



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPAY ZEKÂ TEKNİKLERİNİ KULLANARAK YÜKSEK VERİMLİ KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI

Mümtaz MUTLUER

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan-2013

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

DOKTORA TEZİ

YAPAY ZEKÂ TEKNİKLERİNİ KULLANARAK YÜKSEK VERİMLİ KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI

Mümtaz MUTLUER

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Osman BİLGİN

2013, 127 Sayfa

Jüri
Danışman: Doç.Dr. Osman BİLGİN
Prof.Dr. Mustafa Uğur ÜNVER
Prof.Dr. Saadetdin HERDEM
Yrd. Doç.Dr. Bekir MUMYAKMAZ
Yrd. Doç.Dr. Ömer AYDOĞDU

Bu çalışmada, kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonları yapay zekâ teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım optimizasyonlarının amacı yüksek verimli motor geometrileri elde etmektir.

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında genetik algoritma, benzetilmiş tavlama algoritması, diferansiyel evrim algoritması, yapay arı koloni algoritması ve parçacık sürü optimizasyon algoritması gibi farklı yapıda ve özellikte yapay zekâ teknikleri kullanılmıştır. Kullanılan yapay zekâ tekniklerinin kalıcı mıknatıslı senkron motorun tasarım optimizasyonuna katkıları simülasyonlar ve uygulama sonuçları ile karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur.

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonları için ilk olarak analitik bir tasarım programı hazırlanmıştır. Optimizasyonlar sonucu elde edilen motor geometrilerinin analitik ve manyetik simülasyonları sayısal analiz programları ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca motor geometrilerinin uygunluğu TÜBİTAK/TEYDEB projesi kapsamında hazırlanan bir test düzeneği ile test edilmiştir.

Örnek bir uygulama olarak asansör taşıma sistemleri gibi düşük devirli endüstriyel çalışmalar için kullanımları öngörülen kalıcı mıknatıslı senkron motorlar içten rotorlu, yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı, dağıtılmış ve konsantre sargılıdır. Seçilen kalıcı mıknatıslı senkron motor yapıları düşük hızlı uygulamalar için oldukça uygundur. Bununla birlikte tez çalışmasında gerçekleştirilen proje kapsamında farklı kalıcı mıknatıslı senkron motorlarla da çalışılmıştır.

Bu çalışmada, sadece kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarına yapay zekâ tekniklerinin katkıları ortaya konmamıştır. Bununla birlikte kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonları için geliştirilen yapay zekâ teknikleri tabanlı bir arayüz tasarım programı ile başlangıç seviyesindeki tasarım mühendisleri ve lisans üstü çalışanlar için gerekli alt yapı hazırlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: asansör taşıma sistemleri, kalıcı mıknatıslı senkron motor, tasarım optimizasyonu, yapay zekâ teknikleri.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

DESIGN OF HIGHLY EFFICIENT PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR BY USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES

Mümtaz MUTLUER

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE
OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERING

Advisor: Assoc.Prof.Dr. Osman BİLGİN

2013, 127 Pages

Jury
Advisor: Assoc. Prof.Dr. Osman BİLGİN
Prof.Dr. Mustafa Uğur ÜNVER
Prof.Dr. Saadetdin HERDEM
Assist. Prof.Dr. Bekir MUMYAKMAZ
Assist. Prof.Dr Ömer AYDOĞDU

In this study, design optimization of permanent magnet synchronous motors has been carried out by using artificial intelligence techniques. The objective of the design optimizations is to obtain geometries of highly efficient motors.

Artificial intelligence techniques, which have different structures and properties such as genetic algorithm, simulated annealing algorithm, differential evolution algorithm, artificial bee colony algorithm, and particle swarm optimization algorithm, have been used in the design optimization of permanent magnet synchronous motors. Contributions of the used artificial intelligence techniques for the design optimization of permanent magnet synchronous motor have been demonstrated by comparing the simulations and the practical results of the applications.

An analytical design program was firstly prepared for the design optimization of the permanent magnet synchronous motors. The analytical and magnetic simulations of the motor geometries, that obtained by the design optimization, were tested by numerical analysis programs. In addition, the suitability of the motor geometries was tested by a test system prepared in a TÜBİTAK/TEYDEB project.

As a sample application, the permanent magnet synchronous motors, which intended for use in low-speed industrial applications such as elevator traction systems, have inner rotor, surface-mounted permanent magnet, distributed and concentrated winding. The chosen structures of permanent magnet synchronous motors are very suitable for low-speed applications. The different structures of permanent magnet synchronous motors were also studied under the project during the dissertation study.

In this study, the contributions of the artificial intelligence techniques have not only been revealed for the design optimization of permanent magnet synchronous motor, but also the necessary infrastructure has been prepared for entry-level design engineers and graduates with a developed interface design program based on artificial intelligence techniques for the design optimization of permanent magnet synchronous motor.

Keywords: artificial intelligence techniques, design optimization, elevator traction systems, permanent magnet synchronous motor.

ÖNSÖZ

Günümüzde yapılan mühendislik tabanlı optimizasyon çalışmalarında enerji verimliliği olgusu ana tema olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle, günlük hayatın her alanında kullanılan elektrik motorları üzerine yapılan çalışmalar enerji verimliliği açısından ön planda yer almaktadır. Elektrik motorlarının en fazla kullanıldığı uygulamaların başında gelen asansör taşıma sistemleri ise elektrik enerjisinin en çok tüketildiği endüstriyel alanlardan biridir. Asansör taşıma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan asenkron motor ve redüktör kompakt yapısının enerji verimliliğine ve sistemin toplam maliyetine olan etkileri tüketiciye, ülke ekonomisine ve yeryüzü enerji kaynaklarının kullanımına olumsuz yansımaktadır. Bu nedenle asansör taşıma sistemlerinin tahrik donanımlarında değişikliğe gidilerek redüktörsüz ve moment kapasitesi daha yüksek motorların kullanılması söz konusu olumsuz durumların asgari seviyeye düşürülmesinde etkili olacaktır.

Kalıcı mıknatıslı senkron motorlar asansör taşıma sistemleri gibi düşük hız yüksek moment ihtiyacı duyulan endüstriyel uygulamalarda üstün performansları ile dikkat çekmektedirler. Bu nedenle kalıcı mıknatıslı senkron motorlar üzerine yapılan tasarım ve tasarım optimizasyonu çalışmaları dünya genelinde artmaktadır. Bu çalışmalarda yapay zekâ tekniklerinden faydalanılmakta, ayrıca sayısal analiz programları kullanılarak çalışmaların kalitesi artırılmaktadır. Kalıcı mıknatıslı senkron motorlar asansör taşıma sistemlerinde kullanılmak üzere ülkemize büyük oranda ithal edilmektedirler. Bu durum pekçok olumsuzluğu beraberinde getirmekte, özellikle diğer endüstriyel alanlar için kalıcı mıknatıslı senkron motorların üretimlerinde gerekli bilgi ve teknolojik alt yapının yurdumuzda oluşamamasına neden olmaktadır.

Yukarıda bahsedilen hususlar doğrultusunda, bu tez çalışmasında beni yönlendiren ve çalışmanın "Asansör Sistemleri İçin Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve İmalatı" isimli TÜBİTAK/TEYDEB 15007 Kobi ArGe Projesi olarak desteklenmesini sağlayan tez danışmanım Sayın Doç.Dr. Osman BİLGİN'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca doktora çalışmama sağladığı desteklerden dolayı TÜBİTAK'a da teşekkür ederim.

Son olarak, doktora çalışmam süresince bana desteğini esirgemeyen sevgili eşime ve oğullarım Muhammed ve Yusuf'a içtenlikle şükranlarımı sunarım.

Mümtaz MUTLUER

Konya, Nisan-2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **x**

Kısaltmalar x
Simgeler xi

1. GİRİŞ **1**

1.1. Konunun Tanıtımı 2
1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi 5

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **7**

3. YAPAY ZEKÂ TEKNİKLERİ **12**

3.1. Optimizasyon 12
3.2. Genetik Algoritma (GA) 13
3.3. Benzetilmiş Tavlama Algoritması (BTA) 15
3.4. Diferansiyel Evrim Algoritması (DEA) 17
3.5. Yapay Arı Koloni Algoritması (YAKA) 20
3.6. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (PSOA) 23

4. KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORLARIN (KMSM) ÖN ANALİTİK TASARIMLARININ GELİŞTİRİLMESİ **25**

4.1. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Genel Yapısı 26
4.1.1. Mil 26
4.1.2. Rotor 27
4.1.3. Kalıcı mıknatıslar 28
4.1.4. Stator 29
4.1.5. Sargılar 29
4.2. Yüzey Montajlı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor Geometrileri 30
4.3. Yüzey Montajlı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Manyetik Analizi 32
4.4. Yüzey Montajlı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Elektrik Analizi 35
4.5. Yüzey Montajlı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlarda Verim Denkleminin Elde Edilmesi 38
4.5.1. Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda bakır kaybı 39
4.5.2. Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda demir kaybı 39

5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ **41**

5.1. Maxwell Denklemleri 42
5.2. Sınır Koşulları 42

5.2.1. Dirichlet sınır koşulu....43
5.2.2. Neumann sınır koşulu....43
5.2.3. Karma sınır koşulu....43

6. KMSM'LERİN ANALİZİNDE KULLANILAN PROGRAMLAR....45

6.1. FLUX-2D Programı....45
6.1.1. KMSM geometrisinin çizilmesi....45
6.1.2. KMSM vuruntu momentinin (cogging torque) hesaplanması....46
6.1.3. KMSM elektromotor kuvvet değerinin hesaplanması....47
6.1.4. Nominal hızda KMSM verim değerinin hesaplanması....49
6.2. SPEED Programı....50
6.2.1. KMSM geometrisinin çizilmesi....50
6.2.2. KMSM simülasyon sonuçlarının elde edilmesi....52

7. GELİŞTİRİLEN KMSM TASARIM PROGRAMI....54

7.1. KMSM Tasarım Programının Özellikleri....54
7.1.1. Birinci aşama....55
7.1.2. İkinci aşama....56
7.1.3. Üçüncü aşama....60

8. KMSM'LERİN TASARIM OPTİMİZASYONLARININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ....62

8.1. Tasarım Optimizasyonu Giriş Parametreleri....63
8.2. Tasarım Optimizasyonu Sabitleri....63
8.3. Tasarım Optimizasyonu Sınır Değerleri....64
8.4. Giriş Parametreleri ve Verim Arasındaki Korelasyon....65
8.5. Tasarım Optimizasyon Sonuçları....67
8.5.1. GA simülasyon sonuçları....70
8.5.2. BTA simülasyon sonuçları....72
8.5.3. DEA simülasyon sonuçları....74
8.5.4. YAKA simülasyon sonuçları....76
8.5.5. PSOA simülasyon sonuçları....78
8.5.6. Motor tasarım parametrelerinin değişimleri....80
8.6. SPEED Programı İle Analitik Simülasyon Sonuçları....82
8.6.1. Ön analitik tasarım parametreleri için SPEED programı simülasyon sonuçları....83
8.6.2. YAKA-PSOA ile elde edilen tasarım parametreleri için SPEED programı simülasyon sonuçları....86
8.7. FLUX-2D Programı İle Manyetik Simülasyon Sonuçları....90
8.7.1. Ön analitik tasarım parametreleri için FLUX-2D programı simülasyon sonuçları....90
8.7.2. YAKA-PSOA ile elde edilen tasarım parametreleri için FLUX-2D programı simülasyon sonuçları....94
8.8. Tasarım Optimizasyonu Sonuçlarının Gösterilmesi....97

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER....101

9.1. Sonuçlar....101

9.2. Öneriler 103

10. KAYNAKLAR 104

EKLER 109

EK-1A Ön Analitik Parametre Değerleri İçin KMSM1 Vuruntu Moment Grafiği (Cogging Torque) 109
EK-1B Optimum Parametre Değerleri İçin KMSM1 Vuruntu Moment Grafiği (Cogging Torque) 109
EK-2A Ön Analitik Parametre Değerleri İçin KMSM2 Vuruntu Moment Grafiği (Cogging Torque) 110
EK-2B Optimum Parametre Değerleri İçin KMSM2 Vuruntu Moment Grafiği (Cogging Torque) 110

ÖZGEÇMİŞ 111

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

ark.	: Arkadaşları
AlNiCo	: Alimünyum-Nikel-Kobalt
AR-GE	: Araştırma-Geliştirme
ASM	: Asenkron motor
BTA	: Benzetilmiş tavlama algoritması
DA	: Doğru akım
DEA	: Diferansiyel evrim algoritması
EMK	: Elektromotor kuvvet
FDAM	: Fırçasız doğru akım motoru
GA	: Genetik algoritma
KM	: Kalıcı mıknatıs
KMSM	: Kalıcı mıknatıslı senkron motor
KMSM1	: Birinci kalıcı mıknatıslı senkron motor
KMSM2	: İkinci kalıcı mıknatıslı senkron motor
KMSM3	: Üçüncü kalıcı mıknatıslı senkron motor
KMSM4	: Dördüncü kalıcı mıknatıslı senkron motor
KMSM5	: Beşinci kalıcı mıknatıslı senkron motor
KMSM6	: Altıncı kalıcı mıknatıslı senkron motor
NdFeB	: Neodium-Demir-Bor
PSOA	: Parçacık sürü optimizasyon algoritması
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
SmCo	: Samarium-Kobalt
Uyg.	: Uygunluk
YAKA	: Yapay arı koloni algoritması
yy.	: Yüzyıl
YZT	: Yapay zekâ teknikleri
2D	: 2 Boyut (Dimension)

Simgeler

A_{so}	: Stator oluk alanı
$(BH)_{max}$	: Maksimum manyetik enerji
B	: Manyetik akı yoğunluğu
B_r	: Kalıcı mıknatıs artık manyetik akı yoğunluğu
B_δ	: Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu
B_{rb}	: Rotor boyunduruk maksimum manyetik akı yoğunluğu
B_{sb}	: Stator boyunduruk maksimum manyetik akı yoğunluğu
B_{sd}	: Stator diş maksimum manyetik akı yoğunluğu
$B_{\delta m}$	: Hava aralığı maksimum manyetik akı yoğunluğu
cov	: Kalıcı mıknatıs genişlik oranı (magnet coverage)
$Ç_{mil}$	: Mil çapı
$Ç_{rd}$	: Rotor dış çapı
$Ç_{ri}$	: Rotor iç çapı
$Ç_{sd}$	: Stator dış çapı
$Ç_{si}$	: Stator iç çapı
çr	: Çaprazlama oran katsayısı
D	: Değişken parametre sayısı
D	: Elektrik akı yoğunluğu
E	: Elektromotor kuvvet
E	: Enerji seviyesi
E	: Elektrik Alan şiddeti
f	: Skaler fonksiyon
F	: Ağırlıklandırılmış fark vektörü
F	: Kuvvet
f_i	: Yiyecek kaynağının kalitesi
f_{so}	: Stator oluk dolgu faktörü
G	: Jenerasyon
g_{best}	: Global çözümlerin en iyisi
h_{KM}	: Kalıcı mıknatıs kalınlığı
H	: Manyetik akı şiddeti
H_c	: Manyetik akı şiddeti
H_m	: Kalıcı mıknatıs manyetik akı şiddeti

h_{sa} : Stator oluk ağzı kalınlığı

h_{so} : Stator oluk kalınlığı

h_{sb} : Stator boyunduruk kalınlığı

i : i. kromozom

i, I, I : Akım

I_s : Stator akımı

I_d : d-ekseni akımı

I_q : q-ekseni akımı

j : j. kromozom parametresi

J : Akım yoğunluğu

k : Boltzman sabiti

k_c : Çevresel manyetik akı düzeltme katsayısı

k_{carter} : "Carter" katsayısı

k_d : Motor geometrisi düzeltme katsayısı

k_{dd} : Demir dolgu katsayısı

k_F : Fukolt kayıp katsayısı

k_H : Histerezis kayıp katsayısı

k_k : Hava aralığı kaçak manyetik akı katsayısı

k_M : Moment katsayısı

k_{ns} : Temel sargı faktörü

k_{sa} : Stator ağzı genişlik katsayısı

k_{sn} : Sargı sonu faktörü

k_q : Motor geometrisi düzeltme katsayısı

L : İndüktans

L_d : d-ekseni indüktansı

L_q : q-ekseni indüktansı

L_m : Mıknatıslanma indüktansı

L_{md} : d-ekseni mıknatıslanma indüktansı

L_{mq} : q-ekseni mıknatıslanma indüktansı

L_k : Kaçak indüktansı

L_{rp} : Rotor paket boyu

M : Moment

M_n : Nominal moment

M_{KMSM} : Motor ağırlığı

M_{KM} : Mıknatıs ağırlığı

N : Bir faz stator sargı sayısı

NP : Kromozom sayısı

n_s : Bir stator oluğundaki sargı sipir sayısı

N_{2p} : Kutup sayısı

q : Faz sayısı ve kutup sayısı başına oluk sayısı miktarı

Q_s : Stator oluk sayısı

P : Güç

P_B : Bakır kaybı

p_{best} : Lokal çözümlerin en iyisi

$P_Ç$: Motor çıkış gücü

P_D : Demir kaybı

P_F : Fukolt kaybı

P_G : Motor giriş gücü

P_H : Histerezis kaybı

p_i : Nispi seçilme olasılık katsayısı

P_{Fsb} : Stator boyunduruk fukolt kaybı

P_{Fsd} : Stator diş fukolt kaybı

P_{Hsb} : Stator boyunduruk histerezis kaybı

P_{Hsd} : Stator diş histerezis kaybı

$p(\delta E)$: Amaç fonksiyonu değerlerindeki değişim

r : Yarıçap

R, R_s : Stator sargı direnci

R_d : Stator paket dışındaki sargı direnci

R_i : Stator paket içindeki sargı direnci

R : Relüktans

R_{KM} : Kalıcı mıknatıs relüktansı

R_k : Kaçak akı relüktansı

R_δ : Hava aralığı relüktansı

R_r : Rotor relüktansı

R_s : Stator relüktansı

S : Temel akım yük değeri

SN : Yiyecek kaynak sayısı

t : İterasyon sayısı

T : Metalin sıcaklık değeri

U : Motor besleme gerilimi

U_d : d-ekseni gerilimi

U_q : q-ekseni gerilimi

V : Elektrik potansiyeli

V_{sd} : Stator diş hacmi

V_{sb} : Stator boyunduruk hacmi

V_{rb} : Rotor boyunduruk hacmi

w_{sd} : Stator diş genişliği

w_{sdi} : Stator dişi iç genişliği

w_{sdd} : Stator dişi dış genişliği

w_{sa} : Stator oluk ağzı genişliği

w_{KM} : Kalıcı mıknatıs genişliği

x^{max} : Parametrenin maksimum değeri

x^{min} : Parametrenin minimum değeri

$x_j^{(u)}$, $x_j^{(l)}$: Değişkenlere ait üst ve alt değerler

x : Konum vektörü

μ_0 : Boşluğun bağıl geçirgenliği

μ_r : Bağıl manyetik geçirgenlik

φ : Manyetik akı

ϕ_{ij} : Yiyecek kaynağı ağırlıklandırma katsayısı

φ_k : Kaçak manyetik akı

φ_m : Temel manyetik akı

φ_r, φ_{KM} : Kalıcı mıknatıs manyetik akısı

$\varphi_{\delta m}$: Hava aralığı maksimum manyetik akısı

φ_δ : Hava aralığı manyetik akısı

τ_s : Stator oluk adımı

δ : Stator ve rotor arasındaki hava aralığı

δ_e : Stator ve rotor arasındaki eşdeğer hava aralığı

δE : Enerji seviyeleri arasındaki fark

$p(\delta E)$: Bireylerin amaç fonksiyonu değerlerindeki değişimi

α : Kalıcı mıknatısın elektriksel açı genişliği

θ : Açısal konum

ω : Açısal hız

υ : Motor hızı

υ : Hız vektörü

υ_n : Nominal motor hızı

υ_{ij} : Yiyecek kaynağ

ω_{el} : Elektriksel açısal hız

β : Akım ve manyetik akı vektörü arasındaki elektriksel açı

λ : Stator oluk açıklığı geçirgenlik katsayısı

ρ_{ns} : Sargı öz direnci

β_{St} : "**Steinmetz**" katsayısı

η : Motor verimi

η_{hata} : Motor verimi hata değeri

∇ : Nabla operatörü

ρ : Elektrik yük yoğunluğu

1. GİRİŞ

Elektrik makinaları en genel başlık altında transformatörler, generatörler ve motorlar olarak üç gruba ayrılmaktadırlar. Bu sınıflandırma elektrik enerjisinin seyri ve sarfiyatı açısından değerlendirildiğinde elektrik motorlarının enerji verimliliğindeki önemi açık bir şekilde ön plana çıkmaktadır. Zira günümüzde dünya genelinde üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık %65'i elektrik motorları tarafından tüketilmektedir (Pillay ve ark., 1998). Bu nedenle elektrik motorları üzerine enerji verimliliği merkezli çalışmalar günümüzde oldukça önem arz etmektedir.

Elektrik motorları başta asenkron motorlar (ASM) olmak üzere DA motorlar, senkron motorlar ve diğer alt motor başlıkları şeklinde sınıflandırılmaktadırlar. Asenkron motorlar yapılarının basitliği, üretim ve bakım maliyetlerinin az oluşu gibi nedenlerden dolayı endüstrinin her alanında en çok kullanılan motor sınıfını oluşturmaktadır. Özellikle düşük devir yüksek moment istenen çalışmalarda asenkron motor ve redüktör sistemi günümüze kadar kullanımını yaygın bir şekilde sürdürmüştür. Fakat bu tür kompakt sistemler özellikle enerji verimliliği ve toplam sistem maliyeti açısından avantajlı değildirler (Libert ve Soulard, 2003).

Endüstriyel sahada karşılaşılan söz konusu zayıflıklar ve olumsuzluklar motor tasarımlarında, sürücü sistemlerinde ve malzeme imalat teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak giderilmeye çalışılmaktadır. Bu bağlamda, AlNiCo, seramik, SmCo ve NdFeB gibi yapay kalıcı mıknatıslar son yüz yıldır endüstrideki çeşitli sahalarda kullanılmaktadır. Kalıcı mıknatısların en fazla kullanıldığı alanlardan bir tanesi de elektrik motorlarıdır. Bilhassa 20yy.'ın son çeyreğinde kalıcı mıknatıs (KM) teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak daha üstün performanslı kalıcı mıknatıslı elektrik motorları imal edilmeye başlanmıştır. Bu durum endüstride yaygın kullanılan asenkron motorların cazibesinin azalmasına neden olmuştur. Çünkü yüksek manyetik özellikli ve farklı tasarım mimarilerinde daha ucuza imal edilebilen kalıcı mıknatısların elektrik motorlarında kullanılması toplam maliyetleri düşürmüştür. Ayrıca elektrik motorlarından istenen düşük hızda yüksek moment ve geniş kontrol bölgesine sahip olması gibi çalışma performansları sağlanmış ve farklı endüstriyel ihtiyaçlara özgü uygulamalar gerçekleştirilebilmiştir (El-Refaie ve Jahns, 2008).

Yüksek manyetik özellikli kalıcı mıknatısların kullanıldığı motorların başında kalıcı mıknatıslı senkron motor (KMSM) ve fırçasız doğru akım motoru (FDAM) gelmektedir. Kalıcı mıknatıslı senkron motorlar düşük moment dalgalılık

karakteristikleri, küçük hacimlerde yüksek moment sağlayan yapıları ve esnek tasarım mimarilerinden dolayı endüstriyel çalışmalarda kullanımları hızla artmaktadır. Bu sayede endüstriyel ihtiyaçlara etkili çözümler sunulabilmektedir (Gradinaru ve ark., 2008).

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım geometrileri stator, rotor, sargılar, kalıcı mıknatıslar ve milden oluşmaktadır. Elektrik motorlarının tasarımlarında kullanılan malzemelerin özellikleri, motorların kullanım alanları ve maliyetleri gibi pekçok etken tasarımı sınırlayan faktörlerdendir. Bu nedenle motor tasarımına geçmeden önce ihtiyaçların (çalışma şartlarının) ve yaklaşık tasarım geometrisinin belirlenmesi, daha sonra ön analitik tasarımın ve tasarım optimizasyonunun yapılması ve son olarak ise sayısal analiz programları ile tasarım simülasyonlarının yapılması gerekmektedir (Bianchi ve Canova, 2002; Aydın ve ark., 2001). Burada, optimizasyon aşaması tasarım çalışmasının sonu ile başlangıcı arasında bir korelâsyon sağlayarak maliyet ve zaman tasarrufu sağlayacaktır. Bu sayede tasarım aşamaları tamamlanan motorun prototip üretimine geçilebilir.

Bu tez çalışmasında asansör taşıma sistemlerinde kullanılmak üzere yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarımları yapılmış, yüksek verimli motor geometrileri elde etmek için yapay zekâ teknikleri kullanılarak tasarım optimizasyonları gerçekleştirilmiş, sayısal analiz programları kullanılarak sonuçlar doğrulanmış ve prototip motorlar endüstriyel ortamda üretilmiştir. Bu aşamalardan sonra prototip motorların test ölçümleri yapılmış ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca yapay zekâ tekniklerinin kalıcı mıknatıslı senkron motorun tasarım optimizasyonundaki etkinlikleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

1.1. Konunun Tanıtımı

Diğer mühendislik çalışmalarda olduğu gibi kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında da ilk olarak tasarım amacının belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaca göre ilgili tasarım parametreleri seçilmekte ve daha sonra iteratif tasarım süreci başlamaktadır. Tasarım optimizasyonunun önemli kriterlerinden bir diğeri de kullanılacak optimizasyon metodunun belirlenmesi olmaktadır. Elektrik motorlarının tasarım problemlerinin çok boyutlu ve lineer olmayan yapılarından dolayı bu aşamada sezgisel metotlar oldukça faydalıdır. Çünkü sezgisel metotlar geniş çözüm uzayında

sağladıkları etkili çözümlerle tasarımcının optimum çözüme yaklaşımını hızlandırmakta ve problemin çözümünü kolaylaştırmaktadırlar.

Optimizasyon çalışmalarında kullanılan yapay zekâ tekniklerinin farklı özelliklerinden dolayı çözümler üzerindeki hassasiyetleri farklıdır (Antoniou ve Lu, 2007). Bununla birlikte günümüze kadar gelişimlerini sürdüren yapay zekâ teknikleri üstün performansları ile geniş çözüm uzayında optimum sonuçlara ulaşabilmektedir. Mühendislik problemlerinde yaygın kullanılan ve üstün performanslı yapay zekâ teknikleri; genetik algoritma (GA) , benzetilmiş tavlama algoritması (BTA), diferansiyel evrim algoritması (DEA), yapay arı koloni algoritması (YAKA) ve parçacık sürü optimizasyon algoritması (PSOA) gibi metotlardır. Bu tez çalışmasında söz konusu metotlar ile kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonları gerçekleştirilmiştir.

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında farklı amaç fonksiyonları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Tasarım parametrelerinin seçimini çoğunlukla amaç fonksiyonu belirlemektedir. Ayrıca tasarım parametrelerinin sayısı ve seçimi ön analitik tasarıma ve tasarımcının yaklaşımına bağlıdır. Ön analitik tasarımı dikkatli yapılmış bir optimizasyonda sonuçlar da aynı derecede güvenilir olacaktır. Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında üretim maliyetlerinin düşürülmesi, moment dalgalılığının azaltılması ve motor veriminin artırılması gibi hedefler amaç fonksiyonu olarak seçilmişlerdir (Kim ve ark., 2009; Bianchi ve ark., 2006; Hwang ve ark., 2009). Bu tez çalışmasında ise motor veriminin iyileştirilmesi tasarım optimizasyonlarının amacı olarak belirlenmiş ve buna bağlı olarak yedi adet geometrik parametre seçilmiştir.

Uygulamalı mühendislik çalışmaların sonunda yapılması gerekli olan deneysel testler çalışılan problemin ne seviyede çözüldüğünü göstermesi açısından oldukça önemlidir. Fakat bu testler gerekli deneylerin ve ölçümlerin yapılacağı ekipmanları zorunlu kılmaktadır. Bu ise pahalı ve zaman alıcı bir işlemdir. Bununla birlikte bu konuda hazırlanan profesyonel programlar da prototip üretim aşamasına geçmeden önce problemin çözümü ile ilgili kritiği yapmaya yardımcı olmaktadırlar.

Elektrik motorlarının tasarımlarında analitik, manyetik, termik ve mekanik analiz programları kullanılmaktadır. Bu programlar sayesinde ön analitik tasarım gözden geçirilmekte ve uygulama sonuçlarıyla paralellik gösteren simülasyonlar elde edilebilmektedir. Fakat bu programların pahalı oluşları bir dezavantajdır. Bundan dolayı elektrik motorlarının tasarım optimizasyonuna motorun elektriksel ve manyetik ön

analitik tasarımını sağlayan bir program geliştirmekle başlamak faydalı olmaktadır (Hanselman, 1994). Bu tez çalışmasında kalıcı mıknatıslı senkron motorların ön analitik tasarımları için elektriksel ve manyetik eşdeğer devrelere bağlı tasarım denklemleri sunulmuş ve bir arayüz tasarım programı ortaya konmuştur. Daha sonra, tasarım optimizasyonlarında elde edilen sonuçlar prototip üretim aşamasına geçmeden önce profesyonel analiz programları (SPEED – FLUX-2D) ile test edilmişlerdir.

Bu doktora tez çalışması dokuz bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde; tez konusu genel olarak tanıtılmış, tezde kullanılan yapay zekâ tekniklerinden, profesyonel analiz programlarından ve tezin aşamalarından kısaca bahsedilmiştir. Ayrıca tez çalışmasının bilimsel katkıları özlüce sunulmuştur.

İkinci bölümde; tez çalışmasında faydalanılan literatür özetleri sunulmuştur.

Üçüncü bölümde; ilk olarak "**optimizasyon**" kavramı ve yapay zekâ teknikleri hakkında genel bir açıklama yapılmıştır. Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında kullanılan yapay zekâ tekniklerinden bahsedilmiştir. Sözkonusu yapay zekâ tekniklerine ait doyurucu bilgiler verilmiş, özellikle algoritma akış şemaları incelenmiştir.

Dördüncü bölümde; tasarım optimizasyonları gerçekleştirilen KMSM geometrileri ve motorların temel kısımları anlatılmıştır. Tasarım optimizasyonlarına yönelik motorların elektriksel ve manyetik analizleri gerçekleştirilmiş ve "**d**-**q**" eşdeğer devreleri çıkartılmıştır. Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında amaç fonksiyonu olarak verim denkleminin elde edilmesi detaylı bir şekilde ortaya konmuştur.

Beşinci bölümde; sonlu elemanlar yönteminden bahsedilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili temel bilgiler verilmiştir. Elektrik motorlarının tasarımlarında kullanılan Maxwell denklemleri ve sınır koşulları ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

Altıncı bölümde; kalıcı mıknatıslı senkron motorların analitik analizlerinde kullanılan SPEED programı ve manyetik analizlerinde kullanılan FLUX-2D programı ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Yedinci bölümde; yüzey montajlı dağıtılmış sargılı kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonları için geliştirilen bir arayüz tasarım programı ayrıntılı olarak tanıtılmıştır. Söz konusu programın kullanım özellikleri, kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarına katkıları ve program çıktıları gerekli açıklamalar dâhilinde sunulmuştur.

Sekizinci bölümde; kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonları yapay zekâ teknikleri ile gerçekleştirilmiştir. Tasarım optimizasyonlarında tasarım sabitleri ve parametre sınır değerleri gibi büyüklükler verilerek yapay zekâ tekniklerinin uygulaması ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde verilmiştir. Bu sayede algoritmaların performansları test edilebilmiştir. Profesyonel analiz programları kullanılarak optimizasyon sonuçları test edilmiştir. Kalıcı mıknatıslı senkron motorlara ait çıkış gücü, giriş gücü, moment, akım, EMK, bakır kaybı, demir kaybı ve verim gibi değerler verilerek daha detaylı değerlendirmelere imkân sağlanmıştır.

Dokuzuncu bölümde; tez çalışmasında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Kalıcı mıknatıslı senkron motorların ve genel olarak elektrik motorlarının tasarım ve tasarım optimizasyonlarına dair faydalı bilgiler ve öneriler verilmeye çalışılmıştır.

Onuncu bölümde; tez çalışmasında faydalanılan kaynaklar sunulmuştur.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Asenkron motorlar asansör taşıma sistemlerinde en yaygın kullanılan elektrik motorlarıdır. Asansör taşıma sistemlerinde ihtiyaç duyulan düşük hız/yüksek moment özelliği asenkron motora bağlı redüktör yardımıyla sağlanmaktadır. Bu durum ise toplam sistem verimini azaltıcı, maliyeti ve gürültüyü artırıcı özellikler taşımaktadır. Bu nedenle asansör taşıma sistemlerinde redüktörlü asenkron motorların kullanımları verimli değildir. Son yıllarda enerji kaynaklarının optimum kullanımı üzerine büyük bir çaba sarfedilmekte ve enerji verimliliği yüksek makinelerin kullanımı dünya genelinde ve yurdumuzda teşvik edilmektedir. Bununla birlikte asansör taşıma sistemlerinde kalıcı mıknatıslı senkron motorların kullanılmalarıyla redüktör ve makine dairesi ortadan kalkmakta ve sistem verimi büyük ölçüde artmaktadır. Bu durum ise enerji tasarrufu açısından büyük kazançlar sağlamaktadır. Endüstriyel alanlar incelendiğinde, özellikle yüksek moment ve düşük hız uygulamalarında kalıcı mıknatıslı senkron motorların kullanılmalarıyla sistemin toplam verimi büyük ölçüde artmaktadır. Bu nedenle farklı mimari özellikteki kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonları üzerine AR-GE faaliyetleri hızla artmaktadır.

Elektrik motorlarının endüstriyel ürüne dönüşme serüvenlerindeki prototip üretim aşamasından önce simülasyonlar için profesyonel programlar kullanılmaktadır. Fakat profesyonel programların kullanımlarında karşılaşılan motorların tam olarak

modellenememesi ve çok fazla değişkenin olması gibi zorluklar sözkonusu analizleri geciktirmektedir. Ayrıca programların pahalı oluşlarından dolayı elektrik motor tasarımında bu programlardan faydalanma imkânı zayıflamakta ve tasarım işlemleri zorlaşmaktadır. TÜBİTAK/TEYDEB kobi ve Selçuk Üniversitesi doktora tez projeleri kapsamında tasarım optimizasyonları gerçekleştirilen kalıcı mıknatıslı senkron motorların analizlerinde profesyonel programlar kullanılmış ve bu programların kullanımları hakkında faydalı bilgiler sunulmuştur.

Yapay zekâ teknikleri mühendislik problemlerinin çözümünde çok büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Ayrıca elektrik motorunun tasarım optimizasyonunda tasarımcının probleme yoğunlaşmasını artırmakta ve elde edilen sonuçların değerlendirilmeleriyle farklı bakış açılarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında sunulan bilgiler doğrultusunda elektrik motorlarının tasarım optimizasyonlarında yapay zekâ tekniklerinin kullanımları için seçicilik de sağlanmaktadır.

Yukarıda belirtilen hususlar doğrultusunda bu tez çalışmasının amacı, asansör taşıma sistemlerinde kullanılmak üzere yüksek verimli yüzey montajlı dağıtılmış ve konsantre sargılı kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarımları ve tasarım optimizasyonlarını bilgisayar ortamında sağlamaktır. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen proje ile ülke ekonomisine katkı sağlamak ve sonrasında farklı endüstriyel alanlar için KMSM modellerinin ileri düzeyde tasarımlarını ve tasarım optimizasyonlarını gerçekleştirmek bu çalışmayı daha da faydalı kılacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarımlarına yönelik çalışmalar çeşitli ortamlarda akademik gruplar tarafından sürdürülmektedir. Bu akademik çalışmalar sadece motor tasarımları üzerine olmamakta, bununla birlikte motor sürücüleri, kontrol sistemleri ve motorlarda kullanılan malzemelerin iyileştirilmeleri üzerine de olmaktadır. Ayrıca bu çalışmalar farklı sektörlerdeki firmalar tarafından finanse edilmekte ve ortaya çıkan endüstriyel ürünlerin seri üretimleri de gerçekleştirilmektedir. Bu tez çalışmasında faydalanılan literatürlere ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

Mohammed (1997) elektromanyetik sistemlerin (elektrik makinesi) tasarımında genetik algoritma kullanmış ve transformatör tasarım optimizasyonu için bu metodun etkinliğini bir örnekle incelemiştir. Çalışmada ayrıca elektrik makinesi tasarım optimizasyonunda genetik algoritmanın lokal çözümlere takılmayarak global çözümlere yakınsama işlevselliğinin artırılması için, algoritmanın tasarım problemine verimli bir şekilde uyarlanması ve seçim kriterine etki eden ölçekleme faktörü gibi yapısal karakteristiklerin faydaları değerlendirilmiştir.

Bianchi ve Bolognani (1998) analitik ve sonlu eleman modellerini geliştirdikleri yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun tasarım optimizasyonunu genetik algoritma kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada motorun moment, verim ve maliyet gibi büyüklükleri iyileştirilmeye çalışılmıştır ve genetik algoritma ile "**hill-climbing**" arama metodu karşılaştırılmıştır. Bu sayede genetik algoritmanın söz konusu tasarım optimizasyonu için oldukça uygun olduğu ortaya konmuştur. Bununla birlikte sonlu eleman modeli ile yapılan motor tasarım optimizasyonunun çalışma süresi açısından uygun olmadığı görülmüştür.

Rasmussen ve ark. (2000) fırçasız doğru akım motorları için hava aralığı manyetik akı yoğunluğunu temel alarak motorun gürültüsünü azaltmayı ve verimini artırmayı amaçlamışlardır. Elektrik motorlarının tasarım optimizasyonlarında hızlı ve güvenilir çözümlere ulaşmak kullanılan metodun kabulü açısından önemli olduğu için, söz konusu tasarım metodu sonlu elemanlar yöntemi ile test edilmiş ve güvenilirliği ortaya konmuştur. Tasarım çalışmasının ön analizini oluşturan motorun analitik tasarımı ise tasarım optimizasyonu yol haritasında belirleyici örnekliğe sahip olduğu ifade edilmiştir.

Libert ve Soulard (2005) radyal akılı kalıcı mıknatıslı senkron motorları stator sargısı ve kalıcı mıknatıs çeşitleri, kalıcı mıknatısların rotora yerleşimleri, rotor kutbu ve stator oluk sayısı kombinasyonlarına göre karşılaştırmışlardır. Çalışmada endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan redüktörlü asenkron motorların kalıcı mıknatıslı senkron motorlar ile değiştirilmesi hedeflenmiştir. Bununla birlikte teğetsel mıknatıslanmış kalıcı mıknatıslı senkron motorun gömülü mıknatıslı radyal akılı motordan daha üstün olduğu karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur.

Salminen ve ark. (2005) konsantre stator sargılı kalıcı mıknatıslı senkron motorlar için stator oluk ve kutup sayısının üç fazlı sistemde motor çıkış momentinin büyüklüğüne etkilerini incelemişlerdir. Bununla birlikte kalıcı mıknatıslı senkron motorlar için farklı çıkış momenti hesaplama yöntemlerini motorun indüktans değerlerine bağlı olarak karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada motor tasarımcıları için

pratik bilgiler verilmiş ve konsantre stator sargılı kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarımında stator kaçak indüktansının diğer parametrelere göre daha etkili olduğu ifade edilmiştir. Bu durum farklı geometrideki motor tasarımları için etkili bir karşılaştırma yöntemi sunmaktadır.

Salminen ve ark. (2005) stator oluk ve rotor kutup sayılarına bağlı olarak farklı konsantre sargılı yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorların moment dalgalılığını incelemişlerdir. Motor geometrilerindeki kalıcı mıknatıs genişliği ve stator oluk ağız genişliği parametrelerinin moment dalgalılığına etkisi incelenmiş ve uygun kalıcı mıknatıs elektrik açısı verilmiştir. Motor moment dalgalılığının sadece yapısal özelliklerden kaynaklanmadığı gösterilmiş ve motor uzay harmonikleri ile hava aralığı manyetik akı harmoniklerinin uyumu ile vuruntu harmoniklerinin azaltılabileceği gösterilmiştir.

Sudhoff ve ark. (2005) yüksek verim ve yüksek moment/hacim oranına sahip bir kalıcı mıknatıslı senkron motor geometrisi elde etmek için genetik algoritma yardımı ile motorun tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Tasarım optimizasyonunda motor ebatları ile birlikte sürücü sistemi de ele alınmıştır. Gerçekleştirilen tasarım optimizasyonunun bir diğer özelliği de tek ve çok kriterli amaç fonksiyonuna sahip olması ve daha önceki tasarım çalışmalarında kullanılan parametrelerden çok daha fazla tasarım parametresi ihtiva etmesidir. Tasarım optimizasyonu öncesinde elde edilen motor moment, manyetik akı, vb. denklemlere Steinmetz metodu kullanılarak demir kayıpları da ilave edilmiştir. Bununla birlikte kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarımı ile ilgilenen mühendisler için stator diş kalınlığı, motor besleme gerilimi ve stator sargı sonu değerlerini içeren motor hacim modifikasyonları tavsiye edilmiştir.

Libert ve Soulard (2006) konsantre stator sargılı kalıcı mıknatıslı senkron motorlara ait stator saç paketlerinin üretim aşamalarını incelemişlerdir. Stator saç paketleri gerek motorun üretimi gerekse motor kayıpları açısından önemli bir unsurdur. Bu nedenle endüstrideki mevcut uygulamalar maliyet açısından ve üretimde ihtiyaç duyulan malzeme/performans açısından karşılaştırılmıştır. Konsantre sargıların üstünlükleri yanında sargıların sator oluklarına yerleştirilme problemine yönelik bir çözüm örneği motor tasarım uygulaması üzerinde gösterilmiştir.

Mi (2006) elektrikli taşıtların iyileştirilmesine yönelik kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarım optimizasyonda kalıcı mıknatısların ebatlarını incelemiştir. Motor maliyetinin en büyük kalemini oluşturan kalıcı mıknatısların ebatlarının değişimi motor hacmini de değiştirmektedir. Bu nedenle kalıcı mıknatısların ebatları motorun performans değerlerini ve aynı zamanda motorun hacmini ve maliyetini de etkileyecektir. Tasarım optimizasyonu sonuçları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak test edilmiştir. Çalışma neticesinde uygun mıknatıs modeli bulunarak sadece tasarım optimizasyonu sağlanmamış aynı zamanda hızlı bir ön analitik tasarım metodu da geliştirilmiştir.

Salminen ve ark. (2007) kalıcı mıknatıslı senkron motorlar için kalıcı mıknatısların rotora yerleşimlerine göre karşılaştırmalar yapmışlardır. Bu yapısal modele göre oluşan yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı motorların sağladıkları moment değerleri farklılık göstermiştir. Motor analizinde farklı rotor yapılarının momente etkileri incelendiği gibi stator oluk sayısı ve rotor kutup sayısının da momente etkileri incelenmiştir. Bu sayede kalıcı mıknatıslı senkron motorun analizi ana başlık

altında ikincil başlıklarla detaylandırılmıştır. Ayrıca farklı motor yapılarının dolaylı etkilerinden olan motor kayıpları da incelenmiş ve endüstriyel hedefler doğrultusunda kalıcı mıknatıslı senkron motorlar yapısal ve işlevsel olarak sınıflandırılmıştır.

Aydın (2008) çift rotor ve tek statorlu eksenel akılı kalıcı mıknatıslı disk motorlar için vuruntu momenti minimizasyon yöntemlerinden mıknatıs kaykısını detaylı bir şekilde incelemiştir. Disk motorlarda vuruntu momentini azaltmak için en uygun ve ekonomik yöntem rotor mıknatıslarının yerleşimlerinin ayarlanmasıdır. Bu nedenle farklı mıknatıs kaykı teknikleri ve motor performansına etkisi üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak test edilmiştir. Sonuçlar örnek bir disk motor ile test edilmiş ve vuruntu momenti bileşenindeki iyileşmeler gösterilmiştir.

Cvetkovski ve Petkovska (2008) kalıcı mıknatıslı senkron motorun verim iyileştirmesi için motorun tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Tasarım optimizasyon aracı olarak genetik algoritma kullanılmıştır. Tasarım optimizasyonu sonucu elde edilen optimum motor modeli sonlu elemanlar yöntemi ve ön analitik tasarıma bağlı olarak değerlendirilmiştir.

Isfahani ve Sadeghi (2008) kalıcı mıknatıslı senkron motorların düşük maliyet ve sabit moment bölgesine bağlı olarak motor tasarım çalışması gerçekleştirmişlerdir. Belirlenen amaç fonksiyonu için gömülü kalıcı mıknatıslı senkron motorun analitik tasarım modeli çıkartılmış ve uygun bir tasarım algoritması geliştirilmiştir. Tasarım optimizayonunda genetik algoritma kullanılmıştır. Tasarım optimizasyonu sonucu elde edilen optimum motor geometrisinin daha küçük hacimde daha yüksek moment verdiği de ortaya konmuştur. Çalışmanın sonunda motor tasarım optimizasyonunu test etmek için sonlu elemanlar yöntemi sonuçları kullanılmıştır.

Cassimere ve Sudhoff (2009) kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonuna yönelik çalışmalarında yüksek verimli ve yüksek moment/hacim oranına sahip motor tasarımı üzerinde durmuşlardır. Tasarım optimizasyonu için genetik algoritma ve parçacık sürü optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Motorların tasarım optimizasyonlarında kullanılan algoritmalar ve tasarım problemlerine yönelik çözüm yaklaşımları yapısal olarak incelenmiştir. Elektrik motorlarının tasarımlarında kullanılan algoritmaların performanslarının makine tasarımına özgü olduğu vurgulanmıştır.

Chin ve Soulard (2009) elektrikli araçlarda tahrik sistemi için yüzey-gömülü kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarımı üzerine çalışmışlardır. Tasarım optimizasyonu motorun sabit güç bölgesi için uygulanmıştır. Tasarımı tamamlanan örnek bir kalıcı mıknatıslı senkron motor ile asenkron motor performans değerlerine göre karşılaştırılmışlardır.

Kim ve ark. (2009) dahili V-yerleşimli kalıcı mıknatıslı senkron motorun çok kriterli tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Dahili kalıcı mıknatıslı senkron motorların analitik tasarımlarında motor manyetik eşdeğer devresinin kullanılmasının, hava aralığı kaçak manyetik akılarının analitik olarak tam tespit edilememesinden dolayı sağlıklı tasarım sonuçları vermeyeceği, ayrıca kalıcı mıknatısların ve mıknatıs bariyerlerinin yerleşimlerinden dolayı da analitk tasarımın oldukça güç olacağı vurgulanmıştır. Bu nedenle tasarım optimizasyonu için sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı çalışmada, dahili V-yerleşimli kalıcı mıknatıslı senkron motorun tasarım

optimizasyonu için beş amaç fonksiyonu barındıran çok kriterli Taguchi metot kullanılmıştır. Söz konusu optimizasyon metodunun farklı mıknatıs/rotor yapılarında da kullanılabileceği belirtilmiştir.

Mai (2009) hybrid araçlarda kullanılmak üzere harici rotorlu yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarım optimizasyonu üzerinde çalışmıştır. Sıralı kuadratik programlama (sequential quadratic programming) optimizasyon metodu kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Tasarım optimizasyonunda elde edilen performans sonuçları sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanmaya çalışılmıştır. Ayırca mevcut metodun özelliklerine de değinilmiş ve farklı kullanım alanları belirtilmiştir. Mevcut metot çoklu optimizasyon problemlerine uygun ve hızlı olmasının yanında lokal çözümlere yakınsaması ve ayrık parametreli problemlere uygulanamaması gibi zayıflıklara sahiptir.

Wang ve ark. (2009) geliştirdikleri çok aşamalı ayrık ve sürekli değişkenli genetik algoritmayı yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun tasarım optimizasyonuna uygulamışlardır. Optimizasyon probleminin matris gösterimi elde edilmiş, amaç fonksiyonu ile giriş tasarım parametreleri arasındaki korelasyona göre matrissel form tekrar yapılandırılmıştır. Tasarım optimizasyonu sonucu elde edilen motor değerleri sonlu elemanlar yöntemi ile test edilmiştir.

Yaojing ve ark. (2009) harici rotorlu yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun analitik tasarımı ve tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Tasarımın ilk aşaması olarak motorun yapısal özellikleri irdelenmiştir. Tasarım optimizasyonunda temel unsur motoru daha modüler ve yüksek güç kapasiteli yapmak için yeni bir soğutma sistemi geliştirilmesidir. Bunun için motorun elektromanyetik analizinden faydalanılmış ve tasarımı gerçekleştirilen motor sonlu elemanlar yöntemi temelli ANSYS programı ile analiz edilmiştir.

Aydın ve ark. (2010) çift rotorlu tek statorlu eksenel akılı kalıcı mıknatıslı senkron motorun yeni bir akı zayıflatma kontrol metodu ile tasarım, analiz, kontrol ve deneysel uygulamalarını gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan senkron motor üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile test edilmiştir. Ayrıca eksenel akılı makinenin kontrolü için alan zayıflatma yöntemi sunulmuştur.

El-Refaie (2010) kesirli oluk sayılı konsantre sargılı kalıcı mıknatıslı senkron motorun analizini yapmıştır. Amaç olarak, yüksek güç yoğunluğuna, akı-zayıflatma kapasitesine ve rotor kayıplarını tolere edecek yapıya sahip bir motor hedeflenmiştir. Bu çalışmada kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarımları üzerine gerçekleştirilen uygulamaların geniş bir fihristi de verilmiştir.

Ho ve ark. (2010) kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda vuruntu momentini azaltmanın en etkili yollarından birinin kalıcı mıknatısların dağınık yerleşimlerinin ifade edildiği bu çalışmada, yeni bir sonlu elemanlar yöntemi yaklaşımını senkron motorun tasarımında vuruntu momentinin azaltılması için önermişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi ile sadece vuruntu momentinin azaltılması amaçlanmamış, aynı zamanda çözüm süresinin kısaltılması da öngörülmüştür. Bununla birlikte genetik algoritma daha iyi bir optimizasyon aracı olarak da sunulmuş ve eldeki sonuçlarla bu öneri desteklenmiştir.

Kolehmanien (2010) orta hızlı kalıcı mıknatıslı senkron motorlar için gömülü mıknatıslı yeni bir rotor yapısı denemiştir. Kırlangıç kuyruğu yapılı rotor için bazı tasarım yaklaşımları gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Altı ve on dört kutuplu makinelerde elektromanyetik ve sonlu elemanlar yöntemi çözümleri yapılarak motorlar incelenmiştir. Ayrıca, motorların elektromanyetik tasarımları ile birlikte mekanik konstrüksiyonları da geliştirilmeye çalışılmıştır.

Pfister ve Perriard (2010) yüksek hızlı oluksuz yapılı kalıcı mıknatıslı senkron motorun analitik modeli üzerinde çalışmışlardır. Çalışmanın amacı hızlı bir motor tasarım optimizasyon işlemi için optimum analitik çözüm modeli sunmaktır. Analitik model manyetik alan çözümlerini, rotordaki mekanik gerilmeleri, elektromanyetik güç kayıplarını, sürtünme kayıpları ve rulmanlardaki kayıpları içermektedir.

Hamiti ve ark. (2011) yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun tasarım optimizasyonu için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu metoda göre motorun tasarım optimizasyonu eşzamanlı elektromanyetik ve termik analize bağlıdır. Tasarım optimizasyonunda amaç fonksiyonu olarak motorun ağırlığı seçilmiş ve genetik algirtma metodu uygulanmıştır. Bu uygulamada karşılaşılan zayıflık ise optimizasyon süresinin uzun oluşudur. Bunun için çalışmada etkin bir genetik algoritma kod yazılımının gerekliliği vurgulanmıştır.

Meng ve ark. (2011) yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun tasarım optimizasyonu için "Six Sigma" metodu ile çok aşamalı ayrık ve sürekli değişkenli genetik algoritmayı birleştirerek uygulamışlardır. Optimizasyon probleminin amacı motor maliyetinin azaltılmasıdır. Bu nedenle motor kısımlarının maliyeti amaç fonksiyonunu belirlemiştir. Tasarım optimizasyonu sonuçları önceki uygulamalarla test edilmiştir.

Tudorache ve Trifu (2012) kalıcı mıknatıslı senkron motorun relüktans momentinin azaltması için motorun tasarım optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada optimizasyon algoritmaları ve bir sayısal metot olan sonlu elemanlar yönteminin motor tasarımında birlikte kullanılmasından doğan uzun hesaplama süresinin azaltılması öngörülmüştür. Kalıcı mıknatısların rotor yüzeyine asimetrik yerleştirilmeleri ile relüktans momentinde iyileştirme sağlanmıştır. Ayrıca motor tasarım süresi de oldukça kısaltılmıştır.

Tsampouris ve ark. (2012) iki farklı kalıcı mıknatıslı senkron motorun tasarım optimizasyonu stator sarım konfigürasyonlarına bağlı olarak yapılmıştır. Motorların çok kriterli tasarım optimizasyonlarındaki amaç motor performanslarının ve üretim maliyetlerinin iyileştirilmesidir. Gerçekleştirilen optimizasyon çalışması örnek deneysel uygulamalar sağlanarak test edilmişlerdir.

3. YAPAY ZEKÂ TEKNİKLERİ

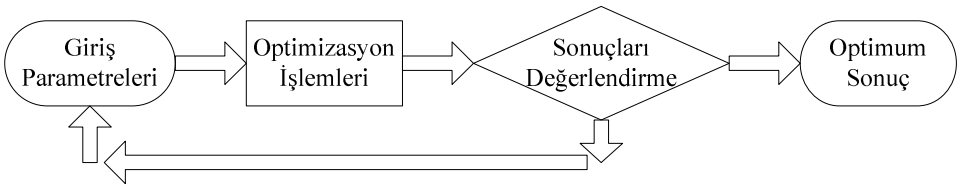
3.1. Optimizasyon

Geçmişten günümüze insanoğlu yaşamda karşılaştığı problemlere çözümler üretmek için çalışmıştır. Problemlere üretilen çözümler eldeki imkânlarla, insanoğlunun bilgi ve becerisine göre zaman içinde değişmiştir. Aynı şekilde zamanla değişen bir başka husus da insanoğlunun beklentisi, yani problemlerin algılanışlarındaki farklılıklar olmuştur. İnsanoğlu yine de amaçları doğrultusunda belirlediği problemlere en iyi çözümleri bulmak için çalışmalara devam etmektedir.

İnsanoğlunun herhangi bir probleme en iyi çözümü bulmak için gerçekleştirdiği faaliyetlerin tamamına "**optimizasyon**" denmektedir (Rao, 2009). Optimizasyon sürecinde en önemli unsur probleme en iyi cevabı arayan insandır. Çünkü optimizasyon işlemlerinde problemi tespit eden, problemde hangi parametrelerin kullanılacağına karar veren, mevcut problemin diğer hangi problemlerle veya disiplinlerle ilgili olduğunu fark eden, optimizasyon için hangi yöntemlerin kullanılacağını belirleyen ve en önemlisi problemin çözümünde elde edilen sonuçları değerlendiren insanın kendisidir.

Optimizasyon işlemi bir probleme en iyi çözümü arama faaliyetidir. Fakat ortaya çıkan sonuç en iyi olmayabilir. Bu durum ise optimizasyon işlemlerinin problemin tespiti, kullanılacak parametrelerin seçimi ve uygulanacak yöntemler gibi kriterler yönüyle sürekliliklerini ortaya koymaktadır.

Optimizasyon faaliyetinin temel unsurları Şekil 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Optimizasyon faaliyetinin aşamaları

Mühendislik problemlerinin çözümünde optimizasyon işlemleri için deterministik metotlar kullanıldığı gibi olasılıksal (istatistiksel) metotlar da kullanılmaktadır. Olasılıksal metotlar belirli bir amaç fonksiyonu doğrultusunda global veya lokal çözümlere rastgele şekilde yakınsamaktadırlar. Bu faaliyet uzun zaman alan problemlerin çözümlerinde kolaylık sağlamakla birlikte kullanılan yapay zekâ

metodunun yapısına ve operatörlerine bağlı olarak da çözümün doğruluğuna etki etmektedir. Optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan ve bu çalışmada da kullandığımız olasılıksal metotlar aşağıda verilmiştir.

- Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
- Benzetilmiş Tavlama Algoritması (Simulated Annealing Algorithm)
- Diferansiyel Evrim Algoritması (Differential Evolution Algorithm)
- Yapay Arı Koloni Algoritması (Artificial Bee Colony Algorithm)
- Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (Particle Swarm Optimization Algorithm)

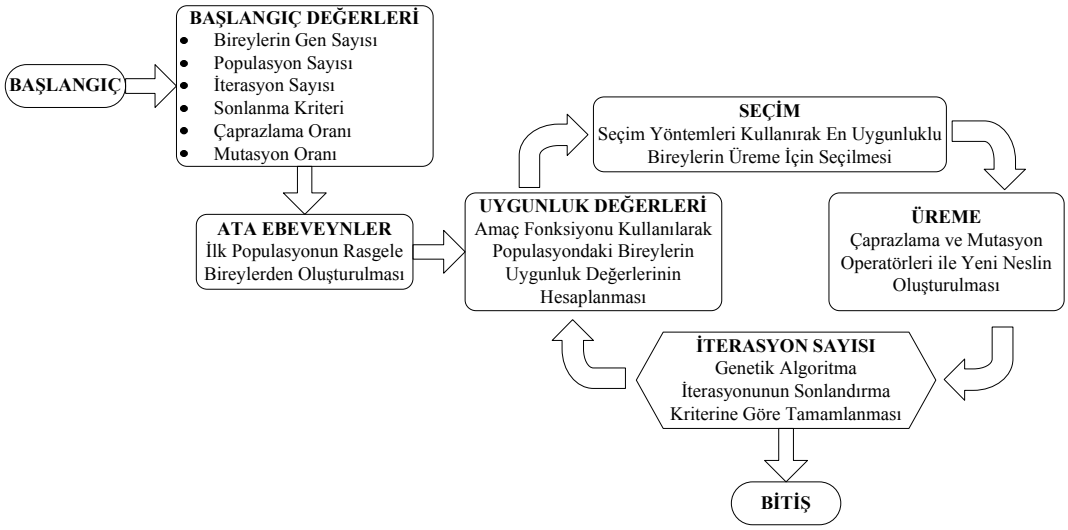
3.2. Genetik Algoritma (GA)

Teorisyeni Michigan Üniversitesi'nden John Holland olan genetik algoritmanın (GA) temel prensibi bir kolonideki bireylerin hayatta kalmak için verdikleri mücadeledir. 1970'li yıllarda John Holland tarafından ortaya konulan GA daha sonraki yıllarda David Goldberg tarafından bir kontrol probleminin çözümünde kullanılarak yaygınlaşmıştır (Goldberg, 1989).

GA'da optimizasyon probleminin çözümü için sadece bir çözüm üretilmez. Bunun yerine populasyon tabanlı bir çözüm uzayında optimizasyon probleminin optimum çözümü bulunmaya çalışılır. Bu özellikleri sayesinde GA çok geniş bir çözüm uzayını kısa sürede tarayabilir. GA'da populasyonlar birbirlerinden bağımsız bireylerden; bireyler ise problemin çözümünü içeren genlerden oluşmaktadırlar. Genlerin sayısı ve büyüklüğü ise populasyonda kullanılan giriş parametreleri ile doğrudan ilişkilidir.

Genetik algoritma karmaşık ve çok boyutlu çözüm uzayında en iyi bireyin hayatta kalması ilkesine göre global optimum çözümü aramaktadır (Michalewicz, 1996). Bunun için GA'da bireylerin genetik özelliklerinin sonraki nesillere taşınmasına karar vermek gerekmekte, bu ise uygunluk fonksiyonu kullanılarak sağlanmaktadır. Uygunluk değerleri yüksek bireyler sonraki nesillerin oluşumunda etkili olacaklar ve zayıf nesiller ise optimizasyon sürecinde mevcut populasyonda dışarıda kalacaklardır. Her bir iterasyonda gerçekleşen bu durum GA'nın optimum çözüme yakınsamasını sağlayacaktır. Optimizasyon probleminde GA ile optimum çözümün bulunabilmesi için, bireylerin probleme özgü gösterimi doğru bir şekilde yapılmalıdır ve uygunluk fonksiyonu etkin bir şekilde oluşturulmalıdır.

Genetik algoritma, optimizasyon problemlerinde global optimum çözümü bulmak icin garanti vermez ve lokal bir çözüme de yakınsayabilir. Fakat GA başlangıç çözümüne de ihtiyaç duymaz. Genetik algoritma üreme, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinden oluşmaktadır. GA'da üreme operatörü kullanılarak yüksek uygunluk değerine sahip bireylerin bir sonraki nesilde yaşama mücadelesine devam etmesi sağlanır. Bunun için populasyondaki bireylere rulet tekerleği, turnava veya diğer seçim kriterleri uygulanır. Çaprazlama operatörü rasgele seçilen iki birey arasında uygulanır ve melez bireyler oluşur. Bu operatör sayesinde daha güçlü bireylerin oluşması ve ebeveynlerin üstün özelliklerinin yeni nesillere aktarılması sağlanır. Mutasyon GA'da en son uygulanan operatördür ve mutasyon operatörü ile bireylerin gen yapısı değiştirilir. Bu sayede algoritmanın lokal çözümlere yakınsaması önlenir. Genetik algoritmanın akış diyagramı Şekil 3.2.'de verilmiştir (Rao, 2009; Michalewicz, 1996).



Şekil 3.2. Genetik algoritma akış diyagramı

GA'nın çalışma prensibi genel olarak aşağıda özetlenmiştir:

i. Ata ebeveyn olarak ilk populasyon rasgele oluşturulur. Populasyondaki birey sayısı için bir sınırlama yoktur, problemin çeşidine göre birey sayısı değişebilir.

ii. Populasyondaki bireylerin uygunluk değerleri hesaplanır. GA'nın başarısı uygunluk fonksiyonunun hassasiyetine bağlıdır. Eşleşme havuzu oluşturulurken uygunluk değerleri esas alınır ve çeşitli seçim yöntemleri kullanılır.

iii. Seçilen bireyler eşlenerek yeniden kopyalama ve değiştirme uygulanır. Eşleşme havuzunda bulunan bireylerin genlerinin çaprazlanması ve yeni bazı bireylerin genlerinin mutasyona uğraması sağlanır.

iv. Uygunluk değerleri yüksek yeni bireylerin uygunluk değerleri düşük ebeveynlerle yer değiştirmesi sağlanarak populasyonun sabit büyüklükte kalması sağlanır.

v. Daha sonra algoritma ii. adıma dönerek bireylerin uygunluk değerleri tekrar hesaplanır ve diğer adımlar tekrar edilir. Belli bir nesil sayısına kadar algoritma döngüsü devam eder. Tüm iterasyonların sonucu elde edilen nesiller içinden en iyi uygunluk değerine sahip olan birey optimum çözüm olarak kabul edilir.

GA'nın çalışma mantığı göz önünde bulundurularak evrimsel optimizasyon algoritmalarının temel karakteristikleri şu şekilde ortaya konmuştur (Karaboğa, 2011):

- Optimizasyon probleminin çözümlerini ifade eden populasyondaki bireylerin genetik kodlu gösteriminin sağlanması
- Optimizasyon probleminde ebeveyn bireyleri (ilk populasyon) oluşturacak yöntemin belirlenmesi
- Populasyondaki bireyler arası mücadelede bireylerin uygunluk değerlerinin belirleneceği amaç / uygunluk fonksiyonunun elde edilmesi
- Optimizasyon sürecinde yeni bireylerin elde edilmesini sağlayacak operatörler
- Populasyon ve iterasyon büyüklüğü gibi GA'da işleyişi kontrol etmeyi sağlayan değerler

3.3. Benzetilmiş Tavlama Algoritması (BTA)

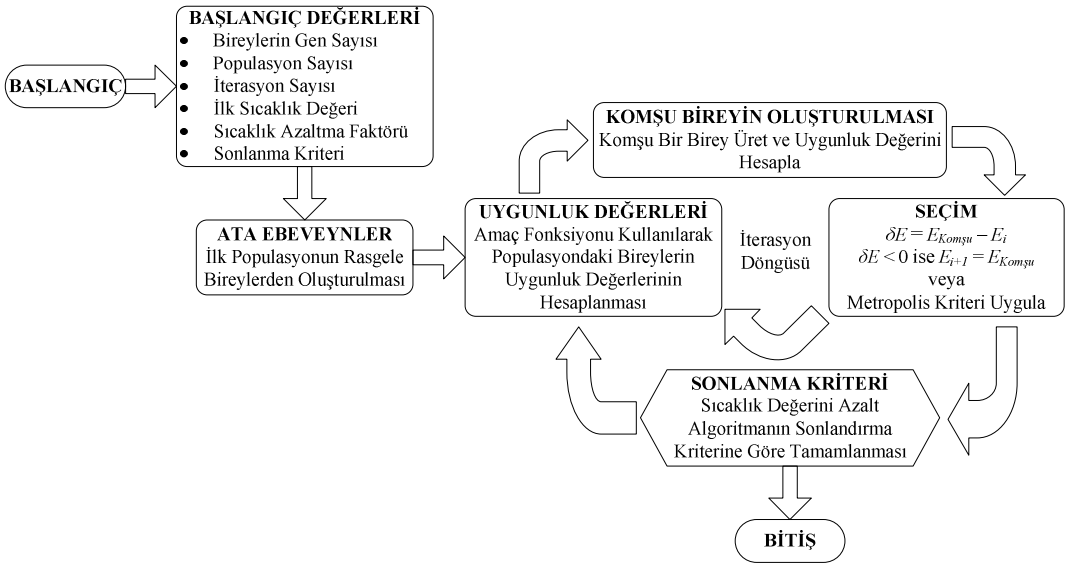
Benzetilmiş tavlama algoritması (BTA) tek çözümün geliştirildiği bir yapay zekâ tekniğidir. Kirkpatrick ve ark. (1983) tarafından lineer olmayan problemlerin çözümü için geliştirilen BTA temel prensibini istatistiksel bir yaklaşım olan "**Metropolis**" algoritmasından almaktadır.

Metallerin oda sıcaklığından çok daha yüksek bir sıcaklık değerine kadar ısıtılıp daha sonra düzenli bir şeklide soğutulması işlemine "**tavlama**" denmektedir. Metallerin moleküler yapılarındaki kararlılığını sağlamak amacıyla soğutma işlemi oldukça yavaş uygulanmaktadır. Bu sayede metaller yüksek enerji seviyelerindeki kararsız yapıdan uzaklaşarak düşük enerji seviyelerinde moleküler olarak daha kararlı bir yapıya kavuşurlar. Sıcaklık değerlerinin değişimlerine bağlı olarak metallerin yapısal

özelliklerindeki moleküler değişim optimizasyon işleminin de temel mantığıyla uyum arz etmektedir. Isıtılan metalin tavlama sürecinde farklı sıcaklık değerlerindeki yapısal durumu optimizasyon işleminde problemin çözümüne ve mevcut durumlardaki metalin enerji seviyeleri de bireylerin amaç fonksiyon değerlerine karşılık gelmektedir.

Genelde ilk nesil optimizasyon algoritmalarında (örneğin, genetik algoritma) lokal değerlere takılma söz konusudur. Bu durum ise global optimum çözümlerin arandığı optimizasyon problemlerinde istenmeyen bir durumdur. Benzetilmiş tavlama algoritması bu dezavantajı ortadan kaldıracak bir çalışma prensibine sahiptir. BTA'da global arama ile birlikte lokal arama da yapılmaktadır. Bu durum metalin sıcaklık değerinin azaltılmasına karşılık gelen optimizasyon algoritmasının herhangi bir enerji seviyesinden daha düşük bir enerji seviyesine geçişte sıcaklık değeri belirli bir süre değiştirilmeyerek sağlanmaktadır. Bu sayede algoritmanın lokal arama yapması da mümkün olmaktadır.

Optimizasyon algoritmalarının üstünlüğü başlangıç değerlerine bağımsızlıkla ilişkilendirilir. Yeni nesillerin oluşturulmasında ebeveyn bireylere göre minimum ve maksimum komşulukların taranabilmesi BTA'ya başlangıç değerlerinden bağımsızlık kazandırmaktadır. Bu durum için Denklem (3.1)'de verilen istatistiksel uygulamaya dayanan Metropolis fonksiyonu kullanılmaktadır. BTA'nın akış diyagramı Şekil 3.3.'de verilmiştir (Rao, 2009; Yang, 2010).



Şekil 3.3. Benzetilmiş tavlama algoritması akış diyagramı

$$\delta E = E_{i+1} - E_i$$
$$p(\delta E) = \exp(-\delta E / kT) \tag{3.1}$$

Burada, E enerji seviyelerini, δE enerji seviyeleri arasındaki farkı, T metalin sıcaklık değerini ve k "**Boltzman**" sabitini ve $p(\delta E)$ ise bireylerin amaç fonksiyonu değerlerindeki değişimi temsil etmektedir. Optimizasyon probleminin çözümünde Boltzman sabitinin değeri algoritmada kolaylık olması için genelde bir olarak alınmaktadır.

BTA'nın çalışma prensibi aşağıda özetlenmiştir (Rao, 2009):

i. BTA'da ilk olarak iterasyon sayısı gibi sabit kontrol değerleri belirlenir. Ayrıca sıcaklık azaltma faktörü ve sonlanma faktörü optimizasyon problemine göre seçilir. Bu seçimler optimizasyon süresi ve sonuçlar açısından oldukça önemlidir. Başlangıç sıcaklık değeri için ise skaler bir büyüklük girilebileceği gibi başlangıç populasyonundaki bireylerin uygunluk değerleri de girilebilir.

ii. Daha sonra ilk populasyon rasgele oluşturulur. Populasyondaki her bir bireyin uygunluk değeri hesaplanır.

iii. Seçme kriteri ile komşu birey belirlenir ve uygunluk değeri hesaplanır.

iv. Populasyondaki mevcut birey ile komşu birey uygunluk değerleri açısından değerlendirilir. Burada komşu bireyin uygunluk değeri daha iyi ise komşu birey seçilir veya Metropolis yöntemi ile karşılaştırma yapılır ve iki bireyden biri populasyonda varlığını sürdürür. Bu işleme iterasyon sayısınca devam edilir. Bu sayede lokal ve global çözümler taranmış olur.

v. İterasyonların tamamlanmasından sonra sıcaklık değeri azaltılarak tekrar iii. adıma dönülür. BTA sonlandırma kriterine kadar devam eder. Sonuçta populasyondaki bireylerinden bir tanesi optimum çözüm olarak elde edilir.

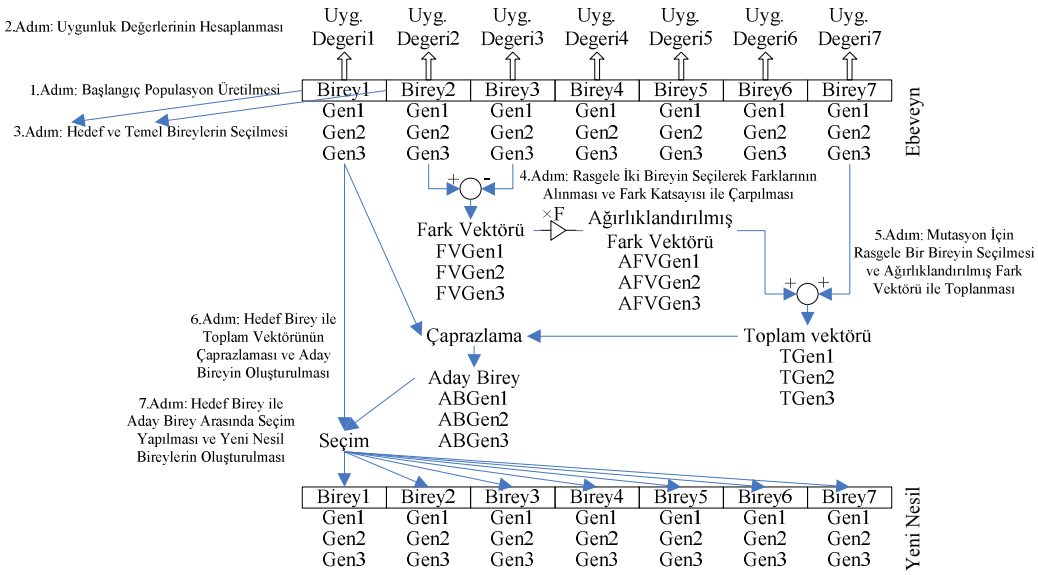
3.4. Diferansiyel Evrim Algoritması (DEA)

Yapay zekâ tekniklerinden (YZT) bir tanesi de diferansiyel evrim algoritmasıdır (DEA). İlk defa 1995 yılında global optimizasyon problemlerinde kullanılmak üzere Price ve Storn tarafından önerilmiştir. GA ile temelde benzerlik taşır. Fakat DEA'nın en dikkat çekici yönü kullandığı diferansiyel operatördür. Diferansiyel operatör ile

ebeveynlerin genleri üzerinde uygunluk değerlerini artırıcı farksal işlem yapılır. Bu sayede her bir iterasyonda populasyonun kalitesi artırılmaya çalışılır.

Yapay zekâ tekniklerinin gelişim çizgisinde optimizasyon problemine kolay uygulanabilirlik önemli bir kriterdir. Bu nedenle, DEA anlaşılabilir gerçek kod dizilimine ve çok az sayıda ayarlanması gereken parametreye sahip olduğundan dolayı üstün bir özellik sergiler. Ayrıca DEA'nın test fonksiyonları üzerindeki performansı diğer genetik tabanlı algoritmalara göre karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur ve iyi neticeler alınmıştır.

DEA'nın akış diyagramı Şekil 3.4.'de verilmiştir (Storn ve Price, 1995; Keskintürk, 2006):



Şekil 3.4. Diferansiyel evrim algoritması akış diyagramı

DEA'nın çalışma prensibi aşağıda özetlenmiştir (Rao, 2009; Storn ve Price, 1995; Keskintürk, 2006):

i. DEA'da operatörlerin çalışabilmesi için gerekli birey sayısı en az dörttür. Gerçek kodlu olarak uygulanan diferansiyel evrim algoritmasında Denklem (3.2)'ye göre başlangıç populasyonu oluşturulur.

$$\forall i \le NP \wedge \forall j \le D : x_{j,i,G=0} = x_j^{(1)} + rand_j\left[0,1\right] \times \left(x_j^{(u)} - x_j^{(1)}\right) \tag{3.2}$$

ii. DEA'da farklı mutasyon uygulamaları olmakla birlikte temel mutasyon operatörünün işleyişi için başlangıçta rasgele üç birey seçilir. İlk iki bireyden fark operatörü ve ağırlıklandırma katsayısı (F) ile ağırlıklandırılmış fark vektörü hesaplanır. Üçüncü birey ile ağırlıklandırılmış fark vektörü toplanarak mutasyon işlemi tamamlanır. Ortaya çıkan toplam vektör çaprazlama işleminde kullanılır. DEA'da mutasyon operatörünü ifade eden denklem şu şekildedir:

$$\forall j \le D : n_{j,i,G+1} = x_{j,r_3,G} + F \times \left(x_{j,r_1,G} - x_{j,r_2,G} \right) \tag{3.3}$$

iii. DEA'da çaprazlama operötürü GA'dan farklılık gösterir. Çaprazlama operatörü için mutasyonda elde edilen toplam vektör ile mevcut populasyondan hedef birey değerlendirilir. Toplam vektörün genlerinin seçilebilmesini sağlayacak rasgele üretilmiş bir sayı ile çaprazlama oranı karşılaştırılır. Bu karşılaştırma neticesinde toplam vektörün veya hedef bireyin geni aday vektöre seçilir. Ayrıca toplam vektörden en az bireyin seçilebilmesi için rasgele gen seçme operatörü Denklem (3.4) kullanılır.

$$\forall j \le D : x_{j,u,G+1} = \begin{cases} x_{j,n,G+1} & eğer\ rand[0,1] \le çr \vee j = j_{rand} \\ x_{j,i,G} & aksi\ durumda \end{cases} \tag{3.4}$$

iv. Yeni neslin oluşturulmasında bireylere ait uygunluk değerleri önemlidir. Burada çaprazlama sonucu elde edilen aday birey ile hedef birey arasında uygunluk değerlerine göre karşılaştırma yapılır. Uygunluk değeri yüksek olan bireyler yeni nesli Denklem (3.5) ile oluşturur.

$$\forall i \le NP : x_{i,G+1} = \begin{cases} x_{u,G+1} & eğer\ f\left(x_{u,G+1}\right) \le f\left(x_{i,G}\right) \\ x_{i,G} & diğer\ durumlarda \end{cases} \tag{3.5}$$

v. DEA'nın durdurulması için farklı kriterler seçilebilir. İterasyon sayısının aşılması veya populasyondaki en iyi ve en kötü bireylerin uygunluk değerlerinin farkının belli bir değerin altına düşmesi bu kriterlerden bazısıdır.

3.5. Yapay Arı Koloni Algoritması (YAKA)

Yapay arı koloni algoritması (YAKA) sürü zekâsına dayalı bir yapay zekâ tekniğidir. Sürü zekâsının en temel özellikleri görev paylaşımı ve kendi kendine organizasyondur. Görev paylaşımı ya da iş bölümü farklı işleri eş zamanlı olarak gerçekleştirmek için sürüdeki bireylerin yetenekleridir. Kendi kendine organizasyon ise hayati davranışları sürdürebilmek için bireyler arasındaki etkileşimdir. Kendi kendine organizasyon dört özellikten oluşur; pozitif geribildirim, negatif geribildirim, dalgalanmalar ve çoklu etkileşim. Bal arıları tarafından sergilenen sürü zekâsına ait kendi kendine organizasyon karakteristiklerinin ayrıntıları şu şekildedir (Karaboğa, 2005):

- Pozitif geri besleme, zengin gıda kaynaklarının aranması için bal arısı bireylerinin motivasyonudur.
- Negatif geri besleme, görevli arıların kalitesiz gıda kaynaklarını terk etmesi gibi kontrollü davranışların sağlanmasıdır.
- Dalgalanmalar, yeni bal arısı bireylerinin üretimleri gibi rastgele işlemlerdir.
- Çoklu etkileşimler, bal arıları arasında işbölümü yapmak için titreşimli danslarla gösterilen gıda kaynakları hakkında bilgi paylaşımını sağlayan davranışlardır.

Sürü zekâsına dayanan yapay arı algoritmaları yaklaşık olarak son on yıl içinde incelenen bir yapay zekâ tekniğidir. Diğer sürü optimizasyon algoritmalarının canlıların yaşamsal davranışlarının benzetimi gibi, YAKA da kraliçe bal arısının davranışı ve diğer arıların dansları ve çoğalmaları gibi hayati arı davranışlarının benzetimini yapar. YAKA, arıların yiyecek arama davranışlarının benzetimi ile ortaya konmuştur. Bu nedenle YAKA gıda kaynakları, görevli arılar ve işsiz arılar olarak üç temele dayanmaktadır. YAKA için bazı varsayımlar Karaboga (2011) tarafından önerilmektedir:

- Her bir nektar kaynağı sadece tek bir bal arısına aittir, görevli arıların sayısı gıda kaynaklarının sayısına eşittir.
- Görevli arıların sayısı gözcü arıların sayısına eşittir.
- Nektar kaynağı biten bir görevli arı kaşif bir arıya dönüşür.
- Gıda kaynaklarının yerleri yapay arı koloni algoritmasının olası çözümlerini sembolize eder ve nektar kaynaklarının miktarı da algoritmanın uygunluk değerlerini (çözümlerin kalitesi) temsil eder.

YAKA'da kaşif arılar kullanılarak global çözüm ve görevli ve gözcü arılar kullanılarak da lokal çözüm için dengeli bir çaba sarf edilmektedir. YAKA'nın üstün bir arama performansına sahip olmasının yanında ayrıca geleneksel optimizasyon algoritmalarından daha az sayıda operatöre ve dolayısıyla kolay bir kod dizilimine sahip olması da etkileyicidir. Karaboga (2005) tarafından geliştirilen algoritmanın kod dizilimi şu şekildedir (Akay, 2009):

BAŞLA

- Denklem (3.6)'yı kullanarak yiyecek kaynaklarını (başlangıç populasyonu) üret ve populasyonun çözüm sayacını sıfırla ($hata_i = 0$)

$$x_{ij} = x_j^{\min} + rasgele(0,1)\left(x_j^{\max} - x_j^{\min}\right) \begin{cases} i = 1,...,SN \\ j = 1,...,D \\ \text{SN}; \textit{ yiyecek kaynak sayısı} \\ \text{D}; \textit{ parametre sayısı} \\ x_j^{\max}; \text{j. parametrenin maksimum değeri} \\ x_j^{\min}; \text{j. parametrenin minimum değeri} \end{cases} \tag{3.6}$$

- **"*limit*"** değerini belirle

$$limit = (SN \times D)/2 \tag{3.7}$$

- Populasyonun uygunluk değerlerini Denklem (3.8) ile hesapla

$$uygunluk_i = \begin{cases} 1/(1+f_i), & f_i \geq 0 \\ 1/abs(f_i), & f_i < 0 \end{cases} \tag{3.8}$$

- **TEKRAR**

  FOR $i = 1$ **to** SN **DO**

  i. Görevli arılar için yeni yiyecek kaynaklarını Denklem (3.9) ile üret ve uygunluk değerlerini hesapla

$$\upsilon_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}\left(x_{ij} - x_{kj}\right) \begin{cases} i,k = 1,...,SN \\ j = 1,...D \\ \text{SN}\,;\, \textit{yiyecek kaynağı sayısı} \\ \text{D}\,;\, \textit{parametre sayısı} \\ \phi_{ij} = [-1,1] \\ \upsilon_{ij} = \begin{cases} x_j^{\min} & , \ \upsilon_{ij} < x_j^{\min} \\ \upsilon_{ij} & , \ x_j^{\min} < \upsilon_{ij} < x_j^{\max} \\ x_j^{\max} & , \ x_j^{\max} < \upsilon_{ij} \end{cases} \end{cases} \tag{3.9}$$

ii. υ_i ve x_i arasında "**greedy**" seçim metodunu uygula

iii. Eğer $uygunluk_{\upsilon_i} < uygunluk_{x_i}$ ise $hata_i = 0$; değilse $hata_i = hata_i + 1$

END

Gözcü arılar için Denklem (3.10)'u kullanarak ve uygunluk değerlerine bağlı kalarak olasılık değerlerini hesapla ve $t = 0$, $i = 1$

$$p_i = \frac{uygunluk_i}{\sum_{j=1}^{SN} uygunluk_j} \tag{3.10}$$

TEKRAR

IF $rasgele\ sayı < p_i$ **THEN**

i, ii ve iii adımları tekrar et, daha sonra $t = t + 1$

END IF

UNTIL $t = SN$

IF $\max\{hata_i\} > \textbf{\textit{limit}}$ **THEN**

Denklem (3.6) ile üretilen rasgele bir çözümle x_i 'yi değiştir

END IF

Optimum çözümü sakla

- **UNTIL** *sonlandırma kriteri*

3.6. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (PSOA)

Parçacık sürü optimizasyon algoritması (PSOA) Eberhart ve Kennedy (1995) tarafından geliştirilmiş populasyon tabanlı bir yapay zekâ tekniğidir. Algoritmanın geliştirilmesinde kuş ve balık sürülerinin hayat serüvenlerindeki yaşamsal davranışları incelenmiştir.

Yapay zekâ tekniklerinin geliştirilmesinde etkin dürtü optimizasyon algoritmalarının probleme kolay uygulanabilirlik kriterini sağlamasıdır. PSOA klasik optimizasyon algoritmalarına göre çok daha kolay kod dizilimine ve çok daha az parametre sayısına sahip olmasından dolayı optimizasyon problemlerinde üstün bir performans sağlamaktadır. Çünkü GA'lar gibi populasyon tabanlı olsa da PSOA çaprazlama ve mutasyon gibi operatörleri bulundurmaz ve kontrol parametre sayısı oldukça azdır.

PSOA kuş ve balık sürülerinin yiyecek arama davranışlarının benzetimine göre çalışır. Her bir iterasyon sonrası populasyondaki bireylerin uygunluk değerleri sürünün yiyeceğe yakınlık durumuyla alakalıdır. Dolayısıyla populasyondaki her bir birey sürüdeki her bir kuş veya balığı temsil eder ve "**parçacık**" olarak isimlendirilir. Bununla birlikte sürüdeki her bir kuşun veya balığın yiyecek kaynağına ya da populasyondaki her bireyin optimum çözüme yakınsaması kontrol edilir.

PSOA'da iki önemli unsur vardır. Bunlar lokal çözümlerin en iyisini gösteren "$\mathbf{p}_{\mathbf{best}}$" ve global çözümlerin en iyisini gösteren "$\mathbf{g}_{\mathbf{best}}$" değerleridir. Buradan anlaşılmaktadır ki, parçacık sürü optimizasyon algoritması genetik algoritmaların aksine hem global hem de lokal arama yapabilmektedir. "$\mathbf{p}_{\mathbf{best}}\mathbf{t}$" değeri her bir iterasyondaki en iyi uygunluk değerine sahip bireyi, "$\mathbf{g}_{\mathbf{best}}$" değeri de herhengi bir iterasyona kadar elde edilen en iyi uygunluklu bireyi göstermektedir.

PSOA'nın kod dizilimi şu şekildedir (Rao, 2009; Eberhart ve Kennedy, 1995):

i. n boyutlu ve D bireyli başlangıç populasyonu Denklem (3.11) ile üretilir

$$x = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1D} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nD} \end{bmatrix}_{n \times D} \tag{3.11}$$

Başlangıç populasyon matrisine göre i. parçacık $x_i = \left[x_{i1}, x_{i2}, ..., x_{iD} \right]_{1\times D}$ lokal en iyi birey $p_{best_i} = \left[p_{best_{i1}}, p_{best_{i2}}, ..., p_{best_{iD}} \right]_{1\times D}$ ve global en iyi birey $g_{best_i} = \left[g_{best_{i1}}, g_{best_{i2}}, ..., g_{best_{iD}} \right]_{1\times D}$ olur. Ayrıca her bir parçacığın kontrolünü sağlayan hız vektörü ise $v_i = \left[v_{i1}, v_{i2}, ..., v_{iD} \right]_{1\times D}$'dir.

ii. Her bir iterasyonda parçacıkların hız ve konum vektörleri Denklem (3.12)'ye göre bulunur.

$$\begin{aligned} v_i^{k+1} &= v_i^k + c_1 rand_1^k \left(p_{best\,i}{}^k - x_i^k \right) + c_2 rand_2^k \left(g_{best}{}^k - x_i^k \right) \\ x_i^{k+1} &= x_i^k + v_i^{k+1} \end{aligned} \tag{3.12}$$

iii. Sonlandırma kriteri sonrasında bulunan global optimum değer sonuç olarak alınır.

4. KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORLARIN (KMSM) ÖN ANALİTİK TASARIMLARININ GELİŞTİRİLMESİ

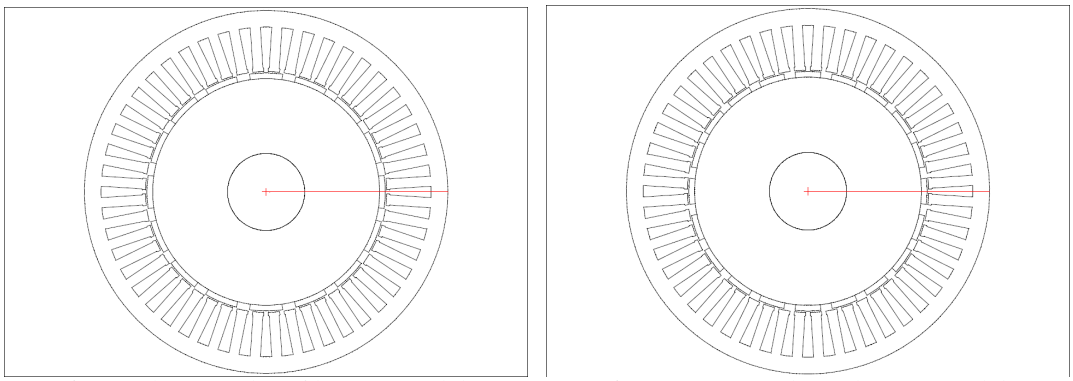
Kalıcı mıknatıslı senkron motorların endüstriyel alanlarda kullanımı gelişen sürücü ve malzeme teknolojisine paralel bir şekilde her geçen gün artmaktadır. Farklı endüstriyel alanlarda kullanılan kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım mimarileri de ihtiyaçlara ve zorunluluklara göre değişebilmektedir. Bu tercih aynı zamanda tasarımcıya da özgüdür (Aydın ve ark., 2012).

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların yapısı başlıca stator, rotor, sargılar, kalıcı mıknatıslar ve milden oluşmaktadır. Elektrik motorlarının tasarım optimizasyonlarında amaç fonksiyonunu belirleyen temel unsur tasarım sonrasında motordan beklenen performanstır. Başka bir ifadeyle elektrik motorlarının farklı kısımlarında amaç fonksiyonuna göre tasarım optimizasyon çalışması yapılmaktadır. Kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda tasarım optimizasyonu çalışmaları özellikle hava aralığı, kalıcı mıknatısların ebatları, stator olukları ve sargı yerleşimi üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bu optimizasyon çalışmaları motor veriminin iyileştirilmesi, motor maliyetinin ve ağırlığının azaltılması, moment dalgalılığının indirgenmesi gibi amaçlar için olmaktadır. Bununla birlikte kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarımlarında bazen sadece ön analitik tasarım, tasarım optimizasyonu algoritması, sonlu elemanlar yöntemi temelli sayısal analiz programları veya bunlardan birkaçı birlikte kullanılmaktadır. Bu farklılıkların temelinde tasarım maliyeti ve süresi, motorların modellenebilme kolaylığı gibi etkenler yatmaktadır.

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarımlarına yönelik çalışmalarda ve yayınlarda verilen temel bilgiler oldukça yeterli ve kapsamlıdır. Bu nedenle tez çalışmamızda tasarım optimizasyonları gerçekleştirilecek yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorların ön analitik tasarımları tasarım optimizasyon problemlerinin amaç fonksiyonuna yönelik yapılacaktır. Burada asansör taşıma sistemleri için dağıtılmış ve konsantre sargılı yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorların verimi iyileştirilmeye çalışılmış ve tasarım optimizasyonları yapay zekâ teknikleri kullanılarak yapılmıştır. Bununla birlikte elektrik motorlarının ön analitik tasarımları için oldukça fazla elektriksel, manyetik ve geometrik denklem olduğundan dolayı tasarım denklemlerinin uygun bir şekilde (katsayılar kullanılarak) en aza indirgenmesi sadelik açısından faydalı olarak görülmüştür.

4.1. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Genel Yapısı

Kalıcı mıknatıslı senkron motorlar yapıları itibariyle beş ana kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar içten dışa doğru; mil, rotor, kalıcı mıknatıslar, stator ve sargılardır. Bu çalışmada yüksek verimli motor geometrileri elde etmek amaçlandığından dolayı motorların yapıları tanıtılırken bu husus ön planda tutulacaktır. Bu çalışmada kullanılan yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorlara ait iki boyutlu motor geometrileri Şekil 4.1.'de verilmiştir.



a) Dağıtılmış sargılı / 16 kutup – 48 oluk **b)** Konsantre sargılı / 20 kutup – 48 oluk

Şekil 4.1. Yüzey montajlı KMSM geometrileri

4.1.1. Mil

Elektrik motorlarında mil ebatlarının ve özelliklerinin seçimi özellikle makine konstrüksiyonu açısından önemlidir. Elektrik motorunun elektriksel, manyetik ve termal analizinde çok fazla önem arz etmeyen bu motor kısmı üzerinde motorun mekanik analizinde hassasiyetle durulması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında tasarım optimizasyonu yapılacak kalıcı mıknatıslı senkron motorların mil seçiminde asansör taşıma sistemleri ile ilgili yönetmeliklerden, endüstriyel ve ticari gereksinimlerden istifade edilmiştir. Ayrıca tasarımı yapılacak motorların diğer ebatları mil seçiminde de etkili olmuştur. Örneğin, prototip üründen sonra farklı özelliklerdeki motorların geliştirilmelerinde ve seri üretim aşamalarında kullanılacak kalıcı mıknatıs uzunlukları ve motor paket boyları mil uzunluğunu belirlemektedir.

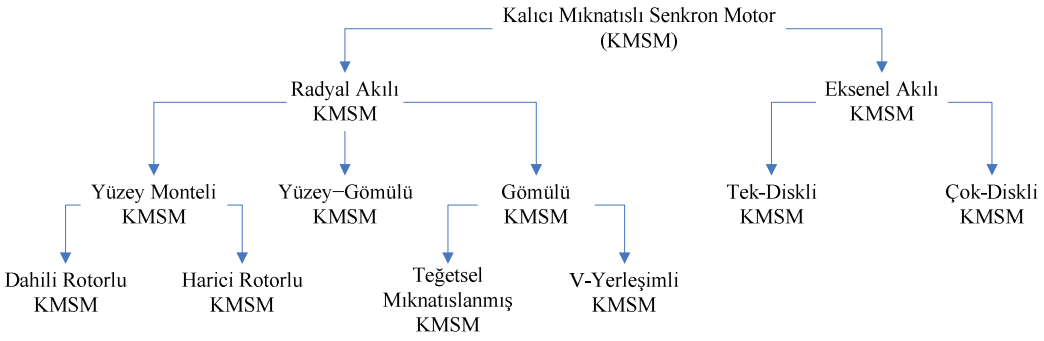
4.1.2. Rotor

Elektrik motorlarının rotor ve stator kısımları motorun elektriksel, manyetik ve termal analizinde ön planda yer almaktadır. Ferromanyetik malzemelerden seçilen bu kısımların önemleri elektrik motorlarının yapısal özelliklerine göre değişir. Asenkron motorların termal analizlerinde önemli bir unsur olan rotor kısmı düşük frekanslarda çalışan yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun termal analizinde motorun performansını çok fazla etkileyecek derece önemli değildir. Fakat kalıcı mıknatısların rotora yerleşimleri ve bunun akabinde motorun elektriksel ve manyetik analizi tasarım açısından önemlidir.

Diğer elektrik motorlarında olduğu gibi kalıcı mıknatıslı senkron motorun çıkış momentini büyük bir oranda belirleyen iki büyüklük vardır, bunlar rotorun dış çapı ve motor paket boyudur. Bu durumu gösteren Denklem (4.1)'e göre motorun mil momenti rotorun dış çapı ($Ç_{rd}$) ile eksponansiyel, motorun paket boyu (L_{rp}) ile de lineer olarak değişmektedir (Hanselman, 1994).

$$M = k_M Ç_{rd}^2 L_{rp} \tag{4.1}$$

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların rotor kısmı genelde kayıpların en az olduğu bölgedir. Kalıcı mıknatısların rotora yerleşimleri üretim aşamasında en fazla dikkat edilmesi gereken hususlardan bir tanesidir. Şekil 4.2.'deki gösterime göre mıknatısların rotora yerleşimlerine göre kalıcı mıknatıslı senkron motorlar değişik isimler almaktadır (Libert, 2004).



Şekil 4.2. Kalıcı mıknatıslı senkron motor çeşitleri

4.1.3. Kalıcı mıknatıslar

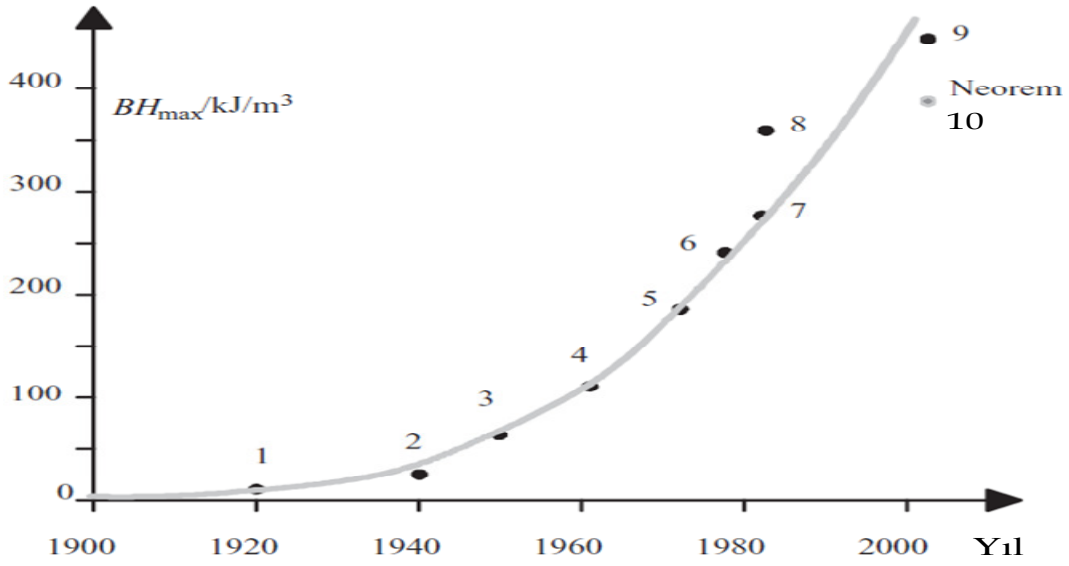
Kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda kullanılan kalıcı mıknatısların endüstriyel çalışmalarda yaklaşık yüz yıllık kullanımları vardır. Kalıcı mıknatıs üreticileri ürettikleri mıknatısların tüm özelliklerini ayrıntısıyla vermekte ve ayrıca çalışmalara özel üretim yapabilmektedirler. Kalıcı mıknatısların kalitelerindeki artıştan dolayı, özellikle 1980'li yılların ortalarında NdFeB ve SmCo mıknatısların keşfiyle kalıcı mıknatıslı senkron motorların üretimleri de hız kazanmıştır. Zira mıknatıslar hem maliyet yönüyle hem de motordan beklenen performansın sağlanması yönüyle KMSM'nin endüstriyel uygulamalarında en önemli tasarım elemanıdır.

Kalıcı mıknatıslar geçmişten günümüze keşif takvimlerine göre AlNiCo, Ferrit (seramik), SmCo ve NdFeB başlıkları altında sınıflandırılmaktadır (Şekil 4.3.) (Pyrhonen ve ark., 2008). Farklı element ilaveleriyle kaliteleri artırılmaya çalışılan kalıcı mıknatısların genel özellikleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir (Miller, 1989).

Çizelge 4.1. Kalıcı mıknatısların özellikleri

Özellik	Birim	AlNiCo5(-7)	Ferrit	Sm_2Co_{17}	NdFeB
B_r	T	1.35	0.405	1.06	1.12
$\mu_0 H_c$	T	0.074	0.37	0.94	1.06
$(BH)_{max}$	MGOe	7.5	3.84	26.0	30.0
μ_r	H/m	1.9	1.1	1.03	1.1
Özgül Ağırlık	kg/m^3	7.31	4.8	8.2	7.4
Öz Direnç	μΩcm	47	$>10^4$	86	150
Isıl Genleşme	10^{-6}/°C	11.3	13	9	3.4
Isı Katsayısı	%/°C	−0.02	−0.02	−0.025	−0.1
Manyetik Doyum (H)	kOe	3.5	14.0	>40	>30
Metalurjik Değişme Sıcaklığı	°C	550	1080	350	200
Curie Sıcaklığı	°C	890	450	800	310

Enerji verimliliğinin ön planda tutulduğu KMSM uygulamalarında NdFeB mıknatıslar tercih edilmektedirler. NdFeB mıknatıslar üstün manyetik özelliklerinden dolayı tercih sebebi olmakta, fakat en büyük dezavantajları kırılganlıkları, sıcaklık artışından daha fazla olumsuz etkilenmeleri ve Curie sıcaklıklarının daha düşük olmasıdır. Bu durum endüstriyel uygulamalarda bir zayıflık teşkil etmekte ve motor tasarımında üzerinde önemle durulması gerekmektedir.



Şekil 4.3. Kalıcı mıknatısların tarihsel gelişimi: 1, Kobalt-Çelik; 2, FeCoV; 3, AlNiCo; 4, AlNiCo; 5, SmCo5; 6, Sm(Co, Cu, Fe, Zr)17; 7, NdFeB; 8, NdFeB; 9, NdFeB; 10, Neorem (özel bir NdFeB)

4.1.4. Stator

Stator malzeme olarak rotorla aynı özelliklere sahiptir. Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında stator kısmında en fazla çalışılan bölgeler stator ağız ve diş kısımlarıdır. Bunun nedeni hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun motorun verimine, moment dalgalılığına ve sürücü seçimine olan etkisi, sargıların stator oluklarına yerleşim şekilleri ve ayrıca kullanılan malzemedeki manyetik doyumdur.

Motorun yapısal özelliğine bağlı olarak rotor dış kısımda stator iç kısımda olabilir. Bu durumda motorun termal analizinde statorun önemi artar.

Dahili rotorlu kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda stator çap genişliğinin motorun mil gücüne etkisi olmamaktadır. Bu nedenle stator çapının asgari düzeyde küçük tutulması maliyet açısından gereklidir.

4.1.5. Sargılar

Kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda dağıtılmış (distributed) ve konsantre (concentrated) olmak üzere iki adet sargı çeşidi kullanılmaktadır. Ayrıca motorlarda güç ve moment denklemlerini iki açıdan incelemek mümkündür (Hanselman, 1994).

Makro açıdan moment denklemi;

$$M = \underbrace{\frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}}_{\substack{\text{Stator Sargısına Bağlı} \\ \text{Reluktans Moment}}} - \underbrace{\frac{1}{2} \varphi^2 \frac{dR}{d\theta}}_{\substack{\text{Kalıcı Mıknatıslara Bağlı} \\ \text{Reluktans Moment}}} + \underbrace{Ni \frac{d\varphi}{d\theta}}_{\text{Motor Momenti}} \tag{4.2}$$

Mikro açıdan moment denklemi;

$$\left.\begin{aligned} F &= BLi\sin\alpha \\ P &= Fv \\ M &= Fr \\ v &= \omega r \end{aligned}\right\} M = P/\omega \tag{4.3}$$

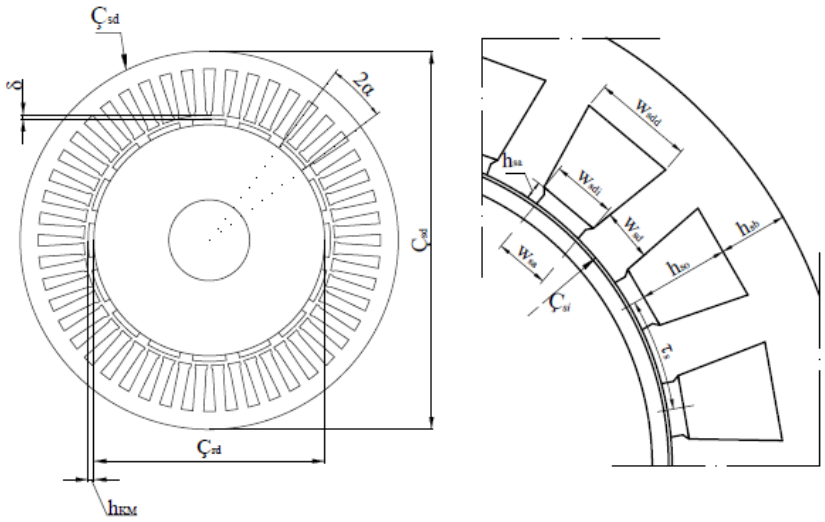
Denklem (4.2) ve Denklem (4.3)'de B manyetik akı yoğunluğunu, F kuvveti, i akımı, L indüktansı, M momenti, N bir faz stator sargı sayısını, P gücü, r yarıçapı, R relüktansı, φ manyetik akıyı, θ açısal konumu, ω açısal hızı, υ motor hızını ifade etmektedir. Moment denkleminin iki adet temel bileşeni vardır. Bunlar, motorun momentine kalıcı mıknatısların katkısını gösteren manyetik akı yoğunluğu ve sargıların sağladığı manyetomotor kuvvettir. Bununla birlikte stator sargıları indüktans ve direnç değerlerini etkilemektedir. Bundan dolayı kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda sargı düzeni ve sipir sayısı verime etki eden büyük bir faktördür.

4.2. Yüzey Montajlı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor Geometrileri

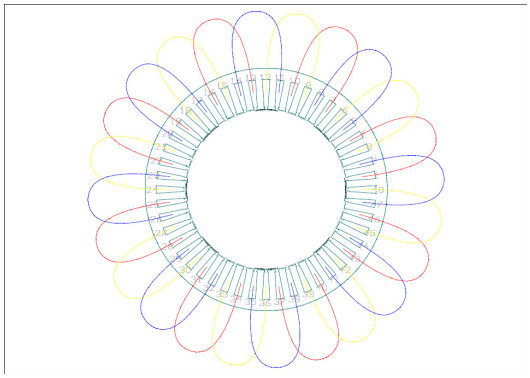
Bu tez çalışmasında tasarım optimizasyonu gerçekleştirilen yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorlar onaltı/yirmi rotor kutbuna ve kırksekiz stator oluğuna sahiptir. İki boyutlu geometrileri Şekil 4.1.'de verilmiş olan motorlar asansör taşıma sistemleri gibi düşük hızlı uygulamalar için oldukça uygundur. Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorlar demanyetize alanlara karşı zayıftır, fakat özellikle üretim kolaylığı açısından tercih edilmektedirler (Libert, 2004). Bu motorların I_d akım bileşeni sıfır değerindedir ve kalıcı mıknatıslar rotorun yüzeyine yerleştirildiklerinden dolayı bu tasarım modeli düşük hızlar için uygundur.

Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorların analitik tasarımlarına ait denklemler Şekil 4.4.'deki geometrik tasarım değişkenlerine göre verilmiştir. Ayrıca bu

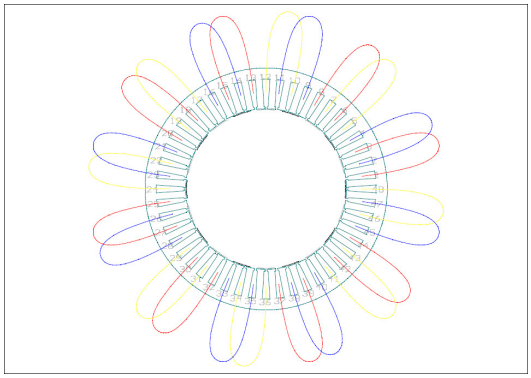
tasarım denklemlerinin elde edilmelerinde Şekil 4.5.'teki sargı yerleşimleri dikkate alınmıştır (Güemes ve ark., 2008). Tasarım optimizasyonundaki giriş parametreleri motora ait geometrik büyüklüklerden oluşmaktadır.



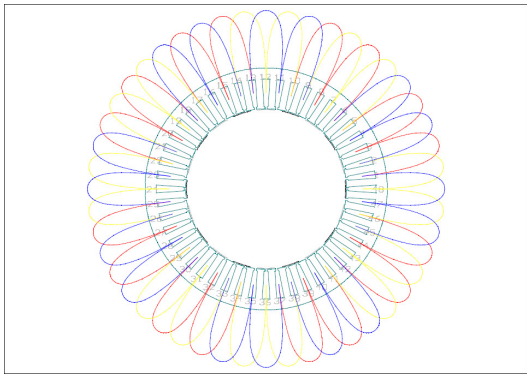
Şekil 4.4. Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun geometrik büyüklükleri



a) 16 kutup – 48 oluk



b) 20 kutup – 48 oluk (tek katmanlı)



c) 20 kutup – 48 oluk (çift katmanlı)

Şekil 4.5. Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda sargı yerleşimleri

$$Ç_{si} = Ç_{rd} + 2h_{KM} + 2\delta \tag{4.4}$$

$$\tau_s = \pi \frac{Ç_{si}}{Q_s} \tag{4.5}$$

$$w_{sdi} = \pi \frac{Ç_{si} + 2h_{sa}}{Q_s} - w_{sd} \tag{4.6}$$

$$w_{sdd} = \pi \frac{Ç_{si} + 2h_{so}}{Q_s} - w_{sd} \tag{4.7}$$

$$h_{sb} = \left(Ç_{sd} - Ç_{si} - 2h_{so}\right)/2 \tag{4.8}$$

$$k_{sa} = w_{sa}/w_{sdi} \tag{4.9}$$

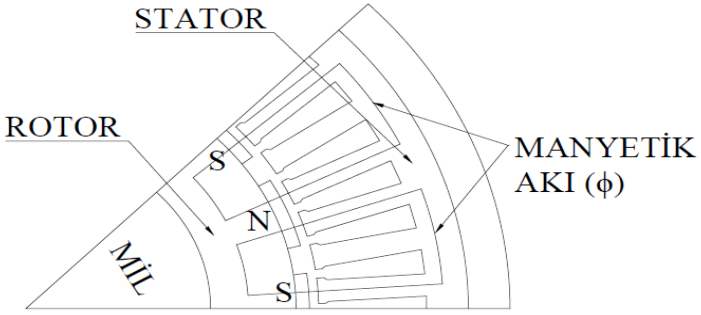
$$A_{so} = \left(w_{sdi} + w_{sdd}\right) \times \left(h_{so} - h_{sa}\right)/2 \tag{4.10}$$

Denklem (4.4) – Denklem (4.10)'da $Ç_{rd}$ rotor dış çapını, $Ç_{si}$ stator iç çapını, h_{KM} kalıcı mıknatıs kalınlığını, δ stator ve rotor arasındaki hava aralığını, τ_s stator oluk adımını, Q_s stator oluk sayısını, w_{sdi} stator dişi iç genişliğini, h_{sa} stator ağzı kalınlığını, w_{sd} stator diş genişliğini, h_{so} stator oluk kalınlığını, k_{sa} stator ağzı genişlik katsayısını, w_{sa} stator ağzı genişliğini ve A_{so} stator oluk alanını göstermektedir. Yukarıda verilen geometrik denklemler yüzey montajlı KMSM için geçerlidir. Farklı tasarım mimarilerine sahip motorlar için bu denklemler tekrar incelenmelidir.

4.3. Yüzey Montajlı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Manyetik Analizi

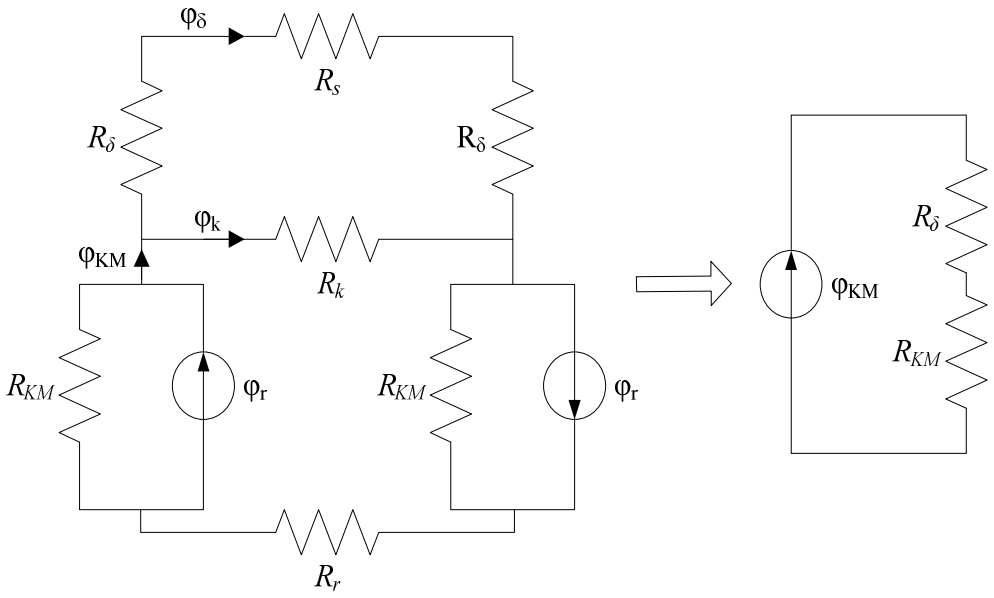
Elektrik motorlarının manyetik devre modellemelerinde en önemli büyüklük hava aralığı manyetik akı yoğunluğudur. Kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda hava aralığı manyetik akı yoğunluğu kalıcı mıknatıslar tarafından sağlanmaktadır (Libert, 2004; Hanselman, 1994). Ön analitik tasarım için hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değerinin doğru şekilde hesaplanması diğer motor parametrelerinin doğru tespit edilmesine ve ön analitik tasarım sonuçlarının, simülasyon ve deneysel sonuçlarla

uyumluluğuna olumlu etki edecektir. Bununla birlikte motor tasarımı çok değişkenli ve lineer olmayan bir optimizasyon problemi olduğundan dolayı hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun değeri tasarım optimizasyonundaki parametre sınır değerlerini de etkileyecektir. Kalıcı mıknatıslı senkron motorların manyetik analizleri Şekil 4.6.'daki manyetik akı modeline ve Şekil 4.7.'deki manyetik eşdeğer devreye göre yapılmıştır (Libert, 2004; Hanselman, 1994).



Şekil 4.6. Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun manyetik akı modeli

Şekil 4.7.'deki motorun manyetik eşdeğer devresinde rotor ve stator relüktansları küçük değerli oluşlarından dolayı ihmal edilmiş ve kaçak akı relüktans değeri de bir katsayı olarak hava aralığı manyetik akı yoğunluğu denklemine dahil edilmiştir. Bu sayede motor manyetik eşdeğer devresi sadeleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Yüzey montajlı KMSM manyetik eşdeğer devresi

$$R_{KM} = \frac{h_{KM}}{\mu_o \mu_r L_{rp} w_{KM}} \tag{4.11}$$

$$R_{\delta} = \frac{\delta_e}{\mu_o L_{rp} w_{KM}} \tag{4.12}$$

Denklem (4.11) ve Denklem (4.12)'de R_{KM} kalıcı mıknatıs relüktansını, h_{KM} kalıcı mıknatıs kalınlığını, L_{rp} rotor paket boyunu, w_{KM} kalıcı mıknatıs genişliğini, R_{δ} hava aralığı relüktansını, δ_e stator ve rotor arasındaki eşdeğer hava aralığını göstermektedir. Mıknatıs ve hava aralığı relüktans denklemlerinde kullanılan $L_{rp} w_{KM}$ ifadesi kalıcı mıknatısın yüzey alanını temsil etmekte ve rotor ile stator arasındaki manyetik akının katettiği eşdeğer hava aralığı uzaklığı ise "**Carter**" katsayısı ile verilmektedir (Libert, 2004).

$$\begin{aligned} \delta_e &= k_{carter} \times \delta \\ k_{carter} &= \frac{\tau_s}{\tau_s - w_{sa}^2 / \left(w_{sa} + 5\delta \right)} \end{aligned} \tag{4.13}$$

Burada, k_{carter} Carter katsayısını, δ stator ve rotor arasındaki hava aralığını, τ_s stator oluk adımını, w_{sa} stator ağzı genişliğini göstermektedir. Carter katsayısının farklı denklemlerle gösterilmesi de mümkündür (Hanselman, 1994).

$$\begin{aligned} k_{carter_1} &= \left[1 - \frac{1}{\frac{\tau_s}{w_{sa}} \left(5\frac{\delta}{w_{sa}} + 1 \right)} \right]^{-1} \\ k_{carter_2} &= \left[1 - \frac{2w_{sa}}{\pi \tau_s} \left\{ \tan^{-1}\left(\frac{w_{sa}}{2\delta} \right) - \frac{\delta}{w_{sa}} \ln\left[1 + \frac{1}{4}\left(\frac{w_{sa}}{\delta} \right)^2 \right] \right\} \right]^{-1} \\ k_{carter_3} &= \left[1 - \frac{w_{sa}}{\tau_s} + \frac{4\delta}{\pi \tau_s} \ln\left(1 + \frac{\pi w_{sa}}{4\delta} \right) \right]^{-1} \end{aligned} \tag{4.14}$$

Manyetomotor kuvvet denkleminde gerekli sadeleştirmeler yapıldığından hava aralığı manyetik akı yoğunluğu denklemi elde edilir.

$$H_m h_{KM} = \left(R_{KM} + R_\delta\right)\varphi_{\delta m} \tag{4.15}$$

$$\varphi_{\delta m} = B_{\delta m} L_{rp} w_{KM} \tag{4.16}$$

$$H_m = \frac{B_r}{\mu_0 \mu_r} \tag{4.17}$$

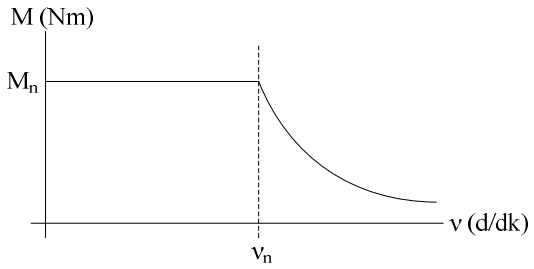
$$B_{\delta m} = \frac{B_r k_k}{1 + \dfrac{\mu_r \delta_e}{h_{KM}}} \tag{4.18}$$

Denklem (4.15) – Denklem (4.18)'de verilen simgeler Şekil 4.7.'de açık bir şekilde verilmişlerdir. Hava aralığı manyetik akı denklemindeki k_k ifadesi hava aralığında kalıcı mıknatıslar arası kaçak akı oranını göstermektedir. Aşağıda ifade edilen denklem yüzey KMSM için geçerlidir.

$$k_k = \frac{100 - \left(7 N_{2p}/60 - 0.5\right)}{100} \tag{4.19}$$

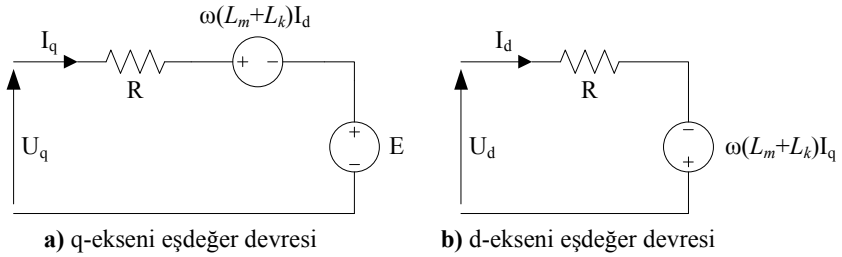
4.4. Yüzey Montajlı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Elektrik Analizi

Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda kullanılan kalıcı mıknatısların μ_r değerleri bire çok yakın olduğundan dolayı, bu motorlar çıkık olmayan kutup yapısına sahiptir. Şekil 4.8.'de verilen kalıcı mıknatıslı senkron motor moment / hız karakteristiği ve Şekil 4.9.'daki d-ekseni ve q-ekseni eşdeğer devreleri motorun elektriksel analizinde temel alınmıştır (Libert, 2004; Babr, 2007; Stening, 2006). Motorun elektriksel analizinde indüktans, direnç ve elektromotor kuvvet değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Fakat özellikle ön analitik tasarım için en önemli parametre stator sargısı sipir sayısının elde edilmesidir. Motorun elektriksel devre parametreleri nominal devir sayısı için hesaplanmıştır.



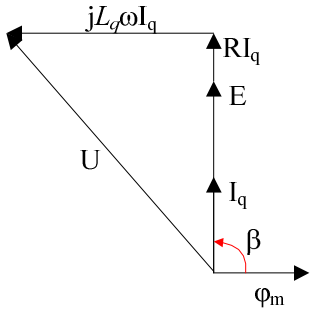
Şekil 4.8. KMSM için moment / hız karakteristiği

Motorun d-ekseni ve q-ekseni elektriksel eşdeğer devreleri kullanılarak nominal hız için fazör diyagramı Şekil 4.10.'da elde edilmiştir (Babr, 2007; Stening, 2006). Fazör diyagramının elde edilmesinde motorun çıkık olmayan kutup yapısında olduğu, I_q akım değerinin motor akımına eşit olduğu ve β açı değerinin 90° olduğu göz önünde bulundurulmuştur.



a) q-ekseni eşdeğer devresi **b)** d-ekseni eşdeğer devresi

Şekil 4.9. Yüzey montajlı KMSM elektriksel eşdeğer devreleri



Şekil 4.10. Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun elektriksel fazör diyagramı (nominal hız için)

Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun d-q eksenleri indüktans değerleri birbirine eşittir ve bu değerler aşağıdaki denklemler yardımı ile hesaplanır.

$$
\begin{aligned}
&L_k = N_{2p} q n_s^2 L_{rp} \mu_o \lambda \\
&\lambda = \frac{h_{sa}}{2 w_{sdi} k_{sa}} + \frac{h_{sa}}{2 w_{sdi} (1 - k_{sa})} \left(\ln\left(\frac{h_{sa}}{2 - 2k_{sa}} \right) - \ln\left(\frac{h_{sa}.k_{sa}}{2 - 2k_{sa}} \right) \right) \\
&L_{md} = L_{mq} = \frac{3}{\pi} \left(q n_s k_{n_s} \right)^2 \frac{\mu_o}{\delta_e + \frac{h_{KM}}{\mu_r}} \left(Ç_{si} - \delta \right) L_{rp} \\
&L_d = L_q = L_k + L_{md} = L_k + L_{mq}
\end{aligned}
\tag{4.20}
$$

Burada, L_k kaçak indüktansı, L_d d-ekseni indüktansını, L_q q-ekseni indüktansını, L_{md} d-ekseni mıknatıslanma indüktansını, L_{mq} q-ekseni mıknatıslanma indüktansını göstermektedir. Elektrik motorlarının güç üretiminde motor saç paketi içindeki sargı, yani manyetik akı tarafından kesilen stator sargısı önemlidir. Bu nedenle stator saç paketi dışındaki sargı sonu kısmı motor bakır kaybında etkili olmakla birlikte motorun mil gücüne katkısı yoktur (Hanselman, 1994). Stator sargısının her iki kısmı için direnç değerleri aşağıdaki denklemler ile ifade edilmiştir.

$$
\begin{aligned}
&R_i = \rho_{n_s} N_{2p} L_{rp} n_s^2 q \big/ f_{so} A_{so} \\
&R_d = \rho_{n_s} \left(Ç_{si} + h_{so} \right) k_{n_s} n_s^2 q \big/ f_{so} A_{so} \\
&R = R_i + R_d = \rho_{n_s} \frac{\left(N_{2p} L_{rp} + \left(Ç_{si} + h_{so} \right) k_{n_s} \right) n_s^2 q}{f_{so} A_{so}}
\end{aligned}
\tag{4.21}
$$

Denklem (4.21)'de verilen R_d stator paket dışındaki sargı direncini ve R_i stator paket içindeki sargı direncini göstermektedir. Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun elektriksel eşdeğer devresindeki en önemli büyüklük Denklem (4.22)'de verilen elektromotor kuvvetidir. Çünkü bu ifade motorun sabit moment veya sabit güç bölgesinde çalışmasını belirler. Bir başka ifadeyle motorun sabit moment bölgesinden sabit güç bölgesine geçiş sınırını belirler.

$$
E = \frac{d\varphi_m}{dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega k_{n_s} q n_s B_{\delta m} L_{rp} \left(Ç_{si} - \delta \right) \tag{4.22}
$$

"*S*" olarak verilen akım yük değeri motor için bir sınır değerdir. Denklem (4.23)'te verilen bu değer motorun çekeceği akımın belirlenmesini sağlayarak stator sargısı sipir sayısının hesaplanmasına yardım eder (Libert, 2004).

$$S = \frac{4M}{\pi\left(Ç_{si} - \delta\right)^2 L_{rp} B_{\delta m} k_{n_s} k_d \sin\beta}$$
$$n_s I = S\tau_s \tag{4.23}$$
$$J = \frac{n_s I}{A_{so} f_{so}}$$

Şekil 4.10.'daki motorun elektriksel fazör diyagramına göre Denklem (4.24) yazılır.

$$U^2 = \left(E + RI_q\right)^2 + \left(L_d \omega I_q\right)^2 \tag{4.24}$$

Bu denklemde motora ait direnç, indüktans ve elektromotor kuvvet değerleri $L_d = n_s^2 L_d'$, $L_q = n_s^2 L_q'$, $R = n_s^2 R'$ ve $E = n_s E'$ şeklinde stator sargısı cinsinden ifade edilecek olursa ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa motorun her bir oluğundaki sargı sipir sayısı hesaplanmış olur.

$$U^2 = \left(n_s E' + n_s^2 R' I_q\right)^2 + \left(n_s^2 L_d' \omega I_q\right)^2$$
$$U^2 = n_s^2 \left(E' + R'\left(n_s I_q\right)\right)^2 + n_s^2 \left(L_d' \omega \left(n_s I_q\right)\right)^2 \tag{4.25}$$
$$n_s = \frac{\hat{U}}{\sqrt{\left(E' + R' n_s I\right)^2 + \left(L_d' \omega n_s I\right)^2}}$$

4.5. Yüzey Montajlı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlarda Verim Denkleminin Elde Edilmesi

Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorların elektriksel ve manyetik analizleri yapıldıktan sonra verim denkleminin elde edilmesinde motorun bakır kaybı ve demir kaybı hesaplanır. Elektrik motorlarının demir kaybı denkleminin elde edilmesi oldukça güç bir iştir. Fakat tasarım optimizasyonu yapılan motorların frekans değeri küçük olduğundan dolayı demir kaybının verime etkisi düşüktür. Bu nedenle bakır kaybı daha önemlidir.

4.5.1. Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda bakır kaybı

Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun bakır kaybı stator faz sargı direnci ile faz akımının karesinin çarpımı şeklinde ifade edilir. Motor veriminin yüksek tutulması için bakır kaybının azaltılması gereklidir. Bu nedenle stator sargı direncinin veya stator akım değerinin azaltılması önemlidir. Bunun için optimum motor geometrisi elde etmek, üstün özellikte malzeme kullanmak ve farklı sarım teknikleri kullanmak gereklidir. Ayrıca motor akımının azaltılması sürücü seçimi ve toplam maliyetler açısından da faydalıdır (Hanselman, 1994).

$$P_B = 3 \times R_s \times I_s^2 \tag{4.26}$$

4.5.2. Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda demir kaybı

Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun demir kaybı histerezis ve fukolt kayıpları olarak ikiye ayrılır. Motorun stator ve rotor kısımlarındaki demir kayıplarının ayrı ayrı hesaplanması için bu kısımların hacimlerinin bilinmeleri gereklidir. Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun stator diş ve boyunduruk kısımları ile rotor boyunduruk kısmının hacimleri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} V_{sd} &= Q_s L_{rp} k_{dd} \left(\left(h_{so} - h_{sa} \right) w_{sd} + \left(w_{sd} + \tau_s - w_{sa} \right) \left(h_{so} - h_{sa} \right) / 2 + \left(\tau_s - w_{sa} \right) h_{sa} \right) \\ V_{sb} &= L_{rp} k_{dd} \pi \left(Ç_{sd}^2 - \left(Ç_{si} + 2h_{so} \right)^2 \right) / 4 \\ V_{rb} &= L_{rp} k_{dd} \pi \left(Ç_{ri}^2 - Ç_{mil}^2 \right) / 4 \end{aligned} \tag{4.27}$$

Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun demir kayıplarının hesaplanması için aşağıdaki denklemler kullanılır. Bu denklemlerde kullanılan k_c ve k_q değerleri motor geometrisi düzeltme faktörleridir ve değerleri sırasıyla 1.1-1.5 ve 0.7-1.4 aralığında değişmektedir (Stening, 2006). Rotor demir kaybı oldukça küçük değerde olduğu için hesaplamalarda ihmal edilmiştir.

$$P_D = P_H + P_F = k_H B^{\beta_{st}} \omega_{el} + k_F B^2 \omega_{el}^2$$
$$P_{Hsd} = k_H B_{sd}^{\beta_{st}} \omega_{el}$$
$$P_{Hsb} = k_H B_{sb}^{\beta_{st}} \omega_{el}$$
$$P_{Fsd} = \frac{12}{\pi^2} q k_F k_q k_c \left(\omega_{el} B_{sd}\right)^2 \tag{4.28}$$
$$P_{Fsb} = \frac{1}{\text{cov}} \frac{8}{\pi^2} k_F \left(\omega_{el} B_{sb}\right)^2 \left(1 + \frac{8 k_q h_{sb}^2}{27 \,\text{cov}\, q \tau_{s2}^2}\right)$$
$$\text{cov} = 2\alpha/\pi$$
$$P_D = \left(P_{Hsd} + P_{Fsd}\right) V_{sd} + \left(P_{Hsb} + P_{Fsb}\right) V_{sb}$$

Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorun bakır kaybı ve demir kaybı denklemleri elde edildikten sonra verim denklemi aşağıdaki şekilde elde edilir. Denklem (4.29), kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarım optimizasyonunda amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır.

$$\%\eta = \frac{P_Ç}{P_Ç + P_D + P_B} \tag{4.29}$$

5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Elektrik motorlarının tasarımları kısmi diferansiyel denklemler içermektedir. Bu denklemlerin çözümünde farklı sayısal metotlar kullanılmaktadır. Bu metotların en etkili ve en çok kullanılanı ise sonlu elemanlar yöntemidir. Özellikle elektrik makine tasarımı üzerine özelleşmiş pekçok profesyonel program sonlu elemanlar yöntemini esas almaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) 20yy.'ın ortalarında geliştirilmiş sayısal bir metottur. Bu yöntem ilk defa uçak gövdelerinin analizlerinde kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi günümüze kadar özellikle inşaat, makine ve elektrik mühendisliği alanlarında çok fazla kullanım imkânı bulmuş ve pekçok mühendislik probleminin çözümünde faydalanılmış etkili bir yöntemdir. Bununla birlikte sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasında sınır değer problemlerinin çözümü için uzun ve yorucu matematiksel işlemler gerekmektedir. Bu durum ise sonlu elemanlar yöntemi için ve dolayısıyla mühendislik problemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü için bir dezavantaj niteliğindedir. Fakat günümüzde bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak sonlu elemanlar yönteminin kullanımında da bir trend yakalanmıştır. Bu sayede sonlu elemanlar yöntemini kullanan genel profesyonel programlar özelleşerek çözümü istenen problemlere özgü paket programlar yaygınlaşmıştır. Örneğin, ANSYS programı farklı mühendislik disiplinleri tarafından kullanılmasına karşın FLUX-2D programı sadece elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılmaktadır.

FLUX-2D programı elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılan SEY tabanlı profesyonel programlardan biridir. Bu tez çalışmasında kalıcı mıknatıslı senkron motorların manyetik analizlerinde kullanılan FLUX-2D programı pekçok yönüyle üstün bir performans göstermektedir. Bu özelliklerden başlıcası elektromanyetik problemlerin ele alınışında söz konusu elektromanyetik modelin çizilmesidir. Bunun için farklı yöntemler halen kullanılıyor olsa da FLUX-2D programı içerisinde geliştirilen çizim kolaylıkları (OVERLAY) sayesinde motorun elektromanyetik modelinin çok kolay elde edilebiliyor olmasıdır. Bu durum ise saatlerce hatta günlerce süren çizim işlemlerinin bir kaç dakika içinde tamamlanmasını sağlamaktadır.

SEY hakkında literatürde çok fazla bilgi mevcut olduğundan dolayı tezin bu bölümünde SEY ile igili bazı temel özelliklerden bahsedilecektir. Daha sonra ise FLUX-2D programının kalıcı mıknatıslı senkron motorlara uygulanışı ile ilgili detaylı bilgiler sunulacaktır.

5.1. Maxwell Denklemleri

Elektrik makinelerinin elektromanyetik analizleri için gerekli matematiksel model Maxwell denklemlerinin kullanılmasıyla elde edilmektedir. Elektrik motorlarının manyetik analizleri için dört temel Maxwell denkleminin ifade edilmesi gereklidir (Pyrhonen ve ark., 2008; Gieras, 2010). Bu denklemler diferansiyel formda yazılırsa;

1. Elektrik alan için "**Gauss Yasası**", $\nabla.D = \rho$
2. Manyetik alan için "**Gauss Yasası**", $\nabla.B = 0$
3. Faraday'ın "**İndüksiyon Yasası**", $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$
4. "**Ampére Yasası**", $\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$

Yukarıda ifade edilen Maxwell denklemleri kısaca açıklanacak olursa; birinci Maxwell denklemi, herhangi bir kapalı yüzey alandan geçen elektrik akısının bu alandaki yük yoğunluğuna eşit olduğunu; ikinci Maxwell denklemi, herhangi bir kapalı yüzey alana giren manyetik akının bu alandan çıkan manyetik akıya eşit olduğunu; üçüncü Maxwell denklemi, bir yüzey alandan geçen manyetik akının zamana bağlı değişiminin bu yüzey alanı çevreleyen çizgi boyunca elektrik alan şiddetine ters polariteli olarak eşit olduğunu; dördüncü Maxwell denklemi ise, bir çizgi boyunca elektrik akımının ve zamana bağlı değişen elektrik akısının çizginin etrafındaki açık yüzeyde manyetik alan şiddetine eşit olduğunu göstermektedir. Maxwell denklemlerinin çözümünde sınır koşullarının belirlenmesi gerekmektedir.

5.2. Sınır Koşulları

Sonlu elemanlar yöntemi çok boyutlu karmaşık bir problemi "*sonlu eleman*" adı verilen küçük ve birbirlerine bağlı çok sayıda parçacığa bölerek çözmeye çalışmaktadır. Bununla birlikte çözümü istenen mühendislik probleminin sınırları genellikle sonsuz genişliktedir. Bu durumda söz konusu problemin çözümü zorlaşmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde sınır koşullarının kullanılmasıyla birlikte büyük boyutlu problem daha basit bir yapıya kavuşturulmuş olmaktadır. Elektromanyetik analiz problemlerinde bu durum sonlu elemanların düğümlerindeki manyetik vektör potansiyellerinin yüksek doğrulukla sağlanmasını da kolaylaştırmış olmaktadır.

SEY'de en sık kullanılan üç adet sınır koşulu mevcuttur (Gieras, 2010; Guru ve ark. 2004):

- Dirichlet sınır koşulu
- Neumann sınır koşulu
- Karma sınır koşulu

5.2.1. Dirichlet sınır koşulu

Dirichlet sınır koşuluna göre elektromanyetik bir problemin çözümünde "**s**" yüzeyini çevreleyen "**l**" çizgisindeki bir noktada manyetik vektör potansiyeli daha önce belirlenen sabit bir değere eşittir. Bu sayede elektromanyetik probleminin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü kolaylaştılır. Genel olarak elektrik motorlarının yüklü çalışmalarında Dirichlet sınır koşulu dikkate alınmaktadır.

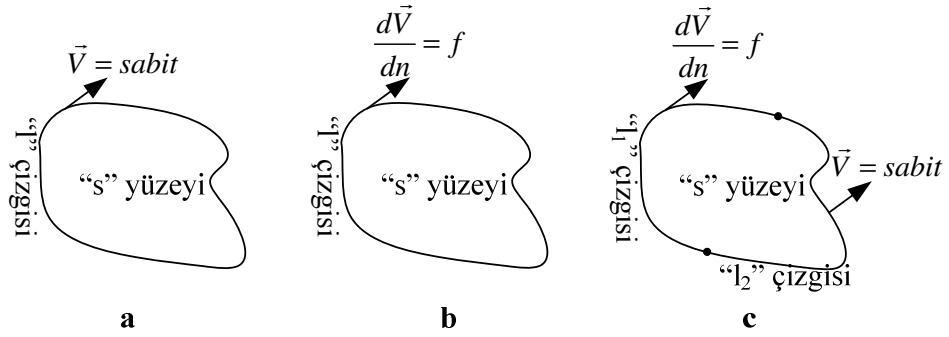
5.2.2. Neumann sınır koşulu

Neumann sınır koşuluna göre ise elektromanyetik bir problemin çözümünde "**s**" yüzeyini çevreleyen "**l**" çizgisindeki bir noktada manyetik vektör potansiyelinin türevi sıfıra veya bir fonksiyona eşittir. Neumann sınır koşulu ile sonlu elemanlar yönteminde gerçek değerlerin elde edilmesi güç olmakla birlikte ortalama sınır değer elde edilir. Bu sınır koşulu sadece elektrik motorlarının boşta çalışma analizlerinde kullanılmaktadır.

5.2.3. Karma sınır koşulu

Elektromanyetik bir problemin çözümünde Dirichlet ve Neumann sınır koşullarının birlikte kullanılmasıyla sağlanan sınır koşuludur. Sonlu elemanlar yönteminde iki düğüm arasındaki "**s**" yüzeyine ait "$\mathbf{l_1}$" ve "$\mathbf{l_2}$" çizgileri üzerindeki iki farklı noktada Dirichlet ve Neumann sınır koşullarının ayrı ayrı uygulanması şeklindedir.

Dirichlet, Neumann ve Karma sınır koşullarına ait bir gösterim Şekil 5.1.'de verilmiştir (Guru ve ark. 2004).



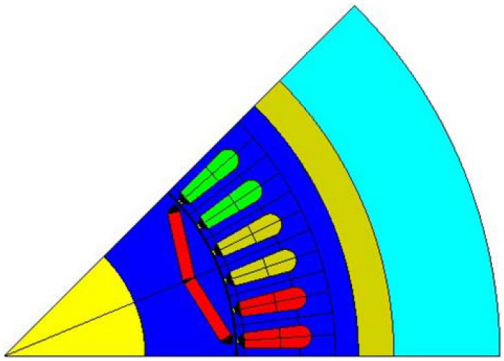
Şekil 5.1. Sonlu elemanlar yöntemi sınır koşulları **a)** Dirichlet **b)** Neumann **c)** Karma

6. KMSM'LERİN ANALİZİNDE KULLANILAN PROGRAMLAR

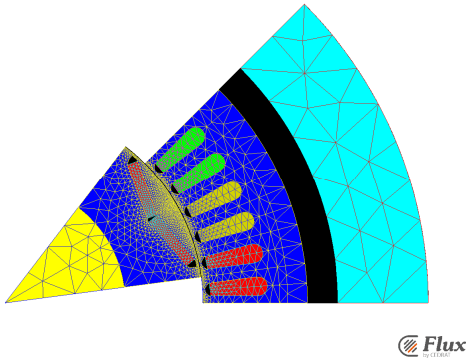
6.1. FLUX-2D Programı

6.1.1. KMSM geometrisinin çizilmesi

Sonlu elemanlar yöntemi kullanan programlarda motor geometrisinin elde edilmesi ve SEY ağ modelinin oluşturulması oldukça güç bir iştir. Aynı zamanda bu durum simülasyon sonuçlarını da etkilemektedir. Bu nedenle motor geometrisinin çizilmesi büyük bir önem arz etmektedir. Bununla birlikte elektrik motorlarının manyetik analizlerinin FLUX-2D programı ile yapılması için motor geometrisinin tamamının çizilmesine gerek yoktur. Bu işlem motorun kutup sayısı ile oluk sayısı arasındaki uygun bir kombinasyonla sağlanmaktadır. Örneğin, 8 kutuplu 48 oluklu bir kalıcı mıknatıslı senkron motorun analizinde bir kutupluk kısmın çizilmesi simülasyonlar için yeterli olmaktadır (Şekil 6.1. – Şekil 6.2.).



Şekil 6.1. 8 kutuplu 48 oluklu KMSM geometrisi



Şekil 6.2. 8 kutuplu 48 oluklu KMSM geometrisi için ağ modeli

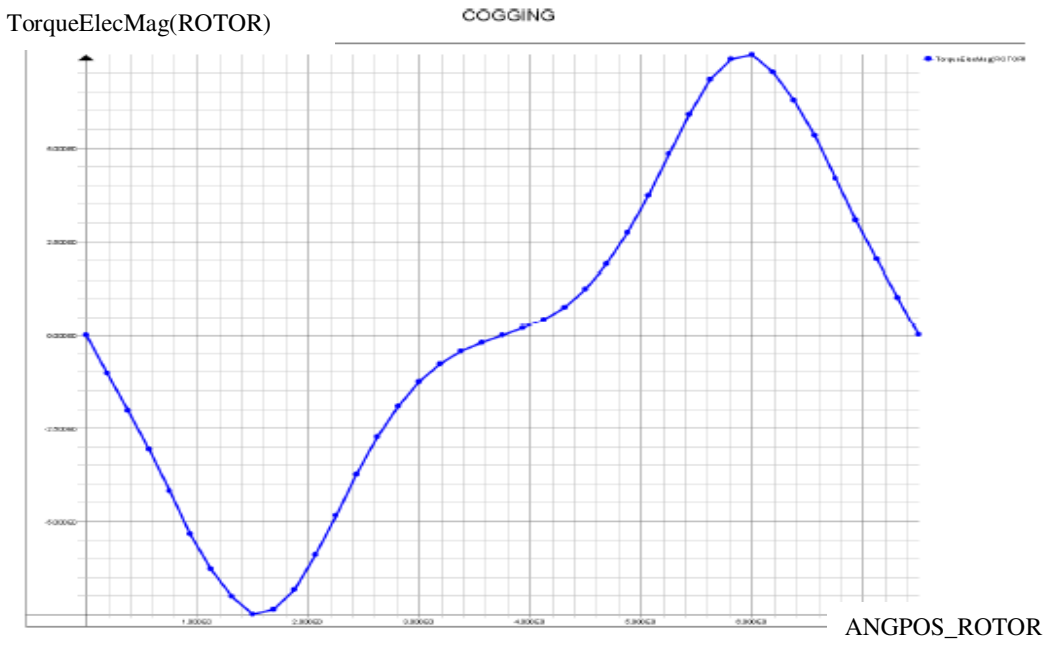
FLUX-2D programı ile motor geometrisinin çizilmesinde iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Birinci yönteme göre motorun köşe noktaları belirlenerek sırasıyla noktalar birleştirilir ve daha sonra yüzey tanımlamaları yapılmaktadır. Bu yöntem pratiklikten uzak, yorucu ve aynı zamanda hata yapılması mümkün bir süreçtir. İkinci yönteme göre motor geometrisinin çizilmesi oldukça kolay ve pratiktir. Bu yöntemde seçenekler şeklinde sunulan motor değişkenleri belirtilerek motor geometrisi hızlı bir şekilde elde edilir. Burada FLUX-2D programının "OVERLAY" menusü kullanılarak temel motor geometrisi seçilir. Daha sonra gerekli düzeltmeler yapılarak motor geometrisinin son hali elde edilir.

Kalıcı mıknatıslı senkron motorun geometrisi elde edildikten sonra SEY ile çözüm yapabilmek için temel düğümler belirlenerek ağ yapısı oluşturulur. Bu işlemler de FLUX-2D programı ile oldukça kolaylaştırılmıştır. Motor geometrisinde kullanılan kalıcı mıknatıslar, stator, rotor, hava aralığı gibi yüzeylerin karakteristiklerinin belirlenmesi de FLUX-2D programının sunduğu kolaylıklardandır.

Kalıcı mıknatıslı senkron motorun FLUX-2D programı ile analizi beş aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu bölümde tez konusu ile ilgili ilk üç kısım hakkında bilgiler verilecektir.

6.1.2. KMSM vuruntu momentinin (cogging torque) hesaplanması

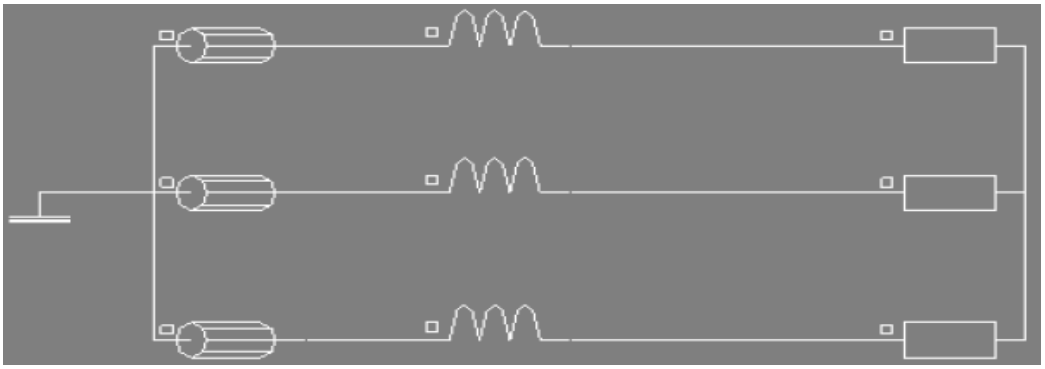
Vuruntu momenti (cogging torque) hava aralığı manyetik akısına ve relüktansına bağlı motorun relüktans momentidir. Bu moment yapısal olarak incelenmekte ve motorun çalışmasında nominal momente olumsuz etki etmektedir. Kalıcı mıknatıslı senkron motorun FLUX-2D programı ile simülasyonunda her bir aşamada farklı ayarların yapılması gerekmektedir. Vuruntu momentinin hesaplanmasında motorun mekanik birer derecelik adımlarla hareket etmesi sağlanmaktadır. İsteğe bağlı olarak bu ayar değiştirilerek daha yüksek çözünürlüklü simülasyon da yapılabilir. Elektrik motorlarının vuruntu momentinin analizinde bir periyotluk moment dalgası yeterli olduğundan dolayı ve bilgisayar hafızasını ekonomik kullanmak için uygun ayar girişlerinin yapılması yerinde olacaktır. Örneğin, 8 kutuplu 48 oluklu bir kalıcı mıknatıslı senkron motorun mekanik 7.5°'lik simülasyonu vuruntu momenti analizi için yeterli olmaktadır (Şekil 6.3.).



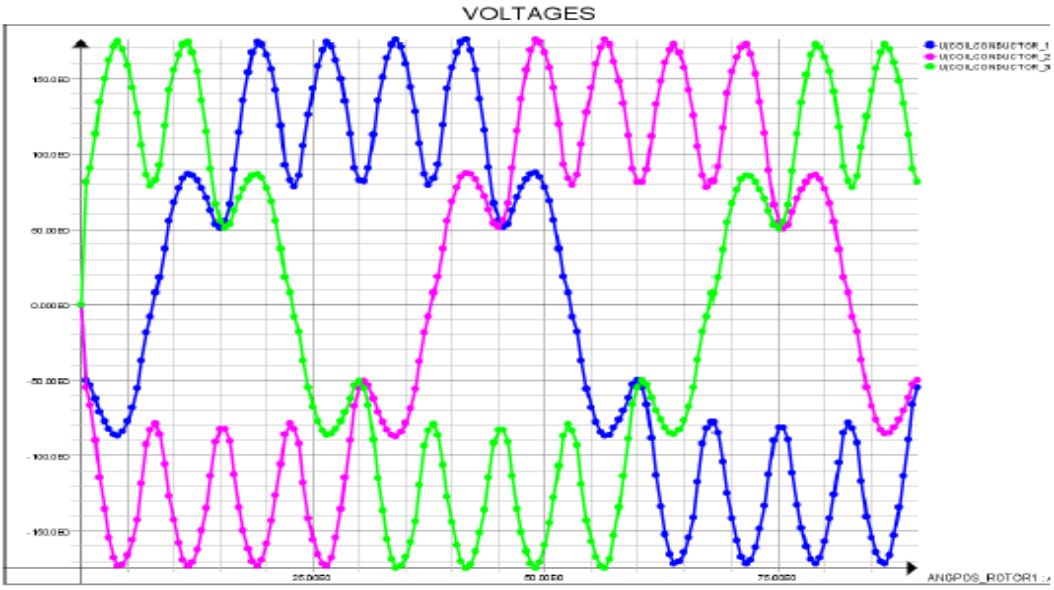
Şekil 6.3. 8 kutuplu 48 oluklu KMSM vuruntu momenti

6.1.3. KMSM elektromotor kuvvet değerinin hesaplanması

Kalıcı mıknatıslı senkron motorun elektromotor kuvvet (EMK) değerinin hesaplanması nominal hızda yüksüz iken yapılmaktadır. Simülasyon için gerekli değerler girilmekte ve ayrıca yıldız bağlantı devresi de çizilmektedir. Kalıcı mıknatıslı senkron motorlar genellikle yıldız bağlı olarak çalıştırıldığından dolayı motor sargıları, sargı sonu indüktansı ve voltmetreyi sembolize eden karakterler Şekil 6.4.'teki devrede görülmektedir. Simülasyonda elde edilen sargı gerilimleri Şekil 6.5.'de ve tek bir faz sargısına ait EMK harmonik değerleri ise Şekil 6.6.'da görülmektedir.

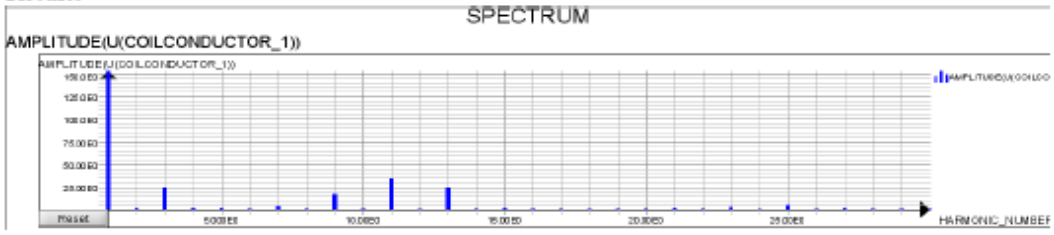


Şekil 6.4. 8 kutuplu 48 oluklu KMSM için stator sargısı bağlantı devresi



Şekil 6.5. 8 kutuplu 48 oluklu KMSM için EMK değerleri

Results

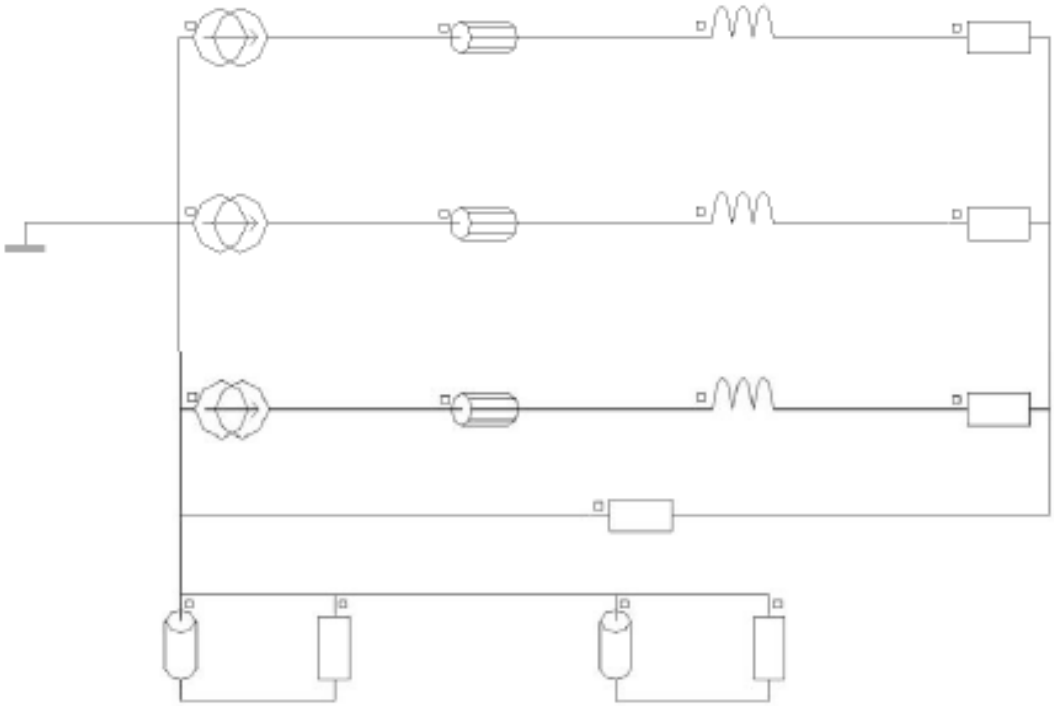


HARMONIC_NUMBER	AMPLITUDE(U(COILCONDUCTOR_1))
1.000E0	152.991E0
2.000E0	1.04182E0
3.000E0	24.2359E0
4.000E0	982.581E-3
5.000E0	1.10506E0
6.000E0	858.931E-3
7.000E0	3.80124E0
8.000E0	826.042E-3
9.000E0	16.2906E0
10.00E0	857.09E-3
11.00E0	33.9965E0
12.00E0	865.217E-3
13.00E0	24.7172E0
14.00E0	882.561E-3
15.00E0	1.8694E0
16.00E0	844.645E-3
17.00E0	889.12E-3
18.00E0	851.292E-3
19.00E0	769.967E-3
20.00E0	887.761E-3
21.00E0	1.07726E0
22.00E0	880.014E-3
23.00E0	2.21841E0
24.00E0	821.012E-3
25.00E0	4.43191E0
26.00E0	852.302E-3
27.00E0	1.35615E0
28.00E0	883.28E-3
29.00E0	876.619E-3
30.00E0	865.652E-3

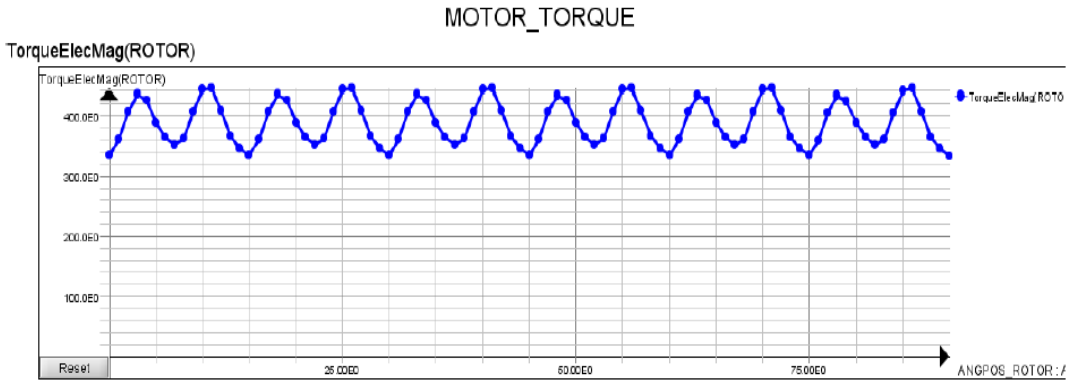
Şekil 6.6. 8 kutuplu 48 oluklu KMSM için bir faza ait EMK harmonik değerleri

6.1.4. Nominal hızda KMSM verim değerinin hesaplanması

Bu aşamada kalıcı mıknatıslı senkron motorun kayıpları ve verim değeri elde edilmektedir. Motorun elektromotor kuvvetinin eldesinde kullanılan devreden farklı olarak elektrik devresi yüklü çalışma simülasyonu için değiştirilmektedir (Şekil 6.7.). Simülasyon sonucu motorun nominal hızda yüklü çalışma momenti elde edilmekte ve verim değeri hesaplanmaktadır (Şekil 6.8.).



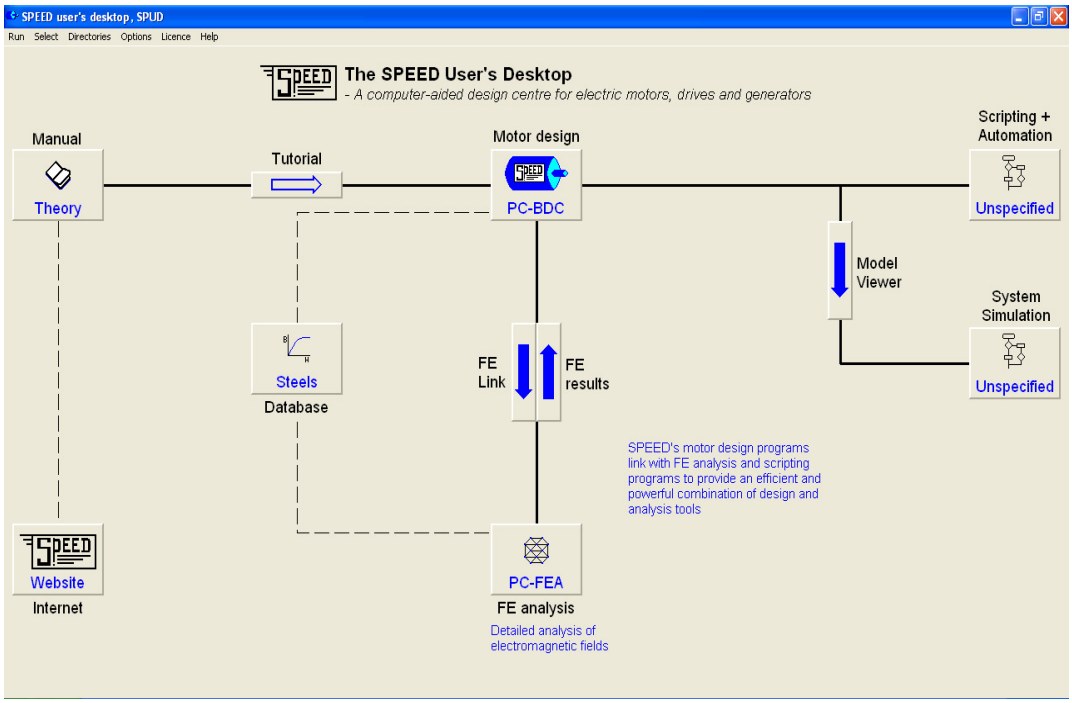
Şekil 6.7. 8 kutuplu 48 oluklu KMSM için yüklü çalışma sürücü devresi



Şekil 6.8. 8 kutuplu 48 oluklu KMSM için yüklü çalışma mil momenti

6.2. SPEED Programı

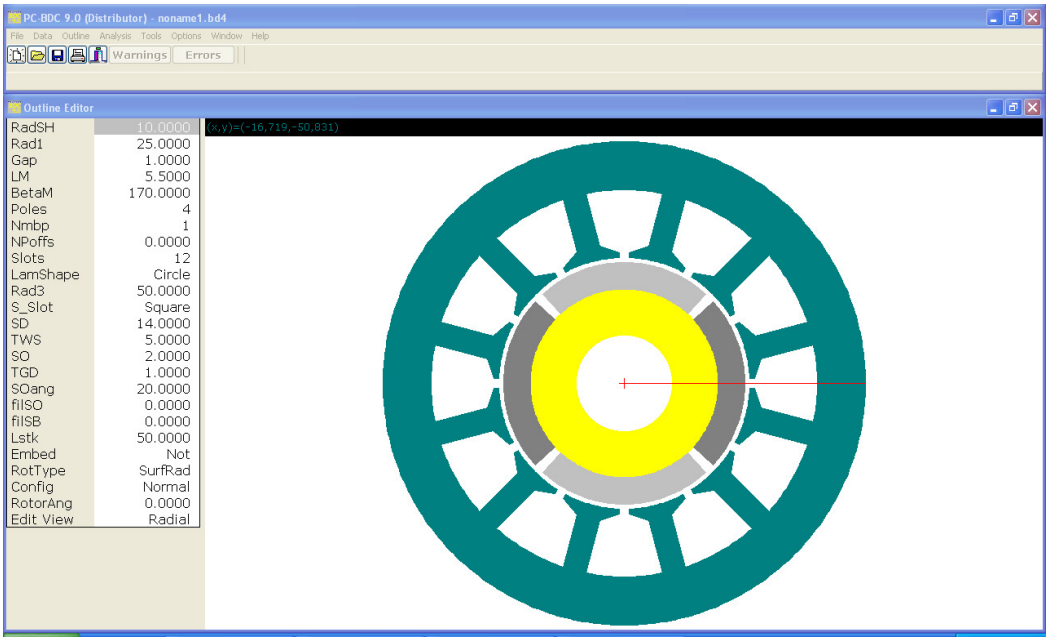
Elektrik motorlarının tasarımları üzerine yapılan çalışmalarda sonuçların doğruluğunu hızlı bir şekilde test etmek için profesyonel programlardan faydalanılmaktadır. Bu programlardan bir tanesi de SPEED programıdır. Bu program ile farklı motor modellerinin analizleri yapılabilmekte ve program içerisinde bu motorların manyetik analizini mümkün kılan sonlu elemanlar yöntemi modülü bulunmaktadır. SPEED programı arayüzü Şekil 6.9.'da gösterilmiştir. SPEED programı oldukça ayrıntılı bir yapıya sahip olduğundan dolayı programın tanıtımı özlüce tez çalışmamıza yönelik yapılmıştır.



Şekil 6.9. SPEED programı arayüzü

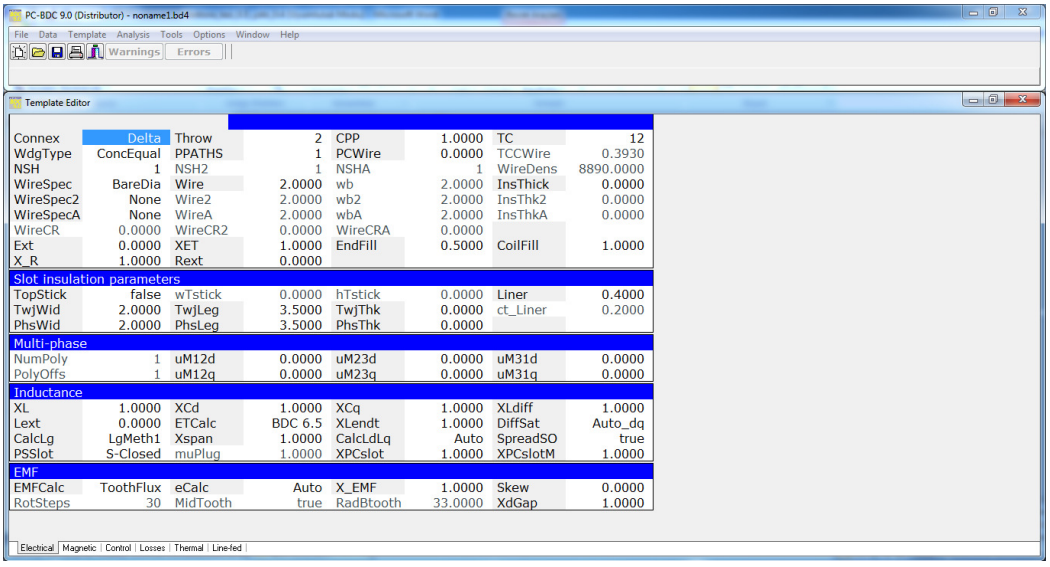
6.2.1. KMSM geometrisinin çizilmesi

SPEED programı ile motor geometrisinin elde edilmesinde program kütüphanesinde mevcut olan motor modellerinden faydalanılmaktadır. Şekil 6.10.'da verilen temel program arayüzünden de görüleceği gibi seçilen motor modeline göre çok özel çizimlerin haricinde motora ait tüm geometrik parametreler değiştirilebilmektedir.

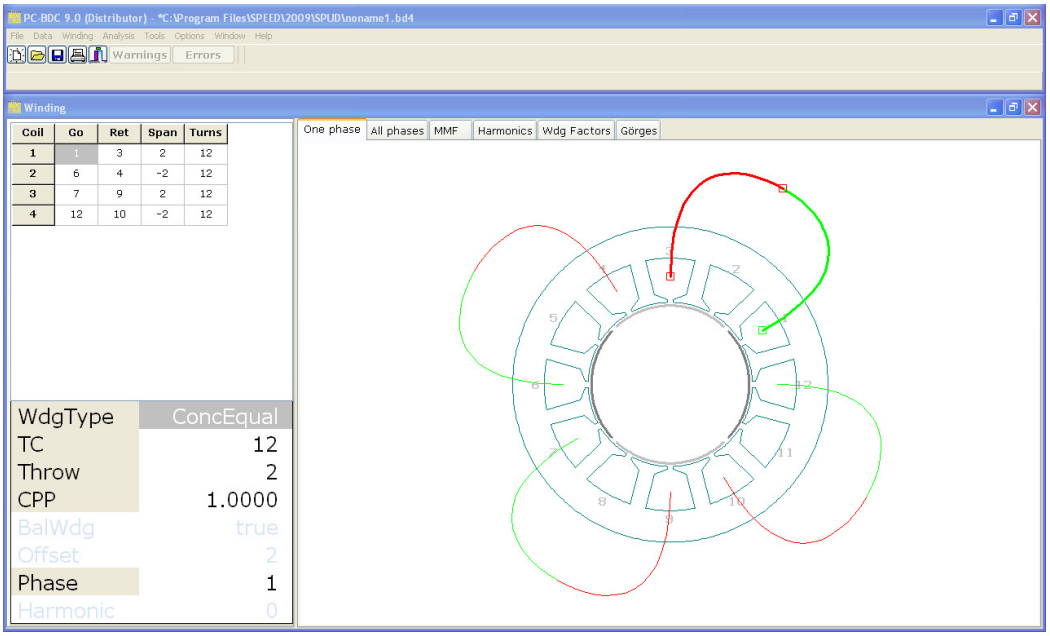


Şekil 6.10. SPEED programı anahat arayüzü (outline editor)

SPEED programının temel tasarım editörlerinden biri Şekil 6.11.'de ifade edilen şablon arayüzü ve diğeri ise Şekil 6.12.'de verilen sargı arayüzüdür. Bu editörler SPEED programının kullanımını oldukça kolaylaştırmaktadırlar. SPEED programı çok fazla parametre ile detaylı çalışma imkânı sağlamaktadır. Bununla birlikte bu durum motor tasarımına yönelik detaylı bilgilerin bilinmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle programın kitapçığının detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 6.11. SPEED programı şablon arayüzü (template editor)



Şekil 6.12. SPEED programı sargı arayüzü (winding editor)

SPEED programının şablon arayüzünde analizi gerçekleştirilecek motorun elektriksel, manyetik, kontrol, motor kayıpları, termal ve asenkron çalışma değerleri girilebilmektedir. Hassas çalışmalar için buradaki detaylar önemli olsa da motorun genel bir analiz sonucu için bazı parametrelerin seçilmesi yeterli olmaktadır.

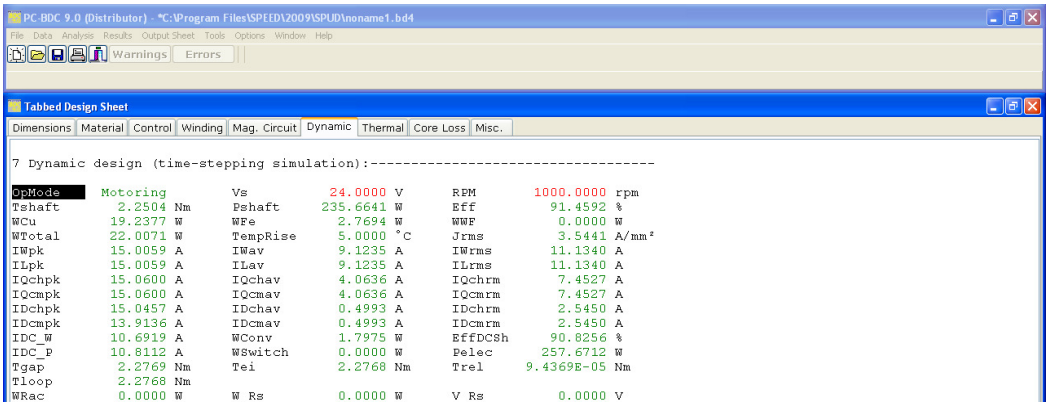
SPEED programının sargı arayüzünde ise analizi gerçekleştirilecek motorun tek fazının veya tüm faz sargılarının motora yerleşimleri görülebilmektedir. Ayrıca sargı faktörleri, sargı harmonikleri, elektromotor kuvet ve manyetomotor kuvvet gibi vektörel grafikler incelenebilmektedir. Bu editörün en üstün yanlarından biri ise sargıların stator oluklarına yerleşimlerinin kolayca değiştirilebilmesidir.

6.2.2. KMSM simülasyon sonuçlarının elde edilmesi

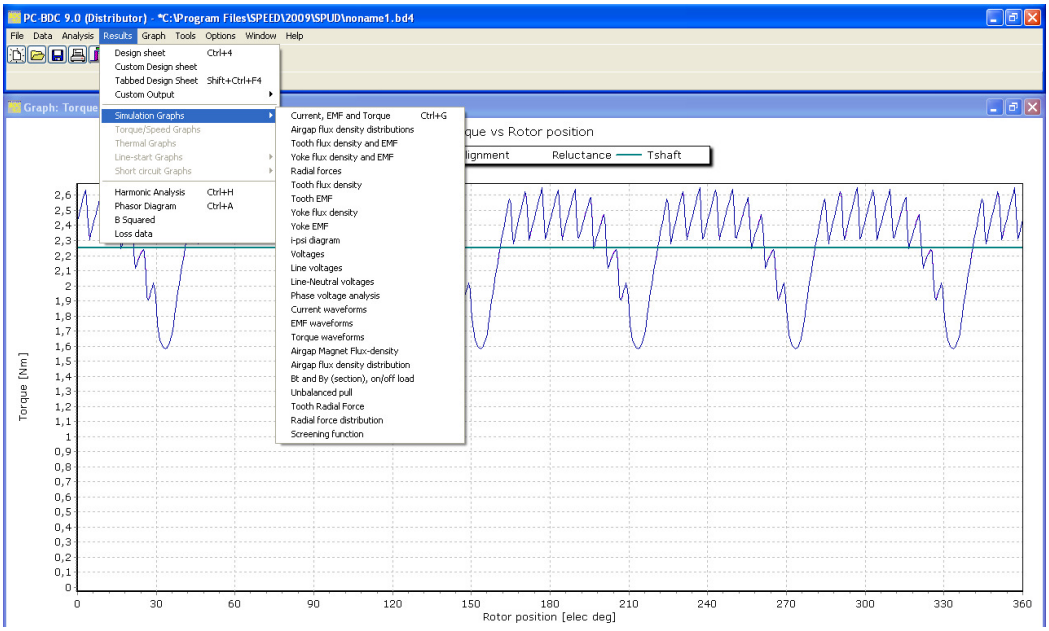
SPEED programı ile kalıcı mıknatıslı senkron motorun analitik analizinin yapılması sonrasında elde edilen sonuçlar grafik veya skaler büyüklükler şeklinde gösterilmektedir. Vuruntu momenti gibi ayrıntılı değerlerin hesaplanması için Şekil 6.11.'de gösterilen şablon arayüzünde gerekli seçimlerin yapılması gerekmektedir. SPEED programı ile yapılan simülasyon sonucunda Şekil 6.13.'te de görüldüğü gibi motora ait geometrik büyüklükler, malzeme özellikleri, kontrol değişkenleri, sargı değerleri, manyetik devre büyüklükleri, statik/dinamik analiz değerleri, termal değerler,

nüve kayıpları ve motor ağırlığı gibi daha farklı büyüklükler elde edilmektedir. Ayrıca Şekil 6.14.'te gösterilen motora ait elektromotor kuvvet, akım, moment ve hava aralığı manyetik akısı gibi analitik simülasyon sonuçları grafikler şeklinde verilmektedir.

SPEED programı ile FLUX-2D programı analiz edilecek motora ait ortak büyüklükler kullandıklarından dolayı SPEED programı ile analiz edilen motor FLUX-2D programına kolayca adapte edilmektedir. Ayrıca bu program ile analiz edilen motor termal analiz yapan MOTOR-CAD programı gibi farklı programlarla da ortak kullanılabilmektedir.



Şekil 6.13. SPEED programı simülasyon sonuçları arayüzü (tabbed design sheet)



Şekil 6.14. SPEED programı simülasyon grafikleri arayüzü

7. GELİŞTİRİLEN KMSM TASARIM PROGRAMI

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarımları uzun süreli ve çok maliyetli bir işlemdir. Motorların seri üretim aşamasına gelmeleri pekçok tasarım aşamasının gerçekleştirilmesine bağlıdır. Bu nedenle tasarım aşamaları büyük bir dikkat gerektirmektedir. Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarımlarında da diğer elektrik motorlarının tasarımlarında olduğu gibi motorun ön analitik tasarımı ile başlanmaktadır. Bu sayede motorun geometrisi ve bazı manyetik özellikleri hakkında ön bilgi sahibi olunmaktadır. Daha sonra sistemin doğruluğunu görmek için sayısal analiz programları kullanılmaktadır. Burada gerekli simülasyonlar profesyonel programlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle motorun manyetik analiz aşamasına geçilmeden önce optimum motor geometrisi üzerinde çalışmak sonraki tasarım aşamaları için gereklidir.

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında yapay zekâ tekniklerinden istifade edilmektedir. Bu tez çalışmasında da kullanılan teknikler mühendislik çalışmalarda büyük kolaylık sağlamaktadırlar. Fakat yapay zekâ tekniklerinden yeterince faydalanabilmesi için çalışılacak tasarım konusu etkili bir şekilde ifade edilebilmelidir.

Bu tez çalışmasında yüksek verimli KMSM geometrileri elde etmek için kullanılan yapay zekâ teknikleri genetik algoritma, benzetilmiş tavlama algoritması, diferansiyel evrim algoritması, yapay arı koloni algoritması ve parçacık sürü optimizasyon algoritmasıdır. Dağıtılmış ve konsantre sargılı motorların ön analitik tasarımı ve tasarım optimizasyonu için opsiyonel bir tasarım programı geliştirilmiştir.

7.1. KMSM Tasarım Programının Özellikleri

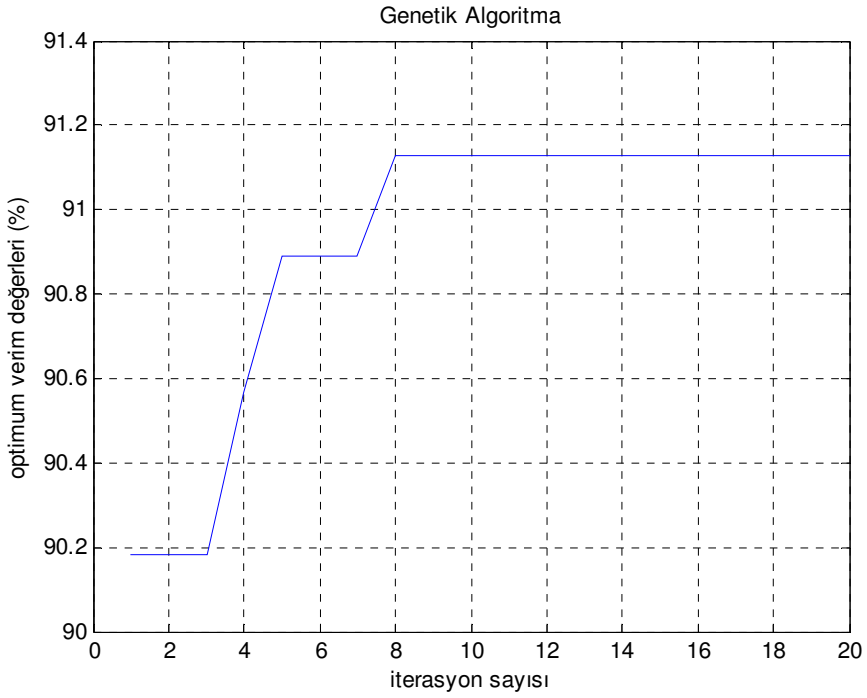
KMSM tasarım programı üç aşamadan ve üç bağımsız arayüzden oluşmaktadır. Birinci aşamada motorun ön analitik tasarımı ve yapay zekâ teknikleri ile tasarım optimizasyon yapılabilmektedir. İkinci aşamada ön analitik tasarım ve tasarım optimizasyonu sonucu elde edilen değerler kullanılarak hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, motor akımı, motor gerilimi ve motor çıkış gücü grafikleri çizdirilebilmektedir. Üçüncü aşamada motorun yapısal değişimlerinin motor performansına etkileri incelenebilmektedir. Üçüncü aşamada kutup sayısının değişimi ile motor moment harmoniklerinin veya diğer performans değerlerinin değişimi incelenmektedir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen arayüz tasarım programı MATLAB/GUI kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, Matlab programının kod yazım kolaylıklarından ve görsel kullanım özelliklerinden büyük oranda istifade edilmiştir. Her bir arayüz kısmı birbirinden bağımsız olarak da işlem gerçekleştirebilmektedir.

7.1.1. Birinci aşama

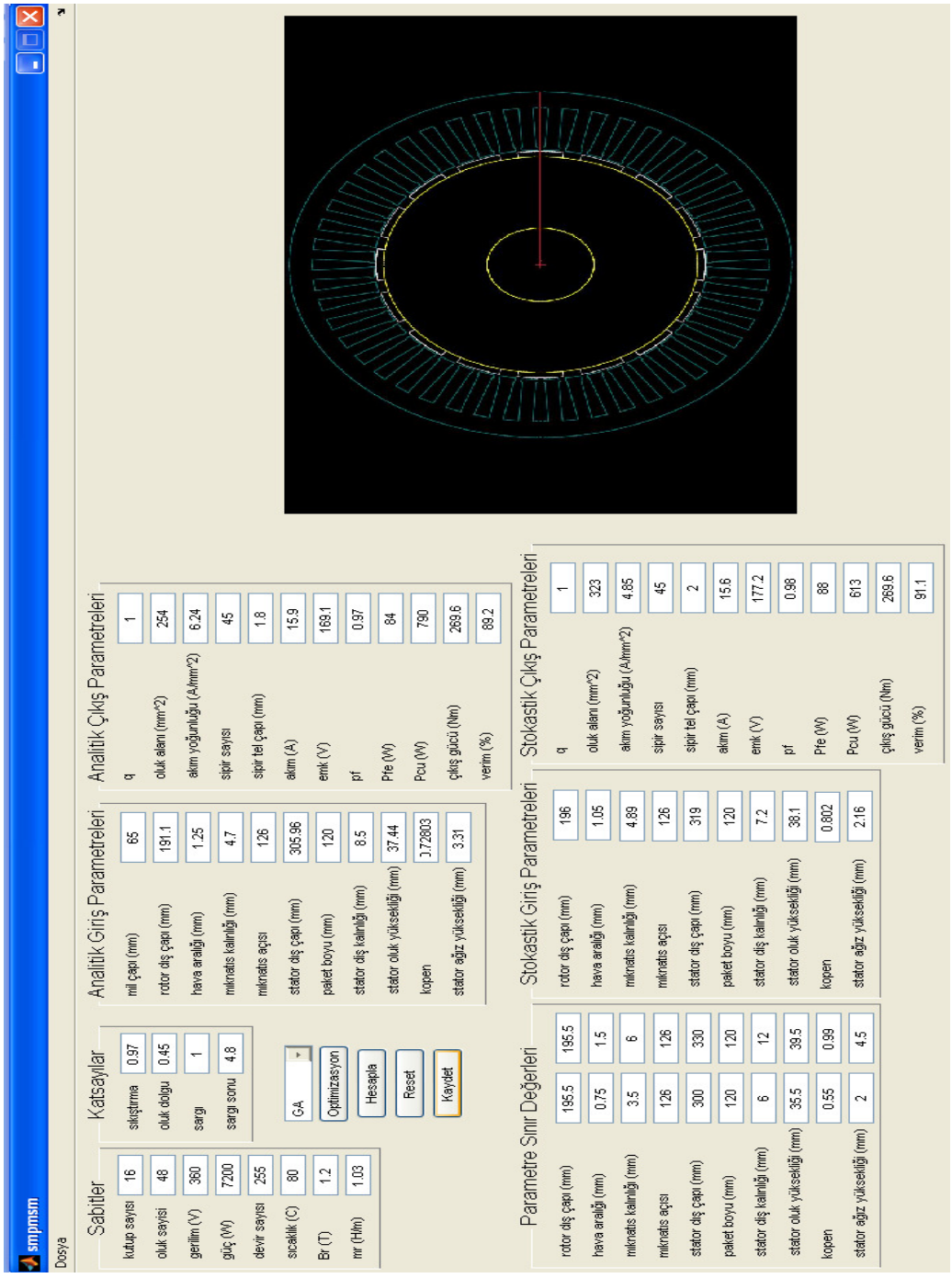
Kalıcı mıknatıslı senkron motorun ön analitik tasarımı için sabitler, katsayılar ve giriş parametreleri seçenekleri; tasarım optimizasyonu için ayrıca giriş parametresi sınır değerleri seçenekleri mevcuttur. Her iki işlem sonrası elde edilen sonuçlar aynı arayüz üzerinde görülebilmektedir. Bu sayede tasarım optimizasyonunda parametre değişimlerinin seyri görülebilmektedir.

Bu tasarım programında yapay zekâ tekniklerine ait parametreler seçmeli olarak verilmemiştir. Daha önce ifade edilen gereksinimlerden dolayı buna gerek yoktur. Fakat algoritmalar çıkış grafikleri verilerek iterasyon süresince elde edilen optimum verim değerleri takip edilebilmektedir (Şekil 7.1.). Ayrıca tasarım ve tasarım optimizasyonu sonrasında bulunan sonuçlar değiştirilerek yeni karşılaştırmalar yapılabilmektedir.



Şekil 7.1. Tasarım programı ile elde edilen optimum verim grafiği

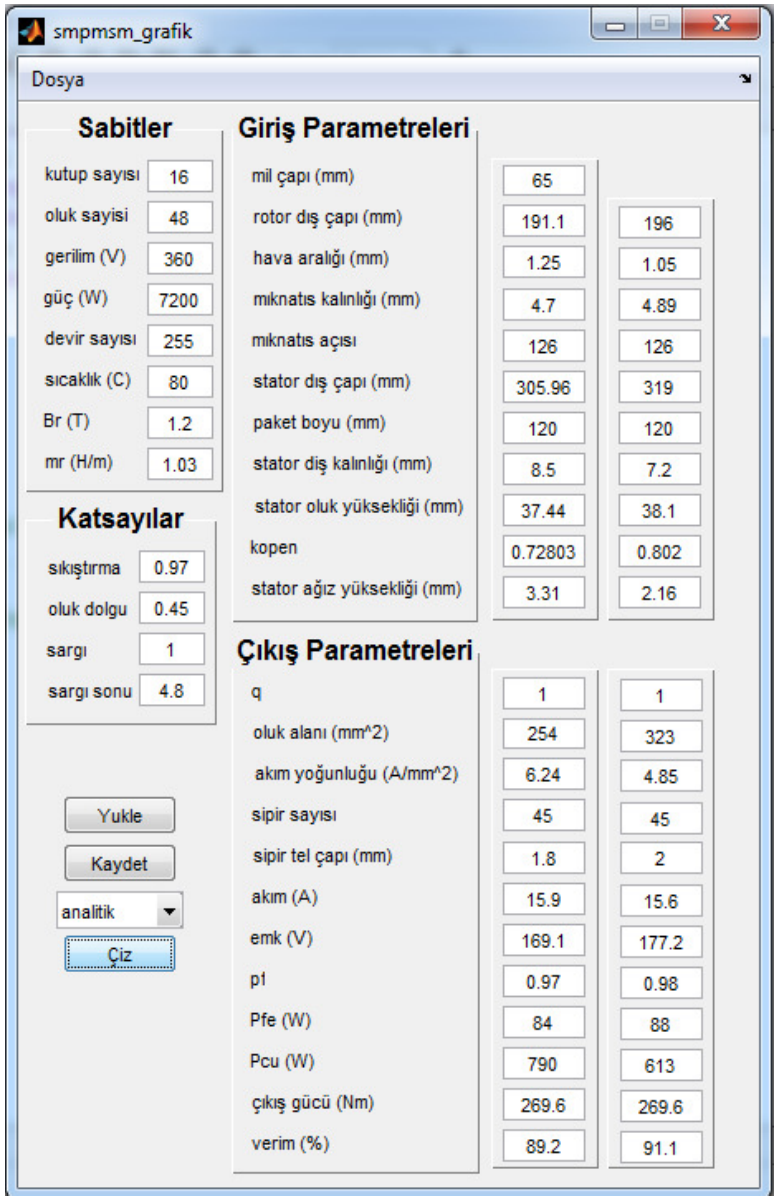
Tasarım programının birinci arayüzü Şekil 7.2.'de verilmektedir. Bu programda yapılacak işlemler sonrası elde edilen veriler silinerek tekrar hesaplamalar yapılabilir. Ayrıca sonuçlar kaydedilerek daha sonraki arayüz kısmında kullanılabilmektedir.



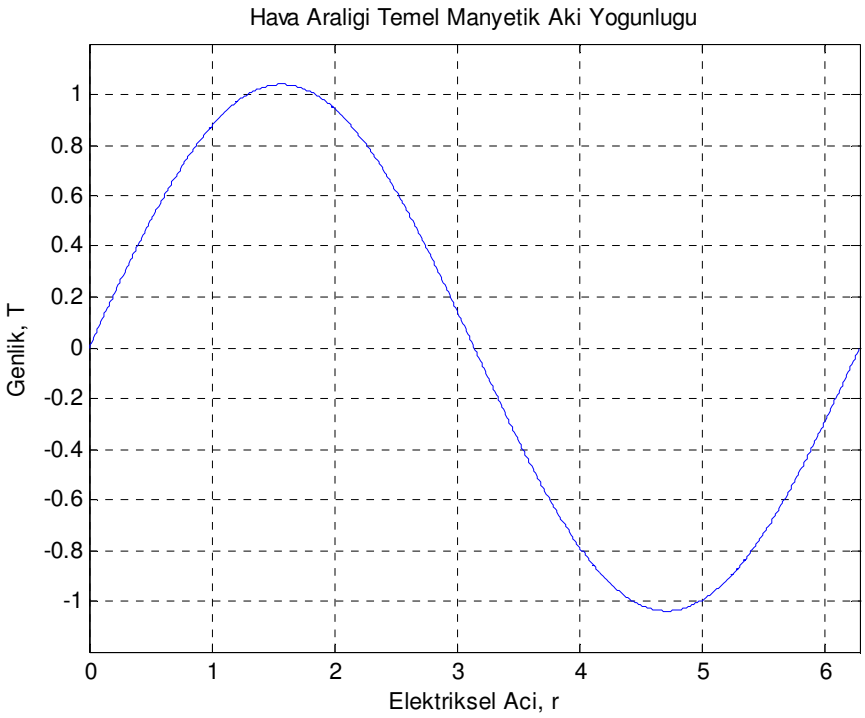
Şekil 7.2. KMSM tasarım programı birinci arayüzü

7.1.2. İkinci aşama

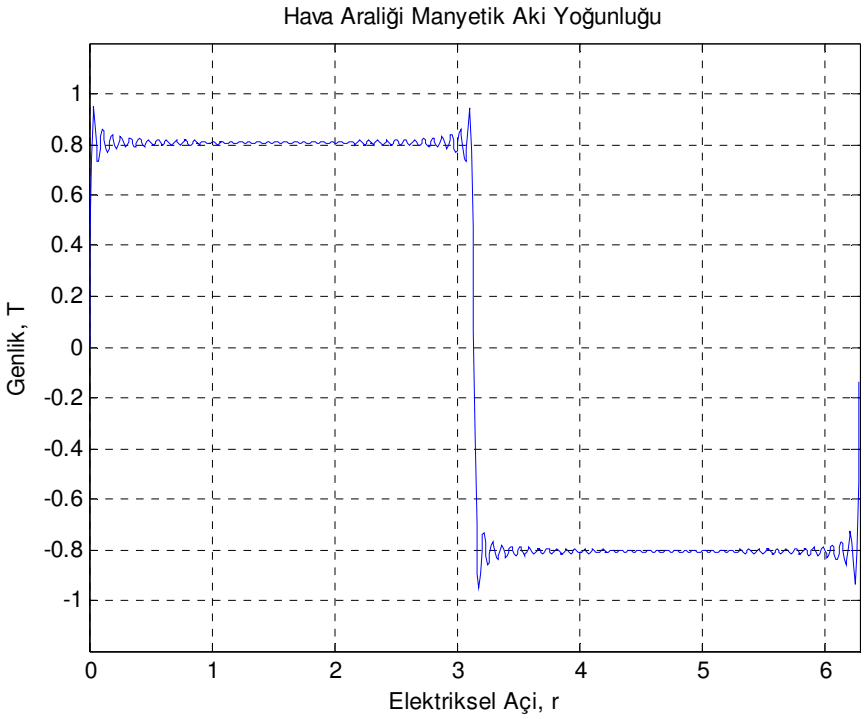
Tasarım programının ikinci arayüzü Şekil 7.3.'te verilmektedir. KMSM'nin ön analitik tasarımı ve tasarım optimizasyonu sonucu elde edilen değerler kullanılarak hava aralığı temel manyetik akı yoğunluğu, hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, motor akımı, motor gerilimi ve motor çıkış gücü grafikleri çizdirilebilmektedir. Bu sayede motorun sadece verimi incelenmemekte, daha kapsamlı analizler de yapılabilmektedir. Söz konusu grafikler Şekil 7.4. – Şekil 7.8.'de verilmektedir.



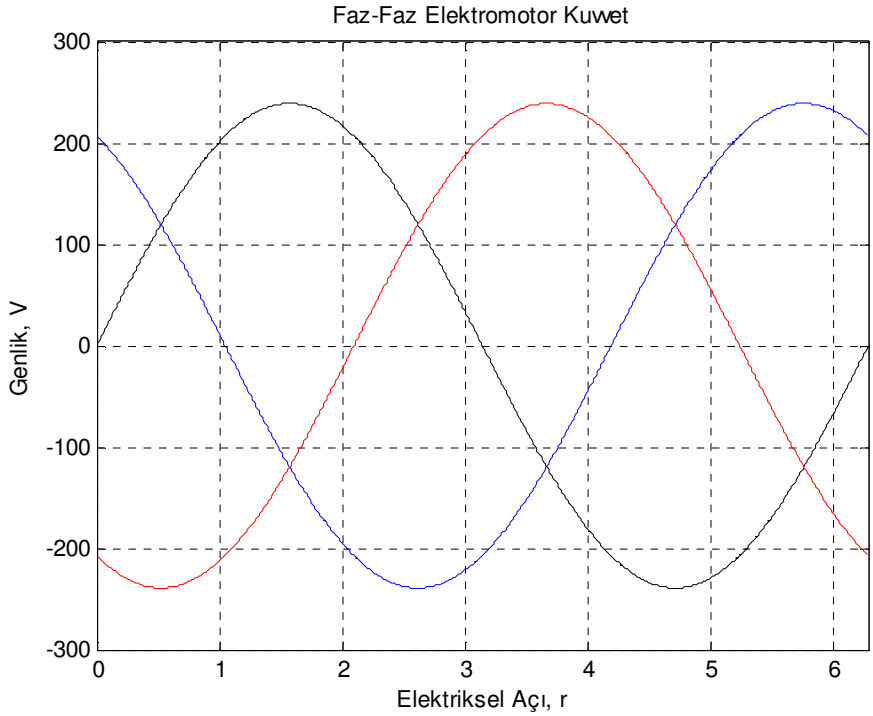
Şekil 7.3. KMSM tasarım programı ikinci arayüzü



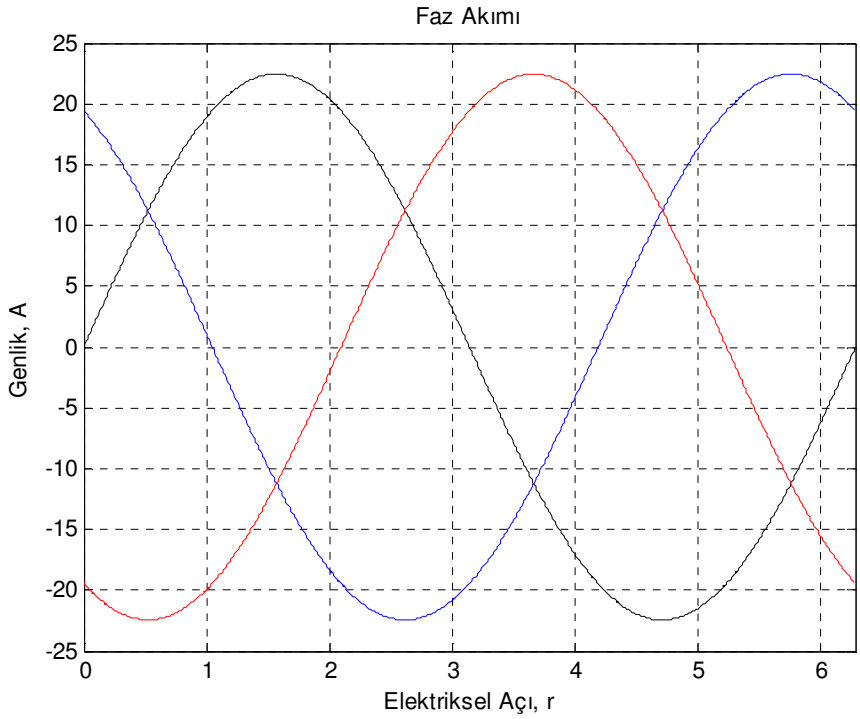
Şekil 7.4. KMSM'ye ait temel B_δ grafiği



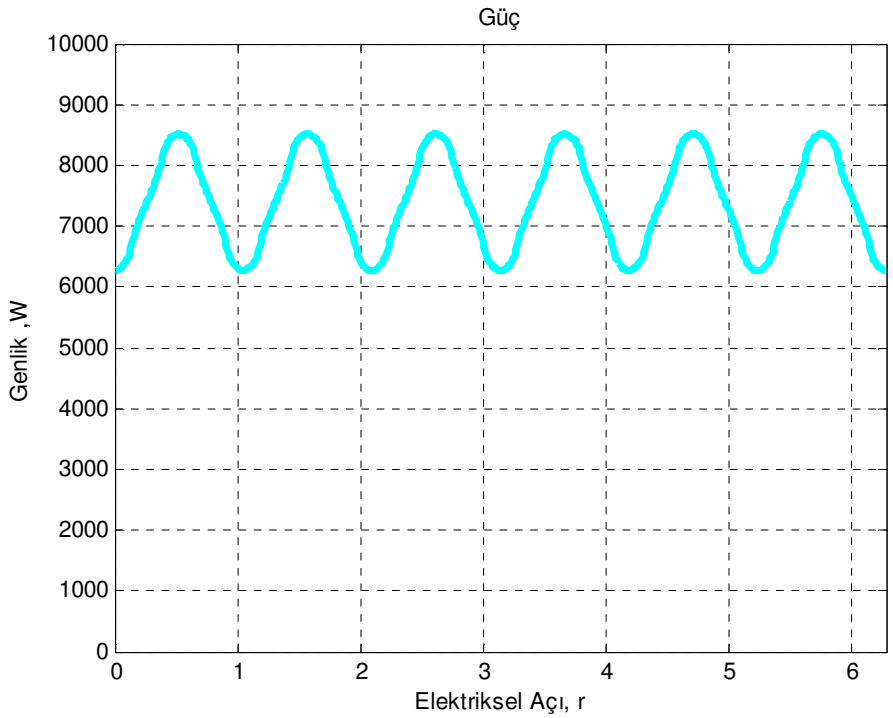
Şekil 7.5. KMSM'ye ait B_δ grafiği



Şekil 7.6. KMSM'ye ait EMK grafiği



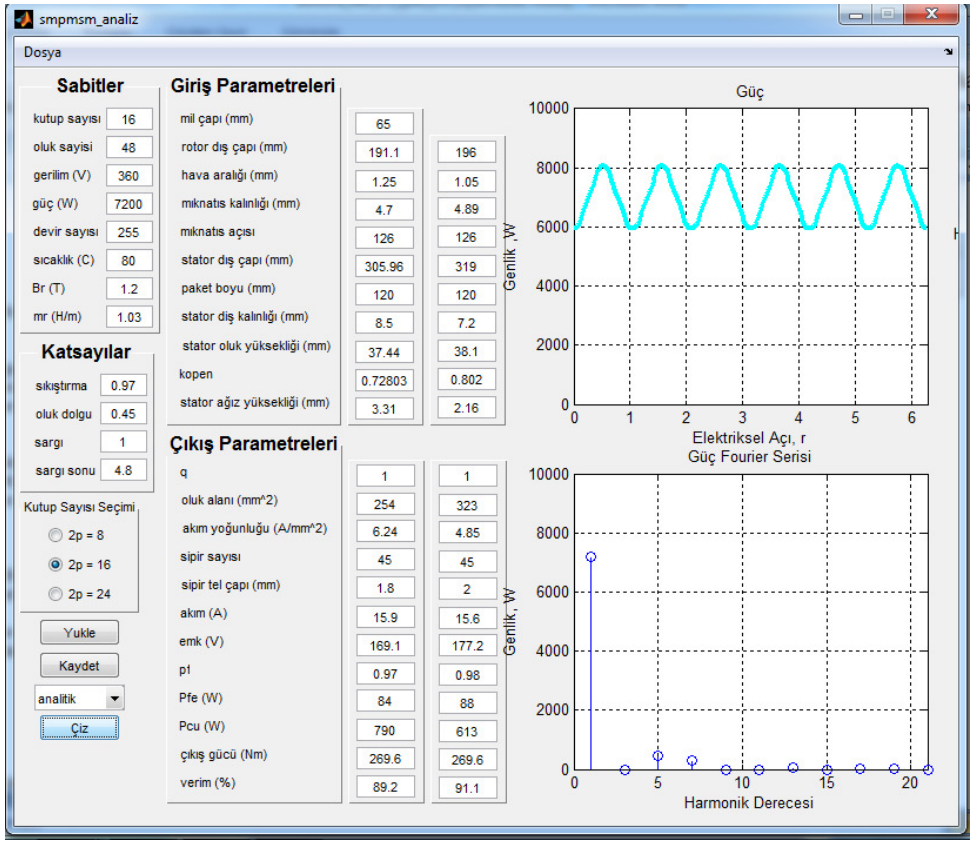
Şekil 7.7. KMSM'ye ait akım grafiği



Şekil 7.8 KMSM'ye ait güç grafiği

7.1.3. Üçüncü aşama

Tasarım programının üçüncü arayüzü Şekil 7.9.'da verilmektedir. KMSM'nin ön analitik tasarımı ve tasarım optimizasyonu sonucu elde edilen değerler kullanılarak motor çıkış gücü grafiği çizdirilebilmekte ve harmonik analizi yapılabilmektedir. Buradaki analizler sadece motor geometrisine ait tasarımsal nitelik taşımaktadır. Tasarım parametrelerinin söz konusu motor çıkış gücü grafiğine ve harmonik değerlere etkileri anlık görülebilmektedir.



Şekil 7.9. KMSM tasarım programı üçüncü arayüzü

8. KMSM'LERİN TASARIM OPTİMİZASYONLARININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Elektrik motorlarının tasarım optimizasyonlarında tasarım parametrelerini bağımlı ve bağımsız değişken olarak ikiye ayırmak mümkündür. Bağımsız değişkenler tasarım optimizasyonu giriş parametresi olarak ifade edilmekte, bağımlı değişkenler ise herhangi bir bağımlı veya bağımsız değişken cinsinden ifade edilmektedir. Bununla birlikte tasarım optimizasyonu algoritmasında giriş parametreleri için alt ve üst sınır değerleri motor performansına göre belirlenmektedir.

Tasarım optimizasyonu algoritmasında sabit değerler de bağımsız giriş değerleri olarak kullanılmaktadır. Bu değerler ön analitik tasarım aşamasında belirlenmekte ve tasarım optimizasyonu yapılacak elektrik motorunun diğer ara ve çıkış değerleri bu sayede hesaplanmaktadır.

Elektrik motorlarının tasarım optimizasyonu problemleri çok değişkenli ve lineer olmayan bir yapıda olduğundan dolayı tasarım sınır değerlerinin de konulması kaçınılmazdır. Geometrik parametre sınır değerleri birbirleri cinsinden ifade edilirlerken elektriksel ve manyetik sınır değerleri tasarım optimizasyonu algoritmasında skaler büyüklükler cinsinden gösterilmektedirler. Tasarım optimizasyonu sonucu elde edilecek elektrik motor geometrisinin başlangıç sınır değerlerinin dışında olması optimizasyon algoritmasında ceza fonksiyonları kullanılarak önlenmektedir (Çunkaş, 2004).

Bu tez çalışmasında yüksek verimli dağıtılmış ve konsantre sargılı yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motor geometrileri elde etmek için kullanılan tasarım giriş parametreleri, tasarım sabitleri ve tasarım sınır değerleri aşağıda ayrıntılı bir şekilde anlatılmış ve söz konusu motorlara ait temel büyüklükler Çizelge 8.1.'de verilmiştir. Bu çalışmada KMSM3 için elde edilen optimum geometrik parametre değerleri KMSM4, KMSM5 ve KMSM6 analizlerinde de kullanılmıştır. Bununla birlikte kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarım optimizasyonunda Denklem (4.29) amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır.

Çizelge 8.1. KMSM'lere ait temel büyüklükler

Temel Büyüklükler	KMSM1	KMSM2	KMSM3	KMSM4	KMSM5	KMSM6
Çıkış gücü (kW/Nm)	7200/270	7200/270	7200/270	2260/270	6780/405	3390/270
Çalışma gerilimi (V)	360	360	360	360	360	360
Hız (d/dk)	255	255	255	80	160	120
Kutup sayısı	16	20	20	20	20	20
Stator oluk sayısı	48	48	48	48	48	48

8.1. Tasarım Optimizasyonu Giriş Parametreleri

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında giriş parametre sayısı amaç fonksiyonuna ve tasarımcının yaklaşımına göre optimizasyon problemini en iyi ifade edecek şekilde belirlenmektedir. Giriş parametre sayısının az oluşu optimizasyon süresini kısaltmakta fakat çözüm hassasiyetini azaltmaktadır. Benzer şekilde giriş parametre sayısının çok oluşu da optimizasyon süresini artırmakta fakat optimizasyon sonuçlarının güvenilirliğini artırmaktadır.

Bu çalışmada KMSM geometrilerine ait on adet büyüklük giriş parametresi olarak seçilmiştir. Fakat bunlardan, kalıcı mıknatıslı senkron motorların moment dalgalılıklarının azaltılması için, elektriksel mıknatıs açısı; prototip ve sonrasındaki seri üretim aşamaları için ise rotor paket boyu ve stator iç çapına bağlı olarak rotor dış çapı sabit değerler olarak girilmiştir. Bu şekilde motorların giriş parametre sayısı yediye düşürülmüştür. Diğer geometrik büyüklükler ise giriş parametreleri, sabit tasarım değişkenleri ve katsayılar cinsinden ifade edilmişlerdir. Seçilen giriş parametreleri tasarım optimizasyonunda yeterli hassasiyeti sağlamaktadır. Yüzey montajlı KMSM geometrisine ait giriş parametreleri Şekil 4.4.'te daha önce gösterilmişti, Çizelge 8.2.'de ise ayrıntılı olarak verilmişlerdir.

Çizelge 8.2. Tasarım optimizasyonu giriş parametreleri

Sabit değerli	$\mathbf{Ç_{rd}}$	Rotor dış çapı
Değişken değerli	$\mathbf{h_{KM}}$	Kalıcı mıknatıs kalınlığı
Değişken değerli	$\boldsymbol{\delta}$	Hava aralığı genişliği
Değişken değerli	$\mathbf{h_{sa}}$	Stator ağız yüksekliği
Değişken değerli	$\mathbf{w_{sd}}$	Stator diş kalınlığı
Değişken değerli	$\mathbf{Ç_{sd}}$	Stator dış çapı
Değişken değerli	$\mathbf{h_{so}}$	Stator oluk yüksekliği
Değişken değerli	$\mathbf{k_{sa}}$	Stator ağız açıklığı genişliğinin stator oluk genişliğine oranı
Sabit değerli	$\boldsymbol{\alpha}$	Kalıcı mıknatısın elektriksel açı genişliği
Sabit değerli	$\mathbf{L_{rp}}$	Rotor paket boyu

8.2. Tasarım Optimizasyonu Sabitleri

Elektrik motorlarının tasarım optimizasyonlarında bazı parametre değerlerinin önceden belirlenmesi gerekmektedir. Bu değerler elektriksel ve mekanik büyüklükler olabileceği gibi kullanılacak malzemelerin özellikleri ve tasarımı gerçekleştirilecek elektrik motorunun karakteristikleri de olabilir. Kalıcı mıknatıslı senkron motorların ön

analitik tasarım aşamasında optimizasyon sabitleri ile tasarımda keyfi değişimler sağlanabilir. Fakat tasarım optimizasyonunda yapay zekâ algoritması koşulmadan önce tasarım sabitlerinin belirtilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde tasarım sabitleri de bir değişken olarak yapay zekâ algoritması içerisinde ifade edilmelidir. Bununla birlikte optimizasyon çalışmalarında, özellikle elektrik motorlarının tasarımları gibi lineer olmayan problemlerde, giriş parametre sayısını artırmak iyi bir yaklaşım değildir.

Bu tez çalışmasında tasarım optimizasyonuna ait sabit değerler Çizelge 8.3.'te ayrıntılı olarak gösterilmişlerdir.

Çizelge 8.3. Tasarım optimizasyonu sabit değerleri

Sabit Tasarım Parametresi	Simge	Değer
KM (NdFeB) manyetik akı yoğunluğu	B_r	1.2 T
KM (NdFeB) manyetik geçirgenliği	μ_r	1.03
Demir dolgu katsayısı	k_{dd}	0.97
Stator oluk dolgu faktörü	f_{so}	0.45
Sargı sonu faktörü	k_{sn}	4.8
Sargı direnci (20 °C'de)	R	1.72e-8 Ω/m

8.3. Tasarım Optimizasyonu Sınır Değerleri

Mühendislik optimizasyon problemlerinde optimal çözümü bulmak oldukça uzun süreli bir çalışmayı gerektirmektedir. Özellikle giriş parametrelerinin fazla olduğu problemlerde bu işlem daha fazla uzamaktadır. Elektrik motorlarının tasarımı gibi lineer olmayan ve parametreler arası çoklu etkileşimlerin olduğu mühendislik problemlerinde optimal çözüme ulaşmak daha çok çaba gerektirmektedir. Fakat elektrik motorlarının tasarım optimizasyonlarında giriş parametreleri ile amaç fonksiyonu arasında korelasyonların bilinmesi ve yeterli tecrübî bilgi sayesinde çözüm kolaylaşmaktadır.

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında seçilen amaç fonksiyonuna göre giriş parametreleri faklılaşmakta, ayrıca giriş parametrelerinin sonuçlar üzerindeki belirleyiciliğe de değişmektedir. Optimizasyon çalışmalarında giriş parametrelerinin birbirlerini sınırlayıcı özellikleri varsa, yani birbirleri arasındaki korelasyon değerlerine göre, bu sayede algoritma optimal çözüme kolay bir şekilde yakınsayacaktır. Fakat durum böyle değil de, bazı parametrelerin amaç fonksiyonu ile korelasyonları negatif bazılarınınki de pozitif ise ve aynı zamanda giriş parametrelerin ara değerler üzerindeki etkisi aynı yönlü ise optimizasyon çalışmasında parametre sınır değerleri daha çok önem kazanmaktadır. Başka bir deyişle optimizasyon probleminde algoritmanın çözüm uzayını bu değerler ile sınırlandırmak gerekmektedir. Aynı

zamanda bu durum optimizasyon algoritmasının operatörlerine ve çalışma yapısına da bağlıdır.

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında sınır değerlerden yararlanmak zorunluluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Burada sınır değerler elektriksel, mekanik, manyetik, termal veya maliyet şeklinde farklı bir amaç fonksiyonu olabilir. Elektrik motorlarının tasarım optimizasyonlarında sınır değerler motorun çalışma şartları göz önünde bulundurularak tasarımcı tarafından belirlenir (Aydın ve ark., 2012). Bu tez çalışmasında kullanılan sınır değerler Çizelge 8.4.'te verilmiştir.

Çizelge 8.4. Tasarım optimizasyonu sınır değerleri

Özellik	Sabit Tasarım Parametresi	Sınır Değeri
Manyetik	Stator diş maksimum manyetik akı yoğunluğu	$B_{sd} < 1.8$ T
	Stator boyunduruk maksimum manyetik akı yoğunluğu	$B_{sb} < 1.4$ T
	Rotor boyunduruk maksimum manyetik akı yoğunluğu	$B_{rb} < 1.4$ T
	Sargı sıcaklığı	80 °C
Maliyet	Motor ağırlığı	$M_{KMSM} < 150$ kg
	Mıknatıs ağırlığı	$M_{KM} < 4.5$ kg
Geometrik	Stator diş genişliği	$w_{sd} > 0.3\tau_s$
	Stator oluk kalınlığı	$0.15h_{so} < w_{sdd} < 0.5h_{so}$

8.4. Giriş Parametreleri ve Verim Arasındaki Korelasyon

Optimizasyon çalışmalarında giriş parametreleri ile çıkış arasındaki ilişkinin analizi optimizasyon sonuçlarının değerlendirilmesi açısından faydalı olmaktadır. Bu sayede optimizasyon probleminin sonuçlarına giriş parametrelerinin etkisi ortaya konarak daha sonraki çalışma aşamalarında ön tahminde bulunulması sağlanır. Optimizasyon giriş parametreleri ile amaç fonksiyonu arasındaki korelasyon giriş parametre sınır değerlerine bağlıdır.

Bu tez çalışmasında tüm motorlara ait korelasyon değerlerinin hesaplanması için yedi adet parametre seçilmiştir. Tasarım parametreleri ile motor verimleri arasındaki korelasyon değerleri herbiri ikiyüzelli hesaplama sonucuna dayanan beş ayrı değerlendirmede çıkarılmış ve değişken değerli giriş parametreleri sınır değerleri Çizelge 8.5.'te, sabit değerli giriş parametreleri Çizelge 8.6.'da ve tasarım optimizasyonu giriş parametreleri ile verim arasındaki korelasyon değerleri Çizelge 8.7.'de verilmiştir.

Çizelge 8.5. Değişken değerli giriş parametreleri sınır değerleri

Tasarım Parametresi	Sınır Değerleri	
	Alt Değer	Üst Değer
h_{KM} (mm)	3.5	6
δ (mm)	0.75	1.5
h_{sa} (mm)	2	4.5
w_{sd} (mm)	6	12
$Ç_{sd}$ (mm)	300	330
h_{so} (mm)	35.5	39.5
k_{sa}	0.55	0.99

Çizelge 8.6. Sabit değerli giriş parametreleri

Tasarım Parametresi	Değer
$Ç_{rd}$ (mm)	$Ç_{si}-2\times\delta-2\times h_{KM}$
α (°)	63
L_{rp} (mm)	120

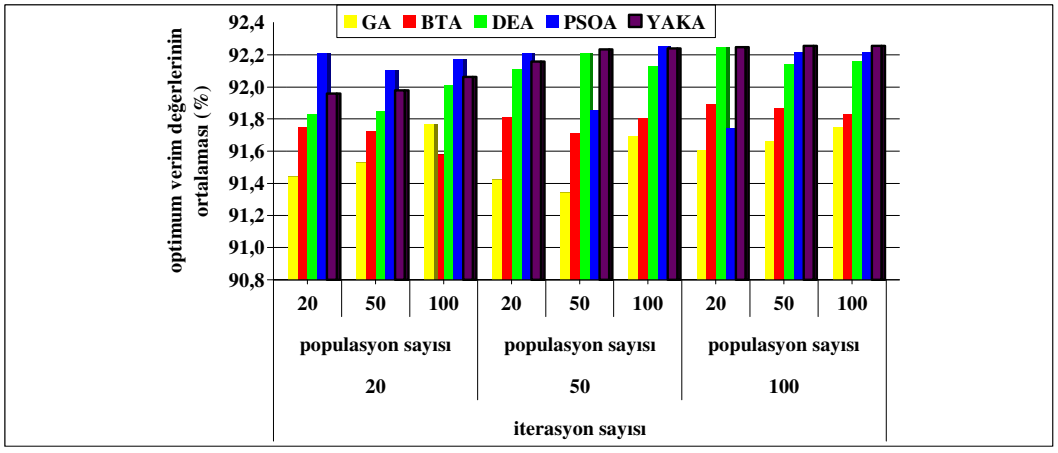
Çizelge 8.7. Tasarım optimizasyonu giriş parametreleri ile verim arasındaki korelasyon değerleri

	Korelasyon değerleri	Tasarım Parametreleri						
		h_{KM}	δ	h_{sa}	w_{sd}	$Ç_{sd}$	h_{so}	k_{sa}
KMSM1	1. hesaplama	0.316	-0.288	-0.077	-0.869	0.012	0.106	-0.310
	2. hesaplama	0.291	-0.198	-0.112	-0.911	0.157	0.214	-0.112
	3. hesaplama	0.319	-0.355	-0.087	-0.882	0.214	0.336	-0.196
	4. hesaplama	0.174	-0.351	-0.175	-0.823	0.185	0.106	-0.074
	5. hesaplama	0.274	-0.331	-0.007	-0.897	0.044	0.097	-0.038
	ortalama	**0.275**	**-0.305**	**-0.092**	**-0.876**	**0.122**	**0.172**	**-0.146**
KMSM2	1. hesaplama	0.286	-0.340	-0.033	-0.862	0.104	0.081	-0.046
	2. hesaplama	0.230	-0.351	-0.108	-0.917	0.123	0.116	-0.016
	3. hesaplama	0.334	-0.256	-0.245	-0.807	0.067	0.123	-0.089
	4. hesaplama	0.388	-0.268	-0.100	-0.868	0.187	0.041	-0.108
	5. hesaplama	0.306	-0.198	-0.150	-0.865	0.165	0.106	-0.005
	ortalama	**0.309**	**-0.283**	**-0.127**	**-0.864**	**0.129**	**0.093**	**-0.053**
KMSM3	1. hesaplama	0.167	-0.316	-0.156	-0.872	0.146	0.228	-0.112
	2. hesaplama	0.237	-0.414	-0.050	-0.856	0.047	0.000	-0.123
	3. hesaplama	0.407	-0.185	-0.131	-0.872	0.160	0.205	-0.105
	4. hesaplama	0.305	-0.144	-0.010	-0.869	0.030	0.164	-0.077
	5. hesaplama	0.234	-0.437	-0.078	-0.835	0.356	0.325	-0.066
	ortalama	**0.270**	**-0.299**	**-0.085**	**-0.861**	**0.148**	**0.184**	**-0.097**

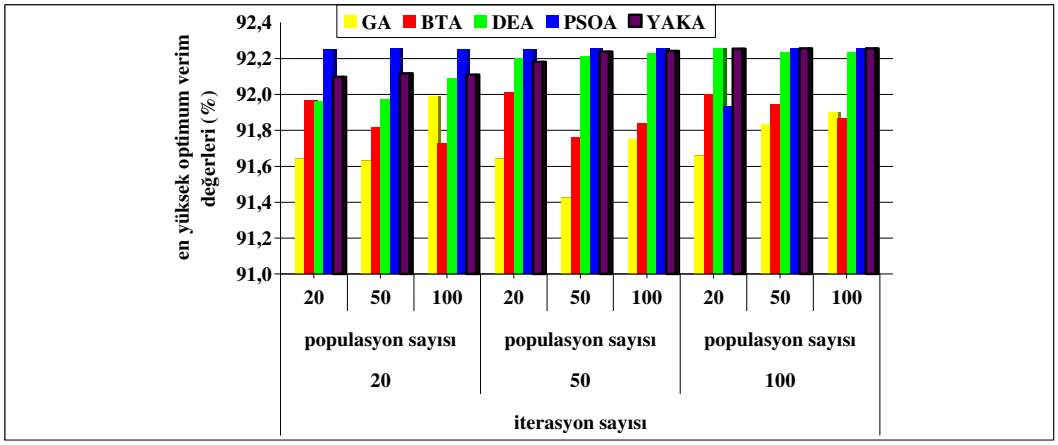
Çizelge 8.7.'deki tüm korelasyon değerlerine göre motor verimleri ile kalıcı mıknatıs kalınlığı, stator dış çapı, stator oluk kalınlığı arasındaki korelasyon pozitif; hava aralığı genişliği, stator ağız kalınlığı, stator diş kalınlığı ve stator ağız açıklığı genişliğinin stator oluk genişliğine oranı arasındaki korelasyon ise negatiftir. Bununla birlikte kalıcı mıknatıslı senkron motorların verimleri ile tasarım parametreleri arasındaki korelasyon değerleri farklılık göstermektedir. Motorlara ait korelasyon değerleri farklılık göstermekle birlikte en yüksek korelasyon değerleri stator diş kalınlığı, hava aralığı genişliği ve kalıcı mıknatıs kalınlığı için sağlanmıştır.

8.5. Tasarım Optimizasyon Sonuçları

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonu GA, BTA, DEA, YAKA ve PSOA ile gerçekleştirilmiştir. Yapay zekâ tekniklerinin tasarım optimizasyonundaki performanslarını ve hassasiyetlerini karşılaştırmak için koşular farklı populasyon (20, 50 ve 100) ve iterasyon sayılarında (20, 50 ve 100) üçer kez gerçekleştirilmiştir. En iyi KMSM verim değeri elde edilen koşunun sonuçları değerlendirmeye alınmıştır. Yapay zekâ tekniklerinin koşuları için sonlandırma kriteri olarak iterasyon sayıları seçilmiştir. Herbir algoritmanın elde ettiği en iyi ve ortalama verim değerleri Şekil 8.1. – Şekil 8.6. arasında gösterilmiş ve ayrıca algoritmaların en yüksek optimum değerleri elde ettiği iterasyonların grafikleri alt başlıklar halinde ayrı ayrı verilmiştir. SPEED ve FLUX-2D programları ile gerçekleştirilen analizlerde algoritmaların elde ettiği en iyi optimum verim değerlerini sağlayan tasarım parametreleri kullanılmıştır.

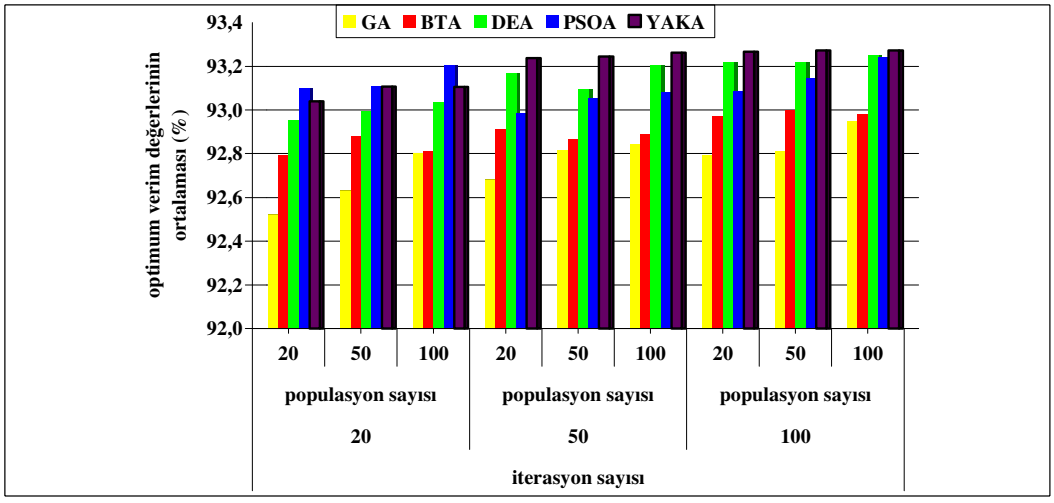


Şekil 8.1. KMSM1 için optimum verim değerlerinin ortalaması

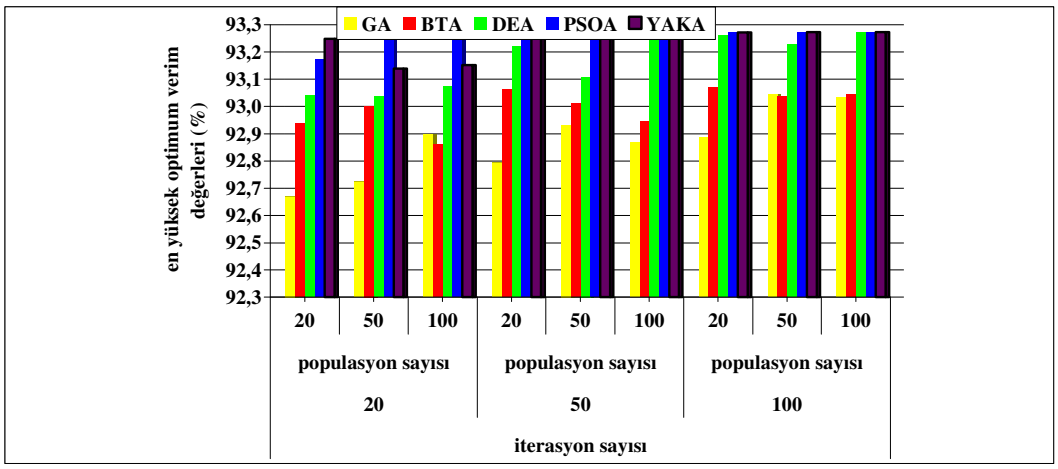


Şekil 8.2. KMSM1 için en yüksek optimum verim değerleri

Şekil 8.1.'e göre KMSM1 için en yüksek ortalama optimum verim değeri %92.256 olarak PSOA tarafından elde edilmiştir ve Şekil 8.2.'deki grafiklere göre ise en yüksek verim değeri %92.256 olarak YAKA ve PSOA'ya aittir. Bu grafiklere göre gerçekleştirilen tasarım optimizasyon çalışmasında PSOA ve YAKA yapay zekâ teknikleri seçilen giriş parametresi sınır değerlerinde optimum çözümü bulmada en iyi performansı göstermişlerdir. Bununla birlikte PSOA optimum verim değerini daha kısa sürede bularak daha üstün bir performans sergilemiştir.

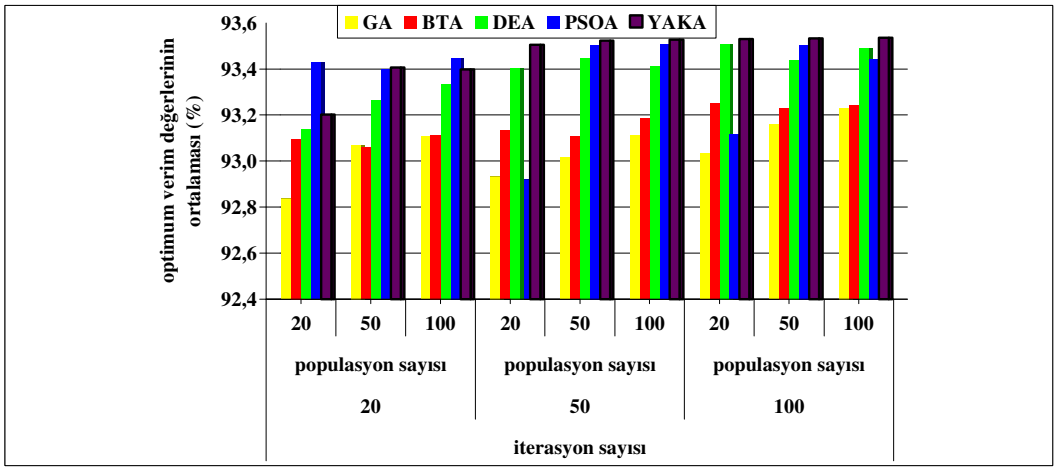


Şekil 8.3. KMSM2 için optimum verim değerlerinin ortalaması

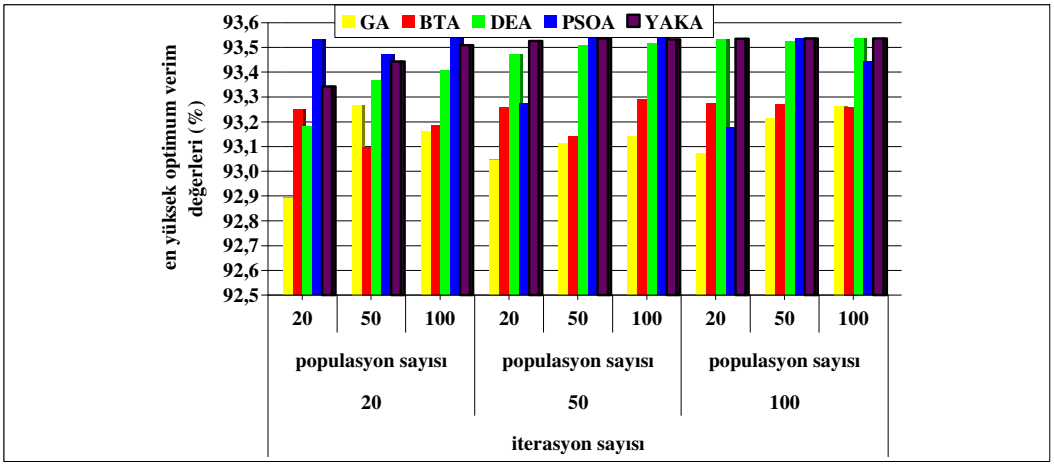


Şekil 8.4. KMSM2 için en yüksek optimum verim değerleri

Şekil 8.3.'e göre KMSM2 için en yüksek ortalama optimum verim değeri %93.273 olarak YAKA tarafından elde edilmiştir ve Şekil 8.4.'teki grafiklere göre ise en yüksek verim değeri %93.273 olarak YAKA ve PSOA'ya aittir. Bu grafiklere göre gerçekleştirilen tasarım optimizasyon çalışmasında PSOA ve YAKA yapay zekâ teknikleri seçilen giriş parametresi sınır değerlerinde optimum çözümü bulmada en iyi performansı göstermişlerdir. Bununla birlikte PSOA optimum verim değerini daha kısa sürede bularak daha üstün bir performans sergilemiştir.



Şekil 8.5. KMSM3 için optimum verim değerlerinin ortalaması



Şekil 8.6. KMSM3 için en yüksek optimum verim değerleri

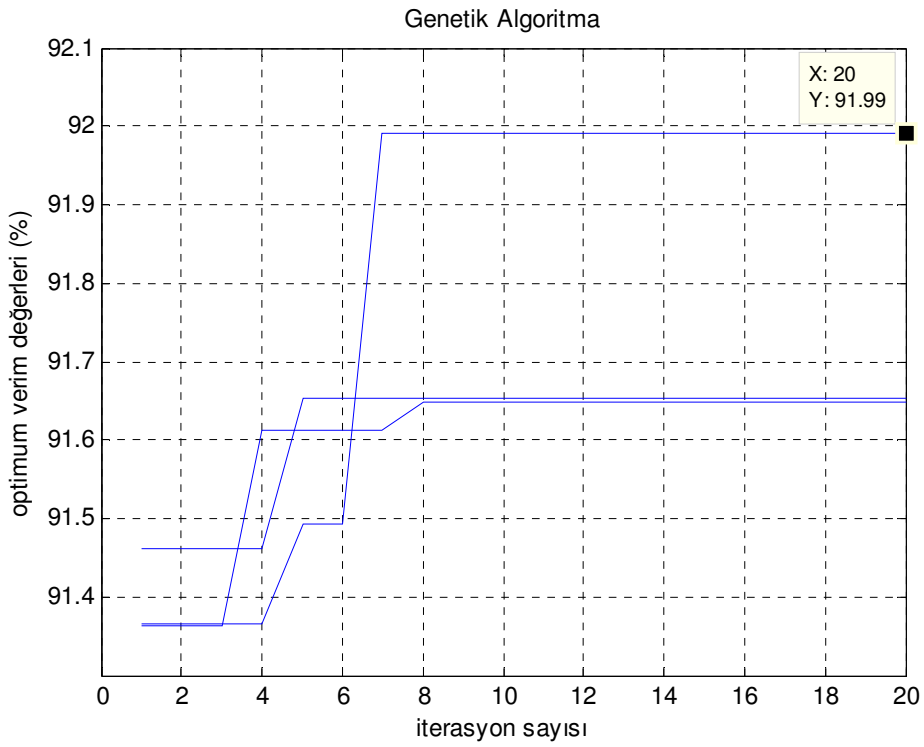
Şekil 8.5.'e göre KMSM3 için en yüksek ortalama optimum verim değeri %93.536 olarak YAKA tarafından elde edilmiştir ve Şekil 8.6.'daki grafiklere göre ise en yüksek verim değeri %93.536 olarak YAKA ve PSOA'ya aittir. Bu grafiklere göre gerçekleştirilen tasarım optimizasyon çalışmasında PSOA ve YAKA yapay zekâ teknikleri seçilen giriş parametresi sınır değerlerinde optimum çözümü bulmada en iyi performansı göstermişlerdir. Bununla birlikte PSOA optimum verim değerini daha kısa sürede bularak daha üstün bir performans sergilemiştir.

8.5.1. GA simülasyon sonuçları

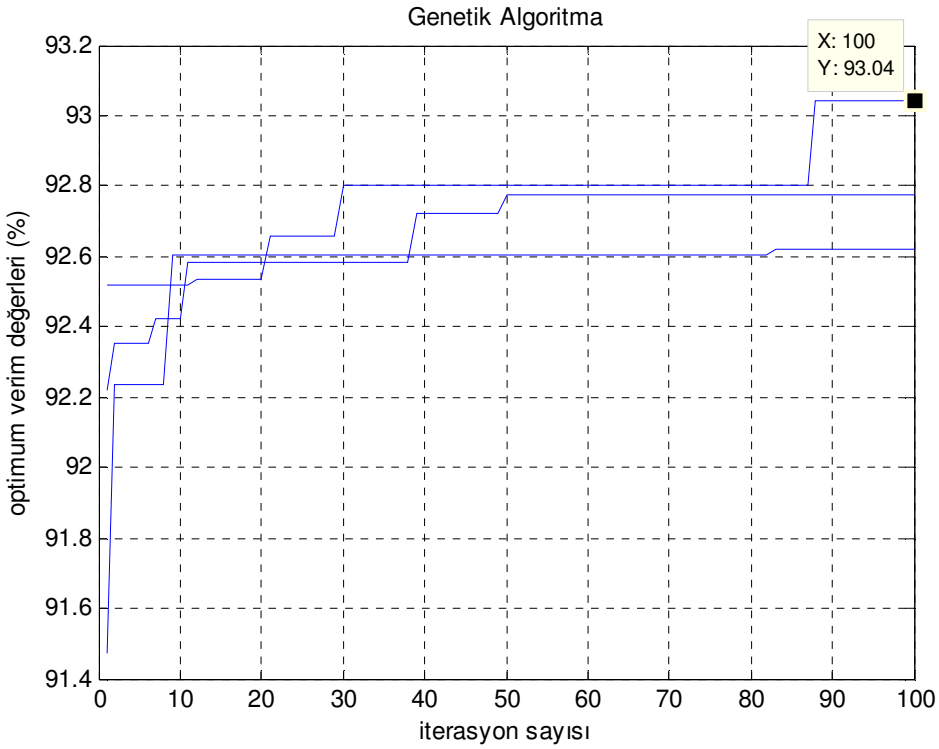
Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonları için GA sonuçları Çizelge 8.8.'de verilmiştir. Motorların genetik algoritma ile yapılan tasarım optimizasyonlarında en yüksek optimum verim değeri KMSM1 için %91.991, KMSM2 için %93.042 ve KMSM3 için %93.268 olarak elde edilmiştir. GA'nın bu koşularına ait grafikler Şekil 8.7.'de verilmiştir.

Çizelge 8.8. GA ile elde edilen optimum verim değerleri

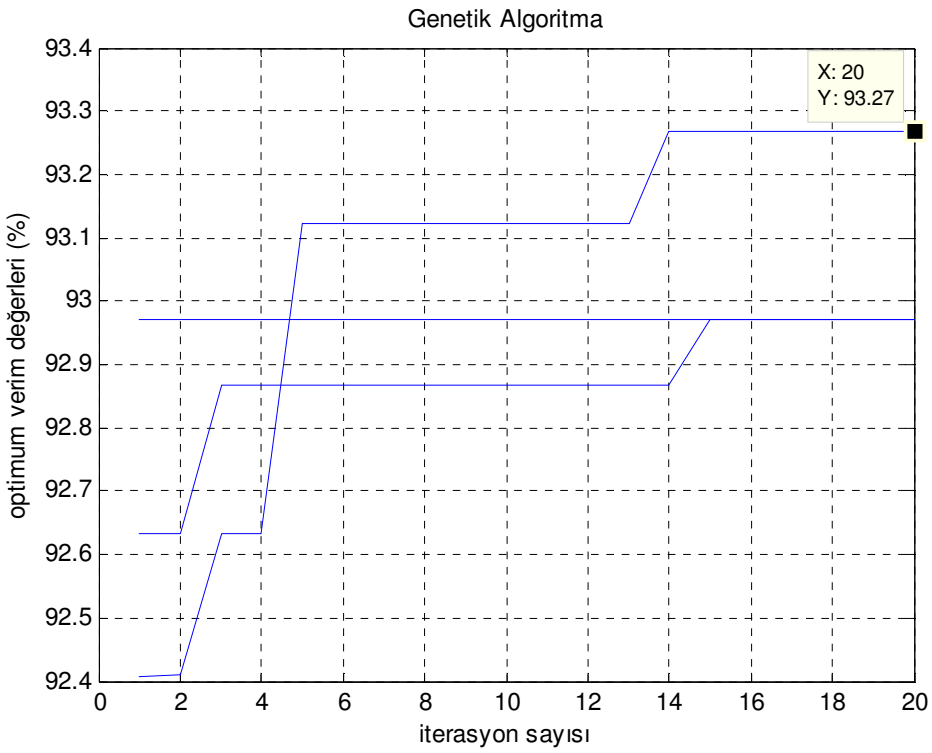
	iterasyon sayısı								
	20			**50**			**100**		
	populasyon sayısı			**populasyon sayısı**			**populasyon sayısı**		
	20	**50**	**100**	**20**	**50**	**100**	**20**	**50**	**100**
KMSM1 (η)	91.642	91.633	**91.991**	91.645	91.428	91.751	91.658	91.833	91.901
KMSM2 (η)	92.667	92.724	92.896	92.795	92.931	92.869	92.885	**93.042**	93.033
KMSM3 (η)	92.893	**93.268**	93.162	93.046	93.112	93.140	93.072	93.214	93.264



a) KMSM1 için optimum verim değerleri



b) KMSM2 için optimum verim değerleri



c) KMSM3 için optimum verim değerleri

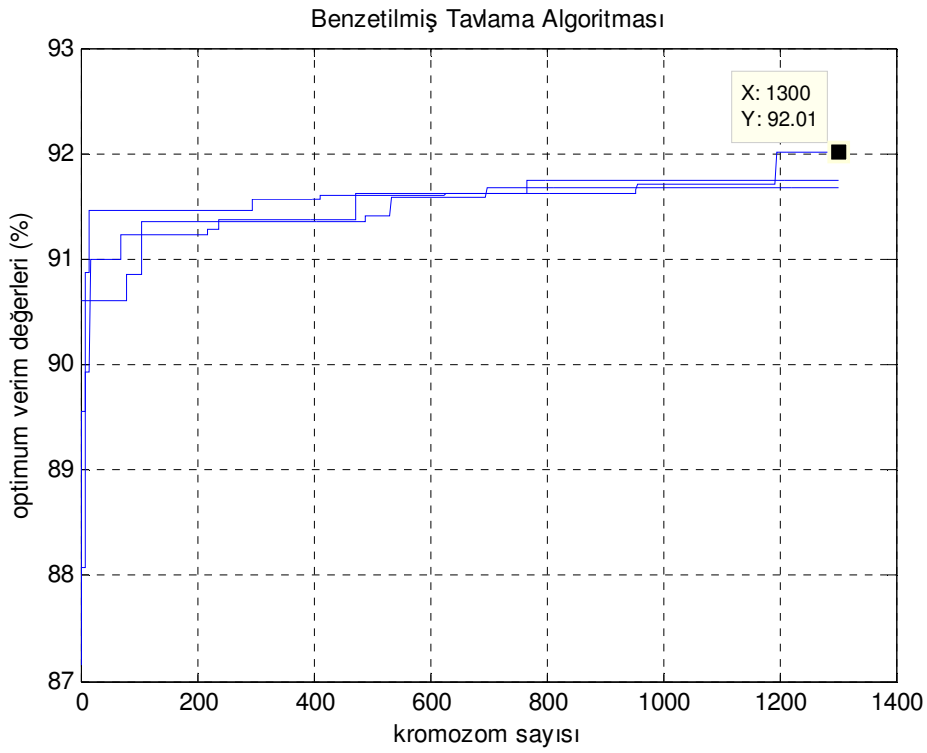
Şekil 8.7. GA optimum verim değerlerine ait grafikler

8.5.2. BTA simülasyon sonuçları

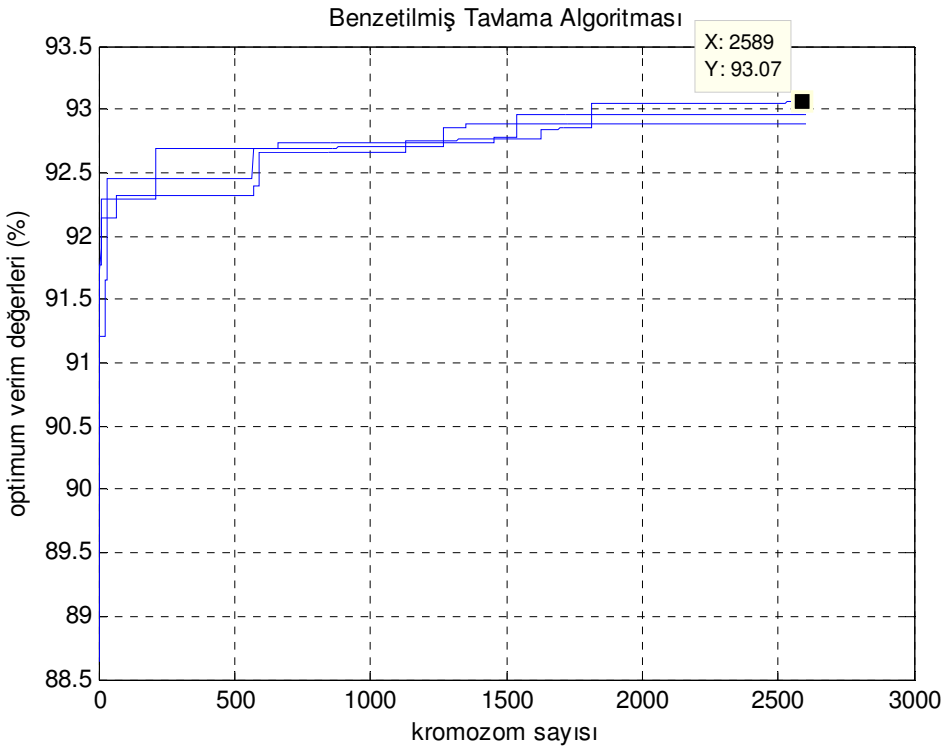
Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonları için BTA sonuçları Çizelge 8.9.'da verilmiştir. Motorların benzetilmiş tavlama algoritması ile yapılan tasarım optimizasyonlarında en yüksek optimum verim değeri KMSM1 için %92.008, KMSM2 için %93.068 ve KMSM3 için %93.291 olarak elde edilmiştir. BTA'nın bu koşularına ait grafikler Şekil 8.8.'de verilmiştir.

Çizelge 8.9. BTA ile elde edilen optimum verim değerleri

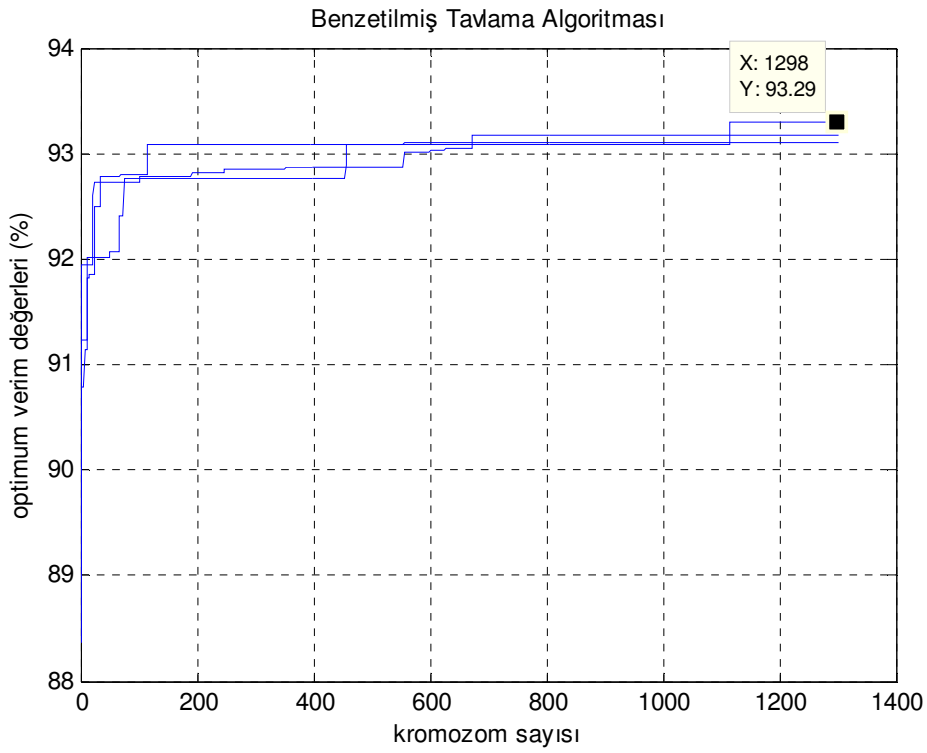
	iterasyon sayısı								
	20			**50**			**100**		
	populasyon sayısı			**populasyon sayısı**			**populasyon sayısı**		
	20	**50**	**100**	**20**	**50**	**100**	**20**	**50**	**100**
KMSM1 (η)	91.966	91.815	91.728	**92.008**	91.764	91.835	92.000	91.945	91.868
KMSM2 (η)	92.937	93.001	92.862	93.062	93.010	92.945	**93.068**	93.037	93.045
KMSM3 (η)	93.251	93.098	93.185	93.257	93.140	**93.291**	93.272	93.269	93.260



a) KMSM1 için optimum verim değerleri



b) KMSM2 için optimum verim değerleri



c) KMSM3 için optimum verim değerleri

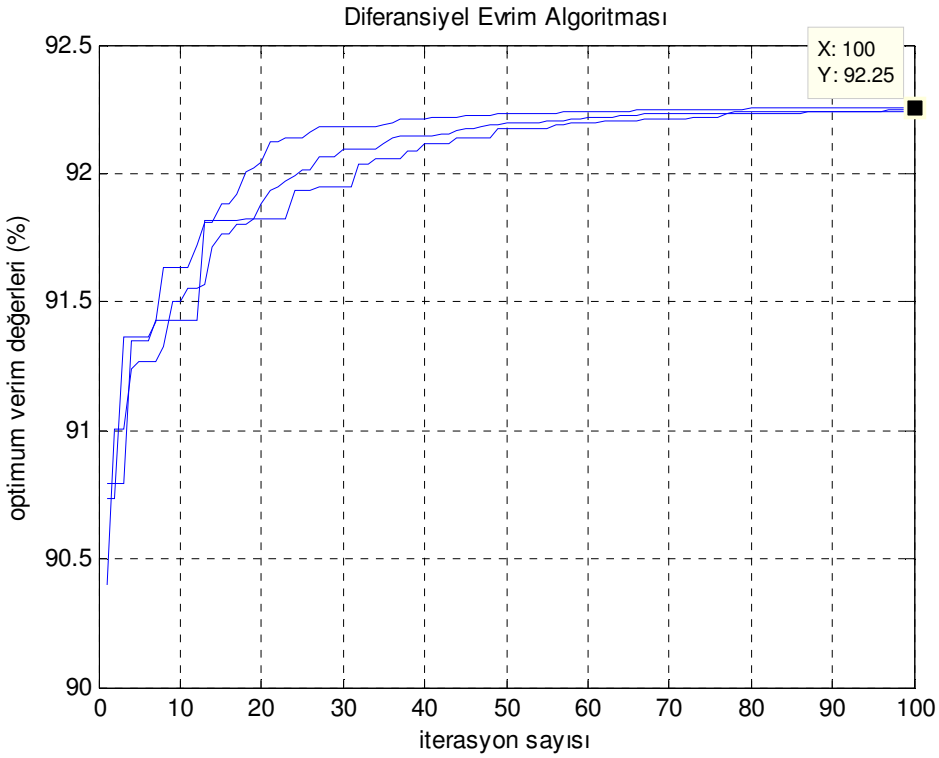
Şekil 8.8. BTA optimum verim değerlerine ait grafikler

8.5.3. DEA simülasyon sonuçları

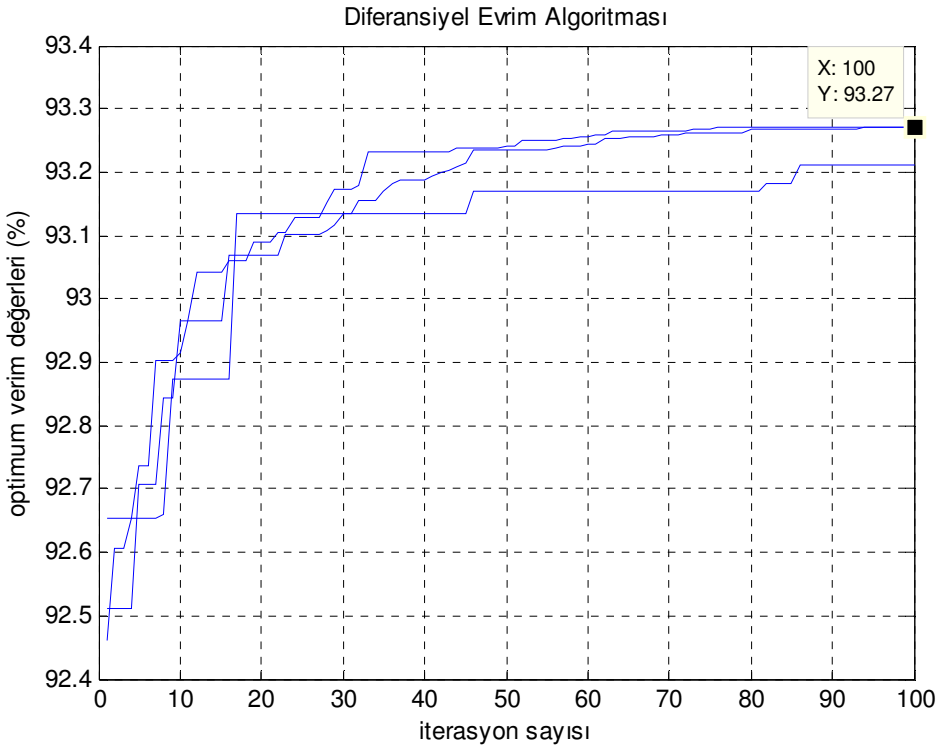
Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonları için DEA sonuçları Çizelge 8.10.'da verilmiştir. Motorların diferansiyel evrim algoritması ile yapılan tasarım optimizasyonlarında en yüksek optimum verim değeri KMSM1 için %92.255, KMSM2 için %93.272 ve KMSM3 için %93.535 olarak elde edilmiştir. DEA'nın bu koşularına ait grafikler Şekil 8.9.'da verilmiştir.

Çizelge 8.10. DEA ile elde edilen optimum verim değerleri

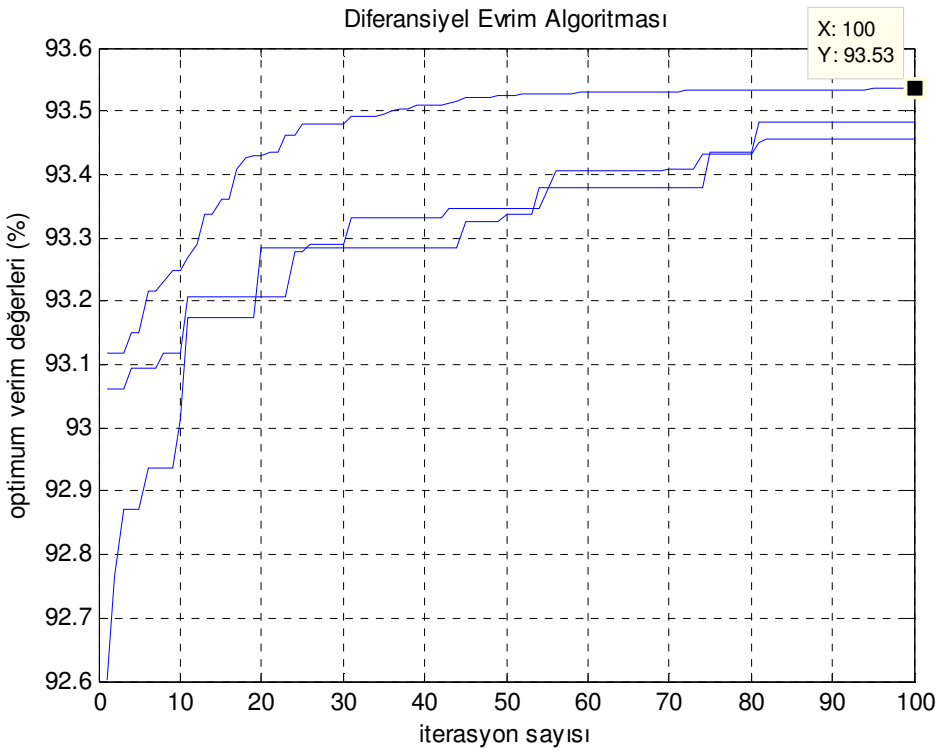
	iterasyon sayısı								
	20			**50**			**100**		
	populasyon sayısı			**populasyon sayısı**			**populasyon sayısı**		
	20	**50**	**100**	**20**	**50**	**100**	**20**	**50**	**100**
KMSM1 (η)	91.960	91.973	92.091	92.202	92.213	92.227	**92.255**	92.233	92.233
KMSM2 (η)	93.040	93.038	93.074	93.221	93.108	93.264	93.260	93.226	**93.272**
KMSM3 (η)	93.181	93.368	93.408	93.470	93.509	93.514	93.533	93.527	**93.535**



a) KMSM1 için optimum verim değerleri



b) KMSM2 için optimum verim değerleri



c) KMSM3 için optimum verim değerleri

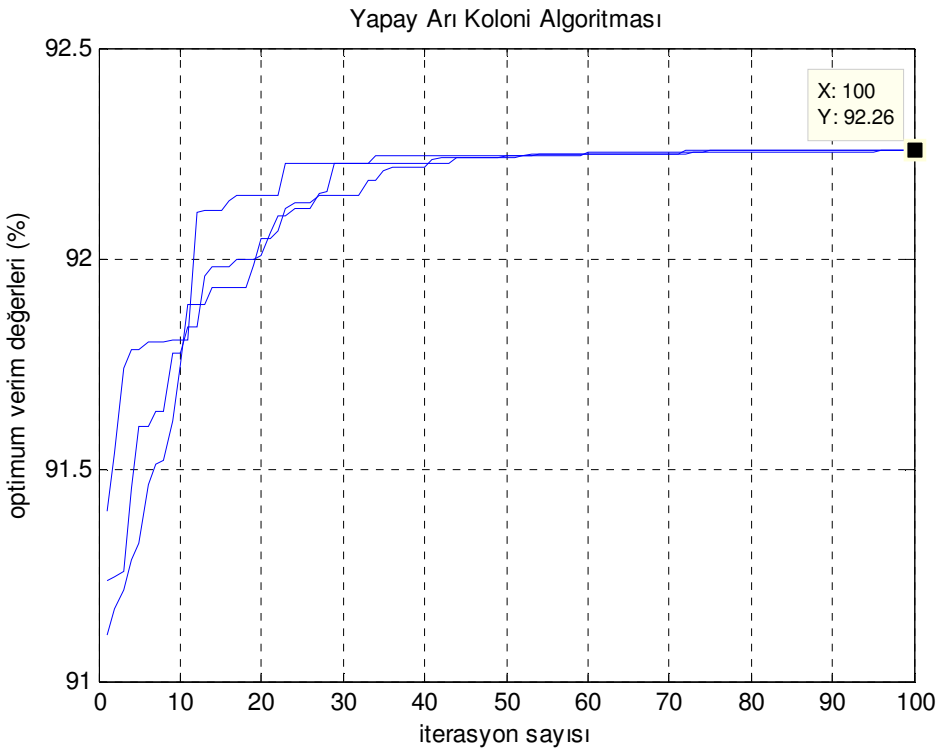
Şekil 8.9. DEA optimum verim değerlerine ait grafikler

8.5.4. YAKA simülasyon sonuçları

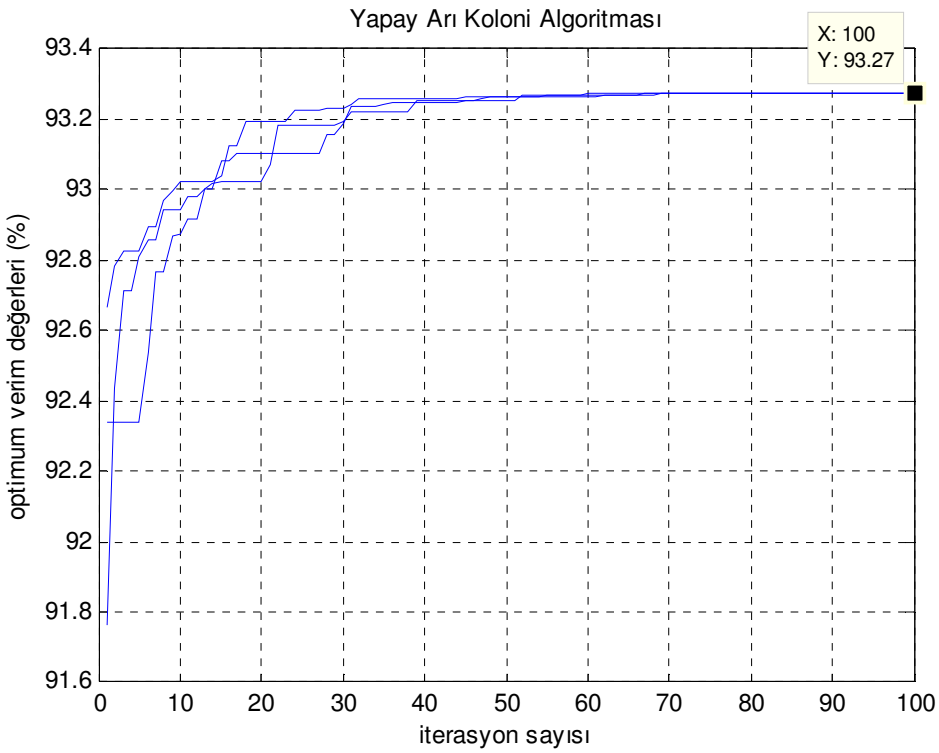
Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonları için YAKA sonuçları Çizelge 8.11.'de verilmiştir. Motorların yapay arı koloni algoritması ile yapılan tasarım optimizasyonlarında en yüksek optimum verim değeri KMSM1 için %92.256, KMSM2 için %93.273 ve KMSM3 için %93.536 olarak elde edilmiştir. YAKA'nın bu koşularına ait grafikler Şekil 8.10.'da verilmiştir.

Çizelge 8.11. YAKA ile elde edilen optimum verim değerleri

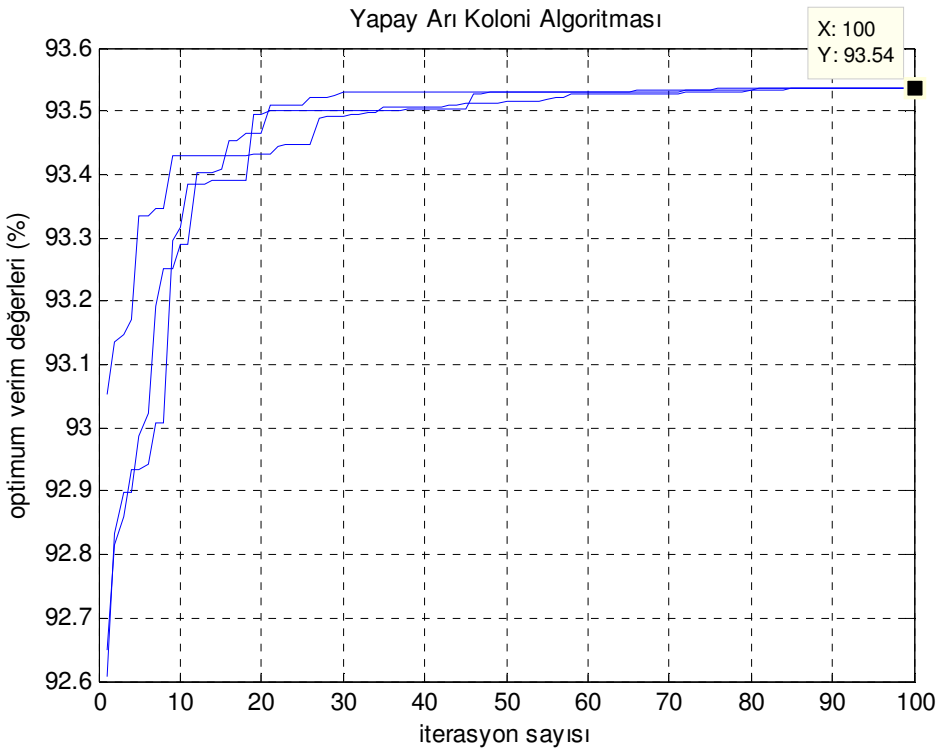
	iterasyon sayısı								
	20			**50**			**100**		
	populasyon sayısı			**populasyon sayısı**			**populasyon sayısı**		
	20	**50**	**100**	**20**	**50**	**100**	**20**	**50**	**100**
KMSM1 (η)	92.097	92.117	92.110	92.181	92.239	92.243	92.255	**92.256**	**92.256**
KMSM2 (η)	93.247	93.138	93.151	93.252	93.255	93.269	93.272	**93.273**	**93.273**
KMSM3 (η)	93.343	93.443	93.509	93.526	**93.536**	93.533	93.535	**93.536**	**93.536**



a) KMSM1 için optimum verim değerleri



b) KMSM2 için optimum verim değerleri



c) KMSM3 için optimum verim değerleri

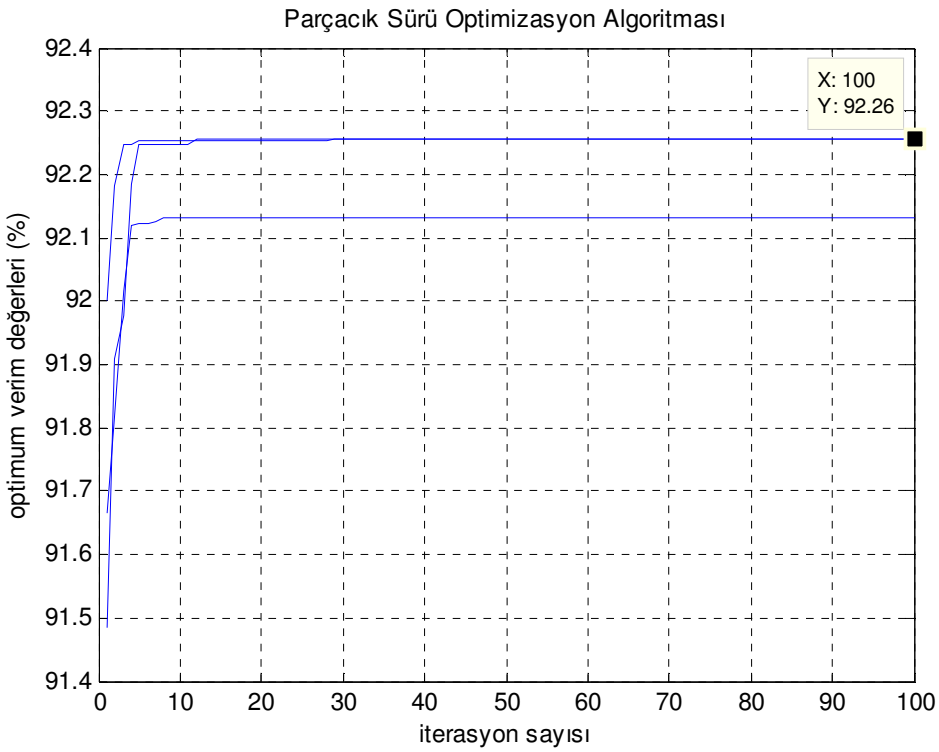
Şekil 8.10. YAKA optimum verim değerlerine ait grafikler

8.5.5. PSOA simülasyon sonuçları

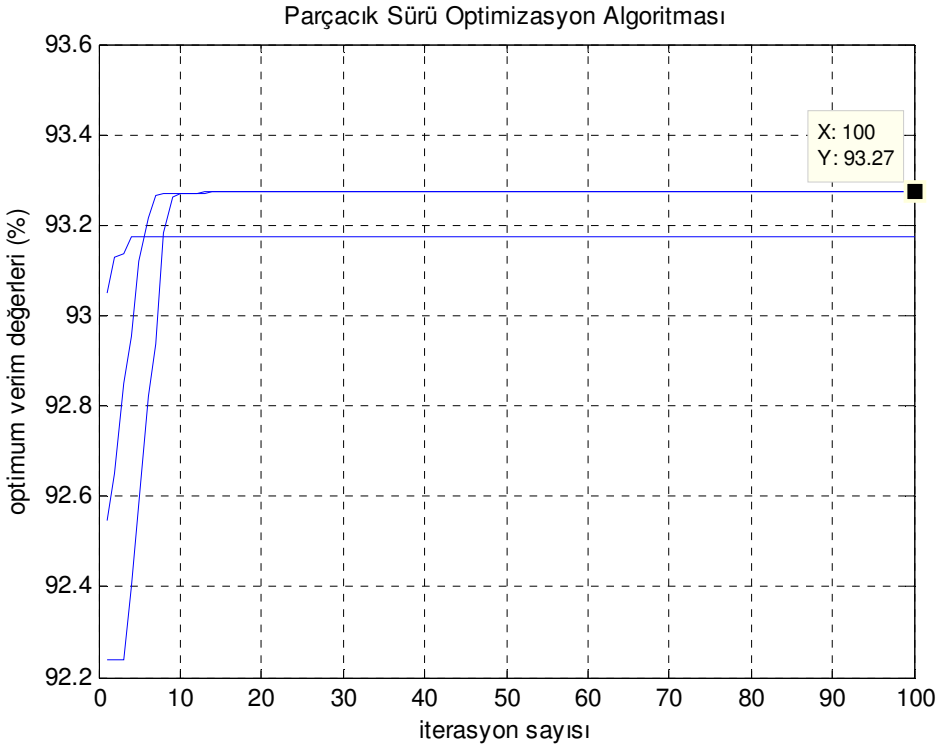
Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonları için PSOA sonuçları Çizelge 8.12.'de verilmiştir. Motorların parçacık sürü optimizasyon algoritması ile yapılan tasarım optimizasyonlarında en yüksek optimum verim değeri KMSM1 için %92.256, KMSM2 için %93.273 ve KMSM3 için %93.536 olarak elde edilmiştir. PSOA'nın bu koşularına ait grafikler Şekil 8.11.'de verilmiştir.

Çizelge 8.12. PSOA ile elde edilen optimum verim değerleri

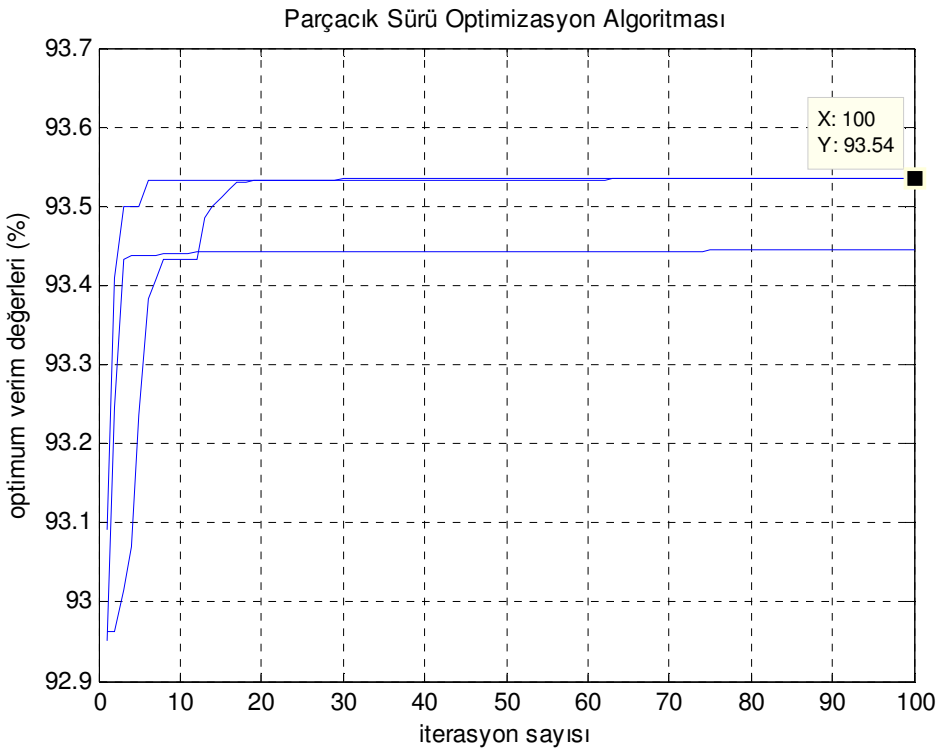
	iterasyon sayısı								
	20			**50**			**100**		
	populasyon sayısı			**populasyon sayısı**			**populasyon sayısı**		
	20	**50**	**100**	**20**	**50**	**100**	**20**	**50**	**100**
KMSM1 (η)	92.253	92.255	92.254	92.252	**92.256**	**92.256**	91.934	**92.256**	**92.256**
KMSM2 (η)	93.172	93.271	**93.273**	93.266	**93.273**	**93.273**	**93.273**	**93.273**	**93.273**
KMSM3 (η)	93.533	93.473	**93.536**	93.273	**93.536**	**93.536**	93.179	**93.536**	93.444



a) KMSM1 için optimum verim değerleri



b) KMSM2 için optimum verim değerleri



c) KMSM3 için optimum verim değerleri

Şekil 8.11. PSOA optimum verim değerlerine ait grafikler

8.5.6. Motor tasarım parametrelerinin değişimleri

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların yapay zekâ teknikleri ile yapılan tasarım optimizasyonlarında herbir motor için elde edilen geometrik parametreler Çizelge 8.13., Çizelge 8.14. ve Çizelge 8.15.'te verilmiştir. Buradaki parametre değişimleri daha önce elde edilen motor parametreleri ve verim arasındaki korelasyon değerleri ile paralellik arz etmektedir. Çizelge 8.7.'de verilen korelasyon değerlerine göre motor verimi ile kalıcı mıknatıs kalınlığı, stator dış çapı, stator oluk kalınlığı arasındaki korelasyon pozitif; hava aralığı genişliği, stator ağız kalınlığı, stator diş kalınlığı ve stator ağız açıklığı genişliğinin stator oluk genişliğine oranı arasındaki korelasyon ise negatif olduğu ifade edilmişti.

Çizelge 8.13. KMSM1 için optimum değerler

	$Ç_{rd}$	h_{KM}	δ	h_{sa}	w_{sd}	$Ç_{sd}$	h_{so}	k_{sa}	α	L_{rp}	η
analitik	191.1	4.70	1.25	3.31	8.5	305.96	37.44	0.72803	63	120	89.175
GA	196.72	5.39	0.76	2.26	8.12	327.13	39.48	0.60806	63	120	91.991
BTA	195.9	5.76	0.79	2.28	8.13	329.93	39.25	0.631	63	120	92.008
DEA	195.51	5.99	0.75	2	8.11	330	39.5	0.55067	63	120	92.255
YAKA	195.5	6	0.75	2	8.12	330	39.5	0.55	63	120	92.256
PSOA	195.5	6	0.75	2	8.12	330	39.5	0.55	63	120	92.256

Çizelge 8.14. KMSM2 için optimum değerler

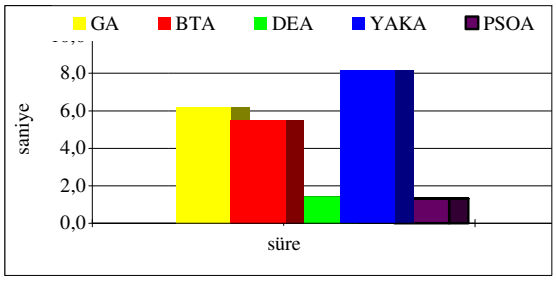
	$Ç_{rd}$	h_{KM}	δ	h_{sa}	w_{sd}	$Ç_{sd}$	h_{so}	k_{sa}	α	L_{rp}	η
analitik	191.1	4.70	1.25	3.31	8.5	305.96	37.44	0.72803	63	120	90.607
GA	195.46	5.99	0.78	3.3	7.94	328.5	39.25	0.60247	63	120	93.042
BTA	196.12	5.67	0.77	2.07	7.84	328.38	38.74	0.71085	63	120	93.068
DEA	195.51	6	0.75	2.01	7.97	329.99	39.5	0.55045	63	120	93.272
YAKA	195.5	6	0.75	2	7.97	330	39.5	0.55	63	120	93.273
PSOA	195.5	6	0.75	2	7.97	330	39.5	0.55	63	120	93.273

Çizelge 8.15. KMSM3 için optimum değerler

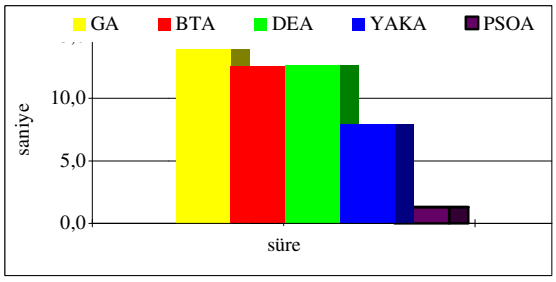
	$Ç_{rd}$	h_{KM}	δ	h_{sa}	w_{sd}	$Ç_{sd}$	h_{so}	k_{sa}	α	L_{rp}	η
analitik	191.1	4.70	1.25	3.31	8.5	305.96	37.44	0.72803	63	120	90.984
GA	195.52	5.82	0.92	2.02	7.72	322.67	39.31	0.61237	63	120	93.268
BTA	197.41	5.02	0.78	2.2	7.7	327.83	39.35	0.71479	63	120	93.291
DEA	195.5	6	0.75	2	7.97	329.98	39.5	0.55542	63	120	93.535
YAKA	195.5	6	0.75	2	7.97	330	39.5	0.55	63	120	93.536
PSOA	195.5	6	0.75	2	7.97	330	39.5	0.55	63	120	93.536

Çizelge 8.13., Çizelge 8.14. ve Çizelge 8.15.'te verilen motor verim değerlerinin değişimi yapay zekâ teknikleri ile elde edilen optimum geometrik parametre değerlerinin değişimleri Çizelge 8.7. için yapılan değerlendirmeyi teyit etmektedir. Bu değerlere göre kalıcı mıknatıs kalınlığı, stator dış çapı ve stator oluk kalınlığının artması ile motor verimi artmış; hava aralığı genişliği, stator ağız kalınlığı, stator diş kalınlığı ve stator ağız açıklığı genişliğinin stator oluk genişliğine oranının azalması ile motor verimi azalmıştır. Burada yapay zekâ tekniklerinin çözüm uzayını arama performansları ise algoritmanın üstünlüğünü yansıtmıştır.

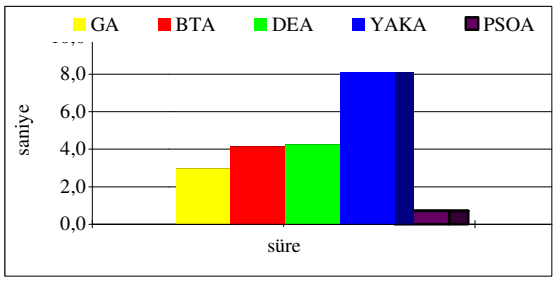
Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında optimizasyon süreleri Şekil 8.12.'de verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde, uzun çalışma gerektiren motor tasarımlarında yapay zekâ tekniklerinin kullanımlarının tasarım optimizasyonuna katkıları görülmektedir. Optimizasyon süreleri açısından PSOA yapay zekâ tekniği üstün bir performansa sahiptir. YAKA tekniği ise çok iyi değerlere yakınsamasına rağmen düşük hızda kalmıştır.



a) KMSM1 için algoritma koşularının süreleri



b) KMSM2 için algoritma koşularının süreleri



c) KMSM3 için algoritma koşularının süreleri

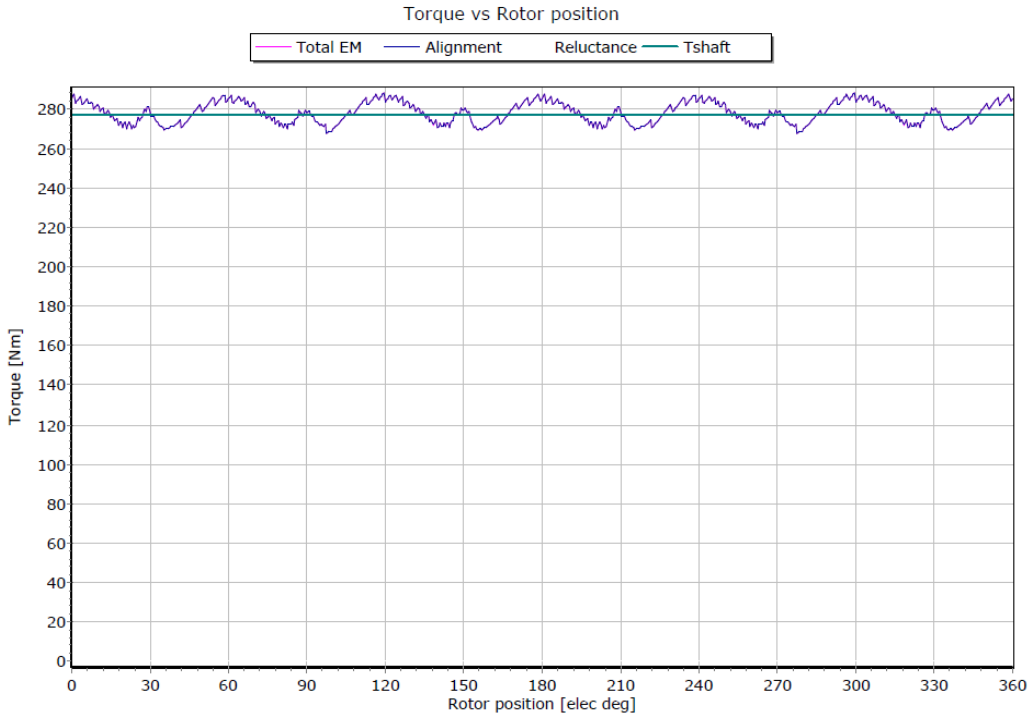
Şekil 8.12. Optimizasyon algoritmalarına ait koşuların süreleri

8.6. SPEED Programı İle Analitik Simülasyon Sonuçları

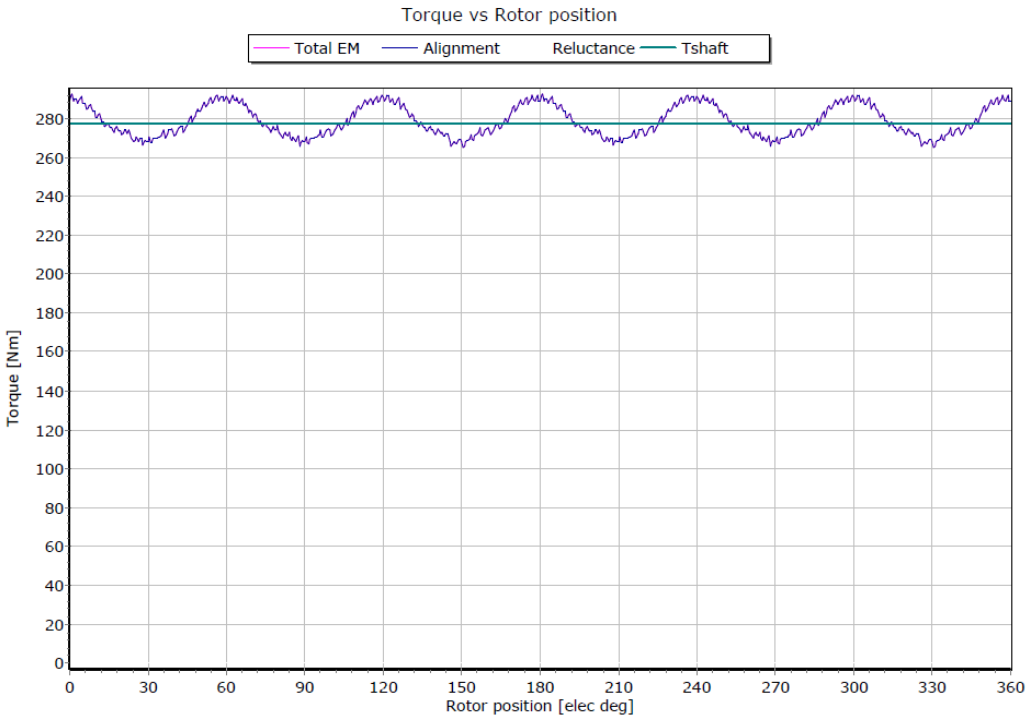
Ön analitik tasarım sonucu ve yapay zekâ teknikleri (YAKA-PSOA) ile elde edilen optimum KMSM geometrilerini test etmek için analitik simülasyonlar SPEED programı ile yapılmıştır. Kalıcı mıknatıslı senkron motorların SPEED programı ile analitik analizlerinde kullanılan geometrik parametre değerleri Çizelge 8.13., Çizelge 8.14. ve Çizelge 8.15.'te verilmiştir. Optimum geometrik değerler olarak en yüksek verimi sağlayan parametreler kullanılmıştır.

8.6.1. Ön analitik tasarım parametreleri için SPEED programı simülasyon sonuçları

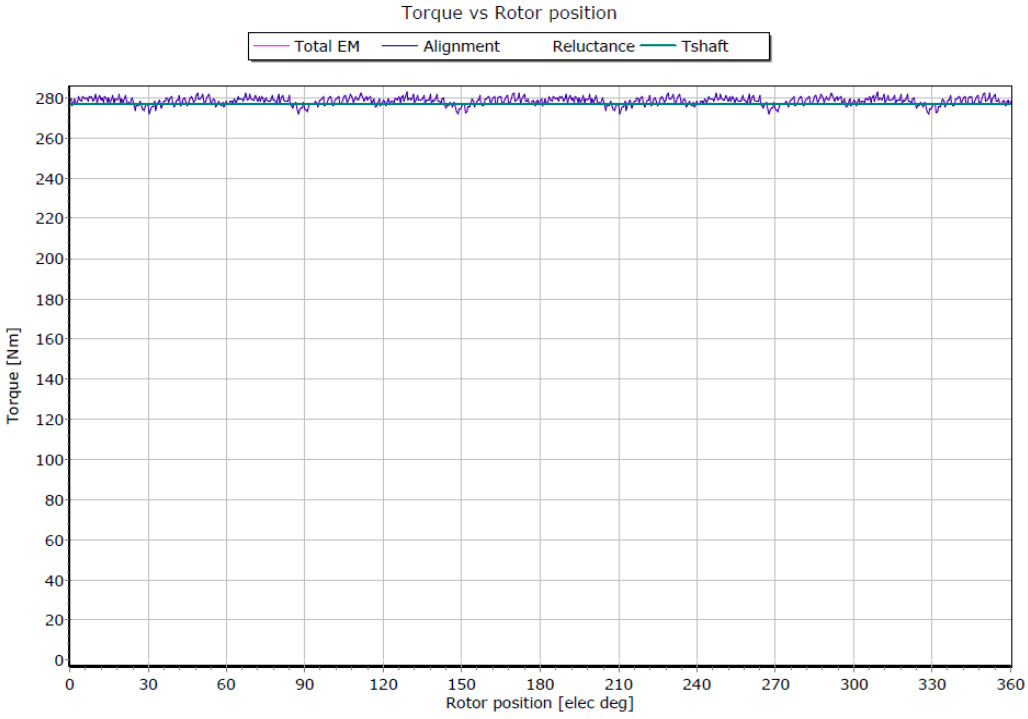
Kalıcı mıknatıslı senkron motorların ön analitik hesaplamalarında kullanılan geometrik parametre değerlerine ait SPEED programı ile yapılan analiz sonuçlarında elde edilen verim değerleri KMSM1 için %90.56, KMSM2 için %92.88, KMSM3 için %92.45, KMSM4 için %80.12, KMSM5 için %89.69 ve KMSM6 için %85.55'tir. Motorlara ait moment/rotor konum grafikleri Şekil 8.13.'te verilmiştir. Ön analitik tasarım parametreleri için SPEED programı ile elde edilen KMSM1 ve KMSM2 moment/rotor konum grafiklerinde moment dalgalılığı (torque ripple) fazla iken KMSM3, KMSM4, KMSM5 ve KMSM6 moment/rotor konum grafiklerinde moment dalgalılığı düşüktür.



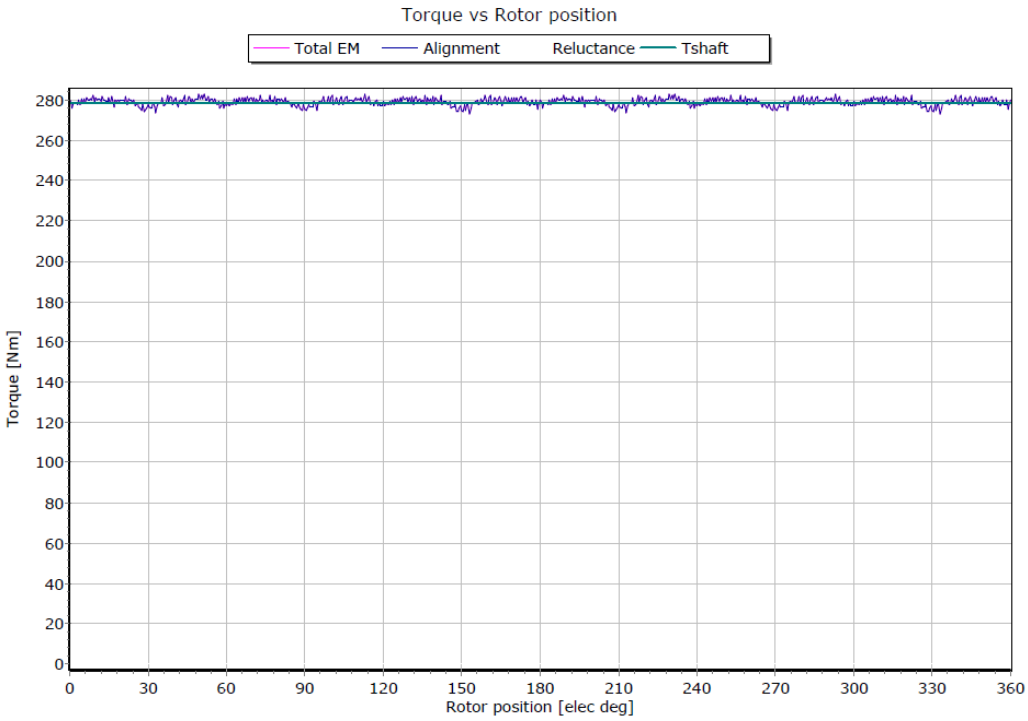
a) KMSM1 için SPEED programı ile moment/rotor konumu grafiği



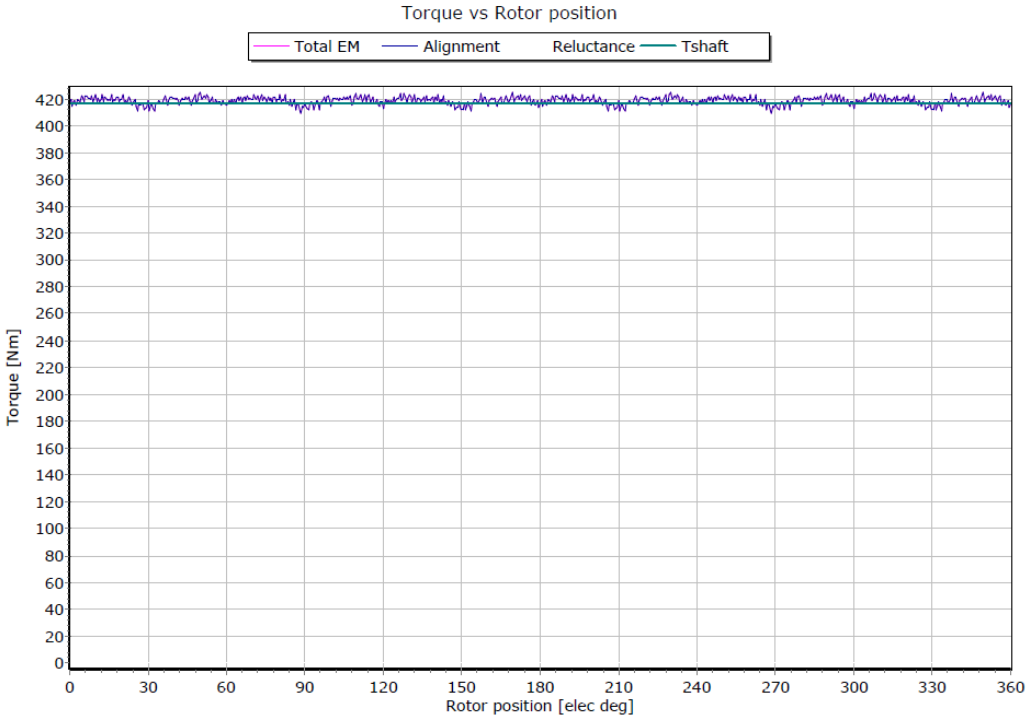
b) KMSM2 için SPEED programı ile moment/rotor konumu grafiği



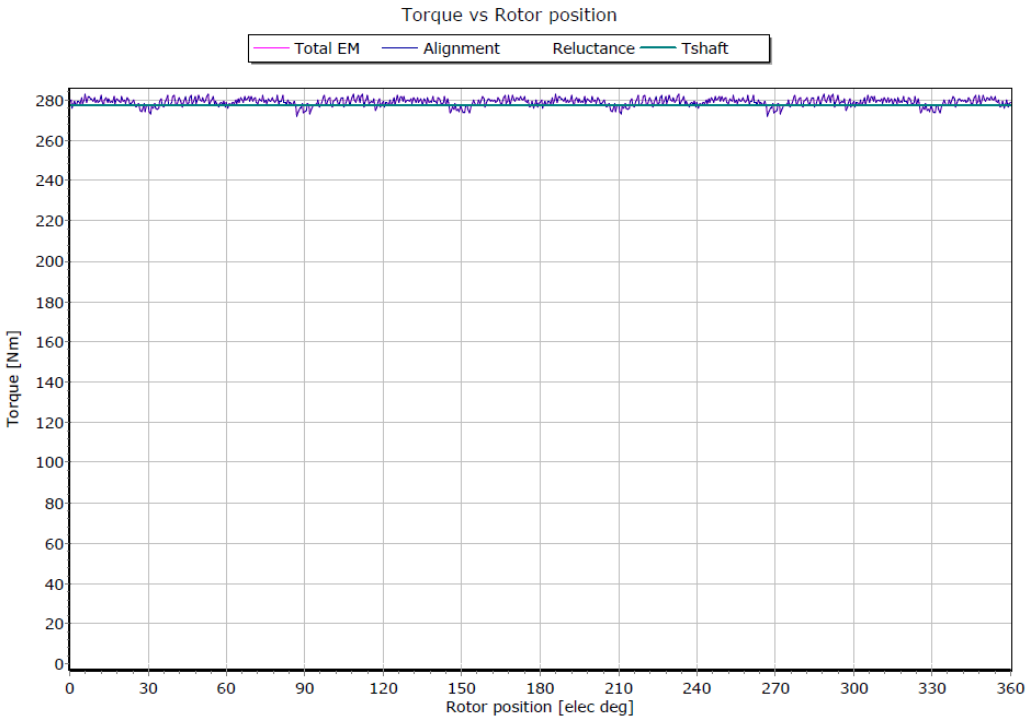
c) KMSM3 için SPEED programı ile moment/rotor konumu grafiği



d) KMSM4 için SPEED programı ile moment/rotor konumu grafiği



e) KMSM5 için SPEED programı ile moment/rotor konumu grafiği

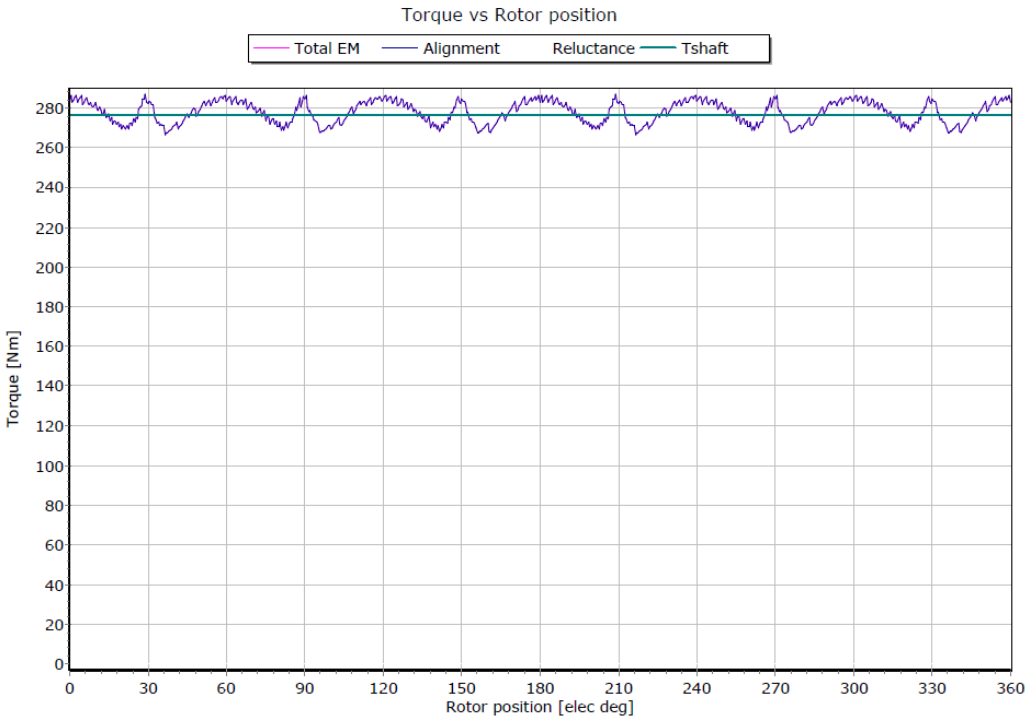


f) KMSM6 için SPEED programı ile moment/rotor konumu grafiği

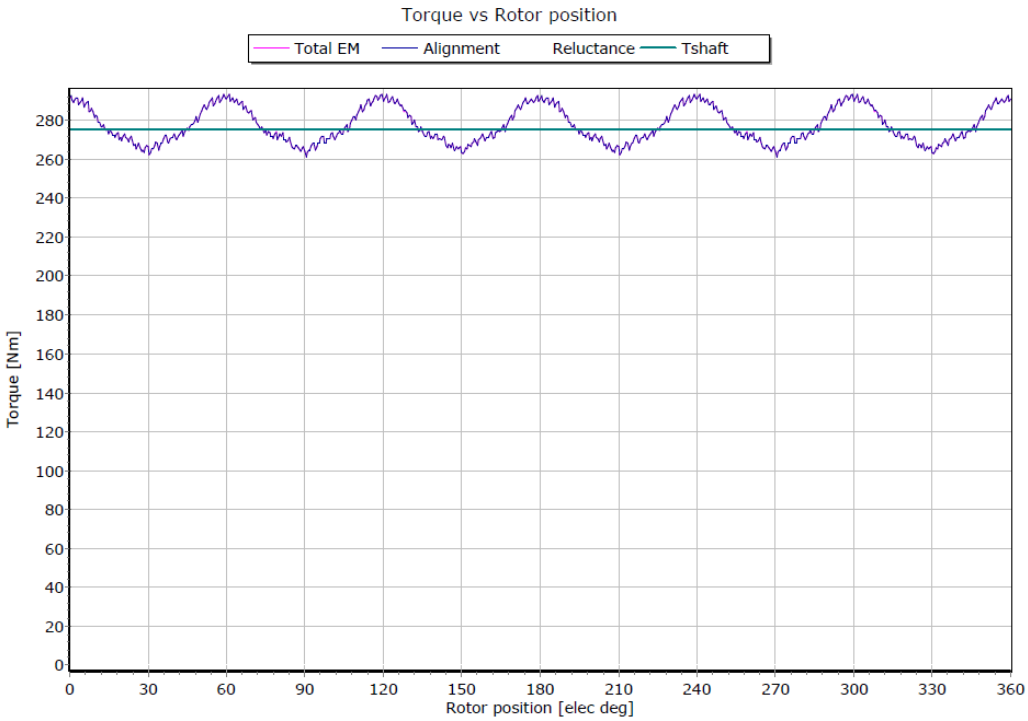
Şekil 8.13. Motorlara ait ön analitik tasarım parametreleri için SPEED programı ile moment/rotor konumu grafikleri

8.6.2. YAKA-PSOA ile elde edilen tasarım parametreleri için SPEED programı simülasyon sonuçları

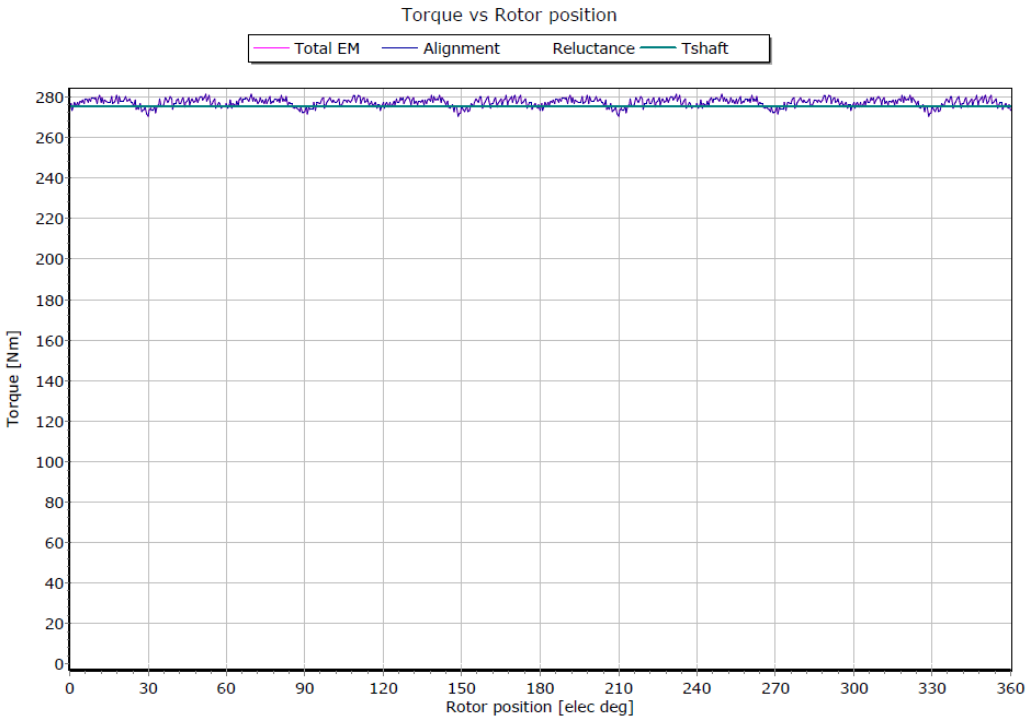
Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında YAKA-PSOA ile elde edilen motor geometrileri için SPEED programı ile yapılan analiz sonuçlarında elde edilen verim değerleri KMSM1 için %93.52, KMSM2 için %95.11, KMSM3 için %94.84, KMSM4 için %86.1, KMSM5 için %93.04 ve KMSM6 için %90.14'tür. Motorlara ait moment/rotor konum grafikleri Şekil 8.14.'te verilmiştir. Optimum tasarım parametreleri için SPEED programı ile elde edilen KMSM1 ve KMSM2 moment/rotor konum grafiklerinde moment dalgalılığı (torque ripple) fazla iken KMSM3, KMSM4, KMSM5 ve KMSM6 moment/rotor konum grafiklerinde moment dalgalılığı düşüktür.



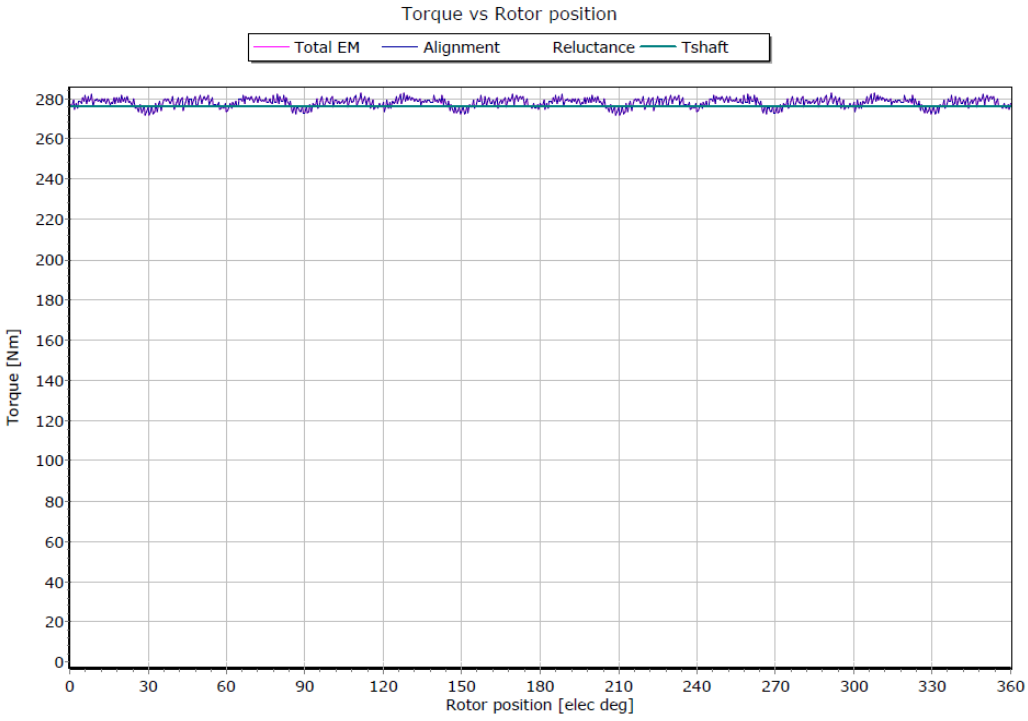
a) KMSM1 için SPEED programı ile moment/rotor konumu grafiği



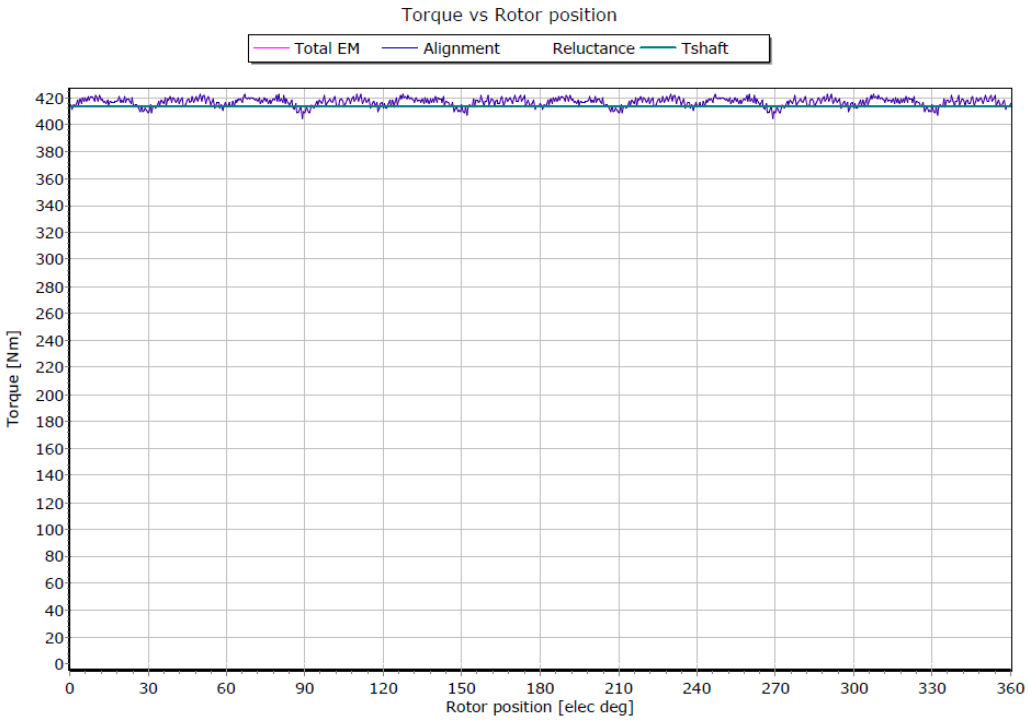
b) KMSM2 için SPEED programı ile moment/rotor konumu grafiği



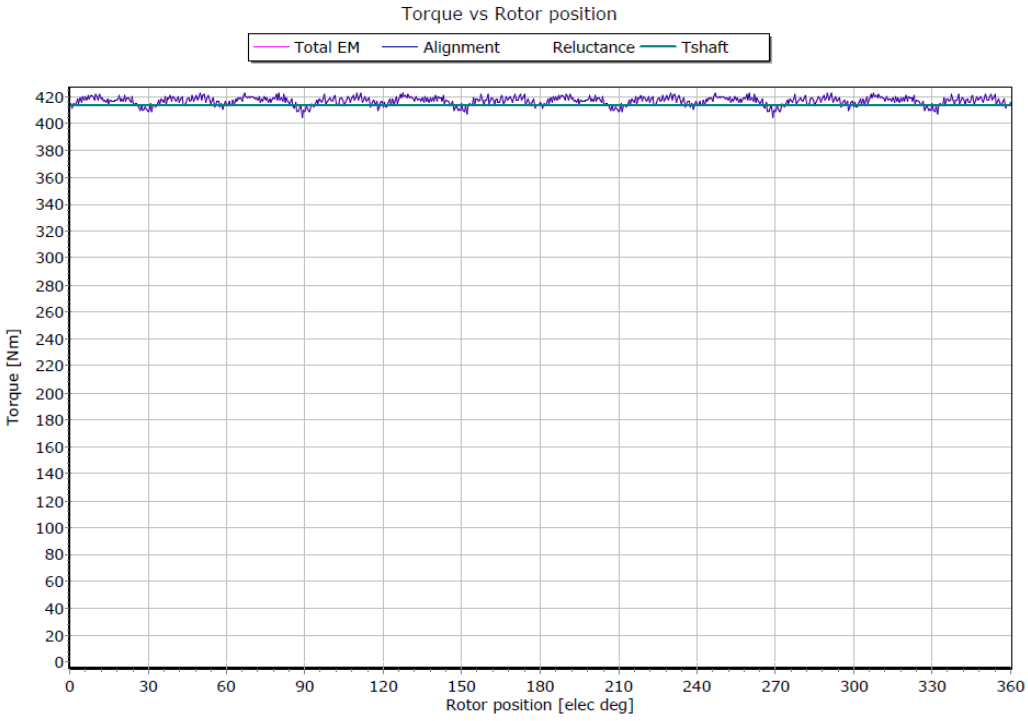
c) KMSM3 için SPEED programı ile moment/rotor konumu grafiği



d) KMSM4 için SPEED programı ile moment/rotor konumu grafiği



e) KMSM5 için SPEED programı ile moment/rotor konumu grafiği



f) KMSM6 için SPEED programı ile moment/rotor konumu grafiği

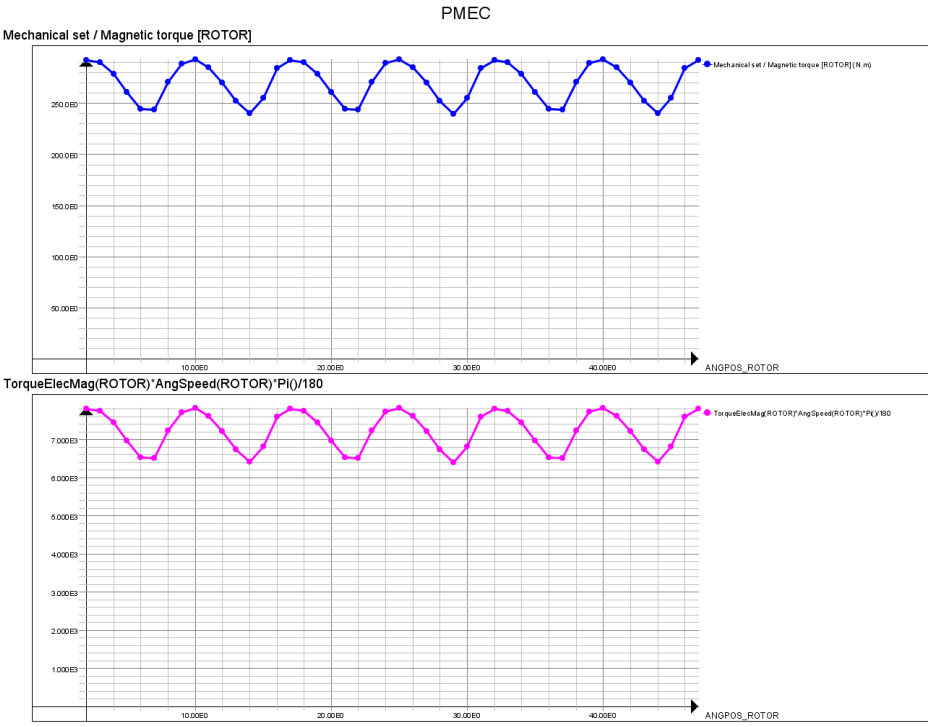
Şekil 8.14. Motorlara ait YAKA-PSOA ile elde edilen tasarım parametreleri için SPEED programı ile moment/rotor konumu grafikleri

8.7. FLUX-2D Programı İle Manyetik Simülasyon Sonuçları

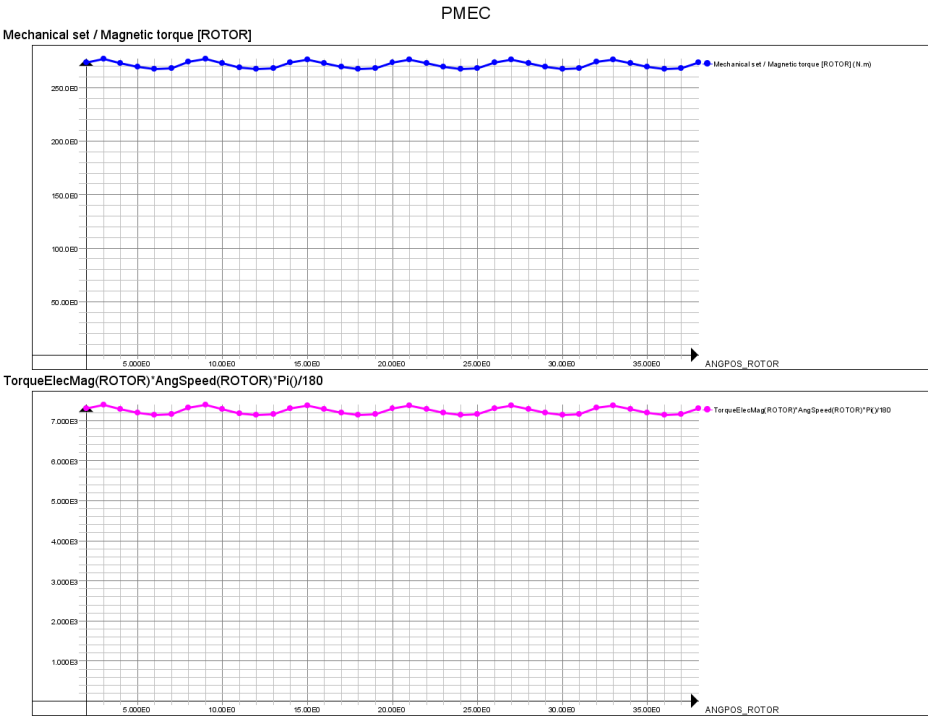
Ön analitik tasarım sonucu ve yapay zekâ teknikleri (YAKA-PSOA) ile elde edilen optimum KMSM geometrilerini test etmek için manyetik simülasyonlar sonlu elemanlar yöntemi tabanlı FLUX-2D programı ile yapılmıştır. Kalıcı mıknatıslı senkron motorların FLUX-2D programı ile manyetik analizlerinde kullanılan geometrik parametre değerleri Çizelge 8.13., Çizelge 8.14. ve Çizelge 8.15.'te verilmiştir. Optimum geometrik değerler olarak en yüksek verimi sağlayan parametreler kullanılmıştır.

8.7.1. Ön analitik tasarım parametreleri için FLUX-2D programı simülasyon sonuçları

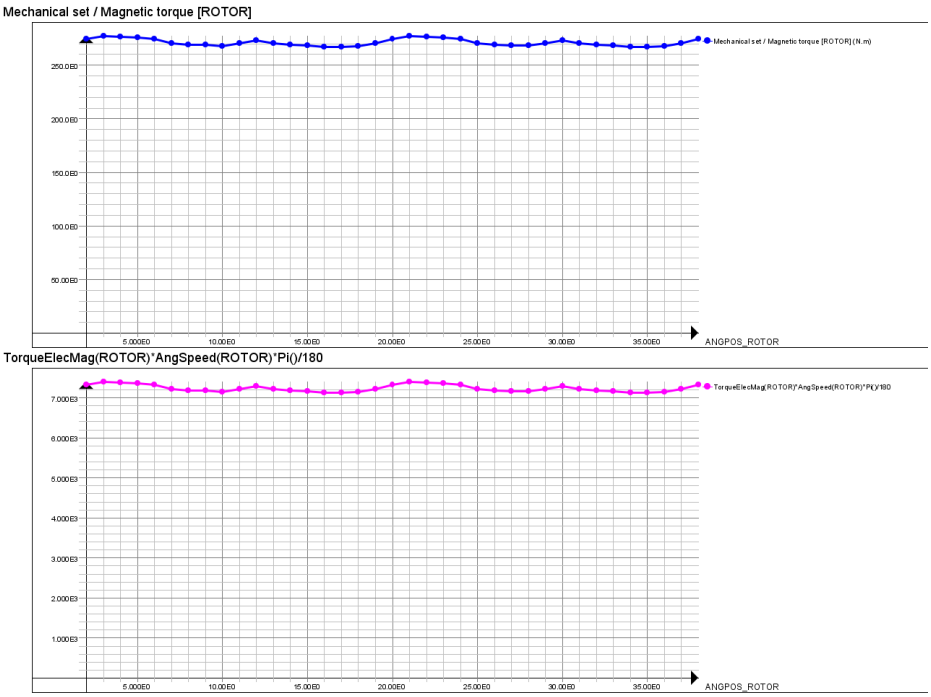
Kalıcı mıknatıslı senkron motorların ön analitik hesaplamalarında kullanılan geometrik parametre değerlerine ait FLUX-2D programı ile yapılan analiz sonuçlarında elde edilen verim değerleri KMSM1 için %89.12, KMSM2 için %87.78, KMSM3 için %89.05, KMSM4 için %76.34, KMSM5 için %86.09 ve KMSM6 için %82.11'dir. Motorlara ait moment/rotor konum grafikleri Şekil 8.15.'te verilmiştir. Ön analitik tasarım parametreleri için FLUX-2D programı ile elde edilen KMSM1 ve KMSM2 moment/rotor konum grafiklerinde moment dalgalılığı (torque ripple) fazla iken KMSM3, KMSM4, KMSM5 ve KMSM6 moment/rotor konum grafiklerinde moment dalgalılığı düşüktür.



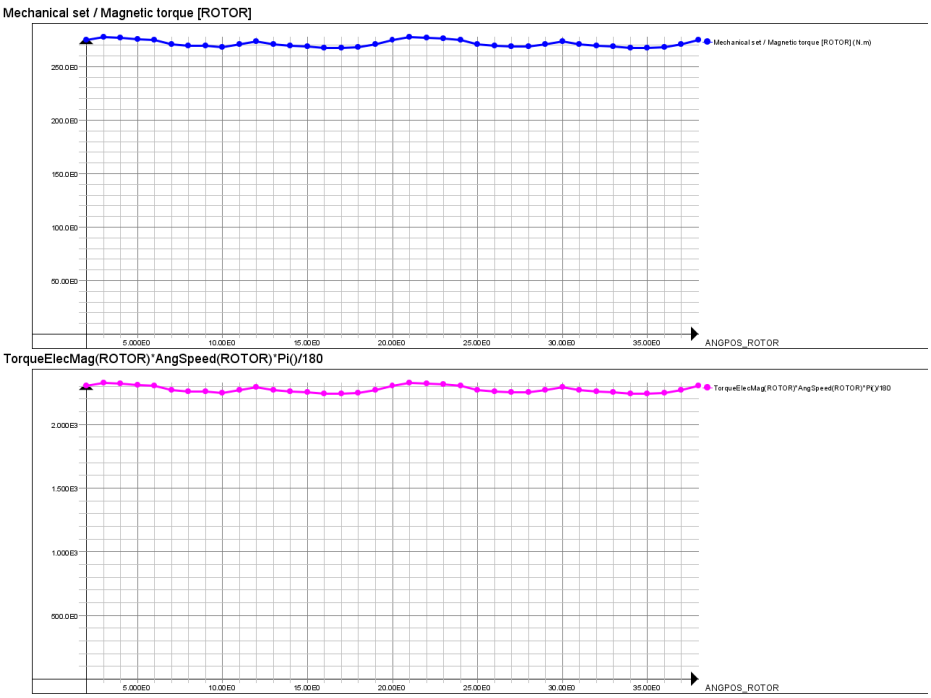
a) KMSM1 için FLUX-2D programı ile moment/rotor konumu grafiği



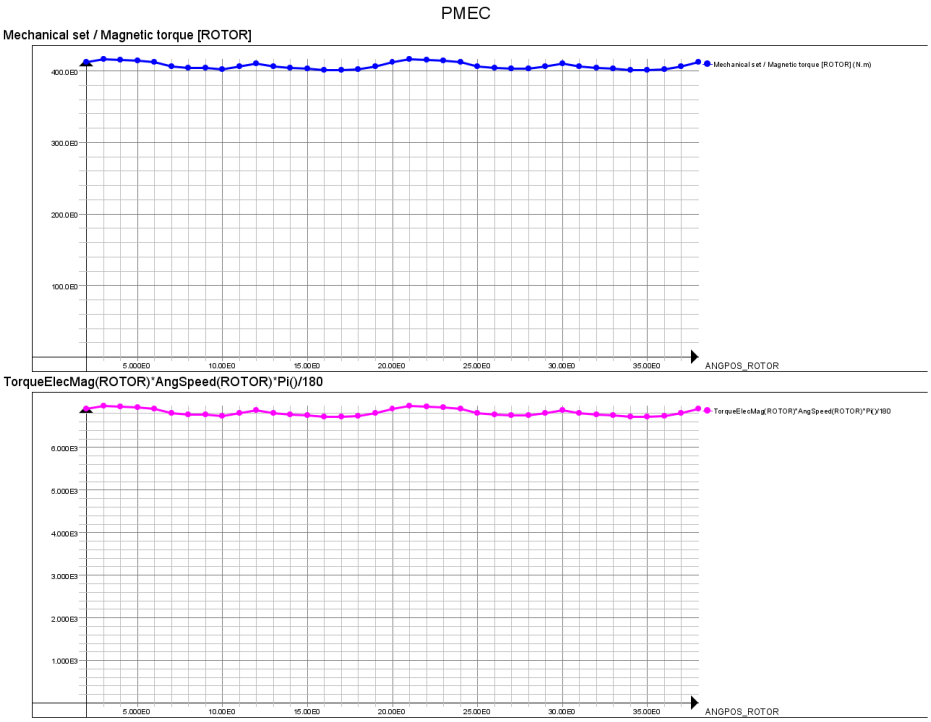
b) KMSM2 için FLUX-2D programı ile moment/rotor konumu grafiği



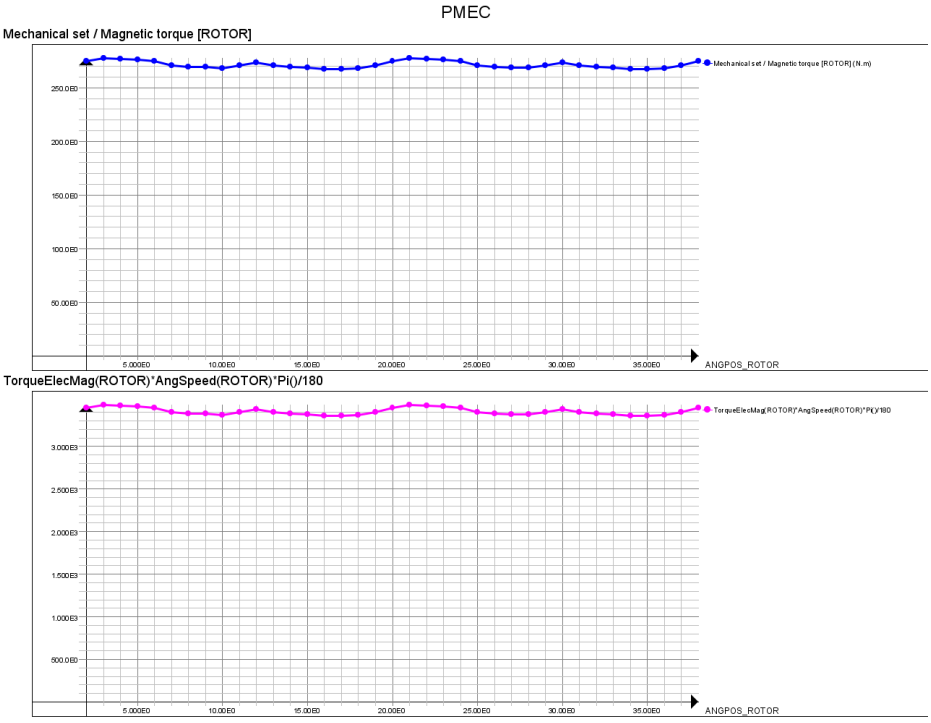
c) KMSM3 için FLUX-2D programı ile moment/rotor konumu grafiği



d) KMSM4 için FLUX-2D programı ile moment/rotor konumu grafiği



e) KMSM5 için FLUX-2D programı ile moment/rotor konumu grafiği

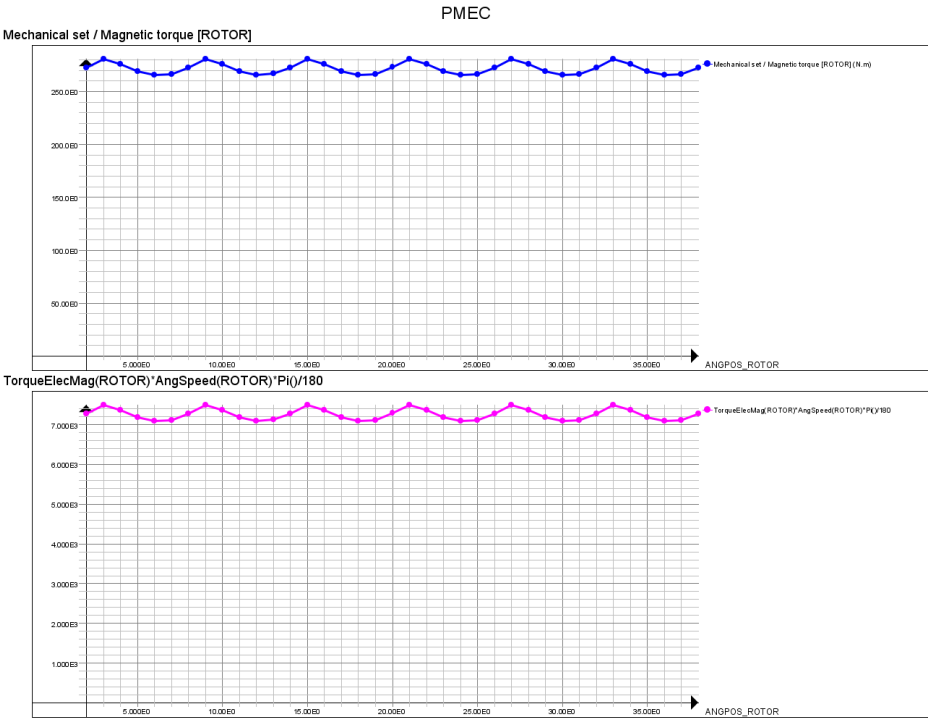


f) KMSM6 için FLUX-2D programı ile moment/rotor konumu grafiği

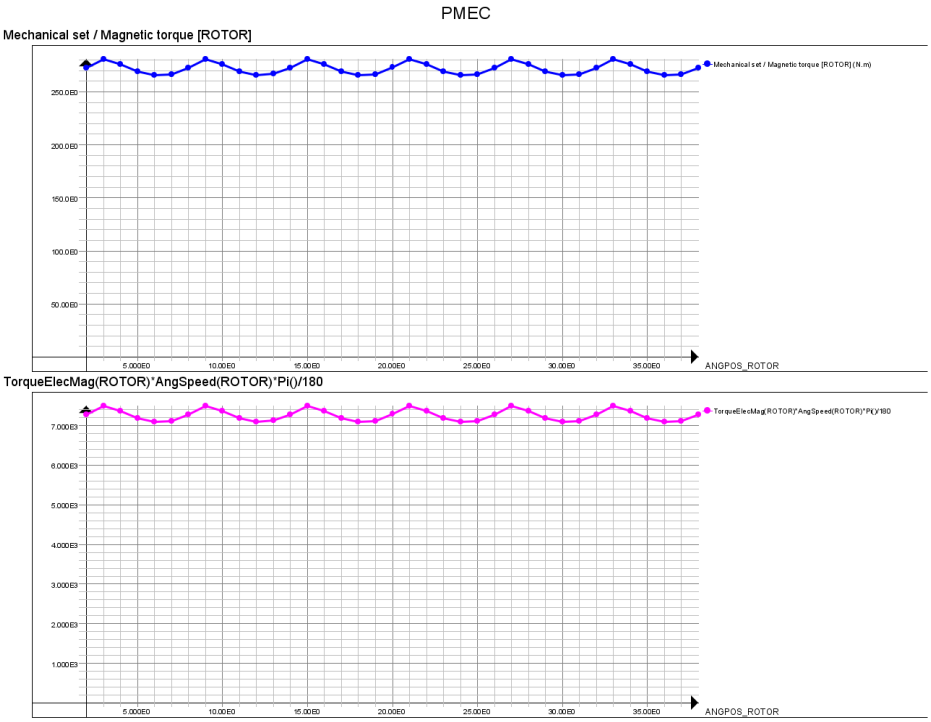
Şekil 8.15. Motorlara ait ön analitik tasarım parametreleri için FLUX-2D programı ile moment/rotor konumu grafikleri

8.7.2. YAKA-PSOA ile elde edilen tasarım parametreleri için FLUX-2D programı simülasyon sonuçları

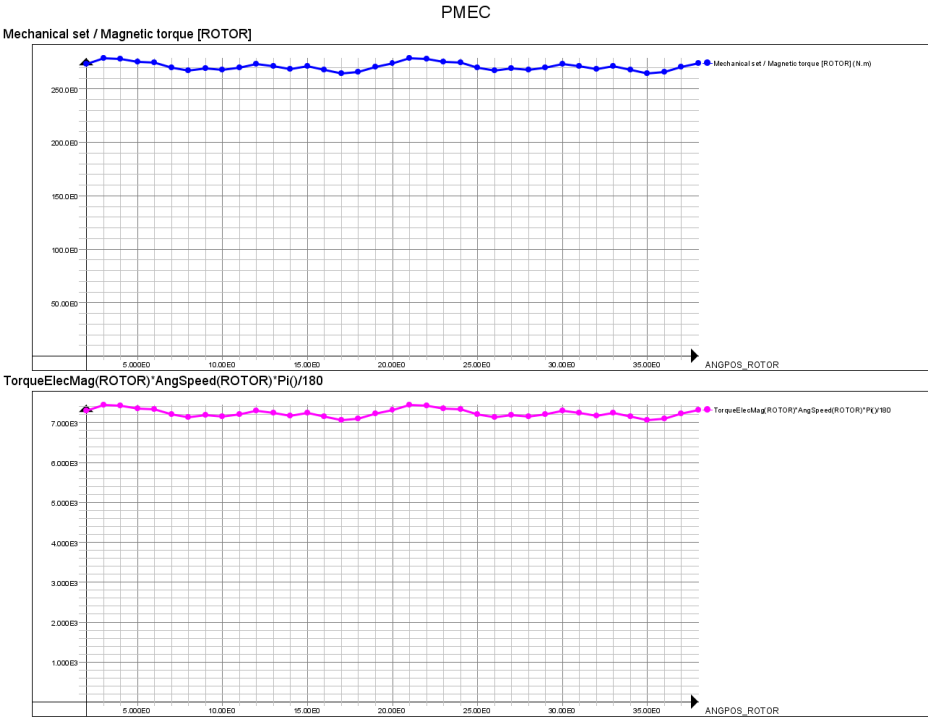
Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında YAKA-PSOA motor geometrileri için FLUX-2D programı ile yapılan analiz sonuçlarında elde edilen verim değerleri KMSM1 için %92.97, KMSM2 için %92.55, KMSM3 için %93.71, KMSM4 için %84.44, KMSM5 için %91.58 ve KMSM6 için %88.73'tür. Motorlara ait moment/rotor konum grafikleri Şekil 8.16.'da verilmiştir. Optimum tasarım parametreleri için FLUX-2D programı ile elde edilen KMSM1 ve KMSM2 moment/rotor konum grafiklerinde moment dalgalılığı (torque ripple) fazla iken KMSM3, KMSM4, KMSM5 ve KMSM6 moment/rotor konum grafiklerinde moment dalgalılığı düşüktür.



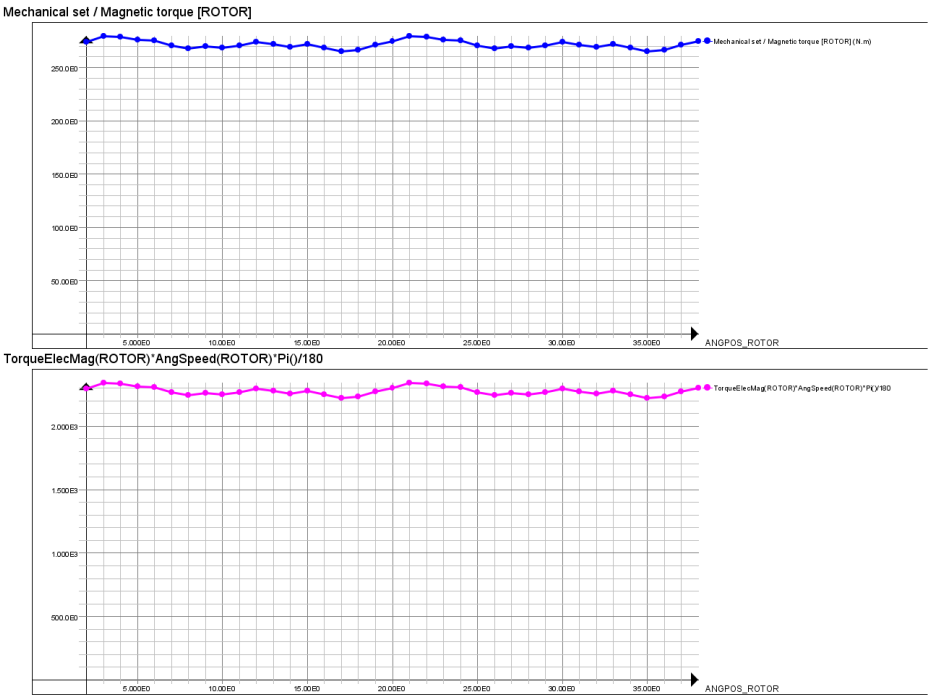
a) KMSM1 için FLUX-2D programı ile moment/rotor konumu grafiği



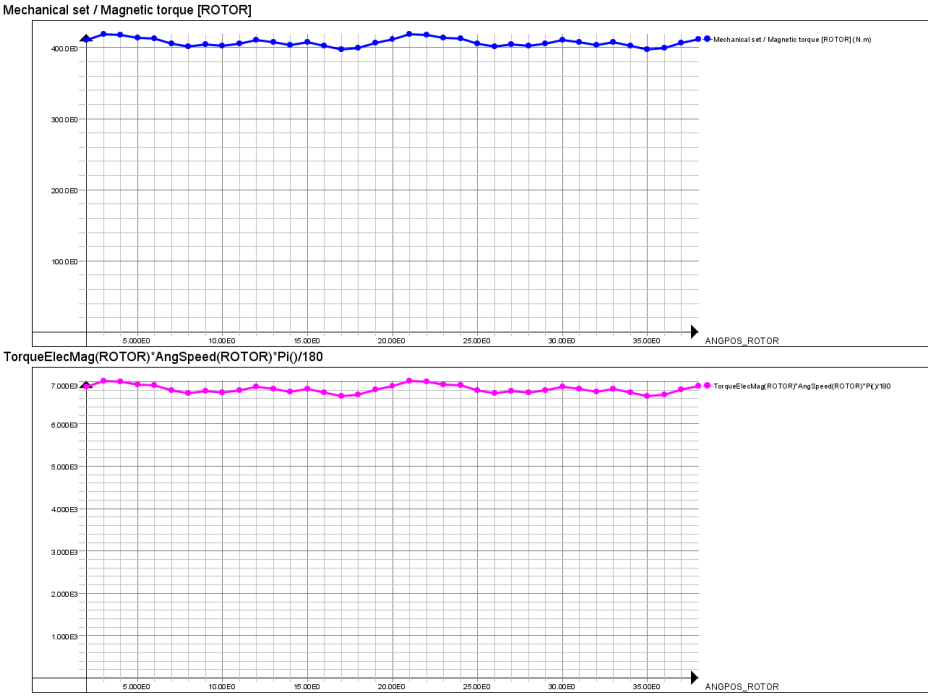
b) KMSM2 için FLUX-2D programı ile moment/rotor konumu grafiği



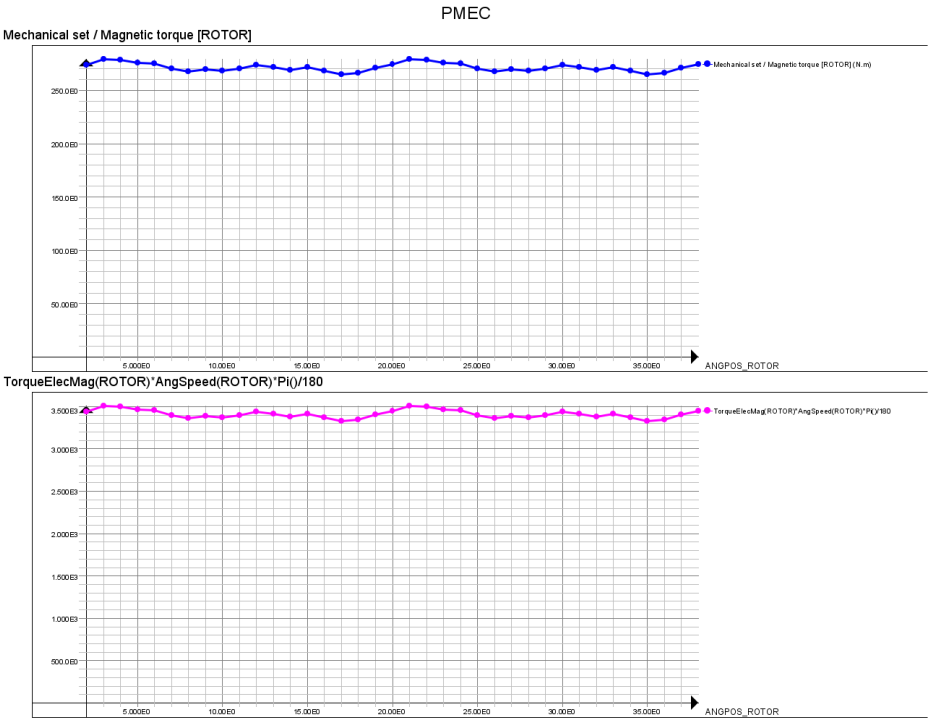
c) KMSM3 için FLUX-2D programı ile moment/rotor konumu grafiği



d) KMSM4 için FLUX-2D programı ile moment/rotor konumu grafiği



e) KMSM5 için FLUX-2D programı ile moment/rotor konumu grafiği



f) KMSM6 için FLUX-2D programı ile moment/rotor konumu grafiği

Şekil 8.16 Motorlara ait YAKA-PSOA ile elde edilen tasarım parametreleri için FLUX-2D programı ile moment/rotor konumu grafikleri

8.8. Tasarım Optimizasyonu Sonuçlarının Gösterilmesi

Bu tez çalışmasında elde edilen kalıcı mıknatıslı senkron motorlara ait çıkış gücü, giriş gücü, moment, akım, EMK, bakır kaybı, demir kaybı, verim ve verim hata değerleri Çizelge 8.16. – Çizelge 8.21.'de verilmektedir. Mutlak verim hata değerlerinin hesaplanmasında SPEED ve FLUX-2D programı ile elde edilen verim değerleri esas alınmıştır.

Çizelge 8.16. KMSM1 için elde edilen değerler

	FLUX-2D	**ANALİTİK**	**SPEED**	**FLUX-2D**	**PSOA**	**SPEED**
P_G (W)	8057.69	8074.05	8165.66	7708.07	7804.40	7891.23
P_C (W)	7210.78	7200.00	7395.04	7239.57	7200.00	7380.20
M (Nm)	270.03	269.63	276.93	271.12	269.63	276.38
I (A)	15.87	15.87	15.87	15.24	15.24	15.24
E (V)	157.59	169.05	160.63	161.11	181.61	165.50
P_B (W)	790.11	789.85	743.71	506.49	506.44	472.82
P_D (W)	29.76	84.20	26.90	73.12	97.96	38.21
η (%)	89.12	89.17	90.56	92.97	92.26	93.52
η_{hata} (%)	**0.06**		**1.53**	**0.76**		**1.35**

Çizelge 8.17. KMSM2 için elde edilen değerler

	FLUX-2D	ANALİTİK	SPEED	FLUX-2D	PSOA	SPEED
P_G (W)	8202.50	7946.38	7976.04	7784.06	7719.27	7733.43
P_C (W)	7243.47	7200.00	7408.26	7255.00	7200.00	7355.63
M (Nm)	271.26	269.63	277.43	271.69	269.63	275.46
I (A)	18.73	18.73	18.73	16.40	16.40	16.40
E (V)	140.10	143.28	136.13	146.44	168.84	153.33
P_B (W)	658.29	658.53	535.84	410.88	410.86	331.05
P_D (W)	43.58	87.85	31.94	50.78	108.41	46.74
η (%)	87.78	90.61	92.88	92.55	93.27	95.11
η_{hata} (%)	**3.22**		**2.44**	**0.78**		**1.93**

Çizelge 8.18. KMSM3 için elde edilen değerler

	FLUX-2D	ANALİTİK	SPEED	FLUX-2D	PSOA	SPEED
P_G (W)	8080.56	7913.47	8008.71	7669.20	7697.56	7755.15
P_C (W)	7234.95	7200.00	7404.42	7235.14	7200.00	7354.67
M (Nm)	270.94	269.63	277.28	270.94	269.63	275.42
I (A)	18.47	18.47	18.47	16.17	16.17	16.17
E (V)	135.68	145.26	138.06	143.50	171.17	155.51
P_B (W)	640.53	625.62	572.34	389.01	389.15	353.73
P_D (W)	38.82	87.85	31.94	48.22	108.41	46.74
η (%)	89.05	90.98	92.45	93.71	93.54	94.84
η_{hata} (%)	**2.17**		**1.59**	**0.18**		**1.37**

Çizelge 8.19. KMSM4 için elde edilen değerler

	FLUX-2D	ANALİTİK	SPEED	FLUX-2D	PSOA	SPEED
P_G (W)	2965.07	2911.67	2906.31	2678.98	2679.36	2687.71
P_C (W)	2273.81	2262.00	2328.68	2274.92	2262.00	2313.99
M (Nm)	271.42	270.01	277.97	271.55	270.01	276.21
I (A)	7.00	7.00	7.00	5.92	5.92	5.92
E (V)	130.40	120.44	114.47	138.02	147.04	133.58
P_B (W)	627.60	627.38	568.57	390.66	390.24	360.48
P_D (W)	10.42	22.29	9.06	12.92	27.11	13.25
η (%)	76.34	77.69	80.12	84.44	84.42	86.10
η_{hata} (%)	**1.77**		**3.03**	**0.02**		**1.95**

Çizelge 8.20. KMSM5 için elde edilen değerler

	FLUX-2D	ANALİTİK	SPEED	FLUX-2D	PSOA	SPEED
P_G (W)	7882.26	7730.14	7787.19	7400.93	7416.85	7455.00
$P_Ç$ (W)	6819.89	6786.00	6984.10	6819.72	6786.00	6935.89
M (Nm)	407.03	405.01	416.83	407.02	405.01	413.96
I (A)	18.50	18.50	18.50	15.82	15.82	15.82
E (V)	131.94	136.71	129.94	142.84	164.94	149.85
P_B (W)	870.06	870.05	774.59	540.00	540.05	477.43
P_D (W)	33.72	74.10	28.49	41.84	90.80	41.68
η (%)	86.09	87.79	89.69	91.58	91.49	93.04
η_{hata} (%)	**1.97**		**2.12**	**-0.10**		**1.67**

Çizelge 8.21. KMSM6 için elde edilen değerler

	FLUX-2D	ANALİTİK	SPEED	FLUX-2D	PSOA	SPEED
P_G (W)	4131.85	4055.62	4080.51	3820.26	3826.28	3849.81
$P_Ç$ (W)	3409.11	3393.00	3491.04	3409.85	3393.00	3470.26
M (Nm)	271.29	270.01	277.81	271.35	270.01	276.15
I (A)	9.71	9.71	9.71	8.30	8.30	8.30
E (V)	131.46	130.20	123.75	140.54	157.27	142.88
P_B (W)	627.00	627.38	575.55	390.09	390.24	359.19
P_D (W)	16.26	35.24	13.92	20.16	43.04	20.36
η (%)	82.11	83.66	85.55	88.73	88.68	90.14
η_{hata} (%)	**1.89**		**2.21**	**-0.06**		**1.62**

Çizelge 8.16. – Çizelge 8.21.'de verilen değerler incelendiğinde kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarımları ile ilgili aşağıda belirtilen değerlendirmeleri yapmak mümkündür:

- Elektrik motorlarının tamamında olduğu gibi kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda verimin artırılması için bakır ve demir kayıplarının azaltılması gerekmektedir. Bununla birlikte düşük hızlarda kullanılan kalıcı mıknatıslı senkron motorların frekans değerleri de düşük olduğundan dolayı demir kayıplarının toplam kayıplara oranı azdır. Bu nedenle motorların verimlerinin iyileştirilmesi için bakır kayıpları daha büyük önem arz etmektedir. Bakır kayıplarının değişimi ise iki faktöre bağlıdır. Bunlar, motor akımı dolayısıyla stator sargısı akım yoğunluğu; stator sargısı direnci dolayısıyla stator sargısı kesitidir. Geometrisi optimize edilen motorlarda stator sargısı akım yoğunluğu düşmekte ve stator sargısı direnci azalmaktadır.
- Kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda verimi artırmak için stator oluk ve rotor kutup oranının değiştirilmesi ve farklı sargı sarım tekniklerinin kullanılması faydalı olmaktadır. Bu sayede motorun veriminde geometriye bağlı olarak iyileştirme sağlanmaktadır. Burada çalışılan üç adet motor yapısından kırksekiz oluklu yirmi kutuplu çift katman sargılı kalıcı mıknatıslı senkron motor diğer motor yapılarından daha üstün performans göstermektedir. Bununla birlikte moment dalgalılığını (torque ripple) da çift katmanlı sargılı motor geometrisi düşürmektedir. Bu durum ise motor veriminin iyileştirilmesi yanında daha memnuniyet verici bir gelişmedir (Şekil 8.13. – Şekil 8.16.).
- DEA, YAKA ve PSOA ile kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında genel olarak daha iyi sonuçlar alınmıştır. Bu algoritmalar kolay kod yazılımına ve üstün operatörlere sahip olması gibi nedenlerden dolayı

geniş çözüm uzayında global ve lokal çözümleri birlikte tarayarak optimum sonuçlara ulaşabilmektedir.

- Yapay zekâ tekniklerinden PSOA ile kalıcı mıknatıslı senkron motorların verimlerinin iyileştirilmesinde diğer metotlara göre daha iyi sonuçlar alınmıştır. Çizelge 8.16. – Çizelge 8.21.'de verilen değerlere göre tasarım optimizasyonları sonrasında motor verimlerinin iyileştirildiği görülmektedir. Ayrıca SPEED ve FLUX-2D programları ile yapılan analizlerde tasarım optimizasyonları sonrasında motor verimlerine ait hata değerlerinin azaldığı da görülmektedir.
- Çizelge 8.16. – Çizelge 8.21.'de verilen değerlere göre geliştirilen tasarım programı, SPEED ve FLUX-2D ile elde edilen motorlara ait EMK değerleri arasında belirgin fark vardır. Bu durum ise elektrik motor tasarımlarına yönelik analitik hesaplamaların yetersizliğini ortaya koymaktadır. Bu yetersizlik elektrik motor geometrisindeki manyetik akı dağılımının analitik metotla tam olarak ortaya konamamasıdır.
- Kalıcı mıknatıslı senkron motorların verimlerinin iyileştirilmesinde düşük akımlara sahip motor geometrilerinin elde edilmeleri motor sürücüleri açısından da büyük önem arz etmektedir. Çizelge 8.16. – Çizelge 8.21.'e göre motor akım değerleri KMSM1 için %3.97, KMSM2 için %12.44, KMSM3 için %12.45, KMSM4 için %15.43, KMSM5 için %14.49 ve KMSM1 için %14.52 oranında azalmıştır. Bu sayede daha düşük güçlü sürücüler kullanılarak toplam sistem maliyeti azaltılmış olmaktadır.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında farklı yapay zekâ teknikleri kullanılarak kalıcı mıknatıslı senkron motorların geometrik parametrelere bağlı verim iyileştirmeleri yapılmıştır. Tasarım optimizasyonları gerçekleştirilen motorların asansör taşıma sistemlerinde kullanılacağı düşünülerek yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı, dağıtılmış ve konsantre sargılı olarak motor geometrileri belirlenmiştir. Kalıcı mıknatıslı senkron motorların sahip oldukları temel büyüklükler Çizelge 8.1.'de verilmiştir. Çizelge 8.1.'de verilen özelliklere sahip kalıcı mıknatıslı senkron motorlar asansör taşıma sistemleri gibi düşük hızlı endüstriyel uygulamalar için yeterli donanımı sağlamaktadırlar. Bununla birlikte kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında kullanılan yapay zekâ tekniklerinden GA ile ikili kodlu (binary) olarak, BTA, DEA, YAKA ve PSOA ile gerçek kodlu olarak çalışılmıştır.

Çizelge 8.13., Çizelge 8.14. ve Çizelge 8.15.'te her bir motor için yapay zekâ teknikleri ile elde edilen optimum verim değerlerini sağlayan tasarım parametreleri Çizelge 8.7.'deki korelasyon değerlerine paralel olarak optimum değerlere yakınsamaktadır. Ön analitik tasarım değerlerine göre yapay zekâ teknikleri ile elde edilden tasarım parametrelerinden kalıcı mıknatıs kalınlığı, stator dış çapı ve stator oluk kalınlığı artmış; hava aralığı genişliği, stator ağız kalınlığı, stator diş kalınlığı ve stator ağız açıklığı genişliğinin stator oluk genişliğine oranı azalmıştır.

KMSM1 için Çizelge 8.13.'te verilen sonuçlara göre verim %89.175 değerinden %92.256 değerine yükselmiştir; KMSM2 için Çizelge 8.14.'te verilen sonuçlara göre verim %90.607 değerinden %93.273 değerine yükselmiştir; KMSM3 için Çizelge 8.15.'te verilen sonuçlara göre verim %90.984 değerinden %93.536 değerine yükselmiştir. Bu verim değerlerine göre KMSM1 için %3.46, KMSM2 için %2.94, KMSM3 için %2.8'lik bir verim iyileştirmesi yapay zekâ teknikleri kullanılarak sağlanmıştır.

Yapay zekâ tekniklerinin performansları populasyon ve iterasyon sayılarına göre değerlendirildiğinde genel olarak yüksek populasyon ve iterasyon sayılarında elde edilen sonuçların daha iyi olduğu görülmektedir (Çizelge 8.8. – Çizelge 8.12.). Fakat bu durumda algoritmaların iterasyon süreleri artmaktadır. Bir elektrik motorunun tasarım süreci baştan sona kadar ele alınarak toplam tasarım süresine bakıldığında ise bu yapay

zekâ tekniklerin faydası ve kullanılabilirlikleri ortaya çıkmaktadır. Ayrıca yapay zekâ teknikleri ile elde edilen verim değerlerinin birbirlerine yakınlığı da her bir algoritma için olumlu bir durumdur. Bununla birlikte parçacık sürü optimizasyon algoritmasının optimum değere yakınsama hızı oldukça yüksektir (Şekil 8.12.). Şekil 8.1., Şekil 8.3. ve Şekil 8.5.'de KMSM1, KMSM2 ve KMSM3 için verilen grafiklere göre yapay arı koloni algoritması diğer algoritmalardan daha kararlı yapıdadır. Diferansiyel evrim algoritması ise genetik aloritmaya ve benzetilmiş tavlama algoritmasına göre daha üstün performansa sahiptir (Şekil 8.1. – Şekil 8.6.). Bu nedenle optimizasyon çalışmalarında global arama ile birlikte lokal aramayı da başarıyla gerçekleştiren (Şekil 8.7. – Şekil 8.11.) ve güçlü operatörlere sahip yeni nesil yapay zekâ tekniklerinin kullanılmasının oldukça faydalı olduğu görülmüştür.

Tasarım optimizasyon çalışmalarında elde edilen kalıcı mıknatıslı senkron motorlara ait çıkış gücü, giriş gücü, moment, akım, EMK, bakır kaybı, demir kaybı ve verim değerleri Çizelge 8.16. – Çizelge 8.21.'de verilmiştir. Bu değerlere göre yüksek verimli bir motor geometrisinde stator sargı kesiti artmakta ve stator sargısı akım yoğunluğu ise azalmaktadır. Bu sonuç endüstriyel bir motor tasarım çalışması için pratik bir yaklaşım sunmaktadır. Bununla birlikte daha üstün performans değerlerindeki motorların üretimi tasarlandığında ilk olarak motor geometrisinin uygun bir şekilde belirlenmesi büyük bir önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında üç adet motor yapısından kırksekiz oluklu yirmi kutuplu çift katman sargılı kalıcı mıknatıslı senkron motor diğer motor yapılarından daha üstün bir performans göstermektedir. Moment dalgalılığı (torque ripple) da çift katman sargılı motor geometrisi ile düşürülmektedir (Şekil 8.13. – Şekil 8.16.). Bu durum ise motor veriminin iyileştirilmesi ile birlikte daha memnuniyet verici bir gelişmedir.

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım ve tasarım optimizasyonlarında kullanılmak üzere bir arayüz tasarım programı oluşturulmuştur. Bu tasarım programı ile motorların analitik tasarımları ve yapay zekâ teknikleri ile tasarım optimizasyonları yapılabilmektedir. Bu sayede motorların tasarım ve analiz süreci kısaltılmıştır.

Bu tez çalışmasında tasarımları gerçekleştirilen kalıcı mıknatıslı senkron motorları test etmek için SPEED ve FLUX-2D programları kullanılmıştır. Ayrıca motor tasarımı üzerine farklı geometrik kombinasyonlar bu programlar sayesinde titizlikle incelenmiştir. SPEED ve FLUX-2D programları ile yapılan analizlerde ön analitik tasarım verim değerleri ile simülasyon değerleri arasındaki hata değerlerinin tasarım optimizasyonları sonrasında motor verim değerleri ile simülasyon değerleri arasındaki

hata değerlerinden büyük olduğu görülmüştür. Bu nedenle tasarım optimizasyonları sonuçları analiz programları ile de doğrulanmıştır.

Şekil 8.13. – Şekil 8.16.'da gösterilen moment grafiklerine göre en yüksek verime ve en az moment dalgalılığına sahip geometri 20 kutup / 48 oluk çift katmanlı KMSM olmuştur. Elde edilen bu KMSM geometrisi farklı özelliklerdeki motorlar için de denenmiş ve olumlu sonuçlar alınmıştır (Çizelge 8.19. – Çizelge 8.21.). Ön analitik ve tasarım optimizasyonu sonrası KMSM1 ve KMSM2 modelleri için vuruntu moment (cogging torque) grafikleri de EK-1 ve EK-2'de verilmiştir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen TÜBİTAK/TEYDEB projesi kapsamında elde edilen tasarım ve tasarım optimizasyonu verileri prototip kalıcı mıknatıslı senkron motor imalinde kullanılmıştır. Proje sonrasında prototip motorun seri üretimine geçilerek ülke ekonomisine katkı sağlanmıştır.

9.2. Öneriler

Bu tez çalışmasında KMSM tasarım ve tasarım optimizasyonu yapay zekâ teknikleri ile gerçekleştirilmiştir.

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım süreci bilgi ve tecrübe gerektiren bir süreçtir. Parametre sayısının çokluğu ve tasarım probleminin lineer olmaması çözümü zorlaştırmaktadır. Bu durum tasarım probleminin matematiksel olarak hassas bir şekilde ortaya konmasını etkilemektedir. Burada elektrik motorlarının simülasyonlarının sayısal analiz programları ile yapılmaları çok gereklidir. Bu açıdan elektrik motor tasarımlarında kullanılan analiz programlarının çok yönlü olarak geliştirilmeleri gerekmektedir. Örneğin, bu analiz programlarının bir veya birkaç amaç fonksiyonuna yönelik motor analizi yapabilmeleri çok faydalı olacaktır.

Endüstriyel alanlardaki KMSM tasarım ve tasarım optimizasyonu çalışmaları çok amaçlı olarak gerçekleştirilmelidir. Bu ise farklı disiplerden uzmanların çalışmasını zorunlu kılmaktadır. Kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında genel olarak ısı transferleri, elektriksel ve mekanik kayıplar, sürücü sistemleri, genel performans değerleri, moment harmonikleri gibi kriterler bağımsız olarak veya birlikte çalışılabilir. Fakat söz konusu çalışmaların büyük bir maliyet gerektirdiğine de dikkat edilmelidir. Bu yönüyle elektrik motorları üzerine çalışmalarda profesyonel laboratuvar ortamları hazırlanmalıdır.

10. KAYNAKLAR

Akay, B., 2009, Nümerik optimizasyon problemlerinde yapay arı kolonisi algoritmasının performans analizi, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri.

Antoniou, A., Lu, W.S., 2007, Practical optimization algorithms and engineering applications, *Springer Science+Business Media*, New York-USA, 64-79.

Aydın, M., 2008, Magnet skew in cogging torque minimization of axial gap permanent magnet motors, *ICEM - Proceedings of the International Conference on Electrical Machines*, Sayfa 1-6.

Aydın, M., Huang, S., Lipo, T.A., 2001, Optimum design and 3D finite element analysis of non-slotted and slotted internal rotor type axial flux PM disc machines, *Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol.3, Sayfa 1409-1416.

Aydın, M., Huang, S., Lipo, T.A., 2010, Design, analysis, and control of a hybrid field-controlled axial-flux permanent-magnet motor, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 1.

Aydın, M., Ocak O., Albaş, G.Ç., 2012, Kalıcı mıknatıslı senkron motorların doğrudan sürüşlü beyaz eşya uygulamalarında kullanımı, *EMO Bilimsel Dergi*, Cilt 2, Sayı 3, Sayfa 7-11.

Babr, S.M., 2007, Design of PM motors with concentrated windings for concrete cutters, Yüksek Lisans Tezi, *Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics*, Stockholm.

Bianchi, N., Canova, A., 2002, FEM analysis and optimisation design of an IPM synchronous motor, *International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, Sayfa 49-54.

Bianchi, N., Bolognani, S., Frare, P., 2006, Design criteria for high-efficiency SPM synchronous motors, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 2.

Bianchi, N., Bolognani, S., 1998, Design optimisation of electric motors by genetic algorithms, *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, Vol. 145, No. 5, Sayfa 475-483.

Cassimere, B.N., Sudhoff, S.D., 2009, Population-based design of surface-mounted permanent-magnet synchronous machines, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 24, No. 2.

Chin, Y.K., Soulard, J., 2009, Design study of a traction motor for electric vehicles, *ICEMS – Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems*, Vol. 1, Sayfa 786-791.

Cvetkovski, G., Petkovska, L., 2008, Efficiency maximisation in structural design optimisation of permanent magnet synchronous motor, *IEEE Proceedings of the International Conference on Electrical Machines*.

Çunkaş, M., 2004, Elektrik motorlarında genetik algoritma ile tasarım optimizasyonu, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 67-68.

El-Refaie, A.M., 2010, Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machines: opportunities and challenges, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 1.

El-Refaie, A.M., Jahns, T.M., 2008, Impact of winding layer number and magnet type on synchronous surface PM machines designed for wide constant-power speed range operation, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 23, No. 1.

FLUX-2D, 2010, Application Brushless motor with embedded magnets technical paper, *Flux® 2D Cedrat Copyright*, FRANCE.

Gieras, J.F., 2010, Permanent magnet motor technology design and applications, *CRC Press, Taylor & Francis Group*, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, 89-119.

Guru, B.S., Hiziroglu, H.R., 2004, Electromagnetic field theory fundamentals, *Cambridge University Press*, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 2RU, UK, 590-594.

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

Gradinaru, V., Tutelea, L., Boldea, I., 2008, 25 kW, 15 krpm, 6-4 PMSM - optimal design and torque pulsation reduction via FEM, *OPTIM – 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic*, Sayfa 249-256.

Güemes, J.A., Iraolagoitia, A.M., Donsión, M.P., Del Hoyo, J.I., 2008, Analysis of torque in permanent magnet synchronous motors with fractional slot windings, *ICEM - Proceedings of the International Conference on Electrical Machines*, Sayfa 1-4.

Hamiti, T., Gerada, C., Rottach M., 2011, Weight optimisation of a surface mount permanent magnet synchronous motor using genetic algorithms and a combined electromagnetic-thermal co-simulation environment, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Sayfa 1536-1540.

Hanselman, D.D., 1994, Brushless permanent-magnet motor design - version 1, *R. R. Donnelley & Sons Company*, USA, 11-12.

Ho, S.L., Chen, N., Fu, W.N., 2010, An optimal design method for the minimization of cogging torques of a permanent magnet motor using FEM and genetic algorithm", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Volmue 20, Sayfa 861-864.

Hwang, C.C., Chang, C.H., Li, P.L., 2009, Design optimization for cogging torque minimization and efficiency maximization of a high-speed PM motor, *PEDS - International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Sayfa 938-943.

Isfahani, A.H., Sadeghi, S., 2008, Design of a permanent magnet synchronous machine for the hybrid electric vehicle, *Proceedings of World Academy of Science Engineering and Technology*, Volume 35.

Karaboga, D., 2005, An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, Technical Report TR06, *Computer Engineering Department, Engineering Faculty, Erciyes University, Kayseri, Turkey*.

Karaboga, D., 2011, Yapay zekâ optimizasyon algoritmaları, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, TÜRKİYE.

Kennedy, J., Eberhart, R.C., 1995, Particle swarm optimization, *International Conference on Neural Networks*, Vol. IV, Sayfa 1942-1948.

Keskintürk, T., 2006, Diferansiyel gelişim algoritması, *YA/EM - Yöneylem Araştırması / Endüstri Mühendisliği - XXVI. Ulusal Kongresi*, Sayfa 214-217.

Kim, K.C., Lee, J., Kim, H.J., Koo, D.H., 2009, Multiobjective optimal design for interior permanent magnet synchronous motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, No. 3.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P., 1983, Optimization by simulated annealing, *Science, New Series*, Vol. 220, No. 4598, Sayfa 671-680.

Kolehmanien, J., 2010, Optimal dovetail permanent magnet rotor solutions for various pole numbers, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 1.

Libert, F., 2004, Design, optimization and comparison of permanent magnet motors for a low-speed direct-driven mixer, Öğrenimini Tamamlamış Doktora Tezi (Licentiate), *Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics*, Stockholm.

Libert, F., Soulard, J., 2003, Design study of a direct-driven surface mounted permanent magnet motor for low speed application, *Proceedings of Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems Electromotion*.

Libert, F., Soulard, J., 2005, Design study of low-speed direct-driven permanent-magnet motors with concentrated windings, *6th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems*.

Libert, F., Soulard, J., 2006, Manufacturing methods of stator cores with concentrated windings, *PEMD - 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*.

Mai, H.C.M., Dubas, F., Chamagne, D., Espanet, C., 2009, Optimal design of a surface mounted permanent magnet in-wheel motor for an urban hybrid vehicle, *VPPC - IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Sayfa 481-485.

Meng, X., Wang, S., Qiu, j., Zhang, Q., Zhu, J.G., Guo, Y., Liu, D., 2011, Robust multilevel optimization of PMSM using design for six sigma, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 10.

Mi, C.C., 2006, Analytical design of permanent-magnet traction-drive motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 42, No. 7.

Michalewicz, Z., 1996, Genetic algorithms + data structures = evolution programs - third, revised and extended edition, *Springer-Verlag*, Berlin, 1-10.

Miller, T.J.E., 1989, Brushless permanent-magnet and reluctance motor drives, *Oxford University Press, Walton Street*, Oxford, 34-53.

Mohammed, O.A., 1997, GA optimization in electric machines, *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*.

Pfister, P.D., Perriard, Y., 2010, Very-high-speed slotless permanent-magnet motors: analytical modeling, optimization, design, and torque measurement methods, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 1.

Pillay, P., Levin, V., Otaduy, P., Kueck, J., 1998, In-situ induction motor efficiency determination using the genetic algorithm, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 13, No. 4.

Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcová, V., 2008, Design of rotating electrical machines, *John Wiley & Sons Ltd*, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, 1-9.

Rao, S.S., 2009, Engineering optimization: theory and practice – 4th ed., *John Wiley & Sons, Inc.*, Hoboken-New Jersey, 1-6.

Rasmussen, K.F., Davies, J.H., Miller, T. J. E., McGilp, M.I., Olaru, M., 2000, Analytical and numerical computation of air-gap magnetic fields in brushless motors with surface permanent magnets, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 36, No. 6.

Salminen, P., Jokinen, T., Pyrhönen, J., 2005, Pull-out torque of fractional-slot PM-motors with concentrated winding, *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, Vol. 152, No. 6.

Salminen, P., Pyrhönen, J., Jussila, H., Niemela, M., 2007, Concentrated wound permanent magnet machines with different rotor designs, *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Sayfa 514-517.

Salminen, P., Pyrhönen, J., Libert, F., Soulard, J., 2005, Torque ripple of permanent magnet machines with concentrated windings, *ISEF - XII International*

Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering.

Stening, A., 2006, Design and optimization of a surface-mounted permanent magnet synchronous motor for a high cycle industrial cutter, Yüksek Lisans Tezi, *Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics*, Stockholm.

Storn, R., Price, K., 1995, Differential evolution - a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces, Technical report TR-95-012, *International Computer Science Institute, Berkley*.

Sudhoff, S.D., Cale, J., Cassimere, B., Swinney, M., 2005, Genetic algorithm based design of a permanent magnet synchronous machine, *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, Sayfa 1011-1019.

Tsampouris, E.M., Beniakar, M.E., Kladas, A.G., 2012, Geometry optimization of PMSMs comparing full and fractional pitch winding configurations for aerospace actuation applications, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 2.

Tudorache, T., Trifu, I., 2012, Permanent-magnet synchronous machine cogging torque reduction using a hybrid model, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 10.

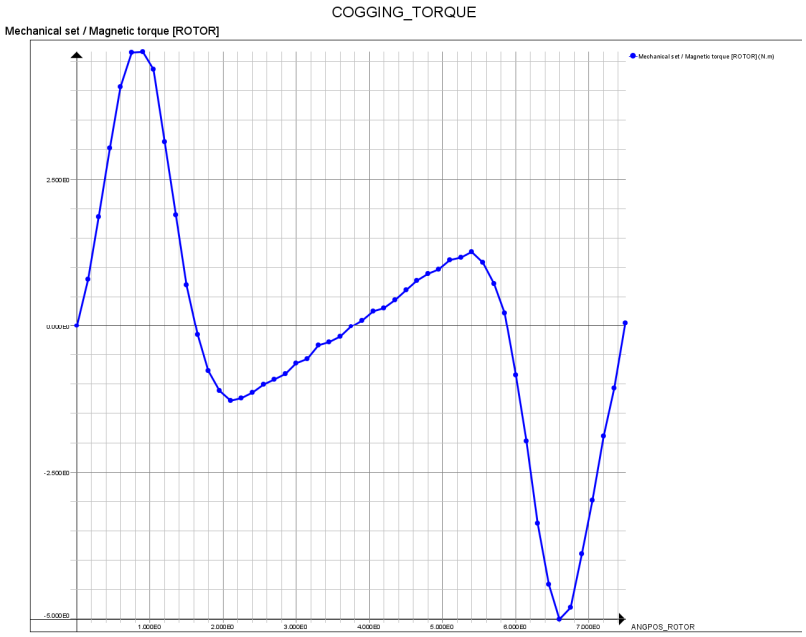
Wang, S., Meng, X., Guo, N., Li, H., Qiu, J., Zhu, J.G., Guo, Y., Liu, D., Wang, Y., Xu, W., 2009, Multilevel optimization for surface mounted PM machine incorporating with FEM, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol 45, No. 10.

Yang, X.S., 2010, Engineering optimization - an introduction with metaheuristic applications, *John Wiley & Sons, Inc.,* Hoboken-New Jersey, 181-188.

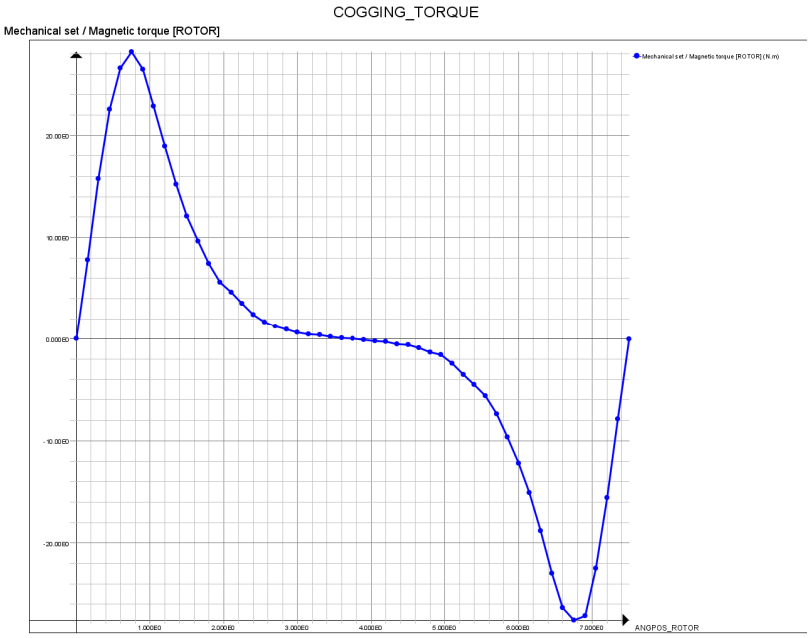
Yaojing, F., Kai, Y., Chenglin, G., 2009, Design and optimization of external-rotor torque motor, *ICEMS - International Conference on Electrical Machines and Systems*, Sayfa 1-4.

EKLER

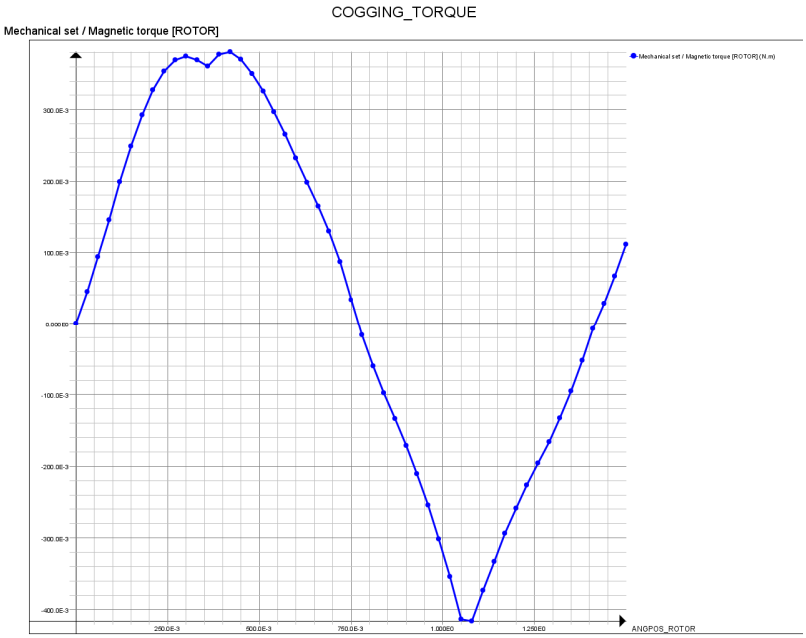
EK-1A Ön Analitik Parametre Değerleri İçin KMSM1 Vuruntu Moment Grafiği (Cogging Torque)



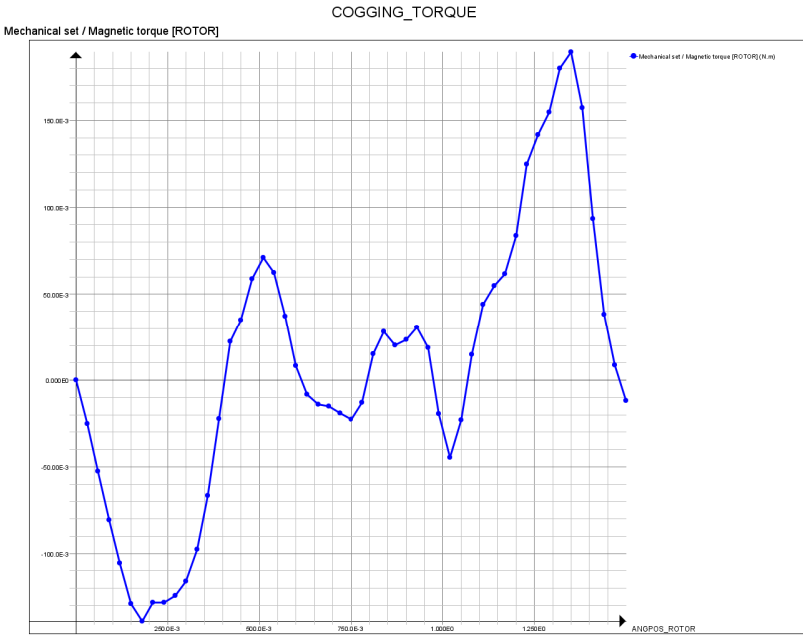
EK-1B Optimum Parametre Değerleri İçin KMSM1 Vuruntu Moment Grafiği (Cogging Torque)



EK-2A Ön Analitik Parametre Değerleri İçin KMSM2 Vuruntu Moment Grafiği (Cogging Torque)



EK-2B Optimum Parametre Değerleri İçin KMSM2 Vuruntu Moment Grafiği (Cogging Torque)



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Mümtaz MUTLUER
Uyruğu	**:**	TC
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Konya / 1979
Telefon	**:**	+90 332 223 21 70
Faks	**:**	+90 332 241 06 35
e-mail	**:**	mmutluer@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	**Konya İmam Hatip Lisesi**	**1999**
Üniversite	:	**Selçuk Üniversitesi**	**2004**
Yüksek Lisans	:	**Selçuk Üniversitesi**	**2007**
Doktora	:	**Selçuk Üniversitesi**	**2013**

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2004-2006	**MEDAŞ**	**Elektrik Mühendisi**
2006-2006	**TCK 3. Bölge Müdürlüğü**	**Elektrik Mühendisi**
2006-…	**Selçuk Üniversitesi**	**Araştırma Görevlisi**

UZMANLIK ALANI

Elektrik Motorları Tasarımı, Yapay Zekâ Teknikleri

YABANCI DİLLER

Arapça, İngilizce

YAYINLAR*

1. Mutluer, M., Bilgin, O., Çunkaş, M., 2007, Parameter determination of induction machines by hybrid genetic algorithms, KES 2007, Part I, LNAI 4692, pp. 116–124. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)
2. Bilgin, O., Altun, Y., Mutluer, M., 2010, PLC ile kontrol edilen bir asansörün SCADA ile izlenmesi ve arıza takibi, ELECO.

3. Mutluer, M., Bilgin, O., 2011, Application of a hybrid evolutionary technique for efficiency determination of a submersible induction motor, Turk J Elec Eng & Comp Sci, Vol.19, No.5. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)
4. Mutluer, M., Bilgin, O., 2012, Comparison of stochastic optimization methods for design optimization of permanent magnet synchronous motor, Neural Comput & Applic, Volume 21, Number 8, 21:2049-2056. (Doktora tezinden yapılmıştır)
5. Mutluer, M., Bilgin, O., 2012, Optimal design of permanent magnet synchronous motor by hybrid evolutionary method based on input parameter selection, ICCIT. (Doktora tezinden yapılmıştır)
6. Mutluer, M., Bilgin, O., 2012, Application of genetic algorithm in design optimization of permanent magnet synchronous motor, BATMANSCS. (Doktora tezinden yapılmıştır)
7. Mutluer, M., Bilgin, O., 2012, Design optimization of PMSM by particle swarm optimization and genetic algorithm, INISTA. (Doktora tezinden yapılmıştır)