



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

EKSENEL AKILI SABİT MIKNATISLI ÇİFT STATORLU

SENKRON MOTOR TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sümeyye SARIDAĞ

Danışman: Doç. Dr. Mustafa EKER

TOKAT- 2025

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Mustafa EKER danışmanlığında hazırlamış olduğum “Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Çift Statorlu Senkron Motor Tasarımı” adlı Yüksek Lisans tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

.../.../...

Sümeyye SARIDAĞ

İmza

TEŞEKKÜR

Eğitim sürecime göstermiş olduğu sabır, harcadığı zaman ve özverisi ile yön veren, deneyim ve bilgilerinden yararlandığım, öğrencisi olduğum için kendisiyle gurur duyduğum değerli danışmanım Doç. Dr. Mustafa EKER'e,

Engin bilgi birikimi ile kariyer hayatımda örnek alacağım kıymetli hocam Prof. Dr. Mehmet AKAR'a,

Tez yazım sürecinde yol göstericiliği ve önemli tavsiyeleri ile katkıda bulunan Dr. Öğr. Üyesi Yusuf AVŞAR'a ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÖZSOY'a,

Her konuda bana yardımcı olan Arş. Gör. Emre GÖZÜAÇIK'a ve Arş. Gör. Hilal İRGAN'a,

Lise başlangıcıyla hayatıma giren, içtenliği ve dostluğu ile iyi kötü her anımda yanımda olan can dostum Sevda YERLİKAYA'ya,

Beni bugünlere getiren, her daim bana güvenen, anlayış ve fedakarlıkları ile arkamda duran anne ve babama, manevi desteği ile bana güç veren kardeşime,

Teşekkürü borç bilirim...

ÖZET

EKSENEL AKILI SABİT MIKNATISLI ÇİFT STATORLU SENKRON MOTOR TASARIMI

Sarıdağ, Sümeyye

Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Mustafa EKER

2024, xiii + 78 Sayfa

Sanayi sektöründe enerji verimliliğinin artırılması, sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Günümüzde, geleneksel asenkron motorların yerine daha yüksek verimli ve güç yoğunluğu yüksek motorların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu bağlamda, mıknatıs ve eksenel akılı motor teknolojisinin gelişiminin etkisi ile eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron motorlar, kompakt yapıları, yüksek tork kapasiteleri ve gelişmiş termal performansları ile önemli bir alternatif sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, çift statorlu eksenel akılı senkron motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, tek taraflı eksenel akılı motorlarda görülen düzensiz manyetik çekim kuvvetlerini minimize ederek daha dengeli bir motor yapısı oluşturmaktır. Bu kapsamda, Motenergy firmasına ait 3 fazlı, 100 A, 48 V bir motorun stator ölçüleri referans alınarak, çift statorlu ve tek rotorlu bir motor modeli geliştirilmiştir. Bu rotor modelinde ise yüzey mıknatıslı NN yapı kullanılmıştır. Motorun manyetik, termal ve yapısal analizleri Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile gerçekleştirilmiş, optimizasyon sürecinde ise Çok Amaçlı Genetik Algoritma (MOGA) yöntemi kullanılmıştır.

Tasarım süreci, öncelikle matematiksel modelleme ile başlatılmış, ardından SEY tabanlı analizler ile devam etmiştir. Elde edilen bulgular, önerilen motor tasarımının yüksek verimlilik (%92,41) ve tork dalgalanma değerinin %7 civarında olduğu daha dengeli manyetik kuvvet dağılımı açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Eksenel Akılı Motor, Çift Stator Tek Rotor, Motor Tasarımı

ABSTRACT

DESIGN OF DOUBLE STATOR AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Sarıdağ, Sümeyye

Master's Thesis, Electrical-Electronics Engineering Department

Advisor: Doç. Dr. Mustafa EKER

2024, xiii + 78 pages

Increasing energy efficiency in the industrial sector is of great importance for sustainability. Today, the use of higher efficiency and higher power density motors instead of conventional asynchronous motors is becoming increasingly widespread. In this context, with the effect of the development of magnet and axial flux motor technology, axial flux permanent magnet synchronous motors offer an important alternative with their compact structure, high torque capacity and improved thermal performance.

In this thesis, a double stator axial flux synchronous motor design is carried out. The main objective of the study is to create a more balanced motor structure by minimising the irregular magnetic attraction forces seen in single-sided axial flux motors. In this context, a double stator and single rotor motor model has been developed by taking the stator dimensions of a 3-phase, 100 A, 48 V motor from Motenergy as reference. In this rotor model, surface magnet NN structure was used. The magnetic, thermal and structural analyses of the motor were carried out by Finite Element Method (FEM) and Multi Objective Genetic Algorithm (MOGA) method was used in the optimisation process.

The design process was started with mathematical modelling and then continued with FEM based analyses. The results obtained show that the proposed motor design has significant advantages in terms of high efficiency (92.41%) and more balanced magnetic force distribution with torque ripple value around 7%.

Keywords: Axial Flux Motor, Double Stator Single Rotor, Motor Design

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ETİK SÖZLEŞME.....	i
TEŞEKKÜR.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	x
1 GİRİŞ	1
2 GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÖZETLERİ.....	6
2.1 Motor Özellikleri	11
2.2 Motor Yapısal Kısımları.....	12
2.2.1 Stator.....	12
2.2.2 Sargılar.....	14
2.2.3 Rotor	15
2.2.4 Mıknatıslar	15
2.3 Eksenel Akılı Senkron Motorların Sınıflandırılması	17
2.3.1 Tek Statorlu Tek Rotorlu Eksenel Akılı Senkron Motor.....	18
2.3.2 Tek Statorlu Çift Rotorlu Eksenel Akılı Senkron Motor	19
2.3.3 Çift Statorlu Tek Rotorlu Eksenel Akılı Senkron Motor	22
2.3.4 Çok Statorlu ve Çok Rotorlu Eksenel Akılı Senkron Motor	23
3 MATERYAL METOT	24
3.1 Temel Analitik Boyutlandırma Denklemleri.....	25
3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	32

3.3	Çok Amaçlı Genetik Algoritma	34
4	BULGULAR ve ÖNERİLER	37
4.1	Çift Statorlu Eksenel Akılı Senkron Motorun SEY ile Analizi.....	37
4.2	Çift Statorlu Eksenel Akılı Senkron Motorun Manyetik Tasarımı	41
4.3	Çok Amaçlı Genetik Algoritma Optimizasyon Sonuçları.....	46
4.4	Çift Statorlu Eksenel Akılı Senkron Motorun SEY Sonuçları.....	49
4.5	Farklı Yük Koşullarında SEY Sonuçları.....	56
4.6	Çift Statorlu Eksenel Akılı Senkron Motorun Yapısal Tasarımı	57
4.7	Çift Statorlu Eksenel Akılı Senkron Motorun Termal Analizi	63
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	67
	KAYNAKÇA.....	72

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Eylül 2024 döneminde faturalanan elektrik tüketiminin tüketici türü bazında dağılımı (%)	1
Şekil 1.2 Avrupa'da motor satışları	3
Şekil 2.1 Homopolar Jeneratör	6
Şekil 2.2 Farklı motor topolojilerinde akı yolları	11
Şekil 2.3 a) nüvesiz stator b) nüveli oluksuz stator c) nüveli oluklu stator	12
Şekil 2.4 EASM'nin stator yapısı a) lamine stator nüvesi b) stator oluk yapısı c) oluklar (Rhyu vd., 2017)	13
Şekil 2.5 a) Dağıtılmış sarım b) tambur sargı c) toroidal sargı	14
Şekil 2.6 a) Sincap kafesli rotor b) yüzey mıknatıslı rotor	15
Şekil 2.7 EASM' lere ait sabit mıknatıs şekilleri: a) Yarım daire, b) Trapezoidal, c) Dikdörtgen ve d) Dairesel	16
Şekil 2.8 Farklı mıknatıs düzenlemeleri (üstteki) radyal mıknatıs düzenlemesi, (ortadaki) teğetsel mıknatıs düzenlemesi, (alttaki) Halbach dizisi	17
Şekil 2.9 EASM sınıflandırmaları	18
Şekil 2.10 Konsantre sargılara sahip oluklu stator	18
Şekil 2.11 Oluksuz toroidal sargılı tek statorlu EASM	19
Şekil 2.12 Oluksuz dikdörtgen stator sargılara sahip TORUS topolojisi	19
Şekil 2.13 Oluksuz toroidal sargılı TORUS topolojisi	20
Şekil 2.14 TORUS NN topolojisi	20
Şekil 2.15 TORUS NS topolojisi	21
Şekil 2.16 Nüvesiz TORUS NS yapısı	21
Şekil 2.17 YASA motor	21
Şekil 2.18 Oluklu ÇS-EASM	22
Şekil 2.19 Oluksuz ÇS-EASM	23
Şekil 2.20 Çok statorlu çok rotorlu topoloji	23
Şekil 3.1 Tetrahedron	32
Şekil 3.2 MOGA'nın optimizasyon sürecine ait akış şeması	35
Şekil 4.1 RMxprt görseli a) stator sargı şeması b) stator oluk geometrisi	37
Şekil 4.2 Hava aralığı manyetik akı değeri	38

Şekil 4.3 Stator akımları	39
Şekil 4.4 Verim.....	39
Şekil 4.5 Güç grafiği.....	39
Şekil 4.6 İndüklenen gerilim.....	40
Şekil 4.7 3 Boyutlu katı model	41
Şekil 4.8 Oluşturulan mimariye ait motor bölümleri a) rotor nüvesi ve mıknatıs b) $\frac{1}{4}$ model c) stator nüvesi	42
Şekil 4.9 Kullanılan ağ yapısı	43
Şekil 4.10 Optimize edilmemiş modele ait stator faz akımları	44
Şekil 4.11 Optimize edilmemiş modele ait indüklenen gerilim.....	45
Şekil 4.12 Optimize edilmemiş modele ait tork grafiği.....	45
Şekil 4.15 Nominal çalışmada stator akımları	49
Şekil 4.16 Nominal çalışmada indüklenen gerilim	49
Şekil 4.17 Nominal çalışmada tork.....	50
Şekil 4.13 Optimizasyon öncesi FFT sinyalleri.....	52
Şekil 4.14 Optimizasyon sonrası FFT sinyalleri.....	52
Şekil 4.18 Nüvelerdeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı	53
Şekil 4.19 Stator nüvesinin manyetik akı yoğunluğu dağılımı	53
Şekil 4.20 Stator nüvesinin akı vektörleri.....	54
Şekil 4.21 Rotor nüvesinin manyetik akı yoğunluğu dağılımı	54
Şekil 4.22 Rotor manyetik akı vektörleri ve akı dağılımları.....	54
Şekil 4.23 Mıknatısların manyetik akı dağılımları	55
Şekil 4.24 Stator sargılarının akım yoğunluk değerleri	55
Şekil 4.25 ÇS-EASM parçaları	58
Şekil 4.26 Yapısal analiz için oluşturulan 3 Boyutlu model	59
Şekil 4.27 Motor mili stres analizi	60
Şekil 4.28 Motor mili yer değiştirme analizi	60
Şekil 4.29 Stator oluk dişleri yer değiştirme analizi	61
Şekil 4.30 Stator oluk dişleri stres analizi.....	61
Şekil 4.31 ÇS EASM'nin termal sıcaklık dağılımı.....	64

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo No	Sayfa
Tablo 3.1 Standart dalga şekilleri.....	27
Tablo 3.2 Tasarımı gerçekleştirilen motor parametreleri	31
Tablo 4.1 Motor parçalarında kullanılan malzemeler	44
Tablo 4.2 Optimizasyon limit değerleri	47
Tablo 4.3 Mıknatıs optimizasyon sonuçları	48
Tablo 4.4 Akı yoğunluğu aralıkları	56
Tablo 4.5 ÇS-EASM'nin farklı yük koşulları altındaki çalışma değerleri.....	57
Tablo 4.6 ÇS-EASM'nin kısımlarına ait termal özellikler	63

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

Simgeler

$P_{\text{çıkış}}$	Çıkış gücü
η	Verim
m	Faz sayısı
T	EMK'nın bir döngüsünün periyodu
e	Hava aralığı EMK'sı
i	Faz akımı
E_{pk}	EMK tepe noktası
I_{pk}	Faz akımının tepe noktası
K_i	Akım dalga faktörü
K_p	Elektriksel güç dalga şekli katsayısı
I_{rms}	Faz akımının rms değeri
K_e	EMK katsayısı
K_w	Sargı dağıtım katsayısı
N_t	Faz başına sarım sayısı
B_g	Hava aralığı akı yoğunluğu
f	Frekans
P	Rotor kutup çifti
λ	İç yüzey yarıçapı ile dış yüzeyin yarıçap oranı
D_i	İç yarıçap
D_o	Dış yarıçap
K_Φ	Rotor ve stator üzerindeki elektriksel yükleme oranı
A	Toplam elektriksel yüklenme
m_1	Stator faz sayısı
L_e	Motor eksenel uzunluğu
K_L	En-boy oranı katsayısı
D_{tot}	Toplam dış yarıçap uzunluğu
L_{tot}	Eksenel yönde motor uzunluğu
P_{den}	Toplam güç yoğunluğu
ω_m	Rotor açısal hızı

W_{cu}	Sargı sonu uzunluğu
D_{avg}	Ortalama yüzey yarıçap uzunluğu
K_{cu}	Bakır dolgu faktörü
J	Akım yoğunluğu
L_s	Stator eksenel uzunluğu
L_r	Rotor eksenel uzunluğu
g	Hava aralığı eksenel uzunluğu
L_{cs}	Stator nüve kalınlığı
L_{ss}	Oluk derinliğı
B_{cs}	Stator nüvesi manyetik akı yoğunluğu
α_p	Hava aralığı ortalama akı yoğunluğunun tepe noktası değerine oranı
L_{pm}	Mıknatısların eksenel uzunluğu
L_{cr}	Rotor nüve uzunluğu
B_{cr}	Rotor nüve akı yoğunluğu
B_u	Mıknatıs yüzeyindeki akı yoğunluğu
μ_r	Bağıl geçirgenlik katsayısı
B_r	Mıknatısın kalıcı akı yoğunluğu
K_d	Kaçak akı katsayısı
K_c	Carter katsayısı
K_f	Radyal yöndeki hava aralığı manyetik akı yoğunluğu
$P_{kayıp}$	Toplam kayıplar
P_{cu}	Bakır kayıpları
P_{rotor}	Rotor kayıpları
P_{stray}	Kaçak yük kayıpları
P_{fe}	Nüve kayıpları
E	Elektrik alan şiddeti
H	Manyetik alan şiddeti
ρ	Yük yoğunluğu
B	Manyetik akı yoğunluğu
σ	Elektrik iletkenliğı

ε	Elektrik geçirgenliği
ε_0	Serbest uzaydaki elektriksel geçirgenlik
ε_r	Bağıl geçirgenlik
μ	Manyetik geçirgenlik
μ_0	Serbest uzaydaki manyetik geçirgenlik

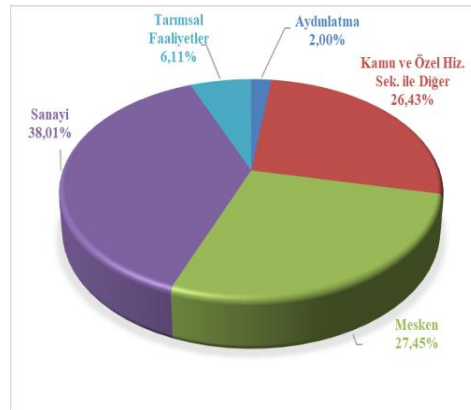
Kısaltmalar

SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
IEC	Uluslararası Elektrik Komisyonu
IE	Uluslararası Verimlilik
EMK	Elektromotor Kuvveti
EASM	Eksenel Akılı Senkron Motor
ÇS EASM	Çift Statorlu Eksenel Akılı Senkron Motor
AFIR	Eksenel Akılı İç Rotor
MOGA	Çok Amaçlı Genetik Algoritma

1 GİRİŞ

Sanayi Devrimi ile ortaya çıkan sanayileşme, fosil yakıt tüketiminde önemli bir artışa yol açmıştır. Bu kaynakların kontrolsüz kullanımı, nüfus artışı, beşeri faaliyetler ve doğal faktörlerle birleşerek atmosfere salınan sera gazı konsantrasyonunun artmasına neden olmaktadır. Sera gazlarının artan konsantrasyonundan kaynaklanan küresel ısınma, modern çağın en önemli sorunlarından biri haline gelmektedir. Bu soruna katkıda bulunan çeşitli unsurlar arasında enerji üretimi en büyük faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle enerji üretiminde çevresel zararı azaltmak, enerji kaynaklarını korumak ve ekonomik büyümeye katkı sağlamak için enerji tüketiminin doğru yönetilebilmesi gerekmektedir (Saidur, 2010).

Elektrik tüketim oranlarına bakılarak enerji üretimi analiz edilebilmektedir. Şekil 1.1’de verilen EPDK raporlarına göre Türkiye’de 2024 yılı Eylül ayı için faturalanan elektrik tüketim dağılımının %38.01’lik kısmının sanayi sektörü tarafından kullanıldığı görülmektedir. Sanayi sektörünün enerji tüketimindeki yüksek payı enerji arz-talep dengesini ve enerji üretim tesislerinin kapasite planlamalarını doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla sanayi sektöründe enerji tasarruf uygulamalarına odaklanılması gerekmekte ve teknolojik iyileştirmeler kritik önem taşımaktadır (Anonim, 2024a).



Şekil 1.1 Eylül 2024 döneminde faturalanan elektrik tüketiminin tüketici türü bazında dağılımı (%)

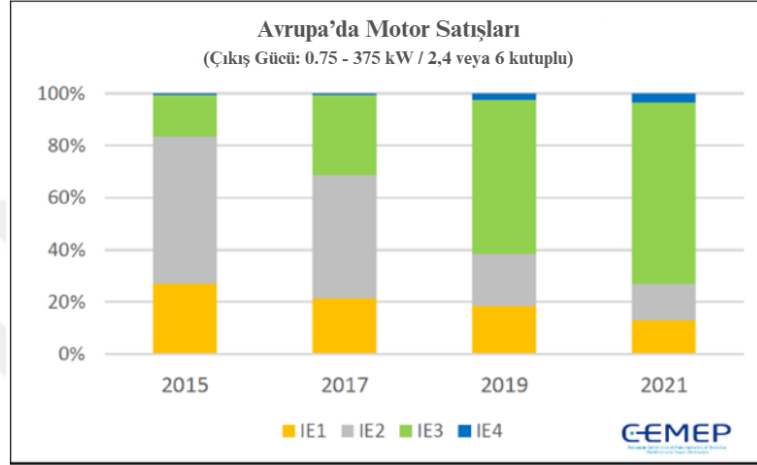
Sanayide enerji tüketiminin yaklaşık %70’i, küresel elektrik tüketiminin ise %53’ü elektrik motoru tahrikli sistemler tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu yüksek kullanım oranları enerji tüketim sınırlandırmalarını ve uluslararası yasal düzenlemeleri gerektirmiştir (Anonim, 2024b).

Elektrik motorlarında verimliliği sağlamak için sanayi sektöründe ilk olarak 1998 yılında tüketiciyi korumak ve haksız rekabeti önlemek adına CEMEP (Avrupa Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği İmalatçıları Komitesi) kurulmuştur. Bu komite elektrik motorları verimlilik değerlerini yüksekte düşüğe doğru EFF1, EFF2 ve EFF3 şeklinde sınıflandırmıştır. 2009 yılına gelindiğinde Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) hükümetlerin verimlilik seviyelerini belirleyerek küresel ölçekte elektrik tüketiminde tasarruf sağlamak, karbon emisyonunu azaltmak ve ülkeler arası motor kullanımlarında uyum oluşturmak amacıyla uluslararası sınıf standartları yayınlamaktadır. Birçok ülkede IEC 60034-30-1 elektrik motoru standartları temel düzenleme kabul edilmektedir. Bu standart baz alınarak Dünya çapında verimli motor kullanımlarını karşılaştırılabilir hale getirmek için IE (Uluslararası Verimlilik) sınıfları uygulanmaktadır (De Almeida vd., 2019; Zöhra ve Akar, 2019).

0.12 ile 1000 kW çıkış gücüne sahip elektrik motorlarını verimliliklerine göre sınıflandıran IE enerji verimliliği sınıflarının açıklamaları şu şekildedir:

- IE1- (Standart Verimlilik): En düşük seviyede bulunmaktadır. Bu sınıf Türkiye’de 2012 yılında yasaklanarak kullanımları sınırlandırılmıştır.
- IE2- (Yüksek Verimlilik) IE1 sınıfına kıyasla daha verimlidir 2015 yılı itibari ile piyasadan kaldırılmışlardır ancak düşük güç seviyelerinde sürücü ile kullanımlarına izin verilmiştir.
- IE3 (Premium Verimlilik) enerji verimliliği yüksek olan bu sınıf standart haline getirilerek 2015 yılı itibariyle kullanımları zorunlu hale getirilmiştir.
- IE4- (Süper Premium Verimlilik) Yüksek verimlilik uygulamaları için önem oluşturmaktadır. 2030 yılına kadar kullanım teşviklerinin artırılması ve en düşük enerji verimliliği sınıfını oluşturarak uygulamaya konulması beklenilmektedir.
- IE-5 (Ultra Premium Verimlilik) geliştirilmekte olan bu sınıf elektrik motorlarında kayıpları en aza indirerek verimliliğin elde edilebileceği en üst sınıfı oluşturmakta ve bu sınıf uygulamalarının genişletilmesi planlanmaktadır (Aybeniz vd., 2022; Goman vd., 2019)

IE enerji sınıfı uygulamalarının etkinliğini daha iyi görebilmek için CEMEP 2022 yılının Temmuz ayında elektrik motorlarında belirlenen IE sınıf standardı uygulamalarının 2015 – 2021 yılları arasındaki pazar araştırması rapor sonuçlarını 7 yıl arayla kıyaslamıştır. Kullanım oranları verilen motor sınıflarında yıllara göre değişen kullanım oranları Şekil 1.2’de gösterilmektedir. Bu oranlarda 2021 yılı verilerine göre IE3 verim sınıfına ait motorların oranları %70 artış göstermiştir (Anonim, 2022).



Şekil 1.2 Avrupa'da motor satışları

Türk sanayisinde ise kullanılan 7.5 ila 375 kW anma güç aralığındaki alternatif akım, asenkron, üç fazlı ve sincap kafesli motorlar daha verimli motorlarla değiştirilerek Türkiye ekonomisine yıllık 34 Milyar kWh enerji tasarrufu ile 21 milyar TL katkı sağlaması planlanan bir dönüşüm programı başlatılmıştır (Anonim, 2024c).

Sanayi sektöründe toplam enerji tüketiminin büyük bir kısmını asenkron motorlar oluşturmaktadır. Yapılarının basit olması, az sıklıkta bakım gerektirmeleri, maliyetlerinin düşük olması, zorlu ortamlarda güvenilirliği ile endüstride geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Fakat enerji verimliliği sağlayamayan bu motorların yerini günümüz endüstrisinde yüksek verimliliğe gereksinim duyulan ve gelişen teknoloji ile tasarlanan yüksek güç yoğunluğuna sahip motorlar almaktadır (M. Liu vd., 2023).

Asenkron motorlara eksenel akıllı motorlar önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Sabit mıknatıslı senkron motor sınıfında yer alan Eksenel Akıllı Senkron Motorlar (EASM), elektrikli motor teknolojilerinde önemli bir gelişme olarak tanımlanmakta ve tarihçesi 1800'lü yıllara dayanmasına rağmen 1960'lı yıllardan sonra akademik çalışmalarda

görülmeye başlanmıştır. EASM'lerde kullanılan sabit mıknatıslar yüksek manyetik akı üretmekte bu özelliği motorun kompakt ve hafif yapılarda tasarlanabilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle gelişen mıknatıs teknolojisi yüksek verimlerde çalışan motor araştırmalarında büyük ilerleme sağlamıştır. EASM'ler yapısal avantajlarının yanı sıra yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verimlilik sunmaları nedeniyle mıknatıs teknolojisinde yaşanan gelişmeler sonrası popüleriteleri artmıştır. Bu avantajlara yüksek tork ve düşük hızda çalışma ile termal üstünlükler de eklenmektedir. Bu sebeple gerek akademik çalışmalarda gerekse endüstriyel uygulamalarda yoğun ilgi görmektedir.

EASM'ler farklı topolojilerde kullanım imkânı sunmaktadır. Tek taraflı motor topolojilerine, basit yapıları ve yaygın kullanımları ile sıklıkla karşılaşılmaktadır. Fakat bu motorların dezavantajı düzensiz manyetik çekim kuvvetlerine maruz kalmalarıdır. Bu yapıdaki dezavantajı gidermek ve manyetik çekim kuvvetlerini dengelemek için çift taraflı yapılar kullanılmaktadır. Ayrıca çift taraflı yapılar daha yüksek güç yoğunluğu, daha yüksek tork, daha az titreşim, düzgün manyetik alan dağılımı ve gelişmiş dinamik performans gibi avantajlar sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında Çift Statorlu Eksenel Akı Senkron Motor (ÇS-EASM) avantajları da göz önünde bulundurularak, piyasada seri üretimi yapılan tek taraflı bir motorun stator ölçüleri kullanılarak çift statorlu tek rotorlu bir motor tasarımı planlanmıştır. Çalışmanın amacı tek taraflı yapıya sahip eksenel akı motorlarda meydana gelen düzensiz çekim alanının olumsuz etkisini minimize etmeye yönelik tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple Motenergy firmasına ait 3 fazlı, 100 A, 48 V bir motorun stator yapısı referans alınarak yüksek verim ile çalışan bir model hedeflenmiştir. Tasarımı planlanan motor özel bir amaca yönelik tasarlanmamış olup, kullanılmak istenilen alanlara yönelik sürme şekli, sargı yapısı gibi basit değişikliklerle istenilen alanlara evrilebilecek bir yapıda olması istenmiştir. Mevcut hali ile fan ve pompa tahrikinde tercih edilebilmektedir. Ayrıca tasarlanan motor topolojisinde NN tipi rotor yapısı tercih edilmiştir. NN yapı rotor nüvesi NS yapıdaki rotor nüvesine kıyasla daha kalın yapıdadır, bu çalışmada ileriki çalışmalara da temel oluşturmak amacı ile NN yapı tercih edilmiştir. Bu tasarımda NN tipi rotor yapısı ve kullanılan mıknatısların tork ve tork salınımına etkisi de incelenmiştir. Bu salınımları azaltmak için Çok Amaçlı Genetik Algoritma (MOGA) yöntemi tercih

edilmiştir. Elde edilen bulgular detaylı olarak sunulmuştur. Tasarım aşaması ilk olarak matematiksel modelleme ile yapılmış daha sonra motorun Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile analitik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Analitik tasarımdan sonra motorun 3 Boyutlu katı modeli oluşturulmuş ve SEY ile analizleri incelenmiştir. Manyetik tasarım tamamlandıktan sonra yine SEY ile motorun termal ve yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu tez 5 ana bölümden oluşmaktadır. Tez taslağı aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

Tez Taslağı

Bölüm 1: Giriş: Dünya’da ve Türkiye’de sanayinin ve motor kullanımlarının enerji tüketimi ile küresel ısınmadaki kritik önemini içermektedir. Ayrıca motor verimliliklerinin ve motor kullanımlarındaki tarihsel gelişiminin, günümüzde EASM’lere ne gibi katkılar sağladığını açıklarken tezin içeriği hakkında bilgi vermektedir.

Bölüm 2: Genel Bilgiler ve Literatür: Bu kısımda EASM’lerin tarihçesinden kısaca bahsedilmiştir ve literatürde bu motorlar ile ilgili çalışmalara nasıl yer verildiği anlatılmıştır. Ayrıca EASM’lerin topolojileri ve birbirlerine göre avantajlarını sunmaktadır.

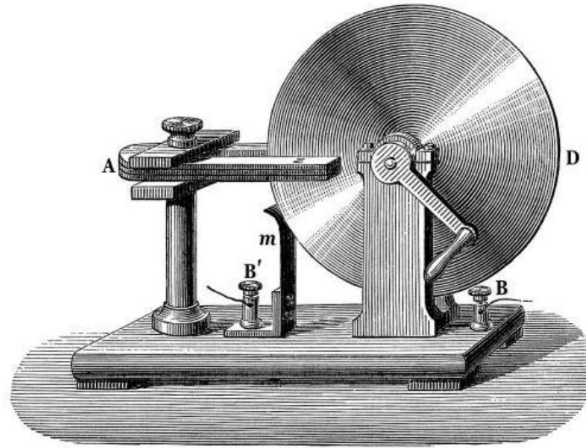
Bölüm 3: Materyal ve Metot: ÇS-EASM’lerin yapısı, matematiksel denklemleri, motor parçaları verilmiştir. Bunun yanı sıra tezde kullanılan SEY ve MOGA optimizasyon yöntemleri hakkında bilgiler içermektedir.

Bölüm 4: Bulgular ve Tartışma: İlk olarak motorun matematiksel modellemesine ait sonuçlar verilmiştir. Daha sonra ise SEY ile yapılan analitik ve 3 Boyutlu katı model sonuçlarını sunmaktadır. MOGA optimizasyon yöntemi ile elde edilen sonuçlar aktarılmıştır. Son olarak motorun termal ve yapısal analizlerine ait sonuçlar bulunmaktadır.

Bölüm 5: Sonuç ve Öneriler: Bu bölümde genel değerlendirme ve önerilere yer verilmiştir.

2 GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETLERİ

Michael Faraday, 1831 yılında doğru akımı eksenel bir alan içerisinde ve dönen bakır bir diskten oluşan Şekil 2.1'deki homopolar jeneratörünü kullanarak elde etmiştir. Bu çalışması eksenel akıllı motorların, elektriğin ve manyetizmanın anlaşılmasına öncülük etmiştir. 1837 yılında Thomas Davenport'un ilk radyal akıllı makinenin patentini alması ile radyal akıllı motorlar çoğu elektrikli makine kullanımlarında çözüm haline gelmiştir. Bu durum uzun yıllar eksenel akıllı motor teknolojisindeki gelişmelerin duraksamasına neden olmuştur. Eksenel akıllı motorların bu duraksamasında bir diğer etken; stator ve rotor arasında manyetik çekimin fazla oluşu, imalat sorunları, stator nüvesi laminasyonunun maliyetinin yüksek olması ve montajda yaşanan zorluklardır (Mushid ve Dorrell, 2017).



Şekil 2.1 Homopolar Jeneratör (Alglave ve Boulard, 1884)

1980'li yıllara gelindiğinde nadir toprak elementlerinde önemli gelişmeler yaşanmıştır. Nadir toprak elementleri yapay kalıcı mıknatısların oluşturulması için temel malzemelerdir. Kalıcı mıknatıslar motorların rotorlarında sargılar yerine kullanılarak daha verimli ve performansı yüksek motorların geliştirilmesine öncülük etmiştir. Bu durum sonrası elektrik motorlarında büyük bir inovasyon yaşanmıştır. Çin 2010 yılında nadir toprak elementi üreticiliğinde Dünya genelinde %97.3'lük pay ile ihracatta lider konuma gelmiştir. Aynı yıl içerisinde Çin'in Japonya'ya yönelik nadir toprak ihracatını kısıtlanması nedeni ile elektrikli araçlar, bataryalar ve manyetik sistemler gibi alanlarda bu elementlere büyük ölçüde bağımlı olan Japonya'ya büyük bir tehdit oluşturmuştur. Bu

nedenle nadir toprak krizi olarak adlandırılan küresel bir sorun yaşanmıştır. Bu sorun sonrası Çin'in tekelinde bulunan nadir toprak elementlerinin fiyatları yükselişe geçerek piyasada güvensizliğe ve EASM'lerin üretim ve gelişmesinde dalgalanmalara neden olmuştur (Depraite ve Goutte, 2023; Güner B., 2019). Mıknatıslarda sağlanan bu gelişmeler sonrasında sabit mıknatıslı motor kullanım ve tasarımlarında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Sabit mıknatıslı motor sınıfından olan eksenel akılı motorlara avantajlı yapıları sayesinde yoğun ilgi kazanmıştır. Düşük hız ve yüksek performans gerektiren elektrikli araçlarda, yüksek verimlilikleri ile rüzgar türbinlerinde, düşük gürültü ve titreşimleri sayesinde medikal uygulamalar gibi çeşitli sektörlerde geniş kullanım alanı oluşturmıştır. Yapısal düzenlemeler, yeni topolojiler, malzeme teknolojisinde yaşanan gelişmeler, optimizasyon çalışmaları için tasarlanan yazılımlar gibi birçok konuda yapılan araştırmalar zamanla derinleşerek bu motor yapılarını geliştirmek ve iyileştirmek için literatürde yerini almıştır.

Huang ve ark. (1998) elektrik makinelerinde farklı yapı ve özellikteki makineleri farklı dalga biçimleri ile dikkate alarak genel amaçlı boyutlandırma denklemlerini geliştirmişlerdir. Makine kıyaslamalarında hava aralığı hacmi yerine motorun toplam hacmi ile kıyas yapılması gerekliliğini savunmuşlardır. Hesaplamalarında asenkron ve çift yönlü sabit mıknatıslı motor yapısını karşılaştırarak güç yoğunluğu kıyas sonuçlarını açıklamışlardır.

Cavagnino ve ark. (2001) ÇS-EASM ile geleneksel radyal akılı motor yapılarını kıyaslamıştır. Çalışmalarının ana amacı radyal akılı ve eksenel akılı motorların ne zaman kullanılabileceğini belirlemektir. Motor hacmini, kayıpları ve akı yoğunluğunu sabit tutarak elektromanyetik tork ve tork yoğunluğu açısından motorların performanslarını karşılaştırmışlardır. Seçtikleri iki motorun yapıları farklı boyutlarda ve kutup sayılarındanadır. Kutup sayısını belirleyici faktör seçerek eksenel uzunluğun kısa, kutup sayısının yüksek tutulduğunda EASM'lerin radyal akılı motorlara alternatif olabileceği sonucuna varmışlardır.

Aydin ve ark. (2001) çalışmalarında EASM motorlarında tork titreşimlerini minimize etme konusuna odaklanmışlardır. İç ve dış rotorlu eksenel akılı motorlarda vuruntu

torkunu ve tork dalgalanmalarını 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu SEY kullanarak karşılaştırmışlardır. Sonuçta mıknatısları optimum açısıyla eğmenin, farklı sargı tiplerinin kullanımının, oluksuz statorun oluklu statorlara göre tork dalgalanmalarını azaltmada etkili olacağı gibi sonuçlara varmışlardır.

Mahmoudi ve ark. (2011) çift taraflı eksenel akıllı motor topolojilerinden oluklu ve oluksuz TORUS ve ÇS-EASM arasında karşılaştırma yapmışlardır. Huang ve arkadaşlarının geliştirmiş oldukları genel boyutlandırma denklemlerini kullanarak topolojilerin çeşitli hacimlerini beş güç değerinde karşılaştırmışlardır. 2 Boyutlu alan dağılımları için SEY kullanmışlardır. Çalışmalarının sonunda oluklu TORUS ve ÇS-EASM'nin maksimum tork yoğunluğuna sahip olduğu, oluksuz yapılarda ise ihmal edilebilir düzeyde tork titreşimleri ve tork dalgalanmalarının olduğu sonucuna varmışlardır. İncelemiş oldukları TORUS topolojisinin yüksek akım yoğunluğunda ve düşük elektrik yüklemesinde yüksek güç yoğunluğuna, AFIR topolojisinin ise düşük akım ve yüksek elektrik yüklemesinde yüksek güce sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Mahmoudi ve ark. (2012) genetik algoritma tabanlı bir tasarım denklemi ve ortaya çıkan tasarımlar üzerinde elektromanyetik alan analizi yapmak için SEY'i kullanmışlardır. Maksimum güç yoğunluğu elde etmek için farklı oluk sayısına sahip motorları optimize etmişlerdir. Daha sinüzoidal bir zıt elektromotor kuvveti (EMK) dalga formu ve düşük vuruş torku elde etmek için sargı yapısının yeniden tasarlanması ve sabit mıknatısların eğriltilmesi gibi yöntemleri kapsamlı bir şekilde araştırmışlardır. En iyi konfigürasyonu üretim ve simülasyonda test etmişler ve test sonuçlarında başarılı olmuşlardır.

Husain ve ark. (2017) SEY kullanarak EASM'lerde farklı rotor ve stator konfigürasyonlarının tork yoğunluğunu, güç faktörünü ve verimliliğini karşılaştırmıştır. Ayrıca farklı oluk/kutup kombinasyonlarının motor performansını nasıl etkilediğini de incelemiştir. Karşılaştırmalar sonucunda, çift taraflı yapıların tek taraflı yapılara göre daha yüksek tork yoğunluğu elde ettiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, gömülü ve yüzey mıknatıslı konfigürasyonlarda motorların tork-hız aralıklarını incelemiştir.

Çetin (2018) hazırladığı tez çalışmasında sabit mıknatıslı tek statorlu tek rotorlu fırçasız doğru akım motoru tasarımı gerçekleştirmiştir. Tasarımında yeni bir yöntemle tork dalgalanmalarını azaltmak için mıknatıslara adım ve kayma uygulamıştır. Ek olarak stator oluklarında meydana gelen geometrik hataların tork dalgalanmaları üzerindeki etkisini göstermiş ve hatadan kaçınılması için olukların frezeleme yöntemi ile üretilmesini önermiştir.

Amin ve ark. (2019) Eksenel akıllı makinelerin tasarım ve performansları üzerinde durarak farklı rotor ve stator konfigürasyonlarını avantaj ve dezavantajlarıyla yapısal özelliklerini içeren kapsamlı bir araştırma yapmışlardır. Motor boyutlarının performansı nasıl etkilediği açıklamışlardır. Eksenel akıllı makinelerin uygulama alanlarını ve bu alanlarda nasıl avantajlar sağladığını da listelemişlerdir

Hemeida ve ark. (2019) manyetik eşdeğer devre modelini avantaj ve dezavantajlarıyla sunmuşlardır. Bu model ile EASM'lerde elektromanyetik parametreleri çözmek amaçlı yüklü-yüksüz gerilimleri, vuruş torku ve tork dalgalanmalarını, stator demir kayıplarını hesaplamışlardır. SEY'e kıyasla daha hızlı ve daha basit bir yolla gerçek değerlere yakın sonuçlar almışlardır. Sonuçta manyetik eşdeğer devre modelinden faydalanarak, motorun tüm elektromanyetik parametreleri farklı geometrik ve yüklenme durumlarında deneysel olarak elde edilmiştir.

Hao ve ark. (2022) EASM'lerde yapılan çalışmalara odaklanmış ve bu çalışmalardaki temel topolojik yapıları, tasarım ve optimizasyon yöntemlerini ve kontrol tekniklerini incelemiştir. Sonuç olarak, performans karşılaştırmaları yapmış, MOGA kullanılmasının önemini vurgulamışlardır. Sistem güvenilirliğini artırmak için optimal ve sensörsüz kontrolün güvenlik ve maliyet açısından gerekliliklerinden bahsetmişlerdir.

Slutskiy ve ark. (2022) eksenel ve radyal akıllı motorlar arasındaki temel farklılıkları açıklamak ve bu iki motorun özelliklerini kıyaslamak amacıyla bir çalışma yürütmüşlerdir. Motor tasarımında verimlilik için kullanılan teknikleri açıklamışlardır. İki farklı motorda kayıpları, torkun bozulma nedenlerini ve soğutma yöntemlerini incelemiş ve bunlar için çözümler sunmuşlardır.

Nishanth ve ark. (2023) makalelerinde literatürde verilen farklı EASM topolojileri ile son zamanlarda tasarlanan yeni EASM türlerini, tasarım, boyutlandırma, optimizasyon ve üretim tekniklerini detaylı bir şekilde incelemişlerdir. 2013 yılı itibari ile prototip tasarımlarını da araştırmışlardır. EASM tasarımlarının performans parametrelerini hesaplayarak radyal akılı makineler ile kıyaslamışlardır. Düşük ve orta hızlı uygulamalarda yüksek yoğunlukta tork elde etmek için eksenel akılı motorların daha uygun tasarımların oluşturulmasına olanak sağladığı sonucuna ulaşmışlardır. Çalışmalarında çeşitli yönlerden EASM'leri değerlendirerek bulundukları öneriler neticesinde elektrik makine teknolojilerinde büyük ilerlemeler kaydedilebileceğini ve EASM'lerin geniş ölçekte ticari açıdan benimsenmesine yönelik yüksek potansiyele sahip olduklarını vurgulamışlardır.

Jenkins ve ark. (2023) EASM rotor mıknatısları ve sargıların termal yönetimde kritik önemini vurgulamışlardır. Soğutma yöntemlerini EASM konfigürasyonlarının yapılarına göre değerlendirmişlerdir. Akım yoğunluğunu yükseltmenin yüksek miktarda ısı ürettiğinin önemini vurgulamış bunun için statorun soğutulmasında hangi stratejilerin uygulanabileceğini tartışmışlardır. ÇS-EASM konfigürasyonunun diğer konfigürasyonlara göre uç sargı uzunluğunun motor kütlelerinin artmasını sağladığı, bunu tolere etmek için hızı artırmak gerektiğini, aynı güç değeri gereken uygulamalarda torku azaltarak motor boyutunun düşürülebileceği gibi tasarım değerlendirmelerinde bulunarak hangi termal yönetimin seçilebileceğini detaylıca anlatmışlardır.

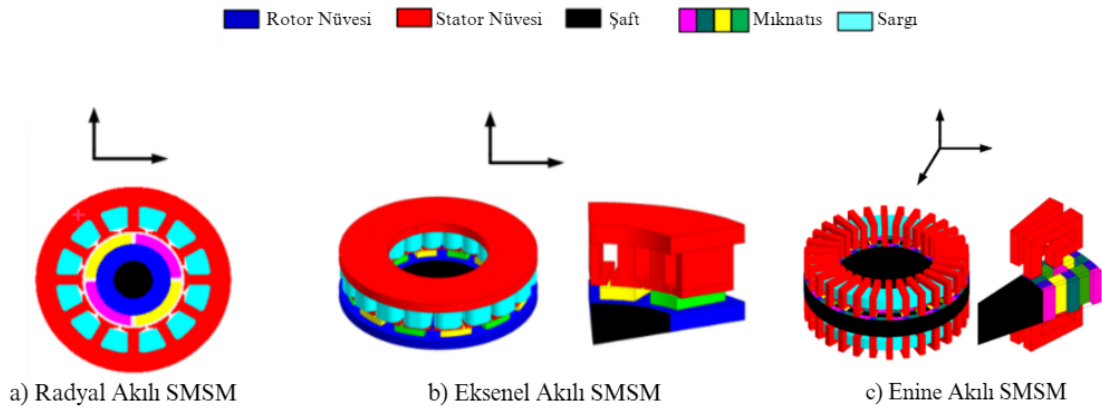
Pamuk (2024) EASM'nin optimal tasarım için beş adet optimizasyon değişkenine bağlı olarak kritik değerlerin tespitine yönelik matematiksel model oluşturmuştur. Genetik algoritma kullanarak gerçekleştirdiği optimizasyonu SEY ile birleştirerek tasarladığı motorun kayıplarını hesaplamıştır.

Wang ve ark. (2024) eksenel akılı motordan YASA, çift statorlu tek rotorlu motor ve kaydırılmış eksene sahip çift statorlu tek rotorlu motor topolojileri arasında 3 Boyutlu SEY ile manyetik performanslarını, avantaj ve dezavantajlarını karşılaştırmışlardır. Bu motorları soğutma, verimlilik, kayıplar ve üretilen tork gibi özellikleri bakımından değerlendirmişlerdir. Sonuçta çift statorlu tek rotorlu motor topolojisinin en yüksek torka,

YASA topolojisinin en düşük nüve kayıplarına ve kaydırılmış eksene sahip çift statorlu tek rotorlu motor topolojisinin en yüksek verimliliğe ve en düşük indüklenmiş voltaja sahip olduğu verilerini elde etmişlerdir.

2.1 Motor Özellikleri

EASM'ler yüksek güç yoğunluğu sağlayan motorlardır. Sabit mıknatısları sayesinde doğal manyetik akı oluşturur ve motorun uyarımı için harici bir enerji kaynağına duyulan ihtiyacı ortadan kaldırır. Asenkron motorların aksine mevcut hat akımından çekilen reaktif gücü azaltarak manyetik alanı korur ve yüksek güç faktörü sağlar. Yüksek güç faktörü, motorun aktif gücünün daha verimli kullanılmasını sağlayarak enerji kayıplarını azaltır ve daha düşük bir hat akımıyla aynı güce ulaşmayı mümkün kılar (Jurca ve Fodorean, 2012). Manyetik akı hava aralığı akı yönüne göre eksenel, radyal ve transversal olarak üçe ayrılır. Temel farkları, torkun stator ve rotor arasındaki elektromanyetik kuvvetler tarafından üretilmesi ve oluşturulan manyetik alanın oluşum yönüne göre isimlendirilmesidir. Şekil 2.2'de gösterildiği üzere radyal akılı motorlarda, manyetik akı hava aralığını radyal yönde geçerek boylamasına bir akı yönünü izler. Eksenel akılı motorlarda, hava aralığı akısı eksenel yönde hareket ederek nüvede boylamasına bir akı yönüne sahiptir. Transversal akılı motorlarda manyetik akı nüvenin kesitine dik bir yönde hareket ederek enine bir akı konfigürasyonuna sahip olmasını sağlar. Hava aralığı akısı ise radyal veya eksenel olabilir (Husain vd., 2020).



Şekil 2.2 Farklı motor topolojilerinde akı yolları (Husain vd.,2020)

Eksenel Akıllı Motorların Avantajları

- EASM'ler aynı güç talebi altında radyal akıllı muadillerine kıyasla daha kompakt bir yapıya sahiptir. Bu durum, özellikle sınırlı kullanım alanı gerektiren uygulamalara ideal bir seçenek sunar. Ayrıca kompakt yapıları, genel malzeme kullanımını azaltarak maliyet etkinliği açısından önemli bir avantaj sağlar.
- Hacimsel güç yoğunluğu fazla ve verimliliği yüksektir.
- Rotorda sargıların olmaması, alan uyarımındaki güç kayıplarını ortadan kaldırarak yüksek verimlilik ve çıkış gücü elde edilmesine olanak tanır.
- Asenkron motorlarda üretilen güç yoğunluğunun iki katı, yüksek enerjili mıknatıs kullanımı ile de neredeyse üç katı ve daha fazla güç yoğunluğu elde edilebilir (Rahman vd., 2006).
- Kutup sayıları artırılarak tork yoğunluğu artırılabilir (Profumo vd., 1996).
- Statorların ve rotorların simetrik sıralaması, stator sargıları arasında ısıyı daha iyi yayma özelliğini beraberinde getirir. Bu, motorun daha uzun süreli kullanımları için olumlu yanlarından birisidir (J. Zhao vd., 2023).

2.2 Motor Yapısal Kısımları

Motor yapısal olarak temelde 5 kısımdan oluşur. Bunlar stator, sargı, rotor, mıknatıs ve hava aralığıdır. Motor yapıları motor tasarımları ve kullanım alanları bakımından farklılıklar gösterir. Bu kısımlara daha yakından bakılacak olursa:

2.2.1 Stator

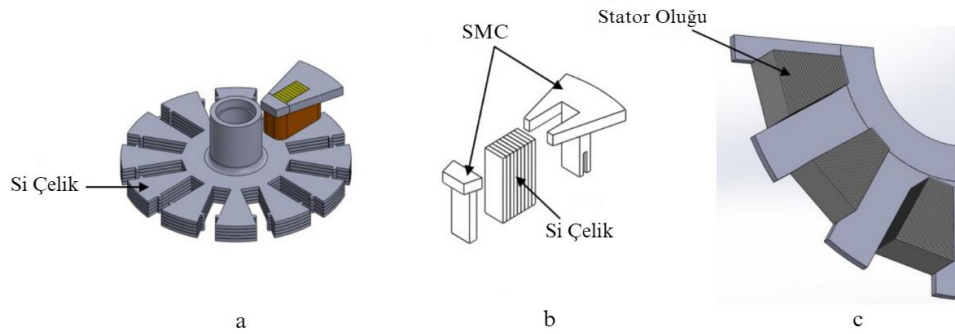
Manyetik alanın oluşturulduğu ve manyetik akının iletimini sağlayan kısımdır. Motor üzerindeki görevi rotora akım sağlamaktır. Stator kendi içinde nüveli, nüvesiz, oluklu veya oluksuz yapılara ayrılır. Kullanılacak sargı tipine göre yapı şekli değişiklik gösterir. Şekil 2.3'te nüvesiz, nüveli oluksuz ve nüveli oluklu stator yapılarına örnek görsel verilmiştir.



Şekil 2.3 a) nüvesiz stator b) nüveli oluksuz stator c) nüveli oluklu stator(Amin vd., 2019)

Nüveler oluklu ve oluksuz yapıların farklı sarım tekniklerine izin veren yapıları sayesinde manyetik akının yoğunlaştırılmasına yardımcı olur. Stator nüvesinin var olduğu motor yapılarında statorda ferromanyetik malzeme kullanılır. Girdap akımı kayıplarını azaltmak için lamine edilmiş manyetik levhalar veya yalıtkan malzeme kullanılmış demir tozlarından oluşan yumuşak manyetik kompozitler (SMC) tercih edilir (Asama vd., 2022).

Nüvesiz yapılarda akı bir rotordan diğerine hareket etmesi nedeniyle statora gerek duyulmaz bu nedenle demir kullanımı yoktur. Bunun yerine mıknatıslanmanın ve iletkenliğin olmadığı reçine ve epoksi gibi malzemeler tercih edilir. Bu kütlenin düşük olması ve verimin yüksek olması istenen tasarımlar için tercih edilebilir. Çünkü nüvenin bulunmaması stator kaynaklı girdap akım kayıplarının, histeresiz kayıplarının ve nüve kayıplarının oluşmayacağı anlamına gelir. Stator oluk yapısının olmaması elektromanyetik titreşimin oluşmasını engelleyerek tork kalitesini artırır (Profumo vd., 1996).



Şekil 2.4 EASM'nin stator yapısı a) lamine stator nüvesi b) stator oluk yapısı c) oluklar (Rhyu vd., 2017)

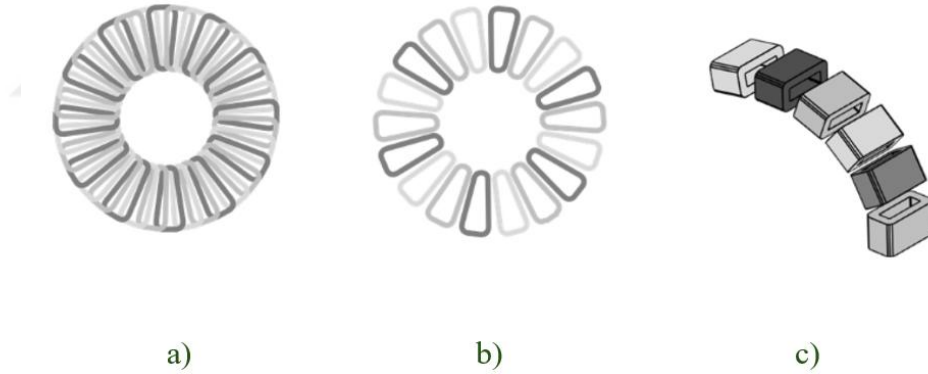
Bir diğer önemli nokta ise statorun oluklu ya da oluksuz olduğu durumdur. Statorun olukları Şekil 2.4'te gösterildiği gibi sargıların yerleştirilmesi için stator nüvesine açılan yapılardır. Oluk sayısı, şekli, türü, açıklığı ve doluluk oranları ile motoru güç çıkışı, tork üretimi ve verimlilik açısından etkiler. Motor ağırlığını arttırsa da mekanik açıdan dayanıklılık sağlar. Farklı sargı yapılarına izin verdiği için akı dağılımı üzerinde etkilidir. Oluklardan kaynaklı kayıpların akı dalgalanmalarına neden olması oluklarda istenmeyen durumlardır (Rhyu vd., 2017). Oluksuz stator yapısında sargılar özel bir sarım ve yerleştirme yöntemi ile reçine içine gömülebilmektedir. Sargılar nüveye toroidal sarılır. Üretimi basit, daha hafif yapıda ve termal yönetimi kolaydır. Stator olukları ve

mıknatıslar arasında oluşan ve motor performansını etkileyen vuruntu torkunu olumsuz tasarımlar neredeyse ortadan kaldırır (Saygin ve Aksöz, 2017).

2.2.2 Sargılar

Eksenel akılı motorların sargıları, aktif kısımları akıyı radyal yönde yönlendirecek biçimde yerleştirilir. Mıknatıslar, hava aralığı akısını rotor üzerinde eksenel yönde iletecek şekilde konumlandırılır. Bu sayede sargılar elektrik akımı ile beslenerek elektromanyetik alan oluşumu sağlar ve mıknatıslarla etkileşime girerek dönme hareketi oluşturur.

EASM'lerde sargılar tambur ve toroidal sargı olmak üzere 2 temel yapıdan oluşur. Tambur sargılar genel olarak stator oluklarına yerleştirilir. Stator etrafına ise daire şeklinde sarılır. Bu sargılar tüm konfigürasyonlarda kullanılabilir. Toroidal sargılar stator demir nüvesi etrafına sarılır. Genellikle TORUS NN motorlarda tercih edilir (R. Huang vd., 2022). Tambur ve toroidal sargılara örnek bir görsel Şekil 2.5'te verilmiştir.

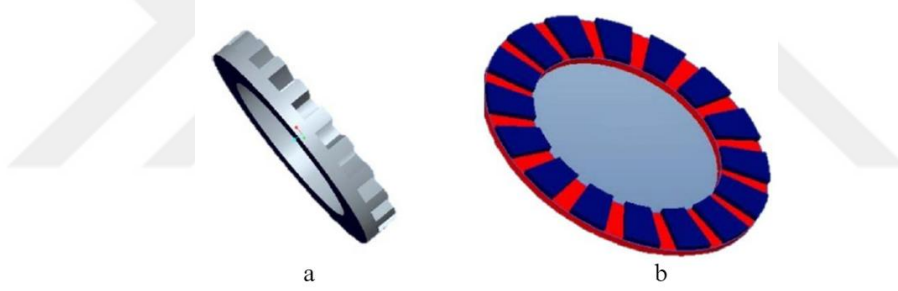


Şekil 2.5 a) Dağıtılmış sarım b) tambur sargı c) toroidal sargı (Kampker vd., 2024)

Sargılar sarım şekline göre farklılıklar gösterir. Dağıtılmış sargılar stator oluklarına eşit sarım sayısı ile simetrik sarılır. Yüksek güç yoğunluğunun avantajını arttırmak için dağıtılmış sargılar sargı tasarımları için uygun seçeneklerden biridir. Mıknatıslı makinelerin sarımlarında yaşanan zorluk, uzun uç sargılara sahip olmaları ve konsantre sargılara göre daha fazla bakır kaybı gibi dezavantajlara sahiptir. Konsantre sargılar stator oluklarına her oluk sayısına eşit sayıda sarılır. Dağıtılmış sargılarla karşılaştırıldığında, konsantre sargıların sarımı daha kolaydır. Kısa uç sargılara ve daha düşük bakır kaybına sahiptir. Ayrıca dağıtılmış sargılara göre daha küçük alanlarda sarılabilmektedirler (Kwon vd., 2006).

2.2.3 Rotor

Rotorlar motorların hareketli kısımlarıdır. Statorda üretilen manyetik alan ile rotor mıknatıslarının oluşturduğu statik manyetik alan etkileşime girer. Bu etkileşim sayesinde rotor stator manyetik alanını takip eder ve senkron hızda dönüş hareketi oluşturur. EASM’lerde rotorlar yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı olmak üzere iki şekilde karşımıza çıkar. Gömülü mıknatıslar yüksek hızlarda motoru merkezkaç kuvvetinden koruyarak rotoru mekanik açıdan daha dayanıklı olmasını sağlar. Ancak rotora gömülü olmaları nedeni ile rotor nüvesinde kayıpları arttırır ve artan sıcaklık nedeniyle demanyetize olma riskleri yüksektir. Yüzey mıknatıslı EASM’lerin montajı daha kolay ve maliyeti daha düşüktür. Mıknatıslar statorla doğrudan manyetik akı teması sağlar. Şekil 2.6 b)’de yüzey mıknatıslı rotor yapısı verilmiştir. Mıknatıslar yüzeyde olduğu için soğutulması daha kolaydır. Fakat mekanik dayanımı daha düşüktür bu nedenle ek uygulamalara gereksinim duyar (Amin vd., 2019).



Şekil 2.6 a) Sincap kafesli rotor b) yüzey mıknatıslı rotor (Amin vd., 2019)

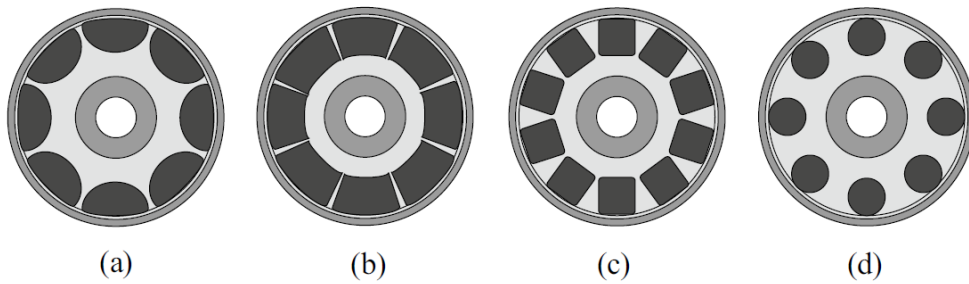
İlave olarak sincap kafesli rotor kullanımları da şebeke kalkışlı eksenel akılı motorlarda sıkça görülmeye başlanmıştır. Şekil 2.6 a)’da sincap kafesli rotor yapısına ait görsel bulunmaktadır. Bu rotor kullanımında motor çalışmaya başlatılırken geçici asenkron motor modunda kararlı duruma geçtiğinde ise senkron mod olarak çalışmasına devam ederek asenkron ve senkron motorların avantajlarından faydalanır (Eker vd., 2018).

2.2.4 Mıknatıslar

Stator ve rotor arasındaki mesafe hava aralığı olarak ifade edilir. Hava aralığı stator ve rotor arasında akının iletimini sağlayan kısımdır. Motorun genel performansını doğrudan etkilediği için doğru hesaplanması ve ayarlanması gerekir. Eksenel akılı motorlar yapısal özellikleri bakımından kolay ayarlanabilen hava aralığına sahiptir. Stator ve rotor arasındaki mesafe doğru ayarlanmadığı ve mesafenin kısa olması durumunda manyetik

akı yoğunluğu artarak malzemenin doyuma ulaşmasına ya da dengesiz zıt EMK'nın oluşmasına sebep olur. Eğer mesafe uzun olursa manyetik akının zayıflamasına sebep olarak motor verimi ve tork üretimi düşürür. Manyetik akı yoğunluğu mıknatısların hava aralığı ile etkileşimine bağlıdır. Mıknatıslar manyetik alanı kuzey-güney akı yollarına ayırarak şekillendirir. Manyetik alanın oluşturduğu manyetik kuvvetler stator sargıları tarafından oluşan manyetik alan ile etkileşimi sayesinde tork üretir (R. Huang vd., 2022). Üretilen torkta mıknatıslar ve stator olukları üzerinde manyetik etkileşimin değişiminden kaynaklı tork kalitesinde bozulmalar meydana gelebilmektedir. Bu bozulmalar motor performansını etkilediği için literatürde sıklıkla tork kalitesini arttırmak torkta oluşabilecek dalgalanma ve titreşimleri azaltmak için mıknatıs optimizasyonları yapılmaktadır (Aydin ve Gulec, 2014).

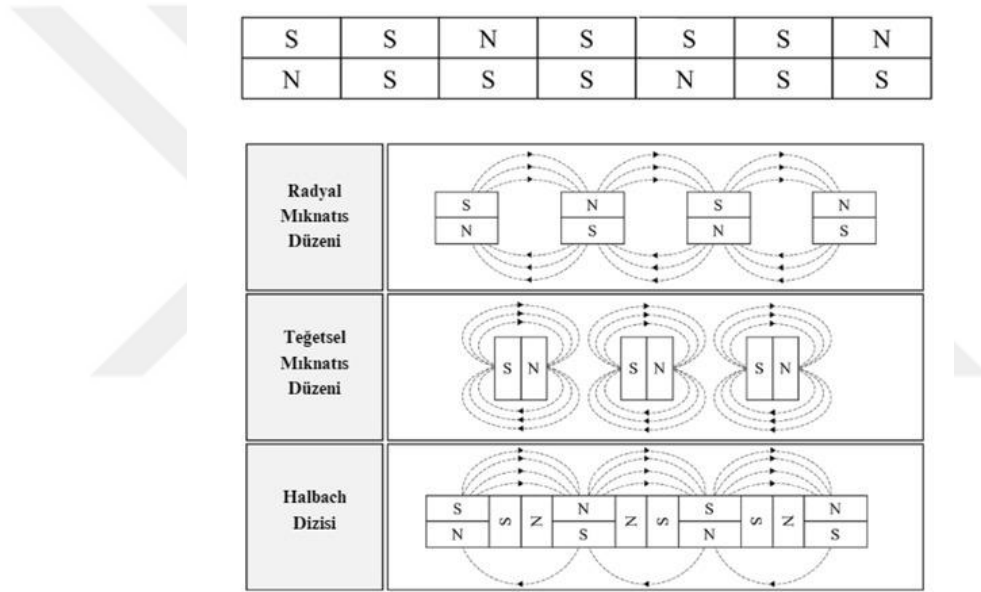
Mıknatıslar şekli, hacmi, kalınlığı yerleşim yeri ve yapıları makinenin uygulama alanına göre değişiklik gösterebilir. Şekil 2.7'de aksel akılı motorlarda kullanılan mıknatıs şekilleri verilmiştir. Şekil bakımından yarım daire şeklinde rotor merkezinden itibaren yerleştirilen mıknatıslar daha az titreşim elde edilmesi istenen tasarımlar için uygundur. Trapezoidal mıknatıslar düzgün manyetik alan dağılımı sağlamaları ile tork dalgalanmaları için özel bir gerekliliğin duyulmadığı durumlar için tercih edilebilir. Dikdörtgen ve dairesel mıknatıslar düşük tasarım maliyetleri ile kolay temin edilebilirler. Dairesel şekle sahip mıknatıslar tork çıkışı yüksek sonuçların alınması sağlar (Kampker vd., 2024; J. Zhao vd., 2023).



Şekil 2.7 EASM' lere ait sabit mıknatıs şekilleri: a) Yarım daire, b) Trapezoidal, c) Dikdörtgen ve d) Dairesel(J. Zhao vd., 2023)

Mıknatıslar şekillerine, aralarındaki mesafeye ve konumlandırılmalarına göre makinenin çıkış voltaj kalitesini ve EMK harmoniklerini etkiler. Rotorda geleneksel düzenleme ve Halbach dizisi olmak üzere 2 mıknatıs düzenlemesi bulunur. Şekil 2.8'de üst görselde

radyal mıknatıs düzenlemesine orta görselde ise teğetsel mıknatıs düzenlemeleri verilmiştir. Geleneksel düzenleme de bulunan bu mıknatıslar aralarında bulunan boşluklu yapılar ile dönüşümlü bir şekilde düzenlenmişlerdir. Alt görselde verilen Halbach dizisinde ise radyal ve teğetsel düzenlemelerin ikisi de kullanılır. Bu düzenleme de mıknatıs kutupları bir taraftaki alanı güçlendirirken diğer taraftaki alanın oluşumunu zayıflatır. Geleneksel düzenlemeye sahip mıknatıslar tasarım ve üretiminin kolaylığı nedeni ile tercih edilirler. Halbach dizisine sahip yapılarda rotor nüvesine gerek duyulmaz. Bu mıknatıs türü motora daha az kalınlıkta tasarım fırsatı ve daha yüksek tork sağlar (Habib vd., 2022).

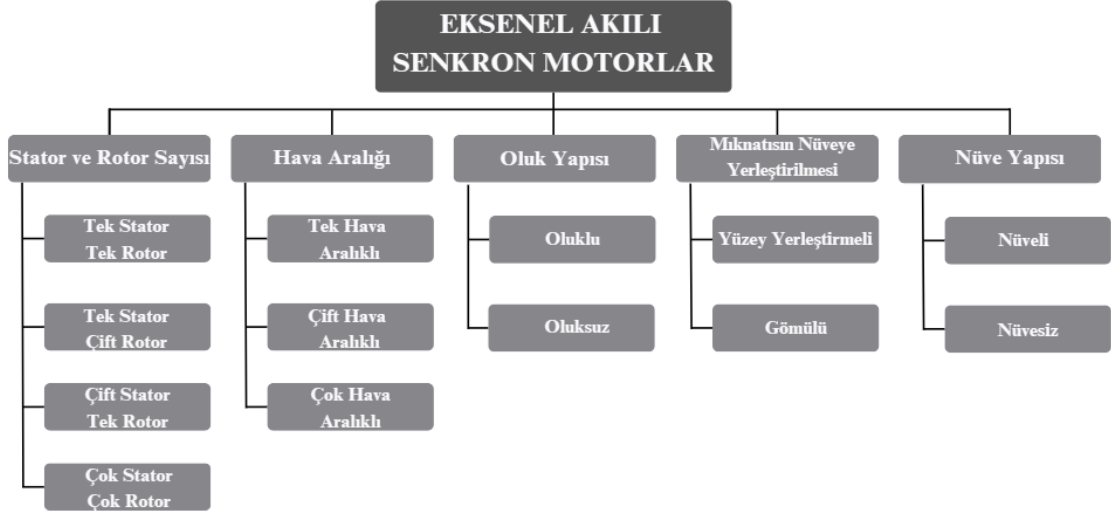


Şekil 2.8 Farklı mıknatıs düzenlemeleri (üstteki) radyal mıknatıs düzenlemesi, (ortadaki) teğetsel mıknatıs düzenlemesi, (alttaki) Halbach dizisi (Kampker vd., 2024)

2.3 Eksenel Akıllı Senkron Motorların Sınıflandırılması

Eksenel akıllı motorlar, yapısal özelliklerine bağlı olarak çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar Şekil 2.8'de verildiği üzere; stator ve rotor sayılarına göre, hava aralığına göre, rotor ve stator yapılarına göre, mıknatısların rotorun yüzeyine monte edilip edilmediğine bağlı olarak yüzey mıknatıslı veya rotorun içine entegre edilirse gömülü mıknatıslı olarak, ayrıca stator yapısına göre, oluklu, oluksuz, nüveli ve nüvesiz olarak sınıflandırılabilirler. EASM'lerde konfigürasyonların

oluşturulması; motorun çıkış gücünü arttırmayı, rulman üzerindeki aksel kuvvetleri azaltmayı ve tork kalitesini arttırmayı amaçlar (Letelier vd., 2007).

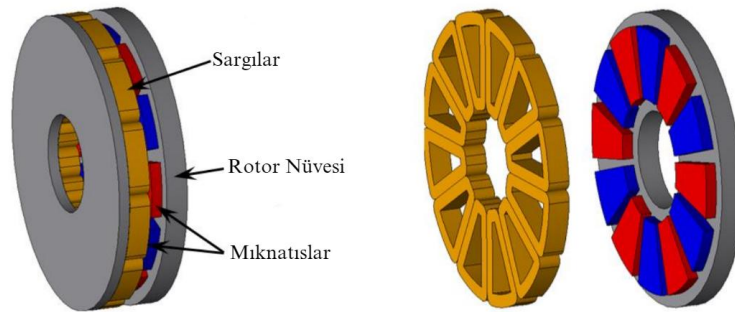


Şekil 2.9 EASM sınıflandırmaları

Rotor ve satorların sayı ve konumlarına bağı olarak 4 ana kategoride tanımlanabilir. Her topoloji kendine has niteliklere sahiptir.

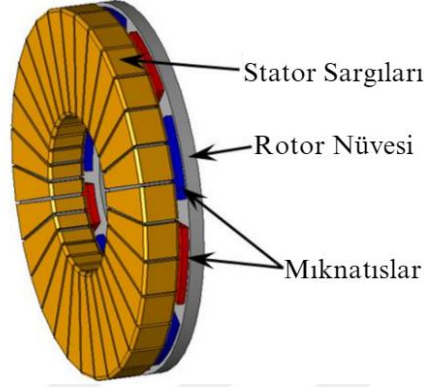
2.3.1 Tek Satorlu Tek Rotorlu Eksel Akı Senkron Motor

Bir sator ve bir rotordan oluştuğu için EASM'ler arasındaki en basit yapıya sahip olanıdır. İki diskli yapıları, düşük parça sayısına sahip olmalarını sağlar bu da üretimi ve montajlanmalarını kolaylaştırır. Diğer yapılarla kıyaslandığında, manyetik akı tek yönde aktığı için daha düşük güç yoğunluğuna sahiptirler. Bir hava aralığına sahip olmaları nedeniyle, rotor ve sator arasında yüksek aksel kuvvetler oluşur. Bu durum, rulmanların aşırı yüklenmesine ve sürtünme kayıplarının artmasına yol açabilir. Ayrıca, yüksek hızlarda rotor yapısının bükülmesine neden olur. Buna çözüm olarak kalın sator ve rotor yapıları ile tasarlanması gerekir (Mirimani vd., 2012).



Şekil 2.10 Konsantre sargılara sahip oluklu sator (Khatib, 2019)

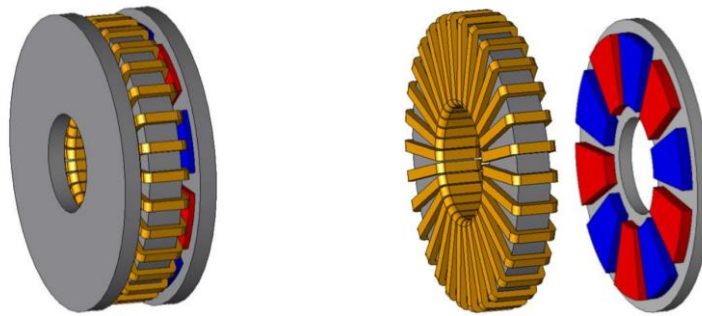
Mıknatısları yüzeye yerleştirilmiş veya gömülü olabilir. Stator kullanım amacına göre Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de görüldüğü üzere oluklu ve oluksuz olabilir (Khatab, 2019). Statorun oluksuz yapıda olması düzensiz manyetik çekimde azalmaya olanak sağlamaktadır (Shao vd., 2021).



Şekil 2.11 Oluksuz toroidal sargılı tek statorlu EASM

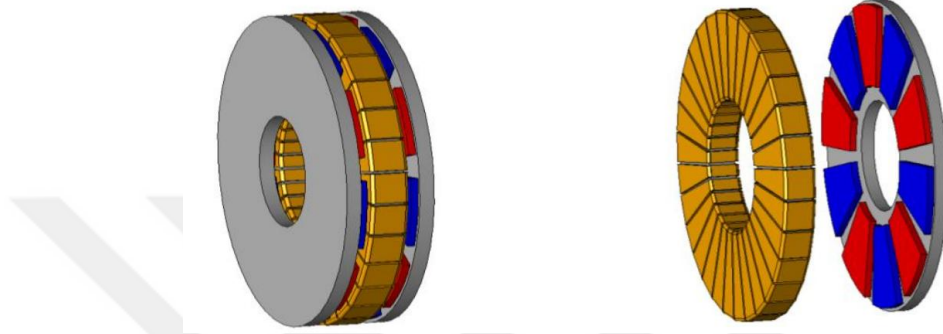
2.3.2 Tek Statorlu Çift Rotorlu Eksenel Akılı Senkron Motor

Literatürde TORUS olarak adlandırılan Şekil 2.12’de gösterildiği gibi iki sabit mıknatıslı rotor arasına statorun konumlandırılmasıyla oluşturulan topoloji türüdür. Motorun rotor diskleri üzerindeki sabit mıknatıslar, hava aralığında eksenel olarak hizalanmış manyetik alanlar oluşturur. Bu mıknatıslar yüzeye monte edilebilir veya rotora gömülebilir. Stator yüzeyinde tork üretimini sağlamak amacıyla bakır iletkenler bulunur. Çift statorlu yapıya kıyasla daha fazla mıknatıs kullanılır ve uç sargılarda daha az bakır kullanıldığı için daha düşük faz direnci ve daha düşük bakır kaybı elde edilir. Bu da motorun verimliliğini önemli ölçüde artırır. Yüksek akım yoğunluğu ve düşük elektrik yükü ile daha yüksek güç yoğunluğuna sahiptirler (Kahourzade vd., 2014).



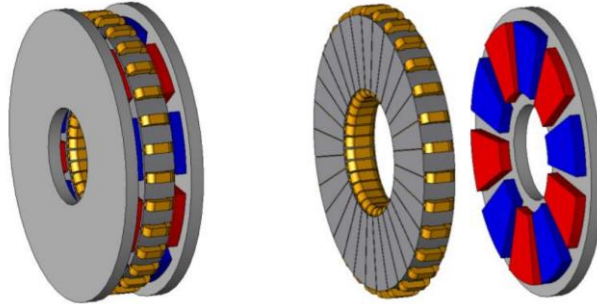
Şekil 2.12 Oluksuz dikdörtgen stator sargılara sahip TORUS topolojisi

TORUS topolojisi çok çeşitli stator düzenlemeleri sunar. Oluklu, oluksuz, nüveli ve nüvesiz kombinasyonlardan oluşur. Oluklu yapılarda sargılar oluklar içinde düzenlenmiştir. Şekil 2.13'te yer alan oluksuz yapılarda, sargılar hava aralığı ile stator nüvesi etrafına toroidal sarılır (Rahman vd., 2006). Boşluklu yapıları sayesinde oluksuz motorlarda düşük kaçak indüktans sağlar. Stator nüve malzemesi yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olmalıdır.



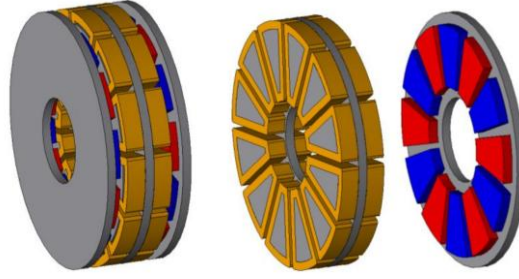
Şekil 2.13 Oluksuz toroidal sargılı TORUS topolojisi

TORUS motorlarda mıknatıs kutuplarının akı yönüne bakılarak NN ve NS olarak iki kategoride düzenleme yapılabilir. NN tipi TORUS topolojisinde Şekil 2.14'te gösterildiği gibi mıknatıslar aynı polariteye sahiptir. Akı stator nüvesi boyunca çevresel akar ve stator üzerinden aynı mıknatısın güney kutbuna geri döner. Statora iki rotordan gelen toplam akının fazla olması nedeni ile boyunduruğun daha kalın olmasını gerektirir eğer yeterli kalınlığa sahip değilse manyetik doyuma ulaşır (Tak ve Ro, 2020).



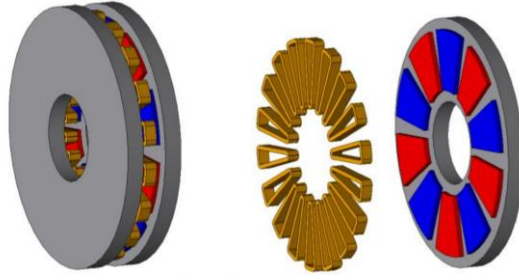
Şekil 2.14 TORUS NN topolojisi

NS tipi TORUS yapısında ise mıknatıslar zıt polariteye sahiptir. Akı stator boyunca rotorun N kutbundan statorun S kutbuna geçerek diğer rotorun S kutbuna aksel olarak akar bu da stator boyunduruğunu gereksiz kılar (J. Zhao vd., 2023). Bu konfigürasyonda yaygın olarak tambur sargıları tercih edilir. TORUS NS topolojisine ait mıknatıs konumları ve sargı şekli Şekil 2.15'te verilmiştir (S. Huang vd., 2001).



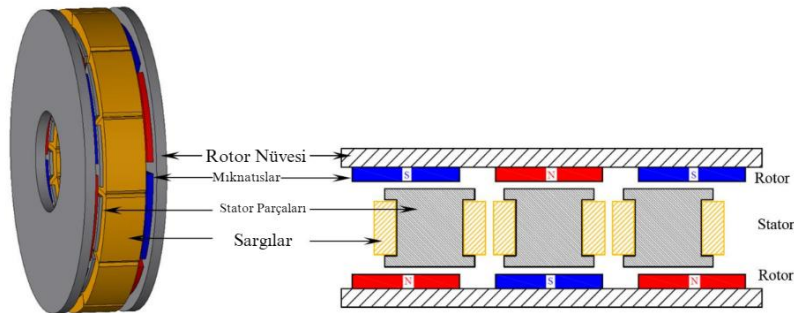
Şekil 2.15 TORUS NS topolojisi

Şekil 2.16’da Nüvesiz TORUS NS yapısı yer almaktadır. Nüvesiz yapı demir kayıplarını kaldırılarak motorun tork yoğunluğunu, gücünü ve verimliliğini arttırdığı için tercih edilir. Daha az malzeme kullanılması nedeniyle düşük ağırlık avantajına sahiptir(Shuaibu vd., 2024).



Şekil 2.16 Nüvesiz TORUS NS yapısı

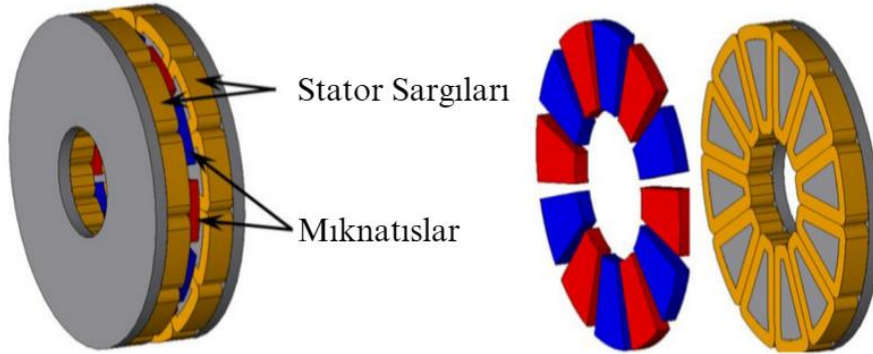
Şekil 2.17’de YASA motorlara ait motor yapısı görülmektedir. YASA motorlar TORUS NS motorlarda stator yapısındaki boyunduruğun çıkarılması ile segmentli armatür olarak bilenen motor yapılarıdır. Stator yapısındaki farklı oluk yapıları bunun için özel uygulanan konsantre sargılar ile TORUS motorların farklılaşmış versiyonlarını oluştururlar. YASA motorlarda stator boyunduruğunun kaldırılmış olması motor nüve kayıplarının ve stator sargılarını kısalttığı için sargı kaynaklı kayıplarının azalmasını sağlar. Kayıpların azalması ile verimliliği artan konfigürasyon türüdür (Taran vd., 2018).



Şekil 2.17 YASA motor

2.3.3 Çift Statorlu Tek Rotorlu Eksenel Akılı Senkron Motor

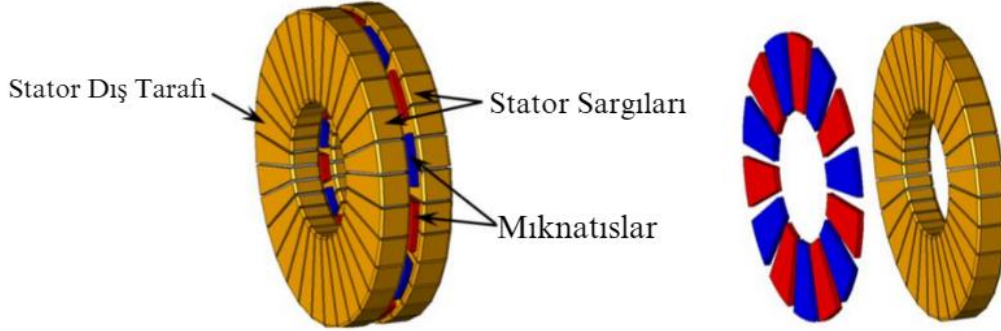
ÇS-EASM iki stator tek rotora sahip topoloji türüdür. İki tarafta bulunan sargılar, iki sargı yapısına karşılıklı olarak hizalanmış mıknatıslardan oluşur. Stator iki taraflı olduğu için daha uzun bakır sargıları ve daha az mıknatıs kullanımı gerektirir (Jenkins vd., 2023). Mıknatıslar rotorun yüzeyine montajlı ya da rotora gömülü olarak yerleştirilebilirler. Rotora gömülü olması mıknatısları darbe ve korezyona karşı daha iyi korur. Bu durum daha kalın rotor nüvesi gerektirir. Fakat mıknatıs uçlarındaki kaçak akı yüzey mıknatıslı motordan daha fazladır. Stator nüveleri Şekil 2.18 ve Şekil 2.19 'da gösterildiği gibi oluklu ve oluksuz olabilir. Oluklu yapılarda tambur sargılar kullanılır. Oluksuz yapılarda sargılar stator nüvesine sarılır. Nüveye sarılan toroidal sargıların rotora bakmayan yüzeylerinde aktif manyetik alan dışında kalan uç sargılar daha yüksek faz direncine ve bakır kaybına, bu durumda verimin düşmesine neden olur. Isı stator sargılarında üretildiği için ÇS-EASM yapısında statorların oluklarının olması motorun daha iyi soğutulmasını sağlar. Aynı zamanda statorların kenarlarda bulunuyor olması sargıların soğutulmasını kolaylaştıran bir diğer durumdur. Bu durum sonucunda rotor güç çıkışı artar (Mahmoudi, Rahim, vd., 2011).



Şekil 2.18 Oluklu ÇS-EASM

Oluklu yapı daha kısa hava aralığında yüksek torka sahip olması nedeni ile tasarım için tercih edilmiştir. Akı yolu NS ve NN olarak ikiye ayrılır. NS yolunu takip eden akı yapılarında genellikle rotor daha küçüktür ve akı rotor mıknatısları üzerinden geçerek karşı statora geçer. NN mıknatıs yapısında manyetik akı simetrik bir akı yolu izler.

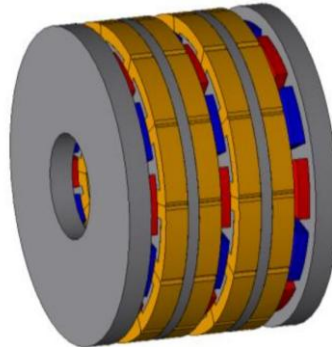
Manyetik devre statorlar üzerinden tamamlanmaz. Bir statordan geçen akı mıknatıslardan geçtikten sonra tekrar aynı statora döner (R. Huang vd., 2022).



Şekil 2.19 Oluksuz ÇS-EASM

2.3.4 Çok Statorlu ve Çok Rotorlu Eksenel Akılı Senkron Motor

EASM'lerin önemli bir özelliği yarıçap değiştirilmeden eksenel yönde rotor ya da stator sayıları arttırılabilir olmasıdır. N stator N+1 rotor ile kademeli artan disk sayısı motorun daha yüksek tork üretmesini sağlar. 2 stator 3 rotordan oluşan çok statorlu çok rotorlu yapıya örnek görsel Şekil 2.20'de verilmiştir. Tek statorlu motor konfigürasyonunda olduğu gibi bu motorlarda da eksenel akının dengelenmesi istenir bu nedenle oluşturulacak konfigürasyonlarda bu özellik ön planda tutulur. Diğer özellikleri bakımından çift taraflı konfigürasyonların özellikleri bu motorlarda da geçerlidir sargı şekilleri, stator yapıları çift taraflı yapılara benzetilebilir (Habib vd., 2020). Ayrıca akı yolları bakımından da oluşturulacak tasarımları çift taraflı yapılarda olduğu gibidir (Shuaibu vd., 2024). Bu motorların mekanik yapıları daha karmaşıktır bu nedenle imalatında zorluklar yaşanır.



Şekil 2.20 Çok statorlu çok rotorlu topoloji

3 MATERYAL METOT

Bir motor sektörün ihtiyaçlarına yanıt verecek şekilde belirlenen kullanım alanına, istenen güç ve boyuta göre tasarlanır. Tasarımın ilk hedefi motorun yüksek verimliliğe ve yüksek tork yoğunluğuna sahip olmasıdır. Tasarlanacak motora karar süreci, geniş çaplı literatür taraması, motor avantaj ve dezavantajlarındaki değerlendirmeler, tasarımda beklenmeyen zorluklar ile uzun bir çalışma süreci gerektirir. Motorun üretilebilirliği göz önüne alınarak malzeme seçimi ve tasarım kriterleri belirlenir. Gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmek için analitik hesaplamalar yapılarak simülasyon sonuçları ile değerlendirilir. Elektrikli makine tasarımlarının simülasyonları için yaygın olarak SEY kullanılır. SEY elektromanyetik, termal ve yapısal analizlerin gerçekleştirilmesinde; motorun hava aralığı akı yoğunluğu, kayıplar, tork çıkış raporları ve verimlilik gibi kritik sonuçlarının alınmasında yardımcı araçlardır.

Bu tez çalışmasında ÇS-EASM tasarımı sunulmuştur. Bu motorun seçilme amacı yüksek güç-atalet oranına sahip olmasıdır. Motor yapısında rotorun iki tarafında statorlar bulunur bu sayede manyetik kuvvetler dengelenir. Rotorda bulunan mıknatıslar motora enerji tüketiminde yardım sağlayarak daha yüksek güç yoğunluğu sağlar. Bu motor çeşidinin yüksek verimliliğe ve yüksek performansa sahip olmasında önemli nedenlerindendir. Bir diğer avantajı ise akının eksenel yönlendirilmesi ile küçük boyutlarda yüksek tork üretimidir. Kısıtlı kullanım alanları ve düşük ağırlık gerektiren uygulamalar için kompakt bir yapı sunar. Motorun statorları için oluklu bir yapı tercih edilmiştir. Bunun nedeni oluklara sargıların daha sık ve düzenli yerleştirilebilmesi ile tork yoğunluğunun artırılabilirliği olmasıdır. Stator sargıları için tambur sargılar kullanılmıştır. Olukların dezavantajı motor titreşimine neden olmasıdır. Statorlar motorun dış kenarlarında bulunması ısı dağıtımını kolaylaştırır. Stator nüvesi tasarlanırken nüvenin manyetik doyuma ulaşmaması gereklidir manyetik doyuma ulaşması motor performansını etkileyeceği için nüve kesit alanı doğru oranlarda ayarlanması gerekir (Tak ve Ro, 2020). Motor için yaygın kullanımı mevcut yüzey mıknatıslı yapı tercih edilmiştir. Yüzeye montelenen mıknatıslar için ferromanyetik rotor nüvesi kullanılmıştır. Bu durum mıknatısların hava ile etkileşimini artırır. Her iki statora karşılık gelecek şekilde NN manyetik akı yolu izlenir. Statorlar ile aynı motor milinde bulunan rotor mıknatısları manyetik etkileşime girerek senkron dönüş

sağlar. Mıknatıs şekli bakımından sıkça tercih edilen ve düzgün manyetik akı dağılımına sahip olması nedeniyle trapezoidal şekil benimsenmiştir (Kampker vd., 2024). Tasarım için kullanılacak motor konfigürasyonunun özellikleri ve malzeme seçimleri belirlendikten sonra motorun bir sonraki aşaması olan analitik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Analitik hesaplamalar için Surong Huang ve arkadaşlarının makinenin toplam hacmini dikkate alarak geliştirmiş oldukları genel boyutlandırma denklemleri kullanılmıştır.

3.1 Temel Analitik Boyutlandırma Denklemleri

Analitik hesaplamalar ile motor boyutlandırmaları elde edilerek tasarımın geometrik ölçüleri belirlenir. EASM'ler için genel boyutlandırma denklemleri kaçak direnç ve indüktans ihmal edilerek aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Motorun nominal çıkış gücü Eşitlik 3.1'de verildiği üzere tahmini bir verim ile belirli bir periyotta faz sayısı, faz gerilimi ve faz akımları çarpımları ile elde edilir (Huang vd., 1998; Mahmoudi vd., 2011).

$$P_{\text{çıkış}} = \eta \frac{m}{T} \int_0^T e(t) \cdot i(t) dt = m K_p \eta E_{pk} I_{pk} \quad (3.1)$$

Burada η makine verimliliği, m makine faz sayısı, T EMK döngü periyodu $e(t)$ hava aralığı faz EMK'sı, $i(t)$ faz akımıdır. E_{pk} hava aralığı faz EMK'sının, I_{pk} faz akımının tepe değerleridir.

Elektriksel güç dalga faktörü K_p formülü Eşitlik 3.2'deki gibi tanımlanır. Burada $f_e(t) = e(t) / E_{pk}$, $f_i(t) = i(t) / I_{pk}$ normalize edilmiş EMK değerini ve akım dalga şeklini verir.

$$K_p = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{e(t) \cdot i(t)}{E_{pk} \cdot I_{pk}} dt = \frac{1}{T} \int_0^T f_e(t) \cdot f_i(t) dt \quad (3.2)$$

K_i ise akım dalga faktörünü ifade eder. I_{rms} faz akımı rms değeridir ve Eşitlik 3.3'teki gibi hesaplanır.

$$K_i = \frac{I_{pk}}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{i(t)}{I_{pk}}\right)^2 dt}} \quad (3.3)$$

Dalga şeklinin tepe noktası olan E_{pk} hesabı Eşitlik 3.4'teki gibidir:

$$E_{pk} = K_e N_t B_g \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) D_0^2 \quad \lambda = \frac{D_i}{D_o} \quad (3.4)$$

Burada K_e sargı dağıtım faktörü (K_w) ile bağlantılı EMK katsayısı, eğer varsa, makinenin belirgin kutupları tarafından kaplanan birim başına hava aralığı alanıdır. N_t faz başına sarım sayısı; B_g hava aralığı akı yoğunluğu, f frekans, P kutup çifti, λ motor iç çap (D_i) ile dış çapın (D_o) oranıdır.

Faz akımının tepe değeri I_{pk} değerine ait hesaplama Eşitlik 3.5'te verilmiştir:

$$I_{pk} = \frac{1}{1 + K_\Phi} A \pi K_i \frac{1 + \lambda}{2} \frac{D_0}{2m_1 N_t} \quad (3.5)$$

Burada K_Φ rotor ve stator üzerindeki elektriksel yükleme oranıdır. Rotorda sargı bulunmadığı için bu değer sıfır alınır. A toplam elektriksel yüklenme, m_1 stator faz sayısıdır.

Verilen Eşitlikler düzenlenerek ilk formülde verilen Eşitlik 3.1'deki $P_{çıkış}$ formülüne eklendiğinde Eşitlik 3.6'da verilen genel çıkış gücü formülünü elde etmiş oluruz.

$$P_{çıkış} = \frac{m}{m_1} \frac{\pi}{2} K_e K_i K_p \eta B_g A \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) \left(\frac{1 + \lambda}{2}\right) D_0^3 \quad (3.6)$$

Burada m_1 stator faz sayısıdır. Bu formül ile genel boyutlandırma denklemini elde etmek için, motorun etkin eksenel uzunluğu L_e , kayıpların, sıcaklık artışının ve tasarımın

verimlilik gereksinimleri göz önünde bulundurularak belirli bir makine yapısına ilişkin en-boy oranı katsayısı olan K_L eklendiğinde elde edilen formül Eşitlik 3.7'deki gibidir.

$$P_{çıkış} = \frac{m}{m_1} \frac{\pi}{2} K_e K_i K_p K_L \eta B_g A \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) \left(\frac{1 + \lambda}{2} \right) D_0^2 L_e \quad (3.7)$$

K_i ve K_p faktörleri bulunabilmesi için zıt EMK ve akım dalga şekilleri incelenebilmektedir. Tablo 3.1'de tipik dalga şekilleri ile ve bunlara karşılık gelen K_i ve K_p değerleri verilmiştir (Mahmoudi vd., 2011).

Tablo 3.1 Standart dalga şekilleri (Tak ve Ro, 2020)

Model	$e(t)$	$i(t)$	K_i	K_p
Sinüs Dalga Şekli			$\sqrt{2}$	$0.5 \cos \phi$
Kare Dalga Şekli			1	1
Trapezoidal Dalga Şekli			1.134	0.777
Üçgen Dalga Şekli			$\sqrt{3}$	0.333

Motorun toplam güç yoğunluğu Eşitlik 3.8'de verilmiştir.

$$P_{den} = \frac{P_{çıkış}}{\omega_m \frac{\pi}{4} D_{tot}^2 L_{tot}} \quad (3.8)$$

Burada D_{tot} dış kapak ile sargı sonu çıkıntılarının dahil olduğu radyal yönde makinenin toplam dış çapıdır. L_{tot} motorun aksel yönde uzunluğudur. ω_m ise rotorun açısal

hızıdır. Motorun dış çapının hesaplanması için $P_{\text{çıkış}}$ formülünden D_0 çekilerek Eşitlik 3.9 elde edilir.

$$D_0 = \sqrt[3]{\frac{P_{out}}{\frac{\pi m}{2m_1} K_e K_p K_i A B_g \eta (1 - \lambda^2) \left(\frac{1 + \lambda}{2}\right)}} \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.10'da W_{cu} sargı sonu uzunluğudur ve stator dış yarıçapı ile toplanarak toplam dış yarıçapı (D_{tot}) verir.

$$D_{tot} = D_o + 2W_{cu} \quad (3.10)$$

Arka arkaya sarılmış sargılarda çıkıntılar makinenin eksenine doğru olduğu kadar dış taraflara doğru da olduğu için bu durum göz önüne alınarak Eşitlik 3.11 gibi hesaplanabilir.

$$W_{cu} = \frac{D_i - \sqrt{D_i^2 - \frac{AD_{avg}}{K_{cu}J_s}}}{2} \quad (3.11)$$

Burada D_i iç yüzey çapı, D_{avg} makinenin ortalama yarıçapı, K_{cu} bakır dolgu faktörü ve J_s akım yoğunludur.

Eşitlik 3.12 motorun eksenel uzunluğunu L_e verir. Burada L_s statorun eksenel uzunluğu, L_r rotorun eksenel uzunluğu ve g hava aralığı uzunluğunun toplamıdır.

$$L_e = 2L_s + L_r + 2g \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.13 te verilen L_{cs} stator nüve kalınlığı ile L_{ss} oluk derinliğinin toplamı statorun eksenel uzunluğunu (L_s) verir. Motorda iki stator bulunduğu için stator eksenel uzunluğu 2 ile çarpılır. $L_{ss} = W_{cu}$

$$L_s = L_{cs} + 2L_{ss} \quad (3.13)$$

Stator nüve kalınlığı L_{cs} için hesaplanan Eşitlik 3.14'te B_{cs} stator nüvesi içerisindeki manyetik akı yoğunluğu, α_p hava aralığı ortalama akı yoğunluğunun, tepe değerine oranıdır.

$$L_{cs} = \frac{B_g \pi a_p D_o (1 + \lambda)}{4p B_{cs}} \quad (3.14)$$

Eşitlik 3.15' te L_{pm} mıknatıs uzunluğu ve L_{cr} rotor nüvesi uzunluğu toplamı rotorun eksenel uzunluğunu verir.

$$L_r = L_{cr} + L_{pm} \quad (3.15)$$

Rotorun eksenel uzunluğunun L_{cr} hesaplandığı Eşitlik 3.16'da B_u daimi mıknatıs yüzeyindeki ulaşılabilir akı yoğunluğu, B_{cr} rotor akı yoğunluğudur.

$$L_{cr} = \frac{B_u \pi D_o (1 + \lambda)}{8p B_{cr}} \quad (3.16)$$

Kalıcı mıknatıs uzunluğu L_{pm} 'dir ve aşağıda verilen Eşitlik 3.17'de olduğu gibi hesaplanmaktadır.

$$L_{pm} = \frac{\mu_r B_g}{B_r - \left(\frac{K_f}{K_d} B_g \right)} g K_c \quad (3.17)$$

Burada μ_r mıknatısın bağıl geçirgenlik katsayısı, B_r mıknatısın kalıcı akı yoğunluğu K_d kaçak akı katsayısı, K_c Carter katsayısı, K_f ise radyal yöndeki hava aralığı manyetik akı yoğunluğu doğrulama katsayısıdır.

Motor çıkış gücünü etkileyen 4 önemli kayıp vardır bunlar stator sargılarındaki bakır kaybı P_{cu} , nüve kayıpları P_{fe} , rotor kayıpları P_{rotor} ve kaçak yük kayıpları P_{stray} ’dir.

Statorda meydana gelen bakır kayıpları, elektrik makinelerindeki toplam kayıpların önemli bir bölümünü temsil eder. Bu kayıplar sıcaklığa bağlıdır ve stator sargılarının çalışma yükünden etkilenen termal koşullarına göre değişir. Stator oluklarında sargılardan kaynaklı akı dağılımı sızıntıları deri ve yakınlık etkisi iletken tellerin aktif kesitini azaltarak akım ve bakır kaybının artması ile sonuçlanır. Pratik uygulamalarda nüve kayıpları, nüvenin malzeme özelliklerine ve yapısal tasarımına bağlı olarak tipik olarak kilogram başına watt (W/kg) cinsinden belirtilir. Nüve kaynaklı kayıpların ana sebep ise BH eğri histerezisi ve girdap akımlarının bir etkisi olarak elektrik frekansı kaynaklı oluşur. Makine hızı nüvede girdap akımlarının oluşmasına neden olur. Nüve kayıpları üç ana bileşenden oluşur: histerezis kayıpları, girdap akımı kayıpları ve anormal kayıplar. Nüve kayıplarına ek olarak, nüveli makineler ayrıca kaçak yük kayıpları da sergiler. Bu kayıpların düzensiz yapıları nedeniyle mutlak hassasiyetle ölçülmesi zordur. Mekanik kayıplar, yatak sürtünmesi, rotor sürtünmesi ve vantilasyon kayıpları dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan dolayı meydana gelir. Rotor nüve kayıpları, sabit mıknatısları destekleyen katı çelik disklerde oluşur. Bu kayıplar motordaki genel enerji dağılımına katkıda bulunur (Talay, 2019). Motordaki toplam kayıplar $P_{kayıp}$ Eşitlik 3.18’de verilmiştir, tüm kayıp bileşenlerinin toplamı olarak ifade edilebilir:

$$P_{kayıp} = P_{cu} + P_{fe} + P_{rotor} + P_{stray} \quad (3.18)$$

Motor sisteminin enerji dengesini doğru bir şekilde analiz edebilmek için motorun verimliliği hesaplanır. Eşitlik 3.19’da motorun çıkış gücü ve kayıpları ile elde edilen verimlilik hesabı yer almaktadır.

$$\eta = \frac{P_{çıkış}}{P_{çıkış} + P_{cu} + P_{fe} + P_{rotor} + P_{stray}} \quad (3.19)$$

Boyutlandırma denklemleri ile oluşturulan matematiksel model ile elde edilen sonuçlar Tablo 3.2’de verilmiştir. Bu temel parametreler ANSYS RMxpert programı aracılığı ile tekrar elde edilerek performans sonuçları doğrulanır.

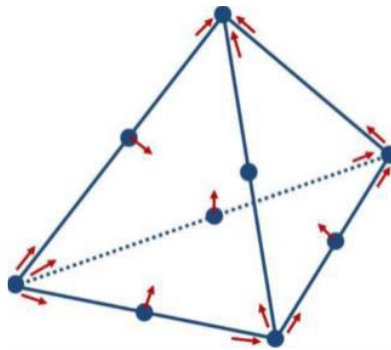
Tablo 3.2 Tasarımı gerçekleştirilen motor parametreleri

Motor bölümü	Malzeme tipi
Çıkış gücü (W)	3312
Nominal hız (rpm)	1500
Nominal tork (Nm)	21.09
Kutup sayısı	4
Faz sayısı	3
Frekans	50
Verim (%)	92
Kayıplar (W)	288
EMK (V)	198
Dış çap (mm)	150
İç çap (mm)	80
Ortalama stator çapı (mm)	115
Stator kalınlığı (mm)	50
Rotor kalınlığı (mm)	25
Oluk sayısı	24
Oluk genişliği (mm)	6.6
Oluk yüksekliği (mm)	27.7
Oluk açıklığı (mm)	1.75
Hava aralığı (mm)	0.75
Hava aralığı akı yoğunluğu (T)	0.83
Stator akımı (A)	5.8
Stator akım yoğunluğu (A/mm ²)	5.2
Bir faza ait bir oluktaki iletken sayısı	29
İletken çapı (mm)	0.813
Mıknatıs kalınlığı (mm)	3

3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Makine performansını elektromanyetik, termal ve mekanik davranışlar belirler. Bu davranışları simülasyonlar aracılığı ile gözlemlemek, optimizasyon işlemlerini gerçekleştirebilmek ve performans analizleri için SEY kullanılır. SEY nümerik hesaplamalar ile çözüm bölgelerini küçük ve basit parçalara bölerek sonlu elemanlara ayırır. Genellikle 2 Boyutlu analizler için alan dikkate alınarak üçgen ve dörtgen elemanlar, 3 Boyutlu analizler için hacimsel hesaplamalarda tetrahedral elemanlar kullanarak analiz sonuçları için yüksek çözüm doğruluğu sağlar. Elemanların köşelerinde düğüm noktaları bulunur bu düğümler üzerinde çözümü gerçekleştirecek fiziksel büyüklüklerin özelliklerine göre hesaplamalar gerçekleştirilir. Elemanlar bu düğüm noktalarında birleşerek ağ yapısını oluşturur. Sayısal çözümler için kullanıcı tarafından ağ yoğunluğu ayarlanarak analiz hassasiyeti artırılır (Korkmaz, 2010).

Tasarım sürecinde analizlerin gerçekleştirilebilmesi için nümerik tabanlı ANSYS Maxwell programı tercih edilmiştir. Bu program motorun teknik özelliklerinin ve genel performansının değerlendirilmesinde yardımcı bir araçtır. Ansys Maxwell'de sonlu elemanların temel birimini Şekil 3.1'de gösterildiği gibi tetrahedron yapılar oluşturur. Tetrahedral elemanlar tüm modelin ağ yapısını dört düğüm noktası ile sararak elektrik ve manyetik alan dağılımlarının değerlendirilmesini ve hassas analizlerin gerçekleştirilmesinde kritik öneme sahiptir (Çoramık, 2018).



Şekil 3.1 Tetrahedron

Motorun analitik tasarım gerçekleştirildikten sonra ön tasarım için ANSYS RMXprt yazılımı kullanılarak motor modeli ayrıntılı bir yaklaşımla tamamlanır. RMXprt ile motorun stator ve rotor boyutları, kullanılacak malzeme özellikleri ve sargı yapıları gibi

tasarım için gerekli ölçülendirmeler belirlenir. Ayrıca motorun verimi, gücü, stator akımları, torku gibi performans sonuçları RMaxprt aracılığıyla alınır. Ardından elde edilen parametreler ve performans değerleri Maxwell yazılımına aktararak ileri düzey analizler gerçekleştirilir. Eksenel akıllı makinelerde akı yolu 3 Boyutludur. Maxwell 2 Boyutta ve 3 Boyutta model oluşturulmasına imkân tanır. 2 Boyutta kullanmanın avantajı 3 Boyutta mevcut olan Z ekseninin kullanılmamasıdır. Eksenel yönde kesilerek ve açılarak doğrusal bir motor gibi görünmesi sağlanır ve model istenilen oranda bölünerek analiz basitleştirilir. Fakat akının stator ve rotor üzerindeki dağılımlarını ve detaylı analizini gerçeğe yakın performans sonuçlarını alabilmek için 3 Boyutlu etkiler dikkate alınır. Uzun analiz süresine ve daha karmaşık olmasına rağmen yüksek doğrulukta hesaplamaların gerçekleştirilebilmesi için 3 Boyutta tasarım kritik önem taşır. Bu nedenle gerçekleştirilen manyetik analizler için 3 Boyutlu Maxwell tercih edilerek motor parçaları üzerinde doygunluk seviyeleri, akı yoğunluğu değerleri, kaçak akı gibi motor için önemli parametreler elde edilmiştir.

ANSYS Maxwell motorun çalışma prensibini, elektrik ve manyetik alanların davranışlarını matematiksel ifadeler aracılığı ile açıklar. Bilgisayar programlarının bu davranışları simüle edebilmesi için Maxwell denklemlerini kullanır (R. Huang vd., 2022).

Bu denklemler:

Faraday Yasası zamanla değişen manyetik alan etrafında elektrik üretimini açıklar. Eşitlik 3.20’de E elektrik alan şiddetidir, B ise manyetik akı yoğunluğudur

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.20)$$

Gauss Eşitlik 3.21 ile manyetik alanın herhangi bir kapalı yüzey üzerinden geçen akı yoğunluğunun sıfır olma durumunu açıklar.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.21)$$

Eşitlik 3.22’de verilen Amper Yasası zamanla değişen bir akımın kendi yönü etrafında manyetik alan üretmesini açıklar. H manyetik alan şiddeti, J akım yoğunluğudur.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.22)$$

Gauss Yasası bir elektrik akımının pozitiften negatife akma ilişkisini açıklar. Eşitlik 3.23’te D elektrik akı yoğunluğu, ρ yük yoğunluğu verir.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.23)$$

Durağan ve yarı durağan elektromanyetik alan dağılımlarının açıklanması için, yer değiştirme akım yoğunluğu $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ ihmal edilir, bu da Eşitlik 3.24'ü verir:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (3.24)$$

Üç boyutta, herhangi bir vektör alanının kıvrımının sapması sıfıra eşit olması durumunda Eşitlik 3.25 elde edilir.

$$\nabla \cdot \vec{J} = \nabla \cdot (\nabla \times \vec{H}) = 0 \quad (3.25)$$

Makroskopik malzemenin özellikleri, Eşitlik 3.26 – 3.28'de gösterilen kurucu bağıntılar tarafından tanımlanır.

$$J = \sigma E \quad (3.26)$$

$$D = \varepsilon E = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (3.27)$$

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (3.28)$$

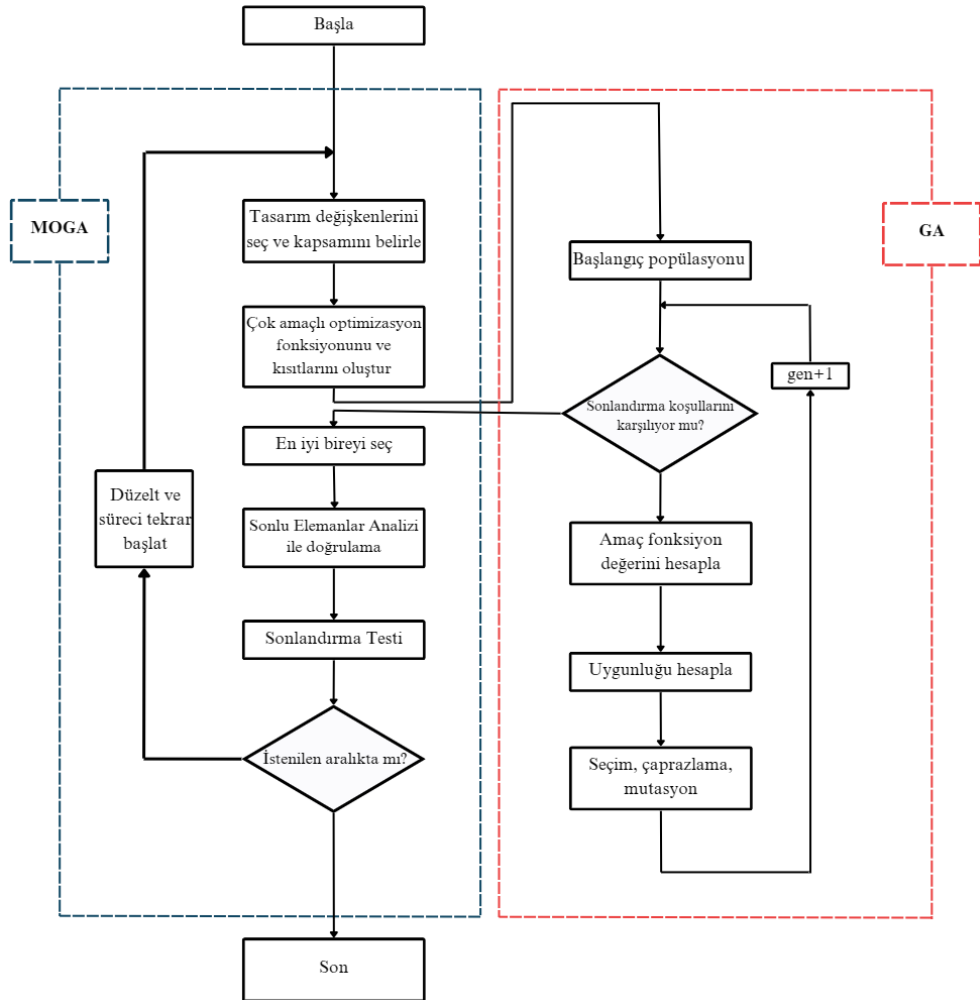
Burada σ elektrik iletkenliği, ε elektrik geçirgenliği bu denklemde $\varepsilon_0 \varepsilon_r$ olarak verilir, ε_0 serbest uzaydaki geçirgenlik ve ε_r yalıtkanlardaki elektrik alan çözümünü belirleyen bağıl geçirgenliktir. Manyetik geçirgenlik μ , serbest uzaydaki geçirgenlik μ_0 ve bağıl geçirgenlik μ_r yalıtkanların manyetik özelliklerini belirler (Ge, 2014).

3.3 Çok Amaçlı Genetik Algoritma

Tasarımın boyutsal parametreleri belirlenirken güç gereksinimlerine göre hesaplamaları yapılır. Fakat özel tasarım gereksinimleri ve performans iyileştirmeleri için bu hesaplamalar yeterli gelmez. Analizlerde sıkça karşılaşılan ve hesap karmaşıklığı ile çözümün zorlaştığı optimizasyon işlemlerinde genetik algorithmadan yararlanılır. Genetik algoritma doğadan esinlenerek biyolojik evrime dayanır. En uygun olanın hayatta kalma ilkesine sahip evrimsel tabanlı bir optimizasyon aracıdır. Doğal seçim ve yinelenme ile en uygun bireyleri seçerek belirlenen hedefler doğrultusunda optimum tasarıma ulaşılmasını kolaylaştırır. Daha iyi uyum sağlayabilen yeni bir kromozom popülasyonu nesli oluşturmak için seçim, çaprazlanma ve mutasyona uğratılma gibi işlemlere tabii

tutarak optimum sonuca yakınsayana kadar aynı işlemleri tekrarlar (Lora vd., 2024; X. Zhao vd., 2020).

Tek amaçlı optimizasyon işlemleri gibi birden fazla hedef fonksiyonunun bulunduğu çok amaçlı optimizasyonlar için de genetik aloritmadan faydalanılır. MOGA, genetik aloritmaya dayalı çok amaçlı optimizasyon aracıdır. Çok sayıda birbiri ile çelişen hedef fonksiyonunun bulunduğu optimizasyon işlemlerinde tek bir çözümün olmadığı durumlar için eşdeğer kalitede bir dizi olası çözüm sunar. Birçok hedef arasında optimum değere yaklaşılması için bireyleri baskınlık ilişkisine göre değerlendirir. Bireyler arasında baskın olan bireyler daha fazla uygunluğa sahiptir, bu nedenle optimal çözümü bulmak için tekrar tekrar yineleme olasılıkları daha yüksektir. MOGA'nın optimizasyon sürecine ait akış şeması Şekil 3.2'de gösterilmektedir (Konak vd., 2006; Yang vd., 2020a)



Şekil 3.2 MOGA'nın optimizasyon sürecine ait akış şeması (Yang vd., 2020b)

MOGA'nın aynı anda birçok optimizasyon işlemini gerçekleştirilebildiği için mühendislik problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Motor tasarımcıları için de büyük kolaylıklar sağlayan bu algoritmalar motorun ortalama tork dalgalanmalarını azaltma, verimliliği arttırma, kayıpları azaltma gibi optimizasyonu yapılacak girdilerin belirlenen maksimum-minimum aralıklarda en uygun değerin bulunmasını sağlar. Zaman içerisinde optimum tasarıma ulaşabilmesi için aşağıda verilen adımlar izlenerek optimizasyon işlemi gerçekleştirilir.

- SEY ile analizi gerçekleştirilen motorlarda MOGA kullanılarak amaç fonksiyonu tanımlanır.
- Motorun boyutları girilerek (D_o , L_s , L_r , $P_{\text{çıkış}}$, η ,...) gibi önemli optimizasyon değişkenlerini gen olarak tanımlar ve tasarım için sınırlar tasarım hedefleri tanımlanır.
- İlk popülasyon boyutu ayarlanır ve tasarım değişkenlerinin optimizasyon aralıkları belirlenerek kromozom (birey) oluşturulur.
- Uygunluk değeri hesaplamaları yapılarak popülasyon içerisindeki her bir ferdin uygunluğunu ölçer.
- Seçim, çaprazlama ve mutasyon yöntemleri ile yeni popülasyonlar oluşturularak motor için belirlenen bireylerin değerlendirilmesi sağlanır.
- Seçim iyi bireylerin uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirilmesi ile bir sonraki nesillere aktarılarak birey sayısının belirlendiği aşamadır.
- Çaprazlama işlemi iki bireyin çaprazlanarak yeni bir birey oluşturulduğu aşamadır. Oluşturulan bireylerde rastgele kesilen genlerin birbiriyle değişimi sağlanarak yeni bireyler oluşturulur.
- Mutasyon çaprazlama işlemi sonrası bireylerin uygunluk değerlerinin arttırmak için rastgele seçilen bir Bit'i 1 ise 0; 0 ise 1 olacak şekilde değiştirir. Bu sayede popülasyonun genetik çeşitliliği arttırılmış olur.

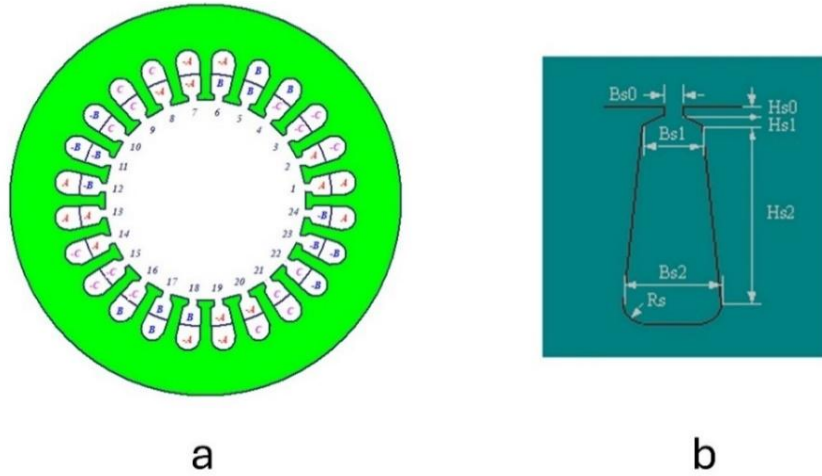
Bu süreçlerde daha güçlü kromozomlar ayıklanarak zayıf kromozomlarda istenmeyen iterasyonların aktarımı durdurulmuş olur. Yeni meydana gelen popülasyonlar yani Algoritma ile elde edilen optimal parametreler simülasyonda kullanılarak sonuç kıyaslamaları gerçekleştirilir. Uygun bulunmaması durumunda değişkenler tekrar girilerek işlem yenilenir ve kontrol edilir (Çunkaş ve Ürkmez, 2013).

4 BULGULAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde çift stator tek rotor topolojisine sahip EASM motorun SEY ile elde edilen nümerik analizi, elektromanyetik tasarım sonuçları, termal ve yapısal özelliklerinin incelenmesine ait yapılan çalışmalar verilmiştir. Ayrıca analiz çalışmalarında kullanılan MOGA optimizasyon çalışması ile ilgili detaylardan da bahsedilmiştir.

4.1 Çift Statorlu Eksenel Akılı Senkron Motorun SEY ile Analizi

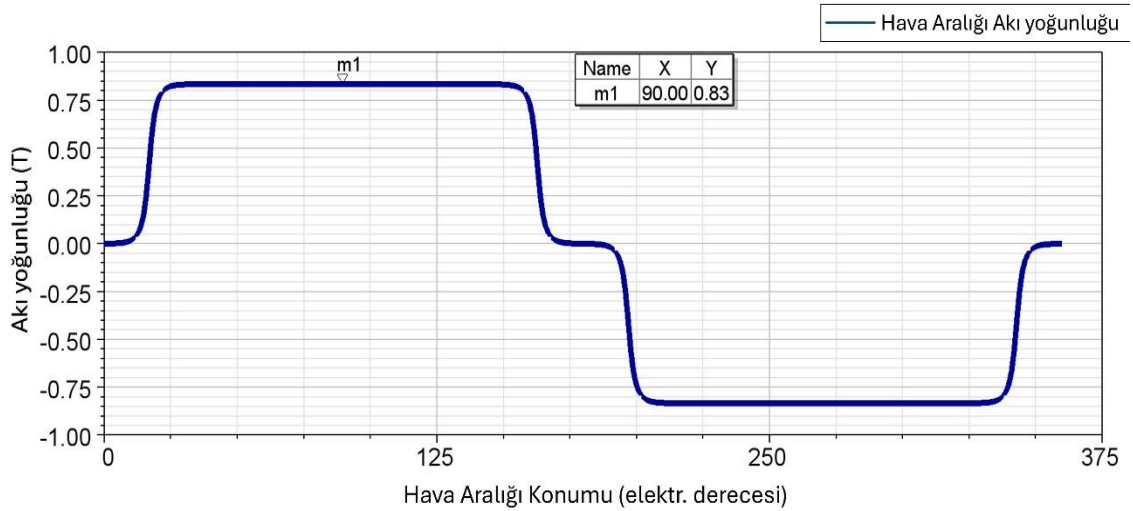
RMxprrt, ANSYS Maxwell yazılımının motor performansını hızlı bir şekilde analiz etmek için SEY tabanlı bir elektrik makinesi tasarım arayüzüdür, ayrıca elde edilen analitik sonuçlara göre makinenin 2 veya 3 Boyutlu geometrisinin de oluşturulmasına imkân tanıyan bir programdır. Bu çalışmada ilk olarak ÇS-EASM'nin matematiksel modeli çıkartılmış, daha sonra bu modele göre ANSYS RMxprrt programında gerekli tanımlamalar yapılmıştır. Tasarlanan motorun SEY ile analitik sonuçları burada tekrar elde edilmiştir. Şekil 4.1'de programa yapılan tanımlamalar ile elde edilen ÇS-EASM'nin stator sargılarına ve stator oluklarına ait RMxprrt görseli yer almaktadır.



Şekil 4.1 RMxprrt görseli a) stator sargı şeması b) stator oluk geometrisi

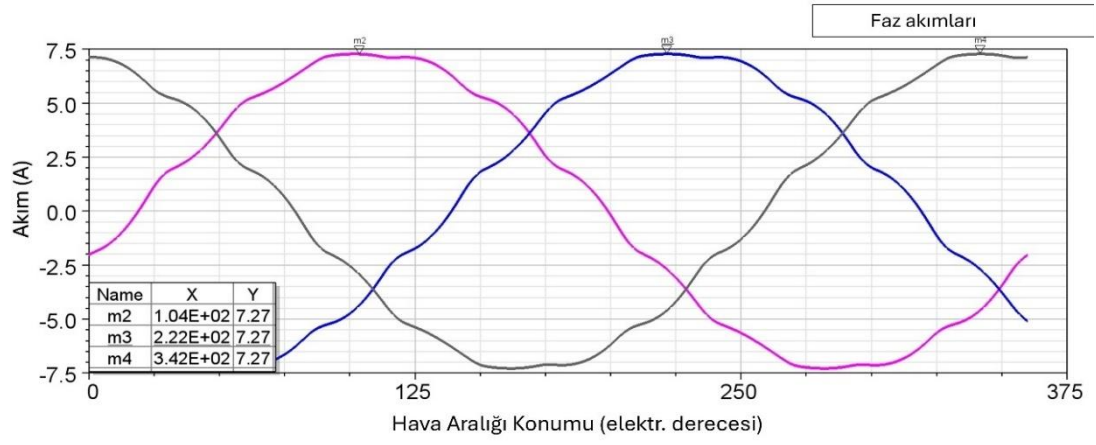
Senkron motorların çalışmasında hava aralığındaki akı rotor manyetik alanına bağlıdır. Rotor ve stator arasındaki hava aralığında rotor akısı statorun manyetik alanıyla etkileşime giren bir manyetik alan oluşturmaktadır. Statorun dönen manyetik alanından kaynaklanan elektromanyetik indüksiyon sonucu bir rotor manyetik alanı oluşturmakta bu da rotor akımını indüklemektedir (Belkacem vd., 2018). Rotorun tasarımı, malzemenin özellikleri, statorun manyetik alanının frekansı/genliği ve yük koşullarının tümü rotorun

manyetik alanının yoğunluğu ile dinamiklerini etkilemektedir. Motorda torkun meydana gelmesi, hava aralığındaki stator manyetik alanı ile rotor manyetik alanı arasındaki bu etkileşime bağlıdır. Rotor manyetik alanının stator manyetik alanıyla hizalanma ve etkileşime girme durumu, motorun verimliliği, güç faktörü, hız dahil olmak üzere motorun performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bunların yanı sıra, titreşim, aşırı ısı üretimi veya verimlilik kaybı gibi performans sorunları, harmonik bozulmalar ya da dengesizlikler gibi olumsuz parametreler rotor manyetik alanındaki değişikliklerden kaynaklanabilir. Bu nedenle, elektrik makinelerinin tasarım ve işletiminin iyileştirilmesi, hava aralığındaki rotor manyetik alanını yönetme yeteneğine bağlıdır.

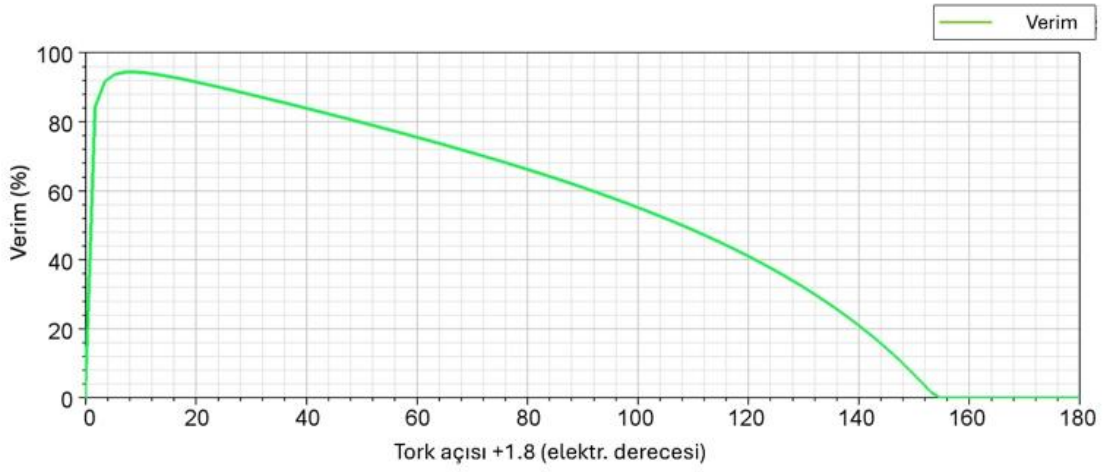


Şekil 4.2 Hava aralığı manyetik akı değeri

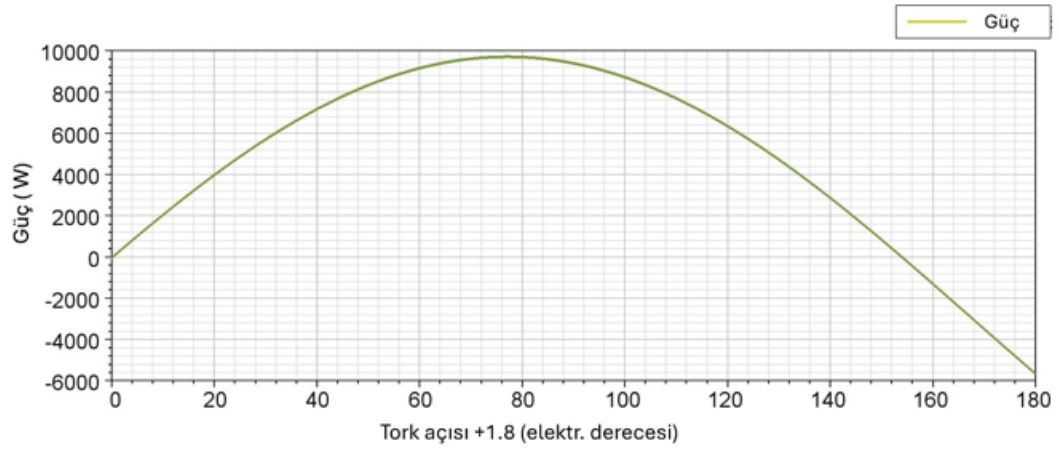
Şekil 4.2’de ANSYS RMxprt arayüzünden elde edilmiş hava aralığı akı dağılımı verilmiştir. Hava aralığı akı yoğunluğu ve dağılımı motor performansının yorumlanması konusunda önemli etkenlerdendir. Bu tasarımın analitik sonuçlarına göre hava aralığında meydana gelen akı değeri 0.83 T olarak elde edilmiştir. Bu değer mıknatıs içeren motorlar için uygun aralıktadır. Elektrik makinelerinde hava aralığı akı dağılımı ile önem teşkil eden güç, akım, verim ve zıt EMK gibi temel değerlere ait analitik sonuçlara göre oluşan eğriler Şekil 4.3-Şekil 4.6’da verilmiştir.



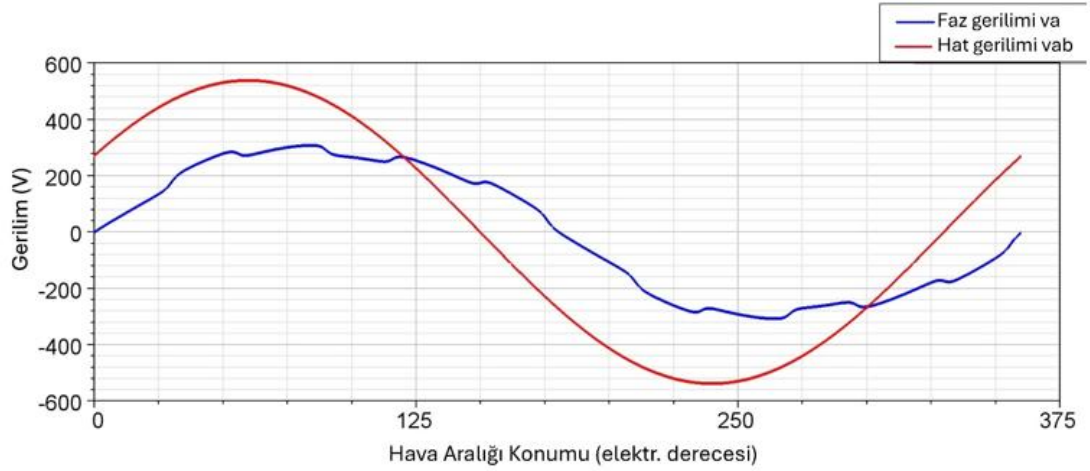
Şekil 4.3 Stator akımları



Şekil 4.4 Verim



Şekil 4.5 Güç grafiği



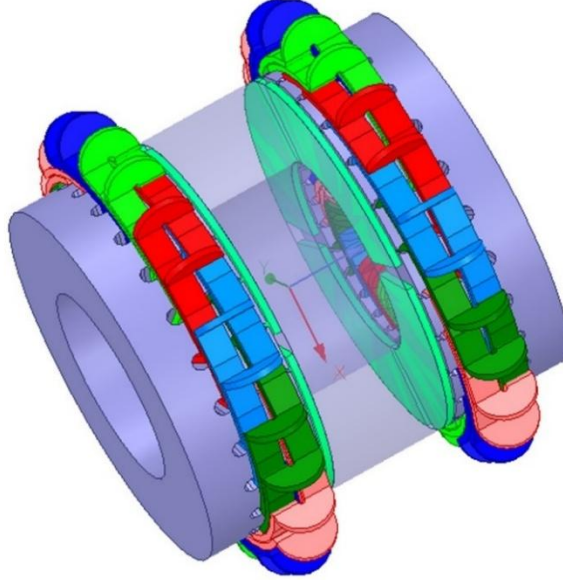
Şekil 4.6 İndüklenen gerilim

Şekil 4.3–Şekil 4.6’da verilen grafiklerden, tasarımı yapılan ÇS-EASM hedeflenen değerlere yakın performans özellikleri gösterdiği gözlenmektedir. Şekil 4.3’te verilen akım eğrileri incelendiğinde, stator sargılarındaki akım dalga formu sinüzoidaldir ve dengeli bir yapıya sahiptir. Elde edilen akımların ortalama rms değeri 5.169 A’dır. Akımın sinüzoidal yapısı, daha düzgün çalışmaya ve daha düşük kayıplara katkıda bulunan minimum harmonik bozulma ile verimli enerji transferini yapabildiğini ifade etmektedir. Motorun güç çıkışı 3 kW olarak elde edilmiş ve bu durumda motorun hedeflenen mil gücünde çıkış verebildiği görülmüştür. Diğer önemli bir parametre ise motorun verim değeridir, verim grafiğinden görüldüğü üzere motor %93.13’lük yüksek bir verimlilikle çalışabilmekte bu da giriş gücünün yalnızca %6.87’sinin direnç kayıpları ve mekanik sürtünme nedeniyle kaybolduğunu göstermektedir.

Şekil 4.5-Şekil 4.6 grafikleri ise sırasıyla güç grafiğini ve indüklenen gerilim eğrilerini vermektedir. Grafiğe göre zıt EMK değeri ise 195.7 V olarak elde edilmiştir. Akım, tork ve zıt EMK arasındaki ilişki, motorun iyi dengelenmiş performansını ortaya koymakta ve değişen yükler arasında kararlı çalışma koşullarını korurken verimli enerji kullanımıyla yüksek güç sağlayabileceğini göstermektedir.

4.2 Çift Statorlu Eksenel Akılı Senkron Motorun Manyetik Tasarımı

Matematiksel model ve RMXprt'te analitik olarak hesaplanan değerlere göre ANSYS Electronics programında 3 Boyutlu katı model oluşturulmuştur. Oluşturulan katı modele ait görsel Şekil 4.7'de verilmiştir.

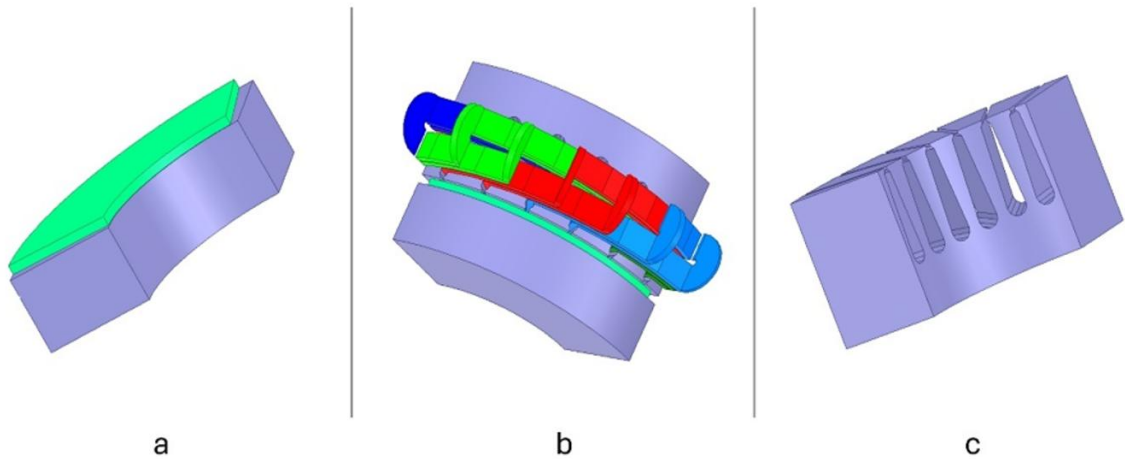


Şekil 4.7 3 Boyutlu katı model

Bu çalışmada tasarlanan motorun rotor nüvesi, diğer eksenel akılı motorlarla kıyaslandığında daha kalın bir yapıya sahip olup, bu özellik motorun yapısal dayanımını artırmayı hedeflemektedir. Tasarımda, motorun ortalama 21 Nm'lik bir çıkış torku sağlamak üzere belirlenmiş olmasına rağmen, kullanılan stator yapısı, daha yüksek tork değerleri için de uygun özellikler taşıyacak şekilde seçilmiştir. Bu motor yapısı, ilerleyen çalışmaların ilk aşamasını oluşturmakta olup, elektrikli araçlar gibi yüksek güç gerektiren uygulamalara yönelik revizyonlarla daha yüksek güç çıkışları sağlamak üzere yeniden tasarlanması planlanmaktadır. Özetle, ilerleyen çalışmalar kapsamında, motorun termal ve mekanik dayanımını artırmak amacıyla rotor nüvesinin daha kalın bir yapıya kavuşturulması hedeflenmiş ve bu, motorun performansını iyileştirmeye yönelik önemli bir tasarım değişikliği olarak öngörülmüştür.

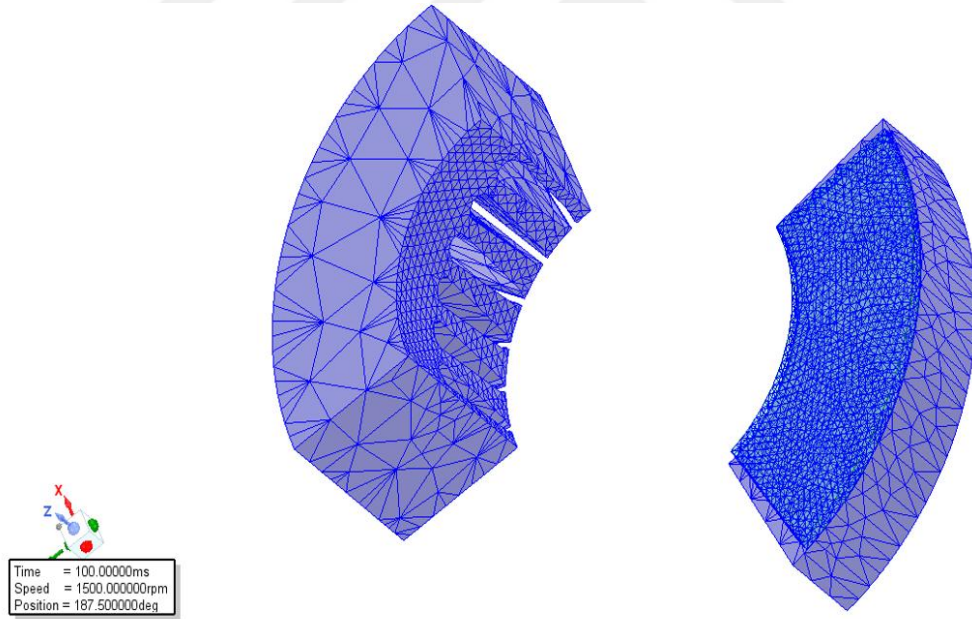
SEY ile yapılan analizlerin doğruluğu, hacmin veya alanın ayrıldığı eleman sayısı ile bu elemanlar üzerindeki bilinen yükler altında sistem davranışının ne kadar doğru modellenebildiğine bağlıdır. ANSYS yazılımında ağ (mesh) işlemi, çözüm bölgesi

üzerindeki eleman veya bölge sayısı olarak tanımlanmakta olup, daha fazla ağ elemanının kullanılması çözümün kesinliğini artırırken, aynı zamanda çözüm süresinin uzamasına, daha fazla depolama alanına ve yüksek kapasiteli işlemci ihtiyacına yol açmaktadır. Bunun yanı sıra, çözüm süresini kısaltmaya veya işlemleri basitleştirmeye yönelik yapılan optimizasyonlar, hata oranında artış riski taşımaktadır (Ge, 2014). Düğüm noktası sayısındaki artış, çözümlerin gerçek değerlere daha fazla yaklaşmasını sağlasa da çözüm süresini önemli ölçüde uzatmaktadır. ANSYS Electronics programında SEY ile yapılan çözümlerde tam model yerine çeyrek model kullanımı, özellikle simetrik yapılara sahip sistemlerde analiz sürecini önemli ölçüde kolaylaştırmakta ve hızlandırmaktadır. Çeyrek model kullanımı, sistemin geometrik ve yükleme simetrilerinden yararlanılarak eleman sayısını azaltır ve bu da çözüm süresini kısaltırken gerekli işlemci gücü ve depolama alanı gereksinimlerini düşürmektedir. Bununla birlikte, doğru sınır koşulları ve simetri kısıtlamaları tanımlandığında, çeyrek model ile elde edilen analiz sonuçları, tam modelle elde edilen sonuçlarla büyük ölçüde uyumlu ve gerçeğe yakın değerler vermektedir (Eker, 2017). Ancak, simetri koşullarının ihmal edilmesi veya yanlış tanımlanması durumunda, analiz sonuçlarında sapmalar oluşabilir. Bu nedenle, çeyrek modelin kullanımı, yalnızca simetri özelliklerinin doğru bir şekilde uygulanabildiği durumlarda tercih edilmeli ve sonuçların doğruluğu gerçek sistemle sürekli karşılaştırılmalıdır. Bu bağlamda tasarlanan motorun analizi için motorun 4 kutuplu olmasından kaynaklı $\frac{1}{4}$ model (çeyrek model) oluşturulmuştur. Oluşturulan $\frac{1}{4}$ modele ait görseller Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8 Oluşturulan mimariye ait motor bölümleri a) rotor nüvesi ve mıknatıs b) $\frac{1}{4}$ model c) stator nüvesi

Bu tasarımda ağ yöntemi olarak TAU yöntemi tercih edilmiştir. TAU yöntemi, özellikle karmaşık geometriye sahip problemlerde yüksek doğruluk sağlamak için tercih edilen bir tekniktir. Bu yöntemin en önemli avantajı, çözüm alanındaki tüm fiziksel değişimleri hassas bir şekilde yakalayabilmesidir. Analizde kullanılan ağ yapısı, motorun farklı bölgelerinde belirlenen nokta yoğunluklarına göre değişmektedir. Stator bölgesinde 26684 düğüm, stator bölgesindeki detaylı akış ve manyetik alanların doğru bir şekilde modellenmesine olanak tanırken, stator nüvesi, rotor nüvesi ve mıknatıslar sırasıyla 4215, 4314 ve 13047 düğüme sahiptir. Rotor ve stator arasındaki hava aralığı bölgesindeki ağ yoğunluğunun artırılması, motorun çalışma verimliliğinin ve elektromanyetik davranışının doğru bir şekilde simüle edilmesini sağlar. Sonuç olarak, diğer alanlardaki düğümlerle birlikte toplamda 77404 düğüm içeren bu ağ yapısı, motorun her bir parçasının fiziksel özelliklerinin yüksek doğrulukla modellenmesini sağlar ve çözümün güvenilirliğini artırır. Ortaya çıkan ağ yapısı Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9 Kullanılan ağ yapısı

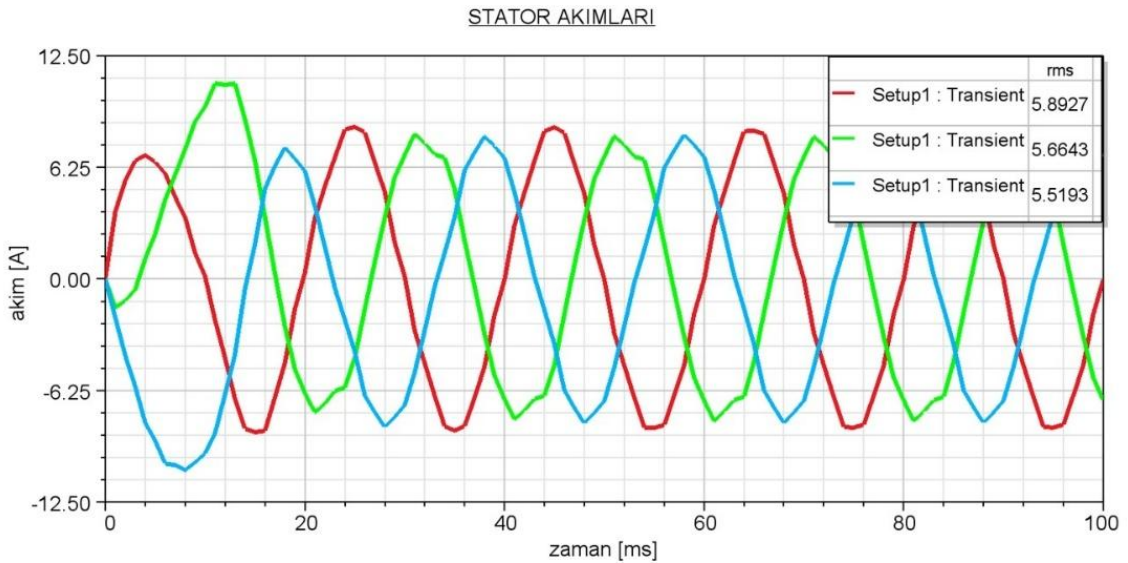
Motor performansını etkileyen diğer bir unsur ise motor parçalarında kullanılan malzemelerdir. Stator sargıları tarafından üretilen manyetik alanın homojen dağılması ve malzemelerde meydana gelen kayıpların minimum düzeyde olması önemli faktörlerden biri olarak gösterilmektedir. Ayrıca mıknatıs içeren motorlarda mıknatısın kalıcı mıknatısiyet özelliği ve sağladığı akı miktarı motor verimliliği ve üretilen torku doğrudan

etkilemektedir. Tablo 4.1’de motor da kullanılan parçalara ait malzeme tipleri yer almaktadır.

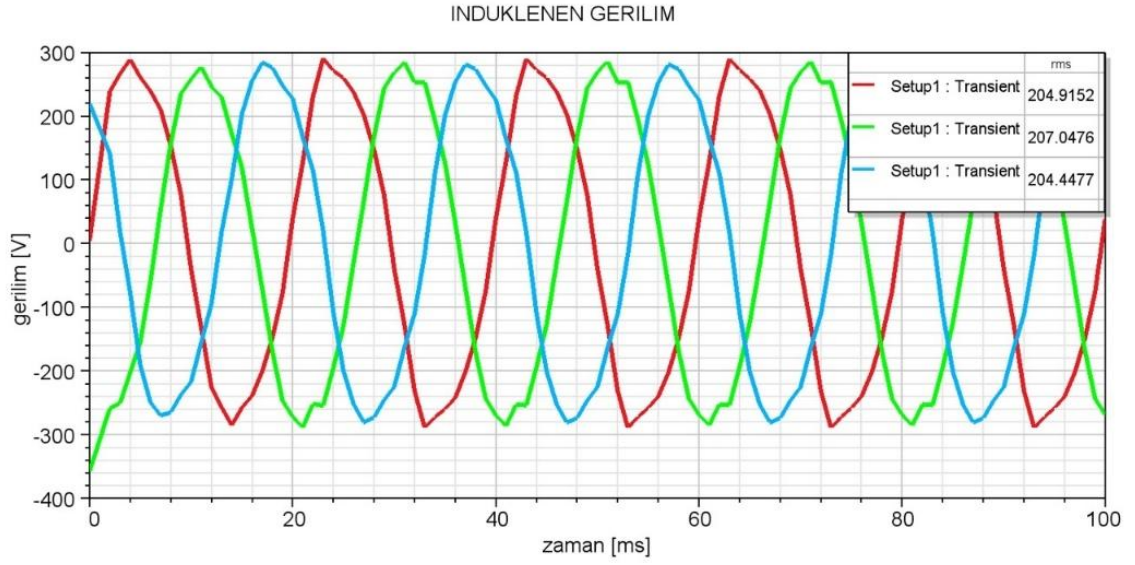
Tablo 4.1 Motor parçalarında kullanılan malzemeler

Motor bölümü	Malzeme tipi
Stator	JFE_Steel_35JN250
Rotor	JFE_Steel_35JN250
Mıknatıs	Arnold_N42SH
Sargılar	Bakır

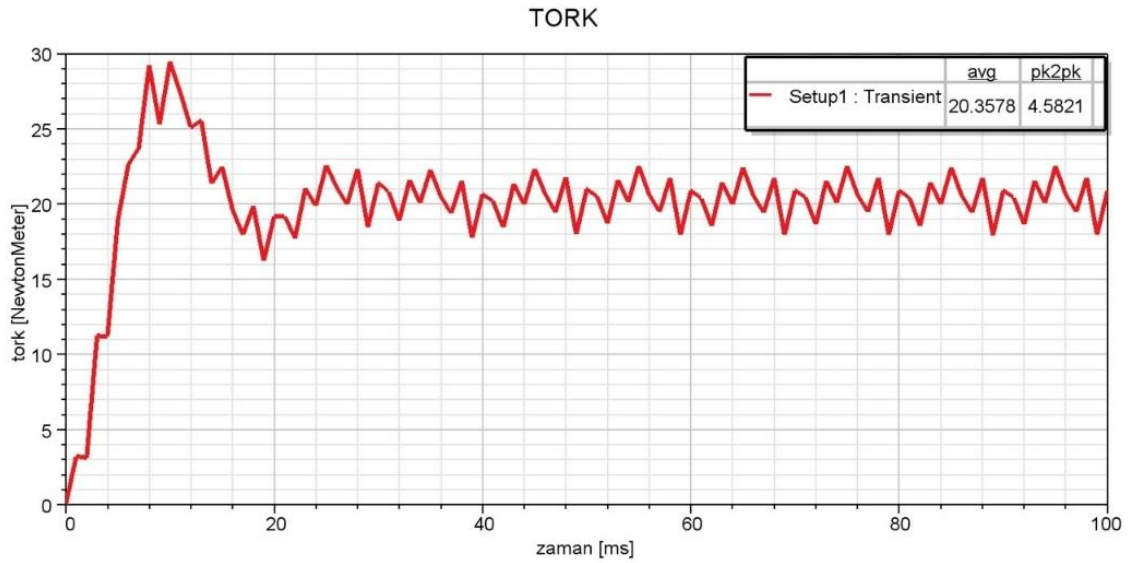
Son tasarım olarak, rotor, stator, mıknatıs ölçüleri belirlendikten sonra en uygun mimari SEY ile ilk çözümleme yapılmıştır. ÇS-EASM için gerçekleştirilen 3 Boyutlu SEY analizi, motorun dinamik performansının ayrıntılı bir şekilde incelenmesini sağlar. Bu analiz, her biri 0.0002 ms hassasiyetle 100 ms’lik bir süre boyunca gerçekleştirilmiştir. 4 kutuplu ve 3.3 kW şaft gücüne sahip bir ÇS-EASM tasarlanmış ve tam yük (21 Nm) altında çalıştırılmıştır. Bu süreçte 3 faz stator akımları, elektromanyetik tork, hız ve verim gibi parametreler kaydedilmiştir. Şekil 4.10-Şekil 4.12, ANSYS Electronics nominal akım ve 1500 d/d hızda elde edilen faz akımı, tork ve hız grafiklerine yer verilmiştir.



Şekil 4.10 Optimize edilmemiş modele ait stator faz akımları



Şekil 4.11 Optimize edilmemiş modele ait indüklenen gerilim



Şekil 4.12 Optimize edilmemiş modele ait tork grafiği

Şekil 4.10'da görüleceği üzere motorun oluşturulan 3 Boyutlu katı modeli mıknatıs optimizasyonu yapılmadan önce fazların dengeli olmasına rağmen faz eğrilerinde şekilsel olarak deformasyonlar gözlenmektedir. Fazlara ait stator akımlarının ortalama rms değeri 5.692 A olarak elde edilmiştir. Şekil 4.11'de sargılarda indüklenen gerilim grafiği verilmiştir. Fazların genel olarak dengeli olmasına rağmen akım grafiğinde bozulmalar olan faza ait gerilim eğrisinde de bozulmalar mevcut ve genlik değeri diğer fazlara göre

dengelemez gelmiştir. Şekil 4.12’ de motordan elde edilen tork grafiğı verilmiştir. Grafikten görüleceğı üzere nominal tork değeri istenilen özelliklere sahip değildir. Ortalama tork değeri düşük iken tork dalgalanma değerinin de oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Motorun ortalama tork değeri 20.22 Nm olarak edilirken, eğride meydana gelen dalgalanma %22.65 olarak elde edilmiştir. Bu verilerin istenilen değerlere ulaşması için optimizasyon işlemi uygulanmıştır.

4.3 Çok Amaçlı Genetik Algoritma Optimizasyon Sonuçları

Bu tez çalışmasında, motor tarafından üretilen tork parametresinin iyileştirilmesi üzerine optimizasyon işlemi ANSYS programı aracılığıyla MOGA ile gerçekleştirilmiştir. Sabit mıknatıslı motorlar gibi elektrik motorlarının performansını mıknatısın geometrik özellikleri ve hacimsel parametreleri doğrudan etkiler (Liu ve Zhou, 2019). Özellikle mıknatısın tork dalgalanması ve ortalama tork değeri üzerindeki etkisi, motorun verimliliğı ve çalışabilirliğı açısından kritiktir (Sarıdağ ve Eker, 2025). Bu bağlamda, tork dalgalanma değerinin %10’un altında, ortalama tork değerinin ise 21 Nm’nin üzerinde tutulması hedeflenmiştir. MOGA, tasarım parametrelerinin etkilerini etkin bir şekilde analiz etmek ve farklı parametrelerin optimum değerlerini belirlemek için güçlü bir yöntem olarak kullanılmıştır. Çalışmanın optimizasyon süreci, motor tasarımında tork dalgalanması ve ortalama tork değeri gibi parametrelerin etkileşimi dikkate alınarak yapılmıştır. Bu algoritma, her iki hedefi aynı anda optimize edebilmiş ve tork dalgalanmasını istenen sınırların altına düşürerek ortalama tork değerini artırabilmiştir. Sonuç olarak, elde edilen optimizasyon verileri, elektrik motorlarının daha verimli ve güvenilir çalışması için gereken tasarım parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesine olanak sağlamıştır.

ANSYS, bu tür uygulamalar için geliştirilen araçlar ile optimizasyon sürecini gerçekleştirmede kullanıcılara önemli kolaylıklar sağlamaktadır. ANSYS yazılımında, ilgili arayüz üzerinden gerekli tanımlamalar yapılarak optimizasyon süreci üç parametre üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler, mıknatısın embrace değeri ve mıknatısın iç ve dış çap değerleri olup, her biri belirli sınırlar içerisinde tanımlanmıştır. Çalışmada tanımlanan sınırlar Tablo 4.2’de sunulmuştur.

Tablo 4.2 Optimizasyon limit değerleri

Optimizasyon kısmı	Minimum değer	Maksimum değer
Mıknatıs embrace	0.7	0.99
Mıknatıs iç çap	80 (mm)	95 (mm)
Mıknatıs dış çap	125 (mm)	150 (mm)

SEY analizinden sonra elde edilen veriler, motorun zamana göre dinamik performansını yansıtan çeşitli önemli parametrelerin ( fazlı stator akımı, tork, verimlilik, g faktörü vb.) değişimlerini incelemeye olanak tanır. Bu parametrelerin her biri, motorun çalışma koşullarına bağlı olarak belirli bir dinamik davranış sergiler ve bu veriler motor tasarımının optimizasyonu için kritik öneme sahiptir. MOGA için başlangıç örneklem büyüklüğü, yineleme başına örneklem büyüklüğü ve maksimum yineleme büyüklüğü sırasıyla 100, 50 ve 20 olarak tanımlanmıştır. Tablo 4.3'te i ve dış çap ölçüleri, ortalama tork, tork dalgalanma ve tepeden tepeye değerleri yer almaktadır..

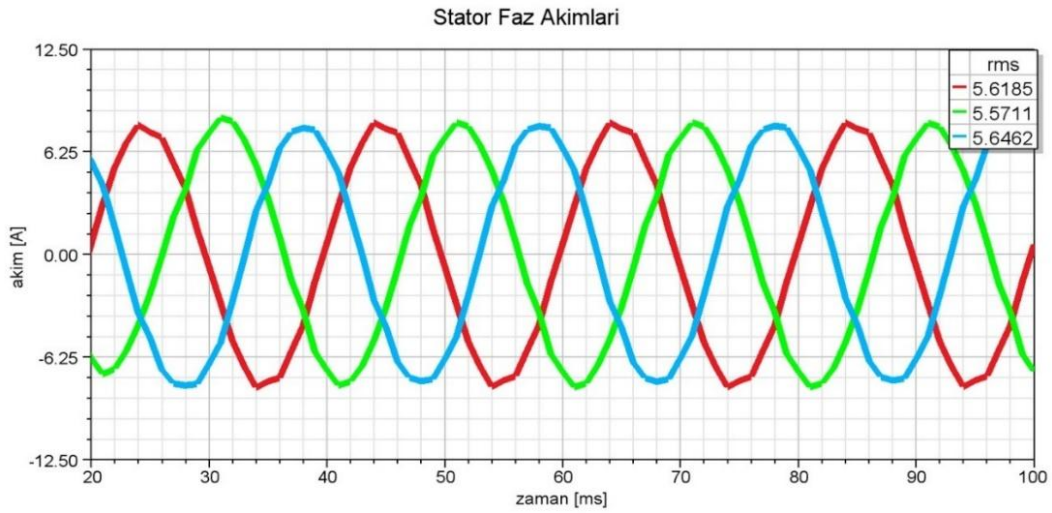
Mıknatıs optimizasyonu sonuçlarına ait grafik değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir. Sonuçlarda ortalama tork değeri ve tork dalgalanma değerinde diğer değerden bağımsız olarak başarılı sonuçlar elde edilmesine rağmen iki değerinde birlikte hedeflenen değerler kapsamında başarılı olması şeklinde mıknatıs ölçüleri belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlarda mıknatıs embrace, mıknatıs i çapı ve mıknatıs dış çapı değerlerinin sırasıyla 0.917235356 mm, 80.88125000 mm ve 149.5324970 mm olduğu ölçüler en iyi optimizasyon değerini oluşturmuştur.

Tablo 4.3 Mıknatıs optimizasyon sonuçları

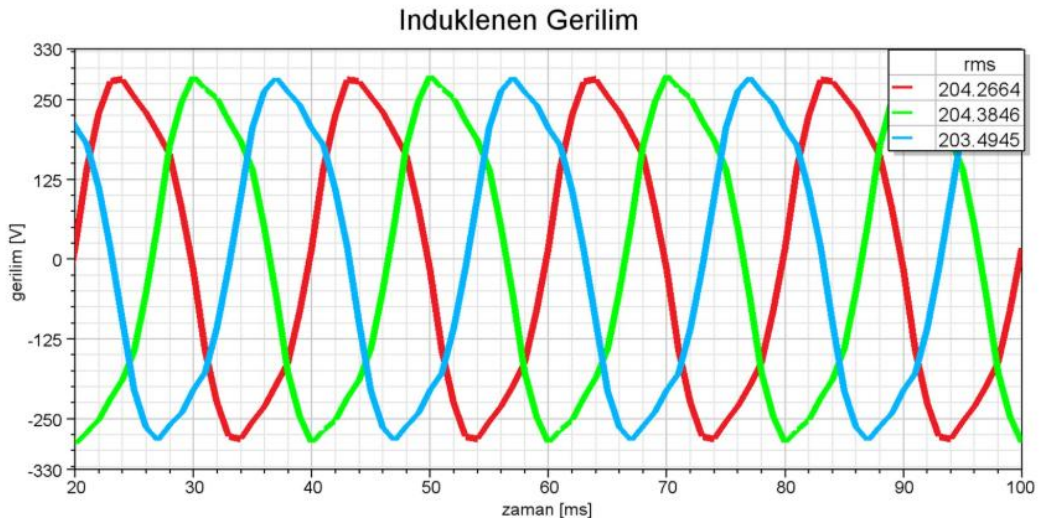
Embrace	İç çap (mm)	Dış çap (mm)	Ortalama tork (Nm)	Tork Dalgalanması (%)	Tepeden tepeye değeri (Nm)
0.700000000	94.25446038	140.0000000	18.35	13.38	2.455
0.700000000	95.00000000	140.0000000	17.92	15.48	2.774
0.710833333	80.62500000	140.4166667	20.40	11.81	2.409
0.723316876	93.15483210	142.8081334	19.62	13.08	2.566
0.724188271	91.47773544	145.1159546	20.17	09.30	1.875
0.732500000	88.12500000	143.7500000	19.98	14.62	2.921
0.743759605	83.79040737	141.8331089	20.56	13.12	2.697
0.754166667	84.37500000	147.0833333	21.27	11.51	2.448
0.755377233	89.53913032	142.0856957	19.83	25.34	5.0249
0.775833333	91.87500000	141.5277778	19.03	16.13	3.069
0.792908842	91.07409955	143.8803423	20.59	21.13	4.351
0.797500000	82.50000000	144.8611111	21.26	15.83	3.365
0.810892356	90.58918279	140.3563652	19.34	15.28	2.955
0.819166667	90.00000000	148.1944444	21.35	14.62	3.121
0.837636737	94.20003102	143.1906950	19.77	08.37	1.654
0.840833333	86.25000000	142.6388889	21.10	07.72	1.628
0.855444500	85.14016258	148.3983013	21.53	15.50	3.337
0.862500000	93.75000000	145.9722222	20.71	05.98	1.238
0.867119857	93.71658756	141.0521219	19.33	08.51	1.645
0.883326025	90.28344823	142.4692946	20.25	06.94	1.405
0.884166667	81.56250000	149.3055556	21.87	13.68	2.991
0.905833330	89.06250000	140.7870370	18.59	14.29	2.656
0.905833333	89.06250000	140.7870370	20.07	02.57	0.515
0.917235356	80.88125000	149.5324970	21.40	07.38	1.579
0.921055428	92.33201090	143.5786001	20.23	07.76	1.569
0.927500000	85.31250000	144.1203704	20.94	13.77	2.883
0.949166667	92.81250000	147.4537037	20.61	16.31	3.361
0.951021672	92.84639267	141.7366153	19.69	11.12	2.189

4.4 Çift Statorlu Eksenel Akılı Senkron Motorun SEY Sonuçları

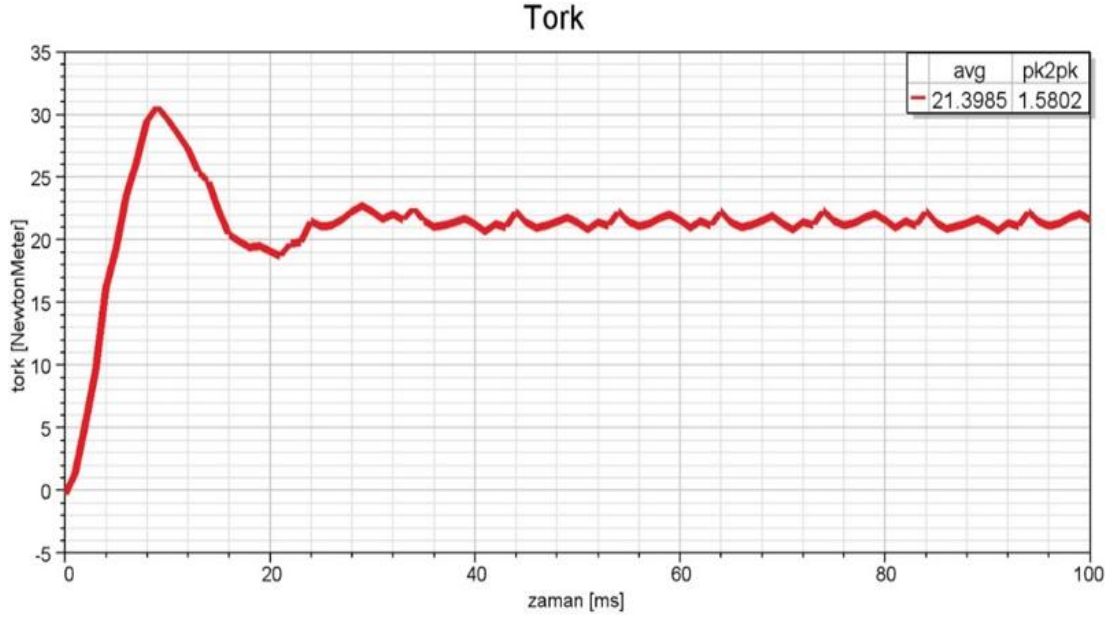
MOGA ile yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen mıknatıs ölçülerine göre tekrar 3 Boyutlu katı modeli oluşturularak akım, tork indüklenen gerilim gibi temel motor parametreleri elde edilmiştir. SEY analizinden sonra elde edilen veriler, motorun zamana göre dinamik performansını yansıtan çeşitli önemli parametrelerin değişimlerini incelemeye olanak tanır. Bu parametrelerin her biri, motorun çalışma koşullarına bağlı olarak belirli bir dinamik davranış sergiler ve bu veriler motor tasarımının optimizasyonu için kritik öneme sahiptir. Şekil 4.15 – Şekil 4.17 motorun 3 fazlı akım grafiklerini, tork eğrisini, indüklenen voltaj grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.13 Nominal çalışmada stator akımları



Şekil 4.14 Nominal çalışmada indüklenen gerilim



Şekil 4.15 Nominal çalışmada tork

ÇS-EASM'nin dinamik performansı için elde edilen veriler motorun dengeli ve verimli modda çalıştığını açıkça göstermektedir. Akım grafiğinden de görülebileceği gibi, üç fazlı stator akımları (Faz A, B, C) zamana göre sinüzoidal bir dalga formu sergilemektedir ve her faz 120° 'lik bir faz farkıyla birbirine uymaktadır. Bu, motorun besleme kaynağının mükemmel faz dengesi ve senkron çalışma sağladığını göstermektedir. Akımların rms değerleri 5.6185 A (Faz A), 5.5711 A (Faz B) ve 5.6462 A'dır (Faz C). Bu değerler arasındaki küçük farklar, sistemin elektriksel simetriyi koruduğunu ve motorun manyetik devresinde bir anormallik olmadığını göstermektedir. Akım dalgalarının bu simetrisi, motorun tork üretimi için dengeli bir manyetik alan ürettiğini kanıtlamaktadır.

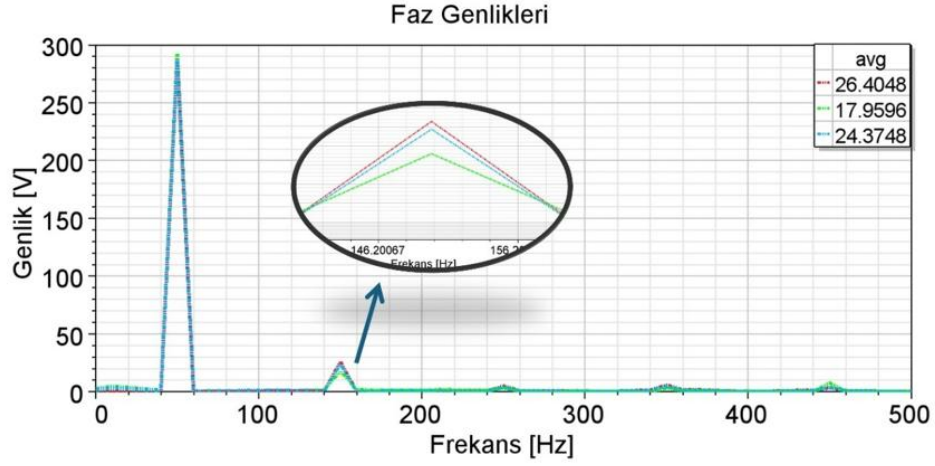
İndüklenen gerilim grafiği incelendiğinde her fazda oluşan gerilimlerin zamana bağlı olarak sinüzoidal bir yapı gösterdiği görülmektedir. Bu grafikten de görüleceği üzere indüklenen gerilimlerin rms değerleri sırasıyla Faz A için 204.2664 V, Faz B için 204.3846 V ve Faz C için 203.4945 V'tur. Bu değerler arasındaki farkların çok küçük olması motorun manyetik devresindeki dengeyi ve rotor-stator etkileşiminin doğruluğunu göstermektedir. Üç fazlı gerilimlerin birbirlerine göre 120° faz farkıyla düzenli olarak değiştiği açıkça görülmektedir. Bu faz farkı senkron motorların karakteristiği olan

motorun doğru faz uyumunu ve senkron çalışmasını teyit etmektedir. Ayrıca bu sinüzoidal yapı motorun zıt EMK'sının ideal biçimde indüklendiğini ve rotor hızının doğru bir şekilde kontrol edildiğini göstermektedir.

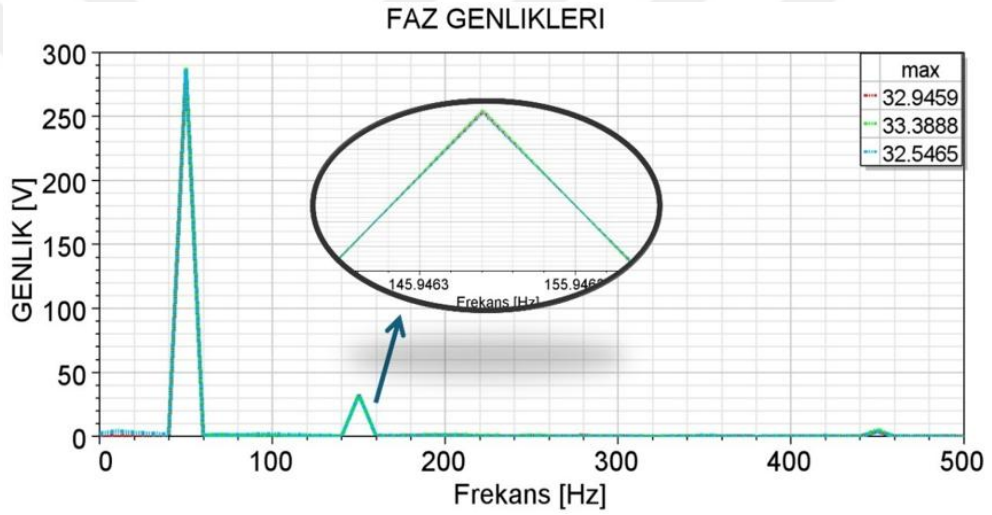
Motorun ürettiği torkun zaman içindeki değişimini gösteren tork grafiği, motorun yük değişimlerine nasıl tepki verdiğini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Motor ortalama olarak yaklaşık 21.3985 Nm sabit tork değerine ulaşmıştır. Bu, motorun yük altında kararlı bir çalışma koşuluna ulaştığını göstermektedir. Ayrıca grafikte gözlenen küçük dalgalanmalar, motorun sabit bir tork üretmeye çalışırken yük değişimlerine anlık düzeltmeler yaptığını göstermektedir. Tepe tork değeri ile ortalama tork arasındaki küçük fark, motorun dinamik tepkisinin yüksek olduğunu ve ani yük değişimlerinde bile tork kaybının minimum olduğunu kanıtlamaktadır.

Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda, ortalama tork değerinde belirgin bir iyileşme sağlanırken, tork dalgalanmalarında da azalma gözlemlenmiştir. Bu iyileşmelerle paralel olarak, indüklenen gerilim değerlerinde de bir gelişme elde edilmiştir. İndüklenen gerilimler, sinüzoidal olarak birbirine yakın olsalar da tork dalgalanmalarına yol açan bazı bozulmalar içermektedir. Bu bozulmaların daha net bir şekilde analiz edilebilmesi amacıyla, indüklenen gerilimlerin frekans domaininde harmonik bileşenleri incelenmiştir.

Harmonik analiz, özellikle motorlarda sıkça karşılaşılan ve istenmeyen titreşimlerin kaynağı olabilen frekans bileşenlerini tespit etmek için önemli bir tekniktir. Elde edilen frekans analizleri Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te sunulmuştur. Bu görsellerin detaylı incelenmesi, özellikle üçüncü harmonikte sinyallerde meydana gelen iyileşmeleri açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Motorlarda üçüncü harmonik genellikle tork dalgalanmalarının ve asimetrik yüklerin bir göstergesidir, bu yüzden bu frekansta gerçekleşen iyileşmeler, motorun dinamik performansındaki önemli bir gelişmeyi işaret etmektedir.



Şekil 4.16 Optimizasyon öncesi FFT sinyalleri

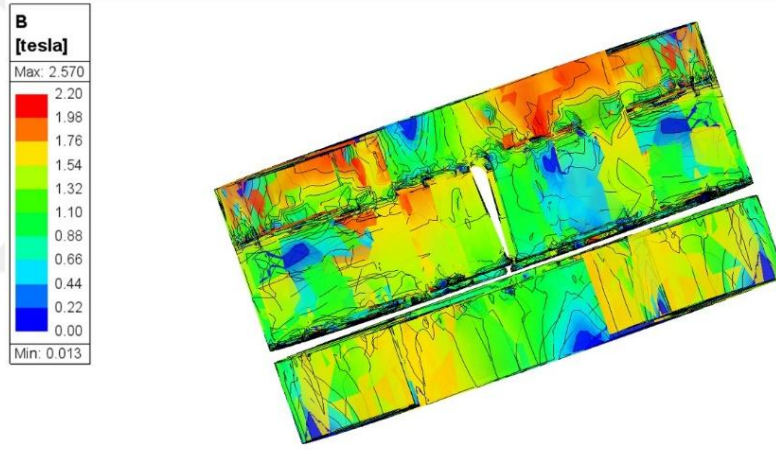


Şekil 4.17 Optimizasyon sonrası FFT sinyalleri

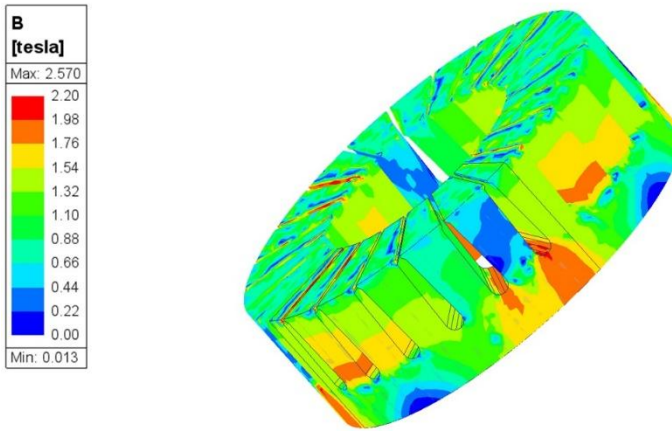
Optimizasyon öncesinde, üçüncü harmoniklerin her faz arasında belirgin farklar oluşturduğu gözlemlenirken, optimizasyon sonrası fazlara ait FFT sinyalleri arasındaki farklar oldukça zor fark edilir hale gelmiştir. Bu durum, motorun daha dengeli bir şekilde çalıştığını ve harmonik bileşenlerin azalmasıyla birlikte genel performansının arttığını göstermektedir. Ayrıca, bu iyileşme yalnızca tork dalgalanmaları ve gerilim değerlerinde değil, motorun genel verimliliği ve stabilitesinde de bir artışa işaret etmektedir. Bu veriler, optimizasyonun yalnızca tork değeri üzerinde değil, aynı zamanda diğer parametreler üzerinde de iyileştirmelere yol açtığını ortaya koymaktadır.

Bu analizlerin genel değerlendirmesi, ÇS-EASM'nin kararlı ve verimli bir modda çalıştığını, üç fazlı akımlarda ve gerilimlerde kararsızlık olmadığını ve motorun dinamik

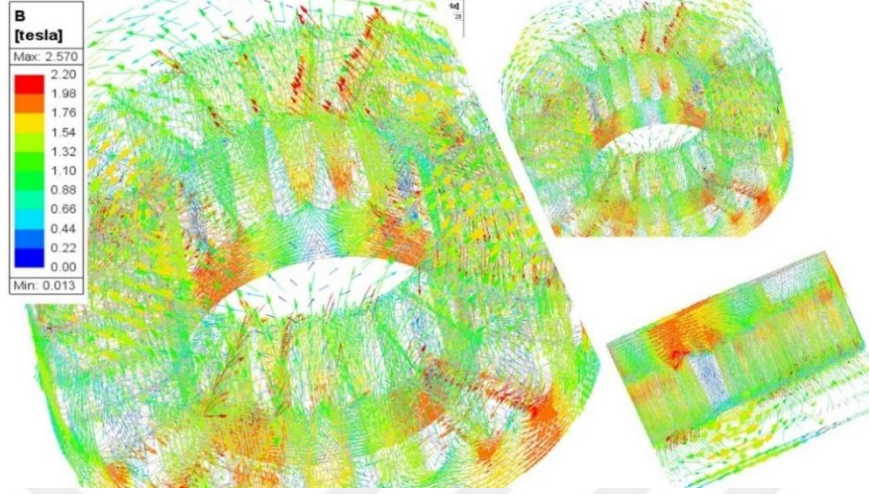
tork üretiminde kararlı bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu veriler, motorun yüksek verimlilik gerektiren uygulamalarda kullanılmaya uygun olduğunu ve özellikle hassas kontrol gerektiren sistemlerde ideal bir seçim olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, motorun elektromekanik performansının beklentileri karşıladığını ve tasarımın başarıyla yapıldığını kanıtlamaktadır. Elektriksel olarak elde edilen akım, tork, zıt EMK gibi parametrelerin yanı sıra motor parçalarında meydana gelen elektromanyetik sonuçlarda önem taşımaktadır. Bu sebeple SEY analiz sonuçlarında stator, rotor ve mıknatistaki manyetik akı dağılımları ve stator sargılarındaki akı yoğunlukları da incelenmiştir. Şekil 4.18-Şekil 4.24 motor parçalarında meydana gelen manyetik akı yoğunlukları ve akı vektörleri verilmiştir. Stator sargılarında meydana gelen akım yoğunlukları ise Şekil 4.24’te verilmiştir.



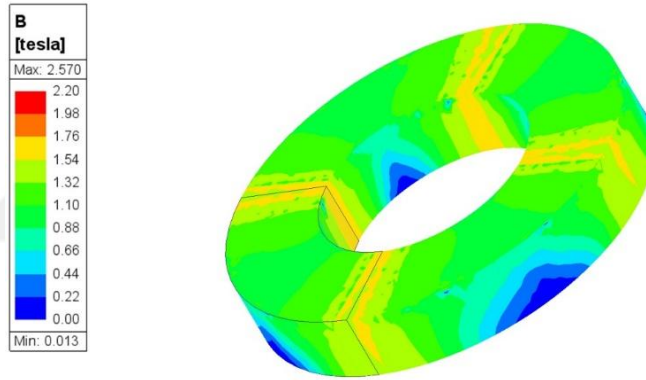
Şekil 4.18 Nüvelerdeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı



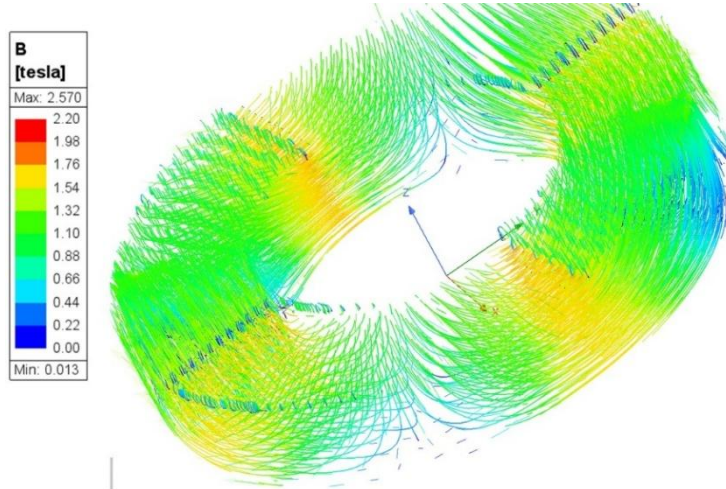
Şekil 4.19 Stator nüvesinin manyetik akı yoğunluğu dağılımı



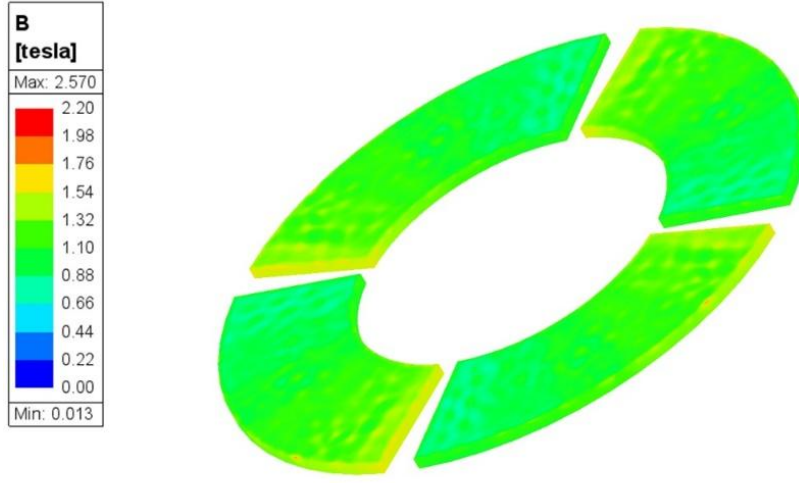
Şekil 4.20 Stator nüvesinin akı vektörleri



Şekil 4.21 Rotor nüvesinin manyetik akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 4.22 Rotor manyetik akı vektörleri ve akı dağılımları



Şekil 4.23 Mıknatısların manyetik akı dağılımları



Şekil 4.24 Stator sargılarının akım yoğunluk değerleri

Motorun nominal çalışma koşullarında elde edilen manyetik akı dağılımı, motorun manyetik alan yapısının genel özelliklerini sunar. Grafiklerde manyetik akı yoğunluğunun maksimum değeri 2.570 Tesla olarak ölçülürken, ortalama akı değeri 1.5-1.7 Tesla arasındadır. Bu akı yoğunluğu değerleri, motorun çeşitli yerlerinde elde edilen yoğunluklar ile Tablo 4.4'te belirtilen referans aralıkları içerisinde olduğunu göstermektedir (Gözüaçık ve Akar, 2023).

Tablo 4.4 Akı yoğunluğu aralıkları (Gözüaçık ve Akar, 2023)

2p₁				
	2	4	6	8
Hava Aralığı Akısı (B_g) (T)*	0.5-0.75	0.65-0.78	0.7-0.82	0.75-0.85
Hava Aralığı Akısı (B_g) (T)	0.65 – 0.82 (ortalama)			
Stator Boyunduruk Akısı (T)	1.1 – 1.45 (tepe değeri)			
Stator Diş Akısı (T)	1.4 – 1.7 (ortalama)			

Maksimum akı yoğunlukları stator oluklarının tabanında ve oluk dişlerinin ucunda gözlemlenirken, motordaki akı yoğunlukları istenen seviyededir. Manyetik akı vektörleri ise kullanılan malzemelerde homojen bir dağılım olduğunu göstermektedir. Stator akım yoğunluğu aşırı değere ulaştığında performans ve verimliliği etkilemektedir. Sınırı aşan ve buna belli bir süre maruz kalan sargılarda aşırı ısınma, bununla beraber izolasyon sorunları, motor verimliliğin düşmesi ve motor ömrünün kısılmasına gibi sonuçlar elde edilmektedir. Düşük akım yoğunluğu ise sargı boyutlarının arttırmakta ve hacimsel olarak verimsiz bir yapı ortaya çıkarmaktadır. Tasarlanan motor 3 kW çıkış gücüne sahip olduğu için bu motor için sargılarda meydana gelen akım yoğunluğunun 4-6 A/mm² olması beklenmektedir. Şekillerden görüleceği üzere maksimum akım yoğunluğu 6.99 A/mm² iken sargıların ortalama akı yoğunluğu 5.2 A/mm² olarak elde edilmiştir. Bu değer, sargıların verimli çalışabilmesi ve ısınma seviyelerinin kontrollü bir şekilde tutulabilmesi için optimal bir aralıktır. Bu akım yoğunluğu, motorun yüksek performansla çalışmasını sağlarken, aşırı ısınmanın önüne geçer ve motorun uzun ömürlü olmasına katkı sağlar.

4.5 Farklı Yük Koşullarında SEY Sonuçları

Nominal çalışma koşullarında istenilen sonuçlar elde edildikten sonra tasarlanan motorun yük performansının analizi gerçekleştirildi. Yük analizi, motorun yüksüz durumundan %125 yük durumuna kadar her yük değeri için aynı koşullar altında ANSYS programında tekrar analiz edildi. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.5'te verilmiştir.

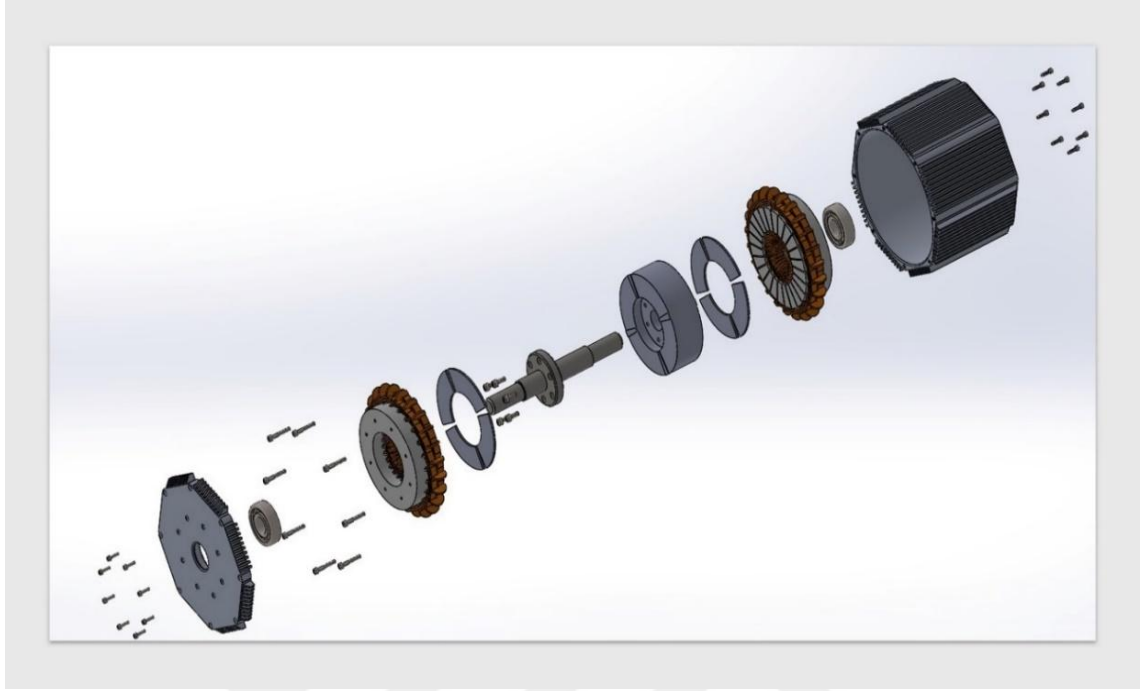
Tablo 4.5 ÇS-EASM'nin farklı yük koşulları altındaki çalışma değerleri

Yük %	Akım (A)	Tork (Nm)	Giriş Gücü(W)	Çıkış Gücü W	Verim(%)
0	0,527	0,925	195	149	76,4
25	1,980	5,248	852	824	91,63
50	3,960	10,667	1742	1675	93,54
75	5,940	16,023	2663	2517	93,25
100	7,920	21,316	3610	3348	92,41
125	9,899	26,488	4577	4161	91,36

Yapılan yük testlerinde motor %25'lik artışlarla nominal yükün %25'ten fazlasına kadar yüklenmiştir. Elde edilen sonuçlarda motor nominal yüke yakın değerlerde çalıştırıldığında %92'den yüksek verimle çalışmakta iken nominal yükte %92.41 değerinde verim ile çalışmaktadır. Motor çalışma koşullarındaki güç faktörü değerleri ise genel olarak 0.97'den daha büyük değerlerde çalışmaktadır.

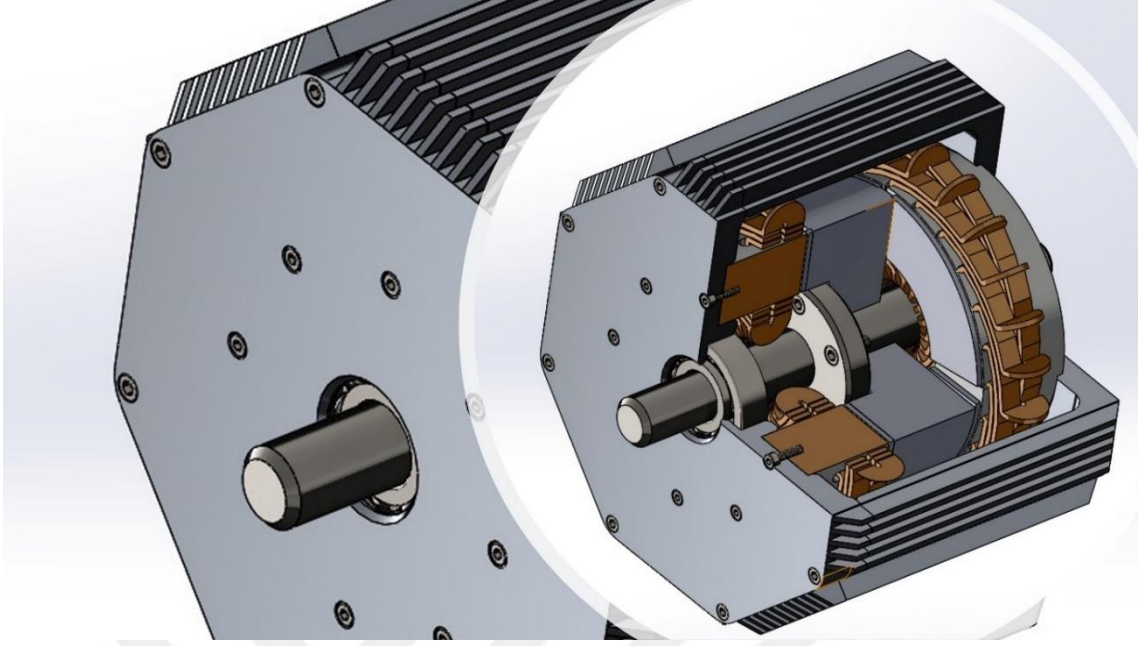
4.6 Çift Statorlu Eksenel Akılı Senkron Motorun Yapısal Tasarımı

Elektrik makinelerinin tasarım ve optimizasyon süreçlerinin önemli bir parçası da yapısal analiz ve motorun yapısal olarak verdiği sonuçlardır. Tasarlanan motorun manyetik ve termal tasarım aşamaları tamamlandıktan sonra yapılması gereken bir işlem olarak değerlendirilmektedir. Buradaki amaç dinamik ve statik yüklenme koşullarına göre motorun güvenli olduğu kanıtlamak ve motorda meydana gelecek deformasyon değerlerini elde etmektir. Diğer bir ifade ile eksenel akılı motorun yer değiştirme analizi, motorun yapısal bütünlüğünü değerlendirmek ve parçaların çalışma koşullarına dayanabilmesini garanti etmek için yapılmıştır.



Şekil 4.25 ÇS-EASM parçaları

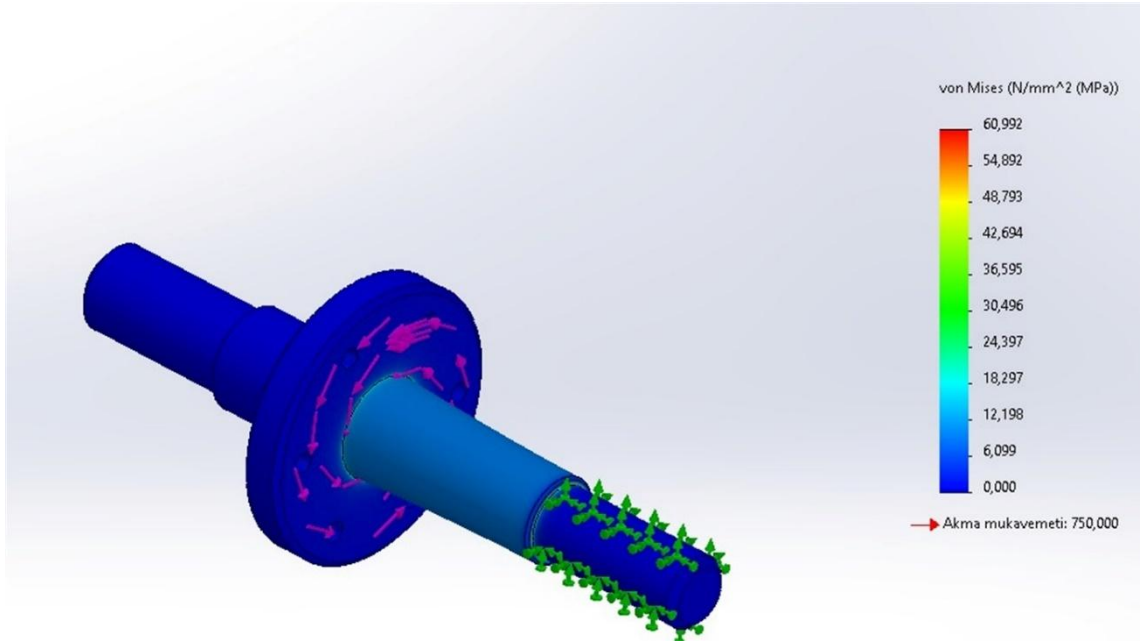
Şekil 4.25'te tasarlanan ÇS-EASM'nin parçaları verilmiştir. Elektrik motorları temel olarak kasa, stator, rotor ve şaft parçalarından meydana gelmektedir. Bazı özel üretimler haricinde rotor ve şaft hareketli parçalar, kasa ve stator sabit parçalar olarak bilinmektedir. Muhafaza veya çerçeve olarak bilinen kasa (dış gövde), makine parçalarını çevrelemenin yanında motor parçalarının sabitlenmesini sağlayarak motorda yapısal bütünlük sağlamaktadır. İç parçaları kir, nem ve mekanik hasar gibi dış çevresel faktörlerden korumanın yanı sıra elektrik makinelerinde sargılar tarafından meydana gelen ısıнын dağılımında yardımcı olur. Kasa aynı zamanda rotorun hareket etmesinde kullanılan yatakları ve diğer elemanları destekler. Şaft (motor mili) motoru yüke bağlayan aktarma organı olarak tanımlanmaktadır. Motorda üretilen mekanik gücü harici bir sistem veya yüke ileten motor parçasıdır. Rulman ise milin, motor muhafazası içinde sorunsuz bir şekilde dönmesini destekler. Rulmanlar sürtünmeyi azaltıp milin rahatça dönmesini sağlamaktadır. Şekil 4.26'da tasarlanan motor yapısal analizinin gerçekleştirilmesi için oluşturulan 3 Boyutlu katı model verilmiştir.



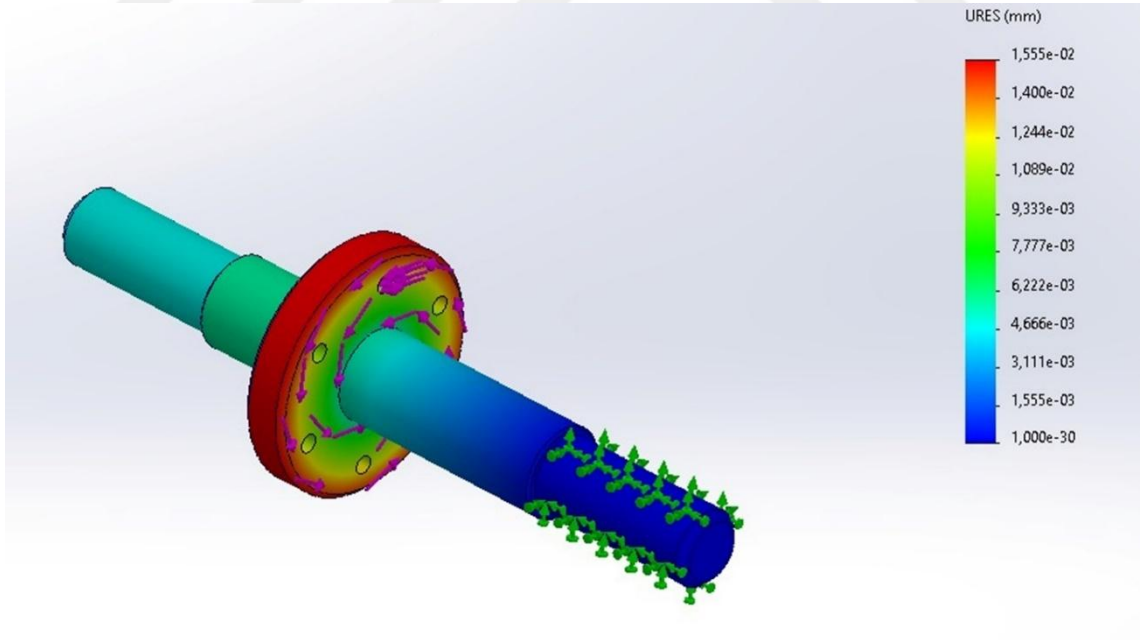
Şekil 4.26 Yapısal analiz için oluşturulan 3 Boyutlu model

Motorun yapısal analizinde en önemli faktör dönen kısımlarda (mil ve rotor) meydana gelecek yapısal etkilerin incelenmesidir. Motorda üretilen tork, rotor ile dönen şaft üzerinden aktarılmaktadır. Bu aktarımda sabitleme, eş eksenleme yapısal olarak motorun ömrünü belirlemektedir.

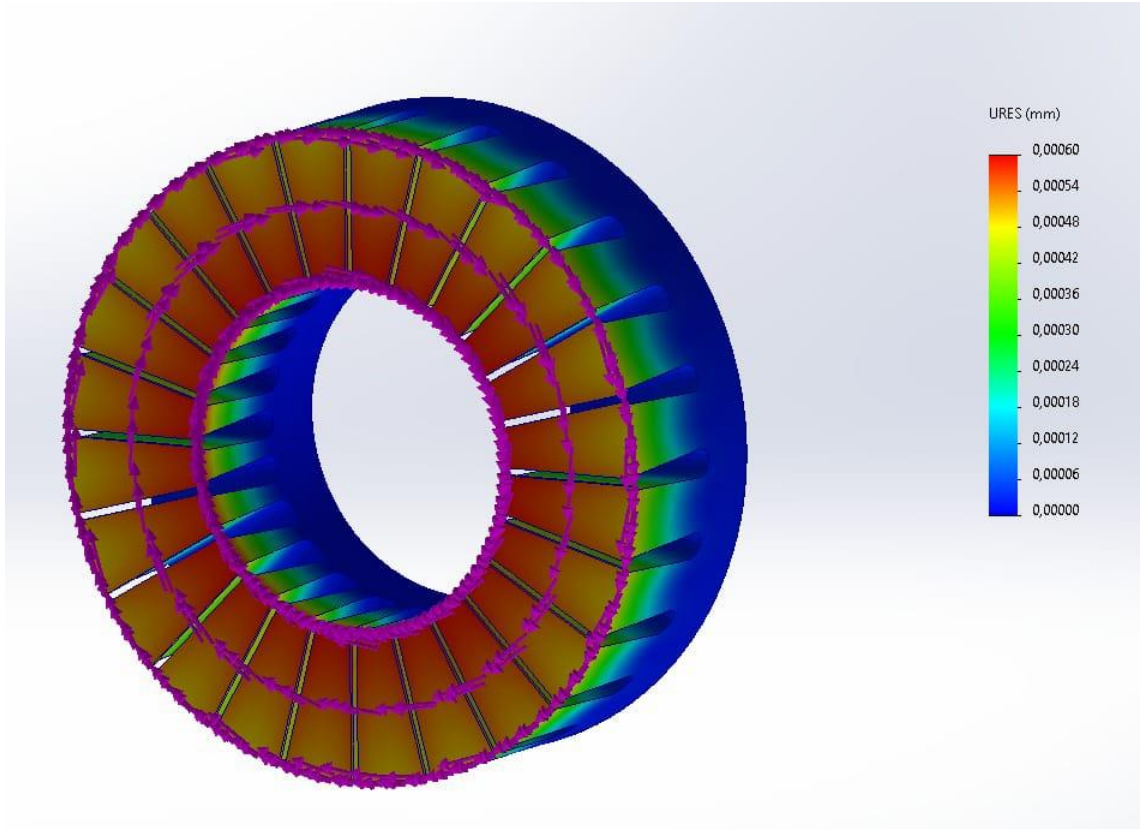
Motor sabitleme noktaları ve aktarım mekanizması tasarımında çok dikkatli davranılmalı, bile motorun yüke bağlantı yönü şekli uygulamalarda farklılık gösterebilmektedir. ÇS-EASM’de gövde ve kapağın tasarımı, motorun araç veya sistem içerisinde düzgün bir şekilde monte edilebilmesini ve aynı zamanda termal gereksinimlerin yönetilmesini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Motor gövdesi için alüminyum (Al 6061) kullanımı, malzemenin daha düşük mekanik mukavemetine rağmen, çelik ile karşılaştırıldığında üstün ısı transfer özellikleri nedeniyle avantajlıdır. Gövdenin gerilim analizi, motor sabitleme noktalarında 1.51 MPa’lık maksimum bir gerilim ortaya koydu; bu, malzemenin akma dayanımından (276 MPa) önemli ölçüde daha düşüktür ve gövde tasarımının operasyonel gerilimlere dayanacağını garanti eder. Yer değiştirme analizi, en uzak sabitleme noktalarında 0.00075 mm’lik maksimum bir yer değiştirme göstermiştir; bu da yük altında minimum deformasyon olduğu anlamına gelir.



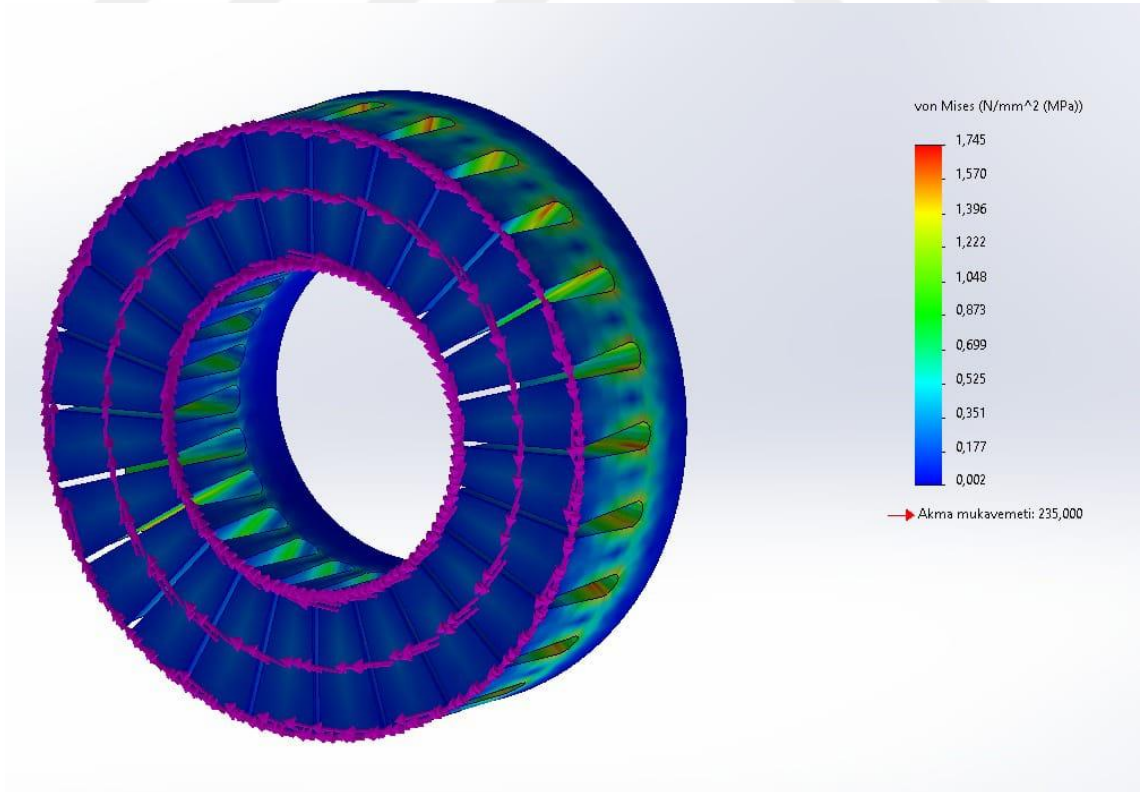
Şekil 4.27 Motor mili stres analizi



Şekil 4.28 Motor mili yer değıştirme analizi



Şekil 4.29 Stator oluk dişleri yer değiştirme analizi



Şekil 4.30 Stator oluk dişleri stres analizi

Yer değiştirme analizinin sonuçları hem şaft hem de stator oluk ağızlarında meydana gelen maksimum yer değiştirmelerin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu göstermiştir. Bu, motorun çalışması sırasında aşırı deformasyona neden olmamasını sağlar. Bu sonuçlar, beklenen yükleme koşulları altında motorun yapısal bütünlüğünün uzun vadeli performans için gerekli olduğunu göstermektedir.

Motor mili ve stator oluk ağızlarında meydana gelen maksimum gerilme değerleri tasarım şekil 4.27–şekil 4.30’da verilmiştir. şaftın maksimum gerilimi 60.92 MPa ve stator oluk dişlerinin maksimum gerilimi 0.739 MPa’dır. Bu değerler, malzemenin akıma dayanımından önemli ölçüde düşük olduğunu göstermektedir, bu da bileşenlerin aşırı stres nedeniyle arıza yapma olasılığı yoktur. Ayrıca şaft ve oluk dişlerinde meydana gelen deformasyona bağlı maksimum yer değiştirmeler şaft için 0.015 mm iken bu değer stator oluk dişlerinde 0.005×10^{-3} mm olarak elde edilmiştir. Her iki parçada da beklenen deformasyon çizgileri vardır, bu da motorun normal çalışma koşullarının %50 fazla yüklendiği durum içinde genel kararlılığının olumlu bir göstergesidir. Ayrıca, şaft ve stator oluk dişleri için güvenlik katsayısı hesaplandı. şaft için 7.13 ve stator oluk dişleri için 184 değerleri elde edildi. Bu güvenlik unsurları, gerekli güvenlik marjının üzerindedir ve motor parçalarının beklenmedik yüklere veya zaman içinde malzeme bozulmasına dayanacak yeterli sağlamlığa sahip olduğunu gösterir. Bu, motorun güvenlik standartlarını karşıladığını ve hizmet ömrü boyunca güvenilir bir şekilde çalışacağını garanti etmektedir.

Genel olarak, eksenel akılı motor için yer değiştirme analizi olumlu sonuçlar vermektedir. Maksimum gerilim ve güvenlik katsayısı değerleri, motorun temel yapısal bileşenlerinin, yani şaft ve stator oluk dişlerinin, arıza riski olmaksızın beklenen çalışma koşullarını karşılayacak şekilde iyi tasarlandığını teyit etmektedir. Bu değerler, istenen performans kriterleriyle uyumludur. Bu olumlu sonuçlar, motorun dayanıklılığını ve operasyonel verimliliğini güvence altına almaktadır.

4.7 Çift Statorlu Eksenel Akılı Senkron Motorun Termal Analizi

Eksenel akılı motorlar, özellikle yüksek verimlilik ve kompakt yapı gibi avantajlarla öne çıkarken, motorun verimli çalışması ve uzun ömürlü olması için termal analiz büyük önem taşımaktadır. Termal analiz, elektrik motorları tasarımının önemli bir aşamasıdır çünkü motorun düzgün çalışabilmesi için sıcaklık seviyelerinin kontrol altında tutulması gerekmektedir. Termal analiz ile, motorun farklı bileşenlerinde meydana gelebilecek ısı artışlarını tespit edilmekte ve bu ısınmanın motorun performansı üzerindeki etkilerini değerlendirilmektedir. Özellikle mıknatıs içeren motorlarda, aşırı ısınma, mıknatısların yapısal bütünlüğünü bozabilmekte ve yapısal düzeyde değişikliklere neden olabilmektedir. Bu da mıknatısların manyetik özelliklerini kaybetmesine yol açmakta, bu durumda motorun verimliliğini ve güç üretimini düşürmektedir.

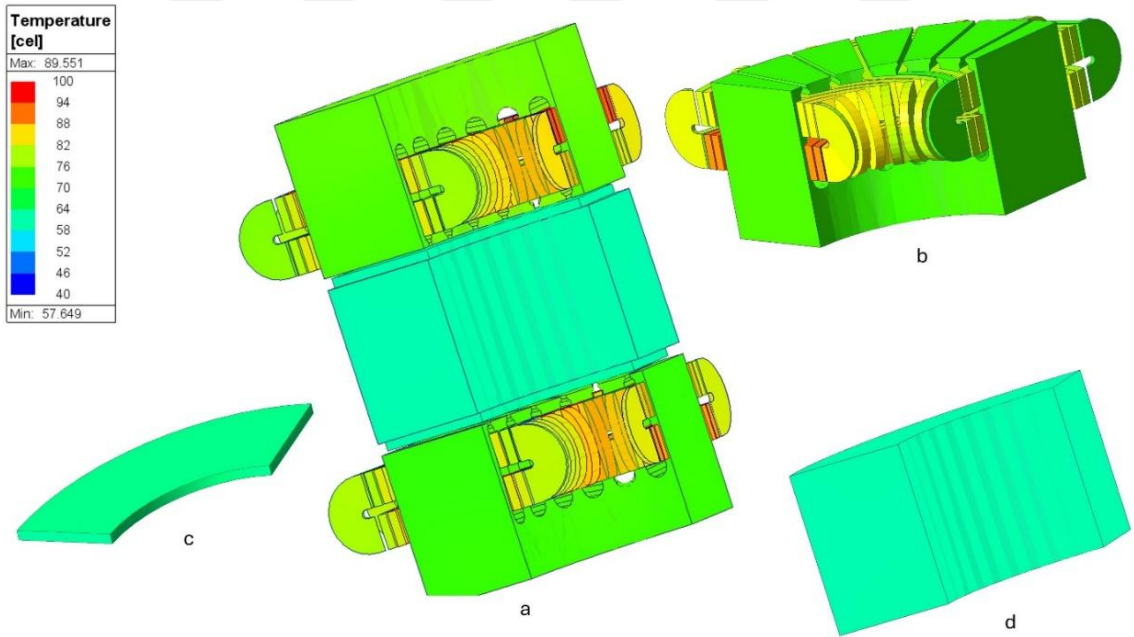
Termal tasarım yapılmadığı takdirde, motorun içinde meydana gelen sıcaklık artış etkileri incelenemeyecektir. Isınmaların elektriksel ve mekanik bileşenlerde vereceği hasar hakkında herhangi bir bilgi edinilmemektedir. Ayrıca, motorun ömrü olumsuz etkilenmekte ve beklenmedik arızalarla karşılaşılabilir. Yüksek sıcaklıklar, motorun daha az verimli çalışmasına ve enerji kayıplarının artmasına yol açmaktadır. Bu durum, motorun düzgün çalışabilmesi için gerekli olan manyetik akıyı sağlayamamasına ve nihayetinde performans düşüşüne sebep olmaktadır. Bu sebeple termal analiz, motorun verimli, güvenilir ve uzun ömürlü olabilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, motorun çalışma koşulları altında stator, rotor ve mıknatıslar arasındaki ısı dağılımı analiz edilmiştir. ÇS-EASM'nin kısımlarına ait termal özellikleri Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6 ÇS-EASM'nin kısımlarına ait termal özellikler

Motor parçası	Kullanılan Malzeme	Malzemenin Özellikleri		
		Yoğunluk (kg/m ³)	İzotropik Isıl İletkenlik (W/mC)	Özısı (J/ kg C)
Stator	JFE_Steel_35JN250	7600	150	460
Rotor				
Sargılar	Bakır	8978	387.6	381
Mıknatıslar	Arnold_N42SH	7500	8.7	460

ÇS-EASM, her iki statorun da bağımsız sargılarla donatıldığı ve her statorun rotorla etkileşim içinde olduğu bir yapıya sahiptir. Rotor, merkezde dönen tek bir bileşen olarak çalışmaktadır. Motorda kullanılan mıknatıslar, özellikle yüksek sıcaklık dayanımları ve güçlü manyetik alan üretme kapasiteleri ile tercih edilmektedirler. Mıknatıslar, motorun verimliliğini doğrudan etkileyen bir faktör olup, ısı özelliklerinin optimize edilmesi motorun performansını ve güvenli çalışmasını sağlamaktadır.

Termal analizde, motorun nominal hızda ve tam yükte çalışırken meydana gelen sıcaklık değişimleri dikkate alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda, motorun farklı bileşenlerinde meydana gelen sıcaklık artışları, kullanılan malzemelerin termal dayanıklılıkları ve çalışma koşulları ile ilişkilendirilmiştir. Motorun termal performansını değerlendirirken, stator, rotor ve mıknatıslar arasındaki sıcaklık değişimlerine dikkat edilmiştir. Yapılan simülasyonlar ve analizler sonucunda, motorun çeşitli bölümlerinde gözlemlenen sıcaklık değişimlerine dair görseller Şekil 4.31’de verilmiştir.



Şekil 4.31 ÇS EASM'nin termal sıcaklık dağılımı

Şekil 4.31’de motorun çeşitli bölgelerindeki sıcaklık farklarını gösteren bir termal dağılım grafiği bulunmaktadır. Sargılardaki, rotor ve mıknatıslar arasındaki sıcaklık seviyeleri açıkça gözlemlenmektedir. Motordaki maksimum sıcaklık stator sargılarında meydana gelerek 89.551°C olarak belirlenmiştir. Bu değer, motorun tam yükte çalışırken

elde edilen sıcaklık sınırlarını göstermektedir. Sargılarda meydana gelen bu sıcaklık değişimi, motorun enerji verimliliğini doğrudan etkileyebilir. Statordaki sıcaklık artışlarının sınırlar dışından meydana gelme durumunda, sargıların izolasyon malzemelerinin bozulmasına yol açabilmekte ve ek soğutma çözümleri gerekmektedir. Bu motorda meydana gelen sıcaklık değeri için risk gözükmemektedir. Rotor kısmında ise motorun en düşük sıcaklık değeri olan 57.649 °C değeri kaydedilmiştir. Rotorun bu düşük sıcaklık seviyeleri, motorun yüksek hızda çalışması ve hareketli parça olması nedeniyle doğal soğutma etkisinin yüksek olduğunu göstermektedir. Eksenel akıllı motorların en büyük avantajlarından bir tanesi rotorların doğal bir fan olarak çalışması olarak gösterilmektedir. Mıknatısların sıcaklıklarını düşürmek için rotor hızının arttığı dönemlerde, rotor doğal bir fan gibi çalışarak soğutma sağlayabilir. Bu tasarım özelliği, motorun yüksek verimle çalışmasına olanak tanırken, aynı zamanda mıknatısların uzun ömürlü olmasına da katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada elde edilen değerlerde bu avantajı destekleyici olacak şekildedir.

Mıknatıslar, motorun manyetik alanını üretmek için kritik bir bileşendir. Arnold_N42SH tipi mıknatısların, sıcaklık artışlarına karşı yüksek dayanıklılığı bulunmaktadır. Termal analizde, mıknatıslarda meydana gelen sıcaklık değerleri ortalama 71°C değerindedir, bu sıcaklık değeri mıknatısın manyetik özelliklerini olumsuz etkilemeden çalışmasını sürdürebileceği bir değerdir. Arnold_N42SH mıknatıslarının demanyetizasyon başlangıç sıcaklığı 150°C olduğu için, motorun çalışma koşullarında bu sıcaklık değerlerinin altında kalınması, mıknatısların güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Yüksek sıcaklıklar, mıknatısların manyetik alan yoğunluğunu etkileyebilir, ancak Arnold_N42SH modeli, sıcaklık arttıkça manyetik alan kaybı riskini minimize edecek şekilde tasarlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, mıknatıslar bu sıcaklık seviyelerinde manyetik performanslarını etkili bir şekilde sürdürmüştür. Motorun verimliliğini etkilemeyen bu sıcaklık değerleri, motor tasarımının güvenli sınırlar içinde olduğunu göstermektedir.

ÇS-EASM'nin termal analizine ilişkin sonuçlar, motorun güvenli çalışabileceği ve verimli performans gösterebileceği koşulları doğrulamaktadır. Motorun sıcaklık değerleri, mıknatısların demanyetizasyon riski olmadan çalışma koşullarını

karşılamaktadır. Sargılarda maksimum 90°C, rotor ve mıknatıs bölgelerinde ise ortalama sırasıyla 65°C ve 70°C sıcaklıkları elde edilmiştir. Bu sonuçlar, motorun tasarımının termal sınırlar içinde olduğunu ve kullanılan malzemelerin yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olduğunu göstermektedir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrik motorlarının endüstrideki payı ve enerji tüketimindeki oranı dikkate alındığında, enerji verimlilikleri büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda endüstride yüksek verimliliğe sahip motorlar tercih edilmekte ve yapılan çalışmalarda da bu tür tasarım ve optimizasyon çalışmaları ile karşılaşılmaktadır. Bu tez çalışmasında ÇS-EASM'nin motor yapısı, tasarımındaki temel kavramlar, parçaların fonksiyonları verilerek SEY ile tasarımı, mıknatıs optimizasyonu ve performans değerlendirmesi kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Mıknatıs içeren motorların verimlilikleri diğer motorlara göre daha yüksek olduğu bilinmektedir. Mıknatıslar, özellikle eksenel akılı motorlar gibi modern motor teknolojilerinde, yüksek güç yoğunluğu, verimlilik ve küçük boyutlu motorların üretilmesine imkân vermesi ile öne çıkmaktadır. Eksenel akılı motorlar, radyal akılı motorlardan farklı olarak manyetik akıyı rotor eksenine paralel yönlendirebildiğinden daha yüksek güç yoğunluğu elde edebilmektedir. Yüksek verimlilik, düşük hızda yüksek tork üretme, termal üstünlük ve düşük titreşim gibi avantajları da bulunur. Tek stator tek rotorlu eksenel akılı motorlar, en basit yapıda ve bu motorların en yaygın olanıdır. Bu topolojinin en büyük dezavantajı ise düzensiz manyetik çekim kuvvetleri olarak gösterilmektedir. Bu sorunları ortadan kaldırmak için çift statorlu veya çift rotorlu yapılar tercih edilmektedir. ÇS-EASM'ler, düzensiz çekimleri ve titreşimleri ortadan kaldırarak yüksek güç yoğunluğu, yüksek tork, daha iyi manyetik alan dağılımı ve dinamik performans sağlar. Bu sebeple piyasada seri üretimi yapılan Motenergy firmasına ait 3 fazlı, 100 A, 48 V bir motorun stator yapısı referans alınarak ÇS-EASM tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu motor belirli bir kullanım alanına uygulamak amacıyla tasarlanmamıştır. Fakat motor yapısında basit değişiklikler yapılarak fan ve pompa tahriki gibi çeşitli uygulamalara kolaylıkla evrilecek bir yapıya sahiptir.

Tasarımda ilk olarak motorun matematiksel modeli oluşturulmuştur. Daha sonra ANSYS programında RMXprt arayüzü ile motorun analitik olarak tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde motor parametrelerinin farklı değerlerinin çıkış parametrelerine etkisi analitik olarak çok daha hızlı görülmektedir. Analitik olarak analiz sonucunda motor hava aralığı

akı dağılımı, faz akımları, verim, giriş/çıkış gücü, güç faktörü, stator sargı değerleri (doluluk faktörü, sargı direnci, sargı indüktansı, vb.), motor parçalarına ait malzemelerin temel özellikleri elde edilebilmiştir. Bu motorun analitik olarak hesaplanan nominal çalışma değerlerinin başlıcaları hava aralığı akı yoğunluğu 0.83 T, stator akımları ortalama rms değeri 5.169 A, motor çıkış gücü 3 kW, motor verimi %93.13, zıt EMK değeri 201.7 V ve tork değeri 19.10 Nm olarak elde edilmiştir. Bu değerler matematiksel tasarım sonuçları ile yakınlık göstermiştir. Ayrıca bu analitik tasarım ile motorun 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu katı modellerinin oluşturulmasına imkân sağlamıştır.

Motorun 3 Boyutlu katı modeli matematiksel modele ve RMXprt'te analitik tasarımlara göre oluşturulmuştur. Elde edilen katı model ANSYS Electronics programı ile simüle edilmiş ve çözümlemesi gerçekleştirilmiştir. Bu çözümleme işlemi ¼ model ile gerçekleştirilmiştir. SEY ile analiz işlemlerinde kullanılan ağ sayısı analiz sonucunu ve analiz süresini doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple optimum sayıda ağ oluşturulmuş, simetri özelliği kullanılarak motorda ¼ model ile analiz edilmiştir. Çeyrek model, sistemin geometrik ve motor simetrisinden yararlanılarak eleman sayısını azaltır bu nedenle çözüm süresini de azaltmaktadır. Tasarım sürecinde TAU ağ yöntemi kullanılmıştır. ANSYS Electronics programında motor modelinde toplamda 77404 adet düğüm noktası oluşturulmuştur. Gerekli malzeme tanımları yapılarak motorun SEY ile çözümlemesi yapılmıştır. Motor ANSYS programında iki farklı şekilde yol verilebilmektedir. İlk olarak akım kaynağı ile sürülerek motorun nominal yükteki çıkış değerleri elde edilmiştir. Termal analiz ile motorun stator, rotor ve mıknatıslar arasındaki ısı dağılımı değerlendirilmiş, sıcaklık artışlarının motorun performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu şekilde 3 faz stator akımı, elektromanyetik tork, hız, verim, güç faktörü gibi motor parametreleri elde edilmiştir. Sonuçlarda elektromanyetik tork (ortalama 19 Nm) ve tork dalgalanma değerleri (%30) istenilen değerlerden farklı geldiği için motorda optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

EASM motorda tork ve tork dalgalanması değerleri mıknatıslarla doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle optimizasyon işlemi mıknatıs üzerine gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada mıknatıs embrace, mıknatıs iç çapı ve mıknatıs dış çapı değerleri optimizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Bu değerler belirli referans değerleri arasında tanımlanarak ortalama tork

değerinin 21 Nm den yüksek, tork dalgalanma değerinin ise %10'un altında olması hedeflenmiştir. Optimizasyon işlemi ANSYS programı MOGA aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde 2 hedef için 3 parametre optimize edilmiştir. Optimizasyon sonucunda ortalama elektromanyetik tork 21.40 Nm, tork dalgalanması değeri ise 0.0738 olarak elde edilmiştir. Bu değerlerin elde edildiği ölçüler, mıknatıs embrace değeri için 0.917235356, mıknatıs iç çap değeri için 80.88125000 mm ve mıknatıs dış çap değeri için 149.5324970 mm'dir.

MOGA yöntemi ile optimizasyon yapıldıktan sonra, mıknatıs ölçülerini kullanarak 3 Boyutlu bir katı model oluşturulmuştur. Bu, akım ve tork indüklenen gerilim gibi motorun temel parametrelerini belirlemek için kullanılmıştır. ÇS-EASM'nin dinamik performansına dair elde edilen sayısal sonuçlar, stator akımlarının rms değerleri sırasıyla Faz A için 5.6185 A, Faz B için 5.5711 A ve Faz C için 5.6462 A'dir. Bu küçük farklar, motorun elektriksel simetriyi koruduğunu ve manyetik devresinde bir anormallik olmadığını doğrulamaktadır. İndüklenen gerilimlerin rms değerleri de sırasıyla Faz A için 204.2664 V, Faz B için 204.3846 V ve Faz C için 203.4945 V olarak ölçülmüştür. Bu değerler arasındaki farklar da çok küçük olup, motorun manyetik devresindeki dengeyi ve rotor-stator etkileşiminin doğruluğunu göstermektedir. Üç fazlı gerilimlerin birbirlerine göre 120° faz farkıyla düzenli olarak değişmesi, motorun doğru faz uyumu ve senkron çalışmasını teyit etmektedir. Motorun tork üretimi ortalama 21.3985 Nm sabit tork değeriyle gerçekleşmiş olup, küçük dalgalanmalar gösteren grafik, motorun yük değişimlerine hızlı tepki verdiğini ve tork kaybını minimumda tuttuğunu ortaya koymaktadır. Tepe tork ile ortalama tork arasındaki küçük fark, motorun dinamik yük değişimlerinde bile yüksek bir tork üretme kapasitesine sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Bu sayısal veriler, ÇS-EASM'nin yüksek verimlilik gerektiren uygulamalarda ideal bir seçim olduğunu ve tasarımının başarılı bir şekilde yapıldığını açıkça ortaya koymaktadır.

Motorun nominal çalışma koşullarında manyetik akı yoğunluğu maksimum 2.570 Tesla, ortalama ise 1.5-1.7 Tesla arasında ölçülmüştür. Akı yoğunlukları, literatürdeki referans aralıklarıyla uyumludur. Maksimum yoğunluklar stator oluklarında ve oluk dışlarında görülmüştür. Motorun tasarımı 3 kW çıkış gücüne sahip olup, sargılarda akım yoğunluğunun 4-6 A/mm² arasında olması beklenmektedir. Bu motor için maksimum

akım yoğunluğu 6.99 A/mm^2 , ortalama ise 5.2 A/mm^2 'dir. Bu değer, motorun verimli çalışmasını ve düşük ısınmayı sağlayarak ömrünü uzatır.

Motorun nominal çalışma koşullarında istenilen sonuçlar elde edildikten sonra, tasarlanan motorun yük performansı analiz edilmiştir. Yük testi, motorun yüksüz durumundan %125 yüke kadar her yük seviyesi için ANSYS programında tekrarlanarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar Tablo 4.5'te sunulmuştur. Yapılan testlerde motor, nominal yükün %25'ten fazlasına kadar her seferinde %25'lik artışlarla yüklenmiştir. Elde edilen verilere göre, motor nominal yüke yakın çalışırken %92'nin üzerinde verim elde edilmiştir ve nominal yükte verim %92.41 olmuştur. Ayrıca, motorun güç faktörü genellikle 0.97'nin üzerinde kalmıştır.

Tasarım çalışmalarında, ÇS-EASM'nin yapısal analizi de yapılmıştır. Motorun tasarımında, rotor ile dönen shaft arasındaki tork aktarımının düzgünlüğü ve motor sabitleme noktalarının etkisi incelenmiştir. Alüminyum (Al 6061) malzeme, düşük mekanik mukavemeti olmasına rağmen ısı transferi açısından avantajlı bulunmuş, motor gövdesi için kullanılmıştır. Gerilim analizine göre, motor sabitleme noktalarında maksimum gerilim 1.51 MPa olarak hesaplanmış, bu değer malzemenin akma dayanımının oldukça altındadır (276 MPa). Yer değiştirme analizi, sabitleme noktalarındaki maksimum yer değişiminin 0.00075 mm ile çok düşük olduğunu göstermiştir. Shaftın maksimum gerilmesi 60.92 MPa , stator oluk dişlerinin maksimum gerilmesi ise 0.739 MPa 'dır; her iki değer de malzemenin akma dayanımının altındadır, bu da bileşenlerin güvenli olduğunu göstermektedir.

Shaft için maksimum yer değiştirme 0.015 mm , stator oluk dişleri için ise $0.005 \times 10^{-3} \text{ mm}$ olarak hesaplanmıştır. Her iki bileşen de beklenen deformasyon sınırları içindedir ve motor normal koşulların %50 üzerinde yüklendiğinde bile genel kararlılığına zarar vermemektedir. Shaft ve stator oluk dişleri için hesaplanan güvenlik katsayısı sırasıyla 7.13 ve 184'tür. Bu yüksek güvenlik katsayıları, motorun güvenlik standartlarını karşıladığını ve uzun süreli kullanımda güvenilir olduğunu kanıtlamaktadır. Sonuç olarak, motorun yapısal tasarımı, beklenen yük koşullarına dayanabilecek şekilde başarılı bir şekilde optimize edilmiştir.

EASM'ler yüksek verimlilik ve kompakt yapı gibi avantajlarla öne çıksa da verimli çalışabilmesi ve uzun ömürlü olabilmesi için termal analiz büyük önem taşır. Motorun içindeki sıcaklık seviyelerinin kontrol edilmesi, aşırı ısınma nedeniyle motor bileşenlerinde meydana gelebilecek hasarları önlemek için gereklidir. Özellikle mıknatıslar, yüksek sıcaklıklara duyarlı olup, aşırı ısınma durumunda manyetik özelliklerini kaybedebilir ve motor verimliliğini düşürebilir. Termal analiz ile motorun stator, rotor ve mıknatıslar arasındaki ısı dağılımı değerlendirilmiş, sıcaklık artışlarının motorun performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Yapılan analizlerde, motorun stator sargılarında 89.551°C , rotor kısmında ise 57.649°C gibi sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Bu sıcaklık seviyeleri, motorun güvenli sınırlar içinde çalıştığını göstermektedir. Mıknatıslar, ortalama 71°C sıcaklıkta çalışırken, Arnold_N42SH tipi mıknatısların demanyetizasyon başlangıç sıcaklığı olan 150°C 'nin altında kalınması sağlanarak manyetik performanslarının etkilenmemesi garantilenmiştir. Sonuçlar, motorun verimli ve güvenli çalışabilmesi için gerekli termal sınırların içinde olduğunu ve kullanılan malzemelerin yüksek sıcaklık dayanımına sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada istenilen sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma sonucunda %93 verimle çalışabilen 4 kutuplu 3,3 kW mil gücüne sahip motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tasarımı yapılan motorun ileride yapılabilecek çalışmalar için zemin oluşturulduğu düşünülmektedir. Öncelikle çift stator yapısına sahip topolojinin bu çalışmada NN tipi rotor yapısı incelenmiştir. NS yapı içinde bu çalışmalar yapılması aynı stator yapısında NN ve NS tipi rotor yapısının karşılaştırılmasına fırsat tanıyacaktır. Ayrıca eksenel akıli motorların farklı topolojileri bulunmaktadır. Farklı topolojilerle bu motorun farklı tasarımları test edilebilir. Ayrıca motor özel kullanım alanlarına göre optimize/revize edilerek mikro ölçekli çalışmalarda kullanılabilir.

KAYNAKÇA

- Alglave, E., J.Boulard. 1884. "The Electric Light". Stanford University Libraries, 458p, New York, USA.
- Amin, S., Khan, S., Hussain Bukhari, S. S. 2019. "A comprehensive review on axial flux machines and its applications". 2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies, iCoMET 2019.
- Anonim. 2022, Temmuz. "Impact of Ecodesign regulation (EC) 640/2009 on the Electric Motor market". Geliş tarihi 18 Aralık 2024, gönderen <https://cemep.eu/wp-content/uploads/2022/07/CEMEP-Motor-IE-Class-report-202207.pdf>
- Anonim. 2024a, Eylül. "2024 Yılı Elektrik Piyasası Eylül Ayı Sektör Raporu". Geliş tarihi 18 Aralık 2024, gönderen <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/4-15713/2024-yili-eylul-ayi-sektor-raporlari-yayimlanmist>
- Anonim. 2024b, Kasım 1. "Energy efficient motors". Geliş tarihi 18 Aralık 2024, gönderen <https://www.iec.ch/basecamp/energy-efficient-motors>
- Anonim. 2024c, Kasım 12. "Türkiye’de Küçük ve Orta Ölçekli İşletmelerde (KOBİ) Enerji Verimli Motorların Teşvik Edilmesi Projesi". Geliş tarihi 18 Aralık 2024, gönderen <https://www.tevmot.org.tr/tevmot/>
- Asama, J., Ikuta, A., Watanabe, S. 2022. "Stator Design for an Axial Flux PM Motor Using Straight Teeth Core with Distributed Winding". 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2022.
- Aybeniz, Y., Kamuran, N. B., Fatma Keskin, A., Atiye Hülya, O., Ahmet Yiğit, A. 2022. "IE3 Verim Sınıfındaki 5,5 kW Gücünde Asenkron Motorun IE4 Verim Sınıfına Yükseltilmesine Yönelik Tasarım İyileştirmeleri". Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (35), 133-141.
- Aydin, M., Gulec, M. 2014. "Reduction of cogging torque in double-rotor axial-flux permanent-magnet disk motors: A review of cost-effective magnet-skewing techniques with experimental verification". IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(9), 5025-5034.
- Aydin, M., Huang, S., Lipo, T. A. 2001. "Torque quality and comparison of internal and external rotor axial flux surface-magnet disc machines". IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 2, 1428-1434.

- Belkacem, L., Mustapha, H., Katia, K., Ahmed, G. 2018. "Design and Investigation of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine for electric vehicles". Proceedings - International Conference on Communications and Electrical Engineering, ICCEE 2018.
- Cavagnino, A., Lazzari, M., Profumo, F., Tenconi, A. 2001. "A comparison between the axial flux and the radial flux structures for PM synchronous motors". Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 3, 1611-1618.
- Çetin, E. 2018. "Eksenel Akıllı Sürekli Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor Tasarımı, Manyetik Analizi ve Prototip Üretimi" (Doktora Tezi). Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Çoramık, M. 2018. " Örnek Bir Analiz Üzerinden Ansys Maxwell Kullanımında Karşılaşılan Güçlüklere Detaylı Çözüm Önerileri". İçinde Uluslararası Necatibey Eğitim ve Sosyal Bilimler Araştırmaları Kongresi (UNESAK-2018) (ss. 26-28).
- Çunkaş, M., Ürkmez, A. 2013. "Çok Kriterli Bulanık Genetik Algoritma ile Dalgıç Asenkron Motorların Tasarım Optimizasyonu". Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23(3).
- De Almeida, A., Fong, J., Brunner, C. U., Werle, R., Van Werkhoven, M. 2019. "New technology trends and policy needs in energy efficient motor systems - A major opportunity for energy and carbon savings". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 115, 109384.
- Depraiter, L., Goutte, S. 2023. "The role and challenges of rare earths in the energy transition". Resources Policy, 86.
- Eker, M. 2017. "Şebeke Yolvermeli Eksenel Akıllı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı" (Doktora Tezi). Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat.
- Eker, M., Akar, M., Emeksiz, C., Dogan, Z., Fenercioglu, A. 2018. "Design of self-starting hybrid axial flux permanent magnet synchronous motor connected directly to line". Journal of Electrical Engineering and Technology, 13(5), 1917-1926.
- Ge, X. 2014. "Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles" (Master's thesis). Chalmers University Of Technology, Sweden.
- Goman, V., Oshurbekov, S., Kazakbaev, V., Prakht, V., Dmitrievskii, V. 2019. "Energy efficiency analysis of fixed-speed pump drives with various types of motors". Applied Sciences (Switzerland), 9(24).

- Gözüaçık, E., Akar, M. 2023. "Senkron Relüktans Motor Analitik Hesabı ve Tasarımı". Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 12(1), 86-100.
- Güner B. 2019. "Nadir Toprak Elementleri Üzerine Jeopolitik ve Jeoekonomik Bir Değerlendirme". Sosyal Bilimler Araştırmaları II, 279-296.
- Habib, A., Che, H. S., Abd Rahim, N., Tousizadeh, M., Sulaiman, E. 2020. "A fully coreless Multi-Stator Multi-Rotor (MSMR) AFPM generator with combination of conventional and Halbach magnet arrays". Alexandria Engineering Journal, 59(2), 589-600.
- Habib, A., Zainuria, M. A. A. M., Che, H. S., Ibrahim, A. A. 2022. "An Appreciation of using Halbach Magnets Array in Axial Flux Permanent Magnet Machines". 2022 IEEE Industrial Electronics and Applications Conference, IEACon 2022, 94-98.
- Hao, Z., Ma, Y., Wang, P., Luo, G., Chen, Y. 2022. "A Review of Axial-Flux Permanent-Magnet Motors: Topological Structures, Design, Optimization and Control Techniques". Machines 2022, Vol. 10, Page 1178, 10(12), 1178.
- Hemeida, A., Lehtikoinen, A., Rasilo, P., Vansompel, H., Belahcen, A., Arkkio, A., Sergeant, P. 2019. "A Simple and Efficient Quasi-3D Magnetic Equivalent Circuit for Surface Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machines". IEEE Transactions on Industrial Electronics, 66(11), 8318-8333.
- Huang, R., Song, Z., Zhao, H., Liu, C. 2022. "Overview of Axial-Flux Machines and Modeling Methods". IEEE Transactions on Transportation Electrification, 8(2), 2118-2132.
- Huang, S., Aydin, M., Lipo, T. A. 2001. "TORUS concept machines: Pre-prototyping design assessment for two major topologies". Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 3, 1619-1625.
- Huang, Surong, Luo, J., Leonardi, F., Lipo, T. A. 1998. "A general approach to sizing and power density equations for comparison of electrical machines". IEEE Transactions on Industry Applications, 34(1), 92-97.
- Husain, T., Hasan, I., Sozer, Y., Husain, I., Muljadi, E. 2020. "A Comprehensive Review of Permanent Magnet Transverse Flux Machines: Use in Direct-Drive Applications". IEEE Industry Applications Magazine, 26(6), 87-98.

- Husain, T., Tekgun, B., Sozer, Y., Hamdan, M. 2017. "Comparison of axial flux machine performance with different rotor and stator configurations". 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2017.
- Jenkins, C., Jones-Jackson, S., Zaher, I., Pietrini, G., Rodriguez, R., Cotton, J., Emadi, A. 2023. "Innovations in Axial Flux Permanent Magnet Motor Thermal Management for High Power Density Applications". IEEE Transactions on Transportation Electrification, 9(3), 4380-4405.
- Jurca, F., Fodorean, D. 2012. "Axial flux interior permanent magnet synchronous motor for small electric traction vehicle". SPEEDAM 2012 - 21st International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 365-368.
- Kahourzade, S., Mahmoudi, A., Ping, H. W., Uddin, M. N. 2014. "A comprehensive review of axial-flux permanent-magnet machines". Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 37(1), 19-33.
- Kampker, A., Born, H., Hartmann, S., Drexler, D., Franke, J., Baader, M., ... Pecha, U. 2024. "Comprehensive Review and Systemization of the Product Features of Axial Flux Machines". 2024 1st International Conference on Production Technologies and Systems for E-Mobility, EPTS 2024.
- Khatab, M. F. H. 2019. "Investigation of Novel Axial Flux Magnetically Geared Machine" (Doctor of Philosophy (PhD)). The University of Sheffield, UK.
- Konak, A., Coit, D. W., Smith, A. E. 2006. "Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial". Reliability Engineering & System Safety, 91(9), 992-1007.
- Korkmaz, S. A. 2010. "Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Asenkron Motorun 3 Boyutlu Analizi" (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Kwon, S. O., Kim, S. Il, Zhang, P., Hong, J. P. 2006. "Performance comparison of IPMSM with distributed and concentrated windings". Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 4, 1984-1988.
- Letelier, A. B., González, D. A., Tapia, J. J. A., Wallace, R., Valenzuela, M. A. 2007. "Cogging torque reduction in an axial flux PM machine via stator slot displacement and skewing". IEEE Transactions on Industry Applications, 43(3), 685-693.
- Liu, J., Zhou, Q. 2019. "Design and optimization of permanent magnet synchronous motor based on finite element analysis". Proceedings of the 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2019, 2055-2058.

- Liu, M., Chen, L., Sheng, X., Yang, Y., Yu, F., Li, Y., ... Ma, Q. 2023. "Dynamic simulation of life cycle environmental benefits of remanufacturing asynchronous motors to permanent magnet synchronous motors". *Journal of Cleaner Production*, 426, 138932.
- Lora, J. L., Raghuraman, B., Marques, B. R., Postariu, D. M., Pellegrino, G. 2024. "Multi-Objective Optimisation of Axial Flux Permanent Magnet Motor for Super-Car Application". 2024 International Conference on Electrical Machines, ICEM 2024.
- Mahmoudi, A., Kahourzade, S., Rahim, N. A., Hew, W. P. 2012. "Design, Analysis, and Prototyping of an Axial-Flux Permanent Magnet Motor Based on Genetic Algorithm and Finite-Element Analysis". *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(4), 1479-1492.
- Mahmoudi, A., Ping, H. W., Rahim, N. A. 2011. "A comparison between the TORUS and AFIR axial-flux permanent-magnet machine using finite element analysis". 2011 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2011, 242-247.
- Mahmoudi, A., Rahim, N. A., Hew, W. P. 2011. "An analytical complementary FEA tool for optimizing of axial-flux permanent-magnet machines". *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 37(1), 19-34.
- Mirimani, S. M., Vahedi, A., Marignetti, F. 2012. "Effect of inclined static eccentricity fault in single stator-single rotor axial flux permanent magnet machines". *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(1), 143-149.
- Mushid, F. C., Dorrell, D. G. 2017. "Review of axial flux induction motor for automotive applications". *Proceedings - 2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis, WEMDCD 2017*, 146-151.
- Nishanth, F. N. U., Van Verdegheem, J., Severson, E. L. 2023. "A Review of Axial Flux Permanent Magnet Machine Technology". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(4), 3920-3933.
- Profumo, F., Zhang, Z., Tenconi, A. 1996. "Axial flux machines drives: a new viable solution for electric cars". *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 1, 34-40.
- Rahman, K. M., Patel, N. R., Ward, T. G., Nagashima, J. M., Caricchi, F., Crescimbin, F. 2006. "Application of direct-drive wheel motor for fuel cell electric and hybrid

- electric vehicle propulsion system". IEEE Transactions on Industry Applications, 42(5), 1185-1192.
- Rhyu, S. H., Khaliq, S., Kim, R. E., Lee, K. D. 2017. "Design and analysis of axial flux permanent magnet motor for electric bicycles with hybrid stator core". 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2017.
- Saidur, R. 2010. "A review on electrical motors energy use and energy savings". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(3), 877-898.
- Sarıdağ, S., Eker, M. 2025. " Design of Double Stator Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor". Journal of New Results in Engineering and Natural Sciences, 30-46.
- Saygin, A., Aksöz, A. 2017. "Design optimization for minimizing cogging torque in axial flux permanent magnet machines". Proceedings - 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2017 and 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, ACEMP 2017, 324-329.
- Shao, L., Navaratne, R., Popescu, M., Liu, G. 2021. "Design and Construction of Axial-Flux Permanent Magnet Motors for Electric Propulsion Applications-A Review". IEEE Access, 9, 158998-159017.
- Shuaibu, I., Ho Tatt Wei, E., Kannan, R., Alhaji Samaila, Y. 2024. "Advancements in axial flux permanent magnet machines utilizing coreless technology: A systematic review". Ain Shams Engineering Journal, 15(12), 103091.
- Slutskiy, D., Aung, S. H., Basnet, S. 2022. "Comparison of Axial and Radial Flux Permanent Magnet Machines". 2022 North American Power Symposium, NAPS 2022.
- Tak, B. O., Ro, J. S. 2020. "Analysis and design of an axial flux permanent magnet motor for in-wheel system using a novel analytical method combined with a numerical method". IEEE Access, 8, 203994-204011.
- Talay, T. 2019. "Eksenel Akıllı Kalıcı Mıknatıslı Motor Tasarımı ve Yapay Sinir Ağlarıyla Optimizasyonu" (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Taran, N., Heins, G., Rallabandi, V., Patterson, D., Ionel, D. M. 2018. "Torque Production Capability of Axial Flux Machines with Single and Double Rotor Configurations". 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2018, 7336-7341.

- Wang, H., Zeng, X., Eastham, J. F., Pei, X. 2024. "Axial Flux Permanent Magnet Motor Topologies Magnetic Performance Comparison". *Energies* 2024, Vol. 17, Page 401, 17(2), 401.
- Yang, Z., Zhao, W., Liu, Y., Wang, X., Kwon, B. Il. 2020a. "Design and Optimization of Hybrid Excitation Synchronous Machine Based on Multi-objective Genetic Algorithm". 2020 IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems, SCEMS 2020, 124-129.
- Yang, Z., Zhao, W., Liu, Y., Wang, X., Kwon, B. Il. 2020b. "Design and Optimization of Hybrid Excitation Synchronous Machine Based on Multi-objective Genetic Algorithm". 2020 IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems, SCEMS 2020, 124-129.
- Zhao, J., Liu, X., Wang, S., Zheng, L. 2023. "Review of Design and Control Optimization of Axial Flux PMSM in Renewable-energy Applications". *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 36(1).
- Zhao, X., Sun, Z., Xu, Y. 2020. "Multi-Objective Optimization Design of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Genetic Algorithm". *Proceedings - 2020 2nd International Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence, MLBDBI 2020*, 405-409.
- Zöhra, B., Akar, M. 2019. "Türkiye’de verimli elektrik motorlarına geçiş süreci ve Şebeke Kalkışlı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar". *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 3(2), 236-242.