



**SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN GENETİK ALGORİTMA ile
VERİM ve AĞIRLIK AMAÇ FONKSİYONLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

İlyas ALADAĞ

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hasan KÜRÜM

AĞUSTOS-2017

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN GENETİK ALGORİTMA ile
VERİM ve AĞIRLIK AMAÇ FONKSİYONLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlyas ALADAĞ
(122113105)

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Programı: Elektrik Makineleri

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11/07/2017
Tezin Savunulduğu Tarih : 01/08/2017

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hasan KÜRÜM (F.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ (M.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. Abuzer ÇALIŞKAN (F.Ü.)

AĞUSTOS-2017

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarında değerli bilgi ve tecrübelerini paylaşan, tezime ve bana sağlamış olduğu katkılarından dolayı danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hasan KÜRÜM'e teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım boyunca mesleki paylaşımlarından ötürü değerli hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet POLAT'a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Eyyüp ÖKSÜZTEPE'ye teşekkür ederim.

Maddi ve manevi yardımını üzerimden eksiltmeyen ve tecrübesi ile yol gösteren Sayın Yrd. Doç. Dr. Taner GÖKTAŞ'a bana ve tez çalışmalarına yaptığı katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Meslek hayatımın her anında varlığı, ilgisi ve bilgisiyle desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyen, her zaman yanımda olan eşim Sayın Arş. Gör. Canan ALADAĞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Beni bugünlere getiren, her zaman yanımda olan anneme ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımda bana sağladığı imkan ve olanaklardan dolayı T.C. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesine teşekkürlerimi sunarım.

İlyas ALADAĞ

ELAĞİ-2017

İÇİNDEKİLER

Sayfa no

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
ABSTRACT	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
KISALTMALAR.....	XIV
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Bakış	1
1.2. Daha Önce Yapılan Çalışmalar	2
1.3. Tezin Amacı	10
2. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR	11
2.1. Giriş	11
2.2. Sürekli Mıknatıslı Motorlar	11
2.2.1. Yüzey Mıknatıslı Senkron Motorlar	12
2.2.2. Dahili Mıknatıslı Senkron Motorlar	13
2.3. Sürekli Mıknatıslı Motorlarda Kullanılan Malzemeler	15
2.3.1. Silisli Çelik Sac Malzemeleri	15
2.3.2. Sürekli Mıknatıs Malzemeleri	17
3. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN ÖN ANALİTİK TASARIMI 19	
3.1. Yüzey Mıknatıslı Senkron Motorların Geometrisi.....	19
3.2. Yüzey Mıknatıslı Senkron Motorların Manyetik Analizi.....	21
3.3. Yüzey Mıknatıslı Senkron Motorların Elektriksel Analizi.....	23
3.3.1. Stator İndüktans Hesabı.....	25
3.3.2. Stator Sargı Direnci Hesabı	27
3.3.3. Motorun Zıt EMK Hesabı	27

3.3.4. Stator Sargı Sayısı Hesabı	28
3.4. Yüzey Mıknatıslı Senkron Motorların Verim Analizi.....	29
3.4.1. Bakır Kaybının Hesabı	29
3.4.2. Demir Kaybının Hesabı	30
4. SEZGİSEL ZEKA TEKNİKLERİ	33
4.1. Optimizasyon.....	33
4.2. Modern Yapay Zeka Algoritmaları	34
4.3. Genetik Algoritma	36
5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	38
5.1. Maxwell Denklemleri	38
5.2. Sınır Koşulları	39
5.2.1. Dirichlet sınır koşulu	39
5.2.2. Neumann sınır koşulu.....	39
5.2.3. Karma sınır koşulu	40
5.3. Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Programlar	40
5.3.1. Maxwell Programı	40
5.3.2. EMETOR Programı.....	43
6. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN TASARIM OPTİMİZASYONU	46
6.1. Genetik Algoritma Yöntemi ile SMSM'nin Optimizasyonunun Gerçekleştirilmesi ...	47
6.1.1. Bireyin Kodlanması.....	47
6.1.2. Başlangıç Topluluğu.....	48
6.1.3. Uygun Bireylerin Seçilmesi	48
6.2. Tasarım Optimizasyonu Parametreleri	50
6.3. Tasarım Optimizasyonu Sınır Değerleri.....	51
6.4. Tasarım Optimizasyonu Sonuçları	53
6.5. Giriş Tasarım Parametrelerinin Değişimi.....	54

6.6. Motorların Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları	54
7. SONUÇLAR.....	65
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ	71



ÖZET

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar yüksek verimlilik, düşük hacim, yüksek güç kapasitesi ve moment yoğunluğuna sahip olduğundan dolayı endüstride birçok uygulamada tercih edilmektedirler. Diğer tür elektrik makinalarında olduğu gibi sürekli mıknatıslı senkron motorlarda da verimlilik artırma çalışmaları optimizasyon uygulamaları ile gerçekleştirilmektedir. Sürekli mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında genetik algoritma (GA) tekniği gibi birçok yapay zeka tekniği kullanılmaktadır.

Bu çalışmada ilk olarak literatürde bulunan sürekli mıknatıslı senkron motorların tasarım çalışmaları detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalara bakıldığında stator ve rotor için farklı durumların dikkate alındığı görülmüştür. Yapılan her bir tasarım iyileştirmesinin ardındaki temel sebepler; kayıpların, ağırlığın, vuruş momentinin ve moment dalgalanmasının minimum seviyeye indirilmesidir. Bu sebepler doğrultusunda yüzey mıknatıslı ve içten rotorlu bir yapıya sahip, dağıtılmış (distributed) ve toplu (concentrated) stator sargı yapısındaki senkron motorların ön analitik tasarımı gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile doğrulanmıştır. Sonlu elemanlar analizi, ANSYS@Maxwell-2D ve EMETOR programları ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra motorların tasarım optimizasyonları genetik algoritma optimizasyon tekniği ile iyileştirilmiştir. Ön analitik tasarım, optimizasyon tasarımı ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Bu tez çalışmasının sonucunda tasarlanan sürekli mıknatıslı senkron motorda verim değerinin arttığı, toplam ağırlık değerinin ve moment dalgalanmasının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu tezde motor tasarımında performans ve verimlilik gibi önemli parametrelerin değişimi incelenmiş ve motor üretim aşaması için gerekli işlemlere ön hazırlık niteliği taşıyan bir çalışma yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Genetik Algoritma, Motor Tasarımı ve Optimizasyonu, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

ABSTRACT

Improvement of Efficiency and Weight Objective Functions of Permanent Magnet Synchronous Motor with Genetic Algorithm

Permanent magnet synchronous motors are preferred in many industrial applications due to their high efficiency, power capacity, torque density and low volume. As with other types of electric machines, efficiency enhancement studies are carried out with optimization applications also in permanent magnet synchronous motors. Many artificial intelligence techniques such as genetic algorithm (GA) technique are used in design optimization of permanent magnet synchronous motors.

In this study, firstly the design works of permanent magnet synchronous motors in the literature have been examined in detail. Looking at the work done, it is seen that different situations are taken into consideration for the stator and the rotor. The fundamental reasons behind each design improvement are losses, weight, cogging torque and torque ripple to a minimum level. For these reasons, preliminary analytical design of synchronous motors in distributed and concentrated stator winding with surface magnet and inner rotor structure has been realized and the results have been verified by the finite element method (FEM). Finite element analysis was performed with ANSYS@Maxwell-2D and EMETOR programs. Then the design optimizations of the motors were improved by the genetic algorithm optimization technique. Preliminary analytical design, optimization design and finite element analysis results are compatible each other. As a result of this thesis study, it has been observed that the value of the motor efficiency is increased, total weight and the torque ripple is decreased. In this thesis, the changes in parameters such as performance and efficiency which are important in motor design are examined and a study is carried out which carries the preliminary qualification for the processes required for the motor production stage.

Keywords: Genetic Algorithm, Motor Design and Optimization, Finite Element Method, Permanent Magnet Synchronous Motor

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa no

Şekil 1.1. Motorun stator sargı konfigürasyonları ve rotor yapısı.....	5
Şekil 1.2. Farklı oluk/kutup kombinasyonlarının moment ve motor kayıplarına etkisi.....	6
Şekil 2.1. SM motor yapıları a) Yüzey mıknatıslı b) Yüzeye gömülü mıknatıslı c) Kutup ayaklı yüzey mıknatıslı d) Dahili mıknatıslı motorlar	12
Şekil 2.2. Yüzey mıknatıslı motor yapısı	13
Şekil 2.3. Gömülü mıknatıslı motor yapısı	14
Şekil 2.4. Farklı türdeki sürekli mıknatısların B-H eğrisi	18
Şekil 3.1. Yüzey mıknatıslı senkron motor geometrisi	20
Şekil 3.2. Yüzey mıknatıslı senkron motor manyetik eşdeğer devresi	21
Şekil 3.3. Gerçek ve temel hava aralığı akı yoğunluğu.....	23
Şekil 3.4. SMSM için moment/ hız eğrisi	24
Şekil 3.5. Yüzey mıknatıslı senkron motorun elektriksel eşdeğer devreleri	24
Şekil 3.6. Yüzey mıknatıslı senkron motorun nominal hızdaki elektriksel fazör diyagramı	25
Şekil 3.7. k_c ve k_q değerlerinin yaklaşım grafiği.....	31
Şekil 4.1. Evrimsel algoritmaların akış diyagramı	35
Şekil 4.2. Genetik algoritma akış diyagramı	37
Şekil 5.1. RMXprt kütüphanesindeki makine modelleri.....	41
Şekil 5.2. RMXpert'te oluşturulan motorun detayları.....	41
Şekil 5.3. M400-50A sac malzemesinin manyetizasyon eğrisi.....	43
Şekil 5.4. Vuruntu momenti (cogging torque) grafiği.....	43
Şekil 5.5. EMETOR programı ekran arayüzü	44
Şekil 5.6. SMSM'nin geometrik kesiti ve ağ yapısı.....	44
Şekil 5.7. SMSM'nin zıt-EMK dalga şekli	45
Şekil 6.1. Kromozom yapısı	47
Şekil 6.2. Yeni üretilen bireylerin kabarcık sıralama yöntemi ile sıralanması	49
Şekil 6.3. Kromozom kod dizisi.....	49
Şekil 6.4. Analitik tasarımı gerçekleştirilen SMSM1 ve SMSM2 Maxwell-2D geometrisi.....	52
Şekil 6.5. SMSM1 ve SMSM2'nin sargı yapısı	52
Şekil 6.4. SMSM1 ön analitik tasarım Maxwell 2D moment-zaman grafiği.....	55

Şekil 6.5. SMSM1 ön analitik tasarım Maxwell 2D faz akımları grafiği	56
Şekil 6.6. SMSM1 Maxwell 2D zıt EMK grafiği	56
Şekil 6.7. SMSM1 ön analitik tasarım EMETOR moment-zaman grafiği	57
Şekil 6.8. SMSM1 GA tasarımı Maxwell 2D moment-zaman grafiği.....	57
Şekil 6.9. SMSM1 GA tasarımı Maxwell 2D faz akımları grafiği.....	58
Şekil 6.10. SMSM1 GA tasarımı Maxwell 2D zıt-EMK-zaman grafiği.....	58
Şekil 6.11. SMSM1 ön analitik tasarım EMETOR moment-zaman grafiği	59
Şekil 6.12. SMSM2 ön analitik tasarımı Maxwell 2D moment-zaman grafiği.....	60
Şekil 6.13. SMSM2 ön analitik tasarımı Maxwell 2D faz akımları-zaman grafiği	60
Şekil 6.14. SMSM2 ön analitik tasarımı Maxwell 2D zıt EMK-zaman grafiği.....	61
Şekil 6.15. SMSM2 ön analitik tasarım EMETOR moment-zaman grafiği	61
Şekil 6.16. SMSM2 GA tasarımı Maxwell 2D moment-zaman grafiği.....	62
Şekil 6.17. SMSM2 GA tasarımı Maxwell 2D faz akımları-zaman grafiği.....	62
Şekil 6.18. SMSM2 GA tasarımı Maxwell 2D zıt EMK-zaman grafiği	63
Şekil 6.19. SMSM2 ön analitik tasarım EMETOR moment-zaman grafiği	63

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa no

Tablo 1.1. Sargı düzeni ve oluk açıklığı geometrisinin indüktans değerlerine etkisi [13]. ..	6
Tablo 1.2. Sargı yapılarının karşılaştırılması	8
Tablo 2.1. SM motorların karşılaştırılması	14
Tablo 2.2. Farklı standartlardaki en önemli silisli sac değerleri	15
Tablo 2.3. Avrupa normlarında sık kullanılan sac malzemeleri	16
Tablo 2.4. Sac malzemeleri manyetizasyon eğri değerleri	17
Tablo 2.5. Sürekli mıknatıslı malzemelerin karşılaştırması	18
Tablo 3.1. Farklı oluk/kutup kombinasyonları için maksimum sargı faktörü değerleri ve oluk başına faz-kutup sayısı değerleri	26
Tablo 3.2. Sargı sabitleri	27
Tablo 5.1. Örnek SMSM modeli için RMxpert parametre değerleri	42
Tablo 6.1. Kullanılan motorların etiket değerleri	46
Tablo 6.2. Tasarım optimizasyonu parametreleri	50
Tablo 6.3. Optimizasyon sınırlamaları	51
Tablo 6.4. Giriş parametreleri sınır değerleri	51
Tablo 6.5. SMSM1' in optimum verim sonuçları	53
Tablo 6.6. Ön analitik ve optimizasyon işlemi ile elde edilen motor parametreleri	54
Tablo 6.7. SMSM1 motorunun ön analitik ve GA tasarımı performans sonuçları	55
Tablo 6.8. SMSM2 motorunun ön analitik ve GA tasarımı performans sonuçları	59

SEMBOLLER LİSTESİ

μ_0	: Boşluğun bağıl geçirgenliği
μ_r	: Bağıl manyetik geçirgenlik
A_i	: İletken alanı
A_s	: Oluk alanı
$\hat{B}_g$	: Temel hava aralığı yoğunluğu tepe değeri
$b_{ss0}, b_{ss1}, b_{ss2}$	: Oluk açıklığı, alt kısım açıklığı, üst kısım açıklığı
b_{ts}	: Dış kalınlığı
D_{rd}	: Rotor dış çapı
D_{ri}	: Rotor iç çapı
D_{sd}	: Stator dış çapı
D_{si}	: Stator iç çapı
g	: Rotor ve stator arasındaki hava aralığı
g_e	: Rotor ve stator arasındaki eşdeğer hava aralığı
h_{bc}, h_{rc}	: Stator ve rotor arka çekirdek uzunlukları
h_m	: Mıknatıs uzunluğu
h_s	: Oluk uzunluğu
h_{sw}	: Oluk ağzı uzunluğu
I_q	: Motorun q eksenî akımı
$\hat{I}$	: Motor akımı
J	: Akım yoğunluğu
k_c, k_q	: Geometrik düzeltme faktörleri
k_{carter}	: Carter katsayısı
k_d	: Düzeltme faktörü
k_{df}	: Dolgu faktörü
k_f, k_h	: Fuko ve histerisiz kayıp katsayıları

k_k	: Hava aralığındaki mıknatıslar arasındaki kaçak oranı
k_o	: Stator ağız genişlik katsayısı
k_{sf}	: Sargı faktörü
k_{ss}	: Sargı sonu faktörü
L	: Motorun paket boyu
L_d, L_q	: d ve q eksenli indüktansları
l_i	: İletken uzunluğu
L_k	: Kaçak indüktans
L_{md}, L_{mq}	: d ve q eksenli mıknatıslanma indüktansları
N_s	: Oluk sayısı
P_b	: Bakır kaybı
$P_ç$	: Çıkış gücü
P_d	: Demir kaybı
P_{d_sd}, P_{d_sn}	: Stator dişi ve nüvesi demir kayıpları
P_{f_sd}, P_{f_sn}	: Stator dişi ve nüvesi fuko kayıpları
P_{h_sd}, P_{h_sn}	: Stator dişi ve nüvesi histerisiz kayıpları
q	: Oluk başına faz-kutup sayısı
R_{faz}	: Faz direnci
R_g	: Hava aralığı relüktansı
R_{sm}	: Sürekli mıknatıs relüktansı
r_w	: Sargı yarıçapı
$\hat{S}$	: Akım yükü
T_n	: Nominal moment
W_{rn}	: Rotor nüvesi ağırlığı
W_{sd}	: Stator dişi ağırlığı
W_{sn}	: Stator nüvesi ağırlığı

w_{sm}	: Sürekli mıknatıs genişliği
β	: Motor akımı ve manyetik akı arasındaki açı
β_{st}	: Steinmetz katsayısı
λ_1	: Oluk açıklığının özgül geçirgenlik katsayısı
ρ_s, ρ_r	: Stator ve rotor kütle yoğunluğu
τ_s	: Stator oluk adımı
Φ_m	: Mıknatıslanma akısı
ω_{el}	: Elektriksel açısal hız
2α	: Mıknatısın elektriksel açısı

KISALTMALAR

AA	: Alternatif akım
ÇTS	: Çift tabakalı sargı
DA	: Doğru akım
DEA	: Diferansiyel evrim algoritması
EMK	: Elektromotor kuvveti
FDAM	: Fırçasız doğru akım motoru
GA	: Genetik algoritma
MMK	: Manyetomotor kuvveti
PSO	: Parçacık sürü optimizasyonu
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
SM	: Sürekli mıknatıs
SMSM	: Sürekli mıknatıslı senkron motor
TTS	: Tek tabakalı sargı
YAKA	: Yapay arı koloni algoritması

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bakış

Enerjinin verimli bir şekilde kullanımı günümüzde oldukça önemlidir. Kaliteyi ve miktarı düşürmeden üretimi en üst seviyede tutmak enerji verimliliğinin temel prensibidir. Bunun yanında elektriksel, ısı ve mekaniksel kayıpların önlenmesi, atıkların geri kazanımı, üretimi azaltmadan enerji talebinin artırılması veya daha verimli kaynak kullanımı gibi faktörler ile verimlilik çalışmaları yapılmaktadır. Dünyada enerjinin her geçen gün daha da vazgeçilmez olmasından dolayı elektrik enerjisinin üretimi ve tüketimi konusunda ciddi çalışmalar yapılmaktadır.

Elektrik makineleri günlük yaşamda birçok yerde ve uygulamada kullanılmaktadır. Elektrik makineleri transformatörler, generatörler ve motorlar olarak üç ana gruptan meydana gelmektedir. Elektrik enerjisinin üretimi ve tüketimi açısından değerlendirecek olursak elektrik makinelerinin enerji verimliliğindeki önemi açık bir şekilde görülmektedir. Elektrik motorlarından mekanik enerji elde edebilmek için elektrik enerjisi kullanılmaktadır. Bundan dolayı elektrik motorlarında enerji verimliliği çok önemli ve kritik bir durumdur.

Yüksek manyetik özellikli sürekli mıknatısların (SM) kullanıldığı motorların başında sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM, *Permanent Magnet Synchronous Motor-PM SM*) ve fırçasız doğru akım motoru (FDAM) gelmektedir. Sürekli mıknatıslı motorların statorunda alan sargıları yer alır, rotorunda ise sargı yerine rotor akısı için gerekli olan sürekli mıknatıslar bulunmaktadır. Özellikle rotorunda uyarma sargısı olmaması ve fırça-kolektör sistemlerinin oluşturduğu kayıpların bu motorlarda olmaması göz önünde alındığında bu tip motorlar performans olarak çok büyük avantajlara sahiptirler. Sürekli mıknatıslı senkron motorlar yüksek verim, düşük moment dalgalılık karakteristikleri, birim hacimden elde edilen yüksek moment ve çıkış gücü, üretim ve bakım kolaylığı, hava aralığında oluşan yüksek manyetik alan yoğunluğu, bazı modellerinde maliyetin düşük olması, yüksek ve düşük hızlarda çalışabilme ve esnek tasarım yapılarından dolayı en çok tercih edilen motor türlerinden biridir.

SMSM'lerin tasarım geometrileri stator, sargılar, sürekli mıknatıslar, rotor ve milden oluşmaktadır. Elektrik motorlarının tasarımında motorların kullanım alanları ve maliyetleri, motorda kullanılan malzemelerin özellikleri gibi etkenler tasarımı sınırlayan faktörlerdendir. Bu nedenle motor tasarımına başlamadan önce tasarım geometrisinin belirlenmesi, daha

sonra ön analitik tasarım ile tasarım optimizasyonunun yapılması ve son olarak ise sayısal analiz programları ile tasarım simülasyonlarının yapılması gerekmektedir [1]. Burada optimizasyon aşaması, tasarım çalışmasının başlangıcı ile sonu arasında bir bağlantı sağlayarak maliyet ve zaman tasarrufu sağlayacaktır. Bu sayede tasarım aşamaları tamamlanan motorun prototip üretimine geçilebilir. Optimum koşullar sağlandığı takdirde seri üretim aşamasına geçilebilir.

1.2. Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Sürekli mıknatıslı motorların tasarımlarına ve iyileştirilmelerine yönelik birçok akademik çalışma yapılmıştır. Bu akademik çalışmalar analitik çözümlere dayalı nümerik yöntemler kullanılarak ve deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmalar olarak gruplandırılmaktadır. Sürekli mıknatıslı motorların tasarımlarına ilişkin çeşitli parametreler bulunmaktadır. Her parametre motor verimini veya boyutunu etkilediğinden ayrı bir araştırma konusu olarak incelenmiştir. Motorlarda kullanılan malzeme özelliklerinden rotor tasarımına, stator sargı düzeninden oluk/kutup kombinasyonuna kadar çok farklı kriterler dikkate alınarak tasarım yapılmaktadır. Bu çalışmalar motorun çıkış momentindeki dalgalanmalarını en az seviyeye düşürmek, vuruş momentini azaltmak, toplam harmonik bozulmayı düşürmek ve motor kayıplarını azaltarak verimi arttırmaya yöneliktir. Sonlu elemanlar yöntemi makinenin gerçek boyutlarını, malzeme özelliklerini ve stator sargı yapısını dikkate aldığından motor tasarımında oldukça sık kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar analizi ile tasarlanan sürekli mıknatıslı motorların deneysel sonuçlar ile doğrulandığı ayrıca motor iyileştirmeleri açısından literatürdeki çalışmalar aşağıda incelenmiştir.

Bianchi ve Bolognani yüzey montajlı sürekli mıknatıslı senkron motorun tasarım optimizasyonunu Genetik Algoritma Tekniği ve Hillclimbing metodunu kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Motorun tasarımında analitik bir metot ve SEY kullanılmıştır. Motorun moment, maliyet ve verim gibi amaç parametreleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Çalışmada genetik algoritmanın motor tasarım optimizasyonu olarak daha uygun sonuçlar ortaya koyduğunu, önerilen tasarımın yararları ve sınırlamaları üzerindeki sonuçları vurgulanmıştır [2].

Libert ve Soulard radyal akıllı sürekli mıknatıslı senkron motorları stator sargı düzeni, mıknatısların rotora yerleşimi, malzeme özellikleri ve oluk/kutup kombinasyonu gibi farklı

tasarım yöntemleri açısından karşılaştırmışlardır. Çalışmanın amacı endüstride yoğun olarak kullanılan asenkron motorun yerine birçok avantaja sahip SMSM'nin kullanımının yaygınlaştırılmasıdır. Çalışmanın sonucunda düşük hızlı uygulamalarda konsantre sargılı ve yüksek kutuplu motorların tasarımının daha iyi sonuçlar verdiği ve geleneksel dağıtılmış sargılı motorlara göre daha az ağırlığa sahip olduğu vurgulanmıştır [3].

Salminen ve ark., oluk/kutup kombinasyonuna bağlı olarak farklı konsantre sargılı yüzey montajlı sürekli mıknatıslı senkron motorların moment dalgalanmalarını araştırmışlardır. Çalışmanın amacı tasarım geometrisini değiştirerek moment dalgalanmalarının nasıl azaltılabildiğini ortaya koymaktır. Çalışmanın sonucunda mıknatıs genişliği ve oluk açıklığı gibi boyutsal parametrelerin yanında manyetik kuvetteki uzay harmonikleri ve hava aralığı akısındaki harmoniklerin birbirleriyle etkileşimi sonucunda vuruğu momenti etkisi azaltılarak moment dalgalanmasının azalabileceği vurgulanmıştır [4].

Başka bir çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan gömülü tip SMSM'nin tasarımını gerçekleştirilmiştir. Motorun tasarım optimizasyonu sabit güç bölgesinde yapılmıştır. Tasarım sonucunda elde edilen sonuçlar aynı boyut ve elektriksel değerlerde olan bir asenkron motorun performans sonuçları ile karşılaştırılmıştır [5].

Salminen ve ark., konsantre sargılı sürekli mıknatıslı senkron motorların oluk/kutup sayısının motor çıkış momentine etkilerini incelemişlerdir. Aynı çerçeve boyutuna, aynı çıkış gücüne ve aynı hıza sahip şekilde tasarlanmış konsantre sargılı sürekli mıknatıslı motorlarda faz ve kutup sayısı başına düşen oluk miktarı ile çıkış momenti arasında bir ilişki olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bu motorlar için indüktans değerlerine bağlı olarak çıkış momenti hesaplama yöntemleri karşılaştırmalı olarak vurgulanmıştır. Stator kaçak indüktansının diğer parametrelere göre daha etkili olduğu belirtilmiştir [6].

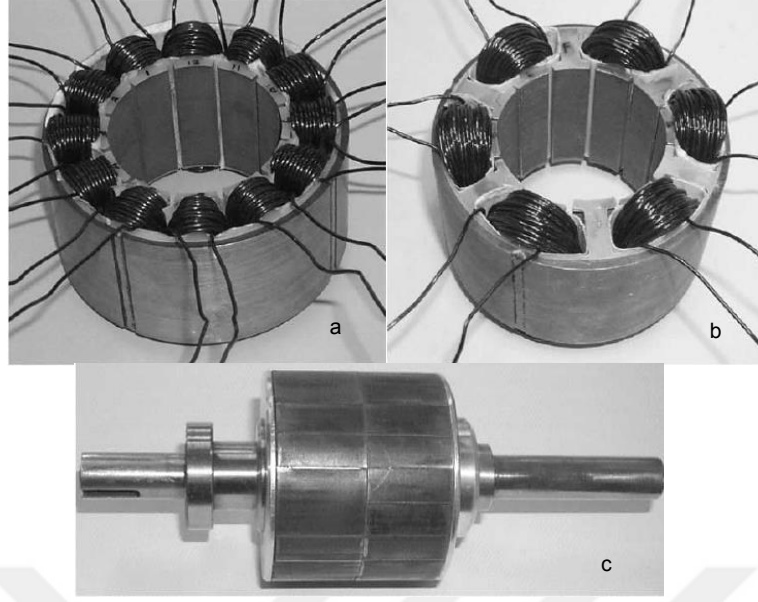
Sudhoff ve ark., genetik algoritma optimizasyon tekniğini kullanarak SMSM'nin verimini ve birim hacim başına düşen momentini arttıracak bir geometrik tasarım yapmışlardır. Tasarım optimizasyonu için oluşturulan denklemlere ek olarak Steinmetz yaklaşımının etkisi ile motorun demir kayıpları, sargı dizilimleri, momenti ve dış kalınlığı gibi önemli parametrelerin etkisi ile tasarım kriterleri için tek ve çok amaçlı fonksiyonların etkisi incelenmiştir [7].

Somanatham ve ark., yaptıkları çalışmada stator oluk yapısının vuruğu momentine olan etkisini incelemişlerdir. Referans bir oluk yapısının belirlendiği çalışmada üç farklı oluk

yapısı incelenerek vurutu momentine olan etkisi incelenmiştir. Önce diş kalınlığı inceltilerek aktif yüzey alanı küçültülmüştür. Sonrasında stator dişinin tabanında oluklu bir geometri oluşturularak yeni bir model oluşturulmuştur. Çalışmada SEY kullanılarak vurutu momentinin değişiminin etkisi gözlenmiştir. Referans modelin vurutu momentinin çıkış momentine oranı %38 olurken, inceltirilmiş diş yapısında olan tasarımda bu değer %41 olarak bulunmuştur. Son modelde ise bu değer %17'ye düşmüştür. Çalışma sonucunda oluk yapısının vurutu momentini etkilediği açık bir şekilde belirtilmiştir [8].

Libert ve Soulard konsantre sargılı SMSM'nin stator ve rotor sac paketlerinin üretim aşamalarını incelemişlerdir. Sac laminasyonları özellikle kayıplar ve üretim maliyeti açısından son derece önemlidir. Toplu sargıların dağıtılmış sargı tipine kıyasla sargı sonlarının kısa olması önemli bir avantaj iken sargıların oluklara yerleşim zorluğu bulunmaktadır. Ayrıca olukların açıklık oranlarına göre moment dalgalanmalarının etkisi incelenmiştir ve yarı açık oluk yapısının tam açık oluk yapısına göre daha az dalgalanmaya sahip olduğu vurgulanmıştır [9].

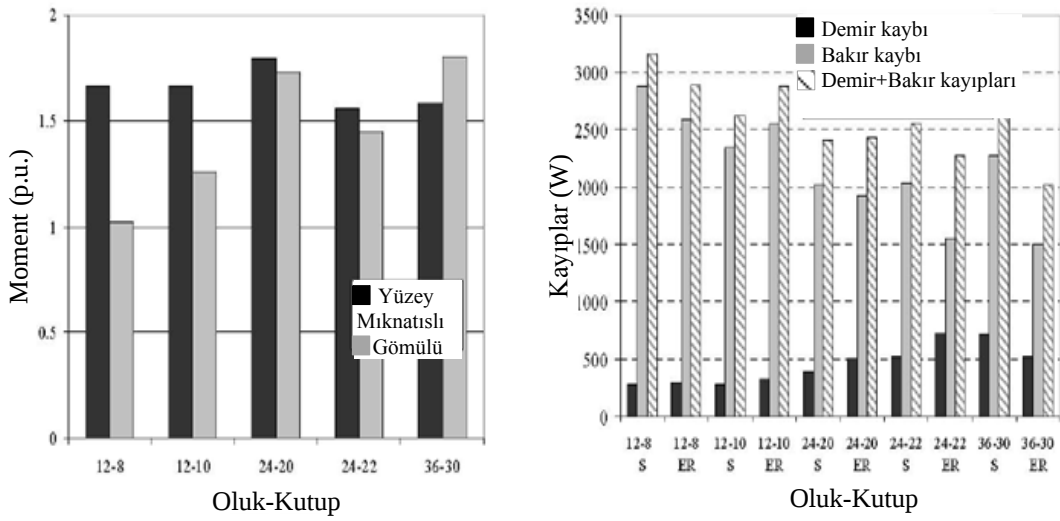
Ishak ve ark., yaptıkları çalışmada oluk/ kutup sayıları benzer ve sargı yapısı tek veya çift katmanlı olan toplu sargılı üç fazlı sürekli mıknatıslı fırçasız motorların elektromanyetik performanslarını detaylı bir şekilde karşılaştırmışlardır. Analitik ve SEY kullanarak hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı, vurutu momenti, elektromotor kuvveti (EMK), moment dalgalanmaları ve bobin indüktanslarını hesaplayarak sonuçları deneysel ölçümlerle doğrulamışlardır. Oluk adımı ve kutup adımının hemen hemen eşit olması yüksek bobin akısı ve moment yoğunluğu oluştururken kesirli oluk sargı kullanımının da düşük vurutu momenti oluşturduğu özellikle vurgulanmıştır. Çalışma sonucunda faz ve hat EMK dalga şekilleri, rotor pozisyonuna bağlı olarak moment dalga şekilleri, öz ve ortak indüktanslar arasında önemli bir fark olduğu gösterilmiştir. Aşağıdaki Şekil 1.1'de (a) Tüm dişlere sarılmış toplu sargı (b) belirli dişlere sarılmış toplu sargı ve (c) rotorun görüntüsü verilmiştir [10].



Şekil 1.1. Motorun stator sargı konfigürasyonları ve rotor yapısı [10].

Mi yaptığı çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan sürekli mıknatıslı senkron motorların mıknatıs hacmi ve boyutunun hesaplandığı bir analitik model oluşturmuştur. Motorun maliyet açısından en önemli kısmı mıknatısın fiziksel boyutudur. Çalışmada analitik modelin doğruluğu sonlu elemanlar yöntemi ile deneysel sistem tasarımı sonuçlarının karşılaştırılması yapılarak kanıtlanmıştır [11].

Salminen ve ark., toplu stator sargısına sahip rotorunda yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslar bulunan sürekli mıknatıslı motorların tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Beş farklı oluk/kutup kombinasyonundaki motorların maksimum moment ve anma yükü koşullarındaki makine karakteristikleri hesaplanmıştır. Düşük hızlı uygulamalarda kullanılan motorların tasarımı hem analitik hem de SEY ile yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda motorların moment ve bakır-demir kayıpları Şekil 1.2'deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Farklı oluk/kutup kombinasyonlarının moment ve motor kayıplarına etkisi [12].

El-Refaie ve ark., yaptıkları çalışmada motor performansında önemli bir parametre olan sargı indüktansının değerini farklı sargı tipleri, oluk/kutup kombinasyonları ve oluk açıklıkları açısından değerlendirmişlerdir. Sürekli mıknatıslı motorların relüktans momenti ve moment dalgalanmalarına sargı indüktansının doğrudan etki ettiği belirtilmiştir. Yüzey mıknatıslı motorlarda yüksek hızlara çıkabilmek için alan zayıflatma kontrolünün zorluğundan dolayı kesirli oluklu toplu sargı yapısı kullanılarak yüksek hızlara daha kolay erişilebileceği sonucu vurgulanmıştır. 12 oluk 10 kutup kombinasyonuna sahip motor için hem tek tabakalı sargı (TTS) hem de çift tabakalı sargı (ÇTS) yapısı kullanılarak öz ve ortak indüktans değerleri Tablo 1.1’de karşılaştırılmıştır.

Tablo 1.1. Sargı düzeni ve oluk açıklığı geometrisinin indüktans değerlerine etkisi [13].

	Tasarım 1		Tasarım 2		Tasarım 3		Tasarım 4	
Sargı tipi	TTS	ÇTS	TTS	ÇTS	TTS	ÇTS	TTS	ÇTS
$L_{öz}$	2.51 mH	3.94 mH	2.62 mH	4.08 mH	2.68 mH	4.16 mH	3.08 mH	4.70 mH
L_{ortak}	0.25 mH	3.67 μ H	0.27 mH	3.52 μ H	0.28 mH	3.67 μ H	0.35 mH	4.08 μ H

Tek tabakalı sargı kullanıldığında harmoniklerin ve oluk kaçak indüktansının artmasından dolayı daha yüksek indüktans değerlerinin elde edildiği vurgulanmıştır. Oluk açıklığı geometrisinin indüktans değerini doğrudan etkilediği kanıtlanmıştır [13].

Cvetkovski ve Petkovska SMSM'nin tasarım optimizasyonunu genetik algoritma tekniğini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon sonucu elde edilen sonuçlar SEY ile modellenerek karşılaştırılmıştır. Optimizasyon sonucunda bakır kayıplarının azaldığı ve dolayısıyla verimin arttığı gözlenmiştir [14].

Isfahani ve Sadeghi hibrit elektrikli araçlarda SMSM kullanımının önemini vurgulayarak motorun tasarım algoritmasını oluşturmuşlardır. Amaç fonksiyonu olarak mıknatıs maliyetini düşürme ve sabit moment bölgesinde çalışma hedeflenmiştir. Çalışmada gömülü tip sürekli mıknatıslı senkron motorun analitik tasarım modeli çıkartılarak tasarım algoritması geliştirilmiştir. Motora uygulanan genetik algoritma optimizasyon tekniği sonucunda elde edilen motor geometrisinde birim hacim başına düşen moment miktarının arttığı vurgulanmıştır. Daha sonra elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi uygulanarak doğrulanmıştır [15].

Cassimere ve Sudhoff sürekli mıknatıslı senkron motorun genetik algoritma ve parçacık sürü optimizasyon (PSO) tekniği ile tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Amaç fonksiyonu olarak verim ve birim hacim başına düşen moment miktarı göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmada evrimsel algoritmaların elektrik makineleri tasarımında etkin bir rol aldığı vurgulanmıştır. Evrimsel algoritmalar ile ilgili vurgulanan diğer noktalar ise; doğrudan kodlama yaklaşımının dolaylı kodlama yaklaşımına göre daha yüksek seçim değerleri bulmaya elverişli olduğu, optimizasyon için süresiz seçim fonksiyonunun sürekli seçim fonksiyonundan daha iyi olduğu, genetik algoritmanın parçacık sürü optimizasyonuna göre birey seçilimi ve kodlama açısından daha güvenilir olduğudur [16].

Cassimere ve Sudhoff'un yaptıkları çalışmaya göre popülasyona dayalı optimizasyon teknikleri kullanılarak tasarlanan elektrik makineleri için yoğun devre parametrelerinin yanı sıra manyetik alan dağılımının belirlenmesinde etkili bir yöntemin olması gerekmektedir. Çalışmada etkin amaca uygun nispeten açık bir analiz sunulmuştur. Özellikle sargı sonu kaçak indüktans hesabının geliştirilmiş bir metodu olan dengelenmiş eksenel uzunluk yöntemi ortaya konmuştur. Sunulan analiz ile laboratuvar ortamındaki test motorunun d ve q indüktans hesabındaki hata değeri belirli oranlarda azaltılmıştır [17].

Elektrik makinelerinin tasarım modellerinin yapıldığı çalışmada optimizasyon algoritmalarının kullanımının yüksek hesaplama verimliliğine katkı yaptığı vurgulanmıştır. Çalışmada öncelikle yüzey mıknatıslı senkron motorun analitik modeli oluşturulmuştur. Sonra parçacık sürü ve genetik algoritma optimizasyon teknikleri ile tasarlanan motorların performans, popülasyon büyüklüğü ve algoritma katsayıları açısından karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak PSO'nun GA'ya göre daha iyi sonuçlar verdiği ve zamanın sınırlayıcı bir faktör olması durumunda da daha avantajlı olduğu vurgulanmaktadır [18].

El-Refaie ve ark., yaptıkları çalışmada sürekli mıknatıslı senkron motorlarda sargı yapılarının önemini kapsamlı olarak incelemiştir. İlk aşamada radyal akı senkron motorlarda kullanılan sargı çeşitleri sınıflandırılmıştır. Bu çalışmada üst üste gelmeyen ve dişlerin üzerine sarılan bir sargı tipi olan toplu sargının tek veya çift tabakalı sargı olma etkisi incelenmiştir. SMSM'lerde kesirli oluk sargının kullanılması; yüksek oluk doluluk oranı, sargı sonu uzunluğunun kısa olması, düşük vurutu momenti, yüksek verim ve güç yoğunluğu, alan zayıflatma tekniğinin yüksekliği ve düşük hata toleransı gibi avantajlara sahiptir. Alan zayıflatmanın zor olduğu yüzey mıknatıslı motorlarda kesirli oluk toplu sargı kullanılarak bu problemin giderilebileceğinin önemi vurgulanmıştır. Çalışmada tek ve çift tabakalı stator sargılarının analiz sonuçları incelenerek detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır. ÇTS yapısında oluşan zıt EMK dalga şeklinin daha sinüzoidal olduğu görülmüştür. Tablo 1.2'de bu iki farklı sargı yapısı için karşılaştırma sonuçları verilmiştir. TTS yapısının yüksek faz indüktansına sahip olması alan zayıflatmanın daha kolay yapılabileceğini fakat zıt EMK dalga şeklinin sinüzoidal formdan uzaklaşması ve sargı faktörünün de yüksek olduğunu belirlemişlerdir. ÇTS kullanımının en büyük avantajlarından biri de sargı sonlarının kısa olması ve daha sinüzoidal bir zıt EMK dalga formuna sahip olmasıdır.

Tablo 1.2. Sargı yapılarının karşılaştırılması [19].

	Tek Tabakalı Sargı	Çift Tabakalı Sargı
Sargı Sonu	Uzun	Kısa
Faz İndüktansı	Yüksek	Düşük
Zıt-EMK	Daha az sinüzoidal	Daha iyi sinüzoidal
Sargı faktörü	Yüksek	Düşük
Oluk/kutup kombinasyonu	Az	Çok
Rotor kayıpları	Fazla	Az
Üretim kolaylığı	Kolay	Zor

Çalışmada ayrıca mıknatısların sinterlenmiş ve sıkıştırılmış olmalarına göre kullanımı karşılaştırılmıştır. Sinterlenmiş mıknatısların bulunduğu motorda moment yoğunluğu daha yüksek çıkarken mıknatısın daha kırılğan bir yapıda olduğu vurgulanmıştır. Çalışmada vurgulanan bir diğer önemli nokta ise ÇTS yapısında hava aralığında oluşan stator manyeto motor kuvveti (MMK) harmoniklerinin düşük oluşundan dolayı moment dalgalanmalarının TTS'ya nazaran daha az olacağı, fakat dişlerdeki manyetik doymanın daha kolay oluşabileceğidir [19].

Duan ve Ionel yaptıkları çalışmada yüzey mıknatıslı SMSM'lerin tek ve çok amaçlı tasarım optimizasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Motor tasarımında kısıtlamaların ve özel algoritmaların önemini vurgulayarak diferansiyel evrim algoritması (DEA) ve tepki yüzeyi algoritmasını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda birey sayısının az olduğu durumda diferansiyel algoritma optimizasyon yönteminin daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Ayrıca çalışma son on yılın motor tasarım optimizasyon yöntemleri hakkında geniş bir bilgi vermektedir [20].

Guo ve ark., yüzey mıknatıslı senkron motorun moment dalgalanması değerini azaltmak için çok amaçlı optimizasyon tekniklerini kullanmışlardır. Çalışmada arama kabiliyetini arttırmak ve optimizasyon hesaplama süresini azaltmak amacıyla parçacık sürü optimizasyonu tekniği kullanılmıştır. Yöntemin doğruluğunu kanıtlamak için analitik tasarım geometrisi ile motorun optimizasyon sonrasında oluşan geometrisinin hem sonlu elemanlar yöntemi hem de deneysel sonuçlar ile karşılaştırması yapılmıştır [21].

Mutluer ve Bilgin yeni bir optimizasyon algoritması olan ve arı sürülerinin davranışlarından esinlenen yapay arı koloni algoritması (YAKA) ile SMSM'nin tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Algoritmanın yapısının basitliği ve kodlama yapısının kolay olması tercih sebebi olarak belirtilmiştir. Çalışmada toplu sargılı SMSM'nin geometrik değişkenleri algoritmanın giriş parametrelerini oluşturmaktadır. Çıkış değeri olarak da motorun verimi elde edilmiştir. Çalışma sonucunda yapay arı kolonisi optimizasyonu ve genetik algoritma optimizasyonu karşılaştırılarak verim ve işlem süresi bakımından YAKA'nın daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Ayrıca optimizasyon işlemleri sonucunda ortaya çıkan geometrik boyutların analitik çözümü ile sonlu elemanlar yöntemi sonuçlarının uyumlu olduğu belirtilmiştir [22].

1.3. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında sürekli mıknatıslı senkron motorların verimliliğini arttırmak ve toplam ağırlığını azaltmak için genetik algoritma optimizasyon tekniği kullanılarak tasarım optimizasyonu amaçlanmıştır. Bunun için literatürde yer alan sürekli mıknatıslı senkron motorlar üzerine yapılmış çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiş, tasarım optimizasyonunu etkileyen en önemli kriterler belirlenmiştir. İlk olarak motorun analitik denklemleri çıkartılmış ve performans sonuçları değerlendirilmiştir. Daha sonra analitik tasarımı yapılan motorun tasarım optimizasyonu ile performans iyileştirilmesi sağlanmıştır. Ön analitik tasarımı ve tasarım optimizasyonu yapılan motorların bilgisayar ortamında sonlu eleman analizleri ANSYS@Maxwell-2D ve EMETOR programlarıyla elde edilmiştir. Çalışmanın sonucunda tasarımı gerçekleştirilen motorun ön analitik, tasarım optimizasyonu ve sonlu elemanlar analizleri karşılaştırılmıştır.

2. SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON MOTORLAR

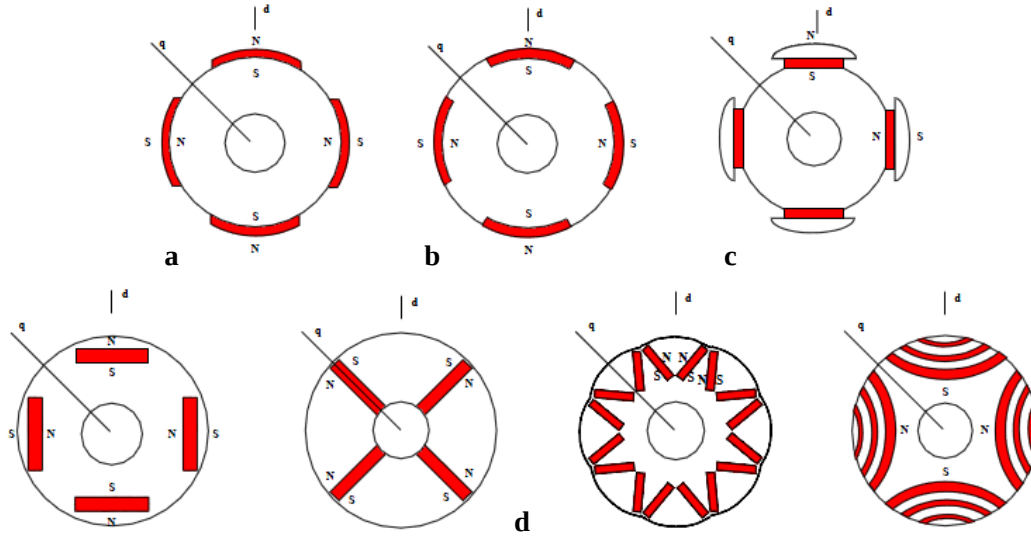
2.1. Giriş

Bu bölümde sürekli mıknatıslı motor türlerinden olan yüzey mıknatıslı ve dahili mıknatıslı motorlar hakkında detaylı bilgi verilmiştir ve sürekli mıknatıslı motorlarda kullanılan malzeme türleri anlatılmıştır. Ayrıca yüzey ve dahili mıknatıslı motor türlerine ait denklemler çıkartılarak ve motor tasarım süreci anlatılmıştır.

2.2. Sürekli Mıknatıslı Motorlar

Senkron motorların rotorunda yer alan DA uyarım sargısı yerine mıknatıs kullanarak uyarım alanı oluşturulan motor türleri sürekli mıknatıslı senkron motor olarak adlandırılmaktadır. Birçok araştırmacı bu motorlarla alakalı çalışmalar gerçekleştirmiş fakat manyetik malzeme alanındaki kısıtlılıklar, güç elektroniği teknolojisinin yeteri kadar gelişmiş olmaması ve motor kontrolünün yetersizliği gibi etkenlerden dolayı yeterli ilerleme sağlanamamıştır. Son yıllarda nadir toprak türü mıknatısların keşfi ile mıknatıs üretim teknolojisi ilerleme kaydetmiş bunun sonucunda bu türdeki motor ve generatörlerin kullanımı artmıştır. 1980'den sonra yüksek enerjili NdFeB (Neodymium Iron Boron) ve SmCo (Samarium Cobalt) mıknatıslarının bulunması ile SM motorlar asenkron ve DA motorlara nazaran popüler hale gelmiştir. SMSM'lerin asenkron ve DA motorlara göre tercih edilmesinin nedenleri hacim ve ağırlıklarının az olması ayrıca verim, moment, güç yoğunluğu ve birim hacim başına üretilen moment miktarının fazla olmasıdır. NdFeB mıknatısları akı yoğunluğu en yüksek olan malzeme olduklarından dolayı motor manyetik devresinin daha iyi tanımlanmasını sağlar. Aynı güçteki motorlara göre daha küçük boyutta olmaları, moment ve güç yoğunluğunun yanı sıra verimlerinin de yüksek olmasından dolayı SMSM'ler birçok uygulamada öncelikle tercih edilmektedirler.

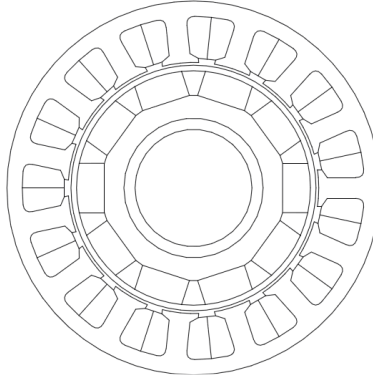
SMSM'ler birçok farklı yapıya sahiptirler. Bu motorlar rotor yapılarına bakılarak temelde iki farklı türe ayrılabilirler. Bunlar yüzey mıknatıslı ve dahili mıknatıslı motorlardır. Şekil 2.1'de SM yapıları ve farklı mıknatıs yapıları verilmiştir. Maliyet ve kontrol basitliği açısından yüzey mıknatıslı SM'ler tercih edilirken yüksek hızlı uygulamalarda mıknatısların mekanik mukavemetinin azalması ve sabit güç bölgesinin arttırılmak istenilmesinden dolayı gömülü tip SM'ler tercih edilmektedir [33].



Şekil 2.1. SM motor yapıları a) Yüzey mıknatıslı b) Yüzeye gömülü mıknatıslı c) Kutup ayaklı yüzey mıknatıslı d) Dahili mıknatıslı motorlar [23].

2.2.1. Yüzey Mıknatıslı Senkron Motorlar

Senkron motorlarda kullanılan mıknatıs gelişmelerinden sonra yüzey mıknatıslı motorlar en çok kullanılan motor türü olmuştur. Yüzey mıknatıslı motorların rotoru Şekil 2.2'deki gibidir. Yüzey mıknatıslı motorlarda mıknatıslardan geçen akı rotor sacına uğramadan doğrudan hava aralığına geçeceği için en yüksek hava aralığı akı yoğunluğuna sahip motorlardır. Yüzey mıknatıslı motorların en büyük dezavantajı rotor yüzeyine yapıştırılan mıknatısların özellikle yüksek hızlarda mekanik problemler meydana getirmesidir. Bundan dolayı yüksek hız uygulamalarında tercih edilmemektedirler. Yüzey mıknatıslı motorların yapılarından dolayı L_d ve L_q indüktansları birbirine eşittir. Bu eşitlikten dolayı relüktans momenti oluşmamasının yanı sıra motor kontrolü de daha kolaydır.

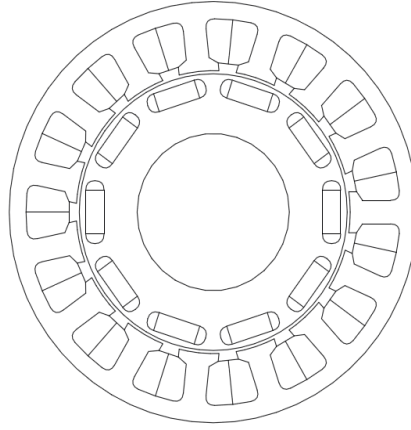


Şekil 2.2. Yüzey mıknatıslı motor yapısı

Yüzey mıknatıslı senkron motorların asenkron ve DA motorlara göre daha küçük boyut, daha yüksek moment yoğunluğu ve daha düşük maliyete sahip olmaları en önemli avantajlarıdır. Ayrıca diğer tipteki sürekli mıknatıslı motorlara kıyasla daha yaygın bir üretime sahiptir. Yüzey mıknatıslı SM'ler yüksek güç yoğunluğu ve düşük hız uygulamalarında tercih edilmektedirler.

2.2.2. Dahili Mıknatıslı Senkron Motorlar

Dahili mıknatıslı motorların rotorunda mıknatıslar içeri gömülü vaziyette bulunmaktadır (Şekil 2.3). Dahili mıknatıslı motorların güç elektroniği ve motor kontrolü alanındaki gelişmeler ile birlikte kullanımı artmıştır. Mekanik olarak daha sağlam bir yapıda olması, ses ve titreşim seviyelerinin az olması ve özellikle yüksek hızlarda etkin bir şekilde kullanılmalarından dolayı çokça tercih edilmektedir. Yüzey mıknatıslı motorlara göre en büyük avantajı daha az mıknatıs hacmi ile aynı güç seviyesini yakalamasıdır. Bu motorların en büyük dezavantajları ise rotor yapısının karmaşık olmasından artan üretim maliyeti ve kontrol zorluğudur.



Şekil 2.3. Gömülü mıknatıslı motor yapısı

Sürekli mıknatıslı motorlar yüzey ve gömülü tip olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Bu motorların özellikleri karşılaştırmalı olarak Tablo 2.1’de verilmiştir. Yüzey mıknatıslı motorların üretiminin daha kolay ve motor kontrolünün de diğer motor türlerine kıyasla kolay olması önemli avantajlarından. Bunların yanı sıra yüksek hızlarda oluşan mekanik problemler rotor kılıfı kullanarak aşılabılır.

Tablo 2.1. SM motorların karşılaştırılması [24]

	Yüzey Mıknatıslı Motorlar	Dahili Mıknatıslı Motorlar
Tip	Fırçasız DA veya SM senkron motor	SM senkron motor
Akı Dağılımı	Kare/ Sinüzoidal	Sinüzoidal
Rotor Yapısı	Basit	Karmaşık
Eddy Kayıpları	Yüksek	Düşük
Hız Limiti	$\sim 1.2 \times \omega_R$	$3 \times \omega_R$
Relüktans Momenti	Yok	Var
Yüksek Hızlara Uygunluk	Yok (Önlem alınmaz ise)	Mümkün
Motor Kontrolü	Nispeten kolay	Karmaşık

2.3. Sürekli Mıknatıslı Motorlarda Kullanılan Malzemeler

2.3.1. Silisli Çelik Sac Malzemeleri

Sürekli mıknatıslı motorlarda farklı özellikte olan birçok sac malzemesi kullanılmaktadır. Uygulamanın türü, maliyetin uygulama açısından önemi ve üretim adedi malzeme seçiminde belirleyici unsurlardır. Savunma sanayi gibi kritik uygulamalarda maliyet az önemliyken seri üretimin yapıldığı beyaz eşya endüstrisi alanında maliyet önemli bir faktördür. Bu nedenle uygulamalarda kullanılan sac yapıları da farklılık göstermektedir. Öte yandan tasarlanan motor yüksek frekanslarda çalışacaksa demir kayıplarının önemli miktarda artacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu tarz uygulamalarda sac kalınlığı 0.1 mm'ye kadar inmektedir. Frekansın daha düşük olduğu uygulamalarda ise demir kayıpları nispeten daha az olacağından maliyeti daha az olan saclar seçmek daha mantıklı olacaktır. Tablo 2.2'de farklı standartlardaki sac dağılım değerleri verilmiştir. Avrupa standartlarındaki dengi "M270-35A" olan "M19" türü sac malzemesi endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir.

Tablo 2.2. Farklı standartlardaki en önemli silisli sac değerleri [25]

AVRUPA IEC 404-8-4 (1986)	A.B.D AISI	JAPONYA JIS 2552 (1986)	RUSYA GOST 21427 0-75
250-35-A5	M-15	35A250	2413
270-35-A5	M-19	35A270	2412
300-35-A5	M-22	35A300	2411
330-35-A5	M-36	-----	-----
270-50-A5	-----	50A270	-----
290-50-A5	M-15	50A290	2413
310-50-A5	M-19	50A310	2412
330-50-A5	M-27	-----	-----
350-50-A5	M-36	50A350	2411
400-50-A5	M-43	50A400	2312
470-50-A5	-----	50A470	2311
530-50-A5	M-45	-----	2212
600-50-A5	-----	50A600	2112
700-50-A5	M-47	50A700	-----
800-50-A5	-----	50A800	2111
350-65-A5	M-19	-----	-----
400-65-A5	M-27	-----	-----
470-65-A5	M-43	-----	-----
530-65-A5	-----	-----	2312
600-65-A5	M-45	-----	2212
700-65-A5	-----	-----	2211
800-65-A5	-----	65A800	2112
1000-65-A5	-----	65A1000	-----

Avrupa standartlarında en çok kullanılan sac malzemeleri, kalınlıkları ve kayıp değerleri Tablo 2.3’te gösterilmektedir. Tablo 2.4’te elektrik motorlarında sık olarak kullanılan “M-27, M-36 ve M-43” silisli saclar için manyetizasyon eğrisi değerleri verilmiştir.

Tablo 2.3. Avrupa normlarında sık kullanılan sac malzemeleri [26].

Sınıf EN1016	Kalınlık	Maksimum Kayıp (50 Hz)		Minimum Manyetik Kutuplaşma (50 Hz)		
	mm	B=1.5 W/kg	1T W/kg	H=2500 T	5000 T	1000 A/m T
M235-35A	0.35	2.35	0.95	1.49	1.60	1.70
M250-35A	0.35	2.50	1.00	1.49	1.60	1.70
M270-35A	0.35	2.70	1.10	1.49	1.60	1.70
M300-35A	0.35	3.00	1.20	1.49	1.60	1.70
M330-35A	0.35	3.30	1.30	1.49	1.60	1.70
M700-35A	0.35	7.00	7.00	1.60	1.69	1.77
M250-50A	0.50	2.50	1.05	1.49	1.60	1.70
M270-50A	0.50	2.70	1.10	1.49	1.60	1.70
M290-50A	0.50	2.90	1.15	1.49	1.60	1.70
M310-50A	0.50	3.10	1.25	1.49	1.60	1.70
M330-50A	0.50	3.30	1.35	1.49	1.60	1.70
M350-50A	0.50	3.50	1.50	1.50	1.60	1.70
M400-50A	0.50	4.00	1.70	1.53	1.63	1.73
M470-50A	0.50	4.70	2.00	1.54	1.64	1.74
M530-50A	0.50	5.30	2.30	1.56	1.65	1.75
M600-50A	0.50	6.00	2.60	1.57	1.66	1.76
M700-50A	0.50	7.00	3.00	1.60	1.69	1.77
M800-50A	0.50	8.00	3.60	1.60	1.70	1.78
M940-50A	0.50	9.40	4.20	1.62	1.72	1.81

Tablo 2.4. Sac malzemeleri manyetizasyon eğri değerleri [25].

Manyetik Akı Yoğunluğu	Manyetik Alan Şiddeti A/m		
	T	M-27	M-36
0.20	36	41	47
0.40	50	57	64
0.70	74	80	89
1.00	116	119	130
1.20	175	174	187
1.50	859	785	777
1.60	2188	2109	1981
1.70	4759	4727	4592
1.80	8785	8722	8682
2.00	26977	26022	26818
2.10	64935	65492	66925
2.20	137203	136977	137075

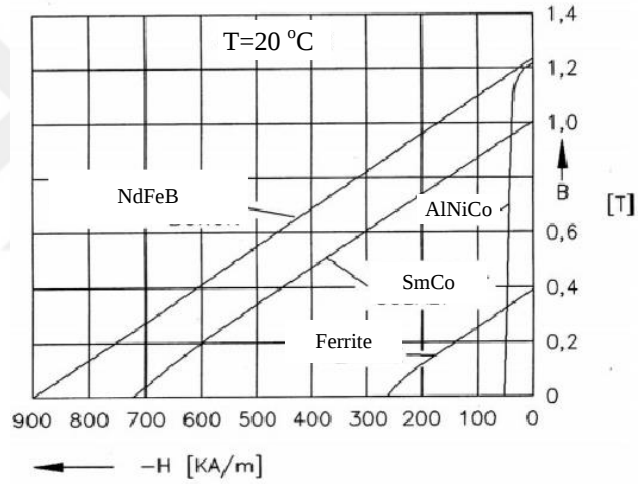
2.3.2. Sürekli Mıknatıs Malzemeleri

Mıknatıs malzemelerindeki gelişmelerle birlikte SM motorlar günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. Alüminyum, nikel, demir ve kobalt alaşımından meydana gelen Alnico türü mıknatısların keşfedilmesi ile sürekli mıknatıslı motorlar birçok alanda yerlerini almışlardır. Bu tür mıknatısların kalıcı akı yoğunluğu değerlerinin yüksek olması en önemli avantaj iken maliyetinin fazlalığı ve mıknatıs özelliklerini kolayca kaybedebilmeleri de dezavantajlarıdır. Bir başka tür olan Ferrite mıknatısların maliyeti Alnico mıknatıslara göre daha düşüktür ve daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Maliyetlerinin yanı sıra mıknatıslanmayı zorlayıcı kuvvetlerinin daha yüksek olması demanyetizasyona karşı direnç oluşturmaktadır. Her iki türünde mıknatıs enerjileri düşük olduğundan dolayı yapılan çalışmalar sonucunda Samaryum ve Kobaltın (SmCo) kullanıldığı nadir toprak mıknatısları geliştirilmiş ve bu teknoloji için çok önemli bir keşif olmuştur. SmCo türü mıknatıslarda depolanan enerji Alnico ve Ferrite mıknatıslara göre daha yüksektir. Fakat hammadde bakımından kısıtlı olmaları ve hassas bir yapıya sahip olduklarından dolayı kolayca kırılabilmesi bu tür mıknatısların önemli dezavantajlarıdır. 1983 yılında Neodimiyum Demir Boron (NdFeB) türü mıknatısların keşfi sürekli mıknatıslı motorlar için bir dönüm noktası olmuştur. Bu mıknatıslar toz presleme ile üretilmişlerdir ve mıknatıs enerjileri 430 kJ/m^3 değerini aşmıştır. Dolayısıyla kalıcı akı yoğunluğu ve mıknatıslanmayı zorlayıcı kuvvet değerleri mevcut duruma nazaran oldukça artmıştır. Bu

tür mıknatısların dezavantajları kırılgan yapıda olmaları, korozyona karşı dirençlerinin düşük olması ve SmCo mıknatıslara göre daha düşük çalışma sıcaklıklarında olmalarıdır. Tablo 2.5’te farklı türdeki olan mıknatısların karşılaştırması verilmiştir. Şekil 2.4’te ise farklı türdeki mıknatısların demanyetizasyon eğrileri gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Sürekli mıknatıslı malzemelerin karşılaştırması [27-29].

Mıknatıs Türü	$B_r(T)$	$H_c(kA/m)$	Korozyona Karşı Direnci	Üretim Kolaylığı	Çalışma Sıcaklığı	Maliyet
AlNiCo	0.5-1.2	40-150	Orta	Zor	540	Orta
Ferrite	0.15-0.43	150-350	Yüksek	Zor	250	Çok Düşük
SmCo	0.9-1.1	700-2400	Yüksek	Yüksek	300	Çok Yüksek
NdFeB	1.0-1.48	900-3200	Zayıf	İyi	220	Yüksek



Şekil 2.4. Farklı türdeki sürekli mıknatısların B-H eğrisi [30]

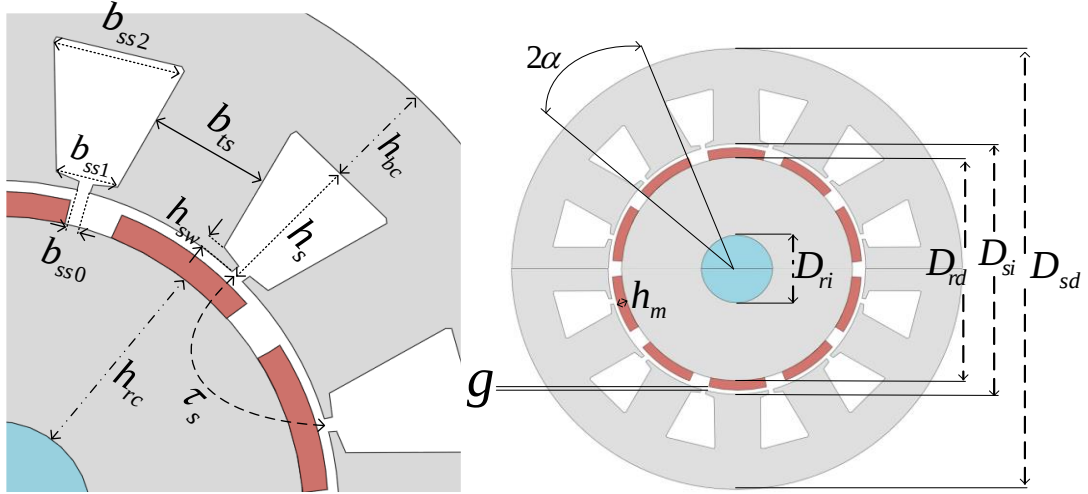
3. SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON MOTORUN ÖN ANALİTİK TASARIMI

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar yapı olarak stator, sargılar, sürekli mıknatıslar, rotor ve milden oluşmaktadır. Elektrik motorlarının tasarım optimizasyonu yapılırken amaç fonksiyonu olarak motorun performans değerleri gözetilmektedir. Diğer bir ifade ile SM motorun tasarım optimizasyonu yapılırken mıknatıs boyutları, hava aralığı uzunluğu, olukların yapısı ve sargı dizilimi önem arz etmektedir. Yapılan optimizasyon çalışmaları neticesinde motorun veriminin artırılması, maliyet, ağırlık ve moment dalgalılığının azaltılması gibi amaçlar hedeflenmektedir. SM motorların ön analitik tasarım sürecinde ilk olarak istenilen tasarım kriterleri göz önünde bulundurularak motorun manyetik devresi modellenir ve oluk/ kutup kombinasyonu gibi değerler ile stator çapı, dış kalınlığı, rotor çapı ve oluk yapısı gibi motorun temel geometrik tasarımı gerçekleştirilir. Daha sonra manyetik ve elektriksel hesaplamalar neticesinde motorun ön analitik tasarımı gerçekleştirilir. Tasarım kriterlerinde istenen amaç fonksiyonlarını karşılayan bir sonuç elde edildiğinde motorun sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek oluşan performansın istenen amaç kriterlerinde olup olmadığına bakılır. Ön analitik çalışma, tasarım optimizasyonu algoritması ve sonlu elemanlar yöntemi ile performans analizinin yanı sıra deneysel sonuçların incelenmesi ile beraber bir motorun tasarımı bir bütün olarak gerçekleştirilmektedir.

3.1. Yüzey Mıknatıslı Senkron Motorların Geometrisi

Bu bölümde, yüzey mıknatıslı senkron motorun geometrik, manyetik ve elektriksel modeli ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu amaçla motorun manyetik ve elektriksel eşdeğer devresini çözmeye yardımcı matematiksel denklemler türetilmiştir. Temel amaç, motorun analitik performans analizini gerçekleştiren radyal akılı bir mıknatısa sahip motorun matematiksel modelini elde etmektir. Tasarım optimizasyonu için kullanılan hava aralığı uzunluğu, mıknatıs uzunluğu, dış kalınlığı, stator dış çapı gibi giriş parametreleri motorun geometrik büyüklüklerinden oluşmaktadır. Çıkış parametreleri ise moment, verim gibi motorun performans değerleridir.

Yüzey mıknatıslı senkron motorun ön analitik tasarımlarına ait Denklem 3.1 ve Denklem 3.8 arasındaki eşitlikler Şekil 3.1'deki geometrik yapıya göre belirlenmiştir.



Şekil 3.1. Yüzey mıknatıslı senkron motor geometrisi

$$D_{si} = D_{rd} + 2 \times (h_m + g) \quad (3.1)$$

$$\tau_s = \pi \times \frac{D_{si}}{N_s} \quad (3.2)$$

$$b_{ss1} = \pi \times \frac{D_{si} + 2 \times h_{sw}}{N_s} - b_{ts} \quad (3.3)$$

$$b_{ss2} = \pi \times \frac{D_{si} + 2 \times h_s}{N_s} - b_{ts} \quad (3.4)$$

$$h_{bc} = \frac{(D_{sd} - D_{si} - 2 \times h_s)}{2} \quad (3.5)$$

$$h_{rc} = \frac{(D_{rd} - D_{ri})}{2} \quad (3.6)$$

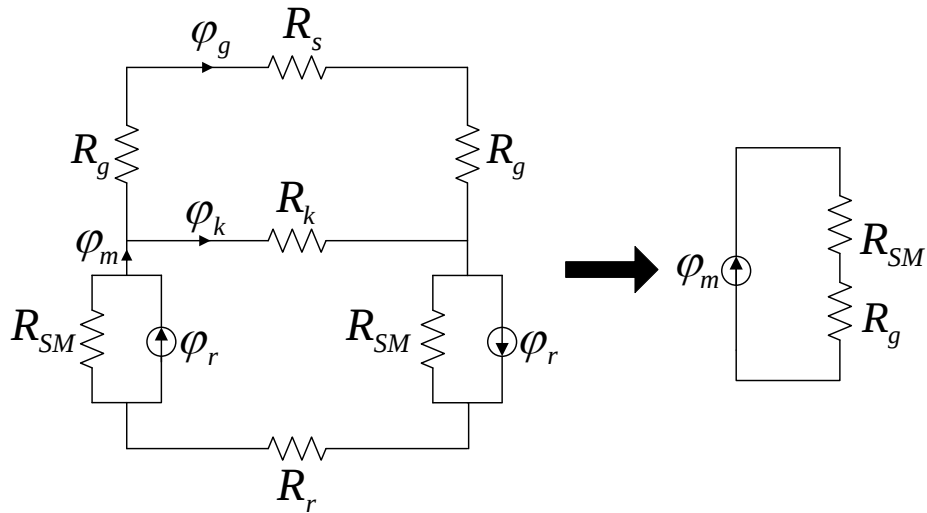
$$A_s = \frac{(b_{ss1} + b_{ss2}) \times (h_s - h_{sw})}{2} \quad (3.7)$$

$$k_0 = \frac{b_{ss0}}{b_{ss1}} \quad (3.8)$$

Denklem 3.1 – Denklem 3.8’de verilen geometrik değişkenler D_{sd} , D_{si} , D_{rd} , h_m , 2α , g , τ_s , N_s , b_{ss0} , b_{ss1} , b_{ss2} , b_{ts} , h_s , h_{sw} , h_{bc} , h_{rc} , A_s ve k_o sırasıyla stator dış çapı, stator iç çapı, rotor dış çapı, mıknatıs uzunluğu, mıknatısın elektriksel açısı, hava aralığı uzunluğu, oluk adımı, oluk sayısı, oluk açıklığı, oluğun alt kısım açıklığı, oluğun üst kısım açıklığı, dış kalınlığı, oluk uzunluğu, oluk ağzı uzunluğu, stator arka çekirdek uzunluğu, rotor arka çekirdek uzunluğu, oluk alanı ve stator ağzı genişlik katsayısını ifade etmektedir [30-32].

3.2. Yüzey Mıknatıslı Senkron Motorların Manyetik Analizi

Elektrik makinelerinin manyetik devre analizinde en önemli büyüklük mıknatısların oluşturduğu hava aralığı manyetik akı yoğunluğudur. Motor tasarım süreci çok değişkenli ve lineer olmayan bir yapıya sahip olduğundan dolayı hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değeri optimizasyon sürecinde sınır değerlerin belirlenmesinde önemli bir rol alacaktır. Sürekli mıknatıslı senkron motorların manyetik analizleri Şekil 3.1’deki manyetik akı modeline ve Şekil 3.2’deki manyetik eşdeğer devreye göre yapılmıştır [33,34].



Şekil 3.2. Yüzey mıknatıslı senkron motor manyetik eşdeğer devresi

$$R_{SM} = \frac{h_m}{\mu_0 \times \mu_r \times L \times w_{SM}} \quad (3.9)$$

$$R_g = \frac{g_e}{\mu_0 \times L \times w_{SM}} \quad (3.10)$$

Denklem 3.9 ve Denklem 3.10’da R_{SM} sürekli mıknatıs relüktansını, L motorun paket boyunu, w_{SM} mıknatıs genişliğini, R_g hava aralığı relüktansını, g_e ise rotor ve stator arasındaki eşdeğer hava aralığını göstermektedir. Hava aralığı ve mıknatıs denklemlerinde kullanılan $w_{SM} \cdot L$ ifadesi mıknatısın yüzey alanını göstermekte ve stator ile rotor arasındaki manyetik akının geçtiği eşdeğer hava aralığı uzunluğu ise “Carter” katsayısı ile verilmektedir [32].

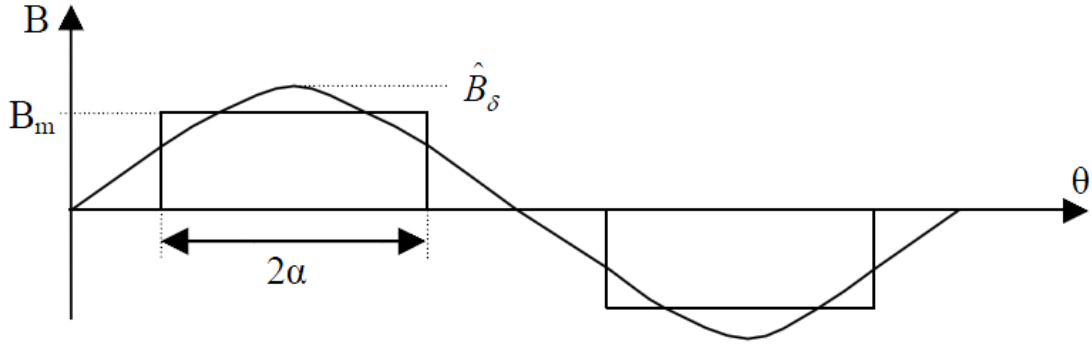
$$g_e = k_{carter} \times g \quad (3.11)$$

$$k_{carter} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \frac{b_{ss0}^2}{b_{ss0} + 5 \times g}} \quad (3.12)$$

Burada, k_{carter} Carter katsayısını, g rotor ve stator arasındaki hava aralığını, τ_s stator oluk adımını, b_{ss0} stator ağız genişliğini göstermektedir. Ayrıca Carter katsayısı Denklem 3.13 ve Denklem 3.14’teki denklemler ile de gösterilebilir [33].

$$k_{carter1} = \left[1 - \frac{2 \times b_{ss0}}{\pi \times \tau_s} \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{b_{ss0}}{2 \times g} \right) - \frac{g}{b_{ss0}} \times \ln \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{b_{ss0}}{g} \right)^2 \right] \right\} \right]^{-1} \quad (3.13)$$

$$k_{carter2} = \left[1 - \frac{b_{ss0}}{\tau_s} + \frac{4 \times g}{\pi \times b_{ss0}} \times \ln \left(1 + \frac{\pi \times b_{ss0}}{4 \times g} \right) \right]^{-1} \quad (3.14)$$



Şekil 3.3. Gerçek ve temel hava aralığı akı yoğunluğu

Şekil 3.3'teki gibi mıknatıslar tarafından oluşturulan hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu dikdörtgen olarak kabul edilirse, mıknatısın oluşturduğu maksimum akı yoğunluğu Denklem 3.15'te ve hava aralığı temel akı yoğunluğu Denklem 3.16'da gösterilir.

$$B_m = \frac{B_r \times k_k}{1 + \frac{\mu_r \times g_e}{h_m}} \quad (3.15)$$

$$\hat{B}_g = \left(\frac{4}{\pi} \right) \times B_m \times \sin \alpha \quad (3.16)$$

Hava aralığı manyetik akı denklemindeki k_k ifadesi hava aralığındaki mıknatıslar arasındaki kaçak oranını göstermektedir. Yüzey mıknatıslı senkron motorlar için kaçak ifadesi Denklem 3.17 ile gösterilebilir.

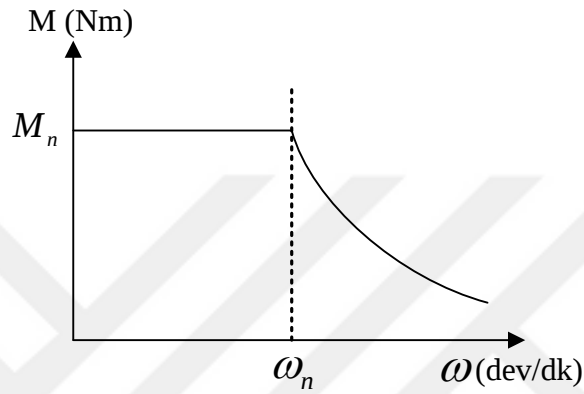
$$k_k = \frac{100 - (7 \times p / 60 - 0.5)}{100} \quad (3.17)$$

3.3. Yüzey Mıknatıslı Senkron Motorların Elektriksel Analizi

Yüzey mıknatıslı senkron motorlarda kullanılan sürekli mıknatısların μ_r değerleri 1 değerine çok yakındır. Bundan dolayı motor çıkık olmayan bir kutup yapısına sahiptir. Şekil 3.4'te verilen sürekli mıknatıslı senkron motorun moment-hız eğrisi ve Şekil 3.5'teki d ve q

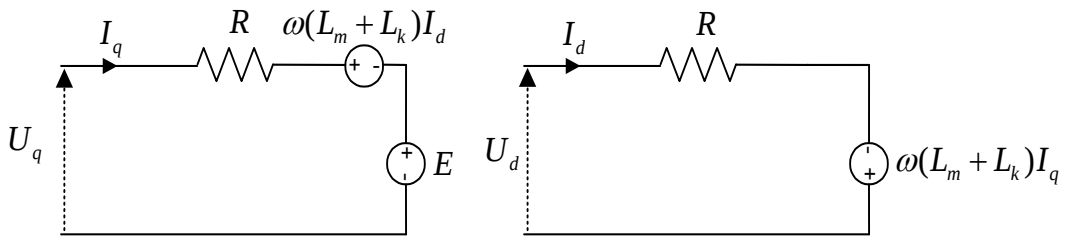
ekseni eşdeğer devreleri motorun elektriksel analizinde referans olarak kabul edilmiştir [30,31,35].

Motorun elektriksel analizinde direnç, indüktans ve elektromotor kuvveti değerleri en önemli parametrelerdir. Bu parametreler hesaplanmadan önce sargı sipir sayısının bilinmesi gerekmektedir. Motorun elektriksel devre parametreleri nominal devir sayısı için hesaplanmıştır.

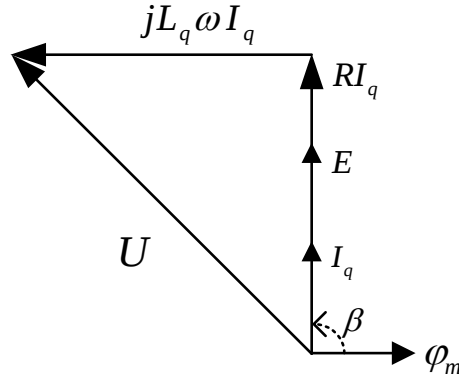


Şekil 3.4. SMSM için moment/ hız eğrisi

Motorun d ve q eksenli elektriksel eşdeğer devreleri yardımıyla nominal hızda fazör diyagramı Şekil 3.5'te elde edilmiştir [31,32]. Motor çıkık olmayan yapıda olduğundan dolayı I_q akımı motor akımına eşittir ve akım ile manyetik akı arasındaki elektriksel açı olan β değerinin 90° olduğu görülmektedir.



Şekil 3.5. Yüzey mıknatıslı senkron motorun elektriksel eşdeğer devreleri



Şekil 3.6. Yüzey mıknatıslı senkron motorun nominal hızdaki elektriksel fazör diyagramı

3.3.1. Stator İndüktans Hesabı

Yüzey mıknatıslı motorların yapısından dolayı d ve q eksenleri arasındaki relüktans farkı çok küçüktür. Bu nedenle, d ve q eksenleri arasındaki indüktans farkı da çok küçüktür. Bu farkın küçük olması motor kontrolünü kolaylaştıran önemli bir etkidir. Denklem 3.18 ve Denklem 3.21 arasında d ve q indüktans değerleri birbirine eşit alınmıştır.

$$L_{md} = L_{mq} = \frac{3}{\pi} \times (q \times n_s \times k_{sf})^2 \times \frac{\mu_0}{g_e + \frac{h_m}{\mu_r}} \times (D_{si} - g) \times L \quad (3.18)$$

$$L_k = p \times q \times n_s^2 \times L \times \mu_0 \times \lambda_1 \quad (3.19)$$

$$\lambda_1 = \frac{9}{8} \left[\frac{h_{sw}/2}{b_{ss0}} + \frac{h_{sw}/2}{b_{ss1} - b_{ss0}} \times \ln \left(\frac{b_{ss1}}{b_{ss0}} \right) + \frac{h_s}{3b_{ss1}} \right] \quad (3.20)$$

$$L_d = L_q = L_k + L_{md} = L_k + L_{mq} \quad (3.21)$$

Burada, L_d ve L_q d ve q eksenleri indüktanslarını, L_{md} ve L_{mq} mıknatıslanma indüktanslarını, L_k ise kaçak indüktansı ifade etmektedir. Denklemlerde verilen oluk başına faz-kutup sayısı ve maksimum sargı faktörlerini farklı oluk/kutup kombinasyonları için Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Farklı oluk/kutup kombinasyonları için maksimum sargı faktörü değerleri ve oluk başına faz-kutup sayısı değerleri

$N_s \backslash p$		4	6	8	10	12	14	16
6	k_{sf}	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866
	q	0.5		0.25	0.2		0.143	0.125
9	k_{sf}	0.617	0.866	0.945	0.945	0.866	0.617	0.328
	q	0.75	0.5	0.375	0.3	0.25	0.214	0.188
12	k_{sf}	1		0.866	0.966		0.966	0.866
	q	1		0.5	0.4		0.286	0.25
15	k_{sf}	0.951		0.711	0.866		0.951	0.951
	q	1.25		0.625	0.5		0.357	0.313
18	k_{sf}	0.954	1	0.617	0.735	0.866	0.902	0.945
	q	1.5	1	0.75	0.6	0.52	0.429	0.375
21	k_{sf}	0.953		0.538	0.65		0.866	0.89
	q	1.75		0.875	0.7		0.5	0.438
24	k_{sf}	0.966		1	0.588		0.766	0.866
	q	2.00		1	0.8		0.571	0.5
27	k_{sf}	0.954	0.945	0.941	0.525	0.617	0.695	0.766
	q	2.25	1.5	1.125	0.9	0.75	0.643	0.563
30	k_{sf}	0.951		0.951	1		0.64	0.711
	q	2.75		1.25	1		0.714	0.625

	Konstantre Sargı Yapısı		Tam Sayı-Oluk Sargı Yapısı
	Kesirli-oluk Sargı Yapısı		Dengesiz Sargı Yapısı

3.3.2. Stator Sargı Direnci Hesabı

Manyetik akı tarafından kesilen stator sargısı motorların güç üretiminde etkilidir. Sac paketi dışında kalan sargı sonu kısmı motor kaybı hesabında etkili olmakla beraber motordaki mekanik güce etki etmemektedir. Bir fazdaki sargı iletkenlerinin elektriksel direnci Denklem 3.22 ve Denklem 3.23'teki gibi verilir.

$$R_{faz} = \rho_T \frac{l_i}{A_i \times N_{pp}} \quad (3.22)$$

$$l_i = L + \frac{2\pi r_w}{N_s} \times k_{ss} \quad (3.23)$$

Burada l_i toplam iletken uzunluğunu, r_w ortalama iletken yarıçapını (motorun merkezi ile oluğun ortası arasındaki mesafe), k_{ss} ise iletkenin sargı sonu katsayısını göstermektedir. Bu katsayılar için sargı sabitleri Tablo 3.2'de verilmiştir [37].

Tablo 3.2. Sargı sabitleri [37].

	Dağıtılmış Sargı	Toplu Sargı Tek Katmanlı	Toplu Sargı Çift Katmanlı
k_{ss}	$1.6N_s/p$	1.46	0.93
f_f	0.45	0.60	0.60

3.3.3. Motorun Zıt EMK Hesabı

Elektromotor kuvveti yüzey mıknatıslı senkron motorlar için en önemli büyüklüktür. Motorun sabit moment ya da sabit güç bölgesinde çalışma koşulunu bu büyüklük belirler. Diğer bir ifadeyle motorun sabit moment bölgesinden sabit güç bölgesine geçiş sınırını çizer. Denklem 3.24'te EMK'ya ait parametreler verilmiştir.

$$E = \frac{d\phi_m}{dt} = 4.44 \times f_e \times k_{sf} \times n_s \times \hat{B}_g \times L \times (D_{si} - g) \quad (3.24)$$

3.3.4. Stator Sargı Sayısı Hesabı

Elektrik motorlarının sargı hesabında akım yükü önemli bir kavramdır. Her motor farklı tasarım mimarilerinden dolayı belirli akım yükü değerlerine sahiptir. Örneğin dolaylı hava soğutmasına sahip çıkık olmayan kutuplu senkron makineler için akım yükü 30-80 kA/m değerleri arasındadır [38]. Denklem 3.25'te akım yükü hesabı verilmiştir.

$$\hat{S} = \frac{4 \times T_n}{\pi \times (D_{si} - g)^2 \times L \times \hat{B}_g \times k_{sf} \times k_d \times \sin \beta} \quad (3.25)$$

Burada kaçak akılardan dolayı ortaya çıkan kayıplar k_d düzeltme faktörü ile kompanze edilmektedir ve değeri 0.95 kabul edilmektedir. d-q eksenleri akım vektörleri arasındaki açıyı temsil eden β çıkık olmayan kutup yapısına sahip SMSM'ler için 90° 'dir. Şekil 3.6'daki elektriksel fazör diyagramı yardımıyla motorun oluk başına düşen toplam amper-sarım miktarı Denklem 3.26 ile hesaplanabilir.

$$n_s \times \hat{I} = \hat{S} \times \tau_s \quad (3.26)$$

$$J = \frac{n_s \times \hat{I}}{A_s \times f_f} \quad (3.27)$$

Motorun termal davranışı bakır ve çekirdek kaybı gibi motor geometrisi ile alakalı ısı etkenlere bağlıdır. SMSM'lerin ısı davranışlarının incelenmesinde sonlu elemanlar analizi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve analitik toplama metodu gibi geleneksel teknikler kullanılmaktadır. Genellikle hesaplama süresi açısından diğer iki metottan daha etkin olan analitik toplama metodu kullanılmaktadır. Denklem 3.26'de akım yoğunluğu motorun termal analizi için oldukça önemli bir değerdir. [39]'a göre, hava soğutmalı makineler için akım yoğunluğu 8 A/m² iken daha güçlü soğutma sistemleri için bu değer 1 kA/ m²'nin üzerine çıkmaktadır.

Şekil 3.6'daki motorun elektriksel fazör diyagramına göre Denklem 3.28 yazılır.

$$U^2 = (E + R \times I_q)^2 + (L_d \times \omega \times I_q)^2 \quad (3.28)$$

Bu denklemde motora ait indüktans, direnç ve zıt EMK değerleri $L_d = n_s^2 \times L_d'$, $L_q = n_s^2 \times L_q'$, $R = n_s^2 \times R'$ ve $E = n_s \times E'$ şeklinde stator sargısı cinsinden yazılırsa motorun her bir oluğundaki sargı sipir sayısı Denklem 3.31'deki gibi hesaplanabilir.

$$U^2 = (n_s \times E' + n_s^2 \times R' \times I_q)^2 + (n_s^2 \times L_d' \times \omega \times I_q)^2 \quad (3.29)$$

$$U^2 = n_s^2 \times (E' + R' \times (n_s \times I_q))^2 + n_s^2 \times (L_d' \times \omega \times (n_s \times I_q))^2 \quad (3.30)$$

$$n_s = \frac{\hat{U}}{\sqrt{(E' + R' \times n_s \times I)^2 + (L_d' \times \omega \times n_s \times I)^2}} \quad (3.31)$$

3.4. Yüzey Mıknatıslı Senkron Motorların Verim Analizi

Yüzey mıknatıslı senkron motorlarda güç kaybına etki eden en önemli iki parametre bakır ve demir kayıplarıdır. Elektrik motorlarının demir kaybının belirlenmesi oldukça zordur. Fakat tasarım optimizasyonu yapılan motorların frekans değerleri küçük ise demir kaybının motor verimine etkisi de az olacaktır. Burada verim ifadesini etkileyen ana unsur olarak bakır kaybı öne çıkacaktır. Aynı zamanda motorun elektriksel kayıplara göre daha küçük miktarda olan mekanik kayıpları da mevcuttur. Eğer motorun dönüş hızı yüksekse sürtünme ve vantilasyon kaybının da değerlendirilmesi önemlidir.

3.4.1. Bakır Kaybının Hesabı

Bakır kayıpları sürekli mıknatıslı senkron motorlarda verime doğrudan etki eden en yüksek orana sahip kayıp türüdür. Bakır kaybı Denklem 3.32'de görüldüğü gibi stator fazı sargı direnci ve faz akımının efektif değerinin karesi ile çarpımı şeklinde ifade edilir. Sargı direncinin azaltılması kayıp miktarını azaltır. Sargı direnci iletken alanı ve uzunluğuna bağlıdır. Oluk başına düşen sargı sipir sayısı ve oluk alanı, oluğun dolgu faktörünü belirler. Bakır kayıplarının belirlenmesinde oluk dolgu faktörü çok önemli bir parametredir. Oluk dolgu faktörü iletken alanı ile oluk alanı arasındaki orandır. Optimum motor geometrisi ve farklı sargı sarım teknikleri oluk dolgu faktörünü etkileyen temel unsurlardır. Sonuç olarak

oluk dolgu oranının yüksek olması bakır kaybını azaltır. Aynı zamanda motor akımının azaltılması ile bakır kayıplarının yanı sıra sürücü sisteminin ve diğer maliyetlerin azaltılması mümkündür.

$$P_b = 3 \times R_{faz} \times I^2 \quad (3.32)$$

3.4.2. Demir Kaybının Hesabı

Yüzey mıknatıslı senkron motorda oluşan demir kaybı histerisiz ve fuko kayıpları olarak sınıflandırılır. Histerisiz kaybı akı yoğunluğunun frekansına ve tepe değerine bağlıdır. Fuko kaybı ise akı yoğunluğu değişiminin zamana oranına bağlıdır. Motorun stator ve rotor gövdelerindeki demir kayıplarının hesaplanması için ağırlık ve hacimlerinin bilinmesi gerekir. Yüzey mıknatıslı senkron motorlarda stator dişi ve nüvesi ile rotor nüvesinin ağırlık ifadeleri Denklem 3.33 ile Denklem 3.35 arasında ve hacim ifadeleri Denklem 3.36 ile Denklem 3.38 arasında verilmektedir.

$$W_{sn} = \frac{\pi}{4} \times (D_{sd}^2 - (D_{sd} - 2 \times h_{bc})) \times L \times \rho_s \quad (3.33)$$

$$W_{sd} = N_s \times b_{ts} \times h_s \times L \times \rho_s \quad (3.34)$$

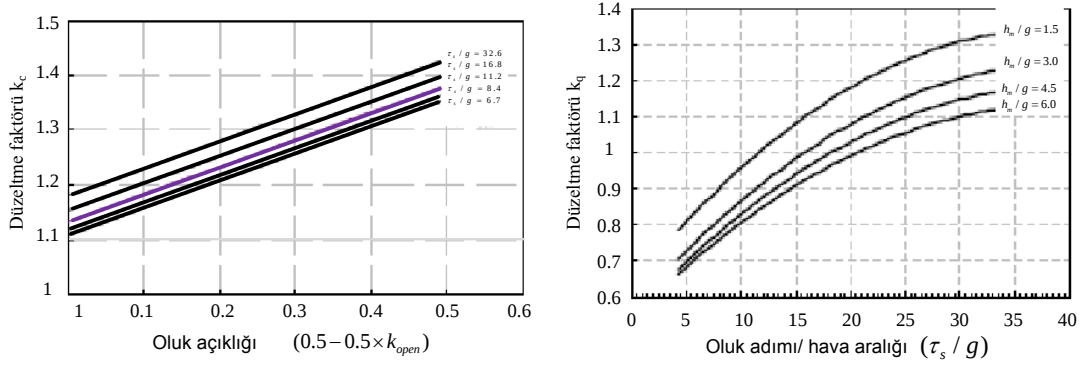
$$W_{rn} = \frac{\pi}{4} \times ((D_{ri} + 2 \times h_{rc}) - D_{ri}^2) \times L \times \rho_r \quad (3.35)$$

$$V_{sn} = L \times k_{df} \times \pi (D_{so}^2 - (D_{so} + 2 \times h_{bc})^2) / 4 \quad (3.36)$$

$$V_{sd} = N_s \times L \times k_{df} \times \left((h_s - h_{sw}) \times b_{ts} + (b_{ts} + \tau_s - b_{ss0}) \times \frac{(h_s - h_{sw})}{2} + (\tau_s - b_{ss0}) \times h_{sw} \right) \quad (3.37)$$

$$V_{rn} = L \times k_{df} \times \frac{\pi (D_{rd}^2 - D_{ri}^2)}{4} \quad (3.38)$$

Yüzey mıknatıslı senkron motorların demir kayıplarının hesabı Denklem 3.39 ile Denklem 3.46 arasında verilmiştir. Bu denklemlerde yer alan k_c ve k_q değerleri Şekil 3.7’de verilen motor geometrisini düzeltme faktörleridir [31]. Rotor demir kaybı çok küçük değerlerde olduğu için ihmal edilmiştir.



Şekil 3.7. k_c ve k_q değerlerinin yaklaşım grafiği [31]

Manyetik malzemede oluşan demir kayıplarının ölçümü değişken frekans ve genliğe sahip olan bir sinüzoidal akı yoğunluğu ile yapılır (Epstein çerçeve testi). Toplam demir kaybı sinüzoidal akı yoğunluğunun genliği ve açısal frekansı ile ilişkilidir.

$$P_d = P_h + P_f = k_h \times B^{\beta_{st}} \times \omega_{el} + k_f \times B^2 \times \omega_{el}^2 \quad (3.39)$$

Denklem 3.39’da k_h ve k_f histerisiz ve fuko akımı sabitlerini, β_{st} Steinmetz sabitini ifade etmektedir. Bütün sabitler malzemenin sac laminasyon özelliğine bağlıdır.

$$P_{h_sd} = k_h \times B_{sd}^{\beta_{st}} \times \omega_{el} \quad (3.40)$$

$$P_{h_sn} = k_h \times B_{sn}^{\beta_{st}} \times \omega_{el} \quad (3.41)$$

$$P_{h_sd} = k_h \times B_{sd}^{\beta_{st}} \times \omega_{el} \quad (3.42)$$

$$P_{f_sd} = \frac{12}{\pi^2} \times q \times k_q \times k_c \times k_f \times (\omega_{el} \times B_{sd})^2 \quad (3.43)$$

$$P_{d_sd} = P_{h_sd} + P_{f_sd} \quad (3.44)$$

$$P_{d_sn} = P_{h_sn} + P_{f_sn} \quad (3.45)$$

$$P_d = V_{sd} \times P_{d_sd} + V_{sn} \times P_{d_sn} \quad (3.46)$$

$$emb = \frac{2\alpha}{\pi} \quad (3.47)$$

Demir ve bakır kaybı denklemleri elde edildikten sonra verim Denklem 3.48 ile verilir. Motor verimi tasarım optimizasyonlarında temel amaç fonksiyonlarından biri olarak sıkça kullanılmaktadır.

$$\% \eta = \frac{P_{\varsigma}}{P_{\varsigma} + P_d + P_b} \quad (3.48)$$

4. SEZGİSEL ZEKA TEKNİKLERİ

4.1. Optimizasyon

Optimizasyon mümkün olan en fazla sayıdaki çözüm kümesi içerisinde en iyi veya aralarından en iyi olan çözümleri aramak için kullanılan bir yöntemdir. Ancak bu işlem sonrasında ortaya çıkan sonuç en iyi olmayabilir. Bu durumda problemin tespiti, uygun parametre seçimi ve yöntemi gibi kriterler optimizasyon işlemi için yeniden tasarlanmalıdır. Elektrik makineleri ve sürücülerinin de dahil olduğu bütün elektromanyetik cihazların ve sistemlerin temel optimizasyon hedefi çıkış gücü, verimlilik, hacim ve maliyet gibi belirli tasarım özelliklerini ve kısıtlamaları karşılamak için malzeme, topoloji ve geometri parametrelerinin de içinde bulunduğu bir çözüm kümesini belirlemektir. Mühendisler ve araştırmacılar yıllardır elektromanyetik cihazların ve sistemlerin tasarımlarını en iyiye yaklaştırmak için optimizasyon yöntemlerini kullanmaktadır [41].

Bir optimizasyon probleminin çözümü iki ana sorundan oluşur: Optimizasyon modellerinin tanımı, yeni optimizasyon yöntemlerinin seçimi ve geliştirilmesidir. Genellikle tek amaçlı (objective) m kısıtlamalı bir optimizasyon modeli Denklem 4.1'deki gibi tanımlanabilir.

$$\min: f(x) \quad (4.1)$$

$$\text{s.t.} \quad g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m, \quad (4.1a)$$

$$x_l \leq x \leq x_u \quad (4.1b)$$

Burada x , f ve g indisleri sırasıyla tasarım parametresi vektörü, amaç ve kısıtlamaları ifade etmektedir. x_l ve x_u ise x 'in alt ve üst sınırlarını m indisi ise kısıtlamaların sayısını göstermektedir. Elektrik makineleri ve sürücüler için tipik optimizasyon hedefleri; maliyetin en aza indirgenmesi, vuruş momenti, momentteki dalgalanmalar ve aşırı salınımın azaltılması ve çıkış gücü ile verimin maksimum seviyeye getirilmesidir. Hacim, kütle, akım yoğunluğu ve sıcaklık artışları ise popüler kısıtlama fonksiyonları olarak öne çıkmaktadır.

Teorik olarak, optimizasyon modeli, elektrik makineleri ve sürücüler için güçlü bir şekilde kısıtlamalı, yüksek derecede lineer olmayan ve yüksek boyutlu bir sorundur. Genetik algoritma, diferansiyel evrim algoritması, parçacık sürü optimizasyonu algoritması ve daha birçok optimizasyon algoritması denklem 4.1’de optimumu bulmak için kullanılmıştır.

Öte yandan, pratik mühendislik uygulamaları açısından elektrik makinelerinin tasarım optimizasyonu çok amaçlı bir sorundur. Çünkü tanımlanabilecek birçok hedef vardır ve farklı uygulamalar için farklı hedefler seçilebilir. Örneğin, çamaşır makinesi ve buzdolapları gibi ev aletleri uygulamalarında motor fiyatı ve çıkış gücü önemli parametreler iken hibrid elektrikli araç uygulamaları için de hacim, güç yoğunluğu ve moment dalgalanması önemli parametrelerdir. Bu nedenle, elektrik makinelerinin yanı sıra diğer elektromanyetik cihazların çok amaçlı optimizasyon tasarım problemleri son zamanlarda ilgi gören bir konu haline gelmiştir.

Genellikle, p hedefleri ve m ise kısıtlamaları belirten çok amaçlı bir optimizasyon modeli denklem 4.2’deki gibi tanımlanabilir.

$$\min: \{ f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x) \} \quad (4.2)$$

$$\text{s.t.} \quad g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m, \quad (4.2a)$$

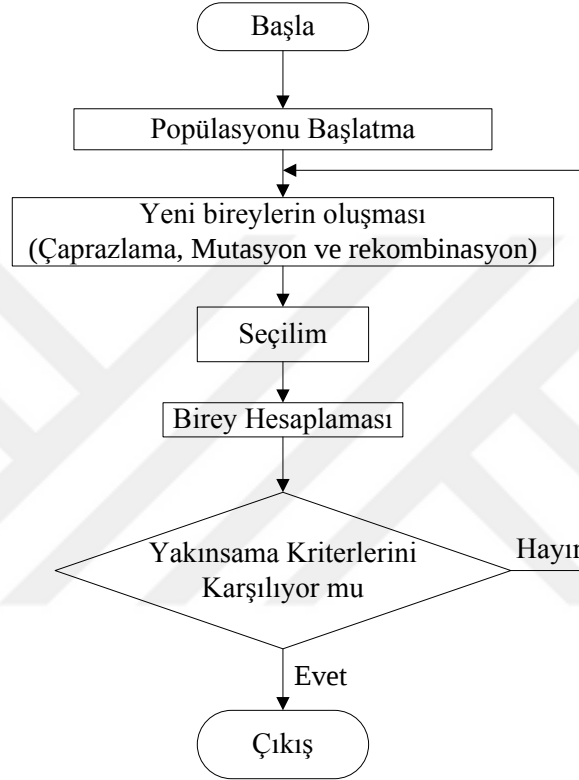
$$x_l \leq x \leq x_u \quad (4.2b)$$

Evrimsel hesaplama alanında geliştirilen çok amaçlı genetik algoritma, baskın olmayan genetik algoritma ve çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu gibi birçok çok amaçlı algoritma elektrik makinelerinin tasarımına girmiştir.

4.2. Modern Yapay Zeka Algoritmaları

Son yıllarda GA, DEA ve PSO gibi optimizasyon yöntemlerinin yanı sıra karınca kolonisi, arı kolonisi, gri kurt kolonisi ve bunu gibi birçok algoritmalar da tasarım optimizasyon problemleri için geliştirilmekte ve uygulanmaktadır.

Evrimsel algoritmalar belirli bir sistemde en uygun konfigürasyonu bulmak için üreme, mutasyon, rekombinasyon, doğal seleksiyon ve en güçlünün hayatta kalması gibi biyolojik evrim mekanizmalarından esinlenen teknikler kullanan sezgisel optimizasyon algoritmalarıdır. Evrimsel algoritmalar için genel bir akış diyagramı Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Evrimsel algoritmaların akış diyagramı [41]

Evrimsel algoritma çizelgesinde birey hesabı, (başlangıç) popülasyondaki her bireyin performansını değerlendirmek için kullanılan amaç fonksiyonlarıyla ilişkilidir. Popülasyon boyutu, çaprazlama, mutasyon, seçilim, rekombinasyon faktörleri, maksimum yineleme sayısı ve yakınsama kriterleri gibi algoritma parametreleri optimizasyonun uygulanmasından önce tanımlanmalıdırlar. Kapsamlı bir araştırma sonucunda evrimsel algoritmaların avantajları aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

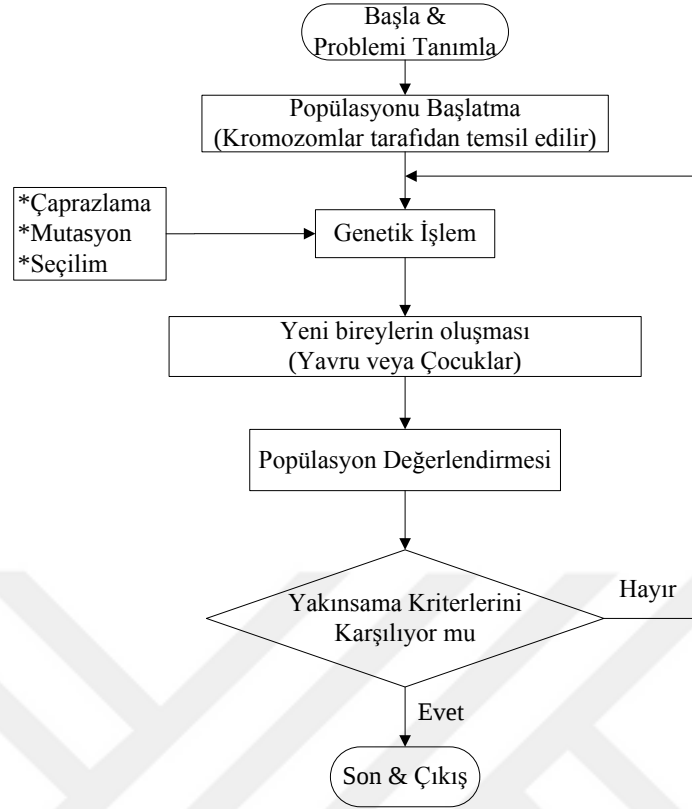
- Global optimizasyon yöntemleridir.
- Nerdeyse tüm optimizasyon problemlerine uygulanabilirler ve daha yüksek boyutsal problemlere uyarlanabilirler.
- Gürültü değerlendirme fonksiyonları açısından güvenilirlerdir.

- Kavramsal olarak basittir ve eldeki soruna kolayca uyarlanabilirler, algoritmanın hemen her yönü değiştirilebilir ve özelleştirilebilir.
- Evrim son derece paralel bir süreç olduğundan dolayı evrimsel algoritmalar güçlü bir paralel arama yeteneğine sahiptir.

4.3. Genetik Algoritma

Evrimsel teorisinden esinlenen genetik algoritma pratik problemlerin çözümüne uyarlanabilir zeki algoritmalar olarak fen ve mühendislik alanında kullanılmaktadır [42]. Şekil 4.2 genetik algoritmanın genel optimizasyon akışını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi algoritma popülasyon kümesinin (kromozomlarla temsil edilen) kurulmasıyla başlatılır. Bir popülasyondan (ebeveyn olarak bilinir) gelen çözümler çaprazlama, mutasyon ve seçim gibi üç genetik işlem yoluyla yeni bir popülasyon (yavru veya çocuk olarak bilinir) oluşturmak için kullanılır. Yeni oluşan bireyler sonraki nesillerin oluşumunda etkin bir rol almaktadır ve zayıf nesiller ise optimizasyon sürecinde popülasyonda yer bulamamaktadır. Her bir adımda gerçekleşen bu işlem GA'yı optimum çözüme yaklaştıracaktır.

GA optimizasyon problemlerinde optimum çözüme değil de lokal bir çözüme yakınsayabilir. Ayrıca başlangıç çözümüne de ihtiyaç duymayabilir. Genetik algoritmada seçim işlemi ile yüksek uygunluk değerine sahip bireyler bir sonraki nesile aktarılır. Çaprazlama operatörü ile rastgele iki bireyden melez bireyler oluşturulur. Çaprazlama sonucunda daha güçlü bireyler ve önceki nesillerin üstün özellikleri yeni nesillere aktarılır. GA'da uygulanan mutasyon operatörüdür ve bu işlem ile yeni bireylerin gen yapısı değişmektedir. Bu sayede lokal çözümlere yakınsama engellenir.



Şekil 4.2. Genetik algoritma akış diyagramı

GA genel hatlarıyla listelenirse;

- İlk popülasyon kromozomlar tarafından rastgele oluşturulur. Birey sayısı probleme özgüdür.
- Popülasyondaki bireylerin uygunluğu değerlendirilir ve optimizasyonun hassasiyeti uygunluk fonksiyonuna bağlıdır. Eşleşme kümesi uygunluk değerlerine göre oluşturulur.
- Seçilen bireyler çaprazlanarak yeni bireyler oluşturulur ve bazı yeni bireyler mutasyona uğrayarak gen yapısı değiştirilir.
- Uygunluk değerleri düşük bireyler ile uygunluk değerleri yüksek bireyler yer değiştirilir. Böylece popülasyonun sabit büyüklükte kalması sağlanır.
- Eğer optimum çözüm sağlanmadı ise (b) adımına dönülerek bireylerin uygunluğu tekrar hesaplanır ve diğer adımlar tekrar edilir. Tüm adımlar sonucunda elde edilen nesiller arasından en uygun değere sahip olan birey optimum çözüm olarak alınır.

5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Motorların tasarımında veya problemlerin çözümlenmesinde, kısmi diferansiyel denklemlerden faydalanılır. Bu denklemlerin çözümlenmesinde en çok kullanılan sayısal metod sonlu elemanlar yöntemidir.

20 yy. 'ın ortalarında geliştirilen bu metot elektrik, makine, inşaat gibi birçok mühendislik alanında kullanılarak problemlerin çözümünde etkili olmuştur. Bu yöntemin en kritik noktası sınır değer problemlerinin çözümünde karmaşık ve uzun işlemler gerektirmesidir. Ancak teknolojiadaki gelişmeler sayesinde oluşturulan bilgisayar programları bu yöntemin hala uygulanabilir olmasına olanak tanımıştır.

5.1. Maxwell Denklemleri

Elektrik makinelerinin elektromanyetik incelemelerinde kullanılan matematiksel model Maxwell denklemlerinden yararlanılarak elde edilir. Elektrik motorlarının bu manyetik analizleri için dört farklı Maxwell denklemini gereklidir [38,40]. Bu denklemlerin diferansiyel formdaki ifadeleri aşağıdaki gibidir.

1. Elektrik alan için “Gauss Yasası”, $\nabla \cdot D = \rho$
2. Manyetik alan için “Gauss Yasası”, $\nabla \cdot B = 0$
3. Faraday’ın “İndüksiyon Yasası”, $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$
4. “Ampere Yasası”, $\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$

Yukarıda verilen Maxwell denklemlerinden birincisi, herhangi bir kapalı yüzey alandan geçen elektrik akısı ile yük yoğunluğunun eşit olduğunu; ikinci Maxwell denklemi, kapalı bir yüzey alandaki manyetik akının bu alandan çıkan manyetik akıya eşit olduğunu; üçüncü Maxwell denklemi olan İndüksiyon Yasası, bir yüzey alandan geçen manyetik akının zamana göre değişiminin bu yüzey alanı çevreleyen çizgi boyunca elektrik alan şiddetine ters polariteli olarak eşit olduğunu; dördüncü Ampere yasası ise, kapalı bir eğri boyunca zamana göre değişen manyetik alanla o eğri üzerindeki elektrik akımı arasındaki ilişkiyi açıklayan yasadır. Maxwell denklemlerinin çözümünde sınır koşullarının bilinmesi gerekir.

5.2. Sınır Koşulları

Sonlu elemanlar yöntemi, çözülmesi karmaşık ve zaman alan problemleri daha küçük veri kümelerine ve daha çok sayıda parçalara ayırarak “sonlu elemanlar” oluşturup çözümleme şeklidir. Ancak bakıldığında mühendislik problemlerinin çoğu sonsuz büyüklükteki sınırdan oluşmaktadır. Bu sorunu basite indirgemek için sınır koşulları kullanılmaktadır. Özellikle elektromanyetik problemlerinde bu durum sonlu elemanların düğümlerindeki manyetik vektör potansiyellerinin yüksek oranda doğrulukla tamamlanmasını sağlar.

Sonlu elemanlar yönteminin temel mantığı karmaşık görünen problemleri gruplara veya kümelere ayırarak daha basite indirgeyip çözmesidir. Çözümleme yapılırken öncelikli olarak sınır koşulları belirlenir. Sisteme verilen sınır koşulları üç ana başlık altında verilebilir :

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

5.2.1. Dirichlet sınır koşulu

Dirichlet sınır koşuluna göre belirli noktalara göre manyetik vektör potansiyel değeri atanır. Dönen makinelerde yüzeyi “s” olan ve “I” çizgisindeki noktada stator sınır koşulu noktasında manyetik vektör potansiyel sıfır olarak atanabilir ve böylece homojen bir dirichlet sınır koşulu sağlanır. Bu durumda stator sac laminasyonu dışındaki kaçak akılar ihmal edilmiş olur ve sonlu elemanlar yönteminin uygulanabilirliği sağlanır.

5.2.2. Neumann sınır koşulu

Neumann sınır koşuluna göre ise elektromanyetik bir problemin çözümünde “s” yüzeyini çevreleyen “I” çizgisindeki bir noktada manyetik vektör potansiyelinin türevi sıfıra veya bir fonksiyona eşitlenir. Neumann sınır koşulu ile sonlu elemanlar yönteminde gerçek değerlerin elde edilmesi oldukça zordur ancak ortalama sınır değeri elde edilir. Bu sınır koşulu elektrik motorlarının sadece boşta çalışma analizlerinde kullanılır.

5.2.3. Karma sınır koşulu

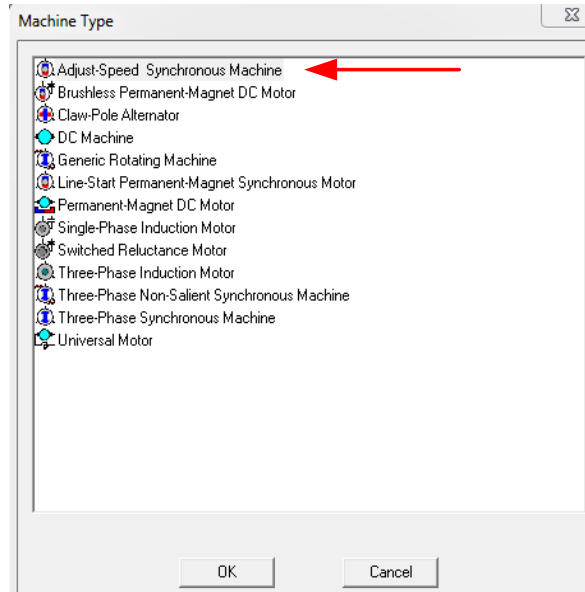
Elektromanyetik bir problemin çözümünde Dirichlet ve Neumann sınır koşulları birlikte kullanılan bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yönteminde iki düğüm arasındaki “s” yüzeyine ait “ l_1 ” ve “ l_2 ” çizgileri üzerindeki iki farklı noktada Dirichlet ve Neumann sınır koşullarının ayrı ayrı uygulanması şeklindedir.

5.3. Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Programlar

Sonlu elemanlar yöntemi tabanlı programlar makinenin gerçek boyutlarını, malzeme özelliklerini ve stator sargı yapısını dikkate aldığından motor tasarımı konusunda oldukça sık kullanılmaktadır. Bu bölümde sürekli mıknatıslı senkron motorun analizinde kullanılacak olan ANSYS Maxwell ve EMETOR programları hakkında detaylı bilgi verilmiştir [43,44].

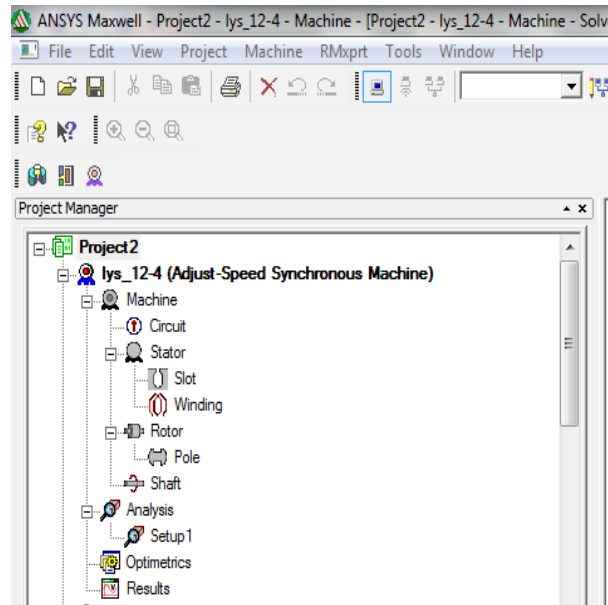
5.3.1. Maxwell Programı

Maxwell programında hem motor geometrisi bağımsız bir şekilde çizilebilir hem de programda daha önce tanımlanmış olan kütüphane vasıtasıyla istenilen özellikteki motor geometrileri seçilebilmektedir. Tanımlı kütüphanesinde üç ve tek fazlı asenkron, sürekli mıknatıslı AA veya DA ve daha birçok motor opsiyonu bulunmaktadır. Bu tez çalışması için en uygun olan tanımlı motor türü, hız ayarlı senkron makinelerdir. Bu modelde rotor üzerinde sürekli mıknatıslar ve stator üzerinde de üç fazlı sargılar bulunmaktadır.



Şekil 5.1. RMxpert kütüphanesindeki makine modelleri

Motor türü seçildikten sonra motor modelini oluşturmak için ana program olan Şekil 5.2'deki menüler kullanılmaktadır. Bu ana programın içerisinde stator oluk sayısı, sargı şeması, motor geometrisi gibi birçok parametreyi ihtiva eden alt menüler bulunmaktadır.



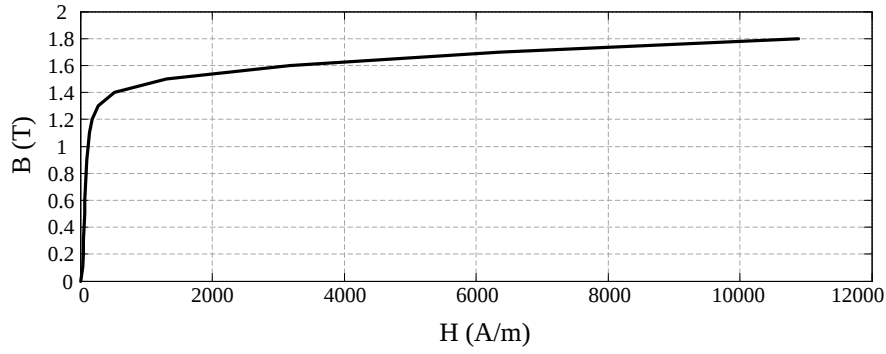
Şekil 5.2. RMxpert'te oluşturulan motorun detayları

Programdaki parametre ağacı ve parametrelerin değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Örnek SMSM modeli için RMxpert parametre değerleri

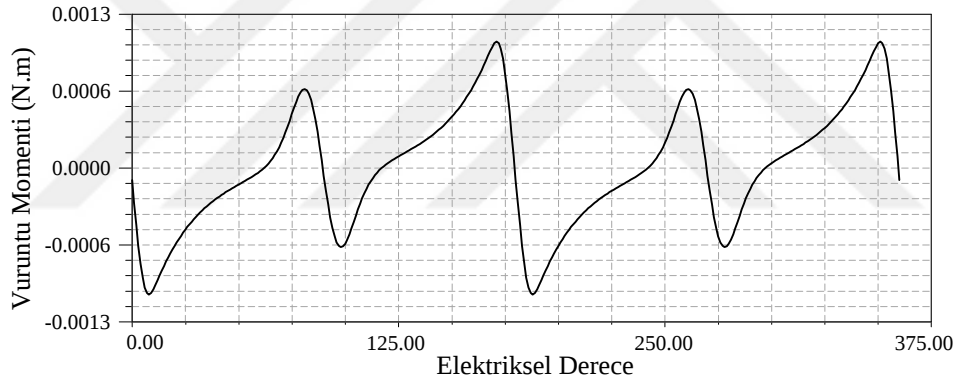
Menü	Parametreler	Değerler
Machine	Kutup Sayısı	4
	Rotor Pozisyonu	İç Rotorlu
	Sürtünme Kaybı	0
	Rüzgar Kaybı	0
	Referans Hız (dev/dk)	10000
	Kontrol Tipi	AC
	Devre Tipi	Y3
Stator	Dış Çap (mm)	90
	İç Çap (mm)	40.5
	Paket Boyu (mm)	55
	İstifleme Faktörü	0.95
	Sac Malzemesi Tipi	M400-50A
	Oluk Sayısı	12
	Oluk Tipi	3
Oluk	Kaykı Genişliği	0
	Otomatik Dizayn	Hayır
	Paralel Diş	Evet
	Diş genişliği (mm)	5.5
	Hs0 (mm)	1
	Hs1 (mm)	0.3
	Hs2 (mm)	16.3
Sargı	Bs0 (mm)	1.77
	Sargı Tabakası	1
	Sargı Tipi	Tam Sargı
	Paralel Yol	1
	Oluk Başı İletken Sayısı	50
	Bobin Adımı	3
	Demet Sayısı	1
Rotor	Tel Sargı	0
	Tel Boyutu	0
	Dış Çap (mm)	33
	İç Çap (mm)	12
	Paket Boyu (mm)	55
	Sac Malzemesi Tipi	M400-50A
	İstifleme Faktörü	0.95
Kutup	Kutup Tipi	1
	Embrace	0.666
	Çıkıntı	0
	Mıknatıs Tipi	NdFe35
	Mıknatıs Kalınlığı (mm)	3.25

Şekil 5.3'te silisli çelik sac malzemesinin B-H eğrisi verilmiştir [45]. Silisli çelik sacın doyuma başladığı diz noktası 1.5 T civarındadır. Tam doyum haline gelme noktası ise 1.8 T'dir. Bu değerler motorun tasarım optimizasyonunda oldukça önemlidir.



Şekil 5.3. M400-50A sac malzemesinin manyetizasyon eğrisi [45]

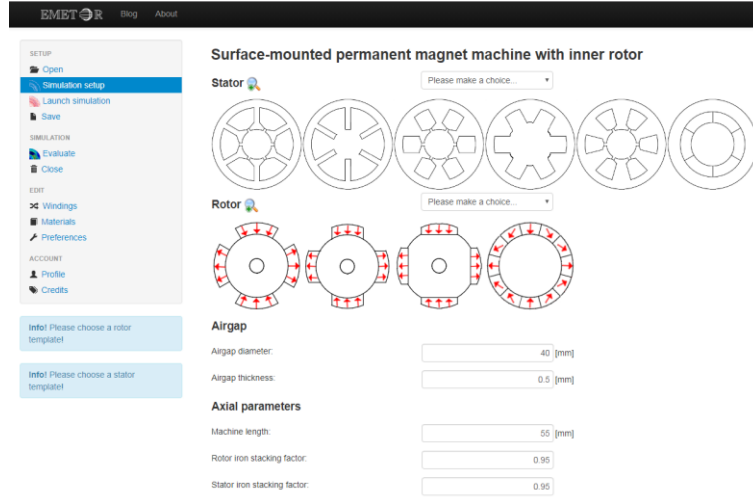
Şekil 5.4'te hava aralığı manyetik akısına ve relüktansına bağlı olan vuruntu momenti(cogging torque) grafiği verilmiştir. Bu moment motorun nominal momentine olumsuz etki etmektedir.



Şekil 5.4. Vuruntu momenti (cogging torque) grafiği

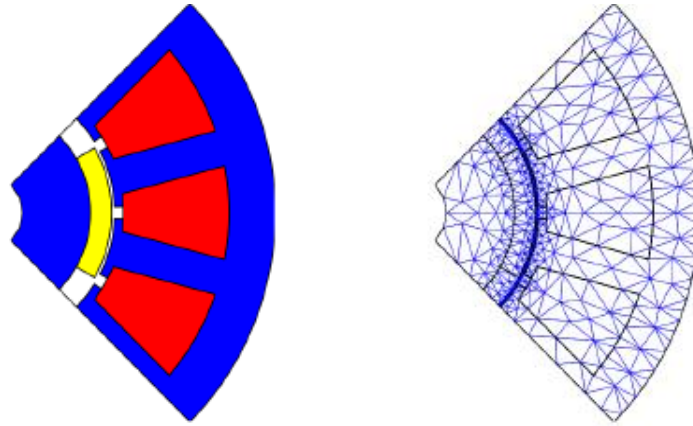
5.3.2. EMETOR Programı

Elektrik motorlarının tasarımında sonuçların doğruluğunu hızlı bir şekilde test etmek için kullanılan web tabanlı bir programdır. Programın en büyük artısı internet erişiminin olduğu her yerde hızlı bir şekilde tasarım sonuçlarını almak iken dezavantajı henüz geniş bir kütüphaneye sahip olmamasıdır. Motor türü olarak sadece yüzey mıknatıslı senkron motorların tasarım analizi yapılabilmektedir. Tez çalışmasında kullanılan motor türü de yüzey mıknatıslı senkron motor olduğundan dolayı EMETOR programı kullanılmıştır. Şekil 5.5'te EMETOR programının geometrik tasarım arayüzü görülmektedir.



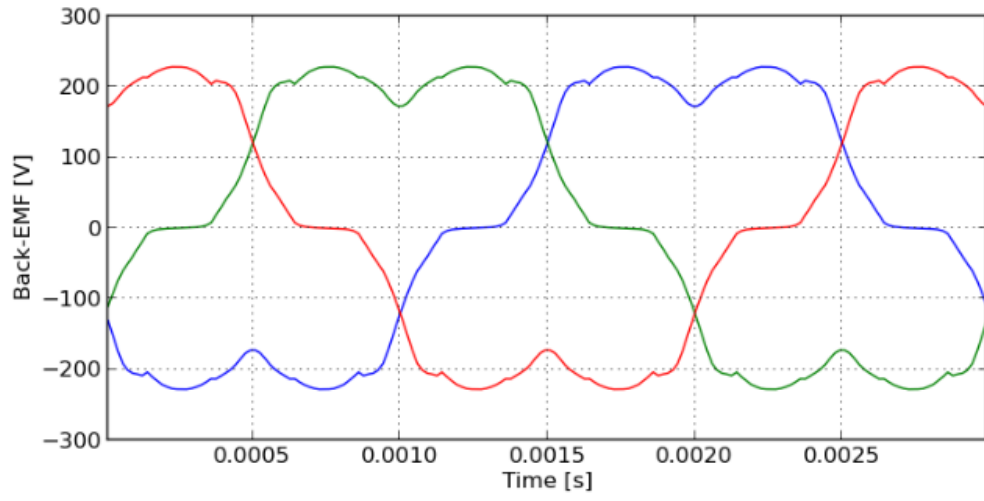
Şekil 5.5. EMETOR programı ekran arayüzü

Motorun geometrik tasarımını yapmak için program kütüphanesindeki mevcut stator ve rotor yapıları seçilerek geometrik değişkenlerin girilmesi mümkündür. Şekil 5.6’da EMETOR’da analizi gerçekleştirilmiş olan motorun geometrisi ve ağ yapısı gösterilmektedir.



Şekil 5.6. SMSM’nin geometrik kesiti ve ağ yapısı

Geometrik tasarımı gerçekleştirilen SMSM’nin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirildikten sonra motorun zıt EMK dalga formu Şekil 5.7’de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.7. SMSM'nin zıt-EMK dalga şekli

6. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN TASARIM OPTİMİZASYONU

Sürekli mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonu sürecinde parametreler bağımlı ve bağımsız değişkenler olarak ikiye ayrılmaktadır. Tasarım optimizasyonunun giriş parametreleri olarak bağımsız değişkenler kullanılırken çıkış parametreleri olarak da bağımlı değişkenler kullanılmaktadır. Ayrıca optimizasyon algoritmasının hazırlanması aşamasında giriş parametreleri için sınır değerleri tasarlanacak motorun çalışma koşulları ve performans çıktılarına göre belirlenmektedir.

Tasarım optimizasyonunda motorun sabit değerleri de bağımsız giriş değişkenleri olarak algoritmanın içerisine dahil edilmektedir. Bu değerler ön analitik tasarım sürecinde belirlenerek tasarım optimizasyonu gerçekleştirilecek motorun performans analizinde kullanılır.

Elektrik motorlarının tasarım optimizasyonu sırasında ortaya çıkan problemler birçok değişkene bağlı olduğundan dolayı tasarım için sınır değerlerin belirlenmesi kaçınılmazdır. Geometrik sınırlamalar birbirleri cinsinden ifade edilirken manyetik ve elektriksel sınırlamalar skaler büyüklükler olarak ifade edilmektedir.

Bu çalışmada dağıtılmış (distributed) ve toplu (concentrated) sargı yapısına ait yüzey mıknatıslı senkron motorun verimini arttırmaya yönelik bir tasarım optimizasyonunun gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu bölümde optimum motor geometrilerini elde etmek için kullanılan tasarım parametreleri, motor tasarım sabitleri ve sınırlamalar ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Tasarım optimizasyonu gerçekleştirilecek olan motorların etiket değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. Kullanılan motorların etiket değerleri [32]

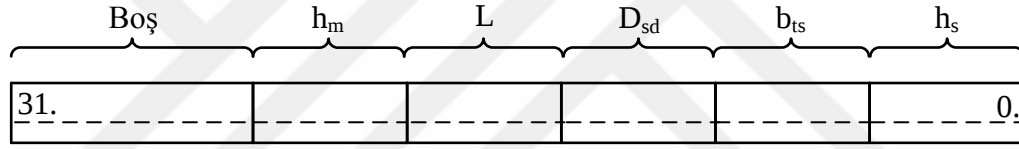
Etiket Değerleri	SMSM1	SMSM2
Çıkış gücü (kW)	5.76	5.76
Anma Gerilimi (V)	315	315
Hız (dev/dk)	10000	10000
Oluk/ Kutup Sayısı	12/4	12/10

6.1. Genetik Algoritma Yöntemi ile SMSM'nin Optimizasyonunun Gerçekleştirilmesi

Genetik algoritma yapısı gereği gelişigüzel bir başlangıç çözüm topluluğu ile başlayarak her bir yeni nesilde daha iyi çözümler yakalamaya çalışmaktadır. Bunun için tanımlı olan uygunluk fonksiyonu ve aşağıda adım adım verilen Genetik Algoritmanın operatörleri kullanılmaktadır.

6.1.1. Bireyin Kodlanması

Her bir birey için 32 bit uzunluğunda bir gen yapısı oluşturulmuştur. Optimize edilmesi planlanan parametreler bu gen yapısına Şekil 6.1' de verildiği gibi yerleştirilmiştir. h_m , L , D_{sd} , b_{ts} ve h_s parametrelerinin her biri için 5 bitlik bir kromozom parçası karşılık getirilerek toplam 25 bit uzunluğunda veri yüklü olan bir kromozom oluşturulmuştur.



Şekil 6.1. Kromozom yapısı

Kısıtlayıcı ve sınırlandırıcılar kullanılarak çözüm uzayı daraltılmış ve hesaplama zamanının kısaltılması sağlanmıştır. Kullanılacak paket boyu göz önüne alınarak aşağıda verilen sınırlandırıcılar tanımlanmıştır. Tabi ki bu sınırlandırıcılar duruma göre değiştirilebilir.

$$h_{bc} \geq h_s / 2 \quad (6.1)$$

$$0.15h_s \leq b_{ss2} \leq 0.5h_s \quad (6.2)$$

$$b_{ts} \geq 0.3\tau_s \quad (6.3)$$

$$85 \leq verim \leq 100 \quad (6.4)$$

$$B_{sd} \leq 1.8T \quad (6.5)$$

$$B_{sn} \leq 1.6T \quad (6.6)$$

$$B_{rn} \leq 1.6T \quad (6.7)$$

$$0 \leq P \leq (2^{25} - 1) \quad (6.8)$$

$$P = \text{int}(\text{rand}() \times (2^{25} - 1)) \quad (6.9)$$

Yukarıda verilen sınırlandırıcılar dikkate alındığında parametrelerin her birisi için 5 bitlik bir kodun yeterli olacağı görülmüştür.

6.1.2. Başlangıç Topluluğu

Gelişigüzel üretilen $(0-2^{25})$ aralığında) 100 adet birey başlangıç topluluğunu oluşturmaktadır.

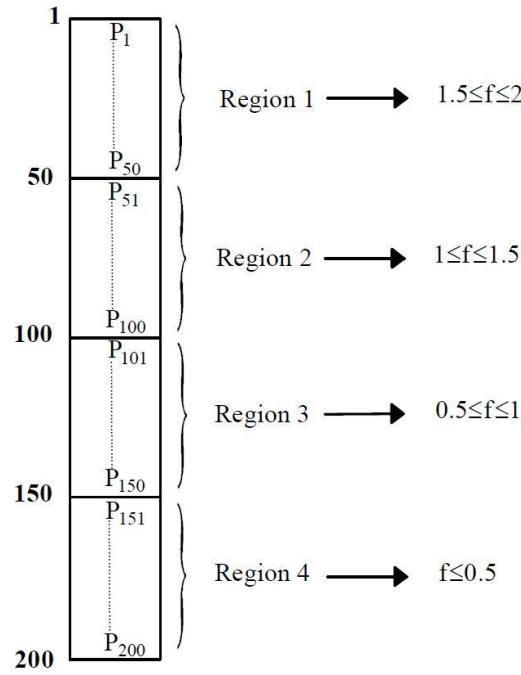
6.1.3. Uygun Bireylerin Seçilmesi

Uygunluk fonksiyonunu tanımlarken istenen güç verimliliği ön plana alınmıştır. Bunun için %85 'in üzerinde bir verim elde edecek şekilde uygunluk fonksiyonu tanımlanmıştır.

Uygunluk fonksiyonu; Denklem (6.10) ile verildiği şekilde ağırlandırılarak oluşturulmuştur.

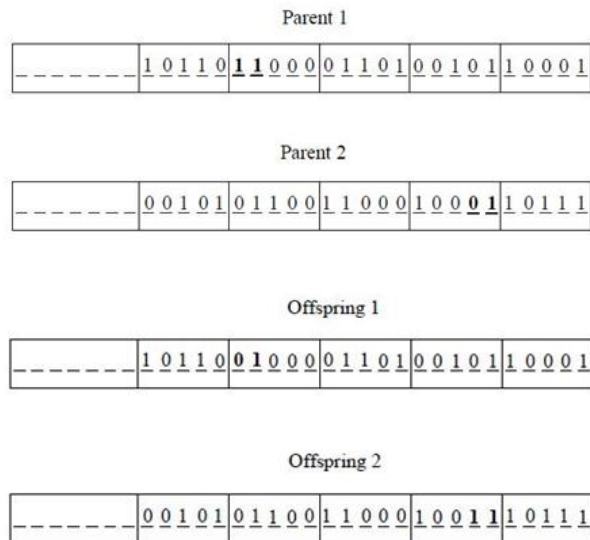
$$\text{fitness} = ((\text{verim} \times 200) + (W_t \times 10)) / 100 \quad (6.10)$$

Şekil 6.2'de gösterildiği gibi yeni üretilen herbir nesilde topluluktaki herbir birey için uygunluk değerleri hesaplanıp kabarcık sıralama algoritması ile sıralanarak iyi bireylerin hayatta kalması ve kötü bireylerin yok edilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 6.2. Yeni üretilen bireylerin kabarcık sıralama yöntemi ile sıralanması

Çaprazlama operatörü; Şekil 6.3'te görüldüğü gibi, 25 bit uzunluğundaki kromozom kodunda rastgele 2 bit karşılıklı ebeveynlerde değiştirilerek özelliklerini yeni üretilen döl bireylere aktarmaları sağlanmıştır.



Şekil 6.3. Kromozom kod dizisi

Mutasyon operatörü; lokal çözümlere takılmaması ve global çözümü yakalayabilmesi amacıyla 0.05' lik bir mutasyon oranı seçilmiştir.

Sonlandırma ölçütü; üretilecek nesil sayısı sınırlandırılarak algoritma sonlandırılmıştır. Yapılan testlerde topluluk içindeki bireylerin benzeşmesi de dikkate alınarak çalıştırma zamanına göre nesil üretilmiş ve sonuçların tatmin edici olduğu Maxwell ile test edilmiştir.

6.2. Tasarım Optimizasyonu Parametreleri

Sürekli mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonunda kullanılan parametreler amaç fonksiyonları ile doğrudan bağlantılıdır. Parametre sayısının az olması optimizasyonun çözümünü hızlandırırken parametre sayısının çok olması çözüm süresini arttırmaktadır ancak daha hassas bir çözüm elde edilmesine de olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada tasarım optimizasyonu için mıknatıs kalınlığı, paket boyu, stator dış kalınlığı, stator dış çapı ve oluk uzunluğu olmak üzere beş adet giriş parametresi belirlenmiştir (Bakınız Tablo 6.2). Diğer geometrik parametreler sabit değerler ve katsayılar olarak atanmışlardır. Tasarım optimizasyonunda elektriksel ve mekaniksel büyüklüklerin sabitleri ve katsayılarının belirlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde kullanılacak algorithmada bu sabitler değişken değerler olarak ifade edilmek zorundadır. Bu durumda optimizasyonun değişken parametre sayısı artmakta ve çözümün hassasiyeti azalmaktadır. Aynı şekilde kullanılacak malzemenin yapısına göre tasarımda değişiklikler yapmak mümkündür. Tablo 6.2'de tasarım optimizasyonunun parametreleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 6.2. Tasarım optimizasyonu parametreleri

Giriş parametreleri	Sürekli mıknatıs kalınlığı (mm)	h_m
	Paket Boyu (mm)	L
	Stator dış kalınlığı (mm)	b_{ts}
	Stator dış çapı (mm)	D_{sd}
	Oluk uzunluğu (mm)	h_s
Sabit Parametreler	SM (NdFe35) manyetik akı yoğunluğu	$B_r (1.23T)$
	SM (NdFe35) manyetik geçirgenliği	$\mu_r (1.099)$
	Sac malzemesi istifleme katsayısı (M400-50A)	$k_{df} (0.95)$
	Oluk dolgu faktörü	f_f (Tablo 3.2)
	Sargı sonu katsayısı	k_{ss} (Tablo 3.2)
	Sargı iletkenliği (20 °C)	$\rho_T (1.72 \times 10^{-8})$
	Mıknatıs yoğunluğu	$\rho_m (7500 \text{ kg/m}^3)$
	Sac malzemesi yoğunluğu	$\rho_s (7600 \text{ kg/m}^3)$
	Bakır yoğunluğu	$\rho_B (8920 \text{ kg/m}^3)$

6.3. Tasarım Optimizasyonu Sınır Değerleri

Elektrik motorlarının tasarım optimizasyonları gerçekleştirilirken giriş parametreleri ile amaç fonksiyonları arasındaki ilişkinin iyi kurulması gerekmektedir. Sürekli mıknatıslı senkron motorların tasarım optimizasyonlarında giriş parametreleri amaç fonksiyonuna bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca bu çalışmalarda parametrelerin birbirlerini sınırlayıcı özellikleri de vardır. Bu sınırlamalar makineden elde edilmek istenen performans değerleri dikkate alınarak tasarımcı tarafından belirlenir. Bu çalışmada motorlar için gerekli olan çalışma koşullarını sağlayan mekanik, termal, manyetik sınırlamalar Tablo 6.3'te verilmiştir.

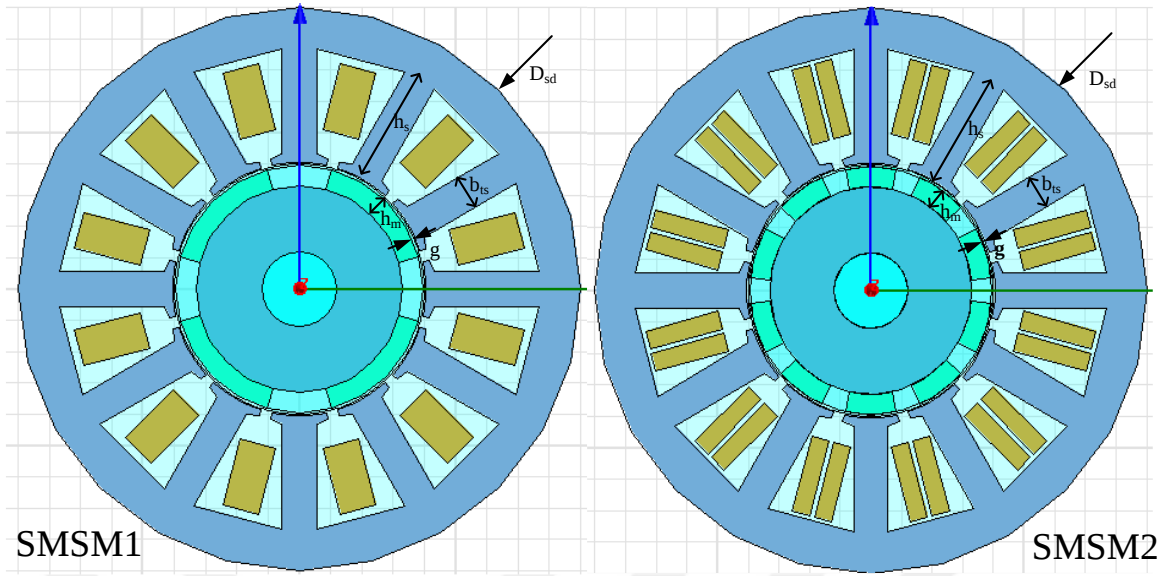
Tablo 6.3. Optimizasyon sınırlamaları

Sınırlama Amacı	Sınırlanan Parametreler	Sınır Değerleri
Mekanik	Oluk uzunluğu	$h_{bc} \geq h_s / 2$
	Oluk genişliği	$0.15h_s \leq b_{ss2} \leq 0.5h_s$
	Diş genişliği	$b_{ts} \geq 0.3\tau_s$
Manyetik	Diş akı yoğunluğu	$B_{sd} \leq 1.8T$
	Stator nüvesi akı yoğunluğu	$B_{sn} \leq 1.6T$
	Rotor nüvesi akı yoğunluğu	$B_{rn} \leq 1.6T$
Termal	Sargı sıcaklığı	$120^\circ C$
	Mıknatıs sıcaklığı	$T_m \leq 100^\circ C$

Motorun tasarım optimizasyonunda giriş değişkenlerinin sınır değerleri Tablo 6.4'te ki gibi belirlenmiştir.

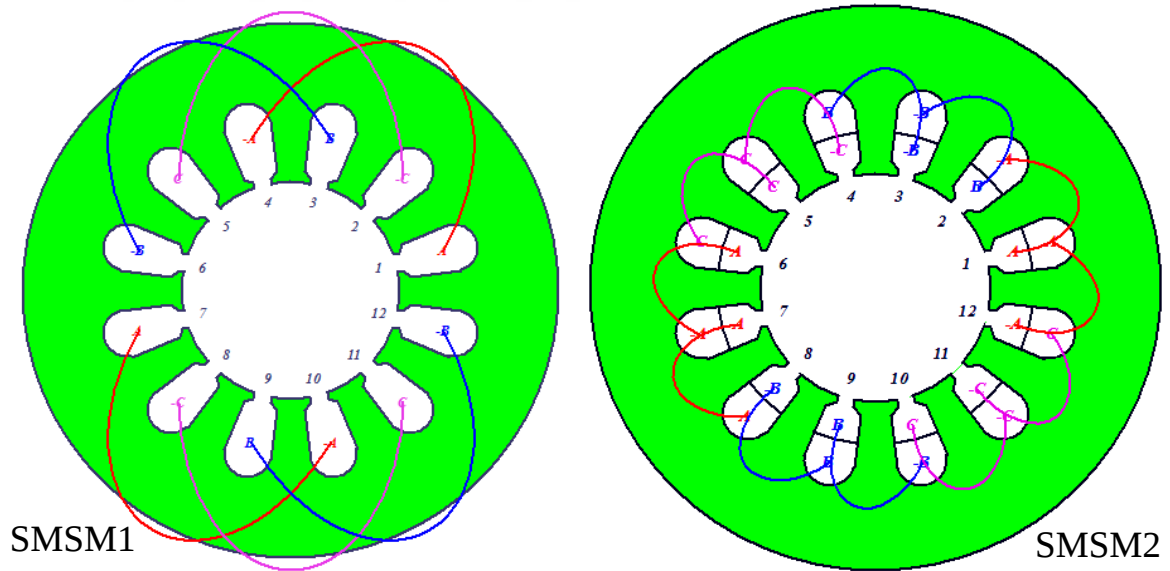
Tablo 6.4. Giriş parametreleri sınır değerleri

Tasarım Parametreleri	Alt Sınır Değeri (mm)	Üst Sınır Değeri (mm)
h_m	2.5	4
L	45	70
h_s	15	19
b_{ts}	5	7.5
D_{sd}	80	105



Şekil 6.4. Analitik tasarımı gerçekleştirilen SMSM1 ve SMSM2 Maxwell-2D geometrisi

Şekil 6.4'te analitik tasarımı gerçekleştirilen SMSM1 (12 oluk-4 kutup) ve SMSM2 (12oluk-10 kutup) motorlarının Maxwell-2D programında oluşturulmuş geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 6.5. SMSM1 ve SMSM2'nin sargı yapısı

Şekil 6.5’te SMSM1 ve SMSM2’ nin sargı dizilimleri verilmiştir. SMSM1 şekilden de görüldüğü üzere dağıtılmış sargı dizilimine sahipken, SMSM2 ise çift tabakalı toplu sargı dizilimindedir.

6.4. Tasarım Optimizasyonu Sonuçları

Dağıtılmış ve toplu sargı yapısına sahip sürekli mıknatıslı senkron motorların tasarımı genetik algoritma optimizasyon tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon işleminin hassasiyetini ve performansını karşılaştırmak için algoritmalar farklı iterasyon (100,250 ve 500) ve popülasyon (50 ve 100) sayılarında on kez tekrarlanmıştır. En iyi verim değeri elde edilen SMSM koşulunun sonuçları değerlendirmeye alınmıştır. Tablo 6.5’te SMSM1’in verimlilik sonuçları verilmiştir.

Tablo 6.5. SMSM1’ in optimum verim sonuçları

Çalışma Sayısı	100 iterasyon		250 iterasyon		500 iterasyon	
	Verim(%)	Ağırlık(kg)	Verim(%)	Ağırlık(kg)	Verim(%)	Ağırlık(kg)
1	93.78	2.22	94.04	2.46	93.62	2.19
2	94.17	3.03	94.10	2.59	93.74	2.24
3	94.01	2.47	94.05	2.50	94.13	2.73
4	93.90	2.31	94.06	2.47	93.90	2.39
5	94.09	2.53	94.24	2.86	93.90	2.41
6	94.03	2.46	94.03	2.46	93.94	2.34
7	94.00	2.45	93.95	2.36	93.88	2.30
8	94.01	2.45	93.77	2.21	94.12	2.70
9	93.97	2.38	94.23	2.80	93.81	2.33
10	94.11	2.60	93.90	2.42	93.96	2.39
Ortalama	94.01	2.49	94.04	2.51	93.9	2.4

Tablo 6.5’te popülasyon sayısı, çaprazlama oranı ve algoritmanın mutasyon oranı sırasıyla 100, 25 ve 0.08 olarak alınmıştır. En optimum çözümler yüz iterasyon adımı için %94.11 verim ve 2.60 kg ağırlık, iki yüz elli iterasyon adımı için %94.10 verim ve 2.59 kg ağırlık ve beş yüz iterasyon adımı için %94.13 verim ve 2.73 kg ağırlığa sahiptir. Ayrıca optimum verimlerin ortalaması yüz iterasyon adımı için %94.01, iki yüz elli iterasyon adımı için %94.04 ve beş yüz iterasyon adımı için %93.9’ dur. Sonlu elemanlar analizinde algoritmadan elde edilen en optimum verimi sağlayan parametre değerleri kullanılmıştır.

6.5. Giriş Tasarım Parametrelerinin Değişimi

Sürekli mıknatıslı senkron motorların genetik algoritma optimizasyon tekniği ile gerçekleştirilen tasarım optimizasyon işlemi sonrasında değişen motor parametreleri Tablo 6.6’da verilmiştir.

Tablo 6.6. Ön analitik ve optimizasyon işlemi ile elde edilen motor parametreleri

Parametreler	SMSM1 (12 oluk/4 Kutup)		SMSM2 (12 oluk/10 Kutup)	
	Ön Analitik	GA	Ön Analitik	GA
h_m (mm)	3.25	3.613	3.25	3.613
g (mm)	0.5	0.5	0.5	0.5
h_s (mm)	17.6	15.9	17.6	15.9
b_{ts} (mm)	5.5	6.61	5.5	6.61
D_{sd} (mm)	90	88.87	90	88.87
D_{rd} (mm)	33	33	33	33
2α (elektriksel derece)	120	120	120	120
L (mm)	55	53.87	55	53.87
h_{sw} (mm)	1.3	1.3	1.3	1.3
Verim (% η)	93.93	94.10	96.12	96.13
Ağırlık (kg)	2.74	2.60	2.34	2.24

Tablo 6.6’da SMSM1 isimli ön analitik tasarım gerçekleştirilen motorun verim değeri %93.93 hesaplanırken genetik algoritma ile tasarım optimizasyonu sonrasında verim değeri %94.10 olarak hesaplanmıştır. Burada mıknatıs kalınlığı, paket boyu, oluk uzunluğu, diş kalınlığı ve stator dış çapındaki değişim miktarlarının motor verimini doğrudan etkilediği görülmektedir.

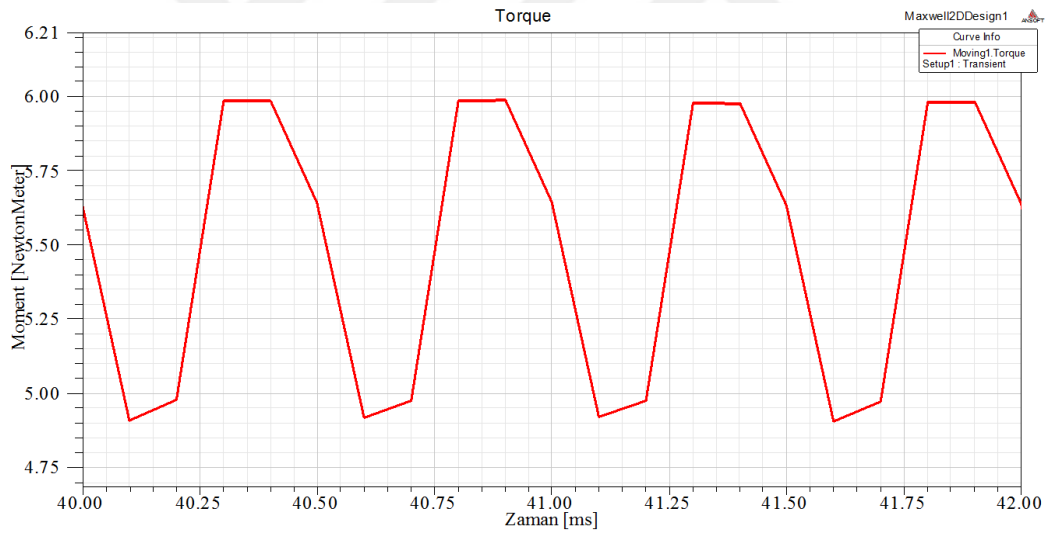
6.6. Motorların Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Sürekli mıknatıslı senkron motorların ön analitik tasarım hesabından elde edilen geometrik parametre değerleri ile Maxwell 2D ve EMETOR programlarında sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Motorların ön analitik tasarım parametreleri kullanılarak Maxwell 2D analizlerinin gerçekleştirilmesi sonucunda SMSM1 motorunun ön analitik tasarım verim değeri %95.78 iken, GA tasarımı verim değeri ise %96’dır.

Tablo 6.7. SMSM1 motorunun ön analitik ve GA tasarımı performans sonuçları

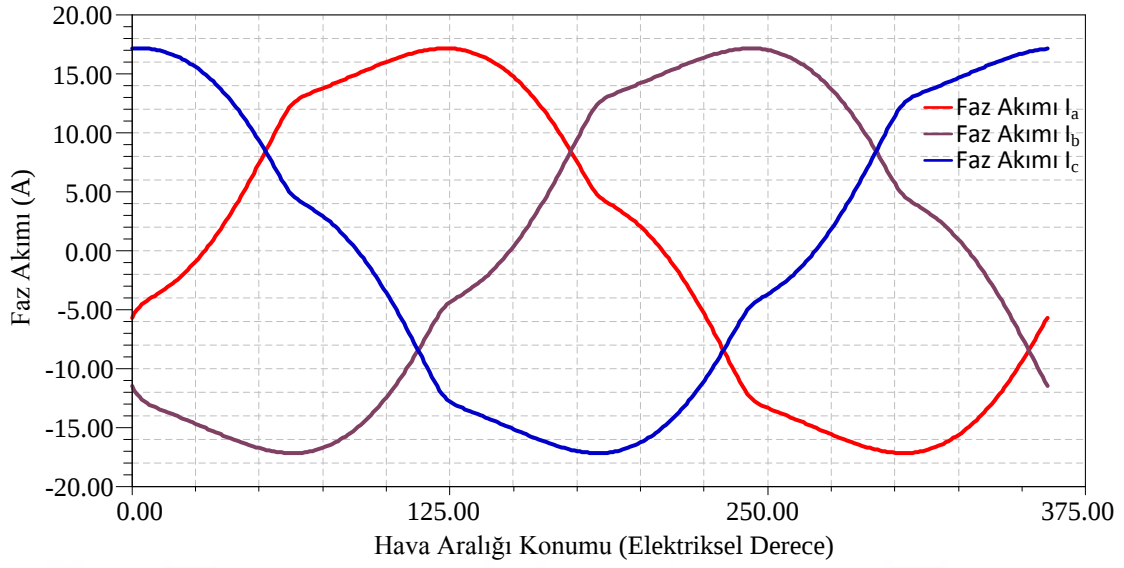
	ÖN ANALİTİK	MAXWELL 2D	EMETOR	GA	MAXWELL 2D	EMETOR
T (Nm)	5.5	5.45	5.5	5.5	5.46	5.48
P _ç (W)	5759	5760.15	5664	5759	5761.5	5644
P _g (W)	6131	6013.7	5929	6120.35	6001	5900
I (A)	12.1	12.22	11.9	11.91	11.8	11.9
E (V)	169.1	147.47	167.93	171.7	153.44	165.25
P _b (W)	146.1	253.52	167.8	161.8	240	170
η (%)	93.93	95.78	95.53	94.1	96	95.66
W _T (kg)	2.74	2.32	2.75	2.6	2.24	2.55

Tablo 6.7’ de SMSM1 motorunun ön analitik tasarım ve GA tasarımı performans sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçları verilmiştir.



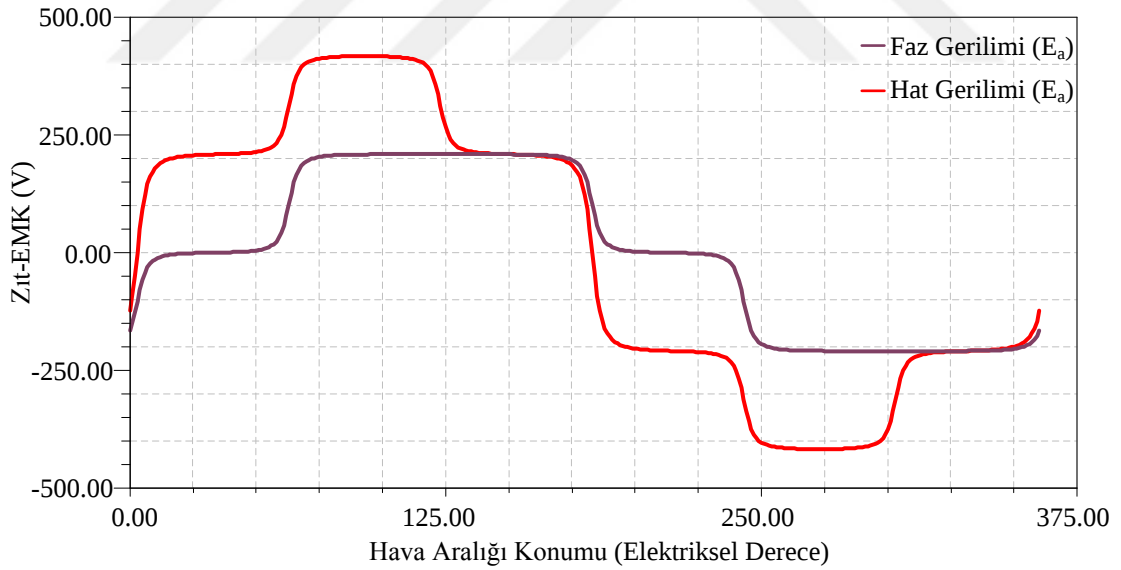
Şekil 6.4. SMSM1 ön analitik tasarım Maxwell 2D moment-zaman grafiği

Şekil 6.4’te SMSM1 motorunun ön analitik tasarımı sonucunda moment-zaman grafiği görülmektedir. Maxwell 2D analizi sonucunda ortalama moment değeri 5.45 Nm olarak hesaplanmıştır. Ayrıca motor %21.81 moment dalgalanmasına sahiptir.



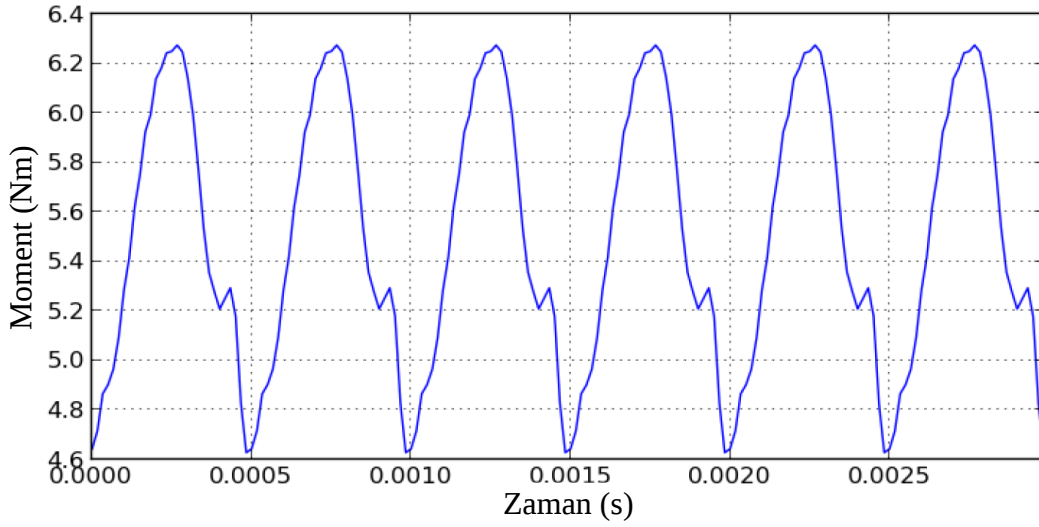
Şekil 6.5. SMSM1 ön analitik tasarım Maxwell 2D faz akımları grafiği

Şekil 6.5'te SMSM1 motorunun faz akımları grafiği verilmiştir. Faz akımlarının tepe değeri 17.13 A'dir.



Şekil 6.6. SMSM1 Maxwell 2D zıt EMK grafiği

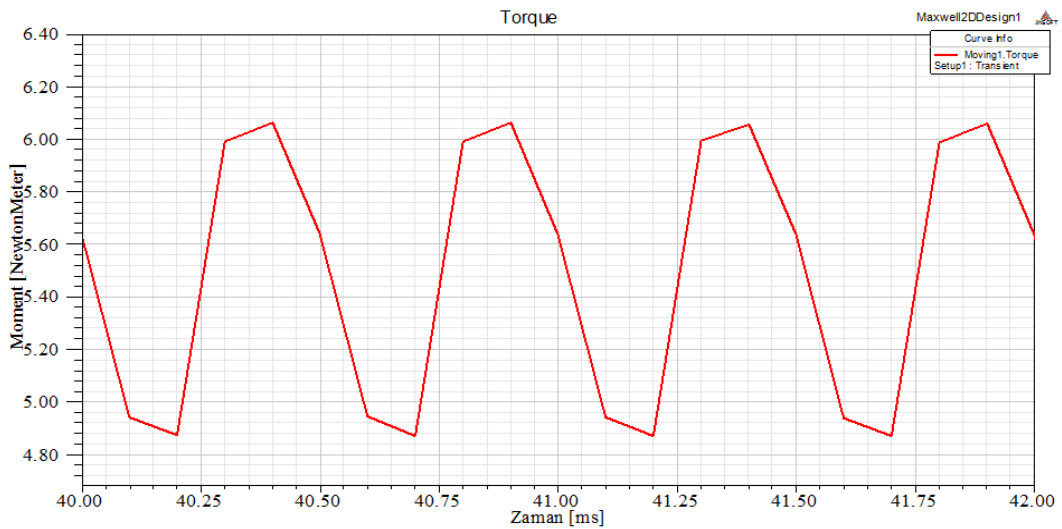
Şekil 6.6'da motorda indüklenen üç faz gerilim grafiği görülmektedir. Zıt EMK hava aralığı akı yoğunluğunun bir fonksiyonu olduğundan dolayı aynı dalga şekline sahiptir. Fazlarda indüklenen zıt-EMK gerilim değerinin tepeden tepeye değeri 417 V'tur.



Şekil 6.7. SMSM1 ön analitik tasarım EMETOR moment-zaman grafiği

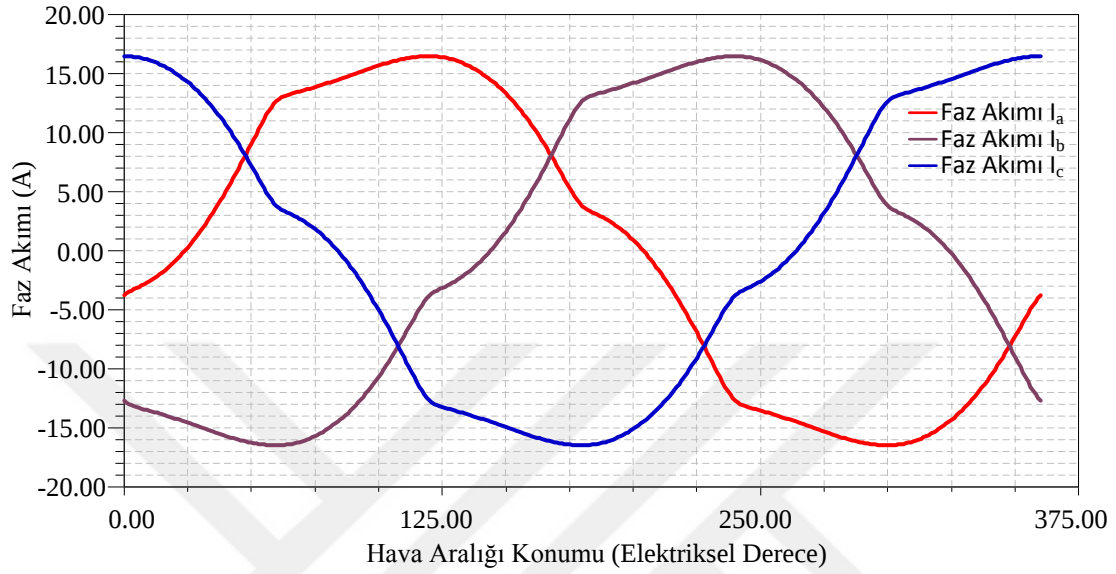
Şekil 6.7’de EMETOR programındaki analiz sonucundaki moment grafiğinin dalga şekli verilmiştir. Moment dalgalanma miktarı %29 civarındadır. EMETOR web tabanlı online bir program olduğundan dolayı hassasiyet oranı çok iyi değildir. Ayrıca sonuçlar arasında farkların oluşmasının nedeni oluşturulan ağ yapıları ile de ilgilidir. Bu nedenlerden dolayı moment dalgalanması daha yüksektir.

Tablo 6.7’de SMSM1 motorunun GA algoritma optimizasyonu ile tasarımı sonrasındaki performans değerleri verilmiştir. Tasarım algoritması sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu tablodan görülmektedir.



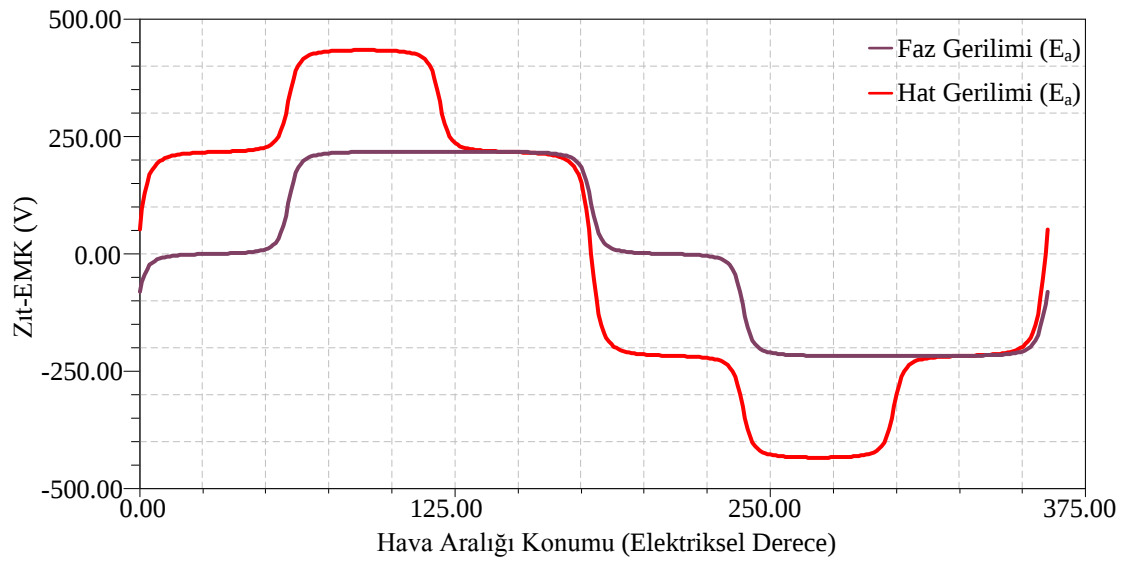
Şekil 6.8. SMSM1 GA tasarımı Maxwell 2D moment-zaman grafiği

Şekil 6.8’de SMSM1 motorunun GA tasarımı sonucunda moment-zaman grafiği verilmiştir. Maxwell 2D analizi sonucunda ortalama moment değeri 5.46 Nm olarak hesaplanmıştır. Ayrıca motor %19.52 moment dalgalanmasına sahiptir.



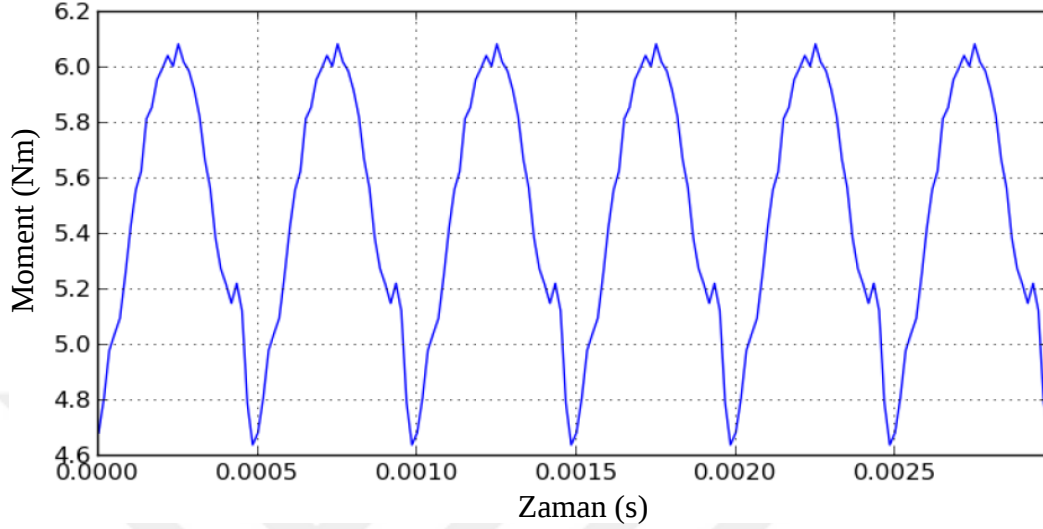
Şekil 6.9. SMSM1 GA tasarımı Maxwell 2D faz akımları grafiği

Şekil 6.9’da SMSM1 motorunun GA ile optimizasyon tasarımı sonrasındaki faz akımları-zaman grafiği verilmiştir. Faz akımı tepe değeri 16.45 A olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.10. SMSM1 GA tasarımı Maxwell 2D zıt-EMK-zaman grafiği

Şekil 6.10’da motorun stator sargılarında indüklenen gerilimin dalga şekli görünmektedir. Fazlarda indüklenen zıt EMK geriliminin tepe değeri 217 V’tur.



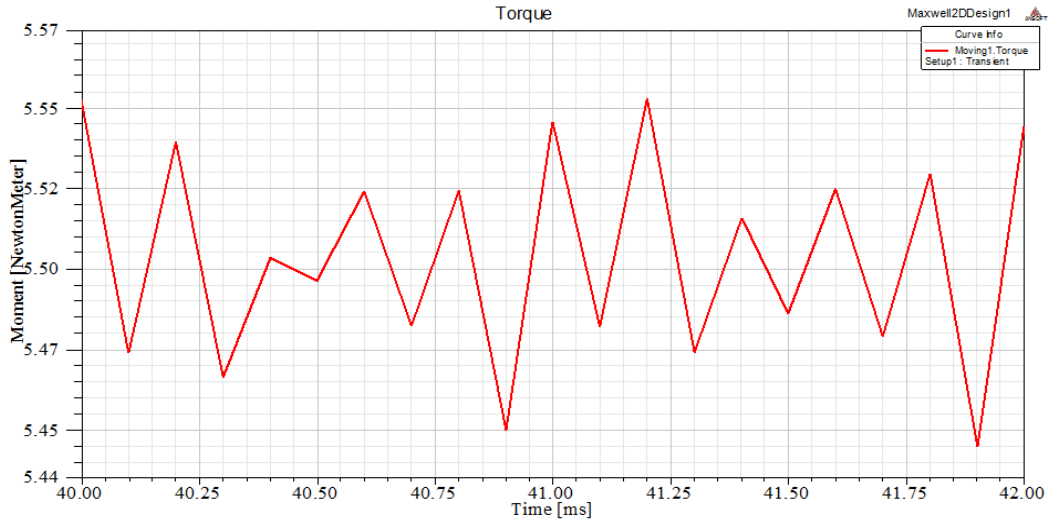
Şekil 6.11. SMSM1 ön analitik tasarım EMETOR moment-zaman grafiği

Şekil 6.11’de EMETOR programındaki analiz sonucundaki motor momentinin dalga şekli verilmiştir. Momentin dalgalanma miktarı %26.43 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6.8. SMSM2 motorunun ön analitik ve GA tasarımı performans sonuçları

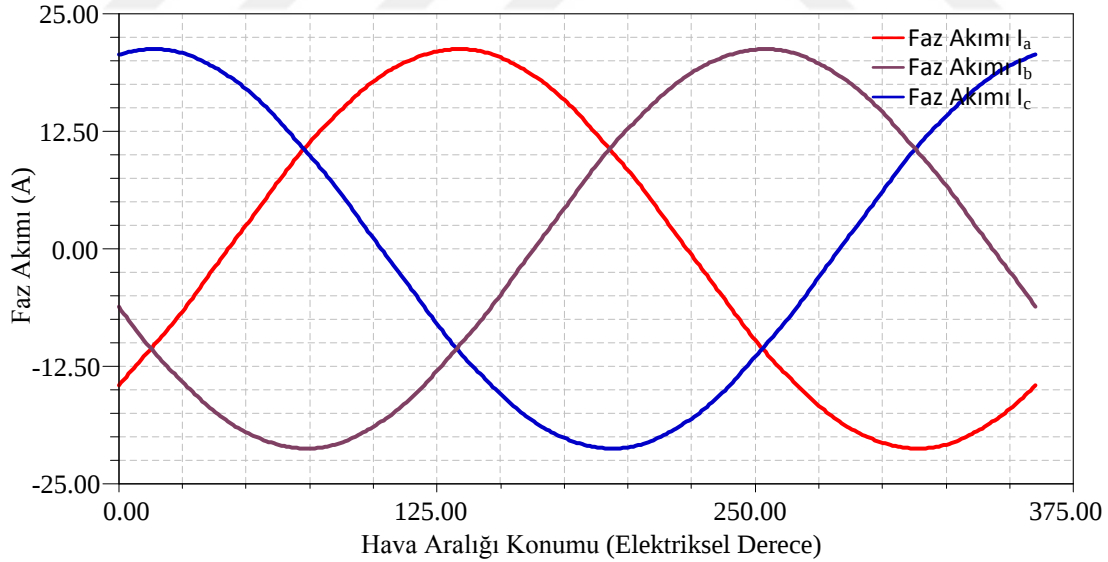
	ÖN ANALİTİK	MAXWELL 2D	EMETOR	GA	MAXWELL 2D	EMETOR
T (Nm)	5.5	5.5	5.52	5.5	5.49	5.67
P _ç (W)	5760	5762.45	5556	5760	5761.88	5730
P _g (W)	5989.25	5919.95	5900	5991.8	5943.16	6074
I (A)	15.37	14.98	15.37	16.12	15.5	15.37
E (V)	124.87	126.57	132.93	119.08	124.4	132.72
P _b (W)	107.75	157.5	111	121.23	181.3	130.5
η (%)	96.12	97.33	94.18	96.13	96.95	94.33
W _T (kg)	2.34	2.07	2.22	2.24	2.00	2.17

Tablo 6.8’de SMSM2 motorunun ön analitik tasarımı sonrasındaki performans değerleri verilmiştir. SMSM2 motorunun SMSM1 motoruna göre veriminin daha yüksek olduğu görülmektedir.



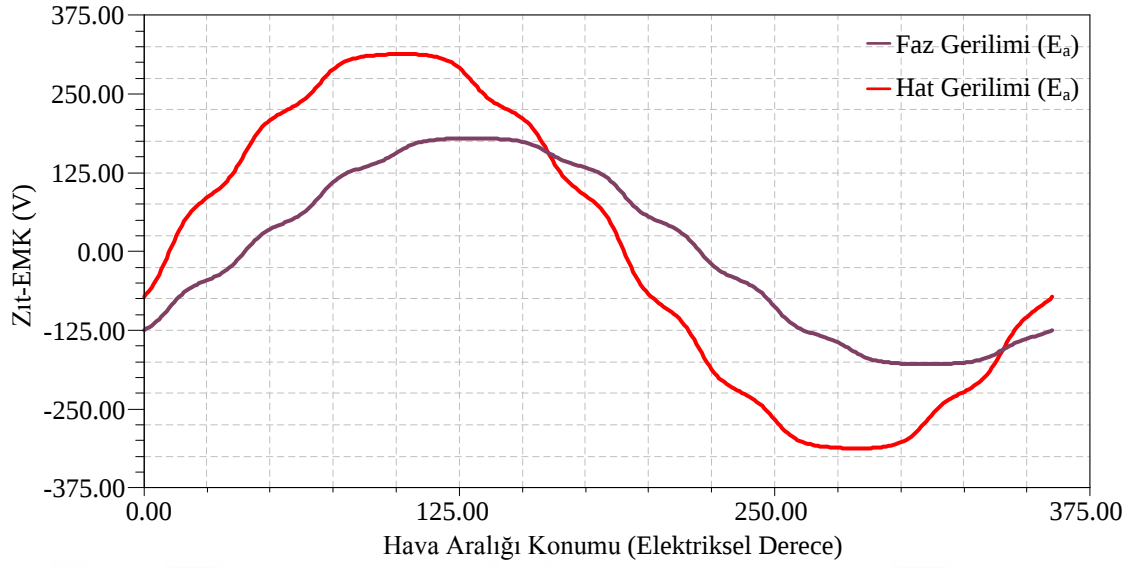
Şekil 6.12. SMSM2 ön analitik tasarımı Maxwell 2D moment-zaman grafiği

Şekil 6.12’de SMSM2 motorunun ön analitik tasarımı sonucunda moment-zaman grafiği verilmiştir. Maxwell 2D analizi sonucunda ortalama moment değeri 5.5 Nm olarak hesaplanmıştır. Motorun dalgalanma oranı ise %1.87 gibi çok düşük bir seviyededir.



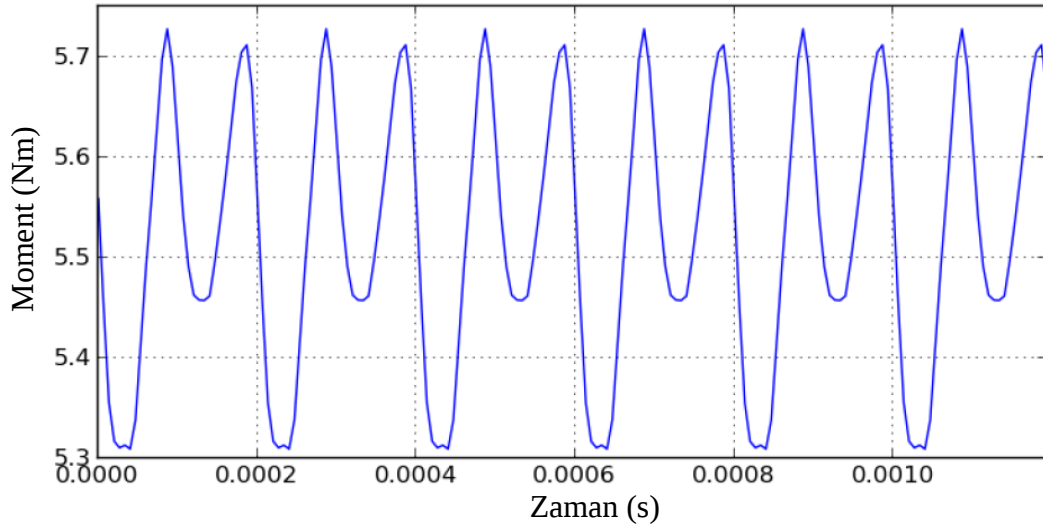
Şekil 6.13. SMSM2 ön analitik tasarımı Maxwell 2D faz akımları-zaman grafiği

Şekil 6.13’te motorun faz akımlarının dalga şekli verilmiştir. Her fazı süren akımların tepe değeri 21.2 A olarak verilmiştir.



Şekil 6.14. SMSM2 ön analitik tasarımı Maxwell 2D zıt EMK-zaman grafiği

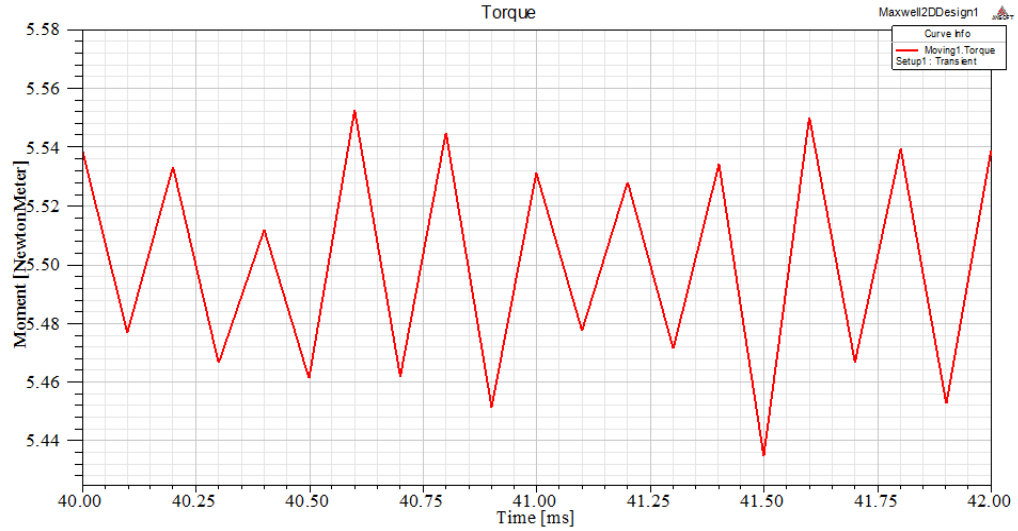
Şekil 6.14'te motorun Maxwell 2D analizi sonucunda stator sargılarında indüklenen gerilimin dalga şekli verilmiştir. Gerilim dalga şekli sinüzoidal forma yakındır ve faz geriliminin tepeden tepeye değeri 358 V'tur.



Şekil 6.15. SMSM2 ön analitik tasarım EMETOR moment-zaman grafiği

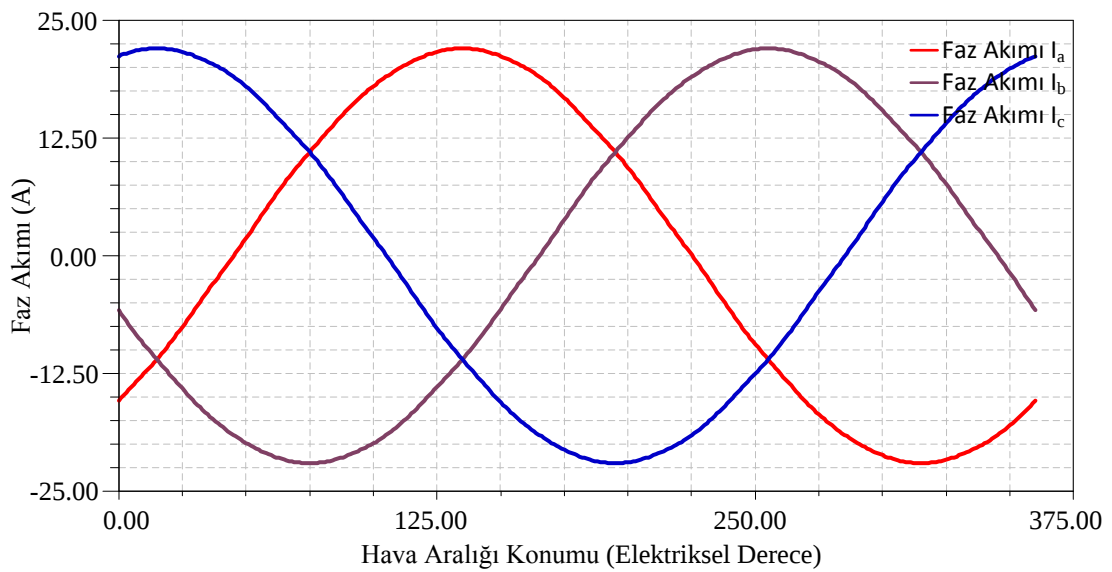
Şekil 6.15'te EMETOR programındaki analiz sonucundaki moment grafiğinin dalga şekli verilmiştir. Moment dalgalanma miktarı %7.6'dır.

Tablo 6.8’de SMSM2 motorunun GA algoritma optimizasyonu ile tasarım performans değerleri verilmiştir. Optimizasyon işlemi sonrasında motor verimi aynı kalırken motorun toplam ağırlığının azaldığı görülmektedir.



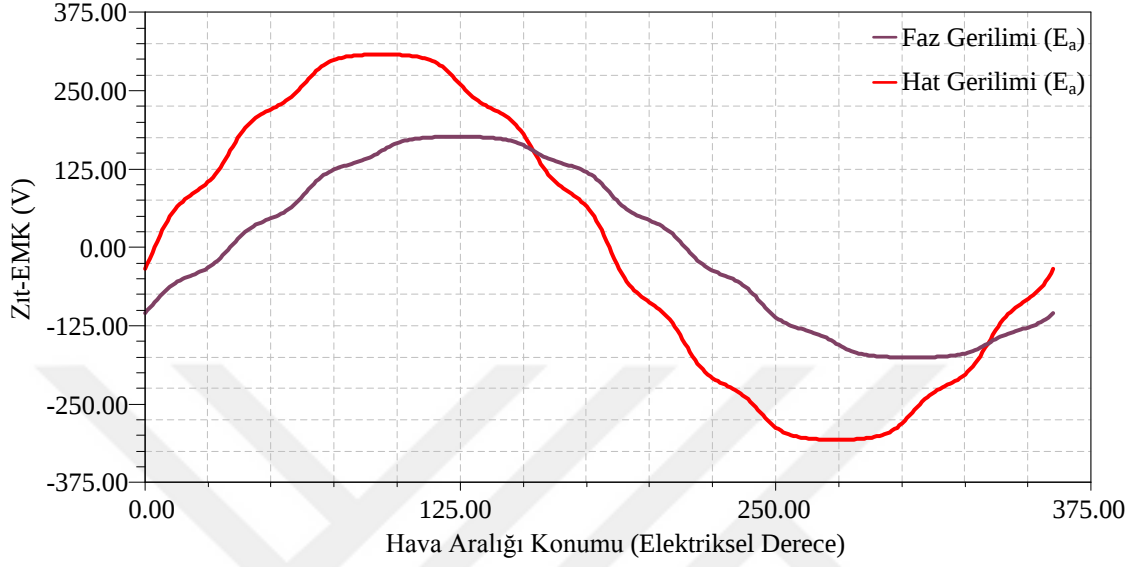
Şekil 6.16. SMSM2 GA tasarımı Maxwell 2D moment-zaman grafiği

Şekil 6.16’da SMSM2 motorunun optimizasyon tasarımı sonucunda moment-zaman grafiği verilmiştir. Maxwell 2D analizi sonucunda ortalama moment değeri 5.49 Nm olarak hesaplanmıştır. Motorun moment dalgalanma oranı ise %2.14 değerindedir.



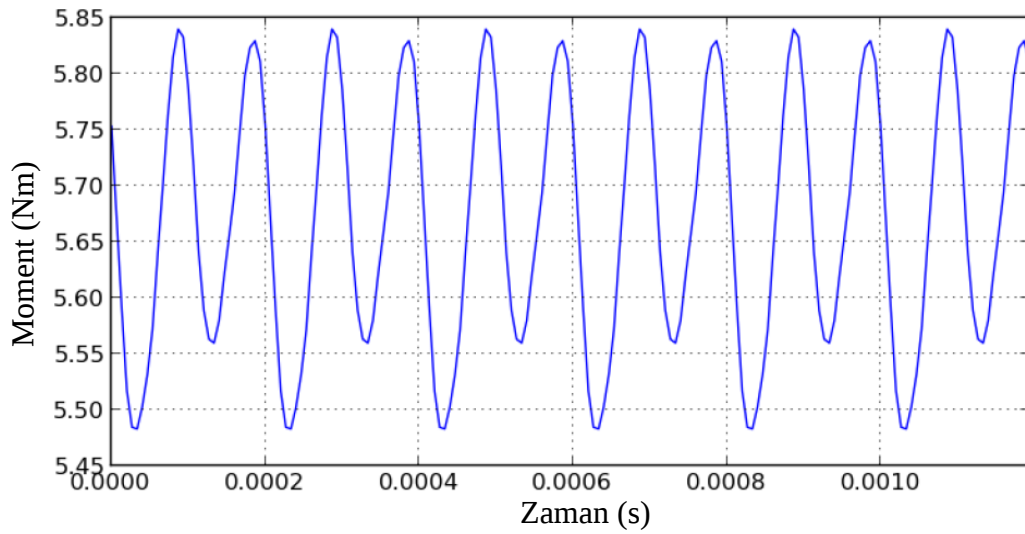
Şekil 6.17. SMSM2 GA tasarımı Maxwell 2D faz akımları-zaman grafiği

Şekil 6.17’de motorun faz akımlarının dalga şekli verilmiştir. Her fazı süren akımların tepe değeri 22 A olarak verilmiştir.



Şekil 6.18. SMSM2 GA tasarımı Maxwell 2D zıt EMK-zaman grafiği

Şekil 6.18’de motorun Maxwell 2D analizi sonucunda stator sargılarında indüklenen gerilimin dalga şekli verilmiştir. Gerilim dalga şekli sinüzoidal forma yakındır ve faz geriliminin tepeden tepeye değeri 351.8 V’tur.



Şekil 6.19. SMSM2 ön analitik tasarım EMETOR moment-zaman grafiği

Şekil 6.19’da EMETOR analizi sonucunda momentin dalga formu verilmiştir. Moment dalgalanma miktarı %6.3’tür.

SMSM1 ve SMSM2 için Tablo 6.6’da ön analitik tasarım ve optimizasyon işlemlerinden sonra elde edilen motor parametreleri verilmiştir. SMSM1’ in ön analitik tasarımında motor verimi %93.93 iken optimizasyon sonrasında motor verimi 94.10’a yükselmiştir. Aynı şekilde SMSM2’ nin ön analitik tasarımı sonucunda motor verimi %96.12 iken optimizasyon işlemi sonrasında %96.13’e yükselmiştir. Aynı zamanda SMSM1 motorunun ön analitik tasarımı sonrasında toplam ağırlığını 2.74 kg iken optimizasyon sonrasında 2.60 kg değerine düşmüştür. SMSM2 motorunun ön analitik tasarımı sonucunda toplam ağırlığı 2.34 kg iken optimizasyon sonrasında 2.24 kg değerine düştüğü görülmektedir.



7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında genetik algoritma optimizasyon tekniği kullanılarak sürekli mıknatıslı senkron motorların geometrik parametrelerine dayalı verim ve ağırlık iyileştirmesi yapılmıştır. Tasarım optimizasyonu gerçekleştirilen motorların (SMSM1 ve SMSM2) geometrileri yüzey mıknatıslı rotor yapısına sahip olup sargı dizilimleri dağıtılmış ve toplu sargı yapısındadırlar. Tasarım optimizasyonunda giriş parametresi olarak mıknatıs kalınlığı, hava aralığı uzunluğu, stator diş kalınlığı, paket boyu, stator dış çapı ve oluk uzunluğu belirlenmiştir ve bu parametrelerin değişimine bağlı olarak motor performansı değerlendirilmiştir. Etiket değerleri belli olan sürekli mıknatıslı senkron motorun verim ve ağırlığını iyileştirmek için Genetik Algoritma tabanlı bir optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Optimizasyon algoritmalarının güvenilirliğini ispatlamak için sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS@Maxwell-2D ve web tabanlı olarak kullanılan EMETOR gibi yazılımlar motor tasarım kriterleri göz önüne alınarak kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre SMSM1 ve SMSM2 motorlarının verimleri optimizasyon sonucunda ön analitik tasarımdaki değerlere göre sırasıyla %0.17 ve %0.01 kadar arttığı gözlemlenmiştir. Ağırlık açısından bakılacak olursa SMSM1 ve SMSM2 motorlarının optimizasyon sonucunda ağırlık değerleri ön analitik tasarımdaki değerlere göre %5.12 ve %4.27 azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca SMSM1 ve SMSM2 motorları için ön analitik ve optimizasyon tasarımı sonrasında motorun nominal momenti, çıkış gücü, giriş gücü, faz akımının etkin değeri ve stator sargılarında indüklenen zıt-EMK geriliminin etkin değeri, bakır kaybı, verim ve ağırlık değerleri incelenmiştir. Bu değerlere bakıldığında sargı sonu uzunlukları dağıtılmış sargılara göre daha kısa ve dolayısıyla oluklara yerleştirilen sargı miktarı daha az olmasından dolayı toplu sargı yapısına sahip olan SMSM2'nin veriminin daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca sargı boylarının kısalmasından dolayı iletken direnci azalmakta ve dolayısıyla bakır kaybı azaltılarak motor veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun yanısıra toplu sargı yapısına sahip motorların dağıtılmış sargı yapısına göre moment dalgalanması değerinin daha az olduğu görülmüştür.

Motor tasarımında; motor verimi, moment dalgalanması ve motorun ağırlık değeri önemli bir rol oynamaktadır. Bununla beraber daha optimum bir motor tasarımı için motorun termal analiz değerleri, manyetik malzemelerin seçimi ve doyumları, akı dağılımları,

fiyat/performans oranı ve pazar payı vb. parametrelerinde uygun şekilde belirlenmesi gerekmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **Bianchi, N. and Canova, A.**, 2002. FEM analysis and optimisation design of an IPM synchronous motor, *International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, 49-54.
- [2] **Bianchi, N. and Bolognani, S.**, 1998. Design optimisation of electric motors by genetic algorithms, *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, **145 (5)**, 475-483.
- [3] **Libert, F. and Soulard, J.**, 2005. Design study of low-speed direct-driven permanent-magnet motors with concentrated windings, *6th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems*.
- [4] **Salminen, P., Pyrhönen, J., Libert, F., and 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*, Baiona, Spain, September 15-17.
- [5] **Chin, Y.K. and Soulard, J.**, 2005. Design study of a traction motor for electric vehicles, *ICEMS – Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems*, Nanjing, China, September 27-29, 786-791.
- [6] **Salminen, P., Jokinen, T. and Pyrhönen, J.**, 2005. Pull-out torque of fractional-slot PM motors with concentrated winding, *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, **152 (6)**, 1440-1444.
- [7] **Sudhoff, S.D., Cale, J., Cassimere, B. and Swinney, M.**, 2005. Genetic algorithm based design of a permanent magnet synchronous machine, *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, San Antonio, TX, USA, May 15-15.
- [8] **Somanatham, R., Prasad, P.V.N. and Rajkumar, A.D.**, 2006. Reduction of Cogging Torque in PMSM Motor with Reduced Stator Tooth Width and Bifurcated Surface Area Using Finite Element Analysis, *Power Electronics, Drives and Energy Systems PEDES International Conference*, New Delhi, India, December 12-15.
- [9] **Libert, F. and Soulard, J.**, 2006. Manufacturing methods of stator cores with concentrated windings, *PEMD-3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, The Contarf Castle, Dublin, Ireland, April 4-6.
- [10] **Ishak, D., Zhu, Z. Q. and Howe, D.**, 2006. Comparison of PMbrushless motors, having either all teeth or alternate teeth wound, *IEEE Trans. Energy Conversion*, **21 (1)**, 95-103.
- [11] **Mi, C.C.**, 2006. Analytical design of permanent-magnet traction-drive motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, **42 (7)**, 1861-1866.
- [12] **Salminen, P., Pyrhönen, J., Jussila, H. and Niemela, M.**, 2007. Concentrated wound permanent magnet machines with different rotor designs, *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Setubal, Portugal, April 12-14.

- [13] El-Refaie, A. M., Zhu Z. Q., Jahns, T. M. and Howe, D., 2008. Winding Inductances of Fractional Slot-Surface-Mounted Permanent Magnet Brushless Machines, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting IAS*, Edmonton, AB, Canada, October 5-9.
- [14] Cvetkovski, G. and Petkovska, L., 2008. Efficiency maximisation in structural design optimisation of permanent magnet synchronous motor, *IEEE Proceedings of the International Conference on Electrical Machines*, Vilamoura, Portugal September 6-9.
- [15] Isfahani, A.H. and Sadeghi, S., 2008. Design of a permanent magnet synchronous machine for the hybrid electric vehicle, *Proceedings of World Academy of Science Engineering and Technology*, 2 (9), 82.
- [16] Cassimere, B. N., Sudhoff, S. D. and Sudhoff, D. H., 2009. Analytical design model for surface-mounted permanent-magnet synchronous machines, *IEEE Trans. Energy Conversion.*, 24 (2), 347–357.
- [17] Cassimere, B.N. and Sudhoff, S.D., 2009, Population-based design of surface-mounted permanent-magnet synchronous machines, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24 (2), 338-346.
- [18] Duan, Y., Harley, R. G. and Habetler, T. G., 2009. Comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm in the design of permanent magnet motors, *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, Shangri-La Hotel Wuhan, China, May 2009, 822-825.
- [19] El-Refaie, A.M., 2010. Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machines: opportunities and challenges, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (1), 107-121.
- [20] Yao, D. and Ionel, D. M., 2013. A review of recent developments in electrical machine design optimization methods with a permanent-magnet synchronous motor benchmark study, *IEEE Transaction on Industry Applications*, 49 (3), 1268-1275.
- [21] Guo, H., Wu, Z., Qian, H. and Sun, Z., 2016. Robust design for the 9-slot 8- pole surface-mounted permanent magnet synchronous motor by analytical method-based multi-objectives particle swarm optimisation, *IET Electric Power Application*, 10 (2), 117-124.
- [22] Mutluer, M. and Bilgin, O., 2014. An intelligent design optimization of a permanent magnet synchronous motor by artificial bee colony algorithm, *Published online in Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24, 1826-1837.
- [23] Heikkila, T., 2002. Permanent magnet synchronous motor for industrial inverter applications - analysis and design, Finland, *PhD Thesis*, Lappeenranta University of Technology.
- [24] Demir, Y., 2013. 1,5 kW'lık Dengesiz Sargı Yapılı Sürekli Mıknatıslı Bir AC Servomotor Tasarımı, Üretimi ve Gerçeklenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

- [25] **Gieras J., F., , Wang, R., Kamper, M., J.**, 2004. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, USA.
- [26] **Khrishnan, R.**, 2010. *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*, 1th ed., CRC Press, New York, USA.
- [27] **Aydin, M.**, Brushless permanent magnet servomotors, Editors: **Kücük S.**, *Serial and parallel robot manipulators: Kinematic dynamics control and optimization*, 1th ed., Published by InTech, Rijeka, 275-294, 2012.
- [28] **Campbell, P.**, 1994. Permanent magnet materials and their application, Cambridge University Press, New York, Cambridge, England.
- [29] **Ruoho, S. and Arkkio, A.**, 2008. Partial Demagnetization of Permanent Magnets in Electrical Machines Caused by an Inclined Field, IEEE Transactions On Magnetics, 44 (7), 1773-1778.
- [30] **Libert, F.**, 2004. Design, optimization and comparison of permanent magnet motors for a low-speed direct-driven mixer, *PhD Thesis*, Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm.
- [31] **Stening, A.**, 2006. Design and optimization of a surface-mounted permanent magnet synchronous motor for a high cycle industrial cutter, *Master Thesis*, Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm.
- [32] **Meier, S.**, 2002. Theoretical design of surface-mounted permanent-magnet motors with field-weakening capability, *Master Tesis*, Royal Institute Technology, Stockholm, Sweden.
- [33] **Hanselman, D. C.**, 1994. Brushless Permanent Magnet Motor Design, USA.
- [34] **Lipo, T. A.**, 1996. Introduction to AC Machine Design, University of Wisconsin-WisPERC, USA.
- [35] **Babr, S. M.**, 2009. Design of PM Motors with Concentrated Windings for Concrete Cutters, *Master Thesis*, Royal Inst. Technology, Stockholm, Sweden.
- [36] **Salminen, P.**, 2004. Fractional Slot Permanent Magnet Synchronous Motor For Low Speed Applications, Lappeenranta University, *PhD Thesis*, Finland.
- [37] **Meier, F.**, 2008. Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications, Royal Inst.Technol., School Elect. Eng., Electrical Machines Power Electronics, *PhD Thesis*, Stockholm, Sweden.
- [38] **Pyrhonen, J., Jokinen, T. and Hrabovcova, V.**, 2008. Design of Rotating Electrical Machines. Hoboken, Wiley.
- [39] **Hendershot, J. R., Miller, T.J.E.**, 2010. Design of Brushless Permanent Magnet Machines, Motor Design Books LLC.

[40] **Gieras, J. F., Wing, M.**, 2002. *Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications*, Marcel Dekker, N. Y., USA.

[41] **Lei G., Zhu, J. G. and Guo, Y. G.**, 2016. *Multidisciplinary Design Optimisation Methods for Electrical Machines and Drive Systems*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

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

[43] www.ansys.com/products/academic

[44] www.emotor.com, EME and MOTOR. 2009.

[45] <https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m400-50a.pdf>



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

İsim Soyisim : İlyas ALADAĞ
Doğum Tarihi : 12.10.1988
Doğum Yeri : ELAZIĞ
Email : ilyasaladag@osmaniye.edu.tr

Eğitim Bilgileri Derece	Üniversite/Okul	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü	2012
Lise	Elazığ Özel Harput Koleji	2007
Çalışma Bilgileri	Kurum	Yıl
Araştırma Görevlisi	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği	2014-devam