T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATIS DESTEKLİ SENKRON RELÜKTANS MOTOR TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ

Hazırlayan
Emrah ESER

Danışman
Doç. Dr. Nurettin ÜSTKOYUNCU

Doktora Tezi

Ocak 2024
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATIS DESTEKLİ SENKRON RELÜKTANS MOTOR TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ

(Doktora Tezi)

Hazırlayan
Emrah ESER

Danışman
Doç. Dr. Nurettin ÜSTKOYUNCU

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FDK-2022-11749 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Ocak 2024
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Emrah ESER

İmza

“Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarımı ve Prototip Üretimi” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışman**
Emrah ESER	Doç. Dr. Nurettin ÜSTKOYUNCU
İmza	İmza

Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Enis GÜNAY

İmza

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan, bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Nurettin ÜSTKOYUNCU'ya, fikirleriyle tezin ilerleyişine ve tamamlanmasına ciddi derecede katkıda bulunan Tez İzleme Komitesi Üyeleri Prof. Dr. Ferhat DALDABAN ve Dr. Öğr. Üyesi Burak TEKGÜN'e ve Tez Savunma Jürimde yer alan ayrıca çalışmalarım sürecinde bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan Prof. Dr. Mehmet AKAR ve Doç. Dr. Mustafa EKER'e katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmem de büyük emeği olan Annem Elmaziye, Babam Basri ESER'e ve desteklerini, güvenlerini ve yanımda olduklarını her zaman arkamda hissettiren Kardeşlerim Özlem, Yeter ve Emirhan'a teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmasının prototip üretiminde düşünce ve destekleri ile katkıda bulunan başta Murat ÖZKAN olmak üzere MNF Plastik Teknolojileri firmasındaki her bir firma çalışanına teşekkürlerimi sunarım.

Beni her zaman destekleyen ve hayatın yükünü birlikte paylaştığımız eşim Özlem ve bu süreçte bana çektiğim bütün sıkıntıları unutturan ve hayattaki neşe kaynaklarım, çocuklarım Amine Nur ve Asaf Emre'ye çok teşekkür ederim

Emrah ESER

Ocak 2024, KAYSERİ

EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATIS DESTEKLİ SENKRON REÜLKTANS MOTOR TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ

Emrah ESER

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Ocak 2024
Danışman: Doç. Dr. Nurettin ÜSTKOYUNCU

ÖZET

Senkron relüktans motorlar yapısal olarak sağlam olmaları, üretim maliyetlerinin düşük olması ve yüksek verim değerlerine ulaşabilmesi gibi özellikleri ile son yıllarda oldukça ilgi çekici bir konumdadır. Motor topolojileri içerinde eksenel akılı motorlar düşük hacim ve yüksek güç yoğunluğu gibi özellikleri ile son zamanlarda araştırmacıların tercih ettiği bir motor topolojisi olmaktadır. Son birkaç yılda ise eksenel akılı senkron relüktans motorlar üzerine çalışmalar sunulmaktadır. Bu tez çalışmasında ilk olarak eksenel akılı senkron relüktans motorun analitik tasarımı yapılmıştır. Analitik tasarım sonucu oluşturulan motor üç boyutlu olarak analiz edilmiş ve rotoru çok amaçlı genetik algoritma ile optimize edilmiştir. Elde edilen eksenel akılı senkron relüktans motorun bariyerlerine sürekli mıknatıs yerleştirilmesi durumunda motor performansına etkisi incelenmiştir. Ayrıca sürekli mıknatıs hacminin artmasına rağmen mıknatısların hava aralığından uzaklaşıldığında ortalama momentin çok etkilenmediği görülmüştür. Tez çalışmasında ayrıca özgün bir rotor topolojisine sahip eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron relüktans motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Eksenel akılı sürekli mıknatıs destekli senkron relüktans motorun üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi analizleri ve rotor optimizasyonu hedefler doğrultusunda yapılmıştır. Performans analizleri sonrasında prototip üretimine hazırlık olarak yapısal ve termal analizleri sonuçları elde edilmiştir. Ardından prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve deneysel çalışmalar ile benzetim çalışmaları doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Senkron Relüktans Motor, Eksenel Akılı Motor, Motor Tasarımı, Çok Amaçlı Genetik Algoritma

DESIGN AND PROTOTYPE FABRICATION OF AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET ASSISTED SYNCHRONOUS REULCTANCE MOTOR

Emrah ESER

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
PhD Thesis, January 2024
Supervisor: Assoc. Prof. Nurettin ÜSTKOYUNCU

ABSTRACT

Synchronous reluctance motors have been in a very interesting position in recent years with their features such as being structurally robust, having low production costs and reaching high efficiency values. Among the motor topologies, axial flux motors have recently become a motor topology preferred by researchers due to their features such as low volume and high power density. In the last few years, studies on axial-flux synchronous reluctance motors have been presented. In this thesis, firstly, analytical design of the axial flux synchronous reluctance motor is carried out. The motor created as a result of the analytical design is analyzed in three dimensions and its rotor is optimized with a multi-objective genetic algorithm. The effect of placing permanent magnets in the barriers of the obtained axial flux synchronous reluctance motor on the motor performance is analyzed. In addition, it has been observed that the average moment is not affected much when the magnets are moved away from the air gap despite the increase in the permanent magnet volume. In this thesis, an axial flux permanent magnet assisted synchronous reluctance motor with a unique rotor topology was designed. Three dimensional finite element method analyses and rotor optimization of the axial flux permanent magnet assisted synchronous reluctance motor were performed in line with the objectives. After the performance analyses, the results of structural and thermal analyses were obtained in preparation for prototype manufacturing. Then prototypes have been manufactured and simulation and with experimental studies verified.

Keywords: Synchronous Reluctance Motor, Axial Flux Motor, Motor Design, Multi-objective Genetic Algorithm

İÇİNDEKİLER

EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATIS DESTEKLİ SENKRON RELÜKTANS MOTOR TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ

Sayfa

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK iii
KABUL VE ONAY iv
TEŞEKKÜR v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
KISALTMALAR x
TABLOLAR LİSTESİ xi
ŞEKİLLER LİSTESİ xii
GİRİŞ 1

1. BÖLÜM
GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Giriş 3
1.2. Literatür Çalışması 3
1.3. Tezin Amacı ve Literatürdeki Yeri 9

2. BÖLÜM
YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Senkron Relüktans Motor 10
2.1.1. SRM Çalışması 11
2.1.2. SRM Eşdeğer Devresi ve Matematiksel Modeli 12
2.2. Eksenel Akılı SRM'lerde Boyutlandırma ve Tasarım 19
2.2.1. EA-SRM Boyutlandırma ve Stator Tasarımı 19
2.2.2. EA-SRM Rotor Tasarımı 23

2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) 26
2.3.1. Maxwell Denklemleri 28
2.4. Çok Amaçlı Genetik Algoritma ve Optimizasyon 29

3. BÖLÜM
EA-SRM TASARIMI ve ANALİZİ

3.1. EA-SRM Tasarımı 36
3.2. EA-SMD-SRM Tasarımı 42
3.3. EA-SMD-SRM'nin Yapısal Analizi 48
3.4. EA-SMD-SRM'nin Termal Analizi 49
3.5. EA-SMD-SRM'nin Prototip Üretimi 51
3.6. EA-SMD-SRM'nin Deney Düzeneği ve Performans Testleri 55
3.6.1. Deney Düzeneği 56

4. BÖLÜM
BULGULAR

4.1. EA-SRM Analiz Sonuçları 61
4.1.1. EA-SRM Rotor Optimizasyonu 61
4.1.2. EA-SRM'de SM Etkisi 63
4.2. EA-SMD-SRM Analiz Sonuçları 68
4.2.1. EA-SMD-SRM SEY Sonuçları 68
4.2.2. EA-SMD-SRM Performansının SEY ve Deneysel Sonuçları 71

5. BÖLÜM
TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Tartışma 77
5.2. Sonuç ve Öneriler 78
KAYNAKÇA 81
ÖZGEÇMİŞ 93

KISALTMALAR

AA : Alternatif Akım

SM : Sürekli Mıknatıs

SRM : Senkron Relüktans Motor

SMD : Sürekli Mıknatıs Destekli

EA : Eksenel Akılı

EA-SRM : Eksenel Akılı Senkron Relüktans Motor

ÇAGA : Çok Amaçlı Genetik Algoritma

EA-SMD-SRM : Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor

d/d : Devir/ Dakika

W : Watt

MMK : Manyetomotor Motor Kuvvet

GA : Genetik Algoritma

VDGA : Vektör Değerlendirmeli Genetik Algotima

ATGA : Ağırlık Tabanlı Genetik Algoritma

NSGA : Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritma

CNC : Computer Numeric Control

DA : Doğru Akım

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. EA-SRM tasarımı başlangıç değerleri 36
Tablo 3.2. Stator parametre değerleri 37
Tablo 3.3. EA-SRM rotor segmentlerinin ve bariyerlerinin başlangıç parametrelerinin değerleri 38
Tablo 3.4. EA-SRM rotor segmentleri ve bariyerleri başlangıç ve sınır parametre değerleri 39
Tablo 3.5. EA-SRM rotor segmentleri ve bariyerleri optimizasyondan sonrası parametre değerleri 40
Tablo 3.6. EA-SMD-SRM tasarımı başlangıç değerleri 43
Tablo 3.7. EA-SMD-SRM sargı parametreleri 43
Tablo 3.8. Neodyum SM'nin özellikleri 45
Tablo 3. 9. EA-SMD-SRM ilk rotor modeli ölçüleri 45
Tablo 3.10. EA-SMD-SRM rotor segmentleri ve bariyerleri başlangıç ve sınır parametre değerleri 46
Tablo 4.1. Analitik Model ve Model A parametre değerleri 62
Tablo 4.2. SM'lerin konum ve hacim bilgileri 63
Tablo 4.3. Farklı rotor yapılarındaki motorların karşılaştırılması 64
Tablo 4.4. EA-SMD-SRM'nin SEY ve deneysel sonuçlar 71

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Anizotropik geometrili "a" nesnesi ve izotropik geometrili "b"nin magnetik alan dağılımı ve relüktans moment üretimi [4] 12
Şekil 2.2. SRM'nin vektör diyagramı [55] 13
Şekil 2.3. SMD-SRM'nin vektör diyagramı [55] 13
Şekil 2.4. SRM'nin tek faz eş değer devresi [55] 14
Şekil 2.5. Temel stator oluk ölçülendirmesi [16] 22
Şekil 2.6. Rotor segment, bariyer ve kol açısı 24
Şekil 2.7. a d-ekseni segmentler üzerindeki MMK dağılımı b q-ekseni segmentler üzerindeki MMK dağılımı [5] 24
Şekil 2.8. ANSYS Maxwell 3D ara yüzü 27
Şekil 2.9. Çaprazlama operatörü [97] 32
Şekil 2.10. Bitsel mutasyon ve bitişik mutasyon [97] 33
Şekil 2.11. ÇAGA akış diagramı [101] 35
Şekil 3.1. Rotor segmentleri ve bariyerleri 38
Şekil 3.2. EA-SRM hesaplanan rotoru 39
Şekil 3.3. Dört EA-SRM optimizasyonlu rotoru 40
Şekil 3.4. EA-SRM üç boyutlu ¼ model 41
Şekil 3.5. Dokuz farklı rotor topolojisi 42
Şekil 3.6. M250-35A sınıfı çeliğe ait B-H eğrisi 43
Şekil 3.7. EA-SMD-SRM sargı bağlantı şeması 44
Şekil 3.8. CK-45 çeliği B-H eğrisi 44
Şekil 3.9. EA-SMD-SRM ilk rotor modeli sargı bağlantı şeması 45
Şekil 3.10. EA-SMD-SRM rotorunda optimizasyonu yapılacak parametreler 46
Şekil 3.11. EA-SMD-SRM rotor tam model 47
Şekil 3.12. EA-SMD-SRM üç boyutlu ¼ model 47
Şekil 3.13. EA-SMD-SRM rotor yapısal analiz-toplam deformasyon 48
Şekil 3.14. EA-SMD-SRM rotor rotor stres analizi 49
Şekil 3.15. EA-SMD-SRM stator ve sargı termal görünümleri 50
Şekil 3.16. EA-SMD-SRM Deneysel sargı sıcaklık grafiği 50
Şekil 3.17. EA-SMD-SRM sarım şeması 52

Şekil 3.18. EA-SMD-SRM sarım aşamaları 52
Şekil 3.19. EA-SMD-SRM parçalı rotor 53
Şekil 3.20. EA-SMD-SRM rotor nüvesi 53
Şekil 3.21. EA-SMD-SRM rotora SM montajlanması ve SM'li rotor 54
Şekil 3.22. EA-SMD-SRM (1-Radyal rulman yatağı, 2-Radyal rulman, 3-Gövde, 4-Eksenel rulman, 5- Stator, 6- Mil, 7-Rotor, 8-Rotor yatağı) 55
Şekil 3.23. Parametre deneyi bağlantı şeması [1] 56
Şekil 3.24. Parametre deneyi düzeneği (1-DA güç kaymağı, 2-LCR metre, 3-Ototrafo) 58
Şekil 3.25. Parametre deneyi düzeneği (1-EA-SMD-SRM, 2-Yük motoru 3-Hız enkoderi, 4-yük hücresi, 5-motor sürücüsü) 59
Şekil 3.26. Drive Composer Entry 2.5 program ara yüzü 60
Şekil 4.1. Analitik model ve Model A moment/zaman grafiği 62
Şekil 4.2. Dokuz farklı motor modelinin ortalama momenti 65
Şekil 4.3. Dokuz farklı motor modelinin moment dalgalanması 65
Şekil 4.4. Dokuz farklı motor modelinde güç faktörü 66
Şekil 4.5. Güç faktörü/SM hacim grafiği 66
Şekil 4.6. Dokuz farklı motor modelinde verim 67
Şekil 4.7. Dokuz farklı motor modelinde indüklenen gerilim 67
Şekil 4.8. EA-SMD-SRM moment akım açısı grafiği 68
Şekil 4.9. EA-SMD-SRM güç faktörü akım açısı grafiği 69
Şekil 4.10. EA-SMD-SRM çıkıntı oranı akım açısı grafiği 70
Şekil 4.11. EA-SMD-SRM verim akım açısı grafiği 70
Şekil 4.12. EA-SMD-SRM verim akım açısı grafiği 71
Şekil 4.13. Nominal hızda gerilim/yük momenti grafiği 72
Şekil 4.14. Nominal hızda güç faktörü/yük momenti grafiği 72
Şekil 4.15. Nominal hızda güç/yük momenti grafiği 73
Şekil 4.16. Nominal hızda verim/yük momenti grafiği 73
Şekil 4.17. Nominal hızda moment dalgalanması/yük momenti grafiği 74
Şekil 4.18. Nominal hızda moment grafiği 74
Şekil 4.19. (a) simülsayon (b) deneysel farklı hız ve yük durumları için gerilim grafikleri 75

Şekil 4.20. (a) simülsayon (b) deneysel farklı hız ve yük durumları için güç faktörü grafikleri 75
Şekil 4.21. (a) simülsayon (b) deneysel farklı hız ve yük durumları için güç grafikleri 76
Şekil 4.22. (a) simülsayon (b) deneysel farklı hız ve yük durumları için verim grafikleri 76

GİRİŞ

Gelişen teknolojiler ile birlikte elektrik enerjisi tüketimi de gün geçtikçe artmaktadır. Giyilebilir teknolojiler, evsel uygulamalar, elektrikli araçlar ve endüstride elektrik enerjisi oldukça fazla tüketilmektedir. Son yıllarda endüstriyel ürünlerin neredeyse tamamı enerji verim sınıflarına göre üretilmekte ve sınıflandırılmaktadır. Enerjinin verimli kullanılması noktasında tüm ülkeler planlı çalışmalar gerçekleştirmekte ve teşviklerde bulunmaktadır. Enerji verimliliği yüksek ürünlerin üretimi konusunda yapılan çalışmaları desteklemektedir. Enerji tüketim verileri incelendiğinde elektrik motorlarının endüstriyel, konut ve ticari faaliyet alanlarında en fazla tüketimi gerçekleştiren cihazlardan biri olduğu görülmüştür. Özellikle elektrikli araçlar ve endüstride elektrik enerjisinin büyük bir bölümü elektrik motorlarında tüketilmektedir. Yüksek verimli motorlara geçişin sağlanması için kullanıcılar teşvik edilmektedir [1–6].

Maliyet analizi gerçekleştirildiğinde Alternatif Akım (AA) motorlarının toplam kullanım süresi boyunca masraf giderinin % 97'lik bölümünü enerji gideri oluşturduğu görülmektedir. Motorun ilk alım maliyeti ise % 2 ile sınırlı kalmaktadır. Dolayısıyla elektrik motorları için verimlilik en önde gelen kriterlerden birisidir. Endüstrinin en çok tercih ettiği motorlar ise radyal akılı asenkron motorlardır. Asenkron motorlar yapısal olarak sağlam olması, şebekeden direkt kalkış yapabilmesi ve üretim maliyetinin düşük olması özellikleri ile tercih sebebi olmaktadır. Fakat rotorunda oluşan bakır kayıpları nedeniyle yüksek verim değerlerine ulaşamamaktadır [3, 7, 8]. Bu nedenle araştırmacılar yeni tür motor araştırmalarına yönelmiştir.

Araştırmacılar motor verimini artırmak için Sürekli Mıknatıs (SM) içeren motor yapıları üzerine çalışmalar yapmaktadır. Fakat artan mıknatıs maliyetleri düşünüldüğünde motorların ilk üretim maliyetleri oldukça artmaktadır. Diğer motor yapılarına yönelen araştırmacılar rotorunda mıknatıs ve bakır içermeyen yapısıyla Senkron Relüktans Motor (SRM) üzerine çalışmalarını yoğunlaştırmışlardır. SRM'lerin yapısal olarak sağlam

olması da tercih nedenleri arasında yer almaktadır. SRM'lerin dezavantajları araştırıldığında güç faktörünün düşük olması ve moment dalgalanmasının fazla olması öne çıkmaktadır. Güç faktörünün iyileştirilmesi için Sürekli Mıknatıs Destekli (SMD) yapı kullanılmaktadır. SRM'de moment dalgalanmasını azaltmak için de rotor bariyer şekillerinin optimizasyonu ile çözüm üretilebilmektedir [9–15].

Elektrik motorları üzerine yapılan çalışmalarda bir başka dikkat edilen özellik yüksek güç yoğunluğu olarak ön plana çıkmaktadır. Radyal akılı motorlara kıyasla Eksenel Akılı (EA) motorların güç-hacim yoğunluğu oranı ve yüksek verim değerlerine sahip olması bu motor yapısı üzerine olan ilgiyi artırmaktadır [16–21].

Bu tez çalışmasında öncelikle bir Eksenel Akılı Senkron Relüktans Motor (EA-SRM) tasarımı gerçekleştirilmiş ve rotor bariyerleri hedeflenen ortalama moment ve moment dalgalanması doğrultusunda Çok Amaçlı Genetik Algoritma (ÇAGA) ile optimize edilmiştir. Akım değeri 100A olan EA-SRM'nin rotoru 4 bariyerli yapıya sahiptir ve her bir bariyere SM yerleştirilerek etkileri incelenmiştir. İkinci olarak üretim kısıtları ve deneysel çalışmalar düşünülerek yeni bir rotor topolojisi tasarlanmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen EA-SMD-SRM, 4 kW mil gücünde 5000 d/d nonimal hızındadır. Tasarımı ve analiz çalışmaları gerçekleştirilen EA-SMD-SRM'nin prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Rotor üretim süreci tez içerinde detaylı olarak verilmiştir. Üretim süreci tamamlanan motorun Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile elde edilen benzetim sonuçlarının doğrulanması için performans testleri yapılmıştır.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Giriş

Bu tez çalışmasında özgün bir EA-SMD-SRM tasarımının yapılabilmesi için SRM'ler üzerine literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Yapılan araştırmalarda tasarımı düşünülen motor üzerine çok fazla çalışma olmadığı görülmüştür. Bu doğrultuda ilk olarak EA-SRM tasarımı gerçekleştirilmiş ve rotoruna konumlandırılan SM'lerin etkisi incelenmiştir. Ayrıca EA-SMD-SRM üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde ise yapılan çalışmaların deneysel olarak desteklenmediği ve analiz yayını olarak sunulduğu görülmüştür.

1.2. Literatür Çalışması

Cupertino ve arkadaşları 'Design Of High-Speed Synchronous Reluctance Machines' isimli çalışmalarında SRM'nin yapımında kullanılan çelik malzemesinin yüksek hızlardaki özelliğini incelemişlerdir. Çalışmanın ikinci kısmında ise yüksek hızlı SRM için yeni bir rotor tasarımı gerçekleştirilmiş ve optimizasyonu yapılmıştır. 70000 d/d hıza kadar SRM'de güç kaybı yaşanmamıştır fakat bu hızın üzerinde yapısal kısıtlamalar nedeniyle gücün azalacağı belirtilmiştir [22].

Nicola Bianchi ve arkadaşları 'Design of Synchronous Reluctance Motor for Hybrid Electric Vehicles' isimli çalışmalarında hibrit elektrik araçlar için senkron relüktans motor tasarımı konusunda çalışma yapmışlardır. İlk bölümde rotor tasarımı üzerinde durulmuş ve akı bariyer sayısı, bariyer açısı gibi parametrelerin etkisi değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma ile moment dalgalanmasının düşürülmesi ve yüksek ortalama moment değerlerinin elde edilmesi üzerinde durulmuştur. Rotor tasarımında bariyer sayısı değiştirilerek incelemeler yapılmıştır. Bariyer sayısı 1, 2 ve 3 olacak şekilde rotor dizayn

edilmiş ve 3 bariyerli yapıda ortalama momentin yüksek ve moment dalgalanmasının azalmış olduğu sunulmuştur [23].

Zhao ve arkadaşları ‘Performance Improvement of Ferrite-Assisted Synchronous Reluctance Machines Using Asymmetrical Rotor Configurations’ adlı çalışmada moment, verimlilik ve güç faktörü geliştirilmiş yeni bir ferrit mıknatıs destekli SRM önermişlerdir. Önerilen bu makinenin özel yanı, manyetik ve relüktans momentlerinin maksimum değerlerine aynı akım faz açılarında veya yakın açılarda ulaşmaya izin veren asimetrik bir rotor yapısını sunmasıdır. Önerilen rotor yapısı simetrik bir rotor yapısı ile aynı çalışma şartlarında karşılaştırılmış ve yeni önerilen ferrit mıknatıs destekli SRM’nin performansının daha iyi olduğu yapılan çalışmada belirtilmiştir [24].

Bonthu ve choi ‘Design Procedure for Multi-Phase External Rotor Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines’ isimli yayınlarında çok fazlı dıştan rotorlu SMD bir SRM tasarımının tasarım prosedürünü sunmuş ve ayrıca analiz ile prototip testini yapmışlardır. Test ve analiz sonuçlarından düşük zıt elektromotor kuvvet harmonikleri ve cogging momenti için en iyi tasarımın seçimi vurgulanmıştır. Yapılan çalışmada mıknatıs destekli dıştan rotorlu SRM’nin elektrikli araçlar ve uçaklarda kullanılabileceğinden bahsedilmiştir [25].

Nagarajan ve arkadaşları ‘Effect of Geometrical Parameters on Optimal Design of Synchronous Reluctance Motor’ isimli yayınlarında momentteki dalgalanmayı azaltırken ortalama moment değerinin düşmemesini hedeflemişlerdir. Çalışmalarında rotor geometrisi parametrelerini değiştirerek bunu elde edecek bir prosedür sunmuşlardır. Prosedür, kurulan test düzeneği ile farklı rotor türleri üzerine uygulanmış ve başarı sağlamıştır [26].

Lee ve arkadaşları ‘A Study on the Synchronous Reluctance Motor Design for High Torque by Using RSM’ çalışmasında motorlarda talep edilen enerji verimliliğinden ve SRM’nin enerji verimliliği açısından rekabetçi bir motor olduğundan bahsetmişlerdir. SRM’nin verimini artırmak için tepki yüzeyi metodolojisi (RMS: response surface method) optimizasyon yöntemini kullanmışlardır. Kullanılan optimizasyon yöntemi ile üretilen prototip motor test edilmiş ve verimlilik sağlanmıştır [27].

Liu ve Lee ‘Optimum Design of an IE4 Line-Start Synchronous Reluctance Motor Considering Manufacturing Process Loss Effect’ isimli çalışmalarında IE4 verim sınıfına sahip kendinden yol almalı bir SRM’nin üretim kayıplarını azaltmaya yönelmişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada üretimden kaynaklı elektrikli çelik kesme / delme hasarının yanı sıra kabarcık efektli sincap kafesli pres döküm gibi hataları gidermeye yönelik çalışmalar yapmışlardır. Motorun rotor geometrisinde optimum bir tasarım gerçekleştirerek bunu uygulamışlar ve önceki üretilen SRM ile yeni motoru karşılaştırmışlardır. Bakır kaybı, demir kaybı, başlangıç momenti, güç faktörü, verimlilik ve senkronizasyon yeteneğinde iyileşme olduğunu yaptıkları uygulama ile doğrulamışlardır [28].

Kabir ve Husain ‘Design of Synchronous Reluctance Motor With Multilayer AC Winding’ adlı yayınlarında dağıtılmış klasik sargı yerine daha kısa sargı uzunluğu ve daha düşük stator manyetomotor kuvveti harmonikleri içeren çok katmanlı bir sargı yapısı sunmuşlardır. SEY ile bir rotor tasarlanmış ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Klasik bir asenkron motor ile karşılaştırıldığında yeni tasarlanan SRM’nin daha verimli olduğu görülmüştür. Ayrıca klasik sargılı SRM ile yapılan karşılaştırmada daha düşük moment dalgalanması ve daha iyi güç faktörü ile daha yüksek ortalama moment elde edildiği belirtilmiştir [29].

Dmitrievskii ve arkadaşları ‘IE5 Energy-Efficiency Class Synchronous Reluctance Motor With Fractional Slot Winding’ isimli çalışmalarında dört kutuplu IE5 sınıfında bir SRM’nin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Motorun fan yükü ile yüklenmesi durumuna göre optimizasyonda verimlilik, moment dalgalanması ve besleme kaynağından alınan gerilimde oluşan harmoniklerin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan optimizasyonda IE5 verim sınıfı gerekliliğinden daha iyi değerler elde edilmiştir. Ayrıca stator ve rotora açı verilmemesine karşın motorun düşük moment dalgalanmasında çalışması sağlanmıştır [30].

Credo, ve arkadaşları ‘Adopting the Topology Optimization in the Design of High-Speed Synchronous Reluctance Motors for Electric Vehicles’ isimli çalışmalarında elektrikli araçlar için yüksek hızlı motorların tasarımını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada rotora yerleştirilen radyal kirişlerin tanımı ve tasarım zorlukları üzerine çalışılmıştır. Topoloji algoritması ile radyal kirişin konumu, sayısı ve boyutlandırılması optimize edilmiştir.

Tasarım sonucu, mekanik bütünlük artırılmış ve yüksek çalışma hızlarında performans korunmuştur [31].

Baka ve arkadaşları 'Design of an Energy Efficient Line-Start Two-Pole Ferrite Assisted Synchronous Reluctance Motor for Water Pumps' adlı yayınlarında su kuyularında kullanılan su pompaları için bir SMD-SRM tasarlamışlardır. İki kutuplu SMD kendinden yol alan bir rotor yapısı üzerine çalışmışlardır. Motorda kullanılan mıknatıslar sayesinde radyal kirişlerin sayısı azaltılmış ve güç katsayısı ile verimlilik artırılmıştır. SEY ile tasarımlar optimize edilmiş ve prototip üretimi yapılarak testleri gerçekleştirilmiştir [32].

Akiki ve arkadaşları 'Axial Ferrite-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor' isimli çalışmalarında yeni bir EA-SMD-SRM tasarımı önermişlerdir. Yapılan çalışmada önerilen eksenel akılı motorun sonlu elemanlar yöntemi ile analizi gerçekleştirilmiş ve optimizasyon işlemi yapılmıştır. Ayrıca daha önceden tasarımı yapılan bir radyal akılı SRM ile karşılaştırılmasını gerçekleştirilmiştir. EA makinenin daha yüksek moment üretme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Yapılan karşılaştırmada üretim detaylarına da değinilmiş ve eksenel akılı makinelerin üretim zorlukları vurgulanmıştır [33].

Tarek ve Sözer 'Design of a Novel Axial Flux Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor' adlı yayınlarında EA-SMD-SRM'yi önermişlerdir. Daha az miktarda mıknatıs malzemesi ile mıknatıs momentine ek olarak daha yüksek isteksizlik momenti sağlamışlardır. EA-SMD-SRM'nin moment dalgalanması en aza indirilirken hacim başına momenti optimize etmek için Taguchi yöntemine dayalı bir yaklaşım yürütülmüştür. Bu tasarımın elektromanyetik ve akı zayıflatma performansları, temel EA-SMD-SRM ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, EA-SMD-SRM'nin daha iyi bir performansa sahip ve uygun maliyetli bir çözüm olabileceğini göstermektedir [34].

Khan ve Arkadaşları 'Design and Analysis of Outer Segmental Rotor Synchronous Reluctance Machine for Future Electric Bike' adlı çalışmada elektrikli bisikletin tahrikinde kullanılan dıştan segmantal rotorlu SRM'nin tasarımını ve analizini sunmuşlardır. Geleneksel tabanlı tasarımlarda akı sızıntısı ve demir kayıplarının yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Akı sızıntısını ve demir kayıplarını azaltmak için, geleneksel tasarımın rotorunu, segmental rotor ile değiştirmişlerdir. Ağırlık, maliyet ve demir kayıplarının önemli ölçüde azaldığı rotor çekirdeği üzerine akı bariyeri tasarlanarak demir

kayıpları daha da azaltılmıştır. Çalışmada 4 farklı rotor üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Önerilen segmental yapılı tüm tasarımlarda, ortalama moment, verimlilik ve kayıplar açısından daha iyi performansın elde edildiği görülmüştür [35].

Pop ve arkadaşları 'First Insights on the Electromagnetic Design of Axial-Flux Synchronous-Reluctance Machine' adlı yayınlarında bir soğutma fanına uygun motor tasarımı düşünmüşlerdir, ayrıca motorun diğer uygulamalar içinde kullanılabileceğinden bahsetmişlerdir. Radyal akılı SM'li ve SM içermeyen motorlar ile önerdikleri EA-SRM'yi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Konsantre sargının daha avantajlı olması beklenirken dağıtılmış sargının daha iyi sonuçlar verdiği ve yüksek moment dalgalanması oluştuğu vurgulanmıştır. Özellikle sargı yapısı üzerine yoğunlaşarak EA-SRM diğer radyal motorlar ile karşılaştırılmaktadır. EA-SRM'nin üretim zorlukları tartışılmaktadır [36].

Mahmudi ve arkadaşları 'Axial-Flux Synchronous Reluctance Motors: Introduction of a New Machine' adlı çalışmalarında literatüre yeni bir EA-SRM modeli sunmaktadırlar. EA-SRM için bir eşdeğer devre modeli sunularak, SEY analiz sonuçları verilmiştir. Eşit hacme sahip ve rotor bariyer sayısı üç olan radyal akılı SRM ile EA-SRM karşılaştırılmıştır. Motorların gücü, momenti, güç faktörü ve verimi incelenmektedir. Motorda oluşacak doyum ve akı dağılımına her iki motorda da bakılmıştır. EA-SRM'nin yüksek moment yoğunluğuna ve yüksek verimliliğe sahip olduğu vurgulanmıştır [37].

Gerçekcioğlu ve Akar 'Optimal Rotor Design of Novel Axial Flux Synchronous Reluctance Motor and Validation' adlı yayınlarında özgün bir EA-SRM tasarımı sunmuşlardır. Rotor topolojisi üzerine yoğunlaşan çalışmalarında iki farklı rotor topolojisi, çoklu bariyer yapısı ve üç farklı yalıtım oranını incelemişlerdir. Moment, moment dalgalanması, mil gücü ve verimlilik parametreleri analiz edildikten sonra karar verilen rotor modelinin optimizasyonu genetik algoritma ile gerçekleştirilmiştir. Tasarımı ve analizleri yapılan EA-SRM modelinin prototipini gerçekleştirmişlerdir. SEY tasarımı ile prototip motor karşılaştırılmış ve başarılı sonuçlar elde edildiği vurgulanmıştır. EA-SRM motorun düşük kayıpları ve mıknatıs içermemesinden dolayı uygun maliyetli olduğu belirtilmiştir [38].

Gerçekcioğlu ve Akar 'Efficiency and Performance Comparison Between Synchronous Reluctance and Induction Motor in Axial Flux Concept' adlı çalışmalarında EA-SRM ile

EA asenkron motoru karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Eşit boyutlarda ve aynı stator yapısında sadece rotorları farklı olan iki EA motor karşılaştırılmıştır. EA-SRM'nin rotoru optimizasyon ile iyileştirildikten sonra moment, moment dalgalanması, güç faktörü, toplam kayıplar ve amper başına moment parametreleri her iki motor için de analiz edilmiştir. Piyasa kullanılmakta olan 2.2 kW gücündeki EA asenkron motora iyi bir alternatif olarak EA-SRM önerilmektedir [39].

Akar ve arkadaşları 'Efficiency Analysis of Axial Flux SynRM in Variable Speed Applications' adlı çalışmalarında elektrikli araçlar için EA-SRM motorun uygunluğunu değerlendirmişlerdir. Elektrikli araçlar için önemli olan parametrelerden hız/moment ve hız/güç değerlerini kontrol etmek için EA-SRM'nin enerji haritasını çıkarmışlardır. Enerji haritası öncelikle SEY analizi ile oluşturulmuş ve daha sonra deneysel çalışmalar ile desteklenmiştir. EA-SRM için elde edilen sonuçlar aynı güçteki radyal akılı motorlar ile kıyaslanmıştır. EA-SRM'nin aşırı yük altındaki durumunu incelemek için hareketli parçalar üzerinde yapısal analizler yapılmıştır. EA-SRM'nin değişken hız aralığı gerektiren elektrikli araçlar için iyi bir alternatif olduğu vurgulanmıştır [40].

Zhou ve arkadaşları 'Design of an Axial-Flux Synchronous Reluctance Machine with 3D-Printed Rotor' adlı yayınlarında EA-SRM'nin rotorunu üretmek için katmanlı üretim teknikliklerinden olan 3D yazıcıyı kullanmıştır. 3D yazıcı ile üretilen yeni bir rotor topolojisini literatüre sunmuşlardır. Çalışmalarında motorun optimizasyonu, prorotip üretimi ve test sonuçlarını yayınlamışlardır. EA-SRM motorun radyal akılı motorlara oranla yüksek moment yoğunluğu, yüksek çıkıntı oranı ve mükemmel ısı dağılımına sahip olduğunu vurgulamışlardır. Doğal soğutma koşullarında 4.43 Newton/Litre moment yoğunluğu elde edilen motorun analitik tasarımı prototip üretimi ile doğrulanmıştır [41].

Gözüaçık ve arkadaşları 'Multislice Analysis of Axial Flux Synchronous Reluctance Motor Based on 2D Finite Element Method Linear Model' adlı çalışmalarında EA-SRM'yi iki boyutlu olarak lineer motora benzetmiş ve analiz sonuçlarını 3D SEY analizi ve deneysel sonuçlar ile kıyaslamışlardır. 3D SEY analizlerinin uzun sürelerde yapıldığını ve dilim modeli yaklaşımı ile 2D SEY sonuçlarının daha kısa sürede çözüme ulaştığını vurgulamıştırlar. 2D, 3D ve deneysel sonuçları moment, moment dalgalanması, zıt EMK, kayıplar ve verimlilik değerleri açısından incelemiştler ve 2D sonuçlarını doğrulamışlardır [42].

1.3. Tezin Amacı ve Literatürdeki Yeri

Bu tez çalışmasında EA-SRM'lerin bariyerlerine SM yerleştirilme durumunun incelenmesi ve özgün bir EA-SMD-SRM tasarımının yapılması amaçlanmıştır. Literatür çalışmasında yapılan araştırmalar göz önüne alındığında EA-SMD-SRM üzerine yapılan tasarım çalışmalarının analiz olarak sunulduğu ve deneysel olarak desteklenmediği görülmüştür.

EA-SRM üzerine yapılan deneysel çalışmada ise rotor bariyerlerinin dik olarak tasarlandığı görülmektedir. Ayrıca yapılan bu çalışmada stator ile rotor aynı iç ve dış çap ölçülerine sahiptir ve rotor solid olarak tek parça halinde üretilmiştir. Tez çalışmasında önerilen motorda rotor bariyer kolları açılı olacak şekilde tasarlanmıştır. Rotor iç ve dış çapı stator ölçülerinden büyük yapılarak sargı sonlarında oluşan akılar ile motor performansının artırılması da düşünülmüştür. Bu tez çalışması ile literatüre EA-SRM'ler için özgün bir rotor yapısının sunulması amaçlanmaktadır. Önerilen EA-SMD-SRM ile EA-Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor'da kullanılan SM miktarı ve hacminden daha azını kullanarak yüksek güç yoğunluğu ve verimlilik hedeflenmektedir.

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Senkron Relüktans Motor

Senkron Relüktans Motor (SRM) tarihte çok uzun yıllardır bilinmesine rağmen özellikle son yıllarda ön plana çıkmaktadır. Yarı iletken teknolojisi ile beraber motor kontrol yöntemlerinin de gelişmesiyle SRM'nin endüstriyel kullanımında artış görülmektedir. Yapı olarak basit ve sağlam olması tercih nedenlerinin başında gelmektedir [1, 4, 43, 44].

SRM yapısal olarak klasik AA motorları ile birçok noktada benzer özellikte olmasına rağmen özellikle rotorunun tasarımında ayrışmaktadır. Stator nüvesi birer yüzeyi yalıtılmış ve üzerine oluklar açılmış sacların preslenmesi ile oluşmaktadır. Oluklara yerleştirilen sargılar ile stator yapısı tamamlanmaktadır. Üç fazlı motorlar için sargılar 120^0 elektriksel açı ile yerleştirilir. Uygulanan üç fazlı gerilim ile burada döner manyetik alanın oluşması sağlanmaktadır [44–47].

Rotor, senkron ve asenkron makineler de olduğu gibi sargılar yada kısa devre çubukları içermemektedir. Sadece demir nüve üzerine açılmış hava bariyerlerinden oluşmaktadır. Bazı tasarımlarda bu bariyerlere mıknatıs yerleşimi de yapılmaktadır. Rotorunda bakır veya alüminyum gibi iletken bulunmaması iletken kayıplarını azalttığı gibi termal olarak da avantaj sağlamaktadır [1, 5, 47, 48].

Son yıllarda endüstride SRM'nin kullanımının artması ile piyasanın en çok tercih ettiği asenkron motorlara alternatif olarak öne çıktığı görülmektedir. Piyasanın tercih nedenlerine bakılacak olursa SRM'nin avantajları ve dezavantajları [49–53] şu şekilde sıralanabilir;

Avantajları;

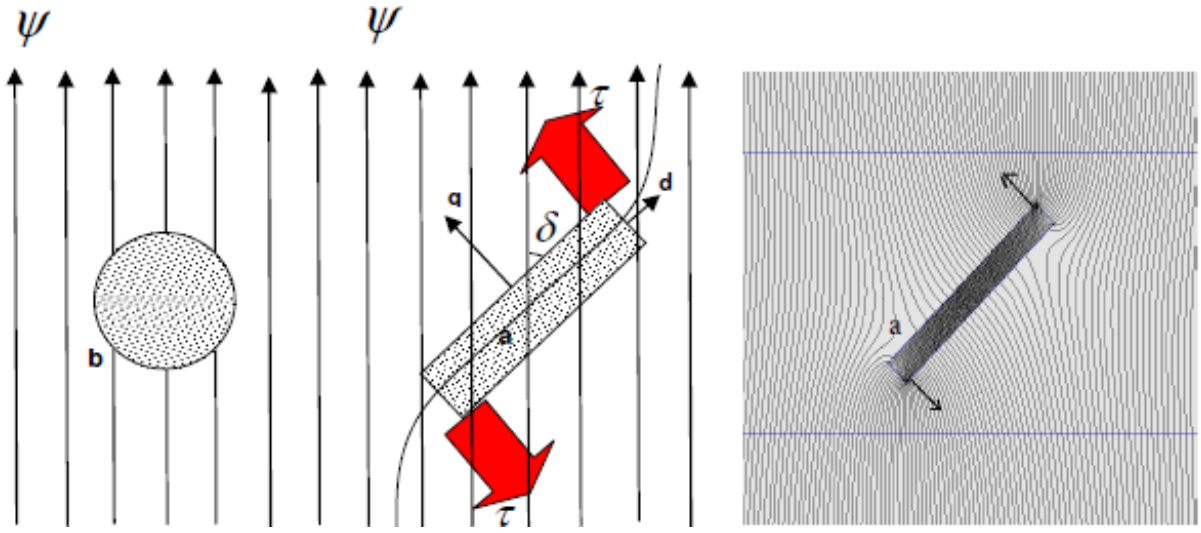
- Düşük maliyet
- Yüksek verim
- Yüksek moment /akım oranı
- Düşük çalışma sıcaklığı
- Basit kontrol ve kolay alan zayıflatma özelliği
- Asenkron motorları ile özdeş sürücü devresi
- Kısa süreli aşırı yük kapasitesi
- Basit ve sağlam yapı
- Güvenilirlik

Dezavantajları;

- Düşük güç faktörü
- Düşük hız aralığı
- Moment dalgalanması

2.1.1. SRM Çalışması

SRM'de moment üretiminin gerçekleşmesi için asenkron makinenin stator tarafından üretilen dönen manyetik alan kuvveti ve relüktans konsepti kullanılır. Şekil 2.1'den relüktans konsepti açıklayacak olursak; Şekil 2.1. (a) izotropik malzeme her açıdan aynı manyetik alanın etkisinde kalmaktadır. Şekil 2.1. (b) görülen anizotropik malzeme ise *d-ekseninde* ve *q-ekseninde* farklı relüktans değerlerindedir. Moment anizotropik malzemenin *d-ekseni* ve manyetik akısı (ψ) arasındaki açıya (δ) bağlı olarak üretilmektedir. Manyetik alan ile *d-ekseni* aynı hizada olmadıkları zaman temel alanın bozulmasına neden olacaktır. Bozulmanın gerçekleşmesi ile alanın temel yönü, maddenin diğer ekseni *q* boyunca hızlanacaktır [1, 4].

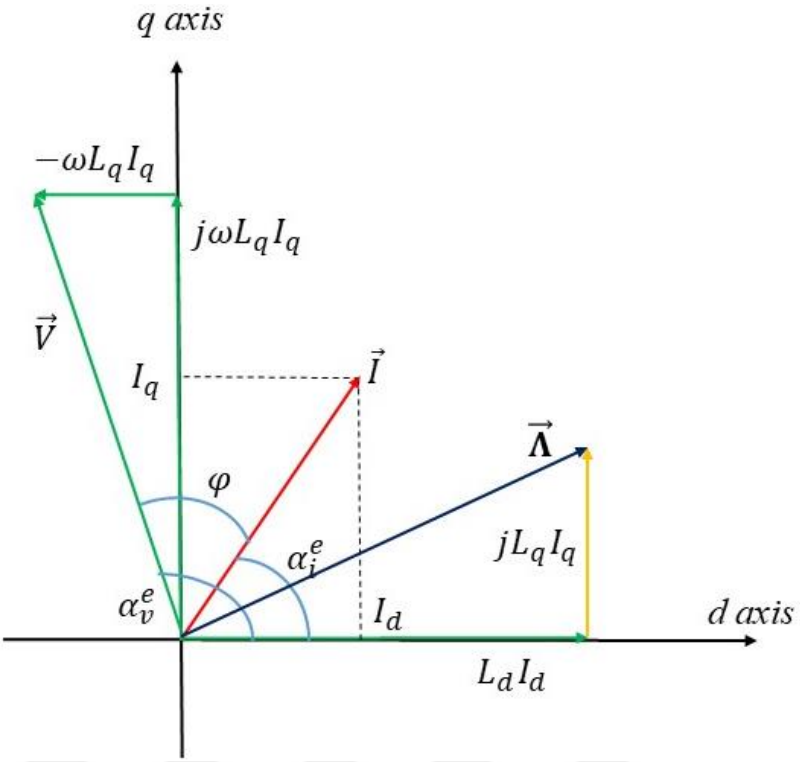


Şekil 2.1. Anizotropik geometrili "a" nesnesi ve izotropik geometrili "b"nin magnetik alan dağılımı ve relüktans moment üretimi [4]

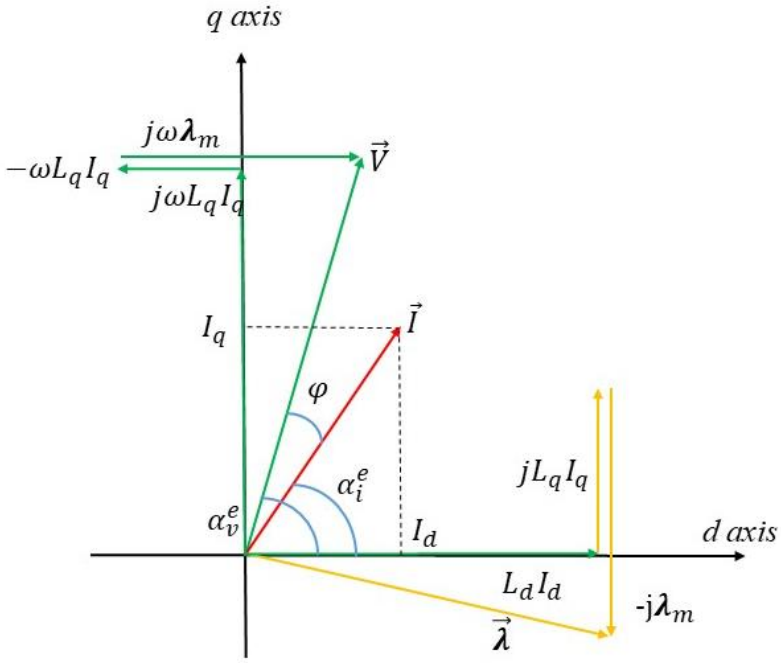
SRM manyetik akısı, statorda sinüzoidal olarak dağıtılmış sargılar tarafından üretilir ve stator ile rotoru, geleneksel asenkron ve senkron makinelerde olduğu gibi küçük bir hava aralığından birleştirir. Stator manyetik alanı senkron hızda dönmektedir ve sinüzoidal bir dağılıma sahip olduğu varsayılır. Rotorda herhangi bir manyetik alan olmadığı için döner manyetik alan tarafından indüklenen alan ile senkron hıza ulaşacaktır. Mıknatıslanma ve alan düzeltmesini sağlayan moment stator akımı tarafından karşılanmaktadır [1, 4, 45].

2.1.2. SRM Eşdeğer Devresi ve Matematiksel Modeli

Asenkron motorların stator sargı yapısı ile SRM'nin yapısı aynı özelliktedir. Bu nedenle akı sinüzoidal olarak dağılmaktadır. Bu özellik dikkate alındığında geleneksel sargılı senkron makinelerin modellenmesinde kullanılan "Park" dönüşümleri ile SRM modellenebilmektedir. SRM'nin modellenmesinde rotorunda alan sargısı ve kısa devre çubukları bulunmaması gibi iki önemli özelliğe dikkat edilmesi gerekmektedir [51, 54]. SRM'nin vektör diyagramı ve eşdeğer devresi oluşturulurken demir kayıpları da dikkate alınmaktadır. SRM ve SMD-SRM'nin vektör diyagramları Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te görülmektedir [55].

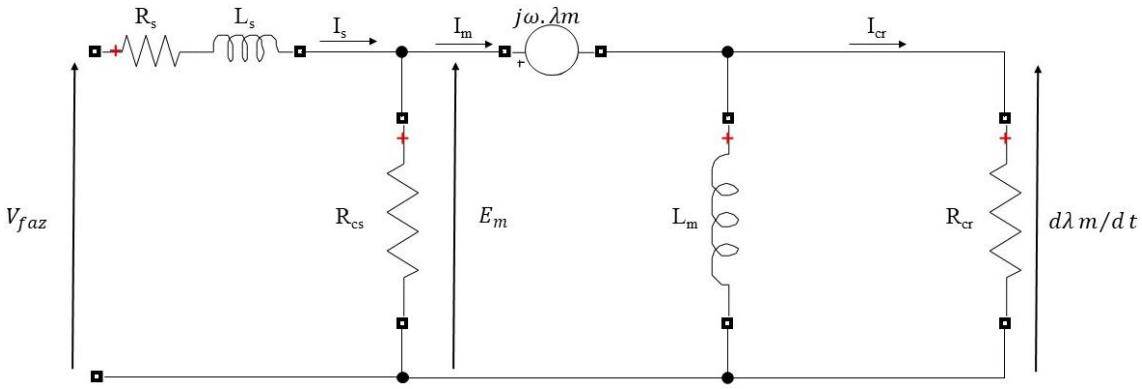


Şekil 2.2. SRM'nin vektör diyagramı [55]



Şekil 2.3. SMD-SRM'nin vektör diyagramı [55]

Tek faza indirilmiş ve demir kayıpları da dikkate alınarak oluşturulmuş eş değer devre modeli Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.4. SRM'nin tek faz eş değer devresi [55]

Şekil 2.2 ve Şekil 2.4 dikkate alınarak, sargı veya kafesten kaynaklanan rotor uyartımı denklemlerden çıkarılacak olursa, SRM'nin temel hızda dönen referans çerçevesindeki ($d-q$ ekseni) matematiksel modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$V_{faz} = E_m + R_s i_s + j\omega_s L_s \tag{2.1}$$

$$E_m = \frac{d\lambda_m}{d_t} + j\omega_s c \tag{2.2}$$

Burada V_{faz} faz gerilimi, i_s faz akımı, E_m faz başına eletromotor kuvvet (emk), L_s faz indüktansı, λ_m faz başına manyetik akı ve ω_s radyan/saniye türünden senkron hız olarak tanımlanmaktadır.

$$\lambda_m = L_{dm} i_{dm} + jL_{qm} i_{qm} \tag{2.3}$$

Burada sırasıyla i_{dm}, i_{qm} ve L_{dm}, L_{qm} faz başına d-ekseni ve q-ekseninde döner referans hız sabitinde sızıntı akımları ve indüktansları olarak tanımlanmaktadır.

Bu nedenle, sabit hızda $\frac{d\lambda_m}{d_t} \cong 0$, olmaktadır. Bu durum göz önüne alınarak Eşitlik 2.1, Eşitlikler 2.2 ve 2.3'e göre yeniden yazılacak olursa;

$$V_{faz} = \left(-\omega_s L_{qm} I_{qm} + R_s I_{dm}\right) + j(\omega_s L_{dm} i_{dm} + R_s I_{qm}) \tag{2.4}$$

$$V_d = -\omega_s L_q I_{qm} + R_s I_{dm} \tag{2.5}$$

$$V_q = -\omega_s L_d I_{dm} + R_s I_{qm} \tag{2.6}$$

Eşitlik 2.5 ve Eşitlik 2.6'da verilen vektör denklemleri analitik tasarımı gerçekleştirilecek olan SRM'nin elektrik ve manyetik parametrelerinin matematiksel olarak modellenmesinde yeterli olmaktadır.

SRM tasarımı gerçekleştirilirken performans değerlendirilmesinde bazı parametreler oldukça önemlidir. Bu parametrelerin matematiksel olarak hesaplanması, analiz sonuçlarından elde edilmesi ve deneysel çalışmalar ile doğrulanması gerekmektedir. SRM için önemli parametreler;

- **Elektromanyetik Moment**

Senkron relüktans makinelerde oluşan elektromanyetik moment, stator tarafından üretilen hava aralığı akısı ile buna karşılık gelen mıknatıslanma akımı arasındaki etkileşim ile üretilmektedir. Elektromanyetik moment farklı eşitlikler ile aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [54, 56].

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\lambda_m i_m sin\beta \tag{2.7}$$

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}(L_{dm-}L_{qm})i_{dm}i_{qm} \tag{2.8}$$

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}(L_{dm-}L_{qm})I_m^2 sin2\theta \tag{2.9}$$

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}(\xi - 1)(\frac{E_m}{\omega L_{dm}})^2 sin2\delta \tag{2.10}$$

Burada ξ çıkıntı oranı olup Eşitlik 2.11'de tanımlanmaktadır. Moment üretiminde yüksek çıkıntı oranı önemlidir ve rotor tasarımı gerçekleştirilirken dikkate alınması gereken bir parametredir.

$$\xi = {L_{dm}}\Big/{L_{qm}} \tag{2.11}$$

Elektromanyetik moment ait Eşitlikler 2.7-2.10 incelendiğinde; belirli bir çalışma gerilim ve hız değerinde mil momentinin maksimum değeri yüksek çıkıntı oranına ve yük açısı(δ) veya akım açısına (θ) bağlı olmaktadır. Motor çalışır durumdayken yük açısının kontrolü pratikte mümkün olmadığından, akım açısının kontrolü ile moment kontrol

edilmektedir [57–59]. Eşitlik 2.3 ve Eşitlik 2.11 ve Şekil 2.2'deki vektör diyagramı dikkate alındığında yük ve akım açılarının eşitlikleri aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$tan\delta = \frac{\lambda_{qm}}{\lambda_{dm}} \tag{2.12}$$

$$tan\theta = \frac{I_{qm}}{I_{dm}} \tag{2.13}$$

$$\theta = tan^{-1}(\xi tan\delta) \tag{2.14}$$

- **Güç Faktörü (GF)**

Vektör diyagramından yararlanılarak elde edilen bu değer hava aralığında oluşmaktadır ve güç faktörü olarak isimlendirilmektedir [10, 60, 61].

$$GF = \cos(\varphi_i) \tag{2.15}$$

$$GF = (\xi - 1)\sqrt{\sin(2\theta)\,/2(tan\theta + \xi^2 cot\theta)} \tag{2.16}$$

Eşitlik 2.16'dan görüldüğü gibi GF çıkıntı oranı ve akım açısının bir fonksiyonudur. Ayrıca maksimum akım açısına $\theta = tan^{-1}\sqrt{\xi}$ denkleminden ulaşıldığı eşitlikten görülmektedir. Güç faktörünün maksimum değeri ise Eşitlik 2.17'den hesaplanabilmektedir [61, 62].

$$GF_{mak} = \frac{\xi - 1}{\xi + 1} \tag{2.17}$$

Hava aralığında oluşan GF'nin makinenin giriş akım ve geriliminden elde edilen güç faktörü ile aynı olmadığının vurgulanması gerekmektedir. Bu durumda vektör diyagramı göz önüne alındığında, iki değer arasında motorun kayıplarından kaynaklanan bir fark oluşmaktadır [52, 63].

$$\cos(\varphi) = \frac{V_d i_d + V_q i_q}{|V||i_s|} \tag{2.18}$$

- **Verim**

Elektrik makinelerinin tasarımında verimlilik oldukça önemli bir yere sahiptir. Dünyada enerji ihtiyacının artması ve fosil yakıtların tükenmesi verimliliği ön plana çıkarmaktadır.

Ayrıca elektrikli araçlar için de yüksek verimli motorlar özel tercih nedeni olmaktadır. Düşük hızlarda demir kayıpları bakır kayıplarına kıyasla ihmal edilebilir düzeyde olduğundan [39, 64, 65] Eşitlik 2.19'da olduğu gibi ifade edilebilmektedir ve bu eşitlik düzenlenecek olursa Eşitlik 2.20 elde edilmektedir.

$$\eta = \frac{\omega T_e}{\omega T_e + 3R_S I_S^2} \tag{2.19}$$

$$\eta = (1 + \frac{3R_S I_S^2}{\omega T_e})^{-1} \tag{2.20}$$

Eşitlik 2.20 incelendiğinde senkron hız değerine kadar eğer verimlilik yüksek düzeyde tutulmak isteniyorsa T_e/I_s oranının da en üst düzeyde olması gerektiği görülmektedir. Bu aynı zamanda yüksek çıkıntı oranını da işaret etmektedir. Demir kayıpları, akı dalgalanması ve moment dalgalanması ile doğrudan ilişkili olduğundan bakır kayıplarına kıyasla ihmal edilebilir bir değer olarak görülmektedir. Fakat yüksek hızlarda frekansın etkisinden dolayı demir kayıpları ihmal edilememektedir.

- **kVA Başına Moment**

Şebekeden çekilen görünür güce göre üretilen momentin oranı, iyi tasarlanmış bir SRM'de yüksek değerli olarak hedeflenmektedir [64]. SRM'nin çıkıntı oranı bu oran ile doğrudan ilişkili olup Eşitlik 2.21'de verilmektedir.

$$\frac{T_e}{KVA} \cong \frac{P}{\omega}(1 - \frac{1}{\xi}) \sin\theta \tag{2.21}$$

- **Moment Dalgalanması**

Motorda üretilen momentte oluşan dalgalanmalar demir kayıplarının artmasının yanında mekanik titreşimlere ve akustik gürültülere neden olmaktadır. Hava aralığında oluşan moment harmonikleri rotor bariyerlerinin tasarımı ile bastırılırsa, stator sargılarına saf sinüzoidal akım uygulandığında moment harmoniklerinin genliği ile akı harmoniklerinin genliği orantılı olmaktadır. Stator oyuklarından kaynaklanan moment dalgalanmasının birinci harmoniği göz önüne alınarak Eşitlik 2.9 düzenlendiğinde [24, 54, 66–68]:

$$T_e(\vartheta) \cong \frac{3}{2}\frac{P}{2}\left(\lambda_d i_q - \lambda_q i_d\right) + \frac{1}{2}(i_d \frac{\partial \lambda_d}{\partial \delta} + i_q \frac{\partial \lambda_q}{\partial \delta}) \tag{2.22}$$

$d-q$ Ekseni indüktanslarının rotor pozisyonuna bağlı oldukları Eşitlik 2.22'den görülmektedir. Moment darbelerini temsil eden moment eşitliğine bir terim eklenmektedir. Fakat bu eklenen terimin ortalama değeri sıfır olmaktadır. Rotor pozisyonuna bağlı moment ifadesi Eşitlik 2.23'te verilmiştir.

$$\begin{bmatrix}\lambda_d\\ \lambda_q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_{dq}(\delta) & L_{dq}(\delta)\\ L_{dq}(\delta) & L_q(\delta)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_d\\ i_q\end{bmatrix} \tag{2.23}$$

Eşitlik 2.22'deki moment ifadesi indüktansların rotor konumuna bağlı olduğu dikkate alınarak yeniden yazıldığında Eşitlik 2.24 elde edilmektedir.

$$T_e(\delta)=\frac{3}{2}\frac{P}{2}\left(\frac{3q}{\pi}\sin\frac{\pi}{3q}\right)\left(L_d-L_q\right)i_d i_q+\left(\Delta L_d+\Delta L_q\right)i_d i_q\cos(3pq\delta)-\Delta L_{dq}(i_d^2-i_q^2)\sin(3pq\delta) \tag{2.24}$$

Momentteki dalgalanmanın nedeni Eşitlik 2.24'e göre iki bileşen ile açıklanabilir. Bunlardan ilki ortalama moment ile ilişkili olan Carter faktörü ve dolaşımda olan akının salınımından kaynaklanmaktadır. Bu durum $d-q$ indüktanslarında $(\Delta L_d, \Delta L_q)$ önemli etkiler oluşturmaktadır. Bu bozucu etkiler rotorun anizotropik yapısı ile azaltılabilmektedir. Diğer bileşen ise ΔL_{dq}'nin oluşmasını sağlayan ve moment dalgalanmasını oluşturan stator yuvalarının etkisi olmaktadır.

- **Demir Kayıpları**

SRM'de demir kayıpları diğer senkron motorlarda olduğu gibi histeresiz kayıpları, Eddy akımı kayıpları ve yüksek frekans histeresiz kayıpları olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Sabit akı yoğunluğunda birim alanda ağırlık başına düşen toplam demir kayıpları(P_{fe}) Eşitlik 2.25'ten hesaplanabilmektedir. Rotor nüvesindeki akı yoğunluğu stator olukları ve rotor yapısından oluşan harmoniklerden dolayı salınım yapmaktadır [52, 69, 70].

$$\frac{P_{fe}}{kg}=K_h B_{om}^2 f_o+\frac{\pi^2}{6}d^2\sigma\left(B_m^h(h_{f1})\right)^{3/2} \tag{2.25}$$

Yüksek hızlarda rotorda oluşan demir kayıpları stator ile karşılaştırılacak düzeyde olmaktadır. Fakat sonuçta tasarım hedefi ortalama moment, güç faktörü ve verimliliği maksimum yapmaktır. Genelde demir kayıplarını azaltmak için düşük kayıplı manyetik

malzeme kullanımı, laminasyon kalınlığını azaltma ve stator oluklarını yarı iletken malzeme ile doldurmak gibi teknikler kullanılmaktadır.

- **Alan Zayıflama Aralığı**

Endüstride birçok alanda farklı hız değerlerinde sabit güç aralığı istenmektedir. Özellikle elektrikli araç uygulamalarında çok geniş hız aralığında sabit güç çıkışı önemli olmaktadır. SRM'de alan zayıflama özelliği var olmakla beraber Eşitlik 2.26'daki gibi ifade edilmektedir [71].

$$\frac{\omega_r}{\omega_b} = \left(\frac{V_{faz}}{\omega_{be}}\right)^2 \frac{3P_o(L_d - L_q)}{2L_d L_q T_{em}} \tag{2.26}$$

Yapılan çalışmalarda özellikle SRM'de çıkıntı oranının (L_d/L_q) makine performansı üzerindeki etkisi vurgulanmakta ve makinenin tasarımında anahtar parametre olarak sunulmaktadır. Çıkıntı oranı rotor bariyerlerinin tasarımı ile doğrudan ilişkili olması nedeniyle rotor kalınlığı ve bariyerlerin geometrik yapısı üzerine yapılan analiz ve optimizasyon çalışmaları oldukça önem kazanmaktadır.

2.2. Eksenel Akılı SRM'lerde Boyutlandırma ve Tasarım

Eksenel akılı makinelerin analitik tasarımında kullanılan, temel eşitlikler, stator ve rotor denklemleri yardımıyla yapılmaktadır.

2.2.1. EA-SRM Boyutlandırma ve Stator Tasarımı

Spesifik yüklemeler önceki tasarım çalışmalarından faydalanarak belirlenmektedir [16, 17, 72]. EA makineler için akım yoğunluğu Eşitlik 2.27'den hesaplanabilmektedir.

$$A_m(D_{ort}) = \frac{m.2\sqrt{2}I_a N_1}{\pi D_{ort}} \tag{2.27}$$

Burada $D_{ort} = (D_o + D_i)/2$ olarak hesaplanmaktadır ve ortalama çap uzunluğu olarak alınmaktadır.

Spesifik yükleme değerleri makinenin tasarımını doğrudan etkilemektedir. Fakat başlangıç değerlerinin literatürden ve deneyimlerden yararlanılarak seçilmesinden başka bir çözümü olmamaktadır. Kabul edilen değer sonucunda hesaplamalar yapılır ve elde

edilen moment ve zıt emk değerleri üzerinden tekrar akım yükleme değerleri hesaplanmaktadır. Hata oranı kabul edilebilir düzeyde ise tasarıma devam edilmektedir.

Eksenel akılı motor tasarımında makinenin ana boyutları aşağıdaki kabuller esas alınarak yapılmaktadır.

- Elektriksel ve manyetik yüklemeler (A_m, B_g) tasarımcı tarafından belirlenmektedir.
- Statorda bir faz başına düşen sarım sayısı N_1
- Stator faz akımı I_a
- Statorda faz başına zıt emk E_f

Makinenin iç çapının dış çapına oranı Eşitlik 2.28'de verilmiştir.

$$k_d = D_i/D_o \tag{2.28}$$

Eşitlik 2.27 yeniden Eşitlik 2.28'e göre düzenlenirse:

$$A_m = \frac{m.4\sqrt{2}I_a N_1}{\pi D_o\,(1+k_d)} \tag{2.29}$$

Sürekli mıknatıslar tarafından statorun bir fazında indüklenen zıt emk:

$$E_f = \pi\sqrt{2}n_s p N_1 k_{w1}\Phi_F = k_E n_s \tag{2.30}$$

Burada m faz sayısı, k_{w1} sargı faktörü, n_s senkron hız, Φ_F kutup akısı ve p kutup sayısı olarak tanımlanmaktadır. Görünür güç (S) Eşitlikler 2.29 ve 2.30'a göre Eşitlik 2.31'deki gibi hesaplanabilmektedir.

$$S = m\big(2E_f\big)I_a = {}^{\pi^2}\!/_{8}\, k_{w1} n_s B_{mg} A_m D_o^3 (1 + k_d(1 - k_d^2) \tag{2.31}$$

Eşitlik 2.31 daha sade olarak yazılırsa Eşitlik 2.33 elde edilmektedir.

$$k_D = (1 + k_d)(1 - k_d^2)/8 \tag{2.32}$$

$$S = \pi^2 k_D k_{w1} n_s B_{mg} A_m D_o^3 \tag{2.33}$$

Elektromanyetik görünür güç ifadesi:

$$S = \frac{\epsilon P_o}{\eta \cos \varphi} \tag{2.34}$$

Dış çap Eşitlikler 2.33 ve 2.34 göre:

$$D_o = \sqrt[3]{\frac{\epsilon P_0}{\pi^2 k_D k_{w1} n_s B_{mg} A_m \eta \cos \varphi}} \tag{2.35}$$

Burada B_{mg} hava aralığı akı yoğunluğunu, ϵ indüklenen gerilimin faz gerilimine onanını ve η verimi ifade etmektedir. Makinenin dış çapını hesaplayabilmek için hava aralığı akı yoğunluğu, zıt emk ve faz akımını bilmemiz gerekmektedir.

EA motorların ana boyutları belirlendikten sonra hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğuna bakılmaktadır. Hava aralığı akı yoğunluğu dağılımının sinüzoidal olduğu düşünülürse ortalama manyetik akı yoğunluğu maksimum akı yoğunluğu değerinin kutup adımı ile ilişkisi ile hesaplanmaktadır.

$$B_{ort} = \frac{p}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{p}} B_{mg} \sin(p\tau) d\tau = \frac{2}{\pi} B_{mg} \tag{2.36}$$

Hava aralığı akı dağılımının sinüzoidal yapıda olmadığı durumda:

$$B_{ort} = \tau_i B_{mg} \tag{2.37}$$

Burada τ_i kutup genişliğinin kutup adımına orandır. Ortalama akı değeri Eşitlik 2.38'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\Phi_F = \int_{r_i}^{r_o} \tau_i B_{mg} \frac{\pi}{p} r dr = \tau_i B_{mg} \frac{\pi}{2p} (r_{in}^2 - r_{out}^2) \tag{2.38}$$

Yukarıdaki değerler hesaplandıktan sonra EA makinelerde sarım sayısı:

$$N_1 = \frac{\pi D_o (1 + k_d) A_m}{4m\sqrt{2} I_a} \tag{2.39}$$

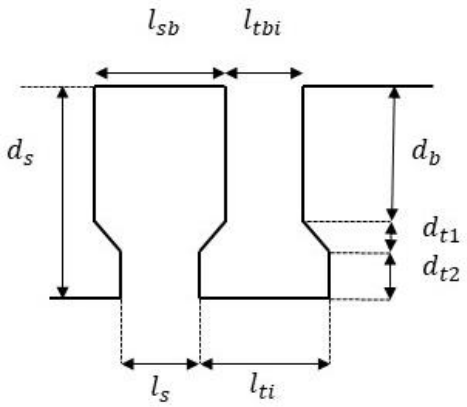
Stator faz akımı:

$$I_a = \frac{P_o}{m\sqrt{2}(V_1)\eta \cos\varphi} \tag{2.40}$$

İndüklenen EMK değeri:

$$E_f = \pi\sqrt{2}N_1 k_{w1} n_s \Phi_F \tag{2.41}$$

EA makinenin iç ve dış çapı statorunda temel ölçülerini belirlemektedir. Statorda sargı yerleşimi için olukların şekilleri ve ölçüleri geometrik olarak belirlenmektedir. Oluk ölçülerinin belirlenmesindeki temel etkiler; oluk başına sargı sayısı (n_{cs}), kabul edilebilir maksimum akım yoğunluğu ve oluk doluluk oranı (k_{fill}) olarak görülmektedir. Şekil 2.5'te temel oluk ölçülendirmesi verilmektedir [17, 73].



Şekil 2.5. Temel stator oluk ölçülendirmesi [16]

Burada dikdörtgensel bir oluk yapısına karar verilmiş ve $l_{sb} = l_s$ alınmıştır. Oluk başına düşen sargı sayısı:

$$n_{cs} = \frac{N_1}{N_{cF}} . 2N_p \tag{2.42}$$

Burada N_p paralel iletken sayısı, N_{cF} faz başına sarım sayısı olarak ifade edilmektedir. Oluk boyutlandırmasına l_{ti}'nin hesaplanması ile başlanmaktadır. Hava aralığındaki manyetik akının stator dişinden aktığı kabul edilir. Budan dolayı l_{tbi} Eşitlik 2.43'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$l_{tbi} = \mathrm{t}_{si} \frac{B_{g0}}{B_{tmax}} \tag{2.43}$$

Burada t_{si} bir oluğun başlangıcından diğer oluğun başlangıcına kadar olan mesafe, B_{mg} hava aralığındaki akı yoğunluğu ve B_{tmax} stator dişi için izin verilen maksimum akı yoğunluğu olarak tanımlanmaktadır.

$$l_{si} = l_{sb} + l_{tbi} \tag{2.44}$$

Hesaplanan ölçülerden sonra oluk alanının hesaplanması gerekmektedir. Oluk alanının hesaplanması için oluktaki toplam iletken kesiti ve doluluk oranı kullanılmaktadır.

$$A_c = \frac{I}{J_{smax}} = \frac{A_s k_{fill}}{n_{cs}} \tag{2.45}$$

Eşdeğer iletken kesiti, izin verilen maksimum akım yoğunluğuna ve istenen momenti sağlamak için gereken maksimum faz akımına bağlıdır. Oluk alanı hesaplandıktan sonra buna bağlı olarak oluk derinliği Eşitlik 2.46'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$h_s = \frac{A_s}{w_{sb}} \tag{2.46}$$

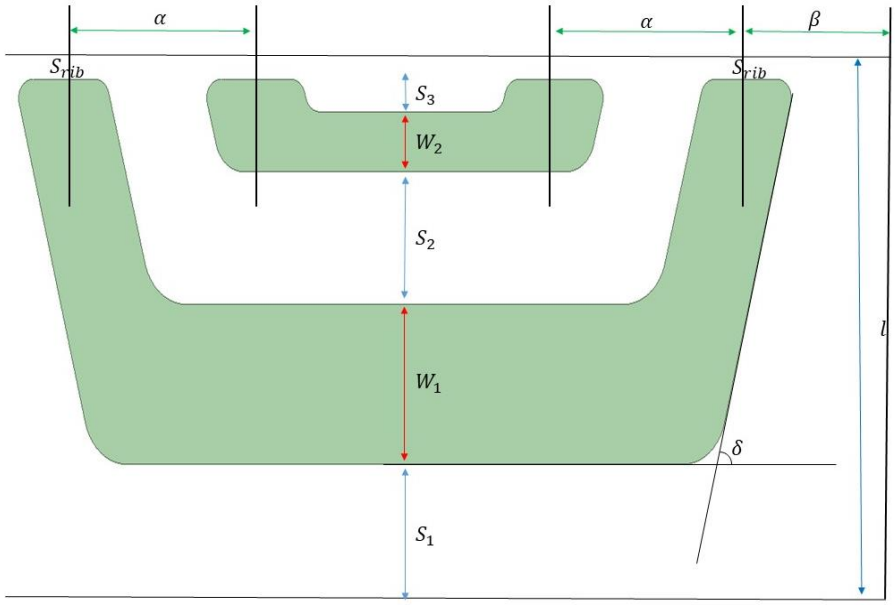
2.2.2. EA-SRM Rotor Tasarımı

SRM'de rotor bariyerleri doğrudan ortalama moment ve moment dalgalanması değerlerini etkilemektedir. Rotor bariyerlerinin kolları ve segmentlerin değerleri açısal olarak belirlenmektedir. Bu açısal değer (α) Eşitlik 2.47'den hesaplanmaktadır [74–76].

$$\alpha = \frac{\frac{\pi}{2p} - \beta}{n_k + \frac{1}{2}} \tag{2.47}$$

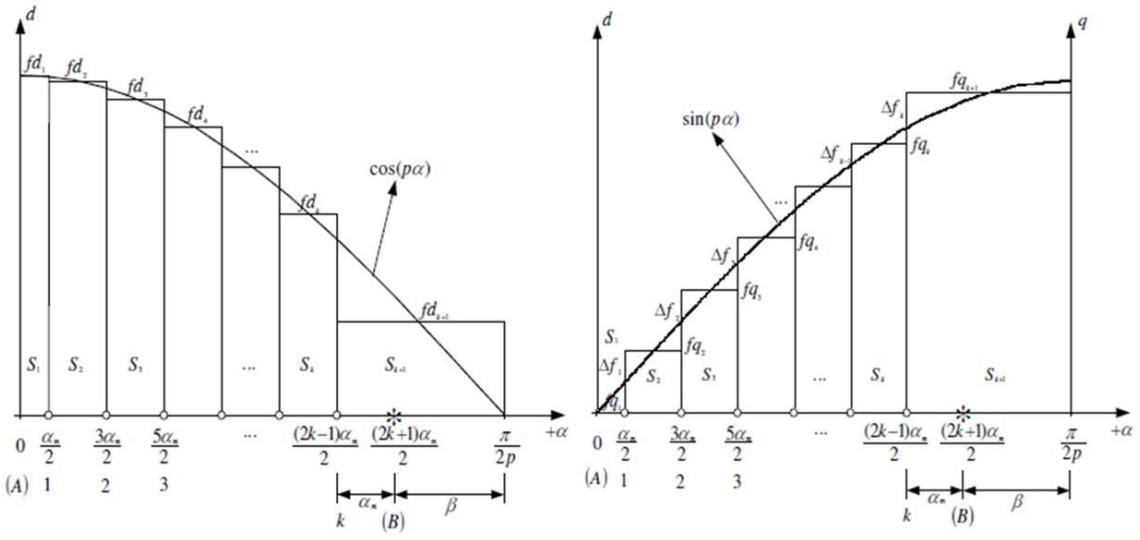
Burada n_k bariyer sayısı, $\beta = {}^{\alpha}/_{k}$ hizalama açısı olarak tanımlanmaktadır ve k değeri yaklaşık değer olarak 2 alınmaktadır [77, 78].

SRM rotor tasarımında diğer bölüm ise bariyerler ve segmentlerin hesaplanmasıdır. Ayrıca bazı tasarımlarda bariyer kol açıları moment salınımı azaltabilmek için açılı olarak yapılmaktadır [79]. Şekil 2.6'da segmentler, bariyerler ve bariyer kolları açısı görülmektedir.



Şekil 2.6. Rotor segment, bariyer ve kol açısı

Segmentlerin ve bariyerlerin genişliklerinin hesaplanmasında hava aralığına etkiyen MMK'ların ortalama değerleri göz önüne alınmaktadır. Şekil 2.7'de d ve q eksenlerinde birim başına etkiyen MMK dağılımı görülmektedir [5,80].



a b

Şekil 2.7. a d-ekseni segmentler üzerindeki MMK dağılımı *b* q-ekseni segmentler üzerindeki MMK dağılımı [5]

Segment hesaplamaları aşağıdaki Eşitlikler üzerinden yapılmaktadır.

$$fd_h = \frac{\int_{\frac{2h-3}{2}\alpha_m}^{\frac{2h-1}{2}\alpha_m} \cos(p\alpha)d\alpha}{\alpha_m} = \frac{\sin\left(p\frac{2h-1}{2}\alpha_m\right)-\sin\left(p\frac{2h-3}{2}\alpha_m\right)}{p\alpha_m} \qquad h = 1, \dots, k \tag{2.48}$$

$$fd_{k+1} = \frac{\int_{\frac{2k-1}{2}\alpha_m}^{\frac{\pi}{2p}\alpha_m} \cos(p\alpha)d\alpha}{\alpha_m+\beta} = \frac{1-\sin\left(p\frac{2k-1}{2}\alpha_m\right)}{p(\alpha_m+\beta)} \tag{2.49}$$

$$\frac{2S_1}{S_2} = \frac{fd_1}{fd_2} \;\&\; \frac{S_h}{S_{h+1}} = \frac{fd_h}{fd_{h+1}} \qquad h = 2, \dots, k \tag{2.50}$$

Bariyer genişliklerinin hesaplamaları bariyerlerinin her birine etkiyen MMK farkı (Δf_k) kullanılarak yapılmaktadır [81].

Segmentlerdeki ortalama MMK değerleri q ekseninde Eşitlik 2.51, Eşitlik 2.52 ve Eşitlik 2.53'lerdeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$f_{q1} = 0 \tag{2.51}$$

$$fd_h = \frac{\int_{\frac{2h-3}{2}\alpha_m}^{\frac{2h-1}{2}\alpha_m} \cos(p\alpha)d\alpha}{\alpha_m} = \frac{\sin\left(p\frac{2h-1}{2}\alpha_m\right)-\sin\left(p\frac{2h-3}{2}\alpha_m\right)}{p\alpha_m} \tag{2.52}$$

$$fd_{k+1} = \frac{\int_{\frac{2k-1}{2}\alpha_m}^{\frac{\pi}{2p}\alpha_m} \cos(p\alpha)d\alpha}{\alpha_m+\beta} = \frac{1-\sin\left(p\frac{2k-1}{2}\alpha_m\right)}{p(\alpha_m+\beta)} \tag{2.53}$$

Bariyerlerde oluşan farklar Eşitlik 2.54, Eşitlik 2.55 ve Eşitlik 2.56 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\Delta f_1 = fq_2 - fq_1 = \frac{\cos(\frac{p\alpha_m}{2})-\cos(\frac{3p\alpha_m}{2})}{p\alpha_m} \tag{2.54}$$

$$\Delta f_{h-1} = fq_h - fq_{h-1} \qquad h = 3, \dots, k$$

$$= \frac{2\cos(p\frac{2h-3}{2}\alpha_m)-\cos\left(p\frac{2h-1}{2}\alpha_m\right)-\cos(p\frac{2h-5}{2}\alpha_m)}{p\alpha_m} \tag{2.55}$$

$$\Delta f_k = fq_{k+1} - fq_k = \frac{(2\alpha_m+\beta)\cos(p\frac{2h-1}{2}\alpha_m)-(\alpha_m+\beta)\cos(p\frac{2h-3}{2}\alpha_m)}{p\alpha_m(\alpha_m+\beta)} \quad (2.56)$$

Bariyerler arasında oluşan oran Eşitlik 2.57'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{W1_h}{W1_{h+1}} = (\frac{\Delta f_h}{\Delta f_{h+1}})^2 \qquad h = 1, \dots, k-1 \quad (2.57)$$

Toplam bariyer uzunluğu l_w ve toplam segment uzunluğunu l_s rotor nüve üzerindeki bariyer ve segment oranını (k_{wq}) vermektedir.

$$k_{wq} = \frac{l_w}{l_s} \quad (2.58)$$

Toplam bariyer ve toplam segment uzunlukları Eşitlik 2.59 ve Eşitlik 2.60'dan hesaplanmaktadır.

$$l_w = \sum_{i=1}^{n_{layer}+1} S_i = \frac{\left({}^{L_{st}}/_{2}\right)-\left({}^{L_{ro}}/_{2}\right)-g}{1+k_{wq}} \quad (2.59)$$

$$l_s = \sum_{i=1}^{n_{layer}} W_{bi} = \frac{\left({}^{L_{st}}/_{2}\right)-\left({}^{L_{ro}}/_{2}\right)-g}{1+\left({}^{1}/_{k_{wq}}\right)} \quad (2.60)$$

2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)

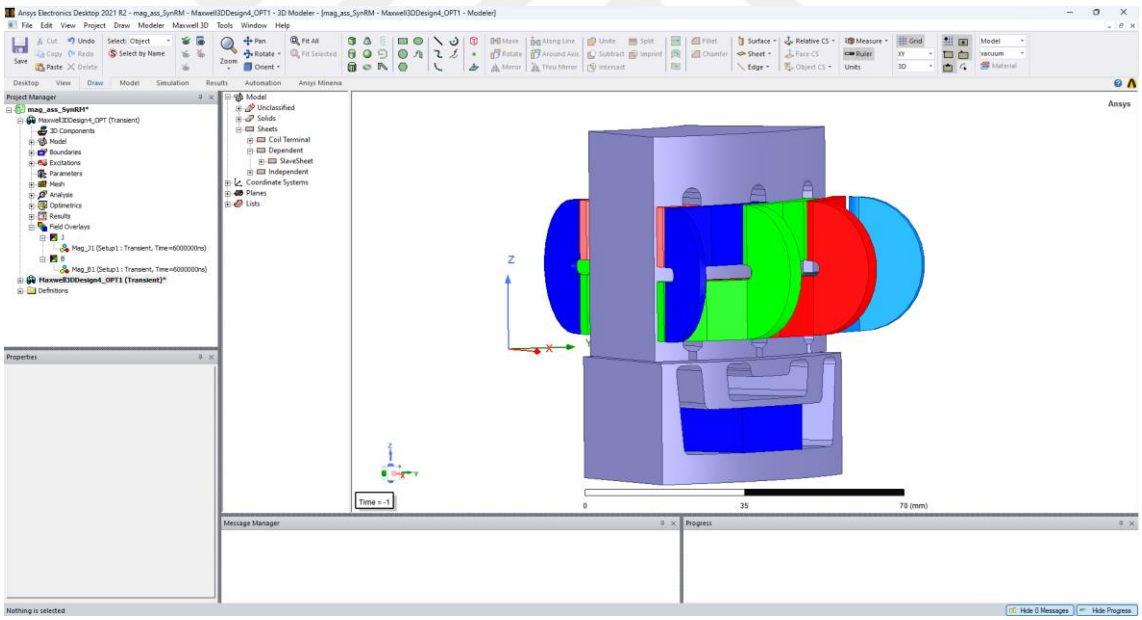
Dünyada karşımıza çıkan olayların tümü fizik kanunlarıyla ve matematiksel ifadeler ile tanımlanmaktadır. Olayların tümü matematik dilinde denkleme dökülmektedir. Fakat bazı denklemler çok karmaşık yapılara bürünebilmekte veya çözümleri oldukça zor olabilmektedir. Karmaşık ve zor yapıdaki bu denklemlerin çözümü için kullanılan yöntemlerden biri de SEY analizi olarak görülmektedir [82]. SEY matematik olarak ifade edilen fizik problemlerinin yanında mühendislik problemlerini çözmekte ve süreklilik durumunu da analiz etmektedir. Termal transfer, akışkanlar, yapısal analiz, titreşim, elektriksel ve manyetiksel analizler ve ayrıca inşaat streslerinde, elektrik motorlarında ve birçok alanda SEY analizi yapılmaktadır [16, 82, 83].

SEY'in temel amacı problemleri küçük parçalara ayırmak ve gerçeğe yakın en doğru sonucu elde etmektir. Yapılan çalışmalar ile beraber gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Bilgisayar yazılımları ile beraber kullanılan SEY analizinin en büyük özelliklerinden birisi giriş verileri değiştirilerek özel problemlerin çözülebilmesidir.

Elektromanyetik problemlerde kullanılan yöntemlerden biri de SEY analizidir. Yapılacak olan tasarımın alan veya hacim olması durumunda onu en küçük parçalara ayırarak çözümleme yapmaktadır [16, 82, 84].

Bu tez çalışmasında SEY analizi için ANSYS Maxwell yazılımı kullanılmıştır. ANSYS Maxwell motor tasarımında en çok tercih edilen analiz programlarının başında gelmektedir. ANSYS uygulamaları problemlerin çözümünü genel olarak üç aşamada gerçekleştirmektedir. Bunlar problemin tanımlanması, sınırların belirlenmesi ve çözümle ve sonuç değerlendirme olarak görülmektedir [17, 83] .

Eksenel akılı motor tasarımlarında özellikle ANSYS Maxwell 3D paket programı kullanılmaktadır. Elektrik makinelerinin tasarımı Maxwell 3D sayesinde oldukça kolay bir şekilde yapılmakta ve gerçek hayat ile yaklaşık sonuçlar alınmaktadır. Şekil 2.8'de tasarımı gerçekleştirilen motor ile ANSYS Maxwell 3D arayüzü görülmektedir.



Şekil 2.8. ANSYS Maxwell 3D ara yüzü

Maxwell statik çözücü, girdap hareketi çözücü ve geçici çözücü gibi seçici çözücülere bağlı olarak uygun denklem kodları ve terimleri kullanmaktadır. Elektrik ve manyetik geçici çözücüler farklı geçici alanları analiz etmektedir. Manyetik geçici çözücüler, zamanla değişen olaylardan kaynaklanan manyetik alanların hesaplanmasından sorumlu olmaktadır. Bu çözücüler zaman alanında çalışır ve her zaman adımında manyetik alanlar için çözümler sağlamaktadır. Zamanla değişen manyetik alan kaynakları arasında hareketli nesneler, hareketli SM'ler ve sürekli değişen gerilim veya akım kaynakları yer

alabilmektedir. Ayrıca çözücü, yakınlık ve yüzey etkileri gibi indüklenmiş alanları da hesaba katmaktadır [83, 85].

Aynı zamanda, elektriksel geçici çözücü, değişen gerilimler, yük dağılımları veya düzgün olmayan şekilde uygulanan akımların neden olduğu elektrik alanlarının sürekli zamansal gelişimini hesaplamak için tasarlanmıştır. Bu çözücünün çıktısı elektrik potansiyeli dağılımıdır [82, 86].

Elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümünü modellemeyi amaçlayan 2 boyutlu Maxwell simülasyonlarında manyetik geçici çözücü kullanılır. Bu çözücü, elektrik enerjisinin mekanik harekete dönüştürüldüğü veya tam tersinin olduğu elektromanyetik sistemlerin dinamiklerini incelemek için oldukça önemli görülmektedir [85, 87].

2.3.1. Maxwell Denklemleri

Elektrik makinelerinin elektromanyetik çözümleri SEY'de sınır koşulları belirlenmiş bir sistemin Maxwell Denklemlerinin çözümü ile yapılmaktadır [83,84].

Maxwell Denklemleri ile makroskopik boyuttaki elektromanyetik bütün olaylar, denklem setleri ile çözümlenebilmektedir. Maxwell denklemlerinin diferansiyel durumları kısaca tanımlanacak olursa:

$$\nabla XE = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{2.61}$$

$$\nabla XH = -\frac{\partial D}{\partial t} + J \tag{2.62}$$

$$\nabla . D = \rho \tag{2.63}$$

$$\nabla . B = 0 \tag{2.64}$$

Eşitlikler 2.61-2.64'te sırasıyla E elektrik alan şiddeti, D elektriksel akı yoğunluğu, H manyetik alan şiddeti, B manyetik akı yoğunluğu olarak tanımlanmaktadır. Elektrostatik ve manyetostatik durumlarda türev bileşenleri zamanla değişim olmadığı için sıfır olmaktadır [17,84].

$$\nabla XE = 0 \tag{2.65}$$

$$\nabla XH = J \tag{2.66}$$

$$\nabla . J = 0 \tag{2.67}$$

Eşitlikler 2.65 – 2.67'ye bakıldığında elektrik ve manyetik alanlar arasında bir ilişki olmadığı görülmektedir. Bu nedenle zamanla değişmeyen durumlarda elektrik alan ve manyetik alanın birbirlerinden bağımsız olduğu söylenebilmektedir.

Maxwell denklenmelerinde ilk tanımlanan Eşitlikler 2.61-2.63 temel denklemler olarak tanımlanmaktadır. Bilinmeyen sayısı denklem sayısından fazla olduğu için tanımsız bir denklem seti olarak kabul edilmektedir. Yapısal denklemlerde tanımlandıktan sonra Maxwell Denklemleri tanımlı bir hale gelmektedir. Yapısal denklemler Eşitlikler 2.68-2.70'te verilmektedir [83,84].

$$D = \in E \tag{2.68}$$

$$B = \mu H \tag{2.69}$$

$$J = \sigma E \tag{2.70}$$

Burada $\in$ malzemenin dielektrik sabitini, μ manyetik geçirgenliğini ve σ ise iletkenliğini ifade etmektedir.

2.4. Çok Amaçlı Genetik Algoritma ve Optimizasyon

Genetik Algoritma (GA) adından anlaşıldığı üzere en uygun çözüm kümesini seçmek için "en uygun olanın hayatta kalması" ilkesinin kullanıldığı kalıtım kavramından esinlenmektedir. GA her nesilde kromozom veya dizi olarak isimlendirilen karar değişkenlerinin oluşturduğu vektörün, temsil ettiği alternatif çözümler popülasyonu optimizasyon probleminin hedefi doğrultusunda değerlendirilmekte ve seçilmektedir. Süreç kendi içerisinde tekrarlanarak yeni nesillerin öncekilerden daha üstün olması sağlanmaktadır. GA'da ilk olarak çözüm uzayının genetik bir temsili ve amaç uzayının matematiksel bir ifadesi gerekmektedir. GA'da her dizinin genetik temsilini gerçek dünyadaki fiziksel karşılığına bağlamak için kodlama şemaları gerekmektedir. Dizinin amaç işlevleri değerlendirilmesi bu şekilde sağlanmaktadır. GA yeni nesiller üretirken

üç genetik işlem ile çoğalmaktadır. Bu işlemler seçim, çaprazlama ve mutasyondan oluşmaktadır. Amaç fonksiyonunun değeri dizgi kalitesinin bir göstergesi olarak ve dizginin çiftleşme (çaprazlama) sürecine katılıp katılmama durumuna karar vermek için seçim sürecinde doğrudan kullanılmaktadır. Çiftleşme havuzuna alının dizi diğer seçilen diziler ile çiftleştirilecek ve yeni nesil çözüm dizileri üretmek için değiştirilmektedir. Oluşan yeni nesillerin mutasyonu ilerleyen süreçte çeşitlilik sağlamak ve arama uzayının küçük bir bölgesinde çözümlere erken yakınsamayı önlemek için kullanılmaktadır. Üç genetik işlem de kullanılarak tekrar tekrar yeni nesiller oluşturulmakta ve daha iyi çözümler bulmak için tüm arama uzayı taranmaktadır. Arama süreci hedeflenen amaç değerlere ulaşıldığı zaman durmaktadır. Optimizasyon adımları aşağıdaki bölümler ile açıklanmaktadır [88–91].

- **Genetik Kodlama ve Çözme**

GA'da kodlama işlemi ikilik tabana dayalı olarak 0 veya 1 olarak yapılmaktadır. Bu durum gerçek dünya problemlerinde iki farklı sorunu oluşturmaktadır. Birincisi her karar değişkeninde seçenek sayısı ikinin kuvveti olmaz ise fazlalık oluşabilmekte ve arama uzayını gereksiz bir şekilde artırmaktadır. İkinci olarak ikilik kodda GA optimal çözüm için arama uzayında keyfi hassasiyet ile elde edilememektedir. Bir dizideki bit sayısı çözüme bağlı olarak önceden belirlenmektedir. Hassasiyet artıkça yani bit sayısı artıkça dizi uzunluğu artmakta ve GA'nın çözmesi gereken problemin karmaşıklığı da artmaktadır. Bazı özel 0111 ve 1000 gibi dizilerde küresel optimum hedefinin aksine yerel optimum hedefe yakınsama görülebilmektedir. Ayrıca bazı dizilerde bir bitin değiştirilmesi kararda önemli değişikliklere yol açmaktadır [92].

İkilik kodlama şemasının problemlerini gidermek için gerçek ve tam sayılar gibi diğer kodlama şemaları da kullanılmaktadır. Gerçek sayılar ile oluşturulan kodlamalar GA'nın doğrudan sürekli değerlere sahip karar değişkenleri üzerine çalışmasına olanak sağlamaktadır. Amaç fonksiyonlarının kademeli olması ile beraber bu yöntem GA'nın performansının artmasını sağlamaktadır. Ancak gerçek sayı kodlu GA'lar için ise farklı çaprazlama ve mutasyon operatörleri gerekmektedir. Ayrık uzay problemlerinin çözümünde ikilik kodlama daha iyi olmasına rağmen fazlalık problemlerinin çözümün de gerçek sayı kodlama şemaları kullanılmaktadır. Tamsayı dizisi her bir karar değişkeni için bir bit tahsis etmektedir. Bundan dolayı iyi çözümleri parçalamak için karar

değişkeninde mutasyon meydana gelmemektedir. Bozucu mutasyonun doğası nedeniyle, arama uzayını daha etkin bir şekilde taramak için daha fazla mutasyona gerek duyulmaktadır [93].

Gerçek kodlu dizilerin yanında ikilik ve tamsayı kodlu diziler genetik operatörlerin dışında bir anlam ifade etmemektedir. GA'da arama uzayında temsil ettikleri çözümlerin konumlarını gerçek dünya ile ilişkilendirmek için kodların çözümlenmesi gerekmektedir. Bundan dolayı kod çözme işlemi amaç fonksiyonunu ifade eden dizilerin değerlendirilmesi ile gerçek dünya değerine geri çevrilmektedir.

- **Başlangıç Popülasyonu**

Bir popülasyon olarak adlandırılan bir çözüm kümesi, her nesilde eşzamanlı bir şekilde optimize edilmektedir. Ana popülasyonlar, ilk nesilden önce popülasyon başlama adımı sırasında rastgele oluşturulmaktadır. Bu adımda, 0 ile 1 arasında rastgele sayılar üretmek için tek düze rastgele sayı üreteci kullanılmaktadır. Rastgele üretilen bu sayılar, çözüm uzayına aktarılarak yeni bir çözüm uzayı oluşturmaktadır. Başlangıç popülasyonu, her bir çözüm uzayına rastgele oluşturulan yeni diziler eklenerek tekrarlamaktadır [88, 94].

- **Amaç Fonksiyonu Değerlendirmesi**

Amaç fonksiyonunun formülü oluşturulurken GA'da probleme bağlı kalınmaktadır. GA'nın çalışma düzenine uyması için amaç fonksiyonu her zaman maksimize veya minimize edilmelidir. Örneğin elektrik motorlarında moment maksimuma veya moment salınımı minimuma hedeflenmektedir. Genelde her bir denemede çözüme yaklaşmak için amaç fonksiyonu hedeflenmekte ve kısıtlamalar altında simülasyonlar gerçekleştirilmektedir [88].

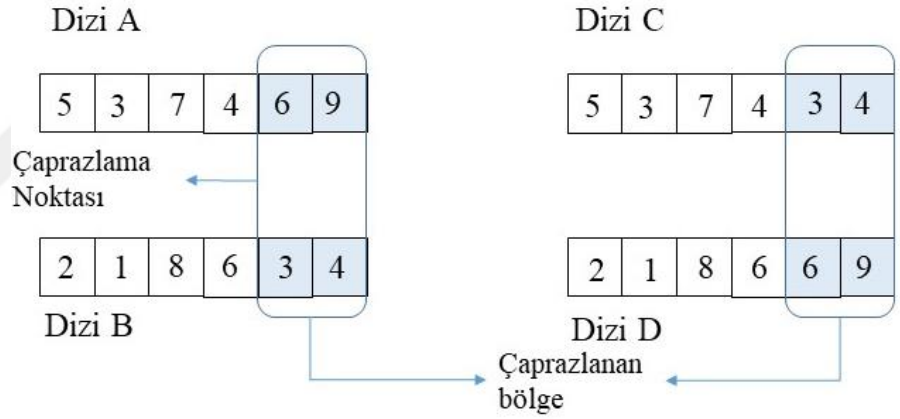
- **Seçim**

Seçim operatörü GA'da ilk operatörü oluşturmaktadır. Bir sonraki çözümlerde daha iyi sonuçlar elde edebilmek için seçim operatörü kullanılmaktadır. GA'da birçok seçim yöntemi kullanılmaktadır. Bunların hepsinin temel amacı "en uygun olanın hayatta kalması" ilkesini gerçekleştirmektir. Turnuva seçimi bu yöntemlerden biri olarak ön plana çıkmaktadır. Bu seçim yöntemi iyi büyüme ve yakınsama özellikleri ile dikkat çekmektedir [92]. Farklı seçim yöntemleri zaman içinde geliştirilip GA'da kullanılmıştır.

- **Çaprazlama**

İkinci operatör, eski nesil dizilerinden yeni nesiller elde etme yani üreme işleminin gerçekleştirildiği çaprazlama olmaktadır. Çaprazlamada hedeflenen özellikler doğrultusunda belirlenen nesillerin uygun çözümleri ile yeni nesiller üretilmektedir.

Çaprazlama operatörü uygulamasında öncelikle popülasyon iki dizi olarak ayrıştırılmaktadır, daha sonra ise her bir dizi çifti sıra ile değerlendirilmektedir. Çaprazlama işleminde iki ana dizi parçalarının, rastgele ve kullanıcı tarafından belirlenen diziler ile bir veya birden fazla noktada çaprazlanması çok fazla tercih edilmektedir. Basit çaprazlama operatörleri aslen ikili kodlu diziler için tasarlanmış olmalarına rağmen, herhangi bir değişiklik yapmaksızın tamsayı kodlu dizilere de uygulanabilmektedir. Şekil 2.9'da basit bit çaprazlama operatörü görülmektedir [95-97].



Şekil 2.9. Çaprazlama operatörü [97]

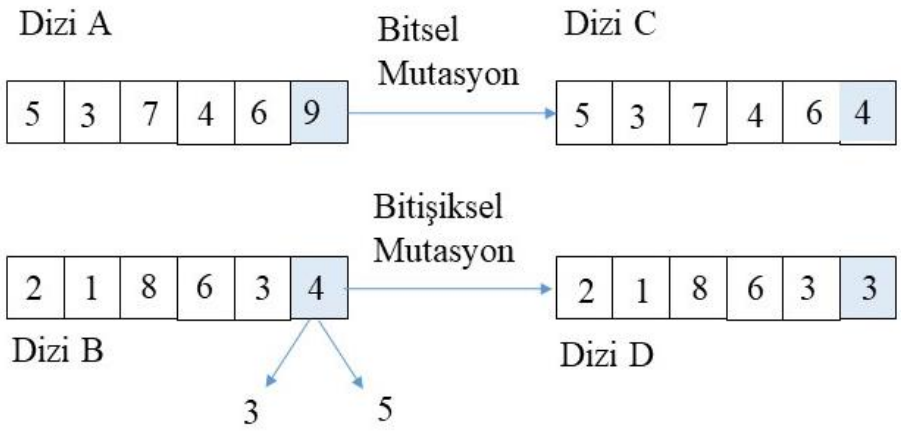
Çaprazlama operatörü 6 bitten oluşan A ve B dizilerine uygulanmaktadır. A ve B dizilerinin sonlarındaki iki bit değiştirilmekte ve böylece yeni nesil olarak C ve B dizileri oluşmaktadır. Gerçek diziler içinde ikili çaprazlama gibi farklı çaprazlama operatörlerinin de oluşturulması gerekmektedir [92].

Çaprazlama olasılığı 0.5-0.1 aralığında değişen bir değer seçilerek belirlenir ve genelde P_c ile sembolize edilmektedir. Çaprazlama işleminden sonra ana nesil dizileri yeni nesil dizileri ile değiştirilerek güncelleme tamamlanmaktadır [88].

- **Mutasyon**

Mutasyon GA'da üçüncü operatör olarak belirlenmektedir. Mutasyon operatörü yerel optimum çözüm noktalarına yakınsamayı önlemek için arama sürecine çeşitlilik katmaktadır. GA'larının tamamında mutasyon sadece uygulandığı bitin değerini değiştirmektedir. GA'da bitsel ve bitişik mutasyon olmak üzere iki yaygın mutasyon yöntemi kullanılmaktadır. Bitsel mutasyon optimizasyon sürecinde kaybedilen iyi çözümleri geri getirmekte ve arama uzayının keşfini iyileştirmektedir [93]. Bitişik mutasyon tanımlanmış çözümleri hassas olarak ayarlamak için kullanılmaktadır [98].

Bitsel mutasyon bir bite uygulanacaksa seçilen bit rastgele bir değer ile değiştirilmektedir. Örnek olarak A dizisinin son bitine bitsel mutasyon uygulandığında değeri 9 iken rastgele bir değer atanarak yeni nesil C dizi elde edilmektedir. C dizisinde son bit 4 olarak belirlenmektedir. Bitişik mutasyonda değiştirilecek olan bit değeri kendisine yakın komşu değerleri ile değiştirilmektedir. Örneğin B dizisinin son bitine bitişiksel mutasyon uygulanacak olursa son bit değeri olan 4 ya 3 ya da 5 değerini almaktadır. Şekil 2.10'da bitsel ve bitişiksel mutasyon örnekleri verilmektedir [95,97].



Şekil 2.10. Bitsel mutasyon ve bitişik mutasyon [97]

- **Durma Kriteri**

Optimizasyon sürecinin GA'da sonlanması için bir durdurma kriteri belirlemek gerekmektedir. Durdurma kriteri için kullanılan en yaygın yöntem toplam değerlendirilen nesil sayısı olmaktadır. Diğer durdurma kriterleri arasında, bir nesil içindeki amaç fonksiyonu değerlerinin varyansı belirli bir eşik değerden daha düşük olması ve yürütme süresi gibi faktörler yer almaktadır [90].

- **Çok Amaçlı Genetik Algoritmaya Geçiş**

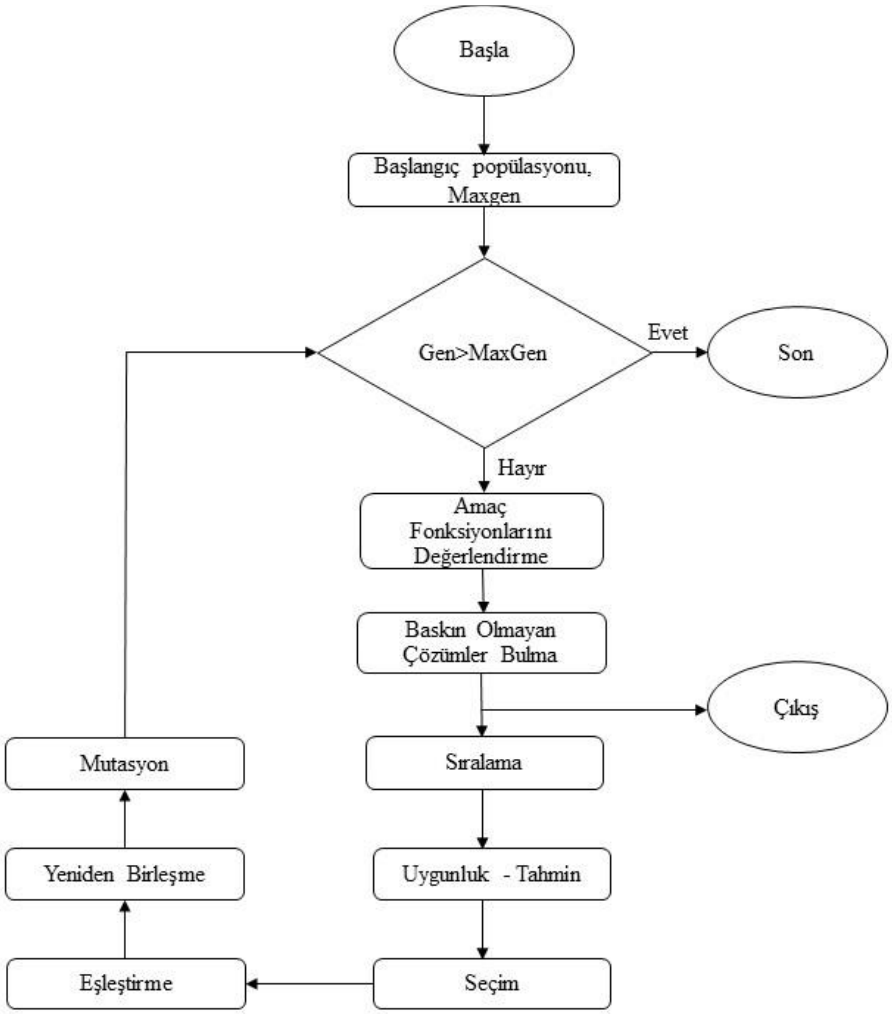
Geleneksel optimizasyon algoritmalarında problem çözümlerinde tek bir amaç veya uygunluk fonksiyonu hedeflenmektedir. Optimizasyonda amaç fonksiyonu sonuçta ya maksimize ya da minimize edilmektedir. Amaç fonksiyonunda tek hedef olduğu için geleneksel optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır. Fakat gerçek dünyada yaşanılan bazı problemlerde amaç fonksiyonları çoklu hedeflere göre çözülmektedir. Bu durumu çözmek için çok amaçlı problemlerde hedefe ulaşmak için GA'ya yardımcı olarak Ağırlıklı Toplam Yöntemi, Ağırlıklı Metrik Yöntemi, Benson Yöntemi ve Değerler Fonksiyonu Yöntemi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ancak kullanılan bu yöntemlerin hepsinde çok amaçlı hedefli optimizasyon problemleri tek amaçlı optimizasyon algoritmalarına dönüştürülmektedir. Birden fazla amaç fonksiyonunu çözmek için "Çok Amaçlı Genetik Algoritma (ÇAGA)" geliştirilmiştir [92].

ÇAGA ilk olarak "Vektör Değerlendirmeli GA (VDGA)" olarak Schaffer tarafından 1985 yılın da önerilmiştir. Bulunan bu yöntem çok amaçlı optimizasyon problemleri için tek amaçlı GA'nın bir uzantısı olarak görülmektedir. VDGA bir amaç fonksiyonu yerine bir amaç vektörünü hedeflemektedir. Vektörün her bir elemanı bir amaç fonksiyonunu temsil etmektedir. GA popülasyonları hedeflenen amaç vektörüne göre alt popülasyonlara ayrılmaktadır. Her bir alt popülasyon amaç vektörünün sadece bir elemanına çözüm üretmektedir.

VDGA'nın geliştirilmesinden birkaç yıl sonra, Hajela ve Lin (1992), Ağırlık Tabanlı GA (ATGA) olarak bilinen bir yöntemi tanıtmışlardır. ATGA, potansiyel çözümleri değerlendirmek için ağırlıklı amaç fonksiyonu değerlerinin toplamını kullanan Ağırlıklı Toplam Yöntemi'ne benzerlik göstermektedir. Ancak Ağırlıklı Toplam Yöntemi'nde tek bir ağırlık vektörü kullanmak yerine, ATGA'da bir nesildeki her bireye farklı bir ağırlık vektörü atanmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, tek bir simülasyon çalışması sırasında birden fazla optimal çözüm elde edilebilmektedir. Ancak ATGA, karışık türdeki amaç fonksiyonlarıyla (hem minimizasyon hem de maksimizasyon) başa çıkamamakta ve Pareto-optimal çözümler bulma konularında zorluklar yaşayabilmektedir [92].

ATGA ile aynı yıl içerisinde Fonseca ve Fleming ÇAGA adı verilen algoritmayı önermişlerdir. Bu algoritmada ilk olarak baskın olmama kavramı ortaya atılmaktadır. Ayrıca baskın olmayan çözümlerin çeşitliliğini de korumuşlardır. Fakat baskın olmayan

çözümler yanlış optimizasyon sonucunu yanlış hedeflerde yönlendirebilmektedir. Bu gibi problemleri çözmek için geliştirilen Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritma (NSGA) ve NSGA-II gibi algoritmalar duyurulmuştur. İlerleyen süreçte geliştirilen algoritmalar ile ÇAGA literatürde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [88, 99, 100]. ÇAGA akış şeması Şekil 2.11'de görülmektedir [101].



Şekil 2.11. ÇAGA akış diagramı [101]

3. BÖLÜM

EA-SRM TASARIMI VE ANALİZİ

EA-SRM tasarımı ilk olarak dört bariyerli yapıda gerçekleştirilmiş daha sonra bu bariyerlere SM yerleştirilerek etkileri incelenmiştir. Tasarımı ve analizi gerçekleştirilen rotoru dört bariyerli olan EA-SRM üretime uygun olmadığı için EA-SMD-SRM tasarımına geçilmiştir. EA-SMD-SRM'nin bariyer sayısı iki olarak tasarım gerçekleştirilmiş ve SM ikinci bariyerde konumlandırılmıştır. Her iki motorun tasarımı ve analizi bu bölümde incelenmiştir.

3.1. EA-SRM Tasarımı

Elektrik makinelerinin tasarımında temel bazı kriterler belirlenmektedir. Örneğin maliyet, güç, verim ve boyut gibi birçok parametre makinenin bazı başlangıç hedeflerine odaklanmaktadır. Bu tez çalışmasında Tablo 3.1'de belirtilen başlangıç değerleri üzerinden tasarım yapılmıştır.

Tablo 3.1. EA-SRM tasarımı başlangıç değerleri

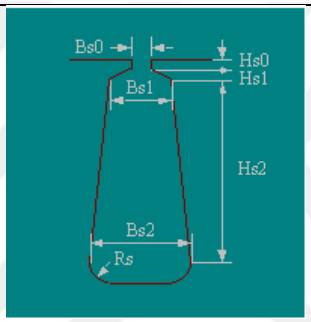
Tanımlar	Parametre	Değer
Çıkış Gücü (W)	P_o	3500
Verim (%)	η	85
Hız (d/d)	n_s	5000
Kutup Sayısı	p	8
Stator Akımı (A)	I_s	100
Giriş Gerilimi (V)	V_s	35

EA motor tasarım eşitlikleri kullanılarak boyut ve stator tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarım sonucu oluşan stator, seri üretimi gerçekleştirilen bir statora çok yakın olduğundan maliyetlerde göz önünde bulundurularak seri üretim stator kullanılmıştır. Stator parametreleri SEY programına girilmiştir. EA motorlarda analiz çalışmaları SEY

programında 3 boyutlu tasarımlar üzerinden gerçekleştirilmektedir. Tablo 3.2'de SEY programına girilen stator parametre değerleri verilmiştir.

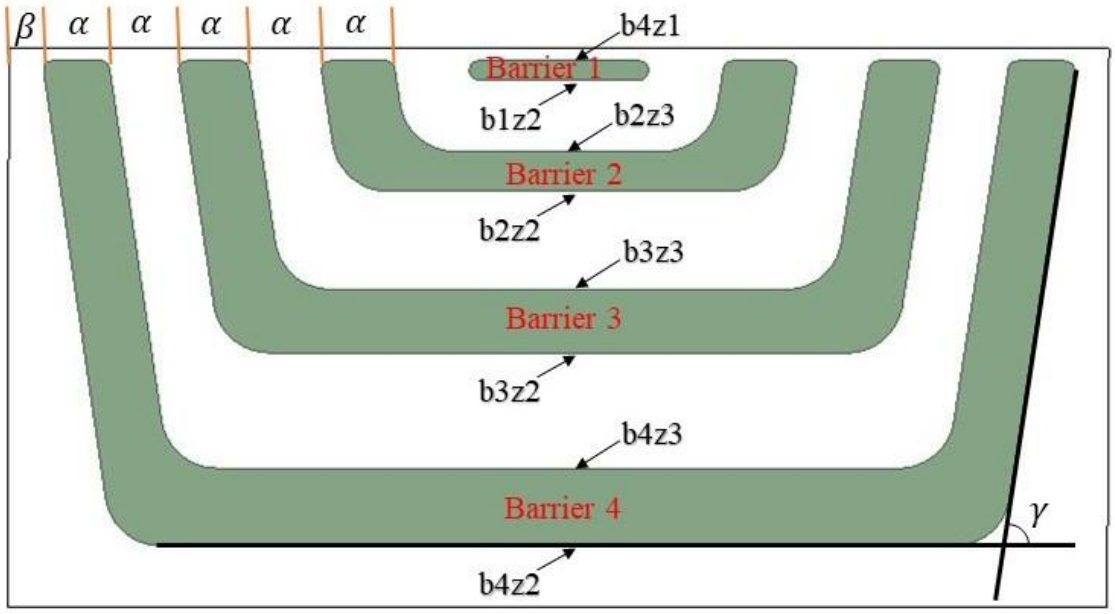
Tablo 3.2. Stator parametre değerleri

Tanımlar	Değer
Dış çap (mm)	150
İç çap (mm)	84
Stator kalınlığı (mm)	50
Hava aralığı (mm)	0.3
Oluk sayısı	24
Oluk türü	3
Hs0 (mm)	2
Hs1 (mm)	1
Hs2 (mm)	33
Bs0 (mm)	2
Bs1 (mm)	5
Bs2 (mm)	5
Rs (mm)	2.5
Sargı katmanı	2
Oluk adımı	3
Sargı kesiti (mm^2)	1.25
Bir oluktaki sargı sayısı	40



Stator iç ve dış çapı ve kalınlığı gibi boyut bilgileri ve ayrıca hava aralığı mesafesi görülmektedir. Motorun oluk yapısı ve sayısı, sargı yapısını doğrudan etkilemektedir. Stator oluk durumuna ve motorun diğer parametrelerine göre sargı değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sargı parametreleri üzerinden tasarım gerçekleştirilmiştir.

Motorun diğer bileşeni olan rotor tasarımında radyal akılı SRM'lerde kullanılan eşitliklerden faydalanılmaktadır [112]. Rotor ilk etapta tasarlanırken 4 bariyerli olarak düşünülmüştür. Dört Bariyerli rotor yapılarında ortalama moment yüksek olurken moment salınımı az olmaktadır [38]. Rotorun optimizasyonunun yapılabilmesi için segmentlerin ve bariyerlerinin modellenmesi gerekmektedir. Rotor modeli oluşturulurken belirlenen parametreler Şekil 3.1'de görülmektedir. Ayrıca hesaplanan rotor segmentlerini ve bariyerlerini oluşturan değerler Tablo 3.3'te sunulmuştur.



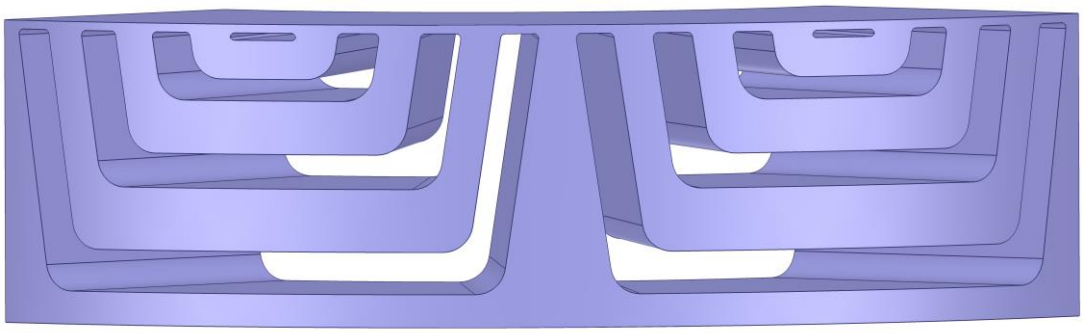
Şekil 3.1. Rotor segmentleri ve bariyerleri

Tablo 3.3. EA-SRM rotor segmentlerinin ve bariyerlerinin başlangıç parametrelerinin değerleri

Parametre	Değer
Rotor kalınlığı (mm)	30
b1z2 (mm)	1.683
b2z2 (mm)	7.664
b2z3 (mm)	5.524
b3z2 (mm)	16.351
b3z3 (mm)	12.949
b4z1 (mm)	0.953
b4z2 (mm)	26.739
b4z3 (mm)	22.560
β (mm)	2.125
k	2
γ (derece)	9

Rotor SEY programında oluşturulurken hesaplanan segmentler ve bariyerler kullanılmıştır. EA-SRM'nin rotoru SEY programının araçları kullanılarak doğrudan oluşturulamamaktadır. Program ara yüzü kullanılarak rotor geometrisi 3D olarak tasarlanmıştır. Bariyer köşeleri üretim problemleri ve akı yolu düşünülerek yuvarlak yapılmıştır. Rotor malzemesi olarak JFE_50JN1000 sınıfı çelik tercih edilmiştir.

SEY programında oluşturulan EA-SRM modeli Şekil 3.2'de görülmektedir. Tasarımı yapılan modelin analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda hedeflenen ortalama moment değerine ulaşılırken moment sanımı değeri yüksek olmuştur.



Şekil 3.2. EA-SRM hesaplanan rotoru

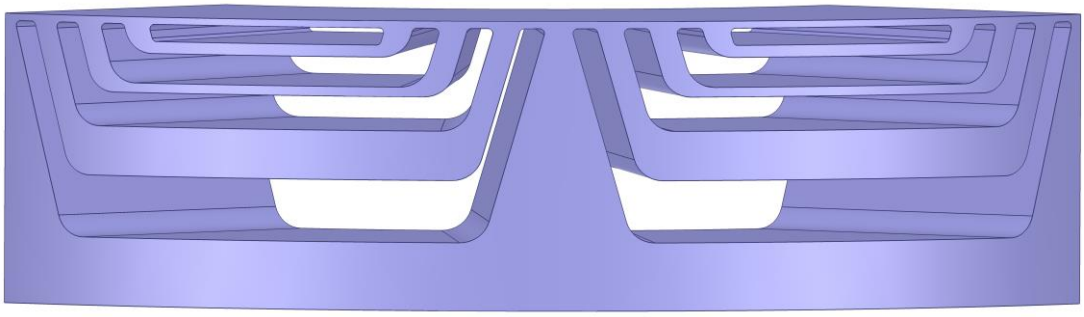
Analizlerde ortalama moment değeri 6.66 Nm olurken moment salınımı %27.33 sonucuna ulaşılmıştır. Momentteki salınımı azaltabilmek için rotor optimize edilmiştir. Rotorun optimizasyonunda ÇAGA kullanılmıştır. Rotor bariyerlerinin optimizasyonu yapılırken kullanılan parametrelerin başlangıç ve sınır değerleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. EA-SRM rotor segmentleri ve bariyerleri başlangıç ve sınır parametre değerleri

Parametre	Değer		
	Minimum	Başlangıç	Maksimum
b1z2 (mm)	1.2	1.683	2,7
b2z2 (mm)	6.5	7.664	8.5
b2z3 (mm)	3.5	5.524	6
b3z2 (mm)	10	16.351	16.4
b3z3 (mm)	7	12.949	13
b4z1 (mm)	0.7	0.953	1.1
b4z2 (mm)	22	26.739	27
b4z3 (mm)	15	22.560	23
β (mm)	1.5	2.125	2.2
k	1.5	2	2.2
γ (derece)	1	9	18

Optimizasyon çalışmasında ortalama moment değerinin minimum 6.75 Nm ve moment salınımının da maksimum %15 olması hedeflenmiştir. Rotorda bariyer kol açısı dahil

olmak üzere 11 parametre optimize edilmiştir. Optimizasyon için SEY programının içerisinde yer alan optimizasyon modülü kullanılmıştır. Programda yer alan optimizasyon modellerinden ÇAGA hedef değer birden fazla olduğu için tercih edilmiştir. ÇAGA için optimizasyon işleminde başlangıç örneklemi 100, iterasyon başına örneklem 50 ve toplam iterasyon sayısı 20 olarak belirlenmiştir. Toplamda 1100 adet çözüm sonucu elde edilmiştir. Optimizasyon sonucunda oluşan rotor yapısı Şekil 3.3'te görülmektedir.



Şekil 3.3. EA-SRM optimizasyonlu rotoru

Optimizasyon sonucu oluşan rotor modelinin parametre değerleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

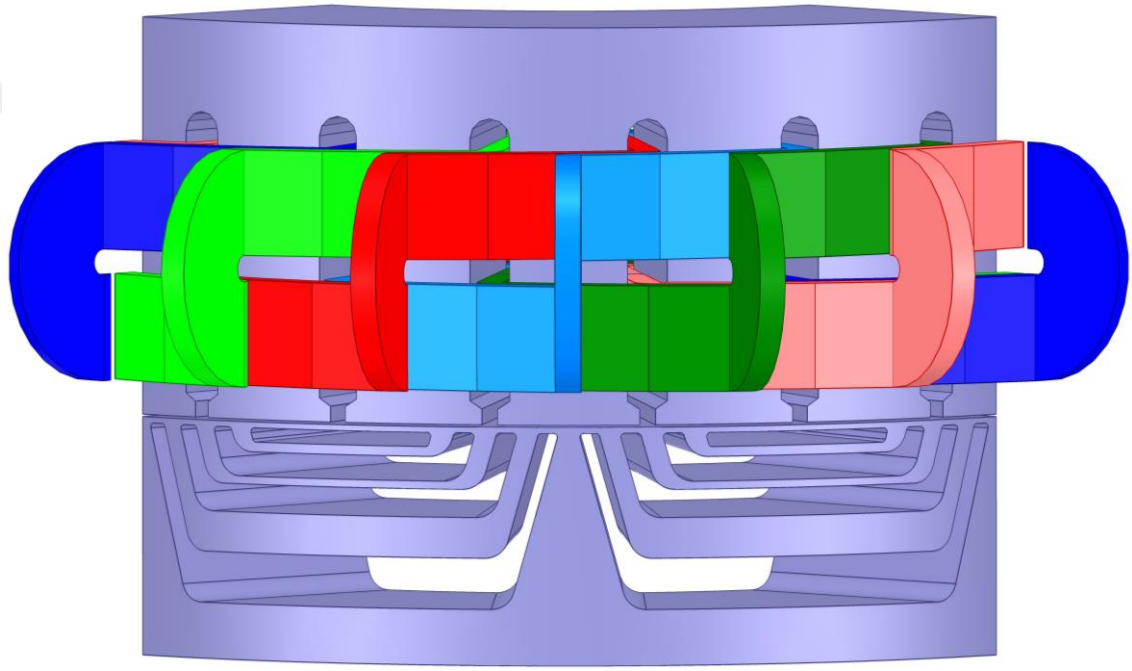
Tablo 3.5. EA-SRM rotor segmentleri ve bariyerleri optimizasyondan sonrası parametre değerleri

Parametre	Değer
b1z2 (mm)	2.521
b2z2 (mm)	6.855
b2z3 (mm)	3.762
b3z2 (mm)	11.390
b3z3 (mm)	7.584
b4z1 (mm)	0.729
b4z2 (mm)	22.946
b4z3 (mm)	16.501
β (mm)	1.511
k	1.891
γ (derece)	16.531

Rotor optimizasyonu tamamlandıktan sonra kol açısının 9º değerinden 16.531 º değerine yükseldiği ayrıca bariyer kollarının inceldiği görülmektedir. Son segmentin kalınlaştığı

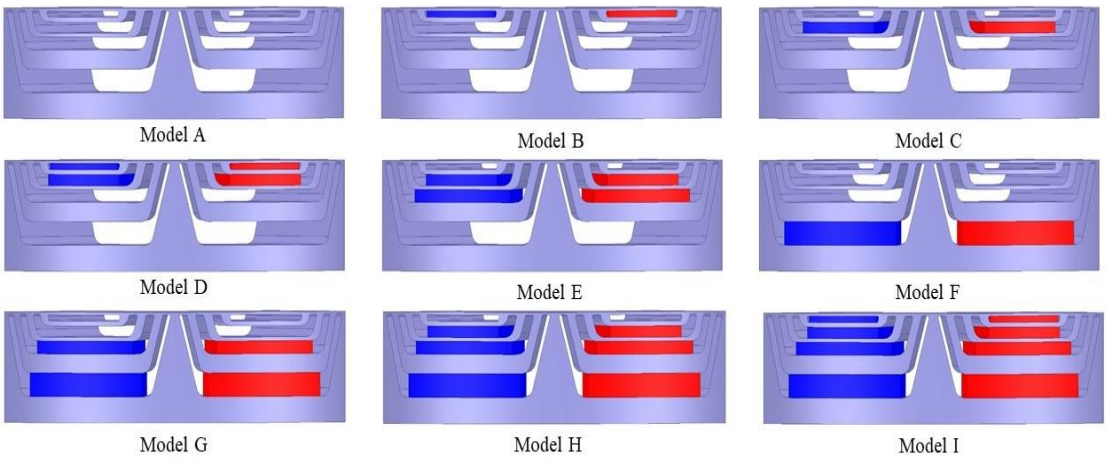
diğer segmentlerin ise inceldiği hem tablolardaki değerlerden hem de Şekil 2.14'ten görülmektedir.

Rotor ölçülerinin optimizasyonu yapıldıktan sonra analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon işlemi uzun süre aldığı için optimizasyon sürecince program analizi 0.5 periyot yapılmıştır. Fakat demir kayıplarının analiz sonuçlarında etkisinin tam olarak görülmesi ve motor performansının daha iyi belirlenmesi için analiz çalışmaları 2 periyot olarak yapılmıştır. EA-SRM'nin üç boyutlu ¼ modeli Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4. EA-SRM üç boyutlu ¼ model

Optimizasyon sonucunda ortalama moment değeri 6.803 Nm ve moment dalgalanması %10.604 olmuştur. Hedeflenen sonuca ulaşıldıktan sonra rotor bariyerlerine SM'ler yerleştirilerek sonuçlar incelenmiştir. SM ilavesi rotor bariyerlerine ayrı ayrı ve faklı bariyerlere birlikte olmak üzere 8 farklı topoloji oluşturulmuştur. Dokuz farklı rotor topolojisi Şekil 3.5'te görülmektedir.

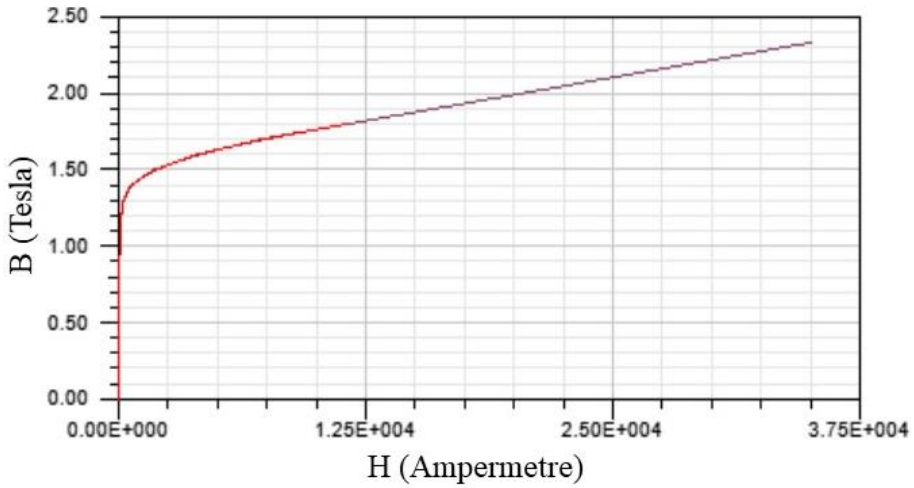


Şekil 3.5. Dokuz farklı rotor topolojisi

3.2. EA-SMD-SRM Tasarımı

Dört bariyerli rotor yapısında prototip üretiminin gerçekleştirileceği zaman bazı zorluklar ile karşılaşılmıştır. Rotor segmentlerinin ince olması bariyer genişliğinin 3 mm'nin altında olması üretimde problem oluşturmuştur. Rotorda açılması planlanan bariyer kollarının köşelerinin yuvarlak olan kısımlarda üretim problemleri olmuştur. Motor akımının 100 A olması motor sürücüsü ve alt yapı eksikliklerini ortaya çıkarmıştır. Bu olumsuz durumlar değerlendirilerek stator sargıları ve rotor topolojisi değiştirilmiştir.

Motor akımı 12A olarak hedeflenmiş ve rotor bariyerleri üretime uygun olacak şekilde 2 bariyerli olarak tasarlanmıştır. Stator üretiminde kullanılan M250-35A sınıfı çelik levhanın kalınlığı 0.35mm'dir. Şekil 3.6'da M250-35A çelik levhanın B-H karakteristiği görülmektedir. Ayrıca rotor bariyerlerinden bir tanesine mıknatıs yerleştirilerek EA-SMD-SRM tasarımı hedeflenmiştir. Tasarımı düşünülen motor için ilk tasarlanan stator yapısı kullanılmıştır. EA-SMD-SRM için ilk belirlenen tasarım parametreleri Tablo 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. M250-35A sınıfı çeliğe ait B-H eğrisi

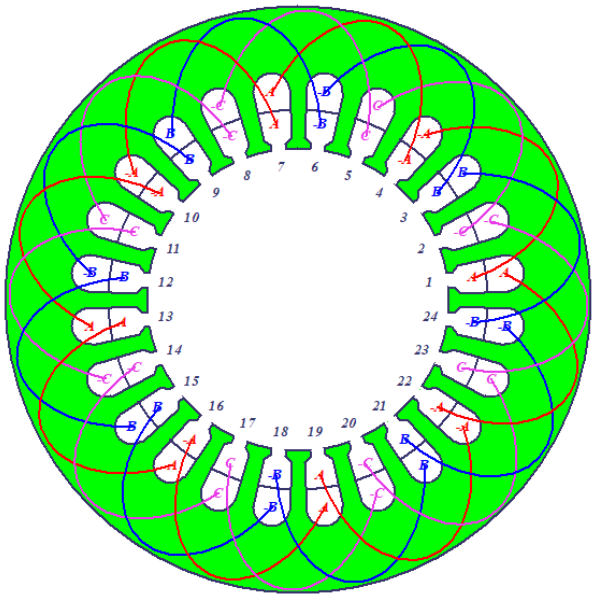
Tablo 3.6. EA-SMD-SRM tasarımı başlangıç değerleri

Tanımlar	Parametre	Değer
Çıkış gücü (W)	P_o	4000
Verim (%)	η	90
Hız (d/d)	n_s	5000
Kutup Sayısı	p	8
Stator akımı (A)	I_s	12
Giriş Gerilimi (V)	V_s	165

EA-SRM için tasarlanan stator yapısı geometrisi aynı tutularak uygun sargı parametreleri hesaplanmıştır. Sargı parametre değerleri Tablo 3.7 ve sargı bağlantı şeması da Şekil 3.7'de görülmektedir.

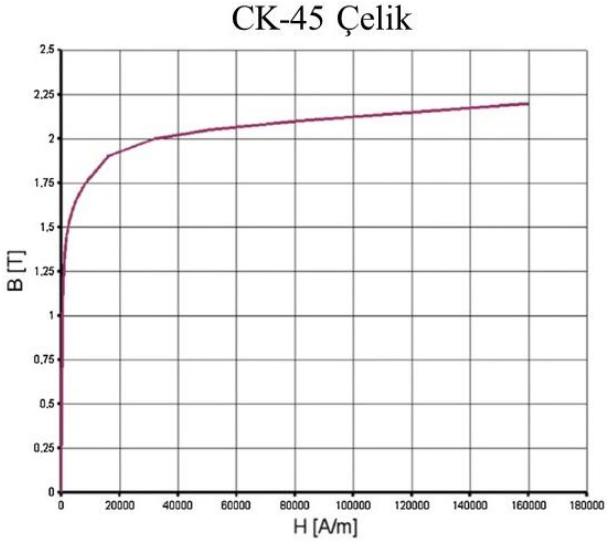
Tablo 3.7. EA-SMD-SRM sargı parametreleri

Tanımlar	Değer
Sargı Katmanı	2
Oyuk Adımı	3
Sargı Kesiti (mm^2)	1.05
Bir Oluktaki Spir Sayısı	64



Şekil 3.7. EA-SMD-SRM sargı bağlantı şeması

EA-SRM'de olduğu gibi bariyer hesaplamaları yapılmıştır. Üretim zorlukları düşünülerek bariyer köşeleri yuvarlak olarak tasarlanmış ve çapı 3 mm alınmıştır. Fakat ikinci bariyere SM yerleşimi düşünüldüğünden SM'nin ölçülerine göre bariyerler oluşturulmuştur. Rotor üretiminde CK-45 sınıf yumuşak çelik kullanılmıştır. CK-45 sınıfı çeliğe ait B-H karakteristiği Şekil 3.8'de görülmektedir.



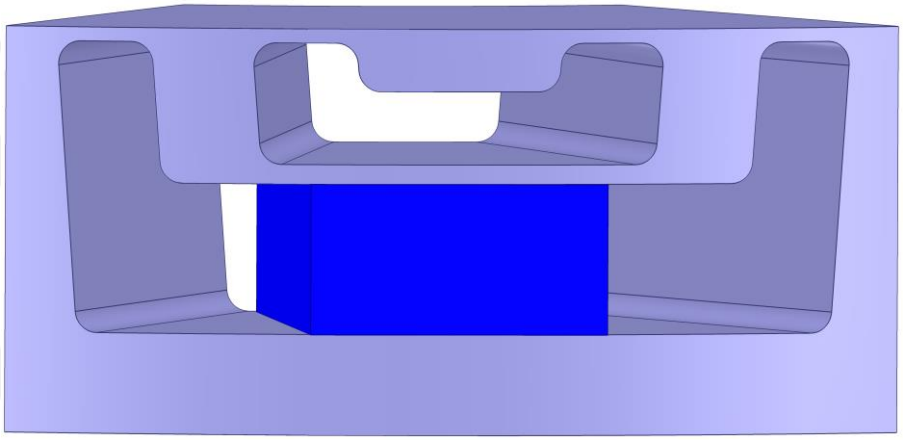
Şekil 3.8. CK-45 çeliği B-H eğrisi

SM seçimi artan mıknatıs maliyetleri düşünülerek yapılmıştır. Piyasada seri üretimi var olan Neodyum türü bir SM tercih edilmiştir. Neodyum türü SM'nin özellikleri Tablo 3.8'de verilmiştir. Rotorun iç ve dış çapı stator iç ve dış çapından daha büyük olarak

tasarlanmıştır. Bunun nedeni stator sargı sonlarındaki kaçak akıyı kullanmak ve mıknatıs ölçüsüne uygun bir rotor yapısı oluşturmaktır. Hesaplamalar sonucu oluşan rotor yapısı Şekil 3.9'da görülmektedir.

Tablo 3.8. Neodyum SM'nin özellikleri

NdFeB-N27	
Br (T)	1.03
H_{cb} (kA/m)	796
H_{cj} (kA/m)	955



Şekil 3.9. EA-SMD-SRM ilk rotor modeli

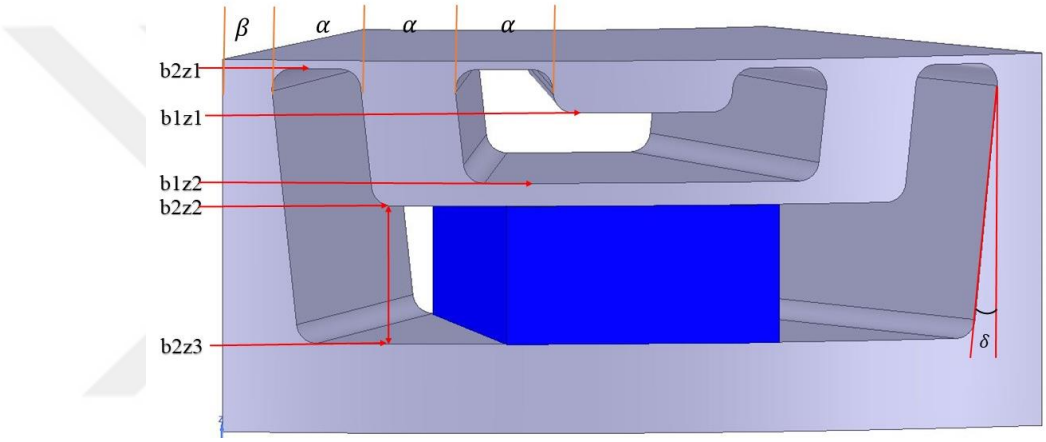
EA-SMD-SRM ilk rotor modeli ve SM ölçüleri Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9. EA-SMD-SRM ilk rotor modeli ölçüleri

Parametre	Değer
İç çap (mm)	77.0000
Dış çap (mm)	157.0000
Rotor kalınlığı (mm)	27
b1z1 (mm)	4.1528
b1z2 (mm)	9.0168
b2z1 (mm)	0.9285
b2z3 (mm)	20.3100
β (mm)	2.7000
k	2.6500
γ (derece)	4.5000
SM yüksekliği (mm)	10
SM genişliği (mm)	20
SM derinliği (mm)	40

İlk rotor modelli EA-SMD-SRM, SEY programı ile analiz edilmiş ve 8.24 Nm ortalama moment ve %27.47 moment salınımı sonucuna ulaşılmıştır. EA-SMD-SRM ilk rotor modeli özellikle hedeflenen moment salınımı değerinde olmadığından bariyer geometrisinde optimizasyona gerek duyulmuştur.

SMD rotor modelinin optimizasyonu 7 farklı parametre üzerinden gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon işlemi yine ÇAGA ile yapılmıştır. EA-SRM'de olduğu gibi toplam 1100 adet çözüm sonucuna ulaşılmıştır. Rotorda optimizasyon için belirlenen parametre değerleri Şekil 3.10'da görülmektedir. Optimizasyon sınırları Tablo 3.10'da verilmiştir.



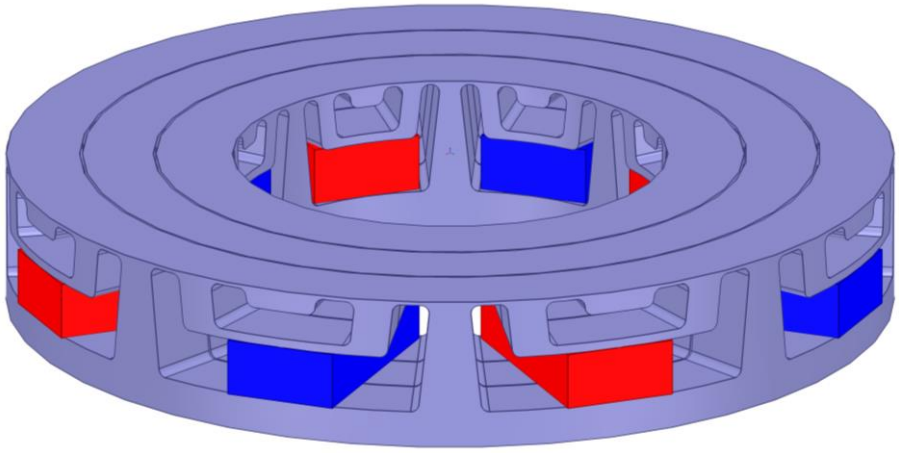
Şekil 3.10. EA-SMD-SRM rotorunda optimizasyonu yapılacak parametreler

Tablo 3.10. EA-SMD-SRM rotor segmentleri ve bariyerleri başlangıç ve sınır parametre değerleri

Parametre	Değer		
	Minimum	Başlangıç	Maksimum
b1z1 (mm)	2.5	4.1528	6
b1z2 (mm)	7	9.0168	10
b2z1 (mm)	0.6	0.9285	1.1
b2z3 (mm)	19.5	20.3100	23
β (mm)	2.62	2.7000	2.75
k	2.62	2.6500	2.75
γ (derece)	1	4.5	9

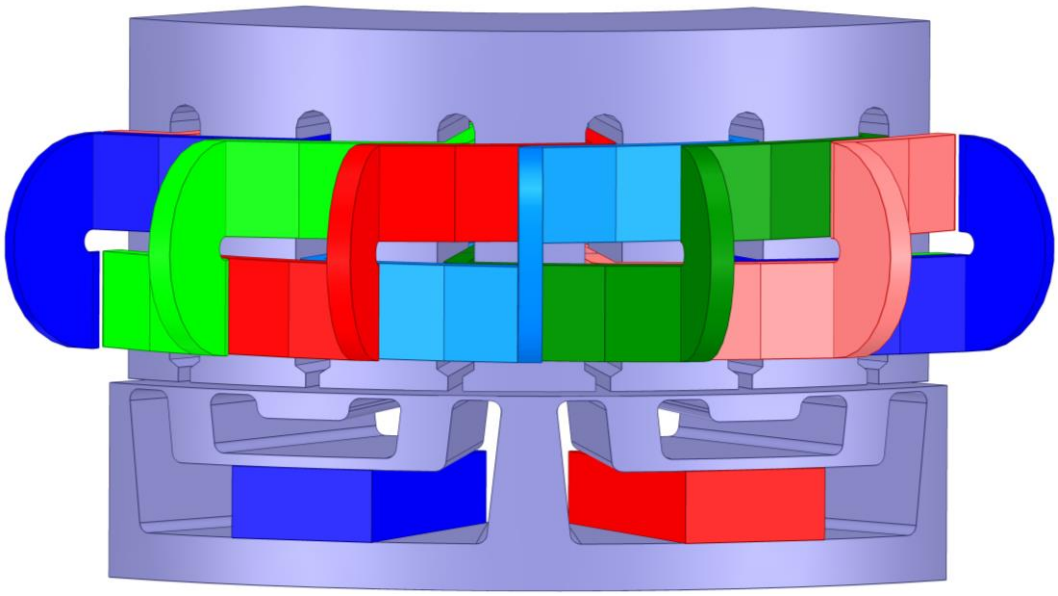
EA-SMD-SRM rotor geometrisinin optimizasyonunda hedef olarak ortalama momentin minimum 8.25 Nm ve moment dalgalanmasının maksimum %10 olması belirlenmiştir. ÇAGA optimizasyon işlemi sonucunda ortalama moment 8.30 ve moment dalgalanması

%10.62 olarak elde edilmiştir. Rotor modeli üretime uygun olması için 3 parça halinde çizilmiş ve birleştirilmiştir. Rotor parçaları iç çaptan dış çapa doğru 14 mm,13 mm ve 13 mm derinliğindedir. EA-SMD-SRM rotor modelinin optimizasyon sonrasındaki tam modeli görünümü Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.11. EA-SMD-SRM rotor tam model

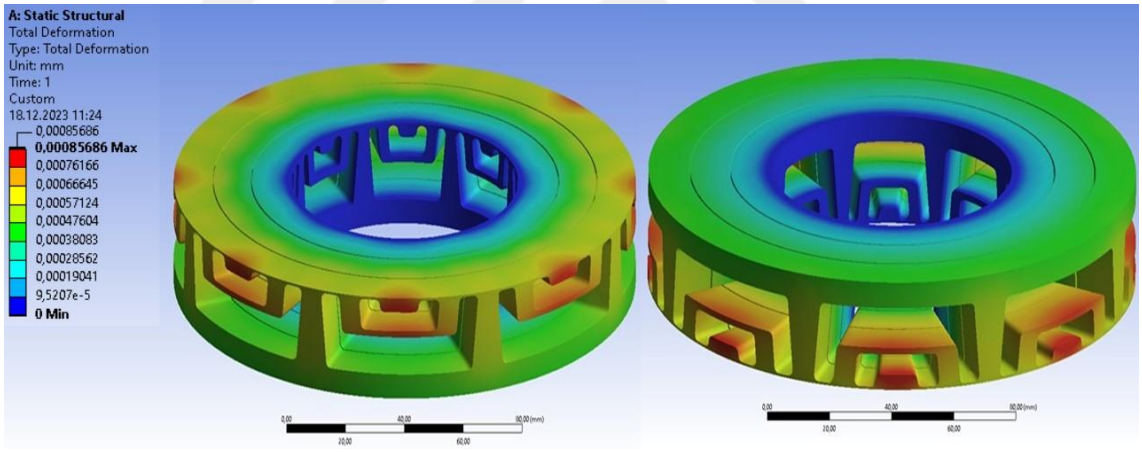
EA-SMD-SRM tasarımı rotor optimizasyonu ile sonuçlanmıştır. Optimizasyon işlemini hızlandırmak için optimizasyon süresince 0.5 periyotta çözümler gerçekleştirilmiştir. EA-SMD-SRM analizleri 2 periyot süresince yapılmış ve demir kayıplarının etkisi sonuçlarda alınmıştır. EA-SMD-SRM'nin üç boyutlu ¼ model görünümü Şekil 3.12'de sunulmuştur.



Şekil 3.12. EA-SMD-SRM'nin üç boyutlu ¼ modeli

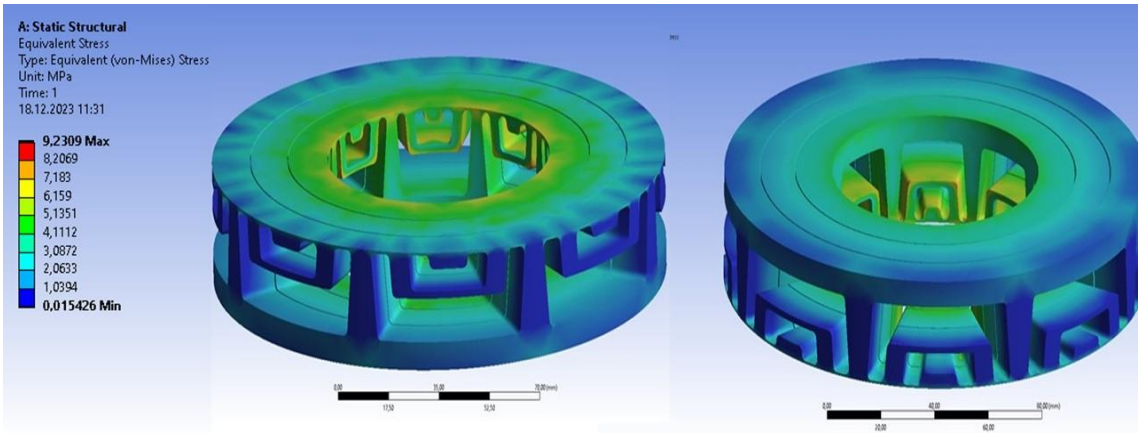
3.3. EA-SMD-SRM'nin Yapısal Analizi

Elektrik makinelerinde manyetik analizlerin sonuçlanmasından sonra prototip üretimi için yapısal analiz de büyük önem arz etmektedir [102-104]. Stator ve rotor arasında oluşan elektromanyetik çekme kuvvetine "kuvvet*kuvvet kolu" prensibinden dolayı oldukça dikkat edilmektedir. Yapısal bozulmalar EA motorlarda balans bozukluğuna neden olmaktadır [105]. Bu tez çalışmasında tasarımı yapılan EA-SMD-SRM tek hava aralıklı olarak tasarlanmıştır. Ayrıca SRM özelliğinden dolayı rotorda oluşacak bozulmalar akı yolunu doğrudan etkileyebilmektedir. EA-SMD-SRM'nin rotorunda yapılan deformasyon analizleri SEY programı aracılığı ile yapılmıştır. Rotor üzerindeki deformasyon maksimum $8.5686x10^{-4}$ mm ve ortalama $4.2072x10^{-4}$ mm olarak analiz sonuçlarından elde edilmiştir. Rotor üzerindeki bozulmanın en fazla hava aralığına yakın noktalarda olduğu Şekil 3.13'te görülmektedir. Hava aralığı uzunluğunun 0.4 mm olduğu dikkate alındığında rotordaki deformasyon ihmal edilebilmektedir.



Şekil 3.13. EA-SMD-SRM rotor yapısal analiz-toplam deformasyon

Yapısal analizlerde ayrıca rotorun stres sonuçlarına da bakılmaktadır. Rotorun yapımında kullanılan CK-45 çeliğinin stres değeri 355 MPa olarak yapılan çalışmalar ile belirlenmektedir [106, 107]. Yapılan SEY analizi ile rotor üzerindeki stres maksimum 9.2309 MPa ve ortalama 3.1623 MPa olarak ölçülmüştür. Analiz sonuçlarından elde edilen ortalama stress değeri CK-45 çeliğnin stres değerinin oldukça altında ve kabul edilebilir bir düzeydedir. Şekil 3.14'te EA-SMD-SRM'ye rotorun stres analizi görülmektedir.



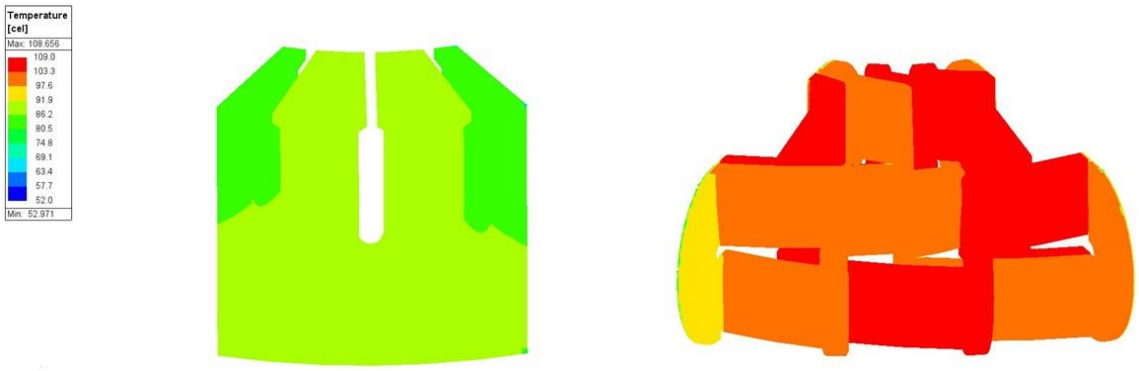
Şekil 3.14. EA-SMD-SRM rotor stres analizi

Yapısal analiz sonuçlarında kullanılan CK-45 çelik malzemenin özelliklerine bakıldığında rotor üretimine uygun görülmektedir. Hem deformasyon hem de stres analizi sonuçları ile üretime uygun olduğu desteklenmiştir.

3.4. EA-SMD-SRM'nin Termal Analizi

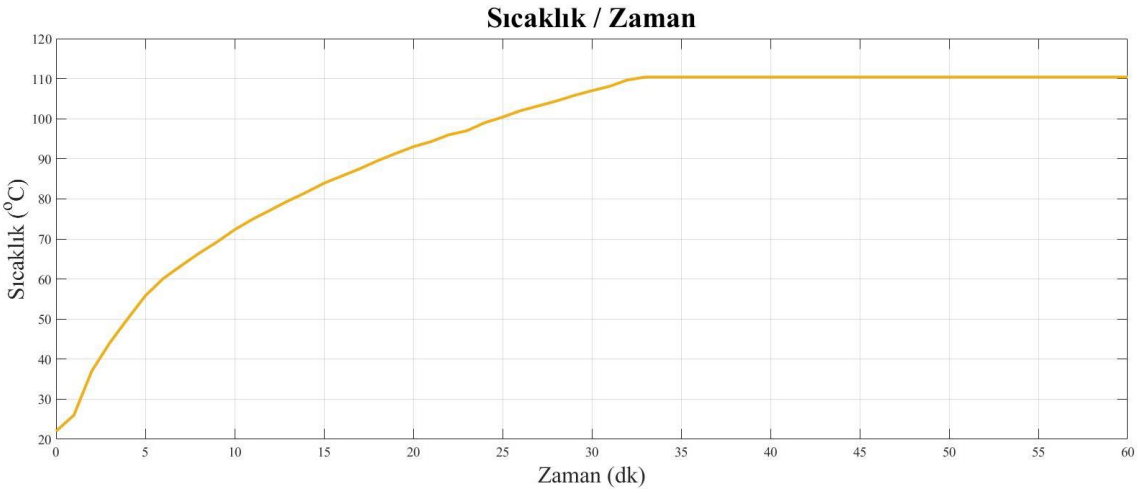
SRM'ler rotorunda bakır içermemesi nedeniyle soğuk rotorlu motorlar olarak bilinse de stator sargılarında oluşan bakır kayıpları ve stator demir kayıplarından dolayı motorlarda sıcaklık artışları olmaktadır. Motorların ısınmasıyla beraber motor içerisinde dağılması üç şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar iletim, taşınım ve radyasyon şeklinde dağılmaktadır. Motorların çelik, bakır ve yalıtım malzemelerinde ısı transferi iletim yoluyla olmaktadır. Konveksiyonel ısı transferi motor içerisinde ve yüzeyinde oluşan hava akımıyla sağlanmaktadır. Radyasyon yolu ile gerçekleşen ısı transferi elektrik makinelerinde değerlendirilmemektedir [108–111].

EA-SMD-SRM termal analizi ANSYS Maxwell'in IcePak arayüzü üzerinden yapılmıştır. Analiz çalışmaları gerçekleştirilirken termal analiz için gerekli tanımlamalar sağlanmakta ve çözüm gerçekleştirildikten sonra termal analizin ara yüzüne aktarım yapılmaktadır. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra termal çözümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.15'te stator ve sargı sıcaklık dağılımı görülmektedir.



Şekil 3.15. EA-SMD-SRM stator ve sargı termal görünümleri

Stator nüvesinin maksimum sıcaklığı 89.373°C ve sargıların maksimum sıcaklık değeri 108.656°C olarak SEY analiz sonucundan görülmektedir. EA-SMD-SRM'nin sargı sıcaklığı deneysel olarak ölçülmüştür. Motor tam yük altında çalıştırılarak sargı sıcaklığının durağan olduğu değere kadar çalışması devam etmiştir. Sargıların sıcaklık ölçümü için termokupl kullanılmıştır. Sargı sıcaklık ölçümü tam yük altında 60 dakika olarak yapılmıştır. EA-SMD-SRM, durağan sıcaklığı olan 110°C'a 33 dakikada ulaşmıştır. Sargı sıcaklığının deneysel ölçüm grafiği Şekil 3.16'da görülmektedir.



Şekil 3.16. EA-SMD-SRM Deneysel sargı sıcaklık grafiği

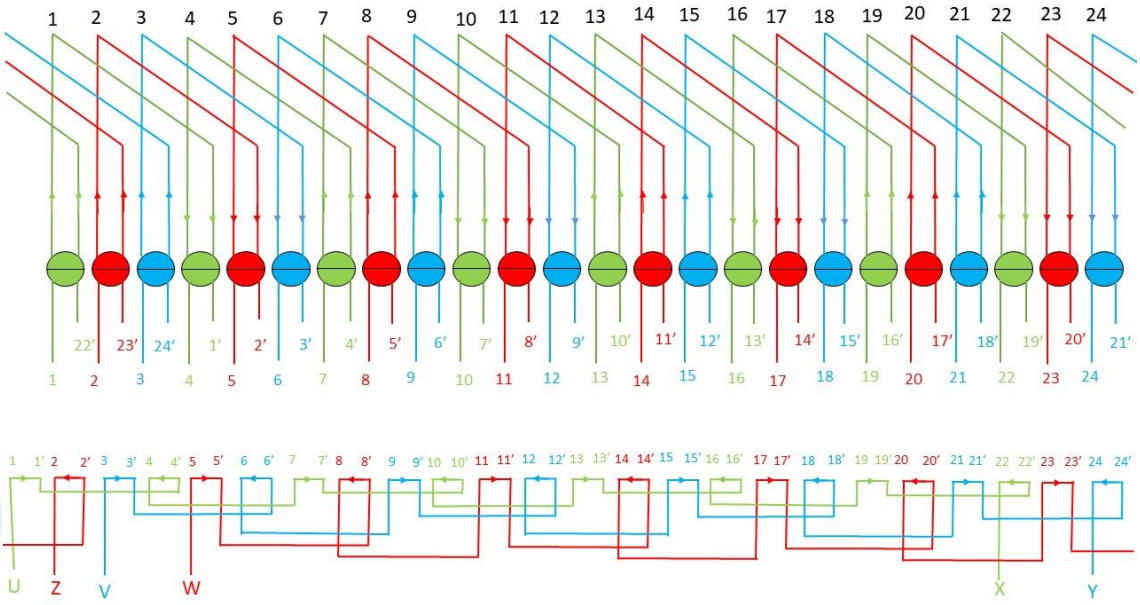
3.5. EA-SMD-SRM'nin Prototip Üretimi

Elektrik makinelerinde hedeflenen parametrelere ulaşabilmek için öncelikle analitik hesaplamaların yapılması, daha sonra nümerik analizlerin gerçekleştirilmesi ve son olarak ise üretime geçilmesi gerekmektedir. Analitik hesaplar doğrultusunda tasarlanan motorun geometrisi oluşturulmaktadır. Çeşitli analiz programları ile tasarımı düşünülen motorun manyetik analizleri yapılmaktadır. Elde edilen analiz sonuçları optimizasyon çalışmaları ile yüksek verime, düşük moment dalgalanmasına ve değişken hız aralığı gibi özeliklere uygun hale getirilmektedir. Fakat üretim noktasına gelindiğinde çeşitli mekanik zorluklar ortaya çıkabilmektedir. Özellikle EA makinelerin üretimi radyal akılı makinelere göre daha zor olmaktadır. EA makinenin seri üretiminin radyal akılı makinelere göre az olmasının yanında kendi yapısı da bu makinelerin üretimini zorlaştırmaktadır.

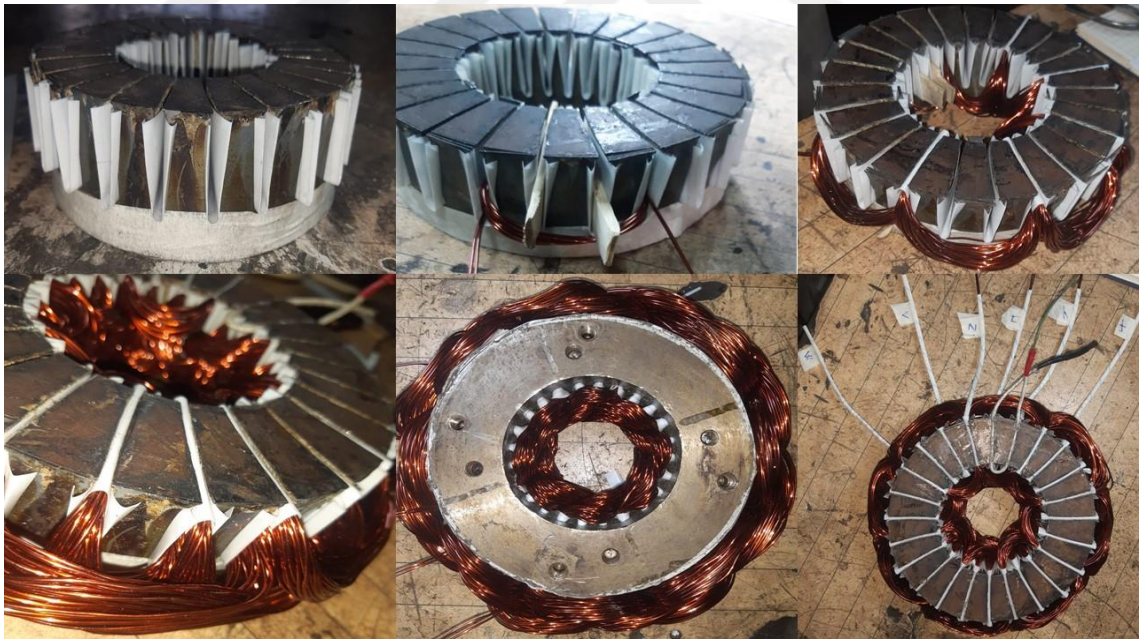
EA-SMD-SRM'nin prototip üretimi statorun elde edilmesi, sarımın yapılması, rotor üretimi ve gövde üretimi ile yataklama işlemlerinden oluşmaktadır. Öncelikle stator nüvesinin elde edilmesi ile üretime geçilmiştir.

Stator nüvesi önceki bölümlerde de belirtildiği gibi seri üretimi yapılan bir modeldir. EA motorlarda stator üretimi radyal akılı motorlara göre daha zor ve riskli olmaktadır. EA motor yapısında stator, genel olarak silisli sacların rulo şeklinde sarılarak üzerine oluklar açılması ile yapılmaktadır. Rulo olarak sarılan stator kaynaklama işlemi ile sabitlenmektedir. Stator üzerine oluklar açılmaktadır. Oluk açma işleminde oldukça dikkatli çalışılması gerekmektedir. Yapılabilecek bir mekanik hatada oluklarda eğilmeler ve ruloda açılmalar oluşabilmektedir.

Stator nüvesi oluklar açılmış halde son halini aldıktan sonra sarım işlemine geçilmektedir. SRM'lerde daha çok tercih edilen tam kalıp sarım tekniği EA-SMD-SRM'de tercih edilmiştir. Sarım yapılırken sargı sonlarının uzun olmamasına ve oluk doluluk oranına dikkat edilmektedir. Sarım şeması Şekil 3.17'de ve sarım aşamaları Şekil 3.18'de görülmektedir.



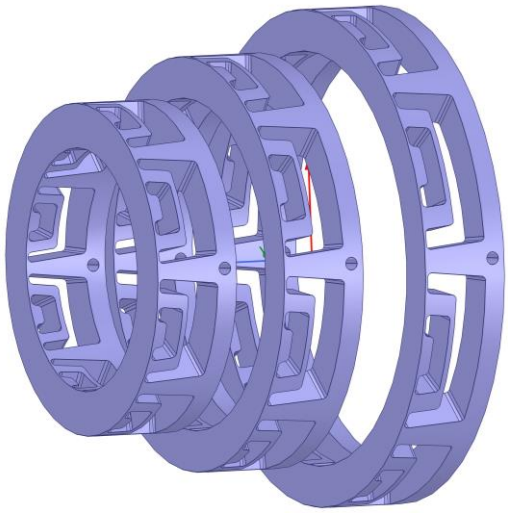
Şekil 3.17. EA-SMD-SRM sarım şeması



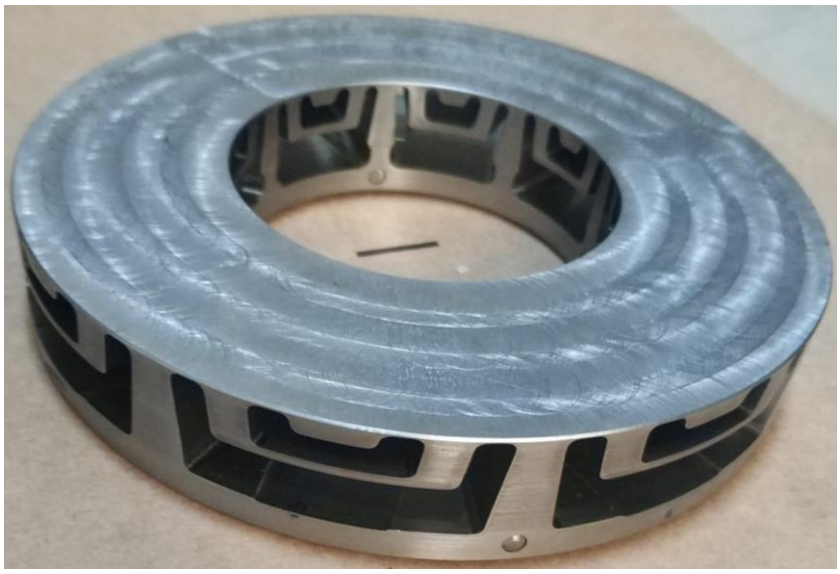
Şekil 3.18. EA-SMD-SRM sarım aşamaları

Tez çalışmasında EA-SMD-SRM tasarımında özellikle rotor üzerine yoğunlaşılmıştır. Yeni bir rotor topolojisi sunulmuştur. İlk defa yapılan çalışmaların üretiminde her zaman çeşitli zorluklar yaşanmaktadır. Rotor üretimi iki aşamadan oluşmaktadır. ilk olarak rotor nüvesi işlenmiştir. İkinci aşamada ise SM'ler rotor bariyerlerine yerleştirilmiştir.

Rotorun üretimi motorun eksenel olmasından dolayı oldukça zor olmuştur. Rotor bariyerlerinin açılması için 4 eksenli CNC makine kullanılmıştır. Silindir olarak imal edilen ve simit şeklinde oluşturulan çelik nüvede bariyerler dıştan içe doğru açılmak istenmiştir. Fakat rotor derinliğinin uzun olması neticesinde üretim sürecindeki problemler nedeni ile istenilen ölçülere uygun bariyerler oluşturulamamıştır. Bundan dolayı rotor nüvesi 3 farklı parça halinde üretime uygun hale getirilmiştir. Üretim sonrası üç parça rotor malzemesinden oluşturulan perçinler kullanılarak birleştirilmiştir. Parçalı rotor nüvesi yapısı Şekil 3.19'da görülmektedir. Üretimden sonra oluşturulan rotor Şekil 3.20'de verilmiştir.



Şekil 3.19. EA-SMD-SRM parçalı rotor



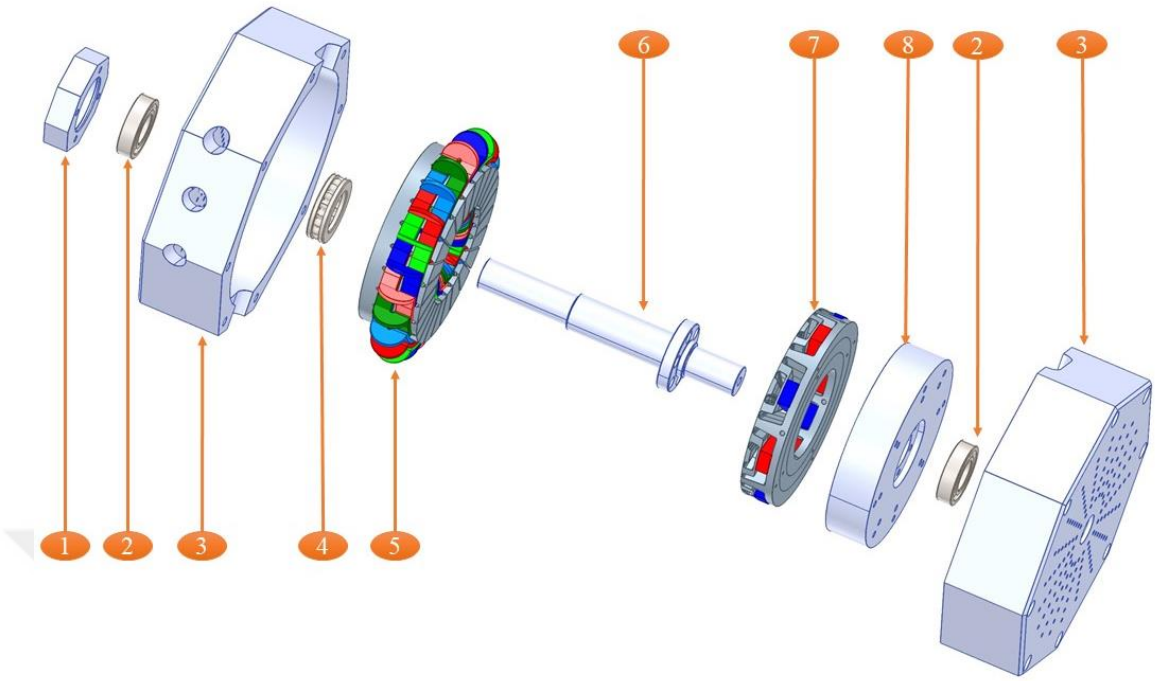
Şekil 3.20. EA-SMD-SRM rotor nüvesi

Rotor tasarımında ikinci aşama olan SM'lerin yerleşiminde kutup yönleri oldukça önemlidir. Rotorun hava aralığına bakan bölümüne doğru SM'ler sırası ile N ve S kutupları olacak şekilde yerleştirilmiştir. SM'lerde oluşabilecek sapmaları engellemek için mıknatıslar sabitlenerek ve sıra ile bariyerlere montajlanmıştır. SM'lerin bariyerlere montajlanması işlemi ve montajlanmış hali Şekil 3.21'de görülmektedir.



Şekil 3.21. EA-SMD-SRM rotora SM montajlanması ve SM'li rotor

Stator ve rotor üretimi tamamlandıktan sonra motorun diğer parçaları olan gövde, mil ve yataklar tasarlanmıştır. EA motorların problemlerinden biride yataklamada yaşanan zorluklardır. Hava aralığının 0.4mm olmasından dolayı yataklama sorununu çözmek için eksenel rulman kullanılmıştır. Eksenel rulman stator tarafındaki gövdeye yerleştirilmiştir. Eksenel yükleri eksenel rulman karşılamıştır. Radyal yükler ise gövdeye montajlanan radyal rulman ile çözüme kavuşturulmuştur. Gövdenin stator tarafının iç kısmına eksenel rulman yerleştirildiği için radyal rulmanın montajı gövde dışı yüzeyine tasarlanan rulman yatağına yapılmıştır. EA-SMD-SRM'nin üç boyutlu tasarımı Şekil 3.22'deki gibi görünmektedir.



Şekil 3.22. EA-SMD-SRM Tasarım Görünümü (1-Radyal rulman yatağı, 2-Radyal rulman, 3-Gövde, 4-Eksenel rulman, 5- Stator, 6- Mil, 7-Rotor, 8-Rotor yatağı)

Motor imalatında gövde ve mil çelik malzemeden yapılmıştır. Rotor yatağı, rotor üzerindeki manyetik alan dağılımını etkilememek için alüminyum malzeme ile yapılmıştır.

3.6. EA-SMD-SRM'nin Deney Düzeneği ve Performans Testleri

Elektrik motorlarının karakteristiklerinin belirlenmesi için deney düzenekleri oldukça önemlidir. Özellikle yeni bir motor tasarımı gerçekleştiriliyorsa simülasyon sonuçlarının doğrulanması ve üretim sürecinde oluşan hataları görebilmek için deney düzeneğinin güvenilir olması daha önem kazanmaktadır. Prototip motorun testleri Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde bulunan elektrik motorları test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğinden kaynaklı bir hata oluşmaması için prototip motor ile yük arasındaki hizalama işlemi lazer eksenleme cihazı ile yapılmıştır.

Deneysel çalışmalarda motorun parametre testleri ve yük testleri yapılmıştır. Motorun performans testleri simülasyon ile uyumlu olacak şekilde farklı hız ve farklı yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda çıkış gücü, verim, güç faktörü, giriş gerilimi, moment ve moment dalgalanması verileri elde edilmiştir.

3.6.1. Deney Düzeneği

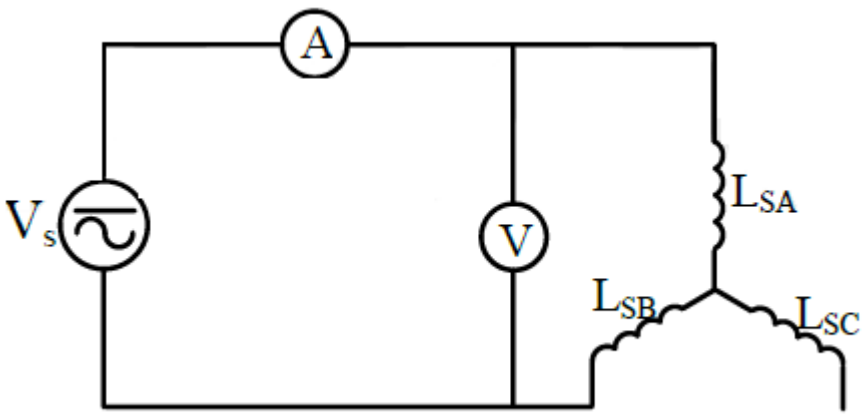
Gerçekleştirilen deneysel çalışmaları parametre testleri ve deneysel çalışmalar olmak üzere iki başlık altında toplanabilir. İki deneysel çalışmanın test düzeneklerinin farklı olması ve farklı yöntemler ile yapılmasından dolayı iki farklı set üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

3.6.1.1. Parametre Deneyleri ve Test Düzeneği

SRM'lerde karakteristiği belirleyen parametrelerin başında stator direnci ve senkron indüktansı gelmektedir. Stator direnci ve indüktansının ölçümü iki farklı çalışma ile yapılmaktadır. Parametre değerlerinin doğru olarak belirlenmesi için rotor pozisyon bilgisi önemlidir. Rotorun konumunu doğru belirlemek için yıldız bağlı olan sargıları DA kaynağına bağlanmalıdır. Sargı uçlarının A fazı DA kaynağının pozitif (+) ucu ile diğer iki faz (B, C) ise kısa devre edilerek kaynağın negatif (-) ucu ile beslenir. Enerji verildikten sonra A fazı ile d-ekseni aynı hizaya gelip rotor kilitlenir. Bu rotor pozisyonu başlangıç noktası olarak belirlenir [1].

Stator sargı direnci belirlenirken AA makinelerinde her zaman kullanılan statora DA uygulama deneyi yapılmıştır. Stator sargıları yıldız bağlı konumdayken sargı uçlarından her hangi ikisi DA kaynağına bağlanır. DA uygulanırken nominal çalışma akımına kadar beslenir ve bu değerdeki akım ve gerilim değerleri ölçülür. Eşitlik 3.1'den R_s direnci hesaplanır. Parametre deneyi bağlantı şeması Şekil 3.23'te görülmektedir.

$$R_s = \frac{V_{DA}}{2I_{DA}} \tag{3.1}$$



Şekil 3.23. Parametre deneyi bağlantı şeması [1]

SRM'de rotor çıkıntı oranı d ve q eksen indüktanslarını etkilemektedir. Çıkıntı oranı ise rotor konumu ile değişmektedir. Bu nedenle stator indüktansları da rotor konumuna (θ_r) bağlıdır. SRM'de d ve q eksen indüktansları Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3 'teki gibi ifade edilir.

$$L_{sd} = L_s - L_{ms} + 1.5L_m \tag{3.2}$$

$$L_{sq} = L_s - L_{ms} - 1.5L_m \tag{3.3}$$

Stator faz sargıları arasında oluşan indüktansların açısı rotor açısının iki katıdır. Fazlar arası indüktanslar Eşitlik 3.4, Eşitlik 3.5 ve Eşitlik 3.6'daki gibi ifade edilmektedir.

$$L_{AB} = 2L_s - 2L_{ms} - 3L_m \cos(2p\theta_r - 2\pi/3) \tag{3.4}$$

$$L_{BC} = 2L_s - 2L_{ms} - 3L_m \cos(2p\theta_r) \tag{3.5}$$

$$L_{AC} = 2L_s - 2L_{ms} - 3L_m \cos(2p\theta_r + 2\pi/3) \tag{3.6}$$

Burada L_s stator self-indüktansının ortalamasını , L_{ms} stator ortak indüktansını, L_m rotor çıkıntısından dolayı stator indüktanslarından birini, L_{AB}, L_{BC}, L_{AC} stator fazlar arası indüktanslarını tanımlamaktadır.

L_{sd} ve L_{sq} parametreleri Eşitlik 3.4, Eşitlik 3.5 ve Eşitlik 3.6 kullanılarak Eşitlik 3.7 ve Eşitlik 3.8'deki gibi elde edilmektedir.

$$L_{sd} = \frac{L_{ABmax}}{2} \tag{3.7}$$

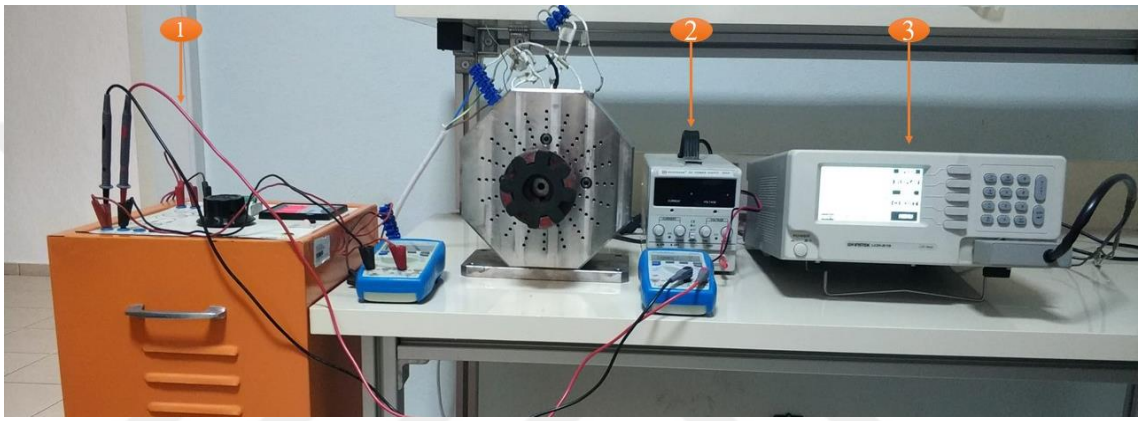
$$L_{sq} = \frac{L_{ABmin}}{2} \tag{3.8}$$

L_{ABmax} ve L_{ABmin} değerlerini elde etmek için LCR metre ölçüm cihazı kullanılmıştır. GW Instek LCR-819 kodlu bir LCR metre direnç ve indüktans ölçümü için kullanılmıştır. L_{AB} indüktansının maksimum ve minumum olduğu rotor konumları LCR metre ile belirlenmiştir. İşaretlenen konumlara göre A ve B fazları AA kaynağı ile beslenmiştir. Deneylerde uygulanan AA beslemesinin akım gerilim ve frekans değerleri ölçülmüş ve aynı işlemler üçer defa yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Maksimum

noktasındaki değerler ile minimum noktasındaki değerler Eşitlik 3.9 kullanılarak hesaplanmış ve L_{sd} ile L_{sq} değerleri elde edilmiştir.

$$L_{AB} = \frac{1}{2\pi f}\sqrt{(\frac{V}{I})^2 - 4R_s^2} \tag{3.9}$$

İndüktans ve direnç ölçümleri için oluşturulan deney düzeneği Şekil 3.24'te görülmektedir.



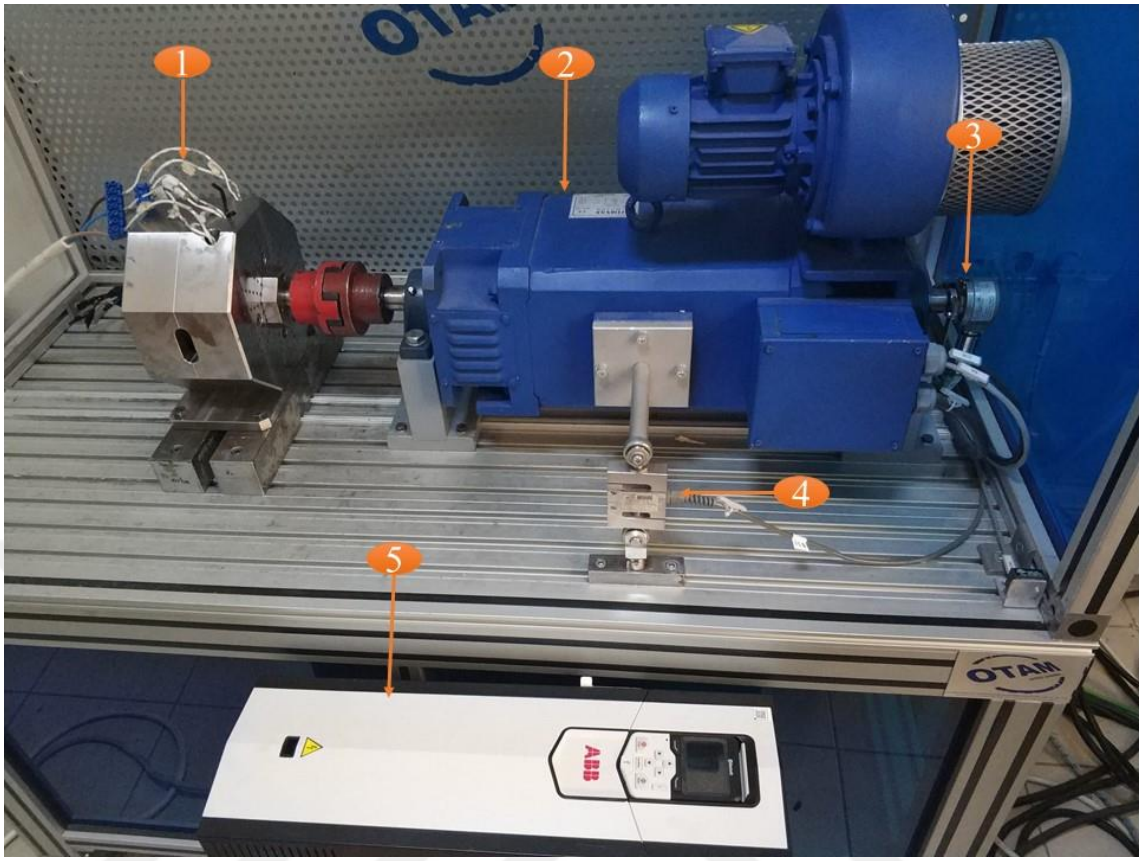
Şekil 3.24. Parametre deneyi düzeneği (1-DA güç kaymağı, 2-LCR metre, 3-Ototrafo)

Deney düzeneğinden oda sıcaklığında ölçülen akım ve gerilim değerleri sonucunda $L_{sd} = 6{,}399$ mH, $L_{sq} = 4{,}597$ mH ve $R_s = 0{,}39\ \Omega$ olarak hesaplanmıştır.

3.6.1.2. Performans Testleri ve Deney Düzeneği

Prototip motorun performans testleri 1000 d/d dan başlayarak nominal hız olan 5000 d/d hıza kadar 5 farklı hız koşulunda, %25 yükten başlayarak %115 yüke kadar 5 farklı yük koşulu için yapılmıştır. Performans testlerinin yapıldığı deney düzeneği Şekil 2.25'te görülmektedir.

Motor yükleme testlerinin güvenilir olarak yapılabilmesi için yazılım sistemi ve sürücüsü ile beraber yük motoru kullanılmaktadır. Yazılım ile prototip motora uygulanan yük kontrol edilebilmektedir ayrıca mil yükünü doğrulamak için 0-100 Nm aralığında ölçüm yapan bir yük hücresi kullanılmaktadır. Hız, akım ve gerilim gibi diğer parametrelerde sistem üzerinden ölçülebilmektedir. Prototip motorun kontrolü için ayrıca evrensel bir sürücü kullanılmıştır.

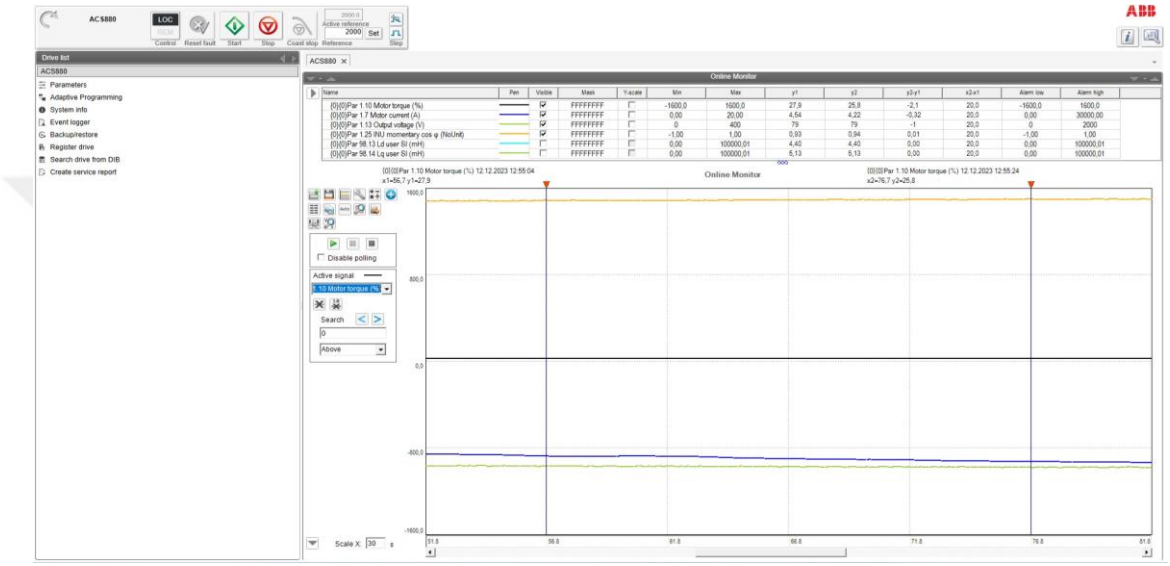


Şekil 3.25. Parametre deneyi düzeneği (1-EA-SMD-SRM, 2-Yük motoru 3-Hız enkoderi, 4-yük hücresi, 5-motor sürücüsü)

Deney setinde prototip motor ve yük motoru *1500 mm X 700 mm* ölçülerinde alüminyum malzemeden yapılmış platforma montajlanmaktadır. Platform üzerine çalışma alanını ortalayacak şekilde kızaklar yerleştirilmiştir. Kızaklar sayesinde üzerine yerleştirilen motorların milleri aynı eksene gelmektedir. Şekil 3.25'te prototip motor (1) ile yük motoru (2) yıldız kaplin ile bir birine bağlanmıştır. Yük motoru olarak 10 kW mil gücüne sahip bir DA motoru kullanılmıştır. DA motoru harici bir sürücü ünitesine sahiptir ve bu sürücü deney setine özel geliştirilen yazılım ile kontrol edilmektedir. Motor mil hızının belirlenmesi için bir hız enkoderi (Baumer EIL580 1024 darbe/devir) (3) kullanılmaktadır. Mil momentinin ölçümü için kuvvet kolu ile gövdeye bağlı olan 0-100 Nm aralığında ölçüm yapabilen bir yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresi IP66 sınıfında ve (-300° - +700 ^{o}) sıcaklık aralığında çalışabilmektedir.

EA-SMD-SRM, endüstriyel bir sürücü olan ABB ACS-880 serisi evrensel sürücü ile kontrol edilmiştir. Sürücü ile EA-SMD-SRM, Direct Torque Control (DTC) modunda sürülmüştür. DTC çalışma modunda yük değişimi ile Akım Başına Maksimum Moment-

MTPA sağlayan stator akım açısı yeniden hesaplanarak değişmektedir. Sürücü parametreleri ve ayarları sürücü üzerinde yer alan panelden kontrol edilebilmektedir. Ayrıca motora uygulanan akım ve gerilim gibi bilgiler anlık olarak panel üzerinden görülebilmektedir. Motor sürücü Drive Composer Entry 2.5 programı yardımıyla bilgisayara kolayca bağlanabilmekte ve kontrol edilebilmektedir. Drive Composer Entry 2.5 programı arayüzü Şekil 3.26'da görülmektedir.



Şekil 3.26. Drive Composer Entry 2.5 program ara yüzü

4. BÖLÜM

BULGULAR

Tez çalışmasının bu bölümünde önceki bölümlerde anlatılan yöntemler ile tasarlanan iki motor modelinin sonuçları incelenmiştir. Bulguların ilk bölümünde EA-SRM'nin optimizasyon yapılmadan önceki rotoru ile optimizasyon yapıldıktan sonraki rotor modeli karşılaştırılmıştır. Daha sonra optimizasyonu yapılmış rotor modelinin bariyerlerine SM yerleştirilmesi durumunda motor performansına olan etkisi incelenmiştir. SM'lerin farklı bariyerlerde ve hacimlerdeki durumu karşılaştırılmalı olarak araştırılmıştır. İkinci bölümde ise tasarımı yapılan EA-SMD-SRM'nin SEY analiz sonuçları verilmiştir. Motorun termal analizi SEY ve deneysel olarak incelenmiştir. EA-SMD-SRM'nin performans testleri farklı yük ve farklı hız koşullarında analiz edilmiştir. SEY sonuçları, deneysel çalışmalar ile karşılaştırılarak doğrulukları desteklenmiştir.

4.1. EA-SRM Analiz Sonuçları

EA-SRM'de öncelikle rotor tasarımı analitik hesaplamalar ile oluşturulmuştur. Oluşturulan rotor yapısı ÇAGA ile optimizasyona tabi tutulmuş ve hedeflenen ortalama moment ve moment dalgalanması sonuçlarına ulaşılmıştır. Optimizasyon sonucu oluşan rotor modelinde bariyerlere SM yerleştirilmesi durumu incelenmiştir.

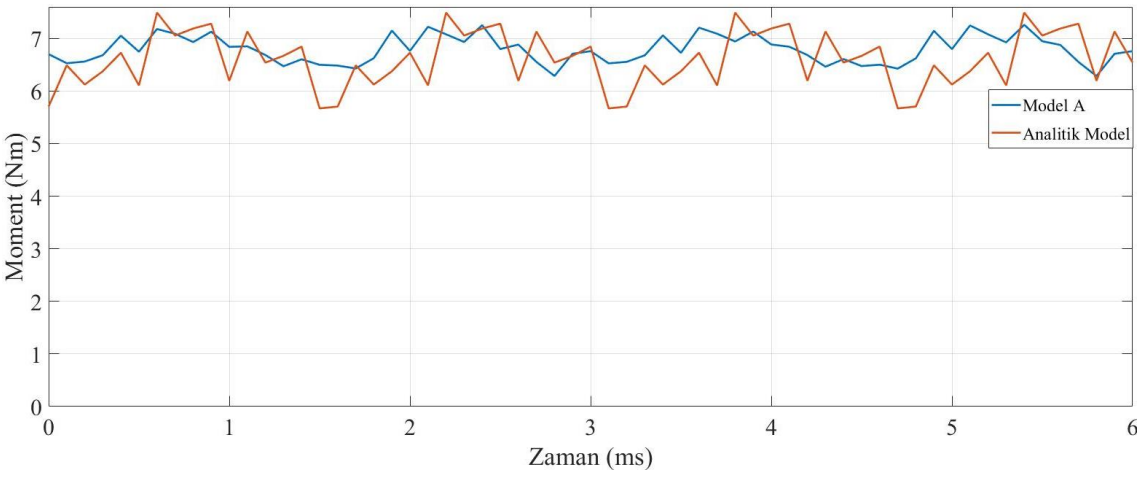
4.1.1. EA-SRM Rotor Optimizasyonu

Analitik olarak tasarımı yapılan rotor modelli EA-SRM (Analitik Model) ile rotor optimizasyonu yapıldıktan sonraki oluşan EA-SRM (Model A) Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'de görülmektedir. Her iki motora ait parametre değerleri Tablo 4.1'de görülmektedir.

Tablo 4.1. Analitik Model ve Model A parametre değerleri

Tanım	Parametre	Değer	
		Analitik Model	Model A
Giriş Gerilimi (V)	V_s	35.485	34.742
Güç Faktörü	$\cos(\varphi)$	0.467	0.454
Verim (%)	η	83.23	84.624
Demir Kaybı (W)	P_{fe}	165.584	135.018
Ortalama Moment (Nm)	T_{ort}	6.660	6.803
Moment Dalgalanması (%)	T_{dal}	27.338	10.604
Endüktans Farkı (d ve q eksenlerinde) (H)	$L_d - L_q$	104.360	103.047
Endüktans Oranı (d ve q eksenlerinde)	L_d/L_q	1.778	1.802

Optimizasyon sonucunda özellikle moment salınımı iyileştirilmiştir. Diğer parametrelerde; gerilim, güç faktörü, verim, demir kaybı ve $d-q$ eksenlerindeki indüktansların farkı ve oranında çok fazla bir değişim olmamıştır. Optimizasyonun hedefi doğrultusunda ortalama moment korunurken moment dalgalanması %10.604 değere düşürülmüştür. Hedeflenen rotor yapısı Model A ile elde edilmiştir. Analitik model ve Model A'nın moment/zaman grafikleri Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Analitik model ve Model A moment/zaman grafiği

4.1.2. EA-SRM'de SM Etkisi

Model A'daki yapının bariyerlerine SM yerleştirilerek etkisi incelenmiştir. Dokuz farklı rotor yapısının görünümü Şekil 3.5'te görülmektedir. Bariyerlere yerleştirilen SM'lerin hacimleri ve konumları motor performansı için oldukça önemlidir. SM'lerin yerleştirildiği bariyerler ve hacim bilgileri Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. SM'lerin konum ve hacim bilgileri

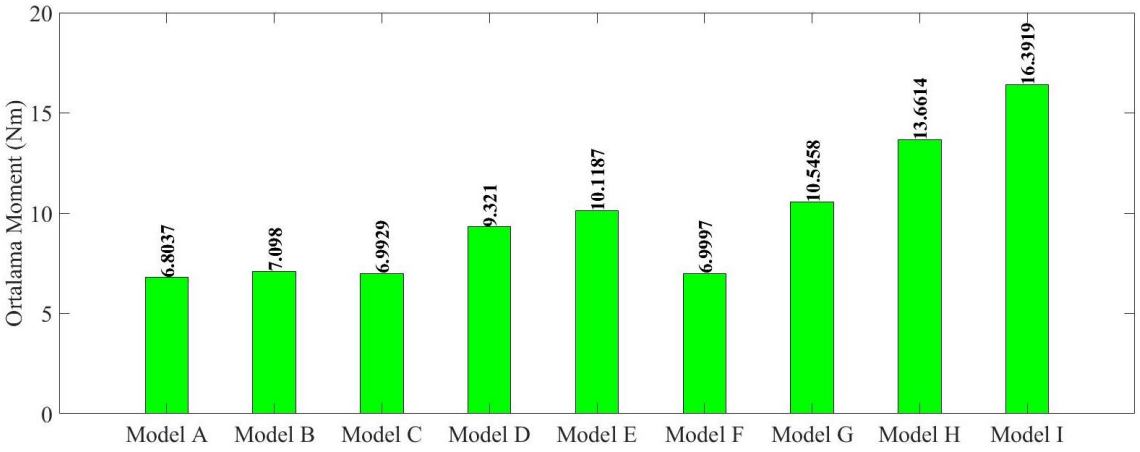
Rotor Modeli	Mıknatıs Yerleştirilen Bariyer				Bir Kutuptaki Toplam Mıknatıs Hacmi (mm^3)
	1	2	3	4	
Model A					SM yok
Model B	X				1033.232
Model C		X			1766.555
Model D	X	X			2799.788
Model E		X	X		4502.583
Model F				X	5677.954
Model G			X	X	8413.982
Model H		X	X	X	10180.538
Model I	X	X	X	X	11213.770

SEY ile yapılan analizlerde moment, moment dalgalanması, güç faktörü, verim ve faz gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Model A'ya SM yerleştirilmesi ile konuma bakılmaksızın ortalama momentte artış olduğu analiz sonuçlarından elde edilmektedir. Moment dalgalanması SM desteği ile birlikte hacmine ve konumuna bağlı olarak artmaktadır. Tablo 4.3'te 9 farklı rotor yapısına sahip motorların nominal koşulları olan 5000 d/d ve tam yük altındaki analiz sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.3. Farklı rotor yapılarındaki motorların karşılaştırılması

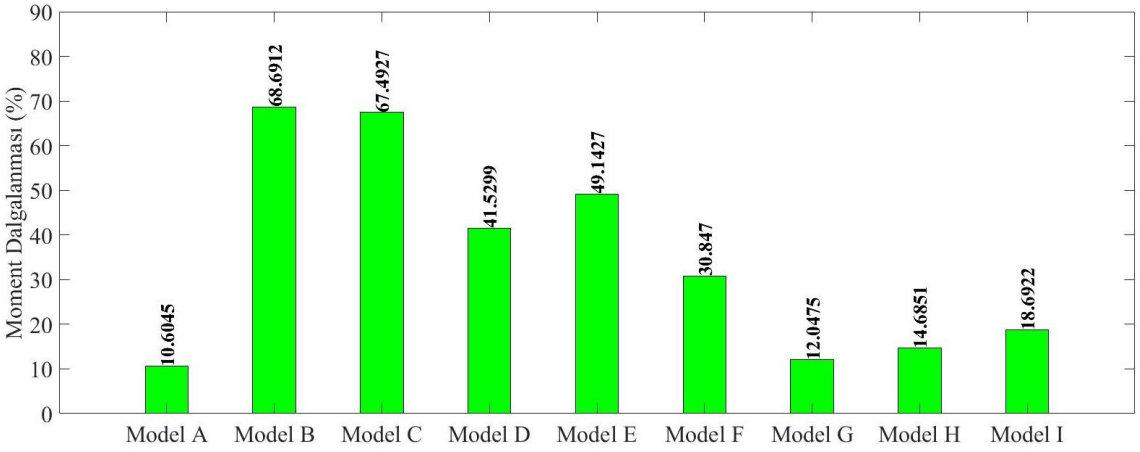
Rotor Modeli	Giriş Gücü (W)	Çıkış Gücü (W)	Moment (Nm)	Moment Dalgalanması (%)	PF	Verim (%)	Faz Gerilimi (V)
Model A	4209.45	3562.04	6.803	10.604	0.453	84.624	31.86
Model B	4317.09	3716.50	7.098	68.691	0.551	86.088	29.40
Model C	4252.33	3661.00	6.992	67.492	0.568	86.094	26.09
Model D	5488.04	4880.46	9.321	41.529	0.704	88.929	29.75
Model E	5881.44	5297.77	10.118	49.142	0.742	90.076	26.47
Model F	4250.51	3664.66	6.999	30.847	0.586	86.217	24.50
Model G	6105.32	5521.34	10.545	12.047	0.760	90.435	26.47
Model H	7745.82	7152.88	13.661	14.685	0.811	92.345	30.04
Model I	9171.18	8582.30	16.391	18.692	0.878	93.579	32.25

Tek bariyerinde SM olan üç motor Model B, Model C ve Model F'de ortalama moment artışı Model A'ya göre az olmaktadır. SM desteği tek bariyerde olan motorlarda ortalama moment yaklaşık olarak aynıdır. SM'nin konumu hava aralığından uzaklaştıkça hacim artsa bile ortalama moment artışı dengelenmektedir. SM'ler bariyerlere tek tek yerleştirildiğinde ortalama moment üzerindeki etkisi az olmaktadır. Ancak SM'nin birden fazla bariyere yerleştirilmesi ortalama momenti daha fazla artırmaktadır. SM tek başına Bariyer 1'e yerleştirildiğinde, ortalama moment artışı Model A'ya kıyasla %4.32 artmıştır. Model H'de alt üç bariyerde SM yerleştirilmesi sonucunda ortalama moment 13.6614 Nm olmaktadır. SM'ın birinci bariyere de yerleştirilmesi ile Model I oluşmakta ve ortalama moment 2.7305 Nm artmaktadır. Bu durum SM'lerin birden fazla bariyere yerleştirilmesi ile ortalama momenti daha fazla etkileyeceğini göstermektedir. Şekil 4.2'de 9 farklı motor modelinin ürettikleri ortalama momentleri görülmektedir.



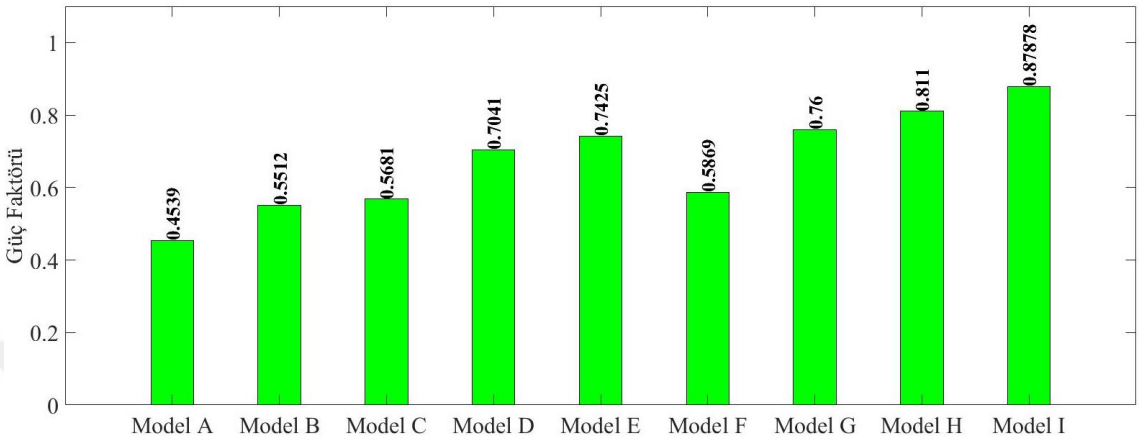
Şekil 4.2. Dokuz farklı motor modelinin ortalama momenti

SM'lerin bariyerlere konumlandırılmasının moment dalgalanması üzerindeki etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Fakat SM'lerin hacimleri ile moment dalgalanması arasındaki ilişki net bir şekilde ifade edilememektedir. Tek bariyerinde SM olan Model B ve Model C'nin moment dalgalanması diğerlerine göre yüksektir bunun nedeni olarak hava aralığına yakın olmaları görülmektedir. Birden fazla SM içeren modellerde ise hava aralığından uzaklaştıkça moment dalgalanması azalmaktadır. Hava aralığından en uzak bariyerlere (Bariyer 3-4) yerleştirilen SM yapısı olan Model G'de moment dalgalanması Model A'ya göre %1.443 artmaktadır. Ortalama momenti artırmak için Bariyer 2'ye SM yerleştirilmesi, moment dalgalanmasının %2.6376 artmasına neden olmaktadır. Ortalama momentin maksimum değere ulaştığı Model I'da moment dalgalanması Model A'ya göre %8.0877 artış göstermektedir. 9 farklı motor modelinde oluşan moment dalgalanması yüzde olarak Şekil 4.3'te görülmektedir.



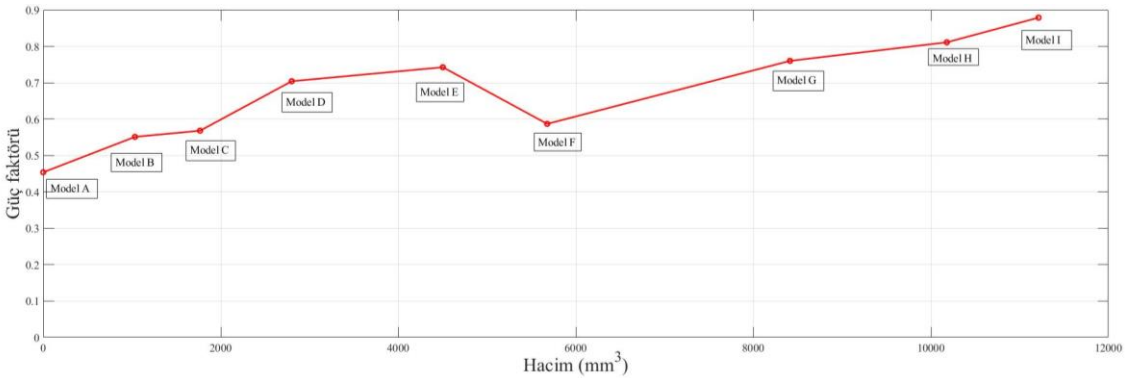
Şekil 4.3. Dokuz farklı motor modelinin moment dalgalanması

SRM tasarımında en büyük problemlerin başında EA-SRM'de olduğu gibi güç faktörü gelmektedir. Tablo 4.3 ve Şekil 4.4'ten bariyerlere SM yerleştirilmesi sonucunda güç faktörünün iyileştiği görülmektedir.



Şekil 4.4. Dokuz farklı motor modelinde güç faktörü

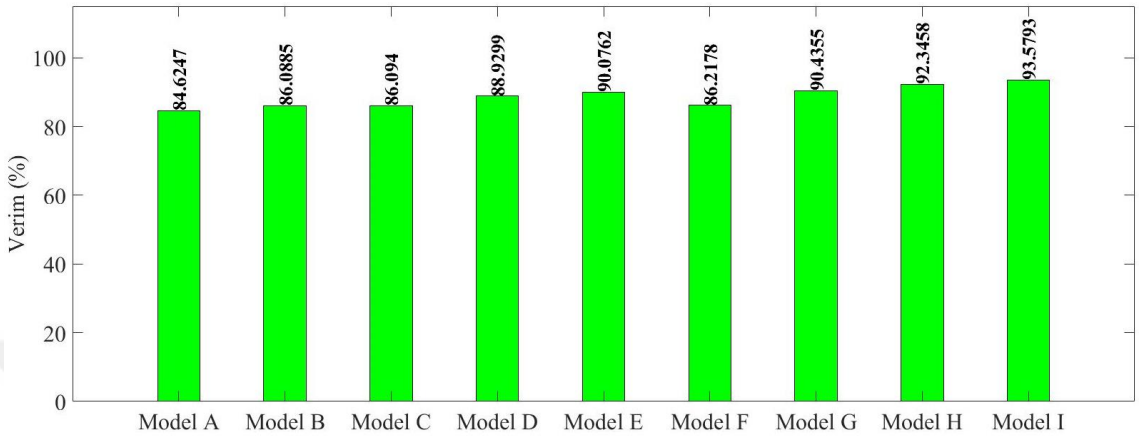
SM hacminin arması ile güç faktörünün artığı görülmektedir. Fakat Model F'de güç faktörü düşmektedir çünkü sadece Bariyer 4'te SM vardır ve bu bariyer hava aralığından en uzak bariyerdir. SM'lerin tek bir bariyere yerleştirildiği modellerde, SM hacmi arttıkça güç faktörü değeri de artmaktadır. Güç faktörü ile SM hacmi arasındaki ilişki Şekil 4.5'de görülmektedir. Güç faktörünün maksimum değeri, SM'lerin tüm bariyerlere yerleştirildiği Model I'da elde edilmektedir.



Şekil 4.5. Güç faktörü/SM hacim grafiği

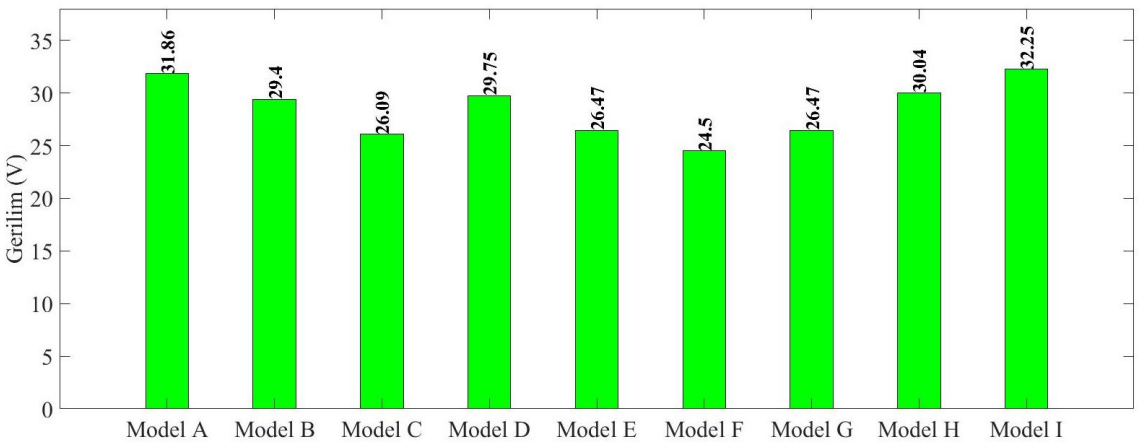
Tablo 4.3'e bakıldığında Model B, Model C ve Model F'de relüktans rotor yapısına kıyasla verimliliği %2 oranında artığı görülmektedir. SM bir bariyer içerisine yerleştirildiğinde, konumunun hava aralığından uzaklaşması ve hacminin artması verimlilik artışını çok fazla etkilememektedir. Model D, Model E ve Model G'de SM'ler iki bariyere yerleştirilmiştir. Hava aralığına yaklaştıkça verimlilik artmaktadır. SM'ler

tüm bariyerlere yerleştirildiğinde, motorun verimliliği önemli ölçüde artmakta ve %93.5793'e ulaşmaktadır. Dokuz farklı rotor modelinde motorun verim durumu Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6. Dokuz farklı motor modelinde verim

Model A'da indüklenen gerilim değeri 31.86 V olarak analiz edilmiştir. İndüklenen gerilim değeri Model I'da artmasına rağmen SM'li diğer motor yapılarında azalmaktadır. Özellikle tek bariyerde SM içeren yapılar olan Model B, Model C ve Model F'nin indüklenen gerilim değerlerine bakıldığında mıknatıs konumunun hava aralığından uzaklaşması ile indüklenen gerilim değeri azalmaktadır. Model F'de indüklenen gerilim değeri Model A'ya göre %23.10 oranında azalmaktadır. Gerilim değerinin önce azalıp sonra artmasının nedenini anlamak için fazör diyagramındaki akım ile gerilim ilişkisine bakılması önemlidir. SM hacminin artması ile beraber akım ile gerilim arasındaki açı değişmekte ve akım sabit olduğu için gerilim değeri değişmektedir. Dokuz farklı rotor modelinde motorda indüklenen gerilim grafiği Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7. Dokuz farklı motor modelinde indüklenen gerilim

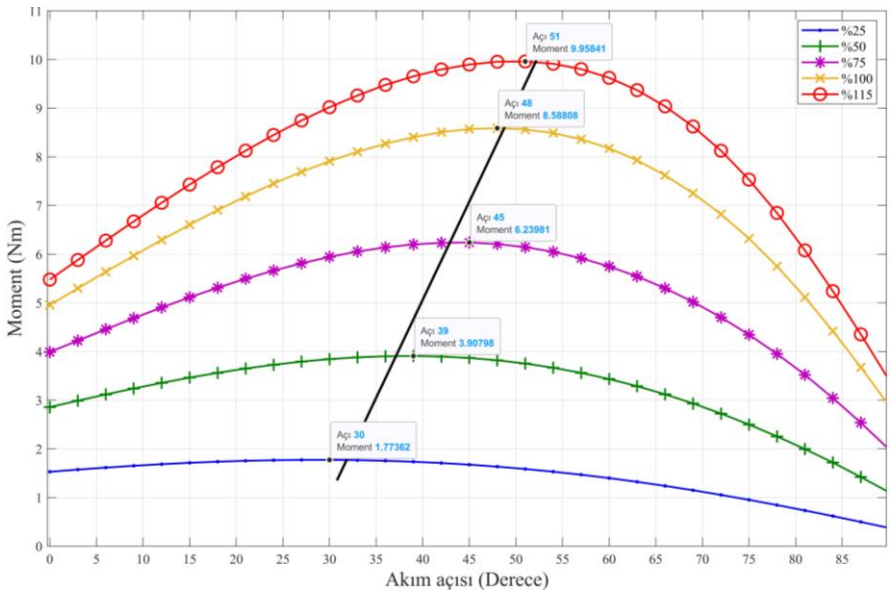
4.2. EA-SMD-SRM Analiz Sonuçları

EA-SMD-SRM'nin tasarımı optimizasyon hedefine ulaşıldıktan sonra tamamlanmıştır. Üretim aşaması öncesi motorun performans ve parametrik analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca motor performansını doğrudan etkileyen termal analizler de yapılmıştır. EA-SMD-SRM'nin yapısal olarak üretime uygunluk durumu yine SEY ile kontrol edilmiştir.

4.2.1. EA-SMD-SRM SEY Sonuçları

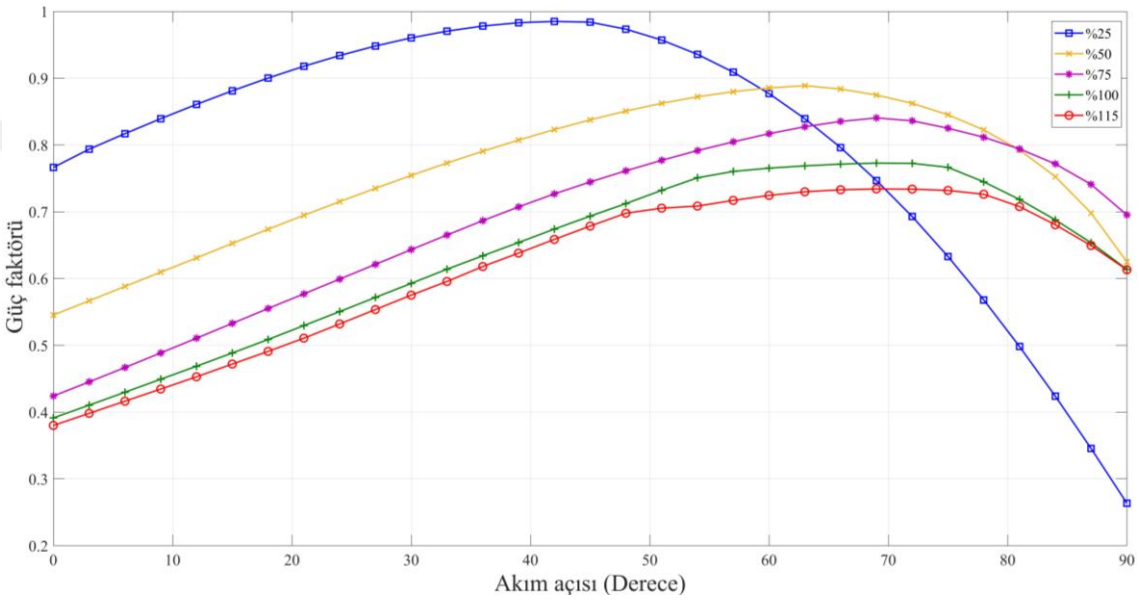
Üretim öncesinde motor performansını değerlendirmek için moment, güç faktörü, çıkıntı oranı ve verimin MTPA açısı ile değişimi incelenmiştir. Farklı yük koşulları altında MTPA açısı 0 dereceden başlayarak 3'er derecelik artışla 120 dereceye kadar artırılmış ve sonuçlar grafiksel olarak elde edilmiştir. MTPA açısının parametrik analizi optimizasyon çalışmasında da olduğu gibi 1/8 modelde 5 ms süresince yapılmıştır.

Momentin akım açısı ile değişimi Şekil 4.8'de görülmektedir. Farklı yük koşuları için gerçekleştirilen analizler sonucunda momentin maksimum olduğu noktalardan çizilen eğriye Akım açısı eğrisi denmektedir. Akım açısı eğrisine bakıldığında EA-SMD-SRM'nin yükünün artması ile birlikte MTPA açısı da artmaktadır. Motor yükünün %25 olduğu durumda akım açısı 30^0 iken motor %115 yük koşuluna getirildiğinde akım açısı 50^0 olmuştur. Nominal yük koşulunda akım açısı 48^0, %50 ve %75 yük koşullarında ise sırası ile 38^0 ve 44^0 olduğu analizler ile bulunmuştur.



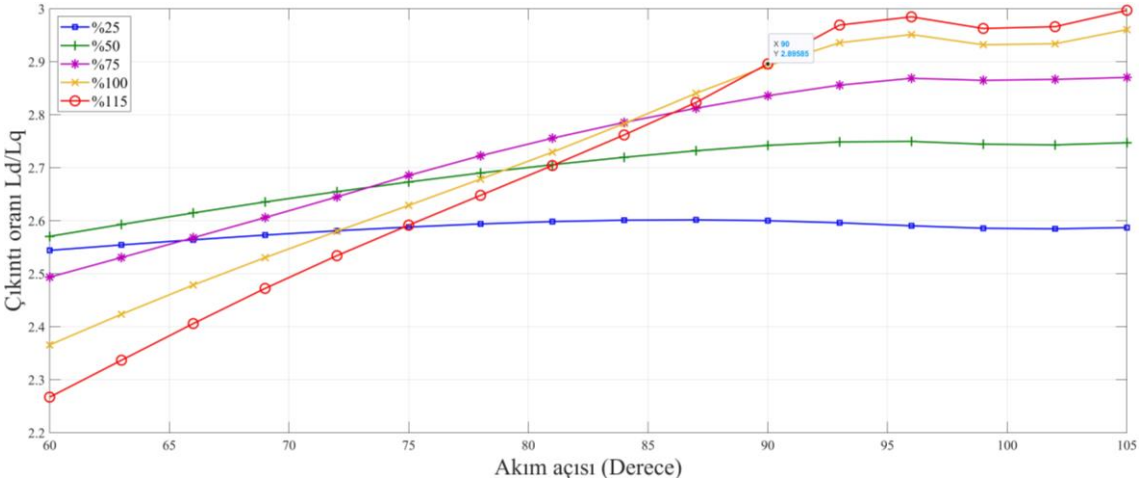
Şekil 4.8. EA-SMD-SRM moment akım açısı grafiği

Güç faktörü, SRM'ler için önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır. EA-SMD-SRM'nin simülasyon sonuçlarından elde edilen güç faktörü akım açısı grafiği Şekil 4.9'dan görülmektedir. %25 yük koşulunda güç faktörünün akım açısı ile değişimi diğer yük koşullarına göre farklı olmuştur. Düşük moment ve güç üretiminde kayıpların kısmen fazla olması bunun nedeni olarak görülmüştür. Diğer 4 farklı yük koşulları için güç faktörü akım açısı eğrileri benzerlikler göstermektedir. Akım açısı düşük yük koşulu haricinde 65^0 ile 70^0 aralığında maksimum değerlerine ulaşmıştır.



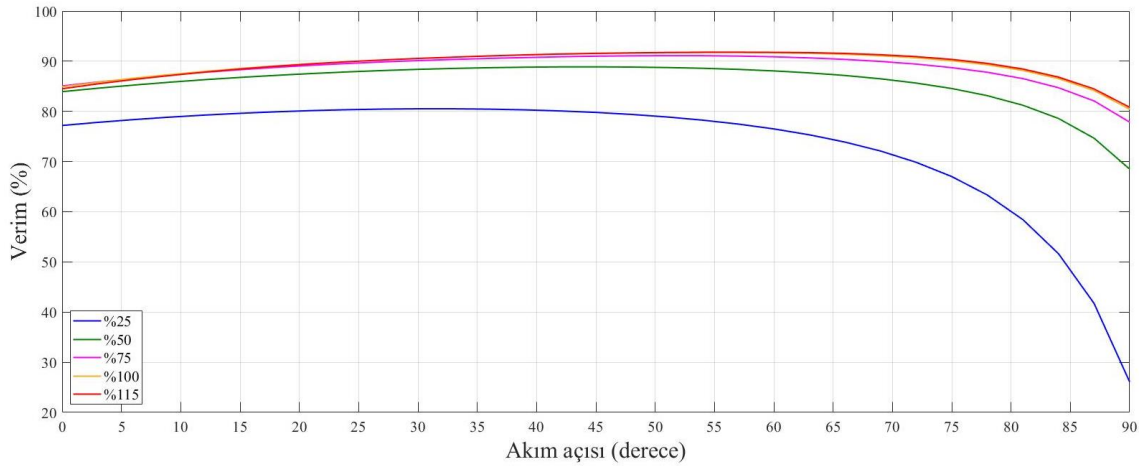
Şekil 4.9. EA-SMD-SRM güç faktörü akım açısı grafiği

SRM motorların rotor tasarımı ve optimizasyonu yapılırken dikkat edilen en önemli parametrelerin başında çıkıntı oranı gelmektedir. EA-SMD-SRM'de çıkıntı oranının akım açısı ile değişimi Şekil 4.10 görülmektedir. Akım açısı 90° olduğu noktadan sonra motorun yük durumu ile çıkıntı oranı orantılı olarak görülmektedir. Yük durumunun %25 olduğu koşulda çıkıntı oranının neredeyse aynı değerlerde kaldığı görülmüştür.



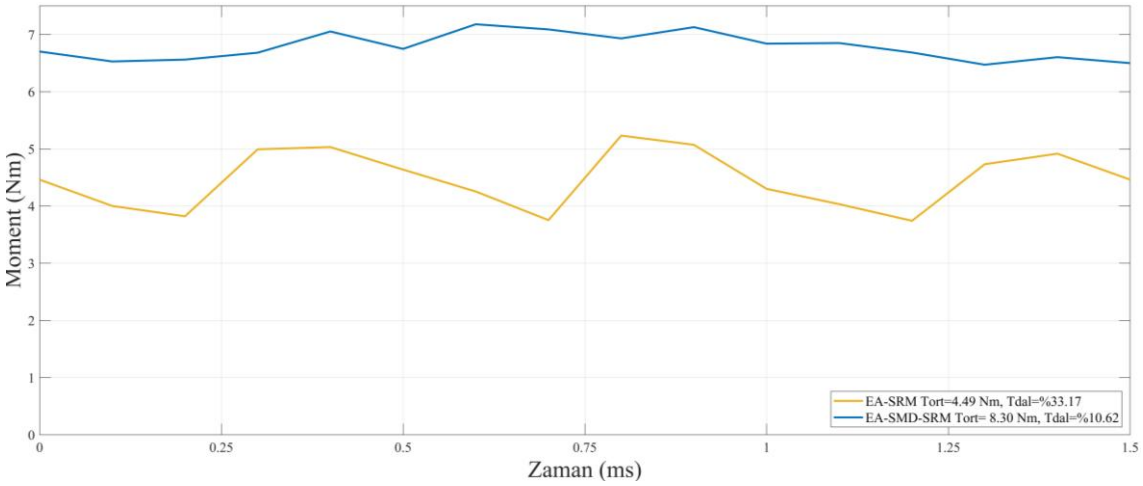
Şekil 4. 10. EA-SMD-SRM çıkıntı oranı akım açısı grafiği

SRM tasarımında en çok dikkat edilen parametrelerden biri de verim olmuştur. Rotor üç parça halinde tasarlanarak kısmen rotordaki demir kayıpları azaltılmıştır. EA-SMD-SRM'de verim parametresi %25 yük koşulu haricinde, akım açısının 0^0-80^0 aralığında verimin %80-%90 değerleri arasında olduğu Şekil 4.11'de görülmektedir. Yük koşulunun %25 olduğu durumda ise akım açısının 0^0-70^0 olduğu aralıkta verim %70-%80 değerleri arasında seyretmiştir.



Şekil 4.11. EA-SMD-SRM verim akım açısı grafiği

Nominal yük ve hız koşulunda EA-SMD-SRM'nin relüktans momentinin ortalama değeri 4.49 Nm ve moment dalgalanması %33.17 olarak SEY analiz sonucundan elde edilmiştir. EA-SMD-SRM moment eğrisi ile SM etkisinin kaldırıldığı yani sadece relüktans özelliğinden elde edilen moment eğrileri Şekil 4.12'de görülmektedir. Ayrıca MTPA açıları EA-SMD-SRM'de 48° iken SM kaldırılan ve EA-SRM olan motorda ise 61° olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.12. EA-SMD-SRM SM'li ve SM'siz moment grafikleri

4.2.2. EA-SMD-SRM Performansının SEY ve Deneysel Sonuçları

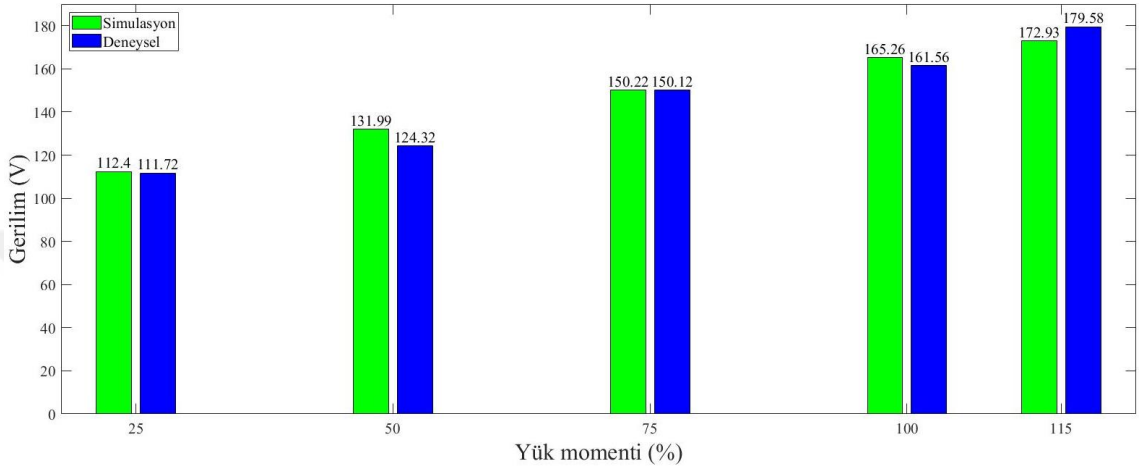
EA-SMD-SRM performans testleri farklı yük ve farklı hız koşulları için yapılmıştır. Test sonuçlarında gerilim, güç faktörü, mil gücü, verim ve moment dalgalanması değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Farklı yük koşulundaki performans testleri öncelikle nominal hızda gerçekleştirilmiştir. Motor performansı 5 farklı yük koşulu (25%, 50%, 75%, 100%, 115%) için incelenmiştir. EA-SMD-SRM motorun SEY ve deneysel sonuçları Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. EA-SMD-SRM'nin SEY ve deneysel sonuçlar

Tanım	Parametre	SEY Sonuçları	Deneysel Sonuçlar
Çıkış Gücü (W)	P_o	4346.82	4046.27
Verim (%)	η	91.02	90.35
Güç Faktörü	$\cos\varphi$	0.80	0.77
Hız (d/d)	n_s	5000	5000
Giriş akımı (A)	I_s	12	12
Giriş Gerilimi (V)	V_s	165.26	161.56
Moment (Nm)	T_{ort}	8.30	7.72
Moment Dalgalanması (%)	T_{dal}	10.62	9.44

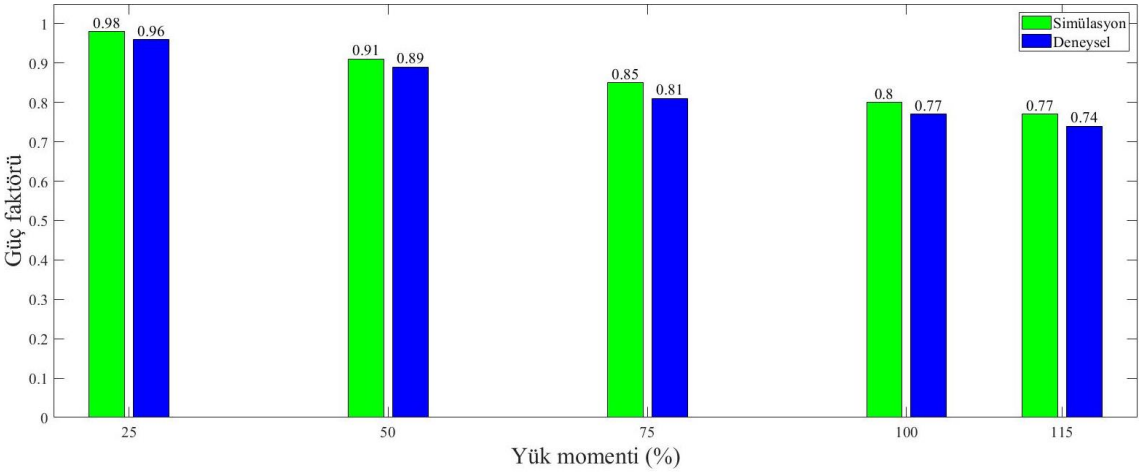
EA-SMD-SRM'nin deneysel çalışmasında testler yapılırken SEY sonuçları ile karşılaştırmanın daha doğru olması açısından akımlar referans alınarak yüklemeler gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle yük testleri prototip motorun giriş akımı 3A, 6A, 9A, 12A ve 13.8A olacak şekilde yapılmıştır.

Nominal hız ve yükte simülasyon sonucu ile deneysel sonuçlar arasında 3.50 V ‘lik bir fark oluşmaktadır. Sadece aşırı yük durumunda deneysel sonuç gerilim değeri simülasyon geriliminden fazla olarak ölçülmüştür. En büyük gerilim farkı %50 yük durumunda oluşmaktadır. Nominal hız için yük değişiminin simülasyon ve deneysel sonuçları Şekil 4.13’te görülmektedir.



Şekil 4.13. Nominal hızda gerilim/yük momenti grafiği

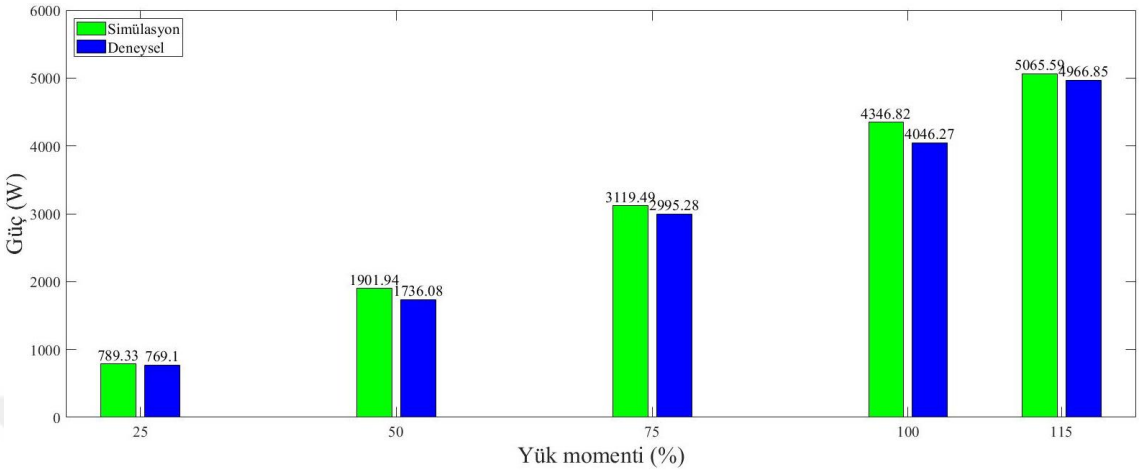
Şekil 4.14’e hem simülasyon hem de deneysel sonuçlardan motora uygulanan yükün artmasıyla güç faktörünün azaldığı görülmektedir. EA-SMD-SRM'de yük azaldıkça omik çalışmaya doğru bir yaklaşım söz konusudur. Simülasyon ve deneysel sonuçlar nominal çalışma koşullarında karşılaştırıldığında 0.03'lük bir fark gözlemlenmiştir.



Şekil 4.14. Nominal hızda güç faktörü/yük momenti grafiği

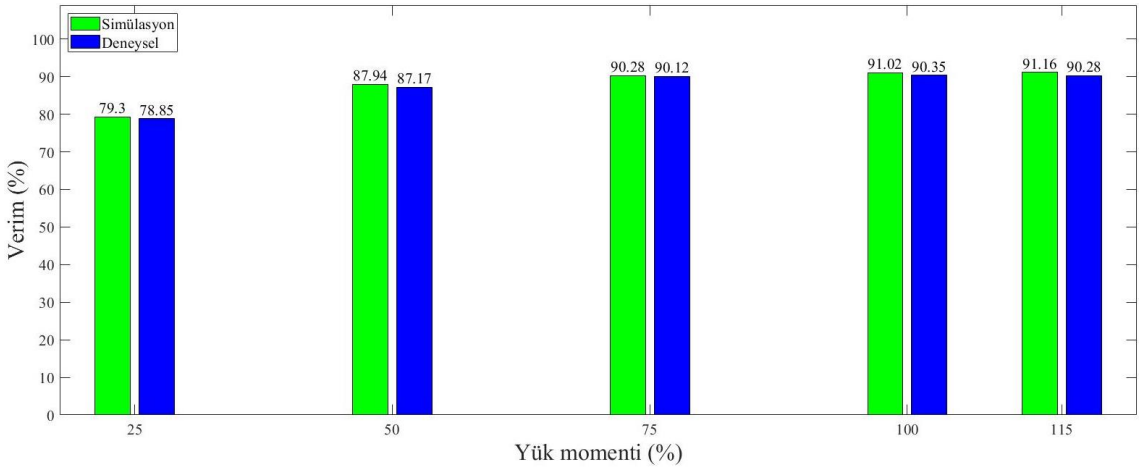
Simülasyon sonuçları ile nominal çalışma koşullarında yapılan deneysel ölçümler karşılaştırıldığında mil gücü farkının 300.55 W olduğu görülmektedir. Deneysel verilerden elde edilen mil gücünün simülasyondan elde edilen gücün %93.08'ine denk

geldiği Şekil 4.15'den hesaplanabilmektedir. Şaft gücünde %6.92'lik bir sapma değeri kabul edilebilir bir fark olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 4.15. Nominal hızda güç/yük momenti grafiği

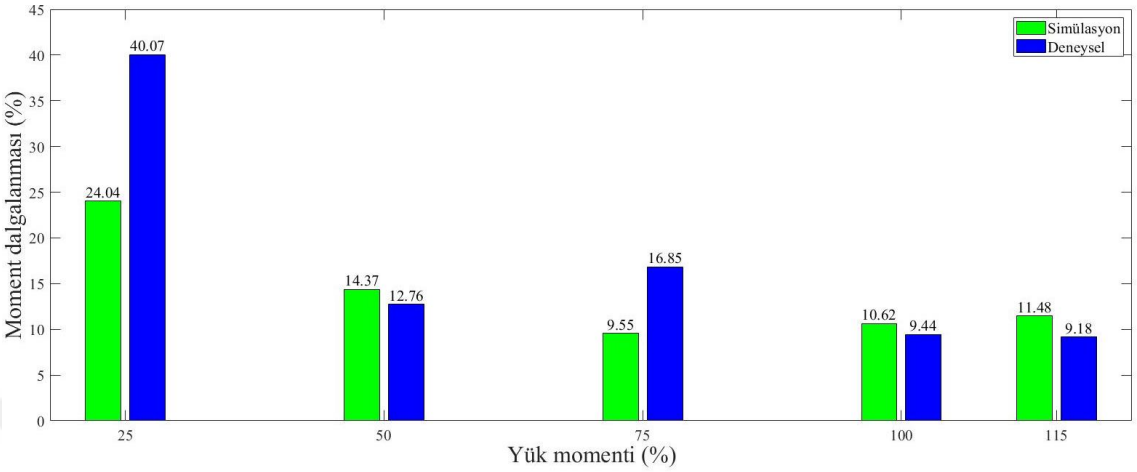
Nominal hız durumunda EA-SMD-SRM'nin simülasyon ve deneysel analizlerinden elde edilen verim verilerine bakıldığında yük durumu arttıkça verimin arttığı Şekil 4.16'dan görülmektedir. Nominal yük ile motor yüklendiğinde simülasyon ile deneysel değerler arasındaki fark %0.67 olarak görülmektedir. EA-SMD-SRM, %75 yük seviyesi ve üzerinde hem simülasyonlarda hem de deneysel sonuçlarda %90 verimi aşmaktadır.



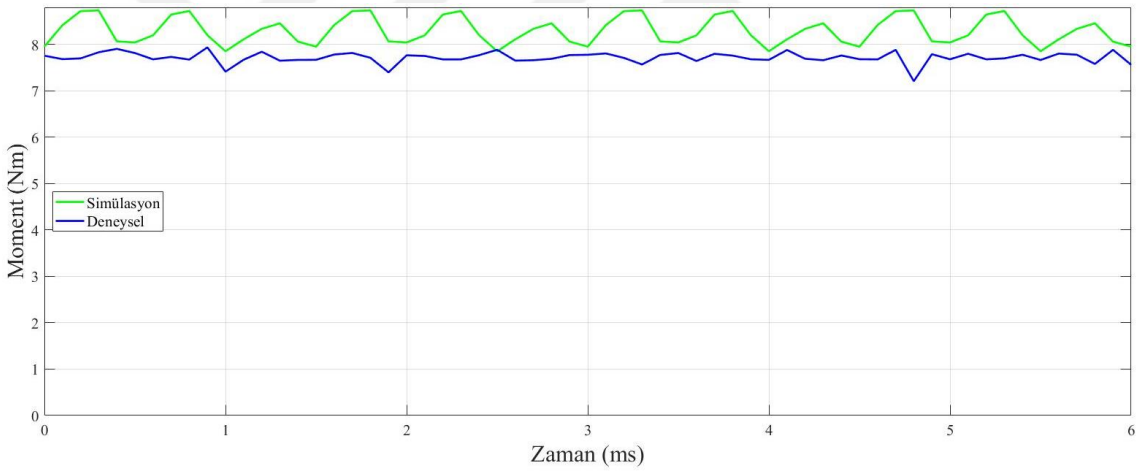
Şekil 4.16. Nominal hızda verim/yük momenti grafiği

Nominal hız ve yük durumunda deneysel sonuçlarda moment dalgalanması %9.44 olarak ölçülmüştür, simülasyon analizlerinde ise %10.62 olarak elde edilmiştir. Motor yüklendikçe moment dalgalanmasının azaldığı nominal yük ve aşırı yük durumlarında görülmektedir. Özellikle %25 yük durumunda deneysel ölçümlerden elde edilen moment dalgalanması analiz sonucunun oldukça üstünde olduğu Şekil 4.17'den görülmektedir.

Nominal hız durumunda SEY ve deneysel sonuçların moment eğrileri Şekil 4.18'de görülmektedir.

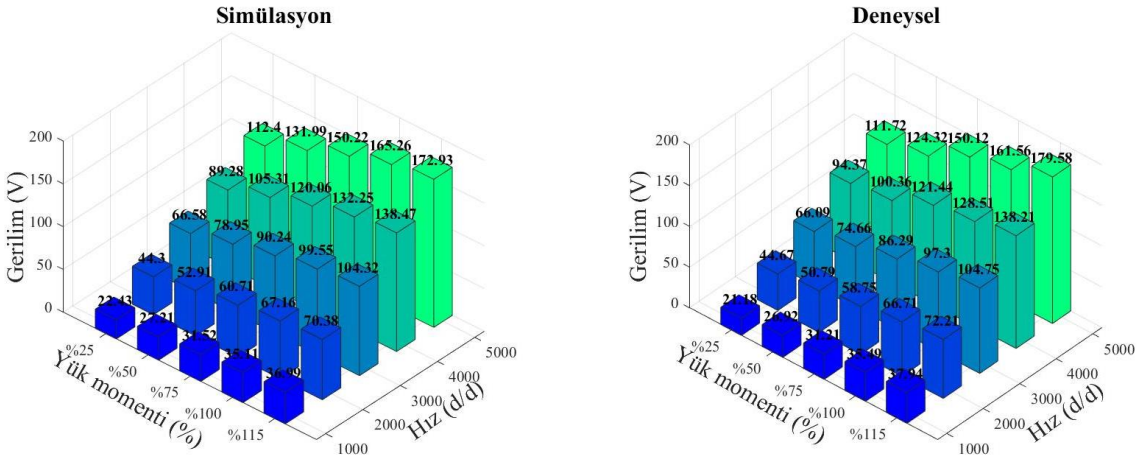


Şekil 4.17. Nominal hızda moment dalgalanması/yük momenti grafiği



Şekil 4.18. Nominal hızda moment grafiği

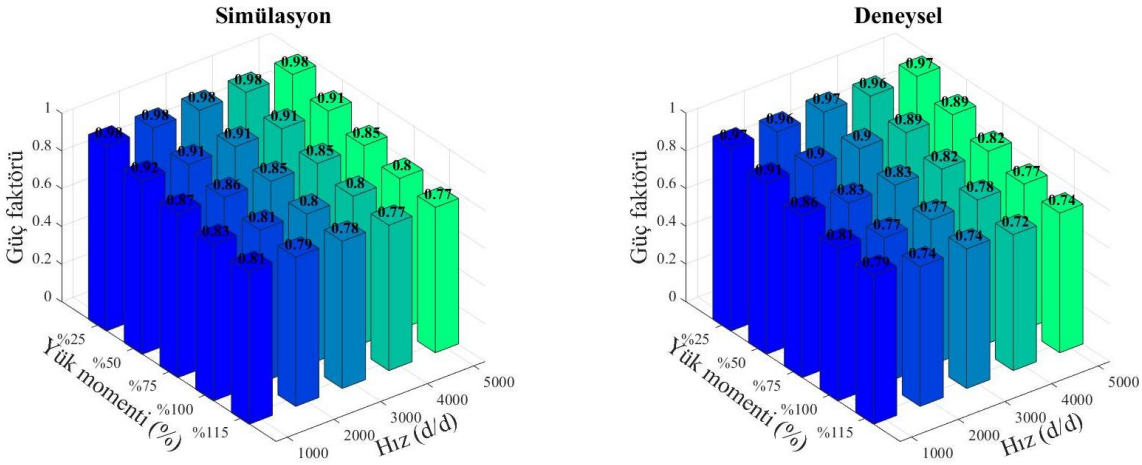
Simülasyon analiz ve deneysel çalışmalar farklı yük durumlarının yanında farklı hız durumları içinde gerçekleştirilmiştir. Gerilim, güç faktörü, güç ve verim grafikleri farklı hız durumları ve farklı yük durumları için grafiksel olarak karşılaştırmalı verilmiştir. Şekil 4.19 incelendiğinde hem hız hem de yük artışının gerilimi arttırdığı simülasyon ve deneysel sonuçlardan açıkça görülmektedir. Gerilimdeki artış yüke bağlı olarak %37'dir. Aynı hızlarda gerilim yüke göre kısmen artmaktadır. Frekans değişimi ile hız değiştiği için hız kademe artışlarında gerilim yaklaşık olarak aynı oranlarda kademeli olarak artmaktadır.



(a) (b)

Şekil 4.19. (a) simülsayon (b) deneysel farklı hız ve yük durumları için gerilim grafikleri

Yük durumu arttıkça ters orantılı olarak güç faktörünün azaldığı Şekil 4.20'de görülmektedir. EA-SMD-SRM'de yük sabit tutulup hız artırılırsa güç faktörü neredeyse sabit kalmaktadır. Özellikle düşük yüklerde motorun güç faktörü yüksek olmakta yük arttıkça ise hız fark etmeksizin azalmaktadır. Yükün %25'ten %115'e çıkması ile güç faktörü simülasyon sonuçlarına göre %21.42 deneysel sonuçlara göre ise %23.71 azalmaktadır. Simülasyon ile deneysel çalışma arasındaki fark %2.29 olmaktadır ve ihmal edilebilir bir değer olarak görülmektedir.

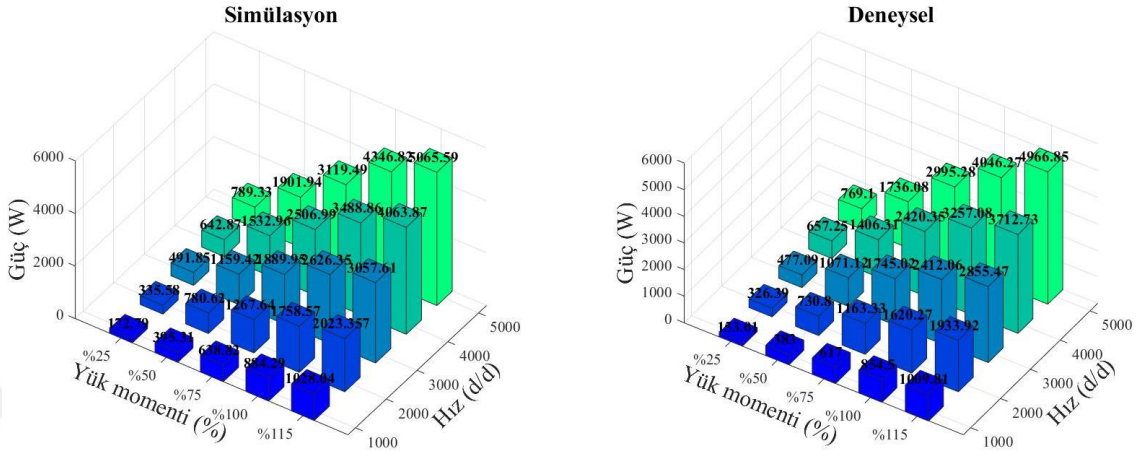


(a) (b)

Şekil 4.20. (a) simülsayon (b) deneysel farklı hız ve yük durumları için güç faktörü grafikleri

Şekil 4.21'den görüldüğü üzere sabit yükte hızın artması veya sabit hızda yükün artması motorun mil gücünü hem simülasyon hem de deneysel sonuçlarda artırmaktadır. Prototip EA-SMD-SRM'de nominal yük durumunda motorun hızının artması mil gücünü

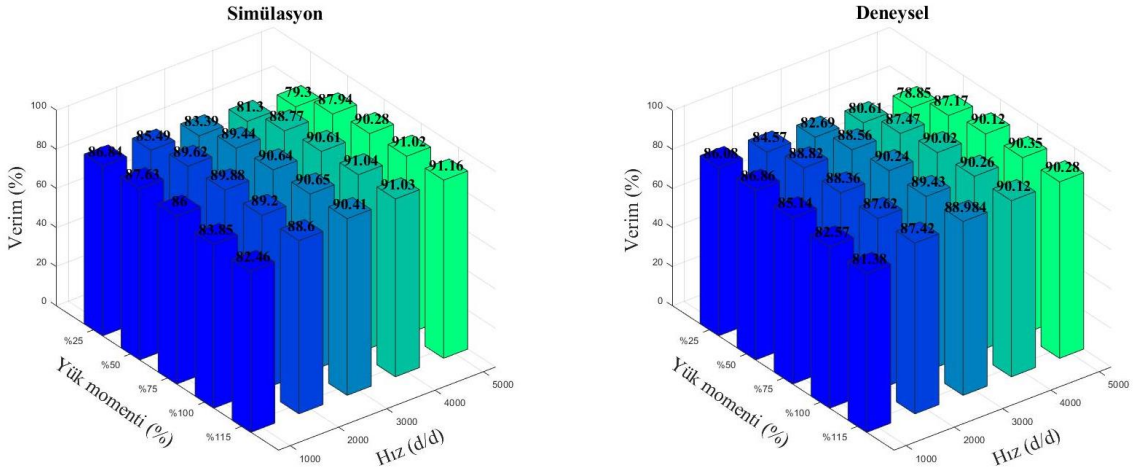
854.5 W değerinden 4046.27 W değerine çıkarmaktadır. Nominal yükte hızın 1000 d/d hızdan 5000 d/d hıza çıkması ile güç artışı %473.52 olmaktadır.



(a) (b)

Şekil 4.21. (a) simülsayon (b) deneysel farklı hız ve yük durumları için güç grafikleri

Simülasyon ve deneysel grafikler incelendiğinde 1000 d/d hızında verimin yük arttıkça azaldığı Şekil 4.22'den görülmektedir. Verim 1000 d/d'da simülasyon sonuçlarında 4.38% azalırken deneysel sonuçlarda %4.7 azalmaktadır. Motorun hızı arttıkça motorun yükü de artırılırsa verim nominal yüke kadar artmaktadır. Motor yükü %75 ve üzeri durumlara geldiğinde hızın artması ile verimde artmaktadır.



(a) (b)

Şekil 4.22. (a) simülsayon (b) deneysel farklı hız ve yük durumları için verim grafikleri

5. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında temel hedef EA-SMD-SRM'yi analitik ve üç boyutlu olarak tasarlamak, prototip üretimi ile deneysel olarak doğrulamaktır. Bu amaçlar doğrultusunda özgün bir motor tasarımı yapılmıştır.

5.1. Tartışma

SRM son yıllarda piyasaya hakim konumda bulunan indüksiyon motorlarına alternatif olmaktadır. Özellikle rotorunda bakır bulunmaması kayıplarını ve rotorun ısınmasını azaltmaktadır. Sağlam yapısı ve üretiminin kolay olması gibi özellikleri ile tercih nedenleri arasında yer almaktadır. Fakat SRM'lerin en büyük problemlerinin başında güç faktörünün düşük olması gelmektedir. SRM'lerde güç faktörünü iyileştirmek için SM'ler kullanılmaktadır.

Son yıllarda artan mıknatıs maliyetleri ile birlikte araştırmacılar ve üreticiler mıknatıs kullanımını azaltma yolunu tercih etmektedir. Araştırmacıların bir kısmı sargılı yapıyı tercih ederken bir bölümü ise relüktans momenti ile birlikte SMD yapıyı tercih etmektedir. SRM'ler rotorunda bakır bulunmaması ve bariyerlerin oluşturduğu hava sirkülasyonunun etkisi ile soğuk rotorlu motorlar olarak bilinmektedir. Bu avantajları göz önüne alındığında araştırmacılar için SMD-SRM'ler oldukça ilgi çekici hale gelmektedir.

Radyal akılı motorlar fabrikasyon işlemlerinin kolaylığı açısından oldukça tercih edilir konumda bulunmaktadır. Gelişen teknolojiler ile birlikte yüksek güç yoğunluğu ve küçük hacim gibi özellikleri de EA motorlara olan ilgiyi artırmaktadır. Ayrıca hava aralığının ayarlanabilir olması yüksek verim EA motorların avantajları arasında gösterilmektedir.

EA motorlar ve SRM'ler son yıllarda araştırmacılar için popüler olsa da üreticiler henüz aynı ilgiyi göstermemektedir. EA motorlarda statorun laminasyonlu olarak üretimi

oldukça zor olmaktadır. Ayrıca EA-SRM'nin rotor üretimi çok hassas bir çalışma gerektirmekte ve bir çok zorluğu bir arada bulundurmaktadır.

5.2. Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında EA-SMD-SRM tasarımı hedeflenmiştir. Düşünülen motorun tasarımında rotor topolojisi üzerine odaklanılmıştır. Özgün bir rotor tasarımı gerçekleştirilmiştir. EA-SMD-SRM'nin tasarımı doğrultusunda yüksek akımda rotor bariyerlerine sabit mıknatıs yerleştirilmesi durumu analiz edilmiş ve etkileri incelenmiştir. Analiz sonuçları doğrultusunda yeni bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. İki bariyerli ve düşük akım şartlarında tasarlanan EA-SMD-SRM'nin analizi, prototip üretimi ve deneysel doğrulaması yapılmıştır. Yapılan çalışmalar dikkate alınarak prototipi hedeflenen EA-SMD-SRM tasarımına geçilmiştir.

EA-SRM tasarımı ilk olarak analitik tasarıma göre gerçekleştirilmiş ve analizleri yapılmıştır. Tasarımı yapılan EA-SRM'nin rotoru hedeflenen ortalama moment ve moment dalgalanması doğrultusunda ÇAGA ile optimize edilmiştir. Optimizasyon sonucunda oluşan rotor yapısına SM'ler yerleştirilerek etkileri incelenmiştir. Mıknatıs desteği EA-SRM'de moment, güç faktörü ve verim parametrelerini olumlu yönde etkilerken moment dalgalanmasını negatif yönde etki ettiği gözlenmiştir. Mıknatıs sayısı ve hava aralığa yakınlık derecesine göre momentte maksimum %140, güç faktöründe maksimum %93, verimde ise maksimum %10 luk bir artış sağlamıştır. Bu değerlerler 4 akı bariyerine de mıknatıs desteği verilmiş olan Model I'da meydana gelmiştir. Fakat bu SRM'lerin dezavantajları arasında yer alan moment dalgalanması değerinde ise yine aynı yapıda %30'luk bir artış gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre mıknatıs destekli EA-SRM'de mıknatıs sayının (hacminin) artması moment, güç faktörü, verim gibi parametreleri olumlu yönde etkilerken, hava aralığına yakın konumlandırılan SM'lerin moment dalgalanmasını olumsuz etkilediği gözlenmiştir.

Motor performansını karşılaştırmak için, optimizasyonu yapılmış olan EA-SMD-SRM'nin simülasyon sonuçlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, optimizasyon sonrasında motor yükü ve akım açısı değişimleri, parametrik analiz ile incelenmiştir. EA-SMD-SRM, 5000 devir/dakika hızında çalışacak şekilde analiz edilmiştir. Akım 0-120 derece aralığında 3 derece artırılarak analizler gerçekleştirilmiştir. EA-SMD-SRM'nin akım (yük durumu) ile değişen performansını değerlendirmek için

maksimum akım değeri, %25, %50, %75, %100 ve %115 seviyelerinde alınarak karşılaştırılmıştır.

EA-SMD-SRM'nin prototip üretime geçilmeden önce yapısal analizleri de gerçekleştirilmiştir. Yapısal analiz olarak deformasyon ve stres testi yapılmıştır. Deformasyon analizi sonucunda ortalama deformasyon 4.2072×10^{-4} mm çıkmıştır. Rotor üzerinde oluşan deformasyon en fazla hava aralığına bakan yüzeye etki etmektedir. Hava aralığının 0.4 mm olduğu göz önüne alındığında deformasyon ihmal edilebilir düzeydedir. Stres testi sonucunda ortalama değer 3.1623 MPa olarak ölçülmüştür. Rotor malzemesinin stres değerine göre analizden elde edilen değer ihmal edilebilmektedir.

Tasarlanan EA-SMD-SRM'nin termal analizi ve deneysel ölçümü de gerçekleştirilmiştir. Prototip üretiminde maliyetler de dikkate alınarak seri üretimi mevcut olan stator ve SM'ler kullanılmıştır. Rotor talaşlı imalat yöntemi ile üretilmiştir. Talaşlı imalat yöntemindeki zorluklar ve demir kayıplarının etkileri değerlendirilerek, rotor üç parça halinde tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir.

Prototip üretimi gerçekleştirilen motorun testleri, farklı hız ve farklı yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında nominal yükte güçte %6.69, verimde %0.74 ve güç faktöründe %3.75 sapma olduğu görülmüştür. Deneysel çalışmadan elde edilen moment dalgalanması sonucu simülasyon sonucuna göre %1.18 daha iyidir. Üretimden kaynaklanan etkiler dikkate alındığında simülasyon sonuçları deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır.

Tamamlanan bu tez çalışmasında EA-SRM'nin rotor bariyerlerine SM eklenmesi durumu incelenmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde özgün bir rotor yapısına sahip olan 4 kW-5000 d/d 8 kutuplu EA-SMD-SRM tasarımı, optimizasyonu ve prototip üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Eksenel yapıda tasarlanması nedeniyle radyal akılı motorlara göre düşük hacim avantajına sahiptir. SMD yapısı ile yüksek verim ve moment avantajı sunmaktadır.

SMD yapıda sunulan bu çalışmada neodyum türü SM kullanılmıştır. İlerleyen çalışmalarda farklı SM türleri kullanılabilir. SM'lerin bariyer kollarına yerleştirilerek performans ve moment dalgalanması üzerindeki etkileri incelenebilir. SMD rotor yapısından dolayı tutma momenti üzerine çalışmalar yapılabilir. Rotor üretiminde

laminasyonlu yapı üzerine çalışılarak demir kayıplarının azaltılması ve verim artışı sağlanabilir. Ayrıca stator sargı yapısı değiştirilerek farklı sarım tekniklerinin EA-SMD-SRM üzerindeki etkileri araştırılabilir.

KAYNAKÇA

1. Boztaş, G., 2019. Düşük Gerilim İle Beslenen Senkron Relüktans Motor Ve Sürücü Tasarımı. Fırat Üniversitesi, Doktora Tezi, Elazıg, 145.

2. Chapman, S. J., Akın, E., & Orhan, A., 2007. Elektrik Makinalarının Temelleri. Çağlayan Kitabevi,744.1-2

3. Islam, M. Z., 2019. Design and Performance Analysis of Rare-Earth-Free Five-Phase Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor. The University of Akron, Phd Thesis, Akron, 176.

4. Moghaddam, R. R., 2007. Synchronous Reluctance Machine (Synrm) Design. KTH Electrical Engineerin, Master's Thesis, Stockholm,90.

5. Moghaddam, R. R., 2011. Synchronous reluctance machine (SynRM) in variable speed drives (VSD) applications. KTH Electrical Engineerin, Phd Thesis, Stockholm, 278.

6. Zöhra, B., Akar M., 2019. Türkiye'de verimli elektrik motorlarına geçiş süreci ve Şebeke Kalkışlı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar. **International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 3(2)**, 236-242.

7. Deli, A., 2016. Yüksek Verimli Motorlarda Kayıplar ve Senkron Relüktans Teknolojisi. *IV. Enerji Verimliliği Günleri*, İzmir, Elektrik Mühendisleri Odası, 279/85-90

8. Eser, E., 2018. Asenkron motorlarda istatistiksel proses kontrol yöntemi ile arıza tespiti. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Tokat, 92.

9. Kim, W. H., Kim, K. S., Kim, S. J., Kang, D. W., Go, S. C., Chun, Y. D., Lee, J., 2009. Optimal PM Design of PMA-SynRM for Wide Constant-Power Operation and Torque Ripple Reduction. **IEEE Trans Magn 45**:4660–4663.

10. Vartanian, R., Toliyat, H. A., Akin, B., Poley, R., 2012. Power Factor İmprovement Of Synchronous Reluctance Motors (Synrm) Using Permanent Magnets For Drive Size Reduction. In: *IEEE Applied Power Electronics*

Conference and Exposition (APEC). 628–633

11. Ergene, L. T., Yılmaz, M., İmeryüz, M., Xheladini, L., Alper, T. A. P., Taşdemir, A., 2018. Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motorlarda Mıknatıs Yerleşiminin Performansa Etkisi. **EMO Bilim Dergi 8:**19–24

12. Çatak, S., 2022) Dış Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Relüktans Motor Tasarımı Ve Uygulaması. Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Yüksek Lisans Tezi, 85.

13. Naeimi, M. R., Abbaszadeh, K., Nasiri-Zarandi, 2021. Torque Ripples Reduction İn A Synchronous Reluctance Motor By Rotor Parameters Optimization. **COMPEL - Int J Comput Math Electr Electron Eng 40**:1053–1066.

14. Moghaddam, R. R., Magnussen, F., Sadarangani, C., 2012. Novel rotor design optimization of Synchronous Reluctance Machine for low torque ripple. *XXth International Conference on Electrical Machines*, 479/420-424.

15. Huynh, T. A., Hsieh, M. F., Shih, K. J., & Kuo, H. F., 2018. An Investigation Into the Effect of PM Arrangements on PMa-SynRM Performance. **IEEE Trans Ind Appl 54**:5856–5868.

16. Şahin F., 2001. Design And Development Of A High-Speed Axial-Flux Permanent-Magnet Machine. Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Phd Thesis, 242.

17. Eker M., 2017. Şebeke yolvermeli eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motor tasarımı. Gaziosmanpaşa Üniversitesi,Tokat, Doktora Tezi, 147.

18. Cao, Z., Mahmoudi, A., Kahourzade, S., Soong, W. L., Summers, J. R., 2020. A Comparative Study of Axial-Flux versus Radial-Flux Induction Machines. In: 2020 *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES*), 609/1–6.

19. Deepak, K., Frikha, M. A., Benômar, Y., El Baghdadi, M., Hegazy, O., 2023. In-Wheel Motor Drive Systems for Electric Vehicles: State of the Art, Challenges, and Future Trends. **Energies 2023, Vol 16**, Page 3121 16:3121.

20. Nishanth F.N.U., Van Verdeghem J., Severson E.L., 2023. A Review of Axial Flux Permanent Magnet Machine Technology. **IEEE Trans Ind Appl 59**:3920–3933.

21. Amin S., Khan S., Bukhari S.S.H, 2019. A Comprehensive Review on Axial Flux Machines and Its Applications. *2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET).* 149/1–7

22. Cupertino F., Palmieri M., Pellegrino G., 2015. Design of high-speed synchronous reluctance machines. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).* pp 993/828–834

23. Ferrari M., Bianchi N., Doria A., Fornasiero E., 2015 Design of Synchronous Reluctance Motor for Hybrid Electric Vehicles. **IEEE Trans Ind Appl 51**:3030–3040.

24. Zhao W., Chen D., Lipo T.A., Kwon B-I., 2015. Performance Improvement of Ferrite-Assisted Synchronous Reluctance Machines Using Asymmetrical Rotor Configurations. **IEEE Trans Magn 51**:1–4.

25. Bonthu S.S.R., Choi S., 2016, Design procedure for multi-phase external rotor permanent magnet assisted synchronous reluctance machines. *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 573/131–1137

26. Nagarajan V.S., Kamaraj V., Balaji M., 2016. Effect of Geometrical Parameters on Optimal Design of Synchronous Reluctance Motor. **J Magn 21**:544–553.

27. Lee J-K., Jung D-H., Lim J., 2018. A Study on the Synchronous Reluctance Motor Design for High Torque by Using RSM. **IEEE Trans Magn 54**:1–5.

28. Liu H-C., Lee J., 2018. Optimum Design of an IE4 Line-Start Synchronous Reluctance Motor Considering Manufacturing Process Loss Effect. **IEEE Trans Ind Electron 65**:3104–3114.

29. Kabir M.A., Husain I., 2017. Design of synchronous reluctance motor with multilayer AC winding. *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC).* 435/1–7

30. Dmitrievskii V., Prakht V., Kazakbaev V., 2019, IE5 Energy-Efficiency Class Synchronous Reluctance Motor With Fractional Slot Winding. **IEEE Trans Ind Appl 55**:4676–4684.

31. Credo A., Fabri G., Villani M., Popescu M., 2020. Adopting the Topology Optimization in the Design of High-Speed Synchronous Reluctance Motors for Electric Vehicles. **IEEE Trans Ind Appl 56**:5429–5438.

32. Baka S., Sashidhar S., Fernandes B.G., 2021. Design of an Energy Efficient Line-Start Two-Pole Ferrite Assisted Synchronous Reluctance Motor for Water Pumps. **IEEE Trans Energy Convers 36**:961–970.

33. Akiki P., Hage-Hassan M., Bensetti M., 2018. Axial Ferrite-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2701/583–589

34. Bin Tarek M.T., Sozer Y., 2019. Design of a Novel Axial Flux Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor. *In: 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 7137/3004–3009

35. Khan MA, Khan F, Jamshed U, et al (2019) Design and Analysis of Outer Segmental Rotor Synchronous Reluctance Machine for Future Electric Bike. *In: 2019 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, pp 1–5

36. Pop A-C., Pop Piglesan F., Martis R., 2018. First Insights on the Electromagnetic Design of Axial-Flux Synchronous-Reluctance Maschine. *In: IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 6240/5702–5709

37. Mahmoudi A., Kahourzade S., Roshandel E., Soong W.L., 2020. Axial-Flux Synchronous Reluctance Motors: Introduction of a New Machine. *In: 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*,1081/1–6

38. Gercekcioglu, H. S., Akar, M., 2021. Optimal rotor design of novel axial flux synchronous reluctance motor and validation. **International Transactions on**

Electrical Energy Systems, 31(5), e12866.

39. Gerçekcioğlu H.S., Akar, M., 2021. Efficiency and Performance Comparison Between Synchronous Reluctance and Induction Motor in Axial Flux Concept. **Gazi Üniversitesi Fen Bilim Derg Part C Tasarım ve Teknol 9**:297–316.

40. Akar, M., Eker, M., Özsoy, M., Gerçekçioğlu, H. S., 2022. Efficiency Analysis of Axial Flux SynRM in Variable Speed Applications. **Machines, 10(10)**, 838.

41. Zhou Y., Liu J., Meng F., 2023. Design of an Axial-Flux Synchronous Reluctance Machine with 3D-Printed Rotor. I*n: 2023 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*. 770/1–7

42. Gözüaçık, E., Eker, M., Akar, M., 2023. Multislice Analysis of Axial Flux Synchronous Reluctance Motor Based on 2d Finite Element Method Linear Model. **J Magn 28**:219–226.

43. Esmer, A., 2023. Elektrikli Araçlar İçin Senkron Relüktans Motor Tasarımı. Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu, Yüksek Lisans Tezi, 81.

44. Yıldız, A., 2023. IE4 verim sınıfı yeni nesil senkron relüktans motorun tasarımı, analizi ve üretimi. Fırat Üniversitesi, Elazıg, Doktora Tezi, 134.

45. Pellegrino, G., Jahns, T. M., Bianchi, N., Soong, W. L., & Cupertino, F., 2016. The rediscovery of synchronous reluctance and ferrite permanent magnet motors: Tutorial Course Notes, **Springer**, 186, pp 10-14.

46. Vartanian R., Toliyat H.A., 2009. Design And Comparison Of An Optimized Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor (Pma-Synrm) With An İnduction Motor With İdentical NEMA Frame Stators. *In: 2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium.* 588/107–112

47. Pancorbo, S.M., Ugalde, G., Poza, J., Egea, A., 2015. Comparative study between induction motor and Synchronous Reluctance Motor for electrical railway traction applications. I*n: 2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. 275/1–5

48. Djeladını, L., 2017. A Performance İmprovement Study Of A Permanent-Magnet Assisted Synchronous Motor Used İn Washers. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi,168.

49. Taghavi, S., 2015. Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications. Doctoral dissertation, Concordia University, Chicago, Phd Thesis, 195.

50. Vagati, A., Franceschini, G., Marongiu, I., Troglia, G.P., 1992. Design Criteria Of High Performance Synchronous Reluctance Motors. *In: Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. 2071/66–73

51. Moghaddam, R.R., Magnussen, F., Sadarangani, C., 2010. Theoretical and Experimental Reevaluation of Synchronous Reluctance Machine. **IEEE Trans Ind Electron 57:**

52. Matsuo, T., Lipo, T.A., 1994. Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine. **IEEE Trans Energy Convers 9**:359–365.

53. Boztaş, G., Aydoğmuş, Ö., Güldemir, H., 2020. Fotovoltaik Panel ile Beslenebilen SynRM Tasarımı ve Kontrolü. **Fırat Univ J Eng Sci 32**:87–94.

54. Lagerquist, R., Miller, T.J.E., 1994. Sensorless Control of the Synchronous Reluctance Motor. **IEEE Trans Ind Appl 30**:

55. Bianchi, N., Fornasiero, E., Soong, W., 2015. Selection of PM Flux Linkage for Maximum Low-Speed Torque Rating in a PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine. **IEEE Trans Ind Appl 51**:3600–3608.

56. Vagati, A. (1994, September). The synchronous reluctance solution: a new alternative in AC drives. *In Proceedings of IECON'94-20th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics,* 1448/1-13.

57. Stipetic, S., Zarko, D., Cavar, N., 2020. Adjustment of Rated Current and Power Factor in a Synchronous Reluctance Motor Optimally Designed for Maximum Saliency Ratio. **IEEE Trans Ind Appl 56**:2481–2490.

58. Jang, S,M, Park, P.I., Lee. S.H., Lee. J.H., 2000. Design of Flux Barrier type Synchronous Reluctance Motor to improve Saliency Ratio. *Proc KIEE Conf 2000/*660–662

59. Yan D., Dong Y., Le le S., Kai J., 2016. Design optimization of cylindrical insulation barriers of synchronous reluctance machine with large saliency ratio. *In: 2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA).* 1031/80–85

60. Kamper, M.J., Volschenk, A.F., 1994 Effect of rotor dimensions and cross magnetisation on Ld and Lq inductances of reluctance synchronous machine with cageless flux barrier rotor. **IEE Proc Electr Power Appl 141**:213–220.

61. Staton, D.A., Miller, T.J.E., Wood, S.E., 1993. Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor. **IEE Proc B Electr Power Appl 140**:249–259.

62. Shahin, A., Nair, D.S., Shreelakshmi, M.P., Ramchand, R., 2023. Design and Analysis of Maximum Power Factor Control for a Three Phase Synchronous Reluctance Motor. *In: 2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM).* 564/181–186

63. Matsuo, T., Lipo, T. A., 1993. Field oriented control of synchronous reluctance machine. *In Proceedings of IEEE Power Electronics Specialist Conference-PESC'93* 1182/425-431.

64. Kamper, M.J., Van Der Merwe F.S., 1996. Direct Finite Element Design Optimisation of the Cageless Reluctance Synchronous Machine Next iteration. **IEEE Trans Energy Convers 11**:7-16

65. Ibrahim, M.N., Sergeant, P., Rashad, E.M., 2015. Synchronous Reluctance Motor Performance Based on Different Electrical Steel Grades. **IEEE Trans Magn 51**:1–4.

66. Fratta, A., Troglia, G. P., Vagati, A., Villata, F. 1993. Evaluation of torque ripple in high performance synchronous reluctance machines. *In Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual*

Meeting (pp. 163-170).

67. Yammine S, Hénaux C, Fadel M, Messine F (2018) Torque Ripple Reduction in a SynRM at a Constant Average Torque by Means of Current Harmonics Injection. **Prog Electromagn Res C 80**:167–180.

68. Mohanarajah, T., Rizk, J., Hellany, A., 2018. Torque Ripple Improvement in Synchronous Reluctance Machines. *In: 2018 2nd International Conference On Electrical Engineering (EECon)*. 77/44–50

69. Masisi, L., Ibrahim, M., Wanjiku, J., 2016. The Effect of Two- and Three-Level Inverters on the Core Loss of a Synchronous Reluctance Machine (SynRM). **IEEE Trans Ind Appl 52**:3805–3813.

70. Lee J.H., 2002. Design solutions to minimize iron core loss in synchronous reluctance motor using Preisach model and FEM. **IEEE Trans Magn 38**:3276–3278.

71. Chalmers, B.J., Akmese, R., Musaba, L., 1998. Design and field-weakening performance of permanent-magnet/reluctance motor with two-part rotor. **IEE Proc Electr Power Appl 145**:133–138.

72. A Gieras, J. F., Wang, R. J., & Kamper, M. J. 2008. Axial flux permanent magnet brushless machines. Springer Science & Business Media.351,38-48

73. Çetin, E., 2018. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motor tasarımı, manyetik analizi ve prototip üretimi. Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Doktora Tezi, 147.

74. Gözüaçık, E., & Akar, M., 2023. Senkron Relüktans Motor Analitik Hesabı ve Tasarımı. **Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 12(1)**, 86-100.

75. Solak. B,. 2021. Senkron Relüktans Motorda Moment Dalgalanmasının Azaltılması. Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul,113.

76. Gerçekcioğlu, H.S., 2021. Eksenel akılı senkron relüktans motor tasarımı, prototip üretimi ve testleri. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Doktora Tezi, Tokat, 224.

77. Ban, B., Stipetic, S., & Jercic, T., 2021. Minimum Set Of Rotor Parameters For Synchronous Reluctance Machine And İmproved Optimization Convergence Via Forced Rotor Barrier Feasibility. **Energies, 14(10)**, 2744.

78. Ibrahim, M.N.F., Sergeant, P., Rashad, E., 2016. Simple Design Approach For Low Torque Ripple And High Output Torque Synchronous Reluctance Motors. **Energies 9**:942.

79. Nagarkar, A., Srinivas, S., 2021. An Optimized Rotor Design of Synchronous Reluctance Motor for Improved Torque Characteristics. *In: 2021 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2021 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM).* 512/107–114

80. Moghaddam, R.R., Gyllensten, F., 2014. Novel High-Performance SynRM Design Method: An Easy Approach for A Complicated Rotor Topology. **IEEE Trans Ind Electron 61(9)**, 5058-5065.

81. Aghazadeh, H., Afjei, E., & Siadatan, A. 2019. Sizing And Detailed Design Procedure Of External Rotor Synchronous Reluctance Machine. **IET Electric Power Applications, 13(8)**, 1105-1113.

82. Arıkan, M. A. S., 2000. Sonlu elemanlar metodunun mühendislikte uygulamaları. Middle East Technical University, Ankara. https://silo.tips/download/sonlu-elemanlar-metodunun-mhendslkte-uygulamalari (Erişim tarihi: Aralık 2023)

83. Ge, X., 2014. Simulation Of Vibrations İn Electrical Machines For Hybrid-Electric Vehicles. Chalmers Unıversıty Of Technology, Master's Thesıs, Göteborg,68.

84. Tap, A., 2017. Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul,143.

85. Cohen, L.D., Cohen, I., 1993. Finite-element methods for active contour models and balloons for 2-D and 3-D images. **IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell 15**:1131–1147.

86. Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D., 2009. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines. **IEEE Trans Ind Electron 56**:871–882.

87. El-Refaie, A.M., Jahns, T.M., McCleer, P.J., McKeever, J.W. 2006. Experimental verification of optimal flux weakening in surface PM Machines using concentrated windings. **IEEE Trans Ind Appl 42**:443–453.

88. Wu Bsc W., 2012. Multiobjective Genetic Algorithm Optimization of Water Distribution Systems Accounting for Economic Cost, Greenhouse Gas Emissions and Reliability. The University of Adelaide,Phd Thesis, Adelaide, 304.

89. Lambora, A., Gupta, K., Chopra, K., 2019. Genetic Algorithm- A Literature Review. *In: 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon).* pp 380–384

90. Mirjalili, S., Mirjalili, S. 2019. Genetic algorithm. Evolutionary Algorithms and Neural Networks: **Theory and Applications,** 43-55.

91. Kumar, M., Husain, D. M., Upreti, N., Gupta, D., 2010. Genetic algorithm: Review and application. **International Journal of Information Technology and Knowledge Management Volume 2**, No. 2, pp. 451-454

92. Deb, K., 2011. Multi-objective optimisation using evolutionary algorithms: an introduction. In Multi-objective evolutionary optimisation for product design and manufacturing London: Springer London,368/3-34.

93. Herrera, F., Lozano. M,, Verdegay, J.L., 1998. Tackling Real-Coded Genetic Algorithms: Operators and Tools for Behavioural Analysis. **Artif Intell Rev 12**:265

94. Sezik, N., 2020. Speed Control Of BLDC Motor Based On Multicriteria Optimizationwith Genetic Algorithm. Çankaya Üniversitesi, Yüksek Lisans, Ankara, 92.

95. Taboada, H., 2007. Multi-Objective Optimization Algorithms Considering Objective Preferences And Solution Clusters. Rutgers University, Phd Thesis, New

Jersey,247.

96. Kayalı, S., 2019. Asenkron Motor Parametrelerinin Çok Amaçlı-Genetik Algoritma İle Belirlenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde,102.

97. Çalışkan, E., 2019. Savunma Yarıçaplı İki Boyutlu Ortogonal Yerleşim Problemleri İçin Çok Amaçlı Genetik Algoritma Önerisi. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya,96.

98. Gibbs, M.S. 2008. Real-coded genetic algorithm parameter setting for water distribution system optimisation.The University of Adelaide, Phd Thesis, Adelaide,130.

99. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Trans Evol Comput 6**:182–197.

100. Yusoff, Y., Ngadiman, M.S., Zain, A.M., 2011. Overview of NSGA-II for Optimizing Machining Process Parameters. **Procedia Eng 15**:3978–3983.

101. Jafferi, N., Tokhi, M.O., Onn Malaysia H., 2009. Multi-Objective Genetic Algorithm Optimisation Approach for the Geometrical Design of an Active Noise Control Systems. **Int J Integr Eng 1**:73-86

102. Gundabattini, E., Mystkowski, A., Idzkowski, A., & Solomon, D. G., 2021. Thermal mapping of a high-speed electric motor used for traction applications and analysis of various cooling methods—A review. **Energies, 14(5)**, 1472.

103. Lin, Y., Huang, Y., Zhang, T., 2022. Comprehensive Design and Analysis of Rotor Stress for HSPMM Considering Cooling Method. **Machhines, 10(6)**:475-485.

104. Bonthu, S.S.R., Choi, S., Baek, J., 2018. Design Optimization With Multiphysics Analysis on External Rotor Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motors. **IEEE Trans Energy Convers 33**:290–298.

105. Aydin, M., Huang, S., & Lipo, T. A., 2004. Axial flux permanent magnet disc

machines: A review. **In Conf. Record of SPEEDAM 8:**61-71).

106. Wahab Ahmed Daud, A., 2014. Improvement of Surface Hardness By Ball Milling Technique for Carbon Steel (CK 45). **Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences, 7(3)**, 265-272.

107. Çelik, S., Ersozlu, I., 2014. Investigation of microstructure and mechanical properties of friction welded aisi 316 and ck 45 steels. **High Temperature Materials and Processes, 33(2**), 161-170.

108. Hamdi, E. S., 1994. Design of small electrical machines. John Wiley & Sons, Inc,605/305-311.

109. Akar, M., Gerçekcioğlu, H.S., 2022. Eksenel Akılı Senkron Relüktans Motorun Termal Analizi. **J Gaziosmanpasa Sci Res 11**:118–127

110. Adouni, A., Cardoso, A.J.M., 2019. Thermal Analysis of Synchronous Reluctance Machines – A Review. **Electr Power Components Syst 47**:471–485. 8

111. Boglietti, A., Cavagnino, A., Pastorelli, M., 2006. Thermal analysis of induction and synchronous reluctance motors. **IEEE Trans Ind Appl 42**:675–680.

112. Eser, E., Üstkoyuncu, N. 2023. Effects of Permanent Magnets on Different Flux Barriers for the AF-SynRMs. **Electric Power Components and Systems**, 0–0.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Emrah ESER
Uyruğu: Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri:
Medeni Durum:
e-mail:
Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölüm	2018
Lisans	Fırat Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Müh.	2011
Lise	Akdağmadeni 75.yıl Milli Piyango Anadolu Lisesi, Yozgat	2004

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2014-Halen	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi	-
2014-2014	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	1 Yıl
2011-2014	Sivas Uzaman Telekomünikasyon	3 Yıl

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

Makaleler

1. Eser, E., Ustkoyuncu, N. 2023. Effects of Permanent Magnets on Different Flux Barriers for the AF-SynRMs. **Electric Power Components and Systems**, 0–0.

2. Eker, M., Eser, E., Günay, İ. (2023). Elektrikli Araçlar için Lityum İyon Bataryalarda Sağlık Ömrünün Belirlenmesi. **Journal of New Results in Engineering and Natural Sciences, 2023(19)**, 54-63

3. Eser, E., Uğurlu, M. 2017. Fiber Optik Kablolarda Hat Birleştirme Hataları ve Kayıplara Olan Etkileri. **Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 6(3)**, 55-65.

Bildiriler

1. Eser, E., Uğurlu, M. 2017. Fiber Optik Kabloların Ek Hatalarından Kaynaklanan Kayıpların OTDR Cihazı İle Tespiti. 2. Uluslararası Mühendislik Mimarlık Ve Tasarım Kongresi, Kocaeli.

2. Eser, E., Doğan, Z. 2017. Asenkron Motorlarda Rotor Çubuk Kırığı Arızasının İstatisteksel Proses Kontrol Metodu İle Tespiti. 2. Uluslararası Mühendislik Mimarlık Ve Tasarım Kongresi, Kocaeli .