T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVAİ RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇİN ÇİFT MODLU ENERJİ DÖNÜŞÜM ÜNİTESİNİN ÇOK FİZİKLİ ANALİTİK TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Esra ÇELİK

DOKTORA TEZİ
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekatronik Mühendisliği Programı

Danışman
Doç. Dr. Muhammet GARİP

Eş-Danışman
Doç. Dr. Kadir ERKAN

Temmuz, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVAİ RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇİN ÇİFT MODLU ENERJİ DÖNÜŞÜM ÜNİTESİNİN ÇOK FİZİKLİ ANALİTİK TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Esra ÇELİK tarafından hazırlanan tez çalışması 29.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı Mekatronik Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Muhammet GARİP
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Doç. Dr. Kadir ERKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Muhammet GARİP, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Cüneyt YILMAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr.Öğr.Üye. Hatice MERCAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Osman KILIÇ, Üye
Marmara Üniversitesi _____

Doç. Dr. Yusuf YAŞA, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Muhammet GARİP sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Havai Rüzgar Enerji Sistemleri İçin Çift Modlu Enerji Dönüşüm Ünitesinin Çok Fizikli Analitik Tasarımı Ve Optimizasyonu" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Esra ÇELİK

İmza

Bu çalışma, “2211-C Öncelikli Alanlar Burs Programı” kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FDK-2021-4345” numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Gazze şehitlerine
ithaf edilmiştir

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenciliğim boyunca destek ve teşviklerini esirgemeyen, çalışmalarımda bana rehberlik eden, bilgi ve deneyimlerini paylaşan muhterem hocalarım Doç.Dr. Muhammet Garip ve Doç.Dr. Kadir Erkan'a en içten şükranlarımı sunarım. Ayrıca, doktora eğitimimi çekilir kılan gerek teknik gerek bilgi birikim yönüyle şahsıma ziyadesiyle katkısı olan Dr. Ahmet Fevzi Bozkurt ve Enes Göker'e teşekkürü borç bilirim.

Bu tez, bir küresel salgına, ülkemin yüzyılın afetine ve bir soykırıma şahitlik etmiştir. Her şeyin anlamsızlaştığı anlarda bile, çalışmalarımda bana moral ve motivasyon desteği sunan, yıllara meydan okuyan dostluğuyla yanımda olan kıymetli dostum Prof. Dr. Yasemin Öner'e en derin muhabbetlerimi ve teşekkürlerimi sunarım. Destek ve cesaret verici katkıları, bu süreçte bana büyük güç ve ilham kaynağı olmuştur.

Tüm eğitim hayatım süresince maddi ve manevi desteğini her zaman hissettiğim aileme, her türlü zorlukta yanımda oldukları ve bana inandıkları için müteşekkirim.

Son olarak, doktora eğitimimin finansmanında YÖK 100/2000 ve TÜBİTAK 2211-C Öncelikli Alanlar (Yenilenebilir Enerji) Doktora burs programları aracılığıyla sağlanan katkılar için derin minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Esra ÇELİK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ xii

ŞEKİL LİSTESİ xiii

TABLO LİSTESİ xv

ÖZET xvi

ABSTRACT xviii

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti . . . 1

1.1.1 Havai Rüzgar Enerji Sistemleri . . . 1

1.1.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Makina . . . 4

1.1.3 Optimizasyon . . . 9

1.2 Tezin Amacı . . . 12

1.3 Hipotez . . . 13

2 TASARIM GEREKSİNİMLERİ 15

3 ÇOK FİZİKLİ YAKLAŞIMLI ANALİTİK MODEL 19

3.1 Elektromanyetik Model . . . 21

3.1.1 Manyetostatik Model . . . 21

3.1.2 Manyetodinamik Model . . . 27

3.1.3 Kayıplar ve Verim . . . 32

3.2 Termal Model . . . 33

3.3 Mekanik Model . . . 34

4 OPTİMİZASYON 37

4.1 Optimizasyon aracı . . . 39

4.2 Optimizasyon probleminin tanımlanması . . . 41

4.3 Optimizasyon sonuçları . . . 46

5 ANALİZLER **49**
5.1 Elektromanyetik Analiz ve Doğrulama 51
5.1.1 Manyetostatik Analizler 51
5.1.2 Manyetodinamik Analizler 56
5.1.3 Kayıplar ve Verim Analizleri 62
5.2 Termal Analiz ve Doğrulama 66
5.2.1 Motor Kalkış Operasyonu 66
5.2.2 Generatör Çalışma 69
5.2.3 Motor iniş operasyonu 70
5.3 Mekanik Analiz ve Doğrulama 74

6 SONUÇ **77**

KAYNAKÇA **79**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **85**

SİMGE LİSTESİ

A_{rot}	Toplam türbin alanı
A_s	Oluk alanı
α_k	Sargı adım açısı
α_p	Mıknatıs doluluk oranı
a	Mach sayısı
b_o	Oluk açıklığı
b_{ry}	Rotor boyunduruk kalınlığı
b_{st}	Stator diş kalınlığı
b_{sy}	Stator boyunduruk kalınlığı
B_{m}	Mıknatısların akı yoğunluğu
B_{s}	Sargıların akı yoğunluğu
B_{y}	Yüklü durumda akı yoğunluğu
B_r	Mıknatıs kalıcı akı yoğunluğu değeri
B_{rm}	Rotor maksimum akı yoğunluğu
B_{sm}	Stator maksimum akı yoğunluğu
$\beta(\mathrm{r})$	Geçirgenlik fonksiyonu
C_p	Türbin güç faktörü
D_m	Rotor dış çapı
D_r	Rotor iç çapı
D_δ	Hava aralığı çapı
D_{si}	Stator iç çapı
D_{so}	Stator dış çapı
δ	Yük açısı

E_{ml}	Motor indüklenen gerilim
$E_{nl,A}$	İndüklenen gerilim
$E_{A_{\mathrm{y}}}$	Yükte indüklenen gerilim
e	Pürüzlülük katsayısı
F_{v}	Radyal fonksiyon
g'	Efektif hava aralığı
γ	Güç açısı
γ_s	Oluk açısı
h_m	Mıknatıs yüksekliği
h_0	Referans ölçüm yüksekliği
h_t	Oluk yüksekliği
I_a	Faz akımı
I_{gen}	Generatör faz akımı
I_{ph_mot}	Motor faz akımı
i	Harmonik bileşeni sayısı
J_{cu}	Akım yoğunluğu
K_c	Girdap kayıp katsayısı
K_c	Karter katsayısı
K_e	Aşırı kayıp katsayısı
K_h	Histeresis kayıp katsayısı
K_v	Sarım faktörü
K_{sov}	Oluk açıklığı faktörü
K_{cu}	Oluk doluluk oranı
l	Kablo uzunluğu
l_{ew}	Sargı sonu uzunluğu
L_d	d ekseni indüktansı
λ	Kanat uç hız oranı
N_s	Oluk sayısı
N_{bobin}	Bobin sayısı

N_{tc}	Faz sarım sayısı
n_{bl}	Rotor kanat sayısı
p	Kutup çifti sayısı
P_{ir}	Demir kaybı
P_{max}	Maksimum enerji
P_{cu}	Bakır kaybı
P_{em}	Elektromekanik güç
$\psi_{\text{fl}-\text{A}}$	Tek faz boşta akı bağı
ρ	Hava yoğunluğu
ρ_{cu}	Bakır direnci
R_a	Faz direnci
r	Yarıçap değişkeni
R_s	Stator iç yarıçapı
R_{rot}	Rotor kanadı yarıçapı
r_{cu}	Tel iletkenin yarıçapı
σ	Kesme gerilimi
σ_{cu}	Bakır iletkenlik değeri
τ	Kutup açısı
τ_{ind}	Moment
τ_c	Bobin adımı
τ_t	Stator diş oranı
T_c	Vuruntu momenti
θ	Açı değişkeni
θ_e	Elektriksel açı
V_{a}	Bağıl hava hızı
V_{cu}	Bakır hacmi
V_{dc}	Motor sürüşü doğru gerilimi
$V_{\text{ç}}$	Çıkış gerilimi
V_{ph_mot}	Motor faz gerilimi

$V_{p_{\text{gen}}}$	Generatör faz gerilimi
w_m	Açısal hız
$\widetilde{\lambda}$	Oluk geçirgenlik fonksiyonu
A_{wing}	Kanat açıklığı
m_{uav}	Hava aracı
pf_{m}	Motor güç faktörü

KISALTMA LİSTESİ

AWES	Airborne Wind Energy Systems
FEM	Finite Element Method
HRES	Havai Rüzgar Enerji Sistemleri
PMSM	Permenant Magnet Synchronous Machine
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SMSM	Sürekli Mıknatıslı Senkron Makina
VTOL	Vertical Take-off and Landing

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Havai rüzgar enerji sistemlerinin gösterimi a)Entegre b) Yer tabanlı 2
Şekil 1.2 Havai rüzgar enerji sistemlerinin tasnifi 3
Şekil 1.3 Sürekli mıknatıslı senkron makinanın genel görünümü 6
Şekil 1.4 Sargı şekillerinin gösterimi: a) Tek katmanlı konsantre sargı b) Çift katmanlı konsantre sargı c) Tam kalıp sargı 7
Şekil 1.5 Optimizasyon türleri 10
Şekil 1.6 Genetik Algoritma temel akış şeması 11
Şekil 1.7 Çalışmanın genel akış şeması 13
Şekil 2.1 Operasyon Modları a)Motor modu b) Generator modu c)Motor modu şematiği d) Generator modu şematiği 15
Şekil 2.2 Temel parametrelerin sistem üzerinde gösterimi 17
Şekil 3.1 Çok fizikli yaklaşımlı anatilik modelin akış şeması 20
Şekil 3.2 Oluk ve oluk açıklığının akı yoğunluğu üzerindeki etkisi 23
Şekil 3.3 Sarım şemasının gösterimi 24
Şekil 3.4 İkincil kesitlerin gösterimi 25
Şekil 3.5 Vacoflux malzemenin B-H eğrisi gösterimi 26
Şekil 3.6 Generator fazör diyagramı 30
Şekil 3.7 Generatör tek faz eşdeğer devre şeması 30
Şekil 3.8 Motor altı adımlı sürüş devresi ve tek faz eşdeğer devre gösterimi 31
Şekil 3.9 Kayıp akış diyagramı 32
Şekil 3.10 Oluk doluluk görünümü 34
Şekil 3.11 Kesme geriliminin gösterimi 34
Şekil 3.12 Sargı sonlarının şematik gösterimi 36
Şekil 3.13 Oluk yapısı ve kesitlerin gösterimi 36
Şekil 4.1 Çok amaçlı optimizasyon probleminin temsili 38
Şekil 4.2 Matlab optimizasyon aracı arayüzü 39
Şekil 4.3 Genel kısıtlar için Pareto-front çözüm seti 46
Şekil 4.4 Soğutma koşulu için Pareto-front çözüm seti 46
Şekil 4.5 Vuruntu Momentinin sonuçlara etkisi 47
Şekil 4.6 Limit-8 çözümü için Pareto-Front çözüm kümesi 48
Şekil 5.1 Nihai makinanın 2 ve 3 boyutlu görünümleri 51
Şekil 5.2 Açık devre analizi için kullanılan SEY modeli 52

Şekil 5.3 Saçaklı durumda hava aralığı akı yoğunluğu analitik ve SEY karşılaştırılması 52
Şekil 5.4 Saçaksız durumda hava aralığı akı yoğunluğu analitik ve SEY karşılaştırılması 52
Şekil 5.5 Sargıların oluşturduğu akı yoğunluğu için kullanılan SEY modeli 53
Şekil 5.6 Yüklü durum için kullanılan SEY modeli 54
Şekil 5.7 Sargıların oluşturduğu akı yoğunluğu 54
Şekil 5.8 Yüklü durumda oluşan akı yoğunluğu 54
Şekil 5.9 Akı yoğunluğu dağılımı 56
Şekil 5.10 Boşta çalışma devresi 57
Şekil 5.11 Boşta çalışma akı bağı grafiği 57
Şekil 5.12 Boşta çalışma indüklenen gerilimler grafiği 58
Şekil 5.13 Vuruntu momenti grafiği 59
Şekil 5.14 Yüklü durumda akı bağı grafiği 60
Şekil 5.15 Yüklü durumda indüklenen gerilim grafiği 60
Şekil 5.16 İndüklenen gerilim ve akım grafiği 62
Şekil 5.17 Sargılardaki akım yoğunluğu dağılımı 66
Şekil 5.18 Motor kalkış operasyonu moment-hız çalışma grafiği 67
Şekil 5.19 Kalkış operasyonu sıcaklık dağılımı 67
Şekil 5.20 Kalkış operasyonu sıcaklık artış grafiği 68
Şekil 5.21 Kalkış sonrası düğümlerdeki sıcaklıklar 68
Şekil 5.22 Motor kalkış operasyonu sonrası mıknatıs ve sargılardaki sıcaklıkların termal SEY analizi sonucları 69
Şekil 5.23 Generatör çalışma sıcaklıkların genel görünümü 69
Şekil 5.24 Generatör çalışma düğümlerde oluşan sıcaklıklar 70
Şekil 5.25 Generatör çalışma rotor ve stator sıcaklıkları dağılımı 70
Şekil 5.26 İniş operasyonu moment hız grafikleri 71
Şekil 5.27 İniş operasyonu sıcaklık artış grafiği 71
Şekil 5.28 İniş operasyonu sonrası genel dağılım 72
Şekil 5.29 İniş operasyonu düğümlerdeki sıcaklıklar 72
Şekil 5.30 İniş operasyonu sonrası mıknatıs ve sargılardaki sıcaklıkların SEY analizi sonucları 73
Şekil 5.31 İniş operasyonu sonrası mıknatısların demagnetizasyon eğrisi . . 73
Şekil 5.32 Rotor yüzeyi kesme gerilimi 75
Şekil 5.33 Stator yüzeyi kesme gerilimi 75
Şekil 5.34 Rotor mekanik dayanım analizi 75
Şekil 5.35 Stator mekanik dayanım analizi 76

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Geliştirilmekte olan havai rüzgar enerji sistemi örnekleri 4
Tablo 1.2 Farklı Rotor Şekilleri ve Sürekli Mıknatıslı Senkron Makina Tasarımları 5
Tablo 2.1 Önerilen Sistemin Parametreleri 16
Tablo 2.2 Motor/Generatör modları için tasarım kriterleri 18
Tablo 3.1 Malzeme Özellikleri 27
Tablo 3.2 Farklı Soğutma Modlarının Termal Özellikleri 33
Tablo 3.3 Farklı makine tipleri için kesme gerilimi değerleri 35
Tablo 4.1 Genetik Algoritma Parametreleri 40
Tablo 4.2 Değişken Tanımları 42
Tablo 4.3 Kısıt Tanımları 43
Tablo 4.4 Genel kısıtlar tablosu 45
Tablo 4.5 Soğutma koşulu kısıt tablosu 45
Tablo 5.1 Sonuç olarak elde edilen makine parametreleri 50
Tablo 5.2 Saçaklı durum ve saçaksız durumun SEY analizine göre hata oranları 53
Tablo 5.3 Sargıların oluşturduğu ve yüklü durumda oluşan akı yoğunluğu hata oranları 55
Tablo 5.4 Boşta çalışma akı bağı ve indüklenen gerilimlerin hata oranları . 58
Tablo 5.5 Yüklü durumda akı bağı ve gerilim değerlerinin hata oranları . . 61
Tablo 5.6 Eşdeğer devre sonuçları 61
Tablo 5.7 Kayıplar ve verim sonuçları 63
Tablo 5.8 Elektromanyetik değerlerin hata oranları 64
Tablo 5.9 Kütle hesaplarının karşılaştırılması 74

ÖZET

Havai Rüzgar Enerji Sistemleri İçin Çift Modlu Enerji Dönüşüm Ünitesinin Çok Fizikli Analitik Tasarımı Ve Optimizasyonu

Esra ÇELİK

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Muhammet GARİP
Eş-Danışman: Doç. Dr. Kadir ERKAN

Son yıllarda geleneksel rüzgar türbini teknolojilerinin teknik ve ekonomik sınırlamaları, yüksek irtifa ve havaî rüzgar enerji sistemlerine yönelik önemli araştırmalara yol açmıştır. Bu çalışma, entegre tip havaî rüzgar enerji sistemi için çok modlu çalışan bir elektrik makinesinin tasarımını ve optimizasyonunu kapsamaktadır. Tasarım süreci, çoklu-fiziksel bir yaklaşımla analitik elektromanyetik modelin ve çok amaçlı genetik algoritmaların (MOGA) kullanımını içermektedir.

Analitik elektromanyetik model, sürekli mıknatıs senkron makine (SMSM) için geliştirilmiş ve tasarım sürecinde kullanılmıştır. Güç yoğunluğunu artırmak amacıyla kobalt-demir manyetik malzeme tercih edilmiştir. Makine, 600 V DC gerilim koşullarında optimize edilmiş ve iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile doğrulanmıştır. Bu optimizasyon sonucunda, makinenin 1.8 kW/kg güç yoğunluğuna ve %96 verimliliğe ulaştığı belirlenmiştir.

Termal analizler, makinenin hem motor hem de generatör modlarında sargı ve mıknatıs sıcaklıklarının kritik eşiklerin altında kaldığını doğrulamıştır. Ayrıca, mekanik dayanıklılık analizleri, stator yüzeyindeki kayma gerilmesinin belirtilen limitlerin altında olduğunu ve tasarımın mekanik açıdan güvenilir olduğunu göstermiştir.

Bu çalışma, entegre tip havaî rüzgar enerji sistemleri için yüksek performanslı ve güvenilir bir makine tasarımının başarıyla gerçekleştirildiğini ve elde edilen sonuçların tasarımın pratikteki etkinliğini doğruladığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: HRES, entegre, SMSM, genetik algoritma, çok amaçlı çok fizikli optimizasyon, SEY, termal analiz, mekanik analiz.

ABSTRACT

Analytical Design And Multiphysics Optimization Of A Dual Mode Energy Conversion Unit For Airborne Wind Energy Systems

Esra ÇELİK

Department of Mechatronics Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Muhammet GARİP
Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kadir ERKAN

In recent years, the technical and economic limitations of conventional wind turbine technologies have led to significant research efforts focused on high-altitude and airborne wind energy systems. This study encompasses the design and optimization of an electric machine operating in multiple modes for a flying-generator airborne wind energy system. The design process incorporates a multi-physical approach using an analytical electromagnetic model and multi-objective genetic algorithms.

The analytical electromagnetic model has been developed for a Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Machine (SMPSM) and utilized throughout the design process. Cobalt-iron magnetic material was selected to enhance power density. The machine was optimized under 600 V DC voltage conditions and validated using two-dimensional Finite Element Method (FEM) analysis. As a result of this optimization, the machine achieved a power density of 1.8 kW/kg and an efficiency of 96%.

Thermal analyses confirmed that the temperatures of the windings and magnets remain below critical thresholds in both motor and generator modes. Additionally, mechanical durability analyses demonstrated that the shear stress on the stator surface is within specified limits, indicating the mechanical reliability of the design.

This study successfully demonstrates the design of a high-performance and reliable

machine for airborne wind energy systems with a flying generator, and the results validate the effectiveness of the design in practical applications.

Keywords: AWES, Fly-Gen, PMSM, genetic algorithms, multi -objective and multi-physics optimization, FEM, thermal analysis, mechanical analysis.

1
GİRİŞ

Bu bölümde havai rüzgar enerji sistemleri, sürekli mıknatıslı senkron makineler ve optimizasyon yöntemleri hakkında literatür araştrmasına yer verilmiştir. Havai rüzgar enerji sistemleri, yerden belirli bir yükseklikte çalışan ve rüzgar enerjisini daha verimli bir şekilde kullanmayı hedefleyen yenilikçi bir enerji üretim teknolojisidir. Bu sistemler, rüzgar türbinlerine göre daha yüksek irtifalarda, daha güçlü ve sürekli rüzgar akımlarını kullanarak enerji üretimini maksimize etmeyi amaçlar. Sürekli mıknatıslı senkron makineler, bu tür sistemlerde kullanılan kritik bileşenlerden biridir ve yüksek verimlilik, düşük bakım gereksinimi ve kompakt tasarım avantajları sunar. Optimizasyon yöntemleri, bu tür yenilikçi enerji sistemlerinin tasarımında ve performansının artırılmasında önemli bir rol oynar. Özellikle çok amaçlı optimizasyon teknikleri, makine geometrisi, malzeme seçimi ve çalışma koşulları gibi birçok parametrenin optimize edilmesini sağlar.

Tezin amacı, havai rüzgar enerji sistemlerinde kullanılan sürekli mıknatıslı senkron makinelerin tasarım ve optimizasyonunu yaparak sistem performansını artırmak ve bu alanda literatüre katkıda bulunmaktır. Bu doğrultuda, çalışma, optimizasyon yöntemlerinin etkinliğini ve bu sistemlerin gelecekteki potansiyelini ortaya koymayı hedeflemektedir.

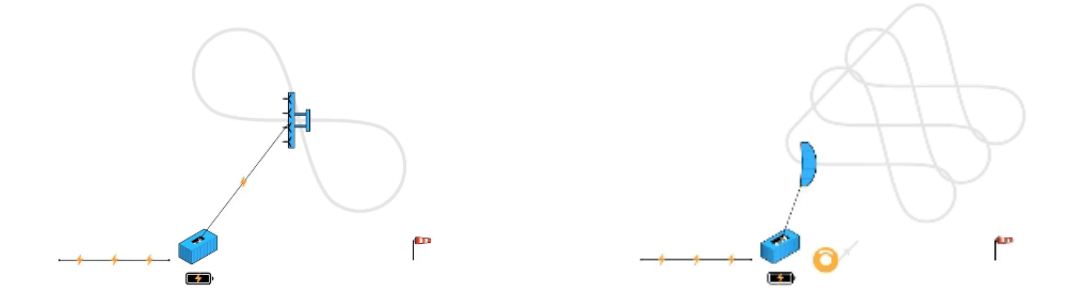
1.1 Literatür Özeti

Literatür araştırması alt başlıklar halinde kategorize edilerek sunulmuştur.

1.1.1 Havai Rüzgar Enerji Sistemleri

Küresel ölçekte toplam nihai enerji tüketiminde elektrik enerjisi payını giderek arttırmakta ve yaklaşık beşte bire ulaşmış durumdadır. Elektrik enerjisi kaynakları içerisinde yenilenebilir enerji, gelişen teknolojilerin de etkisi ile fosil yakıtlardan ucuz hale gelebilmiş ve toplam kurulu gücün %30'ünü teşkil ederek kurulu elektrik

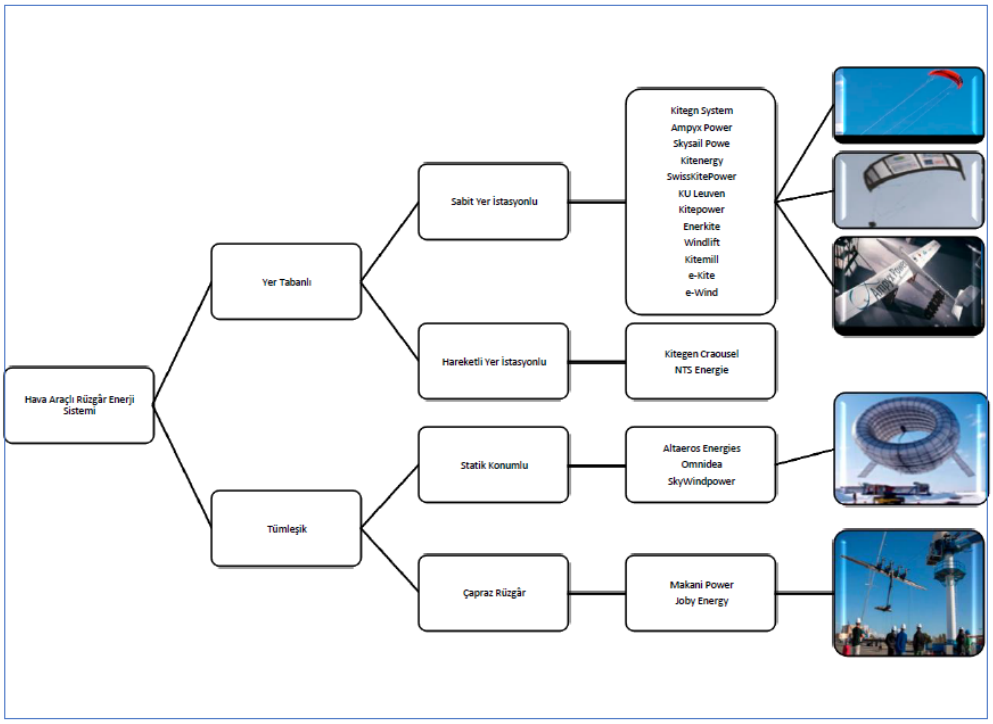
gücü artışına katkı sağlamıştır [1]. Yenilebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr enerjisi, dünya ölçeğinde 2023 itibariyle kara türbinlerinde 945 GW, açık deniz türbinlerde 75 GW kurulu güce sahiptir [2]. Türkiye bazında ise 2007 tarihi itibariye 143MW olan kurulu güç ivmeli olarak 12 GW'a ulaşmış ve üretimdeki payı yaklaşık ortalama %10 olmuştur [3]. Günümüze ulaşan yükselişine rağmen yakın gelecekte kara sahalarının doyuma ulaşması sebebiyle kurulu güç artışında yavaşlama göstermesi muhtemel görünmektedir. Bunun yanı sıra açık denizlerde rüzgâr kaynağının karasal alanlara göre daha güçlü ve kararlı formda olması yatırım eğilimlerini açık deniz uygulamalarına kaydırmaktadır. Açık deniz türbinlerinin inşaat, kurulum, bakım-onarım ve işletme maliyetlerinin karaya nazaran daha yüksek olması artan maliyetleri azaltma amacıyla tek platformda yüksek güçlü (>5MW) türbinlerin geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Ticari ürünler ve akademik çalışmalar 5-10MW arası ve 10MW üzeri türbinlerin uygulanabilirliği üzerine yoğunlaşmış durumdadır. Büyük güçlü türbinlerin teknik ve ekonomik incelenmesi bağlamında Ashuri ve diğerleri [4] yaptıkları çalışmada çok disiplinli en iyileştirme yöntemi ile 5,10 ve 20 MW rüzgâr türbinlerini kanat çapı, kule yüksekliği, toplam ağırlık ve maliyet parametreleri nezdinde uygulanabilirliklerini incelemiş ve mevcut konsept (3 rotor, kule, malzeme vs.) ile fiziki ve ekonomik açıdan uygulanabilirlik eşiğinde olmadığını tespit etmişlerdir. Mevcut konseptin teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilirlik sınırlarına ulaşması, 50-100m yüksekliklerde rüzgâr sahalarının azalması, rüzgârdan elektrik elde edilmesinde yeni tasarımları kaçınılmaz kılmıştır.



a) b)

Şekil 1.1 Havai rüzgar enerji sistemlerinin gösterimi a)Entegre b) Yer tabanlı [5]

Havai Rüzgar Enerjisi Sistemleri (HRES), son yıllarda geleneksel rüzgar türbinleri yerine bir alternatif olarak akademik araştırma gruplarının ve ticari girişim şirketlerinin ilgisini çekmektedir [6]. Konsept ilk kez Loyd tarafından tanıtılmıştır [7]. HRES, yere bağlı bir uçurtma veya hava aracı ile rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi olarak ifade edebilir [8]. Farklı konseptler olsa da, genel olarak iki ana yapısal kategoriye ayrılabilirler: yer tabanlı ve entegre (uçan jeneratör/fly-gen). Yer tabanlı modelde, rüzgar ile hareket eden bir hava aracı veya



Şekil 1.2 Havai rüzgar enerji sistemlerinin tasnifi

uçurtmanın yerdeki generatörleri tahrik etmesi ile elektrik enerjisi üretilir. Ancak entegre tip uçan jeneratör modelinde, elektrik enerjisi havadaki uçağa monteli generatörler ile üretilir ve kabloyla yer istasyona aktarılır. [9]. Şekil 1.1'de temel çalışma şekilleri ve Şekil 1.2'de genel sınıflandırma, farklı konseptlerde geliştirilen sistemler ve bunlara ilişkin birer örnek yer almaktadır. Verilen sınıflandırma haricinde yer tabanlı olmak üzere doğrudan uçurtmanın havadaki dönüşüyle tork elde edildiği uçurtmalı sistemler de bulunmaktadır [9] akademik araştırmalar Şekil 1.2'de verilen konseptlere yoğunlaştığı için tabloda yer verilmemiştir. Türkçe literatürde henüz yaygınlaşmamış olan bu sistem için, "havada," "hava kaynaklı," veya "hava araçlı" gibi terimler yerine, kavramı daha yalın bir şekilde ifade eden "havai" teriminin uygun olduğunu önerilmiştir. Ayrıca, "fly-gen" tabiri yerine, makinelerin hava aracına entegre edilmesini vurgulayan "entegre" ifadesinin daha pratik ve anlaşılır bir kullanım sunduğunu düşünülmüştür.

Tablo 1.1, havai rüzgar enerji sistemleri alanındaki çeşitli şirketlerin geliştirdiği sistemlerin özetini sunmaktadır. Bu sistemler, uçuş tipine (rijit, hafif, hibrit) ve üretim biçimine (entegre, yer tabanlı) göre sınıflandırılmıştır. Almanya merkezli Kitekraft ve Windlift, rijit yapıda ve entegre üretim biçiminde 600 kW güç kapasiteli sistemler sunmakta olup, her iki şirket de teknoloji olgunluk seviyeleri (TRL) 7 ile yüksek gelişim aşamasına ulaşmıştır. İngiltere'nin KPS ve Hollanda'nın Kitepower şirketleri, hafif yapıda ve yer tabanlı sistemler geliştirmekte olup, bu

Tablo 1.1 Geliştirilmekte olan havai rüzgar enerji sistemi örnekleri

Şirket	Ülke	Uçuş Tipi	Üretim Biçimi	TRL	kW
Kitekraft	Almanya	Rijit	Entegre	7	600
Windlift	Amerika	Rijit	Entegre	7	600
KPS	İngiltere	Hafif	Yer	5-6	250
Kitepower	Hollanda	Hafif	Yer	5-6	250
Enerkite	Almanya	Hibrit	Yer	4	100
TwingTec	Dübendorf/Zürih	Hibrit	Yer	4	100
E-Kite	Hollanda	Rijit	Yer	4	100
Skysails	Almanya	Hafif	Yer	4	100
Kitegen	İtalya	Hafif	Yer	4	40

sistemler 250 kW güç kapasitesine ve TRL 5-6 seviyesine sahiptir, bu da sistemlerin prototip aşamasını geçtiğini ve ticari olgunluk aşamasına yaklaştığını gösterir. Almanya'nın Enerkite, Dübendorf/Zürih'in TwingTec ve Hollanda'nın E-Kite şirketleri, hibrit yapıda ve yer tabanlı sistemler sunmakta olup, güç kapasiteleri 100 kW ve TRL seviyeleri 4'tür. Son olarak, Almanya'nın Skysails ve İtalya'nın Kitegen şirketleri hafif yapıda ve yer tabanlı sistemler geliştirmekte olup, güç kapasiteleri sırasıyla 100 kW ve 40 kW olup, TRL seviyeleri 4'tür. Bu tablo, havai rüzgar enerji sistemlerinin mevcut teknolojik durumunu ve geliştirme aşamalarını kapsamlı bir şekilde özetlemektedir.[10].

Bu çalışmada, elektrik generatörlerinin aynı zamanda dikey kalkış için motor olarak da kullanıldığı entegre (uçan jeneratör/fly-gen) dikey kalkış ve iniş tipi (Vertical tack-off and landing) için bir motor/generatör tasarımı yapılmıştır.

1.1.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Makina

Sürekli mıknatıslı senkron makineler (SMSM), hafif yapıları ve yüksek verimlilikleri nedeniyle hem generatör hem de motor olarak yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Selefi olan sargılı senkron makinelerden farklı olarak, SMSM'da rotor üzerinde alan sargıları bulunmaz. Bu durum, rotorun bakır kayıplarını ve fırça ile bilezikleri ortadan kaldırarak daha yüksek verimlilik sağlar. Ayrıca, demir ve bakır kayıplarının statorda toplanması, stator boyunca daha etkili bir soğutma sağlar. Daha yüksek verimlilik, makinanın boyutlarının küçülmesine olanak tanır [11].

SMSM iki ana gruba ayrılır.

- Akım kaynağı sürücü ile beslenen ve ikizkenar yamuk şeklinde bir akı dağılımına sahip olan fırçasız dc makinalar

- Sinüsoidal stator akımlarıyla beslenen ve yaklaşık olarak sinüsoidal hava aralığı akı yoğunluğu dağılımlı senkron motorlar.

SMSM düşük güçlü servo sürücülerde geniş ölçüde kullanılmaktadır. Büyük güçlerde ($\sim$ 20 MW'a kadar) elektrik generatörlerinde, rüzgar enerjisi ile ilgili uygulamalarda kullanmak mümkündür. SMSM'nın sağladığı önemli faydalar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Yüksek hava aralığı akı yoğunluğu
- Yüksek güç / ağırlık oranı
- Büyük döndürme momenti / Eylemsizlik oranı
- Çok düşük hızlarda düzgün dönme momenti
- Sıfır döndürme momenti kontrolü
- Yüksek hız uygulamaları
- Yüksek moment kapasitesi (Çabuk hızlanabilme ve yavaşlayabilme)
- Yüksek verim ve güç faktörü
- Yekpare (kompakt) tasarım

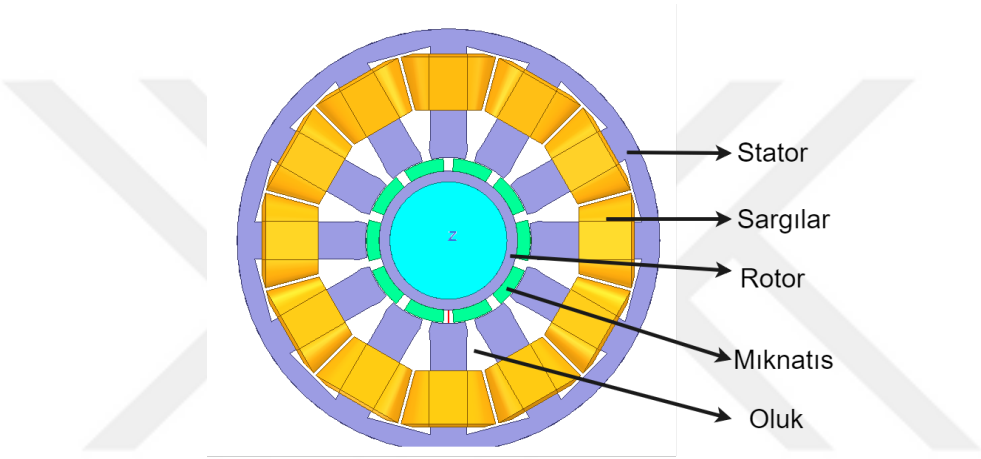
Tablo 1.2 Farklı Rotor Şekilleri ve Sürekli Mıknatıslı Senkron Makina Tasarımları

Kategori	**Alt Kategoriler**
Mıknatısların Yerleşimi	1. Rotor yüzeyine yerleştirilmesi 2. Rotorun içine yerleştirilmesi a. Radyal yerleştirilmiş mıknatıs yapısı b. Dairesel yerleştirilmiş gömülü mıknatıs yapısı
Hava Aralığı Akı Dağılımı	1. Radyal akılı SMSM 2. Eksenel akılı SMSM
Rotorun Bulunduğu Yer	1. Dış rotorlu 2. İç rotorlu
Sargı Yapısı	1. Tam sargı yapısı 2. Kesirli sargı yapısı

Mıknatıslı senkron makinalar uygulama alanlarına göre farklı tiplerde tasarlanabilmektedir. Sinüzoidal akım ve gerilimlerle çalışmak üzere tasarlanan tiplerde genellikle stator sarımları, senkron motor gibi stator oluklarına

yerleştirilmiş üç fazlı sargıdan meydana gelmektedir. Bu tip makinalarda sargılar iki tabakalı, dağıtılmış ve kirişlenmiş olarak sarılarak, sargı magnetomotor kuvvetleri ve hareket gerilimleri sinüs biçimine yaklaştırılmaktadır. Rotorda kullanılan mıknatısın özelliği ve mıknatısın rotora yerleştiriliş şekli motorun performansını etkilediğinden makina performansını artırmak için çeşitli tasarım şekilleri yapılmaktadır. Mıknatısın yerleşimi, hava aralığındaki akı dağılımı, rotorun bulunduğu yer ve sargı yapısına göre kategorize edilebilen SMSM yapıları Tablo-1.2'da gösterilmiştir.

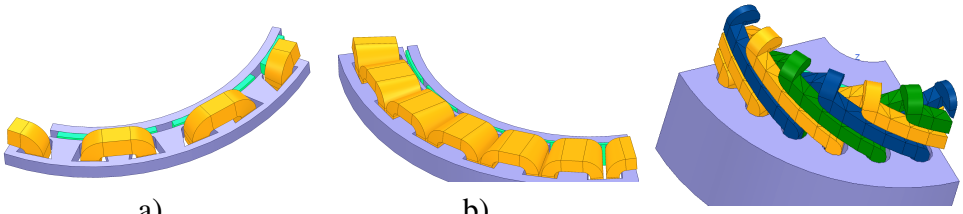
İçten rotorlu, yüzey mıknatıslı radyal tip bir SMSM'nin genel görünümü Şekil 1.3'de yer almaktadır.



Şekil 1.3 Sürekli mıknatıslı senkron makinanın genel görünümü

Şekil 1.3'de görüleceği üzere makinanın ana elemanaları stator, stator oluk ve sargıları ile mıknatıslar ile rotordur. Kullanım amacına bağlı olmak üzere çeşitli oluk/kutup kombinasyonlarını kullanmak mümkündür. Bu çalışmada amaç makinenin boyutlarını azaltma ve güç yoğunluğunu artırmaktır. t makine periyodu ve N_s oluk sayısı olmak üzere $2p = N_s \pm 2t$ oluk/kutup kombinasyonu güç yoğunluğunu arttırma problemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir [12]. Bu oluk/kutup kombinasyonu kesirli oluklu sargı avantajı da sunmaktadır. Kesir oluklu SMSM'nin sağladığı avantajlar aşağıda sıralanmıştır [13].

- **Azaltılmış sarım direnci ve toplam uzunluk ile daha sargı sonları**: Kesirli oluklu makinelerde, sarım direnci ve toplam uzunluk azaltılmıştır. Bu, daha kısa uç sarımı ile elde edilir. sargı sonlarının kısa olması, akımın daha verimli bir şekilde iletilmesini sağlar ve enerji kayıplarını en aza indirir. Sonuç olarak, makine daha verimli çalışır ve daha az enerji tüketir.
- **Oluk doluluk faktörünün iyileştirilmesi**: Bu makinelerde, oluk dolum



Şekil 1.4 Sargı şekillerinin gösterimi: a) Tek katmanlı konsantre sargı b) Çift katmanlı konsantre sargı c) Tam kalıp sargı

faktörü iyileştirilebilir. Oluk dolum faktörü, sargıların oluk içinde ne kadar sıkı yerleştirildiğini ifade eder. Daha yüksek dolum faktörü, sargı direncinin azalmasına ve oluk termal iletkenliğinin iyileşmesine neden olur. Daha düşük direnç, enerji kayıplarını azaltırken, iyileştirilmiş termal iletkenlik makinenin soğutma performansını artırır ve aşırı ısınmayı önler.

- **Azaltılmış bakır kaybı ile yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verimlilik**: Kesirli oluklu makineler, azaltılmış bakır kaybı sayesinde yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verimlilik sunar. Bakır kayıplarının azalması, enerji kayıplarının minimize edilmesine ve makinenin daha verimli çalışmasına olanak tanır. Bu da yüksek güç yoğunluğu ile birleştiğinde, makinenin daha küçük boyutlarda daha fazla güç üretebilmesini sağlar.

- **Düşük vuruntu momenti**: Bu makinelerde vuruntu momenti düşüktür. Vuruntu momenti, motorda titreşim ve gürültüye neden olabilecek bir faktördür. Vuruntu momenti, makinenin daha sessiz ve pürüzsüz çalışmasını sağlar. Bu özellik, özellikle hassas hareket kontrolü gerektiren uygulamalarda büyük bir avantaj sağlar.

- **Azaltılmış bobin sayısı**: Bobin sayısı önemli ölçüde azalmaktadır. Daha az bobin, makinenin üretim maliyetlerini düşürür ve daha basit bir yapıya sahip olmasını sağlar. Bu, aynı zamanda makinenin bakım ve onarım süreçlerini de kolaylaştırır.

- **İyileştirilmiş yalıtım sınıfı ile basitleştirilmiş sarım yalıtımı**: Bu makinelerde, iyileştirilmiş yalıtım sınıfı ile sarım yalıtımı basitleştirilmiştir. Daha iyi bir yalıtım sınıfı, makinenin daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesini sağlar ve genel güvenilirliğini artırır. Basitleştirilmiş sarım yalıtımı ise üretim sürecini hızlandırır ve maliyetleri düşürür.

- **Otomatik sarım teknolojilerinin uygulanabilirliği**: Kesirli oluklu sürekli mıknatıslı makineler, otomatik sarım teknolojilerinin uygulanabilirliğine olanak tanır. Otomatik sarım, üretim sürecini hızlandırır, hata oranını azaltır

ve genel üretim kalitesini artırır. Bu, özellikle büyük ölçekli üretimlerde maliyet etkinliği sağlar.

Buraya kadar olan bölümde, SMSM ile ilgili temel bilgiler verilmiştir. Ayrıca, tez konusu olan havai rüzgar enerji sistemlerinde (HRES) kullanımlarına dair literatürde yer alan çalışmalar da ele alınmıştır. Literatürde, entegre HRES konsepti için elektrik makinesi tasarımıyla ilgili birkaç referans bulunmaktadır. İlk tasarım ve optimizasyon modeli, Kollar ve diğerleri tarafından gösterilmiştir [14]. Çalışma, motor/generatör ve güç elektroniği bileşenlerini içeren çok amaçlı optimizasyon yapmış, düşük gerilimli 16 kW motor üniteleri için %96,4 verimlilik sonucu ile 3,11 kW/kg güç yoğunluğu elde edilmiştir. Başka bir çalışmada, aksiyel ve radyal tip topolojilerde gerçekleştirilen çok fizikli optimizasyon sonucunda, pasif elemanları içeren aksiyel akılı tipte 6,4 kW/kg güç yoğunluğu ve %96 verimlilik elde edilmiştir [15]. Karşılaştırma olarak, radyal tipte 6,2 kW/kg, %94 verimlilik gözlemlenmiştir [16]. Aynı şekilde, güneş enerjili uçak uygulamaları benzer gereksinimlere sahiptir. Ragot ve diğerleri , radyal tip iç SMSM'de güç ünitesi sayısı değişiminin, toplam ağırlık ve yoğunluk üzerindeki etkisini incelemiş ve makineyi optimize etmek için analitik ve çoklu-fiziksel bir yaklaşım benimsemiştir [17], [18]. İlgili bir çalışmada, Zang ve diğerleri , güneş enerjili bir uçak için yüzeye monte edilmiş sürekli mıknatıslı motor için hafif yapı tasarımını, mekanik elemanları ve elektromanyetik parametrik modeli amaçlamıştır [19]. Havacılık uygulamasının başka bir örneğinde, Fang ve diğerleri , stator ve rotor nüve demir içeriğini azaltarak ve kobalt-demir alaşımlı manyetik malzeme kullanarak güç yoğunluğunu artırmaya yönelik bir yaklaşım önermiştir [20], [21].

Literatürde belirtildiği gibi, entegre HRES elektrik makinesi tasarımı, uçağa monte edildiği için benzersiz zorluklar ve isterler sunmaktadır. Gereksinimler, tasarımda önemli ölçüde daha hafif ve kompakt olması, yüksek güç yoğunluğu ve verimlilik gerektirmesi nedeniyle, bu gereksinimleri etkili bir şekilde karşılamak için SMSM'leri en iyi seçenek haline getirir [22]. Ayrıca, bakım kolaylığı nedeniyle tercih edilen doğrudan tahrikli türbinler, genellikle düşük rüzgar hızlarında yüksek tork gerektirir, bu da genellikle yüksek kutup sayısı ihtiyacını doğurur. Bununla birlikte, klasik türbinlerde frekans üzerinde bir kısıtlama gerektirmez. Entegre HRES'te, doğrudan tahrik konfigürasyonu olsa bile, frekans sınırları, zaten yüksek bağıl hava hızından kaynaklanan demir ve anahtarlamalı kayıpları yönetmek için gereklidir [22]. Ayrıca, SMSM'lerin ideal güç faktörü ile çalışması, klasik rüzgar türbini uygulamalarında şebekeye entegrasyon ve güç elektroniği için temel bir kriter haline gelir [23]. Güç faktörü, ekstra zorlu tasarım koşulları nedeniyle entegre durumunda ideal koşullardan sapabilir [22]. Makinenin termal yönetimi,

entegre HRES'te bir zorluk oluştururken, geleneksel türbinlerin termal yönetim için yeterli alanı bulunmaktadır, entegre HRES soğutma ekipmanının ek ağırlığıyla başa çıkmak zorundadır. Ek ağırlıktan kaçınmak için, bağıl hava hızının etkisi nedeniyle hava soğutmalı yapılar tercih edilebilir. Aynı zamanda, daha büyük sistemler, sıvı soğutmalı makine yapılarının tercih edilmesine yol açabilir [24]. Dahası, entegre HRES'in işletim modları, optimal performans ve güvenilirlik sağlamak için termal yönlerin detaylı bir şekilde incelenmesini gerektirir. Sonuç olarak, entegre HRES'in tasarımı, yüksek güç yoğunluğu ve verimlilik gereksinimlerini karşılamak için yenilikçi yaklaşımlar gerektirir.

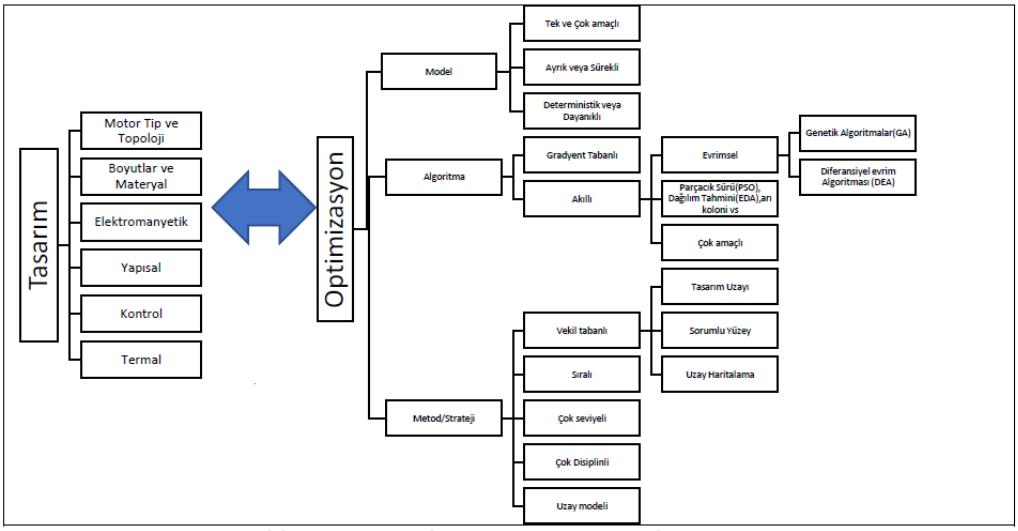
HRES için temel bir dikkate alınması gereken konulardan biri güç yoğunluğunu artırmaktır. Literatürde, ana yöntemler, katkıları ve dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir. Temel yaklaşımla frekansın artması, elektromanyetik cihazların daha küçük hale gelmesine neden olurken, çalışma frekansının artması, frekansla ilişkili demir kayıplarında artışa neden olmakla birlikte sürücü tarafında zorluklar yaratır. Diğer bir yöntem, manyetik yüklemeyi artırmak için Hallbach dizisini kullanmaktır [15], [16], ancak bu, üretim sürecinde kolayca uygulanabilir bir yöntem değildir. Sıvı ile soğutma kapasitesini artırmak, bakır kablo gereksinimini azaltır ve makinenin genel ağırlığını azaltmak için etkili bir yöntemdir. Ancak özellikle sıvı soğutmalı yöntemler, küçük sistemlerde gerekli ekipmanlar için (pompalar, vanalar vb.) alan sorunlarına neden olabilir ve toplam ağırlığı artırabilir. Havacılık uygulamalarında, uçağın hareketinden kaynaklanan hava akımı kullanılarak zorlamalı konveksiyon soğutma, yüksek güç yoğunluğuna sahip makineler için uygun bir alternatif olabilir [25], [26]. İletken olarak süperiletken malzemelerin kullanımı benzer bir etki sağlar [27]. Bu teknoloji henüz olgunluğa ulaşmamasına rağmen halihazırda megavat ölçeğinde kullanılmaktadır. Son olarak, kobalt-demir manyetik malzemenin seçimi, M19 gibi standart manyetik malzemelere göre malzeme kullanımında yaklaşık %40'lara varan bir azalmaya katkıda bulunur [28]. Stator ve rotorlarda kullanılan elektromanyetik malzemeyi azaltarak ve daha yüksek maksimum manyetik akı yoğunluğuna (2,3-2,4 T) sahip olarak elektrik makinelerini tasarlama olasılığı, boyut ve ağırlık açısından önemli ölçüde daha yüksek güç yoğunluklarına sahip olmalarını sağlar. Ayrıca, kütle azalmasıyla %3'lük bir verimlilik artışı elde edilir [29]. Yüksek maliyetlerinden dolayı, CoFe malzemeleri öncelikle havacılık uygulamaları için makinelerde kullanılmaktadır [30].

1.1.3 Optimizasyon

Bu bölümde, elektrik makinelerinin tasarım süreci, disiplinler arası bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Elektrik makinesi tasarımı, motor tipi/topolojisi, boyutlandırma,

malzeme seçimi, elektromanyetik tasarım, termal analiz, yapısal bütünlük, sürücü ve kontrol teknikleri gibi çok çeşitli unsurları içermektedir. Bu unsurlar, bir araya geldiklerinde, makinenin genel performansını belirleyen karmaşık ve çok yönlü bir sistem oluştururlar.

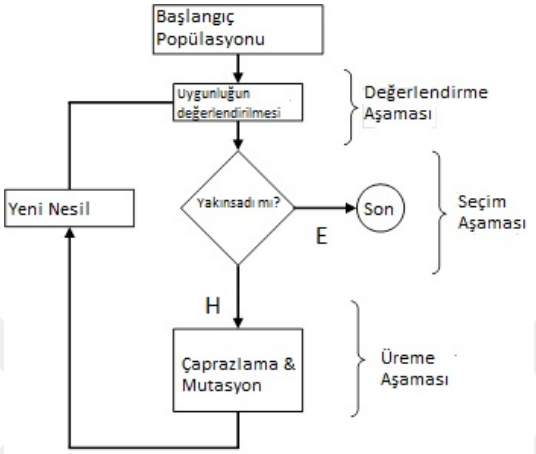
Elektrik makinelerinin elektromanyetik tasarımı, çoğu zaman doğrusal olmayan ve çok amaçlı bir optimizasyon sürecini gerektirir. Bu tasarım süreci, verimlilik, güç, tork, çıkış gücü ve güç yoğunluğunu maksimize ederken, vuruntu momenti, tork dalgalanmaları, ağırlık, hacim ve maliyet gibi parametreleri minimize edecek optimum sonuçları elde etmeyi hedefler. Optimizasyon sürecinde, yalnızca bir amacın gerçekleştirilmesi tekil optimizasyon olarak adlandırılırken, birden fazla amacın aynı anda gerçekleştirilmesi çok amaçlı optimizasyon olarak tanımlanmaktadır. Şekil 1.6, bu optimizasyon türlerinin sınıflandırılmasını görsel olarak sunmaktadır.



Şekil 1.5 Optimizasyon türleri

Modern veya akıllı optimizasyon teknikleri, türevsel analitik ifadelere bağımlı olmadan, çok sayıda parametreyi etkili bir şekilde ele alabilme yeteneğine sahiptir ve global optimum noktaları bulmada oldukça başarılıdır. Bu teknikler arasında, doğadan esinlenerek geliştirilen birçok algoritma bulunmaktadır. Örneğin, genetik algoritmalarda parametreler biyolojik genleri temsil ederken, bu parametrelerin bir araya gelmesiyle oluşan toplu küme ise kromozomu oluşturur. Her yeni nesil, rastgele bilgi değişimi ile oluşturulan dizilerin en iyilerini birleştirerek elde edilir. İlk olarak, genetik algoritma süreci başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıyla başlar. Akabinde her bireyin uygunluk değeri (fitness value) hesaplanır. Bu, popülasyondaki bireylerin ne kadar iyi performans gösterdiğini belirler. Uygunluk değerlerine göre bir kontrol yapılır. Eğer algoritma uygun

bir çözüme yakınsa veya durdurma kriteri sağlanmışsa süreç sona erer. Eğer yakınsama sağlanmadıysa, çaprazlama ve mutasyon işlemleri gerçekleştirilir. Bu adımda yeni nesil bireyler üretilir. Yeni bireyler, mevcut bireylerden elde edilen genetik bilgilerin rastgele çaprazlanması ve mutasyonuyla oluşturulur. Üretilen yeni nesil bireyler, popülasyona dahil edilir ve döngü yeniden başlar. Bu süreç, optimal çözüm elde edilene veya belirlenen bir durdurma kriteri karşılanana kadar devam eder. Temel algoritma akış şeması Şekil 1.6'de sunulmuştur.



Şekil 1.6 Genetik Algoritma temel akış şeması

Elektrik makinesi tasarımında, tasarımcılar genellikle çelişen gereksinimlerle karşı karşıya kalırlar. Örneğin, yüksek güç yoğunluğu ve verimlilik beklentileri, makinenin boyutlarını ve kütlesini minimuma indirme isteğiyle çelişebilir. Bu tür çelişen talepler ve kısıtlamalar, tasarım aşamasında bir optimizasyon sürecini zorunlu kılar. Bu süreçte, stokastik modern optimizasyon yöntemleri, yerel optimumlara sıkışma olasılıklarının düşük olması ve türevsel ifadelere dayanmadan çok sayıda parametreyi etkili bir şekilde ele alabilmeleri nedeniyle önemli avantajlar sunar. Bu yaklaşım, özellikle çoklu-fizik problemleri ele alırken araştırmacılara önemli faydalar sağlar. Her alt-fiziksel bileşen, bir kısıtlama veya amaç olarak tanımlanabilir ve bu bileşenler arasındaki etkileşimler, tasarım sürecinde karmaşık bağımlılıkları modellemede etkili bir rol oynar [31], [23].

Makine optimizasyonu bağlamında, evrimsel algoritmalar, genetik algoritmalar ve parçacık sürü optimizasyonu gibi yöntemler, çok amaçlı ve çoklu-fiziksel elektrik makinesi tasarım problemlerini çözmede yaygın olarak kullanılmaktadır [32], [33], [34]. Bu optimizasyon süreci, analitik bir model geliştirerek ya da 2B veya 3B modellerle sayısal çözücüler kullanarak yürütülebilir. Sayısal yöntemler, analitik yöntemlere göre daha yüksek doğruluk sunmalarına rağmen, hesaplama açısından yoğun süreçlerdir. Analitik modeller ise, geometrik tasarım gereksinimi olmadan ve yüksek işlemci gücü gerektirmeden esnek bir çalışma ortamı sağlar.

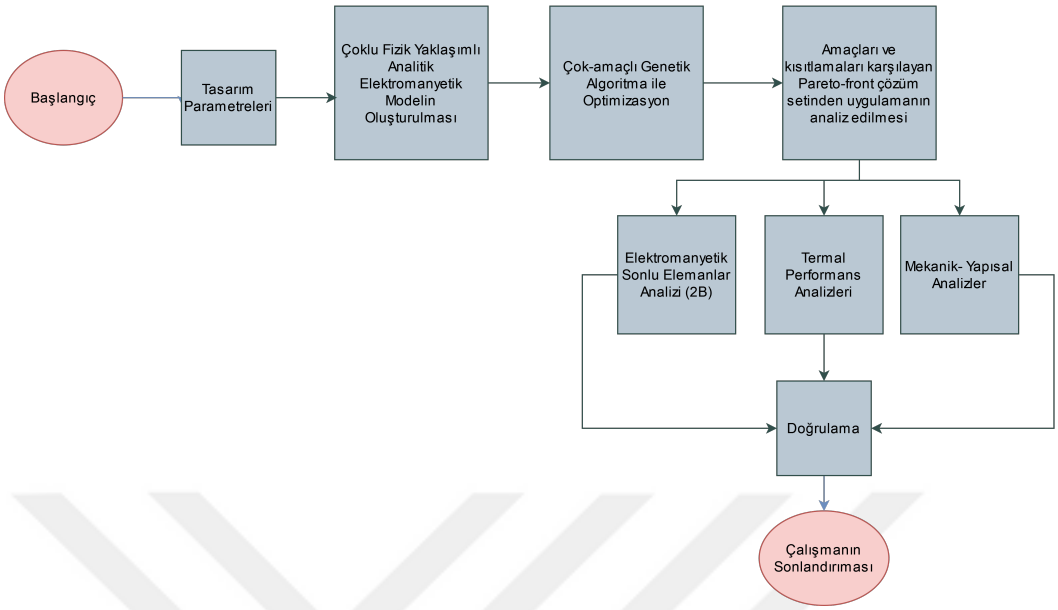
Sonuç olarak, elektrik makinelerinin optimizasyonu, disiplinler arası bir yaklaşım gerektiren karmaşık bir süreçtir. Bu süreçte, modern optimizasyon teknikleri, çok sayıda parametreyi etkili bir şekilde ele alabilme ve çoklu-fizik problemleri çözme konusundaki üstünlükleriyle öne çıkmaktadır. Araştırmacılar, bu teknikleri kullanarak, tasarımın çeşitli yönlerini optimize edebilir ve daha verimli, kompakt ve ekonomik makineler geliştirebilirler.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezde, genetik algoritma aracılığıyla belirlenen çeşitli tasarım değişkenleri ve kısıtlamalar ile yönlendirilen çoklu-fizik yaklaşımını kullanarak analitik bir elektromanyetik model geliştirilmiş ve optimize edilmiştir. Analitik optimizasyonun, SEY (Sonlu Elemanlar Metodu) optimizasyonuna kıyasla hesaplama süresini önemli ölçüde azaltarak avantaj sağladığı kanıtlanmıştır. Burada önemli bir nokta olarak, analitik hesaplamaların sayısal yöntemleri tamamen yerine koymak yerine hızlandırmak için kullanıldığına dikkat çekilmektedir. Önerilen optimizasyon modeli, motor ve generatör modları için belirlenen sınırlı 500 Hz işletme frekansıyla birlikte 2,5 kW birim güce odaklanmaktadır. Ayrıca, indüklenen gerilim seviyeleri her iki modu da dikkate alarak hesaplanmış ve kısıtlar olarak uygulanmıştır. Motor modunda, dişli tork bir uçuş gereksinimi olarak kısıtlama olarak değerlendirilmiştir. Daha yüksek güç yoğunluğuna ulaşmak için rotor ve stator manyetik malzemesi olarak kobalt-demir alaşımı seçilmiştir. Soğutma, aracın yan rüzgar hareketi nedeniyle bağıl hava hızını kullanarak modellenmiştir. Akım yoğunluğu, elektromanyetik modelde dolaylı bir termal kısıtlama olarak hizmet eder. Son çoklu-fizik alt sistemi olarak, mekanik stres, akım ve manyetik alan etkileşimi kullanılarak modelleştirilmiştir. Kütle hesaplamaları, yalnızca aktif manyetik malzeme üzerinde odaklanarak, performansı etkileyen unsurlara yönelik hedeflenmiş bir bakış açısı sunmaktadır. Çalışmanın tüm aşamaları Şekil 1.7'da genel başlıklar halinde sunulmuştur. Optimizasyon sonrası çalışmalarda, modelimiz üç alt sistem doğrulamasından geçmiştir. İlk olarak, 2B SEY elektromanyetik analiz yapılmıştır. Daha sonra, generatör ve motor işletme döngüleriyle uyumlu termal analiz yapılarak mıknatıs ve sarım sıcaklıklarının kritik seviyelerin altında kalması sağlanmıştır. Son olarak, makinenin mekanik dayanıklılığını doğrulamak için 3D mekanik analiz yapılmıştır.

Bu çalışmanın önemi, yalnızca elektromanyetik değil, termal ve mekanik açılardan da makine performansı için önemli olan optimizasyon ve kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesidir. Bu tez, motor ve generatör modlarında çalışan sistemler için çoklu-fizik yaklaşımını kullanarak analitik modelleme ve optimizasyon

metodolojisini sunarak literatüre katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, modelin entegre HRES için performansını somut bir şekilde göstermektedir.



Şekil 1.7 Çalışmanın genel akış şeması

1.3 Hipotez

Bu çalışmanın hipotezi, genetik algoritma ve çoklu-fizik yaklaşımı kullanılarak geliştirilen analitik elektromanyetik modelin, motor ve generatör modlarında çalışan sistemlerin performansını optimize ederken hesaplama süresini önemli ölçüde azaltabileceğidir. Bu hipotezi doğrulamak için aşağıdaki alt hipotezler test edilecektir:

- Elektromanyetik Performans: Genetik algoritma kullanarak optimize edilen analitik model, geleneksel SEY optimizasyon yöntemlerine kıyasla elektromanyetik performans açısından benzer veya daha üstün sonuçlar verecektir.
- Termal Yönetim: Analitik model, termal analizler aracılığıyla, motor ve generatör modlarında mıknatıs ve sarım sıcaklıklarının kritik seviyelerin altında kalmasını sağlayacaktır.
- Mekanik Dayanıklılık: Modelin mekanik dayanıklılığı, 3D mekanik analizlerle doğrulanarak, makinenin operasyonel streslere karşı dayanıklı olduğunu gösterecektir.
- Hızlı Hesaplama: Analitik optimizasyon yönteminin, SEY optimizasyonuna

kıyasla hesaplama süresini önemli ölçüde azaltarak daha hızlı sonuç vereceği doğrulanacaktır.

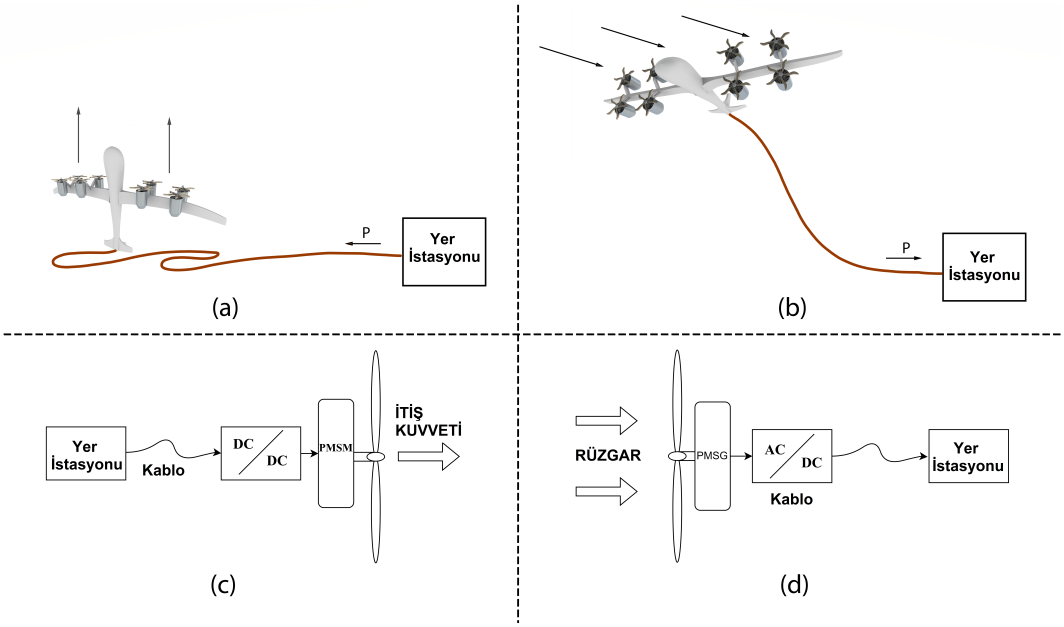
- Performans ve Yoğunluk: Yüksek güç yoğunluğuna ulaşmak için kobalt-demir alaşımı kullanımı, modelin performansını artıracak ve optimizasyon sürecinde avantaj sağlayacaktır.
- Entegre HRES Uygulaması: Önerilen modelin, entegre HRES sistemlerinde başarılı bir şekilde uygulanabileceği ve bu sistemlerin performansını artıracağı öngörülmektedir.

Bu hipotezlerin test edilmesi, modelin doğruluğunu ve etkinliğini kanıtlamak amacıyla çeşitli analizler ve simülasyonlar ile gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, modelin elektromanyetik, termal ve mekanik alt sistemlerinin performansını kapsamlı bir şekilde değerlendirecek ve optimize edilen modelin literatüre katkısını somut bir şekilde göstermiştir.

2
TASARIM GEREKSİNİMLERİ

Bu bölüm, entegre tip HRES'in motor/generatör üniteleri için temel tasarım kriterlerinin belirlemenmesine odaklanmaktadır. Sistem, işletme yüksekliğine ulaşmak için güç ünitelerini motor modunda kullanır, istenilen yüksekliğe ulaştığında, güç üniteleri generatör modunda çalışır ve havada dairesel veya sekiz şeklindeki yörüngeleri takip ederek enerji üretir [35]. Fırtına durumlarında (25 m/s üzerinde rüzgar hızı) veya tehlikeli durumlarda, sistemin güvenli inişini sağlamak için tekrar motor moduna geçilir.

Çalışma modlarının şematik bir temsili Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Entegre HRES'in çalışma prensibi, makine tasarımında çift modlu işletmenin önemini ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın yeniliği, bu bağlamda makinelerin tasarımı ve optimizasyonuna literatüre katkıda bulunmasıdır. Uçuş yörüngesi ve güç ünitesi kontrolü bu çalışmanın kapsamı dışındadır.



Şekil 2.1 Operasyon Modları a)Motor modu b) Generator modu c)Motor modu şematiği d) Generator modu şematiği

Literatürde, entegre HRES için kW ila MW aralığında güç üreten birçok uygulama bulunmaktadır [22], [36], [37]. Bu çalışma, her biri 2,5 kW olan sekiz ünite ile toplamda 20 kW'lik bir entegre HRES için motor/generatör tasarımını sunmaktadır. Geleneksel türbinlerin aksine, entegre HRES'ler, uçağın yan rüzgar hareketi nedeniyle bağıl hava hızı ile güç üretimini kullanır. İşletme noktasındaki rüzgar hızını belirlemek için öncelikle ölçüm veya referans yüksekliği h_0 (m) için rüzgar hızı v_0 (m/s), işletme yüksekliği h'ye $v(h) = v_0.(h/h_0)^e$ formülü ile yükseltilir, ardından bağıl hava hızı uçağın hızına dayalı olarak hesaplanır. Aerodinamik hesaplama bu çalışmanın kapsamı dışında olduğundan, literatürde entegre HRES için hesaplanan maksimum bağıl hava hızı değeri olan $40m/s$ kullanılmaktadır. 20 kW güce sahip ve 100-200 m yükseklikte çalışan sistemin kabul edilen değerleri Tablo 2.1'de gösterilmektedir [38].

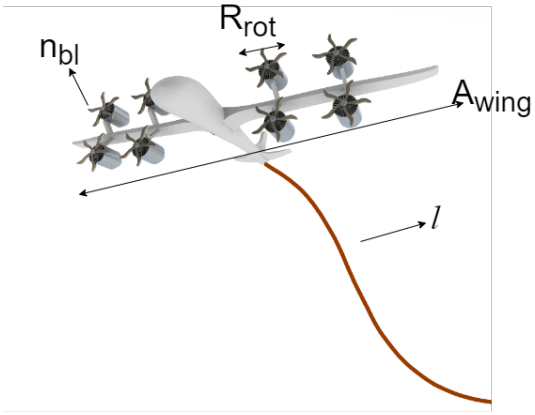
Tablo 2.1 Önerilen Sistemin Parametreleri

Parametre	Birim	Sembol	Değer
Kanat Açıklığı	m^2	$\mathrm{A_{wing}}$	2.93
Rotor Kanat Sayısı	-	$\mathrm{n_{bl}}$	5
Hava Aracının Kütlesi	kg	$\mathrm{m_{uav}}$	50
Maks. Göreceli Hava Hızı	m/s	$\mathrm{V_a}$	40
Kablo Uzunluğu	m	l	152
Maks. Güç	kW	$\mathrm{P_{max}}$	20
Güç Faktörü (5 kanatlı rotor)	-	C_p	0.2
Türbin Verimliliği	-	η_t	0.7

Teorik olarak, rüzgar enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi Betz limiti ile sınırlıdır, bu da 0,59'dur. Tasarım referans alınan sistemde türbin için kanat kontrol mekanizması olmadığını varsayarsak, beş kanatlı bir türbin için türbin güç faktörü C_p'nin 0,2 olduğu kabul edilir [39]. Elektrik makinesi tasarımında, dönme hızı en önemli parametrelerden biridir. Dişli mekanizmasının ekstra ağırlığını ortadan kaldırmak için doğrudan tahrik yöntemi tercih edilir. Bu durumda, rüzgar hızının jeneratörü sürmesini sağlayacak açısal hızın elde edilmesi gerekmektedir. Geleneksel rüzgar türbinlerinin aksine, entegre tip HRES sistemindeki bağıl hava hızı avantajı türbin kanat çapını önemli ölçüde azaltır. Tablo 2.1'deki değerlere dayanarak, türbin kanadı çapı (2.1) ve (2.2) ile bulunur.

$$P_{max} = \frac{1}{2} C_p \rho A_{rot} V_a^3 \tag{2.1}$$

Burada, A_{rot} rotor kanadı alanı (m^2), n türbin sayısı ve ρ hava yoğunluğu (kg/m^3) olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.2 Temel parametrelerin sistem üzerinde gösterimi

Türbinin kanat ucu hız oranı (λ), doğrudan tahrikli motor/generatörün nominal dönme hızını hesaplama için belirlenmesi gereken önemli bir parametredir, (2.3)'te tanımlanmıştır [22].

$$R_{rot} = \sqrt{\frac{A_{rot}}{\mathrm{n_{bl}}\pi V_a^3}} \tag{2.2}$$

Denklem (2.4), w_m (rad/s) mekanik açısal hız ifadesini temsil eder. Rotor mekanik hızı ayrıca (2.5)'te a ile temsil edilen mach sabiti tarafından sınırlanır [37]. Bu nedenle motor modunun maksimum dönüş hızı belirlenir.

$$\lambda = \sqrt{\frac{80}{n_{bl}}} \tag{2.3}$$

$$w_m = \frac{\lambda V_a}{R_{rot}} \tag{2.4}$$

İnverter frekans kısıtlamaları ve demir kayıplarını azaltma ihtiyacı göz önünde bulundurularak, işletme sınırının 500 Hz olarak belirlenmesine karar verildi. Kutup sayısı, belirlenen motor ve generatör işletme modlarındaki frekans sınırına uymak üzere belirlendi. Güç yoğunluğu problemlerinde sıkça kullanılan kesir oluklu 10/12 kombinasyonu [40], [21] tercih edildi. Son tasarım kriterleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

$$w_m = \frac{0.85a}{R_{rot}} \tag{2.5}$$

Oluk/kutup kombinasyonu yüksek sargı faktörü, güç yoğunluğu ve düşük vuruntu

momenti avantajları sebebiyle 10/12 kesir oluklu yapıda tercih edilmiştir.

Tablo 2.2 Motor/Generatör modları için tasarım kriterleri

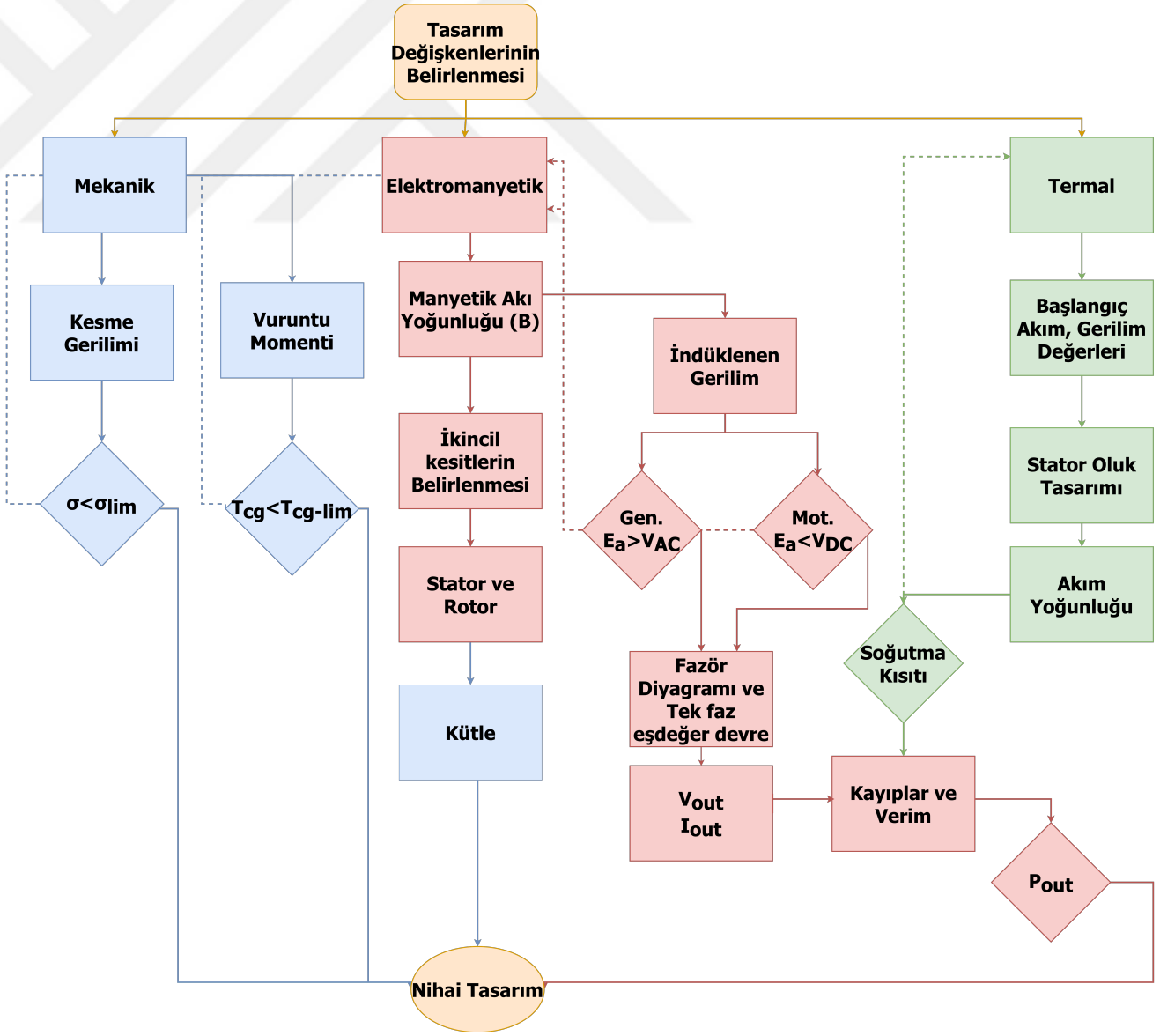
Parametre	Generatör	Motor
Güç	$2.5\ \mathrm{kW}$	$2.5\ \mathrm{kW}$
Hız	4000 dev/dak	5500 dev/dak
Kutup/Oluk	$12/10$	$12/10$
Frekans	$333\ \mathrm{Hz}$	$458\ \mathrm{Hz}$

3
ÇOK FİZİKLİ YAKLAŞIMLI ANALİTİK MODEL

Önerilen çok fizikli yaklaşımı, makinenin performansını kapsamlı bir şekilde analiz etmek için termal ve mekanik isterleri elektromanyetik hesaplamalara entegre eder. Algoritma, makinenin hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu belirleyerek başlar, bu hesaplama yüksüz ve yük altında çalışma koşullarını göz önünde bulundurur. Bu hesaplama sonraki analiz adımları için kritiktir ve bağımsız tasarım değişkenlerine dayanır. Makinenin ikincil kesitleri belirlenen manyetik akı yoğunluğuna dayalı olarak hesaplanır. Sonraki aşamada, indüklenmiş gerilimler, eşdeğer devre ve fazör diyagramı yaklaşımı kullanılarak hem motor hem de generatör çalışma modları için hesaplanır.

Ayrıca, yük altındaki koşullarda, model termal bir kısıtlama olarak akım yoğunluğunu kullanır, bu da akım yoğunluğunu soğutma tipine ve kapasitesine bağlı olarak belirlemede esneklik sağlar. Bu yaklaşım, makinenin termal performansını optimize ederken operasyonel verimliliği korur.

Ek olarak, analitik model, makinenin toplam ağırlığını, manyetik akı yoğunluğu ve akım etkileşiminden kaynaklanan rotor yüzeyindeki kesme gerilmesini ve yüksüz çalışma karakteristiğinde gözlemlenen vuruntu momentini hesaplayarak mekanik gereksinimleri dikkate alır. Bu hesaplamalar, termal ve mekanik gereksinimleri karşılayan bir makine tasarımı için değerli bilgiler sağlar. Genel olarak, analitik model, seçilen sürücü voltaj seviyesine dayalı olarak esnek bir tasarım yaklaşımı sunar ve motor ve generatör çalışma modlarında indüklenmiş gerilimleri kısıtlamalar olarak içerir. Bu çalışmaya özgü analitik modelin akış şeması Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Çok fizikli yaklaşımlı anatilik modelin akış şeması

3.1 Elektromanyetik Model

Bu bölümde, analitik modelin elektromanyetik hesaplamaları detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Model, akı yoğunluğunun belirlenmesi, ikincil kesitlerin tanımlanması ve hem yüksüz hem de yüklü koşullar altındaki işletme karakteristiklerinin analitik hesaplamalarını kapsamaktadır. Elektromanyetik model, tasarım sürecinde parametrik analizlere olanak tanıyan bir yapıya sahiptir ve bu özellik, özellikle alt-alan (sub-domain) analizi kullanılarak sağlanmıştır.

3.1.1 Manyetostatik Model

Hava aralığındaki akı yoğunluğunun kesin olarak belirlenmesi önerilen metodolojinin önemli bir parçasıdır. Hava aralığı akı yoğunluğunun formülasyonu (B_{y}), hem mıknatıslar tarafından oluşturulan manyetik akı yoğunluğunu (B_{m}) hem de armatür akımı tarafından oluşturulan manyetik akı yoğunluğunu (B_{s}) içerir ve oluk geçirgenlik fonksiyonu ($\widetilde{\lambda}$) tarafından modüle edilir, (3.1) [41] şeklinde açıklanmıştır. Denklem radial yönlendirmeli mıknatıs modeline göre elde edilmiştir. Radial yönlendirmeli mıknatıs seçiminde B manyetik alan yoğunluğu vektörünün tanjant bileşeni ihmal edilmektedir.

$$B_{\mathrm{y}}\left(\theta, r\right) = \left(B_{\mathrm{m}}\left(\theta, r\right) + B_{\mathrm{s}}\left(\theta, r\right)\right)\widetilde{\lambda}(\theta, r) \tag{3.1}$$

3.1.1.1 Mıknatısların hava aralığında oluşturduğu akı yoğunluğu

Özellikle açık devre koşulları için tasarlanan alt alan modeline dayalı model (sub-domain), parametrik araştırmalar için kolay adapte edilebilirlik açısından tercih edilmiştir [42]. Stator yapısının oluksuz olduğunu varsayarak, hava aralığındaki akı yoğunluğu (3.2) ile elde edilir. Değişkenler B_r, μ_r, α_p, p, D_r, D_m, D_{si} ve i sırasıyla sürekli mıknatıs remenance değeri, bağıl geçirgenlik, mıknatıs kutup yayının kutup periyodu oranı, kutup çifti sayısı, rotor iç çapı, rotor dış çapı, stator iç çapı ve harmonik bileşen sayısını temsil eder.

$$\begin{aligned} B_{mag}(\theta, r) = & \sum_{i=1,3,5,\ldots}^{\infty} \frac{4}{i\pi}\frac{B_r}{\mu_r}\sin\frac{i\pi\alpha_p}{2}\frac{ip}{(ip)^2-1} \\ & \times \frac{(ip-1)+2\left(\frac{D_r}{D_m}\right)^{ip+1}-(ip+1)\left(\frac{D_r}{D_m}\right)^{2ip}}{\frac{\mu_r+1}{\mu_r}\left[1-\left(\frac{D_r}{D_{si}}\right)^{2ip}\right]-\frac{\mu_r-1}{\mu_r}\left[\left(\frac{D_m}{D_{si}}\right)^{2ip}-\left(\frac{D_r}{D_m}\right)^{2ip}\right]} \\ & \times \cos(ip\theta) \end{aligned} \tag{3.2}$$

Oluklu yapıya sahip makinelerde, Şekil 3.2'te gösterildiği gibi, oluk açıklığının hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu azalttığı gözlemlenmektedir. Bu nedenle, nihai hava aralığı akı yoğunluğu değerinin belirlenmesi, oluk geçirgenlik fonksiyonu ile modülasyon gerektirir. Oluk geçirgenlik fonksiyonu (3.3) şeklinde verilmiştir [43]. (3.3)'te, K_c Carter katsayısını temsil eder. Ek olarak, $\beta(\mathrm{r})$ geçirgenlik fonksiyonunu hesaplamak için bir katsayı olarak işlev görür. Değişkenler b_o, τ_t, i ve N_s, sırasıyla oluk açıklığı, stator diş genişliği, oluk sayısı ve harmonik bileşeni temsil eder. Katsayılar A ve B, hava aralığındaki göreceli geçirgenliği ayarlamak için tanıtılmıştır, A tepe değeri düzenlemek için kullanılırken, B göreceli geçirgenliğin genişliğini kontrol etmek için kullanılır. Bu parametrik model bağlamında, bu katsayılar sabit olarak ayarlanmıştır; A'ya 1 ve B'ye 0.5 değeri ampirik yöntemlerle tespit edilerek atanmıştır. (3.4)-(3.10) ara işlemleri ile oluk fonksiyonu oluşturulur.

$$\widetilde{\lambda}(\theta, r) = \frac{1}{K_c}\left(1 - 2B\beta(\mathrm{r})\frac{b_o}{\tau_t}\right) \times \sum_{i=1,2,3}(-1)\frac{4\beta(r)}{\pi i}\left[0.5 + \frac{A\left(i\frac{b_o}{\tau_t}\right)^2}{\frac{1}{2B^2} - 2\left(i\frac{b_o}{\tau_t}\right)^2}\right]\sin\left(2B\pi i\frac{b_o}{\tau_t}\right)\cos\left(iN_s\theta\right) \tag{3.3}$$

$$g' = g + h_m/\mu_r \tag{3.4}$$

$$K_c = \frac{\tau_t}{\tau_t - \gamma g'} \tag{3.5}$$

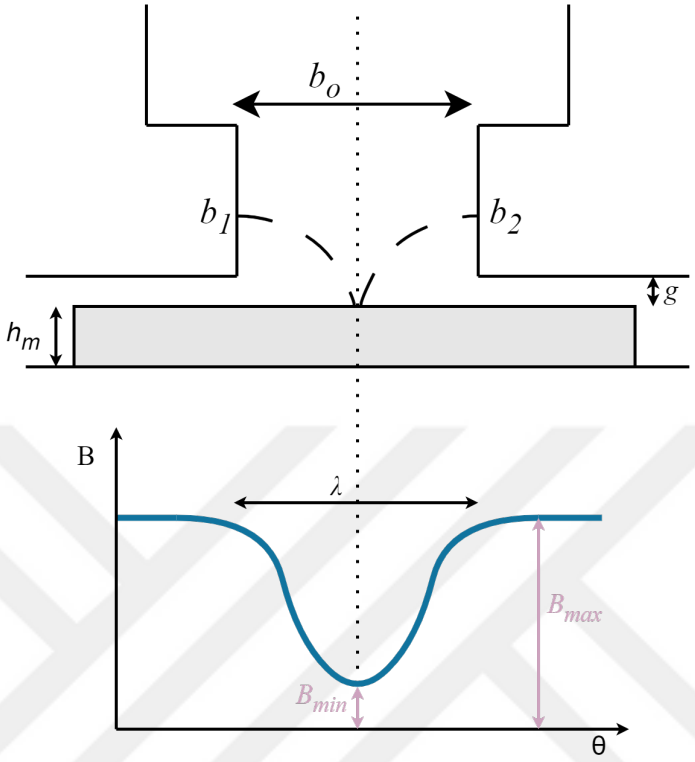
$$\gamma = \frac{4}{\pi}\left\{\frac{b_o}{2g'}\tan^{-1}\left(\frac{b_o}{2g'}\right) - \ln\sqrt{1 + \left(\frac{b_o}{2g'}\right)^2}\right\} \tag{3.6}$$

$$\beta(r) = \frac{1}{2}\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{b_o}{2g'}\right)^2(1 + v^2)}}\right] \tag{3.7}$$

$$a^2 = 1 + \left(\frac{2g'}{b_o}\right)^2 \tag{3.8}$$

$$y\frac{\pi}{b_o} = \frac{1}{2}\ln[\frac{\sqrt{a^2 + v^2} + v}{\sqrt{a^2 + v^2} - v}] + \frac{2g'}{b_o}\arctan\frac{2g'}{b_o}\frac{v}{\sqrt{a^2 + v^2}} \tag{3.9}$$

$$y = \begin{cases} r - (R_s - g - h_m) \\ \quad = r - R_s + g' \end{cases} \tag{3.10}$$



Şekil 3.2 Oluk ve oluk açıklığının akı yoğunluğu üzerindeki etkisi [44], [45]

3.1.1.2 Sargıların hava aralığında oluşturduğu akı yoğunluğu

Yük altında çalışma durumunda, hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu, sargılar tarafından oluşturulan akı yoğunluğu ile mıknatıslar tarafından oluşturulan açık devre hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun birleştirilmesiyle belirlenir. Oluksuz olduğu varsayılan armatür akı yoğunluğu, mıknatıslarda gözlenen modülasyona benzer şekilde, oluk etkisi nedeniyle modüle edilir. Denklem (3.11) armatür akı yoğunluğunu tanımlar. Burada, g', N_{bobin}, N_{tc}, K_v ve α_k sırasıyla sargıların sayısını ve dönüş sayısını, sargı konfigürasyon faktörünü ve bobin açısını temsil eder [46], [47]. Sarım konfigürasyon faktörleri için alt denklemler (3.12-3.15), K_{sov} oluk açıklığı, K_{pv} sargı periyodu ve F_{v} 2D radial faktörleri de dahil olmak üzere aşağıda verilmiştir.

$$B_{\text{s}}(\theta, r, t) = \sum_{k=1}^{N_{\text{bobin}}} \left(\frac{2\mu_0 N_{\text{tc}}\, i(\omega t)}{\pi g'} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{K_v \cos(v\alpha_k)}{v} \right) \tag{3.11}$$

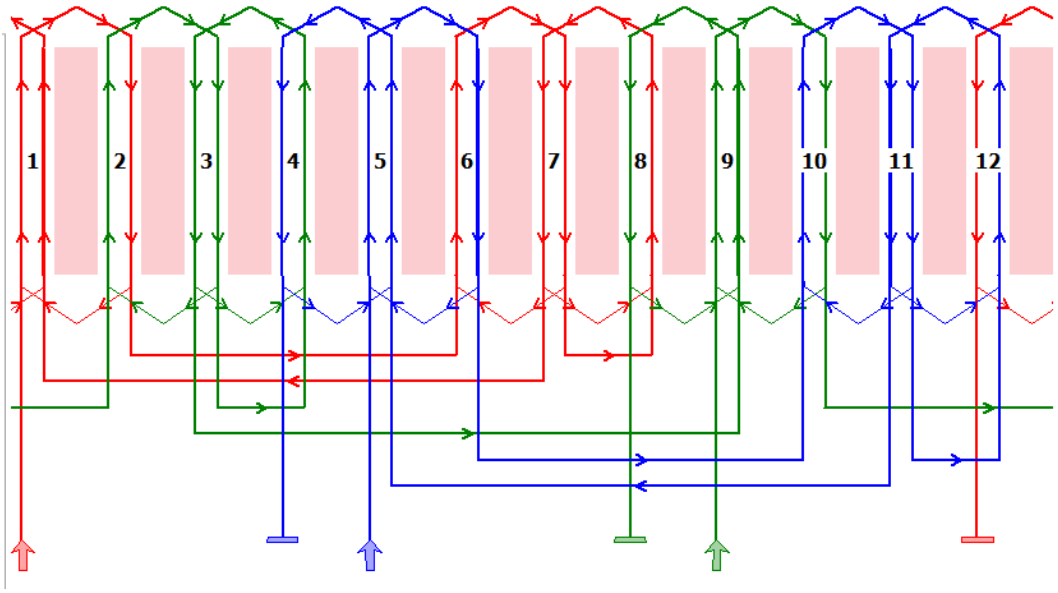
$$K_v = K_{so,v} K_{p,v} F_v \tag{3.12}$$

$$K_{p,v} = \sin\left(\frac{v\alpha_y}{2}\right) \tag{3.13}$$

$$K_{so,v} = \frac{\sin\left(\frac{vb}{2R_s}\right)}{\frac{vb}{2R_s}} \tag{3.14}$$

$$F_v(r) = g' \frac{v}{r} \left(\frac{r}{R_S}\right)^v \frac{1 + \left(\frac{R_r}{r}\right)^{2v}}{1 - \left(\frac{R_r}{R_S}\right)^{2v}} \tag{3.15}$$

Kesir oluklu makine yapısında konsantre sargı tipi seçilmiş olup Şekil 3.3'de fazların yerleşimi görülmektedir. Analitik model her bir fazı ait olduğu bobinlere göre ayrı ayrı hesaplamaktadır.

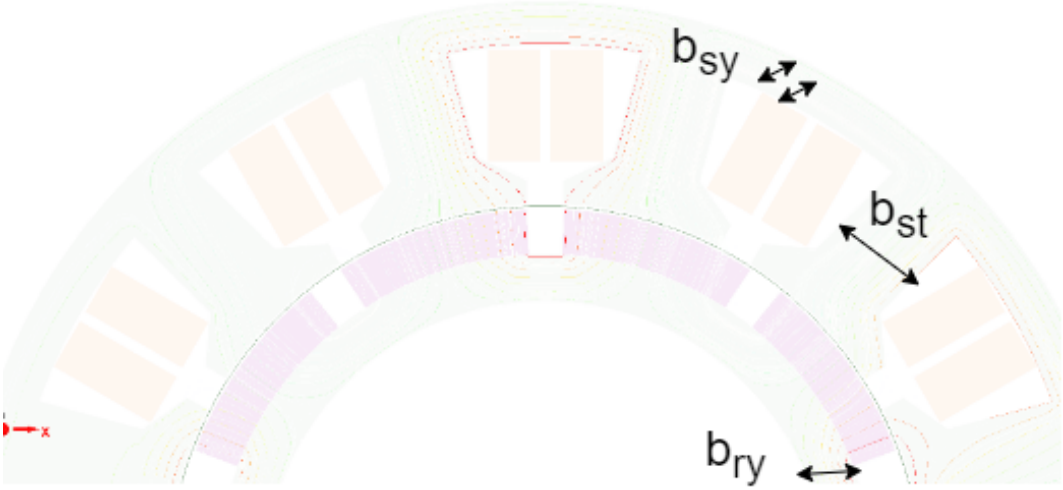


Şekil 3.3 Sarım şemasının gösterimi

3.1.1.3 İkincil Kesitlerin Belirlenmesi

Oluk kutup kombinasyonun 10/12 olarak seçilmesi ikincil kesitlerin oluşmasında avantaj sağlamaktadır. Kaçak akılar ihmal edildiğinde teorik olarak hava aralığından geçen manyetik akının stator dişini takip ederek stator boyunduruğunda

ikiye ayrıldığı böylelikle daha ince bir stator yapısı oluşturduğu bilinmektedir. Şekil 3.4 sonlu elemanlar analizi ortamında akı yolunu göstermektedir.



Şekil 3.4 İkincil kesitlerin gösterimi

Makinenin b_{sy} stator boyunduruk kalınlığı, b_{ry} rotor boyunduruk kalınlığı ve b_{st} stator diş genişliği gibi ikincil parametreleri, hava aralığı akı yoğunluğuna dayalı olarak (3.16)-(3.18) şeklinde hesaplanır [19], [48]. Bu denklemlerde, D_δ hava aralığının ortalama çevresel uzunluğudur, B_{sm} stator maksimum akı yoğunluğu, B_{rm} rotor maksimum akı yoğunluğu, γ_s oluk açısı, τ kutup açısıdır.

$$b_{st} = \frac{D_\delta}{2B_{sm}} \int_{-\frac{\gamma_s}{2}}^{\frac{\gamma_s}{2}} B_\delta(\theta) d\theta \tag{3.16}$$

$$b_{ry} = \frac{D_\delta}{4B_{rm}} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} B_\delta(\theta) d\theta \tag{3.17}$$

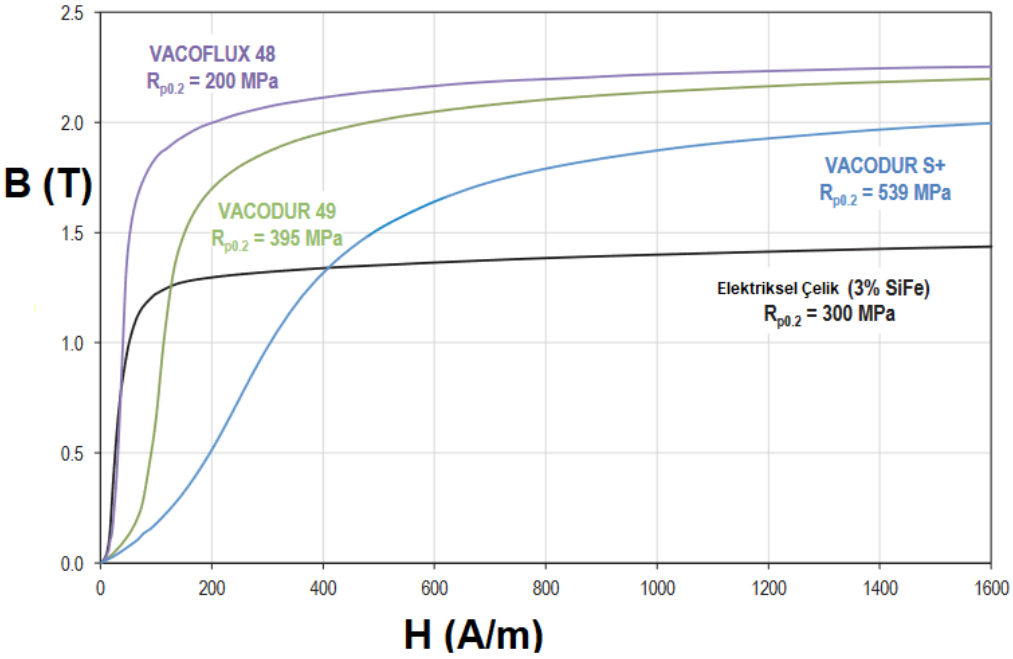
$$b_{sy} = \frac{D_\delta}{4B_{sm}} \int_{-\frac{\pi_s}{2}}^{\frac{\gamma_s}{2}} B_\delta(\theta) d\theta \tag{3.18}$$

Çalışmanın temel odak noktası, elektrik enerjisi üretimidir; ancak bu odak, havacılık sektörü içerisinde yer aldığı için, tasarım kriterleri ve kısıtlamalarını şekillendirmede kilit bir rol oynamaktadır. Bu durum, hem elektriksel performans hem de havacılık uygulamalarına uygunluğu dikkate alarak bir tasarım yaklaşımını gerektirir. Havacılık sektöründe, yüksek güç yoğunluğu ve verimlilik öncelikli hedefler arasında yer alırken, aynı zamanda ağırlık, dayanıklılık ve güvenlik gibi faktörler de büyük önem taşımaktadır. Bu çerçevede, kullanılan malzemelerin

özellikleri ve performansı, tasarımın başarısını doğrudan etkilemektedir.

Kobalt-demir (Co-Fe) alaşımlı manyetik malzemeler, bu tür uygulamalarda tercih edilen malzemeler arasında öne çıkmaktadır. Bu malzemeler, 3-4 kW/kg ve hatta daha yüksek değerlerde güç yoğunluğu elde etme potansiyeline sahiptir [49] [21]. Yüksek güç yoğunluğu, daha kompakt ve hafif tasarımların gerçekleştirilmesine olanak tanıyarak, özellikle havacılık uygulamaları için büyük avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle, bu senaryoda eğilim, Co-Fe alaşımının kullanılmasına doğru yönelmektedir.

Co-Fe alaşımı kategorisinde, seçim Vocaflux-50 olarak yapılmıştır. Vocaflux-50, üstün manyetik özelliklere sahip olup, yüksek doyma akı yoğunluğu ve düşük manyetik kayıplar gibi avantajlar sunmaktadır. Bu özellikler, özellikle yüksek verimlilik ve performans gerektiren uygulamalarda büyük önem taşımaktadır. Seçilen malzemenin kapsamlı özellikleri, bu çalışmanın Tablo 3.1'inde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bu tablo, malzemenin manyetik, termal ve mekanik özelliklerini detaylandırarak, tasarım sürecinde malzeme seçiminin önemini vurgulamaktadır. Şekil 3.5, kobalt-demir alaşımlı malzemenin B-H eğrisini



Şekil 3.5 Vacoflux malzemenin B-H eğrisi gösterimi [50]

göstermektedir. Bu eğri, malzemenin manyetik alan (H) karşısındaki manyetik akı yoğunluğu (B) değişimini ifade etmektedir. Yüksek manyetik geçirgenlik ve düşük histerezis kayıpları, malzemenin verimliliğini artıran faktörlerdir. Bu nedenle, Vocaflux-50'nin seçimi, tasarımın hem performans hem de verimlilik açısından

optimize edilmesine katkıda bulunmaktadır.

B-H eğrisinin analizi, malzemenin tasarım kriterlerine uygunluğunu doğrulamak için yapılmış olup, manyetik devre tasarımında kritik bir referans noktası sağlamaktadır. Bu analiz, malzemenin çalışma aralığında istenilen manyetik performansı sağladığını göstermektedir. Ayrıca, malzemenin sıcaklıkla değişen manyetik özelliklerinin de değerlendirilmesi, yüksek sıcaklık ortamlarında performansını sürdürebilmesi açısından önem arz etmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada kobalt-demir alaşımlı manyetik malzemenin seçimi ve kullanımı, yüksek güç yoğunluğu ve verimlilik gerektiren havacılık uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır. Seçilen malzemenin özellikleri ve performansı, tasarımın hem elektriksel hem de mekanik gereksinimlerini karşılamada etkili bir çözüm sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, bu malzemenin daha ileri analizleri ve deneysel doğrulamaları ile tasarımın performansının artırılması hedeflenmektedir.

Tablo 3.1 Malzeme Özellikleri

Malzeme	Elektriksel Direnç $(\Omega \cdot \mathrm{m})$	Relatif Geçirgenlik	B $_{\text{maks}}$ (T)	Kütle Yoğunluğu $(\mathrm{kg/m^3})$
Vacoflux50	$8.50\mathrm{E}-7$	-	2.2	8120
Bakır	$1.72\mathrm{E}-8$	1	-	8900
NdFeB35	$1.60\mathrm{E}-6$	1.05	1.23	7800

3.1.2 Manyetodinamik Model

Bu bölümde, makinenin boşta çalışma karakteristikleri, akı bağı, indüklenen gerilim ve vuruntu momenti odaklanılarak ele alınmaktadır. Vuruntu momenti mekanik bir çıkış olsa da, elektromanyetik denklemlerin çözümü aracılığıyla belirlenmesi sebebiyle bu bölümde açıklanmıştır.

3.1.2.1 Boşta çalışma Karakteristiği

Boşta çalışma karakteristikleri makinanın akımdan bağımsız olarak dönüş hareketinden kaynaklanan doğal tepkisi göstermektedir. Yükte çalışma durumunu elde etmek için boşta çalışma değerleri kullanılmaktadır. Denklem 3.19 [51], bir elektrik periyodu için çözülmüştür, r hava aralığının orta noktasını temsil etmektedir. Bu denklemde α_k, sargı adım açısını temsil eder.

$$\psi_{\mathrm{fl-A}}(\theta_e) = N_{\mathrm{tc}} L_{\mathrm{stk}} R_{\mathrm{s}} \sum_{k \in \mathrm{fax,A}} \int_{-\alpha_k}^{\alpha_k} B_{\mathrm{m}}(\theta, r, t) \cdot \widetilde{\lambda}(\theta, r) \mathrm{d}\theta_e \tag{3.19}$$

Denklem 3.20'de bulunan boşta akı bağlantısı, indüklenen gerilimi bulmak için kullanılır.

$$E_{nl,A} = -\frac{d}{d\theta_e} \psi_{\mathrm{fl-A}} \tag{3.20}$$

Hava aracına entegre edilmiş motor/generatör ünitelerinde düşük ağırlık ve yüksek verimlilik kriterlerini karşılamanın yanı sıra, vuruntu momentinin minimize edilmesi de önemli bir hedeftir. Vuruntu momenti, motor veya generatörün manyetik devresinde meydana gelen dişli girinti çıkıntıları nedeniyle oluşan moment dalgalanmalarını ifade eder. Bu moment dalgalanmaları, makinenin performansını olumsuz etkileyebilir ve titreşim, gürültü gibi istenmeyen etkilerin ortaya çıkmasına neden olabilir. Dolayısıyla, bu tür uygulamalarda vuruntu momentinin minimize edilmesi, makinenin daha sessiz ve daha verimli çalışmasını sağlar.

Analitik model, vuruntu momentini dikkate alır ve belirlenen sınırlara uygunluğunu sağlamak için gerekli düzenlemeleri yapar. Vuruntu momenti, Maxwell tensor yöntemine göre yanal kuvvetleri bulma prensibine dayanan (3.21) ile belirlenir [52]. Bu denklem, manyetik devredeki yanal kuvvetlerin hesaplanmasında kullanılır ve bu kuvvetlerin etkisiyle oluşan vuruntu momenti belirlenir.

$$T_c = \frac{L_{\mathrm{stk}} R_s^2}{2\mu_0} \sum_{k=1}^{N_s} \int_0^{b_0/2} (B_{rb1}^2 - B_{rb2}^2) dr_\theta \tag{3.21}$$

Denklem 3.21, vuruntu momentini hesaplamak için manyetik akı yoğunlukları (B_r ve B_θ), yarıçap (r) üzerinden hesaplama yapar. Bu denklem, manyetik alanın etkisiyle meydana gelen kuvvetlerin yarattığı momentin miktarını belirler. Vuruntu momentinin hesaplanması, makinenin tasarımında önemli bir adım olup, bu momentin minimize edilmesi için gerekli optimizasyonların yapılmasını sağlar.

Şekil 3.2, b_1 ve b_2 olarak belirtilen oluk yapısının her iki kenarını göstermektedir. Oluk yapısının geometrik özellikleri, vuruntu momentinin büyüklüğünü etkileyen önemli bir faktördür. b_1 ve b_2 oluk kenarlarının genişliklerini ifade eder ve bu genişlikler, manyetik alanın dağılımını ve dolayısıyla vuruntu momentini doğrudan etkiler. Bu nedenle, oluk yapısının optimizasyonu, vuruntu momentinin minimize

edilmesinde kritik bir rol oynar.

Oluk yapısının optimize edilmesi, hem manyetik akı yoğunluğunun düzgün dağılımını sağlar hem de vuruntu momentinin istenilen sınırlarda kalmasını temin eder. Bu optimizasyon sürecinde, analitik model ve Maxwell tensor yöntemi kullanılarak, oluk geometrisi ve manyetik alan dağılımları arasındaki ilişkiler detaylı bir şekilde incelenir. Böylece, vuruntu momentinin minimize edilmesi için en uygun oluk yapısı belirlenir.

3.1.2.2 Yükte Motor/Generatör Karakteristikleri

Yük altında çalışma durumunda, makinenin tek fazlı eşdeğer devresine dahil etmek üzere indüklenen gerilimi hesaplamaktır. Manyetostatik analiz yaklaşımına benzer şekilde, mıknatıslar tarafından indüklenen akı bağının ve akımın zamanla değişen varyasyonundan kaynaklanan akı bağını ayrı ayrı oluşturulur. Yüklü durumda indüklenen gerilimin kapsamlı değerlendirmesi daha sonra (3.22)'de belirtilen süperpozisyon yönteminin sistematik uygulamasıyla gerçekleştirilir [53]. B_A, B_B ve B_C, her bir faz akımının manyetik akı yoğunluğunu temsil ederken B_m ise mıknatısların oluşturduğu akı yoğunluğunu gösterir.

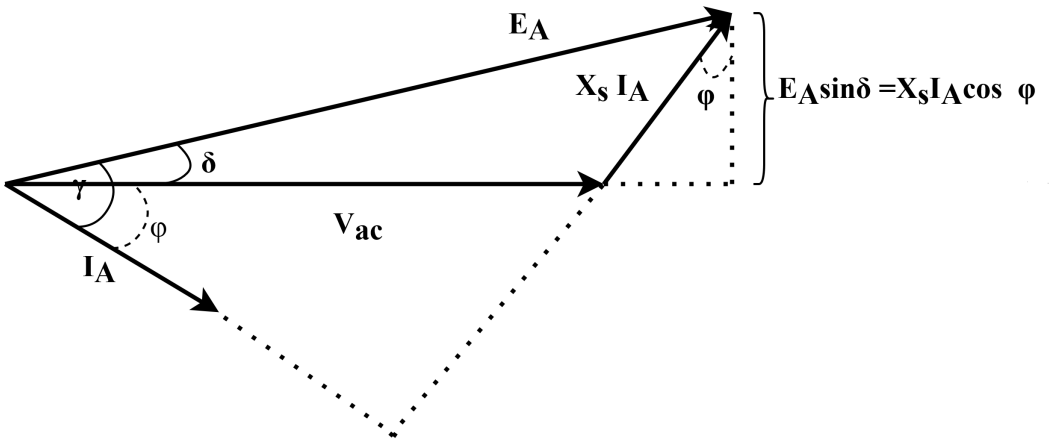
$$E_{A_{\mathrm{y}}} = \frac{L_{\mathrm{stk}} R_s \omega}{N_s} \sum_{m=1}^{N_s} [B_{\mathrm{m}}(\theta + \omega t) + B_A(\theta) + B_B(\theta) + B_C(\theta)] \tag{3.22}$$

Denklem (3.23), Şekil 3.6-b'deki tek fazlı eşdeğer devreyi çözerek elde edilen generatör işletim çıkış gerilimini göstermektedir [54]. Denklem (3.23)'te, $\cos\varphi$ güç faktörünü temsil eder.

$$V_{\mathrm{ç}} = E_{A_y} - \frac{I_a R_a}{\cos\varphi} \tag{3.23}$$

Bir fazör diyagramı, faz direnci üzerindeki gerilim düşüşü ihmal edilerek oluşturulmuştur ve Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Fazör diyagramı, yük açısı δ ile φ arasındaki ilişkiyi gösterir ve bu açıların toplamı γ açısına eşittir. γ açısı, mekanik giriş gücünün (P_{em}) indüklenen gerilim ve akımın çarpımına eşit olmasıyla belirlenir, bu durum (3.24)'te ifade edilmektedir.

$$P_{\mathrm{em}} = \tau_{\mathrm{ind}} \omega_{\mathrm{wm}} = 3 E_A I_A cos\gamma \tag{3.24}$$

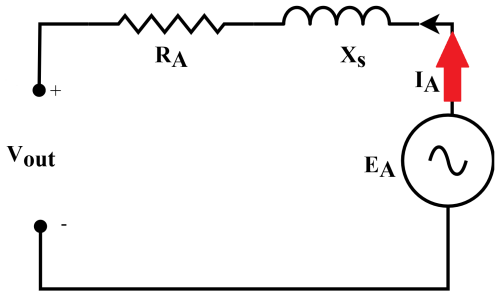


Şekil 3.6 Generator fazör diyagramı [55]

$$I_{\text{a}} cos\varphi = \frac{E_A sin\delta}{X_s} \tag{3.25}$$

Fazör diyagramından görüleceği üzere indüklenen gerilim ve reaktans arasında bir ilişki vardır. Denklem 3.25 güç faktörünü bulmak için kullanılır. (3.26) makinanın generatör modunda çıkış gücünü ifade etmektedir.

$$P_{\text{ç}} = 3V_{\text{ç}} I_{\text{a}} cos\varphi \tag{3.26}$$



Şekil 3.7 Generatör tek faz eşdeğer devre şeması [56]

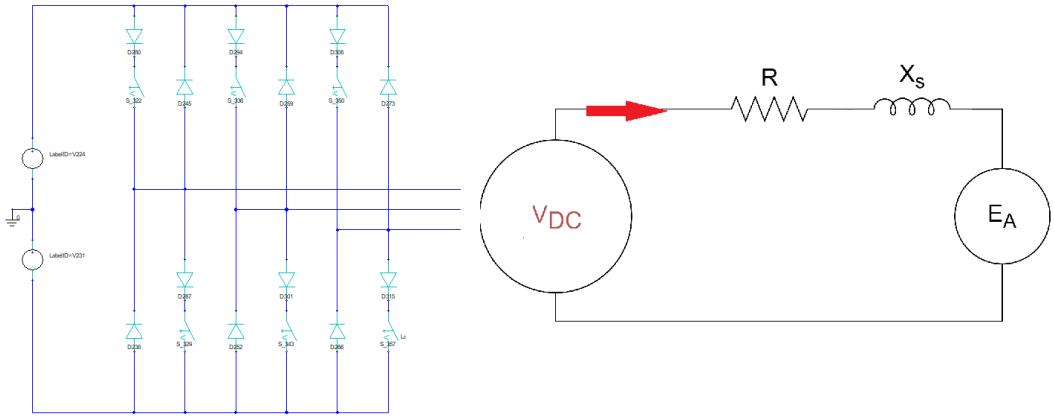
Yüzey mıknatıslı makine seçimi nedeniyle, d ve q eksenlerinin endüktansları eşit olacaktır. 10/12 oluk kutup kombinasyonunun ortak endüktansı sıfır olarak kabul edilmektedir [57]. Akı bağı ve endüktans hesaplaması, $I_a = I$, $I_b = I_c = -\frac{I}{2}$ olan üç fazlı akım şartı altında (3.27) ve (3.28) ile gerçekleştirilmiştir.

$$\psi_{\text{ind}}\ (t^*) = N_{tc} L_{\text{stk}} R_S \sum_{k \in faz,A} \int_{-a_k}^{a_k} B_{\text{s}}\,(\theta, r, t) d\theta \tag{3.27}$$

$$L_d = \frac{\psi_{ind}}{I_a} \tag{3.28}$$

Son olarak, eşdeğer devrenin faz direnci, (3.29) kullanılarak belirlenir, burada ρ_{cu}, τ_c, r_{cu} ve N_{faz} sırasıyla bakırın direnci, bobin adımı, tel iletkeninin yarıçapı ve faz sayısını temsil eder.

$$R_a = \frac{\rho_{cu} N_{\text{tc}} \left(\pi \tau_c + 2L_{stk}\right)}{r_{cu}^2 \pi} \frac{N_s}{N_{faz}} \tag{3.29}$$



Şekil 3.8 Motor altı adımlı sürüş devresi ve tek faz eşdeğer devre gösterimi

Makine hem motor hem de generatör modlarında çalıştığından, iki farklı nominal frekans değeri bulunmaktadır. Makinenin reaktansı, iki ayrı modda hesaplanmış ve tek fazlı eşdeğer devrelerin çözümünde kullanılmıştır. Maksimum motor hızında, indüklenen gerilimin DC besleme gerilimini aşmadığı kontrol edilmelidir. Motor işletimi için çözüm olarak ikinci bir fazör uygulanmıştır. Reaktans değeri, motora özgü çalışma frekansına göre güncellenir ve motorun çalışma limiti, direncin ihmal edilmesiyle (3.30)-(3.32) ile elde edilir ve bir sınır değeri olarak kullanılır. Motor işletimi için güç faktörü 0,8 olarak kabul edilmiştir.

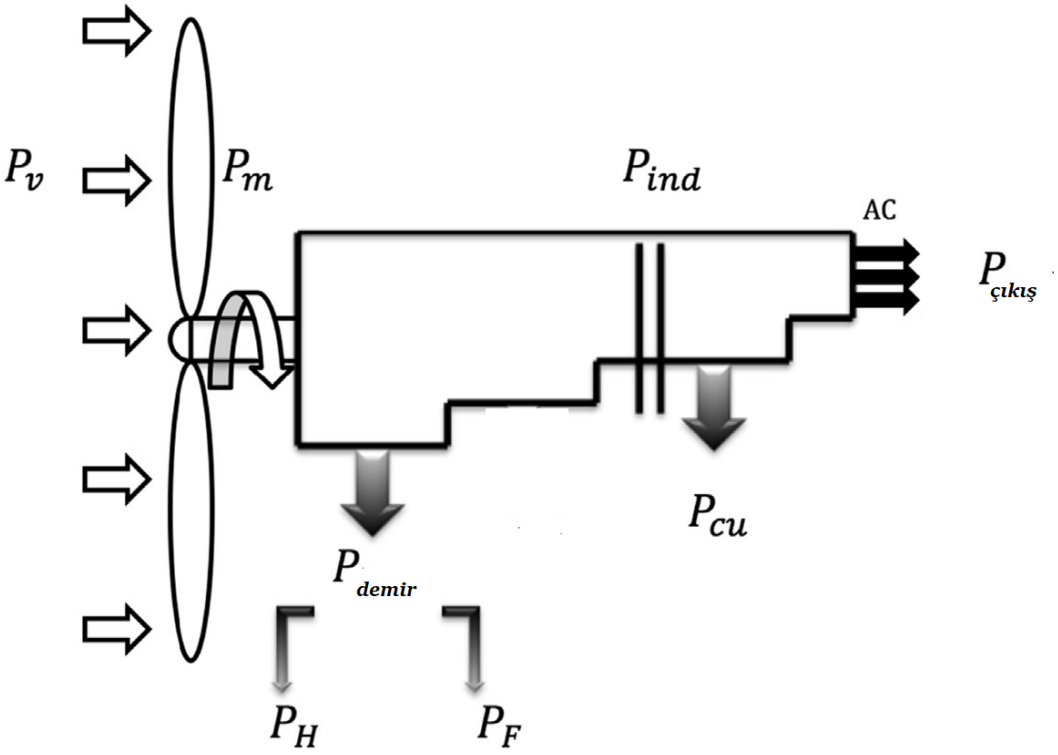
$$V_{ph_mot} = V_{dc} \frac{\sqrt{6}}{\pi\sqrt{3}} \tag{3.30}$$

$$I_{ph_mot} = \frac{P_{em}}{V_{dc}} \sqrt{\frac{2}{3}} \tag{3.31}$$

$$E_{ml} = \sqrt{\left(V_{ph_m}\right)^2 - \left(X_{s_m} I_{ph_m} p f_m\right)^2} - \left(X_{s_{mot}} I_{ph_{mot}} \sin\left(\cos^{-}1\left(\text{pf}_{\text{m}}\right)\right)\right. \tag{3.32}$$

3.1.3 Kayıplar ve Verim

Makine tasarım sürecinde verimliliği incelemek hayati önem taşır. Verimliliği artırmak için kayıpların en aza indirgenmesi gerekir. Önerilen model, stator demir ve bakır kayıplarını dikkate alarak kayıpları hesaplar. Bakır kayıpları, (3.33) ifadesinde belirtilen, termal kısıtlamada kullanılan akım yoğunluğu parametresi J_{cu} ve bakır hacmi V_{cu} ile belirlenir. (3.33) ifadesinde σ_{cu} malzeme iletkenliğini temsil eder.



Şekil 3.9 Kayıp akış diyagramı [55]

$$P_{\text{cu}} = J_{\text{cu}}^2 \cdot \sigma_{\text{cu}} \cdot V_{\text{cu}} \tag{3.33}$$

$$P_{ir} = \left(K_h B_{\max}^2 f + K_c \left(B_{\max} f\right)^2 + K_e B_{\max}^2 f^2\right) V_{sc} \tag{3.34}$$

Sinüzoidal akım koşulları altında, demir kayıpları frekans alanında değerlendirilir. Toplam demir kaybı, (3.34) ifadesinde ifade edilir ve histerezis (K_h), girdap akımları (K_c) ve (K_e) bileşenlerinin toplamından oluşur. Denklemdeki frekans, makinenin temel fonksiyonu olan generatörün çalışma frekansına karşılık gelir.

Sonuç olarak, toplam kayıplar ve verimlilik (3.35)-(3.36) kullanılarak belirlenir.

$$P_{\text{kayip}} = P_{\text{cu}} + P_{\text{ir}} \tag{3.35}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{ç}}}{P_{\text{ç}} + P_{\text{kayip}}} \tag{3.36}$$

3.2 Termal Model

Makinedeki kayıplar tarafından biriken ısı, doğal, hava veya sıvı soğutma mekanizmaları aracılığıyla dağıtılabilir [58]. Yapılandırılan sistemde, uçağın yan rüzgar hareketi nedeniyle dikkate değer bir bağıl hava hızı (40 m/s) elde edilir. Arkadaki türbinin doğal göreceli hızının, soğutmayı etkili bir şekilde kolaylaştıracağı ve ek soğutma ekipmanı gerekliliğini ortadan kaldıracağı öngörülmektedir.

Akım yoğunluğu parametresi, makinenin termal soğutma davranışını doğrudan etkiler. Tablo 3.2, kullanılan soğutma türüne bağlı olarak kabul edilen akım yoğunluğu aralıklarını belirtmektedir [59].

Tablo 3.2 Farklı Soğutma Modlarının Termal Özellikleri [59]

Soğutma Türü	Akım yoğunluğu aralığı $(\mathrm{A/mm^2})$	Isı transfer katsayısı $(\mathrm{W/\left(m^2 \cdot K\right)})$
Doğal konveksiyon	$1.5 - 5$	$5 - 10$
Zorunlu konveksiyon	$5 - 10$	$10 - 300$
Sıvı soğutma	$10 - 30$	$50 - 20000$

Analitik modelde, generatörün nominal işletim gerilimi için 0.8 güç faktörü varsayılarak tek fazlı akım değeri elde edilir, (3.37)'de gösterildiği gibi. pf_{g} generatör modundaki güç faktörüdür.

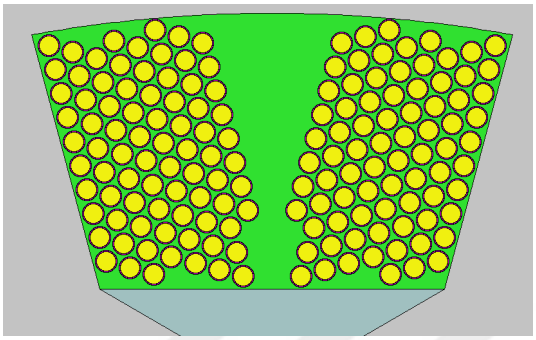
$$I_{\text{gen}} = \frac{P_{em}}{N_{\text{faz}}\, pf_{\text{gen}}\, (V_{p_{\text{ghen}}} / \sqrt{3})} \tag{3.37}$$

$$A_s = \frac{\pi}{4N_s}(D_{so}^2 - D_{si}^2) - \frac{\pi}{4N_s}[D_{so}^2 - (D_{so} - 2b_{sy})^2] - b_{st}(D_{so} - 2b_{sy} - D_{si}) \tag{3.38}$$

Toplam oluk alanı, ikincil kesiti oluşturmak için (3.38)'de seçilir. Akım yoğunluğu değeri, K_{cu} oluk doluluk faktörü ve sargı sayısına göre elde edilir Şekil 3.10 oluk

doluluk görünümünü göstermektedir. D_{so} statorun dış çapıdır. Tasarım sürecinde uygulanan akım yoğunluğu kısıt değeri, (3.39) kullanılarak belirlenir [60].

$$J_{cu} = \frac{6N_{tc}I_{\text{gen}}}{K_{cu}N_sA_s} \tag{3.39}$$



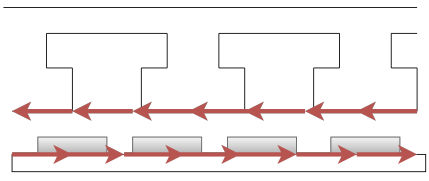
Şekil 3.10 Oluk doluluk görünümü

3.3 Mekanik Model

Kesme gerilimi elektrik makinelerinde kritik bir rol oynar. Tasarım süreci, mekanik sınırları göz önünde bulundurarak bu kesme gerilimini maksimize etmeyi amaçlar. Bu, manyetik akı yoğunluğu ile elektrik yükünün çarpımıyla hesaplanır ve (3.40)'de verilmiştir. Manyetik akı yoğunluğu ve elektrik yükünün sinüzoidal olarak değiştiği varsayılmaktadır. (3.40)'de, $\widehat{B}$ ve $\widehat{A}$ bu parametrelerin tepe değerlerini temsil eder [61].

$$\sigma = \frac{1}{2}\widehat{B}\widehat{A}\cos\delta \tag{3.40}$$

Kesme geriliminin motor üzerinde gösterimi Şekil 3.11'te yer almaktadır.



Şekil 3.11 Kesme geriliminin gösterimi [61]

Literatür, çeşitli makine tiplerine özgü kesme gerilimi aralıklarını kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. Bu aralıklar, belirli uygulamalar için Tablo 3.3'de sunulmuş ve özetlenmiştir [59].

Tablo 3.3 Farklı makine tipleri için kesme gerilimi değerleri [59]

Makine tipi	Kesme gerilimi $\sigma(\mathrm{kPa})$
Havacılık makineleri	$14-35$
Yüksek performans servo motoru	$7-21$
Büyük sıvı soğutmalı makine	$70-140$

Bu çalışmada, makinedeki stator, rotor, sarımlar ve mıknatıslar gibi aktif manyetik malzemenin toplam kütlesini minimize etmek amaçlanmaktadır. Toplam kütlenin hesaplanması için her aktif parçanın kütlesi aşağıdaki gibidir: m_{sc} statorun ağırlığına, m_{ry} rotora, m_{mag} mıknatıslara ve m_{cu} bakır sarımlara karşılık gelir. Her bileşenin geometrisinden türetilen kütle denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$m_{sc} = \rho_{sc} L_{\mathrm{stk}} \left[\frac{\pi}{4} \left(D_{so}^2 - D_{si}^2 \right) - N_s A_s \right] \tag{3.41}$$

$$m_{ry} = \frac{\pi}{4} \rho_{ry} L_{\mathrm{stk}} \left[D_r^2 - (D_r - 2b_{ry})^2 \right] \tag{3.42}$$

$$m_{Cu} = \rho_{Cu} A_s K_{cu} N_s \left(L_{\mathrm{stk}} + l_{ew} \right) \tag{3.43}$$

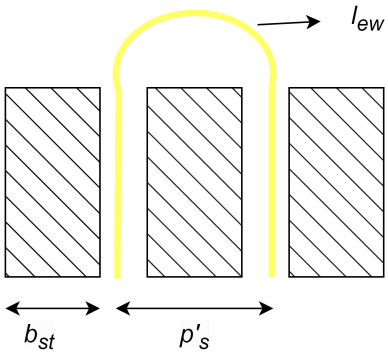
$$m_{mag} = \frac{\pi}{4} \alpha_p \rho_{mag} L_{\mathrm{stk}} \left(D_m^2 - D_r^2 \right) \tag{3.44}$$

$$m_{\mathrm{top}} = m_{\mathrm{sc}} + m_{\mathrm{ry}} + m_{\mathrm{mag}} + m_{\mathrm{cu}} \tag{3.45}$$

Kütle hesaplamalarında stator dişleri üst yüzeyleri ihmal edilmiş olup oluk açıklığı boyunca oluşan stator diş kalınlığı ile hesaplama yapılmıştır. Bu durum toplam stator kütlesinde ihmal edilebilir bir fark yaratmaktadır. Ayrıca sargı sonları l_{ew} denklem 3.46-3.47 ile bulunur. Denklem 3.46'de y_q bobin adımını temsil etmektedir oluk ve kutup sayısı oranının en yakın tam sayı değeri olarak hesaplanır. Stator dişinin yarı yüksekliğinde ölçülen oluk aralığı p_s' , 3.47'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır. Burada h_t oluk yüksekliği olup denklem 3.49 ile oluk yapısının ara paremetreleri ile hesaplanır. Denklem 3.48 ile l_{ew} sargı sonu uzunluğu nihai olarak elde edilir ve sargı kütlesinin hesabında eksenel uzunluğa ilave edilerek kullanılır [62]. Sargı sonlarının şematik gösterimi Şekil 3.12'te yer almaktadır.

$$y_{\mathrm{q}} = Int(N_s/2p) \tag{3.46}$$

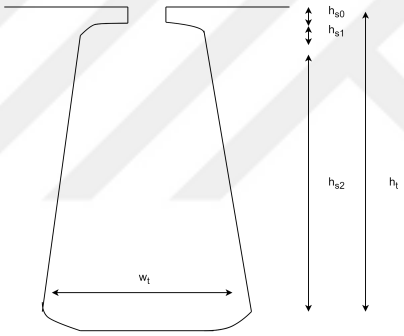
$$p_{\mathrm{s}}' = \pi(D_{\mathrm{si}} + h_t)/N_s \tag{3.47}$$



Şekil 3.12 Sargı sonlarının şematik gösterimi [62]

$$l_{\mathrm{ew}} = \pi/2(p_{s'} + b_{\mathrm{st}})/2 \tag{3.48}$$

Oluk yapısı Şekil 3.13'ta verilmiş olup, oluk kesitlerine ait denklemler 3.49'te yer almaktadır.



Şekil 3.13 Oluk yapısı ve kesitlerin gösterimi

Oluk yapısının belirlenmesi için h_{s0}, h_{s1}, h_{s2} ve h_{st} için (3.49) kullanılır.

$$h_{\mathrm{s0}} = b_{\mathrm{st}} \times \frac{1}{4} \tag{3.49}$$

$$h_{\mathrm{s1}} = b_{\mathrm{st}} \times \frac{1}{4} \tag{3.50}$$

$$h_{\mathrm{s2}} = b_{\mathrm{st}} \times \frac{5}{4} \tag{3.51}$$

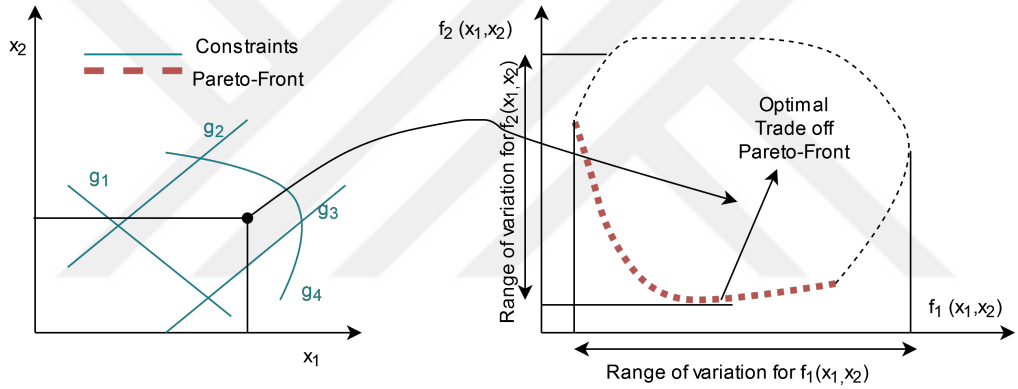
$$h_{\mathrm{t}} = h_{\mathrm{s0}} + h_{\mathrm{s1}} + h_{\mathrm{s2}} \tag{3.52}$$

4
OPTİMİZASYON

Akıllı optimizasyon teknikleri, türevsel analitik ifadelere ihtiyaç duymadan çalışarak, genişletilmiş parametre uzaylarını keşfetmeyi ve global optimum noktaları bulmayı mümkün kılar. Bu teknikler, yerel optimum noktalarından kaçınarak daha geniş bir arama alanı içinde en iyi çözümleri bulmayı hedefler. Bu bağlamda, genetik algoritmalar, doğal süreçlerden ilham alan ve bu yaklaşımı temsil eden önemli bir yöntemdir. Genetik algoritmalar, optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan parametreleri genler olarak ifade eder ve bu genler, bir kromozom oluşturacak şekilde bir araya gelir. Algoritma, doğal seçim ve genetik evrim prensiplerini taklit ederek, kromozomlar arasında rastgele bilgi alışverişi gerçekleştirir ve nesilleri geliştirir [63]. Bu süreçte, başlangıçta çeşitli bir popülasyon üretilir ve her bireyin çözümünün kalitesi, bir uygunluk fonksiyonu kullanılarak değerlendirilir [64]. Uygunluk temelli seçim, çaprazlama ve mutasyon adımları, popülasyonu iteratif olarak iyileştirir ve algoritma, önceden belirlenmiş bir durma kriterine ulaşana kadar bu süreci devam ettirir [65].

Çatışan amaçlara ve kısıtlamalara sahip optimizasyon problemleri için özel olarak tasarlanmış çok amaçlı ve kısıtlı genetik algoritmalar, daha karmaşık problemleri çözmek için geliştirilmiştir. Bu algoritmalar, çeşitli uygunluk fonksiyonları aracılığıyla çözümleri değerlendirir ve bu değerlendirmeler sonucunda, çeşitli kriterler arasında uyumlu bir dengeyi temsil eden Pareto önünde konumlanmış bir çözüm kümesini belirler. Geleneksel tek amaçlı optimizasyon yöntemlerinden farklı olarak, çok amaçlı ve kısıtlı genetik algoritmalar, iteratif süreçleri boyunca çeşitli bir popülasyonu koruyarak, çözüm uzayının kapsamlı bir şekilde keşfedilmesini garanti eder [66]. Bu yaklaşım, çatışan amaçlar arasındaki doğal trade-off'ları etkili bir şekilde yakalayarak, belirtilen kısıtlara uygun olarak Pareto önünde çözümleri belirlemede önemli bir rol oynar. Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, n kısıtlamalı iki amaçlı bir optimizasyon problemi için çok amaçlı genetik algoritmalar, bu karmaşıklığı etkin bir şekilde yönetebilir ve optimize edilmiş çözümler sunabilir [67].

Genetik algoritmaların sunduğu geniş parametre arama kapasitesi ve çatışan amaçlar arasındaki dengeyi sağlama yeteneği, özellikle elektrik makinelerinin optimizasyonunda geniş bir uygulama alanı bulur. Elektrik makinelerinin tasarımı ve optimizasyonu, genellikle verimlilik, güç yoğunluğu, termal dayanım ve maliyet gibi birden fazla performans ölçütünü optimize etmeyi gerektirir. Bu tür çok amaçlı optimizasyon problemleri, geleneksel yöntemlerle zor çözülebilecek karmaşık bir yapıdadır. Genetik algoritmalar, bu zorlukların üstesinden gelmek için etkili bir araç sunar, çünkü popülasyon temelli yapıları, hem küresel arama kapasitesini hem de yerel incelemeleri mümkün kılar. Örneğin, bir elektrik makinesinin rotor ve stator tasarımı, malzeme seçimi, oluk/kutup konfigürasyonu ve soğutma stratejileri gibi parametrelerin optimize edilmesi, genetik algoritmalar sayesinde daha etkin bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu nedenle, genetik algoritmaların elektrik makinesi optimizasyonu alanında geniş bir kabul görmesi ve uygulanması, modern enerji sistemlerinde verimlilik ve performansı artırmada giderek artan bir öneme sahiptir.

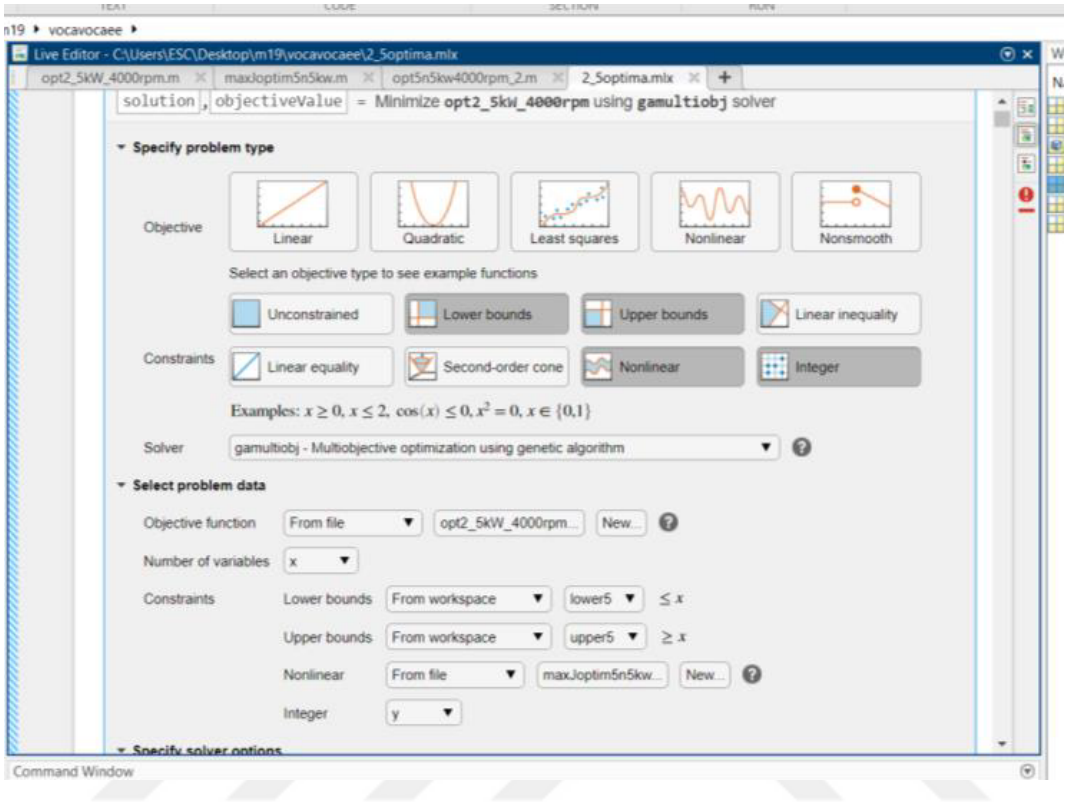


Şekil 4.1 Çok amaçlı optimizasyon probleminin temsili [67]

Bu çalışma, verimliliği ve güç yoğunluğunu maksimize etme çok amaçlı optimizasyon problemine analitik bir modelle çok fizikli bir yaklaşım kullanmaktadır. Analitik bir modelin kullanımı, hesaplama süresini önemli ölçüde azaltır. Alternatif olarak, 2B ve 3B SEY kullanarak yapılan optimizasyon, hesaplama süresi açısından maliyetlidir. Benzer bir çalışma için basitleştirilmiş bir 3B SEY tabanlı optimizasyon yaklaşık olarak 13 saat sürmektedir [68]. Ancak bu çalışmada, optimizasyon süreci, i7 9760H 6/12 çekirdekli CPU ve 16 GB RAM teknik özelliklerine sahip bir bilgisayarda yaklaşık 4 saat sürmüştür. Her iki yöntemi karşılaştırıldığında, önerilen analitik model tabanlı optimizasyon, hesaplama süresinde önemli ölçüde azalmaya neden olmaktadır. SEY doğrulamasına göre, önerilen model yüksek doğruluk oranına sahiptir.

4.1 Optimizasyon aracı

Çözümleme için Matlab çok amaçlı genetik algoritma çözücüsü kullanılmıştır. Şekil 4.2 kullanılan çözücünün arayüzünü göstermektedir.



Şekil 4.2 Matlab optimizasyon aracı arayüzü

Tablo 4.1'de listelenen parametreler, çalışmada kullanılan genetik algoritmanın (GA) yapılandırmasını ayrıntılı olarak sunmakta ve bu algoritmanın optimizasyon sürecindeki performansını belirleyen temel unsurları ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, GA'nın özelleştirilmiş bir versiyonu olan "gamultiobj" çözücüsü tercih edilmiştir. "Gamultiobj," çok amaçlı optimizasyon problemleri için MATLAB tarafından geliştirilmiş güçlü bir çözücü olup, farklı hedef fonksiyonları aynı anda optimize edebilme kabiliyeti ile öne çıkar. Bu çözücünün seçimi, çalışmanın amacına uygun olarak farklı performans kriterlerini aynı anda optimize etme gerekliliği göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

Değişken sayısının yedi olarak belirlenmesi, bu optimizasyon probleminin çözümünde önemli bir rol oynar. Yedi değişken, genetik algoritmanın çözmesi gereken geniş bir parametre uzayını ifade eder. Bu durum, algoritmanın çok yönlülüğünü ve farklı çözüm stratejilerini test etme kapasitesini artırır. Uyumluluk ölçekleme yöntemi olarak "tournament" seçimi ise, popülasyon içindeki bireylerin rekabetçi bir şekilde seçilmesine olanak tanır. "Tournament" yöntemi, belirli bir

Tablo 4.1 Genetik Algoritma Parametreleri

Parametre	Değer
Çözücü	gamultiobj
Değişken Sayısı	7
Uyumluluk Ölçekleme	tournament
Çaprazlama Oranı	0.8
Pareto Oranı	0.35
Nesil Sayısı	1000
Durdurma Nesli	100
Duraklama Eşiği	10^{-4}

grup içerisindeki en iyi bireyin seçilmesini sağlayarak, daha güçlü çözümlerin oluşturulmasına katkıda bulunur. Bu, genetik algoritmanın global optimizasyon yeteneğini güçlendiren önemli bir mekanizmadır.

Çaprazlama oranı 0.8 olarak belirlenmiştir, bu da mevcut popülasyonun %80'inin yeni nesiller oluşturmak için çaprazlanacağı anlamına gelir. Yüksek bir çaprazlama oranı, genetik çeşitliliğin korunmasına ve optimizasyon sürecinde yeni çözümlerin keşfedilmesine olanak tanır. Ancak, bu oran aynı zamanda çözüm uzayının yeterince keşfedilmesini ve daha iyi çözümlerin bulunmasını sağlar. Pareto oranı ise 0.35 olarak belirlenmiştir. Pareto oranı, optimal çözümlerin bir kısmının diğerlerine göre daha fazla önceliklendirildiği bir seçilim stratejisidir. Bu oran, çözümlerin Pareto optimalitesine göre sıralanmasını sağlar ve farklı amaçlar arasında denge kurarak, çözümlerin çoklu amaçlar arasında bir denge bulmasını teşvik eder.

Nesil sayısının 1000 olarak belirlenmesi, genetik algoritmanın uzun süreli evrim sürecini ifade eder. Yüksek nesil sayısı, algoritmanın daha geniş bir çözüm uzayını keşfetmesini sağlar ve daha iyi çözümler bulma şansını artırır. Durdurma nesli ise 100 olarak belirlenmiştir. Bu, algoritmanın herhangi bir nesil boyunca belirli bir iyileşme göstermemesi durumunda sürecin durdurulması için bir kriter oluşturur. Duraklama eşiği olarak 10^{-4} belirlenmiştir, bu da algoritmanın çözüm kalitesinde çok küçük bir iyileşme olduğunda sürecin durdurulmasına olanak tanır. Bu tür durdurma kriterleri, gereksiz hesaplama süresini azaltır ve algoritmanın verimliliğini artırır.

Sonuç olarak, bu genetik algoritma parametreleri, çalışmada hedeflenen optimizasyon problemini etkili ve verimli bir şekilde çözmek için dikkatlice seçilmiş ve yapılandırılmıştır. Her bir parametre, algoritmanın genel performansını ve sonuçların doğruluğunu doğrudan etkileyen önemli bir rol oynar. Bu

yapılandırma, çalışmanın amacı doğrultusunda optimal çözümlerin elde edilmesine büyük katkı sağlamıştır [69].

4.2 Optimizasyon probleminin tanımlanması

Optimizasyon probleminin temel bileşenleri, problemde yer alan değişkenler, bu değişkenlere uygulanan kısıtlar ve optimize edilmesi gereken amaç fonksiyonundan oluşmaktadır. Bu çalışmada, denklemler (4.2) ve (4.3), sırasıyla optimizasyon probleminde kullanılan değişkenler matrisini ve kısıtlar matrisini temsil etmektedir.

Denklem (4.1) ise, optimizasyonun iki temel amaç fonksiyonunu ifade eder. İlk amaç fonksiyonu olan $f(1)$, toplam kütleyi (m_t) minimize etmeyi hedeflerken, ikinci amaç fonksiyonu olan $f(2)$ ise verimliliği (η) maksimize etmeyi amaçlar. Bu iki fonksiyon, optimizasyon sürecinde dengeleyici bir rol oynar ve çok amaçlı optimizasyon problemlerinde sıklıkla kullanılan karşıt hedefleri temsil eder.

Değişkenler matrisi X, yedi değişken $[x(1), x(2), \ldots, x(7)]'$ ile tanımlanmıştır. Bu değişkenler, optimize edilmesi gereken parametreleri içerir ve algoritmanın çözüm uzayını temsil eder. Kısıtlar matrisi G ise, altı adet kısıt $[g(1), g(2), \ldots, g(6)]'$ içerir ve bu kısıtlar, çözüm uzayında izin verilen bölgeleri tanımlar. Kısıtlar, optimizasyon sürecinde çözümün fizibilitesini sağlamak amacıyla uygulanır ve çözümlerin geçerli olup olmadığını belirler. Bu yapılar, optimizasyon probleminin formüle edilmesi ve çözüme ulaşılması için kritik öneme sahiptir.

$$\begin{aligned} F &= [f(1), f(2)]' \\ f(1) &= \min(m_t) \\ f(2) &= \max(\eta) \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$X = [x(1), x(2), ..., x(7)]' \tag{4.2}$$

$$G = [g(1), g(2), .., g(6)]' \tag{4.3}$$

Makinenin tasarımında ana boyutlandırma parametreleri olarak satator iç yarıçapı, eksenel uzunluk, hava aralığı ve mıknatıs kalınlığı belirlenmiştir. Bu parametreler, makinenin performansını doğrudan etkileyen kritik boyutlardır. Tasarım sürecinde, sargı sayısı gibi ek parametreler de dahil edilmiştir; bu, özellikle motorun maksimum hızda çalışması sırasında indüklenen gerilimin aşılmasını önlemek amacıyla yapılmıştır. Ayrıca, oluk açıklığı ve kutup oranı gibi değişkenler, vuruntu momentinin belirlenen sınırları aşmaması için tasarım parametreleri olarak eklenmiştir.

Tablo 4.2, bu çalışmada tasarım değişkenleri olarak seçilen parametreleri ve bu değişkenler için belirlenen alt ve üst sınırları sunmaktadır. Bu sınırlar, genel tasarım prensipleri, mevcut literatür ve uygulama deneyimleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Ayrıca, ilgili sistemin fiziksel kısıtlamaları da göz önünde bulundurulmuştur. Analitik modelin doğrulanmasına odaklanan bu çalışma, imalat toleranslarını değerlendirmeye dahil etmemiştir, ancak bu durum ileriki çalışmalar için bir değerlendirme konusu olabilir.

Tablo 4.2 Değişken Tanımları

Değişken Vektör	Değişken	Parametre	Birim	Alt Sınır Sınırı	Üst Sınır Sınırı
$\mathbf{x}(1)$	R_s	Stator iç yarıçapı	m	0.010	0.100
$x(2)$	g	Hava aralığı	m	0.0001	0.015
$\mathbf{x}(3)$	h_m	Mıknatıs yüksekliği	m	0.0020	0.0090
$\mathbf{x}(4)$	L	Eksenel uzunluk	m	0.010	0.06
$\mathbf{x}(5)$	$\mathrm{N_a}$	Tur sayısı	-	10	200
$\mathbf{x}(6)$	b_o	Oluk açıklığı	m	0.0015	0.005
$\mathbf{x}(7)$	α_p	Kutup oranı	-	0.6	1

Optimizasyon sürecinde, yalnızca tasarım değişkenlerinin belirlenmesi yeterli değildir; aynı zamanda, bu değişkenlerin belirli sınırlar içinde kalmasını sağlamak amacıyla kısıtların da tanımlanması gerekmektedir. Kısıtlar, tasarımın güvenilir ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi için kritik bir rol oynar. Bu çalışma kapsamında, elektrik makinesinin performansını ve güvenliğini garanti altına almak amacıyla çeşitli kısıtlar uygulanmıştır.

Tablo 4.3, optimizasyon probleminde dikkate alınan temel kısıtları ve bunların ilgili parametrelerle olan ilişkisini göstermektedir. İlk olarak, bakır kayıplarını ve termal yönetimi optimize etmek amacıyla akım yoğunluğu (J_{cu}) kısıtı getirilmiştir. Motor ve generatör modlarındaki gerilim değerleri (E_{AM}) ve (E_{AG}), her iki modun da nominal çalışma koşullarında güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için kısıtlanmıştır. Ayrıca, rotor üzerinde oluşabilecek mekanik zorlanmaların kontrolü amacıyla kesme gerilmesi (σ) kısıtı uygulanmıştır. Son olarak, vuruntu momenti (T_c), özellikle düşük hızlarda titreşim ve gürültüyü minimize etmek için sınırlandırılmıştır. Bu kısıtlar, tasarımın hem elektriksel hem de mekanik bütünlüğünü sağlamaya yönelik olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.4 ve Tablo 4.5 farklı limitleri gösteren kısıt matrislerini sunmaktadır. Bu kısıtlar, elektromekanik veya termal alanlarda farklı gereksinimleri incelemek amacıyla çoklu fizik yaklaşımlı analitik elektromanyetik modelin tepkisini

Tablo 4.3 Kısıt Tanımları

Vektör	Kısıt	Parametre
$\mathbf{g}(1)$	J_{cu}	Akım Yoğunluğu
$g(2)$	E_{AM}	Motor Gerilim
$\mathbf{g}(3)$	E_{AG}	Generatör Gerilim
$\mathbf{g}(4)$	σ	Kesme Gerilmesi
$\mathbf{g}(5)$	T_c	Vuruntu Momenti

araştırmayı amaçlamaktadır. Elektromanyetik model, makinanın performansını ve verimliliğini optimize etmek için kullanılan bir araçtır ve bu nedenle doğru ve detaylı bir kısıt analizi kritik öneme sahiptir.

Öncelikle, vuruntu momenti kısıtı sabit tutulmuştur. Vuruntu momenti, sürekli mıknatıslı makinelerde yaygın olarak karşılaşılan bir sorun olup, tork dalgalanmalarına ve titreşimlere neden olabilir. Bu çalışmada vuruntu momenti sabit tutularak, diğer değişkenlerin etkisi daha detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Makinenin soğutma yöntemi, elektromekanik performansını büyük ölçüde etkileyen bir diğer kritik faktördür. Bu bağlamda, makinelerin doğal soğutmalı, zorlamalı hava soğutmalı ve sıvı soğutmalı olma durumlarına göre çeşitli kısıtlar oluşturulmuştur. Doğal soğutma, hava ile soğutma ve sıvı soğutma yöntemlerinin her biri, makinenin çalışma koşullarını ve termal yönetimini farklı şekillerde etkiler. Bu çalışmada, makinenin soğutma yöntemi ve çıkış gerilimi ile ilgili olarak belirlenen kısıtlar ve bu kısıtların analitik model üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Limit-1, Limit-4 ve Limit-7, doğal soğutmalı bir makine için generatör çıkış gerilimi ve motor sürücü geriliminin etkisini göstermektedir. Bu limitler altında yapılan analizlerde, doğal soğutmanın makinenin termal performansı üzerindeki sınırlamaları ve bu sınırlamaların elektromekanik model üzerindeki etkileri ele alınmıştır.

Limit-2, Limit-5 ve Limit-8, zorlamalı hava soğutmalı bir makine için benzer parametreleri incelemektedir. Zorlamalı hava soğutma, doğal soğutmaya kıyasla daha etkili bir soğutma sağlar ve bu nedenle makinenin daha yüksek güç yoğunluğunda çalışmasına olanak tanır. Bu limitler altında, zorlamalı hava soğutmanın makinenin performansı üzerindeki olumlu etkileri ve bu etkilerin analitik model üzerindeki yansımaları incelenmiştir.

Limit-3, Limit-6 ve Limit-9 ise sıvı soğutmalı bir makine için belirlenen kısıtları

içermektedir. Sıvı soğutma, en etkili soğutma yöntemlerinden biridir ve makinenin en yüksek güç yoğunluğunda çalışmasını sağlar. Bu limitler altında yapılan analizlerde, sıvı soğutmanın makinenin performansı üzerindeki etkileri ve bu etkilerin analitik model üzerindeki yansımaları ele alınmıştır.

Tablo 4.5 ise zorlamalı soğutmalı versiyon için yeniden düzenlenmiştir. Bu tabloda, tek bir soğutma tipi olmasına rağmen, gerilim seviyesi, kesme gerilimi beklentisi ve vuruntu momenti kısıtı değişkenlik göstermektedir. Gerilim seviyesi, makinenin çalıştığı voltajı belirlerken, kesme gerilimi beklentisi, makinenin maksimum tork üretme kapasitesini ifade eder. Vuruntu momenti ise, makinenin çalışması sırasında oluşan istenmeyen tork dalgalanmalarını ifade eder. Bu faktörlerin her biri, makinenin performansı üzerinde önemli etkilere sahiptir ve bu çalışmada bu etkilerin detaylı bir şekilde incelenmesi amaçlanmıştır.

Sonuç olarak, farklı soğutma yöntemleri ve gerilim seviyeleri altında, vuruntu momenti kısıtı sabit tutularak yapılan analizler, çoklu fizik yaklaşımlı analitik elektromanyetik modelin performansını ve verimliliğini optimize etmek için önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu tür detaylı kısıt analizleri, makinenin tasarım ve optimize süreçlerinde kritik rol oynar ve bu nedenle bu çalışmada ele alınan konular, elektromekanik modelleme ve optimizasyon alanında önemli katkılar sağlamaktadır.

Tablo 4.4 Genel kısıtlar tablosu

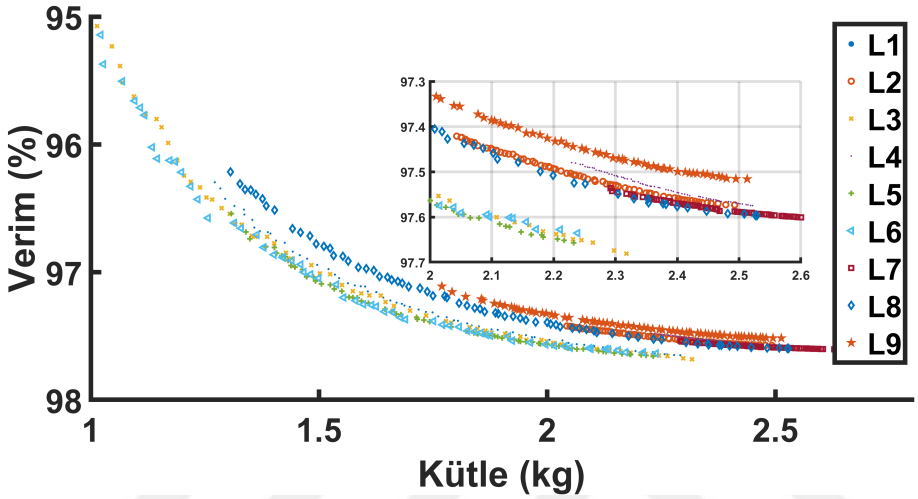
Elemanlar	Kısıt	Operatör	Limit-1	Limit-2	Limit-3	Limit-4	Limit-5	Limit-6	Limit-7	Limit-8	Limit-9	Birim
$g(1)$	J	$\leq$	5×10^{-6}	10×10^{-6}	20×10^{-6}	5×10^{-6}	10×10^{-6}	20×10^{-6}	5×10^{-6}	10×10^{-6}	20×10^{-6}	$\mathrm{A/mm^2}$
$g(2)$	E_{AM}	$\leq$	600	600	600	800	800	800	1200	1200	1200	V
$g(3)$	E_{AG}	$\geq$	380	380	380	380	380	380	760	760	760	V
$g(4)$	σ	$\geq$	15	15	15	15	15	15	15	15	15	kPA
$g(5)$	T_c	$\leq$	$\%1$	$\%1$	$\%1$	$\%1$	$\%1$	$\%1$	$\%1$	$\%1$	$\%1$	Nm

Tablo 4.5 Soğutma koşulu kısıt tablosu

Elemanlar	Kısıt	Operator	Limit-1	Limit-2	Limit-3	Limit-4	Limit-5	Limit-6	Limit-7	Limit-8	Birim
$g(1)$	J	$\leq$	10×10^{-6}	10×10^{-6}	10×10^{-6}	10×10^{-6}	10×10^{-6}	10×10^{-6}	10×10^{-6}	10×10^{-6}	$\mathrm{A/mm^2}$
$g(2)$	E_{AM}	$\leq$	600	800	1200	600	1200	600	600	600	V
$g(3)$	E_{AG}	$\geq$	380	380	760	380	380	760	380	380	V
$\mathrm{g}(\mathbf{5})$	σ	$\geq$	15	15	15	21	21	15	25	30	kPa
$g(6)$	T_c	$\leq$	$\%1$	$\%1$	$\%1$	$\%1$	$\%1$	$\%5$	$\%5$	$\%5$	Nm

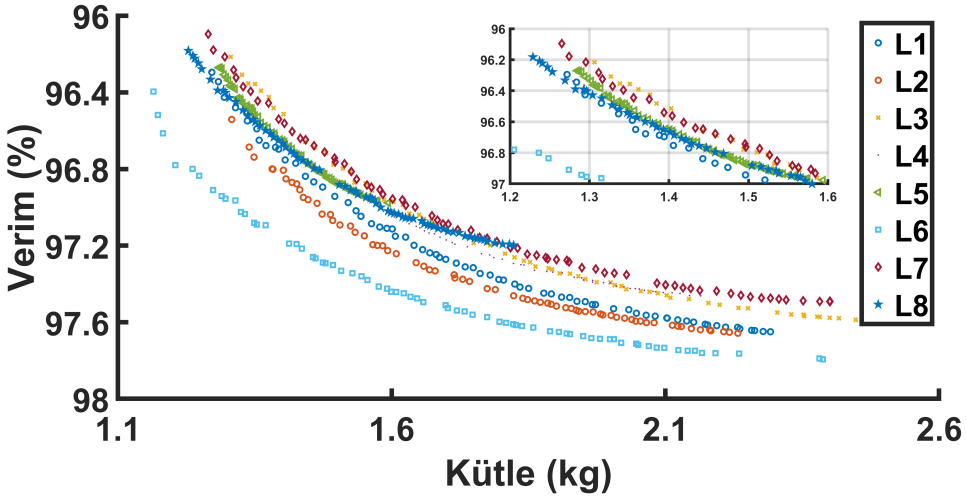
4.3 Optimizasyon sonuçları

Belirtilen senaryolara göre, optimizasyon süreci Pareto ön çözüm kümesinin türetilmesine yol açar. Belirtilen gereksinimleri karşılayan bir tasarım, bu sonuçlar arasından seçilir.



Şekil 4.3 Genel kısıtlar için Pareto-front çözüm seti

Verilen değişkenler, amaç fonksiyonu ve kısıtlamalar için Pareto ön çözüm kümesi, Şekil 4.3'te genel kısıtlar tablosu ve Şekil 4.4'te ise soğutma koşulu tablosu sonuçları olmak üzere gösterilmektedir.



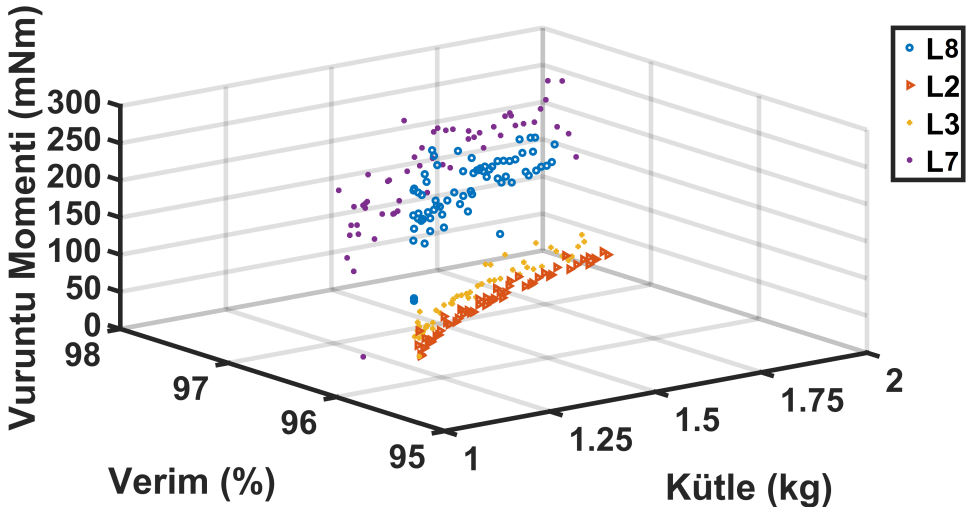
Şekil 4.4 Soğutma koşulu için Pareto-front çözüm seti

Beklendiği üzere, en düşük güç yoğunluğu doğal soğutmalı kombinasyonlarda gözlemlenmiştir. Bu bulgu, doğal soğutma sistemlerinin, sıvı soğutma sistemleri ile kıyaslandığında daha düşük güç yoğunlukları sunduğunu göstermektedir. Bu durum, doğal soğutmanın ısı transfer kapasitesinin sıvı soğutma sistemlerinin gerisinde kaldığını ve bu nedenle güç yoğunluğunun da sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Buna karşılık, en yüksek güç yoğunluğu sıvı soğutmalı senaryo altında elde edilmiştir. Sıvı soğutma, ısıyı daha etkili bir şekilde dağıtma ve transfer etme yeteneğine sahip olduğundan, bu yöntem altında güç yoğunluğunda önemli bir artış sağlanmıştır. Bu bulgu, sıvı soğutma sistemlerinin yüksek performanslı uygulamalarda tercih edilmesinin nedenini açıklamaktadır.

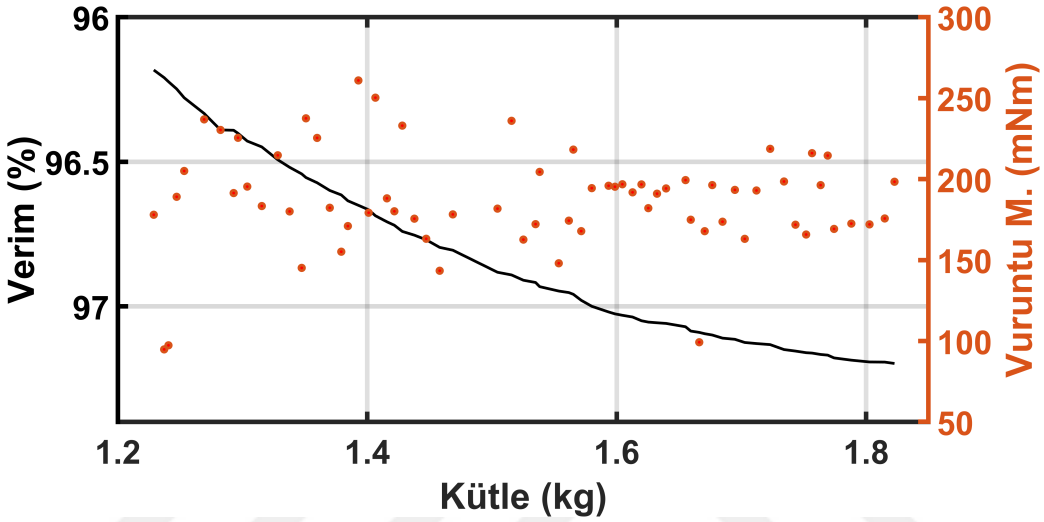
Tablo 4.5, çalışmanın ana amacı olan zorlamalı hava soğutma sistemleri için seçilebilecek kriterleri sunmaktadır. Tablo, zorlamalı hava soğutmanın çeşitli koşullar altında performansını değerlendirmeye yönelik kriterleri açıkça belirlemektedir. Bu kriterler, farklı soğutma yöntemlerinin etkilerini karşılaştırmak ve performanslarını optimize etmek için kullanılmıştır.

Ek olarak, vuruntu momentinin makine performansındaki etkileri de detaylı bir şekilde incelenmiştir. Vuruntu momentinin nominal momentin %1'i veya %5'i ile sınırlandığı durumlarda elde edilen sonuçlar Şekil 4.5'te sunulmuştur. Analizler, vuruntu momentinin 50 mNm kadar azaltılabileceğini göstermektedir. Ancak, bu azalma, verimlilikte %1'e kadar bir düşüşe yol açmıştır. Bu bulgular, vuruntu momentindeki değişikliklerin makinenin genel performansı üzerindeki etkilerini ve bu etkilerin verimlilikle nasıl bir ilişki içinde olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.5 Vuruntu Momentinin sonuçlara etkisi

Önerilen modelin başarısını doğruladıktan sonra, hedef makine optimize edilmiştir. Optimize edilmiş makine çözümü, hedef 600 V DC motor sürücü voltajı için, hava soğutma koşullarını varsayarak elde edilmiştir. Bu durumda elde edilen pareto çözüm sonuçları ve vuruntu momenti değerleri Şekil 4.6'de yer almaktadır. Optimizasyon süreci sonuçları, Bölüm 5'te sunulmuştur. Belirtilen koşullar altında, optimize edilmiş makine olan 1.8 kW/kg güç yoğunluğu ve ayrıca yaklaşık %96 verimlilik göstermiştir. Bu sonuçlar, optimizasyon sürecinin etkinliğini ve önerilen tasarımın belirtilen çalışma koşulları için uygunluğunu vurgulamaktadır.



Şekil 4.6 Limit-8 çözümü için Pareto-Front çözüm kümesi

5
ANALİZLER

Bu bölümde, seçilen tasarımın analitik elektromanyetik hesaplama sonuçları sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile karşılaştırılmaktadır. Analitik ve SEY sonuçları arasındaki uyum, tasarımın doğruluğunu ve güvenilirliğini teyit etmek için önemlidir. Bu karşılaştırma, makinenin elektromanyetik performansını değerlendirmenin yanı sıra, analitik modelin sınırlarını ve geçerliliğini de ortaya koyar. Analitik hesaplamalar, tasarım sürecinde hızlı ve maliyet etkin bir araç sunarken, SEY analizleri daha detaylı ve hassas sonuçlar sağlar. Bu nedenle, her iki yöntemin sonuçlarının karşılaştırılması, tasarımın bütünsel değerlendirmesi açısından kritiktir.

Bunun ardından, MotorCAD kullanılarak hem motor hem de generatör işletme modları sırasındaki termal davranışlar analiz edilmektedir. MotorCAD, elektrikli makinelerin termal yönetimi ve analizinde yaygın olarak kullanılan bir yazılımdır. Termal analizler, makinenin çalışma sırasında oluşabilecek sıcaklık artışlarını ve bu sıcaklıkların makinenin performansı üzerindeki etkilerini belirlemek için yapılır. Doğru termal yönetim, makinenin verimliliğini ve ömrünü artırmak için kritik öneme sahiptir. MotorCAD ile yapılan analizler, makinenin farklı işletme modlarında (motor ve generatör) termal performansını değerlendirir ve olası aşırı ısınma sorunlarını önlemek için gerekli tedbirlerin alınmasına yardımcı olur.

Son olarak, tasarımın mekanik dayanıklılığı Ansys Mechanical'de SEY analizi ile incelenmektedir. Ansys Mechanical, mekanik yapılar ve bileşenlerin dayanıklılığını ve mukavemetini analiz etmek için kullanılan güçlü bir araçtır. Bu analiz, makinenin çalışma sırasında maruz kalacağı mekanik yüklerin ve gerilmelerin değerlendirilmesini sağlar. Mekanik dayanıklılık analizi, makinenin güvenli ve sorunsuz bir şekilde çalışması için önemlidir. Ansys Mechanical ile yapılan analizler, tasarımın mukavemetini doğrulamak ve olası mekanik arızaları önlemek için gereklidir.

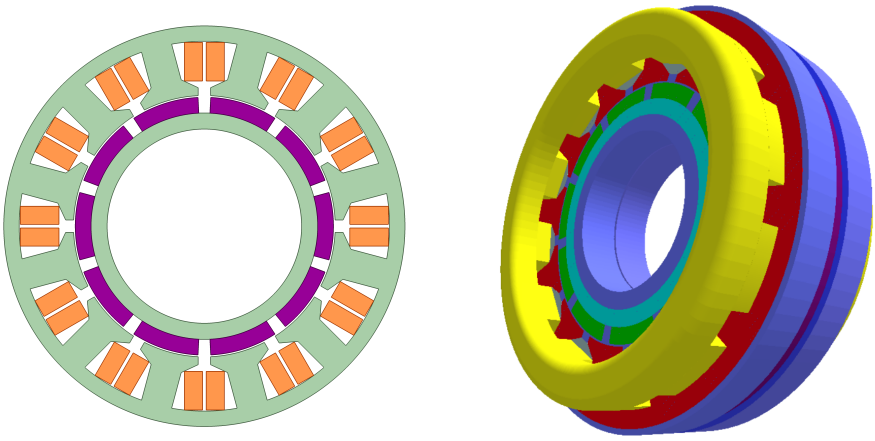
Optimizasyon sonuçları doğrultusunda dengeli bir çözüm elde etmek için Pareto

sonuçlarının merkezi bölgesinden bir çözüm kümesi seçilmiştir. Pareto analizi, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde kullanılan bir yöntemdir ve farklı amaç fonksiyonları arasında denge kurmayı amaçlar. Bu merkezi bölge, her iki amaç fonksiyonunu da eşit derecede karşılayan kabul edilebilir aralığı temsil etmektedir. Merkezi bölgeden seçilen çözümler, amaç fonksiyonu olarak uygulanan kütle ve verimlilik isterlerini birlikte karşılar. Bu merkezi bölge, Limit-8 çözümleri için Pareto sonuçlarının merkezi olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.1 Sonuç olarak elde edilen makine parametreleri

Sembol	Parametre	Birim	Değer
D_{so}	Statör dış çapı	m	0.1122
D_{ri}	Rotor iç yarıçapı	m	0.0366
R_m	Rotor dış yarıçapı	m	0.0361
h_m	Mıknatıs kalınlığı	m	0.0044
α_p	Mıknatıs doluluk oranı	-	0.84
g	Hava aralığı	mm	0.5
N_{tc}	Sarım sayısı	-	80
i_a	Faz akımı	A	4.7479
L_{stk}	Eksenel uzunluk	m	0.0246
b_o	Oluk açıklığı	m	0.0035
h_{s2}	Oluk yüksekliği	m	0.0108
b_{ry}	Rotor boyunduruğu	m	0.0045
b_{sy}	Stator boyunduruğu	m	0.0045
b_{st}	Stator diş kalınlığı	m	0.0087
K_{cu}	Oluk doluluk oranı	-	0.65

Tablo 5.1, bu seçim sonucu oluşturan makine bölümleri hakkında bilgi vermektedir. Tablo, makinenin farklı bileşenlerinin parametrelerini ve özelliklerini detaylı bir şekilde sunar. Bu bilgiler, tasarımın bütünsel bir değerlendirmesini yapmak ve olası iyileştirme alanlarını belirlemek için kullanılır. Oluşan makinanın 2 ve 3 boyutlu görünümleri Şekil 5.1'de yer almaktadır.



Şekil 5.1 Nihai makinanın 2 ve 3 boyutlu görünümleri

5.1 Elektromanyetik Analiz ve Doğrulama

Bu bölümde, 3. bölümde kullanılan denklemlerin analitik çözümleri ile 2B sonlu elemanlar analizi sonuçları arasındaki karşılaştırmalar detaylandırılmaktadır. Bu kıyaslama, analitik modellerin güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini test etmek için önemli bir adımdır.

Analiz sonuçları, önceki bölümde olduğu gibi magnetostatik, magnetodinamik, kayıplar ve verim kategorileri altında sunulmuştur. Magnetostatik analiz, statik manyetik alanların etkilerini incelerken; magnetodinamik analiz, zamanla değişen manyetik alanların dinamik etkilerini ele alır. Kayıplar kategorisi, manyetik malzeme ve iletkenlerde oluşan enerji kayıplarını değerlendirirken, verim kategorisi sistemin genel performansını ortaya koymaktadır.

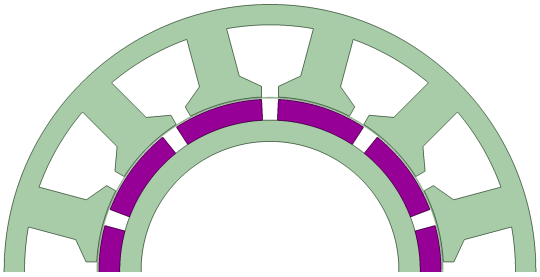
5.1.1 Manyetostatik Analizler

Manyetostatik analizler zamandan bağımsız gerçekleştirilen analizlerdir. Elektromanyetik analitik model doğrultusunda analizler yapılmış ve hata oranları tespit edilmiştir.

- **Boşta çalışma analizleri**

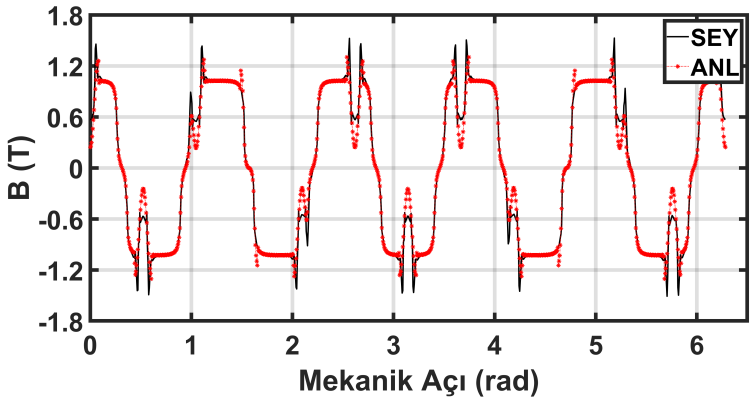
Boşta çalışma manyetostatik analizler, akım etkisinin ihmal edildiği ve yalnızca mıknatısların oluşturduğu manyetik akı yoğunluğunu saptamak için gerçekleştirilir. Şekil 5.2 SEY analizinde kullanılan açık devre modelini göstermektedir.

Analitik hesaplamalar, hava aralığı orta noktası üzerinden akı yoğunluğunu takip etmektedir. Bu nedenle SEY analizlerinde de orta noktada gözlemlenen akı yoğunluğu değerleri kullanılmıştır.

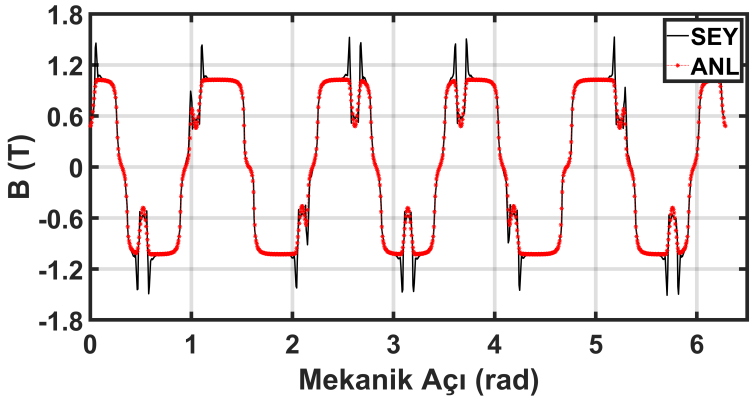


Şekil 5.2 Açık devre analizi için kullanılan SEY modeli

Boşta çalışma koşullarında manyetik akı yoğunluğu sonuçları, oluk açıklıklarından kaynaklanan saçakların ihmal edilmediği durumda Şekil 5.3'te gösterilmektedir. Saçaklanmaların ihmal edildiği durum ise Şekil 5.4'te yer almaktadır. Bu şekilde, her iki durumun da ayrı ayrı görsel olarak karşılaştırılması sağlanmıştır.



Şekil 5.3 Saçaklı durumda hava aralığı akı yoğunluğu analitik ve SEY karşılaştırılması



Şekil 5.4 Saçaksız durumda hava aralığı akı yoğunluğu analitik ve SEY karşılaştırılması

Oluk etkilerinden kaynaklanan tepe değerlerinin ihmal edilmesine rağmen, her iki

sonucun da ilk temel harmoniklerini karşılaştırarak sapmanın %3'ten az olduğu gözlemlenmektedir. Bu nedenle çalışmada saçaklar ihmal edilerek geri kalan hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

SEY sonuçlarına göre saçakların ihmal edildiği ve edilmediği durumlara nazaran oluşan hata oranları Tablo 5.2'de verilmiştir. Analitik sonuçlar, SEY analizinde hava aralığının orta noktasında gözlemlenen değerler ile kıyaslanmaktadır.

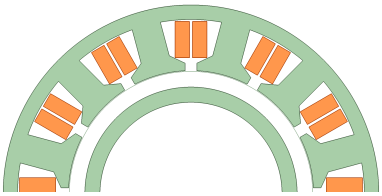
	Birim	SEY	Anl	Maks Sapma (%)	Rms SEY	Rms Anl	Rms Sapma (%)
Saçaklı	T	1.2123	1.1643	3.96	0.8577	0.8237	3.96
Saçaksız	T	1.2123	1.1646	9.73	0.8577	0.8239	3.94

Tablo 5.2 Saçaklı durum ve saçaksız durumun SEY analizine göre hata oranları

- **Yükte Çalışma Analizleri**

Manyetostatik analizlerde yükte çalışma koşulu, mıknatısların ve sargıların oluşturduğu manyetik akı yoğunluğunun ayrı ayrı hesaplanması ile sağlanmaktadır. Bu süreçte her iki bileşenin ayrı ayrı ele alınarak toplam duruma katkıları değerlendirilmektedir.

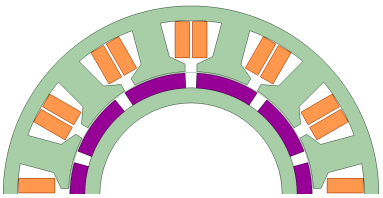
Şekil 5.5 SEY analizinde kullanılan sargıların akı yoğunluğu analizi için kullanılan modeli göstermektedir. Bu model, sargıların oluşturduğu manyetik akı yoğunluğunu hesaplamak için kullanılan temel bir araçtır ve yükte çalışma koşullarında oldukça önemlidir.



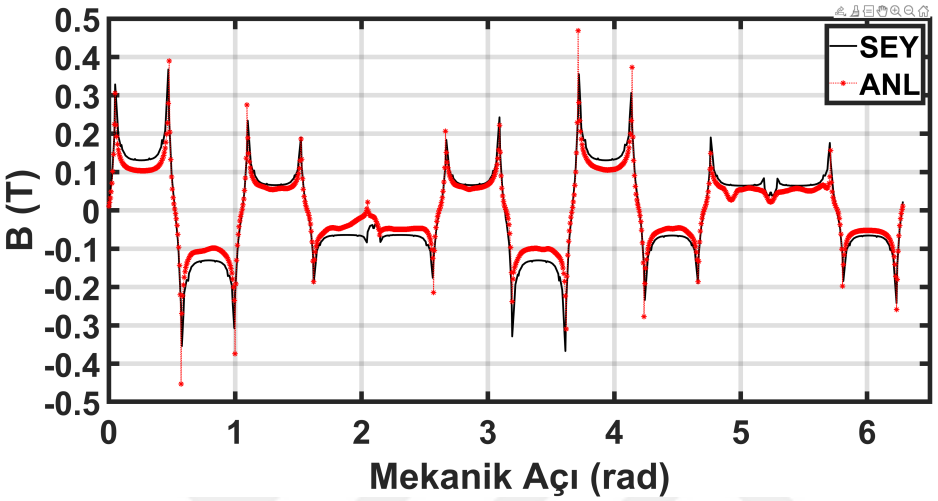
Şekil 5.5 Sargıların oluşturduğu akı yoğunluğu için kullanılan SEY modeli

Yüklü durum analizi ise sargılarla birlikte mıknatısların da hesaba katıldığı durumu ele alır. Bu kapsamda, Şekil 5.6 yüklü durum için kullanılan SEY modelini göstermektedir. Bu model, yük altında çalışan bir sistemde manyetik akının nasıl dağıldığını anlamak açısından kritik öneme sahiptir.

Şekil 5.7, sargıların oluşturduğu manyetik akı yoğunluğunu daha yakından incelemektedir. Bu analiz, sargıların sistem üzerindeki etkisini ve manyetik akı yoğunluğuna katkısını anlamak için yapılmıştır.

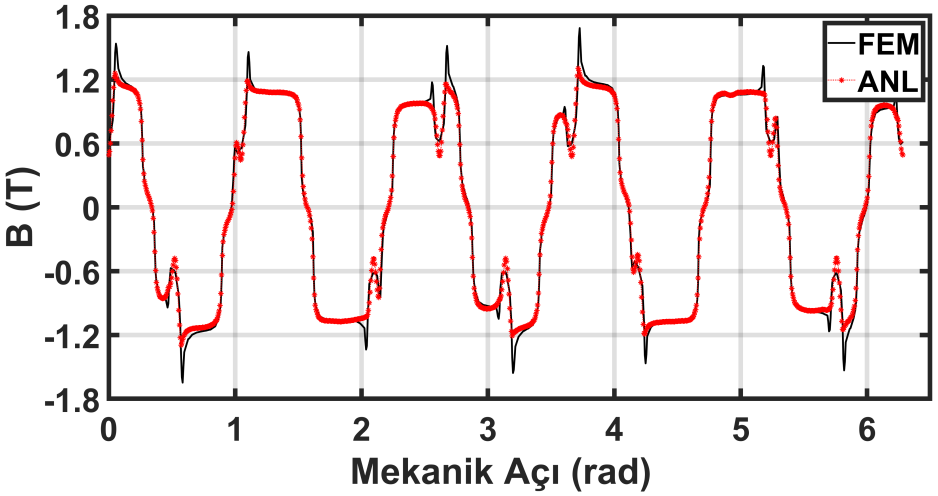


Şekil 5.6 Yüklü durum için kullanılan SEY modeli



Şekil 5.7 Sargıların oluşturduğu akı yoğunluğu

Son olarak, Şekil 5.8 mıknatıs ve sargılar dolayısıyla oluşan toplam manyetik akı yoğunluğunu göstermektedir. Bu, genel sistem performansını ve malzemenin doygunluk noktasını belirlemede kritik bir unsurdur.



Şekil 5.8 Yüklü durumda oluşan akı yoğunluğu

Yükte çalışma analizlerinde, sargıların akı yoğunluğunun tespiti için akımın maksimum olduğu an statik olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Amaç, kesitler

belirlenirken akım etkisinin ihmal edilmemesi ve yük altında çalışma koşullarında elektromanyetik malzemenin doyuma girmeyecek şekilde belirlenebilmesidir.

	Birim	SEY	Anl	Maks Sapma (%)	Rms SEY	Rms Anl	Rms Sapma (%)
B_s	T	0.1027	0.0801	22	0.0726	0.0566	22
B_t	T	1.2598	1.2279	2.53	0.8914	0.8687	2.54

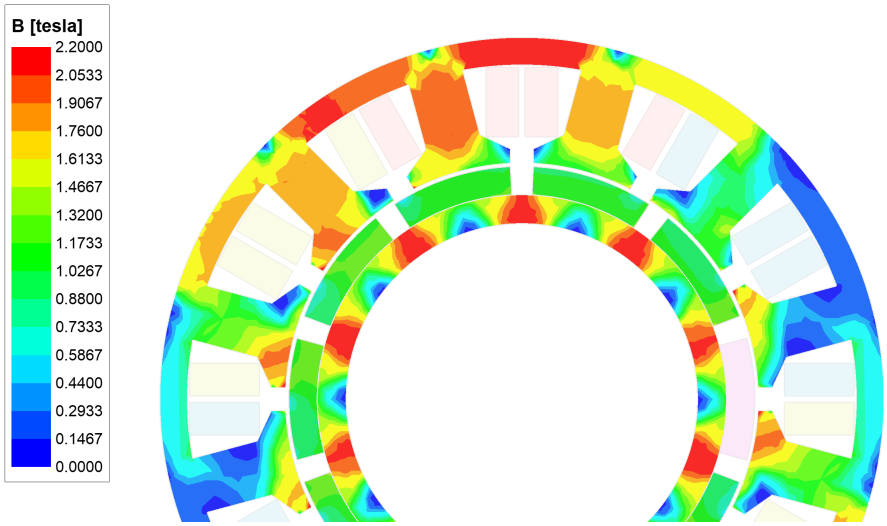
Tablo 5.3 Sargıların oluşturduğu ve yüklü durumda oluşan akı yoğunluğu hata oranları

Tablo 5.5'te her iki durumdaki hata oranları verilmiştir. Sargılardaki %22'lik bir sapma gözlemlenmektedir. Çalışma boyunca orta noktadan gözlemlenen akı yoğunluğu burada da aynı şekilde uygulanmıştır. Gözlemlenen hata oranı, hava aralığı orta noktasındaki sapmadır; ancak nihai hesaplamalarda olumsuz bir etki gözlemlenmemiştir.

- **İkincil Kesitlerin Analizi**

Yük altında çalışmada generatör koşulları dikkate alınarak yapılan analiz, elektromanyetik tasarımın güvenilirliğini ve verimliliğini artırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, (3.16)-(3.18) denklemleri kullanılarak elde edilen ikincil kesit boyutları, belirlenen akı yoğunluğu kriterlerine göre optimize edilmiştir. Bu boyutlandırma işlemi, generatörün yük altında çalıştığı koşullar altında performansını en üst düzeye çıkarmak ve elektromanyetik malzemenin olası manyetik doyuma ulaşmasını engellemek için kritik bir adımdır.

Analizler, özellikle elektromanyetik malzemenin yük altında doyuma ulaşıp ulaşmadığını doğrulamak amacıyla yapılmıştır. Şekil 5.9, generatör modundaki akı yoğunluğu dağılımını ayrıntılı bir şekilde göstermektedir. Bu grafik, rotor boyunduruğu, stator boyunduruğu ve stator dişlerindeki maksimum manyetik akı yoğunluğu değerlerini ortaya koyarak, bu bölgelerde oluşabilecek potansiyel doyum risklerini değerlendirmek için temel teşkil etmektedir. Analiz sonuçlarına göre, bu bölgelerdeki maksimum manyetik akı yoğunluğu değerlerinin yaklaşık olarak 2 (T) civarında olduğu gözlemlenmiştir. M19 tipi klasik elektromanyetik malzemenin doyum noktasının 1.7 T civarında olmakla birlikte kobalt-demir alaşalımlara göre oldukça düşük olduğu bir gerçektir. Bu durum, yük altında çalışırken generatörün istenen performansı göstermesi ve manyetik doyumun önüne geçilmesi için daha yüksek doyum noktalarına sahip malzemelere ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle kobalt-demir alaşımları gibi yüksek doyum noktasına



Şekil 5.9 Akı yoğunluğu dağılımı

sahip malzemelerin kullanımı bu bağlamda önem kazanmaktadır. Kobalt-demir alaşımları, yüksek akı yoğunluklarına dayanabilen yapıları sayesinde, generatörün verimliliğini artırmakta ve performans kayıplarını minimize etmektedir.

Sonuç olarak, yük altında çalışmada generatör modundaki akı yoğunluğu analizleri, kullanılan malzeme seçiminde kritik bir rol oynamaktadır. Bu analizler, elektromanyetik tasarımın optimize edilmesi ve malzeme seçiminde doğru kararlar alınması için temel bir rehber olarak değerlendirilmektedir. Elektromanyetik malzemenin doyum riskine karşı gösterdiği performans, generatörün uzun ömürlü ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak adına büyük önem taşımaktadır.

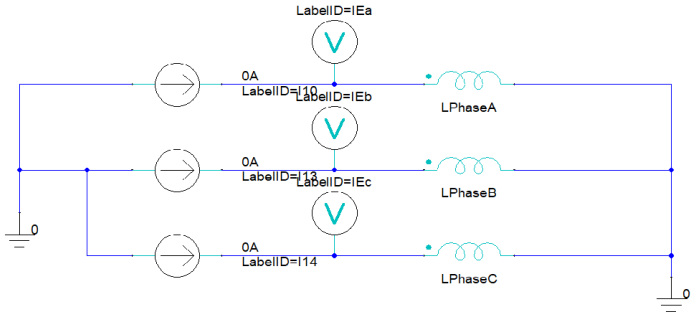
5.1.2 Manyetodinamik Analizler

Bu bölümde, makinenin boşta çalışma karakteristikleri, akı bağı, indüklenen gerilim ve vuruntu momenti, bu büyüklüklerin analiz sonuçlarına odaklanılarak ele alınmaktadır. Boşta çalışma analizleri, makinenin temel elektromanyetik özelliklerini anlamak ve bu özelliklerin makine performansına olan etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Akı bağı ve indüklenen gerilim analizleri, makinenin manyetik devresinin etkinliğini ve elektriksel çıkışını değerlendirmede kritik rol oynamaktadır. Bu analizler, makinenin boşta çalıştığı koşullarda sağladığı verimliliği ve performansı belirlemek için temel veriler sunmaktadır

5.1.2.1 Boşta Çalışma Analizleri

Bu bölümde makinanın boşta çalışmasına bağlı transient analizler sonuçları yer almaktadır. Şekil 5.10'da boşta çalışma analizleri için kullanılan devre modeli

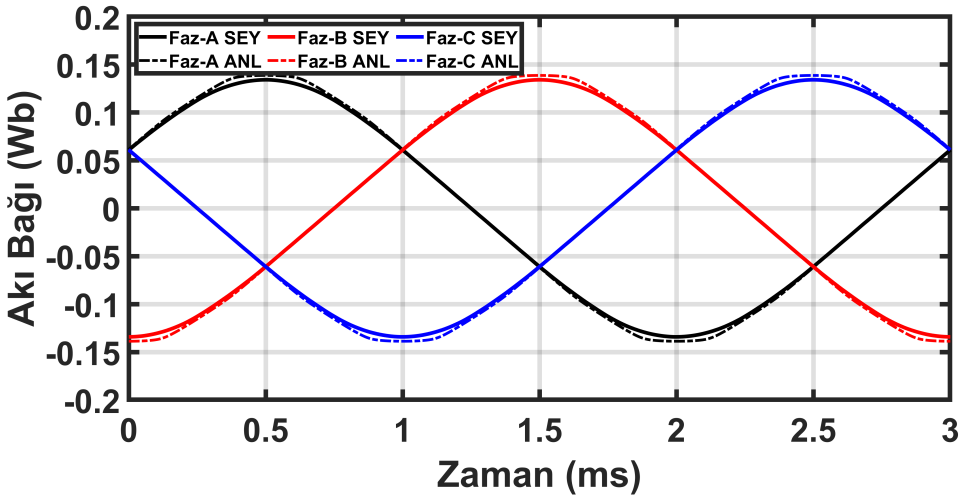
gösterilmiştir. Makinaya verilen dönüş hızında gerilim devrede görünen sargılarda indüklenmektedir.



Şekil 5.10 Boşta çalışma devresi

- **Akı Bağı Analizi**

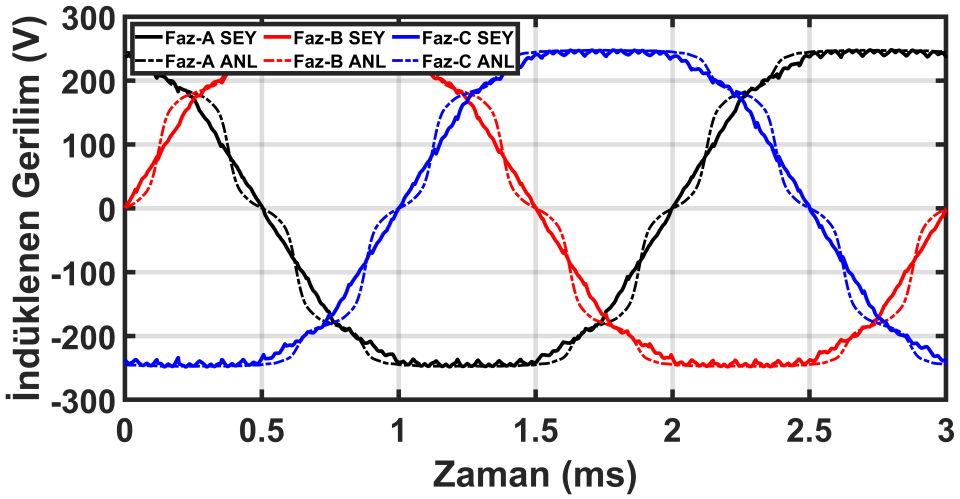
Boşta çalışma durumundaki generatör koşulları için fazların akı bağı ve indüklenen gerilim sonuçlarının analitik çözümü ile SEY karşılaştırması Şekil 5.11 ve 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.11 Boşta çalışma akı bağı grafiği

Tablo 5.4, boşta çalışma koşullarında mıknatısların ürettiği akı bağı ve indüklenen gerilimlerin analitik ve sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile elde edilen sonuçlar arasındaki hata oranlarını göstermektedir.

Analiz sonuçlarına göre elde edilen veriler, akı bağı ve indüklenen gerilim değerlerinde analitik model ile SEY arasında %3.43'e kadar varan küçük



Şekil 5.12 Boşta çalışma indüklenen gerilimler grafiği

	Birim	SEY	Anl	Maks Sapma (%)	SEY	Rms Anl	Sapma (%)
Akı Bağı	Wb	0.1341	0.1387	3.43	0.0920	0.0951	3.36
İndüklenen Gerilim	V	247.7147	247.4083	0.12	193.5837	201.0467	3.85

Tablo 5.4 Boşta çalışma akı bağı ve indüklenen gerilimlerin hata oranları

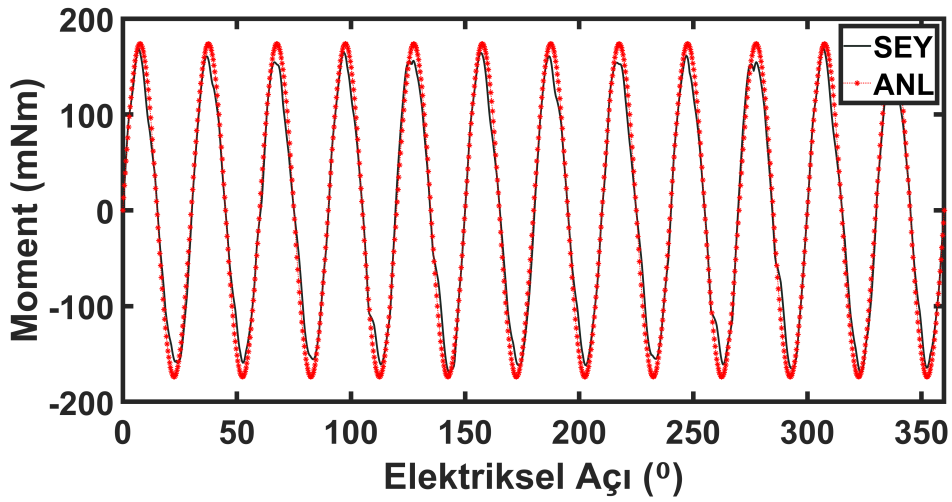
sapmalar olduğunu göstermektedir. Bu sapmalar, analitik modelin SEY ile büyük ölçüde uyumlu olduğunu ve bu iki modelin sonuçlarının tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle indüklenen gerilimdeki sapma oranının yalnızca %0.12 gibi oldukça düşük bir seviyede kalması, analitik modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini pekiştiren önemli bir bulgudur. Bu küçük sapmalara rağmen, analitik modelin basitliği ve hesaplama sürecinin hızlı olması gibi avantajlarına rağmen elde edilmesi, modelin mühendislik tasarımlarında pratik bir yaklaşım olarak kullanılabilirliğini de desteklemektedir. Boşta çalışma koşullarında elde edilen sonuçların SEY ile büyük bir uyum göstermesi, analitik modelin doğru bir şekilde kalibre edildiğini ve gerçek dünya uygulamaları için yeterli hassasiyette olduğunu ortaya koymaktadır.

- **Vuruntu Momenti Analizi**

Tasarlanan makine, havacılık uygulamaları için optimize edildiğinden, vuruntu momenti bu tür uygulamalarda kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Vuruntu momenti, rotor pozisyonuna bağlı olarak değişen elektromanyetik kuvvetlerin sebep olduğu bir tork dalgalanmasıdır ve özellikle hassas hareket kontrolü gerektiren uygulamalarda önemli bir sınırlayıcı faktör olabilir. Bu nedenle,

vuruntu momentinin minimize edilmesi, makinenin performansını ve güvenilirliğini doğrudan etkileyen bir unsurdur.

Şekil 5.13'te, vuruntu momentinin hem analitik model hem de SEY ile elde edilen sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Optimizasyon sürecinde, vuruntu momentinin makinenin nominal torkunun %5'ini aşmaması gerektiği bir kısıtlama olarak belirlenmiştir. Bu kısıtlama, makinenin performansını olumsuz yönde etkileyebilecek tork dalgalanmalarının sınırlandırılmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir. Elde edilen sonuçlar, vuruntu momentinin belirlenen bu sınıra uygun olduğunu ve tasarımın bu açıdan başarılı bir şekilde optimize edildiğini göstermektedir.



Şekil 5.13 Vuruntu momenti grafiği

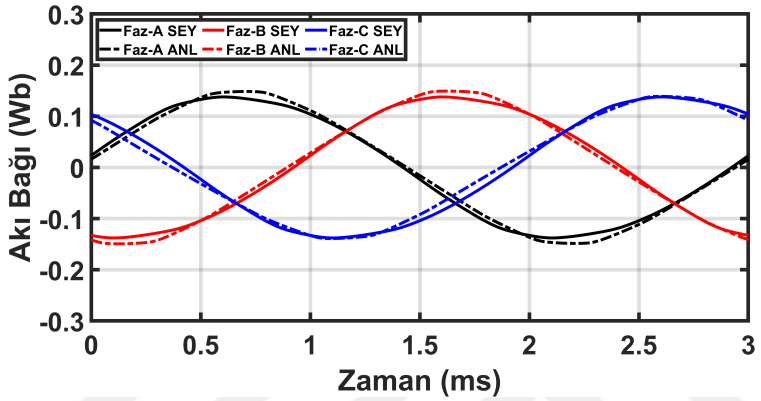
Vuruntu momenti analizinde SEY ve analitik model ile elde edilen sonuçlar arasındaki sapma oranlarını detaylı bir şekilde sunmaktadır. SEY ile hesaplanan vuruntu momenti değeri 169.7677 mNm olarak bulunmuşken, analitik modelle elde edilen değer ise 173.7177 mNm olarak hesaplanmıştır. Bu iki sonuç arasındaki sapma oranı %2.322 olarak tespit edilmiştir. Bu düşük sapma oranı, analitik modelin vuruntu momenti tahmininde SEY ile büyük ölçüde uyumlu olduğunu ve bu konuda güvenilir sonuçlar sunduğunu kanıtlamaktadır.

Analitik modelin vuruntu momenti tahminindeki doğruluğu, özellikle hızlı ve etkili hesaplama gereksinimlerinin olduğu tasarım süreçlerinde büyük bir avantaj sağlamaktadır. SEY, yüksek doğruluk sunan ancak hesaplama süresi bakımından daha uzun süren bir yöntem olarak bilinirken, analitik modelin daha hızlı sonuçlar verip SEY ile uyumlu değerler üretmesi, bu modelin mühendislik tasarımlarında pratik bir araç olarak kullanılabilirliğini artırmaktadır. Bu uyum, tasarım sürecinde hem zamandan hem de hesaplama kaynaklarından tasarruf sağlarken, aynı zamanda

tasarımın doğruluğundan ödün vermemeyi mümkün kılmaktadır.

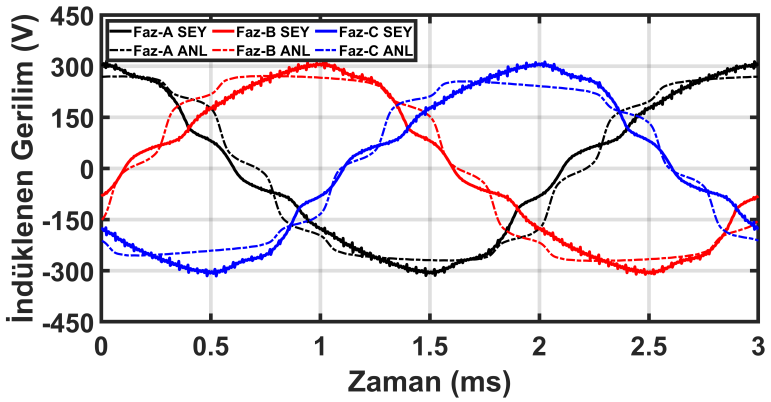
5.1.2.2 Yükte Çalışma Analizleri

Yük altında çalışma durumunda manyetostatik hesaplamalarda olduğu gibi mıknatısların ve akımın ürettiği akı bağı ve indüklenen gerilim değerleri SEY sonuçları ile kıyaslanmıştır. Analitik model bu iki akı kaynağını süperpoze ederek oluşturmaktadır bu yönüyle sonlu elemanalar çözümleme yöntemlerinden ayrışmaktadır.



Şekil 5.14 Yüklü durumda akı bağı grafiği

Şekil 5.14 yüklü durumda akı bağı grafiğini Şekil 5.15 ise indüklenen gerilimleri göstermektedir.



Şekil 5.15 Yüklü durumda indüklenen gerilim grafiği

Tablo 5.5'teki sonuçlar, analitik modelin akı bağı ve indüklenen gerilim tahminlerinde SEY ile bazı sapmalar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle indüklenen gerilimdeki maksimum değer sapması %18.2 ile oldukça yüksekken,

	Birim	SEY	Anl	Maks Sapma (%)	SEY	Rms Anl	Sapma (%)
Akı Bağı	Wb	0.1378	0.1492	8.27	0.0982	0.1025	4.37
İndüklenen Gerilim	V	312.2451	255.3211	18.2	206.5039	200.6192	2.84

Tablo 5.5 Yüklü durumda akı bağı ve gerilim değerlerinin hata oranları

RMS değerlerindeki sapma oranları %5'in altında olacak şekilde genellikle daha küçüktür. Bu farklar, analitik modelin bazı durumlarda SEY kadar hassas sonuçlar veremediğini, ancak RMS değerlerinde daha uyumlu sonuçlar elde edilebildiğini göstermektedir. Ancak fazör çözümleri RMS değerleri ile yapıldığı için nihai sonuçları olumsuz etkilememektedir.

- **Eş değer devre sonuçları**

Generatör mod tek faz eşdeğer devre sonuçları Tablo 5.6'da yer almaktadır. 3. Bölümde analitik olarak hesaplanan değerler ve tek faz eşdeğer devre için sapma oranları Tablo 5.6'da verilmiştir. Sonuçlar, en önemli sapmanın yük açısında ortaya çıktığını göstermektedir. Ancak, bu farklılığa rağmen, sonuçlar 2B SEY ile karşılaştırıldığında memnuniyet verici şekilde kabul edilebilirdir.

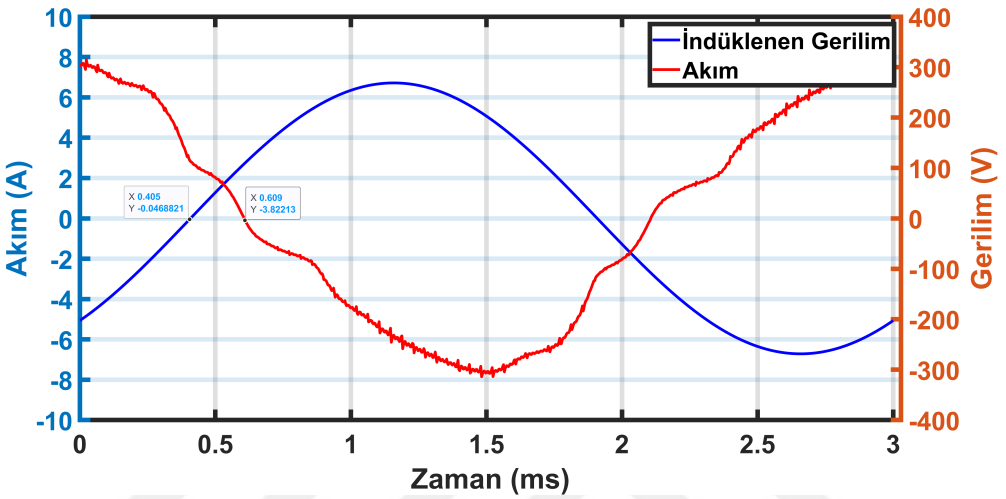
Sembol	Parametre	Birim	Analitik	SEY	Sapma (%)
R_a	Faz Direnci	Ω	1.045	1.05	0.4
L_d	D-ekseni indüktansı	mH	7.3	6.99	4.43
V_{out}	Çıkış Gerilimi	V	210.91	204	3.38
δ	Yük Açısı	-	16	19	15.78
pf	Güç faktörü	-	0.81	0.77	4.93

Tablo 5.6 Eşdeğer devre sonuçları

Tablo 5.6, analitik model ile iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (2B SEY) sonuçları arasındaki karşılaştırmayı ve sapma oranlarını sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, analitik modelin genel olarak yüksek doğrulukta sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Faz direnci ve çıkış gerilimi gibi parametrelerde analitik model ile 2B SEY arasındaki sapmalar oldukça düşük olup, sırasıyla %0.4 ve %3.38 oranlarında gerçekleşmiştir, bu da analitik modelin bu parametrelerde güvenilir sonuçlar ürettiğini göstermektedir. D-ekseni indüktansı ve güç faktörü değerlerinde ise sırasıyla %4.43 ve %4.93'lük sapmalar gözlemlenmiştir; bu sapmalar, kabul edilebilir sınırlar içinde olup, analitik modelin tahmin yeteneğini doğrulamaktadır.

Bununla birlikte, yük açısı için %15.78 gibi daha yüksek bir sapma oranı tespit edilmiştir, bu da yük açısının analitik model ile 2B SEY arasında daha büyük bir uyumsuzluk sergilediğini işaret etmektedir. Bu farklılık, özellikle yük açısının hesaplanmasında analitik modelin bazı sınırlamalara sahip olabileceğini göstermektedir. Genel olarak tablo, analitik modelin birçok parametrede SEY ile büyük ölçüde uyumlu olduğunu, ancak belirli parametrelerde dikkatli bir değerlendirme gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.16 İndüklenen gerilim ve akım grafiği

Kullanılan sonlu elamanlar paket programı gereği tüm senkron makinelerde, kullanıcıların güç açısını veya tork açısını ayarlamaları gerekmektedir. Bu nedenle akım uyartımı veya makinanın başlangıç konumunun gerekli güç açısında yönlendirilmesi beklenmektedir [70]. Yönlendirilmiş yük açısı ile indüklenen gerilim grafği Şekil 5.16 yer almakta olup bu grafik ile güç faktörü minimum veya maksimum noktalarının zamansal farkı ile tayin edilebilmektedir. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre analitik modelin güç faktörünü belirlemede beklenen etkinliği gösteremediği ortaya çıkmıştır.

5.1.3 Kayıplar ve Verim Analizleri

Tablo 5.7, kayıplar, çıkış gücü ve verimlilik değerlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Bakır kayıplarındaki sapması göreceli olarak yüksek olmasına rağmen, sonuçlar genel çıkış gücü ve verimlilik açısından kabul edilebilir düzeydedir.

Tablo 5.7 Kayıplar ve verim sonuçları

Sembol	Parametre	Analitik	2B SEY	Sapma (%)
P_{cu}	Bakır Kaybı	62.3280	58.410	18.6
P_{ir}	Demir Kaybı	20.8	16	30
P_{loss}	Toplam Kayıp	83	70	18
P_{in}	Giriş Gücü	2.563	2525	1.5
P_{out}	Çıkış Gücü	2.472	2455	0.292
η	Verim $(\%)$	96.7	96.20	0.51

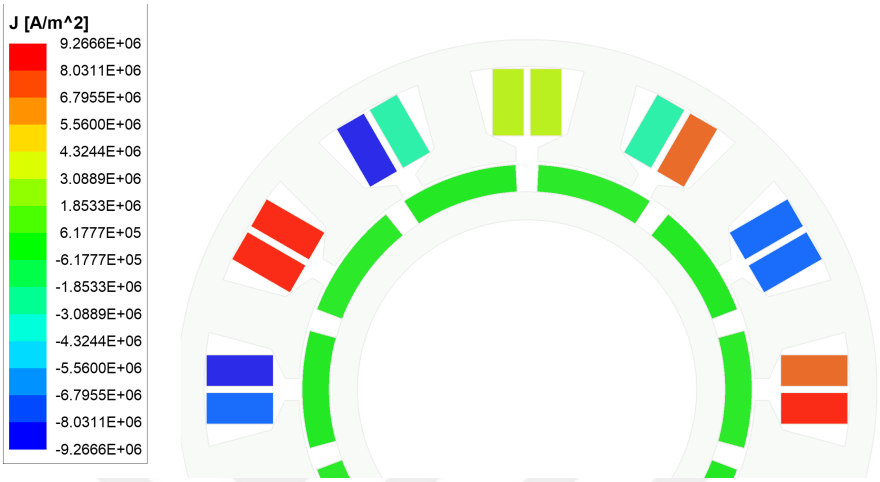
Tablo 5.8 Elektromanyetik değerlerin hata oranları

		Maks			Rms		
	Birim	SEY	Anl	Sapma (%)	SEY	Anl	Sapma (%)
Akı Bağı (Boşta)	Wb	0.1341	0.1387	3.43	0.0920	0.0951	3.36
Akı Bağı (Yükte)	Wb	0.1378	0.1492	8.27	0.0982	0.1025	4.37
İndüklenen Gerilim (Boşta, genaratör) (4000rpm)	V	247.7147	247.4083	0.12	193.5837	201.0467	3.85
İndüklenen Gerilim (Yükte, genaratör)	V	312.2451	255.3211	18.2	206.5039	200.6192	2.84
Vuruntu Momenti	mNm	169.7677	173.7177	2.322	-	-	-
Akı Yoğunluğu (Boşta)	T	1.2123	1.1646	9.73	0.8577	0.8239	3.94
Akı Yoğunluğu (Yükte)	T	1.2598	1.2279	2.53	0.8914	0.8687	2.54

Tablo 5.8'de, elektromanyetik değerlerin analitik ve SEY sonuçları arasındaki hata oranları, hem maksimum hem de RMS değerleri açısından sunulmuştur. Boşta çalışma koşullarında, akı bağı değerleri analitik ve SEY sonuçları arasında %3.43 oranında bir maksimum sapma ve %3.36 oranında bir RMS sapma ile uyumlu bulunmuştur. Bu, modelin boşta koşullarda yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir. Yük altında, akı bağı değerlerinde sapma % 8.27'ye kadar çıkmış ve RMS sapma % 4.37 olarak ölçülmüştür; bu durum yük altında doğrulukta bir düşüş olduğunu işaret etmektedir. İndüklenen gerilimler açısından, boşta koşullarda maksimum sapma sadece % 0.12 ile düşük, ancak RMS sapma % 3.85'tir, bu da belirli bir uyum sağlansa da bazı uyumsuzlukların bulunduğunu göstermektedir. Yük altında ise, indüklenen gerilimlerde maksimum sapma % 18.2'ye yükselmiş, RMS sapma ise % 2.84 olarak kaydedilmiştir; bu, yük altında belirgin bir uyumsuzluk olduğunu ortaya koymaktadır. Vuruntu momenti değerlerinde maksimum sapma % 2.322 olarak ölçülmüş ve genel olarak yüksek uyum sağlandığı görülmektedir. Akı yoğunluğu değerlerinde, boşta koşullarda maksimum sapma % 9.73 ve RMS sapma % 3.94 ile daha yüksek hata oranları gözlemlenmiştir. Yük altında ise, akı yoğunluğu değerlerinin maksimum sapması % 2.53 ve RMS sapması %2.54 ile düşük hata oranları göstermektedir. Genel olarak, bu sonuçlar modelin çeşitli koşullarda doğruluk ve hata oranları açısından değişkenlik gösterdiğini ve yük altında doğruluğun daha yüksek sapmalara yol açtığını ortaya koymaktadır.

5.2 Termal Analiz ve Doğrulama

Akım yoğunluğu, makinenin termal kısıtını belirler. Elektromanyetik SEY analizinde, akım yoğunluğunun yüklü işletme sırasında belirtilen kısıta uyulduğu görülmektedir. Şekil 5.17'de, generatör modunda çalışma sırasında akım yoğunluğu dağılımını göstermektedir.



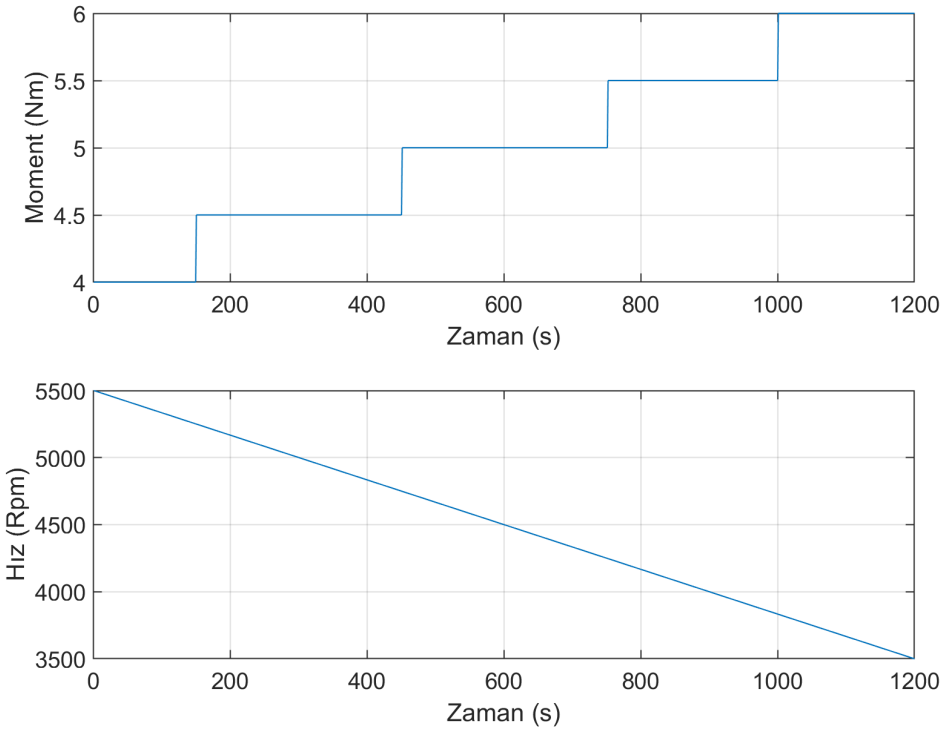
Şekil 5.17 Sargılardaki akım yoğunluğu dağılımı

Generatör işletme modunda, türbinin arkasındaki bağıl hızın projeksiyonunun 15 m/s olduğu varsayılmaktadır. Bunun aksine, bağıl bir hız avantajı olmayan motor işletme modunda, soğutma hızı 5 m/s olarak kabul edilmektedir. Sonrasında, termal analiz hem generatör hem de motor işletme modları için iteratif olarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen işletme senaryosuna göre, makinenin en yüksek yüklenmesi iniş aşamasında gerçekleşir, bu da generatörden motora moduna geçişi açıklar. Bu senaryoya göre, generatör işletimindeki kayıplardan kaynaklanan sıcaklıklar, motor işletimi için başlangıç koşulu olarak kabul edilmiş ve motor işletimi için termal analiz yapılmıştır. Termal analizler makinanın üç çalışma şekli için iteratif olarak yapılmıştır.

5.2.1 Motor Kalkış Operasyonu

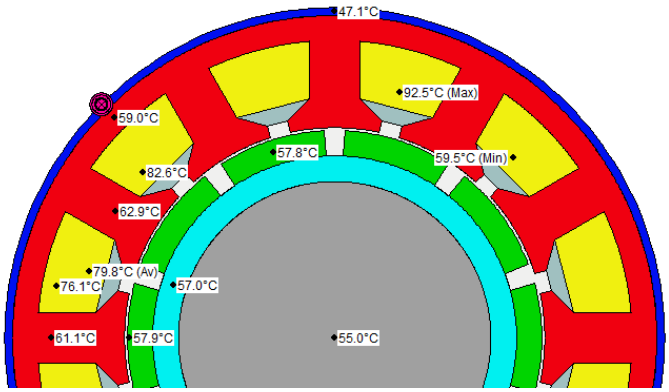
Motorun sistemi enerji üretiminin hedeflendiği noktaya çıkarması için gerekli moment miktarı taşıdığı kablo ağırlığından dolayı zamanla artmaktadır. Bu nedenle 20 dk'lık bir çalışma periyodunda moment değeri nominal değere aşama aşama çıkmaktadır. Buna bağlı olarak da hız momenti artırmak için azalmaktadır. Şekil 5.18 kalkış operasyonundaki hız ve moment değerlerini göstermektedir.

Kalkış operasyonu sonrasında motorda oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 5.19'da gösterilmiştir. İlk operasyon sonrası sargılarda sıcaklıklar minimum 76, maksimum



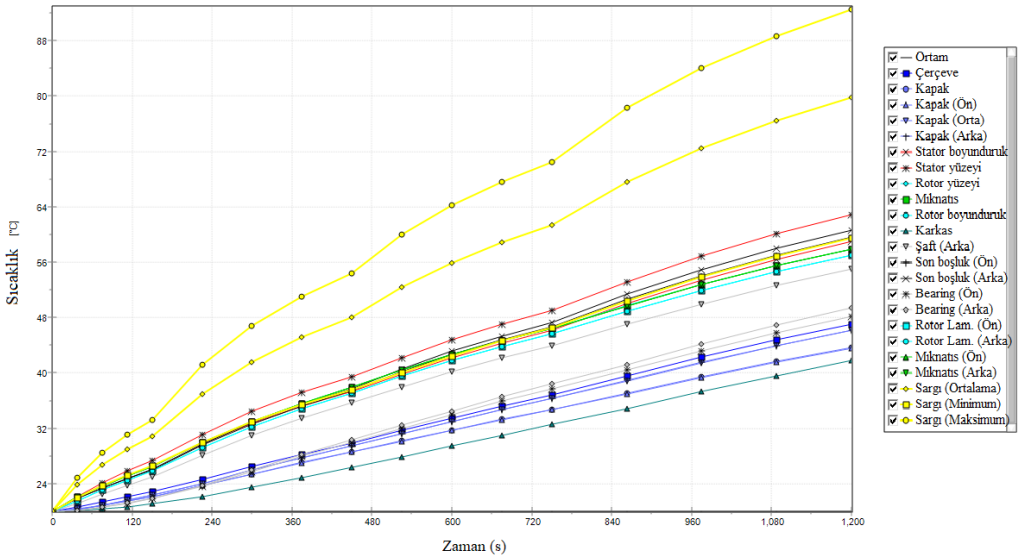
Şekil 5.18 Motor kalkış operasyonu moment-hız çalışma grafiği

92.5 ve ortalama değer olarak 79 dereceyi görmektedir. Mıknatısların sıcaklıkları ise 57 derece civarında gözlemlenmektedir.



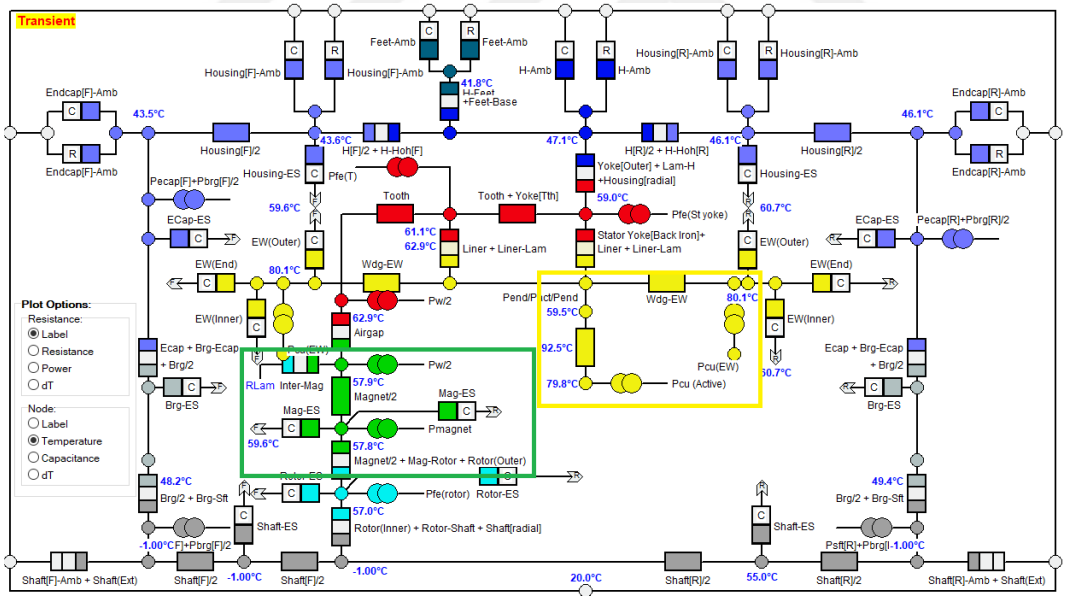
Şekil 5.19 Kalkış operasyonu sıcaklık dağılımı

Çevre sıcaklığının 20 °C olarak alındığı bir senaryoda, kalkış operasyonu sonrası sıcaklık artışı detaylı olarak Şekil 5.20'de sunulmuştur. Operasyon sırasında gözlemlenen sıcaklık artışının sınırlı ve kabul edilebilir seviyelerde olduğunu, dolayısıyla motorun performansının ve güvenilirliğinin korunmuş olduğunu ortaya koymaktadır.



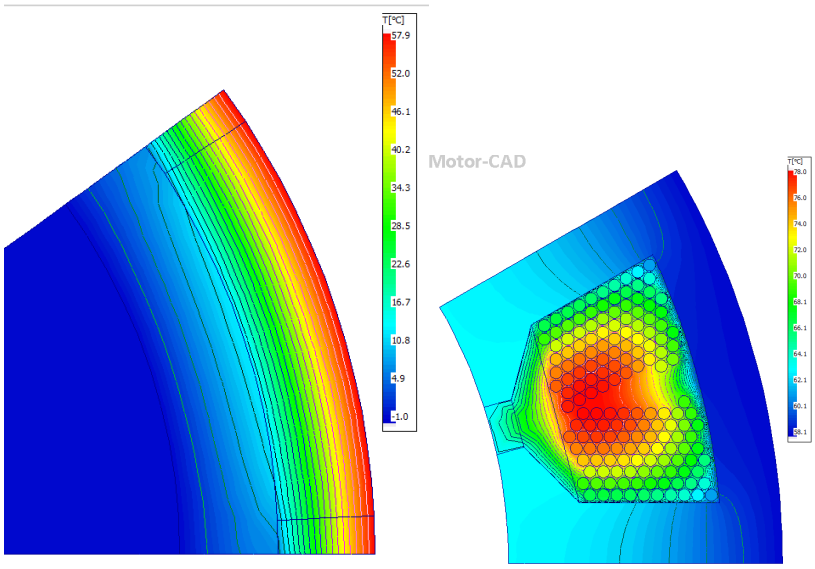
Şekil 5.20 Kalkış operasyonu sıcaklık artış grafiği

Analitik termal çözümleme sonucu düğümlerde oluşan sıcaklık değerleri Şekil 5.21'de gösterilmektedir.



Şekil 5.21 Kalkış sonrası düğümlerdeki sıcaklıklar

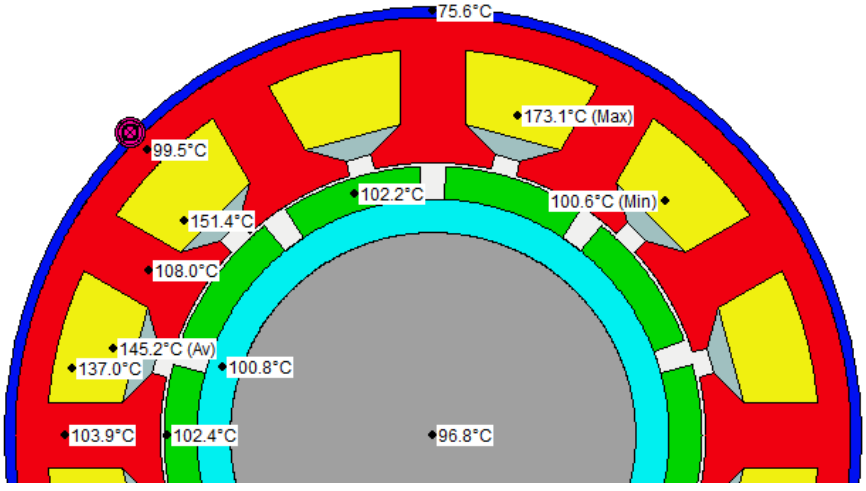
Ayrıca mıknatıs ve sargılardaki sıcaklıklar termal SEY analizine tabii tutulmuştur. Termal SEY analizi sonuçları Şekil 5.22 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.22 Motor kalkış operasyonu sonrası mıknatıs ve sargılardaki sıcaklıkların termal SEY analizi sonucları

5.2.2 Generatör Çalışma

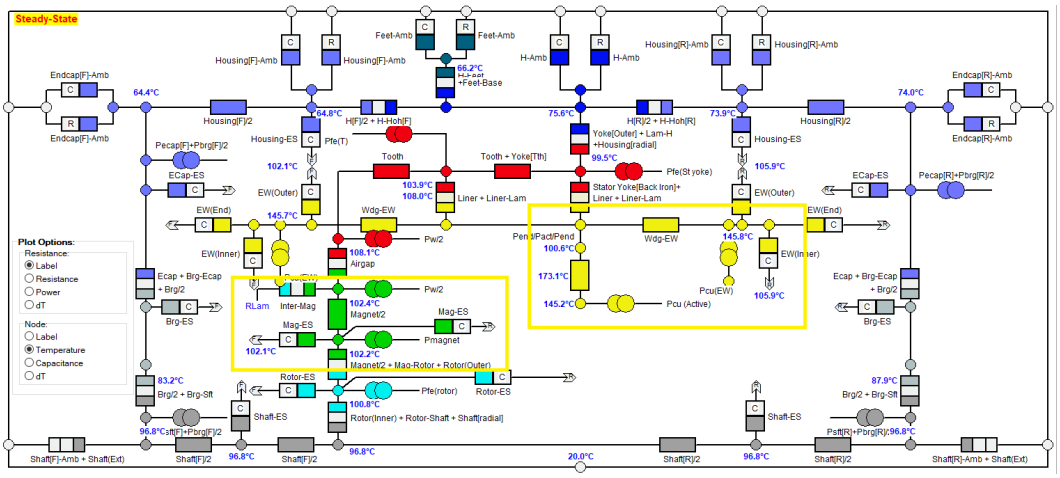
Generatör çalışma, motor kalkış operasyonundan sonra yüklenen sıcaklıkların üzerine makinanının sürekli durumda çalışmasını ifade etmektedir. Generatör çalışma bağıl hava hızının yarattığı etkiden ötürü motor çalışmaya göreye soğutma açısından avantajlı konumdadır. Sürekli durumda çalışma sonucunda oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 5.23'te gösterilmiştir. Bağıl hava hızının soğutma avantajına rağmen mıknatıs ve sargı sıcaklıklarında önemli artışlar olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 5.23 Generatör çalışma sıcaklıkların genel görünümü

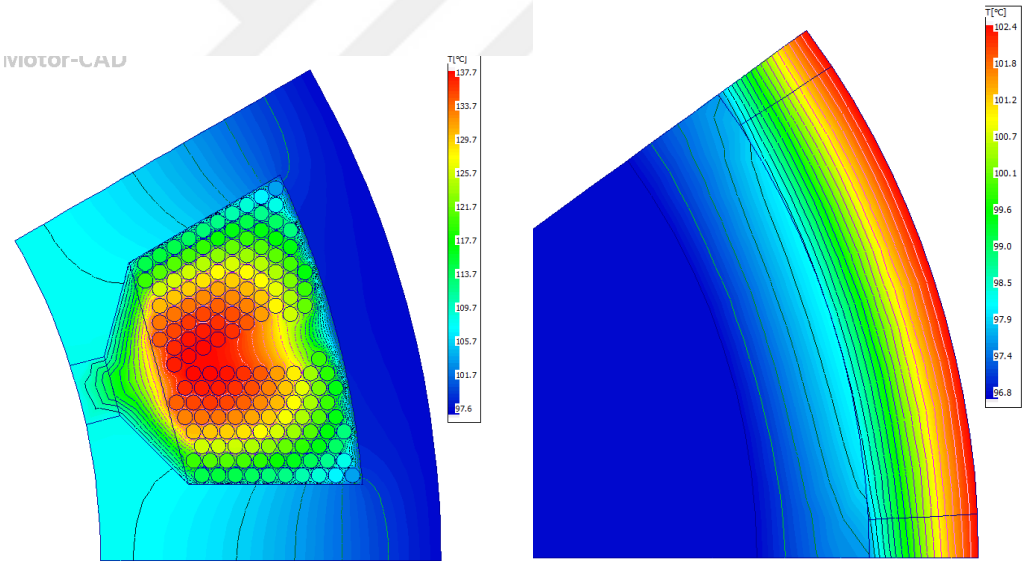
Analitik termal çözümleme sonucu generatör modda düğümlerde oluşan sıcaklık

değerleri Şekil 5.24'te gösterilmektedir.



Şekil 5.24 Generatör çalışma düğümlerde oluşan sıcaklıklar

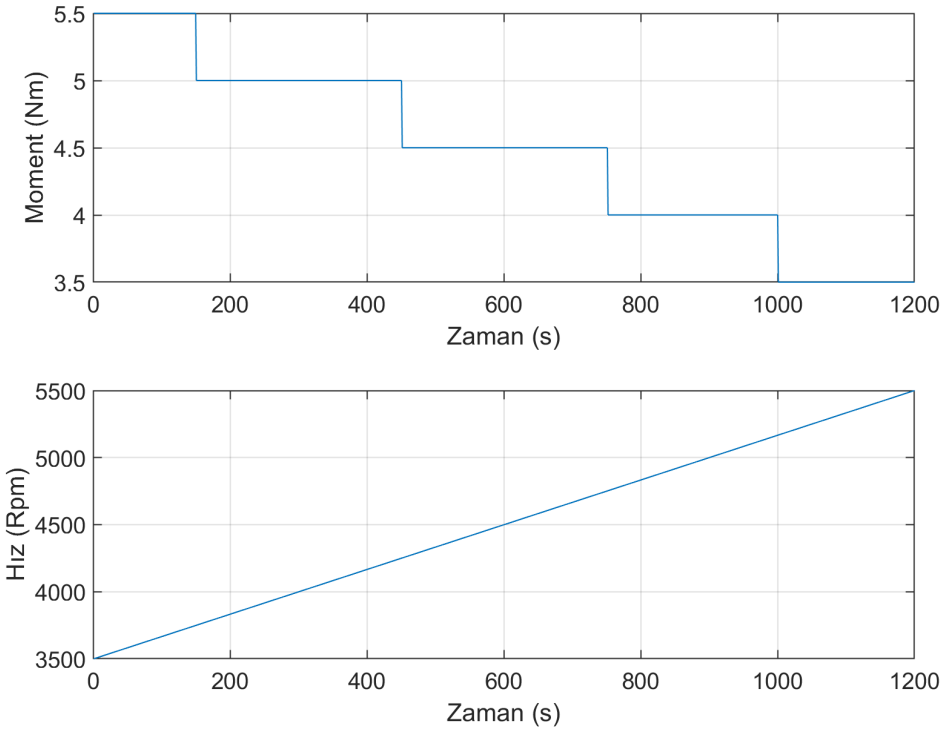
Ayrıca mıknatıs ve sargılardaki sıcaklıklar termal SEY analizine tabii tutulmuştur. Termal sey analizi sonuçları Şekil 5.25 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.25 Generatör çalışma rotor ve stator sıcaklıkları dağılımı

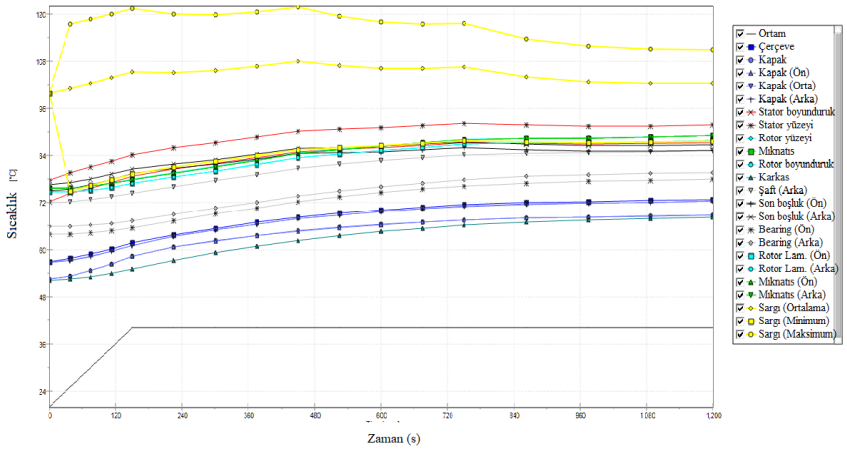
5.2.3 Motor iniş operasyonu

Motor iniş operasyonu, kalkışın aksine düşük hızdan yüksek hıza doğru artmaktadır bununla birlikle aşağı indikçe sistemin yükü azalmakta dolayısıyla moment ihtiyacı aşağıya indikçe düşmektedir. Buna bağlı olarak akımın azalması motoru kritik sıcaklıklardan korumaktadır. İniş operasyonu için tanımlanan moment ve hız grafikleri Şekil 5.26'da yer almaktadır.



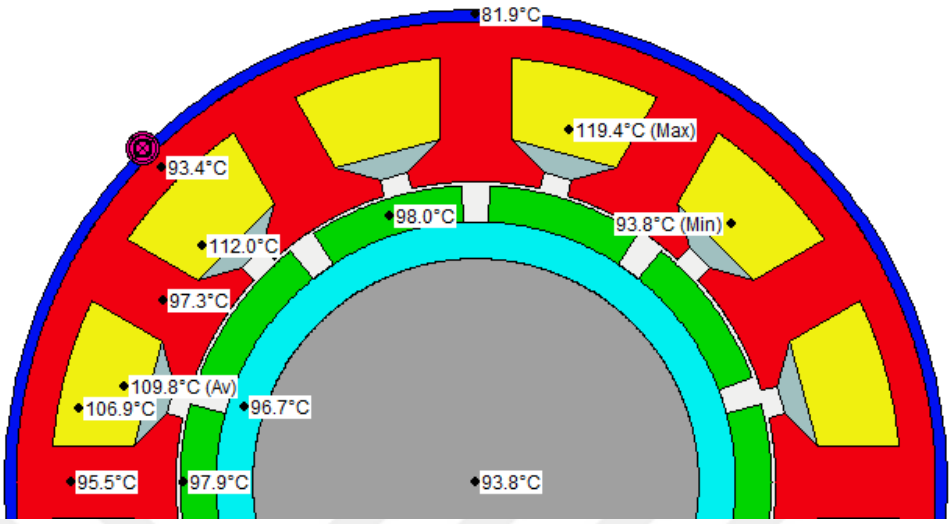
Şekil 5.26 İniş operasyonu moment hız grafikleri

Sürekli durumda generatör çalışmanın sonucunda oluşan sıcaklık değerlerinin akabinde gerçekleşen iniş operasyonu sürecinde sıcaklıkların zamanla artış grafiği Şekil 5.27'de gösterilmektedir. İniş operasyonunda her ne kadar soğutma hava hızı düşük olsa da zamanla yükün azalması doğrultusunda tork ihtiyacı azalmakta buna bağlı olarak akımın düşmesiyle sıcaklıklar sargı ve mıknatıslar açısından kritik seviyeleri aşmamaktadır.



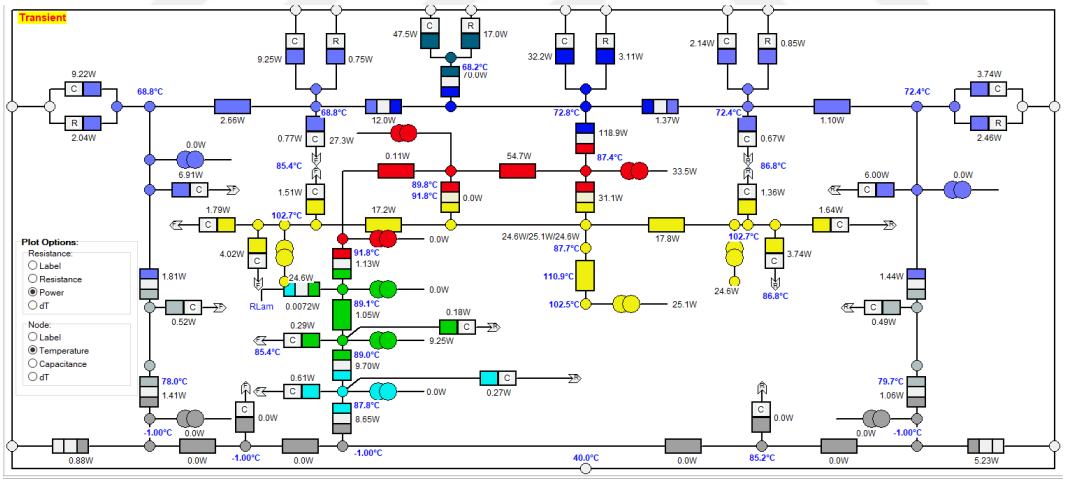
Şekil 5.27 İniş operasyonu sıcaklık artış grafiği

İniş operasyonu sonrasında motorda oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 5.28'de gösterilmiştir.



Şekil 5.28 İniş operasyonu sonrası genel dağılım

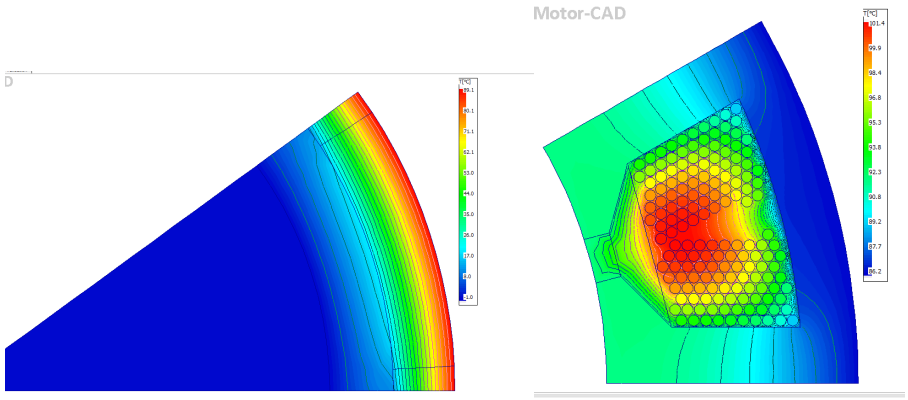
Analitik termal çözümleme sonucu generatör modda düğümlerde oluşan sıcaklık değerleri Şekil 5.29'de gösterilmektedir.



Şekil 5.29 İniş operasyonu düğümlerdeki sıcaklıklar

Ayrıca mıknatıs ve sargılardaki sıcaklıklar termal SEY analizine tabii tutulmuştur. Termal sey analizi sonuçları Şekil 5.30 ile gösterilmiştir.

Ayrıca, iniş operasyonu sırasında ve sonrasında mıknatısların maruz kaldığı sıcaklıkların kalıcı demanyetizasyon etkilerine yol açıp açmadığı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan analizler neticesinde, mıknatısların bu sıcaklık koşulları altında demanyetize olmadığı ve kalıcı mıknatıs özelliklerinin korunduğu

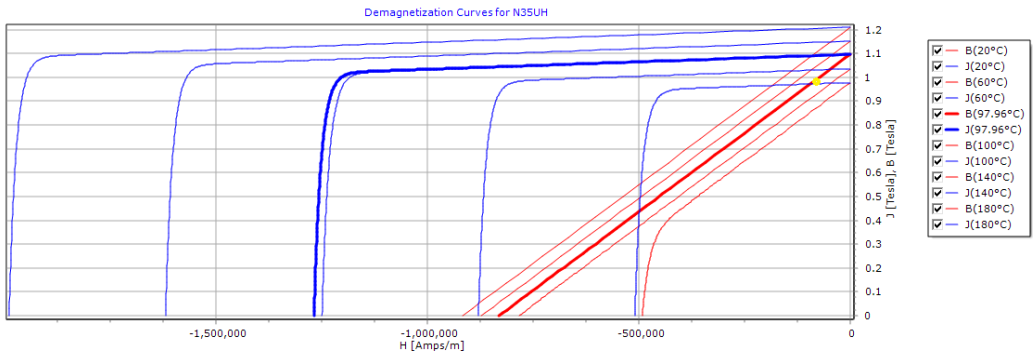


Şekil 5.30 İniş operasyonu sonrası mıknatıs ve sargılardaki sıcaklıkların SEY analizi sonucları

gözlemlenmiştir. Bu sonuç, mıknatısların çalışma sıcaklık aralığında stabil ve etkili bir performans sergilemesini doğrulamaktadır.

Seçilen mıknatıs malzemesi için demanyetizasyon eğrileri, Şekil 5.31'de sunulmuştur. Bu eğriler, mıknatısın belirli sıcaklık ve manyetik alan koşullarındaki performansını gösterir ve demanyetizasyon eşiğini belirlemede kritik bilgiler sağlar.

Demanyetizasyon eğrileri, mıknatısın sıcaklık ve manyetik alan değişimlerine karşı gösterdiği hassasiyeti ortaya koyarak, malzemenin uygulama koşullarında uzun süreli güvenilirliğini değerlendirir. Bu bağlamda, demanyetizasyon testleri ve eğrileri, mıknatıs malzemesinin motorun uzun ömürlü performansına katkısını garanti altına alır. Elde edilen sonuçlar, seçilen mıknatıs malzemesinin mevcut çalışma koşullarında güvenilir olduğunu ve tasarımın termal ve manyetik performans kriterlerini karşıladığını teyit etmektedir. Bu tür değerlendirmeler, hem tasarım aşamasında hem de uygulama sürecinde mıknatıs malzemelerinin uygunluğunu ve etkinliğini sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır.



Şekil 5.31 İniş operasyonu sonrası mıknatısların demagnetizasyon eğrisi

5.3 Mekanik Analiz ve Doğrulama

Bu bölüm, makinenin her aktif parçasının kütlesini ele almakta ve toplam kütlenin bir CAD ortamında doğrulanmasını içermektedir. Tablo 5.9 kütle değerlerinin karşılaştırılması üzerine yapılan analiz, analitik ve CAD yöntemlerinin sonuçları arasındaki sapmaları ortaya koymaktadır. Stator kütlesindeki %8'lik fark, analitik hesaplamalarda stator dişlerinin tepe kısımlarının ihmal edilmesinden kaynaklanmaktadır, bu da tasarımın bu bölümünde daha detaylı bir modellemenin önemini vurgular. Rotor kütlesindeki %0.372 gibi düşük bir sapma, rotorun kütlesinin farklı hesaplama yöntemlerinden minimal düzeyde etkilendiğini gösterir. Mıknatıs kütlesinde %2.613'lük bir fark gözlemlenmiş olup, bu bileşenin kütlesi açısından analitik ve CAD hesaplamaları arasında yüksek bir uyum olduğunu belirtmektedir. Sarım kütlesindeki %2.061'lik sapma, özellikle sargı sonlarının düzgün hesaplanmış olması sayesinde minimal düzeyde kalmıştır, bu da sarım tasarımının her iki yöntemle de tutarlı olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bileşenlerin toplam kütlesi değerlendirildiğinde %4.712'lik bir sapma görülmüştür; bu da hesaplama yöntemlerinin birleşik etkisinin kütle hesaplamalarında makul düzeyde tutarlı sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır.

Kütle	Parametre	Birim	Analitik	CAD	Sapma oranı (%)
m_{sc}	Stator	kg	0.6094	0.621	8.004
m_{ry}	Rotor	kg	0.166	0.153	0.372
m_{mag}	Mıknatıs	kg	0.143	0.143	2.613
m_{Cu}	Sarım	kg	0.5075	0.43	2.061
m_{Toplam}	Toplam	kg	1.422	1.387	4.712

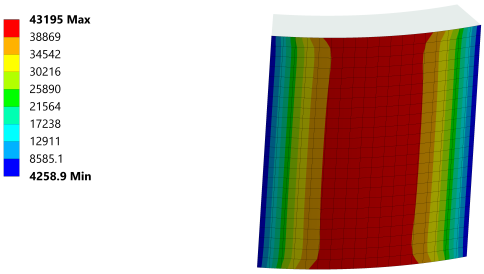
Tablo 5.9 Kütle hesaplarının karşılaştırılması

Optimizasyon sürecinden sonra tasarlanan makinenin mekanik dayanıklılığı Ansys-Mechanical paketi kullanılarak incelendi ve analitik hesaplamalar sırasında belirlenen limit değerine uygunluğu doğrulandı. Analiz sonuçları, stator yüzeyindeki kayma gerilmesi değerinin belirtilen kısıtlamanın altında olduğunu göstererek tasarımın geçerliliğini doğruladı.

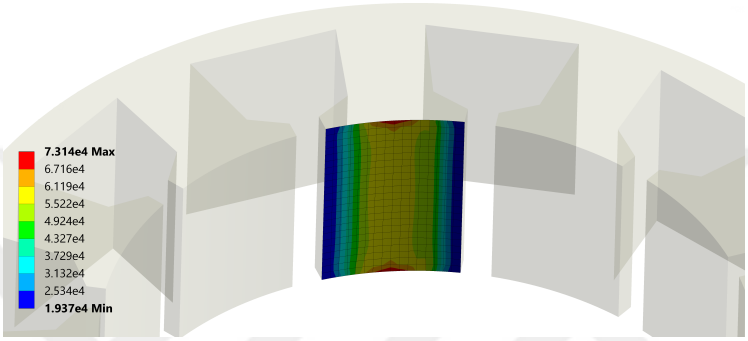
Rotor yüzeyinde yapılan kesme gerilimi analizi, tasarımın mekanik dayanıklılığını doğrulamakta ve Şekil 5.32'de rotorun kesme gerilimi sonuçları gösterilmektedir.

Benzer şekilde, Şekil 5.33'de stator yüzeyindeki kesme gerilimi analiz sonuçları sunulmaktadır. Bu analiz, statorun mekanik dayanıklılığını doğrulamak amacıyla yapılmıştır.

Ek olarak, rotor ve statorda kullanılan elektromanyetik malzemelerin, belirlenen

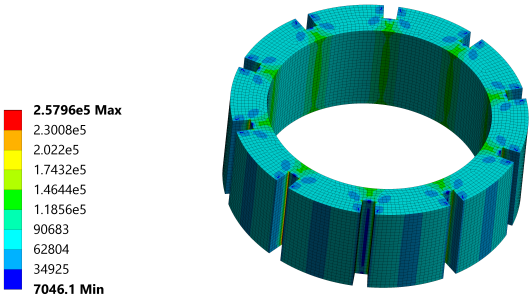


Şekil 5.32 Rotor yüzeyi kesme gerilimi



Şekil 5.33 Stator yüzeyi kesme gerilimi

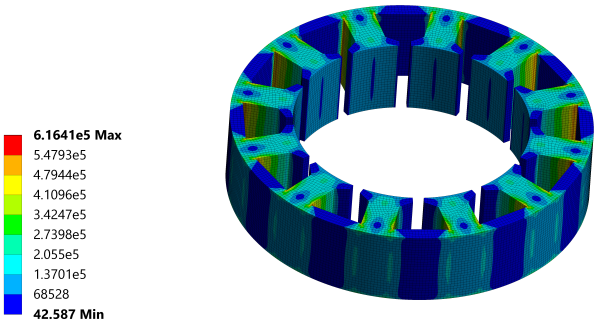
maksimum moment altında dayanım performansı kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu analiz, malzemelerin mekanik stres ve deformasyon toleranslarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.34 Rotor mekanik dayanım analizi

Şekil 5.34'te rotorun mekanik dayanım analizi sonuçları detaylı olarak sunulmuştur. Bu analiz, rotorun malzeme dayanımını ve deformasyon toleranslarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Son olarak, Şekil 5.35'te statorun mekanik dayanım analizi sonuçları yer



Şekil 5.35 Stator mekanik dayanım analizi

almaktadır. Bu analiz, stator malzemelerinin dayanıklılığını ve deformasyon toleranslarını kapsamlı bir şekilde değerlendirmektedir.

6
SONUÇ

Bu çalışmada, havai rüzgar enerji sistemleri için tasarlanan motor/generatör ünitesinin tasarım süreci ve analizi detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Tasarım sürecinde, analitik elektromanyetik model kullanılarak çeşitli optimizasyonlar gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (SEY) analizleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda bazı farklılıklar gözlemlenmiş, bu farklılıkların analizi ise modelin doğruluğunu artırmak için önemli bilgiler sunmuştur.

Termal analizler, akım yoğunluğunun belirlenen kısıtlama değerleri ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Motor ve generatör modlarında yapılan tekrar eden çalışmalarda, mıknatıs ve sargıların kritik sıcaklıklara ulaşmadığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, tasarımın termal açıdan güvenli olduğunu doğrulamaktadır. Güç yoğunluğu ve verimlilik açısından yapılan çalışmalar, 2.5 kW gücünde, 380V AC ve 600V DC voltaj koşullarında 1.8 kW/kg güç yoğunluğu ve %96 verimlilik elde edildiğini göstermiştir. Literatürde benzer güç seviyelerinde yapılan optimizasyon çalışmalarının eksikliği nedeniyle, güç yoğunluğu kıyaslaması yapılamamış, ancak verimlilik yönündeki sonuçların isabetli olduğu gözlemlenmiştir. Pareto-front analizlerine göre, belirli kısıtlar altında daha yüksek güç yoğunlukları elde edilebilmektedir. Bu, tasarımın hem verimlilik hem de performans açısından etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Optimizasyon sürecinin ardından, tasarlanan makinenin mekanik dayanıklılığı Ansys-Mechanical paketi kullanılarak incelenmiş ve analitik hesaplamalar sırasında belirlenen limit değerlerine uygunluğu doğrulanmıştır. Mekanik analizler, özellikle stator yüzeyindeki kayma gerilmesinin belirtilen kısıtlamalar altında olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, tasarımın yapısal güvenilirliğini ve dayanıklılığını kanıtlamaktadır.

Gelecek çalışmalar, bu modelin optimal makine parametrelerinin deneysel doğrulamasını ve daha detaylı termal çözümlerle geliştirilmesini içerecektir. Ayrıca,

detaylı demanyetizasyon analizleri ve aerodinamik performans incelemeleri, rüzgar tüneli testleri gibi yöntemlerle yapılacak ek analizlerle tasarımın gerçek dünya uygulamalarında daha güvenilir ve etkili hale getirilmesi hedeflenmektedir. Bu süreçler, makinenin performansını ve güvenliğini artırarak daha geniş uygulama alanlarına uyarlanabilirliğini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışmada geliştirilen model, havai rüzgar enerji sistemleri için yüksek performanslı ve güvenilir motor/generatör ünitelerinin tasarımında önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Mekanik dayanıklılık analizleri ve detaylı optimizasyon süreçleriyle desteklenen bu model, sürdürülebilir enerji çözümlerine katkıda bulunmakta ve yenilikçi tasarım yaklaşımlarının entegrasyonuna yönelik sağlam bir temel oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

[1] REN21, "Renewables 2024 Global Status Report," REN21 Secretariat, Paris, France, tek. rap., 2024, [Çevrimiçi]. Erişim: 2024-08-19. erişim adresi: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2024_Supply.pdf.

[2] Global Wind Energy Council (GWEC), "Global Wind Report 2024," Global Wind Energy Council, Brussels, Belgium, tek. rap., 2024, Erişim: 2024-08-19. erişim adresi: https://gwec.net/wp-content/uploads/2024/04/GWR-2024_digital-version_final-1.pdf.

[3] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, *Elektrik - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*, https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik, [Çevrimiçi]. Erişim: 19.08.2024, 2024.

[4] J. R. M. T. Ashuri M.B Zaaijer J. Zhang, "Multidisciplinary design optimization of large wind turbines -Technical, economic, and design challenges," *Energy Conversion and Management*, 2016.

[5] Airborne Wind Europe, *Airborne Wind Energy Systems*, Erişim: 2024-08-22, 2024. erişim adresi: https://airbornewindeurope.org/awe-systems/.

[6] J. Weber ve diğ., "Proceedings of the 2021 Airborne Wind Energy Workshop," *Proceedings of the 2021 Airborne Wind Energy Workshop*, National Renewable Energy Laboratory, 2021. erişim adresi: https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/80017.pdf.

[7] M. L. Loyd, "Crosswind Kite Power.," *Journal of Energy*, c. 4, no. 3, ss. 106–111, 1980, ıssn: 01460412. doı: 10.2514/3.48021.

[8] R. Schmehl, *Airborne Wind Energy: Advances in Technology Development and Research*. Springer Singapore, 2018, ss. 6–7.

[9] U. Ahrens, M. Diehl R. Schmehl, *Airborne Wind Energy*. Springer Berlin, Heidelberg, 2016, ss. 10–12.

[10] S. Mann, "An Introduction to Airborne Wind," Offshore Renewable Energy Catapult, UK, tek. rap., 2019, Erişim: 2024-08-19, Çevrimiçi. erişim adresi: https://cms.ore.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2019/02/An-Introduction-to-Airborne-Wind-Stephanie-Mann-AP0020.pdf.

[11] J. F. Gieras, *Permanent magnet motor technology : design and applications*. Crc Press, 2010.

[12] U.-J. Seo, Y.-D. Chun, J.-H. Choi, S.-U. Chung, P.-W. Han D.-H. Koo, "General Characteristic of Fractional Slot Double Layer Concentrated Winding Synchronous Machine," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, c. 8, ss. 282–287, Mar. 2013. doı: 10.5370/jeet.2013.8.2.282. (erişim tarihi 19/08/2024).

[13] H. Ge, "Fractional Slot Concentrated Winding Interior Permanent Magnet Machines with Reluctance Torque: Inductance-Based Methodology for Comprehensive Analysis, Design, and Control," en, Ph.D. dissertation, McMASTER UNIVERSITY, 2016. doı: https://macsphere.mcmaster.ca/handle/11375/20255.

[14] J. W. Kolar ve diğ., "Conceptualization and multiobjective optimization of the electric system of an airborne wind turbine," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, c. 1, no. 2, ss. 73–103, 2013, ıssn: 21686785. doı: 10.1109/JESTPE.2013.2269672.

[15] I. Subotic, C. Gammeter, A. Tüysüz J. W. Kolar, "Weight optimization of an axial-flux PM machine for airborne wind turbines," *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, International Conference on Power Electronic Drives, 2016.

[16] C. Gammeter, Y. Drapela, A. Tuysuz J. W. Kolar, "Weight optimization of a machine for airborne wind turbines," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.*, ss. 950–958, 2014. doı: 10.1109/IECON.2014.7048616.

[17] P. Ragot, M. Markovic Y. Perriard, "Optimization of electric motor for a solar airplane application," *IEEE Transactions on Industry Applications*, c. 42, no. 4, ss. 1053–1061, 2006. doı: 10.1109/TIA.2006.876073.

[18] P. Ragot, M. Markovic Y. Perriard, "Optimization of Electric Motor for a Solar Airplane Application," *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005.*, 2005, ss. 1487–1493. doı: 10.1109/IEMDC.2005.195917.

[19] X. Zhang, L. Li C. Zhang, "Mass Optimization Method of a Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor Based on a Lightweight Structure," *IEEE Access*, c. 8, ss. 40 431–40 444, 2020. doı: 10.1109/ACCESS.2020.2974908.

[20] S. Fang, H. Liu, H. Wang, H. Yang H. Lin, "High power density PMSM with lightweight structure and high-performance soft magnetic alloy core," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, c. 29, no. 2, ss. 1–5, 2019, ıssn: 15582515. doı: 10.1109/TASC.2019.2891630.

[21] S. Fang, Y. Wang H. Liu, "Design study of an aerospace motor for more electric aircraft," *IET Electr. Power Appl.*, c. 14, no. 14, ss. 2881–2890, 2020, ıssn: 17518679. doı: 10.1049/iet-epa.2020.0507.

[22] J. W. Kolar ve diğ., "Conceptualization and multiobjective optimization of the electric system of an airborne wind turbine," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, c. 1, ss. 73–103, 2013. doı: 10.1109/JESTPE.2013.2269672.

[23] K. Sindhya, A. Manninen, K. Miettinen J. Pippuri, "Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator Using Interactive Multiobjective Optimization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 64, ss. 9776–9783, Ara. 2017. doı: 10.1109/tie.2017.2708038.

[24] P. Echeverri, T. Fricke, G. Homsy N. Tucker, "The Energy Kite Selected Results from the Design, Development and Testing of Makani's Airborne Wind Turbines Part II. Technical Artifacts Makani Team," tek. rap., Eyl. 2020. erişim adresi: https://storage.googleapis.com/x-prod.appspot.com/files/Makani_TheEnergyKiteReport_Part2.pdf (erişim tarihi 11/04/2024).

[25] A. D. Pizzo, L. P. Di Noia, R. Rizzo, M. Boi A. Damiano, "Thermal Investigations of Air-Cooled PMSM used in Full-Electric UAV," *2021 IEEE 15th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, 2021, ss. 1–5. doı: 10.1109/CPE-POWERENG50821.2021.9501210.

[26] L. P. D. Noia, L. Piegari R. Rizzo, "Optimization methodology of PMSM cooled by external convection in aircraft propulsion," *Energies*, c. 13, no. 15, 2020, ıssn: 19961073. doı: 10.3390/en13153975.

[27] Y. Terao, W. Kong, H. Ohsaki, H. Oyori N. Morioka, "Electromagnetic Design of Superconducting Synchronous Motors for Electric Aircraft Propulsion," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, c. 28, no. 4, ss. 1–5, 2018, ıssn: 10518223. doı: 10.1109/TASC.2018.2823503.

[28] D. G. Dorrell, A. M. Knight M. Popescu, "Performance improvement in high-performance brushless rare-earth magnet motors for hybrid vehicles by use of high flux-density steel," *IEEE Trans. Magn.*, c. 47, no. 10, ss. 3016–3019, 2011, ıssn: 00189464. doı: 10.1109/TMAG.2011.2157103.

[29] P. P. C. Bhagubai, A. C. Cardoso J. F. P. Fernandes, "Cobalt Iron Core Impact on Optimal Design of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Competition Electric Vehicle," *2020 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, 2020, ss. 158–163. doı: 10.1109/GPECOM49333.2020.9247902.

[30] A. Krings, M. Cossale, A. Tenconi, J. Soulard, A. Cavagnino A. Boglietti, "Magnetic Materials Used in Electrical Machines: A Comparison and Selection Guide for Early Machine Design," *IEEE Industry Applications Magazine*, c. 23, no. 6, ss. 21–28, 2017. doı: 10.1109/MIAS.2016.2600721.

[31] T. de Paula Machado Bazzo, J. F. Kölzer, R. Carlson, F. Wurtz L. Gerbaud, "Multiphysics Design Optimization of a Permanent Magnet Synchronous Generator," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 64, no. 12, ss. 9815–9823, 2017. doı: 10.1109/TIE.2017.2726983.

[32] A. Rahideh, T. Korakianitis, P. Ruiz, T. Keeble M. Rothman, "Optimal brushless DC motor design using genetic algorithms," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, c. 322, no. 22, ss. 3680–3687, 2010, ıssn: 0304-8853. doı: https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.07.025. erişim adresi: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885310004890.

[33] K. Chakkarapani, T. Thangavelu, K. Dharmalingam P. Thandavarayan, "Multiobjective design optimization and analysis of magnetic flux distribution for slotless permanent magnet brushless DC motor using evolutionary algorithms," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, c. 476, ss. 524–537, 2019, ıssn: 0304-8853. doı: https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.01.029. erişim adresi: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885318314495.

[34] N. Bracikowski, M. Hecquet, P. Brochet S. V. Shirinskii, "Multiphysics Modeling of a Permanent Magnet Synchronous Machine by Using Lumped Models," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 59, no. 6, ss. 2426–2437, 2012. doı: 10.1109/TIE.2011.2169640.

[35] *kiteKRAFT Operational Flight*, www.youtube.com. erişim adresi: https://youtu.be/sc4RAtPwNRw (erişim tarihi 11/01/2024).

[36] F. Bauer, "Multidisciplinary Optimization of Drag Power Kites," dok. tezi, Technische Universität München, Munih, Germany, 2019.

[37] M. J. Aull, "Airborne Wind Energy System Analysis and Design Optimization," dok. tezi, University of Cincinnati, USA, 2020.

[38] M. Aull, A. Stough K. Cohen, "Design Optimization and Sizing for Fly-Gen Airborne Wind Energy Systems," *Automation*, c. 1, no. 1, ss. 1–16, 2020, ıssn: 2673-4052. doı: 10.3390/automation1010001.

[39] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons, Ltd, Eyl. 2001. doı: 10.1002/0470846062. erişim adresi: https://doi.org/10.1002/0470846062.

[40] U. J. Seo, Y. D. Chun, J. H. Choi, S. U. Chung, P. W. Han D. H. Koo, "General characteristic of fractional slot double layer concentrated winding synchronous machine," *J. Electr. Eng. Technol.*, c. 8, no. 2, ss. 282–287, 2013, ıssn: 19750102. doı: 10.5370/JEET.2013.8.2.282.

[41] Z. Zhu D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in permanent magnet brushless DC motors. IV. Magnetic field on load," *IEEE Transactions on Magnetics*, c. 29, no. 1, ss. 152–158, 1993. doı: 10.1109/20.195560.

[42] Z. Zhu, D. Howe, E. Bolte B. Ackermann, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors. I. Open-circuit field," *IEEE Transactions on Magnetics*, c. 29, no. 1, ss. 124–135, 1993. doı: 10.1109/20.195557.

[43] Y. Jiang, "Optimal design of permanent magnet synchronous machines based on magnetic field distribution assessment and performance analysis," English, dok. tezi, Illinois Institute of Technology, USA, 2015, s. 118, ısbn: 978-1-339-10752-3. erişim adresi: https://www.proquest.com/dissertations-theses/optimal-design-permanent-magnet-synchronous/docview/1713583981/se-2.

[44] L. Wang, S. Lu Y. Chen, "Two-Dimensional Analytical Models for Cogging Torque Prediction in Interior Permanent Magnet Machine," *Machines*, c. 11, no. 2, 2023, ıssn: 2075-1702. doı: 10.3390/machines11020233. erişim adresi: https://www.mdpi.com/2075-1702/11/2/233.

[45] Z. Zhu D. Howe, "Analytical prediction of the cogging torque in radial-field permanent magnet brushless motors," *IEEE Transactions on Magnetics*, c. 28, no. 2, ss. 1371–1374, 1992. doı: 10.1109/20.123947.

[46] Z. Zhu D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors. II. Armature-reaction field," *IEEE Transactions on Magnetics*, c. 29, no. 1, ss. 136–142, 1993. doı: 10.1109/20.195558.

[47] C. Gammeter, "Multi-Objective Optimization of Power Electronics and Generators of Airborne Wind Turbines," en, Ph.D. dissertation, ETH Zurich, Zurich, 2017-08. doı: 10.3929/ethz-b-000267436.

[48] L. J. Wu, Z. Zhu, J. T. Chen, Z. Xia G. Jewell, "Optimal split ratio in fractional-slot interior permanent magnet machines with non-overlapping windings," *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, IEEE, 2009, ss. 1721–1728. doı: 10.1109/IEMDC.2009.5075435.

[49] D. Golovanov ve diğ., "4-MW Class High-Power-Density Generator for Future Hybrid-Electric Aircraft," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, c. 7, no. 4, ss. 2952–2964, 2021. doı: 10.1109/TTE.2021.3068928.

[50] VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG. "Cobalt-Iron Alloys." Accessed: 2024-08-19. (2023), erişim adresi: https://vacuumschmelze.com/03_Documents/Brochures/Cobalt-Iron%20Alloys.pdf.

[51] Z. Zhu D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in permanent magnet brushless DC motors. IV. Magnetic field on load," *IEEE Transactions on Magnetics*, c. 29, no. 1, ss. 152–158, 1993. doı: 10.1109/20.195560.

[52] L. J. Wu, Z. Q. Zhu, D. A. Staton, M. Popescu D. Hawkins, "Comparison of Analytical Models of Cogging Torque in Surface-Mounted PM Machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 59, no. 6, ss. 2414–2425, 2012. doı: 10.1109/TIE.2011.2143379.

[53] A. Proca, A. Keyhani, A. El-Antably, W. Lu M. Dai, "Analytical model for permanent magnet motors with surface mounted magnets," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 18, no. 3, ss. 386–391, 2003. doı: 10.1109/TEC.2003.815829.

[54] I. T. D. Strous, "Design of a permanent magnet radial flux concentrated coil generator for a range extender application," dok. tezi, Delft University of Technology, Netherlands, 2010.

[55] A. Verde, O. Lastres, G. Hernández, G. Ibañez, L. Verea P. Sebastian, "A new method for characterization of small capacity wind turbines with permanent magnet synchronous generator: An experimental study," *Heliyon*, c. 4, e00732, Ağus. 2018. doı: 10.1016/j.heliyon.2018.e00732. (erişim tarihi 12/10/2020).

[56] S. J. Chapman, *Electric machinery fundamentals.* Mcgraw-Hill Education, 2005.

[57] P. Ponomarev, Y. Alexandrova, I. Petrov, P. Lindh, E. Lomonova J. Pyrhönen, "Inductance Calculation of Tooth-Coil Permanent-Magnet Synchronous Machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 61, no. 11, ss. 5966–5973, 2014. doı: 10.1109/TIE.2014.2304933.

[58] D. Staton, E. Chong, S. Pickering A. Boglietti, *Cooling of Rotating Electrical Machines: Fundamentals, modelling, testing and design*. The Institution of Engineering ve Technology, 2022. doı: 10.1049/pbpo109e.

[59] J. Pyrhönen, T. Jokinen V. Hrabovcová, *Design of rotating electrical machines*. Wiley, 2014.

[60] T. A. LIPO, *Introduction to AC Machine Design*. Wiley-IEEE Press, 2004, ısbn: 9781119352167.

[61] A. S. McDonald, M. A. Mueller H. Polinder, "Structural mass in direct-drive permanent magnet electrical Generators," *Eur. Wind Energy Conf. Exhib. 2007, EWEC 2007*, c. 1, no. 1, ss. 48–56, 2007. doı: 10.1049/iet-rpg.

[62] N. Bianchi, S. Bolognani P. Frare, "Design criteria for high-efficiency SPM synchronous motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 21, no. 2, ss. 396–404, 2006. doı: 10.1109/TEC.2005.853720.

[63] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis With Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence (Complex adaptive systems)*. Mit Press, 1992.

[64] D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

[65] J. Azzouzi, N. Abdel Karim, G. Barakat B. Dakyo, "Axial flux PM synchronous generator design optimization: robustness test of the genetic algorithm approach," *European Conference on Power Electronics and Applications*, IEEE, 2005.

[66] C. C. Coello, G. B. Lamont D. A. V. Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Springer Science & Business Media, Eyl. 2007.

[67] M. S. Altinakar H. Qi, "Numerical-Simulation Based Multiobjective Optimization," *World Environmental and Water Resources Congress 2008: Ahupua'A*, American Society of Civil Engineers, 2008.

[68] A. F. Bozkurt K. Erkan, "MaglevMotor: Design and optimisation of a novel hybrid linear actuator for 6 degrees of freedom rail-passive Maglev carrier," *Iet Electric Power Applications*, Şub. 2024. doı: 10.1049/elp2.12424. (erişim tarihi 01/03/2024).

[69] MathWorks, *Genetic Algorithm Options*, Erişim: 2024-08-24, MathWorks, 2024. erişim adresi: https://www.mathworks.com/help/gads/genetic-algorithm-options.html.

[70] Ansys, Inc., *Ansys Maxwell Help 2021 Release*, Accessed: 2021, Ansys, Inc., Canonsburg, PA, 2021.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makale

1. E. Çelik, M. Garip and K. Erkan, "Optimizing a PMSM With Multi-Physics Approach for Fly-Gen Type Airborne Wind Energy Systems," in IEEE Access, vol. 12, pp. 66281-66295, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3399117.

Konferans Bildirisi

1. E. Çelik, M. Garip, "Multiphysics Design And Optimization Of Pmsm For Fly-Gen Type Airborne Wind Energy Systems", Proceedings Book of ICAME 2021 October 20-22, 2021 İstanbul, Türkiye, p. 518-526.

Proje

1. E. Çelik, M. Garip, "Yüksek İrtifa Rüzgar Enerji Sistemleri İçin Optimum Motor/Generatör Tasarımı", YTÜ Bilimsel Araşma Projesi FDK-2021-4345, (2021-2024).