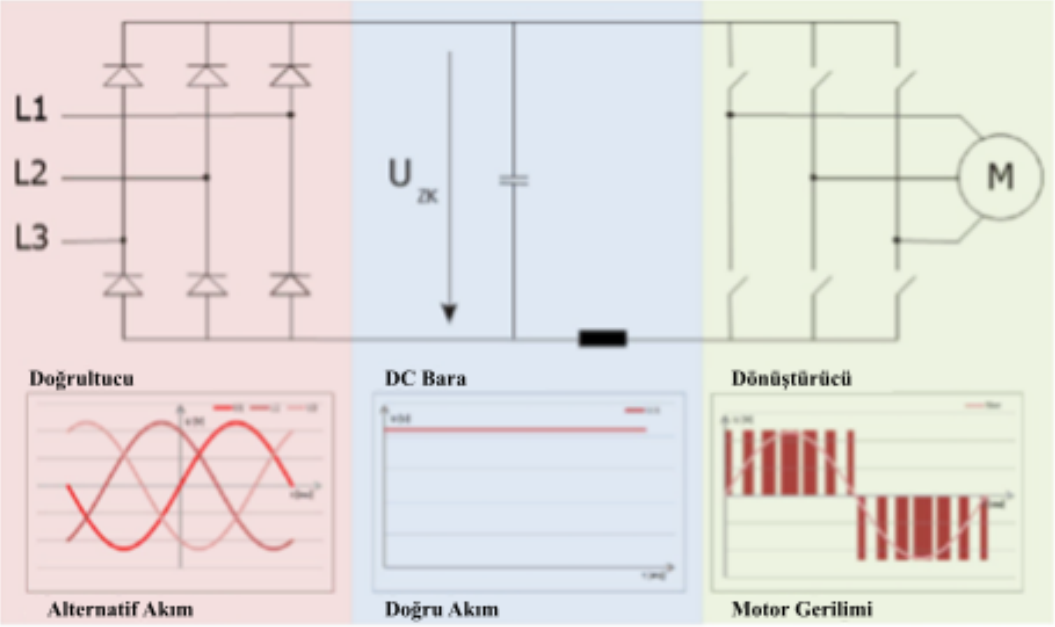
Şekil 3.5 fırçasız doğru akım motorlarında kullanılan elektronik devre kartını göstermektedir.

3.2 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Çalışma Prensibi

Fırçasız doğru akım motorlarının çalışma prensibi, manyetik kutuplar arasındaki itme ve çekme prensibine dayanmaktadır. Stator sargılarından birinin üzerinden akım geçirildiğinde, bu sargının etrafında bir manyetik kutup oluşur. Rotor manyetik alanı her zaman mevcuttur ve bu alan, kalıcı bir mıknatıs tarafından oluşturulur. Rotor üzerinde bulunan kalıcı mıknatıs, bu manyetik kutuplara karşılık gelen zıt kutupları çeker ve aynı kutupları iter. Bu itme-çekme kuvvetleri, motorun dönmesi için gerekli olan torku üretir. İdeal durumda, maksimum tork, stator sargıları ile rotor mıknatısları üzerindeki manyetik alanlar birbirlerine 90° olduğunda meydana gelir. Motorun sürekli olarak dönmesi için, statordaki sargılardan sıralı olarak akım geçirilir ve bu şekilde döner bir manyetik alan oluşturulur.

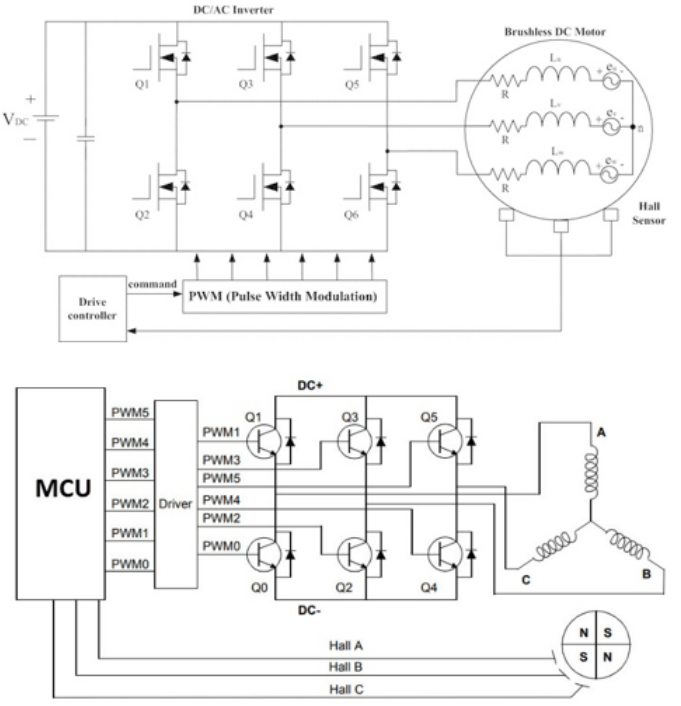
Standart bir fırçasız doğru akım motor sürücüsü, genellikle altı adet güç anahtarına sahiptir. Bu güç anahtarları, motor fazlarını enerjilendirerek rotorun dönmesini sağlar. Fırçasız doğru akım motorlarında komütasyon olayı, yani fazların sıralı olarak enerjilendirilmesi, rotorun sürekli olarak dönmesi için kritik öneme sahiptir.

Fırçasız doğru akım motorları genellikle altı adımda komütasyon dediğimiz sürme yöntemi ile çalıştırılır. Altı adımda komütasyon ile, stator üç faz sargılarından aynı anda iki fazın enerjilendirilerek bir fazın enerjisiz bırakıldığı sürme yöntemi gerçekleştirilir. Bu şekilde stator manyetik alanı altı farklı yönde konumlandırılabilir. Bu altı adımlı sürüş kombinasyonlarının sıralaması, rotor pozisyonuna göre senkronize edilir. Rotor pozisyonu, hall sensörleri veya BEMF (Back Electromotive Force) algılama tekniği (sensörsüz) kullanılarak tespit edilebilir. Hall sensörleri, rotor pozisyonunu algılayarak dijital veya analog bir sinyal üretir. Bu bilgi, stator manyetik alanını bir sonraki pozisyona taşımak için kullanılır. Sensörsüz sürüşte ise, enerjisiz faz üzerindeki voltaj ölçülerek BEMF sıfır geçişi algılanır. Rotorun manyetik alanı enerjisiz fazı geçtiğinde, ilgili BEMF geriliminin polaritesi değişir (sıfır geçişi) ve sıfır geçişi algılandıktan sonra bir sonraki fazın enerjilendirilmesi gerçekleştirilir.



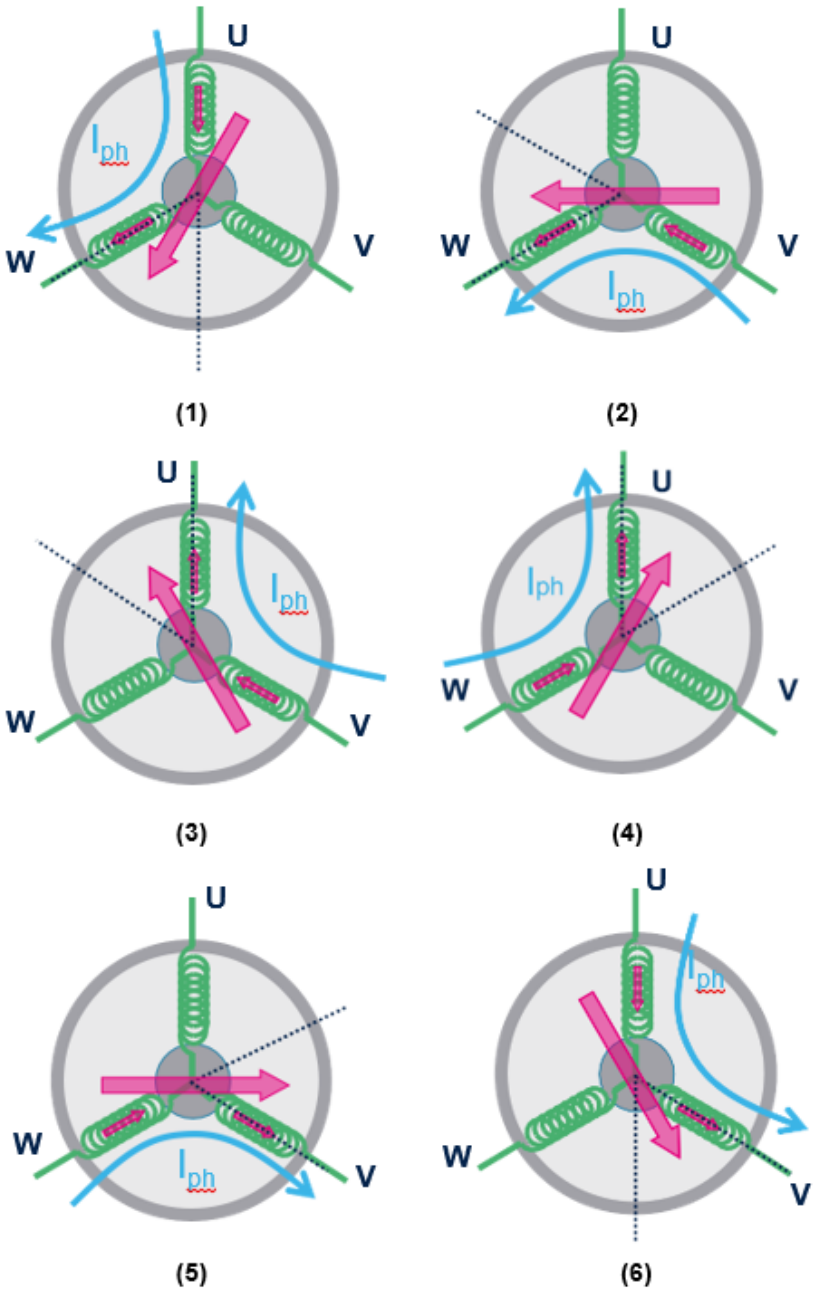
Şekil 3.6 Fırçasız doğru akım motorlarının enerjilendirilmesi

Şekil 3.6 fırçasız doğru akım motorlarında stator faz sargılarının enerjilendirilme aşamasını göstermektedir.



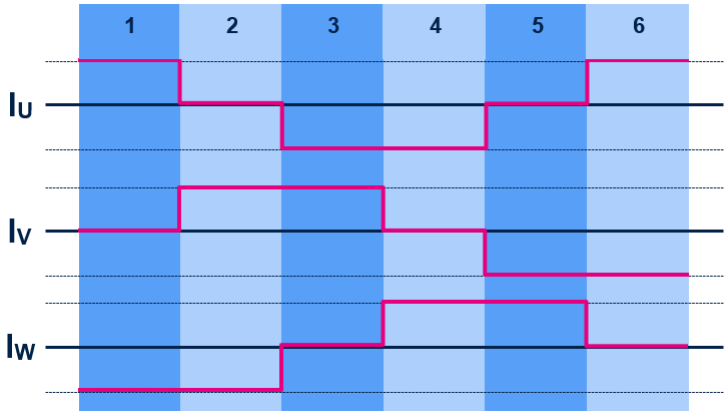
Şekil 3.7 Fırçasız doğru akım motorlarının sürülmesi

Şekil 3.7 fırçasız doğru akım motorlarında stator faz sargılarını enerjilendiren anahtarlama devre şemasını göstermektedir.



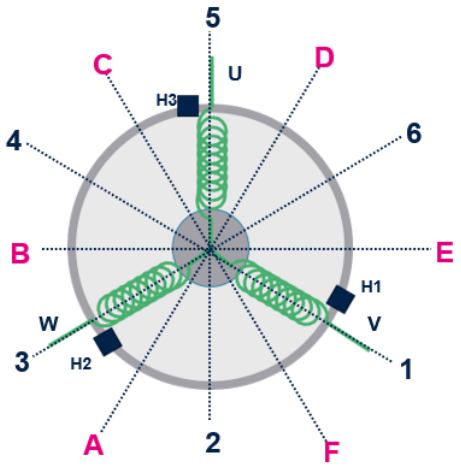
Şekil 3.8 Fırçasız doğru akım motorlarının 6 adımdaki rotor pozisyonları

Şekil 3.8 fırçasız doğru akım motorlarında stator faz sargılarının 6 adımda enerjilendirilmesiyle senkronize biçimde değişen rotor pozisyonlarını göstermektedir.



Şekil 3.9 Fırçasız doğru akım motorlarının 6 adımdaki akım dalga formları

Şekil 3.9 fırçasız doğru akım motorlarında stator faz sargılarının 6 adımda enerjilendirildiğindeki akım dalga formlarını göstermektedir.



Şekil 3.10 6 adımda sürme yöntemi ile rotor ve stator pozisyonları

Şekil 3.10 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının 6 adımda sürme yöntemi ile stator ve rotor pozisyonlarını göstermektedir.

Tablo 3.1 Rotor ve stator pozisyonları ile akım yönü

Rotor Pozisyonu	Stator Pozisyonu	Akım
1	A	U $\rightarrow$ W
2	B	V $\rightarrow$ W
3	C	V $\rightarrow$ U
4	D	W $\rightarrow$ U
5	E	W $\rightarrow$ V
6	F	U $\rightarrow$ V

Tablo 3.1'de rotor pozisyonu ve stator pozisyonu bilgileri ile akımın akış yönü gösterilmiştir.

3.3 Fırçasız Doğru Akım Motor Çeşitleri

Fan uygulamalarında kullanılan fırçasız doğru akım motorları genel anlamda 3 ana başlık altında incelenebilmektedir.

- İç Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru
- Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru
- Disk Tipi (Eksenel Akılı) Fırçasız Doğru Akım Motoru

Ayrıca fırçasız doğru akım motorları, hava aralığında meydana gelen akının şekline göre trapezoidal (kare dalga uyartımlı) tip ve sinüsoidal (sinüs dalga uyartımlı) tip olarak, sensör kullanımına bağlı olarak da sensörlü ve sensörsüz fırçasız doğru akım motorları olarak da sınıflandırılmaktadır.

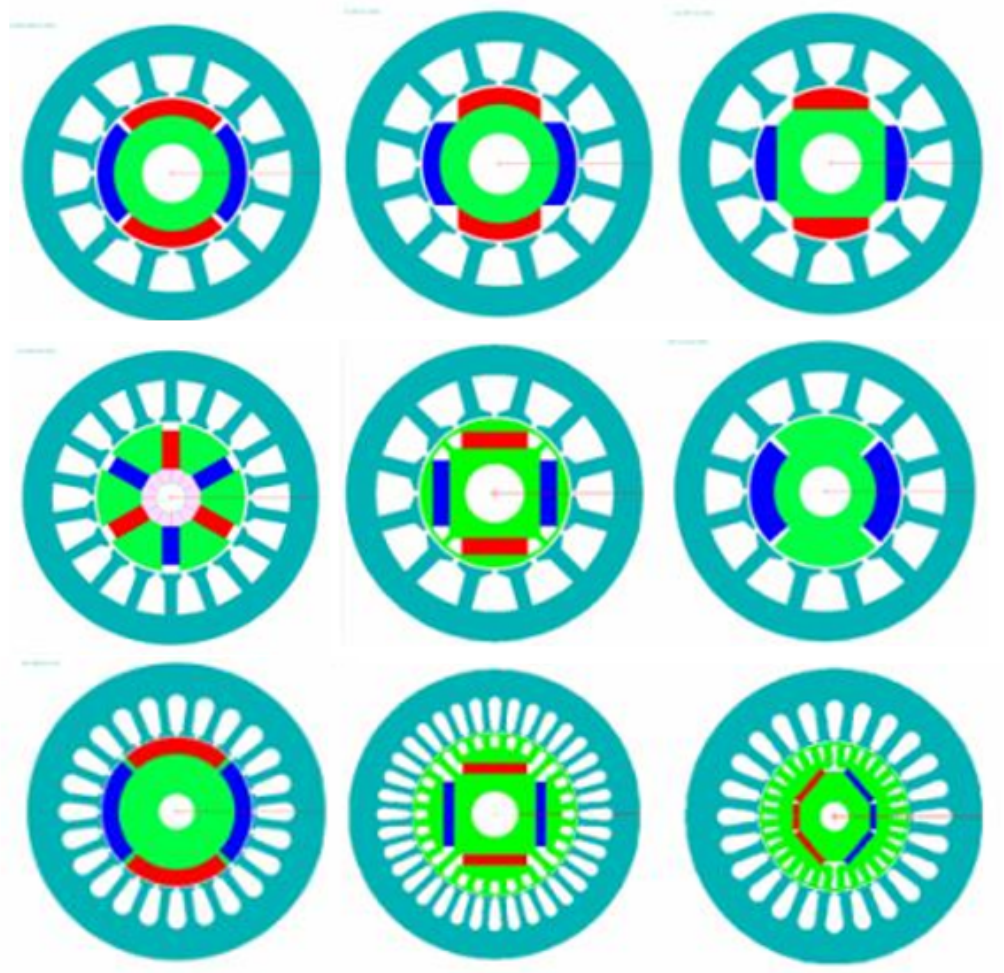
3.3.1 İç Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru

İç rotorlu fırçasız doğru akım (FDAM) motorları, klasik senkron ve asenkron motor yapılarına oldukça benzemektedir. Bu motorlarda sargıların yer aldığı stator kısmı motorun dış kısmını oluştururken daimi mıknatısların yer aldığı rotor kısmı motorun iç kısmında yer almaktadır. Rotoru çevreleyen stator yapısı, asenkron motor stator yapısına büyük ölçüde benzemektedir. İç rotorlu fırçasız doğru akım motorların yapısı, yüksek moment/eylemsizlik oranı nedeniyle düşük eylemsizlik momenti özelliklerine sahiptir. Bu nedenle, iç rotorlu fırçasız doğru akım motorları özellikle yüksek performanslı konum ve hız kontrolü gerektiren uygulamalar için ideal bir seçenektir.

İç rotorlu fırçasız doğru akım motorlarında mıknatıslar, rotorun dış yüzeyine ince şeritler halinde veya yay şeklinde sabitlenmektedir. Bu tasarımda özellikle yüksek hızlarda mıknatısların rotorun yüzeyinden koparak dışına çıkmasını önlemek amacıyla mıknatısların dikkatle sabitlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle rotorlar, yüksek elektriksel dirençli metal şeritler ile sarılarak mekanik sağlamlıkları artırılır.

İç rotorlu fırçasız doğru akım motorlarında mıknatıslar, gömülü ya da yüzey mıknatıslı olacak şekilde yerleştirilebilir. Gömülü mıknatıslı yapıların, manyetik malzemenin mıknatıslı olarak yerleştirilmesi veya rotor içinde mıknatıslanmasından kaynaklanan zorlukları bulunmaktadır. Ancak bu yöntem, yüksek hızlarda mıknatısların yerinden çıkması gibi mekanik sorunları ortadan kaldırır. Yüzey mıknatıslı yapılarda ise mıknatıslar, epoksi yapıştırıcı ile rotor sacına yapıştırılır veya plastik, alüminyum kalıplar içine yerleştirilerek mekanik sorunlar çözülmeye

çalışılır. Yüzey montajlı yapıda, rotor düzgün hava aralığı yapısına sahip olur ve bu da doğru ve dik eksen endüktanslarının birbirine eşit olmasını sağlar.



Şekil 3.11 İç rotorlu fırçasız doğru akım motor yapıları

Şekil 3.11 iç rotorlu fırçasız doğru akım motorlarında farklı tipteki motor yapılarını göstermektedir [42].

İç rotorlu fırçasız doğru akım motor yapısının sağladığı avantajlar;

- Yüksek Moment/Eylemsizlik Oranı: İç rotorlu yapılar, yüksek moment/eylemsizlik oranına sahiptir ve bu da motorun daha hızlı tepki vermesini sağlar.
- Kolay Soğutma: Stator sargıları dış yüzeyde bulunduğundan, dış rotorlu yapılara göre statorun soğuması daha kolaydır.

İç rotorlu fırçasız doğru akım motor yapısının sağladığı dezavantajlar;

- Mıknatısların Sabitlenmesi: Yüksek hızlarda mıknatısların yerinden çıkmasını önlemek için mıknatısların sabitlenmesi dikkatli yapılmalıdır.
- Üretim Zorlukları: Statorun seri üretimde sarılması ve işlenmesi oldukça zordur. Bu da maliyeti ve işçiliği artırır.

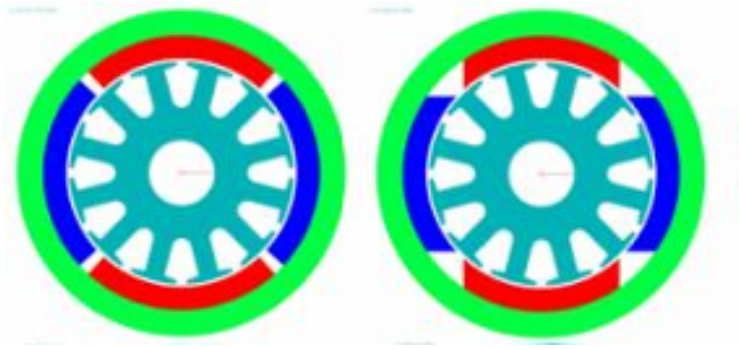
İç rotorlu FDAM, özellikle yüksek performanslı konum ve hız kontrolü gerektiren servo motor ve kompresör uygulamalarında kullanılır. Relüktans farklılıkları, ortalama elektriksel momente ilave olarak relüktans momentinin oluşmasına neden olur. Bu da motorun genel performansını etkiler. Ayrıca, gömülü mıknatıs tasarımları, düşük maliyetleri ve yüksek güç kapasiteleri ile gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bu yapısal özellikler ve performans avantajları, iç rotorlu BLDC motorları çeşitli endüstriyel uygulamalar için ideal hale getirmektedir.

3.3.2 Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru

Bu motorlarda sargıların yer aldığı stator kısmı motorun iç kısmında yer alırken daimi mıknatısların yer aldığı rotor kısmı motorun dış kısmında yer almaktadır. Rotorun, statorun dışında yer aldığı bu yapı en çok kullanılan fırçasız doğru akım motor yapısıdır.

Bu tasarımda kullanılan mıknatıslar rotor yüzeyine gömülü olduğu için dış rotorlu fırçasız doğru akım motor yapısı savrulmalara karşı oldukça dayanıklıdır. İç kısımda yer alan statorun oluk yapıları da, statorun dış tarafında kaldığı için seri üretimde sargı işleminin yapılması oldukça kolaydır.

İç rotorlu motorların tercih edilmesine sebep olan yüksek akı yoğunluğu, bu motorların tercih edildiği uygulamalarda gerekmemektedir. Bu nedenle ferrit mıknatıslar daha fazla tercih edilmektedir. Ferrit mıknatıslar, düşük maliyetleri ve yüksek korozyon dirençleri ile bilinirler. Bu açıdan özellikle fan uygulamalarında ferrit mıknatısların kullanılması avantaj sağlamaktadır. Ancak, ferrit mıknatısların kırılma dayanımlarının düşük olması ve rotordaki tork dalgalanmalarının yaratacağı sorunlar bu yapının bir dezavantajı olarak gösterilebilir. Rotordaki tork dalgalanmaları, anma hızlarında bile iç rotorlu tasarıma göre daha büyük etkiler yaratarak özellikle ilk kalkış anında daha yoğun olmak üzere titreşimlere neden olabilmektedir.



Şekil 3.12 Dış rotorlu fırçasız doğru akım motor yapıları

Şekil 3.12 dış rotorlu fırçasız doğru akım motorlarında farklı tipteki motor yapılarını göstermektedir [42].

Dış rotorlu fırçasız doğru akım motor yapısının sağladığı avantajlar;

- Kolay Üretim: Stator sargılarının dış yüzeyde bulunması, seri üretimde sarım işlemini kolaylaştırır ve üretim maliyetlerini düşürür.
- Savrulmaya Karşı Dayanıklılık: Mıknatıslar rotora gömülü olduğu için savrulmaya karşı oldukça dayanıklıdır.

Dış rotorlu fırçasız doğru akım motor yapısının sağladığı dezavantajlar;

- Rotor Dengesizlikleri: Rotordaki küçük dengesizlikler, anma hızlarında bile titreşimlere neden olabilir. Bu, iç rotorlu yapılara göre daha büyük bir sorundur.
- Mıknatıs Kırılma Problemi: Dış rotorlu motorlarda mıknatısların kırılması, karşılaşılan yaygın sorunlardan biridir.

Dış rotorlu fırçasız doğru akım motorları, yüksek eylemsizlik momentine sahiptir. Bu özelliği sayesinde ani yük değişimlerinde bile hızlarının sabit kalabilme özellikleri ile bu motorlar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu tip motorlar özellikle fan ve çamaşır makinası uygulamalarında tercih edilmektedir.

Tablo 3.2 İç ve dış rotorlu yapıların karşılaştırılması

FDAM Tasarımı	**İç Rotorlu**	**Dış Rotorlu**
Stator	* Sargılı stator dış kısımda yer alır.	* Sargılı stator iç kısımda yer alır.
Rotor	* Mıknatıslı rotor iç kısımda yer alır.	* Mıknatıslı rotor dış kısımda yer alır.
Dişli Kutusu	* Gereklidir.	* Gereksizdir.
Hız	* Yüksek hızlı motorlar için uygundur.	* Düşük ve orta hızlı motorlar için uygundur.
Eylemsizlik	* Düşük ataletlidir.	* Yüksek ataletlidir.
Gürültü	* Dönüş yönünün hızlı değiştirilmesi, motor içindeki hareketli parçalar arasındaki etkileşimler ve hava sürtünmesi nedeniyle gürültü oluşturur.	* Gürültü seviyesi daha azdır.
Bakım	* Daha az bakım gerektirir.	* Daha çok bakım gerektirir.
Verimlilik	* Yüksek verimlidir.	* İç rotorlu tasarıma göre daha az verimlidir.
Tork	* Daha az tork üretirler.	* Daha çok tork üretirler.
Güç Yoğunluğu	* Genellikle dış rotorlu tasarıma göre daha yüksektir.	* Daha düşüktür.
Avantajları	* Dönen milin atalet momenti düşüktür. * Stator ısı dağılımı verimliliği yüksektir. * Daha küçük boyutludur. * Kompakt bir tasarımı vardır. * Yüksek çıkış gücü sağlar.	* Moment ve akım kapasitesi daha çoktur. * Rotor ısı dağılımı verimliliği yüksektir. * Düşük tork dalgalanması vardır. * Hava aralığı büyüktür. * Yüksek tork sağlar.
Dezavantajları	* Yüksek manyetik akı yoğunluğu gerektirir. * Yüksek performanslı mıknatıs kullanımı gerektirir. * Tork dalgalanması yüksektir.	* Gömülü mıknatıslı rotor tasarımı karmaşıktır. * Mekanik kararlılığı bakımından zayıftır. * Stator sargılarınının soğutulması zordur.

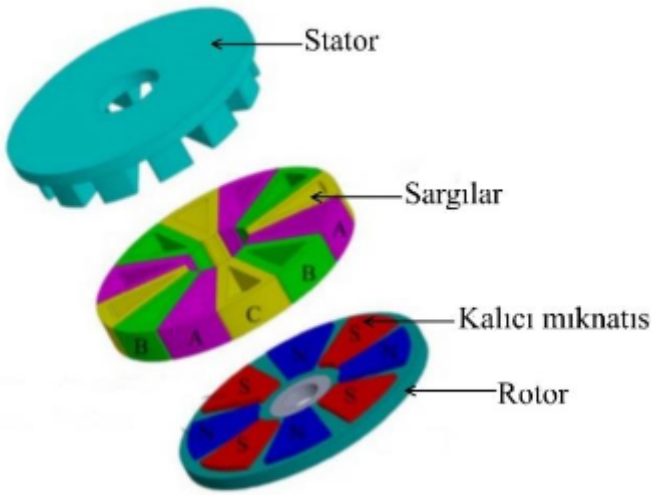
Tablo 3.2'de iç rotorlu ve dış rotorlu fırçasız doğru akım motorlarının karşılaştırılması gösterilmiştir.

3.3.3 Disk Tipi (Eksenel Akılı) Fırçasız Doğru Akım Motoru

Disk tipi fırçasız doğru akım motorları, genellikle düşük hız ve düşük güç uygulamaları için ideal bir çözümdür. Bu motorlarda, çelikten yapılmış bir disk rotorun bir yüzeyine mıknatıslar yerleştirilir. Karşısındaki statorda ise bu mıknatıslara uygun uyarma sargıları bulunur. Bu sargılar normal bobin şeklinde olduğu gibi baskılı devre şeklinde de üretilebilmektedir.

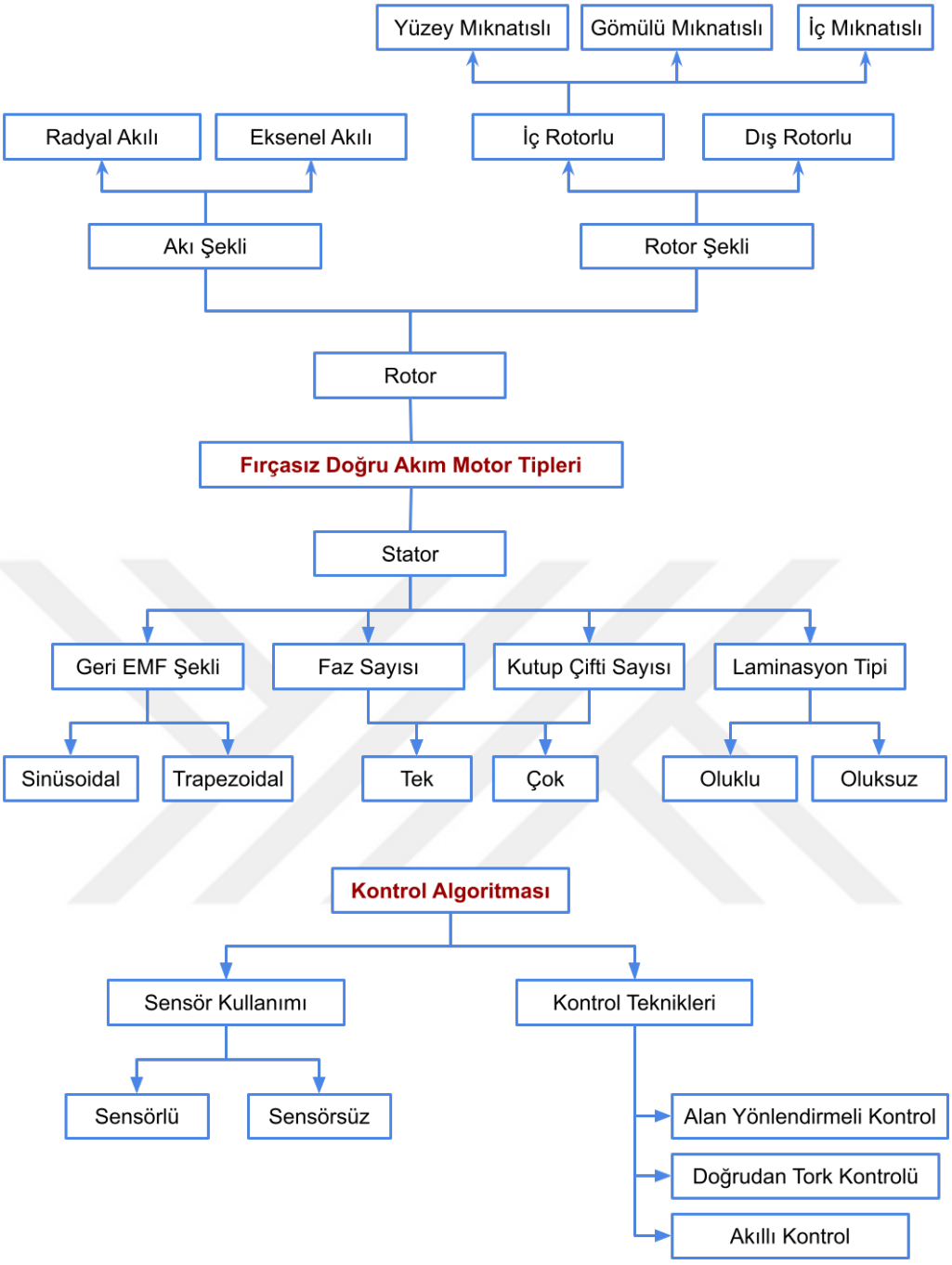
Disk tipi fırçasız doğru akım motorları tek stator ve tek rotor yapısından oluşabileceği gibi birden çok sayıda stator ve rotor yapısından da oluşabilmektedir. Ayrıca stator yapısı da oluklu veya oluksuz olarak yapılabilmektedir.

Düşük hızlarda, kapalı çevrim kontrol sistemi ve hız geri beslemesi sayesinde çok yumuşak bir performans elde edilir. Ancak motor hızı 1000 d/d'nin üzerine çıktığında rotor ve stator çelik yapısında ısınma sorunları ortaya çıkabilir. Bu durumda, motorun yüksek hızlarda çalışabilmesi için ek önlemler alınması gerekir ve bu da maliyeti artırır. Yüksek hızlardaki ısınma problemi nedeniyle, daha çok düşük hız ve düşük güç gerektiren uygulamalarda kullanılır. Düşük hızda yüksek güç ihtiyaçları için ise yüksek kutup sayılı iç rotorlu fırçasız doğru akım motorları tercih edilmektedir.



Şekil 3.13 Disk tipi fırçasız doğru akım motoru

Şekil 3.13 tek statorlu ve tek rotorlu disk tipi fırçasız doğru akım motor yapısını göstermektedir [43].



Şekil 3.14 Fırçasız doğru akım motor tipleri

Şekil 3.14 fırçasız doğru akım motor tiplerini ve kontrol algoritmalarını göstermektedir.

3.4 Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Kullanılan Malzemeler

Fırçasız doğru akım motorlarında kullanılan malzemeler genel olarak üç ana başlık altında incelebilir.

- Silisyumlu Saclar
- Sargı Sistemleri
- Daimi Mıknatıslar

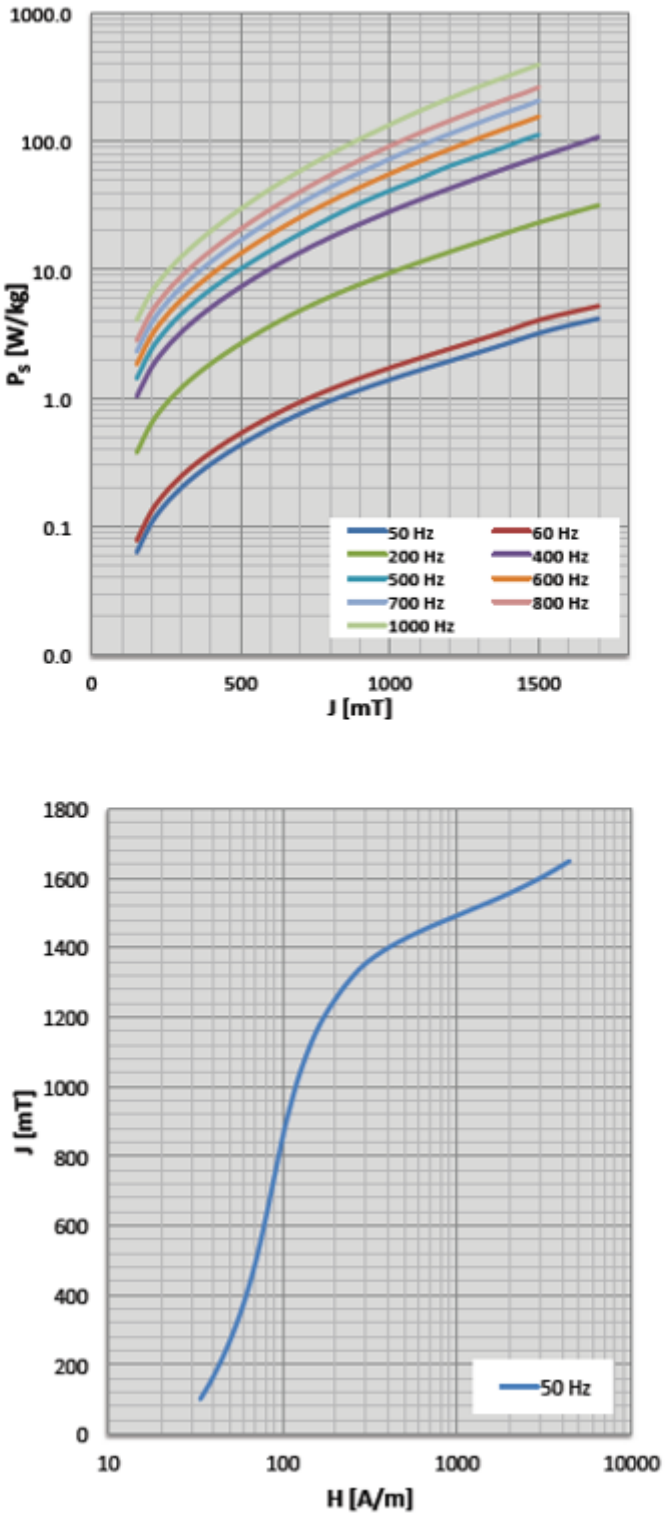
3.4.1 Silisyumlu Saclar

Silisyumlu saclar, elektrik motorlarında stator ve rotor sac paketlerinin yapımında kullanılan, yapısında düşük karbonlu ve silisyum alaşımları bulunan paslanmaz çeliktir. Stator sac paketlerinde kullanıldığında, manyetik alanın dönme hızına uyum sağlar ve motorun verimliliğini artırır. Rotor sac paketlerinde ise manyetik alanın iletilmesini kolaylaştırır ve motorun genel performansını iyileştirir. İçeriğindeki silisyum miktarı genellikle %0.5 ile %4 arasında değişir. Silisyum, çeliğin manyetik özelliklerini iyileştirerek demir kayıplarını azaltır ve böylece motor verimliliğini artırır.

Silisyumlu saclar, manyetik alanın yönünün değişmesi esnasında manyetik malzemelerde meydana gelen enerji kaybını (histerezis kaybı) minimize eder. Bu da motordaki demir kayıplarının azalarak enerji verimliliğinin artmasına ve dolayısıyla motor sıcaklığının azalmasına sebep olur. Bu saclar 0.3 mm, 0.5 mm gibi ince tabakalar halinde üretilir ve her tabaka arasında yalıtkan bir kaplama bulunur. Bu yapı, fuko akımı kayıplarını azaltarak motorun verimliliğini daha da artırır.

Silisyumlu saclar, manyetik alanın kolayca iletilebilmesini sağlar. Bu, motorun manyetik çekirdeklerinin daha etkili çalışmasına ve motor performansının artmasına yardımcı olur. Bu saclar yüksek sıcaklıklarda dahi manyetik özelliklerini koruyabilirler. Bu özellikleri ile motorun uzun süreli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar.

M400-50A sacı özelinde örnek verecek olursak, bu saclar 0.5 mm kalınlığında üretilen ve 1.5 T değerinde 4 W/kg demir kaybı değeri olan sac anlamına gelmektedir. Elektrik motorları, jeneratörler ve transformatörler gibi cihazların üretiminde kullanılırlar. Yüksek verimlilik, uzun ömür ve düşük ısı üretimi gibi avantajlar sağlayarak motorun genel performansını ve ömrünü etkilerler.



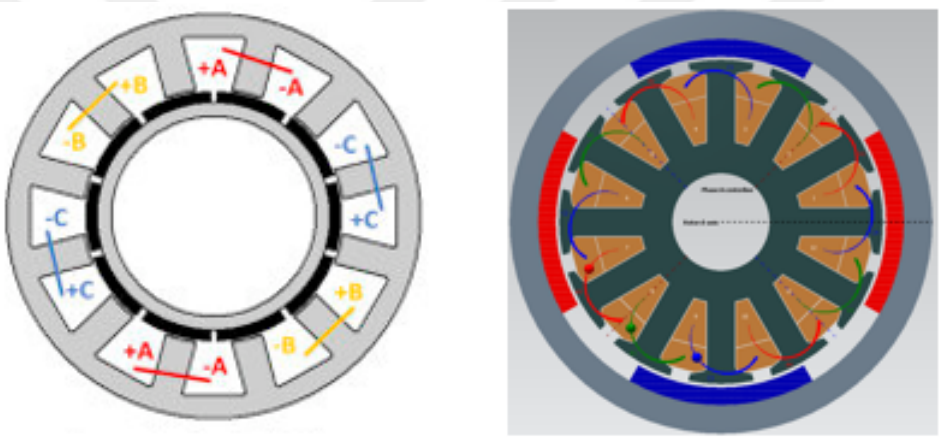
Şekil 3.15 M400-50A sacının spesifik özellikleri

Şekil 3.15 M400-50A sacının demir kayıpları ve manyetik alan yoğunluğu grafiklerini göstermektedir.

3.4.2 Sargı Sistemleri

Fırçasız doğru akım motorlarında kullanılan sargı sistemleri, motorun elektromekanik dönüşüm performansını doğrudan etkileyen kritik unsurlardır. Bu motorlarda genellikle konsantrik sargı tipi kullanılmakla birlikte dağıtılmış sargı yapısı da kullanılmaktadır. Bu sargı tipleri elektrik motorunda akımın dalga şeklini, elektromotor kuvvetinin şeklini ve hava aralığında meydana gelen manyetik akı yoğunluğunun şeklini etkilemektedir.

Konsantrik sargı tipinde sargılar stator dişlerine sarılmaktadır. Bu tip sargılar, daha kompakt ve hafif motor tasarımının yapılmasına neden olur. Ayrıca, üretim süreçleri de daha basittir ve maliyetler genellikle daha düşüktür. Konsantrik sargıda, hava aralığında meydana gelen manyetik akı yoğunluğu trapezoidal olmaktadır. Aynı şekilde akımın dalga şekli ve geri elektromotor kuvveti de trapezoidal olmaktadır.



Şekil 3.16 Konsantrik sargı tipi

Şekil 3.16 konsantrik sargı tipinin yapısını göstermektedir.

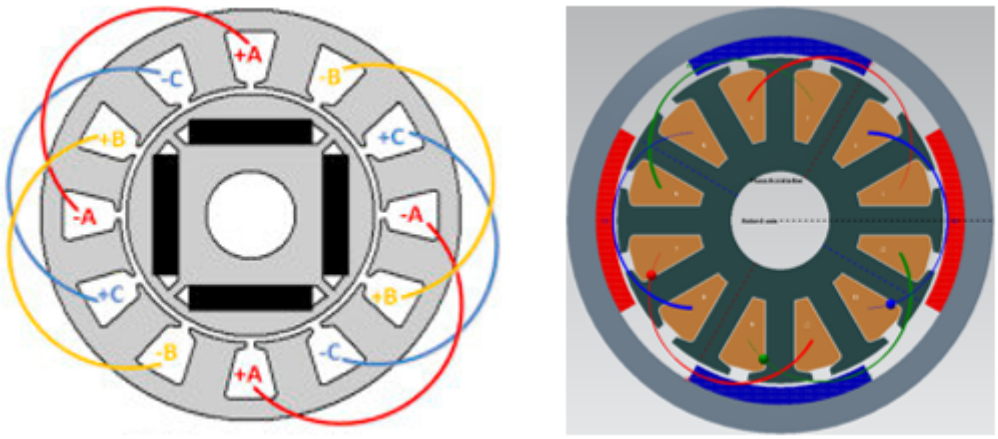
Konsantrik sargı yapısının avantajları;

- Daha kompakt ve hafif tasarım sağlarlar.
- Yüksek güç yoğunluğu sağlarlar.
- Yüksek kalkış moment ihtiyacı olan uygulamalar için idealdir.
- Üretimi kolaydır ve diğer yöntemlere göre daha ucuzdur.
- Kontrol algoritması daha basittir.
- Daha kolay kontrol edilebilen daha ucuz bir denetleyici ile sürülürler.

Konsantrik sargı yapısının dezavantajları;

- Trapez akım dalga formu nedeniyle daha yüksek harmonik içerirler.
- Daha fazla titreşim ve gürültüleri vardır.
- Komütasyon esnasında ve düşük hızlarda tork dalgalanmaları daha fazladır.
- Sinüsoidal dalga formuna göre nispeten daha zayıf performans ve daha düşük verimleri vardır.

Dağıtılmış sargı tipinde ise sargılar oluklara eşit adımlarla yerleştirilerek sarılmaktadır. Bu tür sargılar, motorun daha düzgün bir manyetik alan üretmesini sağlar ve daha az titreşim ile gürültü üretirler. Dağıtılmış sargılar, özellikle düşük hızda çalışan fırçasız doğru akım motorlarında yaygın olarak kullanılır.



Şekil 3.17 Dağıtılmış sargı tipi

Şekil 3.17 dağıtılmış sargı tipinin yapısını göstermektedir.

Dağıtılmış sargı yapısının avantajları;

- Akımın ve hava aralığında meydana gelen manyetik akı yoğunluğunun şekli sinüsoidaldır.
- Sinüsoidal akım dalga formu nedeniyle tork dalgalanması daha azdır.
- Daha düzgün moment üretirler.
- Daha az titreşim ve gürültü sağlarlar.
- Performans ve verimlilikleri daha yüksektir.

Dağıtılmış sargı yapısının dezavantajları;

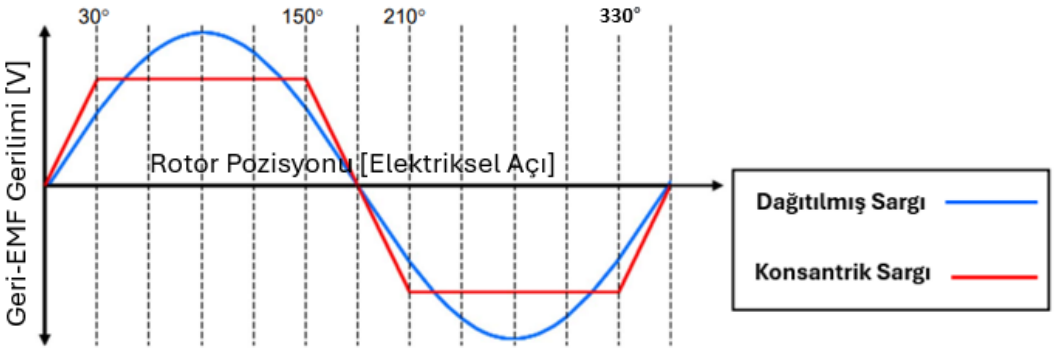
- Daha karmaşık sargı yerleşimi vardır.
- Üretim maliyetleri yüksektir.
- Kontrol algoritması daha karmaşık ve zordur.

Fırçasız doğru akım motor tasarımında sargı tipi seçimi, motorun kullanım amacına ve gereksinimlerine bağlıdır. Yüksek hassasiyet ve düşük gürültü gerektiren uygulamalar için dağıtılmış sargılar tercih edilirken, hafiflik ve kompakt tasarımın önemli olduğu durumlarda konsantre sargılar daha uygun olabilir.

Tablo 3.3 Konsantrik ve dağıtılmış sargı tipinin özellikleri

Konsantrik Sargı Tipi	**Dağıtılmış Sargı Tipi**
Hava aralığında meydana gelen manyetik akı yoğunluğu trapezoidaldır.	Hava aralığında meydana gelen manyetik akı yoğunluğu sinüsoidaldır.
Akımın dalga şekli trapezoidaldır.	Akımın dalga şekli sinüsoidaldır.
Geri EMF trapezoidaldır.	Geri EMF sinüsoidaldır.

Tablo 3.3'te konsantrik ve dağıtılmış sargı tiplerinin özellikleri açıklanmıştır.



Şekil 3.18 Geri-EMF gerilimi dalga formu

Şekil 3.18 konsantrik ve dağıtılmış sargı yapısının dalga formunu göstermektedir.

3.4.3 Daimi Mıknatıslar

Fırçasız Doğru Akım Motorlarında kullanılan mıknatıslar, motor performansını ve verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu mıknatıslar, motorun manyetik alanını oluşturmakta ve rotorun dönmesini sağlamaktadır. FDAM'de yaygın olarak kullanılan mıknatıs tipleri aşağıdaki gibidir.

- Al-Ni-Co Mıknatıslar
- Ferrit (Seramik) Mıknatıslar
- Nadir Toprak Elementi Mıknatıslar (Nd-Fe-B, SmCo)

Al-Ni-Co mıknatıslar alüminyum, nikel ve kobalt elementlerinden oluşmaktadır.

- Avantajlar: Yüksek sıcaklıklarda manyetik özelliklerini korur ve mekanik dayanıklılığı yüksektir.
- Dezavantajlar: Manyetik enerji yoğunluğu diğer mıknatıs türlerine göre düşüktür, bu nedenle genellikle yüksek hacimli uygulamalarda kullanılır.

Samaryum Kobalt (SmCo) mıknatıslar samaryum ve kobalt elementlerinden oluşmaktadır.

- Avantajlar: Yüksek sıcaklıklarda kararlıdır ve korozyona karşı dayanıklıdır. Manyetik enerji yoğunluğu yüksektir.
- Dezavantajlar: NdFeB mıknatıslarına göre daha pahalıdır. Ayrıca, mekanik dayanıklılığı düşüktür, bu nedenle dikkatli bir şekilde işlenmelidir.

Neodimyum Demir Bor (NdFeB) mıknatıslar nadir toprak elementi olan neodimyum, demir ve bor elementlerinden oluşmaktadır.

- Avantajlar: Yüksek manyetik enerji yoğunluğuna ve mükemmel manyetik özelliklere sahiptir. Bu mıknatıslar, küçük boyutlu motorlarda yüksek performans sağlar.
- Dezavantajlar: Yüksek maliyetlidir ve korozyona karşı hassastır. Korozyon direncini artırmak için genellikle kaplamalar kullanılır.

Ferrit (Seramik) mıknatıslar demir oksit ve baryum/stronsiyum karbonattan oluşmaktadır.

- Avantajlar: Düşük maliyetli, üretilebilirliği (yüzey montaj işlemleri) kolay, korozyona dayanıklı ve yüksek sıcaklıklarda kararlıdır.
- Dezavantajlar: Düşük manyetik enerji yoğunluğuna sahiptir, bu nedenle yüksek performans gerektiren uygulamalarda yetersiz kalabilirler.

Mıknatıs Türü	Çalışma Sıcaklığı	Pasa Karşı direnç	Manyetik Kararlılık	Üretim	Maliyet
Alniko	540 °C	Orta	Yüksek	Zor	%30
Ferrite	250 °C	Mükemmel	Zayıf	Zor	%5
SmCo	300 °C	Mükemmel	Çok yüksek	Yüksek	%100
NdFeB	220 °C	Zayıf	Çok yüksek	İyi	%60

Şekil 3.19 Mıknatıs tipleri ve özellikleri

Şekil 3.19 fırçasız doğru akım motorlarında kullanılan mıknatıs tiplerini ve çeşitli özelliklerini göstermektedir [44].

FDAM'de mıknatıs seçimi, motorun kullanım alanına ve performans gereksinimlerine bağlıdır. Örneğin, yüksek hassasiyet ve performans gerektiren uygulamalarda NdFeB mıknatıslar tercih edilirken, maliyetin önemli olduğu ve orta seviye performans gereksinimleri olan uygulamalarda ferrit mıknatıslar kullanılabilir.

Mıknatıs tipi seçimi ayrıca motorun boyutları, çalışma sıcaklıkları ve çevresel koşullar gibi faktörlere de bağlıdır. Her mıknatıs türünün kendine özgü avantajları ve dezavantajları olduğundan, belirli bir uygulama için en uygun mıknatısı seçmek, motor tasarımında kritik bir adımdır.

Fan uygulamaları özelinde ise özellikle çok uygun olmalarından ötürü ve yüzey montaj mıknatıslı yapının üretilebilirliğinin kolay olmasından dolayı ferrit mıknatıslar yoğun olarak kullanılmaktadır. Ferrit mıknatısların yüzeyleri düzgün ve pürüzsüz yapıdadır. Ferrit mıknatıslar, elektriksel açıdan yalıtkandırlar, yüksek sıcaklıklarda manyetik özelliklerini koruyabilme yeteneği sayesinde dayanıklıdır ve ham maddelerin bolluğu ve kolay bulunabilirliği nedeniyle düşük maliyetlidirler.

3.5 Fırçasız DA Motorlarının Avantaj ve Dezavantajları

Fırçasız doğru akım motorları, yüksek performans ve verimlilikleri sayesinde birçok uygulamada tercih edilmektedir.

Soğutma fan uygulamaları için fırçasız doğru akım motorları, yüksek verimlilikleri, uzun ömürlü olmaları ve düşük bakım gereksinimleri ile tercih edilmektedir. FDAM, geniş hız aralığında sabit tork sağlayarak, fan hızının hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar. Bu, enerji tasarrufu sağlayarak operasyonel maliyetleri düşürür ve daha sessiz bir çalışma ortamı sunar. Ayrıca, fırçaların ve komütatörün olmaması, motorun ömrünü uzatır ve bakım gereksinimlerini azaltır. Bu nedenle, soğutma fan uygulamaları için FDAM'ler, uzun vadede daha ekonomik ve verimli bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

3.5.1 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Avantajları

- Verimleri yüksektir ve soğutma performansları iyidir.

  Asenkron motorlarda rotor kayıpları, rotor devrindeki kaymaya bağlı olarak değişmekte ve yüksek değerlerde olmaktadır. Bu kayıplar motor için önemli bir ısı kaynağıdır. FDAM'lerde ise rotor kayıpları ihmal edilecek kadar küçük düzeydedir. Bu nedenle fırçasız doğru akım motorları, asenkron motorlara göre daha yüksek bir verime sahiptir.

  Fırçalı doğru akım motorlarında yer alan fırça ve kollektör yapısı bulunmadığı için mekanik kayıpları da olmamaktadır. Bu yüzden verimleri fırçalı doğru akım motorlarına göre yüksektir. Fırçalı doğru akım motorlarında sargılar rotorda yer alırken FDAM'de sargılar statorda yer almaktadır. Bu da ısının dış ortama transferini kolaylaştırmakta ve soğutma performansını iyileştirmektedir.

- Eylemsizlik momentleri düşüktür ve tepki süreleri hızlıdır.

  Fırçasız doğru akım motorlarında sürekli mıknatıs olarak nadir toprak elementi veya ferrit malzemeler kullanılır. Bu nedenle, asenkron motorların sincap kafesli rotoruna göre daha düşük bir eylemsizlik momenti bulunur. Eylemsizlik moment oranı da bu yüzden düşük olmaktadır. Eylemsizliklerinin düşük olması, bu motorların elektronik olarak kontrol edilmesine ve hızlarının değişmesine daha hızlı cevap vermesini sağlar.

- Uyarma akımına gerek duyulmamaktadır.

  Asenkron motorlarda manyetik alan etkisiyle rotoru uyarabilmek için endüktif karakterli mıknatıslanma akımlarına gerek vardır. Bu akımlar motorun verimini düşürmektedir. FDAM'de ise uyartım, rotordaki sabit mıknatıslarla sağlandığından bu olumsuzluklar ortadan kaldırılır.

- Güç yoğunlukları yüksektir.

  Fırçasız doğru akım motorlarının moment/akım oranı yüksektir. Bu nedenle, aynı kapasitedeki bir asenkron motordan daha küçük ve hafiftirler. Bu da motor hacim ve boyutunun önemli olduğu uygulamalarda tercih edilmelerine sebep olur.

- Gürültü seviyeleri düşüktür.

  Komütasyon olayı elektronik olarak gerçekleştiği için mekanik gürültüye sebep olacak fırça ve kollektör yapısı bulunmamaktadır.

- Bakım gereksinimleri azdır ve ömürleri uzundur.

  Fırça ve kollektör yapısını içermediği için, fırçasız doğru akım motorları kollektörlü motorlara göre daha az bakım gerektirir. Bu da motorun ömrünü ve güvenilirliğini artırır.

- Kolay kontrol edilebilirler.

  Fırçasız doğru akım motorların kontrolü, çıkış momenti doğrudan motor akımıyla orantılı olduğundan, asenkron ve senkron motorlara göre daha kolaydır. Dolayısıyla, karmaşık yapıdaki kontrol algoritmalarına gerek olmadığından sistemin toplam maliyetini de azaltır.

3.5.2 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Dezavantajları

- Maliyetleri yüksektir.

  Mıknatısların tedarik fiyatlarının ve üretimden kaynaklanan giderlerinin yüksek olması nedeniyle FDAM'lerin maliyeti, doğru akım motorlarına ve asenkron motorlara göre daha yüksektir. Ayrıca, sürekli mıknatısların çalışma sıcaklık aralığı, kullanılan malzemenin Curie sıcaklığı ile sınırlıdır. Curie sıcaklığı, bir mıknatısın manyetik özelliklerini kaybettiği sıcaklıktır. Bu sıcaklığın üzerine çıkıldığında, mıknatıs kalıcı olarak manyetik özelliklerini yitirir ve motor performansı olumsuz etkilenir. Dolayısıyla, sürekli mıknatısların güvenli ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için, çalışma sıcaklığı Curie sıcaklığının altında tutulmalıdır.

- Daimi mıknatısların demagnetize olma riskleri bulunmaktadır.

  Daimi mıknatıslar uzun süre kullanıldığında, atmosferik ve termal etkiler sonucunda kalıcı mıknatıs özelliklerini kaybedebilirler. Bu durum, sistemin güvenilirliğini azaltabilir.

- Kontrol edilebilen hız bölgesi sınırlıdır.

  Daimi mıknatıslar sabit bir uyartım sağladığından, FDAM'ler sınırlı bir alan zayıflatma bölgesinde çalışabilirler. Bu bölgede motorun kontrolü daha zordur ve hızlarının sınırlandırılması gerekmektedir.

- Sensörlü tip motorlar için rotor konum algılayıcıları gerekmektedir.

  FDAM'ler, motor sargılarının komütasyonu için mekanik rotor konum algılayıcılarına ihtiyaç duyarlar. Bu algılayıcılar, uygulama, performans, seri üretim ve maliyet açısından motor sistemlerinde çeşitli kısıtlamalar yaratabilir.

3.6 Fan Uygulamalarında Kullanılan Motor Tiplerinin Karşılaştırılması

Fan uygulamalarında kullanılan motor tiplerinden asenkron motorlar, fırçalı doğru akım motorları ve fırçasız doğru akım motorlarının yapısal olarak karşılaştırılması en basit hali ile aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 3.4 Elektrik motorlarının yapısal karşılaştırılması

	Asenkron Motor	**Fırçalı DC Motor**	**Fırçasız DC Motor**
Rotor	Kısa devre ringi bulunur.	Rotoru sargılıdır.	Dami mıknatıslar bulunur.
Stator	Statoru sargılıdır.	Daimi mıknatıslar bulunur.	Statoru sargılıdır.
Gerekli Akım	AC	DC	AC ve DC
Sargı Sistemi	Dağıtılmış sargı.	Konsantrik sargı.	Konsantrik sargı.
BEMF Dalga Formu	Sinüsoidal.	Trapezoidal.	Trapezoidal.
Rotor Konum Algılaması	Gerektirmez.	Gerektirmez.	Sensörlü veya sensörsüz kontrol.
Kontrolör	Gerektirmez.	Gerektirmez.	Gereklidir.
Kontrol Karmaşıklığı	Azdır.	Azdır.	Çoktur.

Tablo 3.4'te elektrik motorlarının yapısal olarak karşılaştırılmasını gösterilmektedir.

Tablo 3.5 Aynı güçteki asenkron motor, fırçalı DC motor ve fırçasız DC motorların özelliklerinin karşılaştırılması

Özellikler	**Asenkron Motor**	**Fırçalı DC Motor**	**Fırçasız DC Motor**
Kayıplar	Yüksek	Orta	Düşük
Verim	Düşük	Orta	Yüksek
Komütasyon Tekniği	Elektromanyetik	Mekanik	Elektronik
Komütasyon Anında Tork Dalgalanması	Yok	Var	Var
Isıl Performans	Orta	Düşük	Yüksek
Aşırı Yüklenebilme	Daha az	Daha az	Daha yüksek
Tepki hızı	Yavaş	Yavaş	Hızlı
Güç Yoğunluğu	Düşük	Orta	Yüksek
Çevresel Etkileri	Düşük gürültülü	Fırçalar nedeniyle gürültülü	Fırçalar olmadığı için gürültüsüz
Ömür	En uzun	Kısa	Uzun
Bakım	Gerektirir	Gerektirir	Gerektirmez
Çalışma Ortamı	Zor koşullarda çalışabilir	Zor koşullarda çalışabilir	Elektronik devreden ötürü sınırlıdır
Teknoloji	Çok eski	Çok eski	Yeni
Maliyet	Düşük	Orta	Yüksek
Uygulamalar	Torktaki gürültü ve dalgalanma, bu motorların kullanıldığı uygulamaları sınırlar. Bu motor, hız regülasyonunun gerektiği ve enerji kaynağının AC olduğu yerlerde kullanılır.	Bu motor, enerji kaynağının DC olduğu yerlerde kullanılır. Düşük güçlü DC motorlar otomasyon, kontrol sistemleri vb. alanlarda kullanılır. Diğer alanlarda kullanımı sınırlıdır ve genellikle yüksek kalkış momentinin gerektiği durumlarda tercih edilir.	Bu motorlar, fan sistemleri, elektrikli ve hibrit araçlar, havacılık, ev aletleri, sanayi, robotik, askeri, tıp gibi birçok uygulamada kullanılır. Bu uygulamalarda ağırlık ve hacim önemlidir. AC veya DC gerilimle beslenir.

Tablo 3.5'te aynı güçteki elektrik motorlarının karakteristik özelliklerinin karşılaştırılmasını gösterilmektedir.

3.7 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Uygulama Alanları

Fırçasız doğru akım motorları, sağladıkları avantajlardan ötürü birçok endüstriyel ve ticari uygulamada sıklıkla tercih edilmektedir. Yüksek verimlilik, düşük bakım gereksinimi, uzun ömür ve sessiz çalışma gibi özellikler, bu motorları birçok sektörde vazgeçilmez bir bileşen haline getirmiştir. Gelecekte, bu motorların yeni uygulama alanlarında da yaygınlaşması beklenmektedir. Bu motorlar, fan sistemleri, elektrikli ve hibrit araçlar, havacılık ve uzay, ev aletleri, sanayi, robotik ve otomasyon, askeri, tıp cihazları gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Aşağıda bu uygulama alanlarından bazıları açıklanmıştır.

3.7.1 Otomativ Endüstrisi

Fırçasız doğru akım motorları, elektrikli araçlar (EA'lar) ve hibrit elektrikli araçlar (HEA'lar) gibi otomotiv endüstrisinin çeşitli alanlarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Elektrikli araçların tahrik motorları olarak kullanıldığında, yüksek verimlilikleri, düşük bakım gereksinimleri ve uzun ömürleri sayesinde önemli avantajlar sunarlar. Aynı zamanda bu motorlar, güç aktarma organlarında, elektrikli direksiyon sistemlerinde ve klima kompresörlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

3.7.2 Havacılık ve Uzay

Havacılık ve uzay endüstrisinde FDAM'ler, yüksek güvenilirlik ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bu motorlar, insansız hava araçları (İHA'lar), uçakların aktüatör sistemleri ve uydu tahrik sistemlerinde kullanılmaktadır. Hafif ve kompakt tasarımları, bu tür uygulamalar için kritik öneme sahiptir.

3.7.3 Tıp Cihazları

Tıbbi cihazlarda, sessiz çalışması, yüksek hassasiyeti ve güvenilirliği gibi büyük avantajlar sunmalarından dolayı bu motorlar tercih edilmektedir. Bu motorlar, cerrahi robotlar, diş hekimliği ekipmanları, tıbbi pompalar ve vantilatörler gibi cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sessiz çalışma özellikleri, özellikle hastane ortamlarında önemli bir tercih sebebidir.

3.7.4 Endüstriyel Otomasyon

Endüstriyel otomasyon sistemlerinde, hassas konumlandırma ve hız kontrolü gerektiren uygulamalar için fırçasız doğru akım motorları idealdir. Robotik kollar, CNC makineleri, taşıma sistemleri ve paketleme makineleri gibi çeşitli endüstriyel ekipmanlarda kullanılmaktadır. Yüksek verimlilikleri ve uzun ömürleri, bu motorların endüstriyel otomasyon uygulamalarında tercih edilmesinin başlıca nedenleridir.

3.7.5 Tüketici Elektroniği

Tüketici elektroniği alanında FDAM'ler, fanlar, bilgisayar sabit diskleri, CD/DVD sürücüleri ve elektrikli aletler gibi birçok cihazda kullanılmaktadır. Özellikle sessiz ve verimli çalışma gereksinimleri nedeniyle, bu motorlar modern tüketici elektroniği ürünlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

3.7.6 Yenilenebilir Enerji Sistemleri

FDAM'ler, yenilenebilir enerji sistemlerinde de önemli bir rol oynamaktadır. Rüzgar türbinleri, güneş enerjisi sistemleri ve hidroelektrik jeneratörlerde kullanılmaktadır. Bu motorların yüksek verimliliği ve güvenilirliği, enerji üretim sistemlerinin performansını artırmak için kritik öneme sahiptir.

3.7.7 Pompa Sistemleri

FDAM'ler, su pompalama sistemlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle tarımsal sulama ve su arıtma tesislerinde, bu motorlar yüksek verimlilik ve düşük enerji tüketimi sunar. Aynı zamanda, güneş enerjisiyle çalışan su pompalarında da sıkça tercih edilmektedirler.

3.7.8 Drone Uygulamaları

Drone teknolojisinde, yüksek güç-ağırlık oranı ve verimlilikleri sayesinde fırçasız doğru akım motorunun kullanımı önemli bir rol oynamaktadır. Bu motorlar, hem ticari hem de askeri dronlarda kullanılmaktadır. Tarım, lojistik, güvenlik ve hava fotoğrafçılığı gibi çeşitli alanlarda dronların yaygınlaşmasıyla birlikte, FDAM'nin önemi daha da artmaktadır.

3.7.9 Ev Uygulamaları

Ev içi uygulamalarda, FDAM'ler çeşitli cihazlarda kullanılmaktadır. Elektrikli süpürgeler, mutfak robotları, çamaşır makineleri ve klima sistemleri gibi ev aletlerinde, sessiz ve verimli çalışmaları nedeniyle tercih edilmektedirler. Enerji tasarrufu sağlayarak kullanıcı dostu bir deneyim sunarlar.

3.7.10 HVAC (Isıtma, Havalandırma ve Klima) Uygulamaları

HVAC sistemlerinde fırçasız doğru akım motorları, enerji verimliliği ve sessiz çalışmaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Isıtma, havalandırma ve klima ünitelerinde, motorların yüksek verimliliği, enerji maliyetlerini düşürmeye yardımcı olurken, sessiz çalışmaları konforlu bir iç ortam sağlamaktadır. HVAC sistemlerinde kullanılan FDAM'ler, ayrıca daha uzun ömürlü ve düşük bakım gereksinimli olup, işletme maliyetlerini azaltmaktadır.

4
REFERANS ASENKRON MOTORUN TASARIMI VE ANALİZİ

4.1 ANSYS RMxprt Arayüzü

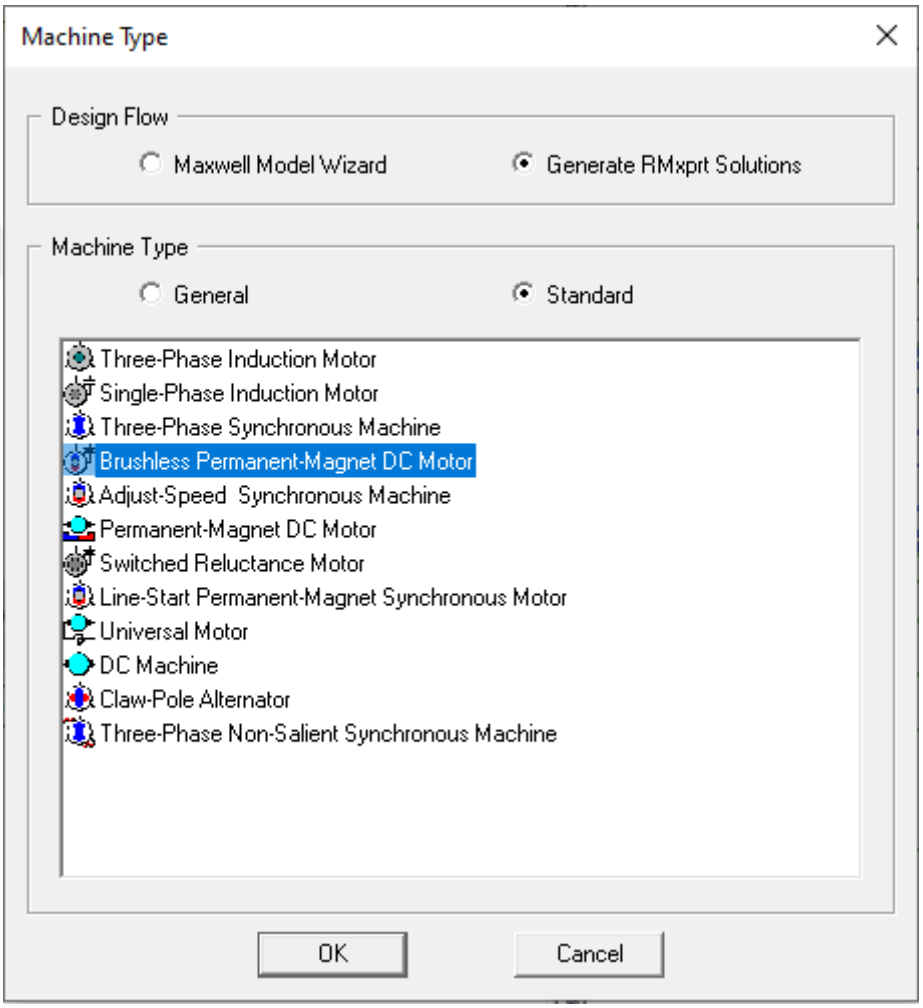
Bu tez çalışmasında elektromanyetik analizler için ANSYS Maxwell yazılımı kullanılmıştır. RMxprt arayüzü kullanılarak, analitik motor teorisi ve eşdeğer manyetik devre yöntemleri ile asenkron ve fırçasız doğru akım motorlarının tasarımındaki temel parametreler ve özellikler tanımlanmıştır. RMxprt ile tasarımı yapılan bu motorlarda, farklı tasarım değişikliklerinin etkileri hızlı ve verimli bir şekilde analiz edilebilmiştir. Bu analizlerin ardından, RMxprt sonuçları ANSYS Maxwell'in 2D elektromanyetik simülasyon modülüne aktarılmıştır. RMxprt'nin ANSYS Maxwell ile entegrasyonu, elektrik makinelerinin tasarım sürecini optimize eder ve tasarımcıların daha hassas ve güvenilir analizler yapmalarını sağlar. Bu sayede tasarım süreci hızlanır ve nihai ürünün performansı en üst düzeye çıkarılabilir.

Bu çalışmada RMxprt kullanılarak, 250 W çıkış gücüne sahip, 12 stator oluğu ve 8 kutuptan oluşan, 25 mm paket boyunda, rotorunda ferrit mıknatıslar bulunan ve oluk başına 320 sipirden oluşan tam kalıp konsantrik sargı yapısına sahip bir FDAM tasarlanmıştır. Bu FDAM için mıknatıs optimizasyonu yapılarak maliyet ve performans karşılaştırması yapılmıştır. Ayrıca, aynı çıkış gücüne sahip bir referans asenkron motor tasarlanmış ve bu motorların verim değerleri, çıkış güçleri, giriş güçleri, toplam kayıpları ve diğer performans özellikleri hesaplanarak, karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. Tasarımı yapılan fırçasız doğru akım motorunun güç tüketim analizleri, değişken çalışma koşulları göz önünde bulundurularak yapılmış, farklı çalışma gereksinimlerine göre hızlar kontrol edilmiş ve simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

4.1.1 RMxprt Elektrik Makinesi Seçim Penceresi

RMxprt, DC motorlar, senkron motorlar, asenkron motorlar ve fırçasız DC (BLDC) motorlar gibi çeşitli elektrik makinelerinin tasarımı için önceden tanımlanmış şablonlar sunar. Bu şablonlar, makine türüne göre özelleştirilmiş giriş parametreleri ve varsayılan değerlerle birlikte gelir.

Bu çalışmada da, bu makinelerden fırçasız doğru akım motoru seçilmiş ve bu motorun tasarımı ile elektromanyetik analizleri yapılmıştır.



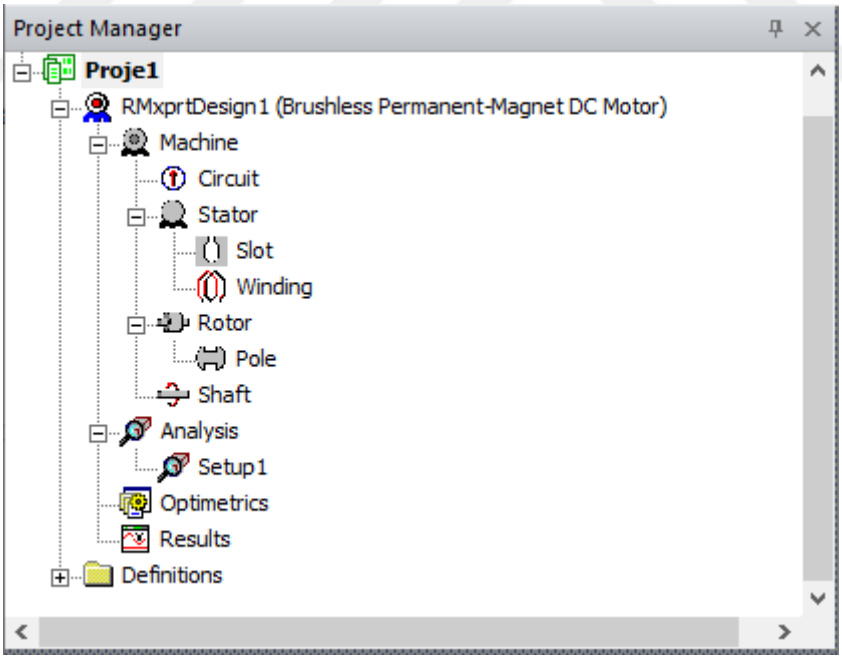
Şekil 4.1 RMxprt elektrik makinesi seçim arayüzü

Şekil 4.1'de RMxprt'in elektrik makinesi seçim arayüzü gösterilmiştir.

4.1.2 RMxprt Proje Yönetim Penceresi

RMxprt elektrik makinesi seçim arayüzünden uygun elektrik motoru seçildiğinde, program o motora ait proje dosyasını oluşturacaktır. Seçtiğimiz fırçasız doğru akım motoru için program tarafından belirlenen ana parametreleri dört ana başlık altında özetleyebiliriz.

- Makine
  - Devre
  - Stator
  - Rotor
  - Mil
- Analiz
- Parametrik
- Sonuçlar

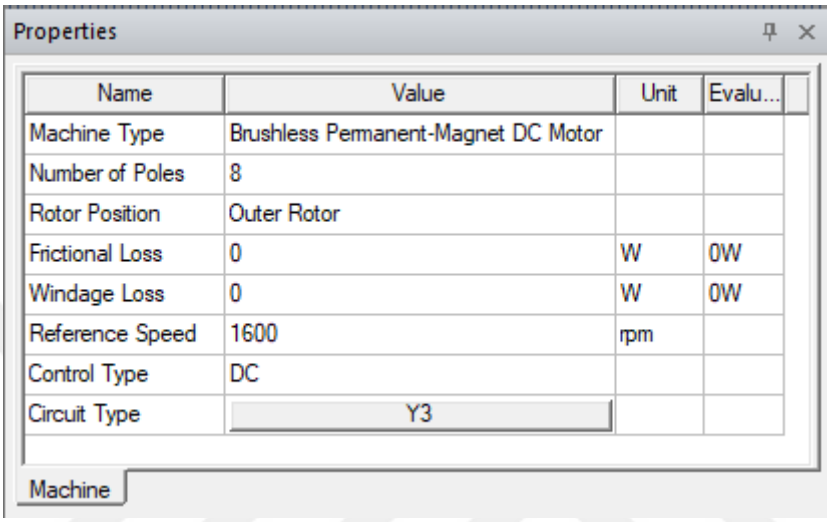


Şekil 4.2 Proje yönetim penceresi

Şekil 4.2 RMxprt'in proje yönetim penceresini göstermektedir.

4.1.3 Makine Özelliklerinin Penceresi

Ansys RMxprt modülünde, elektrik makinasının türü, kutup sayısı, rotor pozisyonlarının konumu, sürtünme ve vantilasyon kayıpları, referans hızı, kontrol tipi ve devre tipi gibi makinaya özel bilgilerin girildiği bir pencere bulunmaktadır. Bu pencere ve bilgi girişlerinin nasıl yapılacağı Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Kontrol tipi DC veya CCC (Akım Kesme Kontrolü) olabilir. Fırçasız doğru akım motoru için ise altı farklı devre tipi kullanılmaktadır.



Şekil 4.3 Makine özellikleri

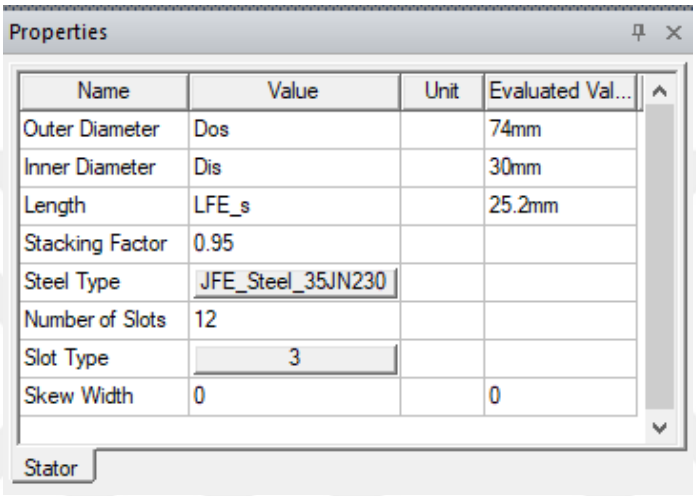
Kullanılan devre tipleri maddeler halinde aşağıdaki gibi açıklanmıştır. Tasarıma uygun devre tipinin seçilmesi gerekmektedir.

- Y3 – Y Tip, 3Φ
- L3 – Döngü Tip, 3Φ
- S3 – Yıldız Tip, 3Φ
- C2 – Çapraz Bağlantılı Tip, 2Φ
- L4 – Döngü Tip, 4Φ
- S4 – Yıldız Tip, 4Φ

Bu devre tipleri ile tasarlanacak motorun bağlantı şekli ve faz sayısı tanımlamaktadır. Tasarımı yapılacak elektrik motoru 2, 3 veya 4 fazlı olabilmektedir.

4.1.4 Stator Özelliklerinin Penceresi

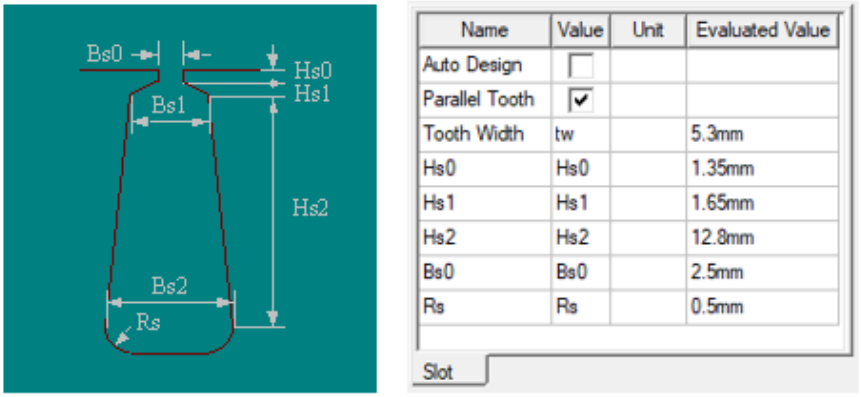
Ansys RMxprt modülünde, stator laminasyon sacının dış çapı, iç çapı, paket boyu, istifleme faktörü, sac tipi, oluk sayısı ve oluk şekli gibi stator özelliklerinin tanımlandığı bilgi giriş penceresi vardır. Bu pencere görseli Şekil 4.4'te verilmiştir. İstifleme faktörü, üretim firmasının kapasitesine bağlı bir katsayıdır. Sac tipi, yazılımın kendi kütüphanesinden seçilebileceği gibi, temin edilen sacın B-H grafikleri ve malzemeye ait sac kayıpları özellikleriyle kütüphaneye tanımlanacak yeni bir malzeme de olabilir. Bu çalışmada, programın kütüphanesinde bulunan JFE Steel 35JN230 sacı kullanılmıştır.



Şekil 4.4 Stator bilgi girişi penceresi

4.1.5 Oluk Şekli ve Boyutlarının Tanımlanması

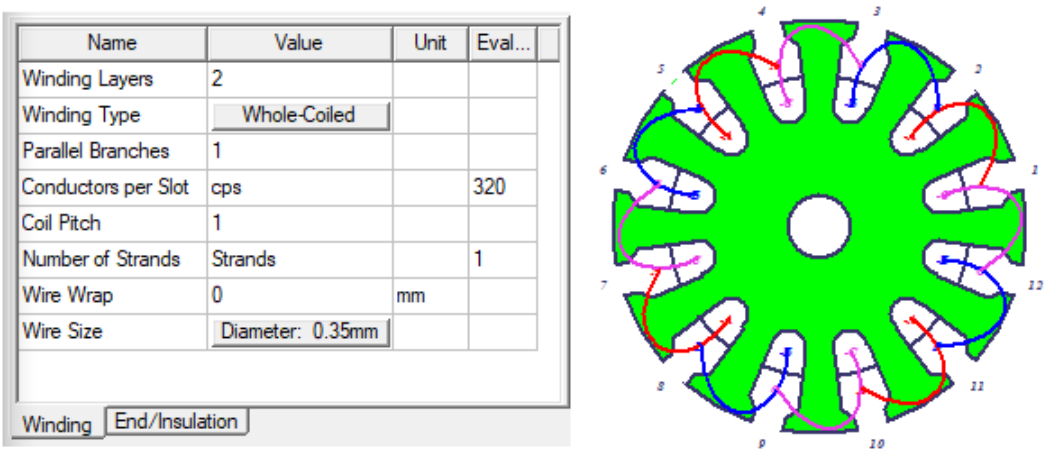
Oluk şekli ve oluk boyutları, oluk tipi seçildikten sonra tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, RMxprt arayüzünde tanımlanmış 3 numaralı oluk yapısı kullanılmıştır. Şekil 4.5'te oluk şekli ve oluk boyutları gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Oluk şekli ve oluk boyutları

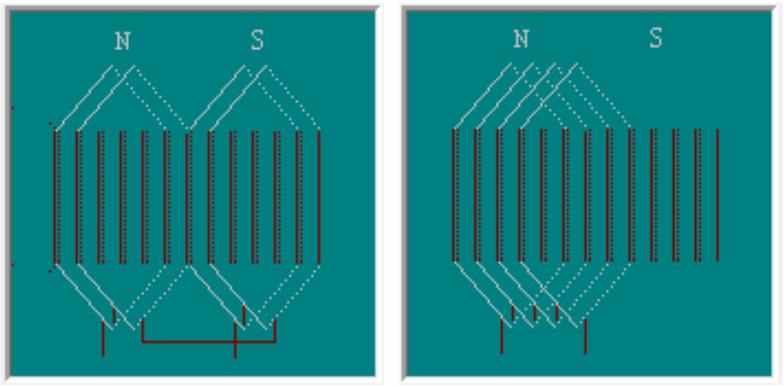
4.1.6 Stator Sargı Özelliklerinin Belirlenmesi

Stator sargısının özellikleri ve sargı yapısı, bir elektrik motorunun performansında kritik etkiye sahiptir. Şekil 4.6'da stator sargı özellikleri ve konsantrik sargı yapısı gösterilmiştir. Burada sargı katman sayısı (tek katmanlı veya çift katmanlı), sargı tipi (tam kalıp veya yarım kalıp), paralel kol sayısı, oluk başına iletken sayısı, bobin adımı (hatve), iletken başına tel sayısı, iletken telin çift taraflı izolasyon kalınlığı ve iletken çapı belirlenmektedir.



Şekil 4.6 Stator sargı özellikleri ve sargı yapısı

RMxprt arayüzünde, tam kalıp ve yarım kalıp sargı tipleri bulunmaktadır. Bu sargı tipleri Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Bu çalışmada, konsantrik sargı yapısı için tam kalıp sargı tipi kullanılmıştır.

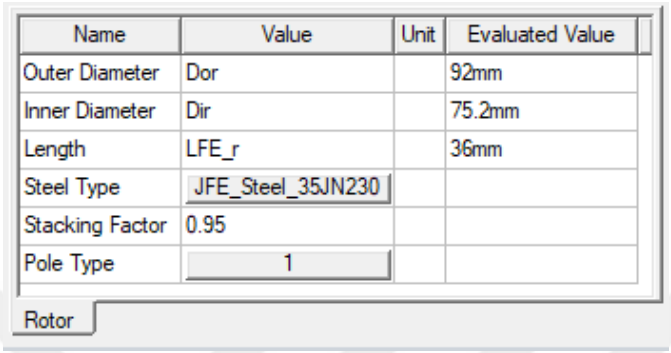


Şekil 4.7 Tam kalıp ve yarım kalıp sargı tipleri

Ayrıca bu pencere ile sargı başı özellikleri veya yarım sipir uzunluğu bilgisi de belirlenmektedir. İzolasyon penceresi ile elektrik motorunda kullanılan oluk içi, oluk ağzı ve faz aralarında kullanılan yalıtkanların kalınlıkları tanımlanmaktadır.

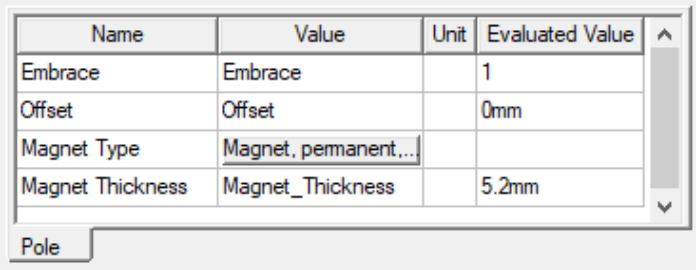
4.1.7 Rotor Özellikleri Penceresi

Rotor özellikleri tanımlanırken, rotor laminasyonunun dış çapı, iç çapı, paket boyunun uzunluğu, kullanılan elektriksel sacın tipi, istifleme faktörü ve kutup tipi belirtilmektedir. Kutup tipi, mıknatısların yüzey montajlı veya gömülü mıknatıslı olmasına göre değişmektedir. Şekil 4.8'de tanımlanmış rotor özellikleri gösterilmiştir. Bu tasarımda, yüzey montajlı tip kullanılmıştır.

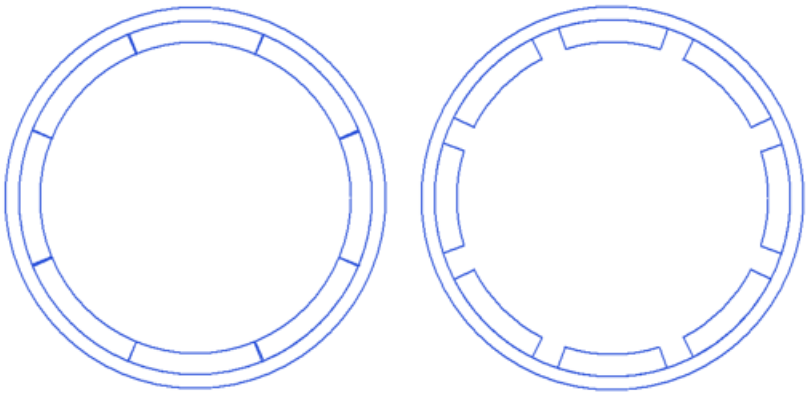


Şekil 4.8 Rotor bilgi girişi penceresi

Şekil 4.9'da kutup özellikleri gösterilmektedir. Burada kutup yayı uzunluğunun maksimum olabilecek yay mesafesine oranı belirtilmektedir. Değeri 0 ile 1 arasında bir değer olmaktadır. Şekil 4.10'da kutup yayı oranının 1 ve 0.8 olması durumu gösterilmiştir. Kullanılan mıknatısın tipi ve kalınlığı da burada tanımlanmaktadır.



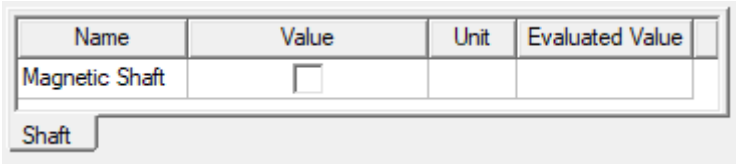
Şekil 4.9 Kutup özellikleri



Şekil 4.10 Kutup yayı oranı

4.1.8 Mil Özelliklerinin Penceresi

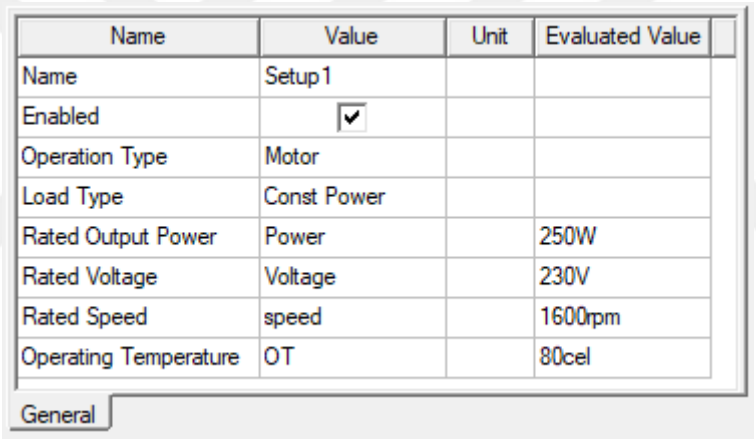
Şekil 4.11'de mil özellikleri penceresi gösterilmiştir. Burada milin manyetik malzemeden yapılıp yapılmadığı tanımlanmaktadır.



Şekil 4.11 Mil özellikleri

4.1.9 Analiz Kurulum Penceresi

Şekil 4.12'de fırçasız doğru akım motorunun analiz kurulum penceresi gösterilmiştir. Burada motor çalışma için, nominal çıkış gücü, nominal gerilim, nominal hız ve çalışma sıcaklığı değerleri tanımlanmaktadır.



Şekil 4.12 Analiz kurulum penceresi

Motor çalışma için beş farklı yük tipi tanımlanabilmektedir.

- Sabit Hız: Motorun hızı sabittir.
- Sabit Güç: Motorun çıkış gücü sabittir.
- Sabit Moment: Motor momenti sabit olup hızdan bağımsızdır.
- Doğrusal Moment: Motor momenti hızı ile doğrusal olarak artar.
- Fan Yükü: Yük, hız ile doğrusal olmayan bir şekilde değişir.

4.2 250 W İç Rotorlu Asenkron Motor Tasarımı

Bu tez çalışmasında fan uygulamalarında kullanılmak üzere bir FDAM tasarlanmıştır. Bu motorun performans, maliyet vb. açılardan analizlerinin karşılaştırmalı olarak yapılabilmesi için, önce fan uygulamalarında yaygın olarak kullanılan 250 W gücünde bir asenkron motor tasarlanmış, daha sonra bu asenkron motor, FDAM ile karşılaştırmada referans olarak kullanılmıştır. Her iki motor için de tasarım parametreleri ve simülasyon sonuçları detaylı olarak verilmiştir.

4.2.1 24 Oluk ve 4 Kutuplu Asenkron Motor Tasarımı

Bu çalışmada FDAM ile karşılaştırmada referans olarak kullanılmak üzere, 24 oluklu, 4 kutuplu , 400 V'luk üç fazlı AC şebekeden beslenen, nominal çalışmada 1390 d/d ve 250 W çıkış gücü değerlerine sahip bir asenkron motor tasarlanmıştır. Asenkron motorun geometrik parametreleri ve tasarım kriterleri aşağıda Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Asenkron motor makine parametreleri

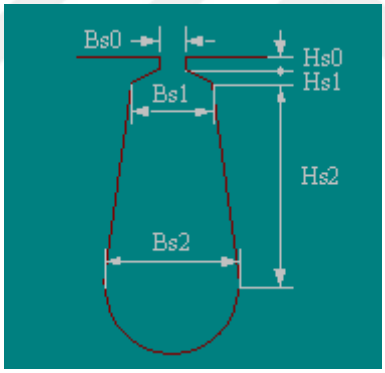
Parametre	**Değer**	**Birim**
Kutup Sayısı	4	
Ek Kayıp Katsayısı	0.023	
Sürtünme Kaybı	1	W
Vantilasyon Kaybı	0	W
Referans Hız	1375	rpm

Buradaki ek kayıp katsayısı, TS-EN 60034-2-1 (Döner elektrik makineleri-Bölüm 2-1: Kayıplar ve verimin deneylerle belirlenmesinde kullanılan standart yöntemler) standardında tanımlanmış olup, üretim yapan firmanın kalitesine göre de değişmektedir.

Tablo 4.2 Stator özellikleri

Parametre	**Değer**	**Birim**
Dış Çap	106.5	mm
İç Çap	62	mm
Paket Boyu	55	mm
İstifleme Faktörü	0.93	
Sac Tipi	POSCO M700-50A	
Oluk Sayısı	24	
Oluk Tipi	2	
Laminasyon Sektör Sayısı	1	
Pres Levha Kalınlığı	0	mm
Helis Genişliği	0	Oluk

Oluk tasarımında 2 numaralı oluk tipi seçilmiştir ve seçilen oluk tipi Şekil 4.13'te gösterilmiştir. RMxprt stator özellikleri penceresinden seçilen 2 numaralı oluk şekli için gerekli geometrik boyutlar Tablo 4.3'te belirtilmiştir. Oluk tasarımı yapılırken paralel diş özelliği kullanılmıştır. Bs1 ve Bs2 değerleri diş genişliği referans alınarak otomatik olarak tanımlanmıştır.

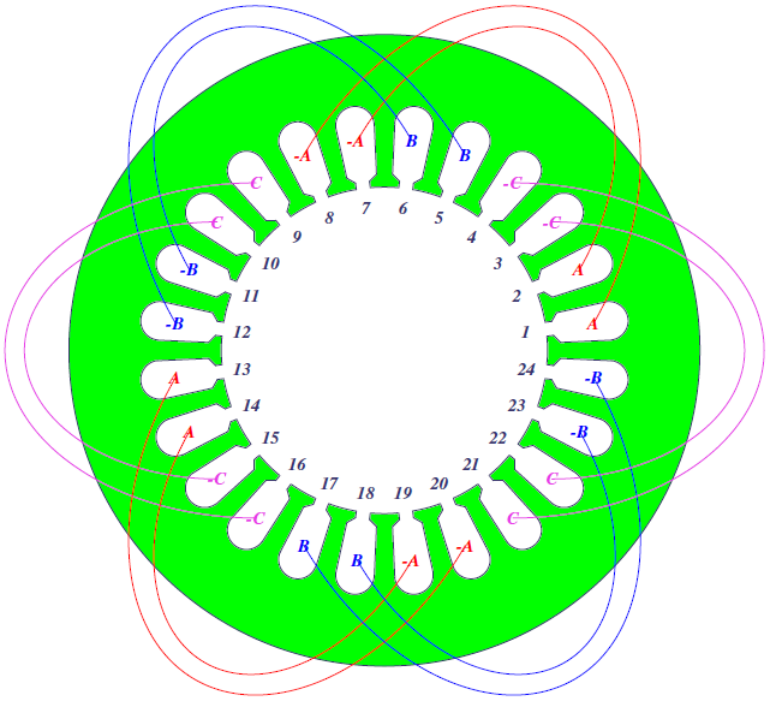


Şekil 4.13 Oluk tipi

Tablo 4.3 Oluk boyutları

Parametre	**Değer**	**Birim**
Paralel Diş	Evet	
Diş Genişliği	4.8	mm
Hs0	0.69	mm
Hs1	0.6	mm
Hs2	8.315	mm
Bs0	2.05	mm
Bs1	3.65624	mm
Bs2	5.84562	mm

Stator sargısı Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Sargı tasarımında dağıtılmış sargı yapısı kullanılmıştır. Stator sargısının bilgileri ve izolasyon kalınlıklarının özellikleri Tablo 4.4'te belirtilmiştir.

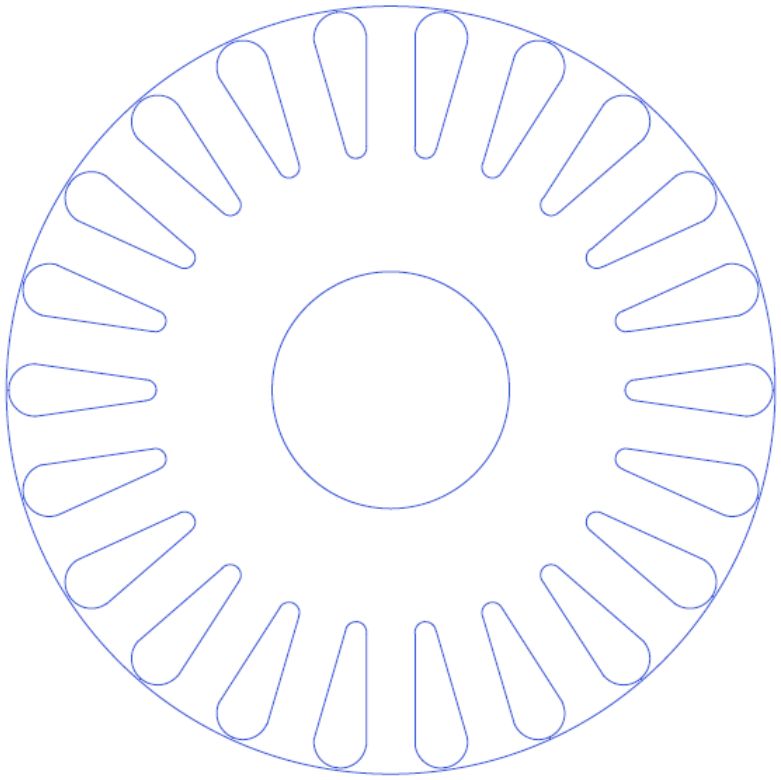


Şekil 4.14 Stator sargısı

Tablo 4.4 Sargı ve izolasyon bilgileri

Parametre	**Değer**	**Birim**
Sargı Katman Sayısı	1	
Sargı Tipi	Tasarımcı	
Paralel Kol Sayısı	1	
Oluk Başına İletken Sayısı	192	
Sargı Hatvesi	1:6:8	
Ortalama Bobin Adımı	6	
İletken Başına Tel Sayısı	1	
Tel Emaye Kalınlığı	0	mm
Tel Çapı	0.36	mm
Yarım Sipir Uzunluğu	146.26	mm
Taban İç Yarıçapı	0	mm
Tavan İç Çapı	0	mm
Sargılar Arası Mesafe	0	mm
Oluk İçi İzolasyon	0	mm
Oluk Ağzı İzolasyon	0	mm
Faz Arası İzolasyon	0	mm
Dolgu Faktörü Sınırı	0.75	

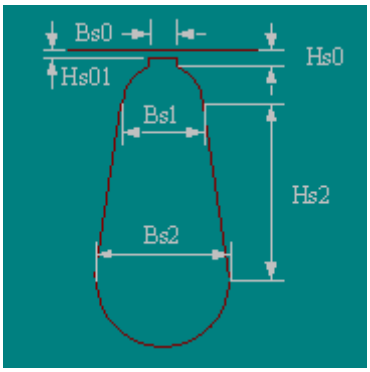
Rotor tasarımı Şekil 4.15'te ve oluk tipi Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Tablo 4.5'te rotor özellikleri ve Tablo 4.6'da oluk boyutları ile sincap kafesli sargı bilgileri belirtilmiştir.



Şekil 4.15 Rotor laminasyonu

Tablo 4.5 Rotor özellikleri

Parametre	**Değer**	**Birim**
İstifleme Faktörü	0.93	
Oluk Sayısı	22	
Oluk Tipi	1	
Dış Çap	61.5	mm
İç Çap	19	mm
Paket Boyu	55	mm
Sac Tipi	POSCO M700-50A	
Helis Genişliği	1	Oluk
Döküm Rotor	Evet	
Yarım Oluk	Hayır	
Çift Kafes	Hayır	



Şekil 4.16 Oluk tipi

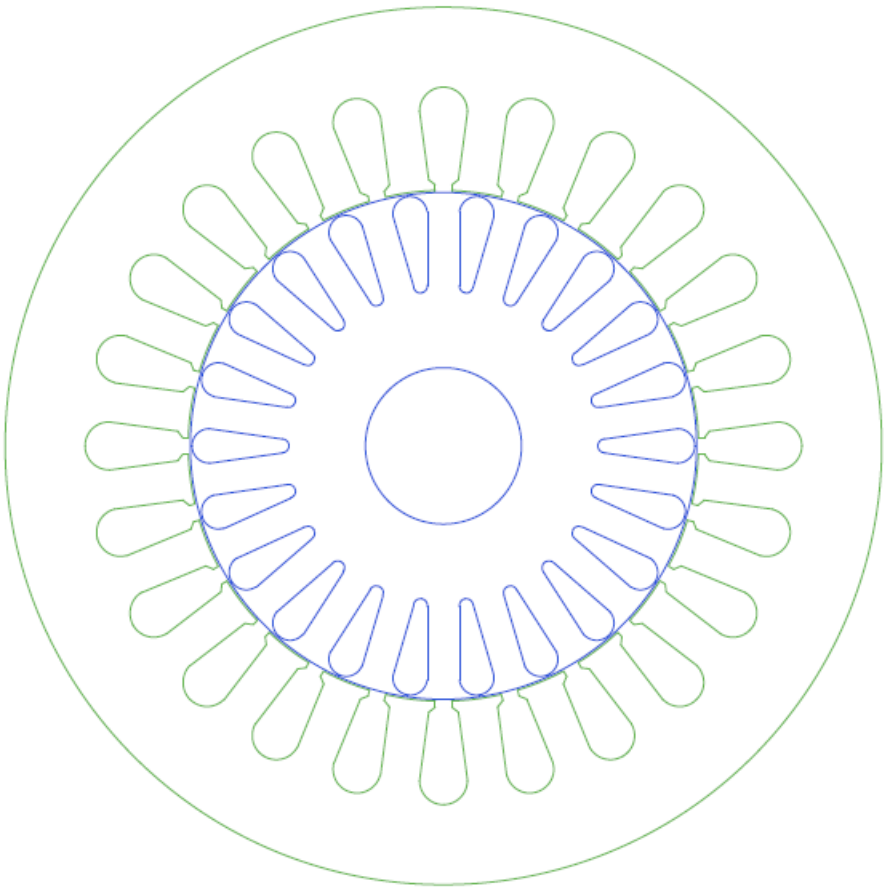
Tablo 4.6 Oluk boyutları ve sincap kafesi bilgileri

Parametre	**Değer**	**Birim**
Hs0	0.19	mm
Hs01	0.19	mm
Hs2	8.85	mm
Bs0	0	mm
Bs1	4.22	mm
Bs2	1.7	mm
Bar İletken Tipi	Al. Döküm	
Uç Halka Uzunluğu	0	mm
Uç Halka Genişliği	10	mm
Uç Halka Yüksekliği	12.5	mm
Uç Halka İletken Tipi	Al. Döküm	
Manyetik Mil	Var	

Aşağıda Tablo 4.7'de verilen çalışma parametreleri kullanılarak, asenkron motorun ANSYS Maxwell RMxprt programında analizleri yapılmıştır. Tablo 4.8'de, 400 V'luk 3 fazlı AC şebekeden beslenen, nominal çalışmada 1390 d/d ve 250 W çıkış gücü değerleri olacak şekilde tasarımı yapılan asenkron motorunun, ANSYS Maxwell RMxprt programı kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçları verilmiştir. Asenkron motorun çalışma sıcaklığı 85° olarak belirlenmiştir. Stator 3 faz sargıları, dağıtılmış sargı tipi ve yıldız bağlantı olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarımı ve analizleri yapılan 24 oluklu ve 4 kutuplu asenkron motorun kesiti de Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

Tablo 4.7 Analiz bilgileri

Parametre	**Değer**	**Birim**
Çalışma Modu	Motor	
Yük Tipi	Sabit Güç	
Nominal Çıkış Gücü	250	W
Nominal Gerilimi	400	V
Nominal Hızı	1375	rpm
Çalışma Sıcaklığı	85	cel
Sargı Bağlantısı	Yıldız	
Frekans	50	Hz



Şekil 4.17 24 oluk, 4 kutup, asenkron motor kesiti

Tablo 4.8 24 oluk, 4 kutup, 250 W asenkron motor analiz sonuçları

Parametre	**Değer**	**Birim**
Nominal RMS Akımı	0.71	A
Yüksüz RMS Akımı	0.553	A
Güç Faktörü	0.737	
Nominal Hız	1390	rpm
Yüksüz Hız	1499.67	rpm
Nominal Çıkış Gücü	250	W
Giriş Gücü	362.45	W
Bakır Kayıpları	73.43	W
Rotor Kayıpları	20.22	W
Demir Kayıpları	12.09	W
Sürtünme Kayıpları	1.01	W
Ek Kayıplar	5.71	W
Toplam Kayıplar	112.454	W
Verim	68.974	%
Kilitli Rotor Akımı	2.345	A
Kilitli Rotor Akım Oranı	3.304	
Nominal Moment	1.739	Nm
Kilitli Rotor Momenti	2.614	Nm
Kilitli Rotor Moment Oranı	1.503	
Devrilme Momenti	3.591	Nm
Devrilme Moment Oranı	2.065	
Hava Aralığı	0.25	mm
Dolgu Faktörü	47.0178	%
Sargı Faktörü	0.965926	
20°C için Faz Direnci	39.397	Ω
Çalışma Sıcaklığındaki Faz Direnci	49.4394	Ω
Sargının Termal Yükü	102.545	A^2/mm^3
Spesifik Elektrik Yüklemesi	15.7141	A/mm
Sargının Akım Yoğunluğu	6.52566	A/mm^2
Stator Diş Akı Yoğunluğu	1.21967	T
Rotor Diş Akı Yoğunluğu	1.6341	T
Stator Boyun Akı Yoğunluğu	1.09605	T
Rotor Boyun Akı Yoğunluğu	0.615962	T
Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	0.670867	T

Analiz sonuçlarına göre; çıkış gücü 250 W, giriş gücü 362.45 W, akım değeri 0.71 A, nominal devri 1390 d/d, nominal momenti 1.739 Nm ve verimi %68.97 olarak elde edilmiştir. Verim sınıfı, TS EN 60034-30-1 (Döner elektrik makineleri - Bölüm 30-1: Şebeke tarafından beslenen a.a motorlar için verimlilik sınıfları (IE kodu)) standardına göre IE2 düzeyinde kalmaktadır.

Tablo 4.9'da TS EN 60034-30-1 standardına göre, 250 W çıkış gücüne sahip 50 Hz ve 4 kutuplu motorlar için tanımlanmış verim sınıfları ve verim değerleri

gösterilmiştir.

Tablo 4.9 250 W 4 kutuplu motor için 50 Hz verimlilik değerleri

Verimlilik Sınıfı	**Nominal Değer**	**Ortalama Değer**	**Minimum Değer**
IE1	61.5	58.61	55.73
IE2	68.5	66.14	63.78
IE3	73.5	71.51	69.53
IE4	77.9	76.24	74.59

Bu çalışmada referans motor olarak kullanılan asenkron motorun ağırlık ve maliyet analizlerini yapabilmek için, Tablo 4.10'da verilen ve asenkron motor tasarımlarında yaygın olarak kullanılan malzemelerin güncel birim fiyatları referans alınmıştır. Bu malzeme birim fiyatları dikkate alınarak yapılan asenkron motorun toplam ağırlık ve toplam maliyet analizi sonuçları ise Tablo 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.10 Birim fiyat bilgisi

Parametre	**Değer**	**Birim**
Bakır Birim Fiyat	305	TL/kg
Saf Alüminyum Birim Fiyat	84	TL/kg
POSCO M700-50A Birim Fiyat	50	TL/kg

Tablo 4.11 Referans asenkron motorun temel malzemelerinin toplam ağırlık ve fiyat bilgisi

Parametre	**Değer**	**Birim**
Toplam Bakır Ağırlığı	0.66	kg
Toplam Alüminyum Ağırlığı	0.23	kg
Toplam Sac Ağırlığı	4.62	kg
Toplam Bakır Maliyeti	201.3	TL
Toplam Alüminyum Maliyeti	19.3	TL
Toplam Sac Maliyeti	231	TL
Toplam Maliyet	451.6	TL

Ağırlık bilgileri ANSYS Maxwell RMxprt analiz programından elde edilmiştir. Kullanılan malzemelerin kilogram başına birim fiyatlarında[1] ise ortalama değerler dikkate alınmıştır. Bakır ve alüminyum birim fiyatları, Ağustos 2024 tarihinde Londra Metal Borsası'ndan alınmıştır [45]. Ağustos 2024 tarihinde sac birim fiyatları, POSCO ve JFE sac üreticilerinden ve mıknatıs birim fiyatları Kingsmagnet firmasından alınmıştır [46–48]. Maliyet hesapları yapılırken, Ağustos 2024 tarihindeki güncel dolar kuru dikkate alınmış ve dolar/TL dönüşümü için 1 USD = 33.5 TL olacak şekilde kabul edilmiştir.

[1] Birim fiyatlar, kg başına ortalama değerler olarak dikkate alınmıştır.

5
FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNUN TASARIMI, ANALİZİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

5.1 250 W Dış Rotorlu FDAM için Elektromanyetik Tasarım

Bu tez çalışmasında 8 kutup ve 12 stator oluğundan oluşan, 230 V'luk bir fazlı AC şebekeden beslenen, nominal çalışmada 1600 d/d ve 250 W çıkış gücü değerlerine sahip bir FDAM tasarlanmış ve Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak RMxprt ve 2D ortamlarındaki sonuçlarını içeren simülasyon çalışması yapılmıştır.

5.1.1 12 Oluk ve 8 Kutuplu FDAM'nin ANSYS Maxwell RMxprt Çalışması

12 oluk ve 8 kutup komfigürasyonu, optimum oluk-kutup-faz kombinasyonuna göre seçilmiştir. Aşağıda Tablo 5.1'de bu çalışmada tasarlanan FDAM'nin geometrik özellikleri, devre özellikleri ve tasarım kriterleri verilmiştir.

Tablo 5.1 FDAM'nin makine ve devre parametreleri

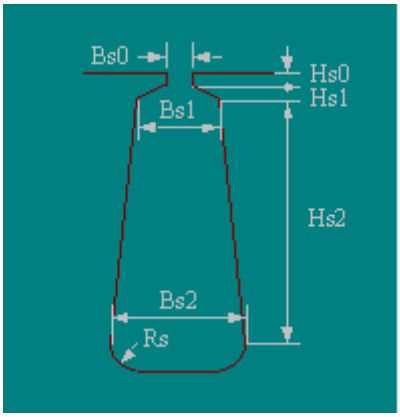
Parametre	**Değer**	**Birim**
Kutup Sayısı	8	
Rotor Pozisyonu	Dış Rotor	
Sürtünme Kaybı	0	W
Vantilasyon Kaybı	0	W
Referans Hız	1600	rpm
Kontrol Tipi	DC	
Devre Tipi	Y3	
Tetikleme Açısı	0	°
Tetikleme Darbe Genişliği	120	°
Transistör + Diyot Gerilim Düşümü	0	V

Fırçasız doğru akım motorlarında üçgen bağlantı tavsiye edilmemektedir. Bunun nedeni, elektrik motorunda oluşabilecek üçüncü bir harmoniğin sebep olacağı istenmeyen bir akımın, üçgen bağlantı tipinde motor sargılarında dolaşacak olmasıdır. Bu dolaşan akım, aşırı akıma ve dolayısıyla bakır kayıplarının artmasına yol açacaktır. Aşırı akım, motor sargılarının aşırı ısınmasına ve potansiyel olarak yanmasına neden olabilir. Yıldız bağlantı tipinde ise faz sargılarının sıfır noktası bulunduğu için, üç faz sargılarında dolaşan akımların toplamı her zaman sıfıra eşit olacaktır. Bu yüzden fırçasız doğru akım motorlarında genellikle yıldız bağlantı tipi tercih edilmektedir. Aşağıda Tablo 5.2'de FDAM'nin statoruna ait parametre değerleri verilmiştir.

Tablo 5.2 Stator özellikleri

Parametre	**Değer**	**Birim**
Dış Çap	74	mm
İç Çap	30	mm
Paket Boyu	25.2	mm
İstifleme Faktörü	0.95	
Sac Tipi	JFE Steel 35JN230	
Oluk Sayısı	12	
Oluk Tipi	3	
Helis Genişliği	0	Oluk

Oluk tasarımında 3 numaralı oluk tipi seçilmiştir ve seçilen oluk tipi Şekil 5.1'de gösterilmiştir. RMxprt stator özellikleri penceresinden seçilen 3 numaralı oluk şekli için gerekli tasarımsal boyutlar Tablo 5.3'te belirtilmiştir. Oluk tasarımı yapılırken paralel diş özelliği kullanılmıştır. Bs1 ve Bs2 değerleri diş genişliği referans alınarak otomatik olarak tanımlanmıştır.

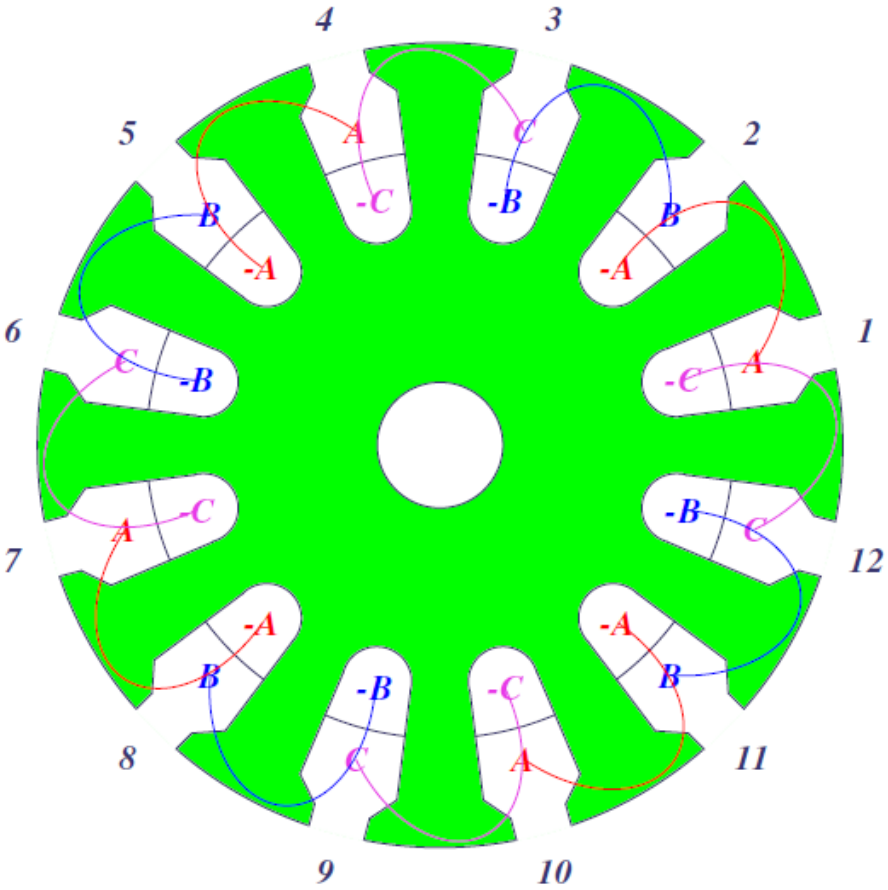


Şekil 5.1 Oluk tipi

Tablo 5.3 Oluk boyutları

Parametre	**Değer**	**Birim**
Paralel Diş	Evet	
Diş Genişliği	5.3	mm
Hs0	1.35	mm
Hs1	1.65	mm
Hs2	12.8	mm
Bs0	2.5	mm
Bs1	12.7223	mm
Bs2	5.86276	mm
Rs	0.5	mm

Tasarımı yapılan FDAM'nin stator sargısı Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Sargı tasarımında konsantrik sargı yapısı kullanılmıştır. Stator sargısının bilgileri ve izolasyon kalınlıklarının özellikleri Tablo 5.4'te belirtilmiştir.



Şekil 5.2 Stator sargısı

Tablo 5.4 Sargı ve izolasyon bilgileri

Parametre	**Değer**	**Birim**
Sargı Katman Sayısı	2	
Sargı Tipi	Tam Kalıp	
Paralel Kol Sayısı	1	
Oluk Başına İletken Sayısı	320	
Bobin Adımı	1	
İletken Başına Tel Sayısı	1	
Tel Emaye Kalınlığı	0	mm
Tel Çapı	0.35	mm
Yarım Sipir Uzunluğu	35	mm
Taban İç Yarıçapı	0	mm
Tavan İç Çapı	0	mm
Sargılar Arası Mesafe	0	mm
Oluk İçi İzolasyon	1	mm
Oluk Ağzı İzolasyon	1	mm
Faz Arası İzolasyon	0	mm
Dolgu Faktörü Sınırı	0.75	

Tablo 5.5'te bu çalışmada tasarımı yapılan FDAM'nin rotoruna ait değerler ve kutup bilgileri belirtilmiştir. Dış rotorlu fırçasız doğru akım motor tasarımı için RMxprt programı, kutup tiplerinden sadece 1 numaralı tip için tasarım imkanı sağlamaktadır.

Tablo 5.5 Rotor ve kutup bilgileri

Parametre	**Değer**	**Birim**
Dış Çap	92	mm
İç Çap	75.2	mm
Paket Boyu	36	mm
Sac Tipi	JFE Steel 35JN230	
İstifleme Faktörü	0.95	
Kutup Tipi	1	
Kutup Yayı Oranı	1	
Kutup Yayı Uzaklığı	0	mm
Mıknatıs Tipi	Ferrit Y33 (YBM-5BB)	
Mıknatıs Kalınlığı	5.2	mm
Manyetik Mil	Yok	

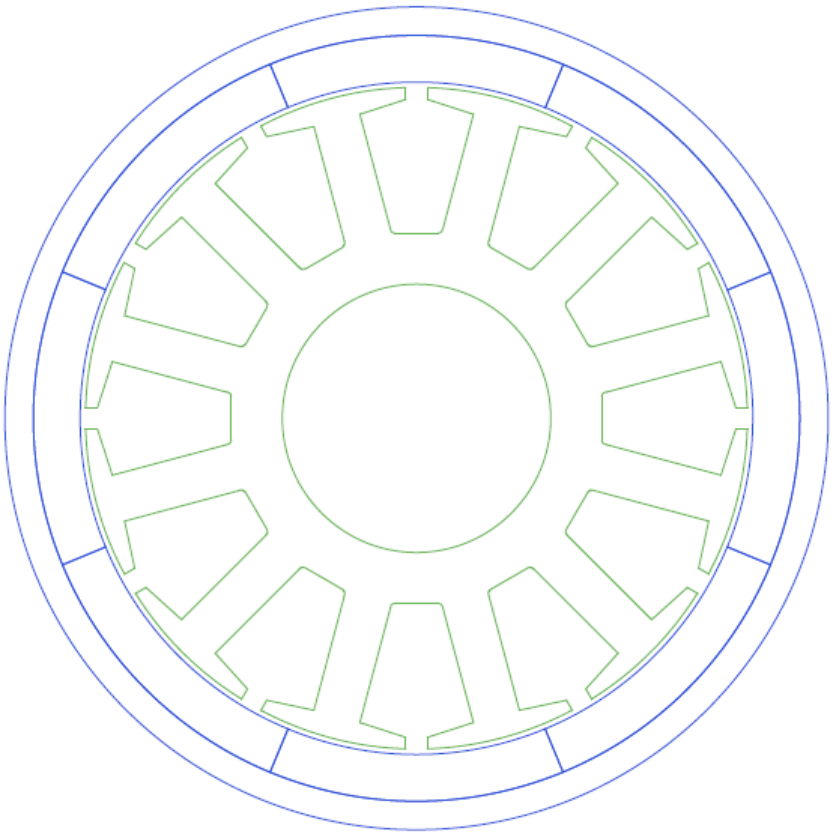
5.1.2 FDAM'nin ANSYS Maxwell RMxprt Analizinden Elde Edilen Sonuçlar

Bu çalışmada 250 W, 230 V, 1600 d/d etiket değerlerine sahip 8 kutuplu bir FDAM tasarlanmış ve Ansys Maxwell RMxprt'de analizleri yapılmıştır. Tablo 5.6'da bu motorun analiz bilgileri verilmiştir.

Tablo 5.6 Analiz bilgileri

Parametre	**Değer**	**Birim**
Çalışma Modu	Motor	
Yük Tipi	Sabit Güç	
Nominal Çıkış Gücü	250	W
Nominal Gerilimi	230	V
Nominal Hızı	1600	rpm
Çalışma Sıcaklığı	80	cel

Şekil 5.3'te tasarımı yapılan 12 oluklu ve 8 kutuplu fırçasız doğru akım motorunun kesit yapısı gösterilmiştir. Tablo 5.7'de, nominal çalışmada 1600 d/d ve 250 W çıkış gücü değerleri olacak şekilde tasarımı yapılan fırçasız doğru akım motorunun, ANSYS Maxwell RMxprt programı kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.3 12 oluk, 8 kutup, FDAM kesiti

Tablo 5.7 12 oluk, 8 kutup, 250 W FDAM analiz sonuçları

Parametre	**Değer**	**Birim**
Nominal RMS Akımı	1.22195	A
Nominal Hız	1594.18	rpm
Yüksüz Hız	2165.36	rpm
Maksimum Çıkış Gücü	416.83	W
Nominal Çıkış Gücü	250.042	W
Giriş Gücü	303.708	W
Bakır Kayıpları	45.9926	W
Demir Kayıpları	7.67409	W
Toplam Kayıplar	53.6667	W
Verim	82.3295	%
Kilitli Rotor Akımı	11.1798	A
Nominal Moment	1.49777	Nm
Kilitli Rotor Momenti	9.95047	Nm
Cogging Torku	0.112901	Nm
Minimum Hava Aralığı	0.6	mm
Dolgu Faktörü	58.6145	%
Sargı Faktörü	0.866025	
20°C için Faz Direnci	8.31171	Ω
Çalışma Sıcaklığındaki Faz Direnci	10.2674	Ω
Sargının Termal Yükü	256.348	A^2/mm^3
Spesifik Elektrik Yüklemesi	20.1838	A/mm
Sargının Akım Yoğunluğu	12.7007	A/mm^2
Stator Diş Akı Yoğunluğu	1.76332	T
Stator Boyun Akı Yoğunluğu	1.10213	T
Rotor Boyun Akı Yoğunluğu	1.41439	T
Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	0.431582	T
Mıknatıs Akı Yoğunluğu	0.319594	T

Analiz sonucuna göre çıkış gücü 250 W, giriş gücü 303.71 W, maksimum çıkış gücü değeri 416 W, akım değeri 1.22 A ve verimi de %82.33 olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.8'de, FDAM tasarımında kullanılan temel malzemelerin birim fiyat bilgisi, Tablo 5.9'da ise kullanılan malzemelerin toplam ağırlık ve toplam fiyat bilgisi verilmiştir.

Tablo 5.8 Birim fiyat bilgisi

Parametre	**Değer**	**Birim**
Bakır Birim Fiyat	305	TL/kg
Ferrit Y33 (YBM-5BB) Birim Fiyat	4641	TL/kg
JFE Steel 35JN230 Birim Fiyat	70	TL/kg

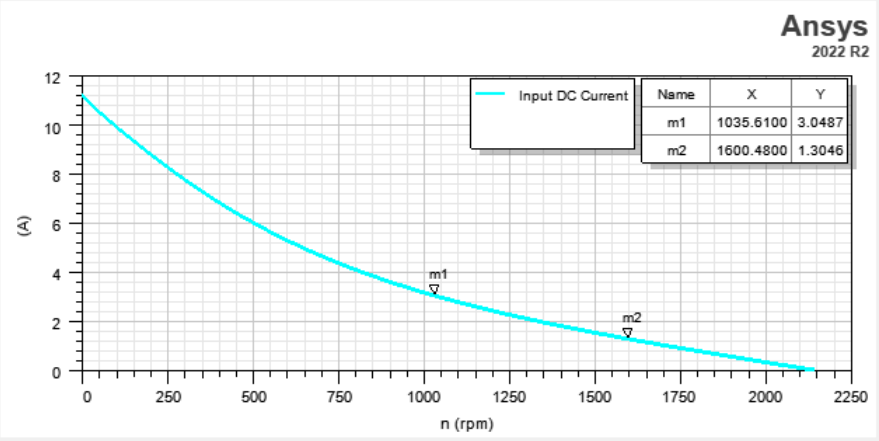
Tablo 5.9 250 W FDAM'de temel malzemelerin toplam ağırlık ve fiyat bilgisi

Parametre	**Değer**	**Birim**
Toplam Bakır Ağırlığı	0.115	kg
Toplam Ferrit Mıknatıs Ağırlığı	0.231	kg
Toplam Sac Ağırlığı	1.983	kg
Toplam Bakır Maliyeti	35.1	TL
Toplam Ferrit Mıknatıs Maliyeti	1072	TL
Toplam Sac Maliyeti	138.79	TL
Toplam Maliyet	1245.9	TL

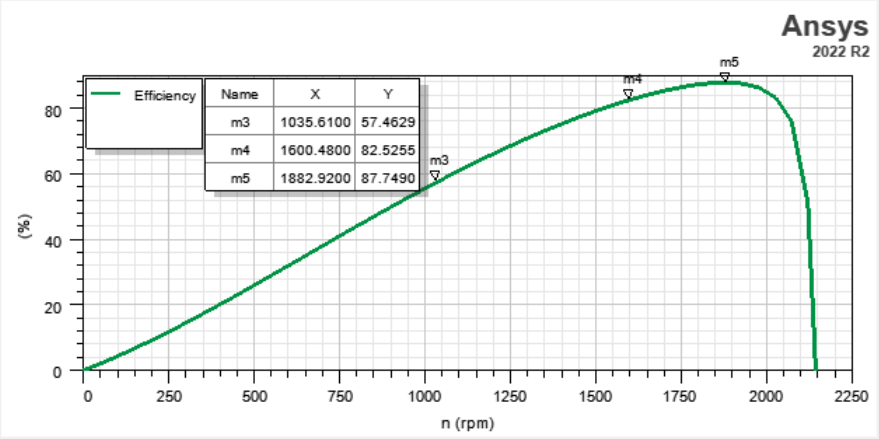
Ağırlık bilgileri ANSYS Maxwell RMxprt analiz programından elde edilmiştir. Kullanılan malzemelerin kilogram başına birim fiyatları[1] ise ortalama değerler olarak dikkate alınmıştır. Bakır ve alüminyum birim fiyatları, Ağustos 2024 tarihinde Londra Metal Borsası'ndan alınmıştır [45]. Ağustos 2024 tarihinde sac birim fiyatları, POSCO ve JFE sac üreticilerinden ve mıknatıs birim fiyatları Kingsmagnet firmasından alınmıştır [46–48]. Maliyet hesapları yapılırken, Ağustos 2024 tarihindeki güncel dolar kuru dikkate alınmış ve dolar/TL dönüşümü için 1 USD = 33.5 TL olacak şekilde kabul edilmiştir.

[1] Birim fiyatlar, kg başına ortalama değerler olarak dikkate alınmıştır.

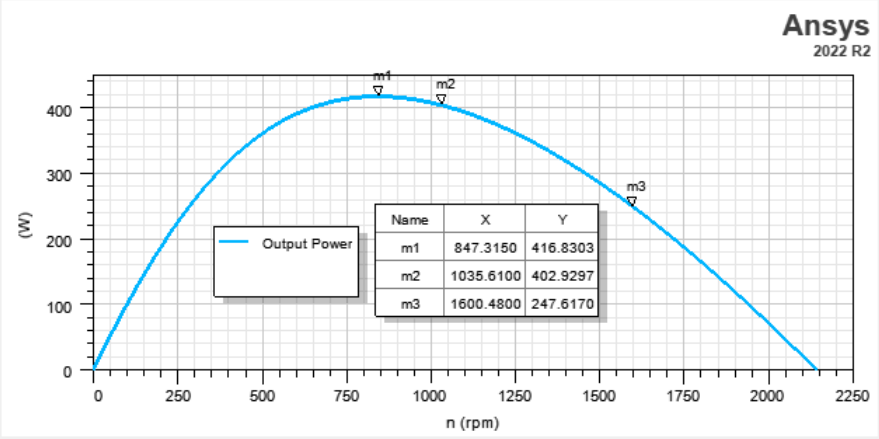
Şekil 5.4'te DC giriş akımı ve hız grafiği, Şekil 5.5'te verim ve hız grafiği ve Şekil 5.6'da çıkış gücü ve hız grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.4 DC giriş akımı'nın (A) ve hız'a (d/d) bağlı değişimi



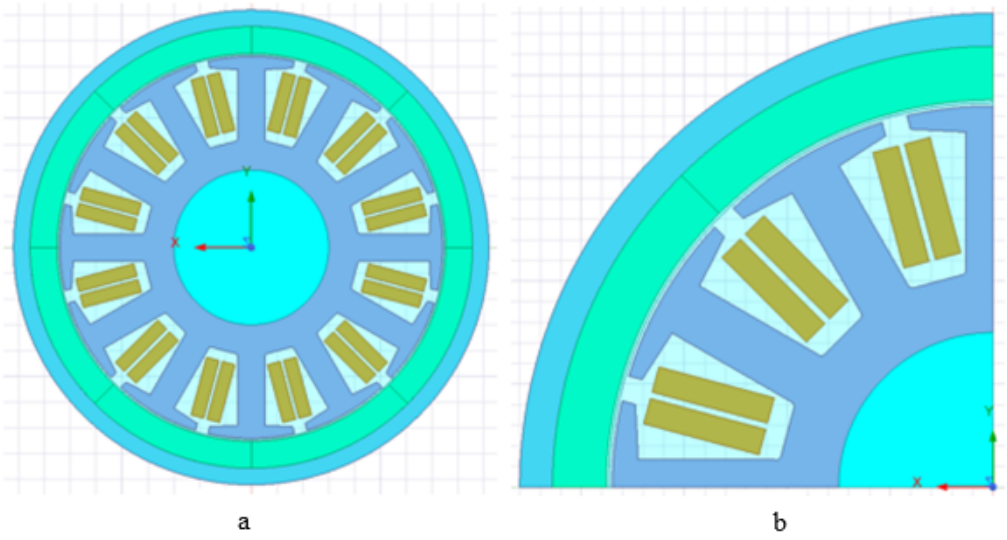
Şekil 5.5 Verim'in (%) ve hız'a (d/d) bağlı değişimi



Şekil 5.6 Çıkış gücü'nün (W) ve hız'a (d/d) bağlı değişimi

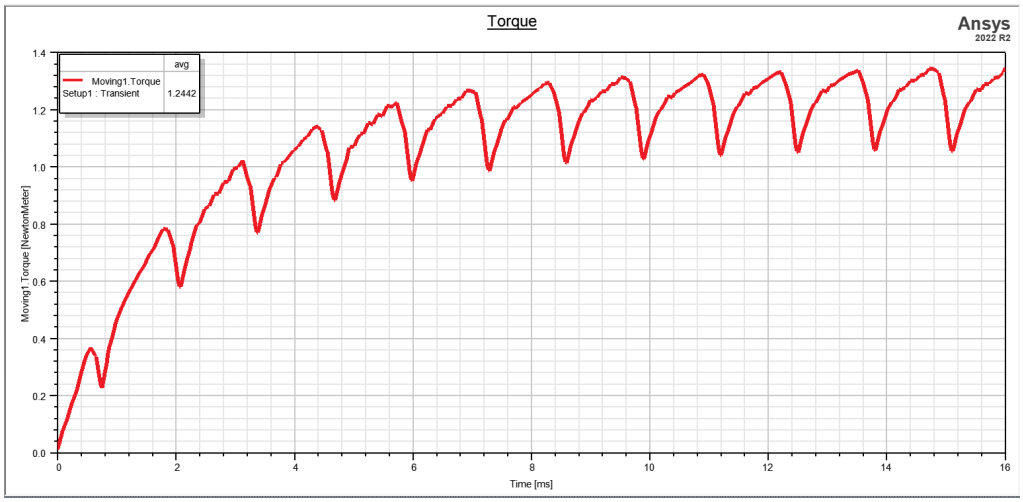
5.1.3 12 Oluk ve 8 Kutuplu FDAM'nin ANSYS Maxwell 2D Çalışması

Bölüm 5.1.2'de 250 W, 230 V, 1600 d/d etiket değerlerine sahip, 12 oluklu, 8 kutuplu FDAM'nin Ansys RMxprt'de analizleri yapılmış ve sonuçlar irdelenmişti. Bu bölümde de bu motorun Ansys Maxwell'de 2 boyutlu (2B) elektromanyetik analizleri yapılmıştır. Motorun bu programdan alınmış 2B kesit görüntüleri Şekil 5.7'de verilmiştir.

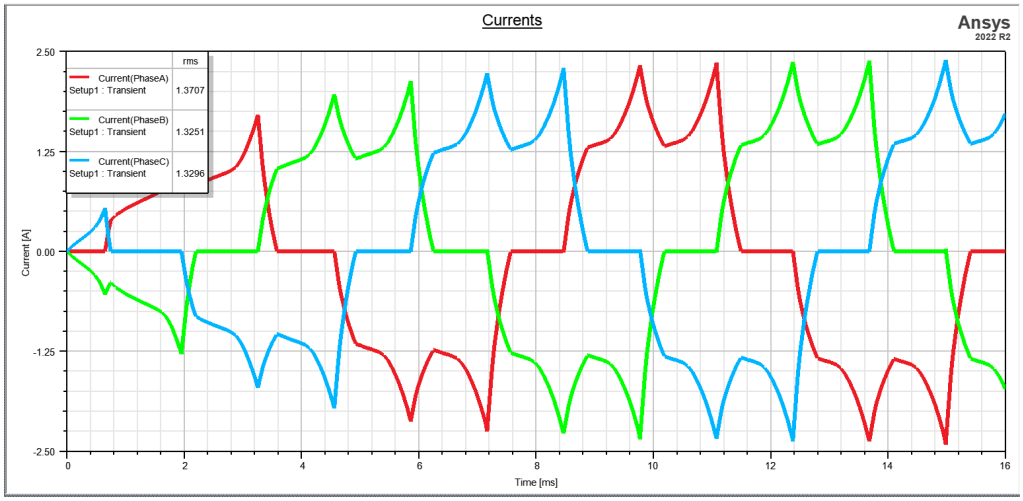


Şekil 5.7 FDAM'nin 2B gösterimi a) 2B tam kesiti, b) 2B yakın plan 1/4 kesiti

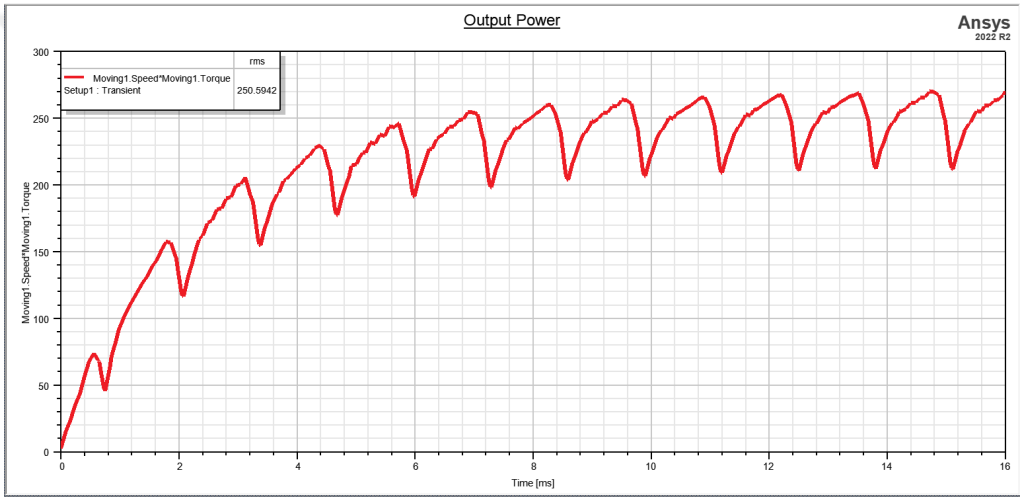
Fırçasız doğru akım motorunun Ansys Maxwell'de yapılan analizinden elde edilen sonuçlar, grafiklerle aşağıda verilmiştir. Bu grafiklerde Şekil 5.8'de moment-zaman grafiği, Şekil 5.9'da sargı akımlarının zaman göre değişimi ve Şekil 5.10'da çıkış gücünün zamana göre değişimi verilmiştir.



Şekil 5.8 Tork ve zaman



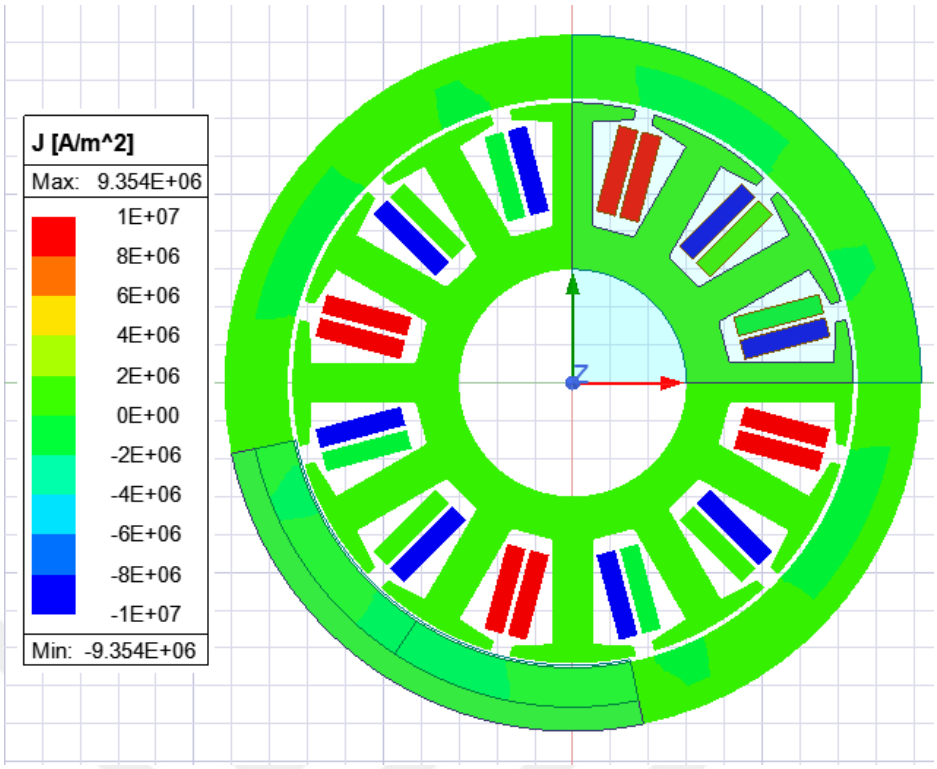
Şekil 5.9 Sargı akımları ve zaman



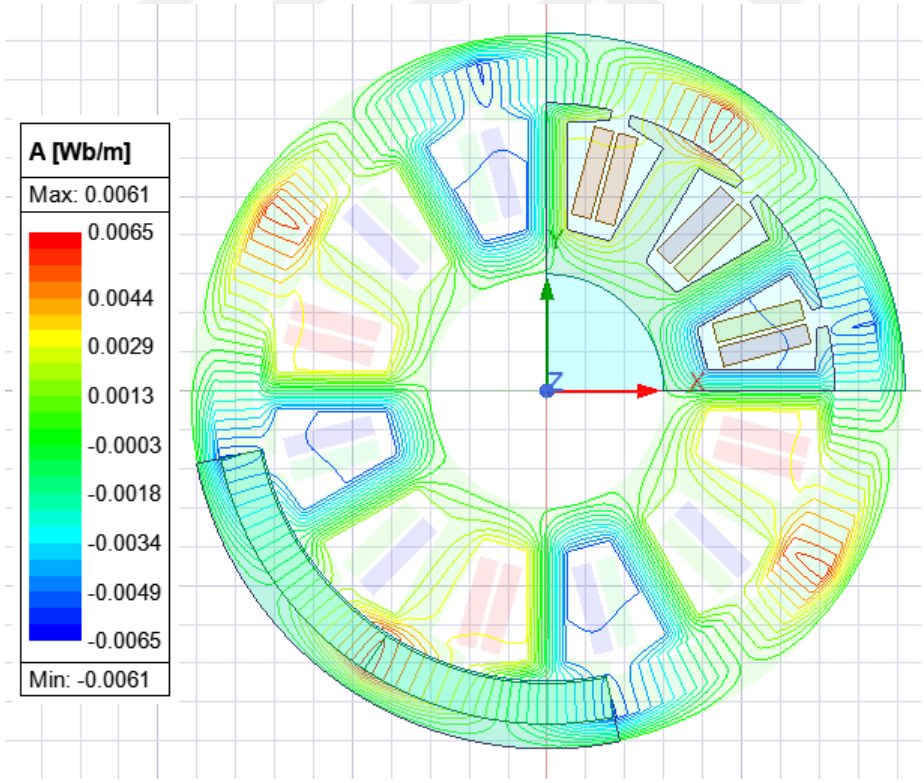
Şekil 5.10 Çıkış gücü ve zaman

Aşağıda Ansys Maxwell'den alınan elektromanyetik analiz sonuçları verilmiştir. Bu grafiklerde Şekil 5.11'de akım yoğunluğu, Şekil 5.12'de akı çizgileri, Şekil 5.13'te manyetik alan şiddeti değişimi ve Şekil 5.14'te de manyetik akı yoğunluğu dağılımı görülmektedir.

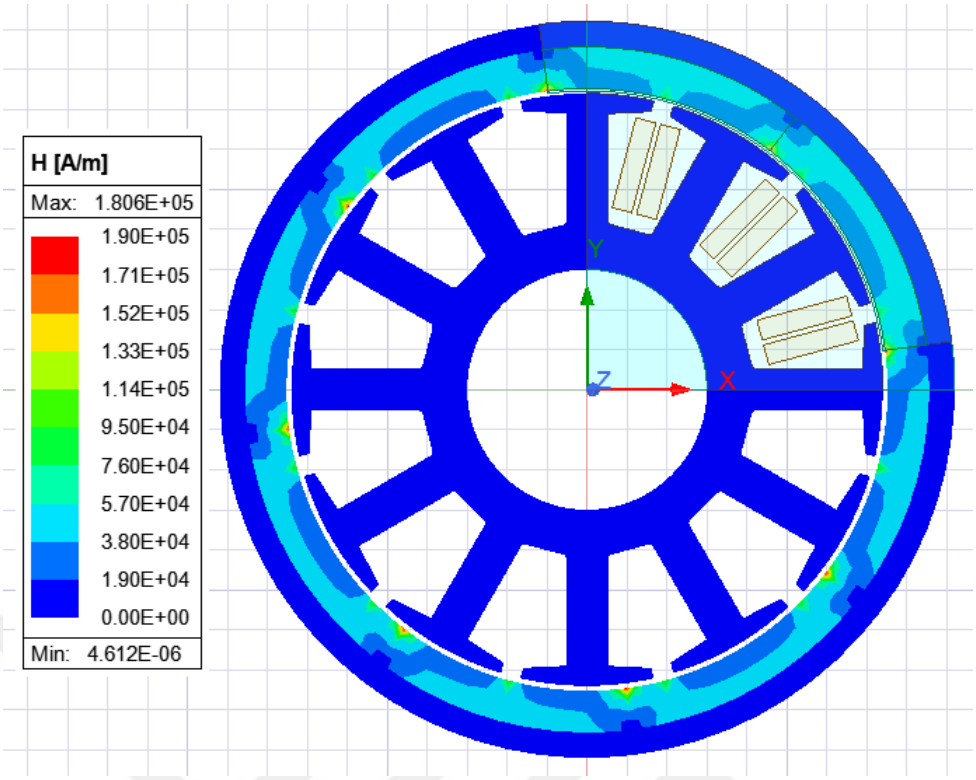
Şekil 5.14'ten de görüldüğü gibi, tasarımı yapılan FDAM'nin maksimum akı yoğunluğu değeri, motorun arka demir çekirdeğinde 2.027 T olarak gözlemlenmiştir. Arka demir çekirdek, manyetik akıyı yönlendirip yoğunluğunu artırarak motorun manyetik performansını ve verimliliğini artırır. Statorun diş ve boyun kısımlarında ise manyetik akı yoğunluğu değeri 1.7 T olarak ölçülmüştür. Bu değerler, senkron motor tasarımı için idealdir. Ayrıca, akı çizgilerinden de görüldüğü gibi, akı dağılımı düzgündür.



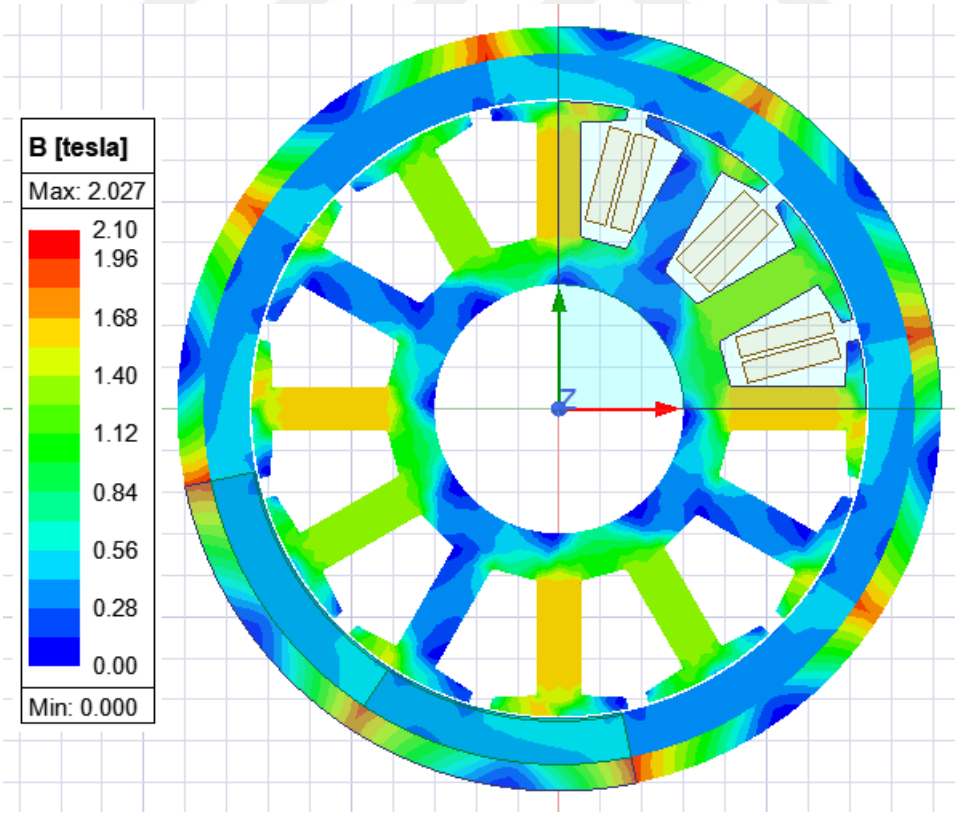
Şekil 5.11 Akım yoğunluğu (A/mm^2)



Şekil 5.12 Akı çizgileri (Wb/m)



Şekil 5.13 Manyetik alan şiddeti (A/m)



Şekil 5.14 Manyetik akı yoğunluğu dağılımı (T)

5.2 250 W, 8 kutuplu Dış Rotorlu FDAM Tasarımının Mıknatıs Optimizasyonu ile Performans ve Maliyet Analizi

Bu bölümde, 4.2'de tasarımı yapılan fırçasız doğru akım motorunda kullanılan Ferrite Y33 mıknatıs tipinin, NdFe35 ve SmCo28 ile değiştirilmesi durumlarındaki performans ve maliyet analizleri yapılmıştır.

5.2.1 NdFe35 Mıknatıs Tipi ile Analiz

Tablo 5.10'da, FDAM tasarımında kullanılan Ferrit Y33 mıknatıs tipinin, NdFe35 ile değiştirilmesi durumundaki analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.10 NdFe35 tip mıknatıs ile FDAM analiz sonuçları

Parametre	**Değer**	**Birim**
Nominal RMS Akımı	1.0592	A
Nominal Hız	1234.08	rpm
Yüksüz Hız	1489.92	rpm
Maksimum Çıkış Gücü	538.246	W
Nominal Çıkış Gücü	250.058	W
Giriş Gücü	296.235	W
Bakır Kayıpları	34.5573	W
Demir Kayıpları	11.62	W
Toplam Kayıplar	46.1774	W
Verim	84.4119	%
Kilitli Rotor Akımı	11.1798	A
Nominal Moment	1.93494	Nm
Kilitli Rotor Momenti	16.1875	Nm
Cogging Torku	0.238469	Nm
Minimum Hava Aralığı	0.6	mm
Dolgu Faktörü	58.6145	%
Sargı Faktörü	0.866025	
20°C için Faz Direnci	8.31171	Ω
Çalışma Sıcaklığındaki Faz Direnci	10.2674	Ω
Sargının Termal Yükü	192.611	A^2/mm^3
Spesifik Elektrik Yüklemesi	17.4956	A/mm
Sargının Akım Yoğunluğu	11.0091	A/mm^2
Stator Diş Akı Yoğunluğu	2.56269	T
Stator Boyun Akı Yoğunluğu	1.60176	T
Rotor Boyun Akı Yoğunluğu	2.05559	T
Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	0.627264	T
Mıknatıs Akı Yoğunluğu	0.464478	T

Analiz sonucuna göre çıkış gücü 250 W, giriş gücü 296.24 W, maksimum çıkış gücü değeri 538.25 W, akım değeri 1.06 A ve verimi %84.41 olarak görülmüştür.

Tablo 5.11'de, FDAM tasarımında kullanılan temel malzemelerin birim fiyat bilgisi, Tablo 5.12'de ise kullanılan malzemelerin toplam ağırlık ve toplam fiyat bilgisi verilmiştir.

Tablo 5.11 Birim fiyat bilgisi

Parametre	**Değer**	**Birim**
Bakır Birim Fiyat	305	TL/kg
NdFe35 Birim Fiyat	7045	TL/kg
JFE Steel 35JN230 Birim Fiyat	70	TL/kg

Tablo 5.12 NdFe35 tip mıknatıs ile temel malzemelerin toplam ağırlık ve fiyat bilgisi

Parametre	**Değer**	**Birim**
Toplam Bakır Ağırlığı	0.115	kg
Toplam NdFe35 Mıknatıs Ağırlığı	0.35	kg
Toplam Sac Ağırlığı	1.983	kg
Toplam Bakır Maliyeti	35.1	TL
Toplam NdFe35 Mıknatıs Maliyeti	2465.8	TL
Toplam Sac Maliyeti	138.79	TL
Toplam Maliyet	2639.7	TL

Ağırlık bilgileri ANSYS Maxwell RMxprt analiz programından elde edilmiştir. Kullanılan malzemelerin kilogram başına birim fiyatları[2] ise ortalama değerler olarak dikkate alınmıştır. Bakır ve alüminyum birim fiyatları, Ağustos 2024 tarihinde Londra Metal Borsası'ndan alınmıştır [45]. Ağustos 2024 tarihinde sac birim fiyatları, POSCO ve JFE sac üreticilerinden ve mıknatıs birim fiyatları Kingsmagnet firmasından alınmıştır [46–48]. Maliyet hesapları yapılırken, Ağustos 2024 tarihindeki güncel dolar kuru dikkate alınmış ve dolar/TL dönüşümü için 1 USD = 33.5 TL olacak şekilde kabul edilmiştir.

[2]Birim fiyatlar, kg başına ortalama değerler olarak dikkate alınmıştır.

5.2.2 SmCo28 Mıknatıs Tipi ile Analiz

Tablo 5.13'te, FDAM tasarımında kullanılan Ferrit Y33 mıknatıs tipinin, SmCo28 ile değiştirilmesi durumundaki analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.13 SmCo28 tip mıknatıs ile FDAM analiz sonuçları

Parametre	**Değer**	**Birim**
Nominal RMS Akımı	1.06758	A
Nominal Hız	1270.35	rpm
Yüksüz Hız	1544.01	rpm
Maksimum Çıkış Gücü	528.597	W
Nominal Çıkış Gücü	250.082	W
Giriş Gücü	296.423	W
Bakır Kayıpları	35.106	W
Demir Kayıpları	11.2353	W
Toplam Kayıplar	46.3413	W
Verim	84.3665	%
Kilitli Rotor Akımı	11.1798	A
Nominal Moment	1.87989	Nm
Kilitli Rotor Momenti	15.5366	Nm
Cogging Torku	0.222053	Nm
Minimum Hava Aralığı	0.6	mm
Dolgu Faktörü	58.6145	%
Sargı Faktörü	0.866025	
20°C için Faz Direnci	8.31171	Ω
Çalışma Sıcaklığındaki Faz Direnci	10.2674	Ω
Sargının Termal Yükü	195.67	A^2/mm^3
Spesifik Elektrik Yüklemesi	17.6339	A/mm
Sargının Akım Yoğunluğu	11.0962	A/mm^2
Stator Diş Akı Yoğunluğu	2.47292	T
Stator Boyun Akı Yoğunluğu	1.54565	T
Rotor Boyun Akı Yoğunluğu	1.98358	T
Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	0.60526	T
Mıknatıs Akı Yoğunluğu	0.448206	T

Analiz sonucuna göre çıkış gücü 250 W, giriş gücü 296.42 W, maksimum çıkış gücü değeri 528.6 W, akım değeri 1.07 A ve verimi %84.37 olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.14'te, FDAM tasarımında kullanılan temel malzemelerin birim fiyat bilgisi, Tablo 5.15'te ise kullanılan malzemelerin toplam ağırlık ve toplam fiyat bilgisi verilmiştir.

Tablo 5.14 Birim fiyat bilgisi

Parametre	**Değer**	**Birim**
Bakır Birim Fiyat	305	TL/kg
SmCo28 Birim Fiyat	12479	TL/kg
JFE Steel 35JN230 Birim Fiyat	70	TL/kg

Tablo 5.15 SmCo28 tip mıknatıs ile temel malzemelerin toplam ağırlık ve fiyat bilgisi

Parametre	**Değer**	**Birim**
Toplam Bakır Ağırlığı	0.115	kg
Toplam SmCo28 Mıknatıs Ağırlığı	0.393	kg
Toplam Sac Ağırlığı	1.983	kg
Toplam Bakır Maliyeti	35.1	TL
Toplam SmCo28 Mıknatıs Maliyeti	4904.3	TL
Toplam Sac Maliyeti	138.79	TL
Toplam Maliyet	5078.2	TL

Ağırlık bilgileri ANSYS Maxwell RMxprt analiz programından elde edilmiştir. Kullanılan malzemelerin kilogram başına birim fiyatları[3] ise ortalama değerler olarak dikkate alınmıştır. Bakır ve alüminyum birim fiyatları, Ağustos 2024 tarihinde Londra Metal Borsası'ndan alınmıştır [45]. Ağustos 2024 tarihinde sac birim fiyatları, POSCO ve JFE sac üreticilerinden ve mıknatıs birim fiyatları Kingsmagnet firmasından alınmıştır [46–48]. Maliyet hesapları yapılırken, Ağustos 2024 tarihindeki güncel dolar kuru dikkate alınmış ve dolar/TL dönüşümü için 1 USD = 33.5 TL olacak şekilde kabul edilmiştir.

Fırçasız doğru akım motorlarının tasarımında kullanılan mıknatıs türü, motorun performansı, verimliliği ve maliyeti üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, mıknatıs seçimi, bir FDAM'nin maliyetini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Mıknatıs türünün yanı sıra, kullanılan mıknatısın uygulama alanına uygunluğu da önemlidir. Örneğin, düşük maliyetli ferrit mıknatıslar, fan uygulamaları gibi düşük güç ve basit uygulamalar için uygun olabilirken, yüksek performans gerektiren uygulamalarda Samaryum Kobalt (SmCo) veya Neodimyum Demir Bor (NdFeB) mıknatıslar tercih edilir. Dolayısıyla, uygulama gereksinimlerine göre mıknatıs seçimi, hem motor performansı hem de maliyeti açısından önemlidir.

[3]Birim fiyatlar, kg başına ortalama değerler olarak dikkate alınmıştır.

5.3 Farklı Mıknatıs Çeşitlerinin Kullanıldığı FDAM Tasarımları ile Referans Asenkron Motorun Performans ve Maliyet Karşılaştırması

Akıllı fan uygulamalarında kullanılmak üzere FDAM tasarımı yapılan bu çalışmada, fan uygulamalarında yaygın olarak kullanılan, aynı güçlerde bir asenkron motor referans olarak alınmış ve performans analizi karşılaştırmalarında kullanılmıştır. Bu bölümde ise Bölüm 5.2'de 3 farklı mıknatıs türü kullanılarak yapılan FDAM tasarımları ile bu referans asenkron motorun performans ve maliyet karşılaştırması yapılmış ve sonuçlar irdelenmiştir. Karşılaştırmada motorların gücü, referans asenkron motorun güç değeri olan 250 W'da sabit tutulmuştur. Tablo 5.16'da ferrit, samaryum-kobalt ve neodiyum-demir-bor mıknatıslarının kullanıldığı FDAM tasarımları ile referans asenkron motorun performans analizi sonuçları verilmiş ve karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo 5.17'de ise bu motorlarda kullanılan temel malzemeler için maliyet karşılaştırılması yapılmıştır. Maliyet hesapları yapılırken, Ağustos 2024 tarihindeki güncel dolar kuru dikkate alınmış ve dolar/TL dönüşümü için 1 USD = 33.5 TL olacak şekilde kabul edilmiştir.

Tablo 5.16 250 W çıkış gücü değerindeki asenkron ve fırçasız doğru akım motorlarının analiz sonuçları

Parametre	**Asenkron Motor**	**NdFe35 Mıknatıslı FDAM**	**SmCo28 Mıknatıslı FDAM**	**Ferrit Y33 Mıknatıslı FDAM**	**Birim**
Nominal RMS Akımı	0.71	1.0592	1.06758	1.22195	A
Nominal Hız	1390	1234.08	1270.35	1594.18	rpm
Yüksüz Hız	1499.67	1489.92	1544.01	2165.36	rpm
Nominal Çıkış Gücü	250	250.058	250.082	250.042	W
Toplam Kayıplar	112.45	46.177	46.341	53.667	W
Giriş Gücü	362.45	296.235	296.423	303.709	W
Verim	68.974	84.412	84.367	82.330	%
Cogging Torku	Yok	0.238469	0.222053	0.112901	Nm
Sargının Termal Yükü	102.545	192.611	195.67	256.348	A^2/mm^3
Spesifik Elektrik Yüklemesi	15.7141	17.4956	17.6339	20.1838	A/mm
Sargının Akım Yoğunluğu	6.52566	11.0091	11.0962	12.7007	A/mm^2
Stator Diş Akı Yoğunluğu	1.21967	2.56269	2.47292	1.76332	T
Rotor Diş Akı Yoğunluğu	1.6341	Yok	Yok	Yok	T
Stator Boyun Akı Yoğunluğu	1.09605	1.60176	1.54565	1.10213	T
Rotor Boyun Akı Yoğunluğu	0.615962	2.05559	1.98358	1.41439	T
Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	0.670867	0.627264	0.60526	0.431582	T
Mıknatıs Akı Yoğunluğu	Yok	0.464478	0.448206	0.319594	T

Tablo 5.17 250 W çıkış gücü değerindeki asenkron ve fırçasız doğru akım motorlarının maliyet karşılaştırılması

Parametre	**Asenkron Motor**	**NdFe35 Mıknatıslı FDAM**	**SmCo28 Mıknatıslı FDAM**	**Ferrit Y33 Mıknatıslı FDAM**	**Birim**
Toplam Bakır Ağırlığı	0.66	0.115	0.115	0.115	kg
Toplam Alüminyum Ağırlığı	0.23	0	0	0	kg
Toplam Mıknatıs Ağırlığı	0	0.35	0.393	0.231	kg
Toplam Sac Ağırlığı	4.62	1.983	1.983	1.983	kg
Toplam Bakır Maliyeti	201.3	35.1	35.1	35.1	TL
Toplam Alüminyum Maliyeti	19.3	0	0	0	TL
Toplam Mıknatıs Maliyeti	0	2465.8	4904.3	1072	TL
Toplam Sac Maliyeti	231	138.79	138.79	138.79	TL
Toplam Maliyet	451.6	2639.7	5078.2	1245.9	TL

Tablodan da görüleceği üzere mıknatıs seçimi, motor maliyeti üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Ferrit mıknatıslı tasarım, NdFe35 ve SmCo28 mıknatıslı tasarımlardan daha ucuzdur. Nedeni ise kg başına mıknatıs maliyetinin diğer mıknatıslara oranla çok daha ucuz olmasıdır. Ferrit mıknatıslı tasarım, NdFe35 mıknatıslı tasarımından %52.8 ve SmCo28 mıknatıslı tasarımından da %75.5 daha ucuzdur. Asenkron motor tasarımında kullanılan bakır miktarı, paket boyunun da büyük olmasından dolayı mıknatıslı motorlara kıyasla %574 daha fazla olmasına rağmen, asenkron motor tasarımı, ferrit mıknatıslı motor tasarımından %63.8 daha ucuzdur. Ancak ferrit mıknatıslı tasarım, asenkron motor tasarımından %19.4 daha verimli olduğu için enerji tüketimi açısından daha avantajlıdır.

6
FAN SİSTEMLERİNDE GÜÇ TÜKETİM ANALİZİ

Ülkemizde, özellikle fan uygulamalarında kullanılan motorların, neredeyse tamamına yakınını asenkron motorlar oluşturmaktadır. Asenkron motorlu bu fanların kendiliğinden kontrolü yapılamamakta, dolayısıyla enerji tüketimi yönetilememektedir. İnverter ile hız kontrolü yapılan uygulamalarda ise yapı karmaşıklaşıp, büyümekte ve bu da ek bir maliyet getirmektedir. Ancak elektronik olarak kontrol edilebilme özellikleri bulunan FDAM, akıllı elektronik sistemler ile ortam şartlarına ve hava gereksinimlerine göre adaptif çalışabilmektedirler. FDAM hafif yük koşulları altında dahi en verimli noktada çalışabilmek için, en optimum çalışma noktasına göre ayarlanabilirler. Böylece enerji tüketimlerinde, uygulamaya göre değişen, %20 ile %70 arasında bir tasarruf sağlanabilmektedir [49]. FDAM'nin, inverterli asenkron motorlara göre hem daha kompakt olan yapıları hem de akıllı elektronik sistemleri ile kontrol edilebilmeleri sayesinde, enerji tüketiminde tasarruf sağlanabildiğinden, sanayide kullanımının yaygınlaştırılması gerekmektedir. Özellikle birkaç fanın birlikte çalıştığı transformatör soğutma üniteleri, klima üniteleri, ısı eşanjörleri ve kondenser sistemleri gibi endüstriyel uygulamalarda, daha verimli ve kontrol edilebilir fırçasız dc motorların kullanımı, günümüzde giderek önem kazanmaktadır.

Ülkemizdeki transformatör üreticileri, transformatör soğutma üniteleri için genellikle fan kanat çapı 250 mm ile 650 mm aralığında değişen, yaklaşık olarak 1000 W'a kadar, üç fazlı dıştan rotorlu asenkron motorlu aksiyel soğutma fanını kullanmaktadır. Bu fanlarda kullanılan motor verimliliği IE2 sınıf olmasına rağmen, fan sistemi %20'nin altında bir verimlilik ile çalışmaktadır. Transformatörlerin soğutma ihtiyacı gece/gündüz çalışmaya veya yaz/kış çalışmaya bağlı olarak, dış ortam sıcaklığına göre değişmektedir. Ancak kullanılan asenkron motorlarda herhangi bir kontrol özelliği olmadığından, gerekli görüldüğü zamanlarda sistemde eş zamanlı çalışan fanlardan bir veya birkaçını açıp kapatmaya dayalı uygulamalar kullanılmaktadır. Bu uygulama ile enerji tüketiminde bir tasarruf sağlanamadığı gibi, sistem verimliliğinde de bir artış gerçekleşmemektedir.

Bu sebeple, özellikle yurtdışında faaliyet gösteren fan üreticileri, birden fazla fanın birlikte çalıştığı uygulamalarda kullandıkları asenkron motorları EC teknolojili FDAM ile değiştirmeye başlamışlardır. Örneğin Alman firmalardan Ebm-papst, Greentech EC teknolojisi olarak adlandırdığı motorlarını, uygulamada kullandıkları asenkron motorlar ile değiştirerek bir karşılaştırma çalışması yapmış ve sonuçları paylaşmıştır. Greentech EC teknolojisini kullanan fanların ve motorların, geleneksel asenkron motorlarla karşılaştırıldığındaki en önemli avantajın, asenkron motorlardaki %65 - %80 arasındaki verimliliğin %90 düzeylerine çıkmasını göstermişlerdir [49]. Böylece giriş enerjisi daha verimli kullanılırken, ısıl kayıplar azalmakta ve motorun ömrü artmaktadır. Ayrıca EC motorlardaki entegre elektronik, sonsuz değişken kontrolüne de izin vermektedir. Bu sayede motor hızı her zaman özel gereksinimlere göre ayarlanabilmekte ve sistem düşük hızlarda bile optimum verimlilik noktasında çalışabilmektedir. Ayrıca bu motorlar klasik asenkron motorlara göre hem daha sessiz çalışmakta hem de CO2 emisyonunu azaltmaktadırlar.

Tablo 6.1'de, Ebm-papst firması tarafından yapılan açma-kapama modunda çalışan dört geleneksel AC fanının güç tüketimi ve Tablo 6.2'de de, sürekli hız kontrolüne sahip dört GreenTech EC fanının güç tüketimleri, karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Buradaki hava performansı terimi, ortamın ihtiyaç duyduğu hava debisi oranını ifade etmektedir.

Tablo 6.1 Farklı soğutma gereksinimleri için hava performansını on/off operasyonlu açma kapama ile ayarlayan AC fanlar

AC Hava Performansı	**Çalışan Fan Sayısı**	**Hız (Yüzdesel)**	**kW Cinsinden Güç Tüketimi**
% 100	4	% 100	7.40
% 75	3	% 100	5.55
% 50	2	% 100	3.70
% 25	1	% 100	1.85

Tablo 6.2 Farklı soğutma gereksinimleri için hava performansını modülasyon çalışma ile ayarlayan EC fanlar

EC Hava Performansı	**Çalışan Fan Sayısı**	**Hız (Yüzdesel)**	**kW Cinsinden Güç Tüketimi**
% 100	4	% 100	6.68
% 75	4	% 75	2.84
% 50	4	% 50	0.84
% 25	4	% 25	0.11

Tablo 6.3'te ise hızları kontrol edilebilen EC motorlu fanların güç tüketim oranlarındaki azalma gösterilmiştir. Tablodan da görüleceği üzere, özellikle düşük hızlarda güç tüketim oranı önemli oranda azalmıştır.

Tablo 6.3 EC fanlar ile güç tüketimindeki azalma

Hava Performansı	**EC ile Güç Tüketimindeki Azalma**
% 100	% 10
% 75	% 49
% 50	% 77
% 25	% 94

Tablo 6.4'te, AC ve EC fan sistemlerindeki yıllık toplam enerji tüketim bedelleri ve Tablo 6.5'te enerji tüketiminden kaynaklanan tasarruf miktarları gösterilmiştir. AC ve EC fanların, günlük 24 saat olmak üzere bir yıl boyunca sürekli olarak çalıştığı varsayılmıştır. Hava performansını ayarlamak için fanların gün içerisinde kaç saat çalışır vaziyette kaldığı tabloda belirtilmiştir.

Tablo 6.4 AC ve EC fanların yıllık bazda enerji tüketim miktarları

Hava Performansı	**Günlük Çalışma Saati**	**Yıllık Çalışma Saati**	**AC Fanların Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)**	**EC Fanların Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)**
% 100	2.4	876	6482	5852
% 75	7.2	2628	14585	7464
% 50	9.6	3504	12965	2943
% 25	4.8	1752	3241	193
Toplam	24	8760	37274	16451

Tablo 6.5 EC fan kullanımının yıllık bazda potansiyel enerji tasarruf miktarları

Enerji Tüketim Birim Fiyatı (€/kWh)	**EC ile Yıllık Tasarruf Miktarı (€)**
0.09	1874
0.12	2499
0.15	3123
0.18	3748

Yıllık bazdaki enerji tüketim miktarları tablosundan görüldüğü gibi, EC fanlar, bir yıllık çalışma süresi boyunca AC fanlara kıyasla %56 tasarruf sağlamaktadır.

Alman firması EBM-Papst tarafından, 2016 yılında, uluslararası ölçekte, orta güç seviyesindeki motorlar için yapılan bu yıllık bazlı enerji ve maliyet analiz çalışması bu tez çalışmasında referans alınmış ve benzer bir çalışma, küçük güçlü motor uygulamaları için ülkemizdeki enerji fiyatlandırması baz alınarak yapılmıştır. Bu karşılaştırma analizinde, ferrit Y33 mıknatısların kullanıldığı FDAM ile referans asenkron motor tasarımlarına ait değerler kullanılmıştır. Bu çalışmanın yapılmasındaki temel amaç, ülkemizde fan uygulamaları için kullanılan asenkron motorların EC motorlarla değiştirilmesi halinde yapılacak tasarruf miktarını göstermektir. Tablo 6.6'da, açma-kapama modunda çalışan dört geleneksel AC fanının güç tüketimi ve Tablo 6.7'de, sürekli hız kontrolüne sahip ferrit mıknatıslı dört EC fanının güç tüketimi açısından karşılaştırılması gösterilmektedir.

Tablo 6.6 Farklı soğutma gereksinimleri için hava performansını on/off operasyonlu açma kapama ile ayarlayan AC fanlar

AC Hava Performansı	**Çalışan Fan Sayısı**	**Hız (Yüzdesel)**	**kW Cinsinden Güç Tüketimi**
% 100	4	% 100	1.452
% 75	3	% 100	1.089
% 50	2	% 100	0.726
% 25	1	% 100	0.363

Tablo 6.7 Farklı soğutma gereksinimleri için hava performansını modülasyon çalışma ile ayarlayan EC fanlar

EC Hava Performansı	**Çalışan Fan Sayısı**	**Hız (Yüzdesel)**	**kW Cinsinden Güç Tüketimi**
% 100	4	% 100	1.216
% 75	4	% 75	0.736
% 50	4	% 50	0.412
% 25	4	% 25	0.120

Buradaki "hava performansı" terimi, ortamın ihtiyaç duyduğu hava debisi oranını ifade etmektedir. Eğer bir ortamın soğutulması için 4 adet AC fanlı sistemin nominal hızında çalıştırılması gerekiyorsa, 4 fanın da çalışır durumda olduğu durumda hava performansı %100 olmaktadır. Bu durumda ihtiyaç duyulan hava debisi oranı %50'ye düşerse, 2 adet AC fanının nominal hızı ile çalışması yeterli olacaktır. EC fan sistemi kullanıldığı takdirde ise, ortamın ihtiyaç duyduğu hava debisi oranı %50'ye düştüğünde, 4 fan da çalışır durumda kalır ve hızları %50 oranında düşürülerek gerekli hava performansı ayarlanır.

Tablo 6.8'de ise hızları kontrol edilebilen ferrit mıknatıslı EC motorlu fanların güç tüketim oranlarındaki azalma gösterilmiştir. AC fanlı sistemlerde hava performansı, sistemde çalışan fanların bir veya birkaçının devreden çıkartılmasıyla ayarlanmaktadır. EC fanlı sistemlerde ise hava performansı, sistemde çalışan tüm fanlar devredeyken fan hızı kontrol edilerek ayarlanmaktadır. Bu da düşük hızlarda güç tüketimini azaltmaktadır. Tablodan da görüleceği üzere, özellikle düşük hızlarda güç tüketim oranı %67 oranında azalmaktadır.

Tablo 6.8 EC fanlar ile güç tüketimindeki azalma

Hava Performansı	**EC ile Güç Tüketimindeki Azalma**
% 100	% 16
% 75	% 32
% 50	% 43
% 25	% 67

Orta güç seviyesi için düşük hızlardaki güç tüketim oranı %94 iken, bu oran düşük güçlü uygulamada %67 olarak elde edilmiştir. Bu da, güç seviyesi ve kullanılan fan sayısı arttıkça tasarruf miktarının artacağını göstermektedir

Tablo 6.9'da, AC ve EC fan sistemlerindeki yıllık toplam enerji tüketim bedelleri ve Tablo 6.10'da enerji tüketiminden kaynaklanan tasarruf miktarları gösterilmiştir. AC ve EC fanların, günlük 24 saat olmak üzere bir yıl boyunca sürekli olarak çalıştığı varsayılmıştır. Hava performansını ayarlamak için fanların gün içerisinde kaç saat çalışır vaziyette kaldığı tabloda belirtilmiştir. Enerji tüketim birim fiyatı için, örnek çalışma referans alınarak ve ülkemizde sürekli değişen birim fiyatlar göz önünde bulundurularak dört farklı değer kullanılmıştır. Bu 4 farklı değer için, ferrit mıknatıslı EC motor ile yıllık yapılacak tasarruf miktarı Tablo 6.10'da gösterilmiştir.

Tablo 6.9 AC ve EC fanların yıllık bazda enerji tüketim miktarları

Hava Performansı	**Günlük Çalışma Saati**	**Yıllık Çalışma Saati**	**AC Fanların Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)**	**EC Fanların Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)**
% 100	2.4	876	1272	1065
% 75	7.2	2628	2862	1934
% 50	9.6	3504	2545	1444
% 25	4.8	1752	636	210
Toplam	24	8760	7315	4653

Yıllık bazdaki enerji tüketim miktarları tablosundan görüldüğü gibi, ferrit mıknatıslı EC fanlar, bir yıllık çalışma süresi boyunca AC fanlara kıyasla %36.4 tasarruf sağlamaktadır. Referans olarak alınan orta güç seviyesi için yapılan çalışmada, EC fanlar AC fanlara kıyasla %56 tasarruf sağlamışken, bu tez çalışmasında yapılan düşük güçlü uygulama için tasarruf miktarı %36.4 olmaktadır.

Tablo 6.10 EC fan kullanımının yıllık bazda potansiyel enerji tasarruf miktarları

Enerji Tüketim Birim Fiyatı (TL/kWh)	**EC ile Yıllık Tasarruf Miktarı (TL)**
2.5	6655
3.5	9317
4.5	11979
5.5	14641

Yukarıda Alman firması Ebm-papst tarafından orta güç seviyesindeki motorlar için yapılan güç tüketim analizlerinde kullanılan değerler, bu çalışmada tasarlanan küçük güç seviyesindeki FDAM için yapılan analizlerde de kullanılarak, bu iki analizin sonuçları karşılaştırılmıştı. Bu bölümde ise ülkemizdeki üç zamanlı tarifeye göre enerji birim ve çalışma saatleri baz alınarak, bu analiz çalışması tekrarlanmıştır. Bu yeni değerlere göre hesaplanan AC ve EC fanların yıllık enerji tüketim miktarları Tablo 6.11'de verilmiştir.

Tablo 6.11 Üç zamanlı tarifeye göre AC ve EC fanların yıllık bazda enerji tüketim miktarları

Hava Performansı	**Günlük Çalışma Saatlerinin Aralığı**	**Günlük Çalışma Saati**	**Yıllık Çalışma Saati**	**AC Fanların Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)**	**EC Fanların Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)**
% 100	06:00-11:00	5	1825	2650	2219
% 75	11:00-17:00	6	2190	2385	1612
% 50	17:00-22:00	5	1825	1325	752
% 25	22:00-06:00	8	2920	1060	351
Toplam	24	24	8760	7420	4934

AC ve EC fanların yıllık enerji tüketim miktarları, hava performansını ayarlayan fanların günlük çalışma saatine bağlı olarak değişmektedir. Fanların günlük çalışma saatleri Tablo 6.11'de belirtilmiştir. Üç zamanlı tarifeye göre yıllık bazdaki enerji tüketim miktarları tablosundan görüldüğü gibi, ferrit mıknatıslı EC fanlar, bir yıllık çalışma süresi boyunca AC fanlara kıyasla %33.5 enerji tüketiminde tasarruf sağlamaktadır.

Tablo 6.12'de, enerji tüketiminden kaynaklanan tasarruf miktarları gösterilmiştir. AC ve EC fanların, günlük 24 saat olmak üzere bir yıl boyunca sürekli olarak çalıştığı varsayılmıştır. Hava performansını ayarlamak için fanların gün içerisinde kaç saat çalışır vaziyette kaldığı tabloda belirtilmiştir. Enerji tüketim birim fiyatı için, Ağustos 2024 tarihli üç zamanlı tarifeye göre fiyatlandırılan değerler kullanılmıştır.

Tablo 6.12 EC fan kullanımının üç zamanlı tarifeye göre yıllık bazda hesaplanmış potansiyel enerji tasarruf miktarları

Günlük Çalışma Saatlerinin Aralığı	**Enerji Tüketim Birim Fiyatı (TL/kWh)**	**EC ile Yıllık Tasarruf Miktarı (TL)**
06:00-17:00	3.15	3793
17:00-22:00	4.62	2648
22:00-06:00	1.97	1397
Toplam	-	7838

Tekli tarifeye göre AC ve EC fanların yıllık bazda enerji tüketim miktarları, Tablo 6.11'de hesaplanan toplam değerler ile aynı olacaktır. Bu enerji tüketim miktarları referans alınarak, Tablo 6.13'te, tekli tarifeye göre EC fanlarının yıllık bazdaki enerji tüketiminden kaynaklanan tasarruf miktarları gösterilmiştir. Enerji tüketim birim fiyatı için, Ağustos 2024 tarihli tek zamanlı tarifeye göre fiyatlandırılan değerler kullanılmıştır.

Tablo 6.13 EC fan kullanımının tekli tarifeye göre yıllık bazda hesaplanmış potansiyel enerji tasarruf miktarları

Enerji Tüketim Birim Fiyatı (TL/kWh)	**EC ile Yıllık Tasarruf Miktarı (TL)**
3.11	7732

Tablo 6.12 ve Tablo 6.13'te, ülkemiz için tasarım çalışmaları yapılan küçük güçlü uygulamalarda kullanılacak EC fanların AC fanlarla değiştirilmesi durumunda, üç zamanlı tarifeye ve tek zamanlı tarifeye göre yapılacak tasarruf miktarları gösterilmiştir. Her iki tarifede de tasarruf miktarlarının benzer olduğu görülmektedir.

7
SONUÇ

Asenkron motorlar, basit ve sağlam yapıları, uzun ömürleri, ekonomik olmaları gibi nedenlerden dolayı günümüzde hala sanayi, otomotiv, savunma, konut gibi sektörlerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Ancak güç elektroniği, entegre devreler, mikrodenetleyiciler ve manyetik malzeme teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak farklı yapılarda motor tasarımlarının endüstriyel uygulamalarda kullanılması giderek yaygınlaşmaktadır. Bu uygulama alanlarından birisi de asenkron motorların sıklıkla kullanıldığı fan uygulamalarıdır.

Birkaç fanın birlikte çalıştığı soğutma fan uygulamalarında kullanılan klasik asenkron motorların hızları adaptif olmadığından, ortamın gerekliliğine göre çalışan fanlardan bir veya birkaçı devreden çıkartılarak, hız kontrolü yapılır. Bu durum, fan sistemlerindeki sistem verimliliğinin düşmesine yol açar. EC (Elektronik komütasyonlu) motorlu fan sistemlerinde ise sistemde bulunan tüm fanlar çalışırken hızları sürekli olarak hem kapalı çevrim hem de açık çevrim olarak kontrol edilebilmektedir. Elektronik komütasyonlu bu kontrol yöntemlerinin uygulanması, özellikle fan sistemlerindeki performans ve verimliliği doğrudan arttırmaktadır.

Farklı soğutma gereksinimleri için geleneksel uygulamalarda, hava performansını ayarlamada AC fanlar kullanılmaktadır. Geleneksel uygulamalarda kullanılan bu fanların kontrolü aslında basit bir şekilde açma kapamaya dayanan "on/off operation" şeklinde, kontrolsüz olarak yapılmaktadır. Modern uygulamalarda ise optimum soğutma performansını elde etmek için, sistemde bulunan tüm fanların çalışır durumda kaldığı, hızlarının sürekli olarak hem kapalı hem de açık çevrim şeklinde kontrol edildiği, EC teknolojili fanlar kullanılmaktadır. EC teknolojisi için günümüzde PM (Permanent Magnet Motor), ECM (Electronically Commutated Motor) ve BLDC (Brushless DC) motor terminolojileri sık sık kullanılmaktadır. EC fanların kontrolü ise "Modulating Operation" denilen sistemdeki fanların ayrı ayrı hızlarının kontrol edildiği modüler çalışma ile yapılmaktadır. Modüler çalışma ile sistemdeki fanların en optimum ve en verimli noktalarında çalışması sağlanarak, enerji tüketim bedellerinde tasarruf yapılabilmektedir.

Alman firması EBM-Papst, 2016 yılında, uluslararası ölçekte, orta güç seviyesindeki motorlar için yıllık bazlı güç tüketimi ve tasarrufu analizi çalışmaları yapmıştır. Bu tez çalışmasında da bu çalışmalar referans alınarak, küçük güçlü motor uygulamaları için ülkemizdeki enerji fiyatlandırması baz alınarak benzer bir çalışma yapılmıştır. Her iki çalışmada elde edilen sonuçlardan da görülmüştür ki, EC fanlı sistemlerin özellikle düşük hızlarda güç tüketimi %95'e kadar düşürülebilmektedir. Günümüzde enerji verimliliği konusunun, saklı bir enerji kaynağı olarak ele alındığı düşünüldüğünde, hızları kolaylıkla kontrol edilebilen ve bu sayede güç tüketimi azaltılabilen fırçasız doğru akım motorlarının kullanımının artırılması gerekmektedir. Özellikle bu tez çalışmasındaki karşılaştırmada da görüldüğü gibi, fan uygulamaları başta olmak üzere asenkron motorların yaygın olarak kullanıldığı ve düşük verimli kimi uygulamalarda, daha verimli olan ve kontrol kolaylığı olan FDAM'lerin kullanılması konusu, üzerinde önemle durulması gereken bir konu haline gelmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan analizlerde, fan uygulamalarında kullanılan 250 W'lık küçük güçlü, verimi %68.974 olan bir asenkron motor referans alınmış ve bu güç değeri korunarak fan uygulamalarında kullanılması için daha verimli FDAM tasarımları yapılmıştır. Asenkron motor ve FDAM karşılaştırmasında, enerji tüketimi ve maliyet analizleri birlikte ele alınmış ve bu analizlerin sonucunda verim; ferrit mıknatıslı FDAM ile %82.33'e, SmCo28 mıknatısın kullanıldığı tasarım ile %84.37'ye ve NdFe35 mıknatısın kullanıldığı FDAM tasarımı ile de %84.41'e yükseltilmiştir.

Mıknatıslı motorların yüksek güç yoğunluğuna sahip olmasından ötürü, asenkron motorun 55 mm olan paket boyu, FDAM tasarımında %54.5 azalarak 25 mm'ye düşürülmüştür. Paket boyunun kısalmasına bağlı olarak toplam bakır ağırlığı %82.5 azalarak 0.66 kg'dan 0.115 kg'a ve toplam demir nüve ağırlığı ise %57 azalarak 4.62 kg'dan 1.983 kg'a indirilmiştir. Maliyet hesabı yapılırken yalnızca tasarımda kullanılan temel malzemeler dikkate alınmış olup, aynı güç seviyesinde; asenkron motorun maliyeti 451.6 TL, NdFe35 mıknatıslı FDAM'nin maliyeti 2639.7 TL, SmCo28 mıknatıslı FDAM'nin maliyeti 5078.2 TL ve ferrit mıknatıslı FDAM'nin maliyeti 1245.9 TL olarak hesaplanmıştır. Bu durumda, ferrit mıknatıslı FDAM tasarımı, asenkron motor tasarımına göre %275.9 daha pahalı, NdFe35 mıknatıslı FDAM tasarımına göre %52.8 daha ucuz ve SmCo28 mıknatıslı FDAM tasarımına göre %75.5 daha ucuz olmaktadır. Maliyet hesabında elektronik devre kartı ve üretim farklılıklarından kaynaklanabilecek farklar göz ardı edilmiştir.

Bir elektrik motorunun kullanım ömrü düşünülerek yapılan maliyet analizinde, toplam maliyetinin %1'lik kısmını sarım maliyeti, %2'lik kısmını satın alma maliyeti oluştururken, %97'lik kısmını ise tükettiği elektrik enerjisinin maliyeti oluşturmaktadır. FDAM'nin, yapılarında bulunan kalıcı mıknatıs ve birlikte kullanıldıkları sürücü kartlarından dolayı asenkron motorlara göre ilk satın alma maliyetleri daha yüksek olabilir. Ancak enerjiyi verimli kullanmaları ve buna bağlı olarak tükettikleri elektrik enerjisinin daha düşük maliyetli olduğu düşünüldüğünde, motor ömrü boyunca asenkron motorlara göre daha kazançlı bir yatırım olabileceklerdir. Ayrıca FDAM'a entegre akıllı elektronik donanım ile hem fanın hem de motorun çalışması kontrol edilebileceğinden, her çalışma koşulunda optimum verimlilik sağlanabilecektir. Bu tez çalışmasında yapılan analizlerde bu yorumu doğrulayan sonuçlar elde edilmiştir. Tez çalışmasında farklı mıknatıs yapılarının kullanıldığı küçük güçlü FDAM tasarımları için yapılan maliyet analizlerinde, hesaba katılmayan bazı maliyet unsurları olsa da, EC motorlu fanlardaki enerji verimliliği sayesinde elde edilen yıllık enerji tasarrufları göz önüne alındığında, bu motorların satın alma maliyetlerinin 1 yıl içerisinde karşılanabildiği görülmüştür. Örneğin bu tez bu çalışmada yapılan analizlerde, ferrit mıknatıslı EC fanların, bir yıllık çalışma süresi boyunca AC fanlara kıyasla %36.4 tasarruf sağladığı görülmüştür. Bu motorların üreticisi firmalar tarafından temin edilen bilgilere göre, bu iki motor türünde de rutin bakımların yapılması durumunda kullanım ömürleri 10-12 yıl arasında değişmektedir. Bu durumda, ömürleri de benzer olan bu iki farklı motor tipinden, enerji tüketimi daha az ve enerji verimliliği daha yüksek olan motor tipinin kullanılması, faturalandırılan elektrik enerjisi miktarını düşürmede oldukça etkili bir çözüm olacaktır.

KAYNAKÇA

[1] *The history of air conditioning*. [Online]. Available: https://www.kimpton.co.uk/history-air-conditioning/ (visited on 02/29/2024).

[2] *Hvactürk*. [Online]. Available: https://www.hvacturk.com/sayfa/hvac-nedir (visited on 02/28/2024).

[3] *Google patents*. [Online]. Available: https://patentimages.storage.googleapis.com/75/93/89/5d447dba9c0b04/US494978.pdf (visited on 02/28/2024).

[4] *René rondeau's antique phonograph and photography site*. [Online]. Available: https://edisontinfoil.com/fans/cwfan.htm (visited on 02/28/2024).

[5] *Google patents*. [Online]. Available: https://patentimages.storage.googleapis.com/dd/91/a0/1278e2fc7d36e0/US414758.pdf (visited on 03/01/2024).

[6] *Antique fan supply co.* [Online]. Available: https://antiquefanparts.com/circa-1902-diehl-ornate-hatbox-dc-ceiling-fan/ (visited on 03/01/2024).

[7] *Willis carrier the air conditioner*. [Online]. Available: https://lemelson.mit.edu/resources/willis-carrier (visited on 03/04/2024).

[8] *Google patents*. [Online]. Available: https://patentimages.storage.googleapis.com/65/90/66/df3edc322cbd28/US808897.pdf (visited on 03/04/2024).

[9] K. R. Rajagopal, C. Sathaiah, "Computer aided design and fe analysis of a pm bldc hub motor," *2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems*, 2006.

[10] J. H. Choi, I. S. Jung, J. Hur, H. G. Sung, B. K. Lee, "On the feasibility of the brushless dc (bldc) motor and controller for 42v automotive cooling fan system," *2007 IEEE International Electric Machines Drives Conference*, 2007.

[11] C. S. Liu, J. C. Hwang, L. R. Chen, C. C. Fu, "Development of new structure of brushless dc servo motor for ceiling fan," *2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2009.

[12] M. Fazil, K. R. Rajagopal, "Development of external rotor single-phase pm bldc motor based drive for ceiling fan," *2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems 2010 Power India*, 2010.

[13] S. Castano, L. N. Barragan, C. C. Rodriguez, A. J. Maixé, "Design of a brushless dc motor for an automotive application: A comparative evaluation with a commercial model," *2012 Workshop on Engineering Applications*, 2012.

[14] G. C. Lee, T. U. Jung, "Design comparisons of bldc motors for electric water pump," *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2012.

[15] A. Saxena, "Performance and cost comparison of pm bldc motors for ceiling fan," *2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2014.

[16] F. Parasiliti, M. Villani, M. Castello, "Pm brushless dc motor with exterior rotor for high efficiency household appliances," *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2014.

[17] H. M. Hashim, Y. Yasa, M. B. Dogruoz, M. Arik, E. Mese, "Investigation of power distribution on an axial fan," *2016 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, 2016.

[18] P. Renaud, S. Louis, P. Damien, A. Miraoui, "Design optimization method of bldc motors within an industrial context," *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2017.

[19] H. C. Hsiao, C. Y. Hsiao, Y. H. Huang, Y. K. Chien, Y. W. Zheng, "Design and economical evaluation of small-capacity motor used in household appliances by taguchi method," *2018 IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems*, 2018.

[20] L. Nakuçi, A. Spahiu, "Saving energy by replacing im with bldc motor in fan application," *EJECE, European Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2, pp. 31–37, 2018.

[21] S. Leitner, H. Gruebler, A. Muetze, "Low-cost bldc claw-pole motor design for fan applications with reduced cogging torque and balanced axial forces," *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2020.

[22] K. A. Reddy, V. Champa, A. P. S, P. S. Nalawade, "Development of speed control for high voltage bldc ceiling fan using regulator," *2021 IEEE Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)*, 2021.

[23] S. Shastri, U. Sharma, B. Singh, "Design and analysis of brushless dc motors for ceiling fan application," *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2020.

[24] S. Chakraborty, J. V. Singh, K. Hatua, "Design of a 3-phase stator for improving the performance of the ceiling fan motors," *2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE)*, 2022.

[25] C. Y. Hsiao, S. M. Htet, G. H. Lin, T. H. Yang, "Investigation of design performance in outer rotor bldc motor for taguchi method," *2023 IEEE 6th Student Conference on Electric Machines and Systems (SCEMS)*, 2023.

[26] IEA, *World Energy Outlook 2017*. International Energy Agency: IEA, 2017.

[27] IEA, *World Energy Outlook 2021*. International Energy Agency: IEA, 2021.

[28] *Türkiye cumhuriyeti enerji piyasası düzenleme kurumu. "elektrik piyasası aylık sektör raporu listesi"*. [Online]. Available: https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23-3/elektrikaylik-sektor-raporlar (visited on 03/08/2024).

[29] *Türkiye cumhuriyeti sanayi ve teknoloji bakanlığı. "türkiye'de enerji verimli motorların teşvik edilmesi, envanter raporu"*. [Online]. Available: https://www.tevmot.org.tr/dokumanlar/ (visited on 03/08/2024).

[30] *Türkiye cumhuriyeti sanayi ve teknoloji bakanlığı. tevmot proje broşürü.* [Online]. Available: https://www.tevmot.org.tr/wp-content/uploads/2020/11/TEVMOT-proje-brosuru.pdf (visited on 03/08/2024).

[31] *Türkiye cumhuriyeti sanayi ve teknoloji bakanlığı. "türkiye'de enerji verimli motorların teşvik edilmesi.* [Online]. Available: https://www.tevmot.org.tr/ (visited on 03/08/2024).

[32] P. Waide, C. U. Brunner, "Energy efficiency series," in *Energy Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor Driven Systems*, IEA, 2011, pp. 35–42.

[33] *Türkiye cumhuriyeti sanayi ve teknoloji bakanlığı. "elektrik motorlarında enerji verimliliği"*. [Online]. Available: https://www.tevmot.org.tr/dokumanlar/ (visited on 03/11/2024).

[34] *Ebmpapst. "brochures – radipac ec centrifugal fans"*. [Online]. Available: https://www.ebmpapst.com/de/en/support/downloads/brochures-and-catalogs.html (visited on 03/12/2024).

[35] M. E. Bakanlığı, "Elektrik elektronik teknolojisi," in *Bir Fazlı Motor Sarımı*, MEB, 2011, pp. 5–6.

[36] *Aksa motor fan*. [Online]. Available: https://www.aksamotorfan.com/tr-TR/catalogue/c-tipi-motor-aks-686m/aks-686m-16/1084/144 (visited on 08/15/2024).

[37] *Gamak, çift devirli motorlar*. [Online]. Available: https://www.gamak.com/cift-devirli-motorlar (visited on 08/15/2024).

[38] *Çelikbilek mühendislik*. [Online]. Available: https://www.celikbilekmuhendislik.com/dc-motor-tamir-bakimi/ (visited on 08/24/2024).

[39] C. Mülayim, *Doğru akım motorları ve genel yapısı*, 2020. [Online]. Available: https://muhendisgelisim.com/dogru-akim-motorlari/ (visited on 08/24/2024).

[40] M. A. Hossain, *What is a dc motor and its working principle?* 2024. [Online]. Available: https://assunmotor.com/blog/dc-motor/ (visited on 08/24/2024).

[41] AXAIR, *Energy efficiency with ec fans motors*. [Online]. Available: https://www.axair-fans.co.uk/all-technical-information/ec-technology-ec-fans/ (visited on 08/24/2024).

[42] Y. Demir, M. Aydın, "Fırçasız dc ve ac sürekli mıknatıslı motor tasarımı ve kullanılan yazılımlar," *2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 2012.

[43] S. Kahourzade, "A comprehensive review of axial-flux permanent-magnet machines," *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2014.

[44] S. KÜL, "Doğrudan yol vermeli sabit miknatisli senkron motor tasarimi ve tasarim optimizasyonu," Ph.D. dissertation, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2015, p. 14.

[45] *London metal exchange: Home*. [Online]. Available: https://www.lme.com/ (visited on 08/11/2024).

[46] *Posco*. [Online]. Available: https://www.poscogroup.com/ (visited on 08/11/2024).

[47] *Jfe steel corporation*. [Online]. Available: https://www.jfe-steel.co.jp/en/ (visited on 08/11/2024).

[48] *Kingsmagnet*. [Online]. Available: https://www.kingsmagnet.com/ (visited on 08/11/2024).

[49] *Ebmpapst. "brochures – greentech ec technology."*. [Online]. Available: https://www.ebmpapst.com/de/en/support/downloads/brochures-and-catalogs.html (visited on 08/11/2024).

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. M. Z. Güney, S. Zorlu Partal, “Soğutma Fan Uygulamalarında Kullanılan Verimsiz Motorlara Alternatif Olarak BLDC Motor Tasarımı” 12. Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi, pp. 114-122, Temmuz 2024.

Ödül

1. TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı Çağrı Duyurusu, Bursiyer