

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN YÜKSEK GÜÇ
YOĞUNLUĞUNA SAHİP DOĞRUDAN TAHRİKLİ GÖMÜLÜ
MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI VE ANALİZİ**

CELALETDİN AKGÜL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ YÜCEL ÇETİNCİVİZ

EYLÜL - 2024

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Celaletdin AKGÜL tarafından hazırlanan “**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN YÜKSEK GÜÇ YOĞUNLUĞUNA SAHİP DOĞRUDAN TAHRİKLİ GÖMÜLÜ MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI VE ANALİZİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **19.09.2024** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Yücel ÇETİNCEVİZ Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Osman ÇİÇEK Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Salih NACAR Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi	

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü	Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ	
----------------	-----------------------	-------

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Celaletdin AĞÜL

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN YÜKSEK GÜÇ YOĞUNLUĞUNA SAHİP DOĞRUDAN TAHRİKLİ GÖMÜLÜ MİKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI VE ANALİZİ

CELALETDİN AKGÜL

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ YÜCEL ÇETİNCİVİZ

Elektrikli araç teknolojisindeki gelişmeler, fosil yakıtların ulaşım ve endüstri üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, 1,4 kW gücünde ve 1100 rpm hızında çalışacak bir gömülü mıknatıslı senkron motor (GMSM) tasarım ve analizi yapılmıştır. GMSM'ler, yüksek güç faktörü, güç yoğunluğu ve tork kabiliyetleriyle elektrikli araç uygulamaları için uygun bir performans sunmaktadır. İç rotor yapısının ve rotorun içine gömülü mıknatısların kullanılması, motorun mekanik dayanımını artırarak yüksek hızlarda stabilite ve performans sağlar. Farklı oluk-kutup konfigürasyonlarının ve en-boy oranlarının motor performansına etkisi incelenmiştir. Ayrıca oluk-kutup konfigürasyonlarının vuruş momentine etkisi analiz edilmiştir. Motor boyutlandırma birçok bağımlı ve bağımsız değişken bulunduğundan ilk adımda parametrik optimizasyon ile, oluk başına iletken sayısı, stator dış kalınlığı ve stator boyunduruğunun verimliliğe etkisi araştırılmıştır. İkinci adımda ise birinci adımda belirlenen parametre değerleri sabit tutularak, diğer değişkenler için çok amaçlı genetik algoritma (ÇAGA) yöntemi kullanılarak optimizasyon yapılarak verimlilik %94 ve üzerinde elde edilmiştir. Optimizasyonu çalışmaları neticesinde farklı motor tasarımları karşılaştırılmış ve en uygun tasarım olarak 39 oluk, 10 kutuplu motor modeli belirlenmiştir. Bu tasarım sürecinde, verimlilik, güç yoğunluğu, tork yetenekleri, boyutlar ve soğutma gereksinimleri gibi kritik faktörlerin yanı sıra elektrikli araçların gereksinimlerini en iyi şekilde karşılayan motor boyutları belirlenmiştir. Belirlenen 39 oluk, 10 kutuplu motorun başlangıç tasarımı ve ÇAGA optimizasyon tasarım modelleri, sonlu elemanlar analizi (SEA) kullanılarak incelenmiştir. Bu analiz, iki boyutlu modelleme yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımından, ÇAGA optimizasyon süreci boyunca yapılan iyileştirmeler gözlemlenmiştir. SEA sonrasında belirlenen motor konfigürasyonu, istenilen değerlere yakın bir performans sergilemiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Vuruş torku, Çok amaçlı genetik algoritması, Kalıcı mıknatıslı senkron makine, En-boy oranı, Elektrikli araç

Eylül 2024, 133 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

DESIGN AND ANALYSIS OF HIGH POWER DENSITY DIRECT DRIVE INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR FOR ELECTRIC VEHICLES

CELALETDİN AKGÜL

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

SUPERVISOR:ASSIST PROF. DR. YÜCEL ÇETİNEVİZ

Advances in electric vehicle technology are critical to reducing the negative impact of fossil fuels on transportation and industry. In this context, a permanent magnet synchronous motor (PMSM) with a power of 1.4 kW and a speed of 1100 rpm has been designed and analyzed. PMSMs offer a suitable performance for electric vehicle applications with high power factor, power density and torque capabilities. Using an internal rotor structure and permanent magnets in the rotor increases the mechanical strength of the motor, providing stability and performance at high speeds. The effect of different slot-pole configurations and aspect ratios on motor performance is investigated. In addition, the effect of slot-pole configurations on the knocking torque is analyzed. Since there are many dependent and independent variables in motor sizing, in the first step, the effect of the number of conductors per slot, stator tooth thickness and stator yoke on the efficiency is investigated by parametric optimization. The parameter values determined in the first step were kept constant in the second step. Optimization was performed using the multi-objective genetic algorithm (MOGA) method for the other variables and the efficiency was obtained at 94% and above. As a result of the optimization studies, different motor designs were compared, and the 39-slot, 10-pole motor model was determined to be the most suitable design. In this design process, critical factors such as efficiency, power density, torque capabilities, dimensions and cooling requirements, and motor dimensions that best meet the requirements of electric vehicles were determined. The initial design and the finite element analysis optimization models of the 39-slot, 10-pole motor were investigated using finite element analysis. This analysis was performed by two-dimensional modeling method and the results are presented comparatively. Improvements from the initial design through the MOGA optimization process are observed. The engine configuration determined after the SEA showed a performance close to the desired values.

KEYWORDS:Cogging torque, Multi-objective genetic algorithm, Permanent magnet synchronous machine, Aspect ratio, Electric vehicle

September 2024, 133 Page

TEŞEKKÜR

Çalışma sürecimde karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmemde ve araştırma faaliyetlerim sırasında beni yönlendiren, kapsamlı bilgi birikimiyle çalışmalarına yeni perspektifler kazandıran saygıdeğer danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Yücel ÇETİNCEVİZ'e içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak tüm hayatım boyunca beni destekleyen, kararlarımı her zaman cesaretlendiren ve moral veren sevgili annem Dudu Akgül'e, babam Satılmış Akgül'e ve ablalarım Sümeyye Erdoğan ve Esra Akgül'e sonsuz şükranlarımı sunar ve teşekkür ederim.

Celaletdin AKGÜL

Kastamonu, 2024

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ANALİTİK BOYUTLANDIRMA	10
2.1 Tork ve Güç	13
2.2 Temel Boyutlandırma	14
2.3 Çıkış Eşitlikleri	14
2.3.1 DA Makina Çıkış Eşitliği	14
2.3.2 AA Makina Çıkış Eşitliği	16
2.4 Kutup Adımı	17
2.5 En-Boy Oranı	17
2.6 Stator Sargısı	18
2.7 İletken Kesiti ve Oluk Alanı	19
2.8 Stator Oluk ve Boyutu	22
2.9 Rotor ve Mıknatısın Boyutlandırılması	25
2.10 Hava Aralığı	28
2.10.1 Hava Boşluğunun Hesaplanması	29
2.10.2 Mekanik Deformasyonların Etkisi	29
2.10.3 Sabit Hava Boşluğu Değeri	29
2.11 Oluk-Kutup Konfigürasyonu ve En/Boy Oranının Performansa Etkisi	30
3. TASARIM BOYUTLARI VE GEREKÇESİ	49
3.1 Kutup-Oluk Konfigürasyonu	49
3.2 Akı Yönü	49
3.3 Stator-Rotor Konfigürasyonu	50
3.4 Alan Uyarımı	50
3.5 Mıknatıs Tipi	51
3.6 Mıknatıs Şekli	51
3.7 Sarım	52
3.8 Hız	53
3.9 Rotor	53
3.10 Stator	54
3.11 Stator Oluk	55
3.12 Nüve	55
3.13 Sargı	57
3.14 Kalıcı Mıknatıs	58
3.15 Malzeme Boyutu Ve Ağırlığı	58
3.16 Kutup-Oluk Konfigürasyonu	60

3.17	Sürekli Miknatıslı Motorlarda Kullanılan Malzemeler	61
4.	VURUNTU TORKU.....	64
5.	OPTİMİZASYON	76
5.1	Elektrik Makine Tasarım Problemi	76
5.2	Optimizasyon Metotları.....	78
5.2.1	Parametrik Analiz.....	80
5.2.2	Çok Amaçlı Genetik Algoritma	83
5.2.2.1	Çok amaçlı genetik algorithmada genetik işlemler	85
5.2.2.1.1	Seçim prosedürü	85
5.2.2.1.2	Elit koruma stratejisi	86
5.2.2.1.3	Algoritma	86
6.	SONLU ELEMENLAR ANALİZİ İLE 2D MANYETİK VE PERFORMANS ANALİZİ	101
7.	SONUÇLAR.....	122
	KAYNAKLAR	124
	ÖZGEÇMİŞ.....	133

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Stator Geometrisi	23
Şekil 2.2 Stator Oluk	24
Şekil 2.3 Stator ve Rotor Geometrisi	26
Şekil 3.1 a) Eksenel akılı ve b) Radyal akılı	50
Şekil 3.2 a) YKM makinesi ve b) GKM makinesi.....	51
Şekil 3.3 a) Dağıtılmış sargılar ve b) Çift katmanlı yoğunlaştırılmış sargılar	52
Şekil 3.4 35JN270'in BH Eğrisi	56
Şekil 3.5 Başlangıç tasarım aşamasında belirlenen makineler	60
Şekil 4.1 Vuruntu tork üretimi: manyetik olarak kararlı pozisyon	65
Şekil 4.2 Vuruntu tork üretimi: manyetik olarak kararsız pozisyon	66
Şekil 4.3 39 oluk ve farklı kutup sayısının vuruntu torkuna etkisi	70
Şekil 4.4 36 oluk ve farklı kutup sayısının vuruntu torkuna etkisi	71
Şekil 4.5 27 oluk ve farklı kutup sayısının vuruntu torkuna etkisi	72
Şekil 4.6 Farklı oluk ve kutup sayısının vuruntu torkuna etkisi	73
Şekil 5.1 Klasik tasarım akış şeması	78
Şekil 5.2 Optimal tasarım akış şeması	79
Şekil 5.3 Farklı oluk-kutup konfigürasyonlarının oluk başına iletken sayısının parametrik analizi	81
Şekil 5.4 Farklı oluk-kutup konfigürasyonlarının stator dış kalınlıklarının parametrik analizi	81
Şekil 5.5 Farklı oluk-kutup konfigürasyonlarının stator boyunduruğunun parametrik analizi	81
Şekil 5.6 GA'da birleşik uygunluk fonksiyonu ile arama yönü	84
Şekil 5.7 VDGA'daki arama yönleri	84
Şekil 5.8 Çok Amaçlı Genetik Algoritmada (ÇAGA) aramanın yönleri	85
Şekil 5.9 Çok amaçlı genetik algoritmaların (ÇAGA) blok diyagramı	87
Şekil 5.10 ÇAGA optimizasyon sonuçları: a) 36 oluk 6 kutuplu verimlilik – iterasyon, b) 36 oluk 6 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk, c) 27 oluk 8 kutuplu verimlilik – iterasyon, d) 27 oluk 8 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk, e) 36 oluk 8 kutuplu verimlilik – iterasyon, f) 36 oluk 8 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk, g) 39 oluk 8 kutuplu verimlilik – iterasyon, h) 39 oluk 8 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk, i) 33 oluk 10 kutuplu verimlilik – iterasyon, j) 33 oluk 10 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk, k) 36 oluk 10 kutuplu verimlilik – iterasyon, l) 36 oluk 10 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk, m) 39 oluk 10 kutuplu verimlilik – iterasyon, n) 39 oluk 10 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk, o) 36 oluk 12 kutuplu verimlilik – iterasyon, p) 36 oluk 12 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk.....	97
Şekil 6.1 Son tasarım modeli	103
Şekil 6.2 Modelleme süreci.....	105
Şekil 6.3 a) Başlangıç tasarımının akı yoğunluğu ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımı akı yoğunluğu	107

Şekil 6.4	a) Başlangıç tasarımının akı yolu ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımının akı yolu.....	109
Şekil 6.5	a) Başlangıç tasarımının hava aralığı akı yoğunluğu ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımının hava aralığı akı yoğunluğu.....	111
Şekil 6.6	a) Başlangıç tasarımının stator akımları ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımının stator akımları.....	112
Şekil 6.7	a) Başlangıç tasarımının moment grafiği ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımının moment grafiği.....	114
Şekil 6.8	a) Başlangıç tasarımının d-q eksen akıları ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımının d-q eksen akıları	115
Şekil 6.9	a) Başlangıç tasarımının d-q endüktansları ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımının d-q endüktansları.....	117
Şekil 6.10	a) Başlangıç tasarımının d-q akımları ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımının d-q akımları	118
Şekil 6.11	a) Başlangıç tasarımının FFT moment ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımı FFT moment.....	119
Şekil 6.12	a) Başlangıç tasarımının FFT akımlar ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımı FFT akımlar.....	120

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Farklı standart elektrik makineleri için izin verilen etkin J ve A değerleri	20
Tablo 2.2 Farklı standart elektrik makineleri için izin verilen akı yoğunlukları	22
Tablo 2.3 Hesaplanan başlangıç 6 kutuplu ve 18 ile 27 oluk sayısının RMxprt değerleri.....	32
Tablo 2.4 Hesaplanan başlangıç 6 kutuplu ve 39 ile 36 oluk sayısının RMxprt değerleri.....	33
Tablo 2.5 Hesaplanan başlangıç 8 kutuplu ve 27 ile 30 oluk sayısının RMxprt değerleri.....	34
Tablo 2.6 Hesaplanan başlangıç 8 kutuplu ve 36 ile 39 oluk sayısının RMxprt değerleri.....	35
Tablo 2.7 Hesaplanan başlangıç 10 kutuplu ve 30 ile 33 oluk sayısının RMxprt değerleri.....	36
Tablo 2.8 Hesaplanan başlangıç 10 kutuplu ve 36 ile 39 oluk sayısının RMxprt değerleri.....	37
Tablo 2.9 Hesaplanan başlangıç 12 kutuplu ve 36 ile 45 oluk sayısının RMxprt değerleri.....	38
Tablo 2.10 Hesaplanan başlangıç 12 kutuplu 39 oluk sayısının RMxprt değerleri ...	39
Tablo 2.11 Parametrik analiz sonrası 6 kutuplu ve 18 ile 27 oluk sayısının RMxprt değerleri.....	40
Tablo 2.12 Parametrik analiz sonrası 6 kutuplu ve 39 ile 36 oluk sayısının RMxprt değerleri	41
Tablo 2.13 Parametrik analiz sonrası 8 kutuplu ve 27 ile 30 oluk sayısının RMxprt değerleri	42
Tablo 2.14 Parametrik analiz sonrası 8 kutuplu ve 36 ile 39 oluk sayısının RMxprt değerleri	43
Tablo 2.15 Parametrik analiz sonrası 10 kutuplu ve 30 ile 33 oluk sayısının RMxprt değerleri	44
Tablo 2.16 Parametrik analiz sonrası 10 kutuplu ve 36 ile 39 oluk sayısının RMxprt değerleri	45
Tablo 2.17 Parametrik analiz sonrası 12 kutuplu ve 36 ile 45 oluk sayısının RMxprt değerleri	46
Tablo 2.18 Parametrik analiz sonrası 12 kutuplu ve 39 oluk sayısının RMxprt değerleri.....	47
Tablo 3.1 Hesaplanan başlangıç rotorların boyutları	54
Tablo 3.2 Hesaplanan başlangıç statorların boyutları	54
Tablo 3.3 Hesaplanan başlangıç stator oluklarının boyutları.....	55
Tablo 3.4 Hesaplanan başlangıç tasarımın çekirdek çelik özellikleri	56
Tablo 3.5 Hesaplanan başlangıç sargı özellikleri.....	57
Tablo 3.6 Hesaplanan başlangıç mıknatıs özellikleri.....	58
Tablo 3.7 Hesaplanan başlangıç makinelerin malzeme tüketimi.....	59
Tablo 3.8 Farklı sürekli mıknatıs malzemelerinin karşılaştırılması.....	62
Tablo 3.8 NdFeB türü mıknatısların manyetik özellikleri	63
Tablo 4.1 Teknik ve ekonomik gereksinimleri sağlayan kutup ve oluk konfigürasyonu.....	67

Tablo 4.2 Vuruntu torkunun oluk kutup konfigürasyonun sonuçları.....	69
Tablo 4.3 Farklı oluk ve kutup sayısının vuruntu torkunun tepeden tepeye ve ortalama değerleri.....	74
Tablo 5.1 Parametrik analiz sonrası parametre değişimleri	82
Tablo 5.2 KMSM'nin ana tasarım parametreleri ve aralıkları	89
Tablo 5.3 ÇAGA optimizasyonun farklı oluk ve kutup sayısının RMxprt değerleri.	99
Tablo 6.1 39S-10P model parametrenin sonuç değerleri	101
Tablo 6.2 39S-10P modelin son tasarım parametreleri.....	102



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

D_{ir}	: Rotor iç çapı
a_m	: Mıknatıs açısı
b_m	: Mıknatısın genişliği
h_{hr}	: Yarım rib radyal uzunluğu
h_{ib}	: Mıknatısın yan iç köprü uzunluğu
h_{ob}	: Mıknatısın yan dış köprü uzunluğu
A_{con}	: Stator iletken kesit alanı
A_{sl}	: Oluk alanı
B_g	: Akı yoğunluğu
B_{ort}	: Ortalama akı yoğunluğu
B_{st}	: Stator dış akı yoğunluğu
B_{sy}	: Stator boyunduruğu akı yoğunluğu
C_o	: Çıkış eşitliği
D_r	: Rotor dış çapı
I_a	: Rotor akımı
I_f	: Faz akımı
I_{ph}	: Faz akımı
I_s	: Faz akımı
K_i	: İstifleme faktörü
K_w	: Sargı faktörü
N_s	: Oluk sayısı
N_{s0}	: Oluk sayısı
N_m	: Kutup sayısı
P_{copper}	: Bakır kaybı
P_{core}	: Nüve kaybı
P_{in}	: Giriş gücü
P_{mec}	: Mekanik kayıplar
P_{out}	: Çıkış gücü
S_{in}	: Görünür güç
T_{ph}	: Faz başına seri iletken sayısı
V_{faz}	: Faz gerilimi
W_{st}	: Stator dışının genişliği
W_{sy}	: Stator boyunduruğunun uzunluğu
a_{slot}	: Elektriksel açı
b_{ps}	: Kutup adım uzunluğu
d_{ps}	: Kutup adımı radyal derinliği
h_m	: Mıknatıs kalınlığı
h_{ry}	: Rotor boyunduruğu uzunluğu
n_{cog}	: İlk vuruş torku
n_s	: Senkron hız
t_s	: Stator dış genişliği

w_{hr}	: İki mıknatıs arası mesafe
w_{ob}	: Köprü uzunluğu
z_o	: Oluk başına iletken sayısı
τ_r	: Rotor kutup adımı
φ_p	: kutup akı
φ_{st}	: Stator akı
a	: Paralel kol (yol) sayısı
B	: Tesla
VA	: Görünür güç
W	: Güç
D	: Paket çapı
E	: Faz başına indüklenen gerilim
GCD	: En büyük ortak bölen
J	: Akım yoğunluğu
L	: Paket uzunluğu
LCM	: En küçük ortak katı
P	: Kutup sayısı
S	: Görünür güç
T	: Şaft torku
Z	: Toplam iletken sayısı
ac	: Spesifik elektriksel yükleme
$b1$	: Mıknatısın yan iç köprü uzunluğu
$\cos\theta$	: Güç faktörü
f	: Frekans
$hs0$	: Dış ucu kalınlığı
$hs1$	: Oluk dış ucu kalınlığı
m	: Faz sayısı
mt	: Mıknatıs kalınlığı
mw	: Mıknatıs uzunluğu
$o1$	: Mıknatıs arası boşluk
$o2$	: Rotor boyunduruğu
rib	: İki mıknatıs arası boşluk
v	: Mıknatısın uzunluk - açısı
wa	: Faz başına sarım sayısı
Ω	: Açısal hız
δ	: Hava boşluğu
ζ	: Yan kalıcı mıknatıs açısı
η	: Verimlilik
λ	: En-boy oranı
τ_p	: Kutup adımı

Kısaltmalar

AC	: Alternatif akım
ÇAGA	: Çok amaçlı genetik algoritması
DA	: Doğru akım
EA	: Elektrikli araç
EMK	: İndüklenen Elektromotor Kuvvet
GA	: Genetik algoritması
GKM	: Gömülü kalıcı mıknatıs
GKMSM	: Gömülü kalıcı mıknatıslı senkron motor
KM	: Kalıcı mıknatıs
KMSM	: Kalıcı mıknatıslı senkron motor
NdFeB	: Neodimyum Demir Bor
RMS	: Kök ortalama kare gerilim
SEA	: Sonlu elmanlar analizi
SmCo	: Samaryum-Kobalt
VDGA	: Vektör değerlendirmeli genetik algoritması
YMKM	: Yüzeye Monte Kalıcı Mıknatıs
FTT	: Hızlı Fourier Dönüşümü

1. GİRİŞ

Fosil yakıtların ulaşım, sanayi ve enerji sektörlerinde tüketilmesinden kaynaklanan hava kirliliği önemli bir küresel çevre sorunu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sorun iklim değişikliği, artan enerji harcamaları ve fosil yakıtlara aşırı bağımlılık ile yakından bağlantılıdır. Bu sektörlerde fosil yakıtların tüketilmesi, hava kirliliğine, sera gazı emisyonlarına ve çevresel bozulmaya büyük ölçüde zarar vermektedir. Dünya çapındaki araştırmacılar ve hükümetler, fosil yakıt bağımlılığının azaltılmasına ve daha temiz alternatiflerin benimsenmesine öncelik verilmektedir (Mansyur vd., 2023).

Elektrikli araç (EA) teknolojisi, ulaşım, endüstri ve enerji üretiminde fosil yakıt tüketiminin olumsuz etkileriyle mücadele etmek için umut verici bir çözüm olarak öne çıkmıştır. Elektrikli araçlar, emisyonları azaltmak, enerji verimliliğini artırmak ve geleneksel fosil yakıtla çalışan araçlarla ilişkili çevresel etkiyi azaltmak için sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır. Elektrikli araçların geliştirilmesi ve yaygın olarak benimsenmesi, emisyonları önemli ölçüde azaltırken daha uzun sürüş menzilleri elde etmek için cazip bir fırsat sunmakta ve böylece daha temiz ve daha sürdürülebilir bir geleceğe katkıda bulunmaktadır (Abo-Khalil vd., 2022; Alanazi, 2023).

EA'lar, emisyonları azaltma potansiyeli ve geleneksel araçlara göre verimliliği artırma avantajı nedeniyle popülerlik kazanmıştır. Bir EA'nın güç aktarma organı, bataryalar ve çekiş inverteri ana bileşenler olarak öne çıkarmaktadır (Busquets-Monge vd., 2023). Motor, EA dünyasında kritik bir bileşendir ve özellikle doğrudan tahrikli motorlar, diğer motorlara göre avantajları nedeniyle tercih edilir. Mekanik bir diferansiyel ve vites kutusu gerektirmezler, bu da mekanik kayıpları ortadan kaldırır ve daha verimli hale getirmektedir (Tang vd., 2021).

EA'larda çeşitli nedenlerden dolayı elektrik motorları tercih edilmektedir. İlk olarak yüksek güç yoğunluğu sunulmaktadır. Bu da boyutlarına ve ağırlıklarına göre yüksek miktarda güç sağlayabilecekleri anlamına gelmektedir. Bu, elektrikli araçların alan veya ağırlık kısıtlamalarından ödün vermeden iyi bir performans elde etmesi açısından çok önemlidir. Elektrik motorları geniş bir tork-hız kapasitesine sahip olup, araçların

dinamik gereksinimleri için gerekli olan çeşitli hız ve yüklerde verimli bir şekilde çalışmalarına olanak tanımaktadır. Elektrikli motorları, elektrik enerjisinin yüksek bir yüzdesini mekanik enerjiye dönüştürerek elektrikli araçların genel enerji verimliliğine katkıda bulunan yüksek verimlilikleriyle bilinmektedir. Elektrik motorları daha az hareketli parçaya sahip oldukları ve daha az sıklıkta bakım gerektirdiklerinden, geleneksel içten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığında daha düşük bakım maliyetlerine sahiptir. Aracın kullanım ömrü boyunca işletme giderlerinin azalmasına yol açmaktadır. Bu faktörler toplu olarak elektrik motorlarını elektrikli araçlara güç sağlamak için tercih edilen bir seçenek haline getirmektedir (Rimpas vd., 2023). Rejeneratif frenleme özelliği sahip EA'lar, yavaşlama sırasında kinetik enerjiyi geri kazanabilir ve bunu bataryaya yeniden şarj etmek için kullanılabilir. Böylece aracın genel verimliliği sürüş ve menzili iyileştirmektedir (Doss vd., 2023; Esfahani ve Darwish, 2022; Pradhan vd., 2023). Elektrikli motorların anlık torku sayesinde elektrikli araçların daha yumuşak, daha sessiz ve daha hızlı tepki veren bir sürüş deneyimi sağladığı iddiasını desteklemektedir (Adnane vd., 2023; Adnane vd., 2024; Alanazi, 2023).

Sunulan menzilin artması ve maliyetlerdeki düşüş, elektrikli araç talebinin ve kullanımının artmasına eden olan önemli faktörlerdir. Pil teknolojisindeki bu gelişmeler elektrikli araçların popülaritesine önemli ölçüde katkıda bulundu. Pil teknolojisi geliştikçe elektrikli araçlar daha uzun sürüş menzilleri sunabilir ve daha uygun fiyatlı hale gelebilir, bu da onları tüketiciler için daha çekici hale getirebilir. Pil teknolojisindeki bu ilerleme, geleneksel fosil yakıtlı araçlarla ilgili çevresel kaygıların giderilmesinde ve elektrikli araçlar gibi daha temiz ulaşım seçeneklerinin benimsenmesini teşvik etmede hayati bir rol oynamaktadır (Hua vd., 2020; Muna ve Kuo, 2022; Pražanová vd., 2022; Yang vd., 2023).

Kalıcı mıknatıslı senkron motor (KMSM) ve EA'lar odaklanan makine tasarımı ve analizindeki son araştırmalarda önemli ilerlemeler kaydedildi. Elektrikli araçlar için KMSM'ler tasarımı, verimli ve kompakt bir tasarıma ulaşmak için elektromanyetik değerler ve boyutsal parametreler gibi çok sayıda serbest değişkenin optimize edilmesini gerektiren bir süreçtir. EA'lara yönelik KMSM tasarımında güç ve tork yoğunluğu maksimuma çıkarma, kayıplara en aza indirilmesi, analitik hesaplamalar

ve yazılım optimizasyonu, dengelemelerin dikkate alınması gereken önemli hususlardır. Elektrikli araçlar için verimli ve kompakt KMSM'lerin tasarımı, analitik hesaplamalar ve gelişmiş yazılım araçlarının bir kombinasyonu kullanılarak çok sayıda serbest değişkenin dikkatli bir şekilde optimize edilmesini gerektiren karmaşık bir iştir. Amaç, mümkün olan en düşük maliyetle istenen performansı elde etmek için kayıpları en aza indirirken güç ve tork yoğunluğunu maksimuma çıkarmaktır (Mendizabal vd., 2023; Özupak ve Çınar, 2023).

EA'ler motor türleri arasında Fırçalı DA Motorlar, Asenkron Motorlar, Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar, Anahtarlama Relüktans Motorlar ve Fırçasız DA Motorlar bulunmaktadır (Hashemnia ve Asaei, 2008; Yildirim vd., 2014). Kalıcı mıknatıslı senkron motorlar (KMSM'ler), çeşitli avantajlarından dolayı gerçekten de elektrikli araçlar için popüler bir seçimdir. KMSM'ler yüksek güç faktörüne sahiptir, bu da elektrik enerjisini verimli bir şekilde mekanik enerjiye dönüştürebilecekleri anlamına gelir. Bu yüksek güç faktörü, genel olarak yüksek verimliliğe yol açarak KMSM'leri, enerji verimliliğinin çok önemli olduğu EA uygulamaları için çok uygun hale getirir. KMSM'ler ayrıca yüksek güç yoğunluğuna sahiptir; bu da boyutlarına ve ağırlıklarına göre büyük miktarda güç üretebilecekleri anlamına gelir. Bu, alan ve ağırlık kısıtlamalarının kritik olduğu EA'lar için önemli bir husustur. KMSM'ler, EA tahrikinin yüksek tork talepleri için gerekli olan yüksek tork yetenekleriyle bilinmektedir. KMSM'lerin tork-hız özellikleri EA uygulamaları için çok uygun olabilir. KMSM yüksek güç faktörü, verimliliği, güç yoğunluğu ve tork yetenekleri, bu özelliklerin oldukça değerli olduğu EA tahrik sistemleri için popüler bir seçim haline getirmektedir (Al-Kaf vd., 2022; Lin vd., 2022; Yoon ve Lee, 2023).

Kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarımı, optimizasyonu ve analiz çalışmaları, rotorun konumuna göre iç ve dış rotor yapılarının çalışmalar gerçekleştirilmektedir. İç rotor KMSM'de rotor statorun içinde bulunurken, dış rotor KMSM'de rotor statorun dışında bulunmaktadır. Çalışmalar, elektrikli araçlar ve bisikletler gibi belirli uygulamalar için en uygun tasarımı belirlemek amacıyla mıknatıs düzenlemeleri, kutup sayısı, akım yoğunluğu vb. gibi çeşitli parametrelere sahiptir. Yüksek verimlilik, tork ve minyatürleştirme elde etmede mıknatıs kalınlığı, mıknatıs yapıları, stator sargı dönüş sayısı, dış çapın yığın uzunluğuna oranı ve girdap akımı kayıpları gibi faktörlerin

önemini vurgulamaktadır. Hem iç rotor hem de dış rotor KMSM yapılarının benzersiz avantajlara sahip olduğunu ve alan sınırlamaları ve verimlilik hedefleri gibi gereksinimlere dayalı farklı uygulamalar için uygun olduğunu göstermektedir (Boztaş vd., 2020; Cui vd., 2023; Gope ve Goel, 2021; Liu ve Zhou, 2019; Wang vd., 2022).

KMSM'ler iki tür mıknatıs yerleştirme vardır; yüzeye yerleştirme ve rotorun içine gömülü. Yüzeye monteli KMSM'lerde mıknatıslar rotorun yüzeyine konumlandırılırken, rotora gömülü KMSM'lerde mıknatıslar rotorun içine gömülmektedir (Abdelhamid vd., 2023; Yuebing vd., 2023). Yüzey yerleştirme rotor yapısında KM'den üretilen akının neredeyse tamamının hava boşluğu geçtiğini ve sızıntı akısının ihmal edilmektedir. Bu, hava boşluğunda daha dengeli ve düzgün bir akı dağılımına neden olmaktadır (Paitandi ve Sengupta, 2020). Yüzeye monte KMSM'de isteksizlik etkisinin ihmal edilecek kadar küçüktür. Bu yüzeye monte tasarımı hava boşluğu akısını bozabilecek armatür reaksiyon etkilerinin azaltıldığı anlamına gelmektedir. Yüzeye monte KMSM'deki eşit hava aralığı akı dağılımı, "sorunsuz tork üretimine" yol açmaktadır (Boztaş vd., 2020). KMSM çıkıntılı kutup rotor yapısı ile yüzeye yerleştirmeli rotor yapısı karşılaştırıldığında, yüzeye yerleştirme yapısı düşük demir kayıpları, bakır ve uyarma kayıplarının olmaması gibi avantajlar sunmaktadır. Bu, yüzeye yerleştirme rotor yapısını enerji tüketimi ve performans açısından daha verimli hale getirmektedir (Yang vd., 2023). Yüzey monte KM (kalıcı mıknatıslı) motorların, yüksek hızda çalışma ve daha büyük sabit güç bölgeleri elde etme konusunda bazı sınırları bulunmaktadır. Yüksek merkezkaç kuvvetleri yüzeye monte kalıcı mıknatıslar, üzerlerine etki eden yüksek merkezkaç kuvvetleri nedeniyle yüksek dönme hızlarında yerinden çıkma veya manyetikliğin giderilmesine karşı daha hassastır. Bu, gömülü kalıcı mıknatıslı (GKM) motorlar gibi diğer rotor tasarımlarıyla karşılaştırıldığında yüzeye monte KM motorların maksimum ulaşılabilir hızını sınırlar. Motorun belirli bir hız aralığında nispeten sabit bir çıkış gücünü koruyabildiği sabit güç bölgesi, yüzeye monte KM motorlarda GKM motorlara kıyasla tipik olarak daha küçüktür. Bunun nedeni, motorun sabit güç bölgesinde çalışmasını sağlayan akı zayıflatma yeteneğinin yüzeye monteli tasarımlarda daha sınırlı olmasıdır. Yüzeye monte KM motorlar genellikle daha doğrusal bir tork-hız karakteristiğine sahiptir ve daha yüksek hızlarda torkta daha dik bir düşüş olur. Bu, GKM motorlara kıyasla geniş sabit güç bölgesiyle yüksek hızlı çalışmayı daha zor hale

getirebilir (Du vd., 2022; Shen vd., 2022). Yüzeye monte KM motorların, bu zorlukları daha iyi çözebilecek GKM motorlar gibi diğer kalıcı mıknatıslı motor tasarımlarıyla karşılaştırıldığında yüksek hızda çalışma ve daha büyük bir sabit güç bölgesine ulaşma açısından sınırlamalara sahiptir.

Mıknatısların rotorun içine yerleştirilmesi, mıknatısların fiziksel olarak muhafaza edilmesi ve korunması nedeniyle, yüksek hızlara ulaşabilen, mekanik olarak sağlam bir rotor yapısı sağlamaktadır. Bu tasarım yaklaşımı, rotorun bütünlüğünü geliştirerek yüksek hızlarda stabilite ve performans sağlamaktadır. Rotorun içine mıknatısların yerleştirilmesiyle sağlanan koruma, özellikle mekanik stres ve kuvvetlerin önemli olduğu yüksek hızlı uygulamalarda, motorun genel dayanıklılığına ve verimliliğine katkıda bulunmaktadır (Aslan vd., 2020; Hahlbeck ve Gerling, 2008; Jaatinen vd., 2015; Jagiela vd., 2014;). GKM motorun mekanik olarak sağlam rotor yapısı, rotor çıkıntısı ve düşük etkili hava boşluğu, hem sabit tork bölgesinde hemde sabit güç bölgesinde akı zayıflamasıyla yüksek hızlara kadar çalışmasını sağlamaktadır. Bu özellikler, motorun çeşitli çalışma koşullarında çok yönlülüğüne ve verimliliğine katkıda bulunarak onu yüksek tork yoğunluğu, geniş bir hız aralığında verimlilik ve geçici aşırı yük kapasitesi gerektiren uygulamalar için uygun hale getirmektedir. GKM motorun tasarımı, özellikle yüksek tork yoğunluğu ve verimliliğin çok önemli olduğu elektrikli çekiş uygulamalarında gelişmiş performans sağlamaktadır. Modern otomotiv ve servo uygulamalarında enerji tasarruflu ve çevre dostu teknolojilere yönelik artan taleple uyumludur (Binder vd., 2023; Ding vd., 2023; Hwang vd., 2018).

GKM motorlar iki mekanizma aracılığıyla tork üretir. Birincisi manyetik tork, yüzeye monte kalıcı mıknatıslı motorlar tarafından üretilen torkun aynısıdır ve rotorun kalıcı mıknatıs alanı ile statorun elektromanyetik alanı arasındaki akı bağlantısı tarafından üretilir. GKM motorları, rotorun içine gömülü kalıcı mıknatıslara sahiptir ve bu da belirgin bir etki oluşturmaktadır. Bu çıkıntı, rotorun yüzeye monte KM motorlarda bulunmayan ek relüktans torku üretmesine olanak tanımaktadır. Manyetik ve relüktans torkunun birleşimi, GKM motorlarının yüzeye monte KM motorlara kıyasla daha yüksek toplam tork çıkışı elde etmesini sağlamaktadır. Bu, GKM motorlarını geniş bir hız aralığında yüksek tork yoğunluğu ve verimlilik gerektiren elektrikli araçlar gibi uygulamalar için çok uygun hale getirmektedir. GKM motorlarının geleneksel yüzeye

monte KM motorlara göre temel avantajları bulunmaktadır. Hem manyetik hem de relüktans torku nedeniyle daha yüksek toplam tork çıkışı elde edilmektedir. Daha düşük kalıcı mıknatıs girdap akımı kayıpları nedeniyle özellikle yüksek hızlarda daha yüksek verimlilik sağlamaktadır. Alan zayıflama kontrolü sayesinde daha yüksek hızlarda çalışabilme yeteneği göstermektedir. Kalıcı mıknatısın manyetikliğini giderme riskinin azaltması görülmektedir. Bu özellikler, GKM motorlarını günümüzde yüksek performanslı elektrikli araç çekiş uygulamaları için en uygun seçim haline getirmektedir (Akaki vd., 2013; Horvath ve Nyerges, 2022; Liu vd., 2021; Nobahari vd., 2021).

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak motor tasarımı için mıknatıs seçimi ile ilgili çalışmalarda, belirli bir hava aralığı akı yoğunluğu için seçilen mıknatıs sınıfına bağlı olarak mıknatısların maliyetlerinin ve kütlesinin önemli ölçüde değiştiği gözlenmiştir. Neodmiyum Demir Bor (NdFeB) mıknatıslar ve yumuşak çelik, rotorlarda kalıcı mıknatıs olarak yaygın olarak kullanılırken, Samarium Kobalt (SmCo) gibi nadir ve pahalı mıknatıslar, özellikle havacılık uygulamalarında, kompakt boyutlarda yüksek manyetik alan yoğunlukları için kullanılmaktadır. Mıknatıs tipi seçimi makine verimliliğini etkiler; NdFeB mıknatıslar genellikle maliyet etkinliği ve verimliliği nedeniyle tercih edilir. Kutup sayısı ve mıknatıs türleri istenilen manyetik alan şiddetine göre seçilmektedir (Arslan vd., 2023; Mei vd., 2023; Özüpak ve Çınar, 2023; Raja ve Geethalakshmi, 2022; Vasudeva ve Marwaha, 2017). Tasarım projesinde, verimliliği ve performansı optimize etmek için çeşitli rotor konfigürasyonları analiz edilerek rotor yapısı belirlenmektedir.

GKM motorlar, yüksek verimlilikleri, kompakt boyutları ve yüksek güç yoğunlukları nedeniyle elektrikli araç uygulamaları için gerçekten idealdir. Sorunsuz araç çalışması, düşük titreşim/gürültü ve yüksek sürüş konforu sağlamak için elektrikli araçlara yönelik GKM motorların belirli özelliklere sahip olması gerekir. Bunlar arasında boyut ve ağırlığın azaltılması, demir kayıplarının en aza indirilmesi, mıknatıs ve relüktans momentinin optimize edilmesi, yüksek hızlarda relüktans momentinin etkin bir şekilde kullanılması, tork dalgalanmalarının en aza indirilmesi, gömülü mıknatısların stratejik olarak yerleştirilmesi ve yönlendirilmesi, hız aralıkları boyunca optimum tork/güç

özelliklerinin sağlanması ve geniş bir sürüş aralığında verimliliğin korunması yer almaktadır (Hwang vd., 2018; Wang vd., 2011).

Doğrudan tahrikli kalıcı mıknatıslı motorların tasarımında önemli iki husus bulunmaktadır. Moment kalitesi ve maliyet en önemli faktörlerden ikisidir ancak kütle, verimlilik, ortalama tork ve performansı ve tork dalgalanması gibi parametrelerin de optimize edilmesi gerekmektedir. Harmonikler, dalgalanmaları ve tutma torku gibi istenmeyen sorunların en aza indirilmesi gerekir. Bu sorunları çözmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler stator oluğunu kaydırma, kesirli oluk/kutup konfigürasyonu, dağıtılmış sargılar, uygun mıknatıs kutup ark genişliği ve küçük oluk açılma genişliği kullanılmaktadır. Tasarım süreci, sonlu elemanlar analizi ve eşdeğer manyetik devre yöntemleri gibi teknikler kullanılarak elektromanyetik analiz, yapısal tasarım ve optimizasyonu içermektedir. Bu, tasarımcıların maliyet, performans ve diğer temel ölçümler arasındaki dengeyi kurmasına olanak tanımaktadır (Du vd., 2023; Yang vd., 2023; Yuan vd., 2019; Wu vd., 2023; Zhang vd., 2023).

KMSM tasarımında vuruş torku, motor performansı açısından kritik bir husustur. Çeşitli araştırma makaleleri, yenilikçi tasarım yöntemleri yoluyla vuruş torkunun azaltılmasına ilişkin bilgiler sunmaktadır. Yaklaşımlardan biri, doğruluğu korurken 3 Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizinin (SEA) hesaplama süresini azaltmak için transfer öğrenmeyi kullanmayı içermektedir. Başka bir yöntem, üretim belirsizliklerini göz önünde bulundurarak vuruş torkunun sağlam tasarım optimizasyonuna ve motorun vuruş torkunu verimli ve doğru bir şekilde optimize etmek için yaklaşık modellemeye odaklanmaktadır. Hız kontrol performansını artırmak için KMSM'lerdeki vuruş torkunu tahmin etmeyi ve reddetmeyi amaçlayan, vuruş torku telafisi için pozisyon bazlı tekrarlayan kontrol tork gözlemcisi önerilmektedir. Vuruş torkunu en aza indirmek için rotor şekli, mıknatıslanma performansı, oluk-kutup sayısı, stator oluk tasarımı, mıknatıs eğimi, kutup-ark katsayısı ve stator genişliği tasarım parametrelerinin optimize edilmesi KMSM'lerde vuruş torkunda önemli bir azalmaya yol açmaktadır. Bu ayarlamalar vuruş torkunun en aza indirilmesinde ve motor performansının iyileştirilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır (Ali vd., 2019; Pranjić ve Vrtić, 2024; Won vd., 2023; Wu vd., 2019; Wu vd., 2023; Zhang vd., 2023).

KMSM'ler tasarımı optimize ederken verimlilik, boyutsal kısıtlamalar, tork, soğutma, manyetik giderme, kontrol performansı ve maliyet gibi çeşitli faktörler önemli rol oynamaktadır. KMSM tasarımıdaki optimizasyon çalışmaları bu sınırlayıcı faktörleri dikkate almaktadır. Bu optimizasyon çalışmalarında Genetik Algoritma, Otomatik ayarlamalı çok gruplandırılmış parçacık sürüsü optimizasyon algoritması (AT-MGPSO), Zaman-adımlı (time-stepping), Powell algoritması, Analitik algoritma, Statik sonlu elemanlar algoritması, Parametrik algoritma, Kaos algoritması, Stokastik algoritma, Çok amaçlı genetik algoritma gibi metodolojiler aracılığıyla verimliliği, güç faktörünü ve performans parametrelerini en üst düzeye çıkarmaya odaklanmaktadır. Bu yöntemler, motor hacmini azaltmak, verimliliği en üst düzeye çıkarmak ve kalıcı mıknatıs ağırlığını en aza indirmek gibi birden fazla hedefi aynı anda dikkate alarak optimum çözümlere ulaşmayı amaçlamaktadır. Bu optimizasyon tekniklerinin ANSYS Maxwell ve ANSYS Simplerer gibi simülasyon araçlarıyla entegrasyonu, tasarım çözümlerinin deneysel sonuçlarla doğrulanmasına olanak tanıyarak optimize edilmiş KMSM tasarımları gerçekleştirmektedir (Avdeev ve Ospinov, 2019; Karaoglan ve Perin, 2022; Yadav ve Verma, 2016)

Bu çalışmada, elektrikli araç teknolojisinin ilerlemesi, fosil yakıtların ulaşım ve endüstrideki olumsuz etkileriyle mücadelede kritik bir rol oynamaktadır. Elektrikli araçlar, emisyonların azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi gibi hedefler doğrultusunda sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Bu bağlamda, elektrikli araçlara yönelik KMSM motor tasarımı gerçekleştirmiştir. KMSM'ler, yüksek güç faktörü, güç yoğunluğu ve tork yetenekleri gibi özellikleriyle elektrikli araçlar için uygun bir çalışma ve sonuç sunmaktadır. İç rotorun kullanılması ve mıknatısların rotorun içine gömülmesi, motorun mekanik dayanıklılığını artırarak yüksek hızlarda stabilite ve performans sağlamaktadır. KMSM'lerin tasarımında önemli bir faktör olan vuruş torku, rotor şekli, mıknatıslanma performansı, oluk-kutup sayısı, stator oluk tasarımı, mıknatıs eğimi, kutup-ark katsayısı ve stator genişliği gibi çeşitli yöntemlerle azaltılmaya çalışılmaktadır. Tasarım optimizasyonu sürecinde, verimlilik, boyutsal kısıtlamalar, tork, soğutma ve maliyet gibi faktörler dikkate alınarak çalışılmaktadır. Bu optimizasyon sürecinde, Çok amaçlı genetik algoritma gibi ileri matematiksel yöntemler kullanılmaktadır. Önerilen çalışmada, tasarlanacak olan GKMSM'nin veriminin yaklaşık olarak %90-95 olması

hedeflenmektedir. farklı motor tasarımlarının karşılaştırılması ve en uygun motor tasarımının gerçekleştirilmesi önemli bir odak noktası olacaktır. Farklı KMSM tasarım seçenekleri, içerdikleri özellikler ve performans metrikleri açısından titizlikle incelenecek ve değerlendirilecektir. Bu karşılaştırma süreci, tasarımın verimliliği, güç yoğunluğu, tork yetenekleri, boyutlar, soğutma gereksinimleri ve maliyet gibi kritik faktörlerin yanı sıra elektrikli araçların gereksinimlerini en iyi şekilde karşılayan tasarımı belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, en uygun motor tasarımının belirlenmesi, elektrikli araç teknolojisinin geleceğine katkı sağlayacak önemli bir adım olacaktır.



2. ANALİTİK BOYUTLANDIRMA

Elektrik makineleri tasarlarken, özellikler kalıcı mıknatıslı senkron motorları, optimal performans ve verimlilik sağlamak için birkaç önemli kriterin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu kriterler şunları içerir (Çetinceviz, 2017):

- Düşük Maliyetli Tasarım
- Yüksek Verimli Tasarım
- Dengeli Tasarım
- Yüksek Güç Yoğunluklu Tasarım
- Malzeme Seçimi
- Tasarım Metodolojisi
- Performans Analizi
- Termal Yönetim
- Üretim ve Test

Düşük verimlilik tasarım sürecinde performanstan azalma üretim maliyetlerinin azaltılması çok önemlidir. Bu, tasarım sürecini optimize etmek ve uygun takviye malzemelerini seçmekle mümkündür. Motorun enerji kaybını azaltmak ve genel performansı artırmak için en verimli şekilde tasarlanması gerekir. Bu, bakır kaybı ve rüzgar kaybı gibi hasarların en aza indirilmesi için stator, rotor ve kalıcı olarak tutulanların tasarımını en üst yolun çıkarılması mümkündür. Tasarım lisanslı, rotor hızı geniş bir hız ve yük aralığı sorunsuz ve verimli çalışma sağlamak için dengelenir. Bu, tork açıklığını, hava aralığını ve sarım konfigürasyonunu ayarlamak mümkündür. Stator, rotor ve kalıcı ömürler için kullanılan malzeme, motor çalışması ve verimlilik üzerinde önemli bir performansa sahiptir. Düşük elektrik direnci, yüksek ısıl iletkenlik ve yüksek manyetik geçirgenliğe sahip özellikler genellikle tercih edilir. Motorun koşullarının karşılamasını sağlamak için, tasarım metodolojisi olarak sistematik bir tasarım yaklaşımı esastır. Bu, uluslararası olarak ayrılmaya uygun olarak makine parçalarının ve çeşitli boyutların boyutlarının, ağırlıklarının, malzeme dosyalarının, çıkış işlemlerinin ve işleyişini içerir. Performans analizi, tasarım performanslarını standartlarını karşılayarak, tek tek ve analitik olarak çalıştırır. Bu, arıza güç faktörünü,

aşırı yük parçalarını ve bozulmaması için sonlu eleman analizini, aşınma ve diğer testleri içerir. Aşırı ısınmayı önlemek için termal yönetim tasarımı önemlidir. Aşırı ısınmanın bozulması ve arızalara neden olması mümkündür. Daha iyi malzemelerin kullanılması, soğutma sisteminin kullanılması ve optimize edilmiş tasarım biçimleri bu hedefe ulaşmak için gereklidir. Tasarım, üretim süreci ile uyumlu olmalı ve nihai ürün performans standartlarını karşılamalıdır. Bu, hesaplanan kişilerin test sonuçlarıyla karşılaştırılmasını ve gerekli düzenlemelerin yapılmasını içerir. Bu kriterler ve faktörler göz önünde bulundurularak, belirtilen teknik spesifikasyonları karşılayan ve farklı uygulamalarda verimli bir şekilde çalışan yüksek performanslı KMSM'ler tasarlamak ve dağıtmak mümkündür (Çetinceviz, 2017).

Elektrik makinelerinin tasarımı, genellikle ilk boyutlandırmadan ziyade analiz çalışmaları için kullanılmaktadır. Yüksek düzeyde çözümler ve seçenekler gerektirir, bu nedenle analitik programlar genellikle önce yapılır ve ardından yazılımla optimize edilmektedir.

Simülasyonlar, verimli bir elektrik motoru tasarlamak için yeterli olmayabilir ve hatta beklenmedik sonuçlar doğurabilir. Sonuç olarak, en iyi tasarımı garanti etmek için analitik hesaplamalar manyetik simülasyonlarla birlikte dikkatli bir şekilde yapılmaktadır.

Elektrikli makinelerin tasarımı ve hesaplanması, üretim teknolojisi ve kalite standartlarıyla yakın bir bağlantıya sahiptir. Elektrikli makine tasarım sürecinin çeşitli adımları için birçok farklı hesaplama ve tasarım yazılımı ürünü mevcuttur. SEA programları, manyetik akı, yoğunluk dağılımı ve tork gibi faktörleri analiz etmek için yaygın olarak kullanılır. Tasarımı daha da iyileştirmek için çok amaçlı optimizasyon yöntemleri uygulanabilir.

Simülasyon yazılımı değerli olsa da, verimli ve üretilebilir bir elektrikli makine tasarımına ulaşmak için yinelemeli bir analitik hesaplamalar, manyetik simülasyonlar ve optimizasyon süreci gereklidir. Bu süreç boyunca tasarımcının uzmanlığı kritik öneme sahiptir.

Dönen bir elektrik makinasının tasarımına, bazı temel özellikleri tanımlayarak başlanabilir, bunların en önemlileri şunlardır (Pyrhonen vd., 2013):

- Makine tipi (Senkron, Asenkron, DA, Relüktans Makine vb.),
- Yapısı (harici kutuplu, dahili kutuplu, eksenel veya radyal akılı vb.),
- Nominal güç,
- Elektrik motorları için mil çıkış gücü (W),
- Senkron motorlar için güç faktörü,
- AA ve DA generatörleri için çıkış gücü (W),
- Senkron generatörler için görünür güç (VA) ve güç faktörü,
- Nominal hız ve açısal hız,
- Makinanın kutup çifti sayısı,
- Anma gerilimi,
- Faz sayısı,
- Makinanın muhafaza sınıfı ve yapısı,
- Verimlilik gibi ek bilgiler,
- Makine tasarımında uygulanan standartlar,
- Maliyeti,
- Üretilebilirliği.

Elektrik makinaları tasarımında önemli serbest parametreler vardır. Tasarımda optimal çözüm amaçlandığında, bu serbest parametrelerin bazıları bir şekilde sınırlandırılmadıkça, çözüm son derece karmaşık hale gelmektedir. Birçok serbest parametre nadiren değişir, bu yüzden çözümü basitleştirmek için bu parametreler sabit alınır. Serbest parametreler aşağıdaki gibi verilebilir (Pyrhonen vd., 2013):

- Stator gövdesinin dış çapı (IEC-(International Electrical Commission) standartlarına göre bu parametre genellikle belirli değerlere sabitlenir),
- Stator gövde uzunluğu,
- Stator oluk genişliği,
- Stator oluk yüksekliği,
- Hava aralığı çapı,
- Hava aralığı uzunluğu,

- Hava aralığı akı yoğunluğunun tepe değeri,
- Çift kutup sayısı ve frekans,
- Rotor oluk genişliği ve yüksekliği,

2.1 Tork ve Güç

Mekanik çıkış gücü P_{out} 'un bir fonksiyonu olarak şaft torku T , denklem 2.1'de ifade edilmektedir (Ammar ve A. O. M. O., 2022).

$$T = \frac{P_{out}}{\Omega} = \frac{P_{out}}{2\pi*n} \quad (2.1)$$

Burada $\Omega = 2\pi*n$ açısal hızdır ve n devir/s cinsinden dönüş hızıdır. Elektrik makinelerdeki enerji kayıpları ısı üretir, çevreye zarar verir ve daha fazla giriş enerjisi gerektiğinden maliyete neden olmaktadır. Transformatörde kayıplar elektriksel nitelikte olup bakır (sargı) P_{copper} ve nüve (manyetik) P_{core} , kayıplar şeklinde meydana gelmektedir. Elektrikli makineler mekanik kayıplar P_{mec} . Bir elektrik makinesinin güç verimliliği η , çıkış/giriş gücü olarak tanımlanmaktadır (Ion ve Syed, 2010).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out}+P_{cos}+P_{iron}+P_{core}+P_s+P_{mec}} \quad (2.2)$$

Elektrik makine tasarımında temel boyutlandırma öncesi önemli bir adım, giriş görünür gücün hesaplanmasıdır. Giriş görünür güç (S), denklem 2.3'te gösterilmektedir (Ammar ve A. O. M. O., 2022).

$$S_{in} = \frac{P_{out}}{(\cos(\varphi))} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'te istenen çıkış aktif gücü, verimlilik ve güç faktörüne bağlı olarak bir asenkron makine için gerekli giriş görünür gücünü hesaplamak için kullanılmaktadır. Görünür güç, kaynaktan çekilen toplam gücü ifade eder ve hem aktif gücü (gerçek güç) hem de reaktif gücü içerir. Bu tür hesaplamalar, elektrik makinelerinin performansını optimize etmek ve güç tüketimini minimize etmek açısından kritik öneme sahiptir.

2.2 Temel Boyutlandırma

Toplam manyetik yükleme, bir makinenin hava aralığındaki toplam manyetik akıdır. Spesifik manyetik yükleme, makinanın hava aralığındaki ortalama akı yoğunluğunu ifade etmektedir. Bunun bir sonucu olarak, denklem (2.4) ve (2.5) ile gösterilmektedir (Gürdal, 2001).

$$\text{Toplam manyetik yükleme} = p * \varphi \text{ Wb} \quad (2.4)$$

$$B_{ort} = \frac{p * \varphi}{\pi * D * L} \text{ T} \quad (2.5)$$

Toplam elektriksel yükleme, rotor veya stator etrafındaki amper-iletkenlerin toplamıdır. Spesifik elektriksel yükleme (ac), a = amper, c = kondüktör veya iletkenin kısaltılmışı, hava aralığında rotor (veya stator) çevresinin metre başına amper iletkeninin sayısını ifade eder. Buna göre, aşağıdaki denklemde (2.6) ve (2.7) verilmiştir (Gürdal, 2001).

$$\text{Toplam elektriksel yükleme} = I_f * Z \text{ amper – iletken} \quad (2.6)$$

$$ac = \frac{I_f * Z}{\pi * D} \quad (2.7)$$

Elektrik makinalarının tasarımındaki ilk adım, D^2L çarpımının elde edilmesidir. Bu çarpım, makinanın hacmi ile orantılı olarak belirli yükleme değerlerini seçmektedir.

2.3 Çıkış Eşitlikleri

Çıkış eşitliği, makinenin çıkışı ile temel boyutları, hızı ve spesifik manyetik ve elektriksel yüklemeleri arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir.

2.3.1 DA Makina Çıkış Eşitliği

DA makinanın rotorundan gelen mekaniksel güç P_{out} , aşağıda olduğu gibi DA makinada üretilen zıt emk, rotor akımından I_a elde edilmektedir . Denklem 2.8’de makinanın mekaniksel gücü verilmektedir (Gürdal, 2001).

$$P_{out} = \left(\frac{p}{a} * \varphi * Z * n \right) (I_a) \times 10^{-3} \text{ kW} \quad (2.8)$$

İletken faz akımı, I_f 'nin I_a/a 'ya eşit olduğu dikkate alınarak denklem 2.9'da aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir (Gürdal, 2001):

$$P_{out} = (p * \varphi)(I_f * Z) * n * 10^{-3} \quad (2.9)$$

Denklem 2.4'teki $(p * \varphi)$ terimi toplam manyetik yükleme $(I_f * Z)$ terimi toplam elektriksel yüklemedir. Böylece, DA makinesinin çıkışı, toplam manyetik ve elektriksel yüklemelerin çarpımı ile orantılıdır. Bu, AA makineleri için de geçerlidir (Gürdal, 2001).

Denklem 2.9'da spesifik yüklemeler kullanılarak, böylece demir ve bakır gibi aktif malzemelerin kullanıldığı tasarımlar için çıkış eşitliği uygulanabilir. Bir makinenin toplam manyetik yükünün mutlak değerini hesaplamak için kullanılan demir parçaları hakkında hiçbir bilgi sağlamamaktadır. Makinenin demir parçalarında maksimum akı yoğunluğunun bir değeri ise kullanılan malzemenin doyma akı yoğunluğu ile kolaylıkla ilişkilendirilebilir. Bu, malzemedan yararlanıldığının bir göstergesidir.

Denklem (2.5) ve (2.7) sırasıyla $(p * \varphi)$ ve $(I_f * Z)$ 'nin değerleri $(P_{out} = (p * \varphi)(I_f * Z) * n * 10^{-3})$ eşitliğinde yerine konularak aşağıda denklem (2.10) ve (2.12) elde edilir (Gürdal, 2001):

$$P_{out} = (\pi * D * L * B_{ort})(\pi * D * ac) * n * 10^{-3} \text{ kW} \quad (2.10)$$

$$P_{out} = (\pi^2 * B_{ort} * ac * 10^{-3}) * D^2 * L * n \text{ kW} \quad (2.11)$$

$$P_{out} = (C_o) * D^2 * L * n \quad (2.12)$$

Bu denklemlerden C_o aşağıdaki gibi yazılabilir ve DA makinanın çıkış katsayısı olarak bilinir.

$$C_o = \pi^2 * B_{ort} * ac * 10^{-3} \quad (2.13)$$

DA makinesinin çıkış eşitliği Denklem 2.12'de verilmektedir. Başlangıçta, büyük makinaların demir ve mekanik kayıpları çok küçük olduğundan, rotorda oluşan gücün makinenin anma gücü ile karıştırılmamalıdır (Gürdal, 2001).

2.3.2 AA Makina Çıkış Eşitliği

Denklem 2.14 faz başına bir devresi olan m fazlı bir makinayı dikkate alarak armatür tarafından geliştirilen kVA, S aşağıda olduğu gibi indüklenen emk, E_{ph} ve faz akımı, I_{ph} 'den elde edilebilir (Gürdal, 2001):

$$S = m * (\sqrt{2} * f * \varphi * T_{ph} * K_w) * (I_{ph}) * 10^{-3} \text{ kVA} \quad (2.14)$$

$f = pn_s/2$, I_{ph} faz başına sadece bir devre olduğundan ve $Z=2*m*T_{ph}$ olduğuna dikkat ederek denklem 2.14'teki aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir (Gürdal, 2001):

$$S = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} * (p * \varphi) * (I_f * Z) * n_s * K_w * 10^{-3} \quad (2.15)$$

Denklem (2.5) ve (2.7) $(p * \varphi)$ ve $(I_f * Z)$ değerlerinin (2.15) eşitliğinde yerine konulması ile aşağıdaki denklem (2.16) ve (2.18) elde edilir (Gürdal, 2001).

$$S = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} * (\pi * D * L * B_{ort}) * (\pi * D * ac) * n_s * K_w * 10^{-3} \quad (2.16)$$

$$S = (1,11 * \pi^2 * B_{ort} * K_w * ac * 10^{-3}) * D^2 * L * n_s \quad (2.17)$$

$$S = (C_o) * D^2 * L * n_s \quad (2.18)$$

Denklem (2.18) AA makinanın çıkış eşitliğidir ve aşağıdaki C_o eşitliği ise çıkış katsayısı olarak bilinir (Ammar ve A. O. M. O., 2022; Gürdal, 2001).

$$C_o = 1,11 * \pi^2 * B_{ort} * ac * 10^{-3} \quad (2.19)$$

D^2L 'nin değeri sırasıyla DA ve AA makinalar için (denklem= $P_{out} = (C_o) * D^2 * L * n$) ve (denklem = $Q = (C_o) * D^2 * L * n_s$) denklemleri kullanılarak hesaplanabilir. Hesaplamadaki diğer adım bu çarpımın D ve L bileşenlerine ayrılmaktadır.

Yukarıda gösterildiği gibi hem spesifik elektriksel yükleme ve hem de çıkış katsayısı hava aralığı çapının (D) kare kökü ile orantılıdır. Bundan dolayı çoğu durumlarda bariz avantajlar büyük çap ve küçük nüve uzunluğu tasarımıyla gerçekleşmektedir. Çap artarken kutup adımının artmaktadır. L/D oranının bir değerinin aşağısında, açıkça uç bölge direnci, kayıplar, manyetik akı ve soğutma gereksiniminin büyük çaplı tasarımın avantajını dengelediği bir sınır bulunmaktadır.

2.4 Kutup Adımı

KMSM tasarımındaki kutup adımı formülü, bir KMSM'nin rotorundaki iki bitişik kutbun merkezleri arasındaki mesafe olan kutup adımı hesaplamak için kullanılır. Denklem 2.20'de şekilde verilir (Boldea ve Tutelea, 2009; Gieras vd., 2009; Gürdal, 2001; Ion ve Syed, 2010, Soleimanı ve Gholamian, 2013):

$$\tau_p = \pi * \frac{D}{p} \quad (2.20)$$

Burada τ kutup adımı, p kutup çifti sayısı ve D rotorun çapıdır. Bu denklem 2.20'deki, makinenin performansını ve verimliliğini etkileyen bir KMSM'deki rotor kutuplarının boyutunu ve aralığını belirlemek için kullanılır. Mıknatısların boyutlandırılması için, kutup aralığı ve motorun kesit geometrisine dayalı mıknatıs kalınlığı ve genişliğinin hesaplanması da dahil olmak üzere analitik bir model sunmaktadır.

2.5 En-Boy Oranı

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarımında en boy çok önemli bir rol oynar. λ olarak gösterilen yığın en-boy oranı, uygun değer motor performansı için belirli bir aralığı düşmesi gereken önemli bir parametredir. İki kutup çiftine sahip bir KMSM için, verimli çalışmayı ve istenen motor özelliklerini sağlamak için yığın en boy oranı olarak 0,6 ila 3 arasında olmalıdır. Bu en boy oranı, motorun verimliliğini, torkunu ve genel performansını etkileyen önemli bir tasarım hususudur. Denklem 2.21'de en boy oranı verilmektedir (Ion ve Syed, 2010).

$$\lambda = \frac{L}{\tau_p} \quad (2.21)$$

λ değerini 0,6 ila 3 arasında değer verildiğinde D ve L 'nin birbirine olan oranları bulunmaktadır.

2.6 Stator Sargısı

Faraday'ın indüksiyon yasasına göre, bir elektrik makinesinin hava aralığı geri emk'sı, hava aralığı akı yoğunluğunun yayılan temel bileşeninin bir sonucu olarak makinenin mıknatıslama endüktansı L_m 'de indüklenir. Uzamsal bir boşluk nedeniyle, geçirgenlik harmonikleri sargının temel frekansında emk bileşenlerini indüklemektedir. Hava aralığı kaçak endüktansı (yani harmonik kaçak endüktans bileşenleri) bunu dikkate almaktadır. Faz başına akı yoğunluğu v harmoniği tarafından indüklenen emk E_v , faradayın indüksiyon yasası uygulanarak ve makinenin geometrisi dikkate alınarak elde edilir (Pyrhonen, 2013).

Dağıtılmış stator sargısı hemen hemen sinüsoidal hava-aralığı akı dalga biçimi meydana getirdiğinden indüksiyon motorlarının akı dağılımı sinüs dalgası şeklinde alınabilmektedir. Stator sargısında indüklenen gerilim denklem 2.22'deki ile ifade edilmektedir (Kartal ve Arabul, 2022).

$$E = 4,44 * f * \varphi * wa * Kw \quad (2.22)$$

Burada, E faz başına indüklenen gerilim, f kaynak frekansı, φ kutup başına akı (Wb), wa faz başına sarım sayısı, Kw sarım faktörüdür.

Kutup başına akı aşağıdaki gibi hava-aralığı ortalama akı yoğunluğu (B_g), kutup adımı τ_p ve net nüve demir uzunluğu ile belirlenebilir (Kartal ve Arabul, 2022):

$$\varphi = \frac{2}{\pi} * B_g * \tau_p * L \quad (2.23)$$

Faz başına stator sarım sayısı denklem 2.24'teki gibi bulunur (Soleimani ve Gholamian, 2013):

$$wa = \frac{E}{4,44 * f * \varphi * Kw} \quad (2.24)$$

Toplam iletken sayısı üç fazlı (m) motorlar için denklem 2.25'teki gibi bulunur (Soleimani ve Gholamian, 2013):

$$Z = 2 * m * wa \quad (2.25)$$

Oluk başına iletken sayısı denklem 2.26'daki gibi bulunur (Soleimani ve Gholamian, 2013):

$$z_o = \frac{Z}{N_s} \quad (2.26)$$

Burada, z_o oluk başına iletken sayısı, Z toplam iletken sayısı, N_s stator oluk sayısı.

2.7 İletken Kesiti ve Oluk Alanı

Elektrik makineleri tasarımında kullanılan oluk boyutlarını hesaplarırken dikkate alınması gereken iki husus bulunmaktadır. İlk olarak, oluğun içindeki dönüşler için gereken alanın hesaplanmasında boşluk miktarı önemlidir. İkinci olarak, iletkenlerin şeklinden kaynaklanan boşlukları telafi etmek için doluluk faktörünün eklenmesi gerekmektedir. Bu faktörlerin yanı sıra, tek bir iletken için gerekli olan alanın, seçilen akım yoğunluğuna bağlı olduğu ifade edilmektedir.

Tek bir gereken alan, seçilen akım yoğunluğu (J_s) bağlıdır. Denklem 2.28'deki (yani j formülü) gibi gösterilmektedir.

Faz akımı denklem 2.27'deki gibi elde edilir (Gürdal, 2001; Soleimani ve Gholamian, 2013).

$$I_f = \frac{P_o * 10^3}{3 * V_{faz} * \cos\theta * \eta} \quad (2.27)$$

Senkron ve asenkron motorlarda faz akımı I_s , stator faz gerilimi V_{faz} , verim η , güç faktörü $\cos\theta$ ile elde edilir.

Yüksek akım yoğunluğunun avantajlar açısından, yüksek akım yoğunluğu genellikle iletken kesitini azaltma potansiyeline sahiptir. Bu, aynı enerji miktarının daha küçük bir iletken kesiti üzerinden iletilmesini sağlar. Dolayısıyla, iletkenlerin boyutu ve ağırlığı azalır. Özellikle, taşınabilir elektronik cihazlarda ve motor sistemlerinde kullanılan iletkenlerin hafifletilmesi, performansı artırabilir ve enerji verimliliğini artırabilir. Ayrıca, daha küçük iletkenlerin kullanılması malzeme maliyetini azaltabilir, çünkü daha az malzeme gerektirirler.

Yüksek akım yoğunluğunun dezavantajları da göz ardı edilemez. Öncelikle, direnç artışıyla birlikte gelir. Yüksek akım yoğunluğu, iletkenlerdeki direnci artırarak enerji kayıplarını artırabilir. Bu, elektrik devrelerinin verimliliğini düşürebilir ve enerji israfını artırabilir. Ayrıca, bakır kayıplarının artması da bir sorun olabilir. Yüksek akım yoğunluğu, iletkenlerdeki bakır kayıplarını artırarak sistemin daha fazla ısınmasına neden olabilir. Bu, malzemelerin ömrünü kısaltabilir ve güvenilirlik sorunlarına yol açabilir. Akım yoğunluğu, elektrik devrelerinin tasarımında önemli bir rol oynamaktadır.

Tablo 2.1 Farklı standart elektrik makineleri için izin verilen etkin J ve A değerleri (Pyrhonen vd., 2013)

	Asenkron Makineler	Çıkık Kutuplu Senkron Makineler	Yalıtılmamış Kutuplu Senkron Makineler			DA Makineler
			Dolaylı Soğutma		Soğutma	
			Hava	Hidrojen		
A/kA/m	30-65	35-65	30-80	90-110	150-200	25-65
	Stator Sargı	Armatür Sargı	-	Armatür Sargı	-	Armatür Sargı
J/A/mm ²	3-8	4-6,5	3-5	4-6	7-10	4-9
	Bakır Rotor Sargı	Alan Sargı				Kutup Sargı
J/A/mm ²	3-8	2-3,5	-	-	-	2-5,5
	Alüminyum rotor Sargı	Çok Katmanlı		Alan Sargı		Dengeleyici Sargı
J/A/mm2	3-6,5	2-4	3-5	3-5	6-12	3-14
	-	Tek Katmanlı	Doğrudan su soğutma ile saha sargılarında 13-18 A/mm ² ve 250-300kA/m değerlerine ulaşılabilir			-

Her sargıdaki bakır kayıpları akım yoğunluğu değerinin karesi ile doğrudan değişir. Sıcaklık artışı verilen bir kontrüksiyon için kayıplara bağlıdır. Stator akım yoğunluğu sıcaklık artış sınırları aşılmaksızın istenilen verim elde edilecek şekilde seçilmelidir. Standar indüksiyon motorunun stator sargısındaki akım yoğunluğu görev tipine ve kullanılan vantilasyon (havalandırma) metoduna bağlı olarak 3-6,5 A/mm² arasında alınabilir. Tablo 2.1’de farklı akım yoğunluğu değerleri verilmektedir (Pyrhonen vd., 2013).

Stator üç fazlı bobin iletkeninin toplam kesiti A_{con} , nominal faz akımı I_s ve akım yoğunluğu J ifade etmektedir. Oluk başına iletken sayısı ve iletken kesit alanı bilindiğinde yaklaşık oyuk (oluk) alanı oluk boşluk faktörünün bir değerinin kabul edilmesi gerekmektedir (Pyrhonen vd., 2013; Soleimani ve Gholamian, 2013).

$$A_{con} = \frac{I_s}{J} \quad (2.28)$$

Oluk doluluk faktörü olarak da bilinen oluk doldurma faktörü, elektrikli makine tasarımında önemli husustur. İletkenlerin kesit alanının oluğun kesit alanına oranı olarak tanımlanır. Oluk doldurma faktörü, makinenin torku, akım yoğunluğu ve bakır kaybı gibi elektrikli makinenin performansının çeşitli yönlerini etkiler. Daha yüksek bir oluk doldurma faktörü genellikle daha yüksek tork ve akım yoğunluğuyla sonuçlanır, ancak aynı zamanda daha yüksek bakır kaybına ve potansiyel olarak daha düşük verimliliğe de yol açar (Pyrhonen vd., 2013).

Optimum oluk doldurma faktörü değeri, elektrikli makinenin özel tasarım gereksinimlerine ve kısıtlamalarına bağlıdır. Genel olarak 0,4 ila 0,6 arasındaki bir oluk doldurma faktörünün birçok elektrikli makine uygulaması için makul bir aralık olduğu kabul edilir. Ancak optimum oluk doldurma faktörü makinenin çalışma frekansı, oluksayısı, sarım konfigürasyonu ve istenilen performans özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Olukların dışında iletkenleri saran yalıtkan bir kısım bulunmaktadır (Meier, 2008; Pyrhonen vd., 2013).

Bu nedenle, bir oluk doldurma faktörü değerinin seçiminde yer alan ödünleşimlerin dikkatlice değerlendirilmesi ve belirli bir elektrikli makine tasarımı için en uygun

değeri belirlemek üzere ayrıntılı simülasyonlar ve analizlerin gerçekleştirilmesi önemlidir. Oluk doluluk oranının 0,4 – 0,6 için gerekli oluk alanı (A_{sl}) (Soleimani ve Gholamian, 2013; URL-1, 2024):

$$A_{sl} = \frac{A_{con} * z_o}{\text{oluk doluluk faktörü}} \quad (2.29)$$

Ayrıca sargılar oluktan çıkmasını diye oluk ağzı yalıtkan ile kapatılır. Oluk hesabında bunlarda dikkate alınmaktadır.

2.8 Stator Oluk ve Boyutu

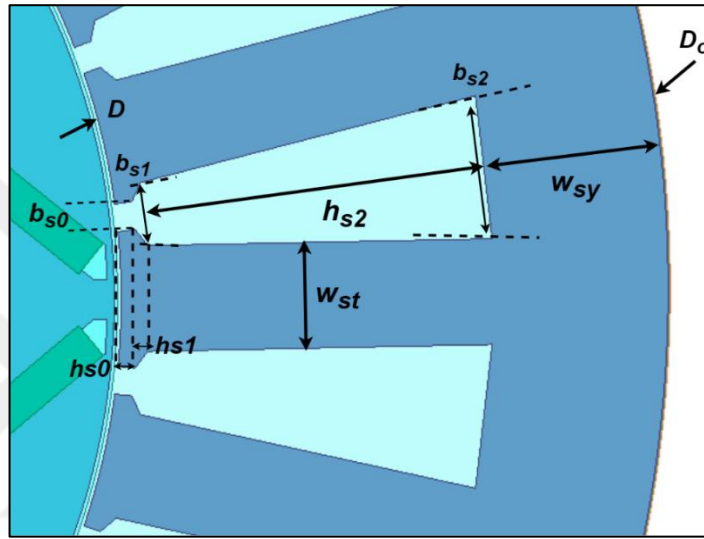
Motor tasarımında oluk ve kutup konfigürasyonu çok önemli bir husustur. Frekans kutup sayısına bağlı olduğundan, oluk ve kutup seçimi aktif parçanın ağırlığı, bakır kaybı, çekirdek kaybı ve besleme frekansı dikkate alınmaktadır. Stator oluklarının KMSM'nin stator sargısını barındırmaktadır. Oluk boyutu çekirdekteki ortalama akı yoğunluğunu etkilemektedir. Oluk boyutu, uygun kesit alanına sahip gerekli sayıda iletkenin dönüşünü karşılamaya yeterli olmalıdır (Güemes vd., 2010; Liv d., 2022; Tang vd., 2020).

Tablo 2.2 Farklı standart elektrik makineleri için izin verilen akı yoğunlukları (Pyrhonen vd., 2013)

	Asenkron Makinalar	Akı yoğunluğu B/T		
		Çıkık Kutuplu Senkron Makineler	Yalıtılmamış Kutuplu Senkron Makineler	DA Makineleri
Hava Boşluğu	0,7-0,9 (Al)	0,85-1,05	0,8-1,05	0,6-1,1 (Bmax)
Stator Boyunduruğu	1,4—1,7 (2)	1,0-1,5	1,1-1,5	1,1-1,5
Diş	1,4—2,1 (stator)	1,6-2,0	1,5-2,0	1,6-2,0
(Görünür Maksimum Değer)	1,5-2,2 (rotor)			(dengeleme sargısı) 1,8-2,2 (armatür sarımı)
Rotor Boyunduruğu	1-1,6 (1,9)	1,0-1,5	1,3-1,6	1,0-1,5
Pole Çekideği	-	1,3-1,8	1,1-1,7	1,2-1,7
Komütasyon kutupları	-	-	-	1,3

Tablo 2.2’deki sürekli mıknatıslı makineler için, günümüzde mıknatıslarının sınırlı remanans ve koersivitesi nedeniyle, senkron makineler için değişken aralığının yarısındaki değerleri seçebiliriz.

Oluk açıklığının artmasıyla vuruntu etkisi güçlenir ve stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu azaltmaktadır. Şekil 2.1’deki, stator oluklarının farklı kısımları gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Stator Geometrisi

B_{s0} iletken çapının 1,5 ila 3 katı olmalıdır ve h_{s0} genellikle stator laminasyonunun kalınlığından daha yüksek olduğu için dış ucundaki manyetik doygunluğu önleyecek kadar yüksek olmalıdır. Bir sonraki görev W_{st} ’yi (stator dışının genişliği) belirlemektir. Genişliği hesaplamak için motorun Φ_{st} (stator dışındaki akı) değeri hesaplanmaktadır. B_{st} (stator dışındaki akı yoğunluğu) değeri, doygunluğu önlemek için belli aralıklarda seçilmektedir. B_{st} değeri 1.6 T seçilmiştir (Ammar ve A. O. M. O., 2022; URL-1).

$$\varphi_{st} = \frac{\varphi_p}{2} * \sin\left(\frac{\pi * p}{N_s}\right) \quad (2.30)$$

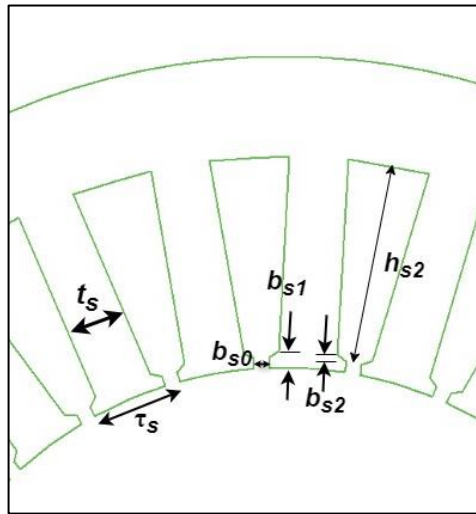
$$\varphi_{st} = B_{st} * W_{st} * L * K_i \quad (2.31)$$

Ki istifleme faktörünü ifade etmektedir. GKM motor tasarımındaki istiflenme faktörü olarak 0,8 ve 0,99 arasında değişmektedir. Stator çekirdeğinin etkin kesit alanının statorun fiziksel kesit alanına oranıdır. İstiflenme faktörü, motorun torkunu ve verimliliğini etkilediği için GKM motorların tasarımında önemli bir parametredir. İstifleme kaybı laminasyon kalınlığının karesiyle orantılı olduğundan, yüksek frekanslarda daha düşük kayıplar elde etmek için ince laminasyonlar kullanılmaktadır (Hanselman, 2023).

Stator boyunduruğunun genişliğini denklem 2.31’de gösterilmektedir. Kutup akısının yarısı her iki taraftaki boyundurukta dağıldığından ve boyunduruktaki akı yolunun uzunluğu daha fazladır. Bu nedenle B_{sy} (stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu) değeri, genellikle B_{st} ’den küçüktür (Ammar ve A. O. M. O., 2022; URL-1).

$$\varphi_p = B_{sy} * W_{sy} * L * K_i \quad (2.32)$$

Akım yoğunluğu J_s aynı zamanda mevcut derecelendirmenin belirleyici bir unsurdur. Stator oluğunun nasıl tasarlandığını belirlemektedir (Gieras, 2008). İletkenlerin olukta kapladığı alanın yanı sıra soğutma için yeterli alan da önemlidir. Bu nedenle tel ölçüsünün ve tel çevresindeki izolasyonun kalınlığının hesaplanmasına bağlı olarak soğutma için ekstra alan yaratılmasını zorunlu kılmaktadır (Gieras, 2008; Liu, 2015).



Şekil 2.2 Stator Oluk

Bir sonraki adım oluk tasarımıdır. Oluk yapısının çeşitli türleri bulunmaktadır. Oluk aralığı τ_s tanımlanabilir, burada S stator oluklarının sayısını temsil eder. Stator oluğunun detay tasarımı, oluk adımına dayalı olarak geliştirilebilir. Şekil 2.2'de stator oluk yapısı gösterilmektedir. Denklem (2.33) ve (2.38)'de gösterildiği gibi oluk boyutlarındaki değişim, verimlilik, hava aralığı akı yoğunluğu, vurutu torku, akı yolu, makine ağırlığı vb. gibi motor performansını etkilemektedir (Liu, 2015).

$$t_s \approx (0,4 - 0,6)\tau_s \quad (2.33)$$

$$hs2 \approx (3 - 7)t_s \quad (2.34)$$

$$bs = \tau_s - t_s \quad (2.35)$$

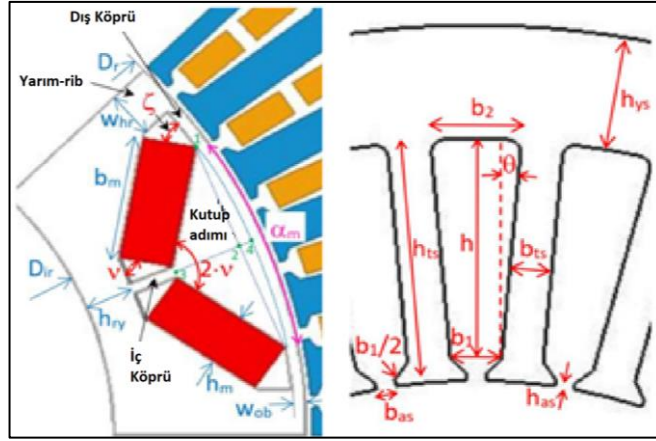
$$bs0 \approx (0,1 - 0,5)bs \quad (2.36)$$

$$bs1 \approx (0,1 - 0,5)bs \quad (2.37)$$

$$bs2 \approx (0,1 - 0,5)bs \quad (2.38)$$

2.9 Rotor ve Mıknatısın Boyutlandırılması

Elektrik makinelerinin rotor tasarımında kullanılan önemli geometrik parametreleri hesaplamak için kullanılır. Her bir parametre, rotorun farklı bileşenlerinin boyutlarını ve açılarını belirlemek için gereklidir. Bu hesaplamalar, motor performansını ve verimliliğini optimize etmek amacıyla yapılmaktadır. Şekil 2.3'te tasarım parametreleri için stator ve rotor geometrisi göstermektedir.



Şekil 2.3 Stator ve Rotor Geometrisi (Di Gerlando ve Ricca, 2022)

$h_m = 3mm$; $v = 90 > v > 59 \text{ deg}$; $w_{ob} = 0,5mm$; $w_{ib} = 2,5mm$; $w_{hr} = (0,55 * \tau_p) mm$; $h_{ry} = (1,5 * w_{hr})mm$; $a_m = 0,754 pu$ Genişlikle ilgili olarak, $w_{ib} = 5 w_{ob}$ oluşmaktadır. Bu varsayımlar doğrultusunda, rotorun diğer boyutları denklem (2.39) ve (2.49)'da gösterildiği gibi belirlenir; burada kutup adımı $\tau = \pi * D/p$ ifadesi ile tanımlanmaktadır (Di Gerlando ve Ricca, 2022).

Denklem 2.39'da kutup adımı uzunluğu verilmektedir. Rotor tasarımındaki önemli bir parametredir. a_m birim genişlik parametresidir ve τ_r ise kutup adımını temsil eder. Kutup adımı, rotorun çapı ile kutup sayısı arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Rotorun manyetik tasarımındaki kutupların düzenlenmesini etkileyerek, motorun verimliliği ve performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir.

$$b_{ps} = a_m * \tau_r \quad (2.39)$$

Denklem 2.40'da mıknatısın yan dış köprü uzunluğu verilmektedir. Rotorun geometrik yapısını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Burada w_{hr} , iki farklı mıknatıs kutbun arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. Dış köprü uzunluğu, kutup adımından, iki farklı mıknatıs kutbunun mesafesinin iki katı ve kutup adım uzunluğunun yarısını çıkararak hesaplanır. Bu hesaplama, mıknatısın doğru şekilde yerleştirilmesi ve rotorun mıknatıs alan dağılımının optimize edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

$$h_{ob} = \frac{\tau_r - 2 * w_{hr} - b_{ps}}{2} \quad (2.40)$$

Denklem 2.41’de yan KM açısı verilmektedir. Burada h_m , mıknatıs yüksekliği (mıknatıs kalınlığı) ve w_{ob} ise dış köprü genişliğini ifade etmektedir.

$$\zeta = \arccos \left[\frac{(h_{ob}(D_r - 2w_{ob})D_r^{-1})}{h_m} \right] \quad (2.41)$$

Denklem 2.42’de mıknatısın yan iç köprü uzunluğu verilmektedir. Burada v mıknatıs açısını temsil etmektedir. Mıknatıs açısının, iç köprü uzunluğu etkisi, rotor tasarımında önemli bir faktördür. İç köprü uzunluğunun doğru ayarlanması, rotorun manyetik alanının etkinliğini stabilitesini etkileyebilmektedir.

$$h_{ib} = h_m * \sin(v) \quad (2.42)$$

Denklem 2.43’te yarım rib radyal uzunluğu verilmektedir. Burada ζ , yan KM açısını temsil etmektedir.

$$h_{hr} = h_m * \sin(\zeta) \quad (2.43)$$

Denklem 2.44’te uzunluk d_{12} verilmektedir.

$$d_{12} = \left(\frac{D_r}{2} - w_{ob} \right) * \sin \left(a_m * \frac{\pi}{p} \right) \quad (2.44)$$

Denklem 2.45’te uzunluk d_{23} verilmektedir.

$$d_{23} = \left(d_{12} - \frac{w_{ib}}{2} \right) * [\tan(v)]^{-1} \quad (2.45)$$

Denklem 2.46’da uzunluk d_{24} verilmektedir.

$$d_{24} = \left(\frac{D_r}{2} - w_{ob} \right) - d_{12} * \left[\tan \left(a_m * \frac{\pi}{p} \right) \right]^{-1} \quad (2.46)$$

Kutup adımı radyal derinliği:

$$d_{ps} = d_{23} + d_{24} + w_{ob} \quad (2.47)$$

Denklem 2.48’de iç rotor verilmektedir. Burada h_{ry} radial yüksekliktir. İç rotor çapının belirlenmesi, motorun genel yapısının etkinliğini artırarak, manyetik performansını iyileştirir.

$$D_{ir} = D_r - 2 * (d_{ps} + h_{ib} + h_{ry}) \quad (2.48)$$

Denklem 2.49’da KM genişliği verilmektedir.

$$b_m = \frac{d_{12} - \frac{w_{ib}}{2}}{\sin(v)} \quad (2.49)$$

Rotor tasarımının optimize edilmesi için kritik bir öneme sahiptir ve her birinin doğru bir şekilde hesaplanması, motorun verimliliği ve performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir.

2.10 Hava Aralığı

Hava boşluğu, özellikle elektrik makineleri tasarımında ve çeşitli mühendislik uygulamalarında kritik bir parametre olarak öne çıkar. Elektrikli makinelerde hava boşluğu, rotor ile stator arasındaki mesafeyi ifade eder ve motor performansını doğrudan etkiler. Hava boşluğu, manyetik akının rotor ve stator arasında geçişini sağlar ve bu nedenle motorun verimliliği, güç yoğunluğu ve genel performansı üzerinde önemli bir rol oynar.

Elektrik motorlarında hava boşluğunun uygun şekilde tasarlanması ve hesaplanması, motorun çalışması sırasında optimum manyetik akı yoğunluğunu sağlamak için gereklidir. Çok küçük bir hava boşluğu, rotor ve statorun fiziksel olarak temas etmesine neden olabilir, bu da ciddi mekanik hasarlara yol açabilir. Öte yandan, çok büyük bir hava boşluğu, manyetik akının zayıflamasına ve motor verimliliğinin düşmesine neden olur.

Hava boşluğu, motor tipine ve uygulama alanına göre değişiklik gösterir. Bu nedenle, hava boşluğunun doğru hesaplanması ve belirlenmesi, motorun güvenilir ve verimli bir şekilde çalışması için kritik öneme sahiptir.

2.10.1 Hava Boşluğunun Hesaplanması

Hava boşluğunun hesaplanması için çeşitli formüller ve yöntemler kullanılır. Genel bir hesaplama formülü şu şekildedir (Tümbek, 2019):

$$\delta = 0,2 + 2\sqrt{DL} \quad (2.50)$$

Denklem 2.50, motorun boyutlarına bağlı olarak hava boşluğunu tahmin etmek ve manyetik tasarımı optimize etmek için kullanılır. Hava boşluğunu doğru belirlemek için çalışma koşulları, yük durumu, sıcaklık değişimleri ve mekanik deformasyonlar da dikkate alınmalıdır.

2.10.2 Mekanik Deformasyonların Etkisi

Hava boşluğunun belirlenmesinde mekanik deformasyonlar önemli bir faktördür. Motorun çalışması sırasında rotor ve stator üzerinde meydana gelen termal genleşme, mekanik titreşimler ve diğer deformasyonlar, hava boşluğunu etkileyebilir. Bu tür mekanik etkiler, rotor ve stator arasındaki mesafenin değişmesine ve dolayısıyla motor performansının olumsuz etkilenmesine neden olabilir.

Bu mekanik etkileri dikkate alarak, hava boşluğunun belirlenmesi daha güvenilir ve verimli bir motor tasarımı için gereklidir. Bu bağlamda, belirli uygulamalarda ve çalışma koşullarında hava boşluğu, yukarıdaki formülden farklı olarak belirlenebilir. Örneğin, mekanik deformasyonların etkisini minimize etmek amacıyla hava boşluğu sabit bir değer olarak alınabilir.

2.10.3 Sabit Hava Boşluğu Değeri

Yukarıda bahsedilen mekanik deformasyonlar ve diğer pratik gereklilikler göz önünde bulundurularak, bazı mühendislik uygulamalarında hava boşluğu sabit bir değer olarak belirlenir. Bu durumda, hava boşluğu için genel bir formül yerine sabit bir değer kullanılır. Özellikle, mekanik deformasyonları ve güvenlik faktörlerini dikkate alarak, hava boşluğunun 1 mm olarak belirlenmesi yaygın bir yaklaşımdır.

Bu sabit değer, motorun güvenilir ve uzun ömürlü çalışmasını sağlamak amacıyla seçilir. 1 mm'lik hava boşluğu, rotor ve stator arasındaki yeterli mesafeyi sağlayarak mekanik temas ve olası hasar riskini minimize ederken, aynı zamanda manyetik akının yeterli düzeyde geçişini sağlar.

Hava boşluğu, elektrikli makinelerin tasarımında kritik bir parametre olup, motorun performansı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Hava boşluğunun doğru bir şekilde hesaplanması ve belirlenmesi, motorun verimli ve güvenilir bir şekilde çalışması için gereklidir. Denklem 2.50'deki genel bir hesaplama formülü olan δ kullanılarak hava boşluğu tahmin edilebilir, ancak mekanik deformasyonlar ve diğer pratik gereklilikler göz önüne alındığında, hava boşluğunun sabit bir değer olarak 1 mm belirlenmesi daha uygun olabilir. Bu yaklaşım, motorun güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir.

2.11 Oluk-Kutup Konfigürasyonu ve En/Boy Oranının Performansa Etkisi

Elektrik makinelerinin tasarımında en-boy oranı (aspect ratio) nemli bir parametredir ve motorun performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. En-boy oranı arttıkça, yani motorun uzunluğu arttıkça, motorun paket uzunluğu da artar ve bu durum bakır kayıplarını etkileyebilir. Paket uzunluğunun artması, motor sargılarının toplam uzunluğunun da artmasına neden olur. Bu artışla birlikte, sargıların direnç değeri yükselir, bu da bakır kayıplarının artmasına yol açar. Artan bakır kayıpları, motorun ısınmasına ve dolayısıyla verimliliğinin düşmesine sebep olur. Bakır kayıplarının artması, aynı zamanda motorun termal yönetim sistemine de ekstra bir yük getirir. Isının etkin bir şekilde dağıtılabilmesi için soğutma mekanizmalarının daha verimli çalışması gerekmektedir. Bunun yanı sıra, motorun uzunluğunun artması, malzeme maliyetlerini ve yapısal karmaşıklığı da artırarak tasarım ve üretim süreçlerini olumsuz etkileyebilir. Bu sebeple, motor tasarımında en-boy oranının optimize edilmesi, hem performans hem de maliyet açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu parametrelerin optimize edilmesi, motorun daha verimli çalışmasını sağlarken, aynı zamanda uzun ömürlü ve güvenilir bir operasyon sunmaktadır. Tablo (2.3) ile (2.18) da hesaplanan başlangıç modellerinin ve parametrik analiz sonrası elde edilen RMxpert sonuçları verilmektedir.

Genel olarak ve parametrik analiz verilerine göre, lamda değerin artışı, motor paketinin uzunluğunun artmasına bağlı olarak verimde bir düşüşe yol açmaktadır. Bunun aksine, lamda değerin düşük olması durumunda ise verimin genellikle arttığı gözlenmiştir. Bu doğrultuda, en yüksek verimlilik seviyesinin lamda değerin 1,22 civarında olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, verimlilik optimizasyonu açısından lamda değeri 1,22 olarak seçilmiştir.

Lamda değerlerinin artması genel olarak, spesifik elektrik yüklenmesi ve akım yoğunluğunun da arttığı görülmüştür. RMXprt analiz sonuçlarına dayanarak, elde edilen veriler bu çalışmada kullanılmıştır. Analizlerde, ortak özellik olarak 36 oluklu ve 6, 8, 10 ve 12 kutuplu modeller tercih edilmiştir. Özellikle, başlık 4 altında vuruntu torkunun incelenmesi amacıyla en yüksek vuruntu torkuna sahip dört farklı oluk-kutup kombinasyonu seçilmiştir. Bu motorların seçimi, vuruntu torku, verimlilik, tork, güç ve optimizasyon gibi parametrelerin incelenmesine yönelik olarak yapılmıştır. Ayrıca, bu seçimde tam sargı ve kesirli sargı yapılarını karşılaştırma amacı da gözetilmiştir.

Kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarımında, başlangıç tasarım aşamasından sonra gerçekleştirilen parametrik analizler sonucunda, belirli tasarım parametrelerinin optimize edilmesiyle verimlilik üzerinde olumlu etkiler gözlemlenmektedir. Özellikle armatür termal yükü, spesifik elektrik yüklenmesi, akım yoğunluğu ve demir kayıpları gibi kritik parametrelerin yüksek seviyelerden düşük seviyelere indirilmesi, motorun toplam verimliliğini artırmaktadır. Bu iyileştirme, daha düşük kayıplarla çalışmayı mümkün kılarken, aynı zamanda motorun termal dengesini de olumlu yönde etkilemektedir.

Anma tork değerine bakıldığında, özellikle belirli λ (lamda) değerlerinde tork performansının da iyileştiği görülmektedir. Lamda değeri, motorun manyetik devresindeki yük paylaşımını ve manyetik akının etkinliğini etkileyen bir parametre olup, doğru optimize edildiğinde motorun tork üretim kapasitesi ve dolayısıyla genel verimliliği artmaktadır. Bu nedenle, tasarım parametrelerinin optimize edilmesi, hem elektriksel hem de manyetik kayıpların minimize edilmesine, dolayısıyla da motorun enerji dönüşüm verimliliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır.

Tablo 2.3 Hesaplanan başlangıç 6 kutuplu ve 18 ile 27 oluk sayısının R_{Mxprt} değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (6 KUTUPLU - 1400W-1100RPM)													
		Armatür Termal Yükü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A _{per_meter})	Armatür Akım Yoğunluğu (A _{per_m2})	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
$\lambda = 1$	18S-6P	270,241	43943,8	6149710	10243,9	214011	1406480	1620490	86,7935	83,9156	1100	12,2099	1,24905	1,30125	0,816374
	27S6P	191,348	36076	5304040	10470,7	149395	1395650	1545050	90,3307	69,8481	1100	12,1159	1,20353	1,29376	0,816149
$\lambda = 1,22$	18S-6P	226,506	39459,8	5740170	10993,4	178760	1393240	1572000	88,6285	77,0083	1100	12,0949	1,26798	1,28792	0,803763
	27S6P	201,496	38273,5	5264630	10623,3	147655	1390960	1538610	90,4033	69,5861	1100	12,0751	1,23792	1,28568	0,806193
$\lambda = 1,44$	18S-6P	248,31	42480,9	5845210	10926,1	184631	1412120	1596750	88,4371	77,3545	1100	12,2589	1,27523	1,28053	0,793821
	27S6P	215698	40715,4	5297710	10461,6	149401	1393990	1543390	90,3199	69,7536	1100	12,1015	1,24196	1,27258	0,795143
$\lambda = 1,66$	18S-6P	167,483	32420,1	5166020	11644,9	134488	1395710	1530200	91,211	65,8134	1100	12,1283	1,2717	1,2595	0,784487
	27S6P	188,717	34606,1	5453280	11734	114403	1390930	1531070	90,8471	65,1929	1100	12,0749	1,23743	1,26577	0,788405
$\lambda = 1,88$	18S-6P	173,313	33868,1	5176340	11729,3	135811	1397080	1532890	91,1402	65,993	1100	12,1283	1,28155	1,26704	0,776341
	27S6P	197,262	36127,9	5460100	11726,5	141453	1391080	1532530	90,77	64,1791	1100	12,0762	1,2847	1,26033	0,778691
$\lambda = 2,11$	18S-6P	268,268	41888,3	6404360	11643	188594	1397610	1586210	88,1103	73,186	1100	12,1329	1,28841	1,25776	0,768028
	27S6P	211914	38177,6	5550760	11647	146383	1407730	1554120	90,581	64,5394	1100	12,2208	1,25616	1,25147	0,770557
$\lambda = 2,33$	18S-6P	191,772	36721,1	5222390	11771,2	139605	1405680	1545290	90,9658	66,259	1100	12,203	1,30264	1,26038	0,7599584
	27S6P	213,283	38942,5	5476880	11718,4	144349	1392140	1536480	90,6053	64,2354	1100	12,0854	1,26992	1,24634	0,762694
$\lambda = 2,55$	18S-6P	289,918	44953,4	6449310	11509	193357	1399800	1593160	87,8633	73,7868	1100	12,1519	1,29857	1,24096	0,750435
	27S6P	224,092	40526,9	5529450	11577,6	147603	1401300	1548900	90,4705	64,8969	1100	12,1649	1,26961	1,23855	0,754492
$\lambda = 2,77$	18S-6P	291,734	45723,5	6380400	11292,7	190873	1388170	1579040	87,9121	74,3602	1100	12,0509	1,28705	1,23009	0,744197
	27S6P	234,521	42040,6	5578450	11281	150639	1405060	1555700	90,317	65,1904	1100	12,1976	1,25523	1,22251	0,747513
$\lambda = 3$	18S-6P	170,904	33486,2	5103710	12278	130942	1391200	1522140	91,3975	62,1853	1100	12,0773	1,28224	1,20863	0,734992
	27S6P	239,047	43017,2	5557020	10887,6	150395	1393520	1543920	90,2588	66,0983	1100	12,0974	1,24495	1,19062	0,740251

Tablo 2.4 Hesaplanan başlangıç 6 kutuplu ve 39 ile 36 oluk sayısının RMxprrt değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (6 KUTUPLU - 1400W-1100RPM)													
		Armatür Termal Yükü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A_per_meter)	Armatür Akım Yoğunluğu (A_per_m2)	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
$\lambda = 1$	39S-6P	273,446	46573,2	5871330	16764,9	198979	1410470	1609450	87,6368	76,2082	1100	12,2446	1,24135	1,31215	0,817526
	36S-6P	245,421	42624,9	5757700	10178	184342	1398010	1582350	88,3501	73,6127	1100	12,1363	1,21426	1,28379	0,812302
$\lambda = 1,22$	39S-6P	256,037	39329,7	6510020	14874,2	189867	1406960	1596830	88,1097	72,4664	1100	12,2141	1,08376	1,13253	0,783008
	36S-6P	259,156	45284,4	5722800	10075,7	181951	1401540	1583490	88,5095	74,3563	1100	12,167	1,22393	1,27566	0,801825
$\lambda = 1,44$	39S-6P	254,601	40324,4	6313810	18637	185140	1399260	1584400	88,3148	68,4412	1100	12,1473	1,23323	1,26568	0,794387
	36S-6P	269,992	47526,2	5680910	10538,6	180234	1387490	1567720	88,5034	73,8006	1100	12,045	1,26619	1,30388	0,782394
$\lambda = 1,66$	39S-6P	273,812	42719,3	6409550	19130,3	190903	1401380	1592280	88,0107	70,1665	1100	12,1656	1,24936	1,29247	0,791922
	36S-6P	249,764	39516,1	6320580	11678,6	178879	1404120	1583000	88,7	66,8424	1100	12,1894	1,23779	1,2555	0,783185
$\lambda = 1,88$	39S-6P	292,747	45104,9	6490360	18819,1	195767	1413690	1609460	87,8364	71,0135	1100	12,2725	1,25822	1,26465	0,782136
	36S-6P	262,12	41335,4	6341280	11683,5	181274	1405380	1586660	88,5751	66,9192	1100	12,2004	1,25201	1,24918	0,773727
$\lambda = 2,11$	39S-6P	304,458	46895	6492330	18806	197346	1414880	1612230	87,7594	71,2061	1100	12,2828	1,26966	1,25942	0,774935
	36S-6P	274,76	43038,6	6384030	11931	184257	1403840	1588090	88,3976	68,6203	1100	12,187	1,26857	1,26415	0,76989
$\lambda = 2,33$	39S-6P	311,946	48258,3	6464090	19046,1	197537	1392750	1590290	87,5785	73,2772	1100	12,0907	1,27867	1,27438	0,772309
	36S-6P	286,998	44725,8	6416850	11914,4	187354	1406180	1593540	88,2429	68,7613	1100	12,2073	1,27932	1,25621	0,76313
$\lambda = 2,55$	39S-6P	355,17	50793,5	6598670	17830,6	204840	1410670	1615510	87,3204	72,7882	1100	12,2463	1,24896	1,22053	0,758837
	36S-6P	300,563	46468,5	6468110	11063,7	190574	1404450	1595020	88,052	70,4613	1100	12,1923	1,23473	1,20658	0,753187
$\lambda = 2,77$	39S-6P	339,225	51815,4	6546800	17450,1	203224	1405930	1609160	87,3708	73,5051	1100	12,2052	1,2458	1,20025	0,751186
	36S-6P	312,491	48045,1	6504110	11339,3	195622	1408920	1604550	87,8082	70,7196	1100	12,2311	1,2611	1,20225	0,747682
$\lambda = 3$	39S-6P	364,428	54432,5	6695040	16824,4	212071	1412400	1624470	86,9452	74,6435	1100	12,2613	1,223	1,17939	0,743275
	36S-6P	329,219	49977,3	6587370	10252,1	199051	1402730	1601780	87,5732	73,2107	1100	12,1774	1,20048	1,14997	0,743606

Tablo 2.5 Hesaplanan başlangıç 8 kutuplu ve 27 ile 30 oluk sayısının RMxprrt değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (8 KUTUPLU - 1400W-1100RPM)													
		Armatür Termal Yükü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A_per_meter)	Armatür Akım Yoğunluğu (A_per_m2)	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
$\lambda = 1$	27S-8P	313,513	46032	6810780	11798,4	213473	1386680	1600150	86,6592	81,9335	1100	12,038	1,26862	1,26037	0,768129
	30S-8P	188,356	35054,4	5373250	12327,9	157649	1403070	1560720	89,8989	70,4314	1100	12,1803	1,2497	1,26492	0,773833
$\lambda = 1,22$	27S-8P	256,493	40266	6369950	12951,1	178630	1381450	1560080	88,55	74,4044	1100	11,9927	1,27358	1,24882	0,75669
	30S-8P	320,311	46824,4	6840690	12293,8	233492	1399840	1633330	85,7046	80,9898	1100	12,1523	1,26662	1,2514	0,761435
$\lambda = 1,44$	27S-8P	287,209	43810,2	6555760	12933,5	188229	1410410	1598640	88,2257	75,4055	1100	12,2441	1,28414	1,24144	0,745155
	30S-8P	345,321	49988,5	6908010	12334,9	236981	1406950	1643930	85,5845	81,2861	1100	12,2139	1,27943	1,24515	0,749989
$\lambda = 1,66$	27S-8P	301,596	45975,9	6559870	12401,6	188813	1393770	1582590	88,0693	76,5052	1100	12,0996	1,26452	1,20672	0,731025
	30S-8P	361,316	52366,7	6899730	12508	236495	1406130	1642620	85,6026	81,2444	1100	12,2069	1,29474	1,25008	0,739943
$\lambda = 1,88$	27S-8P	326,406	48836	6683710	12284,6	195929	1403790	1599720	87,7523	77,6551	1100	12,1865	1,26642	1,1927	0,721601
	30S-8P	193,745	35062,7	5525680	13766,7	144389	1395500	1539890	90,6234	64,4537	1100	12,1146	1,28645	1,22556	0,729612
$\lambda = 2,11$	27S-8P	349,604	51530,8	6784370	11969	201937	1401360	1603300	87,4049	79,2919	1100	12,1655	1,25631	1,16747	0,710232
	30S-8P	205,546	36821,4	5582260	13541	147204	1402530	1549730	90,5013	65,014	1100	12,1756	1,28328	1,20627	0,719321
$\lambda = 2,33$	27S-8P	337,032	44893,9	7507290	12468,9	208282	1404690	1612970	87,087	77,7	1100	12,1944	1,24021	1,05434	0,722789
	30S-8P	211,616	37986,6	5570800	12992	146829	1387510	1534340	90,4305	65,423	1100	12,0452	1,26626	1,15105	0,710954
$\lambda = 2,55$	27S-8P	331,212	45208,3	7326350	13465,5	203341	1387760	1591100	87,2201	72,582	1100	12,0474	1,19897	1,49323	0,683834
	30S-8P	397,373	51528,3	7711750	12090,4	245114	1393930	1639040	85,0453	79,4965	1100	12,1009	1,22061	1,12513	0,69687
$\lambda = 2,77$	27S-8P	351,525	47225,4	7443570	12751,8	210060	1402320	1612380	86,9721	73,973	1100	12,1738	1,237	1,1095	0,680193
	30S-8P	448,872	55532,9	8082980	11135	267218	1400250	1667470	83,9746	81,8114	1100	12,1558	1,17414	1,06898	0,68313
$\lambda = 3$	27S-8P	374,99	49434,3	7585620	11918	217775	1395780	1613550	86,5034	76,3134	1100	12,117	1,19984	1,06938	0,66819
	30S-8P	452,197	56489,6	8004970	11876,2	264840	1404780	1669620	84,1378	81,8088	1100	12,1952	1,22217	1,09498	0,68109

Tablo 2.6 Hesaplanan başlangıç 8 kutuplu ve 36 ile 39 oluk sayısının R_{Mxp}rt değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (8 KUTUPLU - 1400W-1100RPM)													
		Armatür Termal Yükü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A _{per_meter})	Armatür Akım Yoğunluğu (A _{per_m2})	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
$\lambda = 1$	36S-8P	196,395	35691	5502650	12574,3	143411	1393630	1537040	90,6697	66,1519	1100	12,0984	1,24705	1,25482	0,766337
	39S-8P	236,526	40419,9	5851700	11249,4	176929	1412770	1589690	88,8703	72,9011	1100	12,2645	1,18937	1,22008	0,752131
$\lambda = 1,22$	36S-8P	210,657	38214,8	5512460	12629,7	144058	1393800	1537860	90,6325	66,1451	1100	12,0998	1,26787	1,24389	0,751895
	39S-8P	236,388	41776,1	5658450	11861,4	166920	1389570	1556490	89,2759	71,2547	1100	12,0631	1,24312	1,23981	0,756675
$\lambda = 1,44$	36S-8P	228,841	40951,9	5588050	12252,8	147386	1402630	1550010	90,4913	66,7998	1100	12,1764	1,25565	1,21603	0,741316
	39S-8P	254,887	44601,6	5714740	11939,1	169546	1404050	1573600	89,2256	71,637	1100	12,1888	1,25746	1,23572	0,74545
$\lambda = 1,66$	36S-8P	243,058	43224,2	5623190	123246	149600	1407930	1557530	90,3951	67,1993	1100	12,2225	1,26895	1,21822	0,727588
	39S-8P	276,023	47534	5806840	11642,5	173940	1406590	1580530	89,9948	72,4725	1100	12,2108	1,25247	1,21214	0,734549
$\lambda = 1,88$	36S-8P	410,333	55996,5	7327840	11582,2	225414	1386960	1612370	86,0197	70,9002	1100	12,0404	1,23649	1,16814	0,674358
	39S-8P	246,615	38725	6368370	12559,5	167945	1411660	1579610	89,3679	65,6981	1100	12,2549	1,20856	1,15222	0,719339
$\lambda = 2,11$	36S-8P	491,26	62373,6	7876090	11710,9	258236	1412010	1670250	84,5391	81,7458	1100	12,2579	1,24996	1,16658	0,705411
	39S-8P	258,286	40405,6	6392330	12603	170131	1412500	1582640	89,2501	65,7903	1100	12,2622	1,21814	1,14648	0,709587
$\lambda = 2,33$	36S-8P	235,992	38054,7	6201380	12893,6	151318	1392270	1543590	90,197	62,3423	1100	12,0865	1,22359	1,11649	0,694277
	39S-8P	261,547	41341,5	6326500	12372,3	168018	1394240	1562250	89,2452	66,1266	1100	12,1036	1,21506	1,12648	0,700689
$\lambda = 2,55$	36S-8P	248,652	39657,7	6269960	12729,8	155258	1400290	1555550	90,0191	63,0254	1100	12,1562	1,22468	1,10166	0,686063
	39S-8P	280,086	43433,7	6448580	12050,6	174345	1404360	1578700	88,9564	67,026	1100	12,1915	1,20732	1,10148	0,69086
$\lambda = 2,77$	36S-8P	260,72	41177,6	6331600	12481,6	158901	1404450	1563350	89,8359	63,4052	1100	12,1923	1,21265	1,0892	0,680142
	39S-8P	289,854	44578,6	6502080	12503,9	176832	1392830	1569660	88,7344	70,4104	1100	12,0914	1,23283	1,11781	0,690749
$\lambda = 3$	36S-8P	492,697	57089	8630330	11958,4	272076	1389300	1661380	83,6235	78,2996	1100	12,0608	1,19206	1,05572	0,668101
	39S-8P	301,877	46210,8	6532620	12796,6	180464	1396700	1577170	88,5577	71,7302	1100	12,125	1,25507	1,12819	0,686037

Tablo 2.7 Hesaplanan başlangıç 10 kutuplu ve 30 ile 33 oluk sayısının Rmxprt değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (10 KUTUPLU - 1400W-1100RPM)													
		Armatür Termal Yükü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A_per_meter)	Armatür Akım Yoğunluğu (A_per_m2)	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
$\lambda = 1$	30S-10P	166,394	32568,1	5109100	15000,7	129709	1391160	1520870	91,4714	63,9741	1100	12,0769	1,32209	1,2072	0,720968
	33S-10P	300,124	44986	6671490	14254,5	198926	1394570	1593500	87,5164	78,38268	1100	12,1066	1,29569	1,23111	0,727253
$\lambda = 1,22$	30S-10P	270,995	42533,8	6371280	13120,1	153748	1395430	1576300	88,5257	69,1817	1100	12,114	1,22426	1,16107	0,675891
	33S-10P	342,333	49671,4	6991960	13650,8	209467	1402230	1611700	87,0033	81,101	1100	12,173	1,28043	1,18457	0,708174
$\lambda = 1,44$	30S-10P	284,97	44956,9	6338750	12904,7	179125	1390690	1569810	88,5894	67,041	1100	12,0728	1,23727	1,09888	0,637219
	33S-10P	400,944	55271,3	7254110	12890,4	228587	1407160	1635740	86,0255	85,0989	1100	12,2158	1,24863	1,14035	0,690654
$\lambda = 1,66$	30S-10P	333,248	49712,2	6703540	13059,2	197962	1396990	1594950	87,5882	78,932	1100	12,1275	1,24828	1,09865	0,669546
	33S-10P	343,027	45714,1	7503740	13879,2	206242	1397880	1604120	87,143	76,2171	1100	12,1352	1,22836	1,10568	0,675709
$\lambda = 1,88$	30S-10P	380,9	54267,8	7018890	12178	214410	1399420	1613830	86,7142	82,7479	1100	12,1486	1,20971	1,05029	0,651677
	33S-10P	390,332	49791,8	7839270	13032,3	223928	1405080	1629000	86,2537	79,5914	1100	12,1977	1,1977	1,04646	0,65952
$\lambda = 2,11$	30S-10P	331,297	45056,1	7352990	13401,4	200581	1393910	1594500	87,4204	74,4006	1100	12,1008	1,19859	1,05228	0,640345
	33S-10P	404,406	51671,5	7826490	13075,7	224274	1390630	1614900	86,1122	80,1982	1100	12,0723	1,20779	1,04215	0,648366
$\lambda = 2,33$	30S-10P	331,297	45056,1	7352990	13401,4	200581	1393910	1594500	87,4204	74,4006	1100	12,1008	1,19859	1,05228	0,640345
	33S-10P	591,117	64750,2	9129180	12302,6	308035	1201680	1509720	79,5965	95,4	1100	10,432	1,1763	0,999834	0,635409
$\lambda = 2,55$	30S-10P	377,59	49650,4	7604980	12899,6	215390	1397700	1613090	86,6473	77,1662	1100	12,1336	1,19028	0,989634	0,622361
	33S-10P	561,903	64091,2	8767230	12586,4	288638	1182180	1470820	80,3758	93,6	1100	10,2628	1,19253	0,999806	0,628144
$\lambda = 2,77$	30S-10P	585,871	63927,9	9164550	12152,2	313673	1245750	1559420	79,8853	93,6	1100	10,8145	1,15865	0,949032	0,611446
	33S-10P	576,423	65824,2	8757010	11619	289191	1133820	1423020	79,6776	95,4	1100	9,84294	1,14437	0,95943	0,619474
$\lambda = 3$	30S-10P	663,492	68948,9	9622950	12127,8	345949	1219790	1565790	77,9051	97,2	1100	10,5892	1,16123	0,936291	0,604211
	33S-10P	537,842	64439,3	8346480	11666,7	267002	1111660	1378660	80,6332	93,6	1100	9,65049	1,15282	0,951108	0,611223

Tablo 2.8 Hesaplanan başlangıç 10 kutuplu ve 36 ile 39 oluk sayısının Rmxprt değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (10 KUTUPLU - 1400W-1100RPM)													
		Armatür Termal Yükü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A_per_meter)	Armatür Akım Yoğunluğu (A_per_m2)	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
$\lambda = 1$	36S-10P	332,52	48949,6	6793120	13738,9	207142	1407190	1614330	87,1686	79,6743	1100	12,2161	1,29227	1,23458	0,731243
	39S-10P	511,59	62559,1	8177710	13066,9	339859	1392220	1732080	80,3786	95,4	1100	12,0861	1,27391	1,24203	0,736065
$\lambda = 1,22$	36S-10P	370,147	53394,1	6932360	12924	213278	1393810	1607090	86,7289	82,3491	1100	12,0999	1,25959	1,18716	0,712838
	39S-10P	204,061	36580	5578480	14981,9	150526	1392370	1542890	90,2439	66,9166	1100	12,0874	1,29688	1,23591	0,721868
$\lambda = 1,44$	36S-10P	336,91	45731,9	7367080	13939,2	199935	1392250	1592190	87,4427	75,0158	1100	12,0864	1,2457	1,14314	0,695143
	39S-10P	223,623	39370,8	5679920	13884	153640	1395250	1548890	90,0807	68,7775	1100	12,1124	1,25766	1,17388	0,705702
$\lambda = 1,66$	36S-10P	385,187	50075,7	7692090	12553,1	215281	1394690	1609970	86,6283	78,7703	1100	12,1075	1,18658	1,07436	0,676207
	39S-10P	467,2	56823,2	8221990	13461,3	277241	1409580	1686820	83,5643	85,2511	1100	12,2368	1,24373	1,14563	0,692941
$\lambda = 1,88$	36S-10P	419,922	53388,5	7865390	12552,1	225293	1403850	1629140	86,1711	80,0363	1100	12,1871	1,19282	1,0636	0,666291
	39S-10P	559,483	63494,3	8811550	12747,2	314101	1399720	1713820	81,6725	90,8087	1100	12,1512	1,21494	1,10502	0,677537
$\lambda = 2,11$	36S-10P	422,356	54587,9	7737180	13329,2	221161	1398740	1619900	86,3472	79,0974	1100	12,1427	1,23228	1,09037	0,659421
	39S-10P	621,094	68203,1	9106530	12575,4	334401	1379230	1713630	80,4858	93,6	1100	11,9733	1,2133	1,08629	0,667918
$\lambda = 2,33$	36S-10P	625,112	68833	9081580	11839,4	306172	1191120	1697290	79,5515	95,4	1100	10,3403	1,16804	1,01233	0,64332
	39S-10P	635,836	70164,5	9062080	12766	332708	1371640	1704350	80,4789	93,6	1100	11,9075	1,22471	1,08835	0,658386
$\lambda = 2,55$	36S-10P	487,015	60506,8	8048930	13348,5	240406	1400160	1640570	85,3461	82,1771	1100	12,155	1,24303	1,06896	0,637841
	39S-10P	467,028	52596,9	8879380	13547,9	274057	1394970	1669040	83,5794	80,5802	1100	12,11	1,18011	1,02593	0,64437
$\lambda = 2,77$	36S-10P	649,392	72218,9	8991990	12454,4	305528	1176930	1482460	79,3904	95,4	1100	10,2171	1,20521	1,02072	0,628989
	39S-10P	518,066	56171,1	9223010	13240,7	295198	1404160	1699360	82,6288	83,029	1100	12,1898	1,17186	1,00302	0,63476
$\lambda = 3$	36S-10P	597,704	70220,2	8511840	12109,3	278114	1141360	1419470	80,4072	93,6	1100	9,90831	1,19254	0,995171	0,618445
	39S-10P	566,382	59522,8	9515370	12876,8	314326	1394020	1708340	81,6005	85,8668	1100	12,1017	1,16125	0,977839	0,624384

Tablo 2.9 Hesaplanan başlangıç 12 kutuplu ve 36 ile 45 oluk sayısının Rmxprt değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (12 KUTUPLU - 1400W-1100RPM)													
		Armatür Termal Yükü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A_per_meter)	Armatür Akım Yoğunluğu (A_per_m2)	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
$\lambda = 1$	36S-12P	331,325	48380,1	6848380	14834,7	211477	1402720	1614200	86,8989	81,1084	1100	12,1773	1,2692	1,13207	0,677415
	45S-12P	352,5	47481,1	7424000	16112	208903	1390350	1599250	86,9375	76,6972	1100	12,0699	1,29249	1,19036	0,696699
$\lambda = 1,22$	36S-12P	378,621	53469,5	7081060	14470,3	223031	1397680	1620710	86,2386	84,4753	1100	12,1335	1,25946	1,10053	0,655301
	45S-12P	417,769	53439,8	7817560	14592,2	226771	1387890	1614660	85,9555	81,4262	1100	12,0485	1,23617	1,11929	0,674986
$\lambda = 1,44$	36S-12P	355,799	46533,5	7646080	14305,4	213229	1406760	1619990	86,8376	77,995	1100	12,2123	1,18975	1,01549	0,634441
	45S-12P	468,576	58189,9	8052530	14522,2	239319	1392820	1632130	85,3371	83,606	1100	12,0913	1,24449	1,08362	0,658188
$\lambda = 1,66$	36S-12P	387,031	49702	7787030	14442,4	221337	1405620	1626950	86,3956	79,702	1100	12,2024	1,2023	0,998052	0,620791
	45S-12P	588,167	68059,2	8642000	13571,1	281614	1139140	1420750	80,1785	80,1785	1100	988.906	1,20435	1,04424	0,643017
$\lambda = 1,88$	36S-12P	409,493	52200,3	7844650	14275,1	225300	1397250	1622550	86,1144	80,7234	1100	12,1298	1,19657	0,986684	0,607043
	45S-12P	511,101	64780,7	7889720	12380,2	239233	1058970	1298200	81,572	93,6	1100	9,19308	1,15237	0,984337	0,624911
$\lambda = 2,11$	36S-12P	645,869	68768,2	9391970	13462,2	371952	1001070	1373020	72,91	95,4	1100	8,69046	1,16497	0,938007	0,598384
	45S-12P	688,266	64772,1	10626000	13969,6	377789	1377940	1755720	78,4824	93,6	1100	11,9621	1,14905	0,952058	0,611331
$\lambda = 2,33$	36S-12P	606,458	67750,9	8951300	13384,9	341074	980877	1322340	74,1776	93,6	1100	8,51517	1,16374	0,929274	0,586473
	45S-12P	663,838	66891,7	9924070	13206,9	321640	1130740	1452380	77,8543	95,4	1100	9,81617	1,12259	0,913437	0,599714
$\lambda = 2,55$	36S-12P	553,67	65722,3	8424390	12906,7	306011	946605	1252620	75,5703	91,8	1100	8,21765	1,14543	0,901239	0,575529
	45S-12P	655,734	65262,6	10047600	13805,5	311553	1410250	1721810	81,9054	87,3177	1100	12,2427	1,15141	0,924066	0,593525
$\lambda = 2,77$	36S-12P	450,9	59586,2	7567190	12039,6	222670	1033900	1256570	82,2795	91,8	1100	8,97548	1,11006	0,852591	0,566926
	45S-12P	637,164	66969,8	9514200	13848	299437	1274070	1573510	80,9701	95,4	1100	11,0605	1,15148	0,926666	0,605003
$\lambda = 3$	36S-12P	367,357	55014,4	6677460	11384,9	182512	822920	1005430	81,8474	91,8	1100	7,14391	1,0811	0,818087	0,555596
	45S-12P	508,772	60650	8388650	13764,6	240923	954462	1195390	79,8456	95,4	1100	8,28586	1,15065	0,912101	0,597036

Tablo 2.10 Hesaplanan başlangıç 12 kutuplu 39 oluk sayısının RMxprt değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (12 KUTUPLU - 1400W-1100RPM)													
		Armatür Termal Yükü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A _{per_meter})	Armatür Akım Yoğunluğu (A _{per_m2})	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
$\lambda = 1$	39S-12P	373,24	53428	6985840	20202,6	230388	1024850	1255240	81,6459	95,4	1100	8,89694	1,23956	1,11364	0,665476
$\lambda = 1,22$	39S-12P	428,2277	52232,5	8198470	20154,2	256767	1091470	1348230	80,9553	93,6	1100	9,47521	1,17363	1,03858	0,64172
$\lambda = 1,44$	39S-12P	441,06	54500,7	8092750	18425,1	250110	1027770	1277880	80,4277	95,4	1100	8,92226	1,12802	0,972231	0,623643
$\lambda = 1,66$	39S-12P	406,157	53560,9	7583080	19607,5	225727	1023950	1249680	81,9373	91,8	1100	8,88913	1,16796	0,990018	0,614861
$\lambda = 1,88$	39S-12P	345,123	50880,3	6783040	17885,5	189655	799136	988791	80,8195	93,6	1100	6,93744	1,11622	0,93296	0,601857
$\lambda = 2,11$	39S-12P	334,199	51046,8	6546900	16432,8	178696	755399	934095	80,8696	93,6	1100	6,55775	1,10074	0,86283	0,584935
$\lambda = 2,33$	39S-12P	324,261	51124,6	6342550	16188,2	169901	728081	897982	81,0797	93,6	1100	6,32061	1,06926	0,855437	0,557699
$\lambda = 2,55$	39S-12P	342,418	53335,8	6420040	17904,5	176774	745176	921970	80,8265	93,6	1100	6,46918	1,1222	0,888071	0,569095
$\lambda = 2,77$	39S-12P	476,467	55248,2	8624120	20601,9	260290	1011200	1271490	79,5287	91,8	1100	8,77838	1,13341	0,882811	0,560974
$\lambda = 3$	39S-12P	324,276	47069,7	6889280	15002,5	180124	708540	888663	79,731	91,8	1100	615096	0,965619	0,739	0,536838

Tablo 2.11 Parametrik analiz sonrası 6 kutuplu ve 18 ile 27 oluk sayısının RMxprt değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (6 KUTUPLU - 1400W-1100RPM)													
		Armatür Termal Yükü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A_per_meter)	Armatür Akım Yoğunluğu (A_per_m2)	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
$\lambda = 1$	18S-6P	84,1081	24879,8	3380570	9124,31	81970,9	1399380	1481350	94,4665	42,5898	1100	12,1483	1,33722	0,703871	0,825008
	27S-6P	84,8923	26838,3	3163130	9793,57	80779,4	1399950	1480730	94,5446	41,57	1100	12,1532	1,54648	0,617703	0,814593
$\lambda = 1,22$	18S-6P	84,749	24136,9	3511170	9357,36	80752,9	1399850	1480600	94,5459	38,3473	1100	12,1524	1,32003	0,645678	0,810154
	27S-6P	92,0904	29268,7	3146380	9206,41	79865,1	1399310	1479170	94,6007	33,4907	1100	12,1476	1,45258	0,608934	0,809585
$\lambda = 1,44$	18S-6P	97,3946	26605,1	3660760	8687,35	85328,4	1400100	1485430	94,2556	32,7065	1100	12,1545	1,27699	0,645171	0,794241
	27S-6P	98,4741	30726,3	3204880	9637,9	82459,1	1399840	1482300	94,4371	34,5105	1100	12,1523	1,58877	0,607213	0,78569
$\lambda = 1,66$	18S-6P	97,9565	24690,9	3967300	9137,72	86,271,4	1400120	1486390	94,1959	33,6807	1100	12,1547	1,22105	0,652745	0,785056
	27S-6P	96,7309	25614,2	3776460	9936,08	82756,6	1399100	1481850	94,4153	38,823	1100	12,1458	1,31474	0,620532	0,791657
$\lambda = 1,88$	18S-6P	93,5576	26106,9	3583630	9578,2	82542,7	1400170	1482720	94,433	26,1832	1100	12,1552	1,35562	0,623258	0,775883
	27S-6P	96,8459	27730,2	3492440	10105,2	81914,9	1399860	1481770	94,4718	22,1774	1100	12,1524	1,4601	0,585946	0,778101
$\lambda = 2,11$	18S-6P	99,265	37417,5	3620490	9676,89	84346,6	1400270	1484610	94,3186	24,1457	1100	12,156	1,37105	0,6384	0,767279
	27S-6P	101,806	28987,2	3512110	10096,8	83090,6	1400000	1483100	94,3975	23,074	1100	12,1537	1,45156	0,594834	0,768874
$\lambda = 2,33$	18S-6P	100,742	28084,1	3587150	10220,1	84215	1400080	1484290	94,3263	24,6503	1100	12,1543	1,37181	0,758586	0,759058
	27S-6P	108,776	30465,1	3570520	9976,33	85500,2	1399670	1485170	94,2431	22,0839	1100	12,1508	1,45004	0,590125	0,760208
$\lambda = 2,55$	18S-6P	109,849	29774,5	3689360	9623,07	87619,4	1400470	1488090	94,112	21,3469	1100	12,1578	1,38987	0,608022	0,749592
	27S-6P	117,408	30327	3871390	9547,07	87782,5	1399730	1487520	94,0987	36,3247	1100	12,1513	1,31914	0,611022	0,754412
$\lambda = 2,77$	18S-6P	113,703	30715,2	3701840	9450,73	88375,9	1400640	1489020	94,0648	22,2762	1100	12,1592	1,37415	0,600106	0,743539
	27S-6P	122,797	31450,1	3904500	9329,56	89319,4	1399830	1489150	94,002	35,5423	1100	12,1522	1,31195	0,59354	0,747415
$\lambda = 3$	18S-6P	97,725	27517,1	3551440	10723,2	85470,6	1400400	1485870	94,2478	16,6535	1100	12,1571	1,47246	0,612072	0,733208
	27S-6P	129,761	32766	3960250	9232,45	91796,6	1399860	1491650	93,846	33,9099	1100	12,1524	1,31334	611525	0,740008

Tablo 2.12 Parametrik analiz sonrası 6 kutuplu ve 39 ile 36 oluk sayısının RMxprt değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (6 KUTUPLU - 1400W-1100RPM) YENİ EXCEL BAŞLANGIÇ													
		Armatür Termal Yüğü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A_per_meter)	Armatür Akım Yoğunluğu (A_per_m2)	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
$\lambda = 1$	39S-6P	108,637	33050,9	3286950	18013,9	101312	1399880	1501190	93,2512	44,1334	1100	12,1526	1,56742	1,28341	0,80323
	36S-6P	90,2331	27220,1	3314950	9157,67	82221,6	1399790	1482010	94,452	33,6542	1100	12,1518	1,38964	0,626373	0,818406
$\lambda = 1,22$	39S-6P	110,674	29060,9	3808350	15759,4	100797	1400100	1500890	93,2842	29,6327	1100	12,1545	1,23327	1,13214	0,782703
	36S-6P	91,5127	28808,4	3176600	9778,54	81353,9	1399280	1480630	94,0533	36,7575	1100	12,1474	1,58477	0,610831	0,797387
$\lambda = 1,44$	39S-6P	97,0631	27982,2	3468750	19559,2	92831,5	1399860	1492690	93,7809	31,4296	1100	12,1525	1,37947	1,26186	0,792622
	36S-6P	108,804	31774,6	3424260	8587,23	85513,2	1399670	1485180	94,2422	34,0827	1100	12,1507	1,34229	0,619712	0,782183
$\lambda = 1,66$	39S-6P	99,382	28969,6	3430560	20094,3	92452,7	139570	1492020	93,8035	39,2015	1100	12,1499	1,40328	1,28839	0,789857
	36S-6P	89,9372	26623,1	3378160	10022,2	80289	1399080	1479370	94,5728	35,1345	1100	12,1457	1,42713	0,620118	0,786204
$\lambda = 1,88$	39S-6P	104,359	30313,3	3442690	19843,9	93014,6	1399650	1492670	93,7686	38,0253	1100	12,1506	1,42232	1,2597	0,78002
	36S-6P	97,6929	28360,9	3444630	10031,1	83186,6	1399670	1482860	94,3901	27,9186	1100	12,1508	1,4343	0,617421	0,771317
$\lambda = 2,11$	39S-6P	109,004	31584,5	3451190	19912,1	93953,7	1399870	1493830	93,7105	35,7462	1100	12,1525	1,4496	1,25244	0,772089
	36S-6P	97,7197	28891	3382360	10313,3	81782,6	1399460	1481250	94,4788	33,3629	1100	12,149	1,47447	0,621795	0,767155
$\lambda = 2,33$	39S-6P	113,121	32614,7	3468420	20115,7	94823,2	1399940	1494770	93,6563	43,0213	1100	12,1532	1,45262	1,26756	0,770167
	36S-6P	103,047	30166,5	3415930	10451,5	83640,1	1399930	1483570	94,3622	28,6182	1100	12,153	1,50626	0,625856	0,759744
$\lambda = 2,55$	39S-6P	120,724	34313,3	3518280	19105,7	96662,2	1399930	1496600	93,5412	33,4431	1100	12,1531	1,45033	1,21414	0,756534
	36S-6P	108,796	31469,2	3457210	9650,27	84638,4	1399460	1484100	94,297	35,1362	1100	12,149	1,42083	0,590479	0,752013
$\lambda = 2,77$	39S-6P	125,947	35538,4	3543950	18745,5	97745,5	1399890	1497640	93,4734	33,4907	1100	12,1527	1,44835	1,19408	0,749179
	36S-6P	110,991	32230,3	3443680	10076,4	85743,1	1399860	1485600	94,2284	32,7679	1100	12,1524	1,46745	0,608646	0,745854
$\lambda = 3$	39S-6P	132,033	36879,4	3580130	18170	99090,2	1399870	1498960	93,3894	34,5691	1100	12,1525	1,42916	1,17441	0,741986
	36S-6P	130,211	34207,3	3806530	8927,29	92824,9	1399570	1492390	93,7801	40,8251	1100	12,1499	1,3102	0,60668	0,742821

Tablo 2.13 Parametrik analiz sonrası 8 kutuplu ve 27 ile 30 oluk sayısının RMxprt değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (8 KUTUPLU - 1400W-1100RPM)													
		Armatür Termal Yüğü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A_per_meter)	Armatür Akım Yoğunluğu (A_per_m2)	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Diş Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
$\lambda = 1$	27S-8P	136,293	32003,6	4258680	9648,22	105907	1399720	1505630	92,9659	24,4041	1100	12,1512	1,2894	0,615368	0,768328
	30S-8P	89,9339	27053,8	3324260	10750,1	89243,4	1399940	1489190	94,0072	43,3208	1100	12,1532	1,47425	0,627753	0,769004
$\lambda = 1,22$	27S-8P	93,788	26705,2	3511970	11088	81642,9	1399910	1481560	94,3504	35,8863	1100	12,1529	1,42435	0,600033	0,754151
	30S-8P	96,1644	28921,4	3325020	10918,8	88997	1399770	1488770	94,0221	40,4507	1100	12,1517	1,50132	0,628358	0,754125
$\lambda = 1,44$	27S-8P	100,439	28415,1	3534700	11301,5	82889,5	1399880	1482770	94,4098	32,116	1100	12,1526	1,47026	0,592761	0,741022
	30S-8P	102,151	30648,2	3333000	11085,5	89348,5	1399830	1489180	94,0001	36,6071	1100	12,1522	1,54388	0,608017	0,740134
$\lambda = 1,66$	27S-8P	109,698	30411,6	3607130	11181,4	85508,4	1399950	1485460	94,2437	30,5966	1100	12,1532	1,46312	0,623445	0,727728
	30S-8P	106,758	32087,7	3327080	11223,2	89217,8	1399850	1489070	94,0085	35,7221	1100	12,1524	1,5628	0,585369	0,729478
$\lambda = 1,88$	27S-8P	114,536	31728,8	3609840	11020,4	85777,2	1399960	1485730	94,2266	32,393	1100	12,1533	1,45161	0,590275	0,718915
	30S-8P	104,379	26606,5	3923080	11612,1	88840	1399950	1488790	94,0327	32,4149	1100	12,1532	1,34217	0,600133	0,729299
$\lambda = 2,11$	27S-8P	121,122	33266,8	3640920	10959,3	87168,7	1399890	1487060	94,1382	33,7447	1100	12,1527	1,43276	0,623962	0,70839
	30S-8P	110,265	27881,3	3954780	11460,7	89869,1	1399800	1489670	93,9672	32,7566	1100	12,1519	1,30925	0,61635	0,719323
$\lambda = 2,33$	27S-8P	117,601	28117,9	4182430	11130,7	89072,8	1399970	1489040	94,0181	27,8395	1100	12,1534	1,29487	0,610839	0,721843
	30S-8P	117,803	29301,2	4020420	11305	92340,7	1399970	1492310	93,8122	31,1176	1100	12,1534	1,30865	0,626985	0,710782
$\lambda = 2,55$	27S-8P	167,888	36161	4642800	11424,3	116220	1399820	1516040	92,334	15,7946	1100	12,1521	1,38696	0,607998	0,685549
	30S-8P	131,233	31396,1	4179590	10566,3	97438	1400080	1497520	93,4934	29,0631	1100	12,1544	1,26538	0,611288	0,696807
$\lambda = 2,77$	27S-8P	169,874	34808,5	4880250	11127,8	114301	1402130	1516430	92,4625	16,3354	1100	12,1721	1,27819	0,588972	0,680141
	30S-8P	149,331	33961,7	4397050	9891,56	105072	1400060	1505140	93,0191	27,4837	1100	12,1542	1,22455	0,604047	0,68309
$\lambda = 3$	27S-8P	182,792	36595	4995000	10456,9	118431	1401580	1520010	92,2085	18,452	1100	12,1674	1,22712	0,592071	0,668184
	30S-8P	144,075	33808,3	4261520	10621,5	101425	1399960	1501390	93,2446	28,179	1100	12,1533	1,28496	0,608987	0,680948

Tablo 2.14 Parametrik analiz sonrası 8 kutuplu ve 36 ile 39 oluk sayısının RMxprt değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (8 KUTUPLU - 1400W-1100RPM)													
		Armatür Termal Yükü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A_per_meter)	Armatür Akım Yoğunluğu (A_per_m2)	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
$\lambda = 1$	36S-8P	93,7899	27018,6	3471310	10798,9	81723,4	1400010	1481740	94,4846	31,0803	1100	12,1538	1,40366	0,611527	0,764117
	39S-8P	98,9506	29434,8	3361690	10008,4	89448,1	89448,1	1399960	93,8524	41,3531	1100	12,1533	1,44038	0,607424	0,743824
$\lambda = 1,22$	36S-8P	100,715	28945,4	3479460	10975,5	82254,7	1400030	1482290	94,2694	29,673	1100	12,1539	1,43055	0,594389	0,749005
	39S-8P	103,508	31124,1	3325650	10754,4	88512,4	1399930	1488440	93,9132	32,3213	1100	12,153	1,52017	0,61633	0,747591
$\lambda = 1,44$	36S-8P	113,543	31599,2	3593200	10961	86352,4	1400000	1486350	94,1903	25,194	1100	12,1537	1,44142	0,610793	0,737993
	39S-8P	108,546	32770,2	3312340	10795,7	87908,3	1399770	1487680	94,0909	34,8218	1100	12,1516	1,51836	0,590072	0,737825
$\lambda = 1,66$	36S-8P	115,171	32593,8	3533540	11043,7	84694	1400070	1484760	94,2958	28,2672	1100	12,1542	1,44353	0,602296	0,724861
	39S-8P	122,12	34635,1	3525900	10569,4	91840,8	1399860	1491700	93,8432	42,5107	1100	12,1525	1,45195	0,613908	0,730957
$\lambda = 1,88$	36S-8P	206,188	42087,1	4899090	10009,6	125183	1399780	1524960	91,7811	12,0898	1100	12,0898	1,28106	0,601127	0,674284
	39S-8P	155,059	32569,1	4760910	10759,2	114371	1411170	1525540	92,5029	15,1941	1100	12,2506	1,24918	0,607718	0,719313
$\lambda = 2,11$	36S-8P	136,688	36960,9	3697630	10838,8	91131,3	1399840	1490970	93,8878	24,9749	1100	12,1523	1,45348	0,596029	0,702881
	39S-8P	153,857	35048,2	4389870	11401,1	1125550	1399580	1512130	92,5569	13,8585	1100	12,15	1,36996	0,601824	0,708552
$\lambda = 2,33$	36S-8P	189,293	36149,6	5236380	11202	125543	1399730	1525270	91,7691	13,1132	1100	12,1513	1,25107	0,607805	0,69428
	39S-8P	163,242	36706,6	4447220	11444,2	115605	1399760	1515370	92,3711	14,1652	1100	12,1516	1,38287	0,617835	0,699627
$\lambda = 2,55$	36S-8P	197,891	37525	5273580	11178,2	128087	1399650	1527740	91,6159	13,2778	1100	12,1506	1,26487	0,597235	0,686032
	39S-8P	175,53	36469,8	4813030	10495,5	117822	1408310	1526130	92,2797	16,56	1100	12,2258	1,22705	0,606309	0,690884
$\lambda = 2,77$	36S-8P	202,933	40834,8	4971080	11746,6	130635	1399900	1530540	91,4648	12,7374	1100	12,1528	1,38325	0,617095	0,679551
	39S-8P	134,634	32971,4	4083350	11293,4	95992,8	1400020	1496010	93,5834	24,3781	1100	12,1538	1,33574	0,602588	0,690485
$\lambda = 3$	36S-8P	216,233	40309,2	5364350	10719,7	133243	1399660	1532900	91,3078	15,3084	1100	12,1507	1,21844	0,635152	0,668094
	39S-8P	129,199	32484,2	3977290	11378,4	91697,8	1399890	1491590	93,8524	33,9183	1100	12,1527	1,32499	0,596221	0,685654

Tablo 2.15 Parametrik analiz sonrası 10 kutuplu ve 30 ile 33 oluk sayısının R_{Mxprt} değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (10 KUTUPLU - 1400W-1100RPM)													
		Armatür Termal Yükü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A _{per_meter})	Armatür Akım Yoğunluğu (A _{per_m2})	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
$\lambda = 1$	30S-10P	87,7801	25705,8	3414800	13524,5	81835,3	1400000	1481840	94,4774	23,5277	1100	12,1537	1,52197	0,619853	0,714105
	33S-10P	100,271	29311,7	3420840	12913,4	85720,1	1399850	1485570	94,2298	27,8533	1100	12,1523	1,53522	0,603686	0,718142
$\lambda = 1,22$	30S-10P	129,617	30448,5	4256920	11216,7	99233,6	1400150	1499390	93,3817	16,3397	1100	12,155	1,25741	0,612016	0,675877
	33S-10P	112,963	31294,8	3609650	14204,3	89607,8	1399930	1489540	93,9842	37,7113	1100	12,1531	1,45848	1,07607	0,704402
$\lambda = 1,44$	30S-10P	126,092	32465,2	3883920	12341,3	94688,1	1400060	1494750	93,6653	26,8822	1100	12,1542	1,44977	0,604208	0,63291
	33S-10P	124,014	33714,4	3678370	11957	89769,1	1399870	1489640	93,9738	40,3463	1100	12,1525	1,41711	0,600194	0,688932
$\lambda = 1,66$	30S-10P	156,068	35398,1	4408940	11565,8	105538	1399890	1505430	92,9895	20,1531	1100	12,1527	1,28721	0,602061	0,669444
	33S-10P	149,857	30215,2	4959670	11435,6	102892	1400000	1502900	93,1538	23,4187	1100	12,1537	1,15497	0,611048	0,675954
$\lambda = 1,88$	30S-10P	171,265	37863	4523300	11157,3	109795	1399810	1509600	92,7269	22,3804	1100	12,152	1,26965	0,625264	0,651555
	33S-10P	171,468	33001,5	5195780	11031,3	111217	1400190	1511410	92,6415	23,0249	1100	12,1553	1,1424	0,604092	0,659668
$\lambda = 2,11$	30S-10P	159,756	33174	4815700	12007,9	110166	1399960	1510120	92,7049	16,2659	1100	12,1533	1,22979	0,622098	0,640207
	33S-10P	177,42	34225	5183940	11065,1	111130	1400170	1511300	92,6467	24,0781	1100	12,1551	1,14453	0,600639	0,648503
$\lambda = 2,33$	30S-10P	156,701	34813,3	4501180	12914,9	110483	1399910	1510390	92,6852	14,5903	1100	12,1529	1,37116	0,620627	0,639891
	33S-10P	187,125	40151	4660530	12150,9	117078	1399930	1517010	92,2823	19,9693	1100	12,1531	1,35969	0,608926	0,635623
$\lambda = 2,55$	30S-10P	176,172	35958,9	4899270	11953	114652	1399810	1514460	92,4295	17,6272	1100	12,152	1,241	0,619037	0,621939
	33S-10P	197,202	37246,4	5294510	10798,8	116055	1400190	1516250	92,3459	25,92	1100	12,1553	1,1311	0,592896	0,628208
$\lambda = 2,77$	30S-10P	185,347	39628,6	4677100	12243,3	118858	1399810	1518670	92,1736	18,3351	1100	12,152	1,34364	0,629973	0,60641
	33S-10P	204,055	43163,2	4727510	11636,4	120733	1399800	1520540	92,0599	22,6615	1100	12,1519	1,32067	0,624556	0,615155
$\lambda = 3$	30S-10P	193,845	38763,5	5000710	11280,4	119019	1399860	1518880	92,164	20,5853	1100	12,1524	1,18712	0,617573	0,604083
	33S-10P	212,346	44624,4	4758530	11796,8	122984	1399840	1522830	91,924	22,4944	1100	12,1523	1,34834	0,604187	0,607712

Tablo 2.16 Parametrik analiz sonrası 10 kutuplu ve 36 ile 39 oluk sayısının R_{Mxprt} değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (10 KUTUPLU - 1400W-1100RPM)													
		Armatür Termal Yükü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A _{per_meter})	Armatür Akım Yoğunluğu (A _{per_m2})	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
$\lambda = 1$	36S-10P	110,408	30935,9	3568940	12067,7	87022,8	1399800	1486830	94,1471	40,8129	1100	12,1519	1,44	0,593414	0,727706
	39S-10P	152,585	36524,3	4177640	11303,7	94863,8	1399650	1519810	92,0933	22,7426	1100	12,1506	1,37191	0,615497	0,734592
$\lambda = 1,22$	36S-10P	122,718	33719,6	3639370	11760,4	89023,4	1399940	1488960	94,2694	41,0062	1100	12,1531	1,42129	0,612228	0,710444
	39S-10P	96,0968	27498,5	3494620	13259,8	85705,1	1399750	1485460	94,0521	31,7148	1100	12,1515	1,45277	0,612812	0,718378
$\lambda = 1,44$	36S-10P	112,516	31492,7	3572770	13638,4	86804	1399900	1486700	94,1613	23,0168	1100	12,1528	1,57914	0,624323	0,686438
	39S-10P	107,476	29899,4	3594590	12593,8	88289,7	1399930	1488220	94,0674	32,2303	1100	12,153	1,40828	0,610474	0,703734
$\lambda = 1,66$	36S-10P	134,277	33250,1	4038400	12326,2	93312,8	1399900	1493210	93,7509	38,6123	1100	12,1528	1,43346	0,621715	0,675562
	39S-10P	118,719	32180,9	3689100	12584	91684,6	1399900	1491590	93,8532	28,5365	1100	12,1528	1,42732	0,614759	0,690727
$\lambda = 1,88$	36S-10P	137,025	36341,7	3770470	12915,3	93677,9	1399950	1493620	93,7281	22,7564	1100	12,1532	1,54293	0,616515	0,662958
	39S-10P	128,727	34216,9	3762090	12118,8	93921,8	1399930	1493850	93,7128	29,9143	1100	12,153	1,3956	0,614083	0,676423
$\lambda = 2,11$	36S-10P	178,566	35494,1	5030860	11226,9	106707	1400060	1506760	92,9182	25,5684	1100	12,1542	1,17104	0,61737	0,659642
	39S-10P	141,676	36596,5	3871310	12233	98322,2	1400000	1498320	93,4279	26,6464	1100	12,1537	1,42073	0,617168	0,666878
$\lambda = 2,33$	36S-10P	160,127	38433,7	4166320	11990,1	98794,5	1399930	1498720	93,4081	41,6309	1100	12,153	1,40049	0,624095	0,643537
	39S-10P	141,581	37197,3	3806210	12323,3	96217,3	1399980	1496200	93,5692	28,978	1100	12,1535	1,41963	0,590511	0,657474
$\lambda = 2,55$	36S-10P	185,284	39571	4682330	12003	107509	1400390	1507890	92,8702	22,2309	1100	12,157	1,2675	0,617439	0,637811
	39S-10P	192,725	38157,4	5050790	13033,3	130703	1399690	1530390	91,4595	13,976	1100	12,151	1,33211	0,616636	0,644092
$\lambda = 2,77$	36S-10P	209,531	42668,6	4910680	11430,8	115871	1402440	1518310	92,3685	23,1392	1100	12,1749	1,24054	0,620206	0,62895
	39S-10P	206,713	37816,8	5466180	11924	133439	1399880	1533320	91,2974	16,0147	1100	12,1526	1,18943	0,610372	0,634759
$\lambda = 3$	36S-10P	224,432	44755,6	5014610	11303,6	120499	1403940	1524440	92,0955	23,8491	1100	12,1878	1,24227	0,618237	0,618411
	39S-10P	218,712	39422,7	5547880	11794,8	111788	137583	1537350	91,0507	16,8918	1100	12,1517	1,19269	0,606742	0,624369

Tablo 2.17 Parametrik analiz sonrası 12 kutuplu ve 36 ile 45 oluk sayısının R_{Mxprt} değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (8 KUTUPLU - 1400W-1100RPM)													
		Armatür Termal Yüğü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yükleme (A _{per_meter})	Armatür Akım Yoğunluğu (A _{per_m2})	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
$\lambda = 1$	36S-12P	135,414	33076,4	4093970	13505,3	102671	1399800	1502470	93,1665	19,1188	1100	12,1519	1,36871	0,600084	0,676256
	45S-12P	126,508	30159,5	4194620	13767,6	92579,5	1399800	1492380	93,7965	25,9887	1100	12,1519	1,31085	0,589448	0,696686
$\lambda = 1,22$	36S-12P	149,471	34956,3	4275940	13109,5	103908	1399900	1503810	92,9373	21,223	1100	12,1528	1,31195	0,609163	0,655039
	45S-12P	161,914	33268,9	4866820	12246,3	102602	1399940	1502540	93,1715	31,6529	1100	12,1531	1,17587	0,611541	0,675291
$\lambda = 1,44$	36S-12P	153,012	32355,7	4729060	12910	107117	1400050	1507170	92,8928	18,1462	1100	12,1541	1,20962	0,60566	0,634383
	45S-12P	162,706	36356,6	4475270	13134,1	101045	1400100	1501150	93,2688	26,3008	1100	12,1545	1,27548	0,619222	0,658109
$\lambda = 1,66$	36S-12P	156,8	35541,8	4411720	14272,6	108230	1399860	1508090	92,8234	16,505	1100	12,1524	1,36762	0,60873	0,62125
	45S-12P	191,503	40393,4	4740960	12616,2	110126	1400360	1510490	92,7093	25,9569	1100	12,1568	1,26741	0,612012	0,642869
$\lambda = 1,88$	36S-12P	162,994	36999,9	4405260	14139	108346	1399790	1508140	92,8159	17,5123	1100	12,1519	1,35282	0,612558	0,605617
	45S-12P	210,238	45790,3	4591320	12430,1	116111	1401230	1517340	92,3478	25,7273	1100	12,1643	1,31118	0,631122	0,624718
$\lambda = 2,11$	36S-12P	179,4	41759,2	4296060	14882,9	128024	1399750	1527780	91,6202	35,4981	1100	12,1515	1,52466	0,633022	0,596796
	45S-12P	212,135	40610,3	5223670	14166,4	138378	1399770	1538150	91,0036	16,7312	1100	12,1517	1,31359	0,643878	0,611273
$\lambda = 2,33$	36S-12P	185,348	43155,3	4294910	14841,2	128219	1400070	1528290	91,6103	36,6574	1100	12,1542	1,51053	0,62466	0,583046
	45S-12P	156,591	38660,2	4050440	15243,6	101326	1399970	1507290	93,2508	35,4956	1100	12,1534	1,55978	0,623998	0,599217
$\lambda = 2,55$	36S-12P	204,72	46046	4445980	14794,3	135845	1399070	1534910	91,1497	35,0058	1100	12,1455	1,54034	0,640097	0,745791
	45S-12P	160,362	39719,3	4037380	15992,1	102339	1399830	1502170	93,1873	31,0841	1100	12,1522	1,63165	0,596967	0,591976
$\lambda = 2,77$	36S-12P	212,489	45081,7	4713430	12718,8	121308	1399920	1521220	92,0256	25,5657	1100	12,1529	1,29191	0,62859	0,563639
	45S-12P	239,673	43078,4	5563650	13205,5	130133	1399980	1530110	91,4952	23,322	1100	12,1534	1,20817	0,596431	0,596936
$\lambda = 3$	36S-12P	228	47327,2	4817530	12214,7	125837	1399930	1525770	91,7526	27,842	1100	12,1531	1,2809	0,593025	0,55229
	45S-12P	249,19	43943,3	5670710	12917,5	131726	1399870	1531600	91,3995	24,4923	1100	12,1525	1,17666	0,601178	0,596931

Tablo 2.18 Parametrik analiz sonrası 12 kutuplu ve 39 oluk sayısının R_{Mxprt} değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		PARAMETRELER (12 KUTUPLU - 1400W-1100RPM)													
		Armatür Termal Yükü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A _{per_meter})	Armatür Akım Yoğunluğu (A _{per_m2})	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Tork Açısı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
λ = 1	39S-12P	164,902	39704,7	4153200	12090,8	115633	1399920	1515560	92,3703	47,555	1100	12,153	1,30887	1,11058	0,623363
λ = 1,22	39S-12P	192,689	39688,3	4855050	12414,4	129506	1399890	1529400	91,5322	31,7937	1100	12,1527	1,27184	0,945453	0,592641
λ = 1,44	39S-12P	225,115	44104,8	5104100	114421	138911	1399990	1538900	90,9734	38,0267	1100	12,1535	1,20694	0,743432	0,560641
λ = 1,66	39S-12P	234,446	46094,9	5086150	10814,5	139051	1400020	1539070	90,9653	37,6399	1100	12,1538	1,24551	0,681327	0,561156
λ = 1,88	39S-12P	262,904	52844,7	4975040	10091,6	149719	1400080	1549790	90,3394	43,5888	1100	12,1543	1,30442	0,739284	0,509451
λ = 2,11	39S-12P	285,426	56137,5	5084410	9403,65	155508	1400060	1555560	90,0031	48,0853	1100	12,1541	1,28073	0,63574	0,486276
λ = 2,33	39S-12P	309,321	59419,4	5205740	8689,38	162035	1400040	1562080	89,627	53,8734	1100	12,154	1,22928	0,584007	0,465195
λ = 2,55	39S-12P	323,101	61652,4	5240700	8442,62	164717	1400150	1564870	89,4741	55,1305	1100	12,155	1,23949	0,85476	0,445497
λ = 2,77	39S-12P	371,24	58032,1	6397140	9158,78	204858	1399970	1604820	87,2349	40,9981	1100	12,1534	1,18168	0,557017	0,435114
λ = 3	39S-12P	430,727	59749,3	7208910	7570,1	227210	1400200	1627410	86,0385	73,4586	1100	12,1554	1,07838	0,357503	0,405414

Bu çalışmada, farklı amaç fonksiyonları doğrultusunda sekiz farklı motor türü seçilerek bu motorların modelleme ve analizleri gerçekleştirilecektir. Seçilen motor modelleri üzerinden optimizasyon çalışmaları yapılarak, hedeflenen performans kriterlerine en uygun yapıların belirlenmesi amaçlanmaktadır.



3. TASARIM BOYUTLARI VE GEREKÇESİ

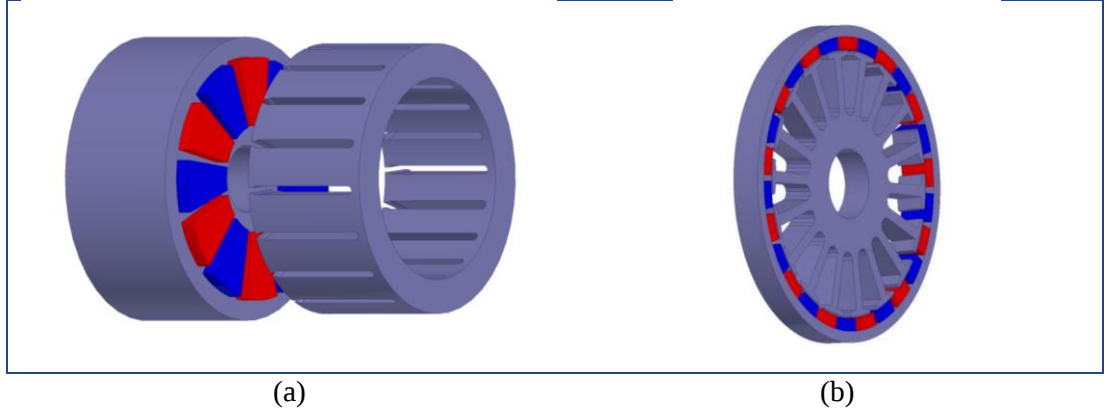
3.1 Kutup-Oluk Konfigürasyonu

Kutup-oluk konfigürasyonu, bir tasarımın önemli bir bileşeni olup bu çalışmanın odak noktasını oluşturmaktadır. Kutup-oluk konfigürasyonunun test edilmesi için, farklı oluk sayısı ve kutup sayısı, çeşitli makine tasarımlarına uygun olarak değiştirilmiştir. Oluk sayısının, sayısal faktörler açısından zengin olması arzu edilir ve ayrıca üç fazlı bir makine olduğu için üç faktörlü olması gerekmektedir. Bu, çeşitli uygulanabilir kutup-oluk konfigürasyonlarını sağlamak için önemlidir. Tasarım aşamasında, birden fazla oluk sayısı kullanılmıştır.

Farklı oluk sayısı, kutup sayısındaki değişikliklerin tork üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır ve bu, çıkış geriliminin frekansı ile doğrudan ilişkilidir. Çalışmamızda, 6 ila 12 kutup arası uygulanabilir kutup sayıları üzerinde çalışılmıştır. Ancak, daha yüksek kutup sayılarında yapılan simülasyonlar, makinelerin giderek yetersiz sonuçlar verdiğini göstermiş ve bu nedenle 12'den fazla kutba sahip makineler dikkate alınmamıştır. Sonuç olarak, nihai kutup sayıları 6, 8, 10 ve 12 olarak belirlenmiştir.

3.2 Akı Yönü

Akı topolojisi, çalışan manyetik akının farklı yönlerini ifade eder ve çalışma akısının dönme eksenine göre yönüne göre adlandırılır. Aşağıdaki Şekil 3.1'de gösterildiği gibi iki ana kategori vardır: eksenel akı ve radyal akı. Üçüncü bir topoloji olan enine akışın yaygınlığı artıyor ancak hala bir yenilik olarak sınıflandırılıyor.



Şekil 3.1 a) Eksenel akılı ve b) Radyal akılı (Kilmartin vd., 2016).

Önerilen tasarım, üretilebilirlik açısından avantajlara sahip olması nedeniyle radyal akılı makine olup, en yaygın ve kanıtlanmış tasarımıdır.

3.3 Stator-Rotor Konfigürasyonu

Elektrikli araçlarda stator ve rotor için geleneksel konfigürasyon, iç rotor topolojiye sahip kalıcı mıknatıslı senkron motorlar, diğer motor topolojilerine göre daha çok tercih edilmektedir. Rotor, statorun içinde yer almaktadır. Rotor sargıları yerine kalıcı mıknatısların kullanılması nedeniyle asenkron motorlara (%92-96) kıyasla daha yüksek verimlilik (%95-98). Bu, genel araç verimliliğini ve menzilini artırır. Daha küçük ve daha hafif bir motor paketine olanak tanıyan kompakt ve yüksek güç yoğunluğu tasarımı. Bu, elektrikli araçlardaki sınırlı alan ve ağırlık kısıtlamaları nedeniyle önemlidir. Yüksek başlatma torku ve iyi alan zayıflatma kapasitesi, çok hızlı şanzımana ihtiyaç duymadan geniş bir hız aralığına olanak tanır. Bu, güç aktarım mekanizması tasarımını basitleştirir.

3.4 Alan Uyarımı

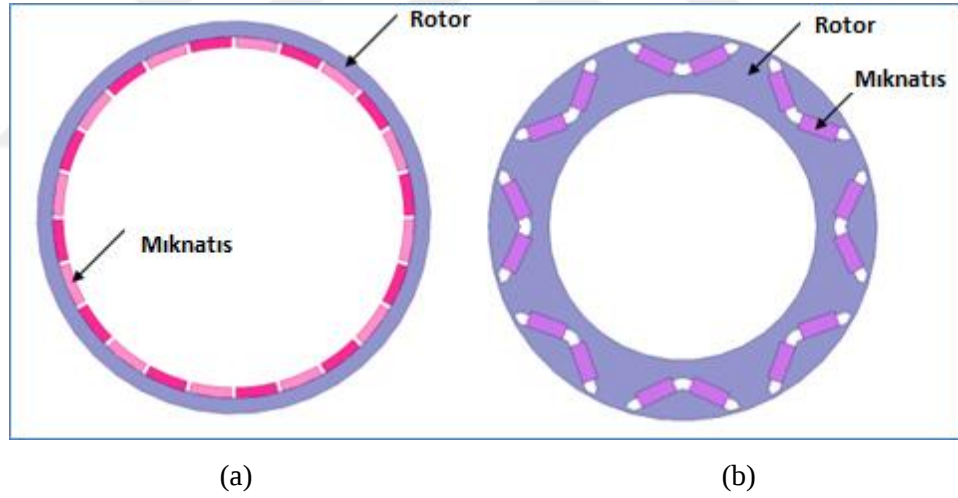
Elektrikli makinelerde alan uyarımı iki ana yöntemle elde edilebilir. Birincisi elektriksel uyarım bu yöntem, solenoide benzer bir manyetik alan oluşturmak için akımın bakır tel bobinlerden geçirilmesini içerir. Manyetik alan kuvveti ve indüklenen Elektromotor Kuvvet (EMK) üzerinde kontrol sağlarken, bobinlerdeki direnç nedeniyle motor kayıplarına neden olmaktadır. Kalıcı Mıknatıs Uyarımı bu yöntemde manyetik alanı oluşturmak için kalıcı mıknatıslar kullanılarak bakır kayıpları ortadan

kaldırılır. Daha verimli olmasına rağmen, çıkış voltajı üzerindeki kontrolü azaltarak dönme hızına voltaj bağımlılığına yol açabilir. Arıza durumlarındaki potansiyel dezavantajlara rağmen, kalıcı mıknatıs uyarımı, makine tasarımındaki verimliliği ve basitliği ile bilinmektedir.

Önerilen tasarım için kalıcı mıknatıs konfigürasyonu kullanılmıştır. Kalıcı mıknatıslı motorların çok verimli olduğu ve daha basit makineler tasarlamak için kullanılabileceği gösterilmiştir.

3.5 Mıknatıs Tipi

Kalıcı mıknatıslı makineler için mıknatıs yönlendirmesi için iki ana sınıf vardır: yüzey kalıcı mıknatıslı (YKM) makineler ve gömülü kalıcı mıknatıslı (GKM) makineler. YPM ve GKM rotorları Şekil 3.2'te gösterilmektedir.



Şekil 3.2 a) YKM makinesi ve b) GKM makinesi (Kilmartin vd., 2016)

Bir iç rotor konfigürasyonu için, gömülü KM alanının en verimli şekilde kullanılmasını sağlanmaktadır. Tasarımlarımızda gömülü KM tasarlanacaktır.

3.6 Mıknatıs Şekli

Mıknatısın şekli, mıknatısın boyutları ve genel geometrisi hakkında bilgi verir. Bu özellik, özellikle bir makinenin veya cihazın tasarımında hayati öneme sahiptir çünkü

mıknatısın şekli, manyetik akışın yönünü etkiler. Bu nedenle, mıknatısın doğru şekli seçilmezse, makinenin performansı olumsuz etkilenebilir.

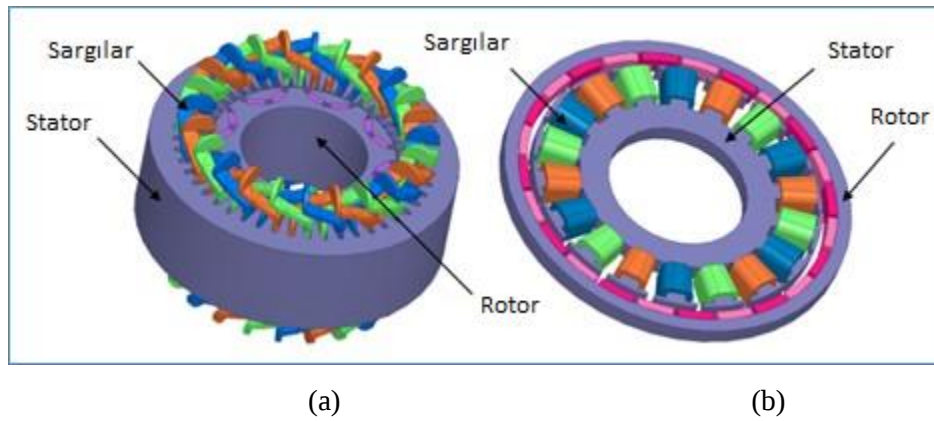
Şekilli mıknatıslar genellikle düz mıknatıslardan farklı bir yapıya sahiptir. Genellikle hafif bir eğriye sahiptirler ve bu, biraz daha düşük güç çıkışıyla bile olsa vuru torkunu azaltmaya yardımcı olabilir. Bu özellik, özellikle hassas makinelerde veya titreşimlerin önemli olduğu uygulamalarda değerlidir.

Tasarım aşamasında kullanılacak mıknatısın şekli, belirli gereksinimlere göre seçilir. Bazı durumlarda, daha fazla manyetik akı yoğunluğu sağlamak için farklı şekiller tercih edilebilirken, diğer durumlarda ise vuru torkunu azaltmak veya manyetik akıyı belirli bir yöne yönlendirmek için özel olarak tasarlanmış şekiller tercih edilebilir.

Tasarımımızda kullanılacak mıknatıs V şekilli bir tiptedir. Bu şekil, belirli bir yönde manyetik akıyı yoğunlaştırmak veya belirli bir alanı etkin bir şekilde kaplamak için idealdir. Ayrıca, vuru torkunu azaltmaya yardımcı olabilir ve makine performansını artırabilir.

3.7 Sarım

Sarım yöntemlerinin iki ana kategorisi vardır: konsantre sarımlar ve dağıtılmış sarımlar. Bu iki farklı sarım yöntemi Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3 a) Dağıtılmış sargılar ve b) Çift katmanlı yoğunlaştırılmış sargılar (Kilmartin vd., 2016)

Konsantre sargılar, stator dişleri üzerine, bobinlerin üst üste binmeyeceği şekilde konumlandırılmıştır. Bu, daha basit bir sargı yapısıyla sonuçlanır ancak manyetik alanda daha yüksek uzay harmoniklerine yol açabilir.

Dağıtılmış sargılar ise üst üste binen bobinlere sahiptir. Bu, daha karmaşık bir sargı yapısıyla sonuçlanır ancak manyetik alandaki uzay harmoniklerinin azaltılmasına yardımcı olabilir.

Konsantre ve dağıtılmış sargılar arasındaki seçim, sargı karmaşıklığı ile manyetik alan kalitesi arasında bir dengeyi içerir. Konsantre sargıların uygulanması daha basittir ancak daha fazla istenmeyen harmoniklere sahip olabilir; dağıtılmış sargılar ise daha karmaşıktır ancak daha temiz bir manyetik alan üretebilir. Sargılar çift katmanlı dağıtılmış tip olarak tasarlanmıştır.

3.8 Hız

KMSM tasarımındaki derecelendirilmiş hız, motorun normal koşullar altında verimli bir şekilde çalışması amaçlanan hızı ifade eder. KMSM'lerde, derecelendirilmiş hız genellikle motorun derecelendirilmiş güç çıkışını ve torkunu elde ettiği hızdır. Bu hız, motorun performans özelliklerini belirlemede ve optimal çalışmayı sağlamada önemlidir.

KMSM'nin derecelendirilmiş hızı, motor tasarımı ve kontrolü üzerinde çeşitli etkilere sahip temel bir parametredir. Genellikle üretici tarafından belirtilir ve belirli bir uygulama için uygun motorun seçiminde önemli bir faktördür. Tasarımımızda kullanacağımız hız aralığı 1000-1200 RPM aralığındadır.

3.9 Rotor

Kalıcı mıknatıslı senkron makinenin rotoru, dış rotor konfigürasyonu için gövdenin dışına konumlandırılmış, makinenin dönen bölümüdür. Rotor, demirin içinde manyetik akı değişmediğinden ve dolayısıyla demir kayıpları minimum olduğundan, lamine edilmemiş elektrikli çelikten yapılmıştır.

Tablo 3.1'de, rotor boyutları gösterilmiştir. Yüksek güç yoğunluğu ve verimliliği elde etmek için optimize edilebilecek temel rotor tasarım parametreleri arasında rotor iç çapı, yığın uzunluğu, uzunluğu ve hava aralığı yer alır. Bu parametrelerin değiştirilmesi KMSM'nin tork, güç ve verimlilik özelliklerini etkilemektedir.

Tablo 3.1 Hesaplanan başlangıç rotorların boyutları

Rotor Boyutları								
Model Sayısı	36S-6P	27S-8P	36S-8P	39S-8P	33S-10P	36S-10P	39S-10P	36S-12P
Dış Çap (mm)	88,09	99,52	97,02	98,7	106,72	108,95	111,19	111,14
İç Çap (mm)	40,21	59,01	57,51	58,52	71,99	73,5	75,02	81,01
Rotor Çelik Yoğunluğu (kg/m ³)	7650	7650	7650	7650	7650	7650	7650	7650
Hava Uzunluğu (mm)	1	1	1	1	1	1	1	1
Paket Uzunluğu (mm)	43,11	38,21	36,74	33,34	29,17	26,2	29,63	25,69

3.10 Stator

Elektrik motorundaki stator, lamine elektrikli çelik saçlardan yapılmıştır. Lamine çelik kullanılır çünkü katı çelik çekirdeğe kıyasla girdap akımı kayıplarını azaltmaktadır.

Tablo 3.2.19 Hesaplanan başlangıç statorların boyutları

Stator Boyutları								
Model Sayısı	36S-6P	27S-8P	36S-8P	39S-8P	33S-10P	36S-10P	39S-10P	36S-12P
Dış Çap (mm)	173,65	178,27	178,59	183,46	188,16	194,21	191,26	192,16
İç Çap (mm)	89,09	100,52	98,02	99,7	107,72	109,95	112,19	112,14
Stator Çelik Yoğunluğu (kg/m ³)	7650	7650	7650	7650	7650	7650	7650	7650
İstiflenme Faktörü	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Paket Uzunluğu (mm)	43,11	38,21	36,74	33,34	29,17	26,2	29,63	25,69

Stator, bakır kayıpların mevcut oluk alanına oranı olan oluk doldurma faktörünün artırılmasıyla potansiyel olarak genişletilebilir. Oluk doldurma faktörünün artırılması, stator oluklarına daha fazla bakırın doldurulmasına olanak tanır ve potansiyel olarak motorun güç yoğunluğunu artırır.

İstifleme faktörü, çelik laminasyonların kalınlığının, laminasyonlar arasındaki yalıtım bağlama malzemesi de dahil olmak üzere toplam kalınlığa oranını ifade etmektedir. Daha yüksek istifleme faktörü, daha az manyetik olmayan malzemeyi ve mevcut alanın daha verimli kullanımını göstermektedir. Yapılan analitik hesaplamalar doğrultusunda, boyutlar da dahil olmak üzere belirli stator özellikleri Tablo 3.2’de statorun iç ve dış çapı ayrıntılı verilmiştir.

3.11 Stator Oluk

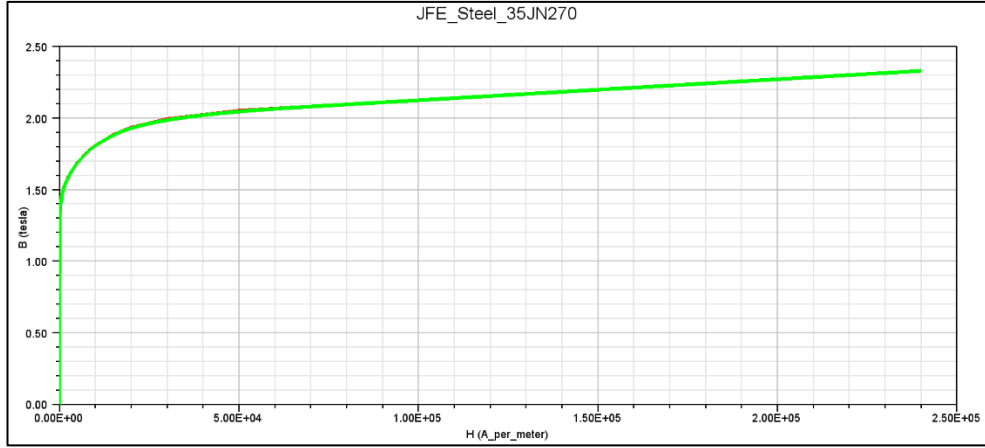
Şekil 2.2’de stator olukları sargıların yerleştirildiği açıklıklardır. Tasarım sürecinde, hem sargıların rahatlıkla yerleştirilebileceği bir boşluk sağlanmış, hem de sargıların ihtiyaç duyduğu maksimum alanın sunulmasına özen gösterilmiştir. Bu şekilde, hem montaj kolaylığı hem de motor performansı optimize edilmeye çalışılmıştır. Tablo 3.3’te belirlenen başlangıç stator oluk boyutları verilmektedir.

Tablo 3.3 Hesaplanan başlangıç stator oluklarının boyutları

Stator Oluk Boyutları								
Model Sayısı	36S-6P	27S-8P	36S-8P	39S-8P	33S-10P	36S-10P	39S-10P	36S-12P
Hs0 (mm)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Hs1 (mm)	1	1	1	1	1	1	1	1
Hs2 (mm)	26,1	24,8	26,5	27,9	27,8	29,5	26,7	28,9
Bs0 (mm)	2	2	2	2	2	2	2	2
Bs1 (mm)	3,2324	3,7129	2,627	2,4412	3,23761	2,9783	2,76742	3,12978
Bs2 (mm)	9,3337	9,5103	7,2639	6,9458	8,54677	8,14013	7,07831	8,18662
Oluk Alanı (cm ²)	169,61	169,83	136,37	136,17	169,422	169,486	136,824	169,087
Dış Genişliği (mm)	7,71	8,56	6,36	5,99	7,49	7,05	6,67	7,09

3.12 Nüve

Rotor ve stator, iki kütüphaneden türetilen çekirdek çelikten yapılmıştır. JFE_Steel_35JN270, elektriksel çelik iletkenliğinin modelini Şekil 3.4’te gösterilen BH eğrisi gösterilmektedir. Çeliğin doygunluğu yaklaşık 1,6T’de gösterilmektedir.



Şekil 3.4 35JN270'in BH Eğrisi

Malzemedeki demir kaybını simüle etmek amacıyla kayıp katsayıları için JFE_Steel_35JN270 kullanılmıştır. Bu özelliklerle birlikte kullanılarak, gerçek dünyadaki çekirdek malzemesi JFE-JN core yönlendirilmemiş çekirdek çeliğini yakından modelleyen bir elektrikli çelik malzeme oluşturulmuştur. JFE-JN core, dönen makine çekirdekleri için yaygın bir malzemedir. Modellenen malzeme, 0,35 mm laminasyon kullanılarak 50Hz'de 1,5T için $\approx 2,6$ W/kg demir kaybına sahiptir. JFE JN-core, daha yüksek kayıplı çekirdek malzemelerinden biraz daha pahalı olan, ancak dönen makine çekirdeklerinde yaygın olarak kullanılan bir çelik sınıfıdır. Rotor ve stator aynı malzemeyi kullanmaktadır, ancak stator 0,94 laminasyon faktörü ile lamine edilmiştir. Tablo 3.4'te çelik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.4 Hesaplanan başlangıç tasarımın çekirdek çelik özellikleri

Çekirdek Çelik Özellikleri	
İletkenlik (Siemens/m)	1851852
Yoğunluk (kg/m ³)	7650
kh	242,17
kc	2,9491

Kh ve Kc değerleri kayıp katsayılarıdır ve simülasyonda sırasıyla histerezis ve girdap akımlarından kaynaklanan elektrik kayıplarını modellemek için kullanılmaktadır. Kh ve Kc'nin her ikisi de ANSYS tarafından BH eğrisinden türetilen birimsiz değerlerdir.

3.13 Sargı

Tel çapı nispeten kalındır ve belirli bir çap değeri ile ifade edilmektedir. Daha kalın bir tel, özellikle yüksek akım uygulamalarında, örneğin batarya şarjı gibi durumlarda, verimliliği artırmaktadır. Daha kalın bir telin daha fazla akımı daha etkili bir şekilde iletebileceği anlamına gelmektedir.

Sarım sayısı, belirli bir sargıda bulunan dönüş sayısını temsil etmektedir. Genellikle bir makinanın çalışma hızına bağlı olarak belirlenir. Örneğin, belirli bir sarım sayısının, 1210 devir/dakika hızında çalışan bir makinede yaklaşık olarak 48 volt RMS (kök ortalama kare gerilim) faz voltajına denk gelecek şekilde hesaplandığı gözlemlenmektedir. Sarım sayısı, makinenin tasarım gereksinimlerine göre ayarlanmaktadır.

Sargılar çift katmanlı dağıtılmış ve konsantre tip olarak tasarlanmıştır. Bu, sargıların iç içe geçmiş iki katman halinde düzenlendiği ve sarımın merkezde yoğunlaştığı anlamına gelmektedir. Bu tip sargılar, mıknatıslı tellerde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

Tablo 3.5 Hesaplanan başlangıç sargı özellikleri

Sargı Özellikleri								
Model Sayısı	36S-6P	27S-8P	36S-8P	39S-8P	33S-10P	36S-10P	39S-10P	36S-12P
Tel Çapı (mm)	1,628	1,829	1,938	1,938	1,829	1,829	1,938	1,829
Sarım Dönüşleri	12	14	10	10	14	14	10	14
İletken Başına Tel Sayısı	3	2	2	2	2	2	2	2
Tel Kesiti (mm ²)	2,081	2,627	2,949	2,949	2,627	2,627	2,949	2,627
Oluk Doluluk Faktörü	58,1832	57,1249	57,3173	57,364	57,1826	57,115	57,149	57,2808
Bakır Özellikleri								
İletkenlik (Siemens/m)	58000000							
Yoğunluk (kg/m ³)	8933							

Tel ve sarım özellikleri, Tablo 3.5'te ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bakır malzeme, ANSYS yazılımının temel kütüphanesinde varsayılan olarak bulunmaktadır ve dönen

makinelerde kullanılan standart bir mıknatıslı telin özelliklerini yansıtmaktadır. Tel, katı, dairesel kesitli ve yalıtımlı bir bakır iletken olarak simüle edilmiştir.

3.14 Kalıcı Mıknatıs

Tasarımında tercih edilen manyetik materyal, Neodimyum-Demir-Bor (NdFeB) alaşımından imal edilen mıknatıslardır. NdFeB temelli mıknatıslar, mevcut ticari piyasada bulunan en güçlü kalıcı manyetik materyallerden biri olarak bilinmektedir. Bu tercih, NdFeB mıknatıslarının yüksek kalıcı manyetik akı yoğunluğu, maliyet-etkinliği ve çeşitli elektrikli makine topolojilerinde geniş bir kullanım yelpazesi sunması gibi avantajlarından kaynaklanmaktadır. Rotor ve mıknatıs boyutlandırması başlığında altında, N42UH mıknatıs tipi belirlenmiştir. Bu belirlenen mıknatıs tipinin özellikleri Tablo 3.6'te detaylandırılmıştır.

Tablo 3.6 Hesaplanan başlangıç mıknatıs özellikleri

Mıknatıs Özellikleri								
Model Sayısı	36S-6P	27S-8P	36S-8P	39S-8P	33S-10P	36S-10P	39S-10P	36S-12P
Mıknatıs Uzunluğu (mm)	37,41	31,57	30,79	31,22	26,5	27	28,2	22
Mıknatıs Kalınlığı (mm)	3,09	3,05	3,15	3,17	3,09	3,11	3,13	3,1
Direnç (Ω m)	1.5x 10 ⁻⁶ /1.3x 10 ⁻⁶							
Mıknatıs Tipi	N42UH-80C							
Mıknatıs Yoğunluğu (kg/m ³)	7500							
Kalıcı Akı Yoğunluğu (Tesla)	1,2157							
Bağıl Geçirgenlik	1,03568							
Koersivite (kA/m)	930							

3.15 Malzeme Boyutu Ve Ağırlığı

Toplam malzeme ağırlığını belirlenmek için KMSM motorunun stator, rotor, sargı ve mıknatıs gibi farklı bileşenleri için kullanılan malzemeler dikkate alınır. Toplam malzeme ağırlığını hesaplamak için tasarımda kullanılan her malzemenin özel boyutlarını ve yoğunluklarını girilmektedir. Tablo 3.7'de belirlenen KMSM

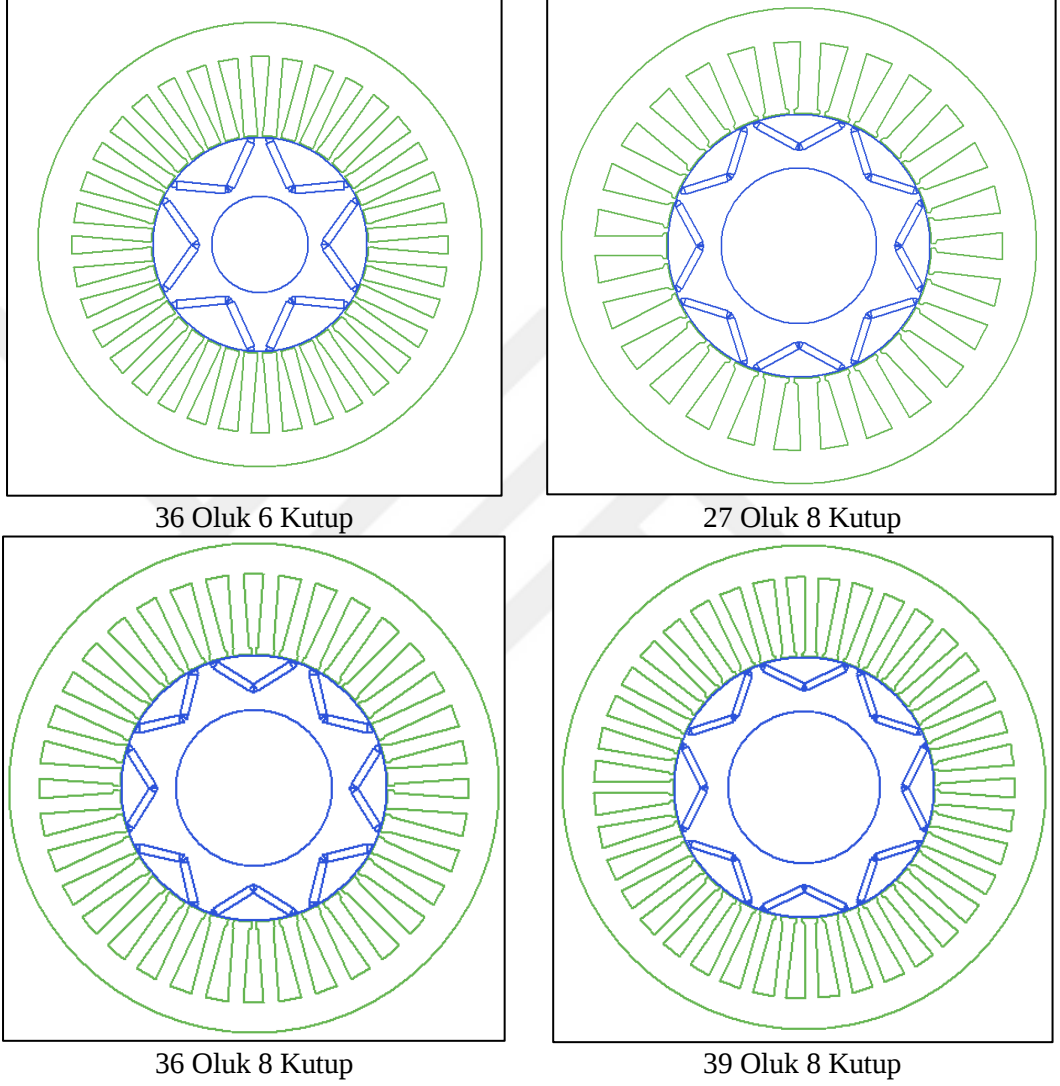
tasarımlarının toplam ağırlıkları verilmiştir. Bu bileşenlerin ağırlıklarının toplamı, motorun genel performansını ve verimliliğini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür.

Tablo 3.2.20 Hesaplanan başlangıç makinelerin malzeme tüketimi

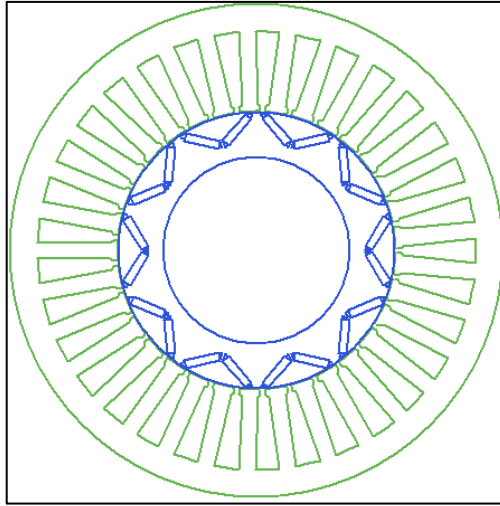
Rotor								
Model Sayısı	36S-6P	27S-8P	36S-8P	39S-8P	33S-10P	36S-10P	39S-10P	36S-12P
Rotor Hacmi (cm3)	169,418	157,7	142,579	134,104	115,984	108,792	128,262	95,14
Rotor Ağırlığı (kg)	1,296	1,206	1,09	1,025	0,887	0,832	0,981	0,727
Stator								
Model Sayısı	36S-6P	27S-8P	36S-8P	39S-8P	33S-10P	36S-10P	39S-10P	36S-12P
Stator Hacmi (cm3)	527,089	451,528	439,585	421,792	363,077	349,134	380,244	318,184
Stator Ağırlığı (kg)	4,032	3,454	3,362	3,22	2,777	2,67	2,908	2,434
Sargı								
Model Sayısı	36S-6P	27S-8P	36S-8P	39S-8P	33S-10P	36S-10P	39S-10P	36S-12P
Bakır Hacmi (kg)	213,44	179,843	185,815	211,838	184,054	186,455	187,803	186,577
Bakır Ağırlık (kg)	1,90668	1,60564	1,65989	1,89235	1,64416	1,66561	1,67765	1,6667
Mıknatıs								
Model Sayısı	36S-6P	27S-8P	36S-8P	39S-8P	33S-10P	36S-10P	39S-10P	36S-12P
Mıknatıs Hacmi (cm3)	29,9	29,43	28,5	26,4	23,88	22	26,15	21
Mıknatıs Ağırlığı (kg)	0,224	0,22	0,213	0,197	0,179	0,165	0,196	0,157
Toplam (kg)	7,459	6,486	6,327	6,34	5,488	5,333	5,763	4,986

3.16 Kutup-Oluk Konfigürasyonu

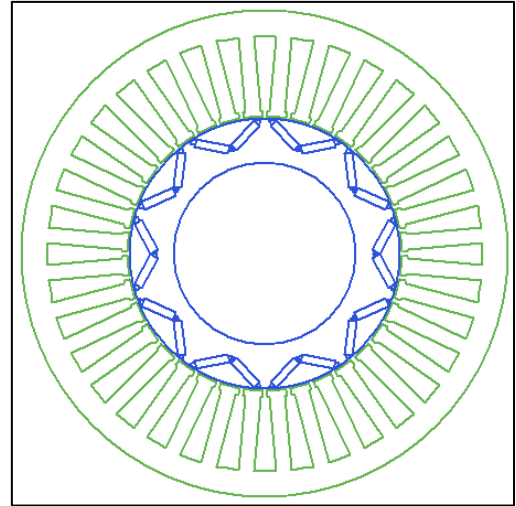
Şekil 3.5’de, önerilen tasarımları göstermektedir. Tasarımda analitik hesaplamalar ve ANSYS ön sonuçlar doğrultusunda oluk ve kutup sayıları belirlendi.



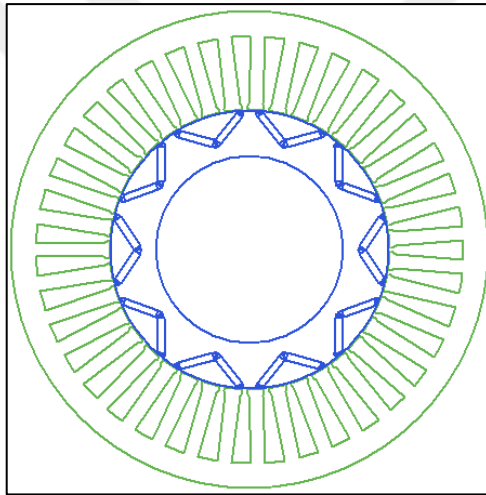
Şekil 3.5 Başlangıç tasarım aşamasında belirlenen makineler



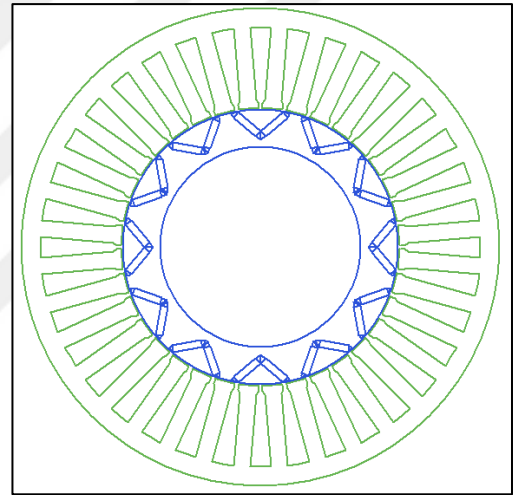
33 Oluk 10 Kutup



36 Oluk 10 Kutup



39 Oluk 10 Kutup



36 Oluk 12 Kutup

Şekil 3.5 Başlangıç tasarım aşamasında belirlenen makineler (Devamı)

3.17 Sürekli Mıknatıslı Motorlarda Kullanılan Malzemeler

1930'lu yıllarda keşfedilen Alnico tipi mıknatıslar alüminyum, nikel, demir ve kobalt alaşımından yapılan bir mıknatıs türüdür. Bu mıknatısların keşfi KMSM yapılarında devrim niteliğindedir. Bu mıknatıs tipinin ayırt edici özelliği olan yüksek Br değerlerinden dolayı günümüzde hala sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak Alnico mıknatısların bazı önemli dezavantajları da vardır. Pahalıdırlar, bu da yaygın kullanımlarını sınırlamaktadır. Ek olarak, mıknatıslanma özelliklerini kolayca kaybetmeye eğilimlidirler ve bu, bazı uygulamalarda sorun teşkil edebilir. Buna karşılık ferrit mıknatıslar Alnico mıknatıslardan daha ucuzdur ve bu nedenle daha yaygın olarak kullanılır. Ferrit mıknatıslar daha yüksek Hc değerlerine sahiptir, bu da

onları demanyetizasyona karşı daha dirençli kılar. Hem Alnico hem de ferrit mıknatıslar, neodim mıknatıslar gibi diğer mıknatıs türlerine kıyasla nispeten düşük mıknatıs enerjilerine sahiptir. Nadir toprak mıknatısları, özellikle neodimyum (NdFeB) ve samaryum-kobalt (SmCo) mıknatısları, diğer kalıcı mıknatıs türlerine kıyasla olağanüstü manyetik güç ve performans sunar. Ancak bunların da bazı dikkate değer sınırlamaları vardır. 1960'larda Samaryum ve Kobalt (SmCo) kullanılarak nadir toprak mıknatıslarının keşfi, mıknatıs teknolojisinde önemli bir ilerlemeydi.

Bu mıknatıslar Alnico ve Ferrit mıknatıslara göre daha yüksek enerjiye ve demanyetizasyon direncine sahiptir. Ancak en büyük dezavantajları kırılganlıklarıdır. 1983 yılında Neodimyum Demir Bor (NdFeB) tipi mıknatısların icadı, nadir toprak mıknatıslarının uygulamalarını daha da genişletti. NdFeB mıknatıslar, önceki tiplere göre 400 kJ/m³'ü aşan daha yüksek mıknatıs enerjilerine ve daha yüksek Br ve Hc değerlerine sahiptir. Ana dezavantajları aynı zamanda kırılganlık ve korozyona karşı koruma ihtiyacıdır. Tablo 3.8'de sürekli mıknatıslı malzemelerinin karşılaştırılması verilmiştir (Ocak, 2021).

Tablo 3.8 Farklı sürekli mıknatıs malzemelerinin karşılaştırılması (Aydın, 2012).

	Ferrite	Alnico	SmCo	NdFeB	
Üretim Yöntemi	Ceramic 8	Alloy	Sm2Co17	Bonded	Sintered
Br, T	0,4	1,25	1,0 - 1,1	0,55 - 0,70	1,25 - 1,35
Hc, kA/m	270	55	600 - 800	180 - 450	950 - 1040
iHc, kA/m	260	55	720 - 2000	210 - 1100	1200 - 1400
(BH) _{max} , kJ/m ³	25 - 32	<44	190 - 240	32 - 88	290 - 400
α_B , %/°C	-0,2	-0,02	-0,03	-0,105	-0,11
α_H , %/°C	-0,27	-0,015	-0,15	-0,4	-0,65
Tc, °C	460	890	800	360	330

Ferrit ve NdFeB tipi mıknatıslar, Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makinelerde (KMSM) yaygın olarak kullanılmaktadır. Ferrit mıknatıslar, 0,4 Tesla kalıcı akı yoğunluğu (Br) değerine kadar üretilebilmekte olup, sinterlenmiş NdFeB mıknatıslar ise 1,0 Tesla ve üzeri Br değerlerinde üretilebilmektedir. 0,5-1,0 Tesla Br değer aralığında ise "plastik mıknatıslar" olarak da bilinen "bağlanmış NdFeB (bonded-NdFeB)" mıknatıslar tercih

edilmektedir. Bu mıknatıslar, mıknatıs malzemesi ile plastik yapıştırıcının uygun oranlarda karıştırılıp preslenmesiyle üretilir. Bu üretim yöntemi, NdFeB mıknatısların gerekli Br seviyesinde üretilmesine olanak tanımakta ve esnek Br seviyeleri nedeniyle bu mıknatısları KMSM'lerde kullanıma uygun hale getirmektedir.

Tablo 3.9 NdFeB türü mıknatısların manyetik özellikleri (Ocak, 2021)

Grade	Remanence(Br)				Coercivity(Hcb)				Intrinsic Coercivity Force(Hcj)		Çalışma Sıcaklığı
	kGs		T		KOe		KA/m		Koe	KA/m	°C
	Nom.	Min.	Nom.	Min.	Nom.	Min.	Nom.	Min.			
N42	13,2	12,6	1,32	1,26	11	10,5	876	836	≥12	≥955	≤80
N45	13,7	13,3	1,37	1,33	11	10,5	876	836	≥12	≥955	≤80
N42M	13,2	12,9	1,32	1,29	12,6	12,2	1003	971	≥14	≥1114	≤100
N45M	13,7	13,3	1,37	1,33	12,8	12,4	1019	987	≥14	≥1114	≤100
N40H	12,9	12,6	1,29	1,26	12	11,5	955	915	≥17	≥1353	≤120
N42H	13,2	12,9	1,32	1,29	12,6	12,2	1003	971	≥17	≥1353	≤120
N42SH	13,2	12,8	1,32	1,28	12,6	12,2	1003	971	≥20	≥1595	≤150
N45SH	13,5	13,3	1,35	1,33	12,8	12,2	1019	981	≥20	≥1595	≤150
N40UH	12,7	12,4	1,27	1,24	12,2	11	971	924	≥25	≥1990	≤180
N42UH	13	12,8	1,3	1,28	12,4	12	987	955	≥25	≥1990	≤180

Sinterlenmiş NdFeB mıknatıslar, çeşitli özellikler ve çalışma sıcaklıkları sunan farklı sınıflarda mevcuttur. Örneğin, sinterlenmiş NdFeB mıknatıslar 1,0 Tesla'dan 1,48 Tesla'ya kadar Br değerleri ile sunulmakta ve 80 ila 200 santigrat derece arasındaki sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Bununla birlikte, 200 santigrat derecenin üzerindeki sıcaklıklarda çalışan motorlarda maliyetinin yüksek olması ve sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılığı nedeniyle Samaryum Kobalt (SmCo) tipi mıknatıslar tercih edilmektedir (Aydın, 2012).

4. VURUNTU TORKU

Son yıllarda, kalıcı mıknatıslı motorlar yüksek performanslı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. PM motor, rotor mıknatısları ve stator olukları arasındaki etkileşim nedeniyle vuruuntu torku üretmektedir.

Vuruuntu torku, genellikle manyetik akı ve stator dişleri ile ilişkili olarak motordaki tork değişimi şeklinde ifade edilmektedir.

Öz endüktansın değişmesi nedeniyle üretilen herhangi bir tork istenmez. Geliştirilen en yaygın tork, bir motorun statoru veya rotoru üzerindeki yarıklardan vuruuntu torku olarak adlandırılır. Vuruuntu torku, bir motor tarafından üretilen torktaki birincil dalgalanma bileşenidir.

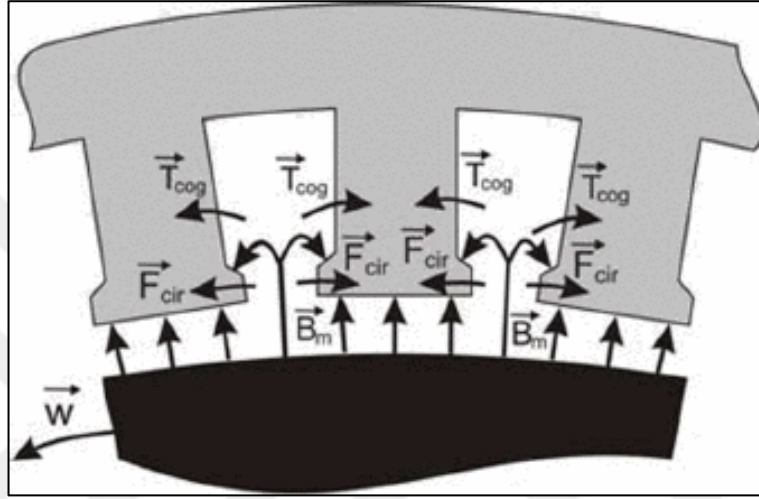
Vuruuntu torku, akımdan bağımsız olarak stator dişlerine veya kutuplarına etki eden rotor mıknatıslarının etkileşimidir, yani rotorun kutupları statorun dişleri ile aynı hizaya geldiğinde, çekimi kırmak için bir kuvvet gerekir ve bu kuvvet vuruuntu torku olarak bilinmektedir (Pillay ve Krishnan, 1991).

Vuruuntu torku, stator dişlerinin kalıcı mıknatıslara göre konuma bağlıdır, çünkü mıknatıslar sürekli olarak minimum isteksizlik konumu ararlar.

Vuruuntu torkunu azaltmaya yönelik yayınlanmış çalışmaların çoğu, stator oluklarını veya rotor mıknatıslarını eğmek, mıknatıs arkını değiştirmek, çatallı dişler, mıknatısların manyetizasyonunu değiştirmek, stator oluk açıklığını değiştirmek ve mıknatısların konumunu değiştirmek gibi motor yapılarını değiştirmeye odaklanmıştır. Bununla birlikte, bu vuruuntu torku azaltma teknikleri genellikle daha zayıf performansa sahip bir motora katkıda bulunmaktadır. Motor yapılarını değiştirmeden, sadece uygun kutup ve oluk konfigürasyonlarını seçerek düşük vuruuntu torku elde etmek mümkündür (Samala, 2018).

Oluklu makine bize hava boşluğu manyetik enerjisinin değişimini yaratan stator anizotropisini (Maddelerin fiziksel ya da mekanik özelliklerinin, yöne bağlı olarak

değişmesi olarak da tanımlanmaktadır) vermektedir. Bu, sistem enerjisini en aza indiriyormuş gibi yapan, yani stator dillerini ve KM'yi hizalamak için çekici kuvvetin (F_{cir}) çevresel bileşinini üretir. Kuvvetin her bir bileşeni, Şekil 4.1'de gösterilen temel vuruntu torku üretir. Olukların ve KM'nin tam hizalanmasının, KM'nin sıfır vuruntu torku ile sonuçlanan temel vuruntu torklarını iptal ettiğini fark edebilmektedir. Bu nedenle, bu konum manyetik olarak ifade edilmektedir (Stamenkovic vd., 2005).

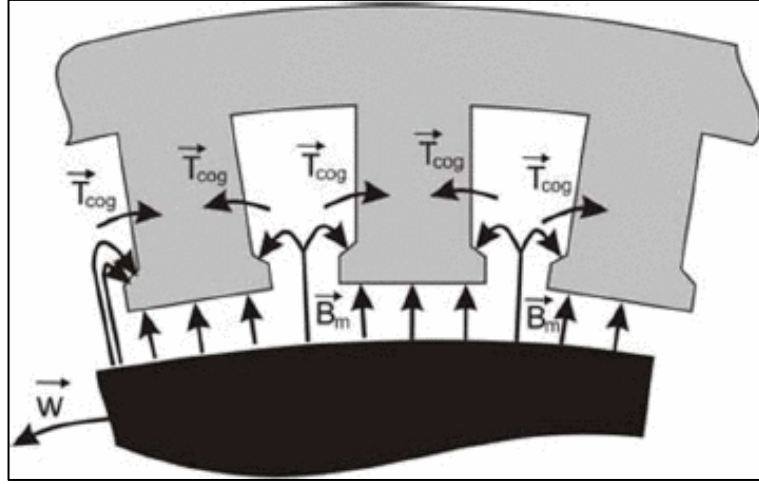


Şekil 4.1 Vuruntu tork üretimi: manyetik olarak kararlı pozisyon (Stamenkovic vb., 2005)

Periyodik bir salınım torku olan vuruntu torku, rotor alanının stator kutupları ile hizalanma eğilimi ile sargılarda akım olmasa bile, rotor döndükçe motor içindeki enerji değişiminden kaynaklanır. Vuruntu torku ve tork dalgalanmasının kombinasyonu, dengesiz tork titreşimine neden olmaktadır. Makinenin çalışmasında ek ve istenmeyen titreşim ve gürültüye neden olmaktadır (Pillay ve Krishnan., 1991).

Bu nedenle, robotlar, sabit disk makine gibi yüksek hassasiyetli konum kontrolünde ve sabit hız kontrolünde kullanıldığında kalıcı mıknatıslı senkron makinelerde, vuruntu torku problemini çözmelidir.

Şekil 4.2'de, kalıcı mıknatıs (KM) ve stator oluklarının hizalanmadığı manyetik olarak kararsız bir konum gösterilmektedir. Bu durumda, sıfır olmayan vuruntu torku, KM'yi sabit bir konuma geri getirme eğilimindedir. Elektromanyetik tork yönünün tersine olduğu için bu tork yönü negatif olarak ifade edilmektedir (Stamenkovic vd., 2005).



Şekil 4.2 Vuruntu tork üretimi: manyetik olarak kararsız pozisyon (Stamenkovic vb., 2005)

Genel olarak, motorun vuruntu torku genellikle rotordaki kalıcı mıknatısların sayısına ve statordaki diş sayısına bağlıdır. Manyetik kutupların ve dişlerin sayısının optimize edilmesi ile mekanik yöntemlerle en aza indirilebilir. Ayrıca, stator dişleri arasındaki geçişleri daha kademeli hale getirmek amacıyla kalıcı mıknatısların eğilmesi veya şekillendirilmesi yoluyla da azaltılabilir. Bu çalışmada, ilk olarak, rotordaki kalıcı mıknatısların sayısı ve oluk kombinasyonu seçilerek düşük vuruntu torku elde edilmesi hedeflenmiştir. İkinci adımda ise mıknatıs açıklığının değiştirilmesi üzerinde durulmuştur (Han vd., 2023).

Motorun vuruntu torku genellikle rotordaki kalıcı mıknatısların sayısına ve statordaki diş sayısına bağlıdır ve manyetik kutupların ve dişlerin sayısını optimize edilebilir. Bu nedenle, kutup ve oluk kombinasyonunda hem teknik hem de ekonomik gereksinimleri karşılamalıdır. Aşağıda oluk ve kutup sayısını 5 şartın sağlanması gerekmektedir (Han vd., 2023).

1. $\frac{N_{s0}}{m}$ faz başına bir dizi eleman yuvası tam olmalıdır.
2. Elektrik açısı $a_{slot} = 120^\circ, a_{slot} = 240^\circ (i = 1 \sim N_{s0})$ olan yuvalar bulunmalıdır.
3. Faz başına kutup başına oluk sayısı 0,25'ten büyük olmalıdır, yani $q \geq 0,25$.
4. Sargı adım faktörü 0,5'ten büyük olmalıdır, $\beta > 0,5$.
5. Sargı katsayısı, 0,85'ten, yani $k_w > 0,85$.

Tablo 4.1’de yukarıdaki 5 koşulu karşılamak için kutup ve oluk gösterilmektedir.

Tablo 4.1 Teknik ve ekonomik gereksinimleri sağlayan kutup ve oluk konfigürasyonu (Han vd., 2023).

2P KUTUP SAYISI	Ns OLUK SAYISI	2P KUTUP SAYISI	Ns OLUK SAYISI
2	3; 9; 15; 21; 27; 33; 39	20	15; 18; 21; 24; 27; 30; 33; 36; 39
4	3; 6; 9; 15; 18; 21; 27; 30; 33; 39	22	18; 21; 24; 27; 30; 33; 36; 39
6	9; 27	24	18; 27; 36
8	6; 9; 12; 15; 18; 21; 27; 30; 33; 36; 39	26	21; 24; 27; 30; 33; 36; 39
10	9; 12; 15; 18; 21; 24; 27; 33; 36; 39	28	21; 24; 27; 30; 33; 36; 39
12	9; 18; 27	30	27; 36
14	12; 15; 18; 21; 24; 27; 30; 33; 36; 39		
16	12; 15; 18; 21; 24; 27; 30; 33; 36; 39		
18	27		

Vuruntu torkunu azaltmak için eşleşme katsayısı $C_{eş}$ ‘in küçük olması ve periyot katsayısı $C_{periyot}$ ’unun büyük olması gerektiği belirtilmiştir.

Denklem 4.1’deki eşleştirme katsayısı verilmiştir (Han vd., 2023).

$$C_{eş} = \frac{N_p \cdot N_s}{LCM(N_p \cdot N_s)} \quad (4.1)$$

$C_{eş}$ ’in minimum değeri; 1 oluk sayısı tek sayı olduğunda ve 2 oluk sayısı çift sayı olduğunda (Han vd., 2023).

Denklem 4.2’ deki dönem katsayısı verilmiştir (Han vd., 2023).

$$C_{periyot} = \frac{N_p}{GCD(N_p \cdot N_s)} \quad (4.2)$$

Mümkün olduğunca küçük bir eşleşme katsayısı ve mümkün olduğunca büyük bir periyodik katsayı seçmeyi önerilmektedir. $C_{eş} = 1$ (tek yuva), eşleşme $C_{eş} = 2$ (çift yuva) ve $C_{periyot} \geq 6$ önerilmektedir (Han vd., 2023).

Tablo 4.1, bu koşulu sağlayan kutup sayısına bağlı olarak karşılık gelen oluk sayısını göstermektedir. Tablo 4.1’de teknik ve ekonomik gereksinimi karşılamakla kalmayıp

aynı zamanda vuruñtu torkunu da azaltan kutup sayısına karşılık gelen oluk sayısını göstermektedir. Öte yandan vuruñtu torkunu azaltmak için miknatisın ve geometrik yapısında birçok başka yöntemler kullanılarak minimum seviyelerde tutulması gerekmektedir (Han vd., 2023).

Diğler literatür çalışmasında vuruñtu torku minumu seviyelerde tutan oluk ve kutup sayısını belirleyen çalışma. Denklem 4.3'te, Vuruñtu torkunu bir fourier serisi açılımı kullanılarak (Hwang vd., 1998);

$$T_{cog}(\theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (T_n \theta_n S_{2n}) e^{jn2\theta} \quad (4.3)$$

Burada Fourier serisi katsayıları T_n , sonlu elemanlar yöntemi gibi analitik veya sayısal yöntemlerle belirlenebilir. Bununla birlikte, T_n 'nin belirli değlerleri aşağıdaki tartışmada gerekli değildir. S_{2n} çarpıklık faktörüdür. Skew kullanılmadığından $S_{2n} = 1$ olur. θ_n Dişlerin harmonik bileşenlerini gösteren bir terim şu şekilde yazılabilir (Hanselman, 2003).

$$\theta_n = \begin{cases} N_s & n_{cog} = q \frac{LCM(N_s, N_m)}{N_m} \\ 0 & \end{cases} \quad (4.4)$$

Burada $LCM(x,y)$ bağımsız değışkenlerinin en küçük ortak katıdır ve q , bir tamsayıdır. n_{cog} , ilk vuruñtu torku harmoniğidir ve vuruñtu torku seviyesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. n_{cog} ne kadar yüksek olursa, ortaya çıkan vuruñtu torku o kadar düşük olmalıdır (Hwang vd., 2006).

Denklem 4.4'de, $LCM(N_s, N_m)$, bir devirdeki vuruñtu torkunun periyodunu temsil eder. Vuruñtu torku seviyesini belirlemek için bir indeks olarak kullanılabilir. Bazı durumlarda, LCM ne kadar yüksekse, vuruñtu torku o kadar az olacaktır (Hwang vd., 1998).

Ek olarak, N_s ve N_m arasındaki en büyük ortak bölen (GCD) de vuruñtu torku seviyesini kontrol etmek için bir indekstir. N_s ve N_m ortak bir faktörü paylaştığında, yani $GCD(N_s, N_m)$ bazı p tamsayılarına eşit olduğunda, her $360/p$ 'de (mekanik derece) ve $n_{cog} = N_s/p$ 'de bir hava boşluğu etrafında yapısal periyodiklik bulunur. Bu nedenle,

GCD ne kadar küçükse, vuruñtu torku o kadar az olacaktır (Hanselman, 2003; Zhu ve Howe, 2000).

Bu çalışmada sunulan sonuçlar aşağıdaki sonuçlara yol açmaktadır (Han vd., 2023; Hwang vd., 1998).

1. Vuruñtu torkunu en aza indirmenin en önemli yolu, n_{cog} değerinin arttırılmasıdır.
2. GCD, vuruñtu torkunu en aza indirmede n_{cog} 'den dan daha az önemli bir role sahiptir. GCD ne kadar küçükse, vuruñtu torku o kadar küçük olur.
3. LCM, vuruñtu torkunu en aza indirmede n_{cog} ve GCD'den çok daha az önemli bir role sahiptir. LCM ne kadar büyük olursa, vuruñtu torku o kadar küçük olur.

Her iki çalışmada birbirini desteklemektedir. GCD ne kadar küçükse, vuruñtu torku o kadar küçük olur. LCM ne kadar büyük olursa, vuruñtu torku o kadar küçük olur. Tablo 4.2'de, LCM, n_{cog} ve GCD değerleri gösterilmektedir.

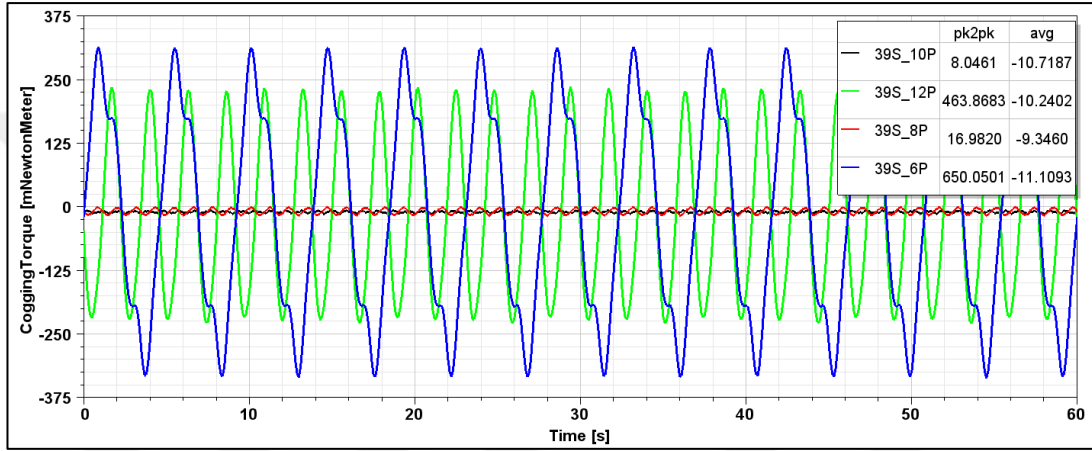
Tablo 4.2 Vuruñtu torkunun oluk kutup konfigürasyonun sonuçları

COGGİNG	n_{cog}	GCD	LCM
18S-6P	3	6	18
27S-6P	9	3	54
36S-6P	6	6	36
39S-6P	13	3	78
27S-8P	27	1	216
30S-8P	15	2	120
36S-8P	9	4	72
39S-8P	39	1	312
30S-10P	3	10	30
33S-10P	33	1	330
36S-10P	18	2	180
39S-10P	39	1	390
36S-12P	3	12	36
39S-12P	13	3	156
45S-12P	15	3	180

Tablo 4.2'de sunulan verilere göre, farklı oluk-kutup konfigürasyonları için LCM, n_{cog} ve GCD değerleri gösterilmektedir. n_{cog} değerinin arttırılmasının, vuruñtu torkunun minimize edilmesinde kritik bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. GCD değeri ne kadar

küçük olursa, Tablo 4.2'de de gösterildiği üzere, vuruñu torku da o kadar küçüktür. Ayrıca, LCM değeri, vuruñu torkunun karşılaştırılmasında kullanılabilecek alternatif bir indeks olarak değerlendirilebilir; LCM ne kadar büyükse, vuruñu torku o kadar düşük olmaktadır.

Bu çalışmada, farklı oluk-kutup motor konfigürasyonları için vuruñu torku değeri, sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılarak simüle edilmiştir. Şekil (4.3) ve (4.6)'da bu simülasyonların sonuçları ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.

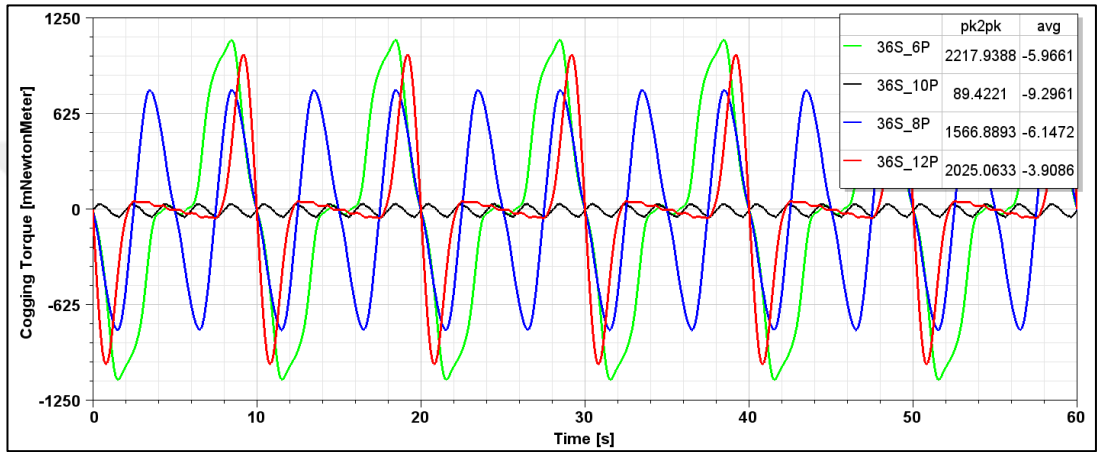


Şekil 4.3 39 oluk ve farklı kutup sayısının vuruñu torkuna etkisi

Şekil 4.3'de 39 oluk ve dört farklı kutup sayısına sahip motorların zamanla değişen vuruñu torku gösterilmektedir. Tork değeri, motorun mekanik özelliklerini ve performansını önemli faktörlerden biridir. Grafikte, farklı kutup sayılarına (6P, 8P, 10P, 12P) karşılık gelen tork dalgalanmaları mavi, kırmızı, siyah ve yeşil çizgilerle ifade edilmektedir. Siyah çizgi ise minimum seviyelerde temsil etmektedir.

Her bir kutup sayısının vuruñu tork profilinde tepeden tepeye (pk2pk) ve ortalama (avg) tork değeri sağ üst köşede belirtilmiştir. 6 kutuplu (6P) model için tepeden tepe değeri 650,0501 mNm ve ortalama değeri -11,1093 mNm olarak gösterilmektedir. En yüksek tepeden tepe değeri, 6 kutuplu motorda en büyük tork dalgalanmasının olduğu göstermektedir. Yüksek olan tepeden tepe değeri, motorun titreşim ve gürültü gibi olumsuz etkilerle karşı karşıya kalabilmektedir. 12 Kutuplu (12P) model için tepeden tepe değeri 463,8863 mNm ve ortalama değeri -10,2402 mNm olarak gösterilmektedir. 12 Kutuplu motorun tepeden tepe değeri, 6 kutuplu motordan daha düşük olmasına rağmen, yine de önemli bir dalgalanma göstermektedir. Bu durum,

tork kararlılığının 6 kutuplu modele göre orta düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır. 8 kutuplu (8P) model için tepeden tepe değeri 16,9820 mNm ve ortalama değeri -9,3460 mNm olarak gösterilmektedir. 8 kutuplu motorda tepeden tepe değeri oldukça düşüktür. Tork dalgalanmasının minimize edildiğini ve bu konfigürasyonun daha pürüzsüz bir çalışma sağlayabileceğini göstermektedir. Bu değer motorda daha az titreşim ve sessiz bir çalışma göstermektedir. 10 kutuplu motorun tepeden tepe değeri 8,0461 mNm ve ortalama değeri -10,7187 mNm olarak gösterilmektedir.



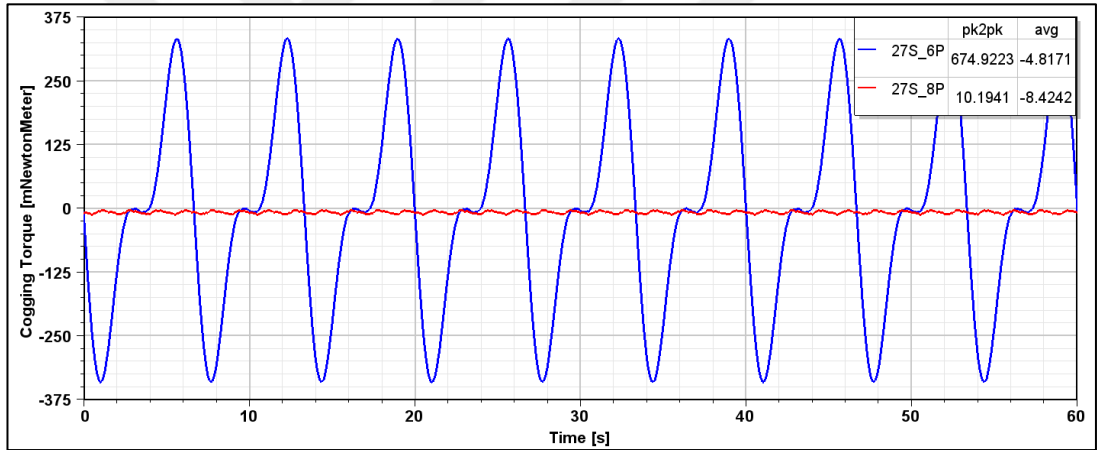
Şekil 4.4 36 oluk ve farklı kutup sayısının vuruntu torkuna etkisi

Şekil 4.4’te farklı kutup sayısının sahip 36 oluklu motorların vuruntu torkunun zamana bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. Şekilde her bir kutup sayısı için tork eğrileri renklerle ayrılmıştır. 6 kutuplu motor (yeşil), 8 kutuplu motor (mavi), 10 kutuplu motor (siyah) ve 12 kutuplu (kırmızı). Tepeden tepe değerleri, her bir kutup sayısına sahip motor için vuruntu torkunun en yüksek ve en düşük noktaları arasındaki farkı ve vuruntu torku genliğini göstermektedir. Bu değerler, sistemdeki mekanik titreşimlerin büyüklüğünü ve tork dalgalanmalarını doğrudan etkilemektedir.

Tepeden tepe değeri kutup sayısı azaldıkça artmaktadır. 6 kutuplu motor için tepeden tepe değeri oldukça yüksek bir seviye olan 2217,94 mNm ve ortalama değeri -5,9691 mNm olarak gösterilmektedir. Bu motorun yüksek genlikli vuruntu torkuna maruz kaldığını ve dolayısıyla daha fazla mekanik titreşim ve tork dalgalanması yaşadığını gösterir. 8 kutuplu motorda tepeden tepe değeri 1566,89 mNm’ye düşmekte ve vuruntu torku azalmakta, fakat hala nispeten vuruntu torkunun yüksek olduğu gözlenmektedir.

10 kutuplu motorun tepeden tepe değeri 89,42 mNm ve ortalama değeri -6,1472 mNm olarak gösterilmektedir. Tork değerinin oldukça düşük bir seviyeye düşerek, tork dalgalanmalarının büyük ölçüde azaldığını ve motorun daha pürüzsüz bir şekilde çalıştığını göstermektedir. 12 kutuplu motor için tepeden tepe değeri 2025,06 mNm ve ortalama değeri -3,9086 mNm olup, 12 kutup sayısının 6 kutuplu motora kıyasla düşük tork dalgalanmasına sahip olduğu fakat 10 kutup ve 8 kutuplu motordan daha büyük olduğu gösterilmektedir.

Tepeden tepe değerleri incelendiğinde 10 kutuplu motorun, vuruntu genliğini belirgin şekilde minimum seviyelerde olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumda motorun titreşim seviyelerinin düşük olduğunu ve mekanik kararlılığının sağlandığını göstermektedir.



Şekil 4.5 27 oluk ve farklı kutup sayısının vuruntu torkuna etkisi

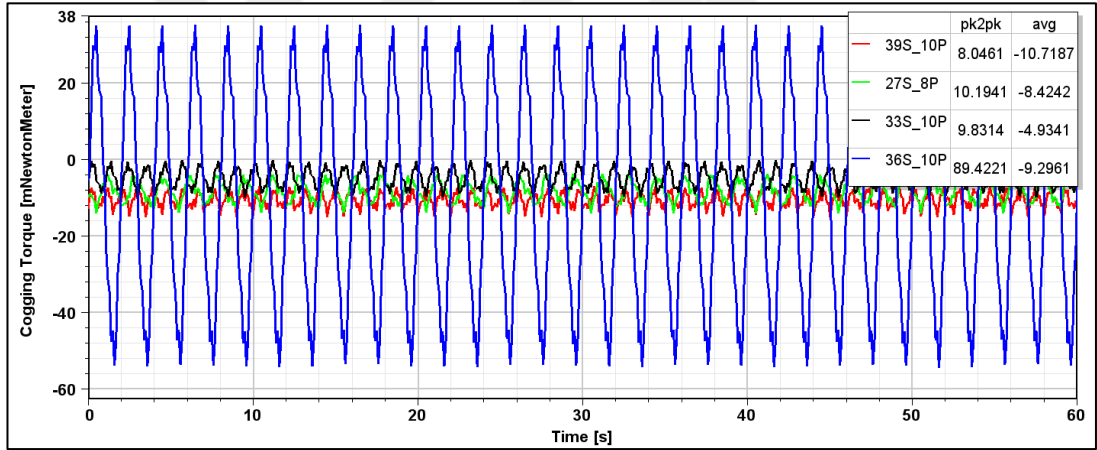
Şekil 4.5’de 27 oluk ve farklı kutup sayısının vuruntu torkunun zamana bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. İki farklı motor tasarımına ilişkin vuruntu torku verileri mavi ve kırmızı renklerle gösterilmektedir. Mavi çizgi, “27S-6P” konfigürasyonu temsil etmektedir. Kırmızı çizgi “27S-8P” diğer konfigürasyonu temsil etmektedir. Grafiğin sağ köşesinde iki konfigürasyona ait tepeden tepe değeri ve ortalama değeri yer almaktadır.

27S-6P konfigürasyonu için tepeden tepe değeri 674,9223 mNm ve ortalama değeri -4,8171 mNm olarak gösterilmektedir. Bu motorun vuruntu torkundaki salınımın oldukça yüksek olduğu göstermektedir. Dolayısıyla, motorun çalıştığı düşük hızlarda

daha fazla titreşim ve düzensizlik yaşanabileceği anlamına gelmektedir. Bu durum, motorun performansını ve olumsuz etkileyebilir, çünkü vuruntu torku motorun başlangıç anındaki hareketini zorlaştırabilir ve genel verimliliğini azaltabilir.

27S-8P motor konfigürasyonu için tepeden tepe değeri 10,1941 mNm ve ortalama değeri -8,4242 mNm olarak gösterilmektedir. Dalgalanma oldukça küçük ve motorun daha düzgün bir tork karakteristiğine sahip olduğunu ve düşük hızlarda çalıştığında daha az titreşim göstereceğini belirtir. 27S-8P motor konfigürasyonu, daha az vuruntu torkuna sahip olduğundan, daha stabil ve verimli bir çalışma sergileyebilir.

Vuruntu torkunu tepeden tepe değeri incelendiğinde 27S-8P motor konfigürasyonunun 27S-6P motor konfigürasyona kıyasla vuruntu torkunun daha az ve iyi bir performans çıkabilmektedir.



Şekil 4.6 Farklı oluk ve kutup sayısının vuruntu torkuna etkisi.

Şekil 4.6’da farklı oluk ve kutup sayılarının vuruntu torku üzerindeki etkisi zamana bağlı olarak gösterilmektedir. Grafikte dört farklı konfigürasyona ait vuruntu torku zamanla birlikte gösterilmiş olup, her bir konfigürasyon farklı renklerle temsil edilmiştir. Kırmızı (39S-10P), yeşil (27S-8P), siyah (33S-10P) ve mavi (36S-10P). Y eksen, vuruntu torkunu (Mili newton metre cinsinden) ifade ederken, X eksen zaman eksenidir (saniye cinsinden). Farklı konfigürasyonların tepeden tepeye tork ve ortalama değerleri vuruntu torkları grafiği üzerinde ayrıca verilmiştir.

Farklı oluk kutup konfigürasyonların genel değerlendirmesinde, 36S-10P konfigürasyonu (mavi eğri) diğerlerine kıyasla çok daha büyük bir tepeden tepe 89,4221 mNm değerine sahiptir. Bu durum, motorun çalışma esnasında önemli ölçüde tork salınımını yaşayacağını ve bu salınımın motorun verimliliği üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceğini göstermektedir. Diğer konfigürasyonlarla yapılan karşılaştırma 39S-10P konfigürasyonu tepeden tepe 8,0461 mNm düşük bir değere sahip olup, bu durum motorun daha az salınım yaşadığını ve dolayısıyla daha stabil bir çalışma sağladığını ortaya koymaktadır.

Tepeden tepe tork değerlerinin analizi, elektrik motorlarının tasarımında önemli bir yer tutmaktadır. Farklı oluk ve kutup sayısının vuruşu üzerinde etkileri, motorun performansını optimize etme ve belirli uygulamalar için en uygun konfigürasyonun seçilmesi konusunda yol göstermektedir.

Tablo 4.3 Farklı oluk ve kutup sayısının vuruşu torkunun tepeden tepeye ve ortalama değerleri

Oluk-Kutup Sayısı	Tepeden tepeye(mNm)	Ortalama(mNm)
36S-6P	2218	5,9
36S-8P	1567	6,1
36S-10P	89,4	9,3
36S-12P	2025	3,9
39S-6P	650	11,1
39S-8P	16,9	9,3
39S-10P	8	10,7
39S-12P	463,8	10,2
27S-6P	674,9	4,8
27S-8P	10,2	8,4
33S-10P	9,8	4,9

Tablo 4.3'te analiz edilen motorlar için vuruşu torkunun tepeden tepeye ve ortalama değerleri içermektedir. Sonuçlar, 39 oluk ve 10 kutup (39S-10P) konfigürasyonuna sahip motorun, tepeden tepeye vuruşu torku açısından en düşük seviyede olduğunu bir motor yapısı olarak öne çıkmaktadır. Bu konfigürasyon, Tablo 4.2'deki verilerle de uyumlu olarak, en düşük vuruşu torkunu sergilemiştir. Vuruşu torkunun rotor üzerindeki kalıcı mıknatıs sayısı ve statordaki oluk sayısı ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle n_{cog} değerinin artırılmasının vuruşu torkunu azaltmada en etkili yol olduğu, GCD değeri ne kadar küçük olursa vuruşu torkunun da o kadar düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, LCM değerinin artmasıyla vuruşu torkunun

da azaldığı tespit edilmiştir. Bu üç parametrenin vuruntu torkuna olan etkileri değerlendirildiğinde, 39 oluk ve 10 kutup konfigürasyonun en düşük vuruntu torkunu sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.



5. OPTİMİZASYON

5.1 Elektrik Makine Tasarım Problemi

Elektrikli makinelerin tasarımında iki farklı aşamadan oluşmaktadır. Boyutlandırma hesabı aşaması ve doğrulama hesabı aşaması.

Boyutlandırma, malzeme seçimini, topolojiyi ve makine tasarım teknik şartnamelerinden başlayarak tüm geometrik parametrelerin hesabını içerir. Makine performans endeksleri ve geometrik boyutlar arasındaki ilişkiler oldukça ilgili (ve doğrusal olmayan) olduğundan, ikincisini birincisinden ayırt etmek için bir dizi ters çevirme fonksiyonu üretmek imkansızdır:

$$p_i = f_i(X) \quad i = 1, n \quad (5.1)$$

p_i , tasarım özelliklerinden elde edilen performans endeksidir

X , geometrik değişken ve malzeme özellikleri vektörüdür

f_i , ilgili (doğrusal olmayan) işlevdir

Genel olarak, p_i 'yi sağlayan birden fazla değişken vektör X bulunabilir. Ayrıca, belirli bir elektrikli makine türü için tasarım çözümleri (örneğin, bir endüksiyon motoru için birleşik güç faktörü) her zaman mevcut olmayabilir. Klasik, optimal olmayan tasarım yaklaşımında, tüm tasarım gereksinimlerini karşılamasa bile, bunların çoğunu sağlayan potansiyel bir X çözümü bulabilmektedir. Optimum tasarım ise, tüm uygulanabilir değişken değerlerinin önemli bir kısmını dikkate aldıktan sonra, belirli bir optimum kriteri (örneğin, minimum başlangıç maliyeti, ağırlık veya maksimum verimlilik) karşılayan en iyi çözümü seçmektedir.

Geometrik değişkenler vektörünü belirlemek amacıyla f_i fonksiyonlarının tersleri kabul edilmediğinden, elektrik ve manyetik gerilmeler (akım yoğunluğu, A/m^2 ; doğrusal akım yüklemesi, A dönüşleri/m; akı yoğunluğu, T ; kesme rotor gerilimi,

N/m²; vb.) geçmiş deneyimlere dayalı olarak seçilmektedir. Ayrıca, hava boşluğu, oluk açıklığı veya yarık kama kalınlığı gibi belirli oluk geometrisi parametreleri de verilmiştir. Tüm geometrik parametreler, elektrik yasaları (örneğin, Maxwell denklemleri) ve geometrik ilişkiler kullanılarak hesaplanır. Elektrik ve manyetik gerilmeler keyfi olarak belirlendiğinden, geometrik değişkenler vektörünün (X) tasarım özelliklerini (pi) karşılayacağının garantisi bulunmamaktadır. Bu nedenle, tasarım sürecinde performansın doğrulanması zorunludur.

Doğrulama hesabı şunları içermektedir (Boldea ve Tutelea, 2009):

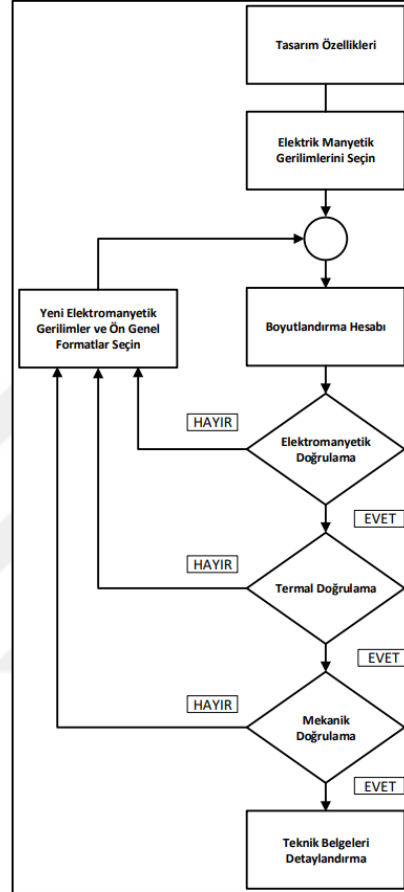
- Elektromanyetik doğrulamalar
- Termal doğrulamalar
- Mekanik doğrulamalar

Genel olarak, pi performansını yerine getirmek için boyutlandırma hesabının birkaç kez yeniden yapılması gerekir. Böylece geometrik boyutlandırma, klasik bir tasarımda bile yinelemeli olarak bulunur. Yineleme sayısı, her doğrulama hesabı rutininden sonra elektrik/ manyetik gerilimleri değiştirmek için seçilen stratejiye bağlıdır. Yineleme sayısını azaltmak için, elektrik/manyetik gerilim değişiklikleri ile geometrik parametre değişimleri arasında bir korelasyon kurulmalıdır. Bununla birlikte, “tasarımın gidişatını hisseden” oldukça deneyimli bir tasarımcı dışında yineleme sayısı yüksek olmaya devam etmektedir.

Şekil 5.1’de klasik bir tasarım yaklaşımının aşamaları gösterilmektedir. Boyutlandırma ve doğrulama hesapları bilgisayarlardır, ancak elektrik/manyetik gerilmelerin ve ilk geometrik parametrelerin seçimi hala tasarımcı tarafından yapılır. Tasarım özellikleri çok kısıtlayıcıysa, bir çözüm bulmak ya çok sıkıcı ya da imkansız olabilir. Aksine, düşük seviyeli makineler için, aynı maliyetle daha düşük maliyetli veya iyi performanslı konfigürasyonlar elde edilebilir.

Şekil 5.1’de optimal bir tasarımın aşamaları gösterilmektedir. Optimum tasarım özellikleri, genel olarak, minimum performans gereksinimlerini ve nesnel bir işlevi içerir. İlk elektromanyetik gerilimler ve geometrik parametreler ya tasarımcı tarafından belirlenir ya da belirli bir alan içinde özel bir rutin aracılığıyla rastgele

oluşturur. Boyutlandırma ve parametre hesabı klasik tasarımlarda olduğu gibi yapılır ve uygun olmayan her performans indeksi için amaç fonksiyonuna bir ceza eklenir. Ceza katsayıları yeterince yüksekse, gereksinimleri nihai tasarım çözümünde sağlanacaktır (Boldea ve Tutelea, 2009).



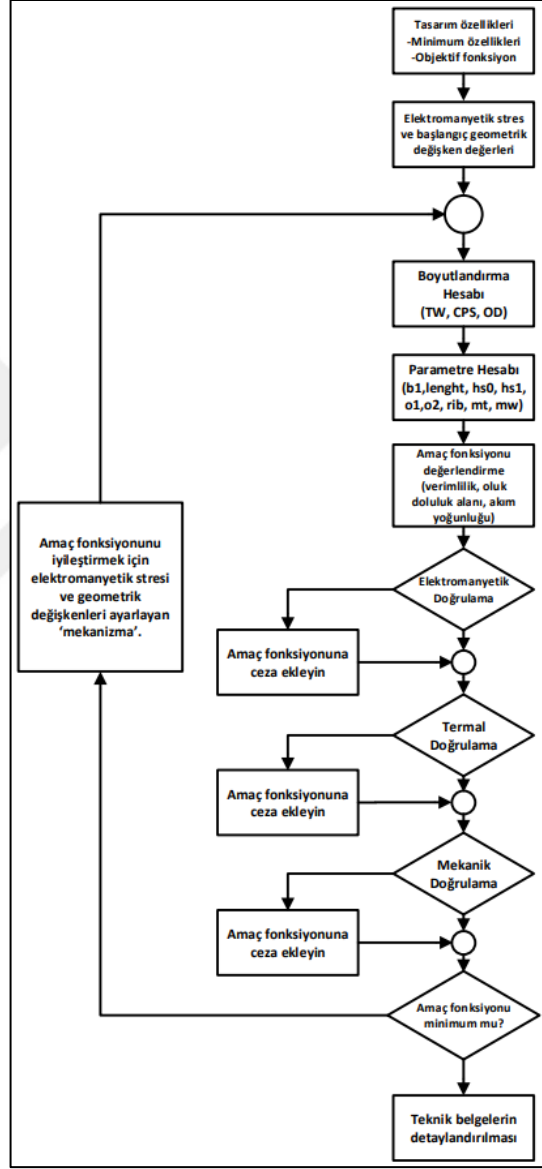
Şekil 5.1 Klasik tasarım akış şeması (Boldea ve Tutelea, 2009)

Minimum amaç fonksiyonu değerinin tespiti ve her yineleme döngüsünden önce elektromanyetik gerilimlerin ve ilk geometrik değişkenlerin yeni değerlerinin seçimi, büyük ölçüde amaç fonksiyonu optimum arama yöntemine bağlıdır (Boldea ve Tutelea, 2009).

5.2 Optimizasyon Metotları

Optimizasyon için matematik, bilim ve ekonomi açısından birçok tanım vardır. Kısa bir tanım verilmiştir (Rao, 2019).

“Optimizasyon, belirli koşullar altında en iyi sonuçları elde etme eylemidir. ”Elektrikli makineler için optimizasyon minimum üretim maliyeti ile belirli bir kritere göre en iyi makine (sürücü) performansını elde etmek için makine (sürücü) tasarım sürecinde uygulanabilir veya sürücü/jeneratör kontrolünde kullanılabilir (Boldea ve Tutelea, 2009).



Şekil 5.2 Optimal tasarım akış şeması (Boldea ve Tutelea, 2009)

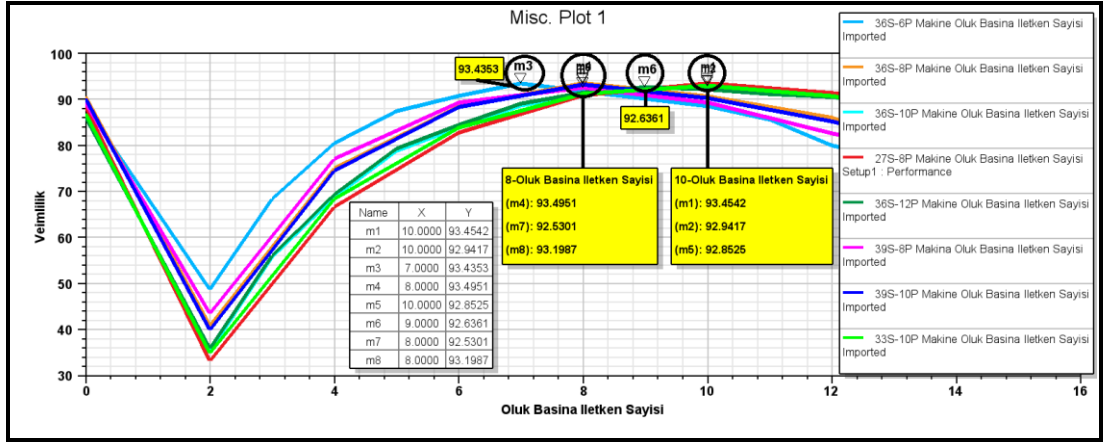
İlk sorun, makineyi tasarlamak ve üretmek, büyük ölçekli bir optimizasyon sürecidir. Optimizasyon süreci, yalnızca bir optimizasyon kriteri ile ilişkili bir anlama sahiptir. Elektrikli makine tasarımları için optimizasyon kriteri, üretim maliyetini düşürmek ve elektrikli makine performansını iyileştirmek veya her ikisini aynı anda yapmak

olabilir. Üretim maliyeti, aşağıdakileri içeren karmaşık bir yapıya sahiptir (Boldea ve Tutelea, 2009).

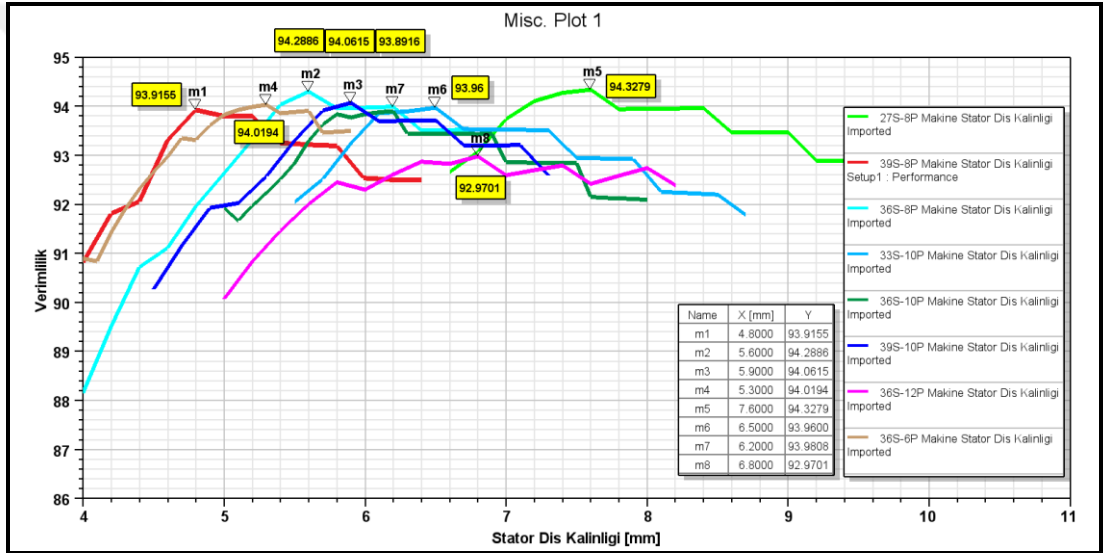
5.2.1 Parametrik Analiz

Bir sistemin veya çalışma koşullarının bir parçası olan sayısal veya diğer ölçülebilir bir faktör, bir parametre olarak adlandırılır. Parametreler, bir sistemi tanımlamak veya performansını, durumunu veya koşulunu değerlendirmek için gerekli veya önemli olan bir sistemin parçalarıdır. Denklem modelleme hareketinin parametreleri, sistem içindeki akışkanların mekaniğini, kütlelerini, boyutlarını, şekillerini ve yoğunluklarını içerebilir. Duyarlılık analizi olarak da bilinen parametrik analiz, çeşitli geometrik veya fiziksel parametrelerin veya her ikisinin bir sorunun çözümü üzerindeki etkisini araştırır. Parametrik analiz, bir kontaktördeki hava boşluğu uzunluğunun manyetik kuvvet üzerindeki etkisini incelemek için tasarım keşfi için çok önemli bir araçtır. Mühendisler ve tasarımcılar, Ansys Maxwell simülasyon çözümleri sayesinde çeşitli kullanım durumlarına yönelik geniş bir parametrik analiz araç seti elde ederler. Zaman parametreleri, geometrik veya fiziksel parametreler ve analiz senaryoları tek veya çoklu parametrik olabilir. Ansys Maxwell yazılımı kullanıcıları, akışkanlar ve termal performans, elektromanyetik, mekanizma hareketi, vibro-akustik, yapısal analizler ve çok sayıda alanda parametrik çalışmalar yapabilmektedir. Parametrik analiz, kullanıcı tarafından tanımlanan çözüm senaryolarına dayanarak "rafine edilmemiş" çözümler üretir. Bu sonuçların daha sonra işlenmesi gerekir, böylece en iyi çözümü veya genel bir tasarıma ulaşılabilir (URL-2, 2024).

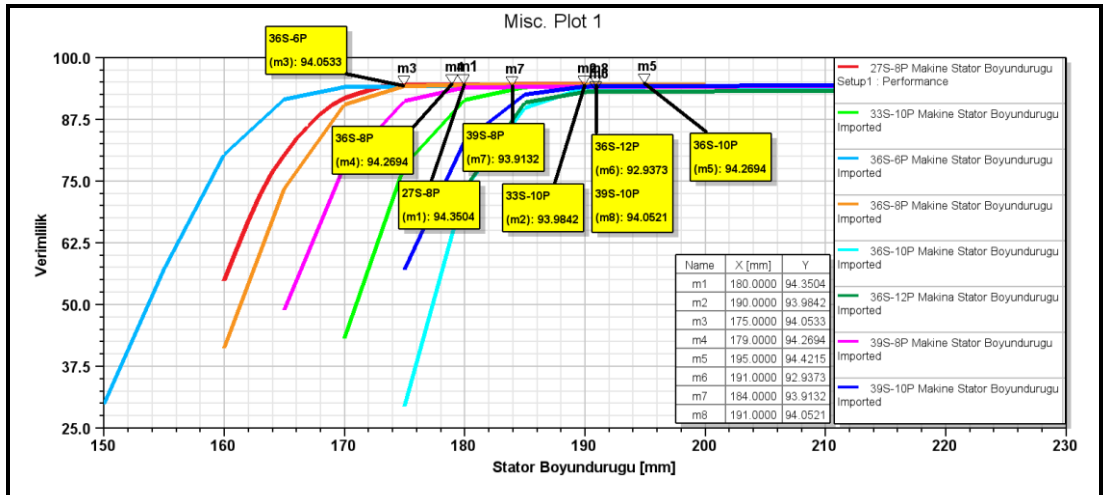
Parametrik analiz, tasarlanan motorları karşılaştırmak için üç farklı çalışma koşulu altında kullanılmıştır. Her motor modelinin stator boyunduruğu, stator dış kalınlığı ve oluk başına sarım sayısı nasıl etkilendiğini incelenecek. Analizde kullanılan oluk başına sarım sayısı, stator boyunduruğu ve stator dış boyutları Şekil (5.3) ve (5.5)'te verilmiştir. Her model için en iyi verimlilik ve performansa dayalı parametrik analiz sonuçları incelenmiştir. Son olarak, prototip için en iyi parametrik analiz sonucu seçilecektir.



Şekil 5.3 Farklı oluk-kutup konfigürasyonlarının oluk başına iletken sayısının parametrik analizi



Şekil 5.4 Farklı oluk-kutup konfigürasyonlarının stator dış kalınlıklarının parametrik analizi



Şekil 5.5 Farklı oluk-kutup konfigürasyonlarının stator boyunduruğunun parametrik analizi

Belirlenen motor modelleri üzerinde, üç temel parametre kapsamında kapsamlı bir parametrik analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecinde, toplamda 24 farklı stator boyunduruğu, stator dış kalınlığı ve oluk başına düşen sarım sayısı incelenmiş ve bu parametrelerin en verimli değer aralıkları belirlenmiştir. İlk tasarım aşamasındaki verilerle parametrik analiz sonuçları karşılaştırılarak, analiz sürecinde bu parametrelerde meydana gelen değişimler tespit edilmiştir. Tablo 5.1'de, parametrik analiz sonrası gözlemlenen parametre değişimlerine ilişkin detaylı bilgilere yer verilmektedir.

Tablo 5.1 Parametrik analiz sonrası parametre değişimleri

Oluk Kutup Konfigürasyonu	İlk Tasarım				Parametrik Tasarım			
	Stator boyunduruğu	Stator dış kalınlığı	Oluk başına düşen sarım sayısı	Verim	Stator boyunduruğu	Stator dış kalınlığı	Oluk başına düşen sarım sayısı	Verim
36S-6P	172,75	5,6	10	88,5095	175	5,3	7	94,0533
27S-8P	178,27	8,56	14	88,55	180	7,6	10	94,3504
36S-8P	178,59	6,36	10	90,6325	179	5,6	8	94,2694
39S-8P	183,46	5,99	10	89,2759	184	4,8	8	93,9132
33S-10P	188,16	7,49	14	87,0033	190	6,5	10	93,9842
36S-10P	194,21	7,05	14	86,7289	195	6,2	10	94,2694
39S-10P	191,26	6,67	10	90,2439	191	5,9	8	94,0521
36S-12P	192,16	7,09	14	86,2386	191	6,8	9	92,9373

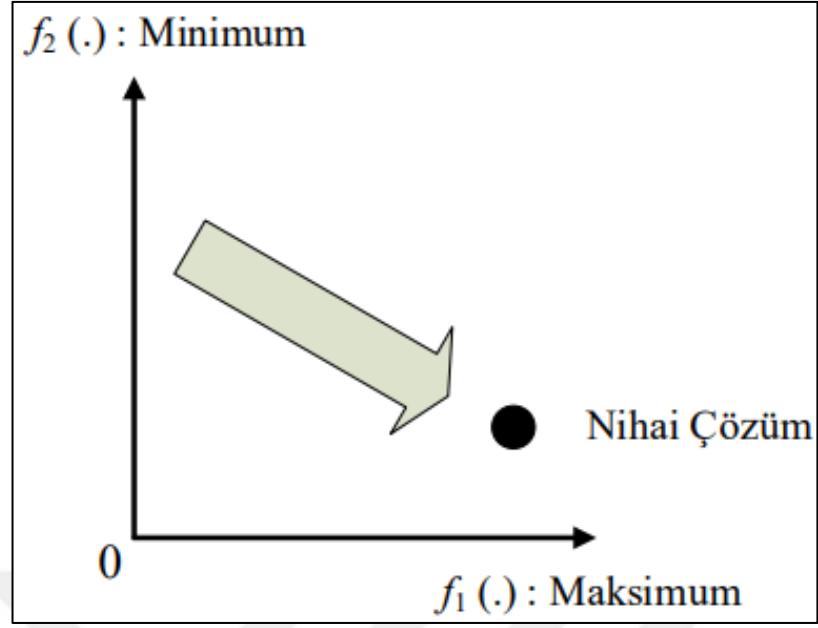
Bu çalışmada, elektrik makinelerinin verimliliği üzerindeki etkileri incelenmek üzere üç farklı parametre ele alınmıştır. Bu parametreler oluk başına iletken sayısı, stator dış kalınlığı ve stator boyunduruğu araştırılmıştır. Bu parametrelerin motor performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir parametrik analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda, her bir parametre için optimum değerler belirlenmiş ve bu parametrelerin motorun çıkış gücüne, verimine, tutma torkuna ve kayıplara olan etkileri dikkate alınarak, en uygun parametre değerleri saptanmıştır. Parametrik analizlerin elektrik makinelerinin çok geniş bir çalışma aralığında etkin bir şekilde simülasyon sonuçları vermiştir. Bu bağlamda, parametrelerin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, elektrik makinelerinin genel performansını ve verimliliğini

artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Makine tasarımı ve performans iyileştirmelerinde parametrik analizin önemini vurgulamaktadır.

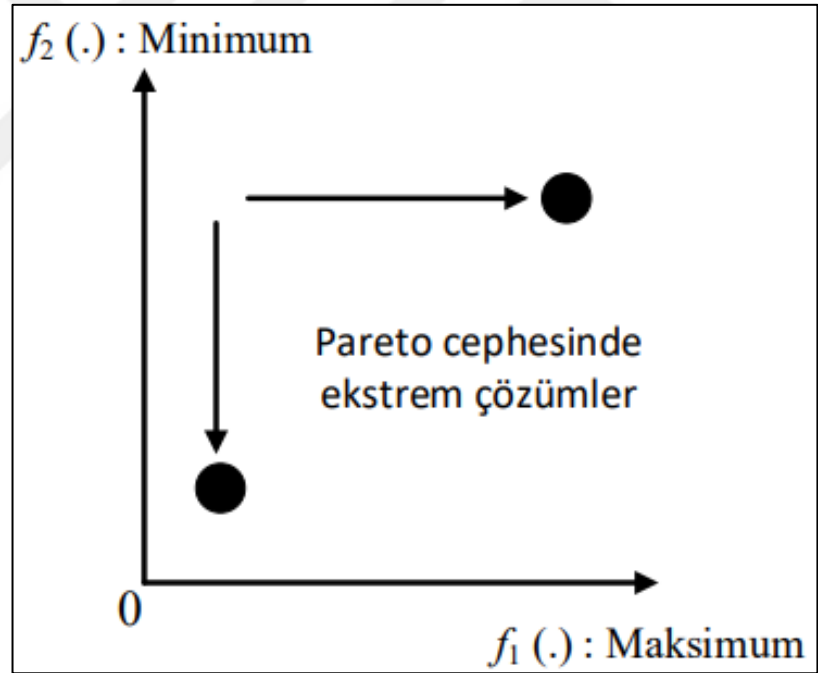
5.2.2 Çok Amaçlı Genetik Algoritma

Genetik algoritmalar genellikle tek bir amaca yönelik optimizasyon problemleri için kullanılır. Ancak, gerçek dünyadaki birçok problem birden fazla amaç fonksiyonuna sahiptir. Bu durumda, genetik algoritmaların bu amaç fonksiyonlarını tek bir uygunluk fonksiyonunda birleştirerek ele alması gerekir. Eğer her bir amaç fonksiyonuna sabit bir ağırlık verirse, genetik algoritmanın arama yönü, çok boyutlu amaç uzayında sabitlenir. Şekil 5.6'da bu durum gösterilmektedir: burada, $f_1(.)$ maksimize edilecek ve $f_2(.)$ minimize edilecek bir amaç fonksiyonudur. Şekil 5.6'daki daire, tek amaçlı genetik algoritmanın nihai çözümünü temsil eder (Murata ve Ishibuchi, 1995).

Schaffer'in çalışmasından bu yana, genetik algoritmaların çok amaçlı optimizasyon problemlerine uygulanması üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Schaffer, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin Pareto optimal çözümlerini bulmak için Vektör Değerlendirmeli Genetik Algoritmayı (VDGA) önermiştir. VDGA'da bir popülasyon, farklı amaç fonksiyonları tarafından yönetilen ayrık alt popülasyonlara bölünür. Schaffer bazı başarılı sonuçlar bildirmiştir, ancak VDGA'nın Pareto cephesinde sadece uç çözümleri bulabildiği görülmüştür. Şekil 5.7'de VDGA'daki arama yönleri gösterilmektedir. Şekil 5.7'de, arama yönleri amaç uzayının eksenlerine paralel olduğu için VDGA uç çözümler bulabilmektedir. Schaffer, VDGA'yı geliştirmek için iki yaklaşım önermiştir. Birincisi, her nesilde baskın olmayan bireyler için sezgisel bir seçim tercihidir. İkincisi ise bir miktar tür seçimi ekleyerek "türler" arasında melezleme yapmaktadır (Murata ve Ishibuchi, 1995).



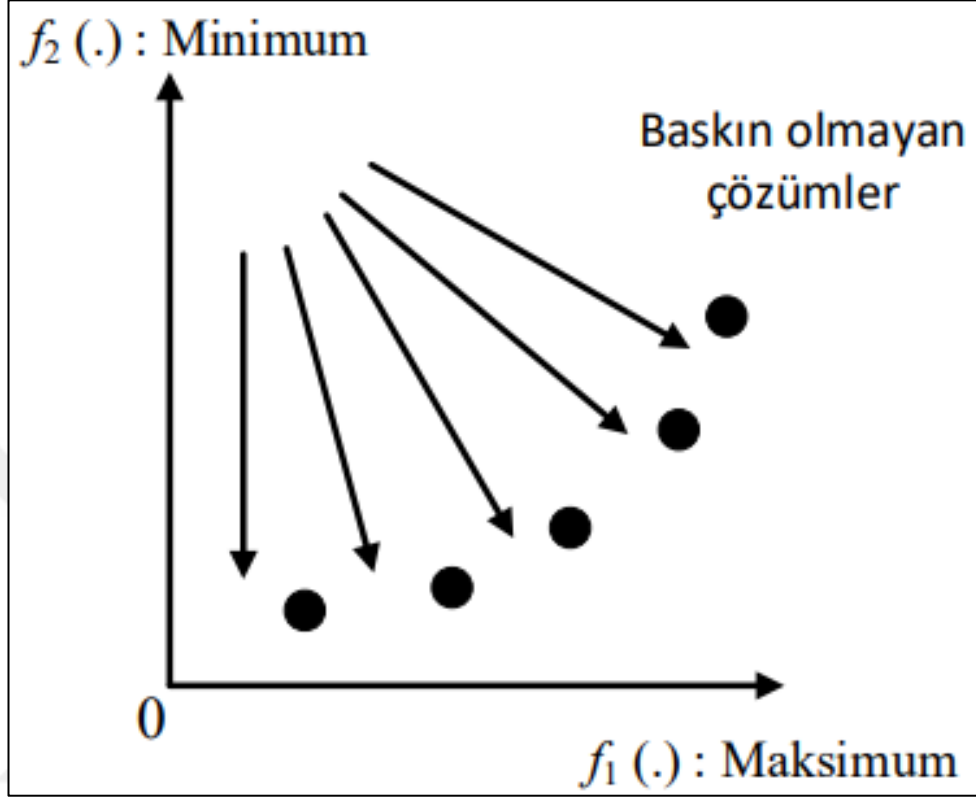
Şekil 5.6 GA'da birleşik uygunluk fonksiyonu ile arama yönü (Murata ve Ishibuchi, 1995)



Şekil 5.7 VDGA'daki arama yönleri (Murata ve Ishibuchi, 1995)

Daha sonra tercihe bağlı olarak Pareto optimal çözümlerden biri seçilebilir. Genetik algoritmalarla tüm Pareto optimal çözümleri bulmak için, her nesilde birey çeşitliliği korunmalıdır. Yakın zamanda Horn ve diğerleri (Horn vd., 1994), seçim prosedürüne Pareto hakimiyeti kavramını dahil ederek ve popülasyonu Pareto cephesi boyunca

yaymak için bir niş baskısı uygulayarak Nişli Pareto Genetik Algoritmasını önermiştir (Murata ve Ishibuchi, 1995).



Şekil 5.8 Çok Amaçlı Genetik Algoritmada (ÇAGA) aramanın yönleri (Murata ve Ishibuchi, 1995)

5.2.2.1 Çok amaçlı genetik algoritmada genetik işlemler

5.2.2.1.1 Seçim prosedürü

Birden çok amaç fonksiyonunu skaler bir uygunluk fonksiyonunda birleştirmenin basit bir yolu, aşağıdaki ağırlık toplam yaklaşımıdır (Murata ve Ishibuchi, 1995):

$$f(x) = w_1 \cdot f_1(x) + \dots + w_n \cdot f_n(x) \quad (5.2)$$

Burada x bir dizidir (yani bireysel), $f(x)$ birleştirilmiş uygunluk fonksiyonudur, $f_i(x)$ i 'inci amaç fonksiyonudur, w_i , $f_i(x)$ için sabit bir ağırlık ve n amaç fonksiyonlarının sayısıdır.

Denklem 5.2’de w_i ’lerin sabit ağırlıklarını kullanırsak, genetik algoritmalarda arama yönü Şekil 5.6’da gösterildiği gibi sabittir. Bu nedenle, Şekil 5.8’de gösterildiği gibi çeşitli arama yönlerini kullanarak Pareto optimal çözümleri aramak için rastgele ağırlıklara sahip bir seçim prosedörü önerilmektedir.

Bir çaprazlama işlemi için bir çift dize seçildiğinde, her ağırlığa aşağıdaki gibi rastgele bir gerçek sayı atılmaktadır (Murata ve Ishibuchi, 1995).

$$w_i = \frac{random_i(.)}{\sum_{j=1}^n random_j(.)}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (5.3)$$

Burada rastgele, (.) negatif olmayan rastgele bir sayıdır.

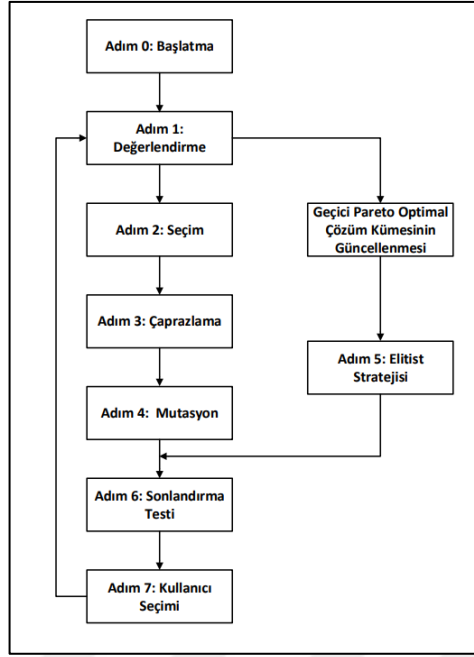
Denklem 5.3’te, w_i ’nin $[0,1]$ kapalı aralığında gerçek bir sayı olduğunu görebiliriz. Bir sonraki dize çifti, denklem 5.3’te ile verilen farklı ağırlık değerleriyle seçilir ve bu böyle devam etmektedir (Murata ve Ishibuchi, 1995).

5.2.2.1.2 Elit koruma stratejisi

ÇAGA’nın yürütülmesi sırasında, her nesilde geçici bir pareto optimal çözümleri seti saklanır ve güncellenir. Her nesilde belirli sayıda (örneğin, N_{elite}) birey setten rastgele seçilir. Bu çözümler ÇAGA’mızda elit bireyler olarak kullanılmaktadır. Bu elit koruma stratejisi, ÇAGA’mızdaki her popülasyonun çeşitliliğini korumada bir etkiye sahiptir (Murata ve Ishibuchi, 1995).

5.2.2.1.3 Algoritma

Önerilen ÇAGA’nın blok diyagramı Şekil 5.9’da sunulmuş olup aşağıda ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır (Murata ve Ishibuchi, 1995).



Şekil 5.9 Çok amaçlı genetik algoritmaların (ÇAGA) blok diyagramı (Murata ve Ishibuchi, 1995).

Adım 0 (Başlatma): Npop dizelerini içeren bir başlangıç popülasyonu oluşturun, burada Npop her popülasyondaki dize sayısıdır.

Adım I (Değerlendirme): Oluşturulan dizgiler için amaç fonksiyonlarının değerleri hesaplanmaktadır. Bu aşamada, geçici bir Pareto optimal çözümler kümesi güncellenmektedir.

Adım 2 (Seçim): Her dizinin uygunluk değerini hesaplamak için denklem 5.3'te belirtilen rastgele ağırlıklar kullanılmaktadır. Mevcut popülasyondan bir çift dize seçimi, aşağıdaki seçim olasılığına göre yapılmaktadır. Ψ popülasyonundaki bir x dizisinin $P(x)$ seçim olasılığı şu şekilde ifade edilmektedir :

$$P(x) = \frac{f(x) - f_{\min}(\Psi)}{\sum_{x \in \Psi} \{f(x) - f_{\min}(\Psi)\}} \quad (5.4)$$

Burada

$$f_{\min}(\Psi) = \min\{f(x) | x \in \Psi\} \quad (5.5)$$

Bu adımda, mevcut popülasyonlardan $N_{pop}/2$ çift seçmek üzere bir tekrar işlemi uygulanmaktadır.

Adım 3 (Çaprazlama): Seçilen her çift için, iki yeni dizilim oluşturmak amacıyla bir çaprazlama işlemi uygulanır. Bu süreç sonucunda, çaprazlama işlemiyle N_{pop} yeni birey oluşturulmaktadır.

Adım 4 (Mutasyon): Çaprazlama işlemi sonucunda oluşturulan dizilimlerin her bit değeri için, önceden belirlenmiş bir mutasyon olasılığına sahip bir mutasyon işlemi uygulanır.

Adım 5 (Elitist Strateji): Önceki işlemler sonucunda oluşturulan N_{pop} dizilim kümesinden rastgele seçilen N_{elite} dizilimleri çıkarın ve bunları, geçici bir Pareto en uygun çözümler kümesinden rastgele seçilen N_{elite} dizilimleriyle değiştirilmektedir.

Adım 6 (Sonlandırma Testi): Önceden belirlenmiş bir durdurma koşulu karşılanmazsa, Adım 1'e geri dönün.

Adım 7 (Kullanıcı Seçimi): ÇAGA, karar vericiye Pareto en uygun çözümlerin son setini sunar. Daha sonra, karar verici tarafından en iyi çözüm seçilir.

Çaprazlama ve mutasyon gibi genetik işlemlerin özellikleri, problemin doğasına göre belirlenir (Murata ve Ishibuchi, 1995).

KMSM motoruna dayalı olarak geliştirilmiş bir algoritmaya dayalı sağlam, çok amaçlı genetik algoritma optimizasyon tasarımı uygulanacaktır. Tablo 5.2'de KMSM'nin ana tasarım parametrelerinin ve aralıklarının ilk tasarım değerlerini vermektedir. Tasarım parametrelerinin aralığı esas olarak yapının performans gereksinimleri ve kısıtlamaları tarafından belirlenmektedir.

KMSM'nin tork, tork dalgalanması ve verimliliği gibi performans göstergeleri genellikle tasarım hedefleri olarak kabul edilir. Sargı telinin kalınlığı SEA'de yansıtılamadığından, genellikle optimizasyon işlemi sırasında sargının çapının değişmeden kalmaktadır.

Sargıların nominal akım yoğunluğunda çalışmasını sağlamak, motorun bakır kaybını sabit bir değer olarak kabul etmeye olanak tanır. Mevcut durumda, motor kaybı üzerinde en büyük etkiyi bakır kaybı oluşturmaktadır. Aynı zamanda, motorun nominal torku, motor performansının ana göstergelerinden biridir. Motorun düzgün çalışmasını sağlamak için, tork dalgalanmasının da dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle, kapsamlı bir değerlendirme sonrasında, motorun nominal torku, tork dalgalanması ve demir kaybı, optimizasyon hedefleri olarak seçilmiştir (Xu vd., 2022).

$$\text{Amaç fonksiyonları: } \begin{cases} f_1(x) = \eta \\ f_2(x) = S_{slot} \\ f_3(x) = J_c \end{cases}$$

Motorun ayrıca optimizasyon sürecinde belirli kısıtlamaları karşılaması gerekir.

Tablo 5.2 KMSM'nin ana tasarım parametreleri ve aralıkları

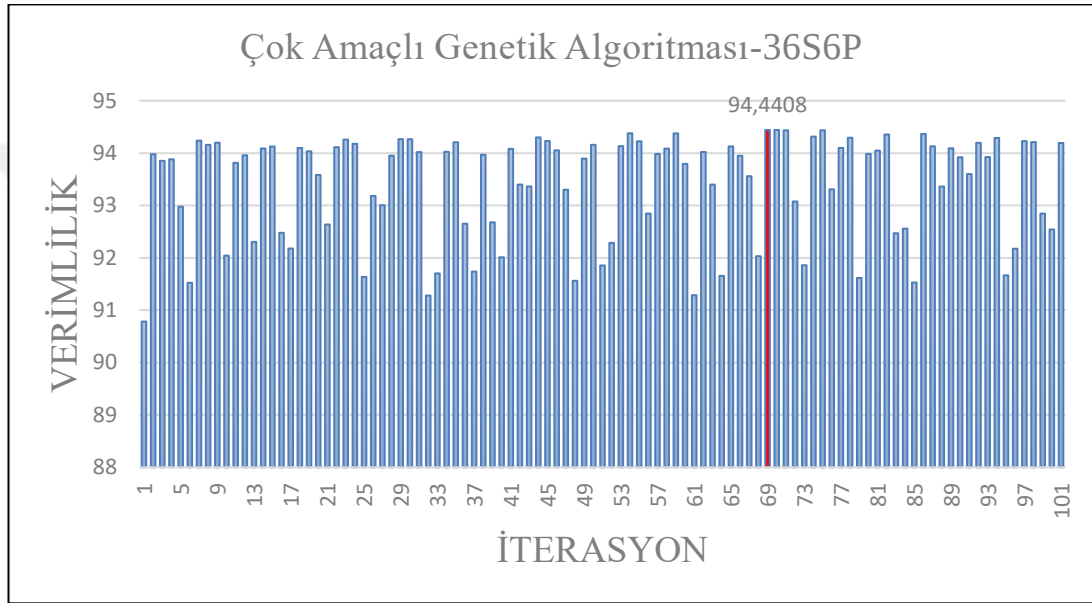
	Parametre	Aralık
STATOR	Wst (mm)	-
	Hs0 (mm)	0-1,5
	Hs1 (mm)	0-1
	Hs2 (mm)	-
	lenght (mm)	0-18
	Bs0 (mm)	-
ROTOR	O1 (mm)	0-1
	O2 (mm)	0-7
	B1 (mm)	0-0,5
	Rib (mm)	0-4
	MT (mm)	0-0.75
	MW (mm)	0-5

Optimizasyonda aşağıdaki üç koşulun karşılanması gerekmektedir.

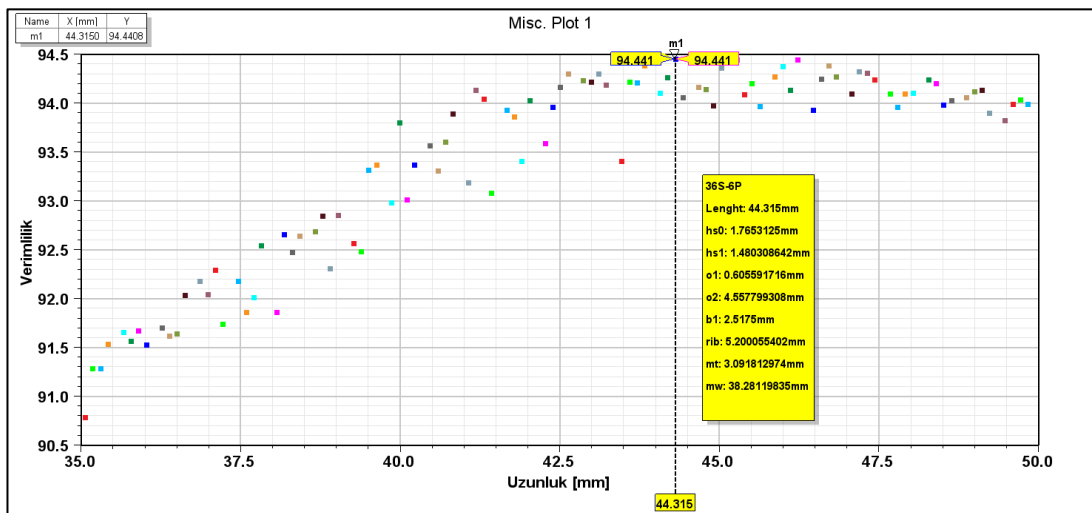
$$\min: \begin{cases} g_1(x) = \eta - 90 \geq 0 \\ g_2(x) = S_{slot} - 0,6 \leq 0 \\ g_3(x) = J_c - 6 \leq 0 \end{cases}$$

Bu çalışmada, belirlenen oluk ve kutup kombinasyonlarının belirlenen parametreler, çok amaçlı genetik algoritması kullanılarak elde edilen parametrelerin optimizasyonu

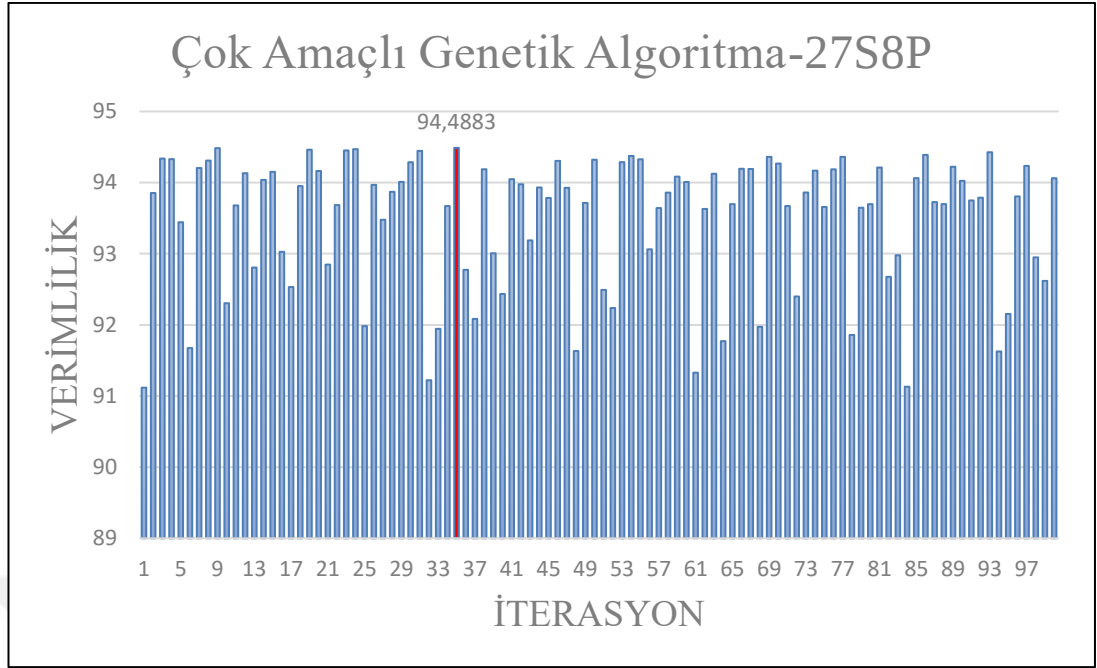
gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın başlangıcında, belirli parametreler seçilmiş ve bu parametreler doğrultusunda çok amaçlı genetik algoritma uygulanmıştır. Bu algoritma, belirli iterasyonlar boyunca çalıştırılarak, en uygun parametreler belirlenmiştir. İterasyonlar sonucunda elde edilen kombinasyonlar, performans ve verimlilik açısından optimize edilmiştir. Bu süreçte, genetik algoritmanın sağladığı avantajlar kullanılarak, çoklu hedeflere yönelik en iyi çözümler bulunmuş ve bu çözümler detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.



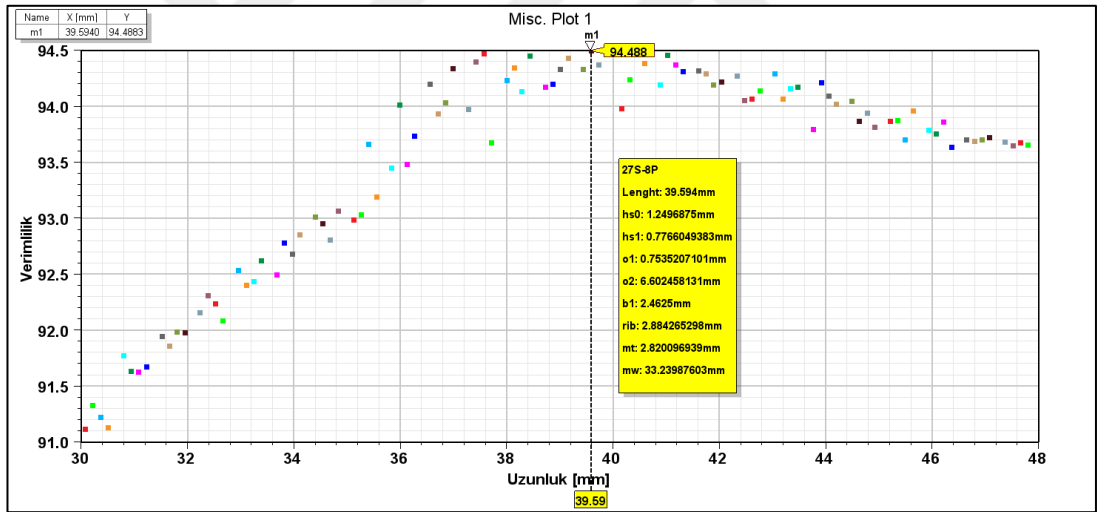
(a)



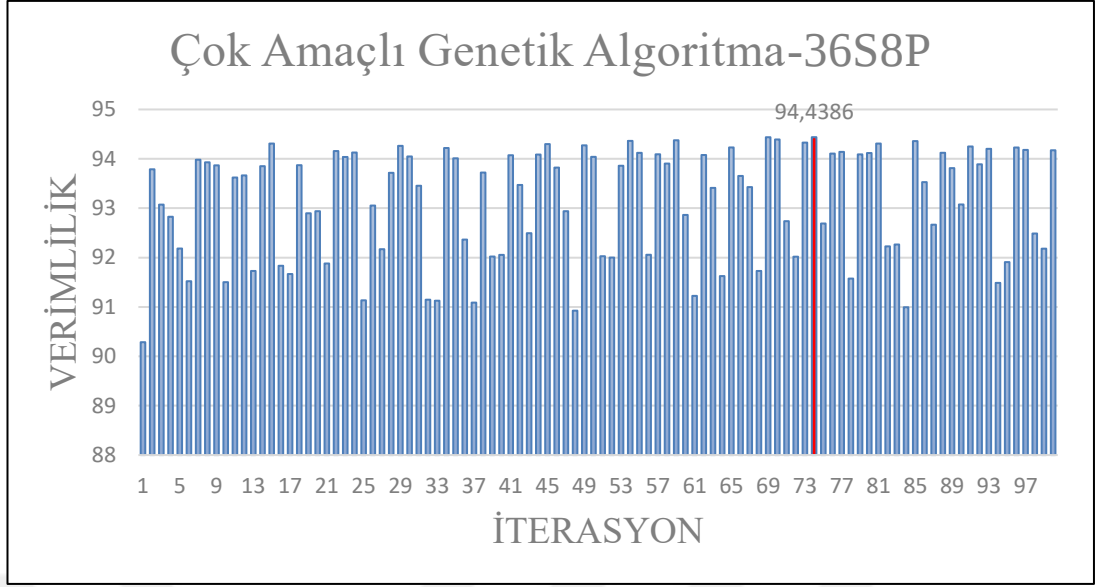
(b)



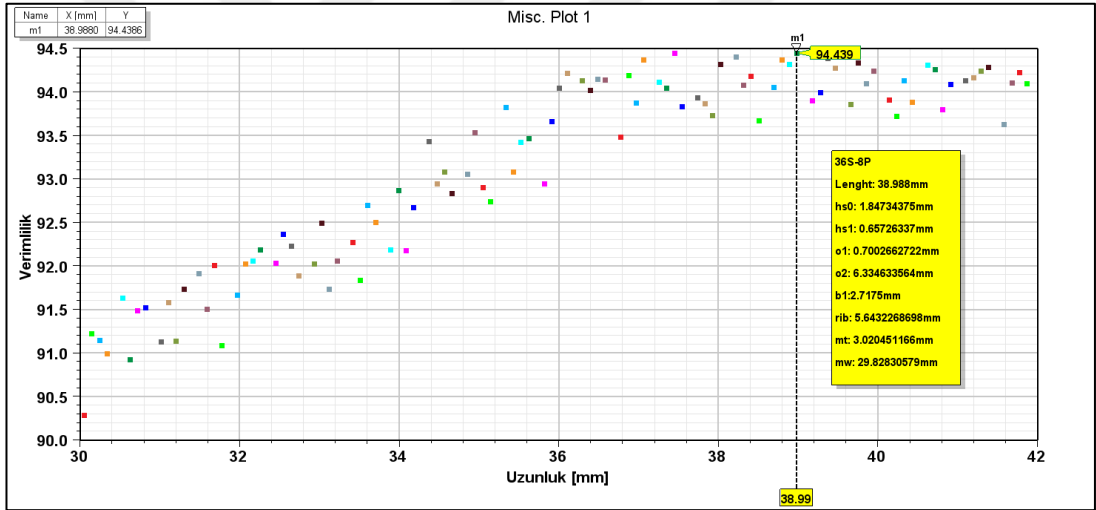
(c)



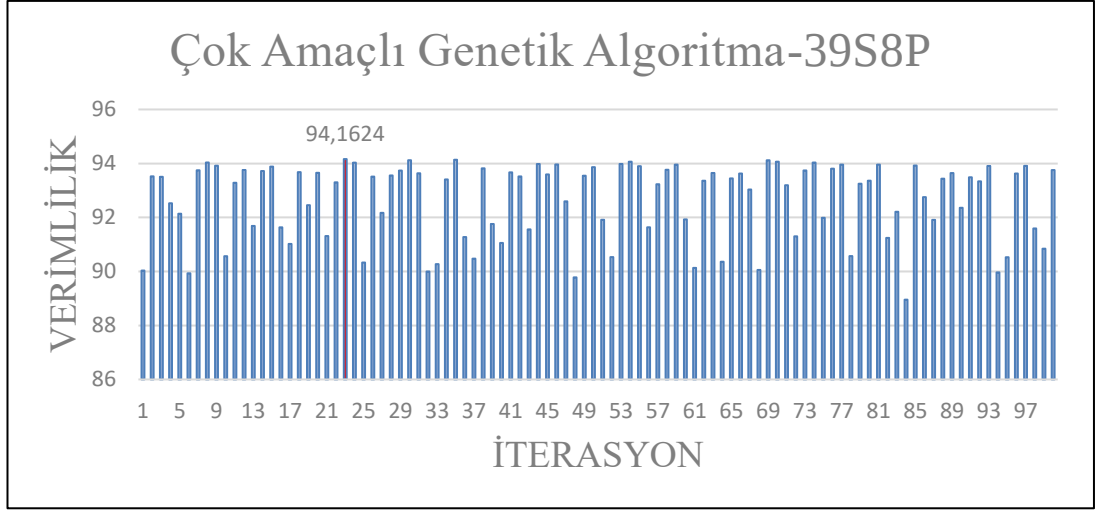
(d)



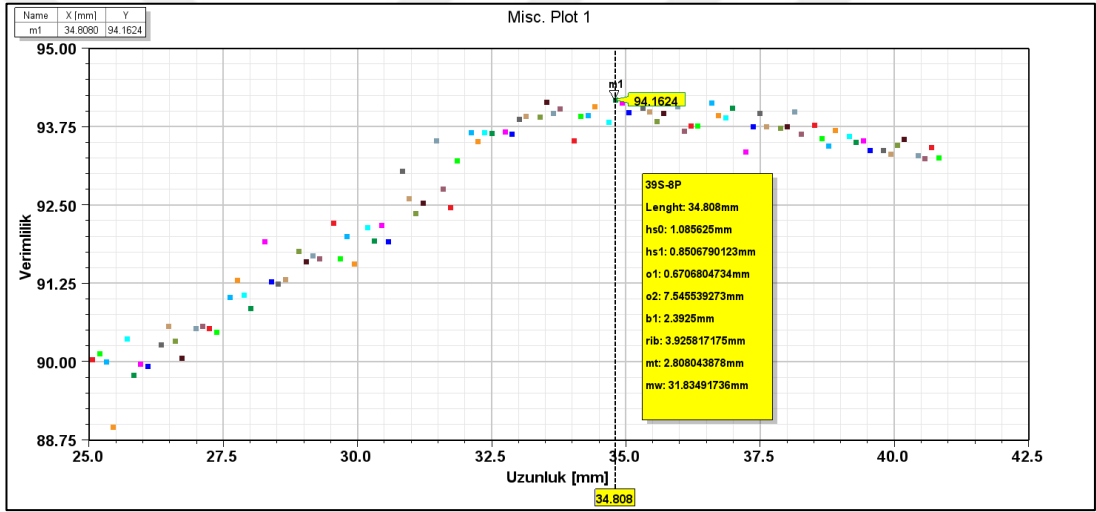
(e)



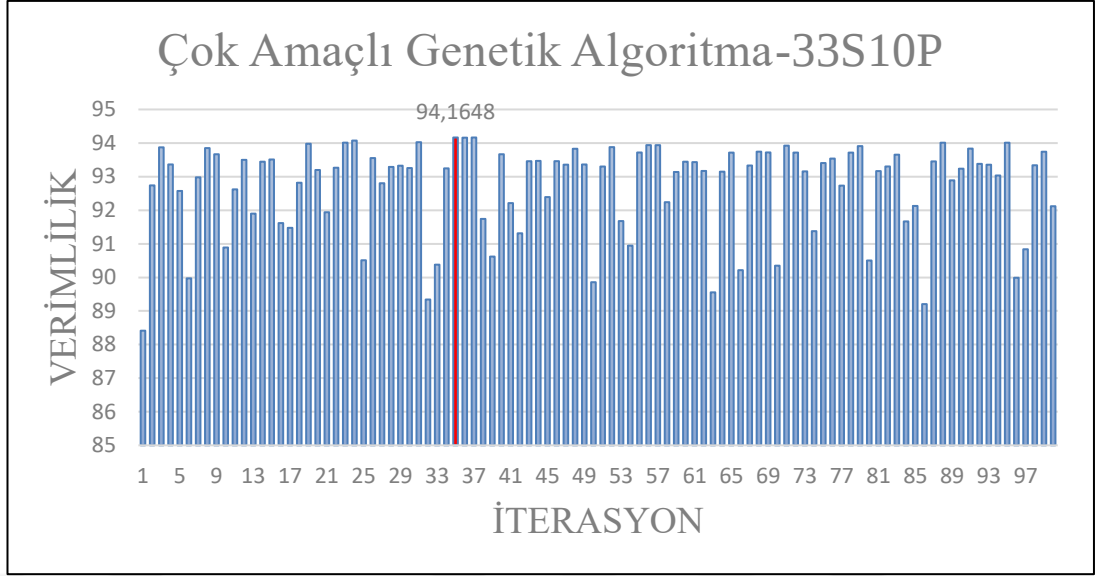
(f)



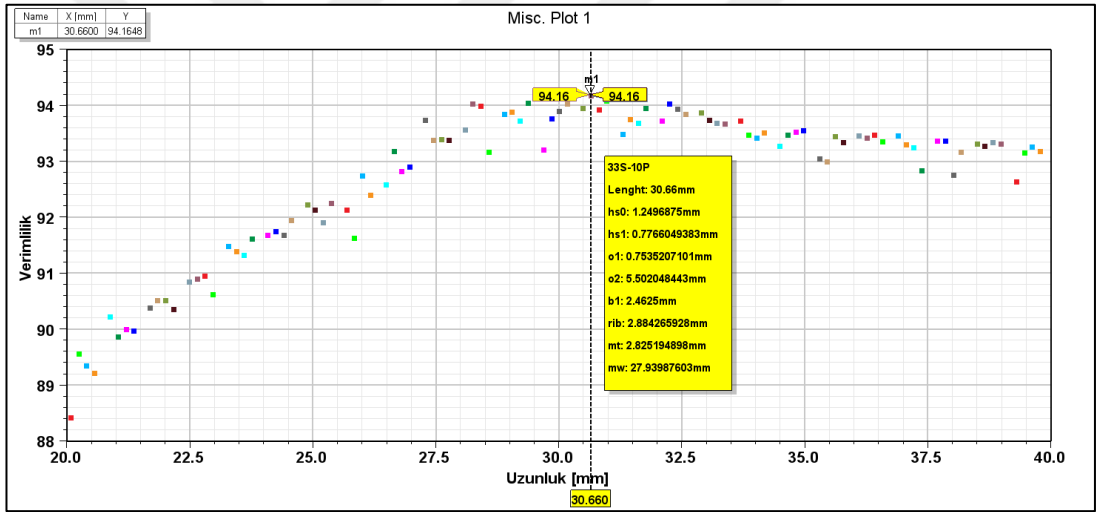
(g)



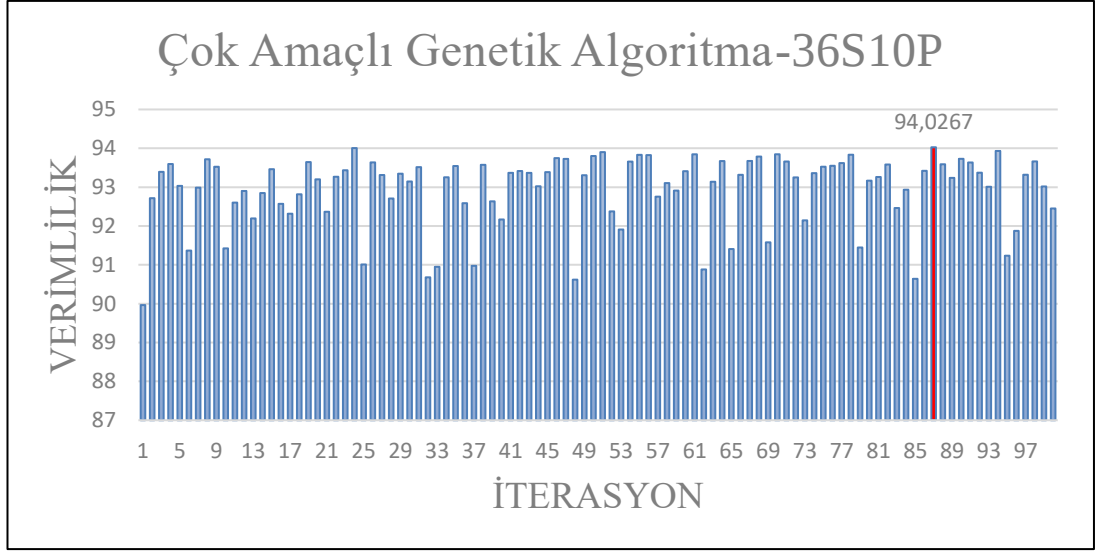
(h)



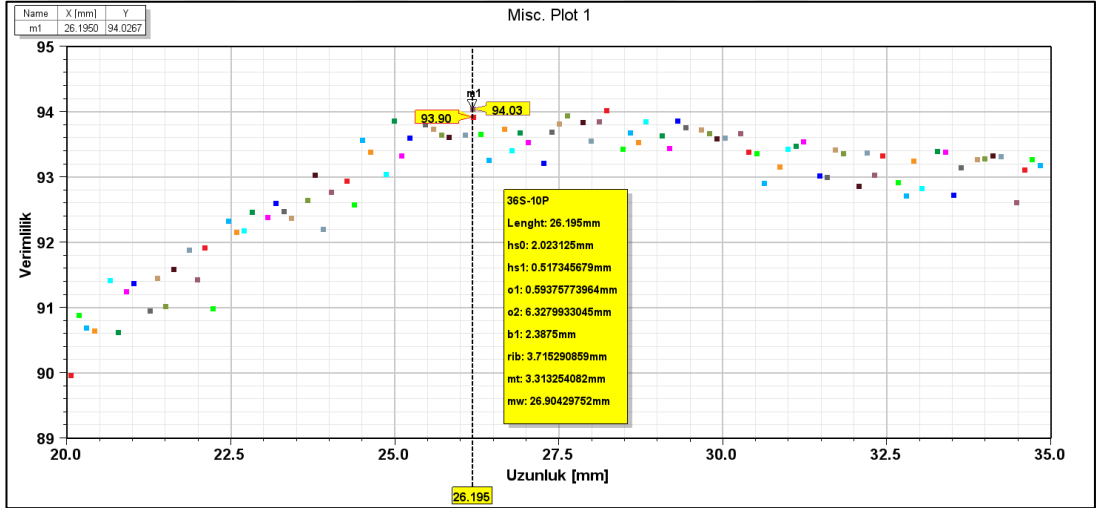
(i)



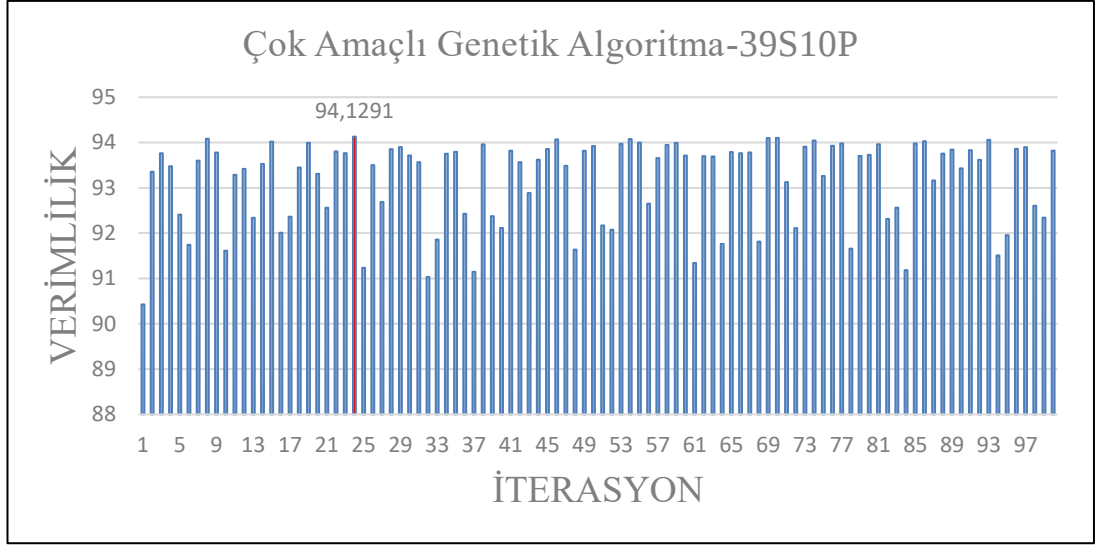
(j)



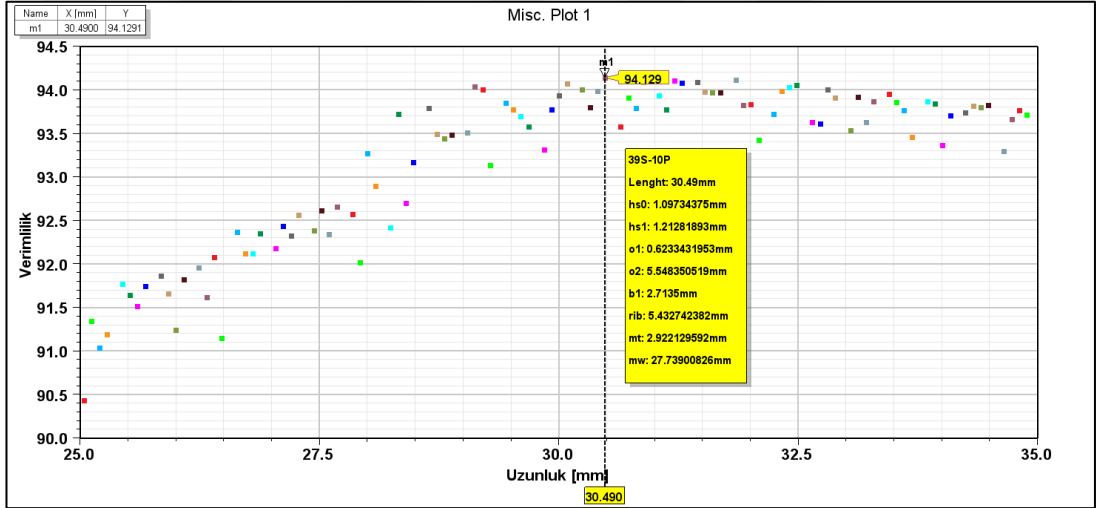
(k)



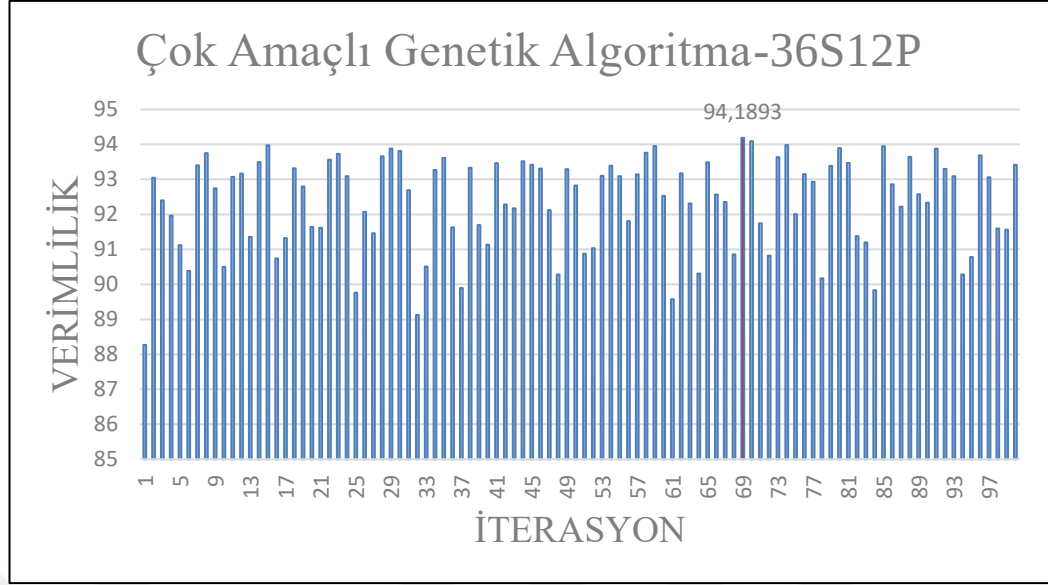
(l)



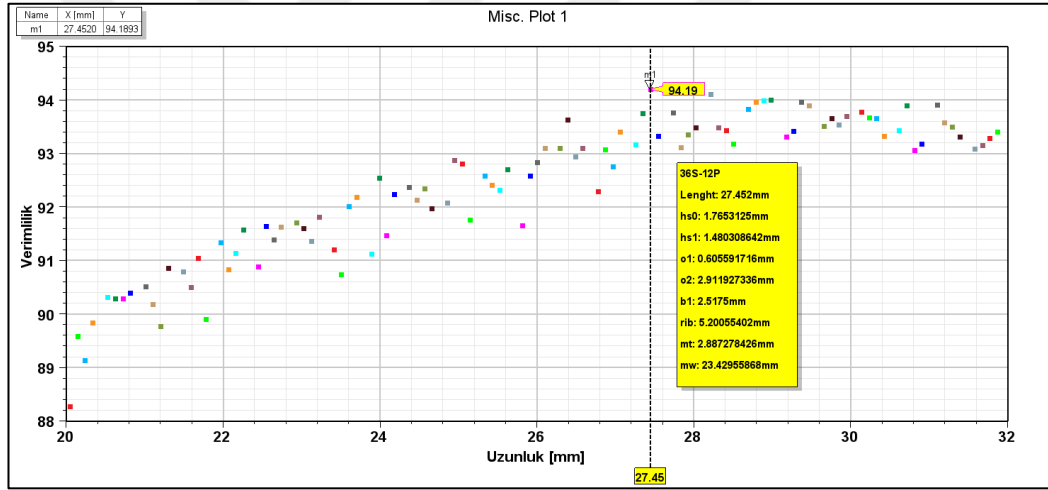
(m)



(n)



(o)



(p)

Şekil 5.10 ÇAGA optimizasyon sonuçları: a) 36 oluk 6 kutuplu verimlilik – iterasyon, b) 36 oluk 6 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk, c) 27 oluk 8 kutuplu verimlilik – iterasyon, d) 27 oluk 8 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk, e) 36 oluk 8 kutuplu verimlilik – iterasyon, f) 36 oluk 8 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk, g) 39 oluk 8 kutuplu verimlilik – iterasyon, h) 39 oluk 8 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk, i) 33 oluk 10 kutuplu verimlilik – iterasyon, j) 33 oluk 10 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk, k) 36 oluk 10 kutuplu verimlilik – iterasyon, l) 36 oluk 10 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk, m) 39 oluk 10 kutuplu verimlilik – iterasyon, n) 39 oluk 10 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk, o) 36 oluk 12 kutuplu verimlilik – iterasyon, p) 36 oluk 12 kutuplu parametrelerin verimlilik – uzunluk

ÇAGA optimizasyon sonuçları, Şekil 5.10'da verimlilik-iterasyon ve verimlilik-parametre ilişkileri bağlamında sunulmuştur. Verimlilik-iterasyon grafiği, optimizasyon sürecinde gerçekleştirilen 100 iterasyonun sonuçlarını ve bu iterasyonlar

sonunda elde edilen parametrelerin verimlilik üzerindeki etkilerini göstermektedir. En iyi iterasyon sonuçlarının, verimlilik değerleri genel olarak %94-95 aralığında seyrettiği gözlemlenmiştir. İterasyonlar arasında en yüksek verimlilik değerine ulaşıldığı an, motorun çeşitli parametreleri ile verimlilik arasındaki ilişkinin incelendiği bir dağılım grafiğiyle de desteklenmiştir. Bu grafikte, özellikle motorun uzunluğu ve diğer parametreler ile verimlilik arasındaki korelasyon net bir şekilde ortaya konmuştur. Tablo 5.3'te ise ÇAGA optimizasyon sonrası elde edilen RMxprt sonuçları verilmektedir.

Başlangıç tasarım aşaması ve parametrik analiz sonrası ÇAGA optimizasyon tasaramında, termal yük, spesifik elektrik yüklenmesi ve akım yoğunluğu gibi parametreler motorun performansı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Optimizasyon sürecinde bu parametreler yapılan değişiklikler, motorun termal yönetimi, kayıpları ve verimliliği üzerinde etkenleri bulunmaktadır.

Tablo 5.3 ÇAGA optimizasyonun farklı oluk ve kutup sayısının R_{Mxprt} değerleri

LAMDA OLUK-KUTUP		(FARKLI OLUK-KUTUP - 1400W-1100RPM) ÇAGA OPTİMİZASYON SONUÇLARI													
		Armatür Termal Yükü (A ² /mm ³)	Spesifik Elektrik Yüklemesi (A _{per_meter})	Armatür Akım Yoğunluğu (A _{per_m2})	Demir Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	Çıkış Gücü (mW)	Giriş Gücü (mW)	Verim	Oluk Doluluk Oranı	Anma Hızı	Anma Torku	Stator Diş Akı Yoğunluğu (T)	Stator Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)	Rotor Boyunduruğu Akı Yoğunluğu (T)
λ = 1,22	36S-6P	88,1326	27812,5	3168810	12958,5	82412,7	1400030	1482450	94,4408	57,9887	1100	12,1539	1,44038	1,32504	0,822105
λ = 1,22	36S-8P	92,4685	27735,2	3333980	14576,9	82492,9	1399950	1482450	94,4386	59,58	1100	12,1532	1,49756	1,19301	0,742007
λ = 1,22	36S-10P	117,112	32940,3	3555270	14543,2	88931,8	1399890	1488820	94,0267	59,498	1100	12,1527	1,46236	1,18974	0,782356
λ = 1,22	36S-12P	97,6517	28254,6	3456150	20631	86379,5	1400300	1486680	94,1893	57,7146	1100	12,1562	1,48506	1,31505	0,685883
λ = 1,22	27S-8P	87,1995	25750,2	3386370	14506,1	81659,7	1399910	1481560	94,4883	59,9559	1100	12,1528	1,46192	1,19038	0,789392
λ = 1,22	33S-10P	103,205	29912,5	3450220	15858,4	86813,2	1399900	1486710	94,1648	59,6371	1100	12,1528	1,49645	1,1136	0,74234
λ = 1,22	39S-8P	94,9413	29808,4	3185060	13705,3	86776,6	1399720	1486500	94,1624	58,8804	1100	12,1512	1,56456	1,1803	0,770182
λ = 1,22	39S-10P	92,2702	26945,4	3424330	16734,6	87337,2	1399790	1487120	94,1291	59,5977	1100	12,1518	1,51388	1,18232	0,718097

Armatür termal yükü, spesifik elektrik yüklenmesi ve akım yoğunluğu optimizasyon süreci boyunca yüksek seviyelerden düşük seviyelere geçtiğinde, motorun sıcaklık artışı genellikle azalmaktadır. Bu durum daha iyi bir termal yönetim sağlar ve motorun uzun vadeli güvenilirliği artırır. Akım Yoğunluğu yüksek olduğunda, iletkenlerdeki ısınma daha fazla olur ve buda armatürde termal stres yaratmaktadır. ÇAGA optimizasyon sonucunda bu değerlerin düştüğü ve motorun termal dayanımını artırarak aşırı ısınmayı önlemektedir. Spesifik elektrik yüklenmesi ve akım yoğunluğu optimizasyon sonrası düşük seviyelere indirildiği gözlemlenmiştir. Bu durum, manyetik devrede kullanılan demir mıknatısların daha aktif hale gelmesine ve dolayısıyla demir kayıplarının artmasına yol açabilir. Demir kayıpları, manyetik devrede histerezis ve eddy akımları nedeniyle meydana gelen enerji kayıplarından kaynaklanmaktadır. Manyetik devrenin daha fazla yüklenmesi, demir kayıplarını artırarak toplam verimliliği olumsuz etkileyebilmektedir.

ÇAGA optimizasyon sonrası verimlilik artışı gözlemleniyorsa, bu kayıplardaki artışa rağmen diğer unsurlarda sağlanan iyileştirmeler sayesinde enerji dönüşümünün daha etkili hale geldiğini göstermektedir. Özellikle akım yoğunluğunun azaltılması, bakır sonuçlarını önemli ölçüde düşürür ve termal yükleri azaltarak motorun verimli çalışmasını sağlamaktadır. ÇAGA optimizasyonu net bir verimlilik kazancı sağlamıştır.

Tablo 5.3'te sunulan RMXprt sonuçlarına göre, ÇAGA optimizasyonu sonrasında amaç fonksiyonlarına uygun olarak %90'ın üzerinde bir verimlilik elde edilmiştir. Ayrıca, oluk doluluk faktörünün 0,65'in altında ve akım yoğunluğunun 6 A/mm²'nin altında olduğu, bu koşulların sağlandığı görülmektedir. ÇAGA optimizasyon sonuçları incelendiğinde, belirlenen parametreler doğrultusunda yapılan analizlerin, elektrikli makine tasarımında performans iyileştirilmesi amacıyla optimize edildiği anlaşılmaktadır. Optimizasyon sürecinde verimlilik esas alınarak çeşitli kriterler değerlendirilmiş ve sonuçlar doğrultusunda tasarım iyileştirilmiştir. Elde edilen bulgular, algoritmanın uygulama alanlarındaki potansiyelini ortaya koyarak, elektrikli makine tasarımında verimliliği artırmada belirlenen parametrelerin doğru seçimi ve ayarlanmasının kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

6. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ İLE 2D MANYETİK VE PERFORMANS ANALİZİ

Motor tasarımında parametre optimizasyonu, sistem performansının artırılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, farklı oluk-kutup konfigürasyonlarına ilişkin belirli parametreler motor verimliliği üzerinde etkili olurken, diğer parametreler ise verimlilik değerinin maksimize edilmesi amacıyla çok amaçlı genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Çalışmanın başlangıcında, farklı oluk-kutup konfigürasyonlarına sahip modellerin analitik hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve ardından vuru torku analiz edilmiştir. Devamında, parametrik analizler ile oluk başına iletken sayısı, stator dış kalınlığı ve stator boyunduruğu gibi faktörler incelenerek en uygun sonuçlar elde edilmiştir. Nihai olarak, çok amaçlı genetik algoritma yardımıyla bu parametrelerin optimizasyonu sağlanmıştır. Elde edilen farklı oluk-kutup konfigürasyonları karşılaştırılmış ve ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak motor parametrelerinin nihai değerlendirmesi sonucunda 39S-10P modeline karar verilmiştir. Tablo 6.1’de ön tasarım ve optimizasyon sonrası elde edilen parametrelerin değerleri sunulmuştur.

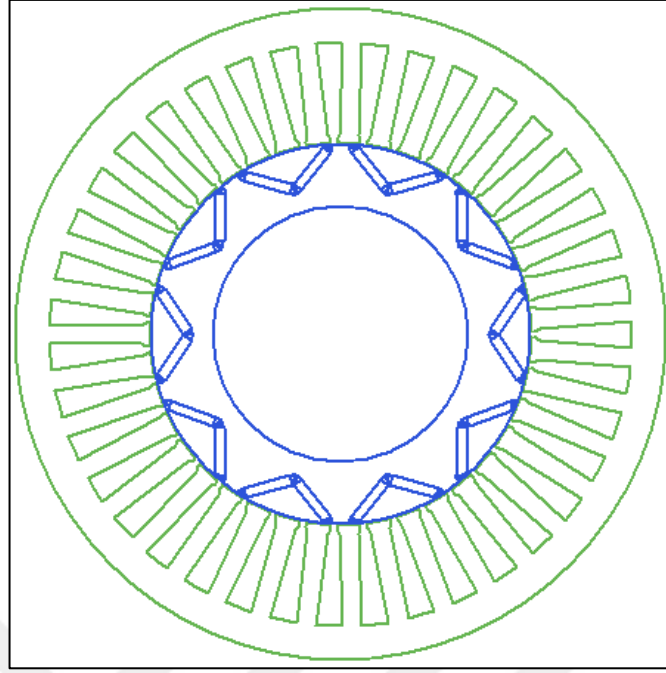
Tablo 6.1 39S-10P model parametrenin sonuç değerleri

Parametre ve Kısıtlar	Ön Tasarım	ÇAGA Algoritması
Paket Uzunluğu (mm)	29,63	30,49
hs0 (mm)	1,5	1,09734375
hs1 (mm)	1	1,21281893
o1 (mm)	1	0,623343195
o2 (mm)	5,94	5,548350519
rib (mm)	4	5,432742382
bs0 (mm)	2	2
b1 (mm)	2,5	2,7135
Rotor dış çapı - mıknatıs arasındaki mesafe (mm)	0,5	0,5
mt (mm)	3,13	2,922129592
mw (mm)	28,2	27,73900826
Verim	94,0568	94,129

Şekil 6.1'de gösterilen son tasarım modeli, 39 oluk ve 10 kutuplu rotor yapısına sahip motor tasarımına dayanmaktadır. Tablo 6.2'de tasarımın parametreleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 6.2 39S-10P modelin son tasarım parametreleri

	Parametre	Değeri	Birimi
Motor Özellikleri	Rotor tipi	İçten Rotorlu	-
	Kutup sayısı, p	10	-
	Motor çıkış gücü, P	1,4	kW
	Frekans, f	91,67	Hz
	Gerilim, V	48	V
	Nominal hız, ω_m	1100	rpm
	Nominal akım, I	19,7	A
	Nominal tork, T_R	12,1518	Nm
	Motor paketi uzunluğu, L_p	30,49	mm
	Oluk sayısı, N_{oluk}	39	-
Rotor	Rotor dış çapı, D_{ro}	111,19	mm
	Rotor iç çapı, D_{ri}	75,02	mm
	Rotor malzemesi	JFE-Steel-35JN270	-
	Hava aralığı kalınlığı, g	1	-
Mıknatıs	Mıknatıs kalınlığı, hm	2,9221296	mm
	Mıknatıs uzunluğu, lm	27,739008	mm
	Mıknatıs tipi	N40UH-80C	-
	Mıknatısın bağıl manyetik geçirgenliği, μ_r	1,03568	-
Sargılar	Bağlantı şekli	Yıldız	-
	Sargı tipi	Dağıtılmış	-
	Sargı katman sayısı	2	-
	Tel kalınlığı, D_{tel}	1,938	mm
	Bir stator fazındaki tur sayısı, N_t	8	-
	Paralel tel sayısı, $ntel$	3	-
Stator Özellikleri	Kutup-faz başına düşen oluk sayısı, q	1,3	-
	Stator iç çapı, D_{si}	112,19	mm
	Stator dış çapı, D_{so}	191	mm
	Silisli saç kalınlığı	0,35	mm
	Saç yığılma faktörü, kyf	0,95	-
	Saç malzemesi	JFE-Steel-35JN270	-
	Sargı faktörü, ksf	0,954	-
	Dış ucu kalınlığı, $hs0$	1,09734	mm
	Oluk dış ucu yarıçapı, $hs1$	1,21282	mm
	Oluk yüksekliği, $hs2$	26,7	mm
	Oluk açıklığı, $Bs0$	2	mm
	Stator dış genişliği, wst	5,9	mm



Şekil 6.1 Son tasarım modeli

SEA, fiziksel sistemleri ve yapıları simüle etmek amacıyla kullanılan, sonlu sayıda bilinmeyi ele alarak gerçek bir sistemin sonsuz bilinmeyenlerine yakınsadığı matematiksel bir yaklaşımdır. Bu yöntemin temel prensibi, analiz edilecek nesneyi, her biri birkaç düğümle birbirine bağlanan, küçük ve düzenli şekilli sonlu sayıda elemanlara bölmektir. Her bir elemanın içinde denge denklemleri ve sınır koşulları oluşturularak, bu elemanların performans parametreleri hesaplanır. Ardından, bitişik elemanların parametreleri düğümler aracılığıyla iletilir ve bu sayede araştırma nesnesinin genel performans dağılımı elde edilir.

SEA, güç frekanslı elektromanyetik ve elektromekanik cihazların analizi ve sentezinde esnek, güvenilir ve etkili bir yöntem olarak kendini kanıtlamıştır. Günümüzde, SEA yazılımları uzman olmayan kullanıcıların dahi rahatlıkla kullanabileceği kullanıcı dostu arayüzler sunmaktadır. Bu yazılımlar, ileri düzeyde uygulamalı matematik bilgisi gerektirmeden elektromanyetik alan dağılımı ve integral parametrelerin hesaplanmasını mümkün kılmaktadır. SEA, herhangi bir şekil ve malzeme için kalıcı mıknatıs devrelerini analiz etme yeteneğine sahiptir. Bu yöntemle, relüktans, kaçak faktörleri veya geri tepme eğrisi üzerindeki çalışma noktası gibi parametrelerin manuel olarak hesaplanmasına gerek kalmaz. Kalıcı mıknatısların demanyetizasyon eğrisi, sonlu elemanlar programına dahil edilir ve bu program, kalıcı mıknatıs sistemindeki

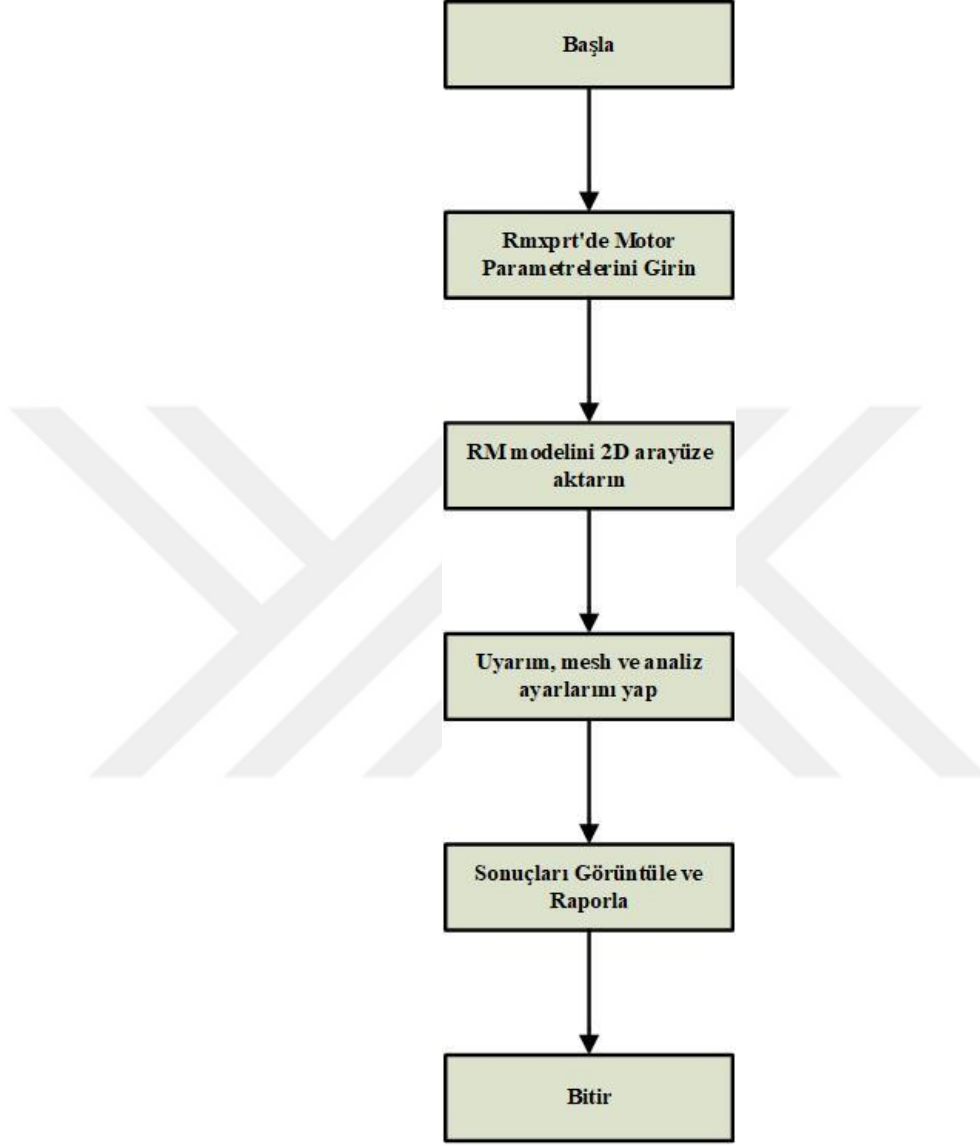
manyetik akı yoğunluğundaki değişiklikleri hesaplayabilir. Kalıcı mıknatıslı motorların analizinde, SEA'nın analitik yaklaşıma kıyasla sağladığı önemli bir avantaj, armatür reaksiyonu etkilerini, endüktansları ve rotor pozisyonuna bağlı olarak elektromanyetik tork değişimini doğru bir şekilde hesaplamaktadır (Aydın vd., 2012; Gieras, 2008).

Motor optimizasyon işlemi tamamlandıktan sonra, sonlu elemanlar hesaplaması analitik yöntemlerle birlikte gerçekleştirilmiştir. Analitik yöntem, parametrelerin hızlı hesaplanmasını sağlarken bir miktar doğruluktan ödün verebilir; ancak bu çalışmada daha yüksek doğruluk elde etmek amacıyla sonlu elemanlar analizi tercih edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi, motoru birçok küçük birime ayırarak her birim için kısmi diferansiyel denklemleri çözmektedir. Bu sayede, motorun iç çalışma koşulları hassas bir şekilde belirlenmekte ve motor performansının iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Sonlu elemanlar analizi, yalnızca motor tasarımına destek olmakla kalmayıp, aynı zamanda motor arızalarının tespit edilmesi ve hata ayıklama süreçlerinde de önemli bir rol oynamaktadır (Yuan, 2003).

Simülasyon sürecinde, ANSYS Maxwell tabanlı sonlu elemanlar analizi kullanılmaktadır. Maxwell, motorun elektromanyetik özelliklerini simüle ederek, sonlu elemanlar analizi ile motor içerisindeki manyetik alan dağılımını, torku, indüklenen elektromotor kuvvetini ve diğer ilgili parametreleri hesaplar. Bu yazılım sayesinde, farklı çalışma koşulları altında çeşitli motor tiplerinin performansı simüle edilerek, motorun gerçek dünyada karşılaşılabileceği potansiyel sorunlara yönelik çözümler geliştirilebilmektedir (Aslan ve Balcı, 2021; Yuan, 2003). Şekil 6.2'de modelleme sürecinin detayları sunulmaktadır.

SEA kullanılarak elektrik motorlarının analiz edilmesinin temel amaçları arasında, motorun stator ve rotor nüvesi, dişler ve oluklar gibi farklı bileşenlerindeki manyetik doyum seviyelerinin tespit edilmesi ve motor tasarım modelinin doğruluğunun test edilmesi bulunmaktadır. Ayrıca, motorun moment kalitesi ve performansını belirleyen vuruş momenti, moment dalgalanması ve ortalama moment gibi bileşenlerin seviyeleri de SEA ile değerlendirilebilmektedir. Farklı SEA yazılımları kullanılarak motor kayıpları ve verimi hesaplanabilmekte ve zamana bağlı geçici durum analizleri

gerçekleştirilebilmektedir. Genellikle, radyal akılı standart senkron motorlarda iki boyutlu SEA tercih edilmektedir (Aslan ve Balcı, 2021).



Şekil 6.2 Modelleme süreci

Motor paket boyunun motor çapına oranının çok küçük olduğu radyal akılı senkron motorlarda ise iki boyutlu SEA, son derece hassas sonuçlar vermektedir. Günümüzde, sürekli mıknatıslı motorların analizinde yaygın olarak kullanılan birçok SEA yazılımının doğruluğu, çeşitli araştırmacılar tarafından kanıtlanmıştır.

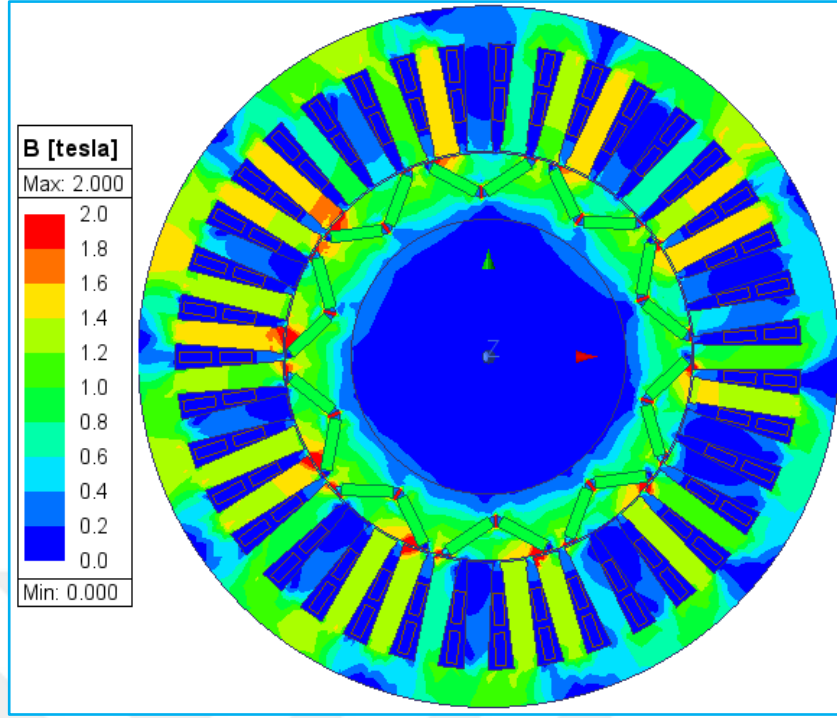
Bu çalışmada, ANSYS Maxwell yazılımı kullanılmıştır. ANSYS Maxwell yazılımıyla oluşturulan SEA işlemine geçilmeden önce, model küçük ağ elemanlarına bölünmekte,

yani model üzerine mesh uygulanmaktadır. Bu aşamada, modelin daha küçük parçalara ayrılması, analiz sonuçlarının doğruluğunu artırmak için kritik öneme sahiptir (Gülçin ve Akar, 2018).

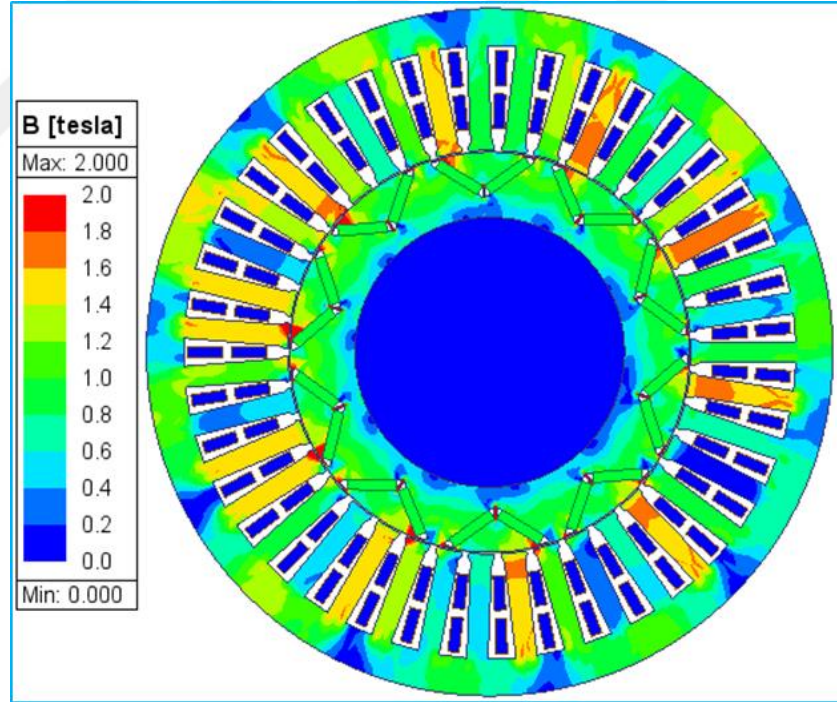
Elektrik makine tasarım sürecinde, stator ve rotor bileşenlerinin çekirdek malzemelerinin manyetizasyon özellikleri ve doyma akı değerleri kritik bir rol oynamaktadır. Tam yük koşulları altında motorun manyetik akı yoğunluğu, motorun yük altındaki performansını daha iyi analiz etmek, güvenilirliğini teyit etmek ve optimizasyon sürecini desteklemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, rotor ve stator çekirdek paketleri için JFE_Steel_35JN270 malzemesi tercih edilmiştir. Şekil 6.3 rotor ve stator yüzeylerindeki akı dağılımı göstermektedir.

Şekil 6.3'te manyetik akı yoğunluğuna ilişkin sonuçlar sunulmuştur. Başlangıç tasarımı, 2D manyetik akı yoğunluğu analizinde SEA simülasyonunun 20,59090 ms zamanında, motor hızı 1100 rpm ve rotor pozisyonu 146,515325 derece olarak zaman bilgisinde analiz sonuçları kaydedilmiştir. Bu tasarımı, stator ortalama manyetik akı yoğunluğu 0,881 T olarak tespit edilmiştir. Stator dışlarındaki manyetik akı yoğunluğu 1,445 T iken, stator dışlarının uç bölgelerinde bu değerin 1,882 T'yi aştığı gözlemlenmiştir. Stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu 1,455 T, rotor bölgesindeki akı yoğunluğu ise 0,774 T olarak saptanmıştır. Mıknatıs akı yoğunluğu ise 0,90 T seviyesindedir. Mıknatıslar arasındaki akı yoğunluğu 2,277 T iken, mıknatısın uç bölgelerinde 2,255 T'lik bir yoğunluk gözlemlenmiştir.

Optimizasyon tasarımı sonrası gerçekleştirilen manyetik akı yoğunluğu incelemesinde, ÇAGA optimizasyon tasarımı, 2D manyetik akı yoğunluğu analizinde SEA simülasyonunun 20,52478 ms zamanında, motor hızı 1100 rpm ve rotor pozisyonu 146,078946° olarak zaman bilgisinde analiz sonuçları kaydedilmiştir. Stator ortalama akı yoğunluğunun 1,068 T yükseldiği tespit edilmiştir. Stator dışlarındaki akı yoğunluğu 1,629 T seviyesine çıkmış, dış uçlarında ise bu değer 1,9 T olarak ölçülmüştür. Mıknatıs akı yoğunluğu 0,931 T'ye ulaşırken, stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu 1,370 T ve rotor bölgesindeki akı yoğunluğu 0,6-0,8 T aralığında belirlenmiştir. Mıknatıslar arasındaki akı yoğunluğu ise 2,2 T, mıknatıs uçlarında 2,157 T olarak tespit edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.3 a) Başlangıç tasarımının akı yoğunluğu ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımı akı yoğunluğu

Optimizasyon tasarımı sonrası gerçekleştirilen manyetik akı yoğunluğu incelemesinde, ÇAGA optimizasyon tasarımda, 2D manyetik akı yoğunluğu

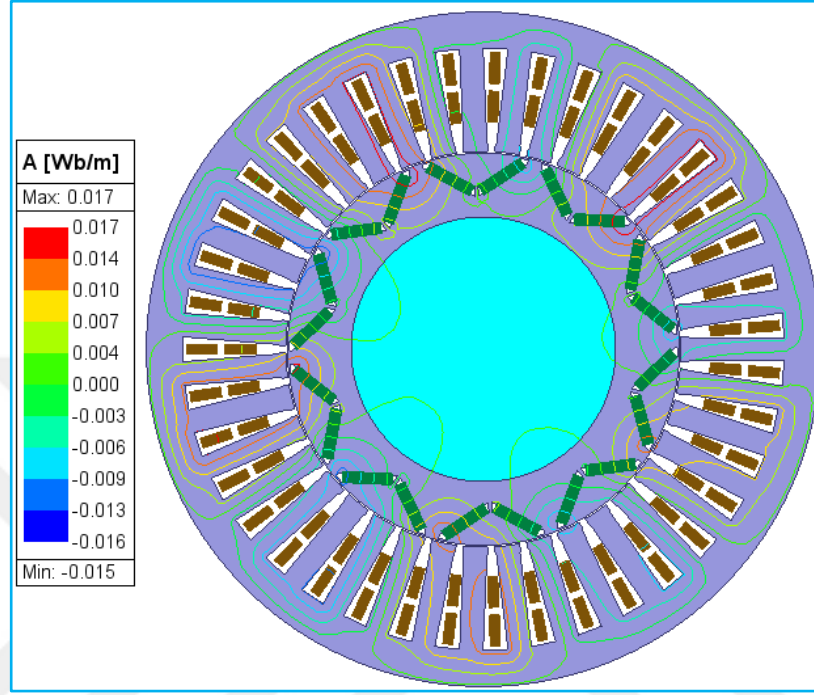
analizinde SEA simülasyonunun 20,52478 ms zamanında, motor hızı 1100 rpm ve rotor pozisyonu 146,078946° olarak zaman bilgisinde analiz sonuçları kaydedilmiştir. Stator'da ortalama akı yoğunluğunun 1,068 T yükseldiği tespit edilmiştir. Stator dişlerindeki akı yoğunluğu 1,629 T seviyesine çıkmış, diş uçlarında ise bu değer 1,9 T olarak ölçülmüştür. Mıknatıs akı yoğunluğu 0,931 T'ye ulaşırken, stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu 1,370 T ve rotor bölgesindeki akı yoğunluğu 0,6-0,8 T aralığında belirlenmiştir. Mıknatıslar arasındaki akı yoğunluğu ise 2,2 T, mıknatıs uçlarında 2,157 T olarak tespit edilmiştir.

Bu bulgular, stator dişlerindeki akı yoğunluklarının, kullanılan silisli saçların manyetik doyma seviyesinin altında kaldığı, diş uçlarında özellikle köşe dönüşlerinde lokal olarak yüksek akı yoğunlukları gözlemlendiği ve bu değerlerin ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirtilmiştir (Soyaslan, 2020). Optimizasyon sonrası tasarımın, başlangıç tasarımına kıyasla önemli iyileştirmeler sağladığını ortaya koymaktadır. Tasarım süreci boyunca boyutsal küçülmeler ve yakın akı yoğunlukları elde edilmiş, buna bağlı olarak demir kayıplarında azalma meydana gelmiştir. Son olarak, motorun tam yük altında çalışırken manyetik doyma noktasına ulaşmadığı saptanmıştır (Pyrrhonen vd., 2013).

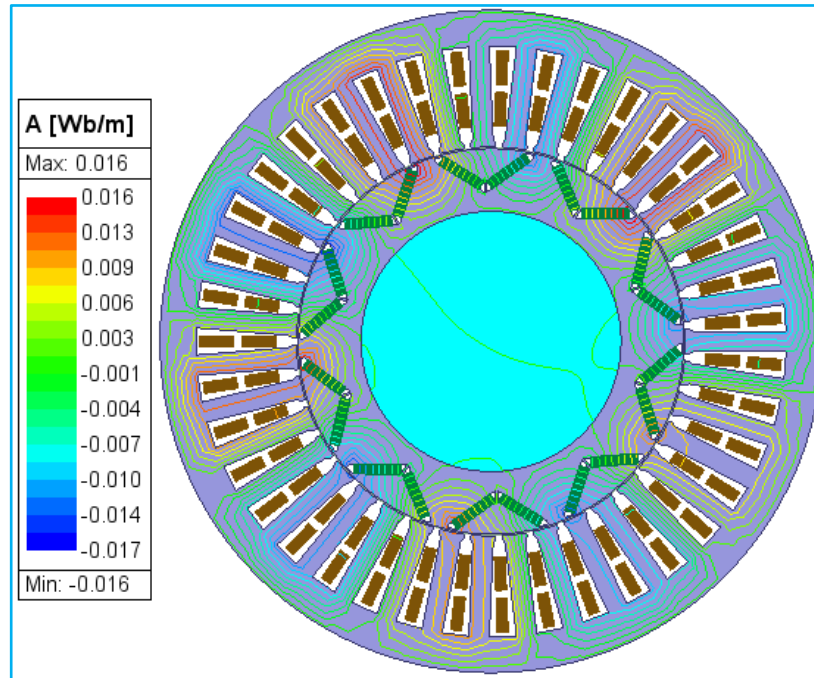
Şekil 6.4'te sunulan 39S-10P modeline ait manyetik akı yolları incelenmiştir. Mıknatısların etkisiyle yoğunlaşan manyetik vektör potansiyelinin, başlangıç tasarımında mıknatısların üzerinde en yüksek değeri 0,017 Wb/m olarak belirlenmiştir. ÇAGA optimizasyonu sonrası yapılan analizde ise, mıknatısların üzerindeki en yüksek manyetik vektör potansiyelinin 0,016 Wb/m olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, optimizasyonun manyetik yoğunlaşmayı etkili bir şekilde azalttığını göstermektedir.

Elektrikli makinelerde manyetik akı sızıntısı olgusu, özellikle performansı optimize etme ve kayıpları en aza indirme bağlamında kritik bir endişe kaynağıdır. İdeal olarak, rotor tarafından üretilen manyetik akı hava boşluğundan stator dişlerine, sonra stator boyunduruğundan ve son olarak karşı rotor kutbuna geçmelidir. Pratik uygulamalarda, bu amaçlanan yoldan sapan ve artan kayıplar gibi istenmeyen etkilere yol açan kaçak akılar sıklıkla meydana gelmektedir. Elektrikli makineler de sızıntı akışlarına birden çok etkileri bulunmaktadır. Kaçak akı yolları, akı geçişleri sırasında kaçak akılar

istenmeyen yolları takip edebilir ve makinenin verimliliğini azaltmaktadır. Bu kaçak yollar, aksi takdirde makinenin performansına katkıda bulunacak enerji kayıplarına neden olmaktadır.



(a)



(b)

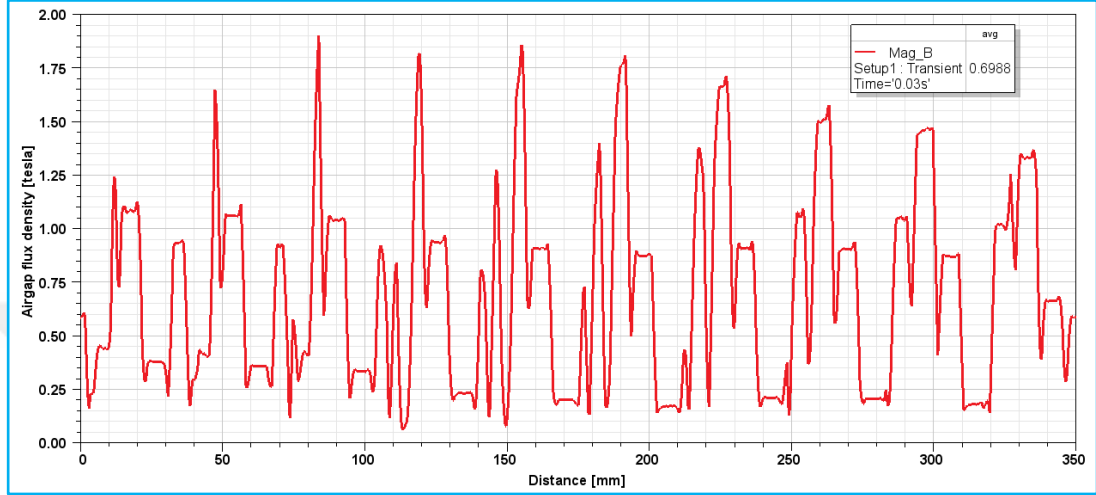
Şekil 6.4 a) Başlangıç tasarımının akı yolu ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımının akı yolu

Hava boşluğu değişkenliği, üretim toleranslarından veya işletme koşullarından kaynaklanan hava boşluğundaki değişimler, kaçak akıyı daha da kötüleştirebilir. Tekdüze olmayan hava boşlukları, düzensiz manyetik alan dağılımlarına yol açabilir ve kaçak akıları etkileyebilir. Manyetik doygunluk, manyetik malzemelerin doygunluğu manyetik akının akışını da etkileyebilir. Manyetik devrenin belirli kısımları doymun hale geldiğinde, malzemenin etkili geçirgenliğinde bir azalmaya yol açabilir ve daha fazla akının sızmasına neden olabilir (Moros vd., 2022; Rezaee-Alam vd., 2021; Soong vd., 2023).

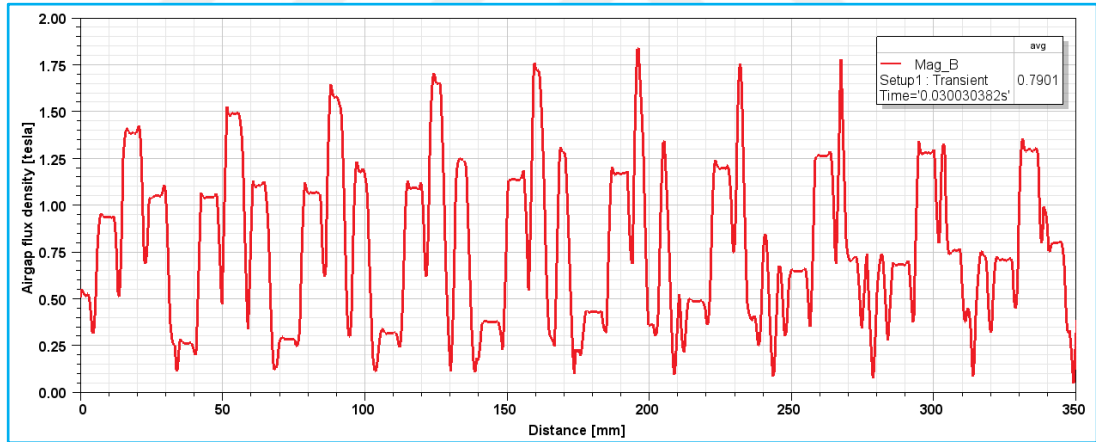
Kaçak akıların neden olduğu kayıpların minimize edilmesi, makinenin genel verimliliğini artırmak açısından son derece önemlidir. Bu nedenle, tasarım sürecinde kaçak akıların doğru bir şekilde hesaplanması kritik bir rol oynamaktadır. Ancak, kaçak akıların hesaplanması oldukça karmaşık bir süreç olup, genellikle Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) gibi ileri mühendislik yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir. Şekil 6.4'te, ÇAGA optimizasyonunun başlangıç tasarımına kıyasla kaçak akı yollarını minimum seviyelere indirdiği görülmektedir. Optimizasyon sonrası tasarımda, akı çizgilerinin stator, hava aralığı, mıknatıs ve rotor üzerinden düzenli ve sürekli bir şekilde geçtiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, rotor üzerinde sınırlı miktarda kaçak akının mevcut olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 6.5'te sunulan SEA analizi sonuçlarına göre elde edilen hava aralığı manyetik akı yoğunluğu grafikleri, rotor ve stator etkileşimi sonucu ortaya çıkan manyetik akı dağılımını göstermektedir. Grafikte gözlemlenen dalgalanmalar, stator dişlerinin rotor ile hizalanması sürecinde manyetik akı yoğunluğunun artıp azaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Başlangıç tasarımında, hava aralığında maksimum manyetik akı yoğunluğu 1,9 T seviyesine ulaşırken, minimum akı yoğunluğu 0,05 T olarak belirlenmiştir. Bu tasarımda hava aralığındaki ortalama manyetik akı yoğunluğu ise 0,6988 T olarak hesaplanmıştır. ÇAGA optimizasyonu sonrası tasarımda ise maksimum manyetik akı yoğunluğu 1,85 T seviyesine düşerken, minimum akı yoğunluğu 0,1 T olarak kaydedilmiştir. Optimizasyon sonrası hava aralığındaki ortalama manyetik akı yoğunluğu ise 0,7901 T olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, optimizasyonun hava aralığındaki akı yoğunluğu üzerinde olumlu bir etki yarattığını göstermektedir. Bu değerler motorun verimli çalışabileceği optimum sınırlar dahilinde

kalmaktadır. Ayrıca, rotor-stator etkileşiminden kaynaklanan harmonik içerik, motor performansını olumlu yönde etkileyebilecek şekilde kontrol altındadır. Genel olarak, analiz edilen veriler, motorun performansını güçlendiren ve potansiyel gelişim alanlarına işaret eden olumlu yönde göstermektedir.



(a)



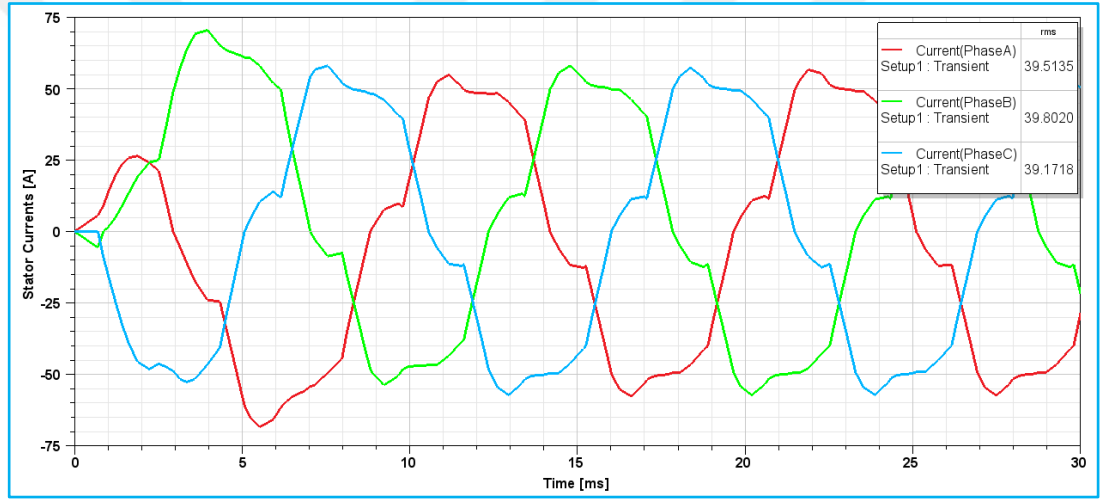
(b)

Şekil 6.5 a) Başlangıç tasarımının hava aralığı akı yoğunluğu ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımının b) ÇAGA optimizasyon tasarımının hava aralığı akı yoğunluğu

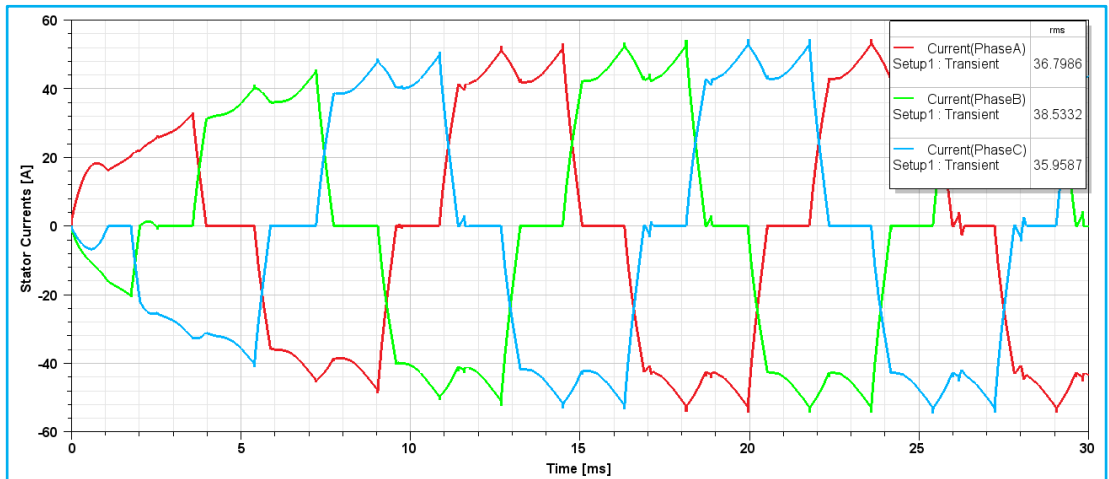
Şekil 6.6’da, stator akımlarının zamanla değişimini göstermektedir. Üç fazlı akımların (A, B ve C) değerleri, 0’dan 30 ms’ye kadar olan bir zaman diliminde sunulmuştur. Kırmızı çizgi, A fazını; yeşil çizgi, B fazını; ve mavi çizgi, C fazını temsil etmektedir. Başlangıç tasarımında, fazlar arasındaki tipik 120° faz farkı ile ilerleyen ve genlik açısından dengeli olan üç fazlı alternatif akım dalgaları gözlemlenmektedir. Grafik, sistemin geçici bir durumda olduğunu ve her bir fazın kök ortalama kare (RMS) akım

değerlerinin sırasıyla 39,5135 A, 39,8020 A ve 39,1718 A olarak hesaplandığını ortaya koymaktadır.

ÇAGA optimizasyon tasarımında ise, fazlar arasında tipik bir faz farkı ve genlik dengesizliği gözlenmektedir. Dalga formlarının kare dalgaya yakın keskin geçişler sergilediği ve genliklerinde belirgin düzensizliklerin bulunduğu dikkat çekmektedir. Her bir faz için RMS akım değerleri sırasıyla 36,7986 A (Faz A), 38,5332 A (Faz B) ve 35,9587 A (Faz C) olarak hesaplanmıştır. Bu veriler, sistemdeki geçici durumun faz akımlarında ani değişimlere ve dalgalanmalara yol açtığını, bunun yük değişimleri veya sistemin geçiş dinamiklerinden kaynaklanabileceğini düşündürmektedir.



(a)



(b)

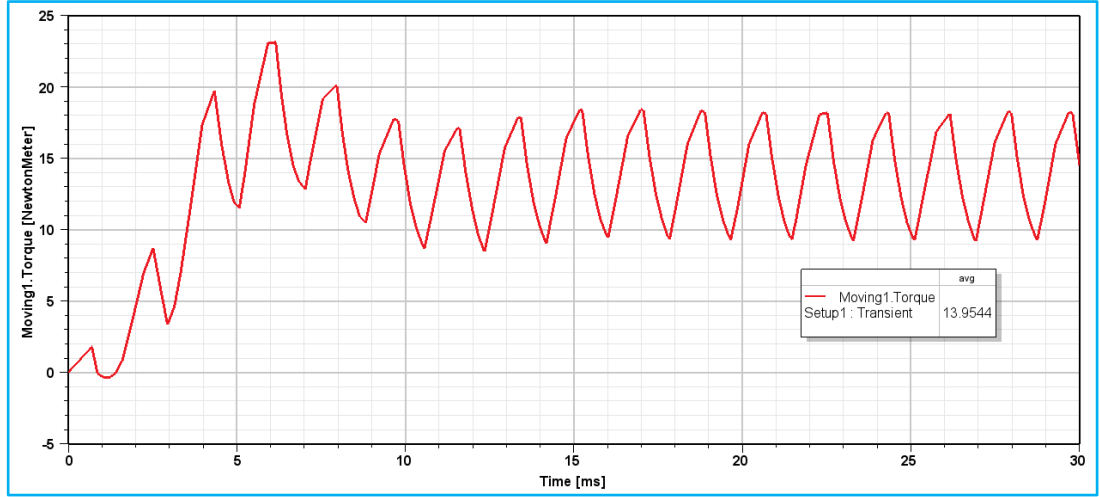
Şekil 6.6 a) Başlangıç tasarımının stator akımları ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımının stator akımları

Şekil 6.7’de SEA analizi sonrası elde edilen tork değerlerinin zaman serisi olarak sunulmasıyla, sistemin tork üretimindeki dinamik değişimleri ve genel performansını ortaya koymaktadır. Başlangıç tasarımında, başlangıçta torkun hızla artarak yaklaşık 5 milisaniyede maksimum değere ulaştığını, ardından düzenli bir dalgalanma sürecine geçtiğini göstermektedir. Bu periyodik tork salınımları, motorun elektromanyetik kuvvetlerle etkileşim halinde olduğuna ve sistemin bu salınımlara cevap verdiğine işaret etmektedir. Ortalama tork değeri 13,9544 Nm olarak hesaplanmış olup, motorun yük altındaki performansını değerlendirmek için önemli bir göstergedir. Ancak, grafik aynı zamanda belirgin bir dalgalanma genliğine sahip olup, bu durum motorun dinamik yanıtında daha fazla dengesizlik olduğu görülmektedir.

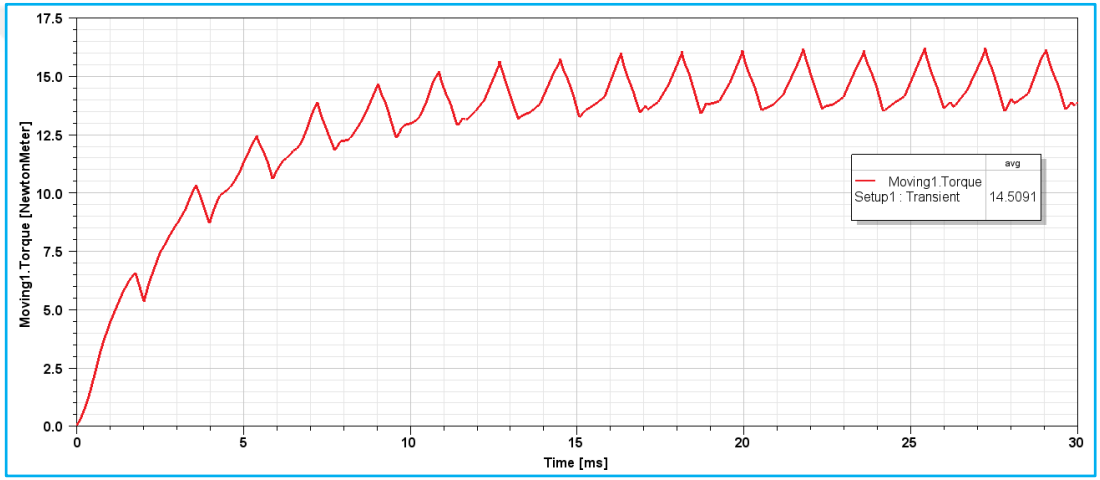
ÇAGA optimizasyon tasarımında grafik de benzer bir başlangıç tork artışı göstermekte; yaklaşık 5 ms’den sonra tork periyodik salınımlar ile dengelenmektedir. Ancak, bu grafikte dalgalanmaların genliği daha küçüktür ve motorun daha kararlı bir performans sergilediği anlaşılmaktadır. Ayrıca, bu motorun ortalama tork değeri 14,5091 Nm ile başlangıç tasarım motorundan daha yüksektir. Bu durum, optimizasyon motorun daha verimli bir tork üretimi sağladığını ve dinamik yanıt açısından daha stabil olduğunu ortaya koymaktadır.

İki tasarım motorun karşılaştırması yapıldığında, optimizasyon motorunun ortalama tork değerinin daha yüksek olduğu ve tork dalgalanmalarının genlik açısından daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklar, optimizasyon motorunun daha kararlı bir performans sergilediğini ve dinamik yanıtının daha kontrollü olduğunu göstermektedir. Başlangıç tasarım motorun ise daha büyük dalgalanmalara sahip olup, bu durum motorun çalışma frekansı ve elektromanyetik kuvvetler arasındaki etkileşimlerin daha karmaşık olduğunu düşündürmektedir. Sonuç olarak, optimizasyon motorunun tasarımı tork üretimi açısından daha verimli ve dengeli olduğu görülmektedir.

Bu analiz, KMSM motorlarının tasarım optimizasyonu sürecinde kritik öneme sahiptir. Motor performansını iyileştirmek ve dalgalanmaları minimize etmek, motorun verimliliğini artırmak açısından önemli unsurlar olup, tork grafiklerinden elde edilen veriler, bu sürecin yönlendirilmesinde kullanılabilir.



(a)

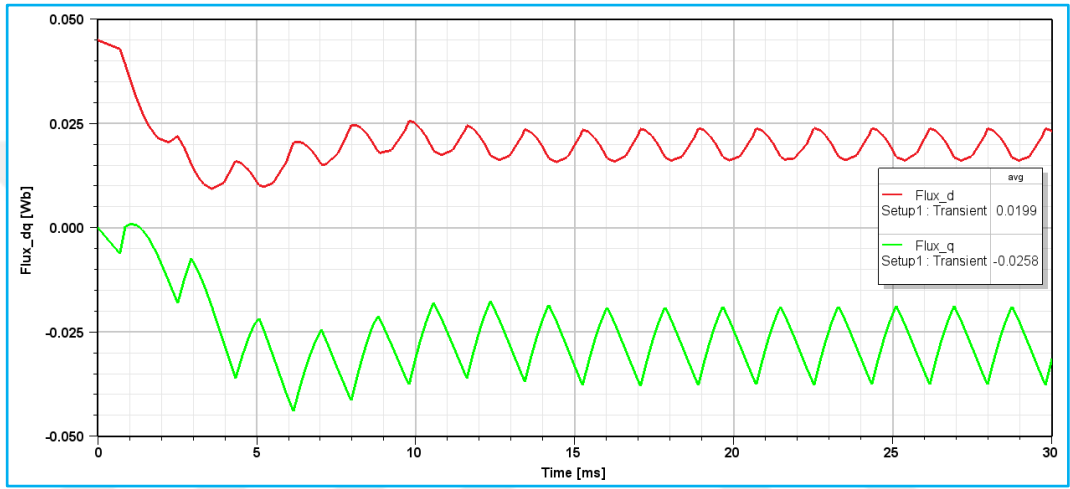


(b)

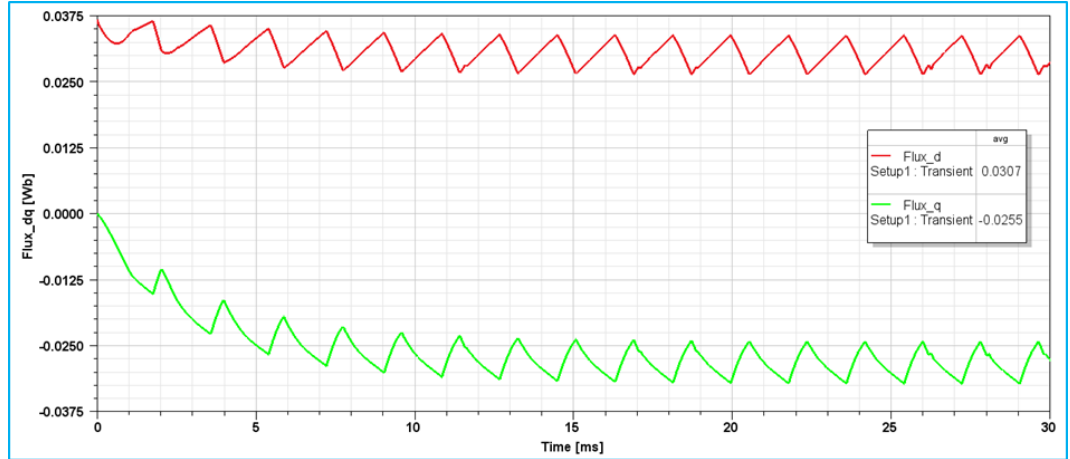
Şekil 6.7 a) Başlangıç tasarımının moment grafiği ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımının moment grafiği

Şekil 6.8’de, zaman eksenine karşılık gelen d-q eksen akı değerleri gösterilmektedir. Başlangıç motor tasarımında d-ekseni manyetik akısı (Flux_d) ortalama olarak 0,0199 Wb civarında dalgalanırken, q-ekseni manyetik akısı (Flux_q) ortalama -0,0258 Wb seviyelerinde gözlemlenmektedir. Bu durum, motorun dinamik performansını ve yük koşullarına verdiği yanıtı doğrudan etkileyen kritik bir gösterge olarak değerlendirilebilir. ÇAGA optimizasyonu ile elde edilen motor tasarımında ise d-ekseni akısının 0,0307 Wb’ye ulaşarak daha yüksek bir ortalama değere sahip olduğu, q-ekseni akısının ise -0,0255 Wb seviyesinde sabit kaldığı görülmektedir. D-ekseni manyetik akısındaki bu artış, optimize edilen motor tasarımının daha etkili bir manyetik alan yönetimi sağladığını ve dolayısıyla genel verimliliği artırdığını ortaya

koymaktadır. Her iki tasarımın karşılaştırılması, motor performansının daha geniş bir perspektiften değerlendirilmesine olanak tanırken, d-ekseni akısındaki değişimlerin motorun tork üretim kapasitesi üzerinde doğrudan bir etkisi olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu analizler, KMSM motor tasarımlarında göz önünde bulundurulması gereken kilit faktörleri ve malzeme seçimlerinin motor performansı üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır. Bu bulgular, gelecekteki motor tasarımlarının optimizasyonu için sağlam bir temel sunmaktadır.



(a)



(b)

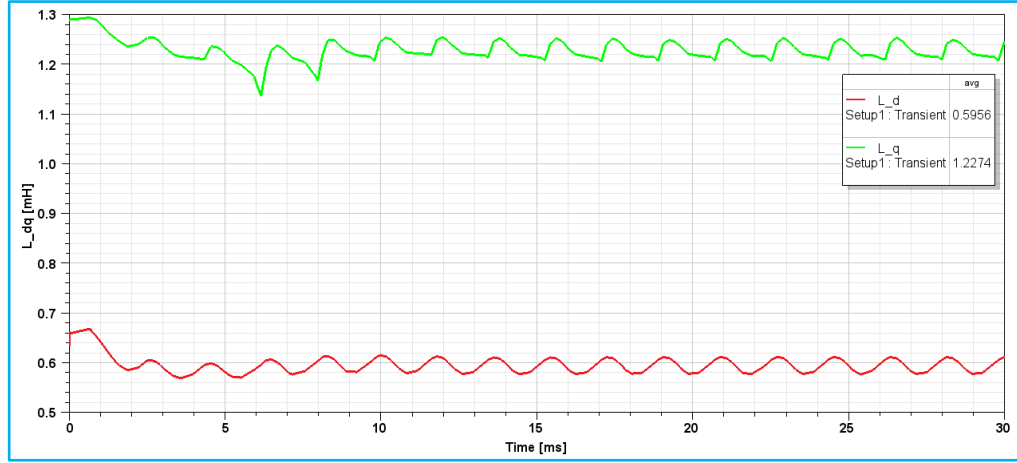
Şekil 6.8 a) Başlangıç tasarımının d-q eksen akıları ve b)ÇAGA optimizasyon tasarımının d-q eksen akıları

Şekil 6.9'da, d-q endüktanslarının zaman (ms) eksenine göre değişimi gösterilmektedir. Kırmızı çizgi, L_d endüktansını temsil ederken, yeşil çizgi L_q endüktansını göstermektedir. Zaman aralığı 0'dan 30 ms'ye kadar uzanmakta ve her iki

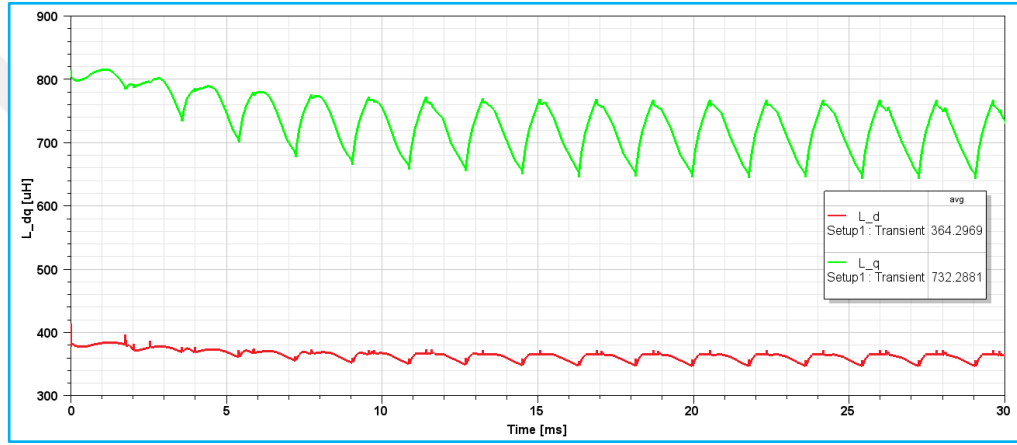
endüktans değeri de belirli bir dalgalanma sergilemektedir. Başlangıç tasarımıda L_d indüktansı yaklaşık 0,5956 mH seviyelerinde sabit kalırken, L_q indüktansı 1,2274 mH civarında dalgalanmalar sergilemektedir. Bu durum, motorun dinamik performansını önemli ölçüde etkileyen bir faktördür. İkinci tasarımıda ise, L_d ve L_q indüktans değerleri mikrohenry (μH) cinsinden sunulmuş olup, L_d indüktansı 364,2969 μH seviyelerinde sabit kalırken, L_q indüktansı 732,2881 μH civarında dalgalanmalar göstermektedir. Her iki grafik arasındaki en belirgin fark, ilk tasarımın daha yüksek L_q indüktans değerine sahip olmasıdır. Bu farklılık, özellikle motorun tork üretimi ve genel verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır.

Tork ve verimlilik açısından değil, motor performansını etkileyen pek çok parametre bakımından farklılık göstermektedir. L_d ve L_q indüktans değerlerinin motorun dinamik tepkisi, hızlanma kabiliyeti, güç faktörü ve akım dalgalanmaları üzerinde doğrudan etkileri bulunmaktadır. Başlangıç motor tasarımıda L_d indüktansı sabit kalırken, L_q indüktansındaki dalgalanmalar, motorun tork üretimi esnasında enerji kayıplarına yol açarak verimliliği ve ısı yönetimi zorlaştırabilir. ÇAGA optimizasyon tasarımıda ise L_d ve L_q değerleri mikrohenry cinsinden sunulmuş olup, bu da motorun hassas kontrol edilebilirliğini ve daha düşük akım dalgalanmalarını desteklemektedir. İndüktans farklılıkları ayrıca motorun termal özellikleri, titreşim ve gürültü seviyelerini de etkileyerek uzun vadede kullanım ömrü ve performans istikrarı üzerinde belirleyici olmaktadır. Sonuç olarak, bu veriler sadece tork ve verimliliği değil, aynı zamanda motorun çalışma karakteristiklerini ve kontrol sistemlerinin etkinliğini optimize etmek açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Şekil 6.10'da d-q akımlarının zaman (ms) eksenine göre değişimi gösterilmektedir. Kırmızı çizgi, L_d akımını temsil ederken, yeşil çizgi L_q akımını göstermektedir. Zaman aralığı 0'dan 30 ms'ye kadar uzanmakta ve her iki akım değeri de belirgin bir dalgalanma sergilemektedir. İki farklı zaman diliminde elde edilen veriler, sabit akım (I_d) ve alternatif akım (I_q) bileşenlerinin dinamiklerini ortaya koymaktadır. Başlangıç motor tasarımıda, sabit akım bileşeni (I_d) dalgalı bir seyir izlerken zamanla negatif değerlere düşmekte ve RMS değeri yaklaşık 49,58 A olarak ölçülmektedir. Alternatif akım bileşeni (I_q) ise daha az dalgalı olup pozitif değerler almakta ve RMS değeri 25,73 A olarak gözlemlenmektedir.



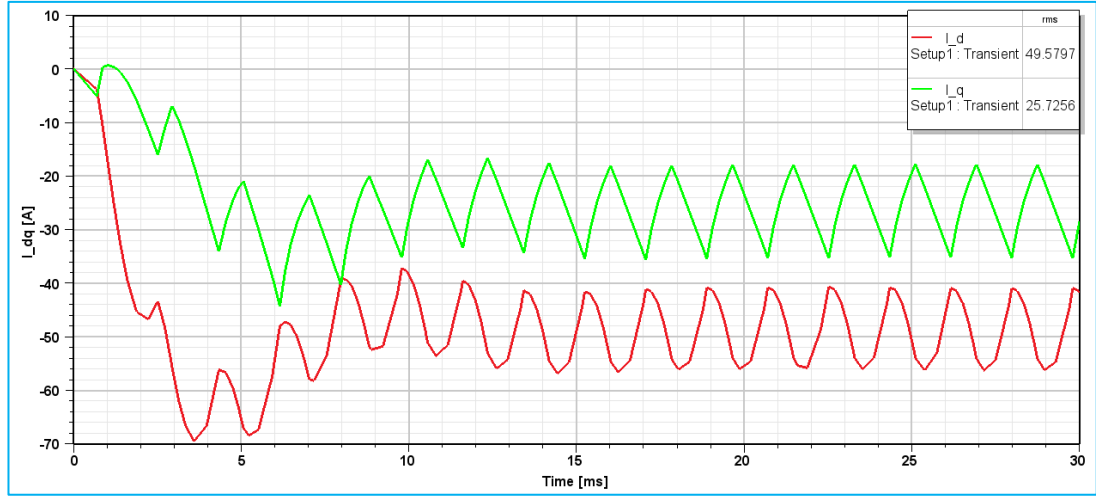
(a)



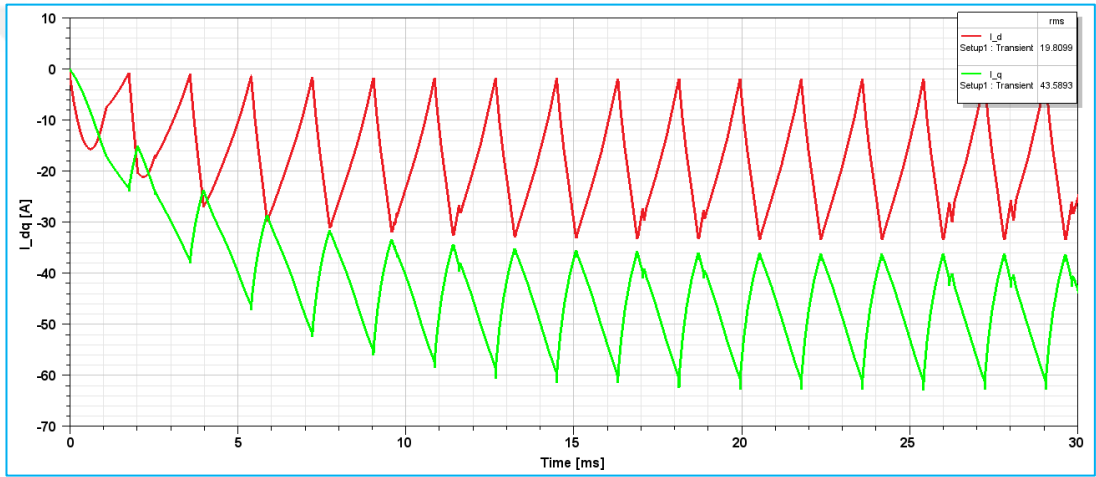
(b)

Şekil 6.9 a) Başlangıç tasarımının d-q endüktansları ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımının d-q endüktansları

Şekil 6.9'da ÇAGA optimizasyon motor tasarımında, sabit akım bileşeninin (I_d) RMS değeri daha düşük olup yaklaşık 19,81 A olarak hesaplanmış, ancak dalgalı bir yapı sergilemektedir. Alternatif akım bileşeni (I_q) bu grafikte belirgin dalgalanmalar göstererek RMS değeri 43,69 A olarak ölçülmüştür. Genel olarak, her iki grafikte de akım bileşenleri arasındaki dalgalanmalar, motorun dinamik davranışlarını ve yük koşullarını yansıtmaktadır. Buna karşın, optimizasyon motor tasarımı grafikte daha düşük RMS değeri olan sabit akım bileşeni, optimizasyon motor tasarımının daha verimli çalıştığını ve enerji tüketimini daha iyi yönettiğini ortaya koymaktadır. Bu analizler, KMSM motor tasarımında akım bileşenlerinin değerlendirilmesinin, motorun enerji verimliliği, performansı ve tork üretimi açısından kritik olduğunu ve motor tasarımlarının belirli uygulama gereksinimlerine göre optimize edilmesine olanak tanıdığını göstermektedir.



(a)

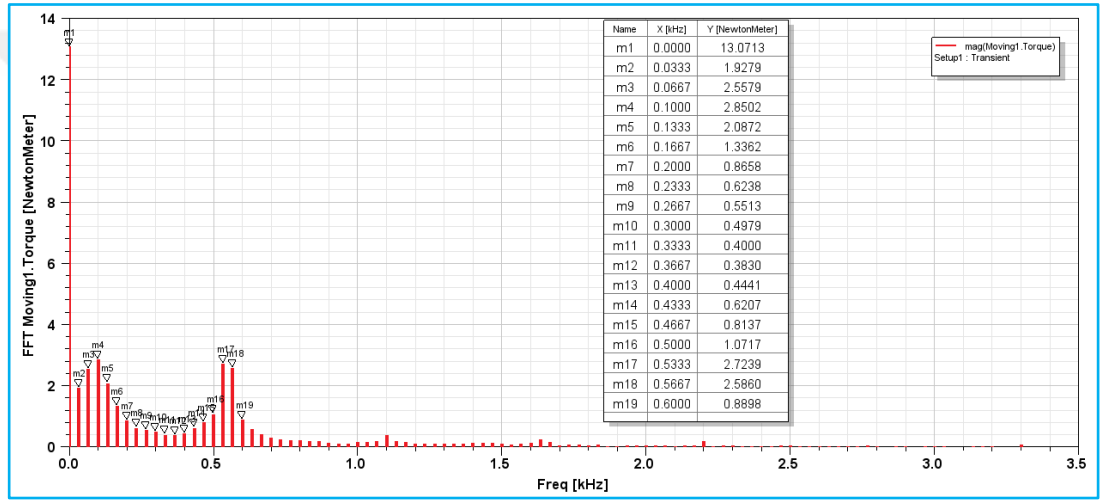


(b)

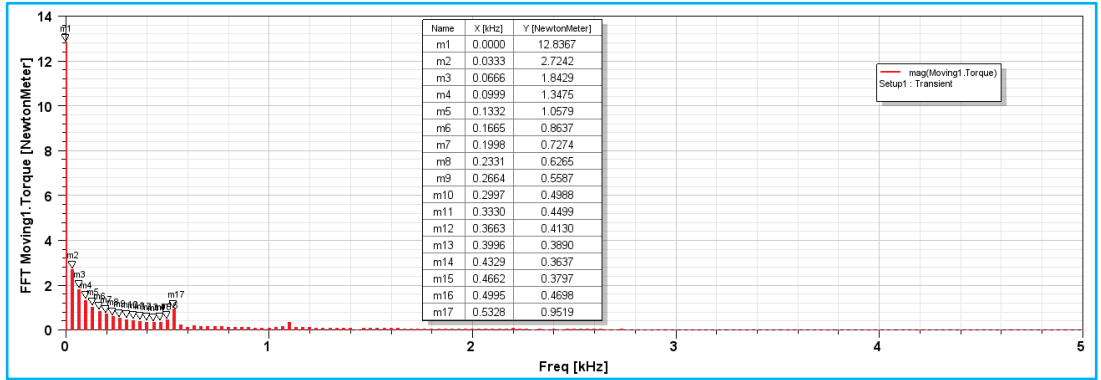
Şekil 6.10 a) Başlangıç tasarımının d-q akımları ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımının d-q akımları

Şekil 6.11’de FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) analizi ile elde edilen moment değerleri, frekans (kHz) eksenine karşılık gelen tork (Newton-Metre) değerlerini göstermektedir. X ekseninde 0’dan 5 kHz’e kadar uzanan frekans aralığı yer almakta, Y ekseninde ise tork değerleri sıralanmaktadır. ÇAGA optimizasyon motor tasarımının analiz sonuçları, 0 kHz ile 5 kHz arasındaki frekanslarda tork dağılımını göstermektedir ve bu motor için kaydedilen maksimum tork değeri 12,837 Nm’dir. Düşük frekanslarda daha yüksek tork değerlerine sahip olan optimizasyon motor tork değerleri, frekans arttıkça azalma eğilimi göstermekte ve özellikle 0,5 kHz civarında önemli bir düşüş gözlemlenmektedir. Başlangıç tasarım motorun sonuçları ise 0 kHz ile 3,5 kHz arasındaki frekans aralığında incelenmiş olup, bu motorun maksimum tork değeri

13,071 Nm olarak kaydedilmiştir. Sonuç olarak, harmoniklerin fazla olması, özellikle yüksek frekanslarda, motorun verimliliğini olumsuz etkileyebilir ve istenmeyen kayıplar ile titreşimlere yol açabilir. ÇAGA optimizasyon motor tasarımı, düşük frekanslarda daha stabil ve verimli bir performans sunarken, Başlangıç motor tasarımının daha geniş bir frekans aralığında tutarlı bir tork sağlamaktadır. Ancak başlangıç motor tasarımında gözlemlenen harmonik bileşenlerin fazlalığı, uzun vadede daha fazla kayıplara yol açmaktadır. İki farklı motor tasarımı, harmonik bileşenlerin minimize edilmesine odaklanarak optimize edilmiş ve performansları, uygulama senaryoları doğrultusunda ÇAGA Optimizasyon yöntemi ile iyileştirilmiştir.



(a)

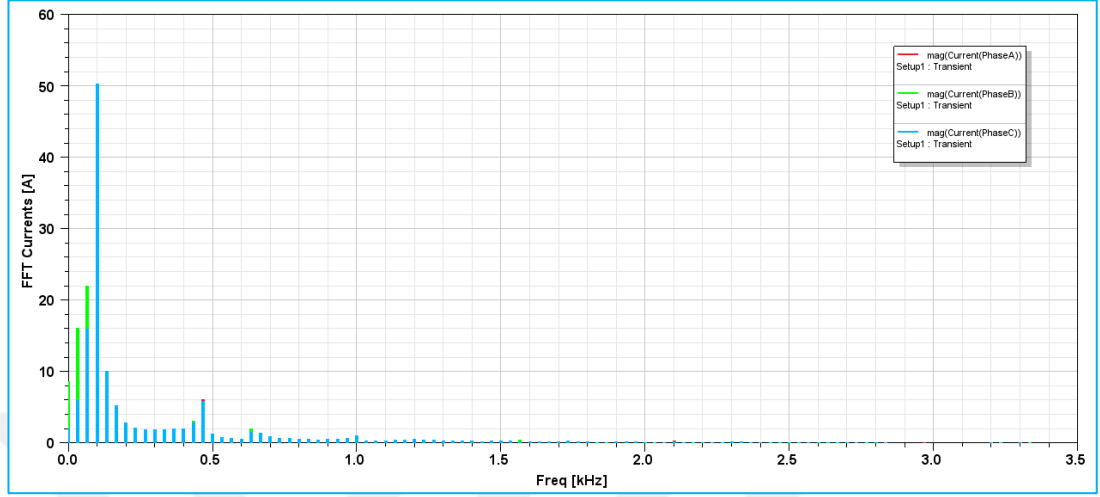


b)

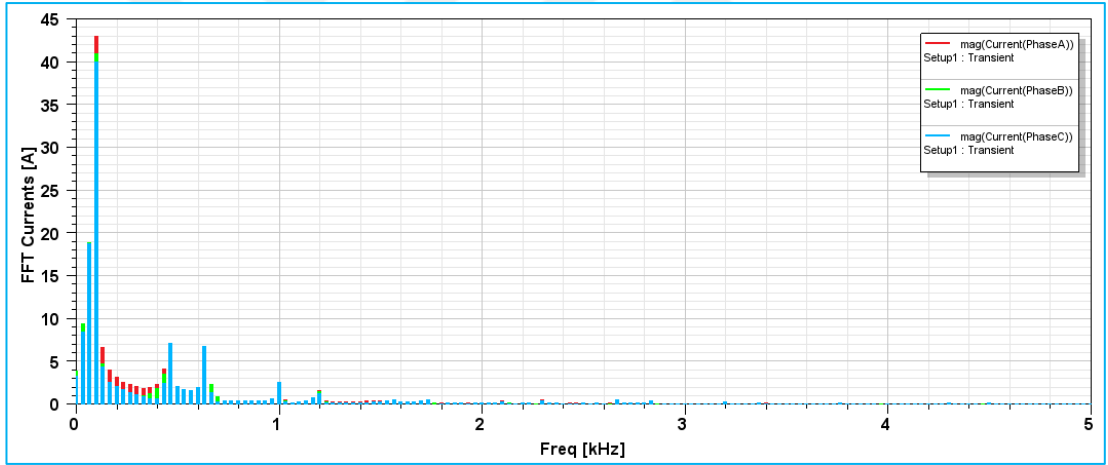
Şekil 6.11 a) Başlangıç tasarımının FFT moment ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımının FFT moment

Şekil 6.12’de FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) analizi ile elde edilen akım değerleri, frekans (kHz) eksenine karşılık gelen üç farklı fazın (A, B ve C) akımlarını

göstermektedir. ÇAGA optimizasyon motor tasarımında frekans aralığı 0-5 kHz arasında olup, maksimum akım değeri yaklaşık 45 A seviyesindedir.



(a)



(b)

Şekil 6.12 a) Başlangıç tasarımının FFT akımlar ve b) ÇAGA optimizasyon tasarımı FFT akımlar

Düşük frekanslarda gözlemlenen belirgin bir peak, motorun düşük yük koşullarında çalıştığını ve daha düşük akım çektiğini göstermektedir. Buna karşılık, başlangıç motor tasarımı frekans aralığı 0-3,5 kHz arasında olup, maksimum akım değeri yaklaşık 60 A'dır. Başlangıç motor tasarımı, daha yüksek frekanslarda peak yaparak daha yüksek yük koşullarında çalıştığını ve daha fazla akım çektiğini ortaya koymaktadır. İki motor arasındaki temel fark, optimizasyon motor tasarımında daha düşük akım değerleriyle çalışarak enerji verimliliği sağlaması, başlangıç motor tasarımında ise daha yüksek güç gereksinimi nedeniyle daha fazla enerji tüketimi

görülmektedir. Her iki sonuçta frekans arttıkça tüm fazların akım değerlerinde belirgin bir azalma gözlemlenmektedir.

ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak yapılan detaylı bir elektrik makinesi tasarım analizi sunulmaktadır. Başlangıç tasarımından ÇAGA optimizasyon tasarımına geçişte sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen bulgular, 39S-10P motor modeline ilişkin iyileştirmeler görülmektedir. Elde edilen sonuçlar motorun performansını ve motor modelinin tasarım parametrelerinin doğruluğunu test etmek için kritik bir öneme sahiptir. Özellikle analiz sürecinde elde edilen sonuçlar, motorun verimlilik, güvenilirlik ve performans hedeflerine ne ölçüde ulaştığını anlamamızı sağlamakta olup, bu modelin gelecekteki geliştirmeleri ve uygulamaları açısından da yol gösterici niteliktedir. Bu bağlamda, tamamlanan 39S-10P motor modeli, ilgili performans kriterleri doğrultusunda başarılı bir şekilde test edilmiş ve sistemin genel işlevselliği açısından olumlu sonuçlar vermektedir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, gömülü kalıcı mıknatıslı senkron motor (KMSM) tasarımı için 1.4 kW gücünde bir uygulama geliştirilmiştir. Analitik KMSM tasarımı kapsamında, en boy oranı, vuruñtu torku, parametrik analiz ve optimizasyon süreçlerine ilişkin sonuç değerlendirmeleri yapılmıştır.

En Boy Oranı, KMSM tasarımında en boy oranının artmasıyla verimin genel olarak düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, en boy oranının stator paket uzunluğunun artmasına bağlıdır. Yüksek en boy oranı, daha büyük bir stator paket uzunluğu anlamına gelmekte olup, bakır kayıplarının artmasına ve dolayısıyla verimliliğin azalmasına neden olmaktadır. En boy oranının azalmasıyla verimin arttığı belirlenmiştir.

Vuruñtu torku ve tork dalgalanmasının kombinasyonu, motor performansında dengesiz tork titreşimlerine yol açmakta olup, vuruñtu torkunun rotordaki kalıcı mıknatısların sayısı ve statordaki oluk sayısı ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, rotordaki kalıcı mıknatıs sayısı ve stator oluk kombinasyonları dikkate alınarak düşük vuruñtu torku elde edilmiştir. Vuruñtu torkunu en aza indirmenin en önemli yolunun n_{cog} değeri yüksek olması ve GCD değeri ne kadar küçükse vuruñtu torkunun o kadar düşük olduğu belirlenmiştir. LCM değeri ne kadar büyükse vuruñtu torkunun o kadar düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu üç kriterin vuruñtu torkuna etkileri göz önüne alındığında, 39 oluk ve 10 kutup kombinasyonunun en düşük vuruñtu torkuna sahip olduğu belirlenmiştir.

Parametrik Analiz, Elektrik makinelerinin verimliliği üzerindeki etkileri incelemek amacıyla üç farklı parametre değerlendirilmiştir: oluk başına iletken sayısı, stator diş kalınlığı ve stator boyunduruğu. Bu parametrelerin motor performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kapsamlı bir parametrik analiz gerçekleştirilmiş olup, her bir parametre için optimum değerler belirlenmiştir. Bu parametrelerin motorun çıkış gücü, verimliliği, tutma torku ve kayıplar üzerindeki etkileri dikkate alınarak en uygun değerler saptanmıştır.

Tasarlanan KMSM'nin tasarım sürecinde, motor performans verilerinin iyileştirilmesi amacıyla çok amaçlı genetik algoritma (ÇAGA) kullanılmıştır. Bu süreçte, belirlenen amaç fonksiyonlarının parametre değerlerine göre optimum sonuçları hesaplayan bir algoritma yöntemi geliştirilmiştir. Optimizasyon sürecinde belirlenen parametreler; iki kutup arası boşluk, mıknatısın yan iç köprü uzunluğu, rotor boyunduruğu, mıknatıslar arası mesafe, mıknatıs kalınlığı, mıknatıs uzunluğu, oluk dış ucu yüksekliği ve dış ucu yüksekliği olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin seçimi sırasında doluluk oranı, verimlilik ve akım yoğunluğunun belirlenen amaç fonksiyonları sınırları içinde kalması hedeflenmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen parametre değerlerine Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak nihai tasarım şekli verilmiştir. Özellikle belirlenen parametrelerin optimizasyon üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiş ve bu doğrultuda elektrikli makine tasarımında performans iyileştirilmiştir.

39S-10P motor modelinin başlangıç tasarımı ve ÇAGA optimizasyon tasarım modelleri, sonlu elemanlar analizi (SEA) kullanılarak incelenmiştir. Analizler, manyetik akı yoğunluğu, kaçak akı, tork üretimi ve d-q eksen akı/endüktans değerleri gibi kritik performans parametreleri açısından gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. İki boyutlu modelleme yöntemiyle yapılan bu incelemede, başlangıç tasarımından ÇAGA optimizasyon sürecine kadar yapılan iyileştirmeler gözlemlenmiştir. Hava boşluğu akı yoğunluğu ve d-q eksenindeki akım-endüktans dalgalanmaları, motorun performansını etkileyen önemli parametreler olup, bu sonuçlar motorun dengeli çalıştığını ve istenilen performansı sergilediğini göstermektedir. SEA sonrasında belirlenen motor konfigürasyonu, istenilen değerlere yakın bir performans sergileyerek optimizasyon sürecine önemli katkılar sağlamıştır.

Sonuç olarak, bu çalışmada farklı oluk ve kutup konfigürasyonları detaylı bir şekilde incelenmiş ve %94-95 arasında verim değerlerine ulaşan, düşük vuruş torkuna sahip tasarımlar belirlenmiştir. Belirlenen 39 oluk ve 10 kutuplu konfigürasyonun, 1.4 kW güç ve 1100 rpm hızında çalışan, tepeden tepeye 8 mNm ile en düşük vuruş torku elde edilmiştir. Sonuç olarak, 39 oluk ve 10 kutuplu konfigürasyonun, bu çalışma kapsamında istenilen değerlere yakın bir performans sergilemiştir.

KAYNAKLAR

- Adnane, M., Nguyen, C. T., Khoumsi, A., & Trovão, J. P. F. (2023, October). Torque Distribution Prediction for Dual-Motor Electric Vehicle Using Ensemble Learning Algorithms. In 2023 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) (pp. 1-6). IEEE.
- Adnane, M., Nguyen, C. T., Khoumsi, A., & Trovão, J. P. F. (2024). Real-Time Torque-Distribution for Dual-Motor Off-Road Vehicle Using Machine Learning Approach. IEEE Transactions on Vehicular Technology.
- Akaki, R., Takahashi, Y., Fujiwara, K., Matsushita, M., Takahashi, N., & Morita, M. (2013). Effect of magnetic property in bridge area of IPM motors on torque characteristics. IEEE transactions on magnetics, 49(5), 2335-2338.
- Alanazi, F. (2023). Electric vehicles: benefits, challenges, and potential solutions for widespread adaptation. Applied Sciences, 13(10), 6016.
- Al-Kaf, H. A. G., Hakami, S. S., & Lee, K. B. (2022). Hybrid current controller for permanent-magnet synchronous motors using robust switching techniques. IEEE Transactions on Power Electronics, 38(3), 3711-3724.
- Ammar, A. O. M. O. (2023). Design and performance evaluation of V-shape PMSM in automotive oil pump systems.
- Arslan, S., Iskender, I., & Navruz, T. S. (2023). Finite Element Method-Based Optimisation of Magnetic Coupler Design for Safe Operation of Hybrid UAVs. Aerospace, 10(2), 140.
- Aslan, B., & Balcı, S. (2021). Sonlu elemanlar analizi yazılımı ile ipm mil motor performans analizi üzerine karşılaştırmalı bir benzetim çalışması. Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2(2), 81-90.
- Aslan, M., Özpolat, A. B., Cengiz, İ. Ş. Ç. İ., Eroğlu, F., & Vural, A. M. (2020). Design and modelling of internal permanent magnet motor. The International Journal of Energy and Engineering Sciences, 5(2), 80-104.
- Avdeev, A., & Osipov, O. (2019, January). PMSM identification using genetic algorithm. In 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED) (pp. 1-4). IEEE.
- Aydın, M., Ocak, O., & Albaş, G. Ç. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Doğrudan Sürüslü Beyaz Eşya Uygulamalarında Kullanımı. EMO Bilimsel Dergi, 2(3), 7-12.
- Binder, J., Silvagni, M., Ferrari, S., Deusinger, B., Tonoli, A., & Pellegrino, G. (2023, April). High-speed IPM motors with rotor sleeve: structural design and performance evaluation. In 2023 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD) (pp. 1-6). IEEE.

- Boldea, I., & Tutelea, L. N. (2009). *Electric machines: steady state, transients, and design with MATLAB*. CRC press.
- Boztaş, G., Yıldırım, M., & Aydoğmuş, Ö. (2020). Design and optimization of a PMSM for obtaining high-power density and high-speed. *Turkish Journal of Science and Technology*, 15(2), 61-70.
- Busquets-Monge, S., Alepuz, S., García-Rojas, G., & Bordonau, J. (2023). Electric Vehicle Powertrains with Modular Battery Banks Tied to Multilevel NPC Inverters. *Electronics*, 12(2), 266.
- Çetinceviz, Y. (2017). Küçük ölçekli rüzgâr ve nehir santralleri için 4 KW gücünde kalıcı mıknatıslı senkron generatör tasarımı ve gerçekleştirilmesi.
- Cui, J., Cui, F., Zhang, J., Huang, H., Tan, L., & Xiao, W. (2023). Design Optimization of an Automotive Permanent-Magnet Synchronous Motor by Combining DOE and NMGWO. *Electronics*, 12(24), 5024.
- Di Gerlando, A., & Ricca, C. (2022, September). Design Modeling and Sizing Equations of V-shape IPM Motors. In *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 1061-1067). IEEE.
- Ding, L., Cheng, Y., Zhao, T., Yao, K., Wang, Y., & Cui, S. (2023). Design and Optimization of an Asymmetric Rotor IPM Motor with High Demagnetization Prevention Capability and Robust Torque Performance. *Energies*, 16(9), 3635.
- Doss, M. A. N., Anuja, T. A., Eswar, K. S., Raja, M. V., Ramasubramanian, V. S., Shalini, E., & Priya, S. (2023). Regenerative braking of BLDC motor applied to electric vehicles. *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 15(3), 424-427.
- Du, G., Li, H., Zhang, G., Hu, C., Zhang, Q., & Liang, L. (2023, November). Electromagnetic Design of Low Speed Inner Rotor Permanent Magnet Motor for Mine Direct Drive System. In *2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (pp. 1149-1154). IEEE.
- Du, G., Li, N., Zhou, Q., Gao, W., Wang, L., & Pu, T. (2022). Multi-physics comparison of surface-mounted and interior permanent magnet synchronous motor for high-speed applications. *Machines*, 10(8), 700.
- Esfahani, F. N., & Darwish, A. (2022, June). Regenerative Braking for EVs Using PMSM with CHB as Bidirectional Traction Converter. In *2022 IEEE 16th International Conference on Compatibility, Power Electronics, and Power Engineering (CPE-POWERENG)* (pp. 1-7). IEEE.
- Gieras, J. F. (2008). *Advancements in electric machines*. Springer Science & Business Media.
- Gieras, J. F. (2009). *Permanent magnet motor technology: design and applications*. CRC press.

- Gope, D., & Goel, S. K. (2021). Design optimization of permanent magnet synchronous motor using Taguchi method and experimental validation. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 22(1), 9-20.
- Güemes, J. A., Iraolagoitia, A. M., Fernández, P., & Donsión, M. P. (2010, September). Comparative study of PMSM with integer-slot and fractional-slot windings. In *The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010* (pp. 1-6). IEEE.
- Gülçin, E. A., & AKAR, M. (2018). Tek fazlı şebeke kalkışlı sabit mıknatıslı senkron motor tasarımı (Doctoral dissertation, Yüksek lisans tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat).
- Gürdal, O. (2001). Elektrik makinalarının tasarımı. Atlas Yayın Dağıtım.
- Hahlbeck, S., & Gerling, D. (2008, September). Design considerations for rotors with embedded V-shape permanent magnets. In *2008 18th International Conference on Electrical Machines* (pp. 1-4). IEEE.
- Han, S., Kim, S., Jo, G., & Kim, H. C. (2023). Selecting Method for Number of Slots and Poles in Brushless Direct Current Motor. *Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 7(2), 106-115.
- Hanselman, D. C. (2003). Brushless permanent magnet motor design. The Writers' Collective.
- Hashemnia, N., & Asaei, B. (2008, September). Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. In *2008 18th international conference on electrical machines* (pp. 1-5). IEEE.
- Horn, J., Nafpliotis, N., & Goldberg, D. E. (1994, June). A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. In *Proceedings of the first IEEE conference on evolutionary computation. IEEE world congress on computational intelligence* (pp. 82-87). Ieee.
- Horvath, P., & Nyerges, A. (2022). Design aspects for in-vehicle IPM motors for sustainable mobility. *Cognitive Sustainability*, 1(1).
- Hua, Y., Zhou, S., Cui, H., Liu, X., Zhang, C., Xu, X., ... & Yang, S. (2020). A comprehensive review on inconsistency and equalization technology of lithium-ion battery for electric vehicles. *International Journal of Energy Research*, 44(14), 11059-11087.
- Hwang, C. C., John, S. B., & Wu, S. S. (1998). Reduction of cogging torque in spindle motors for CD-ROM drive. *IEEE transactions on magnetics*, 34(2), 468-470.
- Hwang, C. C., Wu, M. H., & Cheng, S. P. (2006). Influence of pole and slot combinations on cogging torque in fractional slot PM motors. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 304(1), e430-e432.

- Hwang, M. H., Han, J. H., Kim, D. H., & Cha, H. R. (2018). Design and analysis of rotor shapes for IPM motors in EV power traction platforms. *Energies*, 11(10), 2601.
- Ion, B., & Syed, A. N. (2010). *The Induction Machines Design Handbook*. Electric Power Engineering Series, 2nd ed., by Taylor and Francis Group, LLC, Boca Raton London New York.
- Jaatinen, P., Jastrzebski, R. P., Sugimoto, H., Pyrhönen, O., & Chiba, A. (2015, October). Optimization of the rotor geometry of a high-speed interior permanent magnet bearingless motor with segmented magnets. In 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (pp. 962-967). IEEE.
- Jagiela, M., Garbiec, T., & Kowol, M. (2014). Design of high-speed hybrid hysteresis motor rotor using finite element model and decision process. *IEEE transactions on magnetics*, 50(2), 861-864.
- Karaoglan, A. D., & Perin, D. (2022). Rotor design optimization of a synchronous generator by considering the damper winding effect to minimize THD using grasshopper optimization algorithm. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 12(2), 90-98.
- Kartal, E. T., & Arabul, F. K. (2022). A Comparison between IM and IPMSM with Same Stator Core for EV and Performance Analysis of IPMSM. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (38), 165-172.
- Kilmartin, J. (2016). *Effects of the Pole-Slot Combination on a Surface Permanent Magnet Generator for Wind Applications* (Doctoral dissertation, Flinders University, School of Computer Science, Engineering and Mathematics.).
- Kumar, M., Panda, K. P., Naayagi, R. T., Thakur, R., & Panda, G. (2023). Comprehensive Review of Electric Vehicle Technology and Its Impacts: Detailed Investigation of Charging Infrastructure, Power Management, and Control Techniques. *Applied Sciences*, 13(15), 8919.
- Li, D., Feng, G., Li, W., Zhang, B., & Zhang, J. (2022). Effect of stator slots on electromagnetic performance of a high-voltage line-start permanent magnet synchronous motor. *Energies*, 15(9), 3358.
- Lin, X., Wu, C., Yao, W., Liu, Z., Shen, X., Xu, R., ... & Liu, J. (2022). Observer-based fixed-time control for permanent-magnet synchronous motors with parameter uncertainties. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(4), 4335-4344.
- Liu, H. (2015). *Design of High-Efficiency Rare-Earth Permanent Magnet Synchronous Motor and Drive System*.
- Liu, J., & Zhou, Q. (2019, June). Design and optimization of permanent magnet synchronous motor based on finite element analysis. In 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) (pp. 2055-2058). IEEE.

- Liu, X., Guo, G., Du, L., & Zhu, W. (2021). Multi-objective optimal design and analysis of variable leakage flux IPM motors for improve flux-weakening ability. *Progress In Electromagnetics Research C*, 113, 147-160.
- Mansyur, U., Sitorus, S. R., & Prasetyo, L. B. (2023). Valuation Of Transportation Policy In Makassar City Based On Vehicle Emission Pollution For Sustainable Zone Planning. *Planning Malaysia*, 21.
- Mei, L., Xiao, W., Cui, J., Zhang, Q., & Liu, Z. (2023). Analytical modeling and pole–slot combination selection analysis of a direct-drive drilling permanent magnet synchronous motor. *Processes*, 11(11), 3222.
- Meier, F. (2008). Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications (Doctoral dissertation, KTH).
- Mendizabal, M., McCloskey, A., Poza, J., Zarate, S., & Irazu, L. (2023). Sensitivity Analysis of the Design Parameters of Permanent Magnet Synchronous Motors for Vibration Reduction. *Applied Sciences*, 13(9), 5486.
- Moros, S., Tenner, S., Kempkes, J., & Schäfer, U. (2022, September). Calculation of Slot Leakage Flux and Current Displacement in Form-Wound Windings of Electric Machines by Magnetic Equivalent Circuit. In *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 1246-1252). IEEE.
- Muna, Y. B., & Kuo, C. C. (2022). Feasibility and techno-economic analysis of electric vehicle charging of PV/Wind/Diesel/Battery hybrid energy system with different battery technology. *Energies*, 15(12), 4364.
- Murata, T., & Ishibuchi, H. (1995, November). MOGA: multi-objective genetic algorithms. In *IEEE international conference on evolutionary computation* (Vol. 1, pp. 289-294). IEEE Piscataway.
- Nobahari, A., Vahedi, A., & Nasiri-Zarandi, R. (2021). A modified permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor design for torque characteristics improvement. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 37(2), 989-998.
- Ocak, O. (2021). Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda moment kalitesini artırmaya yönelik melez mıknatıs yerleşimli yeni bir rotor yapısı tasarımı ve deneysel doğrulaması (Yüksek Lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Özüpak, Y., & Çınar, M. (2023). Design and Co-Analysis of A Permanent Magnet Brushless DC Motor By Using Clonal Selection Principle Based Wound Healing Algorithm and Ansys-Maxwell. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 499-510.
- Özüpak, Y., & Çınar, M. (2023). Design Of The Permanent Magnet Synchronous Motor Used In Electric Vehicles With The Help Of The Particle Swarm Algorithm and Ansys-Maxwell. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(20), 141-155.

- Paitandi, S., & Sengupta, M. (2020). Analysis, fabrication and detailed comparative study of surface and interior rotor PMSM prototypes of identical nominal ratings and stators. *Sādhana*, 45(1), 69.
- Pillay, P., & Krishnan, R. (1991). Application characteristics of permanent magnet synchronous and brushless DC motors for servo drives. *IEEE Transactions on industry applications*, 27(5), 986-996.
- Pradhan, S., Shekher, V., & Kumar, M. (2023, Kasım). Regenerative Braking Control Strategy for Electric Vehicles based on PSO Optimization of BLDC Motor Speed Control. In 2023 International Conference on Sustainable Communication Networks and Application (ICSCNA) (ss. 678-684). IEEE.
- Pranjić, F., & Virtič, P. (2024). Cogging Torque Reduction Techniques in Axial Flux Permanent Magnet Machines: A Review. *Energies*, 17(5), 1089.
- Pražanová, A., Knap, V., & Stroe, D. I. (2022). Literature Review, Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles, Part I: Recycling Technology. *Energies*, 15(3), 1086.
- Pyrhonen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova, V. (2013). Design of rotating electrical machines. John Wiley & Sons.
- Raja, M. S., & Geethalakshmi, B. (2022). Evaluation of brushless DC motor structure design for the electric impact using 3-D finite element analysis. *International Journal of Applied*, 11(2), 156-164.
- Rao, S. S. (2019). Engineering optimization: theory and practice. John Wiley & Sons.
- Rezaee-Alam, F., Rezaeealam, B., & Moosavi, S. M. M. (2021). An Improved Magnetic Equivalent Circuit Model for Electromagnetic Modeling of Electric Machines. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, 17(3).
- Rimpas, D., Kaminaris, S. D., Piromalis, D. D., Vokas, G., Arvanitis, K. G., & Karavas, C. S. (2023). Comparative review of motor technologies for electric vehicles powered by a hybrid energy storage system based on multi-criteria analysis. *Energies*, 16(6), 2555.
- Samala, N. S. (2018). Cogging torque and torque ripple analysis on permanent magnet synchronous machines.
- Shen, Q., Zhou, Z., Li, S., Liao, X., Wang, T., He, X., & Zhang, J. (2022). Design and analysis of the high-speed permanent magnet motors: A review on the state of the art. *Machines*, 10(7), 549.
- Soleimani, K. M., & Gholamian, S. A. (2013). Optimum design of a three-phase permanent magnet synchronous motor for industrial applications.
- Soong, W. L., Roshandel, E., Cao, Z., Mahmoudi, A., & Kahourzade, S. (2023, May). Axial Force Negative Stiffness in Axial-Flux Electric Machines. In 2023 IEEE

International Magnetic Conference-Short Papers (INTERMAG Short Papers) (pp. 1-2). IEEE.

Soyaslan, M. (2020). Asansör tahrik sistemleri için dıştan rotorlu sürekli mıknatıslı bir senkron motor tasarımı.

Stamenkovic, I., Jovanovic, D., & Vukosavic, S. (2005, Kasım). Torque ripple verification in PM machines. In EUROCON 2005-The International Conference on "Computer as a Tool" (Cilt 2, ss. 1497-1500). IEEE.

Tang, H., Zhang, M., Dong, Y., Li, W., & Li, L. (2020). Influence of the opening width of stator semi-closed slot and the dimension of the closed slot on the magnetic field distribution and temperature field of the permanent magnet synchronous motor. IET Electric Power Applications, 14(9), 1642-1652.

Tang, X., Chen, J., Pu, H., Liu, T., & Khajepour, A. (2021). Double deep reinforcement learning-based energy management for a parallel hybrid electric vehicle with engine start-stop strategy. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 8(1), 1376-1388.

Tümbek, M. (2019). Elektrikli araçlar için dış rotorlu doğrudan yol vermeli senkron motor tasarımı, analizi ve sürülmesi.

URL-1. <https://www.youtube.com/watch?v=XiQhn7PzyQo>. Erişim tarihi; 13/05/2024.

URL-2. <https://blog.s-t.com.tr/2021/05/13/parametrik-analiz-vs-optimizasyon/#:~:text=Parametrik%20analiz%2C%20%C3%B6rne%C4%9Fin%20bir%20kontakt%C3%B6rdeki,dizi%20parametrik%20analiz%20arac%C4%B1%20sunar>. Erişim tarihi; 13/05/2024.

Vasudeva, C., & Marwaha, S. (2017). Quasi-Static Field Analysis Of Permanent Magnet Generator Using H-Hierarchical Adaptive Finite Element Method. Journal of Engineering Science and Technology, 12(10), 2613-2627.

Wang, A., Jia, Y., & Soong, W. L. (2011). Comparison of five topologies for an interior permanent-magnet machine for a hybrid electric vehicle. IEEE transactions on Magnetics, 47(10), 3606-3609.

Wang, S. C., Nien, Y. C., & Huang, S. M. (2022). Multi-objective optimization design and analysis of V-shape permanent magnet synchronous motor. Energies, 15(10), 3496.

Wei, F., Walls, W. D., Zheng, X., & Li, G. (2023). Evaluating environmental benefits from driving electric vehicles: The case of Shanghai, China. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 119, 103749.

Won, Y. J., Kim, J. H., Park, S. H., Lee, J. H., An, S. M., Kim, D. Y., & Lim, M. S. (2023). Transfer Learning-Based Design Method for Cogging Torque Reduction in PMSM with Step-Skew Considering 3-D Leakage Flux. IEEE Transactions on Magnetics.

- Wu, C. J., Tsai, M. C., & Cheng, L. J. (2019). Design and implementation of position-based repetitive control torque observer for cogging torque compensation in PMSM. *Applied Sciences*, 10(1), 96.
- Wu, L., Chen, H., Yu, T., Sun, C., Wang, L., Ye, X., & Zhai, G. (2023). Robust Design Optimization of the Cogging Torque for a PMSM Based on Manufacturing Uncertainties Analysis and Approximate Modeling. *Energies*, 16(2), 663.
- Wu, Q., Li, W., Li, J., Feng, G., & Zhang, B. (2023). Electromagnetic-Thermal Analysis of High-Temperature Direct Drive Electric-Actuated Valve Canned Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 18(1), 105-119.
- Xu, N., Sun, X., Li, K., & Yao, M. (2022). Robust Multi-Objective Optimization for BEESM Based on Improved Climbing Algorithm. *Progress in Electromagnetics Research B*, 97.
- Yadav, D., & Verma, A. (2016, Kasım). Performance analysis of PMSM drive using MPZO and MOGA technique. 2016 IEEE Endüstriyel Elektronik ve Uygulamalar Konferansı (IEACon), 197-202. IEEE.
- Yang, C., & Shi, H. J. (2023). Prospects of battery assembly for electric vehicles based on patent analysis. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 18, 1134-1139.
- Yang, D., Feng, H., Zhang, W., Zhang, H., & Xu, X. (2023, Kasım). Design and Optimization of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor for Direct Drive Multi-car Elevator Variable Rail System. 2023 IEEE Taşımacılık Elektrifikasyon Konferansı ve Fuarı, Asya-Pasifik (ITEC Asya-Pasifik), 1-5. IEEE.
- Yang, G., Wu, H., Wang, D., Zhang, P., Jiang, S., & Zhang, Y. (2023). Research on Rotor Loss and Rotor Structure Optimization of Rare Earth Permanent Magnet Synchronous Motors in the Weak Field Area. *Energies*, 16(21), 7423.
- Yildirim, M., Polat, M., & Kürüm, H. (2014, Eylül). A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles. 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, 218-223. IEEE.
- Yoon, K. Y., & Lee, S. T. (2023). Performance Improvement of Permanent-Magnet-Synchronous Motors through Rotor Shape Optimization of Marine Blowing System with High-Speed Rotation. *Energies*, 16(14), 5486.
- Yuan, P. (2023). Finite Element Simulation Calculation and Optimal Design of Permanent Magnet Synchronous Motor. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 382). EDP Sciences.
- Yuan, Y., Meng, W., Sun, X., & Zhang, L. (2019). Design optimization and analysis of an outer-rotor direct-drive permanent-magnet motor for medium-speed electric vehicle. *World Electric Vehicle Journal*, 10(2), 16.

- Yuebing, L., Lei, Z., Xiaoqin, Z., & Zedong, Z. (2023, Mayıs). Magnetic Pole Optimization of Sinusoidal Pole-shaping Surface-mounted Multi-phase Permanent Magnet Synchronous Motors. 2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), 24-28. IEEE.
- Zhang, D., Yu, T., Yi, J., Wu, T., Liu, J., & Zhang, J. (2023, Kasım). Design and Cogging Torque Optimization of Outer-Rotor Permanent Magnet Synchronous Motor. 2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2454-2459. IEEE.
- Zhang, Y., Fei, L., Jiang, F., Li, J., Zhao, S., & Li, J. (2023, Ekim). Data Drive Model of Permanent Magnet Synchronous Motor Direct Drive Pump Based on Improved Sparrow Search Algorithm-BPNN. IECON 2023-49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1-6. IEEE.
- Zhu, Z. Q., & Howe, D. (2000). Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines. IEEE Transactions on energy conversion, 15(4), 407-412.