



T.C.

**TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**EKSENEL AKILI SENKRON RELÜKTANS MOTOR
TASARIMI, PROTOTİP ÜRETİMİ VE TESTLERİ**

HARUN SERHAT GERÇEKÇİOĞLU

**DOKTORA TEZİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Prof. Dr. MEHMET AKAR
ARALIK- 2021
Her hakkı saklıdır**

T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI

DOKTORA TEZİ

EKSENEL AKILI SENKRON RELÜKTANS MOTOR
TASARIMI, PROTOTİP ÜRETİMİ VE TESTLERİ

HARUN SERHAT GERÇEKÇİOĞLU

TOKAT
2021

Her hakkı saklıdır



Bu tez çalışması;

**Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından
2020/41 nolu proje ile desteklenmiştir.**

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Harun Serhat GERÇEKÇİOĞLU

ARALIK 2021

ÖZET

DOKTORA TEZİ

EKSENEL AKILI SENKRON RELÜKTANS MOTOR TASARIMI, PROTOTİP ÜRETİMİ VE TESTLERİ

HARUN SERHAT GERÇEKÇİOĞLU

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI

TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MEHMET AKAR

Bu tez çalışmasında, literatürde çalışması yapılmamış özgün bir çalışma olan, rotorunda çoklu sayıda bariyere sahip Eksenel Akıllı Senkron Relüktans Motor (EA-SRM) tasarlanmış, prototip üretimi yapılmış ve son olarak performans testleri tamamlanmıştır. EA-SRM tasarımının ön çalışmasında, rotorunda iki farklı topolojide bariyer tipi, çoklu sayıda bariyer yapısı ve üç farklı yalıtım oranında analitik olarak hesaplamaları yapılmış ve 3D Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile modellenmiştir. Analitik olarak en iyi sonucu veren modelde, Genetik Algoritma (GA) tabanlı optimizasyon analizi ile bariyer geometrisi değiştirilerek tork dalgalanması değeri düşürülmüş, yapısal analizi ve termal analizleri de tamamlanıp prototip motor üretilmiştir. Üretilen prototip IEC TS 60034-30-2 kriterlerine göre test edilmiş ve IEC 60034-30-1:2014 IE4 Süper Premium verim sınıfına sahip olmuştur. Tork, tork dalgalanması, güç faktörü, mil gücü, akım başına tork ve verim parametreleri analiz edilerek benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak tamamlanmış bu tez çalışması, rotorunda kafes bulunmaması sebebiyle bakır kayıplarının olmaması ve mıknatıssız yapısıyla maliyet-bakım masrafının düşüklüğü, yüksek verim ve tork istenilen uygulamalarda iyi bir alternatif olmuştur. Eksenel yapısı ile boyut problemi yaşanan durumlarda radyal akıllı motorların yerini almaya aday hale gelmiştir.

2021, 205 Sayfa

ANAHTAR KELİMELER: Senkron Relüktans, Eksenel Akıllı Motor, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Genetik Algoritma.

ABSTRACT
DOCTORATE THESIS
AXIAL FLUX SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR DESIGN,
PROTOTYPE MANUFACTURING AND TESTS
HARUN SERHAT GERÇEKÇİOĞLU
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
DEPARTMENT OF MECHATRONICS ENGINEERING
SUPERVISOR: PROF. DR. MEHMET AKAR

In this thesis, an Axial Flux Synchronous Reluctance Motor (AF-SRM) with multiple barriers on its rotor, which is an original study that has not been studied in the literature, was designed, then prototype production was made and finally performance tests were completed. In the preliminary study of the AF-SRM design, two different topology barrier types, multiple barrier structures and three different insulation ratios were analytically calculated on the rotor and modeled with the 3D Finite Element Method (FEM). In the model that gave the best analytical result, the torque ripple value was reduced by changing the barrier geometry with a Genetic Algorithm (GA) based optimization analysis, structural analysis and thermal analysis were completed and a prototype motor was produced. Produced prototype has been tested according to IEC TS 60034-30-2 criteria and has IEC 60034-30-1:2014 IE4 Super Premium efficiency class. Torque, torque ripple, power factor, shaft power, torque per current and efficiency parameters were analyzed and compared with simulation results.

As a result, this completed thesis study has been a good alternative in applications where high efficiency and torque are required, with no copper losses due to the absence of a cage in the rotor and low maintenance costs with its structure without magnet. With its axial structure, it has become a candidate to replace radial flux motors in the cases with dimension problems.

2021, 205 Page

KEY WORDS: Synchronous Reluctance, Axial Flux Motor, Finite Element Method, Genetic Algorithm.

ÖNSÖZ

Doktora tezi çalışmalarım sürecinde en büyük şansım olan, çalışma prensibini örnek aldığım saygı değer danışmanım Prof. Dr. Mehmet AKAR'a bilgi birikimi ve deneyimleriyle yoluma ışık tuttuğu için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında yapıcı eleştirileri ile çalışmalarına katkıda bulunan tez izleme komitesi üyeleri sayın Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU ve Dr. Öğr. Üyesi Zafer DOĞAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesindeki destek ve katkılarından dolayı Mekatronik ve Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü akademisyenlerine teşekkür ederim.

Hayat boyu verdikleri destekler için annem Meryem GERÇEKÇİOĞLU ve babam Resul GERÇEKÇİOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Canım kızım Öykü'm ve canım oğlum Erdem'im, uzun ve sabır gerektiren bu süreçte yorgun hissedip kimi zaman pes ettiğimde varlığınıza enerji buldum. Hayatımın her alanında olduğu gibi, tez çalışmamı hazırlarken de sevgisini kalbimin en derinliklerinde hissettiğim ve varlığı motivasyon kaynağı eşim Özge'm, iyi ki varsın.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
SİMGE VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Organizasyonu	7
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ.....	9
2.1. Radyal Akıllı Senkron Relüktans Motorlar (RA-SRM).....	9
2.2. Eksenel Akıllı Senkron Relüktans Motorlar (EA-SRM).....	72
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	77
3.1. SRM Relüktans Konsepti.....	77
3.2. SRM'nin Vektörel Gösterimi, Eşdeğer Devresi ve Temel Performans Özellikleri	78
3.3. Mıknatıslanma Karakteristiği	85
3.3.1. Doyum.....	85
3.3.2. Çapraz eşleme	86
3.3.3. Oluklu stator.....	87
3.4. SRM Tasarım Parametreleri	88
3.4.1. Kutup sayısı (2p).....	88
3.4.2. Akı bariyerleri ve segmentleri.....	90
3.4.3. Rotor bariyer yalıtım oranı.....	91
3.4.4. Teğetsel ve radyal kırımlar	92
3.4.5. Hava aralığı uzunluğu	93
3.5. EA-SRM Boyutlandırma ve Tasarım Eşitlikleri.....	93
3.5.1. Boyutlandırma eşitlikleri.....	94
3.5.2. Stator sargıları	96
3.5.3. Stator oluk boyutlandırmaları	97
3.5.4. Rotor tasarım parametreleri.....	98
3.6. SEY.....	101
3.7. EA-SRM Tasarımı	109

3.7.1. Başlangıç parametrelerinin seçimi ve stator hesapları	110
3.7.2. Rotor tasarımı ve hesapları.....	113
3.8. GA ve Optimizasyon	119
3.9. EA-SRM Kayıpları ve Termal Analiz.....	126
3.10. Prototip Üretimi.....	129
3.11. Üretimi Yapılan Motorun Performans Testleri	135
3.11.1. Test düzeneği	135
3.11.2. EA-SRM parametrelerinin elde edilmesi	139
3.11.3. Testler öncesi hazırlık	141
3.11.4. Testlerin yapılması.....	143
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	145
4.1. EA-SRM Rotor Tasarımı Analitik Hesap Sonuçları	145
4.1.1. Bir bariyerli EA-SRM, rotor bariyer ve segmentlerin analitik hesaplamaları.....	145
4.1.2. İki bariyerli EA-SRM, rotor bariyer ve segmentlerin analitik hesaplamaları	147
4.1.3. Üç bariyerli EA-SRM, rotor bariyer ve segmentlerin analitik hesaplamaları	149
4.1.4. Dört bariyerli EA-SRM, rotor bariyer ve segmentlerin analitik hesaplamaları	151
4.2. EA-SRM Rotor SEY Analiz Sonuçları	153
4.2.1. Optimizasyon sonuçları.....	161
4.2.2. Parametrik analiz sonuçları.....	168
4.2.3. Manyetik doyum analiz sonuçları	172
4.2.4. Yapısal analiz sonuçları	173
4.2.5. Termal analiz sonuçları	175
4.3. Deneysel Sonuçların İncelenmesi ve Karşılaştırmalar	178
4.3.1. Termal analiz deneysel sonuçları	178
4.3.2. Stator sargı dirençlerinin ölçümü	180
4.3.3. Performans testleri	182
5. SONUÇ	188
6. KAYNAKLAR	192
7. ÖZGEÇMİŞ	204

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
L_d	d eksenı endüktansı
L_q	q eksenı endüktansı
n_r	Rotor oluk sayısı
n_s	Stator oluk sayısı
ψ	Manyetik Alan
K_s	Dönüşüm Matrisi
q	Faz-kutup başına stator oluk sayısı
n_s	Stator oluk başına iletken sayısı
C_s	Sargı bağlantı faktörü
L	Motor paket boyu
D	Hava aralığı çapı
f	Kaynak frekansı
k_{w1}	Sargı faktörü
N_1	Faz-kutup başına eşdeğer sarım sayısı,
$\hat{B}_{\delta 1}$	Hava aralığı temel akı yoğunluğunun maksimum genliği.
ξ	Çıkıntı Oranı
K_w	Yalıtım Oranı
W_{ins}	Akı bariyer katmanlarının genişliklerinin toplamı
W_{iron}	Demir katmanlarının genişliklerinin toplamı

B_s	Motor Akı Yoğunluğu
B_d	Hava Aralığı Akı Yoğunluğu
k_c	İletken Dolum Sabiti
k_s	Demir Kayıpları
ψ_g	Hava Aralığı Kaçak Akısı
T	Tork
W'	Manyetik Eşlenik Enerji
F	Eksenel manyetik itiş kuvvet
k_d	İç çapın dış çapa oranı
D_{in}	İç çap
D_{out}	Dış çap
R_{cm-r}	Eşdeğer rotor demir kayıpları direnci
I_m	Stator mıknatıslanma akımı
p	Kutup sayısı
e_m	Hava boşluğu arka elektromotor kuvvet
λ_m	Motor mıknatıslanma akısı
k_{wq}	Rotor yalıtım oranı
g	Hava aralığı uzunluğu

Kısaltmalar	Açıklama
AA	Alternatif Akım
ARM	Anahtarlama Relüktans Motor
ASM	Asenkron Motor
BDFRM	Fırçasız Çift Beslemeli Relüktans Motor
CEMEP	Avrupa Elektrik Makinaları Üreticileri
ÇK	Çıkık Kutuplu
EA	Eksenel Akı
EA-IPM	Eksenel Akı Dahili Mıknatıslı Motor
EA-SRM	Eksenel Akı Senkron Relüktans Motor
EKF	Genişletilmiş Kalman Filtresi
EL	Eksenel Lamineli
EL-SRM	Eksenel Lamineli Senkron Relüktans Motor
EMK	Elektromotor Kuvvet
EU	Avrupa Komisyonu
GA	Genetik Algoritma
IE	Uluslararası Verim Sınıfları
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
JEMA	Japonya Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği
LE	Lamine Edilmiş
LSRM	Doğrusal Senkron Relüktans Motor
MEC	Manyetik Eşdeğer Devre

MGF	Maksimum Güç Faktörü
MMK	Magnetomotor Kuvvet
MOSOMA	Kendi Kendini Organize Eden Geçiş Algoritması
MS	Merkezi Segment
MTD	Maksimum Tork Değişimi
MTK	Maksimum Tork Kontrol
MTKD	Tork Kontrolü Değişiminin Maksimum Oranı
MTPA	Akım Başına Maksimum Tork
MV	Maksimum Verimlilik
NEMA	Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği
OR-SRM	Dış Rotorlu Senkron Relüktans Motor
PV	Fotovoltaik
RA	Radyal Akı
RM	Relüktans Motor
SATK	Sabit Akım Tork Kontrolü
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SMM	Sabit Mıknatıslı Motorlar
SMSM	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
SM-SRM	Sabit Mıknatıslı Senkron Relüktans Motor
SRM	Senkron Relüktans Motor
THD	Toplam Harmonik Bozulma
UKF	Kokusuz Kalman Filtresi
VCSRM	Vektör Kontrollü Senkron Relüktans Motor

YM-SRM

Yüzey Mıknatıslı Senkron Relüktans Motor

YT-SM-SRM

Yüksek Torklu Ferrit Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Türkiye’de 1975-2019 yılları arasında üretilen ve tüketilen enerjinin yıllara göre değişimi (Anonim, 2019a)	1
Şekil 1.2. a) RA motor b) EA motor	5
Şekil 1.3. Örnek EA-SRM parçalarının gösterimi a) Stator b) Stator sargıları c) Rotor.....	6
Şekil 2.1. Kostko’nun tasarladığı SRM’nin rotoru (Kostko, 1923)	9
Şekil 2.2. Lawrenson’un çalışmasında gösterilen çıkık kutuplu rotor (Lawrenson, 1965).....	10
Şekil 2.3. Chalmers ve Mulki (1972) çalışmalarında sunulan akı bariyerli rotor tipleri a) segment tip b) katman tip	11
Şekil 2.4. Ramamoorthy ve Rao (1979) çalışmasında sunulan rotor kesiti ve açıklamaları	12
Şekil 2.5. Platt (1990)’ın rotor tasarımları a) Güçlü anizotropik yapı b) Rotor laminasyonları kutup merkezinden yüzeye 45 derece açılı yapı.....	14
Şekil 2.6. a) tek bariyerli rotor b) 10-katmanlı rotor c) 24-katmanlı rotor d) EL rotor (Staton ve ark., 1991)	15
Şekil 2.7. İnce lamineli ve segmentli EL tipi rotor (Boldea ve ark., 1992).....	17
Şekil 2.8. 24 stator oluklu (her kutup/fazda 2 oluk) SRM modeli (Matsuo ve Lipo, 1994)	19
Şekil 2.9. Luo ve ark. (1995), segmentli ve laminasyonlu rotor tasarımları a) uç köprülü (rib) b) uç köprülü ve bariyer köprülü c) parçalı segmentli (uç ve bariyer köprüsüz) (Luo ve ark., 1995)	20
Şekil 2.10. a) Standart rotor modeli ve bariyer optimizasyon aralıkları b) Optimizasyonu yapılmış rotor modeli (Parasiliti ve Villani, 1995)	21
Şekil 2.11. a) MTD optimizasyonu amaçlanmış rotor b) MTPA optimizasyonu amaçlanmış rotor (Kamper ve ark., 1996)	22
Şekil 2.12. İç akı bariyerlere sahip 4 kutuplu SRM (Kiriya ve ark. 1998).....	28
Şekil 2.13. SM-SRM Tasarımı iş akışı (Tap, 2017).....	42
Şekil 2.14. SM-SRM Tasarımları a) SM-SRM-1 b) SM-SRM-2 a) SM-SRM-3 (Knebl ve ark., 2018)	47
Şekil 2.15. ŞK-SRM iletken çubuklarının farklı tasarımları (Hu ve ark., 2019).....	49
Şekil 2.16. 4 kutuplu 4 bariyerli SRM, akı a) Başlangıç rotor modeli b) Önerilen rotor modeli c) Rotor destek malzemeleri (Hausmann, 2020)	54
Şekil 2.17. a) içten rotorlu model b) dıştan rotorlu model c) önerilen çift rotorlu model (Alani ve ark., 2021)	57

Şekil 2.18. Akı bariyerlerinin farklı şekillerini gösteren rotor geometrilerinin görünümü a) Rotor I b) Rotor II c) Rotor III d) Rotor IV (Parveen ve ark., 2020)	62
Şekil 2.19. SRM'nin farklı kutup ve oluk sayılı tasarımları a) 4 kutup/24 oluk b) 6 kutup/36 oluk c) 8 kutup/48 oluk (Lujun ve ark., 2021)	64
Şekil 2.20. a) Simetrik ve paralel manyetik akı bariyerli SRM a b) Asimetrik ve paralel manyetik akı bariyerli SRM b c) Simetrik ve paralel olmayan manyetik akı bariyerli SRM c d) Asimetrik ve paralel olmayan manyetik akı bariyerli SRM d (Liu ve ark., 2021).....	66
Şekil 2.21. a) ŞK SM-SRM rotor kesiti b) ŞK SM-SRM uç halkası (Baka ve ark., 2021).....	71
Şekil 3.1. SRM relüktans üretimi	78
Şekil 3.2. abc değişkenlerinin ve dq bileşenlerinin şematik gösterimi (İbrahim, 2017)	79
Şekil 3.3. Rotor ve stator demir kayıplarını içeren SRM'nin eşdeğer devresi.....	80
Şekil 3.4. Toplam demir kayıpları da dahil olmak üzere kararlı durumda SRM'nin vektör diyagramı	82
Şekil 3.5. Nominal 10 A akıma sahip bir SRM'de d ve q eksenlerindeki mıknatıslanma özelliği	86
Şekil 3.6. 30 A anma akımına sahip bir SRM'de d ve q ekseninin çapraz kuplaj etkisi dahil mıknatıslanma özelliği	86
Şekil 3.7. SRM rotoru, (a)'dan (d)'ye bir stator oluk aralığını döndürülürken, dört farklı durumda stator dişlerine göre rotor segmentlerinin konumunun karşılaştırılması	87
Şekil 3.8. k sayısındaki q-ekseni akısının segment içinden geçen ve dolaşan bileşenleri ve bununla ilgili rotor bariyer oluklarının açılma konumları (ξ) (sol). q eksenindeki (MMKq) stator başına birim MMK uyarımı ve k sayısındaki segment (rk) üzerindeki ortalama MMKq'ye k sayısındaki segmentte manyetik potansiyel yanıtı (fk). Dolaşan akı, gölgeli alanda gösterilmiştir (sağda). 89	89
Şekil 3.9. 24 stator oluklu bir SRM'nin sonlu eleman çalışmasından kaynaklanan Kw ve $Lmd, Lmq, (Lmd - Lmq)$ karşılaştırmaları	91
Şekil 3.10. a) Örnek bir SRM yapısında teğetsel ve radyal kırımlar b) Kırımları doyurmak için gereken ek q eksen akısı.....	92
Şekil 3.11. Stator oluk geometrisi.....	97
Şekil 3.12. EA-SRM rotor bariyer ve segmentleri	99
Şekil 3.13. a) d-ekseninde uygulanan MMK nedeniyle segmentler üzerinde birim başına MMK dağılımı b) q-ekseninde uygulanan MMK nedeniyle segmentler üzerinde birim başına MMK dağılımı	100
Şekil 3.14. Üçgen eleman.....	105
Şekil 3.15. İki üçgen elemanın birleşimi.....	107
Şekil 3.16. SEY analizinde kullanılan dört kenarlı piramit yapısı (tetrahedron)	108

Şekil 3.17. EA-SRM tasarım aşamaları	110
Şekil 3.18. EA-SRM stator ve mesh görüntüsü	113
Şekil 3.19. 35 JNE 300 B-H Eğrisi	114
Şekil 3.20. Steel 1008 B-H Eğrisi	114
Şekil 3.21. EA-SRM rotor tasarımı Model A	116
Şekil 3.22. EA-SRM rotor tasarımı Model B.....	116
Şekil 3.23. EA-SRM SEY tasarım aşamaları.....	117
Şekil 3.24. Eksenel Akılı SRM rotor segment (S) ve bariyer (W) parametreleri.....	118
Şekil 3.25. GA akış şeması	121
Şekil 3.26. Rotor bariyer optimizasyonunda değişim yapılacak aralıklar.....	126
Şekil 3.27. EA-SRM’de kullanılan ferro manyetik malzemenin manyetik özellikleri	128
Şekil 3.28. 48 oluklu, 8 kutuplu, tam kalıp ve kısa adımlı EA-SRM stator sargıları gösterimi	129
Şekil 3.29. EA-SRM Stator imalat aşamaları.....	130
Şekil 3.30. EA-SRM Rotor imalat aşamaları	132
Şekil 3.31. EA-SRM 3 boyutlu tasarımı	133
Şekil 3.32. EA-SRM gövde imalat süreçleri	134
Şekil 3.33. Test düzeneği genel görünümü (Eker, 2017)	136
Şekil 3.34. Test düzeneği	137
Şekil 3.35. ABB ACS-880 Motor Sürücüsü	138
Şekil 3.36. Drive Composer Entry 2.5 program ara yüzü	138
Şekil 3.37. LCR Metre ölçüm cihazı.....	139
Şekil 3.38. EA-SRM parametrelerinin belirlenmesi	140
Şekil 3.39. EA-SRM endüktans ve direnç ölçümü test ortamı.....	141
Şekil 3.40. Pruftechnik Shaftalign OS3 motor mili hizalama cihazı.....	142
Şekil 3.41. Hizalama cihazının motor kaplinlerine bağlı durumu.....	143
Şekil 4.1. Bir bariyer $kwq = 0.6$ modeli	146
Şekil 4.2. Bir bariyer $kwq = 1$ modeli	147
Şekil 4.3. Bir bariyer $kwq = 1.5$ modeli	147
Şekil 4.4. İki bariyer $kwq = 0.6$ modeli.....	148
Şekil 4.5. İki bariyer $kwq = 1$ modeli.....	149
Şekil 4.6. İki bariyer $kwq = 1.5$ modeli.....	149
Şekil 4.7. Üç bariyer $kwq = 0.6$ modeli.....	150
Şekil 4.8. Üç bariyer $kwq = 1$ modeli.....	151
Şekil 4.9. Üç bariyer $kwq = 1.5$ modeli.....	151

Şekil 4.10. Dört bariyer $kwq = 0.6$ modeli	152
Şekil 4.11. Dört bariyer $kwq = 1$ modeli	153
Şekil 4.12. Dört bariyer $kwq = 1.5$ modeli	153
Şekil 4.13. SEY analizi tork sonuçları a) Model A b) Model B	157
Şekil 4.14. SEY analizi güç faktörü sonuçları a) Model A b) Model B.....	158
Şekil 4.15. SEY analizi tork dalgalanması sonuçları a) Model A b) Model B	159
Şekil 4.16. 4 bariyerli modellerin karşılaştırması a) Tork b) Tork dalgalanması.....	160
Şekil 4.17. Model A optimizasyon grafiği	162
Şekil 4.18. Model A bariyer uçları genişliği değişimi	163
Şekil 4.19. Model A q-ekseni genişliği değişimi	164
Şekil 4.20. Model B optimizasyon grafiği	164
Şekil 4.21. Model B bariyer uçları genişliği değişimi.....	166
Şekil 4.22. Model B q-ekseni bariyer değişimi	167
Şekil 4.23. Tork-Akım Açısı grafiği	170
Şekil 4.24. Güç Faktörü-Akım Açısı grafiği	170
Şekil 4.25. Çıkıntı Oranı-Akım Açısı grafiği.....	171
Şekil 4.26. Çıkıntı Oranı-Akım grafiği	171
Şekil 4.27. Tork Dalgalanması-Akım Açısı grafiği	172
Şekil 4.28. Manyetik doyum analizleri a) Stator manyetik akı yoğunluğu b) Rotor manyetik akı yoğunluğu c) Stator sargıları akım yoğunluğu.....	173
Şekil 4.29. EA-SRM yapısal analizleri – toplam deformasyon	174
Şekil 4.30. EA-SRM yapısal analizleri – toplam gerilme (stres)	175
Şekil 4.31. EA-SRM termal analiz a) stator b) rotor kayıpları c) Toplam kayıplar-akım.....	176
Şekil 4.32. EA-SRM termal analiz a) stator b) rotor ve c) sargılarda meydana gelen sıcaklık dağılımı d) yük durumuna göre ortalama sıcaklıklar	177
Şekil 4.33. Termal testler için test düzeneği	179
Şekil 4.34. EA-SRM termal analiz deneysel sonuçlar	179
Şekil 4.35. Sargı sıcaklığı eğrisi.....	181
Şekil 4.36. EA-SRM MTPA açısı karşılaştırmaları	184
Şekil 4.37. EA-SRM tork karşılaştırmaları	184
Şekil 4.38. EA-SRM güç faktörü karşılaştırmaları	185
Şekil 4.39. EA-SRM verim karşılaştırmaları	185
Şekil 4.40. EA-SRM tork dalgalanması	186
Şekil 4.41. EA-SRM akım başına tork (Nm/A)	187

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

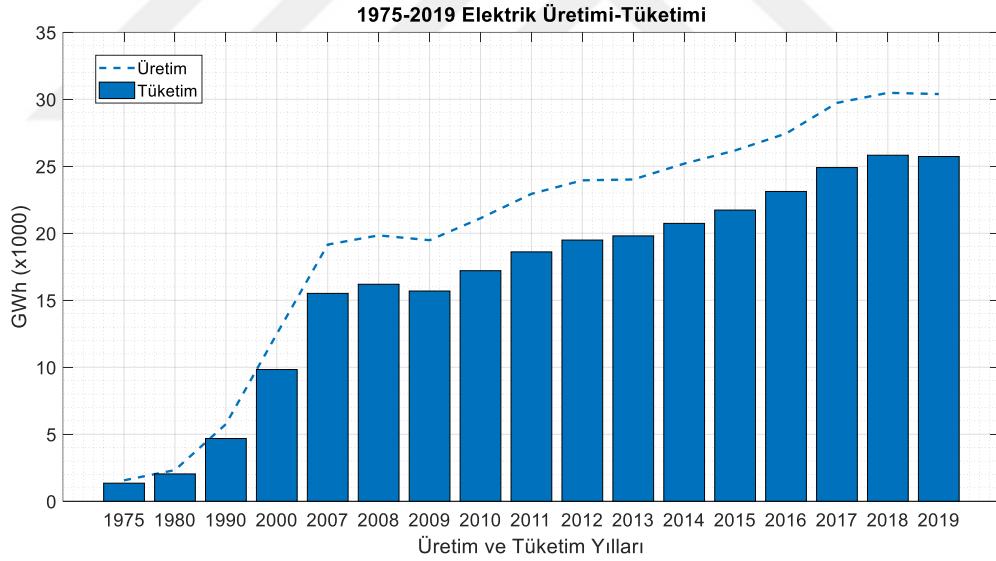
Çizelge 1.1. IE verim sınıfları.....	2
Çizelge 3.1. EA-SRM tasarım için seçilen başlangıç değerleri	111
Çizelge 3.2. EA-SRM hesaplanmış stator oluk parametreleri	112
Çizelge 3.3. EA-SRM stator sargı parametreleri	112
Çizelge 3.4 EA-SRM yalıtım oranları hesapları	118
Çizelge 4.1. Bir bariyerli rotor uç noktası konum açısı ve kontrol açısı	146
Çizelge 4.2 Bir bariyerli rotor segment ve bariyer genişlik değerleri ve yalıtım oranları	146
Çizelge 4.3. İki bariyerli rotor uç noktası konum açısı ve kontrol açısı	147
Çizelge 4.4. İki bariyerli rotor segment ve bariyer genişlik değerleri ve yalıtım oranları	148
Çizelge 4.5. Üç bariyerli rotor uç noktası konum açısı ve kontrol açısı.....	149
Çizelge 4.6. Üç bariyerli rotor segment ve bariyer genişlik değerleri ve yalıtım oranları	150
Çizelge 4.7. Dört bariyerli rotor uç noktası konum açısı ve kontrol açısı	151
Çizelge 4.8. Dört bariyerli rotor segment ve bariyer genişlik değerleri ve yalıtım oranları	152
Çizelge 4.9. EA-SRM tasarımında hesaplanan bariyer ve segment ölçüleri	154
Çizelge 4.10. EA-SRM'ye uygulanan akım ve parametre değerleri	154
Çizelge 4.11. EA-SRM Model A analiz sonuçları.....	155
Çizelge 4.12. EA-SRM Model B analiz sonuçları.....	156
Çizelge 4.13. Model A optimizasyon sonuçları.....	162
Çizelge 4.14. Model A optimizasyon sonucu bariyer ölçüleri	163
Çizelge 4.15. Model B optimizasyon sonuçları	165
Çizelge 4.16. Model B optimizasyon sonucu bariyer ölçüleri.....	166
Çizelge 4.17. Model B üretimsel şartlara uygun bariyer ölçüleri	168
Çizelge 4.18. EA-SRM parametrik analiz sonuçları.....	169
Çizelge 4.19. Sıcaklık testi öncesi direnç ölçümü	180
Çizelge 4.20. Sıcaklık testi ve sonrası alınan veriler	182

Çizelge 4.21. EA-SRM prototipi deneysel sonuçları.....	183
--	-----



1. GİRİŞ

21. yüzyılda dünyada ve ülkemizde teknolojik gelişmelerin ve sanayi kuruluşlarının artmasıyla paralel olarak elektrik tüketimi de artmıştır. Günlük hayatta kullanılan ev aletlerinden, büyük çapta kullanılan endüstriyel cihazlara kadar geniş bir yelpazede kullanılan elektrikli makineler, enerji tüketimi olarak ülkelerin önemli bir tüketim ve maliyet kalemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Enerji talebinin artmasıyla elektrik üretimi her yıl giderek artmıştır. Şekil 1.1’de Türkiye’de 1975-2019 yılları arasında üretilen ve tüketilen enerjinin yıllara göre değişimi gösterilmiştir (Anonim, 2019a). Enerji kaynaklarının kısıtlı olması ve ülke ekonomilerinin gelişimi için “enerji verimliliği” konusu üzerinde ciddi çalışmalar yapılmış ve yaptırımlara varan uygulamalarla karşılaşılmıştır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi artıran destekler yapılmıştır. Ülkemizde de yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi her geçen yıl artmaktadır (Anonim, 2019b).



Şekil 1.1. Türkiye’de 1975-2019 yılları arasında üretilen ve tüketilen enerjinin yıllara göre değişimi (Anonim, 2019a)

2019 yılında ülkemizdeki elektrik tüketimi 290.445 *GWh* iken 2020 yılında %0.14 artış ile 290.856 *GWh*’e ulaşmıştır. Bu tüketimin %42’si sanayide kullanılmaktadır (Anonim, 2019c). Tüketicinin neredeyse yarısının sanayide kullandığını düşünülürse, bu alandaki enerji verimliliğin artırılması sanayide ve ülkemiz ekonomisinde önemli bir katkı

sağlayacaktır. Sanayideki enerji tüketimine bakıldığında ise yaklaşık %70'i elektrik motorları tarafından kullanılmaktadır (Akgün, 2018; Yıldırım, 2019). Buradan sonuçla sanayide kullanılan elektrik motorlarının veriminin artırılması veya verimli motorlar ile dönüşümünün gerekli olduğu görülmektedir.

Dünyadaki elektrik motorlarının geniş market ağına sahip olması sebebiyle performans testleri ve verim sınıfları için eşdeğer standartların belirlenmesi gerekmektedir. Avrupa Elektrik Makinaları Üreticileri Komitesi (CEMEP) ve Avrupa Komisyonu (EU) tarafından 2014 yılında yayınlanan ve gönüllülük esasına dayalı bir deklarasyon ile çıkış gücü 1.1 kW ve 90 kW aralığında olan motorları EFF1, EFF2 ve EFF3 olarak isimlendirilen verim sınıflarına ayırmıştır. Bu CEMEP/EU deklarasyonu verimlilik sınıfları üzerinde yapılmış öncü bir çalışma olup, Avrupa'da ve dünyanın diğer bazı ülkelerinde benimsenmiştir (Anonim, 2014a).

Bu sebeple uluslararası standartlar geliştiren ve elektro-teknoloji alanında uygunluk değerlendirme sistemlerini işleten Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), elektrik motorları ile ilgili test ve verim sınıfları hakkında standartlar belirlemiştir (Almeida ve ark., 2014). IEC, motor enerji verimliliğini tanımlayan standartları uyumlaştırmak için Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği (NEMA), Japonya Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği (JEMA), CEMEP ve Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) kurumlarıyla iş birliği halinde Uluslararası Verim Sınıflarını (IE) geliştirmiştir (Anonim, 2015). IE sınıfları IEC 60034-30-1 standartları ile belirlenmiştir ve 2014 yılında güncellenmiştir. 0.12 kW – 1000 kW aralığındaki motor güçlerine ait IE sınıfları Çizelge 1.1 de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. IE verim sınıfları

Verim Sınıfı Adı	Verim Sınıfı
Standart Verimlilik	IE1
Yüksek Verimlilik	IE2
Premium Verimlilik	IE3
Süper Premium Verimlilik	IE4

Çizelge 1.1’de IE4 en yüksek verimliliği ve IE1 en kötü verimliliği göstermektedir. IE5, IEC 60034-30-1’in bir sonraki bildirisine dahil edilecek ve IE4’e göre enerji kayıplarının %20 daha düşük olacağı öngörülmektedir. IE5 üzerine çalışmaların yapıldığı bilinse de şu an yürürlükte değildir. Verim sınıflarının belirlenmesi kadar motor testlerinin ve ortamının da standartlaşması önemlidir. Motor testlerinin yapıldığında kullanılan donanım, ortam değişkenleri ve testi yapan personel yetkinliği yapılan test sonuçlarına etki edeceğinden, IEC 60034-30-2 standartları ile düzenleme yapılmıştır. Bu düzenleme yayınlaması akabinde Türkiye’de de mevzuat hazırlanmış ve 2011 yılında TS EN 60034-2-2 ile standartlaşmıştır (Anonim, 2011; Anonim, 2014b; Anonim, 2014c).

Sanayide kullanılan motorların %90’ı IE3 ve altı verimlilik sınıfında olan ASM’ler (ASM)’dir. ASM’lerin verim sınıfını yükseltmek için çalışmalar devam ediyor olsa da, rotorlarındaki bakır kayıpları dolayısıyla IE4-IE5 sınıflarına çıkması zor görünmektedir. Bu sebeple endüstriyel alanda alternatif ve yüksek verimli motorların kullanımı artmıştır. Akademik ve endüstriyel çalışmaların sonucunda motor üreticileri, yaygın olarak kullanılan Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) ve senkron relüktans motorlar (SRM)’a yönelik motor tasarımları, prototip çalışmaları ve üretimlerini gerçekleştirmişlerdir.

SRM’nin ilk tasarımları ile 20. yüzyıl başlarında karşılaşmıştır ve günümüze kadar birçok tasarımı yapılmıştır. SRM’ler uzun zaman boyunca düşük performansları dolayısıyla önemsizlenmiştir. Özellikle şebeke kalkışı için kullanılan sincap kafesi içeren tasarımlar dikkat çekmemiştir. Fakat son yıllarda gelişen güç elektroniği ve sürücü sistemleri ile sincap kafesi bulunmayan tasarımlar çalışılmış ve performansları ile dikkat çekmiştir. Özellikle geleneksel alternatif akımlı (AA) motor ve senkron motorlar (SM) ile aynı tip stator kullanımı önemli bir fayda sağlamıştır. SMSM’lerin sahip oldukları mıknatısların maliyeti ve demagnetizasyon dezavantajları düşünüldüğünde rotorunda bakır bulunmayan SRM’ler ön plana çıkmıştır.

Son zamanlarda SRM’ler değişken hız kullanılan endüstriyel uygulamalardaki kullanımı ve aşağıdaki avantajları ile dikkat çekmiştir (Vagati, 1994; Vagati, 1998; Bianchi ve ark., 2015; Mahmoud ve ark., 2015; Ferrari ve ark., 2015; Ibrahim, 2017):

- Rotorunda sargı, mıknatıs ve sincap kafesinin bulunmaması sebebiyle aynı boyutlardaki ASM'ler ve SMSM'lerden rotoru daha hafif ve ucuzdur.
- Rotor sıcaklığı çok düşüktür. Bu sebeple Tork/Akım oranı rotor sıcaklığından bağımsızdır.
- SRM'lerin statoru ve motor sürücüsü için kullanılan eviricileri sanayide kullanılan ASM'ler ve SMSM'ler ile aynıdır.
- Kontrol metotları ASM'ler ile benzerdir. Sensörsüz hız kontrolü rotor tasarımının yapısı sebebiyle daha kolaydır.

SRM'lerdeki güç faktörü, yüksek evirici oranları gerektiğinden ASM'ler ve SMSM'ler ile karşılaştırıldığında daha düşüktür. Diğer taraftan motor verimi aynı güç değerlerindeki ASM'lerden yüksek ve SMSM'lerden düşüktür.

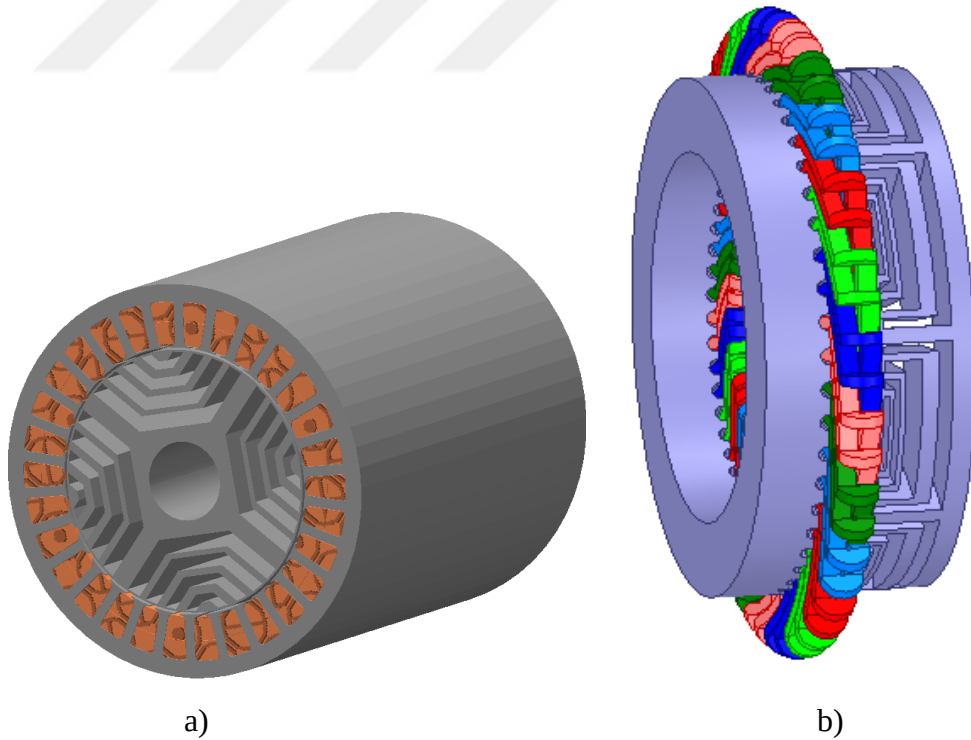
SRM'lerin çalışma prensibi ve tasarımı üzerine detaylı çalışmalar ilerleyen bölümlerde verilecektir.

Motor gövde yapısının seçimi düşünüldüğünde iki tip tasarım ile karşılaşılmaktadır: Geleneksel tip olan radyal akılı (RA) ve son zamanlarda özellikle boyut problemi yaşanan uygulamalarda kullanılmak için tasarlanan eksenel akılı (EA) motorlar. Her iki motorun çalışma prensibi aynı olmakla birlikte iletkenlerin yerleşimi ve akı vektörü yönü motor tipini karakterize etmektedir. EA motorlar elektromanyetik anlamda doğal olarak daha verimli bir topolojidedir. RA motorlarda akı yolu stator boyunduruğundan geçtiği için EA motorlara göre daha uzundur. EA motorlarda akı doğrudan hava aralığından geçerek ilerlemektedir. Manyetik alan, kısa olan akı yolu boyunca güçlü kalır ve makinenin verimliliğini-güç yoğunluğunu artırmasında önemli bir faktördür. EA'nın sağladığı en büyük avantajlardan birisi yüksek güç yoğunluğudur. Kilogram başına düşen motor gücü (watt/kg) oranı diğer motor türlerine kıyasla oldukça iyi seviyededir (Gieras ve ark., 2004; Çetin, 2008; Moreels, 2018).

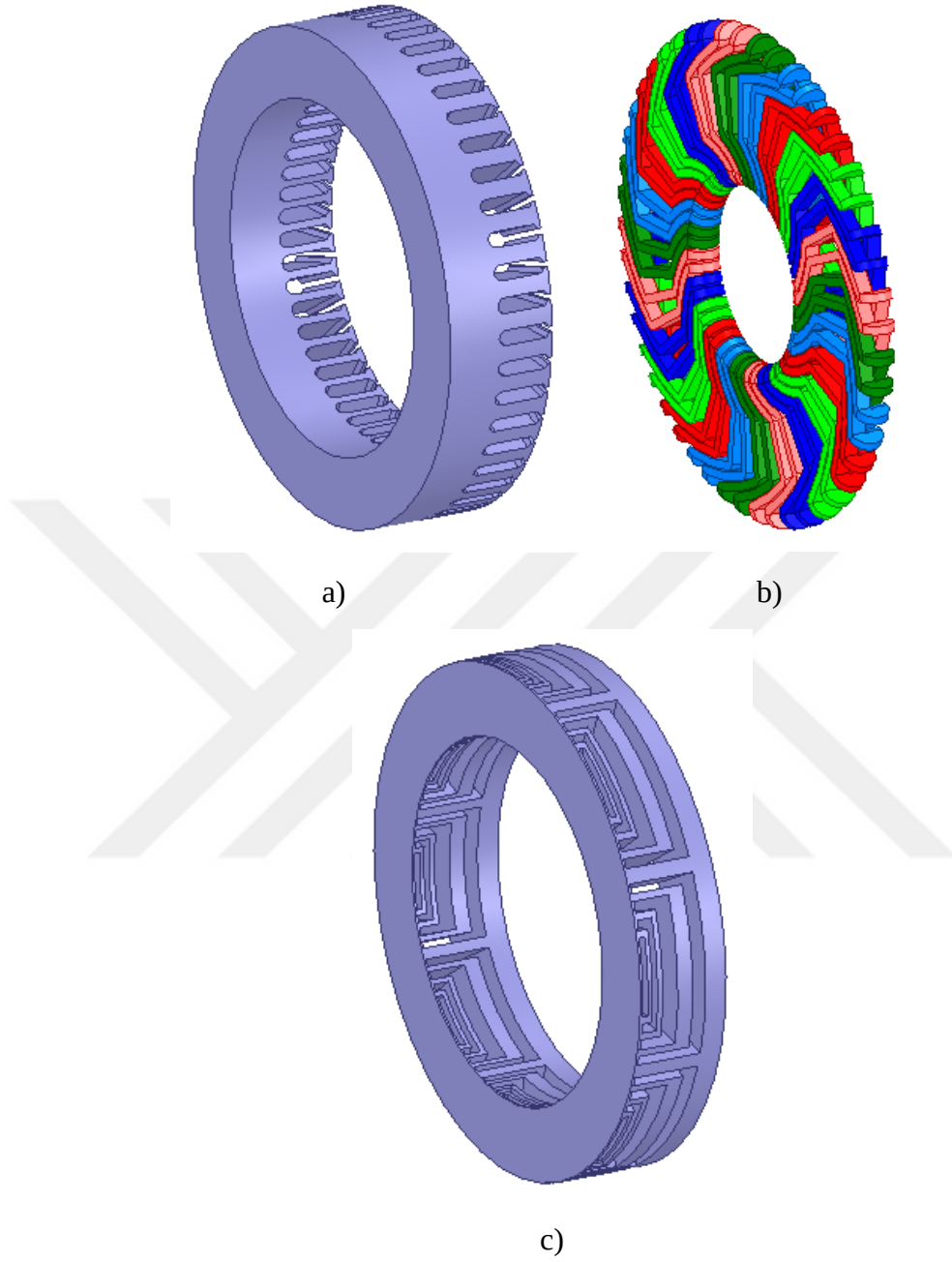
EA motorların elektromanyetik tasarımı, RA motorlardaki gibi silindirik tipteki rotora sahip olması sebebiyle temel olarak benzerlik gösterse de mekanik tasarımı, termal analizi ve üretimsel süreçleri daha karışıktır. EA motorlar, disk tipi motorlar olarak isimlendirilmektedir. Yassı yapılı olması, kompakt yapısı ve yüksek güç yoğunluğu sebebiyle, RA motorlara alternatif olarak dikkat çekmektedir.

EA motorlar elektrikli araçlarda, pompalarda, fanlarda, valf kontrolörlerinde, santrifüj makine parçalarında, robotlarda ve endüstriyel birçok ekipmanda kullanımı için uygundur. Büyük çaplı rotoru ile sağlanan yüksek atalet momentini sayesinde volan çarklarında kullanılabilir. EA motorlar küçük ve orta güçlü generatörlerde de kullanımı uygundur. Kutup sayısının yüksek seçimi ile bu motorların düşük hızlı uygulamalarda kullanımı uygun olmaktadır. Örnek olarak; Elektromekanik çekiş sürücüler, vinçler ve rüzgâr türbinleri verilebilmektedir (Gieras ve ark., 2004; Çetin, 2008; Moreels, 2018).

EA motorlardaki stator ve rotor parçaları disk tipinde olduğu için, üretimleri ayrı ayrı tasarlanabilir ve değiştirilebilir yapıdadır. Tek hava aralıklı tasarlandığı gibi çoklu hava aralığı içeren tasarımlara da izin vermektedir. Ayrıca hava aralığı kolaylıkla ayarlanabilmektedir. Şekil 1.2’de örnek olarak RA ve EA motor topolojileri gösterilmiştir. Şekil 1.3’te örnek bir Eksenel Akı-Senkron Relüktans Motor (EA-SRM) parçaları ayrıntılı gösterilmiştir.



Şekil 1.2. a) RA motor b) EA motor



Şekil 1.3. Örnek EA-SRM parçalarının gösterimi a) Stator b) Stator sargıları c) Rotor

Bu tez çalışmasında ASM'ler in sağlam ve az bakım gerektiren avantajlarını içeren ve aynı stator yapısı kullanılan, yüksek verimli ve tork yoğunluğuna sahip EA-SRM tasarımı yapılmıştır. Yapısal ve termal analizleri de yapılarak EA-SRM prototipi üretilmiştir. Motor tasarımının özgün yanı olan rotor üzerinde detaylı çalışma yapılmıştır. Farklı tiplerde bariyer yapısı ve yalıtım oranları incelenmiş böylece prototip olarak üretilen motorda özgün bir rotor topolojisi sunulmuştur.

Tasarım sürecinde analitik yöntemlerin yanı sıra MathWorks Inc. MATLAB® ve ANSYS® Electromagnetics Suite sonlu elemanlar yazılımı (SEY) geliştirme ortamlarından yararlanılmıştır. Önerilen rotor topolojisinde en yüksek verim karakteristiğine sahip geometrik tasarım verilerinin elde edilmesinde ve optimizasyonunda genetik algoritma (GA) kullanılmıştır. Böylece tork dalgalanması azaltılmıştır ve üretime hazır hale getirilecek tasarımın benzetim sonuçlarına katkı sağlamıştır. Sonuç olarak motor tasarımının performans eğrilerinin çizilmesinde daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesi amacı ile ANSYS® Electromagnetics Suite Maxwell 3D Transient çözücüsü kullanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında elde edilen özgün rotor topolojisine sahip EA-SRM modelinin prototip üretimi yapılmıştır. Üretimi tamamlanan EA-SRM prototipinin performans ve çalışma karakteristiğinin belirlenmesine yönelik yapılan testlerde hali hazırda TOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında mevcut olan motor test düzeneğinden yararlanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında EA-SRM'nin geliştirilmesi ve prototip üretimine yönelik yürütülen çalışmalar 2020/41 proje numarası ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

1.1. Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışmasının metodolojisini içeren tez bölümlerinde özet olarak aşağıdaki bilgiler verilmektedir.

İkinci bölümde; RA-SRM ve EA-SRM'ler hakkında literatür çalışmalarının incelemelerine yer verilmiştir. RA-SRM'ler üzerinde çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen EA-SRM üzerinde çalışmalar az sayıdadır.

Üçüncü bölümde; SRM'lerin genel özellikleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Sonrasında EA-SRM tasarım süreçlerini içeren boyutlandırma eşitlikleri, stator tasarımı ve matematiksel büyüklüklere yer verilmiştir. EA-SRM'nin özgün yanı olan rotor tasarım basamakları ve kutup sayısı, akı bariyer sayısı, uç köprü kalınlıkları, bariyer şekilleri, köprü kalınlığının etkileri üzerine bilgiler verilmiştir. Tasarım benzetimleri yapılmadan önce SEY hakkında bilgi verilmiştir. Analitik ve matematiksel olarak tasarlanan EA-SRM'nin SEY tabanlı benzetim programında tasarımları incelenmiştir. Burada bariyer

sayısının değişimleri, bariyer tipinin farklılıkları ve bariyer yalıtım oranı incelemeleri yapılmıştır. Yapılan benzetimler sonrasında istenilen güç, tork vb. değerlerini karşılayan modelde GA tabanlı optimizasyon çalışması yapılmıştır. Tasarımı, optimizasyonu, yapısal ve termal analizleri de tamamlanan EA-SRM modelinin prototip üretimi hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra üretimi yapılan motorun performans testlerinin yapılacağı test donanımı ve test öncesi hazırlıklar anlatılmıştır.

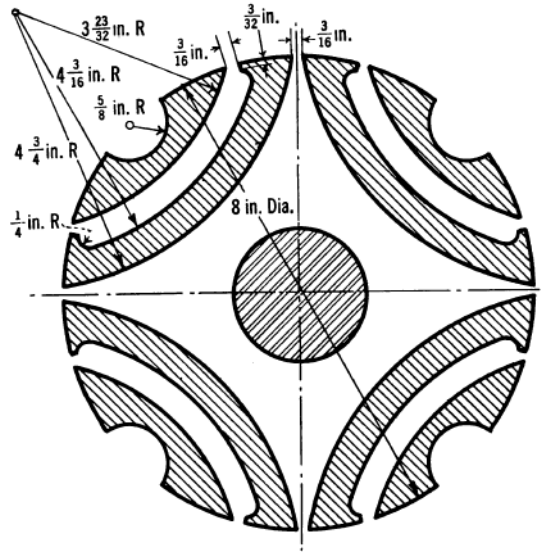
Dördüncü bölümde; Üretilmiş EA-SRM'nin performans testleri yapılmış ve benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda benzetim programı sonuçları ile benzeştiği ve yüksek verimli bir motor olduğu performans sonuçlarında gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında, rotorunda bakır kayıpları bulunmayan, endüstri de kullanılan diğer motorlara alternatif, özellikle boyut problemi yaşanan uygulamalarda kullanımı ile diğer motorlardan öne çıkacak yüksek verimli bir EA-SRM prototip üretilmiş ve testleri tamamlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

2.1. Radyal Akılı Senkron Relüktans Motorlar (RA-SRM)

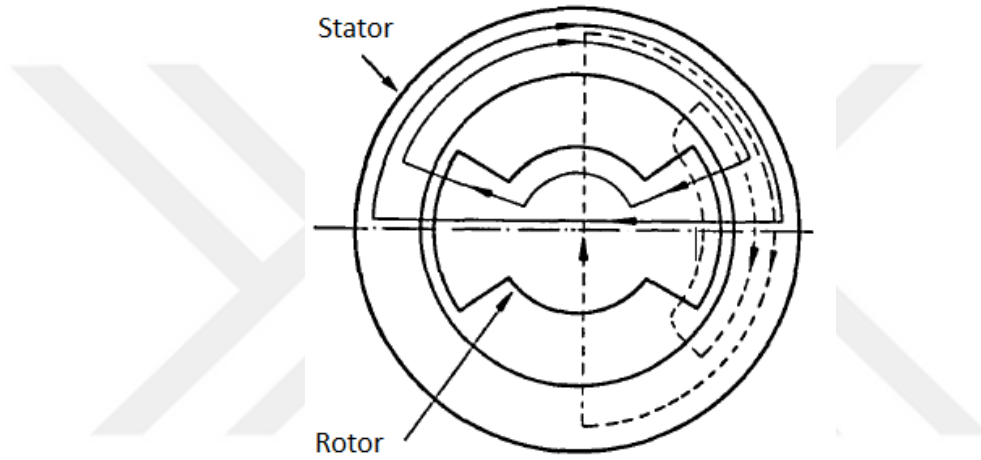
SRM'ler ile ilgili literatürde ilk karşılaşılan model Kostko (1923) tarafından sunulmuştur. Yapmış olduğu çalışmaya “Çok Fazlı Reaksiyon Senkron Motorlar” adını vermiştir. Yazar reaksiyon senkron motorların (Alan sargıları bulunmayan çıkık kutuplu rotorlu) 20. Yüzyıl başlarına kadar kullanılmaya devam eden ve ASM'lerden önce kullanılan, eski tip motorlardan olduğunu belirtmiştir. ASM'ler ile aynı stator yapısının kullanılacağı ve 4 bölümlü (kutuplu) olarak tasarladığı modelde hesapladığı maksimum tork değeri, ortalama aynı boyutlardaki bir ASM'nin %80 i kadar olduğunu belirtmiştir. 4 bölümlü çıkık kutuplu modelin sonuçlarının iyi olduğunu belirtmesine rağmen ilerleyen çalışmalarda 6 bölümlü (kutuplu) tasarımlar ile daha da geliştirilebileceğini belirtmiştir. Bu eserde yaptığı çalışmalar teorik hesaplamalar içermektedir. Şekil 2.1'de Kostko'nun tasarladığı ilk SRM'nin rotoru gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kostko'nun tasarladığı SRM'nin rotoru (Kostko, 1923)

İlerleyen süreçte relüktans tipi çıkık kutuplu rotor tasarımları üzerine teorik çalışmalar devam etmiştir. SM'lerde kullanılan farklı tip rotorlar (silindirik tip, relüktans, çıkık-kutuplu) üzerine çalışmalar yapılmış, eşdeğer devreleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda optimum sonuçlarına veren motor tasarımları için hesaplamalar yapılmıştır. (Trickey, 1946; Talaat, 1951; Lin, 1952; Douglas, 1956; Slemon, 1962).

Lawrenson, (1965) yapmış olduğu çalışmada o zamana kadar genel döner elektrik makineleri ailesinde, relüktans tipinin çok az olduğunu belirtmiştir. Bu sebeple üzerinde detaylı bilgiler olmadığından sincap kafesli ASM'ler ile karşılaştırma ve değerlendirmeleri çok yapılamamıştır. Yeterli tasarım ve geliştirme olanakları verildiğinde, relüktans makineleri (RM), bazı açılardan ASM'lerden daha üstün olduğunu kanıtlayabilir ve diğer motorlardan daha ucuz bir şekilde üretilebilir olduğunu belirtmiştir. Şekil 2.2'de Lawrenson'un çalışmasında gösterilen geleneksel tip, 2 kutuplu relüktans motorun kesiti gösterilmiştir.

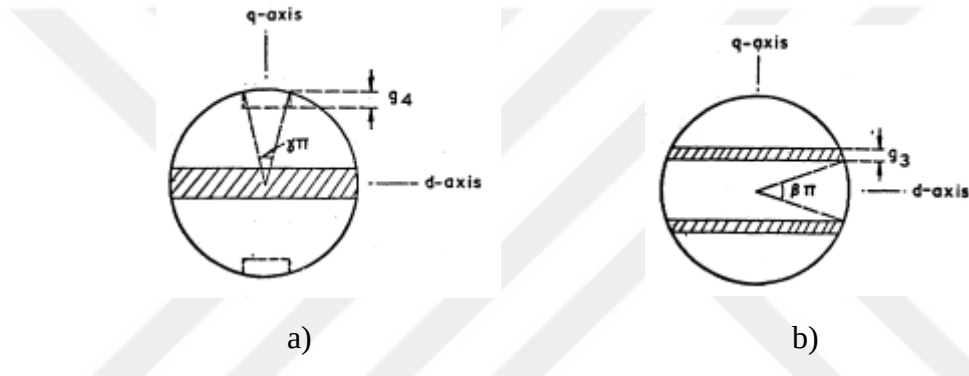


Şekil 2.2. Lawrenson'un çalışmasında gösterilen çıkık kutuplu rotor (Lawrenson, 1965)

1960 ve 1970'lerde relüktans motorlar hakkında çalışmalar artmış ve kararlı durum analizleri üzerine çalışmalar yapılmıştır (Honsinger, 1971). Ayrıca devre analizleri yapılmış ve tork hesaplamaları üzerine teorik çalışmalar yapılmıştır (Pillai, 1967). Çıkık kutuplu SM'lerin eşdeğer devreleri ve fazör diyagramlarının sunulduğu çalışmalar da yapılmıştır (Gray, 1968).

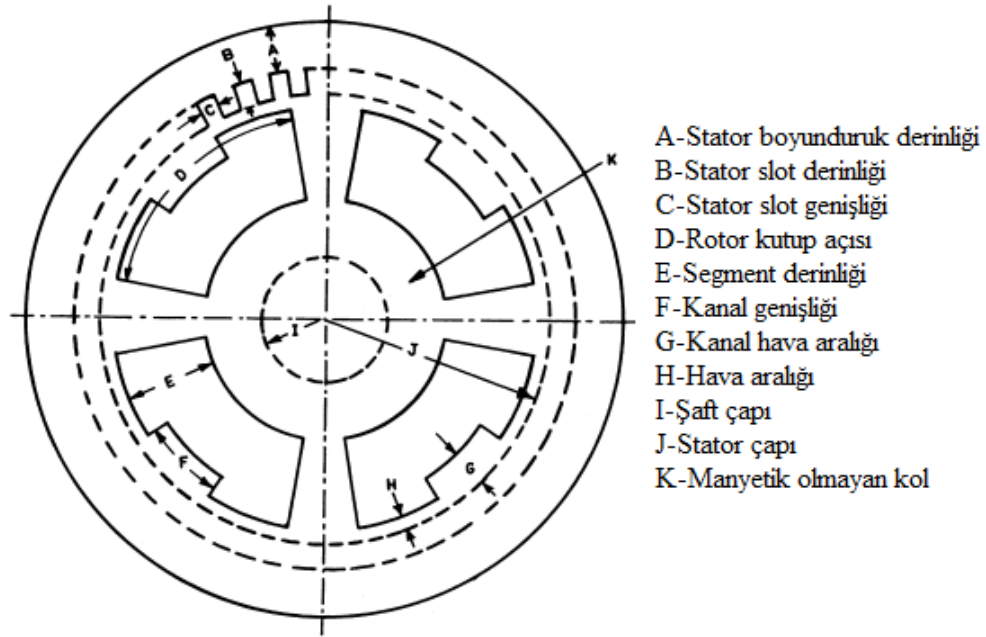
Lipo ve Krause (1967) sunmuş oldukları eserde "Relüktans-Senkron Makine" olarak isimlendirdikleri motorun kararlılık analizi üzerine çalışma yapmışlardır. Bu motorun davranışını tanımlayan eşitliklere yer verilmiştir ve doğrusallaştırmak için küçük-yer değiştirme teorisi uygulanmıştır. Nyquist'in kararlılık kriterleri bu eşitliklere uygulandığında düşük hızlarda (düşük frekanslarda) oluşan kararsızlık bölgeleri hakkında bilgiler verilmiştir. Bu kararsızlık bölgeleri uygulanan stator gerilimleri, sistem ataleti ve makine parametrelerine bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Chalmers ve Mulki (1972) yaptıkları çalışmada laminasyonsuz rotorlara sahip RM tasarımları incelenmiştir. İki tip rotor tasarımı incelenmiştir; Çıkık kutuplu rotorlu ve akı bariyerli rotorlu. Bu modeller için teorik hesaplamalara yer verilmiş ve deneysel sonuçlarla doğrulamışlardır. Birçok rotor tipi incelenmiştir fakat iki tip akı bariyerli model uygun görülmüştür. Birincisinde akı bariyeri rotor eksenini merkezindedir ve manyetik olmayan bir çelik şaft içindedir (segment tip). Diğer tip ise “katman-tip” olarak isimlendirilmiştir. Bu modeller Şekil 2.3’te gösterilmiştir. Tasarım performans sonuçları, daha önce farklı türlerde yayınlanmış olan sincap kafesli ve sargılı lamineli rotora sahip RM’ler ile benzerdir.



Şekil 2.3. Chalmers ve Mulki (1972) çalışmalarında sunulan akı bariyerli rotor tipleri a) segment tip b) katman tip

Ramamoorthy ve Rao (1979), ayrı bir doğru akım kaynağı uyartımı gerekmeyen RM’lerin, uyartımlı SM’den avantajlı olduğunu belirtmişlerdir. Segment rotorlu RM’nin karakteristikleri, geleneksel tip RM’den üstün olduğunu ifade etmişlerdir. Yapılan çalışmada çok fazlı segment rotorlu RM’nin tasarımı, lineer olmayan program yöntemleri ile sunulmuştur. Sonuç olarak 2 HP, 400 V, 4 kutuplu, 24 oluklu, 50 Hz, 3 fazlı motorun performans karakteristikleri gösterilmiştir. Tam yükte %81 verim ve 0.796 güç faktörü hesaplanmıştır. Tasarlanan rotor kesiti Şekil 2.4’te gösterilmiştir.



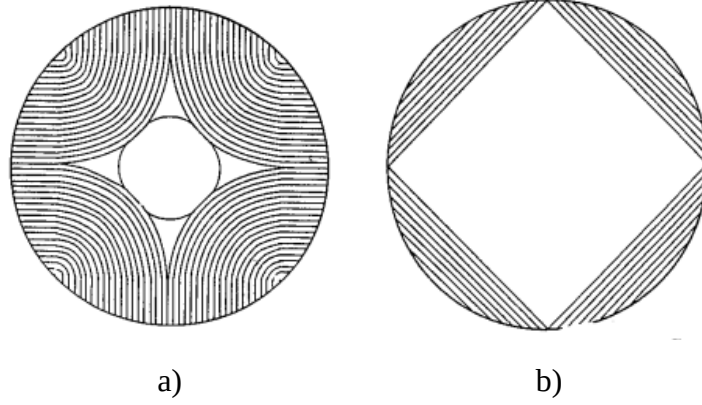
Şekil 2.4. Ramamoorty ve Rao (1979) çalışmasında sunulan rotor kesiti ve açıklamaları

Fukao ve ark., (1989) yapmış oldukları çalışmada amorf metallerin (amorf katı madde) yüksek gerilme kuvveti ve düşük manyetik kayıplara sahip olması sebebiyle, sundukları yüksek hızlı relüktans motorun (uyartımsız SM ve anahtarlamasız) stator ve rotorunda bu malzemeyi kullandıklarını belirtmişlerdir. Motor performansında amorf metalin etkisini görmek için test makinasının kayıplarını ayrı tutmuşlardır ve silikon demir kullanılan motor ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak 48000 d/d hızında yaptıkları test/deneysel sonuçlarda amorf madde kullanılan motorun çekirdek kayıpları silikon demir madde kullanılan motora göre beş kat daha az çıkmıştır. Çekirdek kayıplarındaki bu azalma toplam kayıpların %33'ünü içermekte olduğunu belirtmişlerdir.

Xu ve ark., (1990) sundukları eserde vektör kontrolünün (VK) geleneksel SRM'ye uygulanması (VK-SRM) ile doyum ve demir kayıplarının etkilerine vurgu yaparak sunmuşlardır. Deneysel olarak bu parazitik etkilerin bir VK-SRM'nin performansını önemli ölçüde etkileyebileceği gösterilmiştir. Doyum ve demir kayıpları içeren basitleştirilmiş bir d-q modeli sunmuşlardır ve optimum tork/akım ve optimum verimlilik çalışması ile ilgili deneysel sonuçların, modelin performans öngörülleri ile genel olarak uyumlu olduğu gösterilmiştir. Bu makalede sunulan sonuçlar, doyum ve demir kaybının bir SRM'nin vektör kontrolü için optimum rotor açıları oluşturmada önemli bir role sahip olabileceğini açıkça göstermektedir. Genel olarak, maksimum tork/akım ve

maksimum verimlilik için en uygun açılar, doğrusal ve kayıpsız bir model tarafından öngörölmüş teoride gösterilen 45 dereceli açıdan daha büyük olduğu göstermişlerdir. Çekirdek kayıplarını şönt direnç olarak birleştiren ve d ekseninde doygunluğa izin veren basit bir model, performans hakkında yararlı bilgiler sağlar ve kontrol stratejileri uygulamak için bir araç sağlayacağını belirtmişlerdir.

Platt (1990) yayınladığı eserde üç fazlı SRM statorunun üç fazlı ASM ile benzer yapıda olduğunu belirtmiştir. Önceki çalışmalarda rotor kısımlarının basit çıkık kutuplu yapıda olduğu ve performans olarak düşük olduğunu belirtip yaptığı çalışmada güçlü anizotrop rotor modeli önermiştir. Yeni rotor tasarımı ile manyetik demir laminasyonlarını yaklaşık eşit kalınlıkta manyetik olmayan aralarla birbirinden ayırarak güçlü anizotropiye ulaştırmıştır. Dört kutuplu rotor tasarımındaki manyetik endüktans doğrudan eksene göre çok daha düşük olduğu ve bu rotorlu motorun önceki makinelerden daha fazla tork geliştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Aynı boyuttaki ASM ile karşılaştırmalı deneysel sonuçlara yer verilmiş ve benzer tork değerleri elde etmiştir. Platt (1990) motorun sabit frekans uygulamaları için tasarlanmadığını ancak bir invertör tarafından çalıştırıldığında hem ASM hem de SMSM'lere göre bazı avantajlara sahip olduğunu belirtmiştir. Bunları şu şekilde sıralamıştır; Vuruntu momentinin olmaması, ASM'den daha verimli olması ve karşılaştırılabilir tork üretebilmesi, rotorun serin çalışması ve bu nedenle rotor yatakları gereksiz sıcaklık artışına maruz kalmaması, rotorun sağlam ve kalıcı mıknatısların sıcaklık kısıtlamalarına tabi olmaması, senkron bir makine olması ve alan odaklı kontrolün uygulanmasının kolay olması, SMSM'lerin aksine alan zayıflatma rejimi altında kolayca çalıştırılabilir olması. Eserde sunulan rotor topolojileri Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

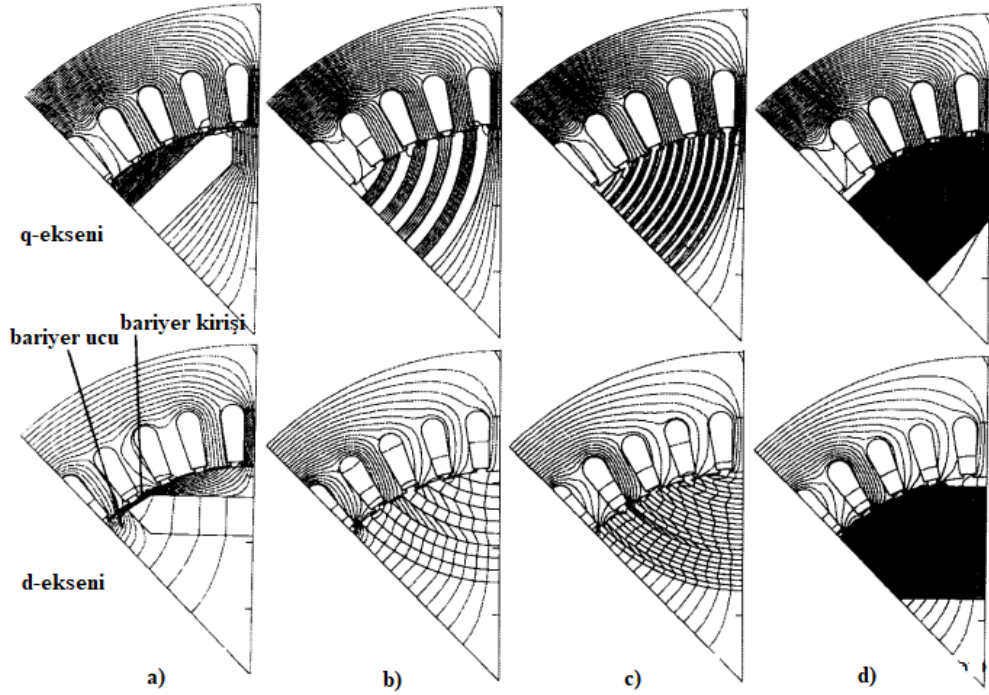


Şekil 2.5. Platt (1990)'ın rotor tasarımları a) Güçlü anizotropik yapı b) Rotor laminasyonları kutup merkezinden yüzeye 45 derece açılı yapı

Lipo, 1991 yılında yayınladığı eserde, SRM tasarımlarında son yıllarda yoğun bir aktivite yaşanmış olduğunu fakat tork kapasitelerinin artırılması için değişken hızlı motor sürücülerine üzerine çok çalışma yapılmadığını belirtmiştir. Ön çalışmalara dayanarak, bu tür motor sürücülerinin tasarımında, ASM veya değişken RM'lerle benzer veya üstün performans özellikleriyle sonuçlanan önemli iyileştirmeler yapılabileceği belirtmiştir. Yaptığı çalışmada altı adet yenilikçi ve ilerleyen süreçlerde dikkat çekecek, değişken hızlı relüktans makine sürücüsü konfigürasyonlarına yer vermiştir. Bunlar; Çok fazlı konsantre sargılı SRM sürücüsü, Alan düzenlemeli RM sürücüsü, İki fazlı konsantre sargılı RM sürücüsü, Homopolar değişken RM sürücüsü, Çift beslemeli AA uyartımlı RM sürücüsü ve Sabit mıknatıs destekli senkron relüktans motor (SM-SRM) sürücüsü.

Staton ve ark., (1991) "SRM Geometrisinin Optimizasyonu" isimli çalışmada tek bariyerli, çoklu bariyerli ve eksenel lamineli topolojilerdeki RM'lar üzerine çalışmalar yapmışlardır. Tek bariyerli yapıdaki SRM'deki güç faktörü ve güç gereksinimi açısından ASM ile rekabet edebilir hale gelecek büyük bir çıkıntı oranına ulaşacak kapasitede olmadığını göstermişlerdir. Güç faktöründeki dezavantajı, özellikle invertör maliyetini fazla olması, tek bariyerli SRM'nin rekabet gücünü ciddi şekilde etkilediğini belirtmişlerdir. Düşük çıkıntı oranı, tork değişim hızı, alan zayıflatma aralığı ve endüktans parametreleri tahmininin doğruluğu hassasiyeti gibi diğer performans yetenekleri üzerinde de ciddi olumsuz etkilere sahip olduğunu ve rotor çıkıntı oranı-stator oluk kombinasyonu nedeniyle tork dalgalanmasının büyük bir bileşenine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Rotorun laminasyon sayısı ve laminasyon-bariyer kalınlığı oranı çoklu

bariyer tasarımında değişken aralıklardadır. 10'dan büyük bir laminasyon sayısı değerini kullanmanın çok az yararı olduğu görülmektedir. Pratikte, stator olukları nedeniyle bozulma ve tork dalgalanmasını önlemek için laminasyon sayısının en az iki katına çıkarmaları gerektiğini belirtmişlerdir. Laminasyon sayısı 24 kullanıldığında yaklaşık 9'luk bir çıkıntı oranı elde edilebildiği gösterilmiştir, bu da güç gereksinimi açısından ASM'ler ile rekabet edebilir hale getirmek için yeterince büyük bir güç faktörü ile sonuçlanmıştır. Çoklu bariyerli tek-laminasyonlu rotor tasarımının pratik olmadığı ve bu nedenle yapımı daha basit olan ve daha düşük tork dalgalanmasına sahip eksenel-lamineli (EL) yapı üzerinde yoğunlaşmışlardır. Eserde çalışılan rotor topolojileri Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

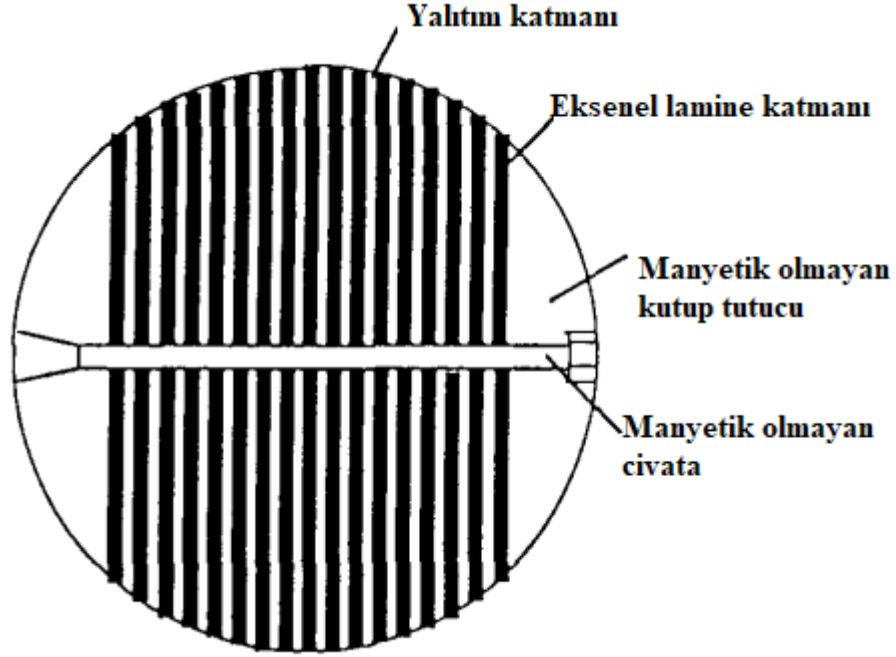


Şekil 2.6. a) tek bariyerli rotor b) 10-katmanlı rotor c) 24-katmanlı rotor d) EL rotor (Staton ve ark., 1991)

Vagati ve ark. (1992) “Yüksek performanslı SRM’lerde tasarım kriterleri” isimli çalışmada rotor yapısını detaylı şekilde tartışmışlardır. q-ekseni akısının en aza indirilmesi dolayısıyla torkun yüksek tutulması için optimizasyon algoritmaları geliştirmişlerdir. Rotor seçiminde önceki çalışmalarda kaynak gösterilerek ve segmentli rotor yapısı seçilmiştir. Rotorun mekanik yapısının sağlamlığı da değerlendirilmiştir. Yapısal olarak rotor kutup uçlarındaki kanalın genişliği q-eksenindeki reaktansı ve

dolayısıyla tork değerini etkilediği mekanik problemler olarak değerlendirilmiştir. Bu değer üretimsel süreçler göz önüne alındığında 0.5 mm alınmış ve tork değeri 6.9 Nm hesaplanmıştır. Örnek alınan motorlardan %8 daha düşük çıkmıştır. Ticari amaçlı seçilmiş karşılaştırma yapılan motordaki tork değeri ise 9 Nm olarak belirtilmiştir.

Boldea ve ark., (1992) çalışmalarında, Eksenel Lamineli SRM (EL-SRM) olarak isimlendirdikleri motorda analiz çalışmaları ve prototip üretimi sonucu test sonuçlarına yer vermişlerdir. Bu tip motorların değişken hızlı sürücülerde kullanılabileceğini, nispeten çok yüksek bir çıkıntı oranı (L_d/L_q) oranına sahip olduğunu ve rotor akımı taşımadığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak, bir EL-SRM'nin yüksek tork yoğunluğu, güç faktörü ve verimliliğe sahip olduğu ve vektör kontrolünün oldukça basit olduğu ifade edilmiştir. Bu eserdeki motor parametrelerinin belirlenmesi, matematiksel ve SEY tabanlı yapılmıştır. Teorik analizden ve manyetik alanın doğası gereği elde edilen tasarım kriterleri SEY ile elde edilmiştir ve böylece EL-SRM'yi sunmuşlardır. Bu eserde önceki çalışmalarda kullanılan EL tipi rotorlardan farklı olarak ince iletken laminasyonlar (%60) ve ince yalıtım katmaları (%40) tasarlanmıştır. Eserde kullanılan rotor topolojisi Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Çalışma sonucunda analitik tahminler ve deneysel test sonuçları arasında benzeşme elde etmişlerdir. SEY sonuçlarından yüksek çıkıntı oranı ve dolayısıyla yüksek performans elde etmek için her kutup ve her faz başına çoklu oluk kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. 1.5 HP laboratuvar prototipinin test sonuçlarında yüksek çıkıntı oranı (21.1), yüksek güç faktörü (0.91) ve yüksek verim (%90) elde etmişlerdir.



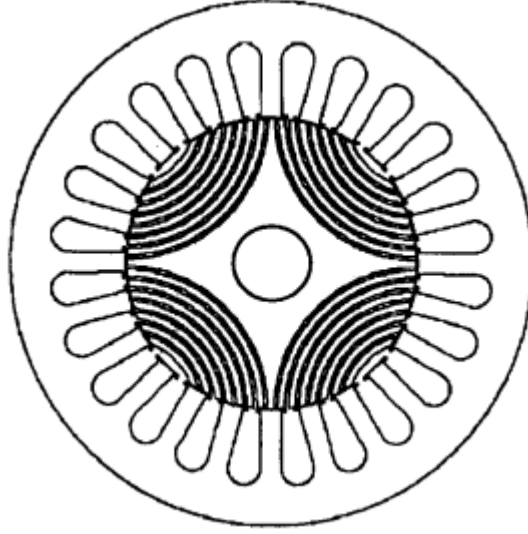
Şekil 2.7. İnce lamineli ve segmentli EL tipi rotor (Boldea ve ark., 1992)

Balbo ve ark. (1993), yaptıkları çalışmada düşük güç ve/veya düşük maliyetli uygulamalar için uygun SRM yapılarını incelemişlerdir. 15 kW gücündeki orta boyut olarak sınıflandırılmış ve 2 HP gücündeki motor ise küçük boyutlu motor olarak isimlendirilmiştir. Üretim maliyetinin düşürülmesi, basitleştirilmiş makine yapıları ve optimum olmayan çalışma koşulları gerektiren otomatik seri üretim tekniklerinin benimsenmesiyle elde edileceğini belirtmişlerdir. SRM'nin performansını etkileyen ana unsurun rotor yapısı olduğu işaret edilmiştir. q-eksenindeki endüktansı küçük tutmak için rotor segment sayısı ve genişliklerinin yüksek tutulması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca iletkenlerin sarımı ve rotor eğikliği (skew) gibi basit provizyonlar sayesinde daha iyi performanslar elde edilebilir. Makalede genel performans üzerindeki etkiler incelenmiştir ve basitleştirilmiş rotor modellerine yer verilmiştir. Bu tür basitleştirilmiş yapılarla bile tatmin edici performansların elde edilebileceğini gösteren bazı uygulama örnekleri ve deneysel testler de açıklanmıştır. Teorik ve gerçek davranış arasında oldukça iyi bir uyum bulunmuş ve bu da son literatürde bildirilen analitik yaklaşımların geçerliliğini teyit etmektedir.

1993 yılında yayınlanan “SRM’lerin Kontrolü” isimli eserde (Betz ve ark., 1993), SRM’lerin kontrol yöntemleri üzerine inceleme ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

Simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarına yer vermişlerdir. Bu eser iki ana bölümden oluşmuştur. Birinci bölüm ideal SRM analizini, ikinci bölüm ise eserde belirtilmiş MTK (Maksimum tork kontrol $\theta_i = \pi/4$), MTKD (Tork kontrolü değişiminin maksimum oranı $\theta_i = \tan^{-1} \xi$), MGFK (Maksimum güç faktörü kontrolü $\theta_i = \tan^{-1} \sqrt{\xi}$) ve SATK (-d ekseninde sabit akım uygulanması ile -q eksenindeki torkun manipüle edilmesi yöntemi) yöntemleri ile performans analizlerini içermektedir. ξ , çıkıntı oranını ifade etmektedir ve önceki çalışmalarda maksimum torkun değişimi akım açısına ve dolayısıyla çıkıntı oranına bağlı olduğu belirtilmiştir. SRM için hemen hemen tüm performans parametreleri ve tüm kontrol stratejileri daha büyük çıkıntı oranını işaret etmektedir. Sonuç olarak genel amaç, bu oranı en üst düzeye çıkarmak için tasarım yapmak olduğunu belirtmişlerdir. Aynı yıl alan odaklı ve vektör kontrolü tabanlı yöntemler ile SRM performansları incelenmiştir (Matsuo ve Lipo, 1993; Trubenbach ve ark., 1993).

Matsuo ve Lipo (1994), yapmış oldukları çalışmada SRM rotorundaki iki önemli geometrik değişken gösterilmiştir. Bunlar rotor segmentlerinin genişliğini ifade eden W_{iron} ve segmentler arasındaki yalıtkan bölge genişliğini ifade eden W_{ins} . Bu iki değişkenin oranı K_w olarak tanımlanmıştır ve 0.2 – 0.6 arası seçilmesi ile yüksek $L_d - L_q$ farkı elde edildiği belirtilmiştir. Fakat bu değerin çok küçük seçilmesi ise yapısal sorunlara neden olacağından, optimum değer olarak 0.5 seçilmiştir. Çıkıntı oranının da “10” civarı seçilmesi, gerçekleştirilebilir bir değer olduğu SEY çalışması ile gösterilmiştir. Oldukça düşük kaçak endüktans değerleri sayesinde çıkıntı oranı 7 – 8 arası beklendiğinde, güç faktörü 0.8 civarı değer ile ASM ile karşılaştırılabilir hale gelmiş olacağını belirtmişlerdir. Bu makaledeki tartışmaları ve analizleri doğrulamak için deneysel bir SRM tasarlanmış ve üretilmiştir. SEY ile gösterilmiştir ki çıkıntı oranı 10.6 hesaplanmıştır. Bu motorun deneysel sonuçları rotor optimizasyon tasarımlarını doğrulamıştır. Bu eserde çalışılan statorunda 24 oluk bulunan rotor modeli Şekil 2.8’de gösterilmiştir.

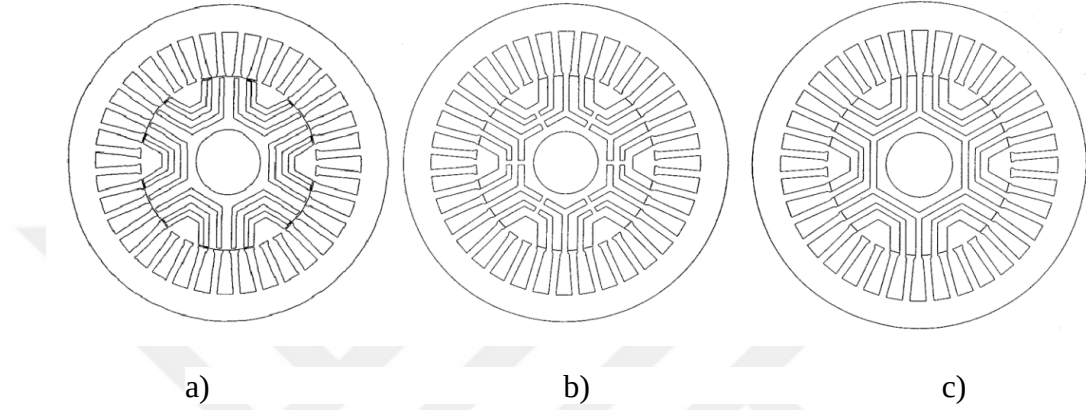


Şekil 2.8. 24 stator oluklu (her kutup/fazda 2 oluk) SRM modeli (Matsuo ve Lipo, 1994)

Fratta ve ark. (1995) yayınladıkları eserde, çok segmentli SRM'nin tork dalgalanmasını önerilen matematiksel model ile öngörülebilir olduğunu belirtmişlerdir. Bu eserde akım açısı 15'er derece değiştirilerek $0 - 90^\circ$ derece arası değişimi ile tork değerleri gözlenmiştir. Teğetsel kırıklı ve teğetsel kırıksız iki adet rotor tipi incelenmiştir. Teğetsel kırıksız modelde önerilen model ve hesaplanan değer sonuçları tüm akım açıları değerlerinde benzeşmiştir fakat teğetsel kırıklı modelde 90° 'ye yakın bölgelerde benzeşmeler olmuştur. Bu sonuç, teğetsel kırığın mevcut olduğu modelin geçerliliğinin, modelin parametreleri tanımlandığında olduğu gibi, kırıkların q-ekseni Elektromotor Kuvvet (EMK) tarafından doyuma gittiği durumlarla sınırlı olduğunu doğruladığını belirtmişlerdir.

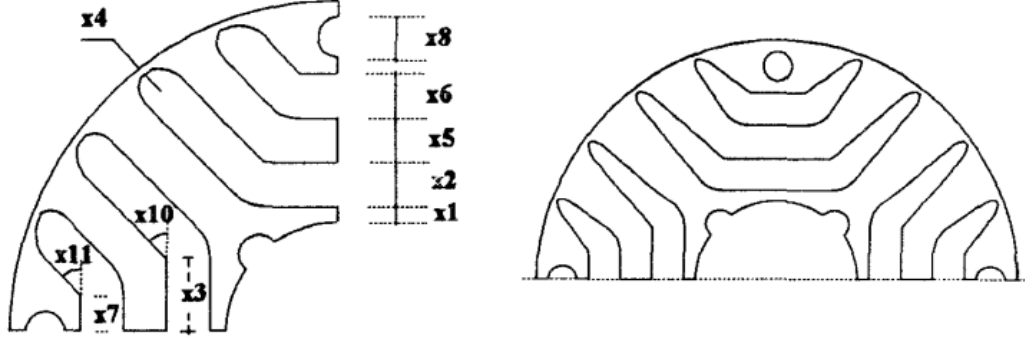
Luo ve ark., 1995 yılında SRM Tasarımı isimli çalışmada segmentli yapıdaki rotor kullanımının, yüksek performanslı SRM oluşturmak için mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Bu makalede üç tip rotor konfigürasyonu önerilmiştir ve SEY ile değerlendirmişlerdir. Rotor segmentleri için herhangi bir bağlantının q-ekseni akısı için düşük relüktans yolu sağlayacağını öngörmüşlerdir. Bu eserde karşılaştırılan rotor tipleri Şekil 2.9'da gösterilmiştir. 3 kutuplu ve 1,2 ve 3 numaralı rotorlardaki çıkıntı oranları sırasıyla 3.44, 3.36 ve 7.98 olarak hesaplanmıştır. Böylelikle, tamamen izole edilmiş segmentlere sahip segmental rotor (3 numaralı rotor), deneysel motor için nihai seçim

olarak sunulmuştur. Çapraz bağlantı mıknatıslanma ve mıknatıslanma doyum etkilerinin, uyarma akımının orta düzeyde kontrolü ile en aza indirilebileceği sonucuna varılmıştır. Deneysel SRM'nin yapım süreci açıklanmıştır. Bu motorun deneysel ölçümleri bitmemiş olsa da bu makaledeki teorik çalışma, yüksek performanslı SRM tasarımının geçerliliğini doğrulamıştır.



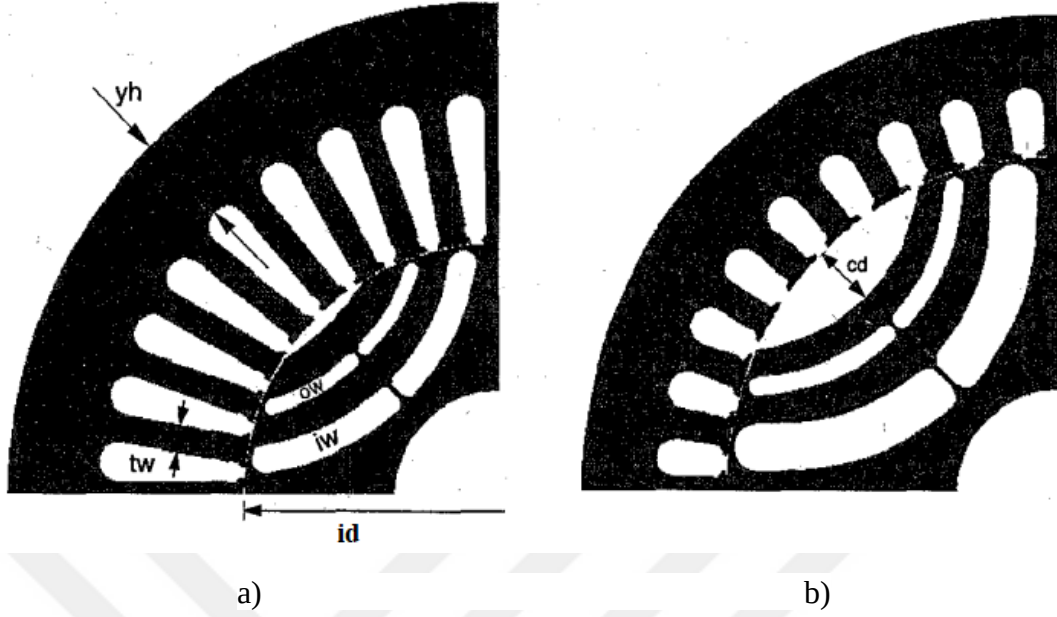
Şekil 2.9. Luo ve ark. (1995), segmentli ve laminasyonlu rotor tasarımları a) uç köprülülü (rib) b) uç köprülülü ve bariyer köprülülü c) parçalı segmentli (uç ve bariyer köprüsüz) (Luo ve ark., 1995)

Parasiliti ve Villani, (1995) “SRM Tasarımı ve Optimizasyon Analizi” isimli çalışmalarında motor tasarımı için SEY, optimizasyon rutini ile birleştiren otomatik bir prosedür sunmuşlardır. Bu prosedürde, SEY analizde rotorun iki farklı konumunda d ve q eksenini endüktansları hesaplandıktan sonra rotor bariyerlerinin genişlikleri değiştirilmiştir. Motorun modellenmesinde, doyum fenomenini ve doğrusal olmayan manyetizma hesaba katılmıştır. Motor tasarımı, endüktans değerleri ve motor performansı üzerindeki etkileri değerlendirmek için rotor şekli üzerinde doğru bir araştırma gerektiğini belirtmişlerdir. Önerilen prosedürün kapasiteleri, iki tasarım stratejisi (sabit ve değişken akı bariyerleri genişliğiyle) ve d eksenini ile q eksenini endüktans farklarının bir fonksiyonu dikkate alınarak belirtilmiştir. Bu fonksiyon, manyetik devrenin minimum ve maksimum relüktans değerlerine karşılık gelen iki farklı rotor konumu referans alınarak nominal akımda hesaplanmıştır. Optimizasyon sonuçları başarıyla sonuçlanmıştır ve değişken akı bariyerleri genişliği durumunda; Tork değeri standart tasarıma göre %33 daha yüksektir ve güç faktöründe %11 artış vardır. Standart rotor ve optimizasyonu yapılmış rotor Şekil 2.10’da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. a) Standart rotor modeli ve bariyer optimizasyon aralıkları b) Optimizasyonu yapılmış rotor modeli (Parasiliti ve Villani, 1995)

Kamper ve ark. (1996) yayınladıkları eserde, SRM olarak isimlendirdikleri motorda SEY ile optimizasyon yöntemi uygulamışlardır. Bu eserde incelenecek SRM'ler 5.5 kW ASM ile aynı ölçülere sahiptir. SRM'lerin rotorları 4 bariyerli ve kutup uçlarındaki köprüler kesik durumdadır ve 1 stator dişi boyu kadar kaydırılmıştır. Optimizasyon analizinde değişmeyecek parametreler şunlar olmuştur: Stator dış çapı (203.2 mm), paket boyu (133.4 mm), stator oluk sayısı (36), bariyer köprüsü (1 mm) ve köprü uzunluğu (0.75 mm). Optimizasyon ile değişecek parametreler ise: stator boyunduruk uzunluğu, stator iç çapı, dış akı bariyeri genişliği, rotor yüzeyindeki bariyerin iç pozisyonu, rotor yüzeyindeki bariyerin dış pozisyonu, rotor kutup ucu kesmesi boyutu, stator dişi genişliği, iç akı bariyerinin genişliği ve akım açısı. 5 adet motora optimizasyon uygulanmıştır. 1. ve 2. Motorda maksimum tork, 3. Motorda maksimum verim, 4. ve 5. Motorda ise akım başına tork (MTPA) kriterleri uygulanmıştır. Sonuç olarak SRM'lerin stator ve rotorunda kısıtlı veya kısıtsız olarak optimizasyon tasarımını yapmanın mümkün olduğu gösterilmiştir. Fonksiyonun gradyanının veya ilk kısmi türevlerinin hesaplanmasını gerektiren optimizasyon algoritmaları, fonksiyon değerini hesaplamak için doğrusal olmayan sonlu eleman alan çözümü kullanılarak başarıyla kullanılabilir. Optimizasyon ile tasarlanmış SRM'nin stator iç çapı, ASM'lerden büyük ölçüde değiştiğinden, bu makinenin performansını bir ASM statoru kullanan diğer makinelerle karşılaştırmak uygun olmayacaktır. Bu makalede elde edilen yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verim (10 kW altı güç aralığı) bu motorun en iyi avantajı olduğunu belirtmişlerdir. Optimizasyon sonucu MTD ve yüksek MTPA amaçlanan modeller Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. a) MTD optimizasyonu amaçlanmış rotor b) MTPA optimizasyonu amaçlanmış rotor (Kamper ve ark., 1996)

Miljavec ve Jereb, 1996 yılında “SRM, ASM’ler ile karşılaştırılabilir mi?” isimli makale yayınlamışlardır. Sunulan makalenin amacı, aynı stator boyutlarında ve stator sarımlarında SRM ve ASM’nin performanslarını karşılaştırmaktır. Bu performans karşılaştırmasında SRM’nin geliştirilebilir olduğunu göstermişlerdir. SRM’de önerilen rotor tasarımında (yüksek endüktans farkı ve oranı) ve ASM ile aynı bakır kayıplar alındığında çıkış gücü daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca güç faktörü de ASM değerlerine ulaşmaktadır. Bu eserde yapılan çalışmaları teorik hesaplamalara dayandırmışlardır. 4 farklı durumu incelemişlerdir (a,b,c ve d durumları).

- a durumunda nominal faz akımı ve endüktans oranı 3.5.
- b durumunda nominal faz akımı akım faktörü $k = \sqrt{2}$ uygulanarak artırılmıştır ve endüktans oranı 3.5.
- c durumunda nominal faz akımı ve endüktans oranı 8.
- d durumunda nominal faz akımı akım faktörü $k = \sqrt{2}$ uygulanarak artırılmıştır ve endüktans oranı 8.

Kang and Sul (1996), yaptıkları konferans çalışmasında SRM eşdeğer devre modelinden türetilen ve verimliliği maksimize edecek akım açısı durumu ile bakır ve demir kayıpları azaltılacağını belirtmişlerdir. Optimal açığı elde etmedeki kısıtlama, belirli bir çalışma

hızı için sabit çıkış torkudur. Motorun verimi, özellikle hafif yük durumunda önerilen yöntemle iyileştirilebilir olduğunu belirtmişlerdir. SRM için tork dinamikleri, akı seviyesi kontrol edilirken bile korunabilir olduğunu çünkü üretilen tork, stator akımıyla doğru orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Bu eserde önerilen algoritma ile demir kayıplarından dolayı doğrusal olmayan tork dengelemesi, basit demir kaybı dengelenmesi işlemine eklenmiştir. Önerilen algoritma tork kontrolünün dinamiklerini korurken, hız ve tork sürücülerindeki elektromanyetik kayıpların azaltılmasına izin vermektedir. Önerilen algoritmanın geçerliliğini göstermek için simülasyon ve deneysel sonuçlar sunulmuştur. Bu eserde deneysel çalışmada kullanılan motor 3.75 kW gücünde, 1800 d/d hızında ve 4 kutupludur. Karşılaştırmak için sabit i_d kullanılan model seçilmiştir ve önerilen yöntem ile verimlilik artışının özellikle hafif yük koşullarında dikkat çekici olduğunu göstermişlerdir.

Hippner ve Harley (1996) yayınladıkları eserde, iki adet EL-SRM tasarımını ele almışlardır. Her iki motor da standart, 4 kutuplu, 1.5 kW ASM statorları kullanılarak tasarlanmıştır. Motorların performansı üzerinde mümkün olduğunca çok faktörün etkisini araştırmak için rotorları farklı şekillerde tasarlanmış ve üretilmiştir. Motor performanslarını hesaplamak için SEY kullanmışlardır. Rotor tipi olarak Platt'ın 1990 yılındaki modelini seçmişlerdir. Motor A olarak isimlendirdikleri rotor özellikleri şu şekildedir; Hava aralığı 0.23 mm , her kutuptaki laminasyon sayısı 28, çelik laminasyon inceliği 0.3 mm ve akı bariyeri 0.4 mm incelikte kâğıt malzeme. Motor B rotor özellikleri ise şunlardır; Hava aralığı 0.25 mm , her kutuptaki laminasyon sayısı 18, çelik laminasyon inceliği 0.6 mm ve akı bariyeri 0.3 mm incelikte bakır malzeme. Karşılaştırmak için 1.5 kW çıkış gücündeki, 36 stator oluklu, 4 kutuplu ve 3 fazlı ASM kullanmışlardır. Test sonuçlarında Motor A'nın çıkış gücü Motor B'den yüksek çıkmıştır ve 1.5 kW değerine ulaşmıştır. Motor A verimi de motor B'den yüksek çıkmıştır ve ASM'nin veriminin %95'ine ulaşmıştır. Motor B 0.89 değeri ile çok yüksek bir güç faktörü göstermiştir. Genel olarak, Motor A'nın performansı, güç faktörü haricinde Motor B'den çok daha iyidir ve hem Motor A hem de B'nin tasarımının dayandığı orijinal ASM'nin performansı ile karşılaştırılabilir olduğunu göstermişlerdir.

Hofmann ve Sanders (1996) yapmış oldukları çalışmada, yüksek güçlü ve yüksek hızlı SRM tasarımı sunmuşlardır. Yazarlar eserde, bu makinenin elektrikli / hibrit elektrikli

araçlar için bir volan enerji depolama sisteminde bir motor / alternatör olarak kullanıma uygun olacağını göstermektedir. Bu tasarımın, SM makinelerle göre daha fazla güvenilirlik ve daha düşük maliyet avantajlarına sahip olmasını beklemişlerdir. Rotor tipleri olarak mevcut literatürde incelenmiştir ve bunları şu şekilde sıralamışlardır: Çıkık kutuplu (ÇK) rotor, lamine edilmiş (LE) rotor ve EL rotor. Bu çalışmada tasarlanan rotor, değişen ferromanyetik ve manyetik olmayan çelik katmanlarından oluşmaktadır. Çeliklerin kalınlıklarını, ferromanyetik rotor bölümlerinin aralığı statorun oluk aralığı ile eşleşecek şekilde seçilmiştir. Bu şekilde, ferromanyetik rotor segmentleri rotorun dönüş açısına bakılmaksızın her zaman bir stator diş adımı ile eşleşmiştir. Bu durum, rotordaki akı değişimlerini ve dolayısıyla demir kayıplarını en aza indirmek için yapılmıştır. Rotorun üretiminde, patlamalı bağlama (yapıştırma) olarak bilinen bir birleştirme tekniği kullanılmıştır. Patlamayla bağlama, iki veya daha fazla metal levhayı yüksek basınçlarda birbirine zorlamak için patlayıcı enerji kullanır. Bu şekilde yüksek mukavemet ve düşük ağırlık avantajlarına sahip olduğu belirtilmiştir. Makinenin oluk sayısı üretimsel sebeplerden dolayı iki olarak sınırlandırılmıştır. Volan uygulamalarında iki kutuplu bir makine kullanmanın başka avantajları da vardır. Daha yüksek kutuplu makine rotorları, stator sargısı tarafından üretilen önemli elektromanyetik radyal kuvvetleri oluşturabilmektedir. İlgili tasarımda analitik ve SEY ile analizleri yapılmıştır. Çıkıntı oranı, analitik analizde 8, SEY analizinde 9 çıkmıştır. Önceki çalışmalarda EL-SRM'de çıkıntı oranı 20 elde edilmiş olsa da ($3600 d/d$), bu eserde tasarlanan motor hızı $24000 - 48000 d/d$ için bu orana ulaşmanın zor olduğunu da belirtmişlerdir.

Coates ve ark. (1997), "EL-SRM'nin Tasarım Optimizasyonu" isimli çalışmada 4 kutuplu, 0.45 yalıtım oranına sahip, 0.3 mm hava aralığı olan ve 9 fazlı 5 kW SRM tasarımı ve optimizasyon algoritması incelenmiştir. Bu algoritmada rotor çapı, rotor kutup aralığı, rotor yalıtım oranı, hava aralığı, oluk açıklığı optimizasyonları, Tork/Kütle oranı amaçlanmıştır. Tork/Kütle oranı en çok rotor kutup aralığı, rotor yalıtım oranı ve hava boşluğuna duyarlı olduğu belirtilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında özellikle ilgi çekici olan rotor kutup aralığı ve rotor yalıtım oranıdır. Daha önce yayınlamış eserlerdeki, küçük kutup aralığı ve yalıtım oranı 0.6 – 0.7 değerlerinden farklı olarak, bu çalışmada büyük kutup aralığı ve yalıtım oranı 0.45 – 0.47 arasında optimal sonuçlar verilmiştir. 5 kW SRM için optimal hava aralığı 0.3 mm çıkmıştır. Bu değer aynı boyutlardaki ASM'nin

neredeyse yarısı kadar çıkmıştır ve bunun sebebi rotorunda akım olmadığından ısı problemi olmaması ve küçük hava aralığına izin vermesi olarak değerlendirmişlerdir.

Chalmers ve Musaba (1997) eserlerinde, EL-SRM'lerin yüksek çıkıntılı olacak şekilde tasarlanabileceğini ve bu nedenle tork kapasitesi, güç faktörü ve verimlilik açısından çok iyi performans sunacağını belirtmişlerdir. Bu eserde, 12.5'lik çıkıntı oranına ulaşan ince rotor laminasyonları kullanılan, 7.5 kW'lık 4 kutuplu bir SRM tasarımını ve performansını sunmuşlardır. İnce rotor elemanlarının modellenmesine ve d-ekseni üzerindeki doyum etkisine özel önem verilerek, motor parametrelerini tahmin etmek için SEY kullanılmıştır. Hesaplanan parametreler, iyi bir uyum göstererek test ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. 50 Hz beslemeli yük testleri, beklenen performans özelliklerini doğrulamıştır, aynı zamanda EL rotor yapısıyla ilişkili ek kayıpların oluşumunu da göstermişlerdir. Ekstra kayıpları azaltmak için bir tasarım değişikliği gösterilmiştir. Sabit güç özelliklerini ve temel hızın 2.25 katı bir hız aralığında tahmin edilen ve ölçülen performans arasında iyi bir uyuma gösteren alan zayıflatma performansının ayrıntılı bir incelemesi rapor edilmiştir.

Fernandez-Bernal ve ark. (1998) "SRM'lerin Verim Kontrolü" isimli çalışmalarında, maksimum verimlilik (MV) için MV kontrol stratejisinin MTPA, maksimum tork değişim oranı (MTD) veya MGF gibi, mevcut açı kontrolü kategorisine ait olduğu kanıtlanmışlardır. MV'nin MTPA, MGF veya MTD gibi akım açısının torktan bağımsız olduğu tüm kontrol stratejileri için, verimliliğin sabit tutulduğu ve torktan (ve akımdan) bağımsız tutulduğu, sadece hızın bir fonksiyonu olduğunu göstermişlerdir. Minimum demir kaybı stratejisi olarak MTD'ye yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Ayrıca hız arttıkça MV'nin MTPA'dan MTD'ye geçtiği de gösterilmiştir. MGF'deki hava aralığı akımı her zaman MTPA (minimum bakır kayıpları) ve MTD (minimum demir kayıpları) arasında olduğundan, MGF en kötü durumda MTPA ve MTD arasında ve çoğu zaman hepsinden daha iyi bir verime sahiptir. Aynı bakır direnci ve demir direnci için EL-SRM, verimlilikte açıkça standart SRM'den üstündür. Özellikle EL-SRM'de MTPA, MGF veya MTD yerine MV kullanıldığında verimlilik artışı kayda değerdir. Yüksek hız için MGF neredeyse maksimum verimlilik sağlar, ancak düşük hızda verimlilik düşer. MTPA, düşük hızda maksimum verimlilik sağlayan zıt bir davranışa sahiptir. MTD ve MGF'deki verimlilikte benzer şekilde davranır. Bununla birlikte, MGF, özellikle EL-SRM'de

MTD'den daha verimlidir. Herhangi bir makine limitine ulaşıldığında, tüm kontrol stratejileri aynı verimlilik değerine yaklaşır. MTPA, yüksek hız bölgesindeki voltaj sınırından özellikle etkilenir ve MGF, nominal hızın altındaki akım sınırından etkilenir. MV'nin, maksimum tork bölgesinde çok az etkilendiğini ve neredeyse her çalışma noktası için düzgün çalıştığını belirtmişlerdir. Bir vektör kontrol şeması içinde uygulama için pratik bir MV sunulmuştur. Performansı, iyi doğruluk ve hızlı tepki gösteren simülasyonla incelenmiştir. Önerilen çözüm analitik bir çözüme dayandığından, gerekirse model hatalarını azaltmak için çevrimiçi tahmin teknikleri parametreleri de kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Malan ve ark. (1998) yayınladıkları eserde, SRM'lerin şaşırtıcı bir şekilde literatürde elektrikli araç tahrik sistemi için olası bir alternatif olarak çalışılmadığını belirtmişlerdir. Bu makalede, bir seri hibrit elektrikli araç için küçük, kompakt bir SRM sürücüsünün kullanımını açıklamaktadır. Bu sürücünün diğer sürücülere göre avantajları ve dezavantajları vurgulanmıştır. SEY için optimum tasarlanmış akı bariyerli rotora sahip SRM'nin iyi bir tork yoğunluğuna ve iyi bir verime sahip olduğu gösterilmiştir. Motor, MTPA veya minimum kVA için akım açısı kontrollüdür. Bu, motorun tüm yük durumları için optimum verimliliğe yakın çalıştırılmasını sağladığını belirtmişlerdir. Elektrikli araçlar için SRM tahrik sisteminin hesaplanan ve ölçülen sonuçlarına yer vermişlerdir. 28 kW güce sahip SRM, bir sedan serisi hibrit elektrikli aracın ön tekerleklerini 4.5:1 dişli oranına sahip bir diferansiyel aracılığıyla sürmek için kullanmışlardır. Simülasyon sonuçları, tepe değeri 120 Nm'lik tork üreten tek SRM sürücüsüyle 1400 kg'lık aracın sıfırdan 80 km/s hıza 25.5 s'de hızlandığını göstermektedir.

Ojo (1998), Çift Beslemeli SRM'nin Alan Yönlendirme Kontrolü (FOC) isimli makalesinde, çift beslemeli SM'nin çalışma prensiplerini hem alanlar hem de eşdeğer devre yaklaşımları kullanılarak açıklanmıştır. Kutuplardaki güç sargısı ve rotor segmentleri sayısının tasarım kısıtlamalarını belirlenmiş, bu da üç uygun çalışma modu ile sonuçlanmıştır. Darbenin ters hava aralığının ortalama bileşenlerine oranını artırarak ve güç ve kontrol sargıları için her faz-her kutup başına stator sargı dönüşleri eşleştirilerek iyileştirilmiş tork kapasitesi elde edilebilir olduğunu belirtmiştir. Doğru akım (DA) kontrol sargılı çift beslemeli SRM'nin, ayrı olarak uyartılan DA motoru ve yüzey mıknatıslı AA motorlar gibi doğal olarak vektör kontrol edilebilir olduğu gösterilmiştir.

Vagati ve ark. (1998) “Tork Dalgalanması Düşük SRM Tasarımı” isimli çalışmalarında, enine lamineli tipteki senkron relüktans motorlar için tork dalgalanmasının en aza indirilmesine yönelik bir tasarım yaklaşımı sunmuşlardır. İlk olarak, olası rotor türleri sınıflandırılmış ve belirli bir stator ile eşleştirilmesi için daha uygun rotor yapısı seçilmiştir. Stator olarak 18 oluklu yapı (n_s) seçilmiştir. Daha sonra, düşük tork dalgalanması dikkate alınarak iç rotor tasarımı açıklanmıştır. Son olarak, üç farklı rotora sahip motorların deneysel sonuçlarını vermişlerdir. Rotor dış aralığı için $n_r = n_s \pm 4$ denklemi ile ifade edilen bağlam sunulmuştur. Seçilen stator tipi için $n_r = 14$, $n_r = 18$ ve $n_r = 22$ modeller incelenmiştir. Rotorlar 4 kutupludur, $n_r = n_s$ ve bundan farklı iki tip seçilmiş olmaktadır. Stator dış çapı 119 mm ve paket boyu 60 mm’dir. Böylece elde edilen motorlar oldukça küçük ve kısadır. Nominal tork değerleri, servo motorlarda olduğu gibi zorunlu soğutma olmadan yaklaşık 3 – 4 Nm’dir. Tüm rotorlar bir stator adımı kadar kaydırılmıştır; bu nedenle elde edilen tork dalgalanması değerleri her durumda oldukça küçüktür. $n_r = 18$ ’den $n_r = 14$ ’e değişim dalgalanmayı 3 faktör azaltmıştır. En düşük tork dalgalanması değerinin ise $n_r = 22$ de çıktığını göstermişlerdir. Buradaki değerler, tork dalgalanmasının 18. harmonikleridir.

Kiriyama ve ark. (1998) “Endüstri için Çoklu Akı Bariyerli Yüksek Performanslı SRM” isimli çalışmalarında son zamanlarda yapılan araştırma ve geliştirmeleri iki farklı yol izlediğini belirtmişlerdir. Bunlardan biri, çıkıntılı kutuplu bir rotora sahip, darbe sinyali kullanan anahtarlamalı relüktans motor (ARM) olarak adlandırılmıştır. Diğeri, birkaç akı bariyeri ile oluşturulmuş bir rotoru tahrik eden, sinüzoidal bir dalga kullanan SRM. Bu ikincisinin stator sargıları, bir ASM veya kalıcı mıknatıslar kullanan fırçasız bir motorda kullanılanla aynı özelliklere sahiptir. Bu makalede akı bariyer yapısı ve tasarım optimizasyonları ile yüksek verimli akı bariyerli SRM prototipi simülasyon ve deneysel çalışmaları incelenmişlerdir. Karşılaştırmak için ASM kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda bariyer sayısı, rotor yalıtım oranı ve rotor dış köprü genişliği gibi parametreler incelenmiştir. İnvertör tahrikli bir ASM ile karşılaştırmayı mümkün kılmak için, 200 W nominal çıkışa sahip genel amaçlı bir ASM statoru kullanılmıştır. İlk olarak akı bariyeri sayısı incelenmiş ve 6 bariyer sayısından fazla durumlarda tork, tork dalgalanması, d ve q eksenleri endüktansları parametrelerinin değişmediği gözlenmiştir. Sonra, yalıtım oranı 0.5 olduğu durumda en yüksek endüktans farkının elde edildiği tespit

- Sabit bir invertör boyutu varsayımı altında, BDFRM, aynı bakır kayıplarını ve aktif bakır malzemeyi varsayarak SRM'nin çıkış gücünün yaklaşık iki katını üretebilir ve kontrol stratejisi, her iki makine için MTPA'dır
- Daha küçük bir invertör elde etmek için BDFRM, MTPA modunda kontrol edilir. Bu, azaltılmış invertör oranını elde etmek için bir miktar çıkış torkunu feda eder. BDFRM için $kVA / (\text{çıkış gücü})$, aynı bakır kayıplarına sahip SRM'in yaklaşık $1/3$ 'üdür.

Makalede teorik olarak sunulan ön çalışma sonuçları, BDFRM'nin daha fazla araştırma gerektirdiğini göstermektedir. Ayrıca SRM ile karşılaştırmaların kabaca ASM için de geçerli olduğunu, çünkü bu motorun SRM ile benzer performansa sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Leonardi ve ark. 1999 yılında yaptıkları çalışmada, elektrikli araçlarda kullanmak için SRM için oldukça belirgin iki rotor yapısı arasında bir karşılaştırma sunmaktadır. Bunlar LE ve EL rotor yapılarıdır, ayrıca ASM da karşılaştırmaya dahil edilmiştir. Bu çalışma, halihazırda üretilen bir ASM sürücüsüne göre ekonomik olarak avantajlı bir alternatif sağlamayı amaçlayan ve uzun yıllar süren araştırmaların özetidir. Çekiş motorlarının, geniş bir sabit güç aralığı, yüksek aşırı yük kapasitesi, düşük tork dalgalanması ve sınırlı sıcaklık artışı özelliklerini sağlaması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu nedenlerden dolayı karşılaştırma tork üretimi ve verimliliği ile sınırlı olmayacak, tork dalgalanması, gürültü ve sıcaklık artışı hususlarını da içermiştir. Deneysel testlerde, EL rotorlu motorun MTPA ve düşük hızda iyi verimliliğe sahip olduğunu, ancak yüksek hızda tork dalgalanması ve rotor kayıplarına sahip olduğunu göstermişlerdir. LE rotorlu motor, amper karakteristiği başına daha düşük bir tork sunmasına rağmen, ASM'ye göre EL rotorlu motordan daha iyi bir alternatif gibi görünmektedir, çünkü düşük tork dalgalanması ve çok düşük rotor kayıpları ile düşük maliyetle inşa edilebilmekte olduğunu belirtmişlerdir.

Hippner ve Haripersad (1999), "EL-SRM'de sıcaklık dağılımı hesabı" isimli eserde, EL-SRM'nin SEY ile sabit durum termal analizi ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Motor içindeki ısı kaynakları, özel olarak tasarlanmış deneysel bir prosedür kullanılarak belirlenmiştir. Motor üzerinde 8 adet yer belirlenmiştir. Bunlar: Stator sargı sonu, stator oluğu, stator çekirdeği, sonlandırma kapağı (fan tarafı), sonlandırma kapağı (kuplaj tarafı) ve 3 adet

yüzey. Sıcaklık dağılımı hesaplaması, tasarım hesaplamalarının zorunlu bir aşamasıdır ve bu nedenle verimli ve doğru bir sıcaklık dağılımı hesaplama yöntemine sahip olmak önemlidir. EL-SRM'nin SEY ile kararlı durum termal analizi gerçekleştirildi. Elde edilen sonuçların doğruluğu tasarım amaçları için tatmin edici bulunmuştur. SEY'in en büyük avantajı, tek tip olmayan sonlu elemanlar ağı oluşturulabildiğinden karmaşık şekillerin kolay modellenmesine izin vermesidir. Hem SEY hem de sonlu farklı sıcaklık hesaplamalarının doğruluğunu prototip motor üzerinde yapılan ölçümlerle doğrulamışlardır.

Bomela ve Kamper 1999 yılında yayınladıkları eserde, elektrik makinelerinde düşük tork dalgalanmasının genellikle akustik gürültüyü ve mekanik rezonans titreşimini azaltmak için gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Düşük tork dalgalanması için tasarım yapmak, ortalama torku ve makinenin güç oranını da etkileyecektir. Bu yazıda, stator sargı adımları değişiminin ve rotor kaydırılmasının, normal EL-SRM'nin ortalama tork ve tork dalgalanması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analizde 2-B sonlu elemanlar zaman adımı yöntemi kullanılmıştır. Sadece akı bariyerlerinin sayısı stator oluk sayısından daha az olan rotorlar dikkate alınmıştır. Bu çalışmada iki motor üzerinde analizler yapılmıştır. Birincisi 9 kW güç değerinde ve stator oluk sayısı 36'dır. Diğer motor ise 42 kW güç değerinde ve oluk sayısı 48'dir. Stator sargı adımı değişimlerinin makinenin tork dalgalanması üzerinde çok az etkiye sahip olduğu ve ortalama torku önemli ölçüde azalttığı gösterilmiş ve açıklanmıştır. Rotorun kaydırılması-eğikleştirilmesi ise tork dalgalanmasını önemli ölçüde azalttığı (her iki makinenin de tork dalgalanması önemli ölçüde %20'den %5'in altına düşürülmüştür), ancak ortalama tork üzerinde çok az etkisi olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, rotorun bir stator oluk adımı kadar eğrilmesinin mutlaka optimum olmadığı da yapılan çalışma sonuçları ile gösterilmiştir. İki SRM için optimum eğiklikler sırasıyla 1.2 ve 1.1 stator oluk aralığındadır.

Hofmann ve Sanders (2000), "Rotor kayıpları minimize edilmiş yüksek hızlı SRM" isimli eserlerinde, rotorda en aza indirgenmiş girdap akımı kayıpları ile yüksek hızlı senkron relüktans makinesinin bir tasarımını sunmuşlardır. Tasarım kriterleri, rotorun yüksek hızlara dayanma yeteneği, vakumlu ortamda çalışma yeteneği, ihmal edilebilir sıfır torklu dönme kayıpları, yüksek güvenilirlik, yüksek verimlilik ve düşük üretim maliyetidir. Senkron relüktans motorun rotoru, ferromanyetik ve manyetik olmayan çeliklerin

bağlanmış bölümlerinden oluşur. Rotordaki kararlı durum girdap akımlarını (ve kayıplarını) hesaplayan, rotor dönüşünü içeren sonlu eleman kodu MATLAB'da geliştirilmiştir. Rotor kayıplarını en aza indirmek için bir stator demiri ve stator sargısı tasarlanmış ve bu tür iki prototip makine imal edilmiştir. Deneysel sonuçlar, 10 kW, 10000 d/d çalışma noktasında %91 verimlilik ve giriş gücünün % 0.5'inden az rotor kayıpları göstermektedir.

Xu (2000), "Gelişmiş tork kapasitesi için beş fazlı SRM'lerin rotor yapısı seçimleri" isimli makalesinde beş fazlı SRM'nin, uygun armatür akımı ile etkileşime giren manyetik alandaki üçüncü harmoniklerin kullanılması nedeniyle, geleneksel üç fazlı SRM'lere göre daha yüksek bir tork yoğunluğuna sahip olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte, üçüncü harmoniklerin etkili kullanımı için, SRM rotorunun alandaki temel ve üçüncü harmonik bileşenler arasında yeterli bağlantı oluşturması kritik önem taşır. Bu makale, iki farklı relüktans rotor yapısının ayrıntılı bir incelemesiyle, beş fazlı SRM'ler için rotor yapılarının karşılaştırma çalışmasını sunmaktadır. Bu çalışmada ÇK rotor ve EL rotora sahip motorlar karşılaştırılmıştır. Beş fazlı bir SRM için, etkili mıknatıslama endüktansları L_{md1} , L_{mq1} , L_{m13} , L_{md3} ve L_{mq3} ile ifade edilmiştir. Fiziki bakış açısından, ilk iki parametre, SRM'nin hava boşluğundaki -d ve -q eksenleri boyunca temel manyetik alanı (uzayda), temel akımı (zamanda) kullanarak üretme yeteneğini temsil eder. Benzer şekilde, son iki parametre, üçüncü harmonik alanı (uzayda) üçüncü bir harmonik sinüs dalgası akımı (zamanda) ile üretme yeteneğini temsil eder. Önceki birçok yayında belirtildiği gibi, -d ve -q eksenleri endüktans parametreleri arasındaki fark ne kadar büyükse rotor yapısı o kadar iyi olur, çünkü SRM'nin tork üretimi maksimize edilir. Yapılan çalışma sonuçlarında, üçüncü harmoniğe sahip beş fazlı SRM için, tork yoğunluğunu en üst düzeye çıkarmak için yalnızca L_{md1} ve L_{mq1} parametreleri değil, aynı zamanda karşılıklı endüktans L_{m13} de optimize edilmelidir. ÇK rotor, yine de nispeten düşük bir göze çarpan L_{md1}/L_{mq1} oranı verir, ancak L_{m13} ile karakterize edilen temel ve üçüncü harmonikler arasında çok güçlü karşılıklı bağlantı oluşturur. EL rotor, yüksek bir göze çarpan orana sahiptir, ancak temel ve üçüncü harmonikler arasında zayıf karşılıklı bağlantı oluşturur ve bu nedenle, beş fazlı SRM için iyi bir eşleşme değildir. Görünüşe göre ÇK rotor ve beş fazlı SRM statoru beş fazlı SRM'nin avantajlarını keşfetmek için iyi eşleşse de EL rotor, saf sinüs dalgası çalışması için karmaşık üretim

süreci ve yüksek maliyet dışında, ÇK rotordan hala daha uygundur. Sağlamlık, maliyet ve üretim kolaylığını hesaba katarak, ÇK rotorun, beş fazlı SRM uygulamalarında EL rotorla çok rekabetçi olduğunu düşündüğünü işaret etmiştir.

Germishuizen ve ark. (2000), "Elektrikli üniteler için SRM ve ASM çekişli sürücülerinin performans karşılaştırması" isimli çalışmalarında SRM ve ASM çekişli sürücülerini, 110 kW'lık bir nominal güç seviyesinde karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma olarak aynı stator yapısı hem SRM hem de ASM için kullanılmıştır. Bu çalışmadaki odak noktası, SRM için rotorun optimum tasarımı yapılması ve iki motor arasındaki karşılaştırmadır. Karşılaştırmada sıcaklık artışı ve hız fonksiyonu olarak tork, verimlilik ve güç faktörü incelenmiştir. ASM statoru 54 olukludur ve daha büyük bir mıknatıslanma akımı pahasına da olsa rotor yüzey kayıplarını en aza indirmek için 1.5 mm'lik büyük bir hava aralığı kullanılmıştır. SRM rotor parametreleri, SEY kullanılarak optimize edilmiştir. SEY, SRM rotorunu çoklu boyutlarda optimize etmek için doğrudan optimizasyonu sürecinde kullanmışlardır. SRM için hava aralığı, ASM'nin 1.5 mm'sine kıyasla 0.8 mm olarak seçilmiştir. SEY kullanılarak 110 kW güç seviyesinde SRM'nin tasarımı doğrulanır. Ölçülen sonuçlar, hesaplanan sonuçların % 5'i dahilinde doğrudur. Bu, SRM'nin bu güç seviyesinde genel bir optimizasyonunun artık gerçekleştirilebileceği anlamına geldiğini belirtmişlerdir. SRM sürücüsünün optimize edilmemiş statoru ile ölçülen performansı, nominal hıza kadar olan hız aralığında ASM sürücüsününki ile olumlu bir şekilde karşılaştırılmıştır. SRM'nin daha düşük stator sargı sıcaklığı artışı, SRM'nin güç oranını %5 – %10 oranında artırmayı mümkün kılar. SRM'nin statoru da optimize edilebilirse, SRM'nin güç oranı daha da iyileştirilebilir olduğunu belirtmişlerdir. Bu, şu anda yalnızca elektrikli makine güç yoğunluğu açısından değerlendirilen SRM sürücüsünü, ASM sürücüsüne göre bir alternatif haline getirmiştir. SRM sürücüsünün yüksek hız bölgesinde ölçülen performansı, ASM sürücüsününkinden kötü çıkmıştır. Bu konuda iki şeyden bahsetmek gerekir. Birincisi, SRM sürücüsünün ASM sürücüsü gibi geniş bir sabit akı zayıflatma hız bölgesine sahip olmadığı ile açıklanabilir. İkincisi, test edilen SRM'nin statorunun optimize edilmemiş olmasıdır, bu da SRM'nin akı zayıflatma hızı bölgesinde performansını olumsuz etkilemiştir. Her iki makinenin verimliliği ve gücü tam yükte hemen hemen aynı olduğunu göstermişlerdir.

Morimoto ve ark. (2000), yayınladıkları makalede, geniş bir sabit-güç operasyonu için SM-SRM tasarımını ve performanslarını incelemektedir. Mıknatısların SRM rotoruna düzgün bir şekilde eklenmesinin etkilerini, prototip makineler üzerindeki çeşitli deneysel sonuçlar ve analizlerle incelenmiştir. Önerilen makine, SRM'ye kıyasla geniş bir sabit güç hız aralığı, yüksek verimlilik ve yüksek güç faktörlü çalışma sunmuştur. Yapılan çalışmada karşılaştırılacak dört motor vardır, bunlar 4 kutuplu ve her kutbunda 2 bariyerli yapıdadırlar. Birinci motor mıknatıssız yapıda diğerleri ise farklı hacimlerde mıknatıslar içermektedir. Mıknatıslı modellerde, normal motora göre mıknatıs hacimi arttıkça verim ve güç faktörünün arttığı gözlenmiştir. Relüktans torku ve relüktans tork oranı da aynı şekilde mıknatıslı modellerde yüksek çıkmıştır fakat mıknatıs hacmi büyüdükçe azalma eğiliminde çıkmıştır. Güç kapasitesi ve verimlilik performansı ile ilgili deneysel sonuçlar, bu makalede incelenen SM-SRM'nin 1:5'in üzerinde geniş bir sabit güç hız aralığı ve sabit güçte çalışma bölgesinde yüksek verimli bir çalışma sunabildiğini göstermiştir.

Stumberger ve ark. (2000), "Doğrusal Senkron Relüktans Motor (LSRM) Parametrelerinin Tanımlanması" isimli makalede, iki eksenli LSRM dinamik modelinin parametrelerinin tanımlanması incelenmiştir. Model parametreleri, kontrollü bir voltaj kaynağı invertörü kullanılarak bir LSRM üzerinde gerçekleştirilen deneylerle tanımlanmıştır. Akıma bağlı doğrusal ve karesel eksen endüktansları deneylerle tanımlanmış ve sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmıştır. Hesaplanan endüktanslar, deneylerle belirlenen endüktanslarla karşılaştırılmıştır. Test edilen LSRM'nin çevrim aralığı sınırlı olduğundan, önerilen parametre tanımlama prosedürü, kinematik kontrol durumunda simülasyon ve deneysel sonuçların karşılaştırılması yoluyla dolaylı olarak doğrulanmıştır. Referans-gerçek konumun karşılaştırması, hız, akım ve gerilim yörüngelerinin elde edilmesini deney ve simülasyon ile elde edilmiştir. Akıma bağlı endüktanslar $L_d(i_d, i_q)$, SEY tarafından hesaplanır ve farklı sabit i_q akımları için deneysel yöntemlerle tanımlanmıştır. Akıma bağlı endüktanslar $L_q(i_d, i_q)$, SEY tarafından hesaplanır ve farklı sabit i_d akımları için deneysel yöntemlerle tanımlanmıştır. Birincil sargının ve birincil kütlenin omik direnci doğrudan ölçülmüştür. Viskoz sürtünme katsayısı deneysel olarak belirlenmiştir. Tanımlanan endüktans değerlerinin hesaplananlarla uyumu iyi çıkmıştır. Burada sunulan akıma bağlı endüktanslar, doğrusal

olmayan LSRM kontrol sentezi için akım ve konuma bağlı kuvvet ve çalışma noktasına bağlı sürtünme ile kullanılmıştır.

Hanguang ve ark. (2001), yaptıkları çalışmada enerji dönüşümü bakış açısına dayanarak, x_d , x_q ve *çıkıntı oranı* K 'nın RM'nin performansı üzerindeki etkisi analiz etmişlerdir ve uygun çıkıntı oranı K 'yı belirleme problemini tartışmışlardır. Y9OS-4 ASM'nin aynı statoruna sahip bir prototipini üretmişlerdir. Bu ASM'nin verileri $U = 220\text{ V}$, $I = 2.7\text{ A}$ ve $r = 6.81\text{ ohm}$ şeklindedir. Motorun performansını analiz etmek amacıyla yapılan prototipin optimizasyonu yapılmamıştır. Yani çıkıntı oranı büyük değildir. Deneysel parametreler $X_d=133.9$, $X_q=8.58$, $K=3.47$ 'dir. SEY ile hesaplanan parametreler $X_d=131.65$, $X_q=41.9$, $K = 3.142$ 'dir ve yakın değerler elde edilmiştir. RM ile ASM arasındaki tek fark rotoru olduğundan, K değeri RM'nin nominal KVA'sını etkilemez. RM'nin aşırı yük kapasitesi K_m için sadece rasyonel X_d , X_q ve güç faktörü alınmıştır. RM'nin çıkıntı oranı, motorun performansı üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Teorik olarak, belirli çıkıntı oranına karşılık gelen maksimum $\cos \varphi$ vardır. Maksimum $\cos \varphi$ 'ye karşılık gelen güç açısı θ_K , genel olarak aşırı yük kapasitesinin gerektirdiği açı değildir. Bu nedenle, çıkıntı oranı K , aşırı yük kapasitesi gerekliliğine ve motor tasarımındaki güç faktörüne göre seçildiği ve çıkıntı oranının basitçe büyütülmesi tavsiye edilmediğini belirtmişlerdir. $K = 10$ koşuluna karşılık gelen güç faktörü yaklaşık 0.85 olacaktır. RM'de aşırı yük kapasitesi 2 olarak alınırsa, AA sürücü sistemlerindeki ASM ile 10 kW altındaki nominal güç seviyesinde rekabet edebilir olduğunu belirtmişlerdir.

Kilthau ve Pacas, 2001 yılında yaptıkları çalışmada, SRM'nin doygunluk ve çapraz kuplaj etkileri dikkate alınarak L_d ve L_q endüktanslarının tüm çalışma noktalarında ölçümü için bir yöntem sunmaktadır. Ölçülen endüktanslar, temel hız ve alan zayıflama aralığında optimum tork gelişimi için gerekli akımları hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu özelliklerin rotor odaklı bir kontrol şemasında uygulanması ve pratik sonuçlar gösterilmektedir. Ek olarak, ölçülen özellikler, yeni bir parametre tabanlı sensörsüz kontrol şemasının geliştirilmesi için kullanmışlardır. Manyetik doyumun, SRM parametreleri ve davranışı üzerinde büyük etkiye sahip olduğunu ve optimum kontrol için ihmal edilemez. Çapraz doyumun dikkate alınması, hesaplanan iç gerilimlerin ve torkun yüksek doğruluğu ile sonuçlandığını ve bu nedenle kontrol kalitesi ve dinamikleri için

temel olduğunu belirtmişlerdir. Makinenin sunulan modeli kullanılarak, yüksek doğrulukta doğrusal olmayan deterministik bir model aracılığıyla tüm çalışma bölgelerindeki terminal gerilimleri ve akımlarından dönüşüm açısı tahmin edilebilir olduğunu sunmuşlardır. SRM'nin bu araştırması, bu makinenin sensörsüz kontrolü ile ilgili daha sonraki çalışmaların temeli olduğunu ifade etmişlerdir.

Murakami ve ark. (2001), yayınladıkları “Yüksek verimli SM-SRM'nin optimum tasarımı” isimli makalede, kalıcı mıknatıslı motorların potansiyel enerji tasarrufları nedeniyle son zamanlarda büyük ilgi gördüğünü ancak pahalı mıknatıslar nedeniyle yalnızca belirli uygulamalar için kullanıldığını belirtmişlerdir. Bu makale, minimum miktarda mıknatıs ile düşük maliyetli ve yüksek verimli SM-SRM'nin optimum tasarımı tartışılmıştır. Bu çalışmada ele alınan motor, destekli kalıcı mıknatıslara sahip çok akı bariyerli bir RM'dir. Minimum mıknatıs miktarı ile maksimum verim elde etmek için rotorun en iç tarafına kalıcı mıknatısların yerleştirildiği konfigürasyon, prototip motor ile simülasyon ve deneylerle değerlendirmişlerdir. Çalışmada kullanılan motor dış çapı/iç çapı $110\text{ mm} / 60\text{ mm}$, hava aralığı 0.4 mm , paket boyu 80 mm , $L_d = 26\text{ mH}$ ve $L_q = 5\text{ mH}$ özelliklerindedir. Karşılaştırmalı bir çalışma için, aynı sınıftaki bir SMSM'nin özellikleri ile aynı seçilmiştir. SRM'nin bakır kaybı, SMSM çok daha yüksektir, dolayısıyla motor verimliliği çok daha düşüktür. Bu, SRM'nin yalnızca rotor çıkıntısı tarafından üretilen relüktans torkunu kullanması ve kalıcı mıknatısların manyetik akısını kullanmaması nedeniyle daha fazla miktarda akımın gerekli olduğu gerçeğini göstermektedir. Bu nedenle, faz tepe akımının ve bakır kaybının azaltılması, motor verimliliğini artırmanın ana yollarıdır. SMSM'nin rotorundaki kalıcı mıknatıslar, yük akımı altında tersinmez demanyetizasyonu dikkate almak için bir akı bariyerinin en derin yarığına gömülür. Rotorda 2, 3, 4 ve 5 sayılı bariyer yapıları incelenmiştir ve yapılan analiz sonuçlarında 4 bariyerli yapı en uygun seçilmiştir. Bakır kaybını azaltmak ve yüksek hız aralığında çalışma aralığını genişletmek için SM-SRM için optimum bağlantı akısı φ_a büyüklüğünün $\varphi_a = L_q i_q$ olduğu kabul edilmiştir. Sonuç olarak, mıknatıs miktarının sadece dörtte biri ile sabit mıknatıslı motorlarla aynı verimliliği gerçekleştirebilen motorlar tasarlamak için bir yöntem oluşturmuşlardır. Deneylerde 750 W bir SMSM'nin manyetik ağırlığının $1/4$ 'ü ile, nominal yükte % 94.4 motor

verimliliği sağlayan SM-SRM geliştirilmiştir. Bu, bir SRM'den % 3.6 daha verimlidir ve bir SMSM ile neredeyse aynıdır.

Schmidt ve Brandl (2001), "Rotoru akı bariyerli SRM'nin karşılaştırmalı SEY analizi" isimli çalışmalarında, akı bariyerli SRM, yüksek bir relüktansa sahip olacak şekilde tasarlanabilir olduğunu belirtmişlerdir. Rotor akı bariyerlerine yerleştirilen kalıcı mıknatıslar, etkili relüktansı önemli ölçüde artırır. Geleneksel SRM ile karşılaştırıldığında, bu SM-SRM ile daha iyi tork kapasitesi ve güç faktörleri sunar. Makalede, doğrusal olmayan SEY hesaplamalarını kullanarak, dört kutuplu ve maksimum 8000 d/d hıza sahip 5 kW'lık bir motorun parametreleri araştırılmıştır. Hem geleneksel RM'nin hem de SM-SRM'nin özellikleri karşılaştırılmıştır. Doğrusal olmayan SEY analizi, böyle bir SM-SRM'nin tork ve endüktans özelliklerini ayrıntılı ve güçlü bir şekilde hesaplanmasını sağlamıştır.

Ferraz ve Souza, 2001 yılında yayınladıkları "Kafes rotorlu SRM parametrelerinin ölçülmesi" isimli eserde, kafes içeren üç fazlı iki kutuplu şebeke kalkışlı geleneksel rotorlu relüktans senkron motorun (ŞK-SRM) dinamik özelliklerinin belirlenmesi için laboratuvarında test etmişlerdir. Amaç, senkron ve asenkron çalışma modları için makine eşdeğer devresini elde etmektir. Vektör diyagramı, motorun senkron performans modellemesini elde etmek için bu çalışmada kullanılan teorik yaklaşımdır. Basit ölçüm prosedürlerine sahip diğer parametrelerin yanı sıra, modelde d-ekseni ve q-ekseni makine reaktansı gereklidir. Kafes rotorlu makinelerin bazı parametrelerinin ölçülmesinin, kafesin neden olduğu distorsiyon nedeniyle bazı zorluklar gösterebileceği iyi bilinmektedir. Q-ekseni reaktansı, ölçülmesi gereken bu kritik parametrelerden biridir. Bir damper veya kafes varsa, ölçümlerden doğru parametre değerlerinin nasıl elde edileceği bir sorun oluşturmaktadır. Bu çalışmada, d-ekseni reaktansı, geleneksel yüksüz test yoluyla elde edilmiştir. Bazı parametrelerin frekansla değişimi, motor bir invertör beslenerek elde edilmiştir. Nominal voltaj altında çalışan motor için, doğrudan eksen endüktansı L_d , değeri frekanslarla biraz değişir (yaklaşık % 3). Hesaplanan ve ölçülen değerler, yüksüz ve yükte çalışma için iyi bir uyum içindedir. Güç faktörünün ölçülen değerleri aynı tork açısı için hesaplanan değerlerden daha düşüktür ve ortalama fark 5^0 ile 15^0 arasındaki tork açıları için %18, 25^0 ile 30^0 arasındaki açılar için ise %5'tir. Hesaplanan ve ölçülen güç faktörü için maksimum değerler, 15^0 ve 25^0 arasındaki tork

açıları için aynı aralıktadır. Kaynaktan çekilen ölçülen akım, ortalama % 7 farklılık ile 20° ye kadar olan tork açıları için hesaplanan değerlerden daha düşüktür. 20° ötesinde ölçülen değerler hesaplanandan daha yüksektir ve çekme torku açısı ile ilgili farklılık % 6'dır. Dinamik eğri, düşük kayma değerleri için asenkron torkta salınımlar sundu. Bunun, teoriye göre kafes sargısında endüklenen akım bileşenleri olan rotorun relüktansından kaynaklandığı bilinmektedir. Ancak hesaplanan değerler, ölçülen değerlerle farklılık göstermiştir. Kararlı durumda kesin tahminler için, çekirdek kayıplarının ve kaçak reaktansların tork açısıyla değişimlerini öngören eşdeğer devreler geliştirmek gerektiğini eklemişlerdir. Geçici akım analizi için güvenli bir d-q modeli elde etmek için, kafes sargısının dirençlerini ve reaktanslarını hassas bir şekilde ölçmek gerektiğini, kafesin koruyucu etkisi nedeniyle bu ölçümler zorlaşacağını belirtmişlerdir.

Bianchi ve Chalmers, 2002 yılında “EL-SRM: Manyetik analiz için analitik ve SEY” isimli çalışmalarında, bir EL-SRM motorunun manyetik özelliklerini hesaplamak için analitik ve sayısal teknikleri sunar ve karşılaştırmışlardır. Ek olarak, bu prosedürleri doğrulamak için deneysel veriler kullanılmıştır. İlk olarak, manyetik niceliklerin analitik bir tahmini rapor edilmiştir. Motorun geometrik verilerinden kolayca elde edilen dağıtılmış bir parametre ağı kullanılır. İkinci olarak, motor akı dağılımlarını ve dolayısıyla akımın fonksiyonları olarak iki eksenli akı bağlantılarını araştırmak SEY ile benimsenmiştir. SEY sonuçları, deneysel bir motor için ölçülen sonuçlarla karşılaştırılmış, hesaplanan ve ölçülen değerler arasında iyi bir uyum göstermişlerdir. İki modelden (Analitik hesaplamalar ve SEY sonuçları) elde edilen akı bağlantıları, farklı akım değerleri ile karşılaştırılmış ve iki model arasındaki maksimum hata % 4'ten az çıkmıştır. Deneysel motor için ölçülen endüktanslar, SEY ile hesaplanmış değerler ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar benzeşmiş ve SEY doğruluğunu onaylamıştır. L_d testleri 5 A üzerinde gösterilmemiştir çünkü bu mevcut en yüksek voltaj (ve akı) durumudur. Uygulamada daha yüksek I_d değerleri oluşmayacağı gösterilmiştir. Yeniden tasarlanacak stator ile nominal torkta daha yüksek akı bağlantıları (%30'a kadar) ve daha düşük akımlar (%10'a kadar) elde edilebilir olduğunu belirtmişlerdir.

Nakatsugawa ve ark., (2002) yapmış oldukları çalışmada, SRM'lerin demir ve bakırdan yapılabildiğini, bu nedenle artık çalıştırılmaz olduklarında düşük maliyetli üretim ve geri dönüşüm için uygun olduklarını belirtmişlerdir. Ancak SRM'ler doğrusal olmayan

endüktans tork özelliklerine sahiptir. Bu nedenle SRM kontrolü için bu özellikleri netleştirmek önemlidir. Bu yazıda, 4 kutuplu deneysel bir SRM üretilmiştir. Motorun endüktans ve tork özellikleri için ölçülen sonuçlar gösterilmiştir. SRM'nin maksimum tork kontrolünü elde edilmiş, bu kontrolün etkinliği deneysel sonuçlarla gösterilmiştir. İlk olarak tork ve tork dalgalanması arasındaki ilişki karşılaştırılarak maksimum tork ve minimum tork dalgalanması elde etmek için rotor bariyer sayılarının seçimi karşılaştırılmıştır. 2 ve 12 bariyer sayısı arasında yapılan simülasyon sonuçlarına göre bariyer sayısı 5 seçilmiştir. Motor parametreleri şu şekildedir; 360 *Watt* güç, 7 *Nm* maksimum tork, 4 kutuplu, 36 stator oluğu, 0.3 *mm* hava aralığı ve 25 *mm* paket boyu. Bu eserde endüktans ve torkun doğrusal olmayan özellikleri ölçülmüştür. L_d ve L_q , değişen akım durumlarına karşı doğrusal değildir ve özellikle manyetik doygunluk nedeniyle, akım arttıkça L_d 'nin önemli ölçüde düştüğü görülmüştür. Tork özelliklerinin de doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğu ve maksimum torku işaretleyen akım fazı, motor akımı büyüdükçe 45° 'den saptığı gözlenmiştir. Ölçümlerden, akımın genliği ile maksimum tork arasındaki ilişki ve akımın fazı ile maksimum tork arasındaki ilişki olmak üzere iki doğrusal ilişkiye odaklanılmıştır. Daha sonra maksimum tork kontrol yöntemi önerilmiştir. Ayrıca maksimum tork kontrolü ile geleneksel sabit faz kontrolü arasındaki verimlilik ve güç faktörü karşılaştırmaları da gösterilmiştir. Testler 1, 3, 5 ve 7 *Nm* yük durumlarında yapılmıştır. Önerilen kontrol sistemi ile sabit faz kontrolüne göre daha yüksek verim ve daha yüksek güç faktörü elde edilmiştir. Örneğin, 7 *Nm*'de sabit faz kontrolüne kıyasla güç faktörü % 4 ve verim % 9 artmıştır.

Beşer (2004), yapmış olduğu "SRM'nin Analizi" isimli tez çalışmasında, SRM'nin endüktans parametrelerini SEY analizi ile rotor konumuna, sargı akımına ve kutup tekerleği yayı (β)'ya bağlı olarak belirlemiştir. Belirlenen sonuçlara göre iki tip rotor tasarımı imal edilmiştir (R1, R2). R1, rotor tasarımı çıkık kutuplu senkron makinanın uyarma sargısız şeklindedir ve manyetik malzemeden üretilmiştir. R2 modeli manyetik olmayan çıkık kutuplar ve manyetik malzemeden rotor dairesine sahiptir. Bu tasarımların rotor konumuna ve sargı akımına bağlı endüktans değişimlerini üç farklı yöntem ile ölçmüştür. Birinci yöntem motorun asenkron olarak çalıştırılması, ikinci yöntem 50 Hz alternatif akım uygulanarak ve üçüncü yöntem ise periyodik darbe gerilimi uygulanmasıdır. Ölçüm sonuçları yardımıyla endüktans parametrelerinin üç boyutlu

yüzey modelleri çıkarılmıştır. Ölçülen endüktans parametreleri Fourier Dönüşümü ile periyodik fonksiyonlar haline dönüştürülmüştür. Endüktans parametrelerinin değişimleri kullanılarak a, b, c faz sisteminde makineye ait matematiksel model oluşturulup modellerin benzetimlerini yapmıştır. R1 ve R2 motor tasarımları için faz-nötr gerilimleri ve sargı akımları deneysel olarak ölçmüş ve benzetim sonuçları ile karşılaştırmıştır. Karşılaştırma sonucunda sonuçların örtüştüğü görülmüştür.

Özdemir (2004), yapmış olduğu tez çalışmasında SRM'nin tasarım ve üretimi dışında çalışılan bir konu olan SRM'nin vektör kontrolü konusunu incelemiştir. SRM'nin akım açısının torkun maksimum değişim oranı kontrolü yöntemine göre PI ve bulanık mantık denetimli vektör kontrolünün sayısal benzetimini yapmıştır. Benzetim sonuçlarına göre bulanık mantık denetleyicili sistemin düşük hızlar haricinde PI kontrolörlü sistemle aynı performans sağladığı görülmüştür. Ancak düşük hızlarda bulanık denetleyicili sistemin daha iyi performans sağladığını göstermiştir. Sonuçların sağlıklı değerlendirilmesi için iki farklı gerçek motor parametrelerini kullanmıştır.

Rakgati ve Kamper 2006 yılında yapmış oldukları “İki rotor yapısına sahip, optimum şekilde tasarlanmış üç ve beş fazlı SRM'lerin tork performansı” isimli çalışmada, farklı normal lamine rotor yapılarına sahip, optimal olarak tasarlanmış üç ve beş fazlı SRM'lerin tork performansı incelenmiştir. Hem dahili akı bariyerli yuvarlak rotor hem de dahili akı bariyeri olmayan ancak sadece kesikli çıkıntılı kutuplu rotor incelenmiştir. Beş fazlı SRM'de faz akımlarına üçüncü harmonik akım bileşeni eklenerek tork performansına etkisi de incelenmiştir. Rotor kaykısı da dikkate alındığı manyetostatik SEY çözümü, aynı bakır kayıpları ve hacimlere sahip makinelerin tasarımını çok boyutlu olarak optimize etmek için doğrudan bir optimizasyon algoritması tarafından kullanılmıştır. Aynı rotor tipi kullanıldığında beş fazlı makine, üç fazlı makineye göre akım başına daha fazla tork üretmiştir. ÇK rotorlu beş fazlı makine, üçüncü harmonik akım enjeksiyonu durumunda kaynaklanan tork artışının sadece % 4 olduğu bulunmuştur. Yuvarlak dahili bariyerli rotorlu üç fazlı makinenin, bu makineyi tork açısından % 28 oranında geride bıraktığı gösterilmiştir. Ayrıca maksimum tork elde edilen akım açısının 60^0 civarında olduğunu göstermişlerdir.

Ersöz (2015), yayınladığı “Akı Bariyerli SRM Tasarımı ve Uygulaması” isimli tez çalışmasında 15 kW gücündeki ASM ile aynı stator yapısını kullanan ve yeni

tasarlanacak olan SRM'yi karşılaştırmıştır. Çalışmada 15 kW'lık ASM, ANSYS Rmxprt programında tasarlanmış, 2D ve 3D manyetik analizlerini yapmıştır. Yapılan tasarım sonucunda ortaya çıkan ölçülerde bir ASM piyasadan bularak ASM'nin çalışma değerlerini ölçmüştür. Aynı ASM statoru kullanılarak SRM rotor geometrisi tasarımı da çalışılarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Tasarım gerçekleştirilirken L_d/L_q oranı göz önünde bulundurularak akı bariyerlerinin tasarımı yapılmıştır. Rotor laminasyon sacları üzerindeki hava/demir oranı motor performansı için önemli olduğu için tasarlanan laminasyon sacı üzerinde parametrik analizler gerçekleştirmiştir. Bu parametrik analizler sonucunda laminasyon sacının 4 bariyerli olmasına karar vermiştir. Analizler sonucu, prototipin üretim süreçleri hakkında bilgiler verilerek imalatı yapılmıştır. Sonrasında piyasada bulunan bir sürücü ile çalıştırılarak boşa çalışma değerleri alınmıştır. ASM ile alınan değerler karşılaştırılmıştır. Alınan değerlere göre SRM'nin verim değerinde % 3'lük bir yükselme meydana gelmiştir. Böylece verimi IE1 sınıfında olan ASM, rotoru değiştirilerek IE3 sınıfına yükseltmiştir. Tork dalgalanmalarında ise yaklaşık % 8'lik bir iyileşme sağlandığını göstermiştir.

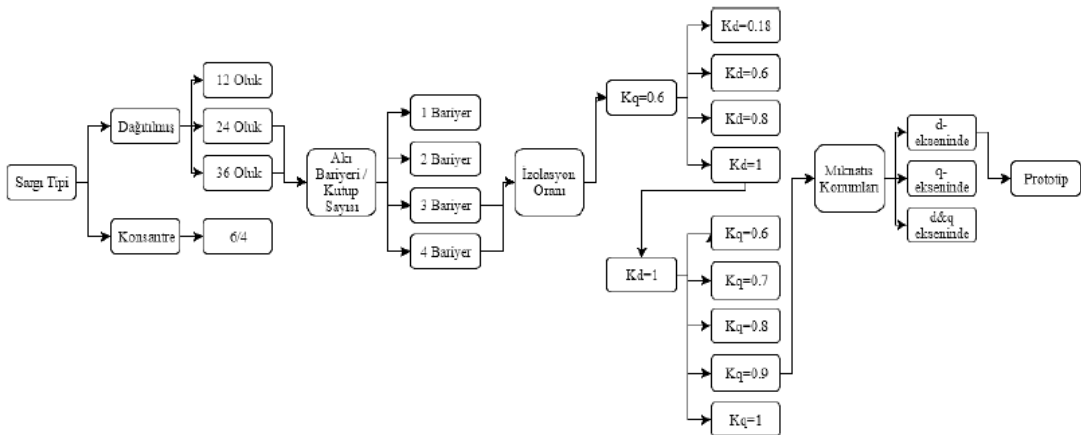
Özçelik (2016), "IE4 Verim Sınıfı SRM Tasarımı" isimli tez çalışmasında, ASM'ye gerek verimlilik gerek ise maliyet anlamında alternatif olarak ortaya çıkan IE4 enerji sınıfına sahip bir SRM tasarımı gerçekleştirilmesini hedeflemiştir. Çalışmanın başlangıç noktası olarak üç fazlı 2.2 kW, dört kutuplu bir ASM alınmıştır. Çalışma boyunca bir sayısal yöntem olan SEY temel alınmıştır. Aynı zamanda bu SEY kullanılarak ulaşılan sonuçları performans sonuçları ile karşılaştırmıştır. Seri üretimde bulunan ASM'nin öncelikli olarak manyetik analizi gerçekleştirilmiştir. Manyetik analiz sonuçlarının performans sonuçları ile örtüşüp örtüşmediği kontrol edilmiştir. Bu sonuçların birbirleri ile olan uyumluluğu gözlemlemiştir. Bu durum manyetik analiz ile gerçeğe yakın sonuçların elde edildiğini göstermiştir. Çalışmanın ikinci adımında; seri üretimde bulunan ASM referans olarak SRM tasarımına başlamıştır. İlk adım olarak manyetik tasarım parametrelerini belirlemiştir. Manyetik tasarım parametreleri ikiye bölünerek bir grup tasarım değişkenleri, diğer grup ise tasarım sabitleri olarak kabul edilmiştir. Tasarım değişkenleri olarak bariyer sayısı; bariyer şekli ve izolasyon oranını seçmiştir. Tasarım sabitleri ise stator geometrisi, kutup sayısı, sarım sayısı ve sargı şeması olarak tanımlamıştır. Literatürdeki matematiksel büyüklükler ve rotor tasarım basamakları kullanılarak bir

boyutlandırma oluşturulmuştur. Optimum çözüme ulaşabilmek için bariyer sayısı; bariyer şekli ve izolasyon oranı gibi tasarım parametrelerini detaylı olarak incelemiştir. Bu inceleme sonucunda üç ve dört bariyerli geometrilerin birbirlerine moment ve moment dalgalılığı açısından yakın sonuçlar verdiği; köşeli geometrinin daha yüksek verimlilik değerlerine ulaştığını gözlemlemiştir. İzolasyon oranı incelemelerinde ise en iyi çözümün q-ekseni izolasyon oranı 0.7 olan geometride elde edildiği sonucuna ulaşmıştır. Tüm bu bulgular kullanılarak dört bariyerli, köşeli geometriye sahip, q-eksen izolasyon oranı 0.7 olan modelin prototip olarak üretilmesine karar vermiştir. Rotorun prototipinin üretilmesi ardından mevcut seri üretimi olan ASM'nin statoru ve gövdesi kullanılarak motoru toplamıştır. Motorun sürüşünü gerçekleştirmek için endüstride SRM sürücüsü olarak özel yazılıma sahip bir SRM sürücüsü temin edilmiştir. Motora farklı yük kademelerinde performans testi gerçekleştirmiştir. Tam yükte gerçekleştirilen performans testi sonucunda motorun verim değerini % 88.9 olarak bulmuştur. Standartlar gereği 2.2 kW, 4 kutuplu bir motorun IE4 verim seviyesini sağlaması için gereken nominal verim değeri % 89.5, alt sınırı ise % 87.92 olarak verilmiştir. Buna göre bakıldığında üretilen prototip motorun hedeflendiği gibi IE4 verim sınıfını sağladığı ve buna ek olarak, elde edilen performans test sonuçları ile manyetik analiz sonuçlarının örtüştüğünü de göstermiştir.

Mohanarajah ve ark. 2016 yılında yaptıkları “Doyumun SRM Performansına Etkisi” isimli makalede küçük boyutlardaki SRM’lerdeki doyum, yüksek boyutlu motorlara kıyasla önemli ölçüde yüksektir, bu da daha düşük güç faktörü ve verimlilik ile sonuçlandığını belirtmişlerdir. Bu makale, özellikle küçük boyutlu SRM’de doyum etkilerini araştırmaktadır. Esas olarak teğetsel ve radyal köprü boyutlarına odaklanmışlardır. Teğetsel ve radyal köprüler, makinenin diğer bölümlerine kıyasla boyut olarak küçük olduklarından, artan akımlar için doyma konusunda çok hassas olduğu bilgisini vermişlerdir. Bu alanlardaki doyum gereksiz yere güç çekilmesine ve verimliliği düşürmesine rağmen, avantajları da vardır. Çalışmada öncelikle teğetsel köprü boyutlarındaki mikro değişikliklere odaklanılmış ve tork, çıkıntı oranı, güç faktörü ve çekirdek kaybı gibi diğer makine parametrelerindeki değişiklikleri gözlemlenmiştir. Ne radyal ne de teğetsel köprü'ye sahip olmayan bir tasarımda dahil olmak üzere SEY kullanılarak 4 modeli analiz etmiş ve çeşitli SRM parametreleri için diğer üç tasarımla karşılaştırmışlardır. Araştırmanın sonuçlarından, diğer performans parametrelerini

etkilemeden SRM rotoru üzerindeki doyum etkisini azaltmak için yöntemler önermişlerdir. Modellerin ($Rib = 0, 0.2 \text{ mm}, 0.5 \text{ mm}$ ve 1 mm) çıkıntı oranı analize bakıldığında çalışma akımına ulaşana kadar teğetsel kırımlı modeller doyum sebebiyle düşük çıkmıştır. Kiriş genişliği arttıkça çıkıntı oranı düşük çıkmıştır. Çalışma akımındaki analizlerde, güç faktörü ve verim değerlerinde de aynı etki gösterilmiştir.

Tap (2017), “SM-SRM Tasarımı” isimli tez çalışmasında, öncelikle geometrik boyutlar ve çalışma koşullarındaki performans kısıtlarını belirlemiş ve bu kısıtlara göre ön tasarım süreci ile tasarıma başlamıştır. Bu ön tasarım sürecinde öncelikle stator yapısını incelemiş daha sonra karar verilen stator tasarımı üzerine en uygun modeli seçerek ardından rotor yapılarını incelemiştir. Rotor yapısında bariyer sayısı, izolasyon oranı ve mıknatıs yerleşiminin etkilerini incelemiş ve en uygun modelleri belirleyip, sonuçlarını karşılaştırmalı olarak sunmuştur. Bu çalışmanın iş akışı Şekil 2.13’te detaylıca gösterilmiştir. Moment üretme kabiliyeti, moment titreşimi, manyetik alan dağılımları, endüklenen gerilimler ve verimler göz önüne alınarak en iyi model seçilmiş ve prototip bir motor üretilmiştir. Bu aşamalarda sadece iki boyutlu SEY ile analizler yapılmıştır. Geçici hal ve sürekli hal manyetik analizleri yapabilen bir ticari paket program (ANSYS Maxwell 2D) ile iki boyutlu düzlemde oluşturulan modeller ile sonuçları elde etmiştir. Üretilen prototip ile laboratuvar ortamında standartlara uygun testler yapmış ve test sonuçları ile prototip SEY modelinin sonuçlarını karşılaştırmalı olarak vererek analizlerin tutarlılığını ortaya koymuştur.



Şekil 2.13. SM-SRM Tasarımı iş akışı (Tap, 2017)

Kovan (2017), “SRM Kontrolü” isimli tez çalışmasında, ASM ve SMSM ile hemen hemen aynı stator yapısına sahip ve bu motor tipleriyle aynı sürücü donanımını kullanan SRM’nin MATLAB üzerinde matematiksel modeli kurulmuştur. Bu model üzerinde sensörlü vektör kontrol algoritmasını incelemiştir. SRM için sensörsüz hız algılama yöntemlerini genel olarak tanıtmış ve motor akımının eğimi ve motor akımları eğimlerinin farkı ile sensörsüz hız ve konum algılama yöntemlerini incelemiştir. Akımın eğimi yöntemiyle sensörsüz pozisyon ve hız algılama algoritması geniş hız aralığında çalışabilmesi ve görece basit algoritması sayesinde akım eğimleri farkı algoritmasına göre daha düşük işlemci gücüyle sağlanabildiğini belirtmiştir. Buna karşın bu yöntemin bozucu etkilere açık olduğu ve hassasiyeti akım eğimleri farkı yöntemine göre daha düşük olduğunu göstermiştir. Stator akımı eğimleri farkı yöntemi bara gerilimi ve endüktans ölçümüne ihtiyaç duymadığı için pozisyon ve hız bilgisini bozucu etkilerden bağımsız olarak sağlayabilmekte olduğunu belirtmiş, buna karşın matematiksel modeli ve algoritması diğer yöntemlere göre daha karışık olduğu gösterilmiştir. Uygulama için yüksek güçlü işlemcilerin seçilmesinin gerekli olduğu, bunun da maliyeti arttıran bir etken olduğunu ifade etmiştir. Buna karşın gerilim sensörüne ihtiyaç duymaması daha sade bir elektronik kart tasarımını mümkün kıldığını böylece maliyet ve sağlamlık bakımından pozitif etkiye sahip olduğunu belirtmiştir.

Donaghy-Spargo (2017), “İnce Nitelikli SRM’lerin Elektromanyetik-Mekanik Tasarımı” isimli makalede, tek dişli bobinler kullanan SRM’nin elektromanyetik ve mekanik analizlerini sunmuş ve seçmiştir. Rotor tasarımı düşünüldüğünde odak noktası elektromekanik tasarım değişimleridir ve bu özel makine topolojisi için aşağıdaki sonuçları çıkarmıştır. Radyal köprü kalınlığının arttırılması, d-ekseni endüktansını değiştirmez; ancak, doymamış q-ekseni endüktansını artırarak çıkıntı oranını düşürür. Radyal köprü, akı bariyerlerinin ana destek elemanıdır ve kararlı durum çalışması altında mekanik bütünlük için minimum güvenlik faktörünü arttırmada en önemli etkiye sahiptir. Radyal köprü kalınlığının arttırılması hem d-ekseni endüktansını hem de doymamış q-ekseni endüktansını etkiler ve teğet bir köprü dahil edilerek, çıkıntı oranında bir kazanç elde edilebilir. Teğetsel köprülerin, kararlı durum işlemi altında yaşanan merkezcil yükleme nedeniyle yapısal bütünlükte daha az role sahip olduğunu belirtmiştir. Doyum başlamasıyla, d ve q-ekseni endüktans özellikleri birleşir ve köprü kalınlığının

elektromanyetik performans üzerindeki etkisi azalır. Prototip makine için tasarım seçenekleri, 2.1 güvenlik faktörü ile 10 kr/d 'lık bir maksimum rotor hızı gerektirir, bu da hava boşluğu kalınlığının sadece % 2'si kadar bir hava boşluğu kapanmasıyla sonuçlanır. Çıkıntı oranı “4” olarak bildirilmektedir. Prototip makinenin, 0.3 mm kadar küçük özelliklerle % 25 aşırı hıza kadar mekanik bütünlüğü korunurken iyi bir elektromanyetik performans elde edebildiği gösterilmiştir. Ayrıca rotor kutup sayısı kesiti ve ince özelliklere sahip rotorların tasarımında dikkatli olunması gerektiği ve artan rotor kutup sayılarının mekanik ve elektromanyetik performansları olumsuz etkilediği ve bu nedenle SRM'lerin en fazla dört kutuplu olmasının tipik bir durum olduğu tartışılmıştır. Rotor yorgunluğu, yüksek frekanslı döngüsel yüklemeler sergileyen bazı endüstriyel prosesleri birleştiren radyal ve teğetsel köprülerin etrafındaki yüksek stres konsantrasyonlarının rotor arızasına neden olabileceğini bilerek, mevcut sınırlı sayıda çalışma nedeniyle bir araştırma alanı olarak tanımlanmıştır.

Inte ve Jurca (2017) “Konsantre sargılı dış rotorlu senkron relüktans makinesinin (ORSRM) tork dalgalanmasının azaltılması” isimli çalışmada, konsantre sargılı bir ORSRM'nin tasarımını sunmuşlardır. Bu sarım türü, daha iyi bir sağlamlık ile makinenin daha kolay inşa edilmesini sağlarken, tork yoğunluğunun ve verimliliğin artmasına izin verdiğini belirtmişlerdir. Kısa uçlu sarım, bu tip makineyi, dağıtılmış sargılı bir makineden daha kısa yapmaktadır. Konsantre sargılı ORSRM tasarımıdaki en büyük zorluk, tork dalgalanma içeriği ve makinenin düşük güç faktörüdür. Bu makalenin başlangıcında, bu çalışma için kullanılacak en uygun topoloji belirlenmiştir, topoloji belirlendikten sonraki adım, hangi tip rotor içeriğinin düşük tork dalgalanmasına sahip olduğunu görmektir. Biri çıkıntısız kutuplu ve diğeri çıkıntılı kutuplu olmak üzere iki tip rotor üzerinde çalışmış, her rotor tipi için üç farklı akı bariyeri formu çalışmışlardır. SEY analizinden sonra, en düşük tork dalgalanma içeriğine sahip olan akı bariyerli çıkıntılı kutuplu ve trapez formlu makine tespit edilmiştir. Çıkıntılı kutuplu ve trapez biçimli akı bariyerli yapı için tork dalgalanma içeriğini azaltmak için stator pabuç uzunluğunu değiştirmişlerdir. Düşük tork dalgalanma içeriğine sahip model için d ve q eksenli endüktanslarını hesaplamışlardır.

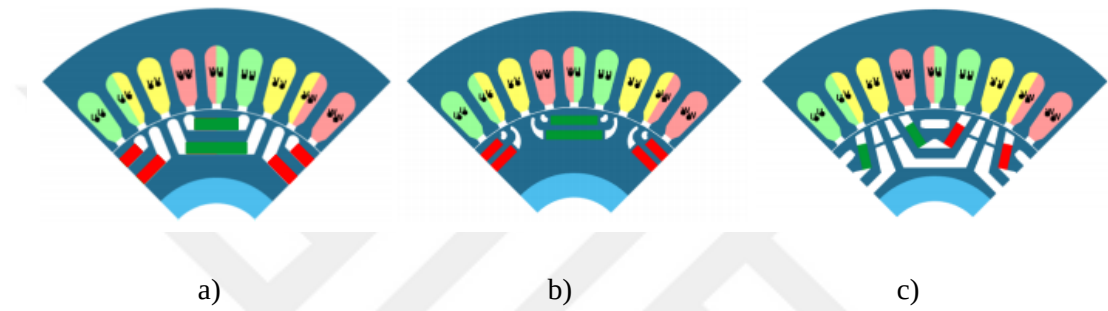
Payza (2018), “Çamaşır Makinesi Uygulaması için Konsantre Sargılı SM-SRM Tasarımı, Üretimi ve Doğrulaması” isimli tez çalışmada, SM-SRM tasarımı yapılmış ve bu

motorun çamaşır makinası uygulaması için kullanılabilirliğini incelemiştir. 9-oluk 8-kutuplu, konsantre sargılı, 3-faz, 650 – 12500 d/d hız aralığına, en az % 70 verim seviyesine sahip motor tasarımı yapılmıştır. İlk olarak motor için ön boyutlandırma yapılmıştır. Daha sonra FLUX 2D SEY programı ile rotorda bulunan kritik tasarım parametreleri üzerinde optimizasyon çalışmaları tamamlanmıştır. Optimizasyon çalışmalarından (rotor üzerinde akı bariyerleri ve mıknatısların optimizasyonu) sonra tasarım sonlandırılarak bu tasarım için prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. alışmalar sırasında köprü ve kiriş kalınlıklarının artmasının motor performansını ciddi derecede kötü etkilediği grlmştir. Ancak bu kalınlıkların rotorun mekanik dayanımını sağlaması nedeniyle bu kalınlıklar güvenli bölgede kalarak seçim yapılmıştır. Kontrol açısı ve oluk açıklığı parametreleri için motor performansını iyileştirmek özellikle de moment dalgalanmasını düşürmek için çalışmalar yapılmıştır. Bu parametreler için moment dalgalanmasını düşürecek ancak çıkış momentinden de kabul edilebilir düzeyde taviz verilecek şekilde seçim yapılmıştır. Prototipi yapılan motorun motor test sisteminde testleri gerçekleştirilmiş ve test sonuçları sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Önerilen model ile önerilen modelin mıknatıs miktarı % 40 azaltılmış durumdaki model için geniş hız aralığında çalışma performansı karşılaştırılmıştır. Mıknatıs miktarı azaldıkça motorun çıkabildiği en yüksek hız değerinin azaldığı ve stator geriliminin de arttığı gösterilmiştir. Bu çalışmalardan sonra önerilen motor için bakır kayıpları, demir kayıpları ve deri etkisi kayıplarını incelemiştir. SM-SRM’de mıknatısın q-ekseninde konumlanmasından dolayı alan zayıflatma bölgesinde mıknatısı zayıflatmak için akım arttırılmamakta olduğunu belirtmiştir, böylece yüksek hızlarda akım artmamakta ve bakır kayıplarının sabit kaldığı gösterilmiştir. Demir kayıpları ise hızın artmasına bağlı olarak frekansın artmasından dolayı yüksek oranda artmaktadır. Deri etkisi kayıpları 650 d/d , 3500 d/d ve 14000 d/d hızlarında incelemiştir. Bu hızlar için sargıların genelinde akım yoğunluğu çok değişmemekle birlikte özellikle 14000 d/d hızında stator oluk açıklığına yakın bölgedeki sargılarda akım yoğunluğunun arttığı da gösterilmiştir. Analiz sonuçları ile üretilen prototipin performans sonuçlarının tutarlı olduğu grlmştir. alışmalar sonucunda tasarlanan ve nerilen SM-SRM’nin çamaşır makinasında kullanılabilecek bir alternatif olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Liang ve ark., 2018 yılındaki “Rotor Yapısı Parametrelerine Dayalı SM-SRM’nin Tork Performansı Analizi” isimli eserde rotorun ana yapısal parametrelerinin ve kalıcı mıknatısın ana parametrelerinin SM-SRM tork performansı üzerindeki etkisi SEY ile incelenmiştir. Ayrıca SM-SRM ve SMSM’nin tork performansı karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, yalnızca 2.4 kg XGS-200 sabit mıknatıs eklenmesinin, kalıcı mıknatıssız bir SRM ile karşılaştırıldığında motor torkunu % 51 artırabileceğini göstermişlerdir. Kullanılan sabit mıknatısların miktarı aynıysa, SM-SRM’nin çıkış tork değeri, SMSM’ninkinden yaklaşık % 12 daha büyüktür. Ayrıca, hava boşluğu uzunluğu (g) ve rotor köprü genişliği, motorun tork performansını etkileyen en önemli parametrelerdir. Bu iki parametrenin değerleri, relüktans torkunun büyüklüğünü doğrudan etkilemiştir. Hava aralığı 0.8 mm’den 0.4 mm’ye düşürüldüğünde tork % 17.5 artmış ve “Rib” 1 mm’den 3 mm’ye yükseltildiğinde tork % 6.6 artmıştır. Daha sonra, sabit mıknatıs ekleme genişliği ve kalınlık değişiminin motor relüktans torku üzerinde çok az etkisi olduğunu göstermişlerdir. Mıknatıs genişliği ve kalınlığının artırılması, çıkıntı oranını azalttığı ve bu da relüktans torkunda bir azalmaya neden olduğu gösterilmiştir. Mıknatıs kalınlığı 0’dan % 100’e yükseldiğinde çıkıntı oranı % 5.9 ve mıknatıs genişliği 0’dan 4 mm’ye yükseldiğinde ise çıkıntı oranı % 3.4 azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca iki tip rotor bariyer yapısı da incelenmiş olup (“U” ve “C” tipi) SEY analizleri sonucunda “U” tipi bariyerin kullanılmasının daha yüksek çıkıntı oranı ve tork sağladığından kullanımını uygun bulmuşlardır.

Knebl ve ark., 2018 yılında yayınladıkları “SM-SRM Tasarımı, İmalatı ve Malzemenin Motor Karakteristiklerine Etkisi” isimli eserde genellikle neodimyum (NdFeB) mıknatıslar kullanan senkron motorlarla yüksek tork yoğunluğu ve verimliliği olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, NdFeB mıknatısların maliyetleri yüksek olduğundan, mıknatıs destekli senkron motorlarda araştırmaların yapıldığını ifade etmişlerdir. Yüzey ve dahili sabit mıknatıslı (SMM) motorlar, düşük hava aralığı akı yoğunluğundan, dolayısıyla düşük elektromanyetik torktan muzdariptir. SM-SRM, rotor çıkıntı oranı (d ve q eksenindeki endüktanslar arasındaki fark) tarafından geliştirilen relüktans torku ile kalıcı mıknatıslar tarafından oluşturulan daha düşük torku telafi etmektedir. Bu makalede, SM-SRM’nin temel özellikleri, elektromanyetik tasarım süreci ve sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır. Aynı zamanda tatmin edici olmayan prototip özelliklerinin

nedenleri üzerine araştırmalar önermişlerdir. Çalışmada 3 farklı rotora sahip modeller karşılaştırılmıştır (Şekil 2.14). İlk iki geometride yalnızca rotor q-eksenine yerleştirilmiş SM bulunurken, üçüncüsü yalnızca d-ekseni boyunca yerleştirilmiş kalıcı mıknatıslara sahiptir. Üçüncü geometri ile ilgili olarak, düşük SM alanına rağmen nispeten yüksek terminal gerilimi hesaplanmıştır. Düşük SM alanı, diğerk iki geometride hesaplanan güç faktöründen yaklaşık % 17 daha düşük olan bir güç faktörüne yol açmıştır.



Şekil 2.14. SM-SRM Tasarımları a) SM-SRM-1 b) SM-SRM-2 c) SM-SRM-3 (Knebl ve ark., 2018)

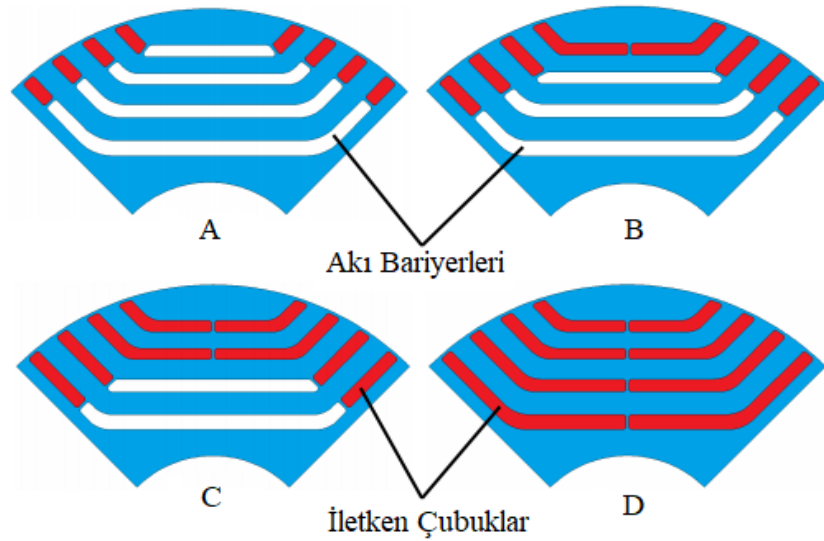
Üç model için yapılan analizlerde stator akımı, faz gerilimi, ortalama tork, tork dalgalanması güç faktörü, verim çıkıntı oranı ve SM boyutları parametreleri değerlendirilmiştir ve ikinci geometri (SM-SRM-2), mekanik sertlik, tatmin edici elektromanyetik özellikler ve üretim fizibilitesi nedeniyle prototip için seçmişlerdir. Analitik model tarafından SEY hesaplamalarının doğru yapıldığı, SEY sonuçları ile üretilen prototip arasındaki farkların üretimden kaynaklandığı tespitinde bulunmuşlardır. Farklı bobin bindirme uzunluğ ve farklı demir doldurma faktörü gibi başlangıçta beklenen ve gerçek üretim verileri arasındaki farkların bu farka neden olduğunu tespit edip yeniden SEY analizi yapıldığında örtüşmenin sağlandığını göstermişlerdir. Aynı SEY ve prototip sonuçlarını elde etmek için, demir kayıplarının başlangıçta beklenen % 40’tan % 75’e yükseltilmesi gerektiğini tespit etmişlerdir.

Boztaş (2019), “Düşük Gerilim ile Beslenen SRM ve Sürücü Tasarımı” isimli doktora tez çalışmasında, Fotovoltaik (PV) panelin üretebileceğı düşük gerilim seviyelerinde, standart motor gövdesine uygun dış ölçülere sahip bir SRM, GA optimizasyon tekniğı kullanılarak tasarlanmıştır. Ayrıca bu motor için motor sürücüsü ve kontrol algoritması

tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Tez çalışmasında ilk olarak SRM ile ilgili detaylı bilgiler vermiştir. Farklı yapıda rotorlara sahip SRM tasarımlarını (Geleneksel, segmental, çift bariyerli, LE-EL) incelemiş ve karşılaştırmıştır. Ayrıca SRM ve ASM'ler ile ilgili bir karşılaştırma da yapmıştır. Daha sonra tasarım aşamaları ve optimizasyon teknikleri ile ilgili geniş bilgiler vererek prototip üretimi gerçekleştirmiştir. Motorun sürekli olarak maksimum hızda çalışmasını sağlayacak şekilde motor sürücüsüne maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritması eklenerek benzetim ortamında test edilmiştir. Fakat deneysel sonuçlar düşük gerilim seviyeli DA kaynağı ile elde edilmiştir. Tez çalışmasında ağırlıklı olarak MPPT algoritmaları ve PV ile ilgili detaylı bilgilere yer vermiştir. Benzetim sonuçlarında SRM'nin kontrolünde hem MTPA hem de MPPT kontrolleri ile ilgili çalışmalarına yer vermiş ve karşılaştırmıştır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde; akım kontrolörleri ve hız kontrolörü sayesinde motorun arzu edilen referans değerlerine düzgün bir şekilde ulaştığı gösterilmiştir. Böylece tasarlanan motor, geliştirilen yazılım ve tasarlanan sürücü sisteminin yük koşulları altında testleri yapılmıştır ve tezin amacına uygun tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma ile daha verimli, daha kompakt ve kullanım kolaylığı sağlayan bir sistem elde edildiğini belirtmiştir.

Hu ve ark. (2019), "Üç Fazlı ŞK-SRM'un Rotor Tasarımı ve Optimizasyonu" isimli makalede üç fazlı şebeke kalkışlı senkron relüktans motor (ŞK-SRM), üç fazlı sincap kafesli endüksiyon motorunun (SK-ASM) ve SRM'nin yapısal özelliklerini birleştirilmiştir. Rotor iletken çubukları sayesinde asenkron tork ile kalkış yapacağı, senkronizasyondaki akı bariyerleri nedeniyle relüktans tork ile çalışacağı gösterilmiştir. İlk olarak, bu makale ŞK-SRM'nin matematiksel modelini ve başlangıç özelliklerini kısaca tanıtmaktadır, ardından ŞK-SRM'nin rotor yapısı optimize edilmiştir. Rotor bariyer katmanlarının sayısının ve akı bariyerlerinin oranının ŞK-SRM'nin d-q eksenli endüktansı üzerindeki etkisi simüle edilmiştir (Optimal bir rotor akı bariyeri yapısı, SEY ile elde edilir). Bu temelde, rotor sincap kafesli iletken çubukların dağılımının ŞK-SRM'nin başlatma kabiliyeti üzerindeki etkisi incelenmiş ve rotor yapısı belirlenmiştir. Optimize edilmiş ŞK-SRM'nin performansı prototip testi ile doğrulanmıştır. ŞK-SRM tasarımının iki ana hedefi vardır: verimlilik optimizasyonu ve başlatma yeteneği optimizasyonu. ŞK-SRM'nin relüktans torku (verimliliği) esas olarak akı bariyerlerinin tasarımı ile belirlenir. Başlangıç asenkron torku esas olarak rotor sincap kafesli iletken

çubukların tasarımı ile belirlenir. Gerçek üretim süreçleri göz önüne alındığında, yapılan analizlerde (d-q eksenleri endüktans farkları) rotor bariyer sayısı 4 ve yalıtım oranı 0.4 seçmişlerdir. Rotor iletken çubuklarının dağılımının ŞK-SRM'nin başlatma kabiliyeti üzerindeki etkisi incelenmiş ve B-model rotoru (Şekil 2.15) belirlenmiştir. Optimize edilmiş ŞK-SRM modelinin simüle edilmiş nominal verimliliği, aynı boyutlardaki IE3 verimli üç fazlı sincap kafesli ASM'ye kıyasla %2.4 oranında iyileştirilmiştir. Son olarak, geliştirilmiş ŞK-SRM'nin (B-modeli) prototipini üretmişler ve geliştirilmiş ŞK-SRM ve aynı tip IE3 ASM'nin performanslarını ölçmüşlerdir. ŞK-SRM'nin verimliliği, her güç altında ASM'den daha yüksek çıkmıştır. ŞK-SRM'nin verimliliği, 3 kW nominal çıkış gücünde ASM'den %2.8 daha yüksek çıkmış, verimlilik IE4 enerji verimliliği seviyesine ulaşmıştır. Bu eserde optimize edilmiş rotorun etkinliğini, prototip testi ile doğrulanmışlardır.



Şekil 2.15. ŞK-SRM iletken çubuklarının farklı tasarımları (Hu ve ark., 2019)

Pohl ve Gerling (2019), “Kafesli Stator Sargılı Düşük Tork Dalgalanmasına sahip SRM” isimli eserde, Titreşim, akustik gürültü ve mekanik bileşenlerin aşınması gibi istenmeyen ikincil etkilerden kaçınmak için elektrikli makinelerde düşük tork dalgalanmasının büyük önem taşıdığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada, bir stator kafes sargısı kullanan senkron relüktans makinelerini ve stator çubuklarının sayısının tork dalgalanması üzerindeki etkisini araştırılmıştır. İlk olarak, bir stator kafes sargısının elektromanyetik özellikleri tartışılmıştır. İkinci olarak, çıkış torku, hava boşluğu kesme gerilimi ilkesine dayalı olarak

analitik olarak hesaplanmıştır. Ek hassasiyet analizi veya sayısal optimizasyon prosedürleri olmaksızın tork dalgalanmasını azaltmak için uygun sayıda stator çubuğu ve kutup çifti kombinasyonları türetilmiştir. Son olarak, farklı çalışma modları, stator çubuklarının sayısı ve rotor geometrileri için SEY ile elde edilen sonuçları doğrulamışlardır. Kafes sargılı SRM'nin çıkış torku, hava aralığı kesme gerilimi ilkesine göre hesaplanmıştır. Sonuç olarak, kutup sayısının katı olmayan stator çubuklarının sayısının seçilmesi, çekiş uygulamalarının gereksinimlerinin çok altında bir tork dalgalanmasına yol açtığını belirtmişlerdir. Önerilen yaklaşımın faydaları hem çalışma modunda hem de rotor geometrisinde bağımsız olarak tork dalgalanmasının azaltılmasında yatmaktadır. Bu, tork dalgalanmasının azaltılması açısından daha fazla analiz yapılması gerekmediği anlamına gelmektedir. Bu nedenle, akı bariyerlerinin uç nokta açılarının konumlandırılması açısından ek serbestlik dereceleri elde edilmektedir. Bunlar, rotor kaybının en aza indirilmesi için veya mekanik sorunlar ortaya çıktığında kullanılabilir. Ayrıca, manyetostatik SEY kullanılarak düşük hesaplama çabasıyla ortalama torkun maksimize edilmesinin mümkün olacağını ifade etmişlerdir. Farklı rotor geometrileri (3 bariyerli, 4 bariyerli) ve yalıtım oranları (0.25, 0.3, 0.35, 0.4) incelendiğinde, kutup başına daha az sayıda akı bariyeri nedeniyle, ortalama tork dört yerine üç akı bariyeri kullanılarak biraz azaltılmaktadır. Ayrıca, kutup başına üç akı bariyeri ile % 0.5'e kadar bir tork dalgalanmasına ulaşılır ve bu hala ihmal edilebilir düzeydedir. Sonuçlardan, tork maksimizasyonu için yalıtım oranının değiştirilmesinin tork dalgalanma davranışına bağlı olmadığını göstermişlerdir.

Mohanarajah ve ark. 2019 yılında yayınladıkları "Nadir Mıknatıslı SM-SRM'lerin Tasarımı" isimli eserde Yüksek motor performansı için kalıcı SM'li, nadir toprak mıknatıslı SRM sunulmaktadır. SM akısının etkinliğini artırmak ve vuruş torkunu azaltmak için yeni bir metodoloji sunulmaktadır. Motor karakteristikleri, SRM ile karşılaştırılmış ve SM akısının etkisi de sunulmuştur. Motor karakteristiği ve performansındaki değişiklikler, MTPA'da analiz edilmiştir. Bu çalışma, SRM'nin performansını artırmak için SM-SRM tasarımının optimize edilmiş SM'lerle tasarlanabileceğini göstermiştir. SM-SRM makine performansları, yeterli SM akısı özelliklerine sahip olacak şekilde boyutlandırılarak nispeten küçük hacimli nadir toprak SM'leri ile önemli ölçüde iyileştirildiğini göstermişlerdir. Torkun % 16 oranında ve güç

faktörünün % 6 oranında iyileştirildiği (MTPA açısında) gösterilmiştir. Tartışıldığı gibi, bu makine için maksimum güç faktörü ve tork iki farklı akım açısındadır. SRM ve SM-SRM'nin tork ve güç faktörü MTPA açıları aynı değildir. Tipik olarak, SRM'nin maksimum torku, rotor yalıtım oranına ve bariyerlerin diğer parametrelerine bağlı olarak 60° ile 70° arasındaki akım açısında bulunurken, SM-SRM'nin maksimum torku, SM akışının büyüklüğüne bağlı olarak daha düşük bir akım açısında bulunur. Bununla birlikte, maksimum güç faktörü hala daha yüksek bir akım açısında yatmaktadır. Bununla birlikte, maksimum torkta, güç faktörü genel çalışma için yeterince yüksektir, ancak SRM ile karşılaştırıldığında daha yüksektir. Öte yandan, maksimum güç faktörünün mevcut açısındaki tork oldukça düşüktür. Bu nedenle, daha iyi çalışma için bu makinede optimum bir kontrol bölgesinin tanımlanması gerektiğini belirtmişlerdir.

Boztaş ve Aydogmus (2019), “Farklı Rotor Yapılarına Sahip SM-SRM’lerin Karşılaştırılması” isimli makalede SRM için dört farklı rotor yapısı incelenmiştir. İlk olarak, rotor üzerinde mıknatıssız 9 stator oluğu ve 4 akı bariyeri olan bir temel motor tasarlanmıştır. Bu motor geleneksel bir SRM olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan tüm motorlar, mıknatıslar dışında temelde benzer bir yapıya sahiptir. Bu çalışmada tasarlanan tüm motorlar için sargı düzeni, stator/rotor iç ve dış çapları ve tüm motor boyutları aynı değerde sabit tutulmuştur. Böylece mıknatısların motor performansı üzerindeki etkileri doğru bir şekilde analiz edilebilecektir. Rotor akı bariyerlerinin farklı konumlarına mıknatıslar eklenerek üç farklı SM-SRM tasarlanmıştır. Rotorun d veya q eksenine mıknatıslar yerleştirilerek motor performansları karşılaştırılmıştır. SRM’ler için en önemli tasarım kriteri, çıkıntı oranını maksimize etmektir. Bu konseptte ulaşmak için rotorun L_d ve L_q arasındaki fark artırılmalıdır. Bu nedenle L_d değerini artırmak veya L_q değerini azaltmak gerekir. L_d değerini artırmak yerine L_q değerini azaltmak daha kolaydır. Rotorun L_q değerini azaltmak için q eksenine boyunca mıknatıslar eklenebilir. Analiz sonuçları, q eksenine mümkün olduğu kadar çok mıknatıs eklenerek en iyi performansın elde edilebileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, çıkıntı oranı 2.95’ten 4.12’ye yükseltildi. Toplam geliştirilen tork 1.34 Nm’den 1.7 Nm’ye yükseltiştir. Sonuç olarak, SM-SRM, geleneksel SRM’den daha iyi performans sunmuştur. Seramik/ferrit mıknatısların düşük fiyatları nedeniyle bu motorların diğer AA motorlara rakip olduğunu belirtmişlerdir.

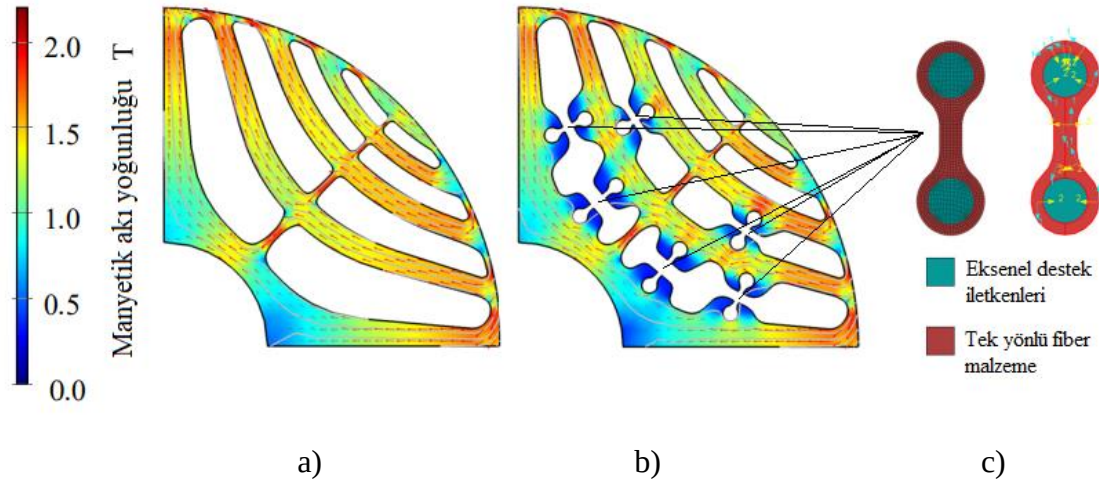
Jia ve ark., 2019 yılında yayınladıkları “Farklı Kutup Sayısına ve IE4 Seviyesine sahip SRM’lerin Tasarımı” isimli makalede IE4 verimlilik seviyesine ulaşmak için farklı sayıda kutuplu SRM’nin tasarımları ve optimizasyonlarını incelemişlerdir. İlk SEY ile örnek veriler elde etmiş, ardından tasarım parametreleri, doyum etkisi, tork, tork dalgalanması vb. gibi motor performansı arasındaki ilişkiyi kurmak için optimizasyon yapılmış model SRM’ler, aşırı öğrenme makinesi (ELM) kullanılarak elde etmişlerdir (ELM, tek gizli katmanlı ileri beslemeli sinir ağlarının eğitimi için önerilen yeni bir öğrenme algoritmasıdır). Son olarak, en iyi optimizasyon performanslarını ve geometrik parametreleri aramak için bir GA kullanmışlardır. SEY ile önerilen yöntemin etkinliğini ve geçerliliğini kanıtlamışlardır. Bu eserde, tasarım hedefi, farklı sayıda (2, 4 ve 6) kutuplu 2.2 kW’lık bir SRM’dir. IE4 verimlilik standardına ulaşmak için, IE3 ASM ile aynı stator yapısı uygun maliyetli olarak benimsenmiş ve ardından SRM’lerin rotor geometrisi, tork ve tork dalgalanması arasında en iyi dengeyi elde etmek için optimize edilmiştir. Optimizasyon sonuçları şu şekildedir; IE4 verimlilik seviyesine göre, üç SRM’nin tasarım hedefi sırasıyla % 88, % 89.5 ve % 87.4’tür. Optimizasyon sonrası üç SRM’nin ortalama torku 7.55 Nm, 14.35 Nm ve 21.17 Nm’dir ve tork dalgalanması sırasıyla % 14.3, % 7.1 ve % 11’dir. Verim değerleri sırasıyla % 89.21, % 89.97 ve % 88.2 elde edilmiştir.

Jia ve ark. (2019) yapmış oldukları başka bir çalışmada ise “Üç Farklı Tip IE4 Verimlilik Makinesinin Tasarımı ve Karşılaştırılması” yapmışlardır. Üç farklı tip IE4 verimlilik sınıfına sahip makinelerin performanslarını ve maliyetlerini karşılaştırmışlardır. Bu makalede, 2.2 kW ASM, SRM ve SM-SRM performansları ve maliyetlerini incelenmiş, karşılaştırılmıştır. SEY ile elde edilen kararlı durum manyetik akı yoğunluğu dağılımları elde edilmiştir. Radyal ve teğet köprülerin hem SRM hem de SM-SRM’lerde oldukça doyumda olduğu açıkça gösterilmiştir, q-eksenine mıknatıs eklenmesi teğetsel akı bariyeri köprülerini doyuma götürmüştür, dolayısıyla q-ekseni endüktansını azaltmak için SM-SRM’nin daha iyi bir performansa sahip olmasına yol açmıştır. Üç makine, akımın 4.6 A olduğu, SRM’ler ve SM-SRM’ler için mevcut açının 60^0 olduğu anma koşullarında karşılaştırılmıştır. Üç makinenin ortalama torku 15.66 Nm, 14.46 Nm ve 16.68 Nm’dir ve tork dalgalanması sırasıyla % 14.1, % 7 ve % 7.1’dir. SM-SRM’nin SRM ile karşılaştırıldığında yüksek torka ve düşük tork dalgalanmasına sahip olduğu açıktır, çıkış

torku yaklaşık % 15.4 daha yüksektir, ASM’de SRM’lerden % 8.3 daha yüksektir ancak tork dalgalanması daha yüksektir. Sonuçlar, tüm bu üç makine tipinin IE4 seviyesi gereksinimini karşılayabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, SRM, biraz zayıf güç faktörü dezavantajı sergilerken, SM-SRM ASM ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir bir maliyetle en yüksek tork yoğunluğunu ortaya koymaktadır.

Hausmann ve ark., 2020 yılında yayınladıkları “Yüksek Hızlı SRM için Rotor Tasarımlarının İncelenmesi ve İyileştirilmesi” isimli makalede, yapısal tasarımı optimize ederek SRM’nin maksimum çalışma hızını artırmayı amaçlayan yeni rotor konseptleri ve tasarımlarına genel bir bakış sunmuşlardır. Ardından, özellikle mekanik ve elektromanyetik özellikleri ile seri üretime uygunluğu açısından yeni bir rotor topolojisini tartışmış ve değerlendirmişlerdir. SRM’ler, SMSM ile karşılaştırıldığında, güç faktörü ve güç yoğunluğunun yanı sıra alan zayıflatma aralığındaki erken güç düşüşü, SRM’lerin iyileştirilmesi için alan sunar. Bu dezavantajlar, esas olarak, sınırlı maksimum ulaşılabilir rotor hızlarına yol açan mekanik kısıtlamalardan kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, rotorun maksimum hızındaki bir artış, SRM’lerin güç yoğunluğunu artırmak için önemli bir potansiyel olarak görülmektedir. Bu nedenle, mekanik ve elektromanyetik sınırlamaları yeniden tanımlamak veya yeni rotor konseptlerinin geliştirilmesi yoluyla bu sınırlamaları atlamak için çok sayıda araştırma yapıldığını belirtmişlerdir. Bu yazıda sunulan yeni tasarım, seri üretime uygunluk ile iyi mekanik ve elektromanyetik özelliklerin bir kombinasyonuna odaklanmaktadır. Bu nedenle, akı öncü malzeme olarak standart elektrik levhaları seçilmiştir. Özellikle yüksek hızlı uygulamalarda merkezkaç kuvvetlerine karşı yüksek mekanik yük kapasitesi sağlamak için rotor göbeğine sürekli fiber takviyeli yapısal destekler yerleştirilmiştir. Kesintisiz liflere kuvvet aktarımını gerçekleştirmek için, iki destek teli etrafında çift halkalı bir bağlantı ile oluşturulan ve kuvvetleri akı ileten bölümler arasında form-fit yoluyla aktaran kemik şeklindeki destekler önerilmiştir. Bu eserdeki konsept ile rotorun mekanik stabilitesini ve güvenliğini optimize etmek için elektromanyetik özellikler üzerinde ilave çelik köprülere göre daha az etkiyle yeni tasarım olanakları açar. Yapısal rotor takviyesinin potansiyel avantajlarını değerlendirmek için, simülasyon yoluyla SRM rotorunun geleneksel tasarımı ile bir karşılaştırma yapılmıştır. Hem geleneksel hem de yeni rotor tasarımı, 15000 d/d ve 20000 d/d hıza tekabül eden bir santrifüj yüküne maruz bırakılmıştır.

Yerleştirilmiş merkezi köprülü bir rotorun yapısal davranışını, elektromanyetik özellikleri geliştirmek amacıyla analiz etmişlerdir. Yapısal kararlılık, geleneksel tasarımdan daha yüksek çıkmıştır. Yapılan elektromanyetik analizde, yeni rotorun endüktans oranının ilk rotora göre biraz daha küçük olduğu fark edilir. Kemik tutucular için ilave elektrikli çelik, q ekseninin manyetik direncini azaltır. Bu, daha yüksek bir q eksen endüktansına (L_q) yol açar. Bu, başlangıç geometrisine kıyasla ortalama torku % 4 (32.26 Nm) azaltmıştır. Yeni fiber takviyeli rotor konseptinin potansiyeli simülasyon ile analiz edildikten sonra, destek yapısı ve rotor çekirdeğine montaj için olası üretim süreçlerini açıklamışlardır. Sayısal simülasyonla yapılan bir konsept çalışması, rotorun yapısal performansının, daha yüksek merkezkaç kuvvetlerine dayanacak ve elektromanyetik davranışı uyarlamak için yeni tasarım olanakları sağlayacak şekilde fiber takviyeli destek yapıları ile geliştirilebileceğini göstermişlerdir. Önerilen rotor modeli ve akı yoğunluğu analiz görüntüleri Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. 4 kutuplu 4 bariyerli SRM, akı a) Başlangıç rotor modeli b) Önerilen rotor modeli c) Rotor destek malzemeleri (Hausmann, 2020)

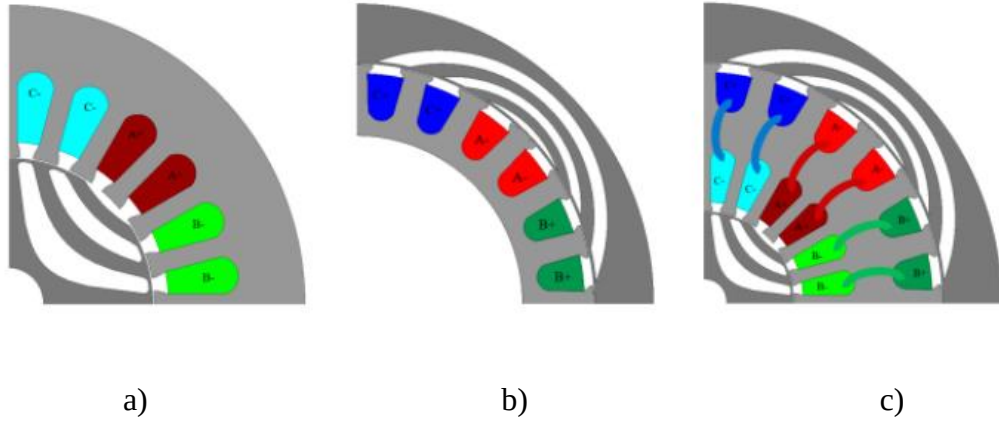
Jammali ve ark., (2020), yayınladıkları eserde, SM-SRM ve elektrikli araç uygulamalarında kullanımları hakkında bir tartışma sunmuşlardır. Bu makale, SM-SRM hakkındaki temel bilgilerin kısa bir incelemesini içermektedir. Makalede daha sonra SM-SR-SRM manyetik modelini belirlemek için deneysel metodoloji ve prosedürün ayrıntılı bir tanımını sunmuşlardır. Bunu takiben, FOC ilkelerine dayalı SM-SRM sürücü geliştirmesinin önemli yönlerini tartışmışlardır. Hem parametre tanımlamasını hem de sürücü çalışmasını göstermek için geniş deneysel sonuçlar dahil edilmiştir.

SM-SRM'lerin SRM ve ASM'ler ile kısa bir karşılaştırmasını yaparak üstün yanlarını belirtmişlerdir. Rotor akı bariyerlerine SM'lerin yerleştirilmesi ile akı köprülerini doyumu ve tork üretimi üzerinde olumlu bir etki ile L_q 'nın daha da azalmasına yol açtığını belirtmişlerdir. Lineer motor modeli kullanımına dayalı basitleştirilmiş sürücü kontrol seçeneği ile doyum ve çapraz kuplaj içeren daha doğru bir motor modeli kullanan MTPA tabanlı kontrol seçeneği arasında karşılaştırma yapılmıştır. İkinci seçeneğin avantajı kanıtlanmıştır. Doğru SM-SRM motor modelinin ve optimal referansların kullanılmasının, tork dalgalanmasında önemli bir azalmaya ve daha iyi bir sürücü performansı kalitesine yol açtığını belirtmişlerdir.

Liu ve ark., 2020 yılında yaptıkları "Asimetrik Rotorlu SM-SRM'nin Optimizasyonu" isimli makalede, Asimetrik rotor tasarımına sahip SM-SRM, manyetik tork ve relüktans torkunun kullanımını etkin bir şekilde iyileştirebilir, böylece tork yoğunluğunu artırılabilirdiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, aynı zamanda, vuruş torku ve aşırı tork dalgalanması sorunlarını da beraberinde getirdiğini, bu aşırı tork dalgalanması sorununu çözmek için, motor yapısı ve kontrol yöntemleri ile tork dalgalanmasının azaltılabileceğini öngörmüşlerdir (Motor yapısı açısından yardımcı yuvanın açılması ve kutup ve yuva kombinasyonlarının farklı sarım yöntemleri ile değiştirilmesi). Kontrol yöntemlerinde, tork harmonik bileşenlerini analiz ederek ve belirtilen harmonik akımı enjekte ederek tork dalgalanmasını azaltmışlardır. Ardından, SEY yardımıyla, asimetrik rotor yapısına sahip SM-SRM'nin tork özellikleri ve performansı üzerindeki üç yöntemin etkisi analiz edilmiştir. Bunlar; Yardımcı slot açılarak optimize edilen model, slot ve kutup kombinasyonu ile optimize edilen model ve harmonik akım enjeksiyonu ile optimize edilen model. Yardımcı slot yöntemi ve harmonik akım enjeksiyon yöntemi, tork dalgalanmasını sırasıyla % 22.91 ve % 43.28 oranında azaltırken, çıkış torku da temel modele göre % 1.76 oranında azaltılmıştır. Harmonik akım enjeksiyon yöntemi, belirtilen tork harmoniğini etkin bir şekilde bastırmıştır. Temel model ile karşılaştırıldığında, oluk ve kutup kombinasyonları yönteminde seçilen dağıtılmış sargılara sahip 27 oluklu stator, tork dalgalanmasını % 87.83 oranında azaltmış ve çıkış torku % 2.46 oranında artırmıştır. Dağıtılmış sargılara sahip 27 oluklu statorun kullanılması da ters EMK dalgasını iyileştirdiğini, Toplam Harmonik Bozulma (THD)'yı

azalttığını ve asimetrik rotorunun akı odaklama özelliklerini geliştirdiğini göstermişlerdir.

Alani ve ark., 2021 yılında yayınladıkları “Çift Rotorlu SRM’nin Analizi ve Tasarımı” isimli makalede, düşük maliyetleri ve basit rotor yapılarına rağmen, düşük tork yoğunluğu, yüksek tork dalgalanması ve düşük tork-hız kapasitesi, SRM’nin otomotiv uygulamasıyla birleşmesinin önündeki engeller olarak belirtmişlerdir. Sonuç olarak, SRM’nin yukarıda bahsedilen zorluklarını iyileştirmek için çift rotorlu konsept araştırılmışlardır. Çift taraflı ve tek taraflı stator yapısı karşılaştırıldığında, arka demir eksikliği bakır için daha fazla alan sağladığından, tek taraflı statorun üstün performansa sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca, geleneksel tek rotorlu SRM’ye benzer şekilde, çift rotorlu makine için optimum stator/rotor kutup kombinasyonları 24/4, 36/4 ve 48/4’tür. 36/6 ise görece olarak daha yüksek tork elde edebilir olduğunu belirtmişlerdir. Akı kanallarının sayısı, kalınlıkları ve açıları incelenmiş, her iki rotorda da aynı sayıda akı kanalının düşük tork dalgalanmaları sağlayabileceğini göstermişlerdir. Son olarak, çift rotorlu makineyi önceden tasarlanmış ve test edilmiş tek rotorlu makineyle karşılaştırmış, %18 daha yüksek tork ve % 41 daha az tork dalgalanması sağlamışlardır. Çift rotorlu makinede iyi bir tork-hız karakteristiği, faz başına optimum sayıda sipir sayısı kullanılarak elde edilebilir, ancak bu daha yüksek akım sağladığı belirtilmiştir. Çift rotorlu makinelerde daha yüksek oluk alanı nedeniyle yüksek bakır kaybı bulunmuştur. Özetle, muadili tek rotorlu makine ile karşılaştırıldığında, çift rotorlu makine yüksek tork, düşük tork dalgalanması, iyi tork-hız kapasitesi ve iyi mekanik bütünlük avantajlarına sahiptir. Bununla birlikte, montaj karmaşıklığının dezavantajı ve daha yüksek aktif olmayan hacim, çift rotorlu makine için dikkate alınması gereken zorluklar olarak not etmişlerdir. Şekil 2.17’de makalede önerilen modeller gösterilmiştir.



Şekil 2.17. a) içten rotorlu model b) dıştan rotorlu model c) önerilen çift rotorlu model (Alani ve ark., 2021)

Knebl ve ark., 2020 yılında yayınladıkları “Yüksek torklu SM-SRM tasarımı (YT-SM-SRM) ve optimizasyonu” isimli eserde, YT-SM-SRM’nin tasarımı ve optimizasyonuna odaklanmışlardır. Önerilen tasarımın uygulamasında, motor maliyetini düşürürken ve mümkün olan en iyi verimi elde etmeyi amaçlamışlardır. Mümkün olan en iyi verimi elde etmenin temel amacı her zaman belirtilen sınırlar içinde yapıldığını belirtmişlerdir. Yazarlar tarafından seçilen optimizasyon yöntemi, evrimsel algoritma ile tasarım optimizasyonudur. Bu yayında YT-SM-SRM’nin optimizasyonu için çok amaçlı kendi kendini organize eden geçiş algoritması (MOSOMA) kullanmışlardır. Ayrıca yüzey mıknatıslı senkron relüktans motor (YM-SRM) ile karşılaştırmalar yapmışlardır. Bu makalede, YM-SRM’nin yerini alabilen YT-SM-SRM topolojisinin optimal tasarımını sunmuşlardır. Bu makalenin önemi iki yönlüdür. Birincisi, paket boyu artışı olmadan YM-SRM ile karşılaştırıldığında benzer özelliklere sahip YT-SM-SRM tasarlamının mümkün olmasıdır. 55 kW gücünde ve aynı dış çap uzunluğundaki YT-SM-SRM optimize edilerek, % 85 verimlilik, % 9.37 tork dalgalanması ve % 8.36’ya eşit güç faktörü elde etmişlerdir. Orijinal YM-SRM makinesine göre % 2.5 verim artışı, neredeyse % 3 daha düşük tork dalgalanması ve güç faktöründe yalnızca hafif bir düşüş olmuştur. Ve bu makalenin bir diğer faydası da, MOSOMA algoritmasının elektrikli makinelerde daha fazla sayıda parametreyi optimize etme yeterliliğinin kanıtlamış olmasıdır. Optimize edilmiş parametre sayısı MOSOMA algoritmasına odaklanan diğer makalelerden önemli ölçüde daha fazla olmasına rağmen, algoritma nispeten iyi bir performansla çalışmış ve iyi bir optimal tasarım bulmuştur. Performans, daha büyük bir

optimizasyon süresiyle veya farklı algoritma ayarlarıyla optimizasyonun test edilmesiyle artırılabilir olduğunu da belirtmişlerdir.

Castagnaro ve Bianchi, (2020), yayınladıkları eserde bütünleşmiş motor milleri için yüksek hızlı küçük güçlü SRM'nin tasarım süreci sunmuşlardır. Optimizasyon sonuçları arasından nihai bir tasarım seçmişlerdir. Seçim, nominal tork ve tork dalgalanması ile makine verimliliği arasındaki denge dikkate alınarak yapılmıştır. Genel makine performansları türetilmiş ve tartışılmıştır. En iyi tasarım çözümlerini bulmak için SEY modeliyle birleştirilmiş çok amaçlı bir optimizasyon gerçekleştirmişlerdir. Motor istenilen performansı sergileyebilmektedir. Rotor mekanik fizibilitesi de kontrol edilmiştir. Sonuç olarak, SRM'nin küçük güçlü entegre motor milleri için aday olduğunu kanıtlanmışlardır. Motorun gücü 4.5 kW , hızı 9000 d/d ve anma akımı 12.8 A 'dir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda verim $\% 94.9$, ortalama tork 4.9 Nm ve tork dalgalanması $\% 8$ çıkmıştır. Modelin elektromanyetik analizi de yapılmıştır, stator demir doygunluğu yüksek çıkmamıştır. Stator dişlerindeki akı yoğunluğu 1.6 T 'yi geçmemiş ve stator boyunduruğunda en fazla 1.3 T çıkmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda bir prototipi, deneysel testler ile SEY tahminini doğrulamak için yapmışlardır fakat bu eserde test sonuçları bulunmamaktadır.

Uberti ve ark. 2020 yılında yayınladıkları "Akışkan Şekilli Akı Bariyerli SRM için Optimizasyon Prosedürü" isimli eserde, SRM'nin tasarımını optimize etmek için yeni bir yazılım tabanlı teknik önermişlerdir. Yöntem, uygun şekilde şekillendirilmiş rotor akı bariyerlerinin konumunu çizmek ve değiştirmek için bir MATLAB kodlarını tanımlamışlardır. MATLAB ve Flux 2D arasındaki iletişim yoluyla, akı bariyerlerinin bölümlerden oluştuğu farklı konfigürasyonları değiştirmiş ve analiz etmiştir. Bu makedeki motor 5.5 kW gücünde, 4 kutuplu, 1500 d/d hızında ve stator oluk sayısı 36'dır. En iyi rotor tasarımını bulmak için, ortalama tork, tork dalgalanması, verimlilik ve güç faktörü, bu işlem sonrası analizlerinde değerlendirmişlerdir. Analizin temelinde 3 bariyerli rotorun, her bir bariyerin üst-orta-alt koordinatları çizgisel olarak konfigüre edilmiş matrisler kullanılmıştır. Her bariyerin orta noktasında 1 mm genişliğindeki köprü bariyeri ikiye bölmektedir. Analizde 4500 matris hesaplanmıştır ve uygulanamaz veya uygun olmayan geometrik varyantlar elendikten sonra kabul edilebilir alternatif sayısı sadece 154'e düşürmüştür. Tork dalgalanması, en alt çizgi -şafta yakın- (bariyer

varyasyonlarında bariyerler çizgi olarak tanımlanmıştır) şafttan daha uzak bir konumda olduğunda, % 35.7'ye eşit olan minimum değerine ulaşır: Sonuç olarak, akıya daha geniş bir merkezi yola izin veren bir geometrinin, tork dalgalanmasını azalttığını belirtmişlerdir. Bu değer yüksek olarak kabul edilebilir, ancak bu çalışmada rotor optimizasyonu sırasında stator geometrisi değişmeden kalmıştır. Tork dalgalanmasının, stator yuvası açıklığının da optimize edilmesiyle azaltılabilir olduğunu ifade etmişlerdir. En düşük tork dalgalanmasının elde edildiği durumda tork değeri yaklaşık 36 Nm civarındadır. Verimlilik neredeyse tüm durumlarda % 94'ün üzerindeki değerlere ulaştığı için farklı konfigürasyonlardan çok fazla etkilenmemektedir. Bunun nedeni, Joule kayıplarının sabit kalması, rotor akı yoğunluğu değerlerinin doyuma yakın bazı kısımlarında ise demir kayıplarının artmasıdır. Her durumda verimlilik üzerindeki etkileri yüzde olarak küçüktür. Güç faktörü değerleri, benzer güce sahip bir endüksiyon makinesinkinden daha düşük ve 0.695 ile 0.735 arasındadır. Yalıtım oranı artırılırsa ve böylece havanın yüzdesi demire göre artarsa, L_q 'de bir azalma olduğu için güç faktörünün genel olarak artan bir eğilime sahip olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada deneysel çalışma yapılmamıştır.

Korman ve ark. (2020), yayınladıkları eserde, SRM'nin tasarımı için farklı amaç fonksiyonları ile üç farklı optimizasyon gerçekleştirmişlerdir. İlk olarak, maksimum dört geometrik değişkenli rotor akı bariyerleri oluşturmak için belirli kurallar uygulanarak parametreler tanımlanmıştır. Bunlar üç bariyerli rotorda, her bariyerin uçları konumlarının ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) değişiminin analizi ve yalıtım oranıdır (kwq) ($14.81 < \alpha_1 < 37.6$, $40 < \alpha_2 < 50.7$, $52.30 < \alpha_3 < 58.9$, $0.2 < kwq < 0.8$). Üç farklı optimizasyonun ilkinde (O1), Amaç fonksiyonları, ortalama torku maksimize etmek ve tork dalgalanmasını minimize etmek için seçilmiştir. İkinci optimizasyon (O2), O1'deki gibi ortalama torku en üst düzeye çıkarmak ve tork dalgalanmasını en aza indirmekle aynı amaçlarla, ancak demir kayıplarının en aza indirilmesi için ek bir hedef işlevle oluşturulmuştur. Tork dalgalanması kısıtlaması her zaman $< \% 10$ 'a ayarlanmıştır. O2'nin amacı, yeni amaç fonksiyonunun (kayıpların minimizasyonu) rotor geometrisi üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Üçüncü optimizasyonun (O3), O2 gibi üç amacı vardır: Ortalama torkun en üst düzeye çıkarılması, tork dalgalanmasının en aza indirilmesi ($< \% 10$ kısıtlama ile) ve kayıpların en aza indirilmesi. Bu durumdaki fark,

değeri O1 ve O2'den elde edilen sonuçlara göre tanımlanacak olan ortalama tork üzerindeki ek bir kısıtlamada yatmaktadır. Kayıp minimizasyonunun dahil edilmesiyle, O2 uygulandığında, O1'e kıyasla nispeten daha düşük ortalama tork değerlerine sahip olmak mümkündür. Bunun üstesinden gelmek için, optimizasyon algoritmasını daha yüksek ortalama torka (belirli bir eşiğin üzerinde) sahip tasarımları aramaya zorlamaktır. Optimizasyon sonuçları, ortalama tork, tork dalgalanması ve demir kayıpları açısından hem amaç fonksiyonlarının hem de kısıtlamaların rotor geometrileri ve makine performansı üzerindeki etkilerini vurgulayarak, ayrıntılı olarak sunmuşlardır. Ortalama tork kısıtlaması (O3) ile kayıpları en aza indirmeye yönelik optimizasyonun, hedef fonksiyonlar arasında en iyi uzlaşma ile daha iyi tasarımlar sağlayabileceği sonucuna varılabilir olduğunu belirtmişlerdir.

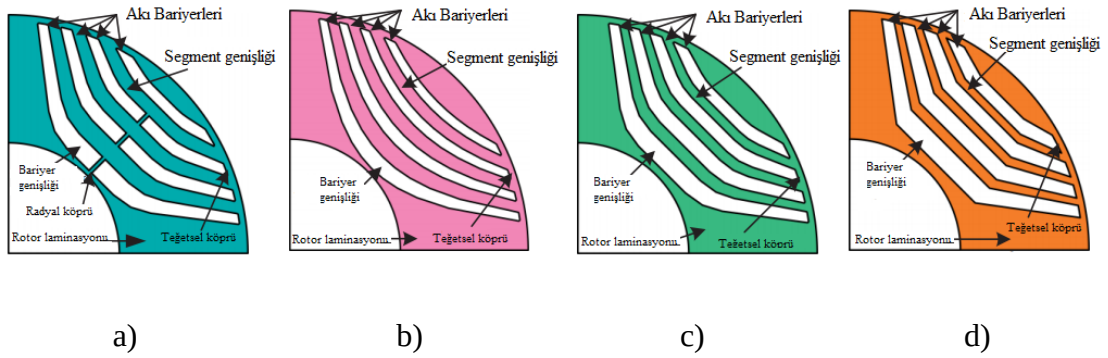
Aramenko ve ark. 2020 yılında yayınladıkları makalede, hava aralığı uzunluğunun ve yarı manyetik kamaların kullanımının, yüksek hızlı uygulamalara yönelik EL-SRM performansı üzerindeki etkisi incelenmişlerdir. İncelenen EL rotorunun, özel manyetik ve manyetik olmayan malzemelerden oluşan bir yığının ısıtma işlemleriyle üretilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada 12 kW gücünde ve 24000 d/d bir motor ele alınmıştır. Bu çalışmadaki EL motor, rotorunu anizotropik yapan elektriksel olarak iletken yumuşak manyetik ve manyetik olmayan katmanlardan oluşmaktadır. Katmanlar, stator tarafından üretilen yüksek dereceli uzamsal harmoniklerin neden olduğu önemli girdap akımı kayıplarına sebep olmaktadır. Bu kayıplar, hava boşluğundaki bir artışla verimli bir şekilde en aza indirilebileceğini belirtmişlerdir. Stator demir kayıpları, özellikle MTPA kontrolü uygulandığında hava aralığı uzunluğuna da bağlıdır. Bu durumda, azalan mıknatıslanma endüktansı nedeniyle daha büyük bir hava boşluğu ile demir kayıpları azalır. Bu iki kayıp bileşeni, daha büyük hava boşluğu ile azalırken, nominal torku üretmek için daha büyük bir stator akımı gerektiğinden, sargıdaki Joule kayıpları artar. Bu bileşenler arasında bir denge sağlamak için, önemli verimlilik artışı ile sonuçlanabilecek optimal hava aralığı uzunluğu bulunmalıdır (bu çalışmada % 0.7). Hava aralığı uzunluğunun etkisini incelemek için 0.75 mm ile 2.5 mm arasında değiştirilmiştir. Yüksek dereceli hava aralığı akı yoğunluğu harmoniklerini azaltmak ve böylece rotor girdap akımı kayıplarını azaltmak için yarı manyetik yarı kamaları da uygulanabilir. Yarı manyetik kamalar, stator sargısı Joule kayıpları üzerinde minimum

etkiye sahiptir. Artan stator dış ucu kaçak endüktansı nedeniyle demir kayıpları biraz artsa da, manyetik kamaların verime olumlu katkısının açık olduğunu ifade etmişlerdir (bu çalışmada % 0.2). En yüksek verimi elde etmek için uygun hava aralığı uzunluğu seçimi ve yüksek bağıl geçirgenliğe sahip yarı manyetik kamaların bir kombinasyonu düşünülebilir. Hava aralığı uzunluğunda daha az artışla benzer rotor kayıplarının azaltılmasını sağlayacağını belirtmişlerdir.

Martinović ve ark., 2020 yılında yayınladıkları “Topoloji Optimizasyonu Kullanılan SRM’nin Karşılaştırılması” isimli eserde, topoloji optimizasyonu kullanılarak bir SRM tasarım optimizasyonu sürecini açıklamışlardır. Farklı sayıda kutup çiftine sahip makineler için karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Ayrıca rotor asimetrisinin faydası da incelenmiştir. Her model, yerel açma/kapama duyarlılığı yöntemiyle hibritlenmiş bir GA kullanılarak topoloji optimizasyonu ile elde edilmiştir. Bu hibrit yaklaşım, hesaplama süresini azaltmak için etkili olabileceğini belirtmişlerdir. Ortalama tork ve güç faktörü açısından 4 kutuplu tasarımların 6 kutuplu ve 8 kutuplu tasarımlarla karşılaştırmaları gösterilmiştir. Motor parametreleri şu şekilde alınmıştır; Stator slot sayısı 36, stator dış çapı 240 mm, stator iç çapı 135.6 mm, paket boyu 150 mm, shaft çapı 45 mm, hava aralığı 1 mm, faz akımı 362.7 A, elektrik yükü 60 kA/m ve akım yoğunluğu 6.5 A/mm². 4 kutuplu SRM’nin en iyi performansı sağladığı rotorun topoloji optimizasyonu ile kanıtlanmıştır. İlk yaklaşımda, farklı kutup çiftlerine sahip motorlar karşılaştırıldığında, stator iç ve dış çapı, yuva sayısı ve boyutları aynı akım yoğunluğu ile aynı tutulmuştur. İkinci yaklaşımda, stator iç çapı ve yuva sayısı ve boyutları değiştirilmiş, ancak akım yoğunluğu ile doğrusal akım yoğunluğunun çarpımı ve stator dış çapı sabit tutulmuştur. Her iki yaklaşımda da en iyi sonuçlar 4 kutuplu motor ile elde edilmiştir. İlk yaklaşıma göre, 4 kutuplu motorda yaklaşık % 9 daha yüksek elektromanyetik tork ve ikinci yaklaşıma göre yaklaşık % 5 daha yüksek tork elde edilmiştir. Ayrıca rotor asimetrisinin faydası incelenmiş ve rotor asimetrisine izin verildiğinde yaklaşık % 2’lik bir iyileşme olacağını belirtmişlerdir.

Parveen ve ark., 2020 yılında yayınladıkları “Güneş Enerjili Su Pompası için SRM Bariyer Şeklinin Tork Dalgalanması ve Çıkıntı Oranı Üzerindeki Etkileri” isimli eserde, SRM rotor yapısı, tork değerinde, tork dalgalanmasında ve güç faktöründe önemli rol oynayan bariyerlerden oluşur. Hava bariyeri şekillerinin motor performansı üzerindeki

etkisi incelenmiştir. Araştırmanın temel amacı, akı bariyer şekillerinin makinenin ortalama tork, tork dalgalanması, doyum, çapraz doygunluk ve çıkıntı oranı üzerindeki etkisini analiz etmektir. Güneş enerjili su pompalarında, özellikle dalgıç pompalarda tork dalgalanması ciddi bir endişe kaynağıdır. Ayrıca güç faktörü, MPPT için değişken frekanslı sürücünün değişim oranına karar vermede ana unsurdur. Çalışma için 24 stator slotlu, 4 kutuplu, 100 Hz, 2.2 kW gücünde, 3000 d/d hızında, hava aralığı 0.7 mm ve stator dış çapı 135 mm genişliğinde SRM seçilmiş ve SEY kullanılarak analiz yapılmıştır. Bu makalede, Şekil 2.18’de gösterildiği gibi dört farklı 4 kutuplu rotor geometrisi analiz edilmiştir. Rotorun 4 topolojisinde de akı bariyerlerinin sayısı aynı tutulmuştur. Bariyerlerin sayısı arttıkça çıkıntı oranı ve güç faktörü artar. Ancak, mekanik bütünlük ile ilgili herhangi bir sorundan kaçınmak ve boyutsal kısıtlamaları korumak için burada incelenmemiştir. Rotor I, radyal köprülere sahip tasarımıdır. Rotor II, Rotor I’e kıyasla daha pürüzsüz yarım daire biçimli bir yapıya sahiptir ve radyal köprü bulunmamaktadır. Rotor III, herhangi bir radyal köprü olmaksızın Rotor I’e benzer segmental bir tasarıma sahiptir. Rotor IV, radyal köprü olmadan segmental bir tasarımla sağlanır ve akı bariyerleri için daha keskin bir şekilde tanımlanmış segmentasyona sahiptir. Rotor tasarımları, tasarım için en hassas parametrelerden bazılarını, yani akı bariyerlerinin şeklini, nervürlerin varlığını, teğet nervürlerin kalınlığını vb. vurgulamak için seçilmiştir.



Şekil 2.18. Akı bariyerlerinin farklı şekillerini gösteren rotor geometrilerinin görünümü a) Rotor I b) Rotor II c) Rotor III d) Rotor IV (Parveen ve ark., 2020)

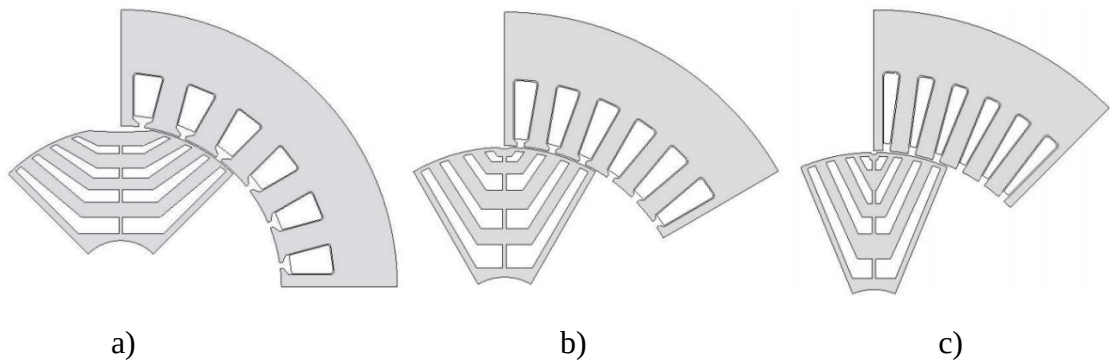
Bu çalışmada, bariyerin genişliği, teğetsel köprüler ve taşıyıcının boyutları, bariyerlerin dış ve iç açısı ile motorun performansını iyileştirmek için değişkenler olarak ele alınmıştır. Analiz sonuçlarında, en yüksek çıkıntı oranı, en düşük tork dalgalanması ve

en düşük stator çekirdek kayıpları Rotor IV’de gözlenmiştir. Rotor IV’ün geometrisinin diğer rotor yapıları arasında en iyi performansı gösterdiği ve makinenin tork profilinin şekillenmesinde teğetsel ve radyal köprüleri boyutlarının önemli bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Yazarlar bu rotor geometrilerinin etkilerini, güneş enerjili su pompalamasında SRM uygulaması için sunmuşlardır. Bu, değişken frekanslı sürücünün derecesini DA bağlantı kondansatörünü ve motorun mekanik stabilizesini, özellikle dikey dalgıç pompalarda tork dalgalanmasının yatak üzerindeki etkilerini de belirlemişlerdir.

Cebeci (2021), “SRM’nin gözlemci tabanlı sensörsüz kontrolü” isimli tez çalışmasında, SRM’nin sensörsüz kontrolü üzerine çalışma yapmıştır. Öncelikle motor matematiksel modelini incelemiş ve dinamik denklemleri kullanarak MATLAB/Simulink ortamında modellemiştir. Bu motor modelinin kontrolüne ilişkin yöntemler incelenmiş ve bu yöntemlerden bazılarında sensörlü olarak benzetim çalışması yapmıştır. Sensörsüz kontrol yöntemlerini de inceleyerek motor açısız hızının önemli olduğunu ve daha önce tüm alternatif akımlı makineler için önerilen aktif akı kavramının prensibi ile rotor açısız konumu tahmin edildiğini belirtmiştir. Kokusuz Kalman Filtresi (UKF) ile tahmin edilen rotor açısız konum değeri kullanılarak motor elektriksel parametreleri Park Dönüşümü ile dönen eksen takımına dönüştürülmekte olduğunu göstermiş, dönen eksen takımında oluşturulan SRM dinamik denklemleri için Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) tasarlamıştır. Tasarlanan EKF ile rotor açısız hızı ve yük torkunu tahmin edilebilir olduğunu göstermiştir. Tahmin edilen rotor açısız hızı, diğer tahmin yöntemlerindeki tahmin değerleri ile karşılaştırmış, EKF ile tahmin edilen rotor açısız hız hatasının diğer yöntemlere göre % 70 oranında daha az olduğunu gözlemlemiştir. Sonuç olarak SRM hem benzetim ortamında hem de deneysel ortamda sensörsüz olarak kontrol edilmiştir. Deneysel ortamda alan yönlendirmeli kontrol yöntemlerinde MTPA uygulanmıştır. Bu yöntem ile motor daha az akım ile mevcut yükü sürebilmiştir.

Lujun ve ark. 2021 yılında yaptıkları çalışmada, son zamanlarda, SMSM’lerin yaygın olarak kullanıldığını, yüksek tork yoğunluğu, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verimlilik gibi avantajlara sahip olsa da, SM’lerin kullanımı SMSM’lerin maliyetini ve işleme zorluğunu artırdığını belirtmişlerdir. SRM’ler, düşük maliyetleri ve yüksek güvenilirlikleri ile SMSM’ler ile rekabetçi olacak bir alternatif olduğunu ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, kalıcı mıknatısların olmaması nedeniyle, SRM’lerin tork

yoğunluğu, aynı koşullar altında SMSM'lerinkinden daha azdır. Bu, SRM'lerin önemli bir dezavantajıdır ve daha fazla araştırılması gerekir. SRM'lerin torkunu birçok faktör etkiler ve kutup çiftlerinin sayısı, makineler tasarlanırken ilk düşünülen unsurdur. Bu makale, basitleştirilmiş manyetik devre modeline dayalı olarak d-ekseni, q-ekseni ve torkun endüktansını hesaplamak için bir denklem önermekte ve kutup çiftlerinin sayısının endüktans ve tork üzerindeki etkisini teorik olarak analiz etmektedir. Teorik analizde çıkarılan denklemden görüldüğü üzere L_d ve L_q , kutup çifti p sayısının karesi ile ters orantılıdır. p kutup çiftlerinin sayısı arttıkça, SRM'lerin L_d ve L_q azalır ve L_q deki azalma L_d 'inkinden biraz daha fazladır. L_d , L_q 'den büyük olduğundan, L_d 'in azalması L_q 'ninkinden daha büyüktür ve fark aralarında azalır ve sonunda torkun azalmasına neden olur. Çalışmanın devamında üç farklı kutup sayısı-oluk sayısı model SEY kullanılarak rotor optimizasyonu yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan modeller Şekil 2.19'da gösterilmiştir. Motorların ana tasarım parametreleri şu şekildedir: Dış çapı 180 mm, paket boyu 75 mm, hız 3000 d/d, güç 5 kW, bariyer sayısı 4, kutup sayıları 4 – 6 – 8. SEY sonuçlarında da teorik hesaplamalar ile aynı doğrultuda kutup sayısı arttıkça tork değerinin düştüğü görülmüştür. 4,6 ve 8 kutuplu modellerin tork değerleri sırasıyla 69.2 Nm – 60.4 Nm – 50.1 Nm elde edilmiştir. Aynı şekilde en yüksek endüktans farkı da en küçük kutup sayılı modeldedir ve en uygun seçeneğin bu olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.19. SRM'nin farklı kutup ve oluk sayılı tasarımları a) 4 kutup/24 oluk b) 6 kutup/36 oluk c) 8 kutup/48 oluk (Lujun ve ark., 2021)

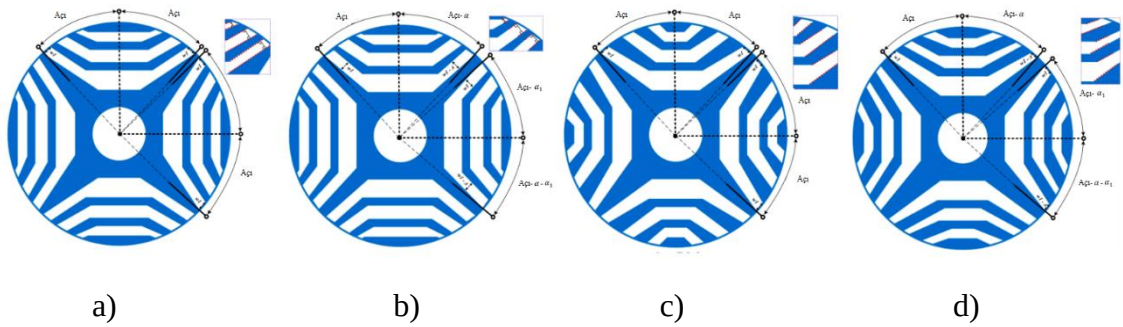
Degano ve ark., 2021 yılında yayınladıkları "Ev Aletleri için SM-SRM'lerin Optimize Edilmiş Tasarımı" isimli eserde düşük maliyetli, yüksek verimli ev aletleri, özellikle de çamaşır makinesi motoru için SM-SRM'nin tasarımı, optimizasyonu ve kontrolüne

odaklanmışlardır. Motorun tasarımı ve optimizasyonu ile, üretilen tork ve güç faktörünü en üst düzeye çıkarmayı, tork salınımlarını ve kayıpları en aza indirmeyi ve böylece verimliliği artırmak amaçlanmıştır. Bu eserdeki motorun tasarım parametrelerinden bazıları şunlardır: Kutup sayısı 4, stator oluk sayısı 24, hava aralığı 0.35 mm, stator dış çapı 102 mm, rotor dış çapı 59.4 mm, paket boyu 48 mm. Tasarım ve optimizasyon için istenilen özellikler ise şunlardır: Güç 600 W, faz akımı 3.5 A, hız 5200 d/d, tork 1 Nm üzeri ve tork dalgalanması % 15 altı. Optimize edilmiş makinenin prototipi üzerinde, önerilen tasarımın bir doğrulaması olarak SEY sonuçlarını ve deneysel ölçümleri karşılaştırmışlardır. Tork kapasitesi tasarım gereksinimlerini karşılamıştır ve geçici aşırı yükleme işlemlerine izin vermek için nominal tork değerini % 30 oranında aşabildiği gösterilmiştir. Aynı boyutlara sahip geleneksel ASM'lere kıyasla mükemmel bir verimlilik elde etmişlerdir, bu da SM-SRM'in beyaz eşyalarda kullanımı için onu iyi bir aday haline getirmiştir. Ayrıca, tork dalgalanması ölçümleri SEY sonuçlarında % 9.1, deneysel sonuçlarında % 10.2 ile önerilen çözümün optimizasyon tasarım hedeflerini karşıladığını doğrulamıştır. Bu çalışmanın sonucunda, SM-SRM sürücülerinin beyaz eşya sektörü için uygun bir aday olduğunu ve önerilen tasarımın en son teknoloji çözümlere göre performans ve verimlilik sınıfını artırabildiğini göstermişlerdir.

Kim ve ark. (2021), yapmış oldukları makalede, uç plaka etkisini göz önünde bulundurarak SRM'lerin 2 boyutlu bir analizini sunmuşlardır. LE rotora sahip bir elektrikli motorda, motorun yapısal sağlamlığını desteklemek için genellikle rotor çekirdeğine bir uç plaka takıldığını belirtmişlerdir. Uç plakalar bazen elektrikli motorun manyetik davranışını değiştiren karbon çeliği içermektedir. Bu nedenle, 3 boyutlu SEY kullanılan bir elektrikli motor, kapsamlı manyetik akı yolunu dikkate alacak şekilde tasarlanmalıdır. Bununla birlikte, tüm tasarım süreci için 3 boyutlu SEY'in uygulanması, hesaplama açısından maliyetlidir. Bu nedenle, SRM'ler için uç plakanın ek manyetik yolunu dikkate alabilen 2 boyutlu SEY tabanlı bir tasarım stratejisi önermişlerdir. Önerilen analiz yöntemi, manyetik eşdeğer devre analizine ve d- ve q-ekseni akı bağlantısı hesaplamasına dayalı olarak geliştirilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliği, bir SRM'nin gerçek tasarım durumu sunularak ve deneysel bir çalışma ile doğrulanmıştır. Bu makalede tasarlanan motor özellikleri şu şekildedir: 3 fazlı, 4 kutuplu, 72 oluklu, dış çapı 432 mm, paket boyu 300 mm, gücü 75 kW, hızı 1800 d/d ve torku 398 Nm. Bu

eserde önerilen strateji şu şekilde özetlenebilir: 1) d- ve q-ekseni akı bağlantıları, uç plaka etkisi ihmal edilerek 2-D SEY aracılığıyla analiz edilir; 2) Hedef makinenin ve uç plakaların geometrisine dayalı olarak bir q-ekseni manyetik eşdeğer devresi (MEC) oluşturulur; 3) MEC modeline dayalı ilgili katsayı türetilir; 4) Güncellenen akı bağlantısı önerilen formüller kullanılarak hesaplanır; 5) Hedef makine, yeni akı bağlantısına ve 4'te elde edilen açısına dayalı olarak 2-D SEY aracılığıyla analiz edilir; 6) q-ekseni akı bağlantısı ve motor performansı, 5)'te elde edilen sonuçlara göre hesaplanır.

Liu ve ark. (2021), yayınladıkları eserde SM malzemelerine ihtiyaç olmadığından ve rotorunda sadece silikon çelik sac gerektiğinden, SRM birçok uygulama için kullanılabilir ve araştırmalar için ilgi çektiğini belirtmişlerdir. SRM'ler için tork dalgalanmasının büyük bir sorun olduğu ve bunu azaltmak çalışmalar yapılabileceğini belirtmişlerdir. Bu yazıda, SRM rotorundaki asimetrik manyetik akı bariyerleri, her katmanın açısı ve genişliği ve manyetik bariyerin her bir tarafı dahil olmak üzere kapsamlı bir şekilde incelenmişlerdir. Daha sonra simetrik ve paralel manyetik akı bariyerli SRMa, asimetrik ve paralel manyetik akı bariyerli SRMb, simetrik ve paralel olmayan manyetik akı bariyerli SRMc, asimetrik ve paralel olmayan manyetik akı bariyerli SRMd olmak üzere dört farklı SRM topolojisi isimlendirilmiş, tasarlanmış, optimize edilmiş ve Şekil 2.20'de gösterildiği üzere karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.20. a) Simetrik ve paralel manyetik akı bariyerli SRM a b) Asimetrik ve paralel manyetik akı bariyerli SRM b c) Simetrik ve paralel olmayan manyetik akı bariyerli SRM c d) Asimetrik ve paralel olmayan manyetik akı bariyerli SRM d (Liu ve ark., 2021)

Yapılan manyetik analiz sonuçlarına göre SRM a'nın ortalama tork ve tork dalgalanması değerleri 23.87 Nm ve $\% 3.66$, SRM b'nin 23.43 Nm ve $\% 1.57$, SRM c'nin 22.37 Nm ve $\% 13.39$, SRM d'nin 23.33 Nm ve $\% 9.19$ olduğu görülmektedir. Aynı stator tasarımı kısıtlaması ve 18 A/mm^2 maksimum akım yoğunluğu ile SRM a ve SRM b'nin ortalama

torku maksimuma çıkaran, tork dalgalanmasını en aza indiren tasarım optimizasyonu yapmışlardır. SRM b'nin çok daha düşük tork dalgalanmasına sahip olduğu ancak yalnızca % 1.7 ortalama tork azaltıldığını göstermişlerdir. Bu nedenle, SRM tasarımı için asimetrik fakat paralel manyetik bariyer iyi bir aday olarak seçilmiştir. Ve manyetik akı bariyerlerinin asimetrik tasarım ilkeleri şu şekilde özetlenmiştir: saat yönüne yakın manyetik akı bariyerinin açısı, saat yönünün tersine yakın olandan daha yüksek olmalıdır, birinci katman ile ikinci katman arasındaki açı farkı, daha yüksek olmalıdır. ikinci katman ve üçüncü katman arasında, manyetik akı bariyerinin genişliğinin simetrik olması da önemli bir rol oynamıştır. Ayrıca performans iyileştirmesi için stator dişlerinin bir kısmının yerini alan tane yönelimli silikon çelikler içeren SRM b G olarak isimlendirilmiş model önerilmiş ve ortalama tork, verim ve güç faktörünün iyileştirildiği göstermişlerdir.

Orlova ve ark. (2021), yaptıkları araştırmada, EL anizotropiye sahip SRM'nin optimal rotor tasarımının matematiksel olarak kanıtlanmış çözümünü veren optimizasyon tekniği sunmuşlardır. Mevcut çalışma, yerel polinom yaklaşımları biçiminde metamodeller kullanarak rotorun şekil optimizasyonu için kaynak tasarrufu sağlayan bir teknik önermişlerdir. Optimal tasarım sonuçları, önerilen şekil optimizasyon yöntemine dayalı olarak elde edilmiş, SEY analizi ve fiziksel deneylerle doğrulamışlardır. Çalışmalarda motor statoru olarak 1.1 kW ASM statoru kullanmışlardır. Yapılan optimizasyon çalışmalarında beş adet değişken tanımlanmıştır ve bazı aralıklar belirlenmiştir. Bunlar rotor dış çapı ($45.25 \text{ mm} < R < 46.05 \text{ mm}$), radyal köprü ($1 \text{ mm} < r_1 < 3 \text{ mm}$), teğetsel köprü ($1 \text{ mm} < r_2 < 3 \text{ mm}$), yalıtım oranı ($0.2 < K_w < 1.2$), bariyer sayısı ($1 < b < 5$). Motorun stator tasarım parametreleri ise şu şekildedir: oluk sayısı 36, dış çap 139 mm, iç çap 91.2 mm, paket boyu 110 mm, sarım sayısı 47, paralel kol sayısı 2, adım sayısı 1-8, dolgu faktörü % 69.87 ve iletken çapı 0.56 mm. Yapılan optimizasyon sonucunda hava aralığı 0.2 mm, radyal köprü 1 mm, teğetsel köprü 1 mm, yalıtım oranı 1 ve bariyer sayısı 4 olarak hesaplanmıştır. Tork dalgalanmasını büyük ölçüde azaltmak için SRM rotorunun bir oluk aralığı kadar eğrilmesi gerekli olduğunu ve bunun ortalama tork üzerinde çok az etkisi olduğunu vurgulamışlardır. Sonuçlardan görüldüğü üzere, bir stator oluk aralığına eşit olan 4 derecelik SRM rotor kaydırılması, tork dalgalanmasını % 53'ten % 7'ye düşmesini sağlamıştır, ancak tork yaklaşık % 20 oranında azalmıştır. Alınan deneysel veriler, sayısal deney verileriyle eşleştirilmiş böylece SRM tasarımının

analizi ve optimizasyonu için seçilen optimizasyon yöntemi doğrulanmıştır. Deneyler sırasında SRM'nin ana enerji özellikleri belirlenmiştir. Motor kontrolü, açık çevrim vektör kontrolü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüksüz ve yüklü test sonuçları verilmiştir. SRM'nin akım-tork ve akım-verimlilik grafiklerine yer vermişlerdir. Maksimum verim (% 89), 1500 d/d nominal hızda, 7.5 Nm'ye eşit torkta elde edilmiştir.

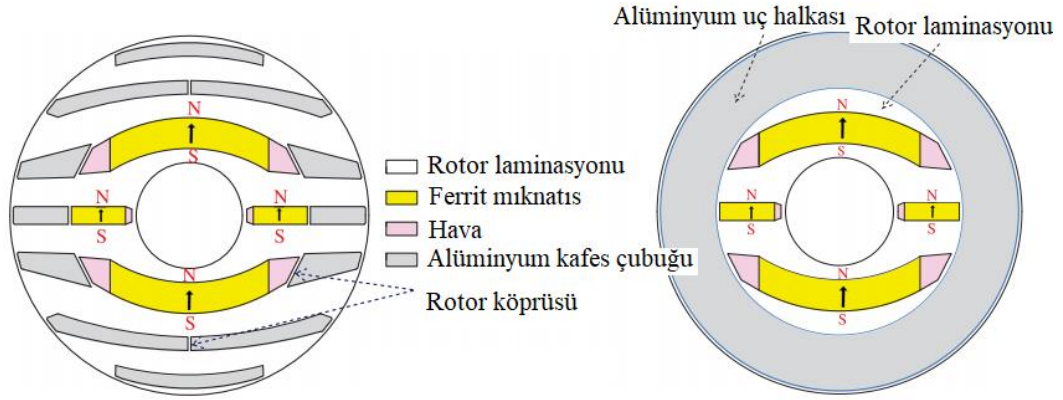
Jurca ve ark. (2021), yayınladıkları makelede, ilk kez inşa edilmiş ve test edilmiş bir yapı olan arızaya dayanıklı modüler dış rotorlu senkron relüktans motorun (OR-SRM) deneysel doğrulaması ile otomatik bir tasarım prosedürü sunmuşlardır. Makalenin temel amacı, tekerlek tahrikinde uygun hata toleranslı yeteneklere sahip yeni bir SRM rotor topolojisi geliştirmektir. Üç farklı rotor tipi karşılaştırılmış (Klasik tip, modüler tip ve segmentel tip) ve her topoloji için binlerce simülasyon çalıştırılmıştır. Modüler yapıda rotorlu iki yeni topoloji, rotorun her bir kutbu ayrı bir modül olarak kabul edilebilir ve bir modülün her bir bariyer köprüsünün bağımsız olarak değerlendirilebileceği segmentli bir topoloji, klasik bir yapı ile karşılaştırmışlardır. Elektromanyetik analizi, FLUX 2D yazılımı kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. İncelenen ana parametreler elektromanyetik tork, tork dalgalanma içeriği, belirginlik oranı ve güç faktörüdür. Makinenin güç faktörünü optimize etmek için, bir MATLAB ve FLUX 2D kuplaj kullanılarak her yapı için bir eş-simülasyon prosedürü gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen performanslara göre en iyi topoloji seçmişlerdir. Ayrıca, önerilen yeni rotorun nominal hızda yapısal bütünlüğü karşılayıp karşılamadığını belirlemek ve rotorun yapısal arızasını önleyecek şekilde ulaşılabilir maksimum hız değerini belirlemek için mekanik bir analiz yapmışlardır. Elektromanyetik analize dayanarak, modüler rotorlu yapının, segmental yapıya kıyasla en yüksek gelişmiş tork ve yapıdaki basitlik nedeniyle genel olarak en iyi aday olduğunu göstermişlerdir. Akı bariyerli dış rotor modüler yapısı, senkron relüktans motorunun mekanik performanslarını sınırladığını belirtmişlerdir. Dış rotor için çekme gerilimi dağılımının doğru bir simülasyonu, sayısal analiz kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. 500 d/d yüksüz hızda, rotor parçalarında endüklenen maksimum çekme gerilimi, malzemenin mukavemetinden çok daha düşüktür. Malzemenin mukavemetinin % 15'lik güvenli bir marjı dikkate alındığında, dış rotorun mevcut konfigürasyonu 2900 d/d 'ya kadar maksimum hıza izin verdiğini belirtmişlerdir. Yeni

OR-SRM'nin modüler rotor konfigürasyonu üretilmiş ve simülasyon sonuçları ile performansı karşılaştırmışlardır. Klasik yapı, en düşük ortalama tork değeri 6.96 Nm iken, en yüksek elektromanyetik tork, 9.04 Nm ile modüler rotor tarafından geliştirilmiştir. Ortada 8.44 Nm ile segmentli yapı bulunmaktadır. En düşük tork dalgalanma içeriği, klasik rotor tasarımı için % 14.75 iken, modüler rotor % 20'lik bir tork dalgalanma içeriği sergilemiştir ve segmentli rotor, % 19.66'lık bir tork dalgalanma içeriğine sahiptir. OR-SRM prototipi için geliştirilen tork, sayısal analizden elde edilenden % 6 daha düşük olan 8.5 Nm çıkmıştır. Önerilen motor gelecekteki çalışmalarda yeni bir topoloji olduğundan, tork dalgalanma içeriğini azaltmak ve makinenin güç faktörünü artırmak için akı bariyerinin şeklinin optimizasyonu ile daha fazla hassasiyet analizi yapılabileceğini belirtmişlerdir. Nadir toprak mıknatısları olmayan bu motorun sağlam yapısı, rotorun sabit ve arızaya dayanıklı özellikleri açısından onu tekerlek içi tahrik için çekici bir çözüm haline getirdiğini vurgulamışlardır.

Lu ve ark., 2021 yılında yayınladıkları "Farklı Rotor Topolojilerine sahip SM-SRM'nin Titreşim Davranışlarının Karşılaştırmalı Çalışması" isimli çalışmalarında, rotor topolojilerinin SM-SRM'ler titreşim özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu makale SM-SRM'lerin elektromanyetik kuvvet ve titreşim performansını, akı bariyerinin şeklinin ve "rotor sanal olukları" etkisi de dahil olmak üzere farklı rotor topolojileriyle araştırmış ve karşılaştırmışlardır. Elektromanyetik kuvvet analitik yöntemle araştırılmış ve düşük titreşim elde etmek için stator olukları ve "rotor sanal yuvaları" kombinasyonları için bir kılavuz verilmiştir. Rotor bariyer tipleri olarak değişken yapı, dairesel ve köşeli modeller karşılaştırılmıştır. Bunların farklı frekanslardaki ($1 \text{ kHz} - 5 \text{ kHz}$) elektromanyetik kuvvetleri ve titreşim ivmelenmeleri karşılaştırılmıştır. En uygun model olarak köşeli tip akı bariyeri seçilmiştir. Stator oluk sayısı ve rotor oluk sayısı arasındaki matematiksel ilişki dikkate alınarak uygun sayılı eşleştirme ile düşük gürültülü ve titreşim elde etmişlerdir ($n_r = 16$). Ayrıca teğetsel köprü değişiminin etkisini de incelemişlerdir. Akı bariyerlerinin ucundan rotor yüzeyine kadar olan genişlik, teğetsel köprü genişliği olarak isimlendirilmiştir ve tork kabiliyeti ve mekanik stres üzerinde büyük etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bir stator dişi üzerindeki toplam kuvvet ve teğetsel köprü kalınlığının 0.5'ten 1.2 mm 'ye artmasıyla ivmelenme göstermişlerdir. Teğetsel köprü kalınlığı arttıkça kaçak akı arttığı için

ortalama kuvvetin azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, bazı düşük frekanslı kuvvet harmonikleri azalırken, bazı yüksek frekanslı kuvvet harmonikleri, teğetsel köprü kalınlığı 0.5'ten 1.2 mm'ye yükseldiğinde artar. Bu nedenle titreşim, radyal kuvvetle aynı eğilime sahiptir. Ayrıca, teğetsel köprü kalınlığı ve kaçak akı artışı nedeniyle SM-SRM'lerin çıkış torku 10.1 Nm'den 9.2'ye düştüğü gözlenmiştir. Bu nedenle, teğet köprü tasarımının ana düşüncesi çıkış torku ve mekanik stres konuları ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir.

Baka ve ark., 2021 yılında "Su Pompaları için Enerji Verimli ŞK İki Kutuplu SM-SRM'nin Tasarımı" isimli makale yayınlamışlardır. Sulama uygulamalarında kullanılan elektrik motorları, dünya çapındaki enerji talebinin büyük bir kısmına katkıda bulunmaktadır. Bu uygulamalarda genellikle ŞK-ASM'ler kullanıldığını ancak, SM motorlara kıyasla nispeten verimsiz olduklarını belirtmişlerdir. Öte yandan, SM motorlar, ASM'lere kıyasla yüksek başlangıç maliyetine sahiptir. Bu nedenle mıknatıssız SRM ve SM-SRM gibi makineler tercih edilmektedir. SRM, ASM'ye kıyasla zayıf güç faktörüne sahiptir ve bu nedenle SM-SRM'ler popüler hale gelmekte olduğunu belirtmişlerdir. Bu makalede, bir sondaj kuyusu dalgıç su pompası için 2 kutuplu çok bariyerli ŞK SM-SRM önermişlerdir. Önerilen motorun göze çarpan özellikleri şu şekildedir; Önerilen SM destekli ŞK-SRM'deki rotor kafesi, rotor akı bariyerlerinin relüktans yoluna gömülüdür. Bu, çalıştırma için ayrı kafes yuvalarına olan ihtiyacı ortadan kaldırmıştır. Böylece, önerilen rotor geometrisi, rotor köprüsü sayısını azaltarak, çıkıntı oranını ve güç faktörünü iyileştirmiştir. Ani akımlar nedeniyle mıknatısları demanyetizasyona karşı korumak için iki kutuplu ŞK SM-SRM için yeni bir rotor uç halkası tasarımı önerilmişlerdir. Önerilen uç halka, rotor dış yüzeyine yakın bir yerde d ekseni kafesini kısmen çevreler. Bu tasarım, mıknatısların d eksenine de yerleştirilmesini sağlamıştır. Optimum akı bariyeri sayısı ve genişlikleri, akı bariyerlerinin sayısı ikiden-dörde ve bariyer genişlikleri 2 mm'den 5.5 mm'ye değiştirilerek çalışılmıştır. Bu analizde belirli bir rotor geometrisi için tüm akı bariyerlerinin genişliği aynı tutulmuştur. Üç akı bariyerli rotor için çıkıntı oranının en yüksek olduğu gözlenmiştir. Bariyer genişliğinin optimal değeri 4 mm olarak bulunmuştur. Bu nedenle, akı bariyerlerinin sayısı, her biri 4 mm genişliğinde üç bariyer olacak şekilde seçmişlerdir. Önerilen motorun rotoru ve alüminyum uç halkası Şekil 2.21'de gösterilmiştir.



Şekil 2.21. a) ŞK SM-SRM rotor kesiti b) ŞK SM-SRM uç halkası (Baka ve ark., 2021)

Seçilen motorun rotor bariyerlerine 15 adet değişken ile optimizasyon yapmışlardır. Optimize edilmiş modelin nominal yükte yüzde tork dalgalanmasının % 45.9'dan % 29.1'e düştüğü gözlemlenmiştir. Kullanılan mıknatıslar üzerine demanyetizasyon analizi de yapmışlardır. Dikdörtgen mıknatıslara kıyasla kavisli mıknatıslarının demanyetizasyona daha yatkın olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, geçici durum sırasında her iki mıknatısta demanyetize olmadığını gözlemlenmiştir. Ayrıca, rotorun çeşitli kısımlarındaki gerilimler, 2-D SEY stres analizi kullanılarak değerlendirmişlerdir. Deneysel sonuçlardan, 2 kutuplu mıknatıs destekli bir SRM'nin tam yük güç faktörü ve veriminin önerilen rotor geometrisi ile sırasıyla 0.83 ve % 90.1 olduğunu göstermişlerdir.

Murataliyev ve ark. (2021), yayınladıkları eserde, doğru ancak hızlı bir analitik modele dayalı olarak SRM'lerin boyutlandırılması ve tasarımı için gelişmiş bir metodoloji önermişlerdir. Çalışma, önerilen boyutlandırma yönteminin doğruluğunu göstermiştir. Bu, daha sonra bir hava boşluğu fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak ince ayar yapılan ön boyutlandırmadaki çıkıntı oranı dikkate alınarak elde etmişlerdir. SRM motor boyutlandırmaları için hem EL edilmiş hem de LE rotor topolojisine uygun yöntem algoritması sunmuşlardır. Bununla birlikte, önerilen metodolojinin basit çıkıntılı kutuplu rotor yapıları için de benimsenebileceği anlaşılmaktadır. Model, tasarlanan ve test edilen 15.9 kW'lık bir SRM'deki deneysel sonuçların yanı sıra SEY simülasyon setleri kullanılarak doğrulamışlardır. Analitik, SEY ve deneysel durumda elde edilen tork değerleri, 5 farklı akım açısında karşılaştırılmıştır (45° , 50.7° , 58.2° , 65° , 71°). En yüksek tork değeri tüm durumlar için 58.2° açısında çıkmıştır. Deneysel sonuçlar teorik tahminle uyumlu çıkmıştır ve geniş bir akım aralığı boyunca ortalama torkun analitik

tahmini hızlı ve doğrudur. Anma akımında, analitik değerin hatası yaklaşık % 2.75 çıkmıştır. Bu çalışmanın, araştırma ve endüstri topluluğu tarafından benimsenebilecek relüktans makinelerinin ön boyutlandırması için hızlı ve doğru bir yöntem tanımladığı sonucuna varılabildiğini belirtmişlerdir.

2.2. Eksenel Akıllı Senkron Relüktans Motorlar (EA-SRM)

Son zamanlarda birçok uygulamada kullanılan AA motorlar arasında, RA-SRM, rotorunda kafes bulunmadığı için bakır kaybı olmaması, yüksek verimi, sağlam yapıları, yüksek tork yoğunluğu ile öne çıkmaktadır. Elektrik motorlarındaki yüksek verim IE4 sınıfına giren bu tasarımlar, sanayide en çok kullanılan ASM'lerin yerine almaya aday haline gelmiştir (Gürdal, 2001; Boldea ve Nasar, 2010; Shi ve ark.,2011; Sawhney, 2016; Gundogdu ve ark., 2017; Aghazadeh ve ark., 2019; Joksimović ve ark., 2020;).

Rotor kayıplarından arındırılmış RA-SRM ler için yeni bir yaklaşım olan EA-SRM'ler (disk tipi motorlar), örnek olarak otomotiv alanındaki boyut sıkıntısı yaşanan uygulamalarda (fan v.b. içerdiğinde büyük boyutlu), kompakt yapısı ve yüksek güç/tork yoğunluğu ile RA motorların karşısında alternatif olarak yer almaktadır (Moghaddam, 2007; Ibrahim ve ark., 2016). RA-SRM ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen EA-SRM çalışmaları çok az sayıdadır.

Pop ve ark., (2018) yayınladıkları bildiri de yeni bir konsept olan EA tasarımlardan SRM topolojisini incelemişlerdir. Referans olarak RA SM-SRM modellenmiş ve SEY ile elektromanyetik davranışı değerlendirilmiştir. Sonraki aşamada RA mıknatıssız SRM tasarlanmıştır. Bundan sonraki aşamada ise bu eser için önerilen EA-SRM, RA hem mıknatıslı hem de mıknatıssız SRM ile karşılaştırılmıştır. EA-SRM'lerde dağıtılmış sargıların kullanılması daha üstün olmasına rağmen, referans motorlarda bölünmüş oluklarda konsantre sargılar kullanılmıştır. Sonuçlar 3D SEY ile hesaplanmış, yüksek tork dalgalanması ve q-ekseni endüktansı gibi durumlar belirtilmiştir. Motor üretilebilirliği ile ilgili düşünceler ve problemler tartışılmıştır.

Akiki ve ark., (2018) yaptıkları çalışmada 18 kutup/16 oluklu, örtüşmeyen konsantre sargılı SM-EA-SRM sunulmuştur. İlk olarak tork dalgalanması ve demir kayıpları 3D SEY ile analiz edilmiştir. Sonra 2D ve 3D analizleri akı ve demir kayıpları açısından karşılaştırılmıştır. Eserde düşük hızlardaki uygulamalarda kullanmak için yüksek torka

sahip motor önerilmiştir ve RA motorlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak EA motor daha yüksek tork yoğunluğuna sahiptir. Fakat üretim süreçleri, termal ve mekanik modellerinde çalışılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Bin Tarek ve Sozer (2019), sundukları bildiride yüksek güç ve tork yoğunluğu, kolay imalatı sayesinde eksenel akı sabit mıknatıslı motorların farklı uygulamalarda kullanıldığını belirtmişlerdir. SM-EA-SRM'ler mıknatıslar ile ilave tork sağlaması ile yüksek torka sahiptir. Tork dalgalanmasını azaltıp tork değerini optimize eden Taguchi metodu kullanılmıştır. Elektromanyetik ve akı zayıflatma performansları eksenel akı dahili mıknatıslı motor (EA-IPM) ile karşılaştırılmıştır. SM-EA-SRM'ler yüksek çıkıntı oranı ve hız aralığı sağlamıştır. Çalışma sonucunda SM-EA-SRM'ler daha iyi bir performansla potansiyel olarak uygun maliyetlidir.

Mahmoudi ve ark., 2020 yılında yayınladıkları “EA-SRM’ler: Yeni Bir Makinenin Tanıtımı” isimli eserde, yeni bir eksenel akı senkron relüktans motorunun (EA-SRM) tasarımını ve analizini sunmuşlardır. Önerilen eksenel akı makine için bir MEC modeli üretmişlerdir ve üretiminin uygulanabilirliğini tartışmışlardır. Önerilen motor tasarımının performansını tahmin etmek için sonlu elemanlar analizi uygulanmıştır. Bu makale, önerilen EA-SRM tasarımının performansını benzer bir RA motorla karşılaştırarak bir temel çalışma sağlamıştır. Motorlar benzer hacme sahip olacak şekilde tasarlanmıştır ve her ikisinin de üç rotor bariyeri vardır. Çalışma parametreleri statik ve dinamik SEY ile elde edilmiştir. Motorların gücü, torku, güç faktörü ve verimliliği incelenmiştir. Motor yapılarıdaki doyum ve akı dağılımı araştırılmıştır. EA-SRM’ler için bir tasarım süreci tanıtılmışlardır. İlk olarak boyutlandırma ve boyut hesaplamaları, ikinci olarak motorun manyetik eşdeğer devresinden performans tahmini ve son olarak SEY simülasyonları kullanılarak mıknatıslama endüktansının doyum etkisinin düzeltilmesi ve dikkate alınması olmak üzere üç ana adımı içermiştir. Biri dört, diğeri sekiz kutuplu olan iki eksenel akı SRM, 2D ve 3D SEY modelleri kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Benzer hacme sahip 2 ve 4 kutuplu motorlar arasında karşılaştırmalı bir çalışma yürütülmektedir. Kutup sayısının EA-SRM’lerin tork üretme kapasitesi üzerindeki etkisini gösterilmiştir. Dört kutuplu RA-SRM ile karşılaştırıldığında, dört kutuplu EA-SRM daha küçük bir tork değeri üretir. Buna karşılık, dört kutuplu eksenel akı makine, tüm vaka çalışmaları arasında en yüksek torku üretir. Kutup sayısının

artmasının EA-SRM'lerin tork üretme kapasitesini arttırdığı sonucuna varılmıştır. Ancak hem RA hem de EA makinelerde kutup sayısı arttıkça güç faktörü azalmaktadır. 4 kutuplu EA-SRM, diğer durumlardaki çalışmalara kıyasla en yüksek güç faktörünü sunmuştur. Her durum için çekirdek kayıpları ve bakır kayıpları rapor edilmiştir. Çekirdek kaybı, makinenin hacmine ve akı yoğunluğuna bağlıdır. Aynı hacimde, EA-SRM'lerin daha düşük çekirdek kaybı, çekirdeğin daha yüksek akım seviyelerinde doymuş olduğunu göstermiştir. EA-SRM'lerin bu özellikleri, aşırı yük durumunda daha iyi çalışma potansiyeli sağladığı belirtilmiştir. EA-SRM'lerin daha düşük bakır kayıpları daha yüksek verimlilikleriyle sonuçlanmıştır. Sabit gerilimli çalışmalarda torkun güç açısı ile karşılaştırılması, maksimum tork kapasitesini karşılaştırmak için hesaplanmıştır. EA'lı 4 kutuplu makine en yüksek torku üretmiştir. Tork dalgalanması bir diğer önemli faktördür. Analizlerdeki 4 adet SRM'nin tork dalgalanmalarının genellikle kutup sayısının artışı ile azaldığı gösterilmiştir. d- ve q-ekseni akıları, ilgili ve q-ekseni akımlarına karşı gösterilmiştir. Her bir şekildeki akıları hesaplamak için her tasarımın anma akımının iki katı kabul edilmiştir. Sonuçlara göre, EA-SRM'lerin d-ekseni akıları, her tipte (2 kutuplu ve 4 kutuplu) RA-SRM'lerin d-ekseni akısından daha küçüktür. EA-SRM'nin d-eksenindeki düşük akı, aşırı yük durumunu tolere etme yeteneklerini göstermiştir. Aslında aşırı yükleme işleminde çekirdeğin doyma riskini azalttığı belirtilmiştir. Simülasyonlar, motorların ilk aşama tasarımı için kullanılabilecek 2B yaklaşımın kabul edilebilir bir doğruluğunu göstermiştir. Motorlar, kabul edilebilir tork yoğunluklarıyla birlikte yüksek verimlilik (% 91 ila % 94) sergilemiştir.

Gerçekcioğlu ve Akar (2021), yapmış oldukları çalışmada daha önce çalışılmamış $2.2\text{ kW} - 1500\text{ d/d} - 8\text{ kutuplu}$ EA-SRM prototipi tasarlamış ve ürettirmişlerdir. Bu çalışmada öne çıkan ve özgün kısım olan rotor tasarımı üzerine odaklanmıştır. Rotor geometrisi tasarımı için 2 farklı bariyer tipi, 3 farklı yalıtım oranı ve çoklu bariyer sayısı olmak üzere toplam 24 adet model analitik olarak hesaplanmış ve 3D SEY ile tasarlanmıştır. Bariyer sayısı arttıkça ve yalıtım oranı düştükçe tork, güç faktörü ve çıkıntı oranının arttığı, tork dalgalanmasının azaldığı gözlenmiştir. Sonuç olarak optimum sonuçları veren 4 bariyerli, 0.6 yalıtım oranında ve bariyer köşeleri açısız olarak yuvarlatılmış model seçilmiştir. Seçilen model tork dalgalanmasını düşürmek amaçlı optimizasyon analizine sokulmuştur. Rotor bariyerlerinin açılmasında üretim

kısıtlamalarından kaynaklı geri-besleme değerlendirilerek optimizasyon aralıkları yeniden belirlenmiş tekrar optimizasyon yapılmıştır. Modelin üretim sonrası testleri ile karşılaştırmak amaçlı parametrik analiz uygulanarak motor performansları değerlendirilmiştir. Üretilen prototip test sonuçları simülasyon ile karşılaştırıldığında, tam yükte yüzdesel sapma; tork için % 5.312, güç faktörü için % 4.47 ve verim için % 0.43 ile başarılı şekilde örtüşmüştür. Bu değerler üretimsel süreçler göz önüne alındığında motor performansını etkileyecek düzeyde değildir. Ayrıca deneysel çalışmada tork dalgalanması yüzdesel oranda % 5.25 daha düşük çıkmıştır. Sonuç olarak özgün yapıda tasarlanmış $2.2\text{ kW} - 1500\text{ d/dk} - 8\text{ kutuplu}$ EA-SRM prototipi, başarılı şekilde üretilmiş ve 60034-30-1:2014 IE4 Süper Premium verim sınıfına sahip olduğu belirtilmiştir.

Gerçekcioğlu ve Akar (2021), sunmuş oldukları eserde rotorunda çoklu sayıda bariyere sahip EA-SRM tasarımı yapılarak, aynı stator yapısı ve boyutlara sahip EA konseptindeki ASM ile performans karşılaştırması yapmak amaçlamışlardır. Eşit bir karşılaştırma olabilmesi için motor ölçüleri ve stator yapısı aynı seçilmiş, sadece rotor değişimi yapılmıştır. Tasarımların ön çalışmasında motor ölçüleri analitik olarak hesaplanmış ve 3D SEY ile modellenmiştir. EA-SRM performansını etkileyen en önemli faktör olan çıkıntı oranını optimal düzeye getirmek için GA tabanlı optimizasyon yapılmış ve rotor geometrisi değiştirilmiştir. Böylece karşılaştırma için uygun model oluşturulmuştur. Tork, verim, giriş gücü, güç faktörü, toplam kayıplar ve akım başına tork parametreleri analiz edilmiştir. Önerilen karşılaştırma metodu ile EA-SRM aynı güç değerindeki (2.2 kW) EA-ASM den daha yüksek verim, güç, amper başına tork ve daha düşük kayıplar elde edilmiştir. Karşılaştırmada dış çapı, iç çapı ve stator parametreleri aynı olup sadece rotor değişimi ile motor verimi oransal olarak % 8.53 artarak, IE3'ten IE4 standartlarına çıkarılmıştır. Tam yükte EA-SRM'de, EA-ASM'den % 23.2 fazla güç üretilmiştir. EA-SRM rotorunda sincap kafesi bulunmaması sebebiyle bakır kayıplarının olmaması ve mıknatıssız yapısıyla maliyet-bakım masraflarının düşüklüğü, yüksek verim ve tork istenilen uygulamalarda iyi bir alternatif olacağını belirtmişlerdir.

Çalışmanın bu bölümünde tez çalışmasına konu olan SRM ve EA-SRM'lerin tasarımı, optimizasyonu ve prototip üretimleri ile literatürde yer alan çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda ön plana çıkan rotor tasarımları ve topolojik özellikler ile ilgili detaylara yer verilmiştir. Araştırmalardan görüldüğü üzere EA-SRM ile ilgili çalışmaların kısıtlı sayıda ve gelişime açık olduğu görülmüştür. SRM ile ulusal tez merkezinde yayınlanan tüm tez çalışmaları da bu bölüm içinde incelenmiştir ve EA-SRM ile ilgili tez çalışmasının bulunmadığı gösterilmiştir. Belirlenen tasarım özellikleri materyal ve yöntem bölümünde detaylı olarak tartışılmıştır.



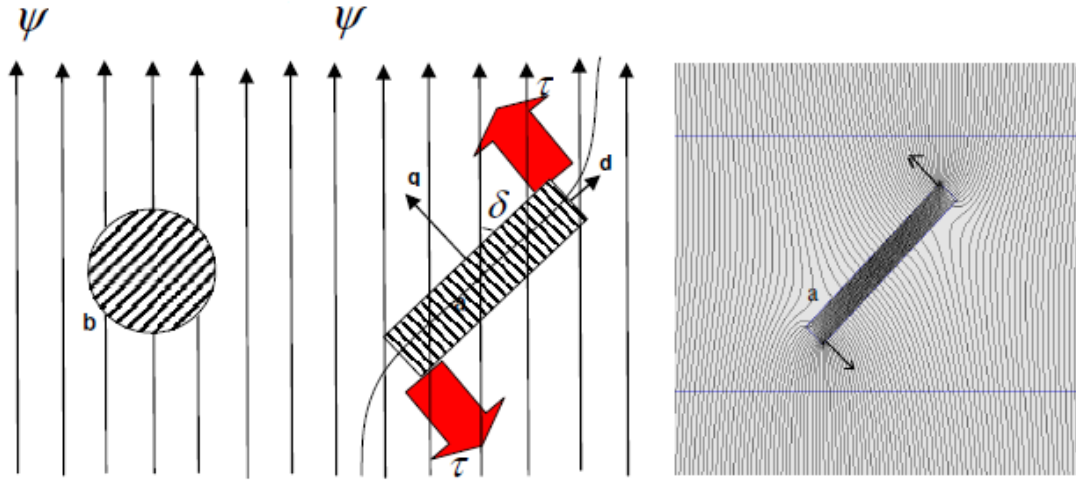
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde EA-SRM'nin geliştirilmesi sürecinde kullanılan materyaller, yöntem ve analizler ile ilgili detaylara yer verilmiştir. Öncelikle SRM çalışma karakteristikleri incelenmiş ve tasarım parametrelerine detaylıca yer verilmiştir. Daha sonra EA-SRM için boyutlandırma ve tasarım eşitlikleri incelenmiştir. Tez çalışmasında kullanılan yöntemlerden SEY ve GA ile ilgili açıklamalar ve incelemeler yapılmıştır. Sonraki bölümlerde ilgili yöntemler kullanılarak tasarlanan EA-SRM'nin SEY analizleri ve optimizasyonları üzerine detaylı çalışma yapılmış ve prototip üretim ve testlerinin yapılması ile ilgili detaylara ayrı ayrı bölümler ayrılarak incelenmiştir.

3.1. SRM Relüktans Konsepti

SRM, tork üretimi için relüktans konseptini ve geleneksel ASM statoru tarafından üretilen dönen sinüzoidal magnetomotor kuvvet (MMK) kullanır. Bu fikir Şekil 3.1 ile açıklanabilir. Bu şekilde, anizotropik manyetik malzemeye sahip (a) nesnesi d ekseninde ve q ekseninde farklı (geometrik) relüktansa sahipken, (b) nesnesindeki izotropik manyetik malzeme tüm yönlerde aynı relüktansa sahiptir (Moghaddam, 2007).

Anizotropik cisme (a) uygulanan bir manyetik alan (ψ), d eksenine ile alan arasında bir açı farkı varsa ($\varphi \neq 0$) tork üretilmektedir. (a) nesnesi d eksenine alanı ile hizalı değilse, ana alanda bir alan bozulması oluşturacağı açıktır. Bu bozulma, nesnenin q eksenine boyunca hizalanır. SRM'de manyetik alan, oluklu bir statorda sinüzoidal olarak dağıtılmış bir sargı tarafından üretilir ve stator ile rotoru, tam olarak geleneksel bir ASM'de olduğu gibi küçük bir hava aralığı aracılığıyla bağlanmıştır. Manyetik alanın senkron hızda döndüğü ve sinüzoidal bir dağılıma sahip olduğu varsayılabilir (Moghaddam, 2007).



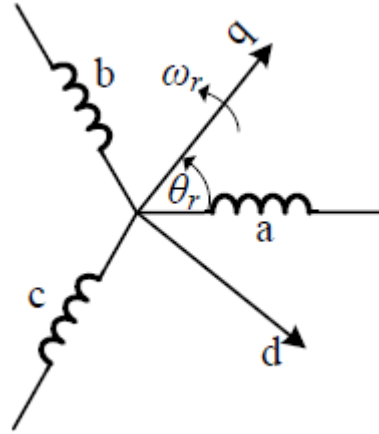
Şekil 3.1. SRM relüktans üretimi

Bu durumda ($\delta \rightarrow 0$), q eksenindeki bozulma alanını azaltarak tüm sistem potansiyel enerjisini azaltmak için hareket eden bir tork her zaman olacaktır. Yük açısı (δ) sabit tutulursa, elektromanyetik enerji sürekli olarak mekanik enerjiye dönüştürülür. Stator akımı hem mıknatıslanmadan (ana alan) hem de alan bozulmasını azaltmaya çalışan tork üretiminden sorumludur. Bu, senkron referans çerçevesinde stator sargısının akım vektörü ile rotor d eksenini (θ) arasındaki açı olan akım açısını kontrol ederek yapılabilir (Moghaddam, 2007).

3.2. SRM'nin Vektörel Gösterimi, Eşdeğer Devresi ve Temel Performans Özellikleri

SRM'nin stator sargısı sinüzoidal olarak dağıtıldığından, hava boşluğundaki akı harmonikleri sadece stator kaçak endüktansında ek bir terime katkıda bulunur. Bu nedenle SRM'nin davranışını tanımlayan denklemler, "Park" denklemleri olan geleneksel bir alan sargılı senkron makineyi betimleyen geleneksel denklemlerden türetilebilir. SRM'de uyarma (alan) sargısı mevcut değildir, ayrıca rotorunda kafes bulunmamaktadır. Uygun inverter kontrolü ile motor hareketsiz konumdan senkron olarak çalıştırılabilir.

Zamanın bir fonksiyonu olarak SRM endüktanslarının değişimini ortadan kaldırmak için, SRM modeli rotor referans çerçevesinde geleneksel "d-q" eksen dönüşümü ile temsil edilir. "abc" değişkenlerinin (gerilim, akım ve akı) ve "dq" bileşenlerinin şematik bir gösterimi Şekil 3.2'de gösterilmiştir (İbrahim, 2017).



Şekil 3.2. abc değişkenlerinin ve dq bileşenlerinin şematik gösterimi (İbrahim, 2017)

abc değişkenlerinin dq bileşenlerine dönüşümü şu şekilde elde edilebilir:

$$\begin{bmatrix} Y_q \\ Y_d \\ Y_d \end{bmatrix} = K_s \begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Burada “Y” değişkeni faz gerilimleri, akımlar ve akı bağlantıları olabilir. Dönüşüm matrisi K_s , hem Park hem de Clark dönüşümlerinin birleşik matrislerini temsil eder ve şu şekilde verilir:

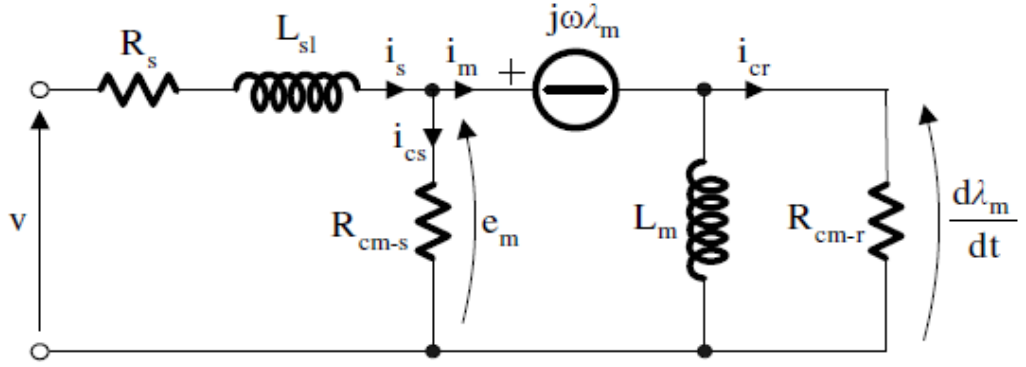
$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Bir SRM’nin dq eksenli gerilim denklemleri şu şekilde formüle edilebilir:

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + p\lambda_d(i_d, i_q, \theta_r) - \omega_r P\lambda_q(i_d, i_q, \theta_r) \\ v_q = R_s i_q + p\lambda_q(i_d, i_q, \theta_r) + \omega_r P\lambda_d(i_d, i_q, \theta_r) \end{cases} \quad (3.3)$$

Burada λ_d ve λ_q , dq-eksenleri kaçak akılarını ifade etmektedir (İbrahim, 2017).

Rotor ve stator demir kayıplarını içeren SRM’nin eşdeğer vektör devresi Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Rotor ve stator demir kayıplarını içeren SRM'nin eşdeğer devresi

Şekil 3.3'teki eşdeğer devre ve Şekil 3.4'te gösterilen vektör diyagramı yardımıyla, Park denklemlerinden hem alan hem de damper sargı denklemleri çıkarılarak, d-q eksenindeki (senkron referans çerçevesi) SRM vektör denklemleri yazılabilir (Moghaddam, 2007).

$$v = e_m + R_s i_s + j\omega L_{sl} i_s \quad (3.4)$$

$$e_m = \frac{d\lambda_m}{dt} + j\omega\lambda_m \quad (3.5)$$

$$v = v_d + jv_q \quad (3.6)$$

$$i_s = i_{sd} + ji_{sq} = i_m + i_{cs} \quad (3.7)$$

Eşitlik 3.4-3.7 de:

v : Motor terminal gerilim vektörü,

λ_m : Hava aralığı kaçak akısı,

L_{sl} : Toplam sargı kaçak endüktansı,

R_s : Sargı direnci,

i_s : Stator akım vektörü,

ω : Açısal hız,

e_m : Hava aralığı elektromotor gerilimi (stator sargısının iç gerilimi).

e_m 'nin kararlı durumdaki RMS değeri Eşitlik 3.8'den hesaplanabilir.

$$|E_m| = \sqrt{2}N_1\pi L D f \hat{B}_{\delta 1} = \sqrt{2} \left(\frac{n_s q k_{w1}}{C_s} \right) \pi L D f \hat{B}_{\delta 1} \quad (3.8)$$

Burada;

q : Faz-kutup başına stator oluk sayısı,

n_s : Stator oluk başına iletken sayısı,

C_s : Sargı bağlantı faktörü,

L : Motor paket boyu,

D : Hava aralığı çapı,

f : Kaynak frekansı,

k_{w1} : Sargı faktörü,

N_1 : faz-kutup başına eşdeğer sarım sayısı,

$\hat{B}_{\delta 1}$: Hava aralığı temel akı yoğunluğunun maksimum genliği.

$$\begin{aligned} e_m &= j\omega\lambda_m = j\omega(\lambda_{dm} + j\lambda_{qm}) = j\omega(L_{dm}(i_{dm})i_{dm} + jL_{qm}i_{qm}) = \\ &= -\omega L_{qm}i_{qm} + j\omega L_{dm}(i_{dm}) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Eşdeğer devredeki tüm demir kayıpları stator tarafına aktarılmış ve basitleştirmek için eşdeğer rotor demir kayıpları direnci R_{cm-r} dikkate alınmamıştır. Bu nedenle, mıknatıslanma akımına göre ($i_m = i_{dm} + ji_{qm}$), λ_m aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\begin{aligned} \lambda_m &= L_m i_m \cong \begin{bmatrix} L_{dm}(i_{dm}) & \sim 0 \\ \sim 0 & L_{qm} \end{bmatrix} i_m = \\ &= \lambda_{dm}(i_{dm}) + j\lambda_{qm}(i_{qm}) \cong \lambda_{dm}(i_{dm}) + jL_{qm}i_{qm} \end{aligned} \quad (3.10)$$

d-eksenindeki akı, akımın doğrusal bir fonksiyonu olarak kabul edilemez, ancak q ekseninde bu kabul edilebilir bir doğrulukla uygulanabilir. Genellikle bu varsayımları etkileyebilecek iki ana yan etki vardır: Birincisi d ve q eksenleri arasındaki çapraz bağlama etkisi ve ikincisi stator oluklarının etkisi. Bu nedenle genel akı denklemleri Eşitlik 3.11'deki gibi yazılabilir. Bu nedenle genel akı denklemleri Eşitlik 3.11'deki gibi

$$\begin{aligned}
IPF &= \cos(\varphi_i) = \sin \beta = \cos\left(\frac{\pi}{2} + \delta - \theta\right) = \\
&= \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{\frac{L_{dm}i_{dm} + i_{qm}}{L_{qm}i_{qm} + i_{dm}}}{\frac{L_{dm}}{L_{qm}} - 1}\right)\right) = \frac{(\xi - 1)}{\sqrt{\xi^2 \frac{1}{\sin^2 \theta} + \frac{1}{\cos^2 \theta}}} = \\
&= (\xi - 1) \sqrt{\frac{\sin(2\theta)}{2(\tan \theta + \xi^2 \cot \theta)}} \tag{3.12}
\end{aligned}$$

$$\xi = \left(\frac{L_{dm}(i_{dm})}{L_{qm}}\right) \tag{3.13}$$

Eşitlik 3.13'te çıkıntı oranı gösterilmiştir. Şekil 3.4'te görüldüğü üzere “ θ ” akım açısını ifade etmektedir. Dahili güç faktörü, makine çıkıntı oranına büyük ölçüde bağlıdır ve $\tan(\theta) = \sqrt{\xi}$ olduğunda maksimize edilmektedir. Maksimum IPF Eşitlik 3.14'e göre hesaplanabilmektedir.

$$IPF|_{max} = \cos(\varphi_i)|_{max} = \frac{\xi - 1}{\xi + 1} \tag{3.14}$$

Terminal güç faktörü Eşitlik 3.15'e göre hesaplanabilir.

$$PF = \cos(\varphi) = \frac{v_d i_{sd} + v_q i_{sq}}{|v||i_s|} \tag{3.15}$$

Eşitlik 3.8'den, statordaki toplam demir kayıpları eşdeğer direnci R_{cm} şu şekilde yazılabilir:

$$R_{cm} \cong \frac{3|E_m|^2}{P_{fe}^{tot}} \tag{3.16}$$

Demir kayıpları akımı aşağıdaki gibi olacaktır:

$$i_{cs} = \frac{e_m}{R_{cm}} \tag{3.17}$$

Demir, sürtünme ve kaçak kayıpları içeren elektromanyetik tork, Eşitlik 3.18'e göre hava aralığı akısı ve mıknatıslanma akımı ile hesaplanabilir (Moghaddam, 2007).

$$\begin{aligned}
T_{em-g} &= \frac{3p}{2} (\lambda_m i_m) = \frac{3p}{2} |\lambda_m| |i_m| \sin \beta = \\
&= \frac{3p}{2} (\lambda_{dm} i_{qm} - \lambda_{qm} i_{dm}) = \frac{3p}{2} (L_{dm}(i_{dm}) - L_{qm}) i_{dm} i_{qm} = \\
&= \frac{3p}{2} (L_{dm}(i_{dm}) - L_{qm}) i_m^2 \sin(2\theta)
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Eşitlik 3.18’de; I_m , stator mıknatıslanma akımı RMS değeridir. β , hava boşluğundaki akım ve akı arasındaki açıdır. p kutup sayısıdır. Şaft torku hesaplaması için Eşitlik 3.18’deki hava aralığı toplam torkundan, demir kayıpları, sürtünme ve kaçak kayıpları eşdeğer torku çıkarılmalıdır.

Bu denklem, makine torkunun belirli stator akımı için, endüktans farkına ($L_{dm} - L_{qm}$) yüksek bağımlılığını gösterir. Hava boşluğu arka EMK, e_m tork denkleminde dahil edilebilir. Arka EMK için Eşitlik 3.8 ve 3.9 kullanılarak Eşitlik 3.19’da gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
\lambda_{dm} &= \frac{e_{qm}}{\omega} = \frac{e_m \cos \delta}{\omega} = \frac{\sqrt{2} E_m \cos \delta}{\omega} \\
\lambda_{qm} &= \frac{(-e_{dm})}{\omega} = \frac{e_m \sin \delta}{\omega} = \frac{\sqrt{2} E_m \sin \delta}{\omega}
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Diğer yandan tork denklemini aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned}
T_{em-g} &= \frac{3p}{2} (L_{dm}(i_{dm}) - L_{qm}) i_{dm} i_{qm} = \\
&= \frac{3p}{2} \left(\frac{1}{L_{qm}} - \frac{1}{L_{dm}(i_{dm})} \right) (L_{dm}(i_{dm}) i_{dm}) (L_{qm} i_{qm}) = \\
&= \frac{3p}{2} \left(\frac{1}{L_{qm}} - \frac{1}{L_{dm}(i_{dm})} \right) (\lambda_{dm} \lambda_{qm}) = \\
&= \frac{3p}{2} \left(\frac{1}{L_{qm}} - \frac{1}{L_{dm}(i_{dm})} \right) \left(\frac{E_m}{\omega} \right)^2 \sin(2\delta) =
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Eşitlik 3.20’de gösterildiği üzere tork, belirli bir gerilim ve hız koşulu için torkun maksimize edildiğini gösterir $\left(\delta = \frac{\pi}{4} \right)$. Ayrıca bu denklemdaki kabul edilebilir bir tahminle endüktans terimi neredeyse sabittir çünkü nominal durumda, $(L_{dm} \gg L_{qm})$ ve q eksen endüktansı neredeyse sabittir. Eksenler arası akı açısı ilişkisi aşağıdaki gibi türetilir (Moghaddam, 2007).

$$\tan \delta = \frac{\lambda_{qm}}{\lambda_{dm}} = \frac{L_{qm}i_{qm}}{L_{dm}(i_{dm})i_{dm}} = \frac{1}{\xi} \tan \theta \quad (3.21)$$

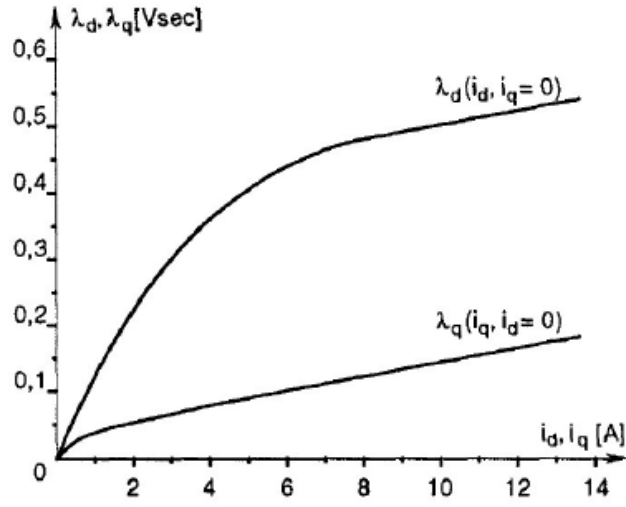
3.3. Mıknatıslanma Karakteristiği

Motorun ana mıknatıslanma akıları (λ_{dm} & λ_{qm}) karakteristikleri genel olarak Eşitlik 3.11'e göre ifade edilebilir. Bu raporda, mıknatıslanma endüktansları (L_{dm}, L_{qm}) dışındaki tüm makine endüktanslarının sabit yığılmış elemanlar olarak modellenebileceği varsayılmaktadır. d ve q eksenlerinde stator kaçak endüktansları eşit ve sabittir vs. doyum, kanal açma ve çapraz kuplajın bu elemanlar üzerindeki yan etkileri göz ardı edilmiştir. Bu nedenle Şekil 3.4'te görüldüğü üzere, SRM'deki doğrusal olmamasına sebep olan ana kaynakların (doygunluk, kanal açma ve çapraz bağlama) toplam stator terminal akısı ($\lambda = \lambda_d + j\lambda_q$) üzerindeki etkisi, sadece hava boşluğu akı bağlantısının, $\lambda_m = \lambda_{dm} + j\lambda_{qm}$ davranışı ile modellenabilir (Moghaddam, 2007).

3.3.1. Doyum

Eşitlik 3.18 ve 3.20, mıknatıslanma endüktanslarının tork ve güç faktörü üzerindeki doğrudan etkisini açıkça göstermektedir. Bu endüktanslar, hem d hem de q eksenini akı yollarında yüksek miktarda demir bulunması nedeniyle makine çekirdeğindeki demirin doyum seviyesinden oldukça etkilenir. Ancak q eksenini akısındaki doyum etkisi, yalıtım katmanları (bariyerler) aslında q eksenini akı çizgilerini kestiği için d eksenindekinden çok daha düşüktür. q eksenindeki doyum etkisinden başlıca sorumlu, rotor yapısında köprülerin varlığıdır.

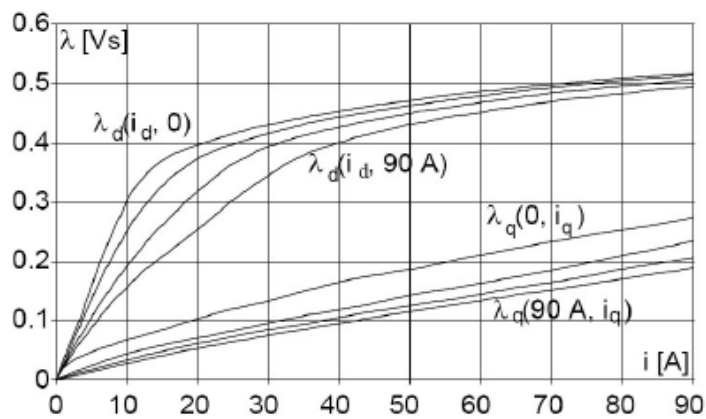
SRM'deki d ve q eksenini akıları üzerindeki tipik doyumluk etkisi Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Motorun anma akımı 10 A'dır. Bu şekil, SRM'de özellikle d ekseninde nominal koşul altında doyumun normal olduğunu göstermektedir. Bu şekil, SRM'de, özellikle d ekseninde, nominal koşul altında doyumun normal olduğunu göstermektedir (Moghaddam, 2007).



Şekil 3.5. Nominal 10 A akıma sahip bir SRM’de d ve q eksenlerindeki mıknatıslanma özelliği

3.3.2. Çapraz eşleme

Eşitlik 3.11’de her eksen akısının başka bir eksen akımına bağımlılığı, SRM’de başka bir doğrusal olmayan etkiyi ifade eder: Çapraz kuplaj veya çapraz mıknatıslanma. Özellikle λ_{dm} ’nin i_{qm} ’ye bağımlılığı, iyi bilinen armatür reaksiyonu etkisini sunabilir, başka bir deyişle, büyük bir q eksen akımı nedeniyle d ekseninin mıknatıslanma bozulması meydana gelir. 30 A stator nominal akımına sahip bir makine için tipik bir çapraz kuplaj etkisi Şekil 3.6’da gösterilmektedir.

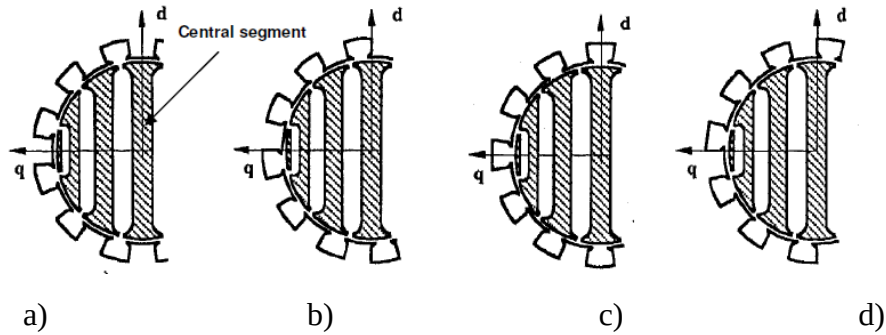


Şekil 3.6. 30 A anma akımına sahip bir SRM’de d ve q ekseninin çapraz kuplaj etkisi dahil mıknatıslanma özelliği

Çapraz kuplaj etkisi esas olarak rotorun d- ve q eksenini arasında paylaşılan demir kısmından kaynaklanır, ayrıca rotor nervürleri bu etkiyi artırır. Çapraz kuplaj aynı zamanda q eksenini akısını da etkili bir şekilde azaltır. Hem doyma hem de armatür tepkisi etkileri, d eksenini endüktansını azaltarak makine torkunu azaltır (Moghaddam, 2007).

3.3.3. Oluklu stator

SRM'deki oluk etkisi, Eşitlik 3.11'de mıknatıslanma endüktanslarının rotor konumu θ 'ye bağımlılığı ile modellenmiştir. Rotor bir stator oluk aralığını döndürülürken, 4 farklı durumda statora göre şematik rotor konumları Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Merkezi segment (MS) göz önüne alındığında, iki aşırı durum vardır. İlk konum, rotorun Şekil 3.7.a'daki gibi olduğu, dişlerin ve segmentlerin aynı fazda olduğu zamandır. Bu durumda, MS'yi içeren akı yolunun toplam relüktansı minimumdur ve bu nedenle L_d , maksimum değerindedir. İkinci konum, rotorun, dişler ve segmentler karşıt durumdayken Şekil 3.7.c'de gösterilen duruma değiştiği zamandır. Şimdi MS'nin karşı karşıya olduğu toplam hava boşluğu relüktans maksimize edilmiştir ve bu nedenle L_d minimumdandır. Rotor, Şekil 3.7.b ve 3.7.d'de gösterilen durumlarda olduğunda, MS stator dişlerinin ve oluklarının yarısını paylaşır ve böylece d eksenini akısı ayrıca bir miktar q eksenini akısına neden olur. Bu, stator oluklarının neden olduğu d ve q eksenini endüktansları arasındaki bir ara bağlantı etkisini göstermektedir. Rotor pozisyonundan dolayı endüktansların değişimi, ilk olarak tork dalgalanması ve ikinci olarak rotor segmentlerinin derinliklerinde yüksek akı dalgalanması ve sonuç olarak rotor gövdesinde demir kayıpları üretir.



Şekil 3.7. SRM rotoru, (a)'dan (d)'ye bir stator oluk aralığını döndürülürken, dört farklı durumda stator dişlerine göre rotor segmentlerinin konumunun karşılaştırılması

Tork dalgalanmasının azaltılması, rotor kaydırma tekniği benimsenerek etkin bir şekilde (geleneksel ASM uygulamaları için kabul edilebilir) elde edilebilir. Tork dalgalanması, rotor kaykısı ile tamamen ortadan kaldırılamaz, çünkü yukarıda tartışıldığı gibi (Şekil 3.7.b'deki rotor konumlarında ve 3.7.d'de), stator oluk etkilerinden dolayı d ve q eksenî akıları arasında her zaman bir etkileşim vardır. Yine de rotor kaykısında, rotor oluk aralığının tork dalgalanmasının azaltılmasında önemli bir katkısı vardır ve bu nedenle dalgalanmayı en aza indirmek için kullanılabilir (Moghaddam, 2007).

3.4. SRM Tasarım Parametreleri

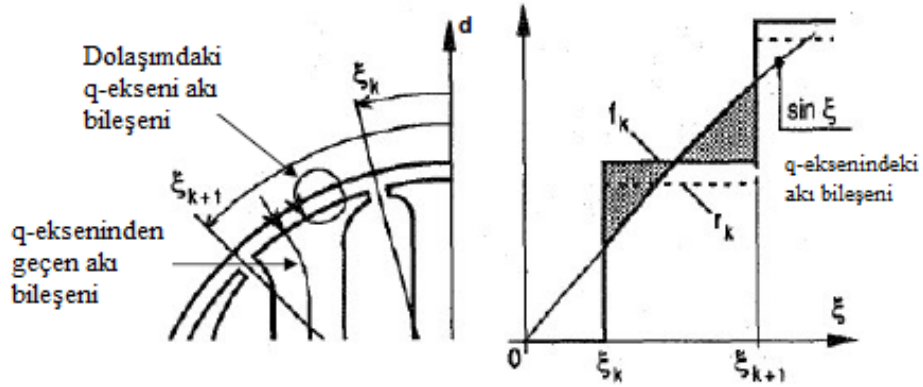
SRM tasarımında performansa etki edecek tasarım parametrelerinin seçimleri önemlidir. Motor parametrelerinden; Kutup sayısı ($2p$), rotorunda bulunan akı bariyerleri ve segmentleri, rotor bariyerlerinin yalıtım oranı, teğetsel ve radyal kırışlar ve hava aralığının etkileri bu bölümde incelenmiştir.

3.4.1. Kutup sayısı ($2p$)

Kutup çifti sayısının SRM performansı üzerinde güçlü bir etkisi vardır. Burada çıkıntı oranı üzerinde kutup sayısının etkisi sunulmuştur.

Bir d-eksenî sinüzoidal MMK, belirli bir hava boşluğu için bir endüksiyon motorunun mıknatıslama endüktansına pratik olarak eşdeğer olan bir endüktansa (L_{md}) yol açar.

Bir q-eksenî sinüzoidal MMK, iki terimin toplamı olan bir q eksenî endüktansına yol açar. L_{ck} terimi, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi, segment uçlarında dolaşan akılarla ilgilidir; L_{fk} terimi, segmentler boyunca akan ve segmentler arasındaki yalıtım katmanlarını içeren akılarla ilgilidir. Segmentleri bağlayan nervürler mevcut olduğunda, bir kırış akısı da eklenmelidir. Bu akı, demir doyumu ile güçlü bir şekilde sınırlıdır.



Şekil 3.8. k sayısındaki q-ekseni akısının segment içinden geçen ve dolaşan bileşenleri ve bununla ilgili rotor bariyer oluklarının açılmal konumları (ξ) (sol). q eksenindeki (MMKq) stator başına birim MMK uyarımı ve k sayısındaki segment (r_k) üzerindeki ortalama MMKq'ye k sayısındaki segmentte manyetik potansiyel yanıtı (f_k). Dolaşan akı, gölgeli alanda gösterilmiştir (sağda)

L_{ck}/L_{md} oranı kutup çifti sayısı p 'den bağımsızdır, ancak kutup çifti başına segment sayısı arttıkça azalır. Her yalıtım katmanı bir çift neredeyse kapalı oluk olarak görülüyorsa, L_{cq} endüktansı, bir endüksiyon motorunun L_{Zr} -rotor zikzak endüktansına pratik olarak eşdeğerdir.

Buna karşılık, L_{fk}/L_{md} oranı pratik olarak n_r 'den (her kutuptaki rotor oluk sayısı) bağımsızdır, ancak p 'ye bağlıdır. İlk yaklaşım olarak, p 'ye doğrusal bir bağımlılık varsayılabilir. Ayrıca, L_{fk} , çeşitli yalıtım katmanlarının relüktansına bağlıdır. Bununla birlikte, eşit aralıklı "oluklar" ve tek tip relüktans dağılımının basit ama etkili durumunda, Eşitlik 3.22 kullanılabilir. Bu, L_{fk} 'nin q-ekseni boyunca ölçülen iç boşluk l_a ile ters orantılı olduğunu ve L_{md} 'nin hava aralığı genişliği g ile ters orantılı olduğunu belirtir (Moghaddam, 2007).

$$\frac{L_{fk}}{L_{md}} \cong (sabit).p \frac{g}{l_a} \quad (3.22)$$

Sonuç olarak, yüksek anizotropi elde etmek için, önce düşük kutup sayısı ile yeterince fazla sayıda rotor segmenti seçilmelidir. Ardından, iç boşluk l_a mümkün olduğu kadar büyük olmalıdır. Tabii ki, l_a serbestçe seçilemez, ancak ana akı ve iç çap seçimleriyle ilgili olmalıdır (Moghaddam, 2007).

3.4.2. Akı bariyerleri ve segmentleri

Kutup çifti başına segment sayısını seçmek için olukları olmayan rotor akı hatlarını araştırmak gereklidir. Bu, SRM tasarımındaki son geometride rotor segmentlerindeki maksimum doyumun stator sırtındaki doyumdan daha düşük olması gerekiyorsa gereklidir. SRM tasarımı için temel bir kural vardır: Rotorun oluk aralığı statorunkine eşit (veya fazla) olmalıdır. Ayrıca optimum bir değer vardır, çünkü segment sayısı ne kadar yüksek olursa rotor demir kayıpları o kadar düşük olur.

Segmentleri rotorun içine yerleştirmek, d eksenini endüktansını mümkün olduğunca artırmak için önemlidir. Bu endüktans, d eksenindeki rotor reaksiyonunu karakterize edecektir (MMKd). İdeal durumda MMKd'nin, d ekseninde maksimum olan sinüzoidal bir şekle sahip olduğu varsayılabilir. Bu nedenle, her rotor segmentinin karşı karşıya olduğu MMKd miktarı, hava aralığındaki segment ucunun d ekseninden açısal mesafesini artırarak azaltılır ve sonuç olarak bu segmentte gerekli demir kalınlığı azalır.

Bu varsayım ile tüm segmentlerde akı yoğunluğunun aynı olması ve rotordaki demir kullanımının artması sağlanır. Segment boyutu için doğrudan bir varsayım, o segmentin hava aralığında karşı karşıya olduğu ortalama MMKd ile orantılı olması gerektiğidir. Bu MMKd, d ekseninden hava aralığındaki segment uç açısı ile sinüzoidal olarak küçülür; bu nedenle segment boyutu da sinüzoidal olarak küçülür.

İdeal olarak rotor segmanlarının sayısının mümkün olduğu kadar yüksek olması gerektiği düşünüldüğünde, motor performansı daha iyi olacaktır. Segment sayısı sınırlıysa, q eksenini akısının dolaşımdaki bileşeni artık azaltılamaz ve iyileştirme, q eksenini akısının geçiş bileşeni üzerinde yoğunlaşacaktır. Bu, L_k 'yi mümkün olduğunca azaltmak için q eksenindeki hava miktarının maksimize edilmesi (yüksek l_a) gerektiği anlamına gelir. Segment boyutunu rotor içindeki segment uzunluğu boyunca sabit tutarak ve ayrıca üst segmentlerin genişliğini sinüzoidal olarak azaltarak, daha sonra ikiden fazla kutbu olan makineler için bariyer genişliklerini uçtan q eksenine doğru artırarak l_a 'yı artırmak mümkündür.

N_L (segmentler+bariyerler) sayısına bakıldığında, $N_L > 8$ durumunda bariyer sayısını artırmanın motor endüktansı üzerinde çok az bir etkisi vardır. Ayrıca, farklı N_L 'lerin L_d

üzerinde çok az etkisi vardır, ancak $N_L < 3$ ise L_q üzerinde büyük bir etkisi vardır. $N_L > 10$ için L_q neredeyse etkilenmez (Moghaddam, 2007).

3.4.3. Rotor bariyer yalıtım oranı

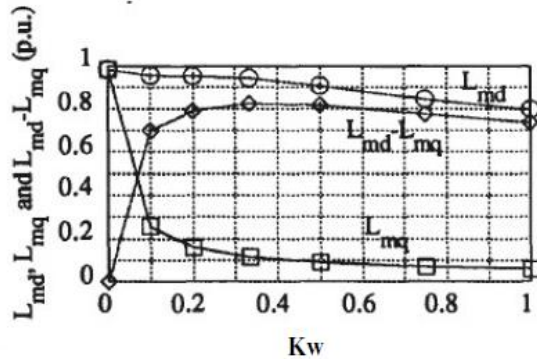
Farklı geometriler arasında karşılaştırma yapmak, farklı tasarımlar arasında karar vermek ve ayrıca ön tasarımların son ayarı için bir oran tanımlamak gerekecektir. Bu yalıtım oranı K_w , Eşitlik 3.23 te ifade edilmiştir.

$$K_w = \frac{W_{ins}}{W_{iron}} \quad (3.23)$$

Bu eşitlikte W_{ins} akı bariyer katmanlarının genişliklerinin toplamı ve W_{iron} demir katmanları genişliklerinin toplamı (Segmentler-akı kılavuzları).

Açıkça, $K_w = 0$ olduğunda, rotorun tamamen demirden yapıldığı varsayılır (yani, çıkıntı yok). $K_w = 1$ olduğunda rotor, hava boşluğu ve laminasyon bölümlerinin eşit olduğu laminasyon bölümlerinden yapılmıştır.

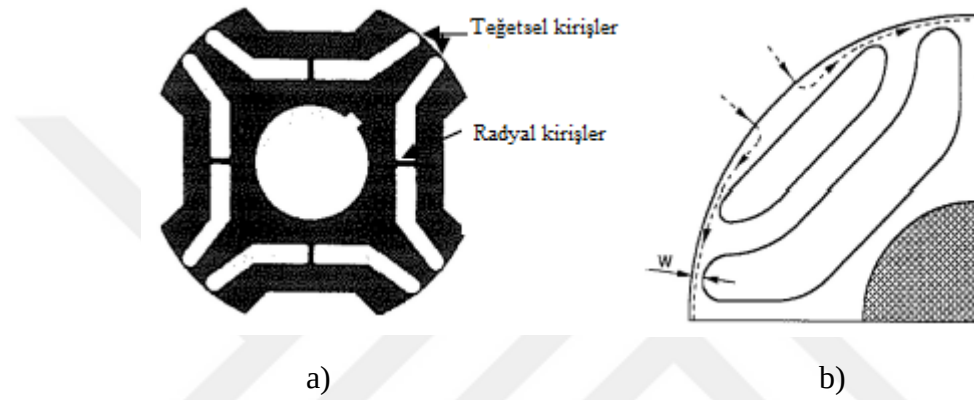
Şekil 3.9 ($L_d - L_q$) ile orantılı olan tork üzerinde, yalıtım oranının tipik etkisini sunulmuştur. 0.2-0.6 arasındaki değer, rotordaki ortalama yalıtım oranı için optimum bir değer gibi görünmektedir (Matsuo ve Lipo, 1994; Fratta ve ark., 1994). Şekil 3.9'da özellikle q ekseninde katı bir rotora boşluklar eklenmesinin L_d üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını, ancak L_q 'nin yüksek oranda etkilendiğini göstermektedir. Aslında yüksek relüktans çıkıntı oranı ve yüksek relüktans farkı elde etmek için asıl amaç, L_d 'yi çok rahatsız etmeden L_q için optimum bir değer bulmaktır (Moghaddam, 2007).



Şekil 3.9. 24 stator oluklu bir SRM'nin sonlu eleman çalışmasından kaynaklanan K_w ve L_{md} , L_{mq} , $(L_{md} - L_{mq})$ karşılaştırmaları

3.4.4. Teğetsel ve radyal kırışler

Bir SRM’de rotor segmentlerinin konumu ve tasarımı mekanik olarak sürdürülebilir olmalıdır. Bir şekilde rotor segmentleri birbirine bağlı olmalıdır. Bu durum şekil 3.10.a’da örnek olarak gösterilen, q-eksenine radyal konumdaki radyal kırışler ve hava boşluğuna yakın teğetsel kırışler yerleştirmektir. Bu kırışler, normal çalışma sırasında q eksenini MMK ile doyurulacaktır. Bu nedenle manyetik potansiyel açısından farklı segmentleri birbirinden ayırmak gerekmektedir.



şekil 3.10. a) Örnek bir SRM yapısında teğetsel ve radyal kırışler b) Kırışleri doymak için gereken ek q eksenini akısı

şekil 3.10.b de gösterilen durumda, kırışleri doyuma götürecektir ek bir akı değeri (λ_r) olacaktır ve bu doğrudan tork azalmasına (kayıp) sebep olacaktır. Tork azalmasını Eşitlik 3.24’te yaklaşık olarak ifade edilmiştir (Vagati ve ark., 1992).

$$\Delta T = \frac{3}{2} p \lambda_r i_d = \frac{4}{\mu_0} (w l B_s) B_d (k_c g k_s) \quad (3.24)$$

Burada B_s motor akısı, B_d hava ap²ralıėı akısı, k_c iletken doluluk sabiti ve k_s ise demir kayıpları için kullanılan bir sabittir. Tork kaybının p^2 ve kanat genişliği w ile orantılı olduğu açıktır ve bu elbette mekanik limitlere bağlıdır. Radyal kırış genişliğinin makine endüktansları ve akı kayıpları üzerindeki etkisi biraz daha karışıktır. Kırış genişliğinin arttırılması hem L_d hem de L_q ’yi eşit olarak değiştirecektir. Bununla birlikte, temel değerlere kıyasla nispi değişim, d eksenindekinden q eksenindeki endüktans için çok daha büyüktür. Aslında L_d azalması, doğrudan kırış genişliğinin arttırılmasıyla değil, d eksenini üzerindeki q eksenini çapraz mıknatıslanmanın etkisinin artmasından kaynaklanır. Kırışlerin devreye girmesi nedeniyle q eksenindeki akım normalde d eksenindekinden

daha büyüktür. Torktaki azalma ($(L_d - L_q)$ ile orantılıdır), hem Eşitlik 3.24 hem de SEY analizi sonuçlarından kanıtlandığı üzere kiriş genişliği ile doğru orantılıdır (Kamper ve Volschenk, 1994).

3.4.5. Hava aralığı uzunluğu

Hava aralığı uzunluğu g , d eksenini endüktansı L_d üzerinde önemli bir etkiye sahiptir, ancak q eksenini endüktansı L_q üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Yapılan çalışmalarda, torku artırmak için g 'nin mümkün olduğunca düşük tutulması gerektiğini gösterilmiştir, bu durum mekanik hususlar nedeniyle sınırlı olacaktır. Tork dalgalanması dikkate alınırsa, bu g azalması, Carter faktöründeki artış nedeniyle tork dalgalanmasını (ayrıca demir kayıplarını) artıracaktır, ancak bu, tüm oluklu statorlar için genel bir durumdur. Bu durumla birlikte segment sonunda dolaşan akı da artmaktadır (Kamper ve Volschenk, 1994).

Carter faktörü şu şekilde açıklanabilir. Oluklu bir armatürde, akı yolunun etkin alanı önemli ölçüde azaltılarak hava boşluğu relüktansında bir artışa neden olur. Bu durumda relüktansı hesaplamanın basit bir yöntemi, hava aralığı akısının, oluk genişliğinin bir kısmı dışında, oluk aralığının tamamına düzgün bir şekilde dağıldığını varsaymaktır. Bu faktör, oluk genişliğinin hava boşluğu uzunluğuna oranına bağlıdır (Viorel ve ark, 2014).

L_q 'nin hava boşluğu uzunluğundaki değişimden etkilenmemesi: d-ekseni çapraz mıknatıslanmanın q-ekseni endüktansı üzerindeki olumlu etkisi ve doğası gereği L_d ve L_q 'nin farklı olmaları ile açıklanabilir.

Genellikle d-ekseni endüktansı L_d , g (d-ekseni akısının geçtiği toplam hava aralığı) ile ters orantılıdır. L_q , $(l_a + g)$ (q eksenini akısının geçtiği toplam hava boşluğu, bariyer ve hava aralığı uzunlukları toplamı) ile ters orantılıdır. $l_a > g$ durumunda, L_d hava boşluğu değişikliklerine L_q 'dan çok daha duyarlıdır (Miller ve ark., 1991).

3.5. EA-SRM Boyutlandırma ve Tasarım Eşitlikleri

EA-SRM karakteristiklerini analiz edebilmek için eşdeğer devre matematiksel modeli gereklidir ve radyal akılı geleneksel motorlardan farklıdır. Bu model hava aralığı alan uyartımları temelindedir. Eksenel manyetik çekiş doğrudan hava aralığı ve uyartım akımları ile ilgilidir.

3.5.1. Boyutlandırma eşitlikleri

$$T = n_p \psi_g i_{sq} \quad (3.25)$$

Bu eşitlikte n_p eksenel akılı motorlardaki kutup sayısıdır, ψ_g hava aralığı kaçak akı ve i_{sq} eksenel stator akımıdır (Hu ve ark., 2018)

$$\psi_g = L_m i_{mg} \quad (3.26)$$

$$L_m = \frac{L'_m}{\delta + z} \quad (3.27)$$

L_m Uyarım endüktansı, i_{mg} uyarım akımı, δ hava aralığı uzunluğu, L'_m hava aralığı uzunluğunda birim başına efektif uyarım endüktansı ve z solid rotor eksenel uzunluğudur.

Manyetik eşlenik enerji W' ;

$$W' = \frac{1}{2} (\psi_{sd} i_{sd} + \psi_{sq} i_{sq} + \psi_{rd} i_{rd} + \psi_{rq} i_{rq}) \quad (3.28)$$

Statordaki eksenel manyetik itiş kuvveti;

$$F = \frac{\partial W'}{\partial z} = - \frac{3L'_m}{4g^2} \frac{dg}{dz} [(i_{sd} + i_{rd})^2 + (i_{sq} + i_{rq})^2] \quad (3.29)$$

Son durumda eksenel manyetik itiş kuvveti ve elektromanyetik tork aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanıp yapılabilir (Hu ve ark., 2018).

$$T = n_p \frac{L'_m}{\delta} (i_{sq} i_{md}) + n_p \frac{L'_m}{\delta} (-i_{sq} i_{md}) \frac{z}{\delta} \quad (3.30)$$

$$F = \frac{L'_m}{\delta^2} (i_{md}^2) + 2 \frac{L'_m}{\delta^2} (i_{md}^2) \frac{z}{\delta} \quad (3.31)$$

Boyutlandırma denklemlerinde ilk olarak iç çapın dış çapa oranı yapılmış çalışmalar ve literatür den Eşitlik 3.32 ile tanımlanmıştır ve $1 / \sqrt{3}$ alınarak boyutlandırma hesapları yapılabilir.

$$k_d = \frac{D_{in}}{D_{out}} \quad (3.32)$$

Akım yoğunluğu Eşitlik 3.33 ile tanımlanmıştır (Gieras ve ark., 2008).

$$A_m = \frac{4\sqrt{2}m_1 I_a N_1}{\pi D_{out}(1+k_d)} \quad (3.33)$$

Rotor uyarım sistemi tarafından stator sargılarında endüklenen EMK;

$$E_f = \pi\sqrt{2}n_s p N_1 k_{w1} \Phi_f = \frac{\pi}{4}\sqrt{2}n_s N_1 k_{w1} B_{mg} D_{out}^2 (1 - k_d^2) \quad (3.34)$$

Statordaki görünür güç;

$$S_{elm} = \frac{\pi^2}{8} k_{w1} n_s B_{mg} A_m D_{out}^3 (1 + k_d)(1 - k_d^2) \quad (3.35)$$

Bu eşitlikte n_s radyan cinsinden motor hızıdır. Bazı terimler k_D olarak ayrıca bir eşitlik şeklinde tanımlanabilir;

$$k_D = \frac{1}{8} (1 + k_d)(1 - k_d^2) \quad (3.36)$$

Görünür elektromanyetik güç, çıkış gücü terimleri ile ifade edilirse;

$$S_{elm} = \epsilon \frac{P_{out}}{\eta \cos \phi} \quad (3.37)$$

Eşitlik 3.37 de ϵ EMK'nın faz gerilimine oranıdır. Motorlarda $\epsilon < 1$ ve generatörlerde $\epsilon > 1$ (Gieras ve ark., 2008).

$$\epsilon = \frac{E_f}{V_1} \quad (3.38)$$

Eşitlik 3.35 ve 3.37 kullanılarak stator çekirdeğinin dış çapı Eşitlik 3.39 ile tanımlanabilir.

$$D_{out} = \sqrt[3]{\frac{\epsilon P_{out}}{\pi^2 k_D k_{w1} n_s B_{mg} A_m \eta \cos \phi}} \quad (3.39)$$

Elektromanyetik tork D_{out}^3 ile orantılıdır (Geiras ve ark., 2008).

$$T_d = \frac{P_{elm}}{2\pi n_s} = \frac{S_{elm} \cos \psi}{2\pi n_s} = \frac{\pi}{2} k_D k_{w1} n_s D_{out}^3 B_{mg} A_m \cos \psi \quad (3.40)$$

ψ stator akımı I_a ve EMK E_f arasındaki açıdır.

Manyetik akı;

$$\Phi_f = \frac{2}{\pi} B_{mg} \frac{\pi}{8p} D_{out}^2 (1 - k_d^2) \quad (3.41)$$

3.5.2. Stator sargıları

Temel hesaplamalardan sonra stator sarım sayıları, kullanılacak iletken çapı ve stator oluk alanı hesaplamaları yapılabilir.

Stator oluk sayısı;

$$N_s = 2pqm \quad (3.42)$$

Statorda faz başına düşen sarım sayısı;

$$N_1 = \frac{K_e V}{4K_f K_w f_1 \phi_f} \quad (3.43)$$

K_w sargı faktörünü ifade etmektedir. Her oluktaki iletken sayısı ise;

$$n_s = \frac{a_1 N_1}{p_1 q} \quad (3.44)$$

a_1 paralel akım yolunu ifade eder. Eğer çift katmanlı sargı kullanılacaksa her oluk iki bölge bobin olduğundan her oluktaki iletken çift sayı olmalıdır. İletken kesiti belirlemeden önce stator akımı bulunmalı ve akımı taşıyacak iletken çapı hesaplanmalıdır (Boldea ve Nasar, 2010).

$$I_a = \frac{P_{out}}{V \cos \phi n m_1} \quad (3.45)$$

Eğer yüksek verim gerekli ise güç, hız ve sargı kayıpları ağır basan parametrelerdir. Bu durumda aşağıdaki akım yoğunlukları tercih edilmelidir.

$$2p = \begin{cases} 2,4 \text{ için } J_{cos} = (4 \dots 7) A/mm^2 \\ 6,8 \text{ için } J_{cos} = (5 \dots 8) A/mm^2 \end{cases} \quad (3.46)$$

Manyetik iletken kesit alanı;

$$A_{co} = \frac{I_a}{J_{cos} a_1} \quad (3.47)$$

İletken çapı;

$$d_{co} = \sqrt{\frac{4A_{co}}{\pi}} \quad (3.48)$$

$d_{co} < 1.3 \text{ mm}$ ise bu durumda paralel iletken sayısını artırmaya gerek olmayacaktır (Boldea ve Nasar, 2010).

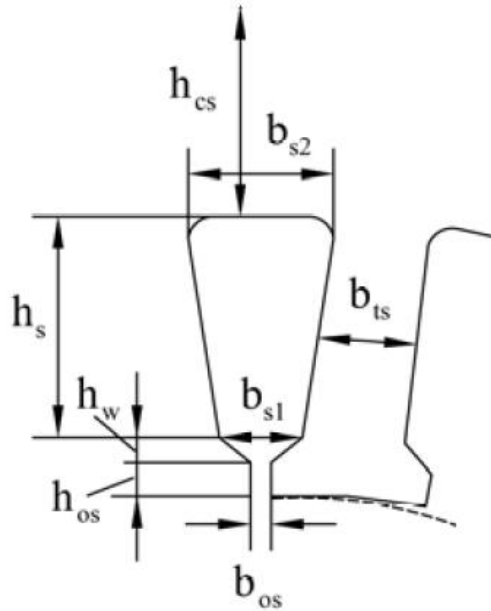
3.5.3. Stator oluk boyutlandırmaları

Statorda faz başına düşen sarım sayısı, her oluktaki iletken sayısı, manyetik kablo kesit alanı ve kablo çapı hesaplamaları sonucu, ortalama kutup uzunluğu da bilinirse oluk ölçüleri hesaplanabilir (Boldea ve Nasar, 2010). Ortalama kutup uzunluğu;

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad (3.49)$$

Kullanışlı oluk alanı A_{su} ;

$$A_{su} = \frac{\pi d_{co}^2 a_p n_s}{4K_{fill}} \quad (3.50)$$



Şekil 3.11. Stator oluk geometrisi

$$b_{ts} = \frac{B_g \tau_s}{B_{ts} K_{fe}} \quad (3.51)$$

Laminasyon yalıtımı oranı 0.5 mm ince laminasyon için $K_{fe} = 0.96$ alınabilmektedir. Genel olarak oluk giriş genişliği, oluk girişi uzunluğu ve oluk girişinden oluk dar genişliği olan b_{s1} oranının alındığı yere kadar olan uzaklık sırasıyla aşağıdaki aralıklarda seçilebilmektedir (Boldea ve Nasar, 2010);

$$b_{os} = (2 \dots 3)mm \quad (3.52)$$

$$h_{os} = (0.5 \dots 1)mm \quad (3.53)$$

$$h_w = (1 \dots 4)mm \quad (3.54)$$

$$b_{s1} = \frac{\pi(D_{in}+2h_{os}+2h_w)}{N_s} - b_{ts} \quad (3.55)$$

$$b_{s2} = \sqrt{4A_{su} \tan \frac{\pi}{N_s} + b_{s1}^2} \quad (3.56)$$

Oluk yüksekliği h_s ;

$$h_s = \frac{2A_{su}}{b_{s1}+b_{s2}} \quad (3.57)$$

Stator boyunduruk yüksekliği h_{cs} ;

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{in} + 2(h_{os} + h_w + h_s))}{b_{s1} + b_{s2}} \quad (3.58)$$

Son olarak stator paket boyu;

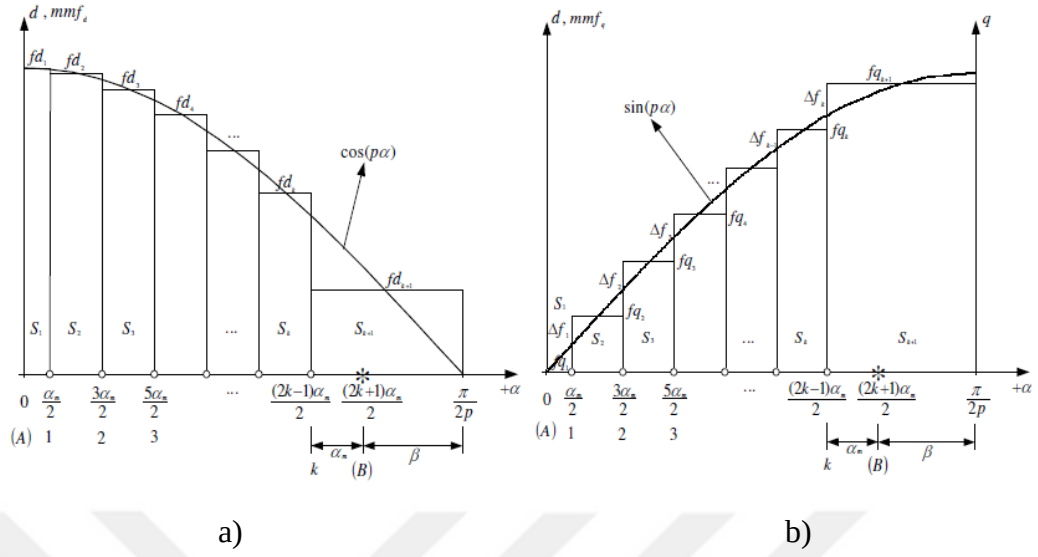
$$L_{stator} = h_w + h_{os} + h_s + h_{cs} \quad (3.59)$$

3.5.4. Rotor tasarım parametreleri

Rotor kutuplarında bulunan segment ve bariyerlerin açısal olarak pozisyonları tork ve tork dalgalanmasında önemli parametrelerdir. Eşitlik 3.60'ta α bariyerler arasındaki açıdır. β ise α açısının kontrolü için gerekli ilave yardımcı açıdır.

$$\alpha = \frac{\frac{\pi}{2p} - \beta}{n_{layer} + \frac{1}{2}} \quad (3.60)$$

α açısı ile tork dalgalanması minimize edilebilmektedir. Optimizasyon çalışmaları ile β açısında değişeceği çalışmalar ile gösterilmiştir. Yapılan çalışmalarda $\beta = \alpha/2$ alınarak hesaplamalar yapılabilmektedir (Moghaddam, 2007; Ibrahim ve ark., 2016).



Şekil 3.13. a) d-ekseninde uygulanan MMK nedeniyle segmentler üzerinde birim başına MMK dağılımı b) q-ekseninde uygulanan MMK nedeniyle segmentler üzerinde birim başına MMK dağılımı

$$fd_h = \frac{\int_{\frac{2h-3}{2}\alpha_m}^{\frac{2h-1}{2}\alpha_m} \cos(p\alpha) d\alpha}{\alpha_m} = \frac{\sin(p\frac{2h-1}{2}\alpha_m) - \sin(p\frac{2h-3}{2}\alpha_m)}{p\alpha_m} \quad h = 1, \dots, k \quad (3.61)$$

$$fd_{k+1} = \frac{\int_{\frac{2k-1}{2}\alpha_m}^{\frac{\pi}{2p}} \cos(p\alpha) d\alpha}{\alpha_m + \beta} = \frac{1 - \sin(p\frac{2k-1}{2}\alpha_m)}{p(\alpha_m + \beta)} \quad (3.62)$$

$$\frac{2S_1}{S_2} = \frac{fd_1}{fd_2} \quad \& \quad \frac{S_h}{S_{h+1}} = \frac{fd_h}{fd_{h+1}} \quad h = 2, \dots, k \quad (3.63)$$

Aynı yöntem ile bariyer genişliklerinin hesapları da her bariyer üzerindeki MMK farkı (Δf_k) ile yapılabilir (Aghazadeh ve ark., 2019).

-q eksen yönünde her segmentteki ortalama MMK Eşitlik 3.64, Eşitlik 3.65 ve Eşitlik 3.66'daki gibi yazılabilir.

$$f_{q1} = 0 \quad (3.64)$$

$$fd_h = \frac{\int_{\frac{2h-3}{2}\alpha_m}^{\frac{2h-1}{2}\alpha_m} \cos(p\alpha) d\alpha}{\alpha_m} = \frac{\sin(p\frac{2h-1}{2}\alpha_m) - \sin(p\frac{2h-3}{2}\alpha_m)}{p\alpha_m} \quad (3.65)$$

$$fd_{k+1} = \frac{\int_{\frac{2k-1}{2}\alpha_m}^{\frac{\pi}{2p}\alpha_m} \cos(p\alpha) d\alpha}{\alpha_m + \beta} = \frac{1 - \sin\left(p\frac{2k-1}{2}\alpha_m\right)}{p(\alpha_m + \beta)} \quad (3.66)$$

Her bariyer arasındaki fark Eşitlik 3.67, Eşitlik 3.68 ve Eşitlik 3.69’da gösterilmiştir.

$$\Delta f_1 = fq_2 - fq_1 = \frac{\cos\left(\frac{p\alpha_m}{2}\right) - \cos\left(\frac{3p\alpha_m}{2}\right)}{p\alpha_m} \quad (3.67)$$

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

$$= \frac{2 \cos\left(p\frac{2h-3}{2}\alpha_m\right) - \cos\left(p\frac{2h-1}{2}\alpha_m\right) - \cos\left(p\frac{2h-5}{2}\alpha_m\right)}{p\alpha_m} \quad (3.68)$$

$$\begin{aligned} \Delta f_k &= fq_{k+1} - fq_k = \\ &= \frac{(2\alpha_m + \beta) \cos\left(p\frac{2h-1}{2}\alpha_m\right) - (\alpha_m + \beta) \cos\left(p\frac{2h-3}{2}\alpha_m\right)}{p\alpha_m(\alpha_m + \beta)} \end{aligned} \quad (3.69)$$

Son durumda bariyer hesapları için oran Eşitlik 3.70’te gösterilmiştir.

$$\frac{W_{1h}}{W_{1h+1}} = \left(\frac{\Delta f_h}{\Delta f_{h+1}}\right)^2 \quad h = 1, \dots, k-1 \quad (3.70)$$

Segment ve bariyer kalınlıkları hesaplarından sonra toplam l_y ve l_a oranları Eşitlik 3.71 ve 3.72’deki gibidir (Moghaddam, 2007).

$$l_y = \sum_{i=1}^{n_{layer}+1} S_i = \frac{\left(\frac{L_{st}}{2}\right) - \left(\frac{L_{ro}}{2}\right) - g}{1 + k_{wq}} \quad (3.71)$$

$$l_a = \sum_{i=1}^{n_{layer}} W_{bi} = \frac{\left(\frac{L_{st}}{2}\right) - \left(\frac{L_{ro}}{2}\right) - g}{1 + (1/k_{wq})} \quad (3.72)$$

3.6. SEY

SEY’e tarihsel olarak bakıldığında 1940’lı yıllarda sayısal metodların geliştirilmesi ile Richard Courant tarafından yapılan çalışmalar ile karşılaşmıştır. Courant sürekli bir sistemi küçük üçgensel bölümlere ayırarak bir analiz yönteminde geliştirmiştir. 1956 yılında, Turner ve diğer bilim adamları bir üçgen eleman için rijitlik matrisini oluşturmuştur. “Sonlu elemanlar” terimi ise ilk olarak 1960 yılında Dr. Ray Clough tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Sonlu Elemanlar Yöntemi, yapı analizi, ısı

transferi, titreşim analizi, manyetik alan, akışkanlar mekaniği ve diğer birçok alanda uygulanmaktadır. 1970’li yıllardan itibaren genel amaçlı sonlu elemanlar paket programları ortaya çıkmaya başlamış ve 1990’lı yılların başlangıcı ile bu yöntem ve uygulamaları hakkında çok sayıda çalışma yapılmıştır (Bostancı, 2002).

Elektrik makinaları alanında SEY çoğunlukla kullanılmaktadır. Elektrik makinaları tasarımlarında SEY yazılım programları kullanılarak;

- Tasarım aşamalarındaki teorik ayrıntılar incelenebilmektedir.
- Tasarlanan prototip modellenerek maliyet ve üretim aşamaları detaylı incelenebilmektedir.
- Tasarımların verim ve performansları karşılaştırılıp geliştirilebilmektedir.
- Manyetik alan konuları ve terimleri daha anlaşılır incelenebilmektedir.
- Başlangıç ve sınır şartları yazılımlar ile uygulanabilmektedir.

(Çeçen, 2018)

Mühendislik alanlarında elektrik ve manyetik alanları içeren problemlerin analizi Maxwell denklemlerinin çözümünden geçer. Bu denklemlerin gerçek geometriler için çözümü birçok durumda zorluklar içermektedir. Ancak, sayısal yöntemler yardımıyla böyle durumlarda işlemler kolay hale gelmektedir. Sayısal elektromanyetik alan analizinde farklı sayısal yöntemlerden faydalanılır. Bunlar; Sonlu elemanlar yöntemi, sonlu farklar yöntemi, Monte Carlo yöntemi ve yük benzetim yöntemi olarak isimlendirilmiştir. Maxwell denklemlerinin diferansiyel formları aşağıdaki gibi verilmektedir (Akyerden, 2018).

Elektrik alan (Gauss Yasası);

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3.73)$$

Manyetik alan (Gauss Yasası);

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.74)$$

İndüksiyon yasası (Faraday Yasası);

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.75)$$

Ampere Yasası;

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.76)$$

Doğrusal ve izotropik bir ortamda $D = \varepsilon E$ ve $B = \mu H$ bağıntıları geçerlidir. ε , permittive ve μ permeabilite konumlar için farklı fonksiyonları ifade etmektedir. E , elektrik alan, D , elektrik akı yoğunluğu, B , manyetik akı yoğunluğu ve H manyetik alan şiddeti alan nicelikleridir (Akyerden, 2018). Buna göre, üç boyutta, herhangi bir vektör alanının kıvrımının sapması sıfıra eşit olduğunda, Eşitlik 3.77 elde edilebilir.

$$\nabla \times J = \nabla(\nabla \times H) = 0 \quad (3.77)$$

Makroskopik malzemenin özelliklerini ifade eden eşitlikler şu şekildedir:

$$J = \sigma E \quad (3.78)$$

$$D = \varepsilon E = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (3.79)$$

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (3.80)$$

Bu eşitliklerde, σ elektriksel iletkenliğe, ε elektriksel geçirgenliğe ve μ manyetik geçirgenliğe karşılık gelmektedir. ε ve μ için kullanılan 0 ve r ifadeleri, boşluk ve bağlı geçirgenliği tanımlamaktadır. Vektör potansiyellerin hesaplanmasında Eşitlik 3.81 tanımlanabilmektedir. Burada A , vektör potansiyelidir.

$$\nabla \times A = B \quad (3.81)$$

Bu eşitlik tüm problem bölgesinde tanımlanmış ve Faraday kanunu eşitliğinde V skaler potansiyeli ile birleştirilebilir.

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V \quad (3.82)$$

Eşitlik 3.82 diğer Maxwell eşitlikleri ile birleştirildiğinde Eşitlik 3.83 elde edilmektedir.

$$J = \sigma E = -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) = \nabla \times H = \nabla \times \frac{B}{\mu} = \frac{1}{\mu} \nabla(\nabla \times A) \quad (3.83)$$

Buradan, kuramsal fizikte temel etkileşmeleri açıklamak için kullanılan Yerelleştirilmiş Bakışım Kuramının kullanılması ile Eşitlik 3.84 elde edilir.

$$\nabla \times A = 0 \quad (3.84)$$

Sonuç olarak elektromanyetik alan, geçici hal formülasyonları için Eşitlik 3.85'teki gibi bir çözüm elde edilir.

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = \nabla \times H_c - \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) + \frac{1}{\mu} \nabla (\nabla \cdot A) \quad (3.85)$$

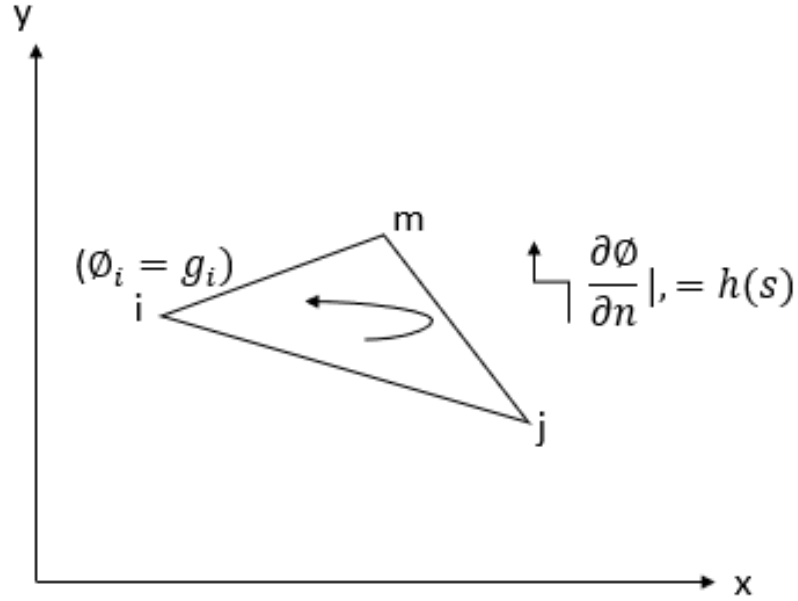
Eşitlik 3.73 (Gauss Eşitliği) ve 3.82 birleştirilerek Eşitlik 3.86 elde edilmektedir ve Poisson denklemi olarak tanımlanmaktadır. Poisson eşitliği kullanılarak elektrostatik problemlerin çözümü için gerekli Laplace denklemi Eşitlik 3.87'de gösterilmiştir (Zöhra, 2019).

$$\nabla^2 V = \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \vec{A}) = -\frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (3.86)$$

$$\nabla V = \nabla^2 V = 0 \quad (3.87)$$

Rayleigh-Ritz Yöntemi

SEY teorisine bakıldığında Laplace ve Poisson denklem tiplerinin çözümlerinde kullanılabilir. Çözüm için gerekli eleman sayıları bazı algoritmalar kullanılabilir. En yaygın yöntem Rayleigh-Ritz yöntemidir. Sınır koşullarının karmaşıklığı ile potansiyel fonksiyonu bulmanın çok zor olmadığı koşullarda, küçük elemanlar ile çözüm aranmaktadır. Elemanların geometrik yapısının aynı olması şartıyla çözüm aranacak bölge aynı geometrik elemanlara bölünür. Örnek olarak üçgen elemanlar kullanılabilir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Üçgen eleman

Tek bir üçgen eleman için Eşitlik 3.88’de gösterilen birinci dereceden bir polinom ile deneme fonksiyonu uygulanabilmektedir.

$$\phi(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y \quad (3.88)$$

Bu fonksiyonda ϕ , x ve y ye göre doğrusal olarak değişmektedir. Ancak üçgen elemanın köşelerindeki potansiyeller ϕ_i , ϕ_j , ϕ_m ise, deneme fonksiyonu köşe noktalarında bu değerleri sağlamalıdır (Çeçen, 2018).

$$\begin{cases} \phi_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i \\ \phi_j = a_0 + a_1x_j + a_2y_j \\ \phi_m = a_0 + a_1x_m + a_2y_m \end{cases} \quad (3.89)$$

Her bir üçgen eleman içinde, potansiyel fonksiyonun Laplace diferansiyel denklemini sağladığı varsayıldığında, homojen sınır koşullarında Laplace denkleminin karşılık gelen fonksiyon;

$$F = \iint \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (3.90)$$

Potansiyel fonksiyonları yerine Eşitlik 3.89’da elde edilen deneme fonksiyonu kullanılırsa;

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_i} = 2(S_{ii}\phi_i + S_{ij}\phi_j + S_{im}\phi_m) \quad (3.91)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_j} = 2(S_{ji}\phi_i + S_{jj}\phi_j + S_{jm}\phi_m) \quad (3.92)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_m} = 2(S_{mi}\phi_i + S_{mj}\phi_j + S_{mm}\phi_m) \quad (3.93)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \phi} + \frac{\partial F}{\partial \phi_i} + \frac{\partial F}{\partial \phi_j} + \frac{\partial F}{\partial \phi_m} = 0 \quad (3.94)$$

$$2 \begin{bmatrix} S_{ii} & S_{ij} & S_{im} \\ S_{ji} & S_{jj} & S_{jm} \\ S_{mi} & S_{mj} & S_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_j \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.95)$$

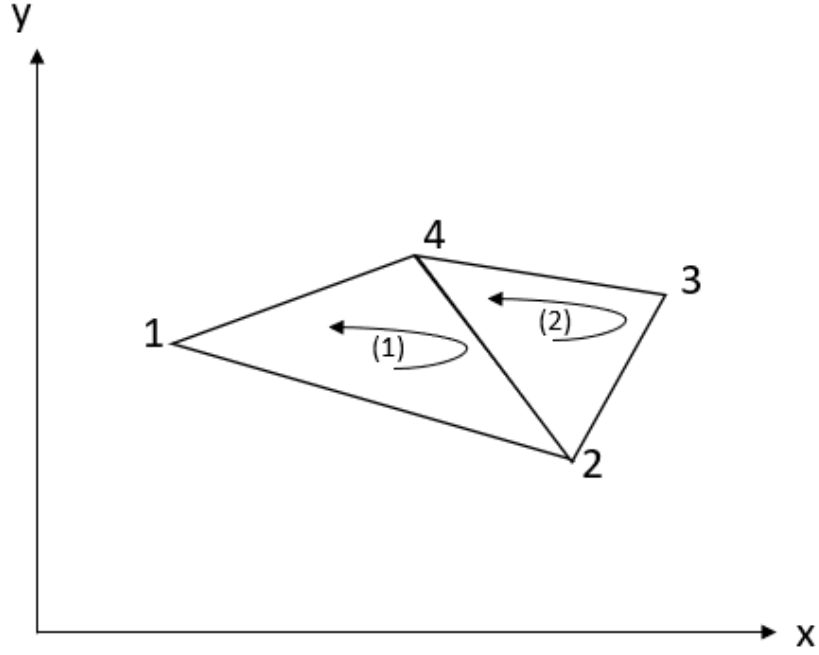
Şekil 3.14'te verilen $\phi_i = g_i$ sınır koşulu matrisle yerleştirildiğinde Eşitlik 3.97 elde edilmektedir (Çeçen, 2018).

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ S_{ji} & S_{jj} & S_{jm} \\ S_{mi} & S_{mj} & S_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_j \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.96)$$

$$\begin{bmatrix} S_{jj} & S_{jm} \\ S_{mj} & S_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_j \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g_i S_{ji} \\ -g_i S_{mi} \end{bmatrix} \quad (3.97)$$

Elemanların Birleştirilmesi

Seçilen elemanlar arasındaki ortak bölgelerdeki potansiyeller tüm bölge için çözümlerinin sürekli durumda olması şarttır. Bu potansiyel işlevler üçgen olarak seçilen elemanların kenarlarında ve içerisinde doğrusal denklemler ile değişmektedir.



Şekil 3.15. İki üçgen elemanın birleşimi

Şekil 3.15'te görüldüğü üzere bazı düğümlerde problemin doğası gereği akım olabilir. Son durumda bu sistemin denklemi Eşitlik 3.98 ile tanımlanmaktadır. Eşitlikte sağ tarafa düğüm noktalarındaki akım yoğunlukları eklenmiştir ve sonuç olarak her bir düğüm noktasındaki potansiyel değerler elde edilmiş olacaktır. (Çeçen, 2018).

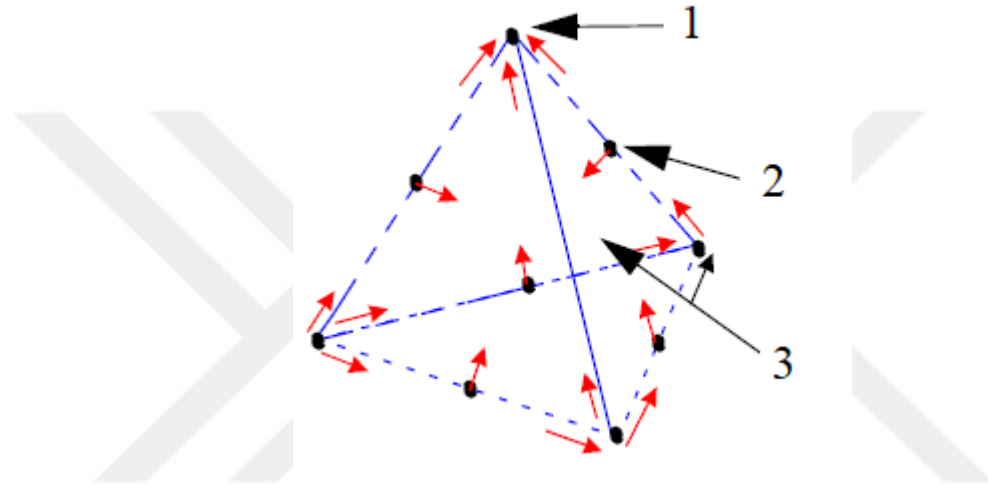
$$\begin{bmatrix} S_{11}^{(1)} + S_{11}^{(2)} & S_{12}^{(2)} & S_{13}^{(1)} + S_{13}^{(2)} & S_{14}^{(2)} \\ S_{21}^{(1)} & S_{22}^{(1)} & S_{23}^{(1)} & 0 \\ S_{31}^{(1)} + S_{31}^{(2)} & S_{32}^{(1)} & S_{33}^{(1)} + S_{33}^{(2)} & S_{34}^{(2)} \\ S_{41}^{(2)} & 0 & S_{43}^{(2)} & S_{44}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ J_2/3 \\ 0 \\ J_4/3 \end{bmatrix} \Delta \quad (3.98)$$

Sonlu eleman, çözümün isteğe bağlı bir geometriden sayısal olarak elde edildiği yöntemi ifade etmektedir. İsteğe bağlı karmaşık geometri, sonlu elemanlar adı verilen basit parçalara bölünmektedir.

Bu çalışmada yapılan tasarımlarda ve prototip üretimi sürecinde, tasarımda SEY analizleri için ANSYS Maxwell3D yazılım programı kullanılmıştır. Tasarım modelleme sürecinde prototip geometrisi ve boyutlandırmaları SEY ortamına aktarılmadan önce, ilk

süreçte analitik olarak hesaplanmıştır. Modelleme sürecinde analiz sürelerinin kısaltılması adına 1/8 3D model tercih edilmiştir.

ANSYS Maxwell3D’de sonlu elemanın temel birimi bir tetrahedrondur (dört kenarlı piramit). Bu elemanlar, sonlu eleman ağı olarak bilinen yapı ile inşa edilmiştir. Şekil 3.16’da SEY analizlerinde kullanılan dört kenarlı piramit yapısı gösterilmiştir (ANSYS Maxwell 3D User’s Guide)



Şekil 3.16. SEY analizinde kullanılan dört kenarlı piramit yapısı (tetrahedron)

Şekil 3.16 da 1 numaralı konumda bir ögenin kenarlarına teğet olan bir Alanın Bileşenleri, köşelerde açıkça saklanmaktadır. 2 numaralı konumda Bir ögenin yüzüne teğet ve bir kenara dik olan bir alanın Bileşenleri, seçili kenarların orta noktasında açıkça saklanmaktadır. 3 numaralı konumda bir iç noktadaki vektör alanının değerleri, düğüm değerlerinden enterpole edilmektedir.

Eşkenar tetrahedron yapısı düğümler arasındaki ikinci dereceden eşitlikler için en uygun yapı olarak kullanılmaktadır ve bu durum ağ yapısının oluşumunda tercih edilen bir geometridir.

Her elemandaki istenen alan, ikinci dereceden bir polinomla (temel fonksiyon) yaklaşık olarak hesaplanmaktadır.

$$H_x(x, y, z) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4xy + a_5yz + a_6xz + a_7x^2 + a_8y^2 + a_9z^2 \quad (3.99)$$

Temel fonksiyonları elde etmek için, bir 3D simülasyonda 10 nokta için alan miktarları hesaplanmaktadır (köşelerde ve kenarlarda düğüm değerleri). Diğer tüm nicelikler, çözüm uzayının bir kısmında veya tamamında alan çözümünden belirlenmektedir. Dörtüzlüler tanımlandıktan sonra, sonlu elemanlar büyük, seyrek bir matris denklemine yerleştirilir.

$$[S][H] = [J] \quad (3.100)$$

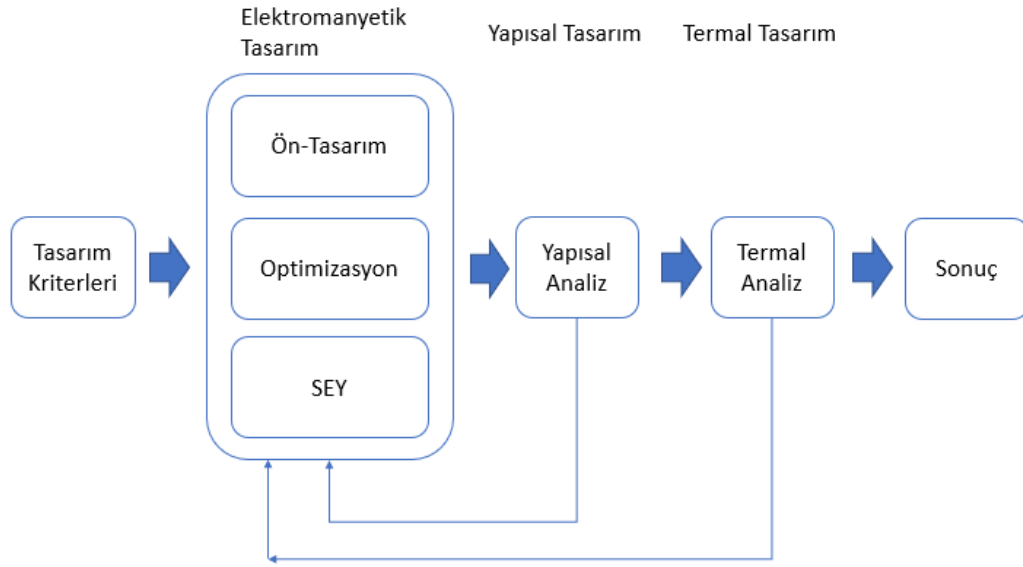
Bu, artık aşağıdakiler gibi standart matris çözüm teknikleri kullanılarak çözülebilir:

- Seyrek Gauss Eliminasyonu (doğrudan çözücü)
- Eksik Choleski Eşlenik Gradyan Yöntemi (ICCG yinelemeli çözücü)

Doğrudan çözücünün varsayılan çözücü olduğuna ve genellikle en iyi yöntem olduğuna dikkat edilmelidir. ICCG çözücü, özel durumlar ve referans için dahil edilmiştir (ANSYS Maxwell 3D User's Guide).

3.7. EA-SRM Tasarımı

Bu bölümde EA-SRM prototip üretimi öncesi en iyi modeli oluşturmak için başlangıç parametrelerinin seçimi ve SEY analizleri incelenmiştir. EA-SRM'nin stator yapısı, rotor bariyer tipi, rotor bariyer sayısı ve rotor yalıtım oranı karşılaştırmaları yapılmış ve en uygun model seçilmiştir. Tasarım metodolojisinde ilk olarak tasarım kriterleri belirlenmektedir. Daha sonra elektromanyetik tasarım olarak ifade edilen, içerisinde motor boyutlandırmaları, optimizasyonu ve SEY analizini içermektedir. Bu aşamadan sonra yapısal analiz ve termal analiz yapılarak tasarım prosedürü tamamlanmış olmaktadır. Yapısal ve termal analiz sonuçlarında yaşanabilecek sorunlar, elektromanyetik tasarım aşamasına geri besleme yapılarak tasarım tekrar kontrol edilebilmektedir. Tasarım aşamaları Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. EA-SRM tasarım aşamaları

3.7.1. Başlangıç parametrelerinin seçimi ve stator hesapları

Oluk kutup sayısı seçimi relüktans torku üretimi ve ortalama tork yoğunluğu için önemlidir. Oluk kutup kombinasyonu seçimi sargı faktörünü maksimize etmesi gereklidir (Taghavi ve Pillay, 2014). EA-SRM’de çift katmanlı dağıtılmış sargılar seçilmiştir. Konsantre sargıların üretimi, kolay ve bakır kayıpları küçük olmasına rağmen yüksek relüktans torku için dağıtılmış sargılar seçilmiştir (Boldea ve Nasar, 2010; Shi ve ark., 2011; Bin Tarek ve Sozer, 2019; Aghazadeh ve ark., 2019).

Bu sebeplerle 48 oluk ve 8 kutup yapısı tercih edilmiştir. Bu oluk-kutup uyumu ile yüksek relüktans tork sağlayacaktır fakat bu sargı seçimi ile tork dalgalanması da yüksek olacaktır. İleri bölümlerde bahsedilecek optimizasyon çalışmaları ile tork dalgalanması değeri düşürülmeye çalışılacaktır.

Akım yoğunluğu J (A/m^2) değeri $3 - 7 A/m^2$ aralığında değişmektedir. Eğer sistemde ilave soğutma ekipmanları bulunursa bu değer yüksek seçilebilmektedir. Manyetik devrelerdeki akı yoğunluğu makinanın laminasyonunda kullanılan materyale bağlı olarak belirli değerler altında olmalıdır. Genellikle iyi tasarlanmış bir motorda stator dişlerindeki maksimum akı yoğunluğu değeri $0.2 T \leq B_{avg} \leq 0.8 T$ aralığında olmalıdır. SRM ler MTPA ile çalıştırıldıklarında, dezavantajlarından olan düşük güç faktörü değerine

sahiptirler. Çıkış geriliminin giriş gerilimine dönüşüm oranı 0.8 – 1 aralığında kabul edilmektedir.

Stator slot dolgu faktörü $k_{fill} = A_{cu}/A_{su}$ eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada A_{cu} toplam bakır alanını ve A_{su} stator slot alanını ifade etmektedir. Dağıtılmış sargı tip kullanıldığında 0.6 değerinde dolgu faktörü kullanılabilmektedir. Bu oran yalıtım kalınlığına ve iletkenlerin geometrisine göre de bağlı olarak değişebilmektedir. İç çapın dış çapa oranı k_d kutup sayısı ile doğru orantılı değişen bir değerdir. 8 kutuplu motorda bu değer 0.72 – 0.74 arası seçilmektedir (Aghazadeh ve ark., 2019). Tasarım için seçilen başlangıç değerleri Çizelge 3.1 de verilmiştir.

Bölüm 3.5.2 ve 3.5.3'te açıklanmış matematiksel ifadeler sonucunda hesaplanmış stator boyutları ve stator oluk parametreleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. Çizelge 3.3'te ise stator sargı parametreleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. EA-SRM tasarım için seçilen başlangıç değerleri

Parametreler	Tanım	Değer
P_o	Çıkış gücü	2.2 kW
n	Hız	1500 d/d
η	Verim	% 90
Cos ϕ	Güç faktörü	0.7
p	Kutup çifti sayısı	4
B_{avg}	Manyetik yük	0.65 T
A_m	Elektrik yükü	23000 A.turn/m
q_s	Her faz her kutuptaki slot sayısı	2
J	Akım yoğunluğu	5 A/mm ²
k_{st}	Laminasyon faktörü	0.96
k_w	Sargı faktörü	0.933
k_{fill}	Dolgu faktörü	0.6
k_d	Stator iç-dış çap oranı	0.72

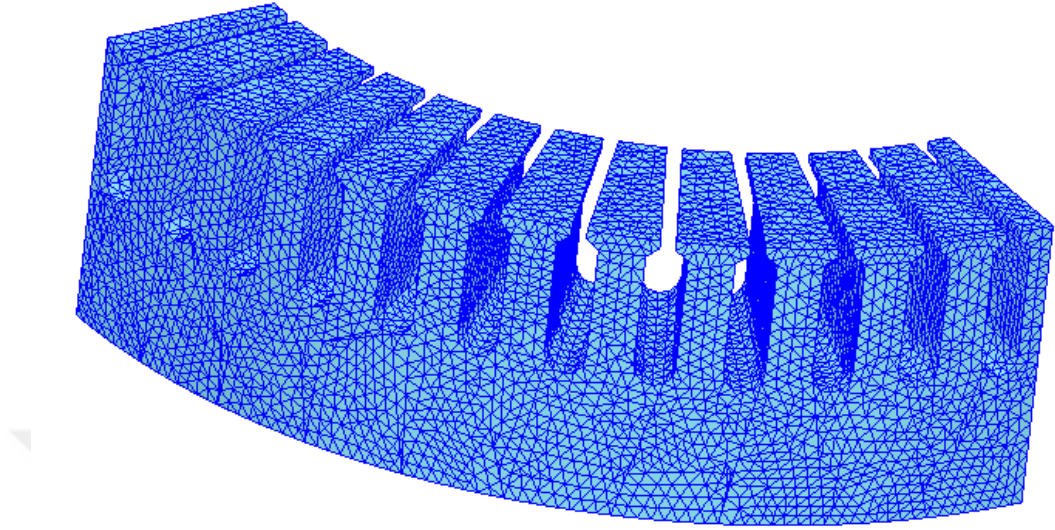
Çizelge 3.2. EA-SRM hesaplanmış stator oluk parametreleri

Parametreler	Tanım	Değer
D_o	Stator dış çapı	210 mm
D_i	Stator iç çapı	150 mm
b_{s1}	Oluk alt genişliği	6.5 mm
b_{s2}	Oluk üst genişliği	6.5 mm
b_{ts}	Stator dişi genişliği	3.304 mm
b_{os}	Oluk ağız genişliği	2 mm
h_s	Oluk yüksekliği	18.72 mm
h_{cs}	Stator çekirdek yüksekliği	18.78 mm
h_{os}	Oluk açıklığı yüksekliği	1 mm
h_w	Oluk açıklık altı yüksekliği	4 mm
L_{stator}	Stator paket boyu	48 mm
L_{rotor}	Rotor paket boyu	39 mm

Çizelge 3.3. EA-SRM stator sargı parametreleri

Tanım	Değer
Faz sayısı	3
Sargı katmanı	2
Sargı tipi	Tam kalıp
Paralel kol	1
Oluktaki iletken sayısı	58
Adım sayısı	5
İletken boyutu çapı	2 x 0.85mm
Oluk sayısı	48

Yapılan hesaplamalardan sonra ANSYS benzetim programında stator modeli oluşturulmuş ve SEY analiz için uygulanan “mesh” yani ağ yapısı uygulanmıştır. Şekil 3.18 de oluşturulan 1 / 4 stator modeli gösterilmiştir.



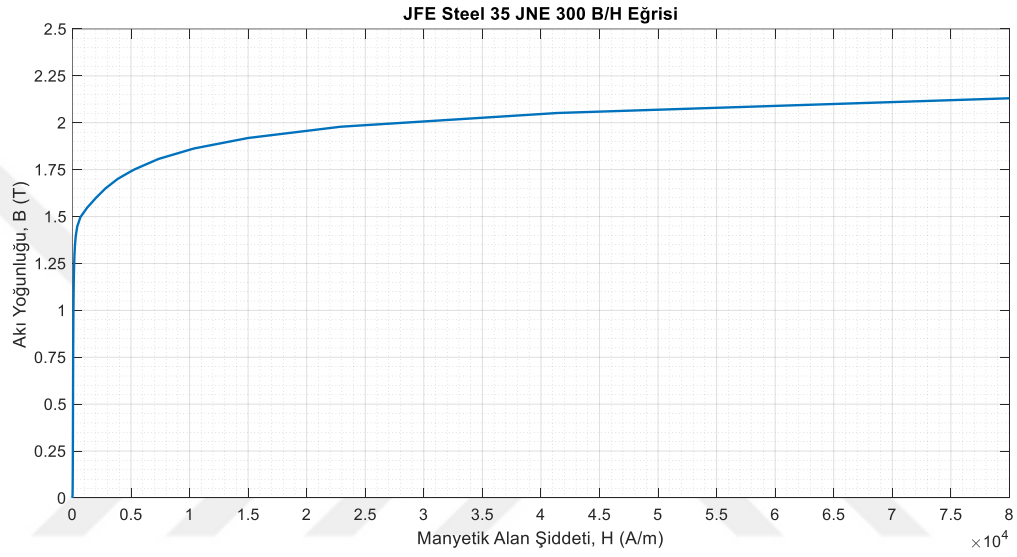
Şekil 3.18. EA-SRM stator ve mesh görüntüsü

3.7.2. Rotor tasarımı ve hesapları

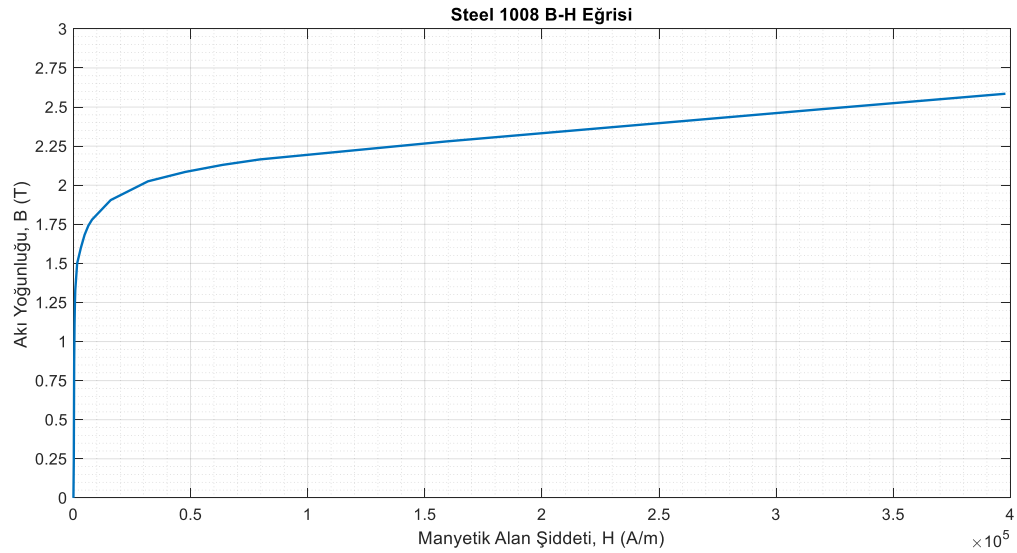
Bu bölümde tez çalışmanın özgün yanı olan ve SRM çalışma performansını etkileyen en önemli faktör olan “rotor tasarımı” üzerine çalışmalar yapılmıştır. EA-SRM, rotor d ve q eksenlerindeki endüktans farkı ile relüktans torkunun oluşması konsepti ile çalışmaktadır. Rotor bariyerlerindeki özgün tasarım ile bu endüktans farkı maksimize edilmeye çalışılmış ve tork dalgalanması minimize edilmiştir. Yapılan optimizasyonlar ile rotor bariyerlerinin sayısı, genişlikleri, bariyer başlangıç açıları gibi değişkenler optimum şekilde ayarlanmıştır. Sonuç olarak daha önceden yapılmamış ve özgün rotor topolojisi oluşturulmuştur.

Analitik olarak tasarlanmış EA-SRM’nin karakteristik eğrilerini çıkarmak için 3D-SEY ile analizleri yapılmıştır. Bariyer analiz ve tasarımları için SEY tabanlı benzetim programı ile çalışmalar yapılmıştır. SEY, akışkanlar dinamiği, elektromanyetik, magnetostatik ve termal iletkenlik gibi integral ve diferansiyel denklemler içeren eşitliklerin çözümü için kullanılan nümerik bir tekniktir. ANSYS programı, SEY gibi fiziksel problemlerin çözümü için kullanılan bir paket programdır. Bu çalışmadaki modeller ANSYS Electromagnetics Suite paket programı ile tasarlanmış ve analizleri yapılmıştır. Manyetik analizlerdeki hesaplama sürelerini azaltmak için stator-rotor bariyer uyumları göz önüne

alınarak EA-SRM'nin 1/8 motor modeli kullanılmıştır. Motor parçalarında materyal olarak, Stator için JFE_Steel_35JN300 ve rotor için Steel_1008 laminasyon çelikleri tercih edilmiştir. JFE_Steel_35JN300 ile nominal çalışma şartlarında $1.85 T$ 'ye kadar tatmin edici performans elde edilmektedir ve $1.5 T - 50 Hz$ koşullarında $2.6 W/kg$ demir kayıpları meydana gelmektedir. Kullanılan materyallerin B-H eğrileri (manyetik alan şiddeti-akı yoğunluğu) sırasıyla Şekil 3.19 ve 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3.19. 35 JNE 300 B-H Eğrisi



Şekil 3.20. Steel 1008 B-H Eğrisi

Motor da üretilecek tork değeri Eşitlik 3.101’de verilmiştir.

$$T_{em} = \frac{3}{2}p(L_{md} - L_{mq})i_{md}i_{mq} = \frac{3}{2}p(L_{md} - L_{mq})I_m \sin(2\gamma) \quad (3.101)$$

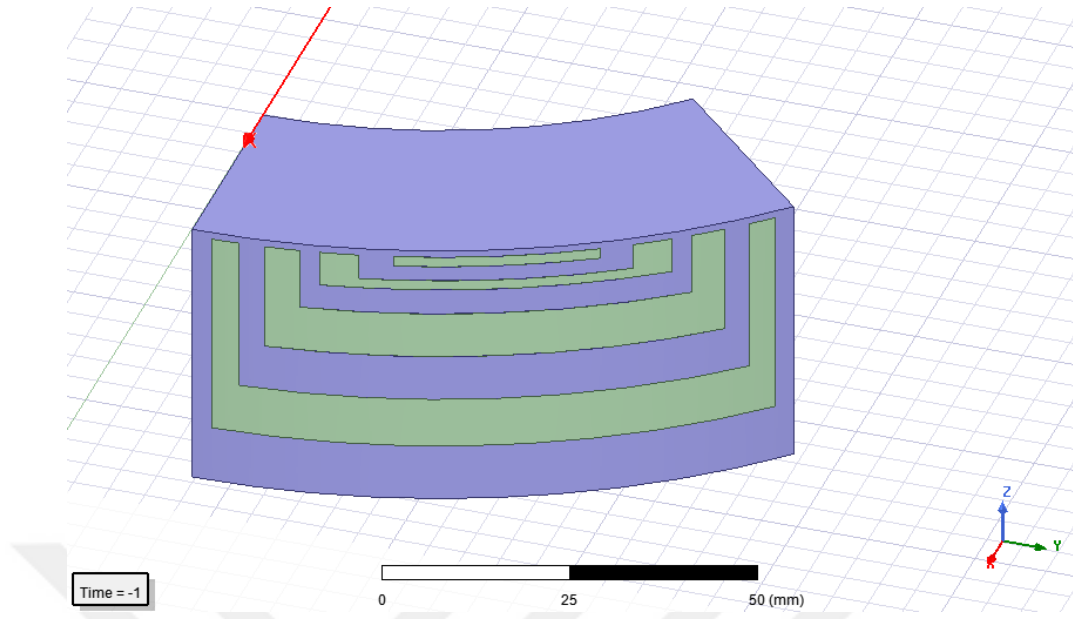
Eşitlik 3.101’de L_{md} ve L_{mq} d ve q eksenlerinde hava aralığındaki endüktansları, i_{md} ve i_{mq} d ve q eksenlerindeki stator akımlarını, I_m stator akımının vektör genliğini ve γ ise akım açısını ifade etmektedir. Eşitlik 3.101’de görüldüğü üzere tork değeri rotorun yapısı ve geometrisi ile doğrudan ilişkilidir. EA-SRM rotor yapısındaki bariyer ve segmentlerin oranları yalıtım oranı (k_{wq}) olarak isimlendirilmektedir.

$$k_{wq} = \frac{l_a}{l_y} \quad (3.102)$$

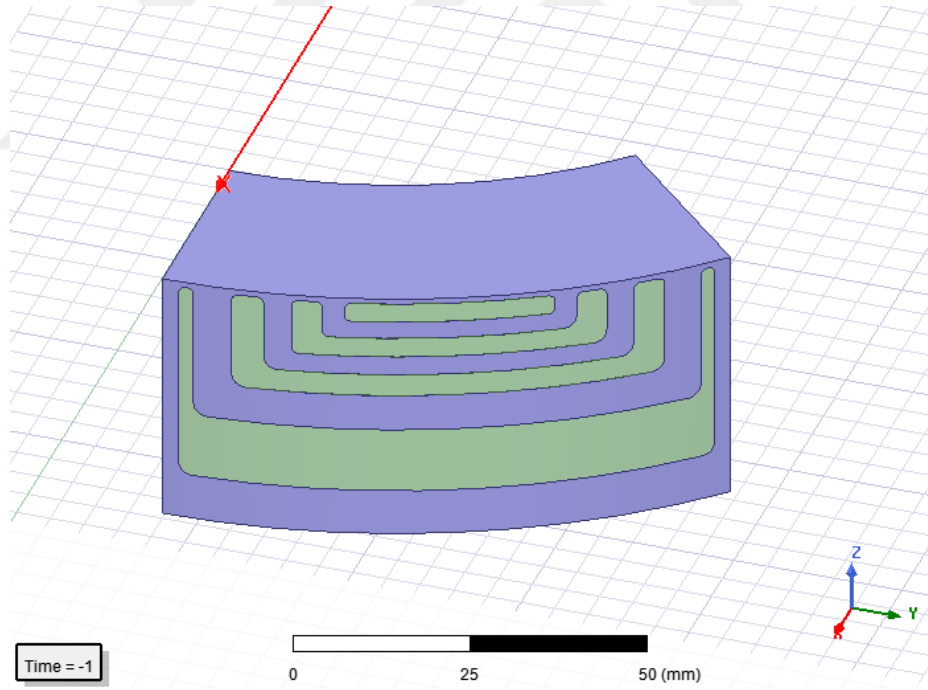
l_a toplam bariyer genişliğini ve l_y ise toplam demir genişliğini ifade etmektedir. Burada amaç optimum tasarımı bularak torku maksimize etmek ve tork dalgalanmasını en aza indirmektedir. Literatürde RA motorlar için k_{wq} değerleri 0.4, 0.6, 1, 1.2 ve 1.5 gibi değerler alınarak çalışmalar yapılmıştır (Moghaddam, 2007; Ibrahim ve ark., 2016; Aghazadeh ve ark., 2019). SRM’lerin rotor bariyer tipi, rotor bariyer sayısı ve rotor yalıtım oranı ile ilgili literatür özetleri bölümünde çok sayıda çalışmaya yer verilmiştir.

Analizi yapılacak motorun rotor kalınlığı hesaplamalar ve üreticiden gelen dönütler sonrası 39 mm seçilmiştir ve önceki çalışmalarda belirlenen hesaplamalar ile 3 farklı yalıtım oranlarında, boyutlandırmalar matematiksel olarak hesaplanmıştır.

Karşılaştırmak için iki model seçilmiştir. Model A ve Model B olarak isimlendirilecektir. Model A’da bariyer yapısı köşelidir. Model B’de ise bariyer köşeleri açılı olarak yuvarlatılmıştır. Model A Şekil 3.21’de ve Model B ise Şekil 3.22’de gösterilmiştir.

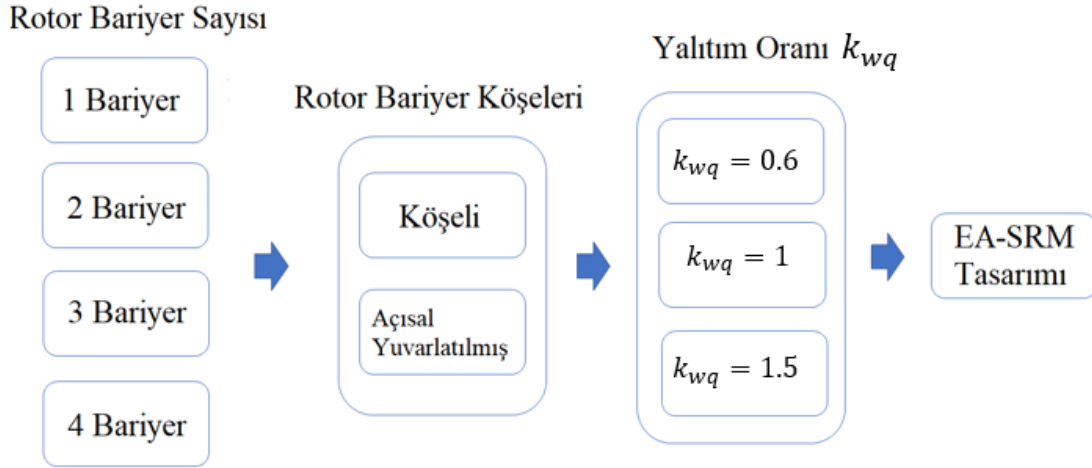


Şekil 3.21. EA-SRM rotor tasarımı Model A



Şekil 3.22. EA-SRM rotor tasarımı Model B

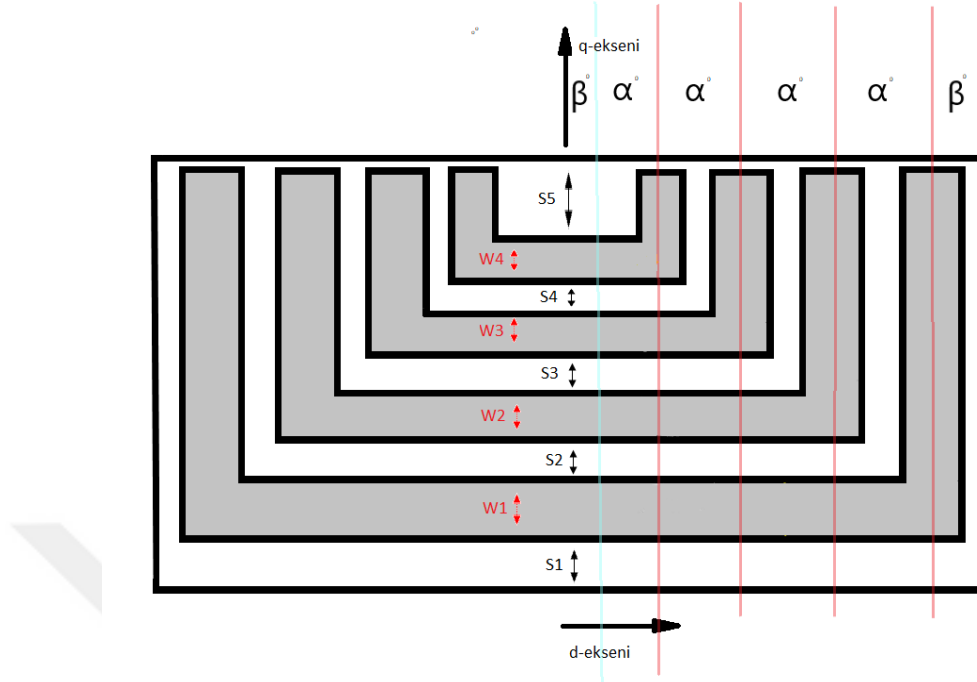
EA-SRM tasarımında Şekil 3.23'te gösterilen aşamalar izlenmiştir. Bu aşamalardaki parametrelerin değişimi, maliyet, verim ve üretilebilirliği için önemlidir (Ozcelik ve ark., 2019). Hava aralığı yapılan hesaplamalar ve aynı güçteki RA motorlardan yararlanılarak 0.3 mm alınmıştır.



Şekil 3.23. EA-SRM SEY tasarım aşamaları

Model A ve Model B için 4 farklı bariyer yapısı (1-2-3 ve 4 bariyerli) analiz edilmiştir. Literatür ve üretimsel açıdan bu bariyer sayıları seçilmiştir. Ayrıca her bir model için 3 farklı yalıtım oranlarında analizleri yapılmıştır (0.6-1 ve 1.5). Toplamda 24 adet model incelenmiş olup tork, tork dalgalanması, güç, güç faktörü, çıkıntı oranı, akım başına tork ve endüklenen gerilim analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Her iki modelde en uygun değerler seçilip tork dalgalanmasını minimize etmek için optimizasyon analizleri yapılmıştır. Son durumda üretim için en uygun model seçilmiş olacaktır.

Hesaplanmış oranları belirtmeden önce S1, S2... ve W1, W2... gibi ifadelerin hangi ölçütleri ifade ettiği Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Eksenel Akılı SRM rotor segment (S) ve bariyer (W) parametreleri

α bariyer başlama açısını ve β ise kontrol açısını belirtmektedir. Bariyerlerin ve segmentlerin hesap oranları bir kere hesaplanıp her iki modelde 39 mm rotor genişliği için ANSYS yazılım programında rotor tarafları oluşturulacaktır.

k_{wq} yalıtım oranını ifade etmiş olup bariyer genişliğinin segment genişliğine oranıdır. Rotor genişliği 39 mm alındığında Çizelge 3.4'teki genişlikler üzerinden segment ve bariyerler detaylandırılacaktır. Bu çalışma için literatürde örnekleri bulunan 0.6 – 1 – 1.5 oranlarında hesaplanacaktır.

Çizelge 3.4 EA-SRM yalıtım oranları hesapları

	$k_{wq} = 0.6$		$k_{wq} = 1$		$k_{wq} = 1.5$	
	$W_{bariyer}$	$W_{segment}$	$W_{bariyer}$	$W_{segment}$	$W_{bariyer}$	$W_{segment}$
$L_{rotor} = 39 \text{ mm}$	14.625 mm	24.375 mm	19.5 mm	19.5 mm	23.4 mm	15.6 mm

3.8. GA ve Optimizasyon

Bu çalışmada optimizasyon aşamasında kullanılacak olan GA sayısal optimizasyon yöntemlerinden biridir. Bir problemin çözümünün zorlaştığı durumlarda, geleneksel yöntemlerle çözülemeyecek durumlarda kullanılmaktadır. GA'lar evrimsel hesaplama tekniğinin bir parçasıdır ve deneysel çalışmalarda optimizasyon aşamasında kullanılır. GA, büyük veri kümelerinden (popülasyon) belirtilen kısıtlara göre en uygun verilerin (bireylerin) belirlenmesinde kullanılan gelişmiş bir optimizasyon yöntemidir. Bu nedenle geometrik optimizasyon çalışmalarında oldukça tercih edilmektedir. Endüstriyel uygulamalarda ve sınıflandırmalarda uygulama alanı bulan genetik algoritmalar mühendislik alanında en çok optimizasyon amaçlı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca alışılmış diğer yöntemlere göre çok daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. GA'lar bazı doğal olaylar göz önünde bulundurularak oluşturulmuş algoritmalarlardır. Bu algoritmalar biyolojik evrimin işleyiş özelliklerini taklit ettikleri için GA olarak isimlendirilmiştir (Turan, 2021).

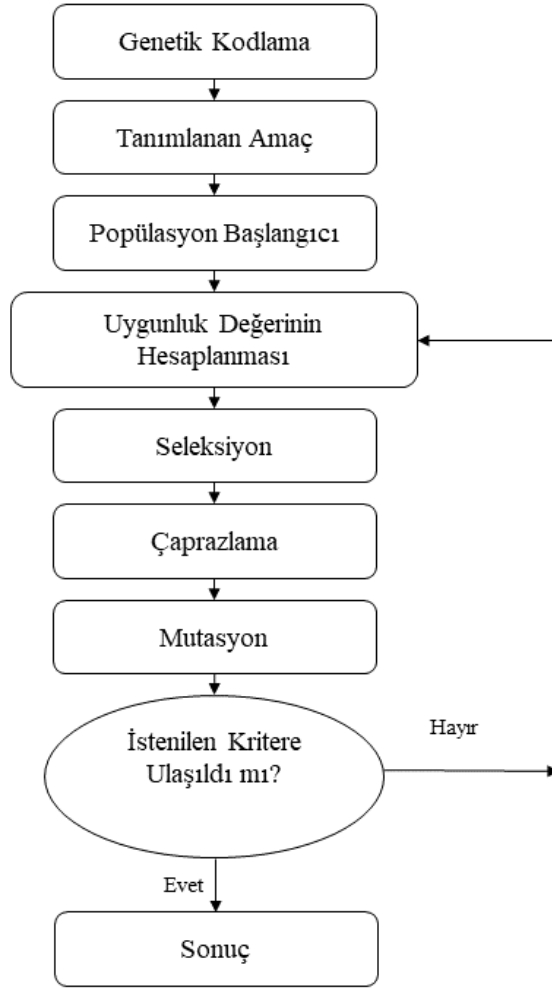
GA popülasyon temelli bir optimizasyon yöntemidir. Popülasyonu oluşturan aday çözümlerin soyut bir tanımlaması olan ve kromozom, genotip, gen gibi isimlerle ifade edilen değerler, türlü evrimsel tabanlı uygulamalar sonucu daha iyi sonuçları temsil eden çözüm adaylarına dönüşürler (evrimleşirler). Bu uygulama kabul edilebilir bir uygunluk değerine ulaşana kadar veya daha önceden belirlenen bir uygulama süresi, nesil sayısı gibi kriterler yerine getirilene kadar sürdürülür (Kevran, 2009).

Şekil 3.25'te GA akış şeması gösterilmiştir. Bu şemadaki aşamalar şu şekilde özetlenebilir; GA tasarım sürecinde öncelikle seçim yapılacak popülasyonun belirlenmesi gerekmektedir. Daha sonra algoritma kullanıcı tarafından belirlenen ya da popülasyondan rasgele seçilen başlangıç değerleri ile çalışmaya başlamaktadır. Bir sonraki adımda her popülasyon bireyi için ayrı bir uygunluk değeri hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu uygunluk değeri ile hedefe en yakın sonucu veren giriş verilerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Hesaplama sonucunda en yüksek değere sahip giriş verisi bir sonraki iterasyona doğrudan aktarılmakta, diğer giriş verileri ise mutasyon ve çaprazlama işlemlerine tabi tutularak bir sonraki iterasyon da kullanılmaktadır (Bianchi ve Bolognani, 1998; Sooriyakumar, 2010; Mutluer ve Bilgin., 2012; Mahmoudi ve ark., 2013; Dinh, 2017; Mutluer, 2018; Ruba ve ark., 2018).

GA, paralel ve genel arama yapan algoritmalarlardır. Aynı anda arama uzayının birçok yerinde paralel olarak arama yapabilmekte ve çözüme daha hızlı bir şekilde ulaşabilmektedir. GA problemlere tek bir çözüm üretmez. Bunun yerine farklı çözümlerin olduğu bir çözüm kümesi üretir. Bu sayede, arama alanındaki birçok nokta kontrol edilebilmekte ve çözüme ulaşma olasılığı artmaktadır. GA sezgisel bir algoritma olduğu için problemlerin çözümünde her zaman en iyi çözümü bulamayabilir, fakat geleneksel yöntemlerle çözülemeyen ya da çözüm süresi uzun olan problemler için en iyi çözüme yakın çözümler üretebilirler (Tuncer, 2013).

GA Avantajları; Karmaşık amaç fonksiyonlarına ait parametreleri yerel minimum ya da maksimumlara takılmadan optimize edilmesi, Çok sayıda parametrelerle çalışma imkânına sahip olması, Kısa sürede iyi sonuçlar vermesi, Zaman kısıtlamalarını hesaba katan en yakın çözümlerden biri olması, Tek çözüm yerine birden fazla parametrelerin optimum çözümlerini elde edebilmesi olarak sıralanabilir.

GA Dezavantajları; Verilen çözümler her zaman en iyi çözüm olamayabilir. Son kullanıcılar tarafından modelin anlaşılması zordur. Problemi ve verileri GA'ların kullanabileceği forma sokmak bazen güçtür. Genetik işlem parametrelerini belirlemek zordur (Sara, 2019).



Şekil 3.25. GA akış şeması

Akış şemasındaki aşamalar şu şekilde detaylandırılabilir:

Genetik kodlama

GA’da nüfusun her bir üyesi bir kodla temsil edilmektedir. GA için ikili kodlama, gray kodlama, tam sayı kodlama, gerçel sayı kodlama, vektör kodlama ve ağaç kodlama gibi çeşitli kodlama seçenekleri bulunmaktadır. Hangi tür kodlamanın kullanılacağı problemin yapısına uygun olarak belirlenmektedir. Sıklıkla kullanılan kodlama biçimleri ikili kodlama ve gerçel sayı kodlamalardır (Tuncer, 2013). Kodlama işlemi genler üzerinde yapılmaktadır. Bu nedenle, öncelikle gen, kromozom ve popülasyon tanımlarının yapılması uygun olacaktır (Kıyak, 2013).

Gen: Kalıtsal molekülde bulunan ve organizmanın karakterlerinin tayininde rol oynayan kalıtsal birimlere denir.

Kromozom (Birey): Birden fazla genin bir araya gelerek oluşturduğu diziye denir. Genlerin kromozom içindeki sıraları da önemli olabilmektedir.

Nüfus (Popülasyon): Kromozomlardan oluşan topluluğa denir. Nüfustaki kromozom sayısı arttıkça çözüme ulaşma süresini ifade eden iterasyon sayısı azalmaktadır (Kıyak,2013).

Tanımlanan amaç

Amaç fonksiyon, nüfus içerisindeki bireylerin genetik gelişimini sağlayan mekanizmanın temelini oluşturmaktadır. GA ile çözümü aranan problem arasındaki tek bağlantıdır. Amaç fonksiyon, bireyi bir giriş olarak alır ve çözümü ne derece karşıladığının ölçüsünü gösteren bir sayı üretir. Ürettiği sayının aralığı problemde problemde değişmektedir (Tuncer, 2013).

Başlangıç popülasyonunun yaratılması

GA’da başlangıç popülasyonunu oluşturmak üzerinde genetik operatörlerin uygulanacağı kromozomların belirlenmesi demektir. GA’da başlangıç popülasyonu tamamen rassal oluşturulabileceği gibi başka basit sezgisel yöntemlerle elde edilen çözümlerde başlangıç popülasyonunu oluşturabilir (Ayhan, 2021).

Başlangıç popülasyonunda mümkün olabilecek çözümler kodlanır. Sistemin çözüm grubu oluşturulur. Biyolojide yer alan popülasyona benzerliği sebebiyle çözüm grubuna popülasyon, bu çözümlerin kodlarına da kromozom adı verilmiştir. Bu adıma başlanırken ilk olarak popülasyonda bulunan birey sayısı belirlenir. Belirlenecek bu sayı için bir genelleme bulunmaz. Bu sayının ne kadar seçileceğinde yapılan işlemlerin karmaşıklığı ve aramanın derinliği dikkate alınır. Bu aşamadan sonra popülasyon rastgele oluşturulur (Turan, 2021).

Uygunluk değerinin hesaplanması

GA’da uygunluk değerinin hesaplanması, her bir kromozomun uygunluk fonksiyonuna tabi tutularak sonucunun elde edilmesi şeklinde yapılır. Bu işlem evrimsel süreçte “Kimin daha iyi veya kimin daha kötü” olduğunun seçilmesi işlemine tekabül eder. Bu işlem GA

için zorunlu bir işlem olup uygunluk fonksiyonu belirlenemeyen problem türleri için GA uygulanamaz. Bir diğer taraftan uygunluk fonksiyonunun sadece 0-1, evet-hayır, doğru-yanlış vb. değerler üretmesi, o uygunluk fonksiyonunun kullanılmayacağı anlamına gelir. Çünkü GA’da aday çözümler (kromozom), her nesilde yapılan işlemler sonucu “giderek daha iyi” bir sonuca ulaşır. Uygunluk fonksiyonları bazı problem tiplerinde hesaplama maliyeti yüksek fonksiyonlar olabilmektedir. Bu durumda problemin çözümü için GA’nın kullanılmaması, problemin daha kısıtlı bir arama uzayında çözümü ya da kullanılacak uygunluk fonksiyonu olarak belirli varsayımlarla yaklaşımlı bir fonksiyon kullanımı tavsiye edilmektedir (Kevran, 2009).

Seleksiyon

Eldeki topluluktan yeni topluluk meydana getirmek için çaprazlama ve mutasyon işlemine alınacak bireylerin belirlenmesi gerekmektedir. GA teorisinde iyi olan bireyler yaşamaya devam etmelidir. Sonra da bu bireyler kullanılarak yeni bireyler elde edilmelidir. Bu yüzden seçim yöntemlerinin hepsinde uygunluk değeri en iyi olan bireylerin seçilme ihtimali de artmaktadır. Bu doğal seçimdeki en uygun olan iynin yaşaması haline benzer bir durumdur. Bu teknik ortalama uygunluğun üzerinde bulunan değerlere çoğalma fırsatı tanımayı amaçlamaktadır. Bir dizinin uygunluk fonksiyonuyla hesaplanan uygunluk değerine göre o dizinin kopyalanma ihtimali artar. Rulet seçilimi, Turnuva seçilimi, sıralı seçim vb. en çok tercih edilen seçim yöntemleridir (Turan, 2021).

Uygunluk değeri yüksek olanların seçilme ve yeni topluma aktarılma şansı daha yüksektir. Böylece bir yandan yüksek uyumluluğa sahip bireyin bir sonraki nesile aktarılamama olasılığı ortadan kaldırılırken, diğer yandan da yeni toplumun maksimum veya ortalama uygunluk değerinde beklenen artışın optimum çözümün uygunluk değerine de yansması söz konusu olacaktır. Ebeveyn olarak isimlendirilen bu kromozom çiftine ait özellikler, üreme sonucunda yeni popülasyona aktarılmaya çalışılmaktadır. Seçilen uyumlu kromozomlardan daha uyumlu bireyler elde etmek için çaprazlama ve mutasyon işlemlerinin uygulanması gerekmektedir (Sara, 2019).

Çaprazlama

Popülasyonu oluşturan tüm kromozomlar uygunluk fonksiyonuna tabi tutulduktan sonra yeni ve daha iyi uygunluk değerine sahip kromozomların oluşturulması maksadıyla, uygunluk değeri nispeten daha kötü kromozomlar yerine, uygunluk değeri nispeten daha iyi kromozomlardan çaprazlama yöntemiyle yeni kromozomlar oluşturulur. Çaprazlama işlemi, iyi değere sahip kromozomların “birikiminin” yeni kromozomlara aktarılması fonksiyonunu yerine getirir. Çaprazlama işlemi genellikle tüm kromozomlar üzerinde uygulanmaz, ancak uygulanırsa en iyi kromozom değerlerinin kaybolmasını engellemek maksadıyla genellikle elitizm yöntemi kullanılır. Çaprazlama işlemi genellikle iki ebeveyn kromozomdan alınan genlerle oluşturulur ve kromozomun başlangıç noktasında belirlenecek bir noktaya kadar olan genler ilk ebeveyn kromozomdan, söz konusu noktadan sonrasındaki genler ise ikinci ebeveyn kromozomdan alınarak yapılır. Ancak benzer şekilde çoklu ebeveyn ve çok noktalı çaprazlamalar da kullanılabilir (Kevran, 2009).

Mutasyon

Mutasyon doğada olduğu gibi genetik algoritma uygulamalarında da geri planda kalan bir operatördür. GA'nın çalışmasında ikinci dereceden rol oynar. GA'larda mutasyon operatörü, küçük bir olasılıkla bir kromozom içindeki bir veya birkaç geni rastgele değiştirerek, arama uzayında yeni çözüm noktalarının elde edilmesini sağlar. Mutasyon, nüfustaki ebeveynlerden çocuk kromozomların üretimi tamamlandıktan sonra, çocuk kromozomların herhangi birisinin herhangi bir geninin değiştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. İkilik kodlamada, seçilen herhangi bir bit 1 ise 0 veya 0 ise 1 olarak değiştirilmektedir. Tamsayı kodlamada ise, seçilen tamsayı yerine başka bir tamsayı yazılarak gerçekleştirilmektedir (Kıyak, 2013).

Doğal evrimde mutasyon, bir genin bir elementinin yeni bir genetik yapı üretmek için bir başkasıyla değiştirildiği rastgele bir süreçtir. GA'larda mutasyon tipik olarak 0,001 ve 0,01 aralığında düşük olasılıkla rastgele uygulanır ve kromozomlardaki genleri değiştirir. Arka planda çalıştığı kabul edilen mutasyon operatörü, genellikle aranan bir dizinin sıfır olmamasını sağlamak ve seçim ve çaprazlama işlemlerinde kaybolma ihtimali olan iyi genetik materyallerin geri kazanımı için bir güvenlik ağı olarak çalışmaktadır (Çelik, 2021).

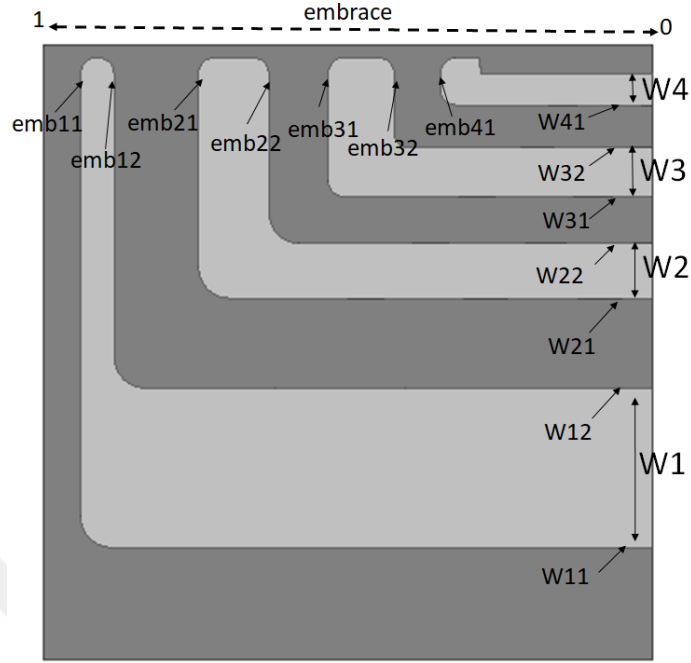
GA ile optimizasyon

Model A ve Model B üzerinde yapılan analiz sonucunda özellikle tork dalgalanması açısından en uygun değerlerdeki 4 bariyerli ve yalıtım oranı 0.6 olan modeller seçilerek Ansys Maxwell programında optimizasyon analizleri yapılmıştır. Tork konusunda istenilen değerlere ulaşılmıştır fakat tork dalgalanması konusunda en uygun değerlere ulaşmak için optimizasyonda istenilen hedef bu yönde olmuştur. Optimizasyon analizinde yöntem olarak GA seçilmiştir.

EA-SRM tork dalgalanması optimizasyon analizlerinde rotor bariyerlerinin $-q$ eksenindeki kalınlıkları ve bariyer uçlarının genişlikleri değiştirme yöntemi uygulanacaktır. Optimizasyonda teğetsel kırımlar sabit tutulacak olup 0.8 mm alınmıştır. Bariyer uçlarının genişlikleri, bir rotor kutbunun orta noktası ile başlayan ve diğer rotor kutbunun başladığı yere kadar olan uzunluğu ifade eden, 0 ile 1 birim aralığında *embrace* olarak tanımlanan *emb* parametresinin değişimi ile optimize edilecektir. Her bariyerin *embrace* eksenindeki başlangıç ve bitiş noktaları sırasıyla Şekil 3.42’de gösterilmiştir. *W1* bariyerinde bariyer uçlarının *embrace* eksenindeki genişlikleri için *emb11* ve *emb12* noktaları tanımlanmıştır ve bu noktaların *embrace* ekseninde değişimi ile optimizasyon yapılacaktır. *W2*, *W3* ve *W4* içinde aynı yöntem izlenecektir.

$-q$ ekseninde ise bariyer kalınlıkları milimetrik olarak değiştirilerek tork dalgalanmasının düşürülmesi hedeflenmiştir. *W1* bariyerinin stator a yakın noktasının rotor merkezine olan uzaklığı *W12* ve diğer noktası *W11* analitik olarak hesaplanmıştır. *W2*, *W3* ve *W4* bariyerlerinde aynı şekilde kalınlıkları bu şekilde hesaplanmıştır. Optimizasyon için her bariyerin tanımlanmış ve hesaplanmış noktalarının (*W11*, *W12*, *W21* ... *W41*, *W42*) değişimi yöntemi izlenecektir. Bariyerlerin $-q$ eksenindeki değişimlerinde, bariyerlerin analiz süresince değişeceği aralıkları belirlemek gerekmektedir. Rotor bariyer optimizasyonunda değişim yapılacak aralıklar ve noktalar Şekil 3.42’de gösterilmiştir.

Bu noktalarının değişim aralıkları belirlenirken analiz süresince birbirleri ile çakışmaması ve üretilebilir olması önemlidir. Özgün olarak tasarlanmış EA-SRM rotor bariyerlerinin değişimi odaklı optimizasyon yapılmıştır.



Şekil 3.26. Rotor bariyer optimizasyonunda değişim yapılacak aralıklar

3.9. EA-SRM Kayıpları ve Termal Analiz

EA-SRM'nin termal davranışının belirlenmesinde doğru modelin oluşturulması, malzeme seçimi ve kayıpların doğru belirlenmesi oldukça önemlidir. Modelleme esnasında bazı varsayımlar yapılır. Bunlar; izolasyon malzemesinin sargıları tamamen kapladığı, stator ve rotor demir kayıplarının homojen ısı üretiminde sabit kaldığı ve motor malzemelerinin ısı iletkenlikleri izotropik olduğudur (Elhomdy ve ark., 2019).

Elektrik motorlarında kullanılan malzemelerin büyük bir kısmının ısıya duyarlı olması sebebiyle termal analizin önemini artırmaktadır. Isı iletiminde kullanılan üç ana metod vardır. Bunlardan ilki olan taşıma-iletim yönteminde ısı transferi doğrudan materyallerin birbiriyle teması ile sağlanırken, aktarım yönteminde ise ısı transferi sıvı veya gaz vasıtasıyla sağlanır. Son yöntem olan radyasyon' da ise ısı enerjisi ısı dalgaları şeklinde transfer edilir (Elhomdy ve ark., 2019). İzotropik ortam için, kararlı hal ısı transferini yöneten denklemler ve sınır koşulları Eşitlik 3.103'teki gibi tanımlanabilir.

$$k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + h_{cv}(T - T_{amb}) = Q \quad (3.103)$$

Eşitlik 3.102' de verilen k termal iletkenliği, T_{amb} ve T sırasıyla ortam sıcaklığını ve bilinmeyen sıcaklığı, Q ise ısı kaynağını temsil etmektedir. Isı kaynağı motorda ısı

artışını sağlayan kaynak olup elektrik motorlarında meydana gelen kayıplar tarafından beslenmektedir. Genel itibariyle elektrik motor kayıpları; bakır kayıpları, nüve kayıpları ve mekanik kayıplar olarak sınıflandırılır. Nüve kayıpları ferro manyetik malzeme olan stator ve rotorda gerçekleşir. Manyetik malzemedeki akı yoğunluğu, besleme voltajı, frekans ve makinanın geometrisine bağlı olarak değişir (Pyrhonen ve ark., 2013). Nüve kayıpları elektrik makinalarında ısı artışı ve verimde düşmeye sebep olmasından ötürü tasarımcılar tarafından dikkatle üzerinde durulan hususlardandır. Nüve kayıpları P_{Fe} ile temsil edilir ve W/m^3 cinsinden Eşitlik 3.104'te de verildiği gibi tanımlanır (Bertotti, 1988).

$$P_{Fe} = P_h + P_e + P_{ex} = k_h f B^\alpha + \frac{\sigma(\pi d)^2}{6\rho} f^2 B^2 + k_{ex} f^{1.5} B^{1.5} \quad (3.104)$$

Eşitlik 3.104'te verilen P_h , P_e ve P_{ex} sırasıyla histerisiz, eddy ve aşırılık kayıpları, B ve f ise manyetik akı yoğunluğu ve frekansı temsil eder. k_h , k_{ex} ve α ise ilgili kayıplara ait katsayılarıdır. SRM'lerde nüve kayıpları birçok araştırmacı tarafından da detaylıca incelenmiştir (Longya ve Jiping, 1992; Jung Chul ve ark., 1998; Fernandez-Bernal ve ark., 2000; Fasquelle, 2007; Yamazaki ve Fukushima, 2010).

Elektrik motorlarında meydana gelen ve en büyük ısı kaynağı olan kayıp ise Joule kaybı olarak bilinen bakır kayıplarıdır. SRM'nin topolojisinden kaynaklı olarak sadece statorunda meydana gelen bakır kayıpları motor tüm kayıplarının yaklaşık %96'sı civarındadır (Wu ve ark., 2017). Bakır kayıplarının hesaplanmasında kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$P_{cop} = 3R_s I_{RMS}^2 \quad (3.105)$$

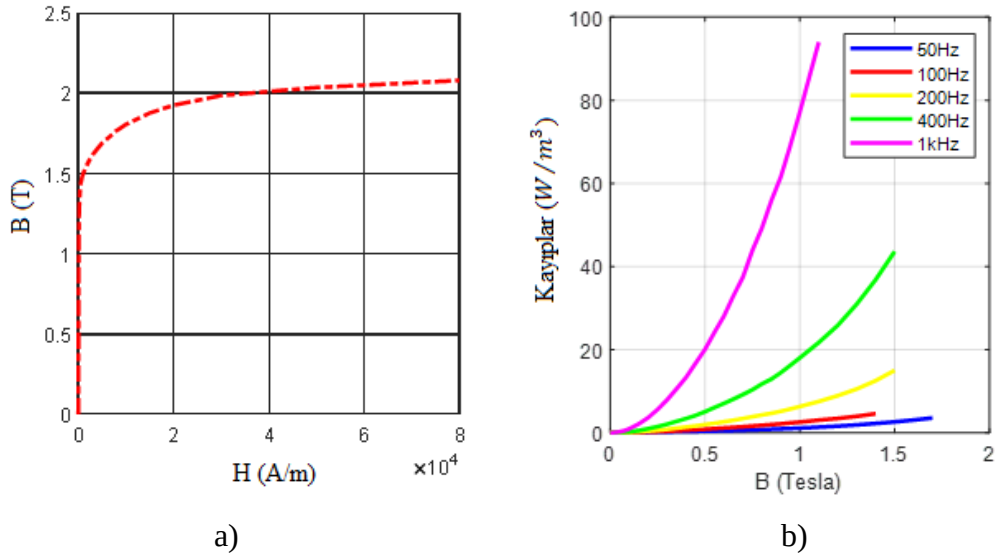
Eşitlik 3.105'te verilen R_s stator sargılarının iç direncini, I_{rms} ise stator akımının rms değerini temsil etmektedir. Sargı iç direncinin sıcaklığa bağlı değişimi eşitlik 3.106'te ve bakır kayıplarının yeni hali ise Eşitlik 3.107'da verilmiştir (Adouni ve ark., 2019).

$$R_s(T) = [1 + \alpha_{cop}(T - T_0)]R_s(T_0) \quad (3.106)$$

$$P_{cop}(T) = 3R_s(T_0)[1 + \alpha_{cop}(T - T_0)]I_{RMS}^2 \quad (3.107)$$

Eşitlik 3.107’de görüleceği üzere stator sarılarında meydana gelen sıcaklık artışı sargı direncini artırmaktadır. Bu durum motorun en verimli çalıştığı hız-moment bölgesini değiştirirken, sargılarda meydana gelecek izolasyon arızaları ise plansız duruşlara sebebiyet verecektir.

Termal analiz sonuçlarının doğru sonuç verebilmesi için manyetik taraftaki kayıpların doğru şekilde termal analiz programına aktarılması gerekmektedir. Manyetik tasarım, analiz ve kayıpların belirlenmesinde Ansys Maxwell programı kullanılmıştır. Sabit akım kaynağı altında MTPA yöntemine göre sürülen motorun ferro manyetik malzemesinde kullanılan sacın manyetik özellikleri Şekil 3.27’de verilmiştir. Eğrilerden görüleceği üzere doyum noktasına yakın ve yüksek frekansta çalışacak olan motorda kayıplarda artmaktadır. Termal analizler için yapılan SEY analizi ve deneysel sonuçlar Bulgular ve Tartışma bölümünde gösterilmiştir.

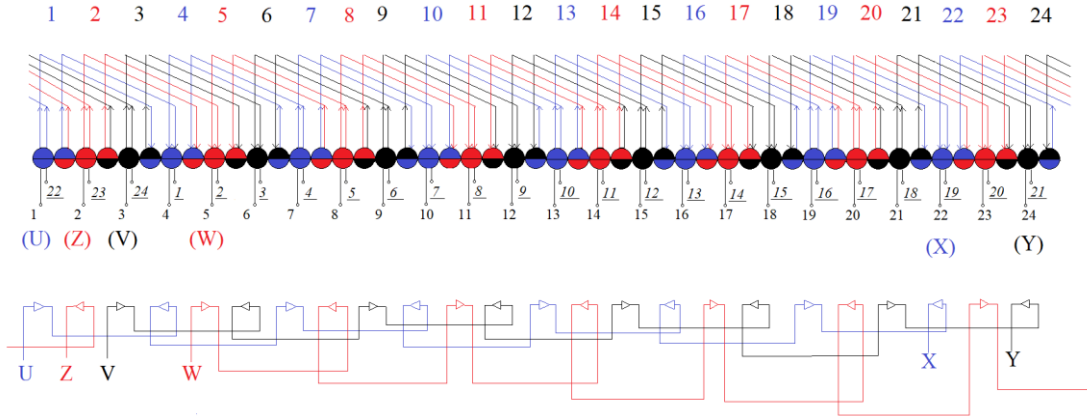


Şekil 3.27. EA-SRM’de kullanılan ferro manyetik malzemenin manyetik özellikleri

3.10. Prototip Üretimi

Önceki bölümlerde EA-SRM'lerin tasarım süreci detaylı olarak incelenmiş ve yeni bir EA-SRM topolojisi önerilmiştir. Ayrıca yürütülen çalışmalar kapsamında önerisi sunulan yeni motor modelinin performans açısından iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılarak nihai motor modeli elde edilmiştir. Elde edilen nihai motor tasarımının çalışma karakteristiği ve performansı ile ilgili detaylı analiz çalışmaları yapılarak elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Elde edilen EA-SRM'nin prototip üretimine yönelik yapılan çalışmalara bu başlık altında yer verilmiştir.

Önerilen prototipte özgün tarafın rotor olmasından dolayı, ASM'lerde bulunan stator yapısı kullanılmıştır. Stator nüvesinin imal edilmesinde silisli çelik sac tercih edilmiştir. Rotor tarafı üretiminde bariyerlerin açılması gibi süreçler içermektedir ve rotor bütünlüğünün bozulmaması için solid yapı seçilmiştir. Talaşlı imalat yöntemi ile bariyer köşeleri yuvarlatılmış olarak açılmıştır. Motor gövdesi ise alüminyum seçilerek imalatlara başlanmıştır. Stator 48 oluklu ve 8 kutupludur, stator sargıları ise tam kalıp ve kısa adımlı olarak sarılmıştır. Sargı şeması Şekil 3.28'de gösterilmiştir.



Şekil 3.28. 48 oluklu, 8 kutuplu, tam kalıp ve kısa adımlı EA-SRM stator sargıları gösterimi

Sarılmaya hazır stator nüvesi ve sargı aşamaları imalatları Şekil 3.29’da gösterilmiştir ve detayları aşağıdaki gibidir.

- (a) Sargıları yapılmamış-boyunduruk tarafı kaynaklanmış stator nüvesi
- (b) Sargı imalatına başlanmış hali
- (c) Sargı imalatına başlanmış hali (boyunduruk tarafından görünümü)
- (d) Sargıların tamamlanmış hali (hava aralığı tarafından görünümü)
- (e) Sargılı stator yandan görünümü
- (f) Sargıların bitmiş hali (hava aralığı tarafı)
- (g) Sargıların bitmiş hali (boyunduruk tarafından görünümü)



a)



b)



c)

Şekil 3.29. EA-SRM Stator imalat aşamaları



d)

e)



f)



g)

Şekil 3.29 (Devam). EA-SRM Stator imalat aşamaları

Şekil 3.30’da sunulan görsellerde EA-SRM rotorunun imalat süreçleri gösterilmiştir. Rotor imalatı ile ilgili detaylar aşağıdaki gibidir.

- (a) Rotor bariyerlerinin açılışı
- (b) Rotor bariyer ölçülerinin kontrolleri ve iç çapının ayarlanması
- (c) Rotor üretilmiş hali (hava aralığı tarafından görünümü)
- (d) Rotor üretilmiş hali (bariyerlerin dıştan görünümü)



a)



b)



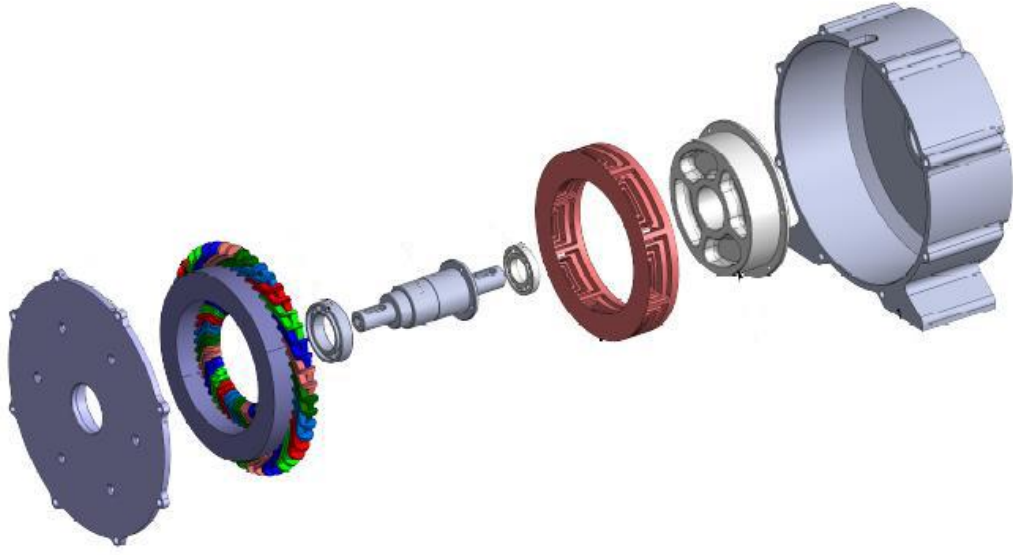
c)



d)

Şekil 3.30. EA-SRM Rotor imalat aşamaları

EA-SRM'nin stator ve rotor kısımları üretildikten sonra gövde kapağı ve gövde tasarımları Şekil 3.31'de gösterilmiştir.



Şekil 3.31. EA-SRM 3 boyutlu tasarımı

Şekil 3.31’de gösterilen 3 boyutlu tasarımdan sonra üretime ait fotoğraflar Şekil 3.32’de gösterilmiştir. Detayları şu şekildedir:

- (a) Motor gövde kapağı (dıştan)
- (b) Motor gövde kapağı (içten)
- (c) Rotor iç kapağı
- (d) Rotor iç kapağı rotora montajlı
- (e) Rotor şaftı
- (f) Epoksi malzeme ile doldurulmuş rotor
- (g) Rotor son hali
- (h) Motor gövdesi (iç görünümü)
- (i) Motor gövdesi son hali



a)



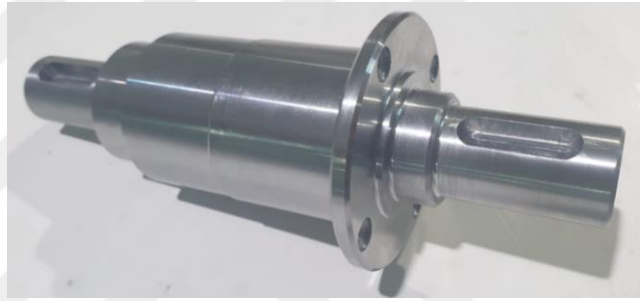
b)



c)



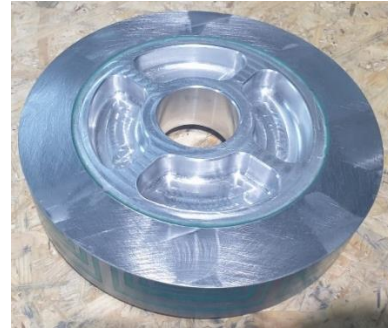
d)



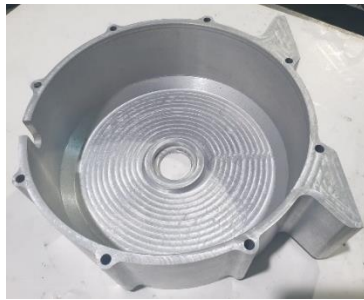
e)



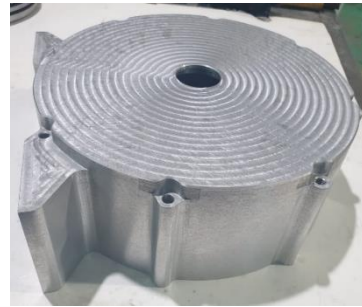
f)



g)



h)



i)

Şekil 3.32. EA-SRM gövde imalat süreçleri

3.11. Üretimi Yapılan Motorun Performans Testleri

Bu bölümde üretimi tamamlanmış olan EA-SRM prototipinin IEC 60034-30-2-1 standartlarına uygun şartlarda test çalışmaları yapılmış ve motor performans testleri yapılmıştır. Bu kapsamda motorun sargı direncinin bulunması, farklı yük profillerinde motorun performansı, motor verimi ve güç faktörünün belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Benzetim çalışmasındaki parametreler deneysel kısımda da seçilerek testler tamamlanmıştır. Bu doğrultuda tork, tork dalgalanması, verim, d-q eksen akımları ve güç faktörü parametreleri farklı yük durumlarında test edilmiştir. Test çalışmalarında halihazırda TOĞÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Mekatronik Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında mevcut olan motor test düzeneğinden yararlanılmıştır. Testler başlamadan önce motor-yük sistemi arasındaki hizalama, lazerli sistem ile yapılmıştır. Tüm testler sonuçlardaki doğruluğu artırmak için 3 tekrar şeklinde yapılarak sonuçların ortalaması kullanılmıştır.

İlerleyen bölümlerde öncelikle testlerin yapıldığı test düzeneği ve testler öncesinde yapılan hazırlık çalışmaları ile ilgili detaylara yer verilmiştir. Daha sonra yapılan testlerle ilgili detaylar, her test için ayrı ayrı tartışılmıştır.

3.11.1. Test düzeneği

Motor yüklemelerinin yapılmasına olanak sağlayan bir adet yük motoruna sahip test düzeneğine 100 Nm'ye kadar yüklemeleri algılayan bir yük hücresi yerleştirilmiştir. Bir kontrol bilgisayarı üzerinden kontrol edilen düzenek, bilgisayarda yer alan bir paket program aracılığı ile, test anında çekilen akım, gerilim, motor tarafından üretilen mil torku, konum bilgisi ve dönüş miktarı anlık olarak kaydetmektedir. Test düzeneği genel görünümü Şekil 3.33'te görülmektedir (Eker, 2017).



Şekil 3.33. Test düzeneği genel görünümü (Eker, 2017)

Şekil 3.33'te görüldüğü üzere test düzeneği: Test alanı (1), kumanda sehpası (2) ve güç ünitesi (3) olmak üzere üç ana kısımdan meydana gelmektedir.

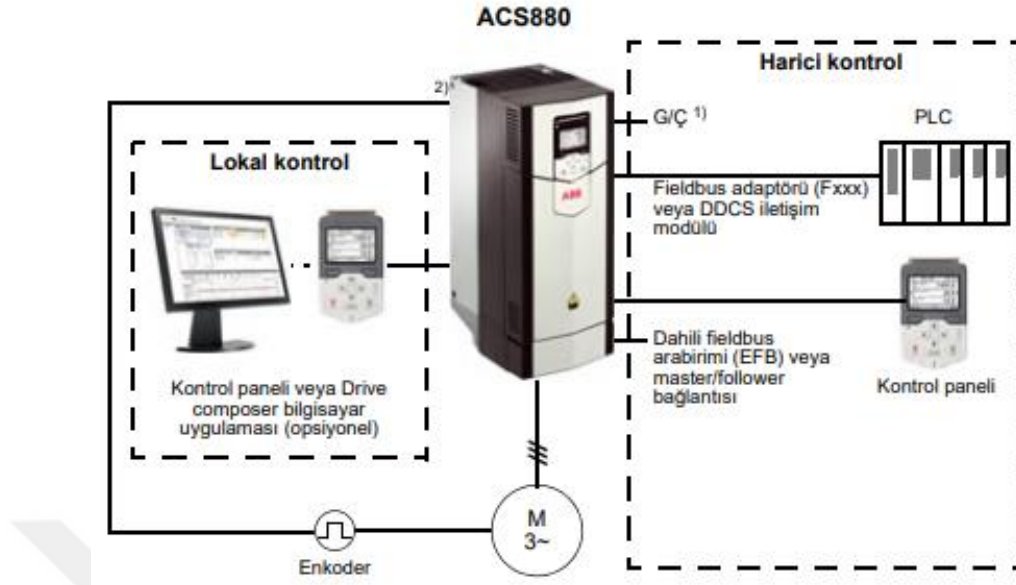
Şekil 3.34'te detaylı olarak gösterilmiş test düzeneği $1500\text{ mm} \times 700\text{ mm}$ çalışma alanına sahiptir. Sehpa üzerine, çalışma alanını ortalayacak şekilde kızaklı bir fikstür yerleştirilmiştir. Böylelikle yük motoru ile test motorunun aynı eksenle karşılıklı bağlanması olanaklı hale gelmiştir. Şekil 3.50 ile sunulan görselde üretimi yapılan prototipin test alanına bağlanmış hali görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi test birimi, test motoru (1) ve yük motorunun (4) karşılıklı bağlanmasına olanak sağlayan kapalı bir çalışma alanına sahiptir. Çalışma alanında testlerde yük görevi üstlenen bir adet 10 kW mil gücüne sahip Doğru Akım (DA) motoru yer almaktadır (4). DA yük motorunun maksimum devri 4000 d/d , nominal torku 2270 d/d 'da 42 Nm 'dir. DA motoru üzerinde dahili radyal fanlı bir soğutma ünitesi (5), motor devrinin ölçülmesi amacı ile bir adet motora akuple enkoder (Baumer EIL580 1024 darbe/devir) (7) ve bir adet tork sensörü (6) yer almaktadır. Tork sensörü olarak, kuvvet kolu ile motor gövdesine bağlanan IP66 Sınıfı, $(-300^{\circ}) - (+700^{\circ})$ sıcaklık aralığında çalışabilen ve 100 Nm 'ye kadar ölçüm aralığına sahip bir yük hücresi kullanılmıştır. Mil ekseninde döner serbestliğe sahip (3 numara ile gösterilen kaymalı tip yatak aracı ile) motor gövdesi üzerinde meydana gelen kuvvet gövdeye bağlanan kuvvet kolu aracılığı ile yük hücresi aktarılmaktadır.



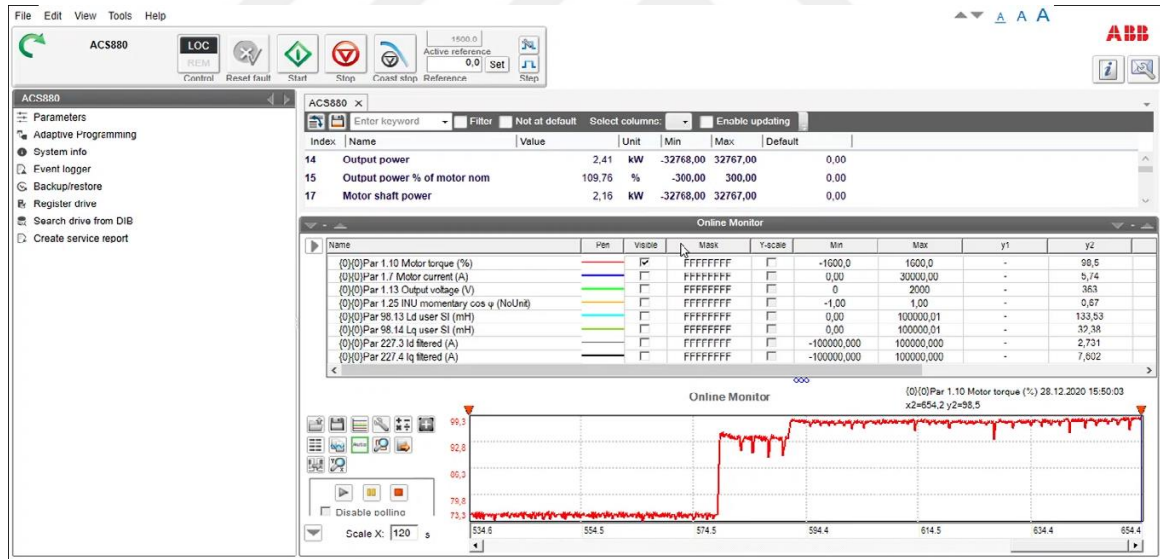
Şekil 3.34. Test düzeneği

Yukarıda motor testlerinin yapıldığı test düzeneği ile ilgili detaylar sunulmuştur. Söz konusu düzeneğe ek olarak testler esnasında test ortamından harici veri edinimi yapılmıştır.

EA-SRM motor sürücüsü olarak endüstriyel bir ürün olan ABB ACS-880 kullanılarak Direct Torque Modunda çalıştırılmıştır. Bu yöntemde her yük durumu için Akım Başına Maksimum Tork-MTPA sağlayan akım açısı tekrar hesaplanmaktadır. Sürücü parametre ayarları ve çalışma anındaki verileri gözlemlemek için operatör panel kullanılabileceği gibi Drive Composer Entry 2.5 arayüz programı da kullanılabilmektedir. Motor hız ve tork sinyallerinin kayıt altına alınmasında NI cDAQ-9174 Chassis ve NI 9239 voltage modülü kullanılmıştır. Şekil 3.35'te sürücü ve kontrol konumlarının görüntüsü gösterilmiştir (Anonim, 2013). Şekil 3.36'da Drive Composer Entry 2.5 arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 3.35. ABB ACS-880 Motor Sürücüsü



Şekil 3.36. Drive Composer Entry 2.5 program ara yüzü

Stator parametrelerinden sargı dirençlerinin sıcaklık ile değişimi motor performansı ve kayıplar açısından önemlidir. Motorun çalışmaya başlamadan önceki ve çalıştırılıp ısıtıldıktan sonraki ölçümlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Motor çalıştırılmadan önce stator dirençleri ölçülmüş ve aynı test sargılar ısıtıldıktan sonra tekrarlanmıştır. Direnç ölçümünde GW Instek LCR-819 model lcr metre kullanılmıştır (Şekil 3.37)



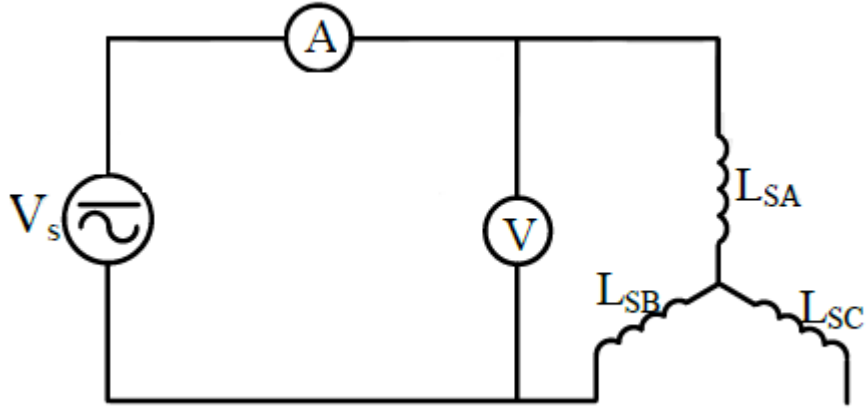
Şekil 3.37. LCR Metre ölçüm cihazı

3.11.2. EA-SRM parametrelerinin elde edilmesi

EA-SRM'nin faz direnci ve senkron endüktansı, motor davranışını tanımlayan temel parametrelerdir. Parametrelerin ölçülmesi için konum bilgisine de ihtiyaç duyulmaktadır. Rotorun konumunu bulmak için ilk olarak motorun herhangi bir fazına DA gerilim kaynağının “+” kutubuna bağlanır. Diğer iki faz kısa devre edilerek kaynağın “-” kutubuna bağlanır. Bu durumda sadece a-fazına enerji verildiğinde rotorun d-ekseni a-fazıyla birlikte hizalanıp kilitlendiği görülmektedir. Buna bağlı olarak rotor konumunun başlangıç noktası belirlenmektedir (Boztaş, 2019).

Motorun R_s ve L_s parametre değerlerini bulmak için Şekil 3.38’te görüldüğü üzere ölçüm devresi oluşturulmaktadır. R_s direnç değerini ölçmek için iki faz arasına DA gerilim kaynağı bağlanır. Sargı uçlarına DA gerilim verilerek ampermetreden ve voltmetreden değerler okunur. Gerilim kaynağının farklı birkaç değeri için ölçümler tekrarlanır. Her ölçüm için direnç değeri hesaplanır. Eşitlik 3.108’e göre elde edilen sonucun ortalaması alınarak $2R_s$ direnç değeri hesaplanmış olmaktadır (Boztaş, 2019).

$$R_s = \frac{R_{AB,ort}}{2} \quad (3.108)$$



Şekil 3.38. EA-SRM parametrelerinin belirlenmesi

Rotor çıkıntısından dolayı d ve q-eksen endüktansları birbirinden farklıdır. Çıkıntıdan dolayı tüm stator endüktansları, $2\theta_r$ rotor açısı θ_r ile değişir. SRM'nin d-q eksen endüktansları Eşitlik 3.109 ve 3.110'da gösterilmiştir.

$$L_{sd} = L_s - L_{ms} + 1.5L_m \quad (3.109)$$

$$L_{sq} = L_s - L_{ms} - 1.5L_m \quad (3.110)$$

Stator fazları arasındaki endüktanslar, rotor açısının iki katı açıya sahiptir. Fazlar arası endüktansların denklemleri Eşitlik 3.111, 3.112 ve 3.113'te verilmiştir.

$$L_{AB} = 2L_s - 2L_{ms} - 3L_m \cos(2p\theta_r - 2\pi/3) \quad (3.111)$$

$$L_{BC} = 2L_s - 2L_{ms} - 3L_m \cos(2p\theta_r) \quad (3.112)$$

$$L_{AC} = 2L_s - 2L_{ms} - 3L_m \cos(2p\theta_r + 2\pi/3) \quad (3.113)$$

L_s : Ortalama stator self-endüktansı

L_{ms} : Stator ortak endüktansı

L_m : Rotor çıkıntısından dolayı stator endüktanslarından biri

L_{AB}, L_{BC}, L_{AC} : Statorun fazlar arası endüktansları

Eşitlik 3.111, 3.112 ve 3.113'ten Eşitlik 3.114 ve 3.115 elde edilmektedir.

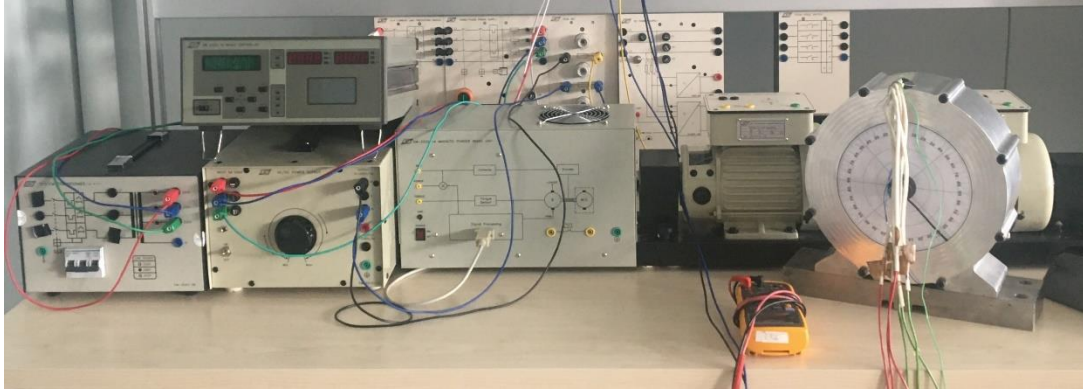
$$L_{sd} = \frac{L_{ABmax}}{2} \quad (3.114)$$

$$L_{sq} = \frac{L_{ABmin}}{2} \quad (3.115)$$

L_{AB} endüktans değerini elde etmek için Şekil 3.38’de görüldüğü gibi AA gerilim kaynağı iki faz arasına bağlanır. Motorun konumu L_{AB} endüktansının maksimum olduğu değere getirilir. Bu noktada motorun konumu sabit tutularak a ve b sargı uçlarına AA gerilim verilerek L_{AB} endüktansı üzerine düşen gerilim ve bu endüktanstan geçen akım ölçülür. Ölçümler birkaç kez tekrarlanır. Eşitlik 3.115 kullanılarak her bir ölçüm için L_{AB} ’nin maksimum değeri elde edilir. Hesaplanan L_{AB} endüktans değerlerinin ortalaması alınır. Aynı işlemler motorun konumu L_{AB} endüktansının minimum olduğu değere getirilip tekrarlanır. Böylece L_{AB} ’nin minimum değeri de elde edilmiş olur (Boztaş, 2019).

$$L_{AB} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\left(\frac{V}{I}\right)^2 - 4R_s^2} \quad (3.116)$$

Endüktans ve direnç ölçümleri için test ortamı Şekil 3.39’da gösterilmiştir. Oda sıcaklığında yapılan test sonuçlarına göre $L_{sd} = 157.256 \text{ mH}$, $L_{sq} = 53.19$ ve $R_s = 1.815$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.39. EA-SRM endüktans ve direnç ölçümü test ortamı

3.11.3. Testler öncesi hazırlık

Testlere başlamadan önce gerekli güvenlik önlemleri alınarak motorun terminal bağlantıları yapılmıştır. Test verilerinin doğru bir şekilde alınması amacı ile prototip ile yük motoru arasında mil eksenlemesi yapılmıştır. Eksenleme işlemi TOĞÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Mekatronik Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında mevcut olan Proftechnik Shaftalign OS3 motor mili hizalama cihazı (Şekil 3.40) ile yapılmıştır.



Şekil 3.40. Pruftechnik Shaftalign OS3 motor mili hizalama cihazı

Şekil 3.41’de Pruftechnik Shaftalign OS3 şaft hizalama cihazı hizalama ayaklarının kaplin kuplajına yerleştirilmiş hali görülmektedir. Hizalama sonucu yatayda ve dikeyde sapma kabul edilebilir düzeye kadar indirilerek testlere başlanmıştır.



Şekil 3.41. Hizalama cihazının motor kaplinlerine bağlı durumu

3.11.4. Testlerin yapılması

Test çalışmalarında motor farklı yük profillerinde çalıştırılarak tork, akım, gerilim, devir ve konum bilgileri yüksek çözünürlükle kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veriler ışığında gerilim, akım, tork, verimi, güç faktörü, tork, tork dalgalanması, -d ve -q eksenleri akımlarının karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçların güvenilir olması açısından yapılan tüm testler 3'er kez tekrar edilmiştir. Sonuçların değerlendirilmesinde elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Yapılan testler üç kategoride toplanmış olup, ilgili detaylar ayrı ayrı başlıklar altında sunulmuştur.

Motor sıcaklık eğrisi ve sargı dirençleri ölçümleri

Stator parametrelerinden sargı dirençlerinin sıcaklık ile değişimi motor performansı ve kayıplar açısından önemlidir. Motorun çalışmaya başlamadan önceki ve çalıştırılıp ısıtıldıktan sonraki ölçümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeplerle motor sıcaklık

testleri yapılmıştır. Motor çalıştırılmadan önce ve çalıştırılıp ısıtıldıktan sonra sargı dirençlerinin ölçümleri yapılmıştır.

Boşta çalıştırma

Testlerin bu adımında prototip motor, eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi amacı ile ABB ACS880 sürücüsü üzerinden yüksüz olarak çalıştırılmıştır. AC sürücüsünün konfigürasyonu ve kumanda edilmesi amacı ile Drive Composer Entry 2.5 yazılım ortamından yararlanılmıştır. Test aşamasında motor sıcaklığı nominal çalışma noktasına kadar yükseltilmiştir.

Sabit yük profili ile yapılan testler

Bu başlıkta yapılan testlerde motorun farklı sabit yükler altındaki performansı incelenmiştir. Bu kapsamda motor yüksüz çalışmadan 17.5 Nm 'ye kadar 3.5 Nm aralıklarla sabit yük durumları için ayrı ayrı test edilmiştir. Motor %25 yük durumunda 3.5 Nm 'ye tekabül etmektedir. Aynı şekilde %125 yük durumu ise 17.5 Nm 'ye denk gelmektedir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Önceki bölümde yapılan çalışmalarda kullanılan yöntem ve materyaller ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir. Bu doğrultuda konuyla ilgili detaylı bir literatür özeti de gösterilmiştir. Daha sonra bu tez çalışmasına konu olan EA-SRM'lerin tasarım süreci detaylı olarak incelenmiştir. Son zamanlarda literatürde incelemeleri ve tasarımları çalışılan SRM topolojileri incelenerek EA-SRM modellenmiştir. Oluşturulan motor modelleri ile ilgili detaylar sunulmuştur. Edinilen tasarım tecrübesinin yanı sıra üretim kolaylığı, verimlilik ve az bakım gerektirme gibi konular da göz önünde bulundurularak yeni bir EA-SRM topolojisi önerilmiştir. Önerilen topolojinin yapısal detayları ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Daha sonra önerilen topolojinin verimlilik, tork ve tork dalgalanması kalitesinin artırılmasında kullanılan yöntem ve materyaller sunulmuştur. Son olarak önerilen iyileştirilmiş topolojinin prototip üretimi ve yürütülen test çalışmaları ile ilgili detaylara yer verilmiştir.

Önceki bölümde detayları sunulan çalışmalar sonucu elde edilen bulgular bu bölümde incelenmiştir. EA-SRM tasarımında öne çıkan rotor tasarımlarının SEY analizleri sonuçları bu bölümde sunulmuştur. Bariyer sayısı ve bariyer tipi seçimi yapılarak tork dalgalanmasını düşürmek amaçlı GA tabanlı optimizasyonlar yapılmıştır. Optimizasyon sonrası parametrik analiz sonuçları da bu bölümde sunulmuştur. Son olarak yapısal ve termal analizleri sonuçları gösterilerek üretim sonrası tasarlanmış prototipin deneysel sonuçlarına yer verilmiştir. Tüm bulgular elde edildikten sonra test sonuçları ile analiz sonuçları karşılaştırılarak performans değerlendirilmesi yapılmıştır.

4.1. EA-SRM Rotor Tasarımı Analitik Hesap Sonuçları

EA-SRM tasarımında ilk olarak bariyer sayıları ve yalıtım oranlarına göre analitik olarak bariyer ve segment hesaplamaları yapılmıştır. Daha sonra her bir model için performans sonuçları SEY analizleri yapılarak gösterilmiştir.

4.1.1. Bir bariyerli EA-SRM, rotor bariyer ve segmentlerin analitik hesaplamaları

İlk olarak rotor bariyeri uç noktası kontrol açısı β ve bariyerler arası açısı α hesaplamaları yapılır. Eşitlik 3.60'ta β yerine $\alpha/2$ alındığında Eşitlik 4.1 elde edilir ve hesaplamalara bu eşitlik üzerinden başlanmaktadır. k bariyer sayısını ifade etmektedir. Rotor uç noktası konum açısı ve kontrol açısı Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Eşitlik 3.61, 3.62 ve 3.63 kullanılarak ve rotor boyu 39 mm seçildiğinde rotor segment ve bariyer genişlikleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Bariyer sayısı 1 seçildiği için bariyer hesabına gerek kalmamıştır.

$$\alpha = \frac{\pi}{k+1} \quad (4.1)$$

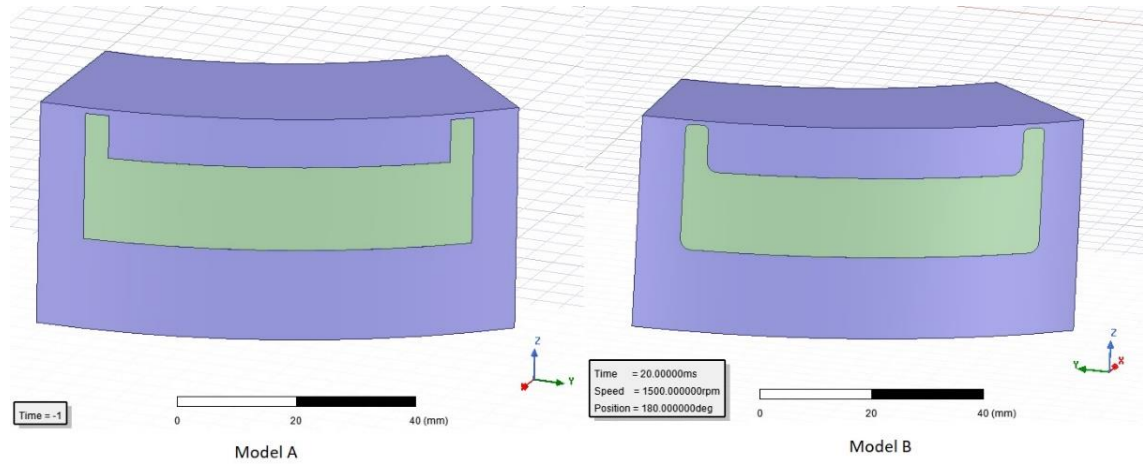
Çizelge 4.1. Bir bariyerli rotor uç noktası konum açısı ve kontrol açısı

α	β
11.25°	5.625°

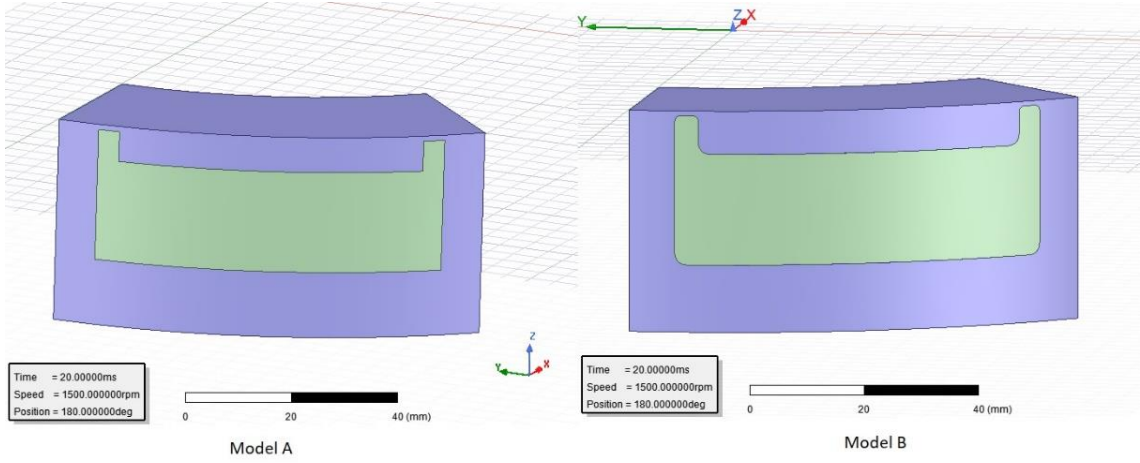
Çizelge 4.2 Bir bariyerli rotor segment ve bariyer genişlik değerleri ve yalıtım oranları

	$k_{wq} = 0.6$	$k_{wq} = 1$	$k_{wq} = 1.5$
$S1 (mm)$	15.846	12.677	10.141
$S2 (mm)$	8.528	6.822	5.458
$S3 (mm)$	14.625	19.5	23.4

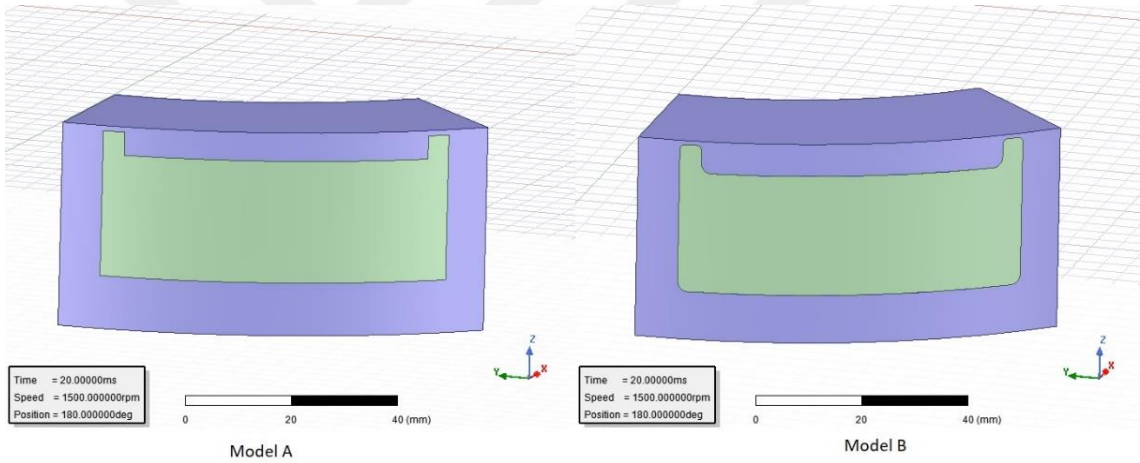
Hesaplanan bu değerler SEY analizi yapılacak yazılımda, Model A ve Model B tasarımlarına uygulanmıştır. Tasarlanan rotor modelleri sırasıyla yalıtım oranları 0.6 – 1 – 1.5 olacak şekilde Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Bir bariyer $k_{wq} = 0.6$ modeli



Şekil 4.2. Bir bariyer $k_{wq} = 1$ modeli



Şekil 4.3. Bir bariyer $k_{wq} = 1.5$ modeli

4.1.2. İki bariyerli EA-SRM, rotor bariyer ve segmentlerin analitik hesaplamaları

Bir bariyerli tasarımdaki gibi hesaplamalar yapılmıştır fakat bariyer sayısı iki olduğu için ilave olarak bariyer hesaplamaları ve oranları için Eşitlik 3.67, 3.68, 3.69 ve 3.70 kullanılmıştır. Rotor uç noktası konum açısı ve kontrol açısı Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Rotor segment ve bariyer genişlikleri Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

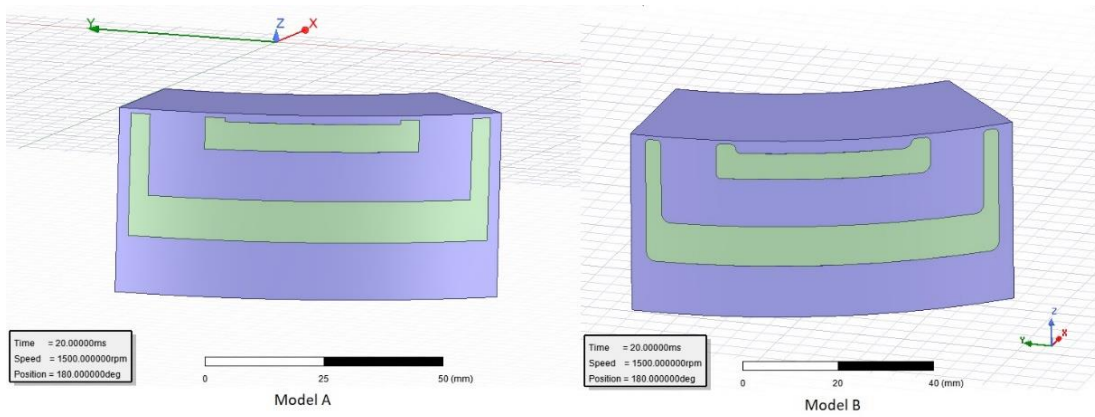
Çizelge 4.3. İki bariyerli rotor uç noktası konum açısı ve kontrol açısı

α	β
7.5^0	3.75^0

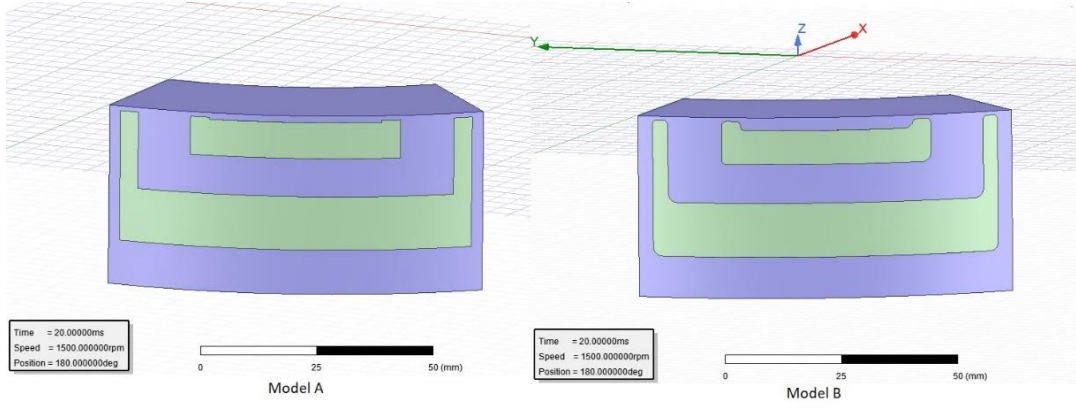
Çizelge 4.4. İki bariyerli rotor segment ve bariyer genişlik değerleri ve yalıtım oranları

	$k_{wq} = 0.6$	$k_{wq} = 1$	$k_{wq} = 1.5$
$S1 (mm)$	12.076	9.661	7.728
$S2 (mm)$	10.473	8.379	6.703
$S3 (mm)$	1.824	1.459	1.167
$W1 (mm)$	8.727	11.637	13.964
$W2 (mm)$	5.897	7.862	9.435

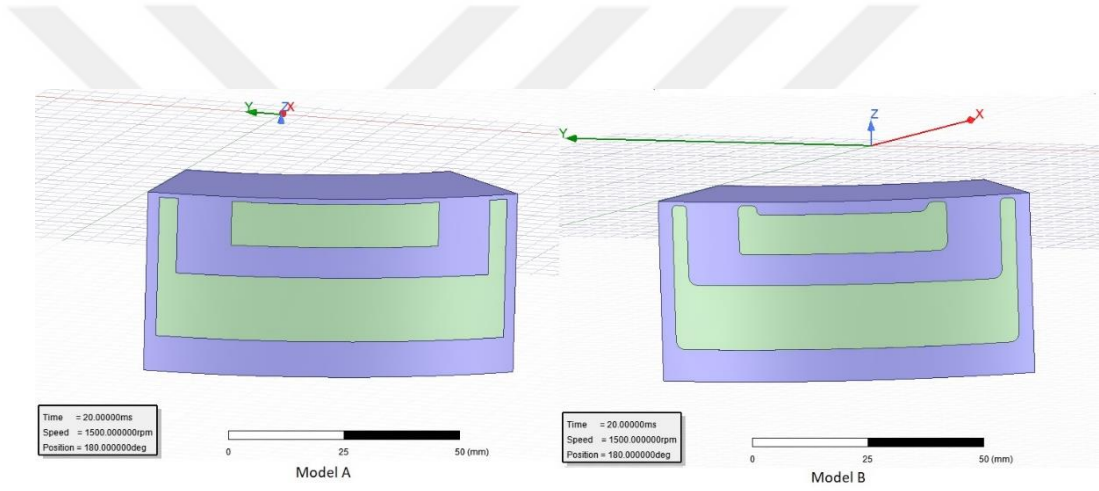
Hesaplanan bu değerler SEY analizi yapılacak yazılımda, Model A ve Model B tasarımlarına uygulanmıştır. Tasarlanan rotor modelleri sırasıyla yalıtım oranları 0.6 – 1 – 1.5 olacak şekilde Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.4. İki bariyer $k_{wq} = 0.6$ modeli



Şekil 4.5. İki bariyer $k_{wq} = 1$ modeli



Şekil 4.6. İki bariyer $k_{wq} = 1.5$ modeli

4.1.3. Üç bariyerli EA-SRM, rotor bariyer ve segmentlerin analitik hesaplamaları

İki bariyerli tasarımdaki gibi hesaplamalar yapılmıştır Rotor uç noktası konum açısı ve kontrol açısı Çizelge 4.5'te gösterilmiştir. Rotor segment ve bariyer genişlikleri Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

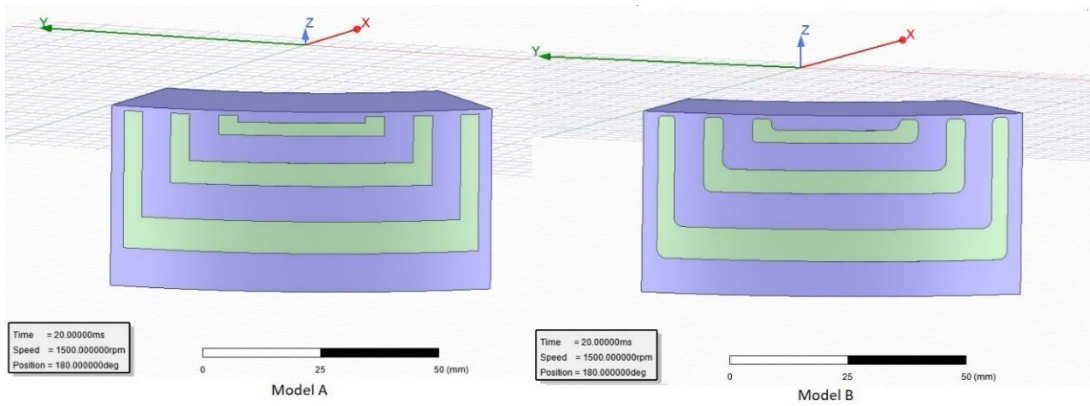
Çizelge 4.5. Üç bariyerli rotor uç noktası konum açısı ve kontrol açısı

α	β
5.625^0	2.8125^0

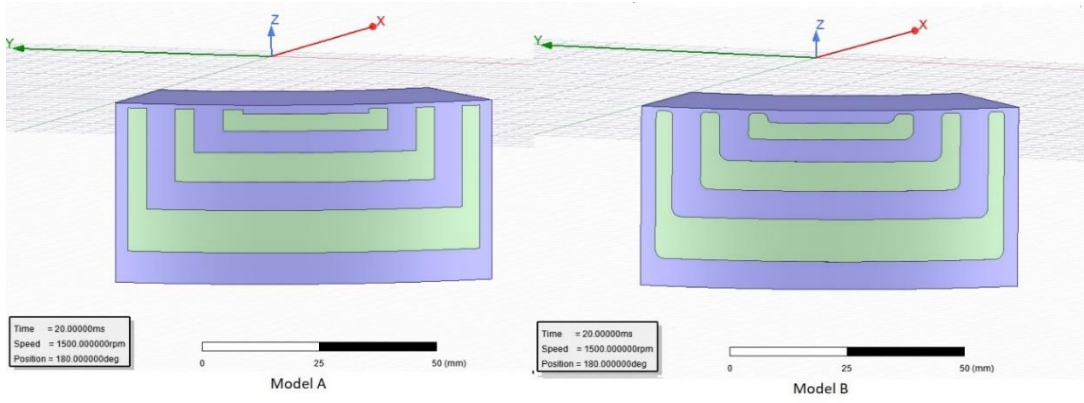
Çizelge 4.6. Üç bariyerli rotor segment ve bariyer genişlik değerleri ve yalıtım oranları

	$k_{wq} = 0.6$	$k_{wq} = 1$	$k_{wq} = 1.5$
$S1 (mm)$	8.319	6.655	5.324
$S2 (mm)$	7.707	6.165	4.932
$S3 (mm)$	5.929	4.473	3.795
$S4 (mm)$	2.418	1.934	1.547
$W1 (mm)$	6.894	9.192	11.030
$W2 (mm)$	4.959	6.428	7.935
$W3 (mm)$	2.77	3.694	4.433

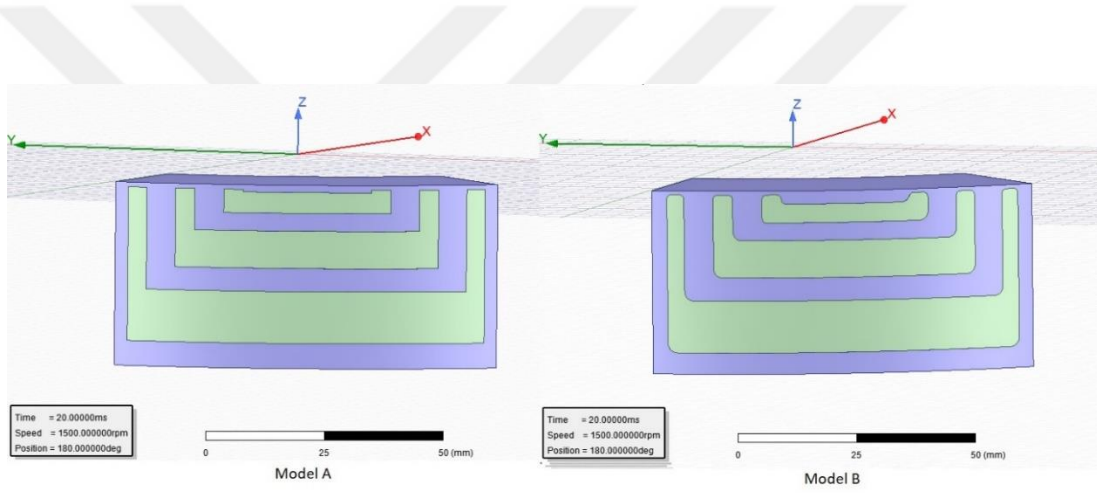
Hesaplanan bu değerler SEY analizi yapılacak yazılımda, Model A ve Model B tasarımlarına uygulanmıştır. Tasarlanan rotor modelleri sırasıyla yalıtım oranları 0.6 – 1 – 1.5 olacak şekilde Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Üç bariyer $k_{wq} = 0.6$ modeli



Şekil 4.8. Üç bariyer $k_{wq} = 1$ modeli



Şekil 4.9. Üç bariyer $k_{wq} = 1.5$ modeli

4.1.4. Dört bariyerli EA-SRM, rotor bariyer ve segmentlerin analitik hesaplamaları

Üç bariyerli tasarımdaki gibi hesaplamalar yapılmıştır Rotor uç noktası konum açısı ve kontrol açısı Çizelge 4.7’de gösterilmiştir. Rotor segment ve bariyer genişlikleri Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.

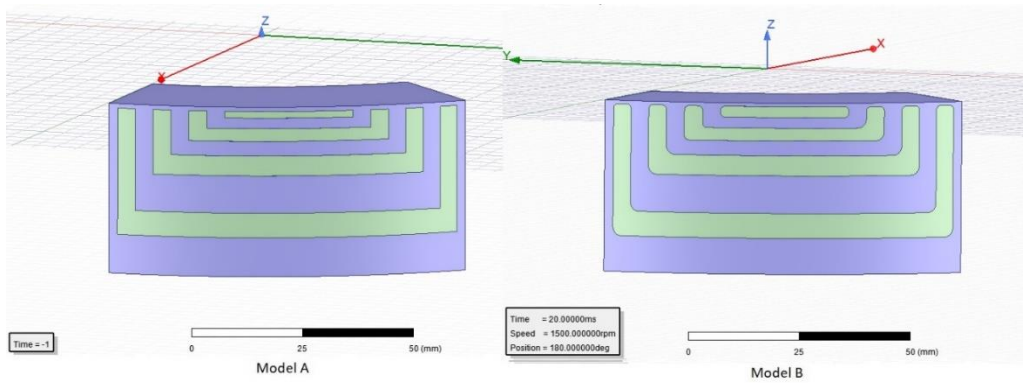
Çizelge 4.7. Dört bariyerli rotor uç noktası konum açısı ve kontrol açısı

α	β
4.5^0	2.25^0

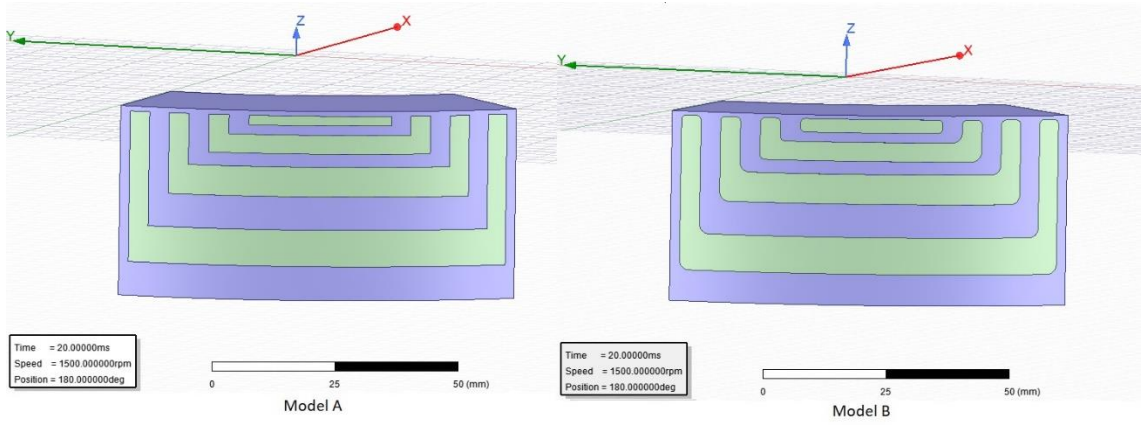
Çizelge 4.8. Dört bariyerli rotor segment ve bariyer genişlik değerleri ve yalıtım oranları

	$k_{wq} = 0.6$	$k_{wq} = 1$	$k_{wq} = 1.5$
$S1 (mm)$	8.997	7.197	5.758
$S2 (mm)$	8.568	6.854	5.483
$S3 (mm)$	3.382	2.705	2.164
$S4 (mm)$	2.456	1.965	1.572
$S5 (mm)$	0.969	0.775	0.62
$W1 (mm)$	5.644	7.525	9.031
$W2 (mm)$	4.587	6.116	7.339
$W3 (mm)$	2.904	3.872	4.646
$W4 (mm)$	1.489	1.985	2.38

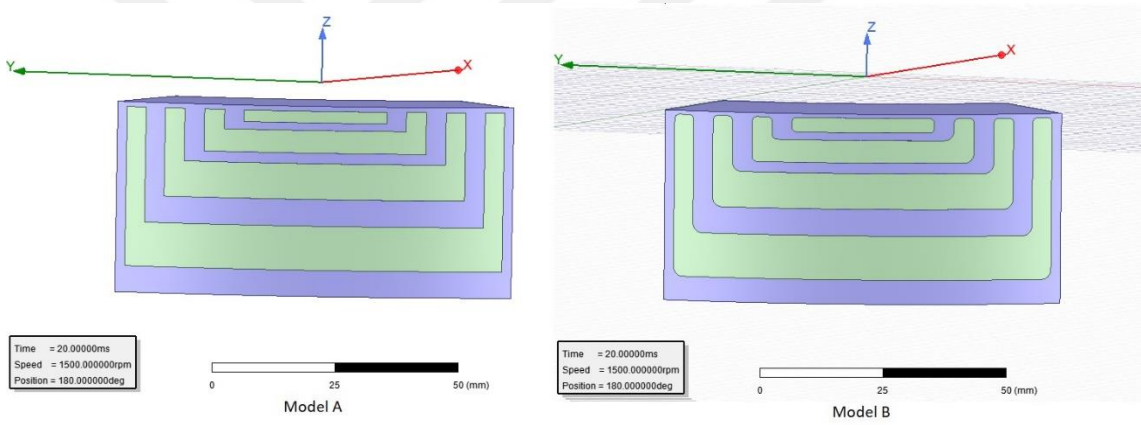
Hesaplanan bu değerler SEY analizi yapılacak yazılımda, Model A ve Model B tasarımlarına uygulanmıştır. Tasarlanan rotor modelleri sırasıyla yalıtım oranları 0.6 – 1 – 1.5 olacak şekilde Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Dört bariyer $k_{wq} = 0.6$ modeli



Şekil 4.11. Dört bariyer $k_{wq} = 1$ modeli



Şekil 4.12. Dört bariyer $k_{wq} = 1.5$ modeli

4.2. EA-SRM Rotor SEY Analiz Sonuçları

EA-SRM tasarımlarında hesaplanan ölçüler tek bir Çizelgede gösterilmiştir (Çizelge 4.9). Tasarlanmış modellerin SEY analizleri 80 ms boyunca 0.33 ms aralıklarla analiz edilecektir. EA-SRM sabit akımda uyarılmıştır ve uygulanan akım değerleri-parametreleri Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. EA-SRM tasarımında hesaplanan bariyer ve segment ölçüleri

	1 bariyer			2 bariyer			3 bariyer			4 bariyer		
α	11.25°			7.5°			5.625°			4.5°		
β	5.625°			3.75°			2.8125°			2.25°		
k_{wq}	0.6	1	1.5	0.6	1	1.5	0.6	1	1.5	0.6	1	1.5
S_1	15.846	12.677	10.141	12.076	9.661	7.728	8.319	6.655	5.324	8.997	7.197	5.758
S_2	8.528	6.822	5.458	10.473	8.379	6.703	7.707	6.165	4.932	8.568	6.854	5.483
S_3	-	-	-	1.824	1.459	1.167	5.929	4.473	3.795	3.382	2.705	2.164
S_4	-	-	-	-	-	-	2.418	1.934	1.547	2.456	1.965	1.572
S_5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.969	0.775	0.62
W_1	14.625	19.5	23.4	8.727	11.637	13.964	6.894	9.192	11.030	5.644	7.525	9.031
W_2	-	-	-	5.897	7.862	9.435	4.959	6.428	7.935	4.587	6.116	7.339
W_3	-	-	-	-	-	-	2.77	3.694	4.433	2.904	3.872	4.646
W_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.489	1.985	2.38

Çizelge 4.10. EA-SRM'ye uygulanan akım ve parametre değerleri

SEY Parametreleri	Açıklama	Değer
Gamma_TSC	Akım açısı	45°
Imax_TSC	Akım	5.8 $\sqrt{2}$
Speed_TSC	Hız	1500 d/d
Phase A akımı	$Imax_TSC * \sin(Speed_TSC/1rpm*8/60*pi*time+Gamma_TSC-0.0deg- \bar{\omega} deg)$	8.20 A
Phase B akımı	$Imax_TSC * \sin(Speed_TSC/1rpm*8/60*pi*time+Gamma_TSC-120.0deg- \bar{\omega} deg)$	-4.14 A
Phase C akımı	$Imax_TSC * \sin(Speed_TSC/1rpm*8/60*pi*time+Gamma_TSC-240.0deg- \bar{\omega} deg)$	-4.06 A
$\bar{\omega}$	d-q eksenleri hizalama açısı	-15.3°

Yapılan analiz sonucunda çıkış değerleri olarak: Tork, tork dalgalanması, mil gücü, güç faktörü, çıkıntı oranı ve akım başına tork sonuçları karşılaştırılmıştır. Tüm sonuçlar Çizelge 4.11 ve 4.12’te gösterilmiştir. Bu çizelgeler de her bariyer ve yalıtım oranlarının sonuçları rahatça gözlenebilir ve karşılaştırılabilir hale gelmiştir. 4 bariyerden fazla bariyer yapısı üretimsel açıdan zorluk çıkaracağı ve analiz sonuçlarının bu boyutlar için hedeflenen güç değerlerine ulaşması sebebiyle, bariyer sayısı seçimleri bu şekilde yapılmıştır.

Çizelge 4.11. EA-SRM Model A analiz sonuçları

Model A	1 bariyer			2 bariyer			3 bariyer			4 bariyer		
k_{wq}	0.6	1	1.5	0.6	1	1.5	0.6	1	1.5	0.6	1	1.5
Nm/A	2.311	2.220	2.153	2.305	2.281	2.187	2.568	2.565	2.524	2.533	2.530	2.395
L_d/L_q	2.981	3.043	3.027	3.395	3.445	3.432	3.665	3.770	3.772	3.826	3.848	3.759
$\cos\gamma$	0.497	0.505	0.503	0.543	0.548	0.547	0.571	0.580	0.580	0.585	0.587	0.579
Tork dalgalanması (%)	25.41	25.81	30.85	61.04	61.49	62.38	24.50	24.09	26.60	13.70	18.33	21.58
P_{mil}	2105	2022	1961	2100	2078	1992	2339	2337	2301	2308	2305	2182
Tork	13.42	12.87	12.49	13.37	13.23	12.68	14.89	14.87	14.65	14.69	14.67	13.89

Model A analizinde; Tork değeri, amper başına tork ve mil gücü parametrelerin en yüksek çıktığı model, 3 bariyerli ve 0.6 yalıtım oranındadır. Çıkıntı oranı ve güç faktörü nün en yüksek çıktığı model ise 4 bariyerli ve 1 yalıtım oranındadır. Tork dalgalanması ise en düşük 4 bariyerli ve 0.6 yalıtım oranındadır.

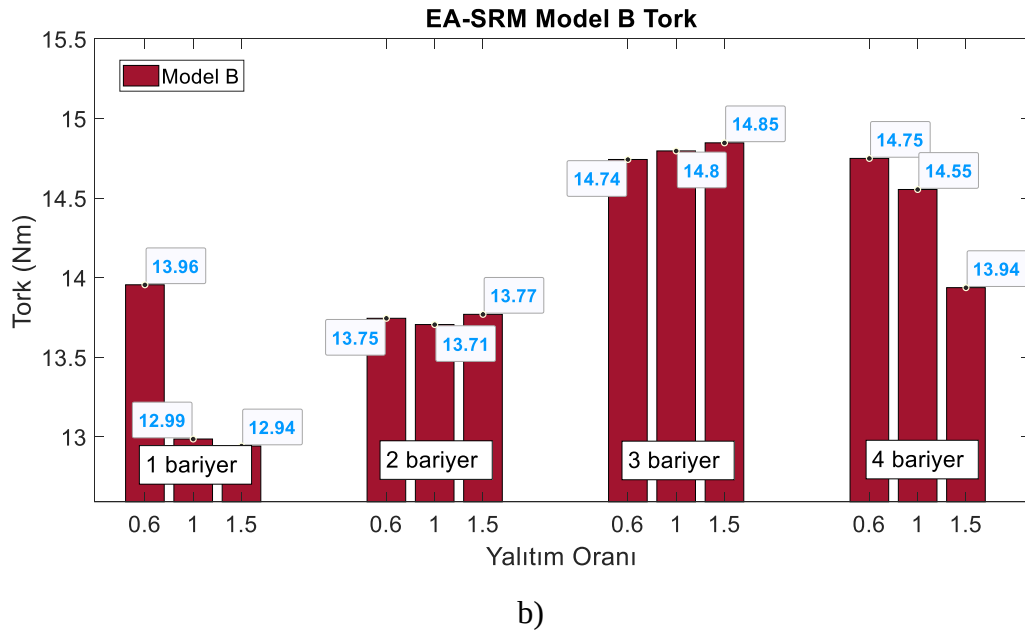
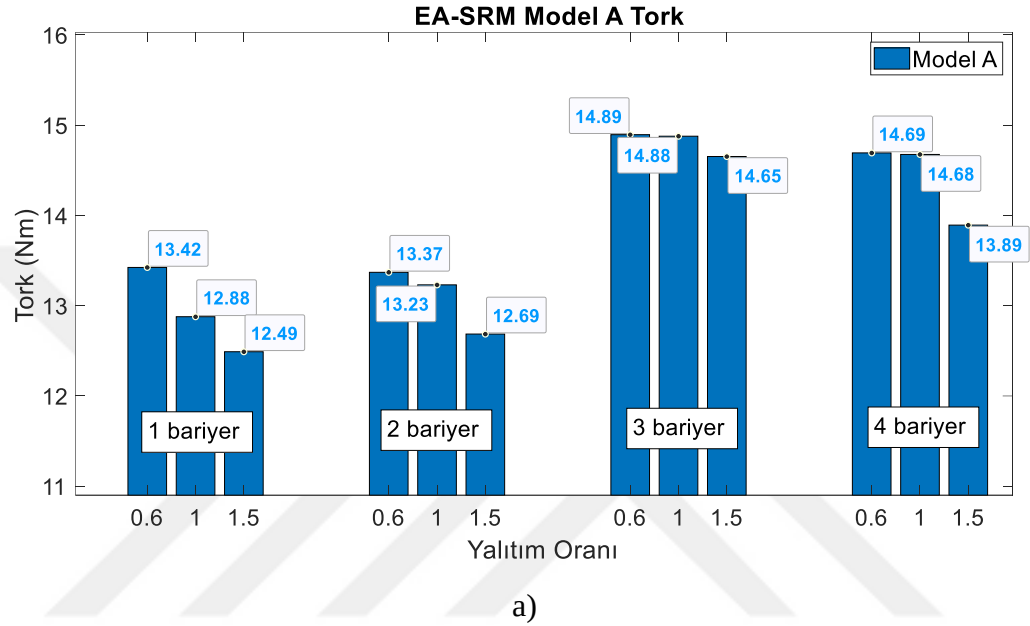
Çizelge 4.12. EA-SRM Model B analiz sonuçları

Model B	1 bariyer			2 bariyer			3 bariyer			4 bariyer		
k_{wq}	0.6	1	1.5	0.6	1	1.5	0.6	1	1.5	0.6	1	1.5
Nm/A	2.448	2.278	2.271	2.411	2.404	2.416	2.586	2.596	2.605	2.588	2.553	2.445
L_d/L_q	3.028	3.094	3.109	3.439	3.514	3.525	3.736	3.859	3.863	3.933	3.966	3.877
$\cos \gamma$	0.503	0.511	0.513	0.548	0.555	0.556	0.577	0.588	0.588	0.594	0.597	0.589
Tork dalgalanması (%)	26.47	30.53	35.05	72.05	76.81	71.81	28.47	24.63	25.29	9.70	14.40	17.76
P_{mil}	2192	2039	2033	2159	2152	2162	2315	2324	2332	2316	2286	2189
Tork	13.95	12.98	12.94	13.74	13.70	13.77	14.743	14.79	14.84	14.74	14.55	13.93

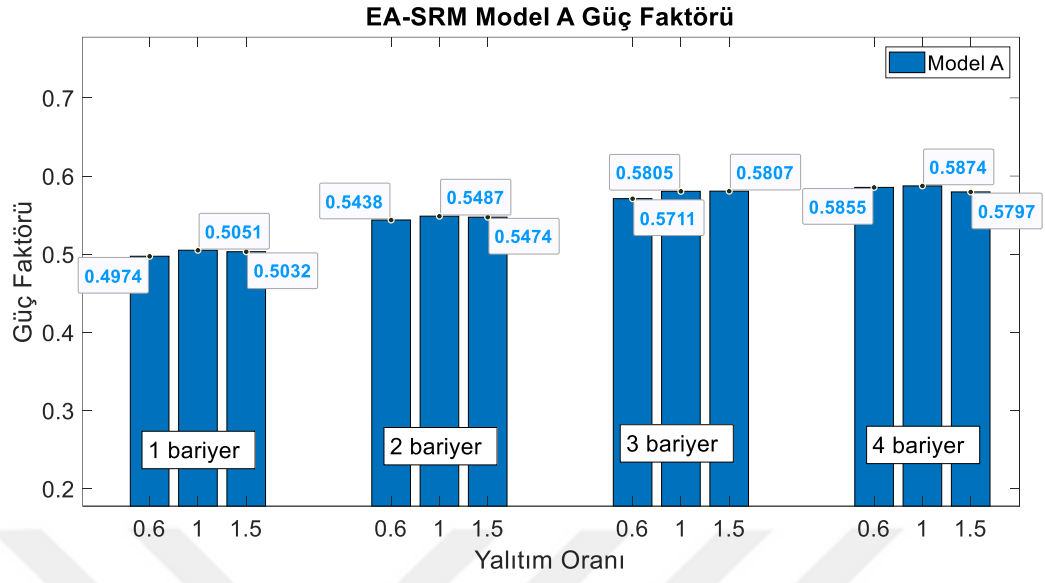
Model B analizinde; Tork, amper başına tork ve mil gücü parametrelerinin en yüksek çıktığı model 3 bariyerli 1.5 yalıtım oranındadır. Çıkıntı oranı ve güç faktörü en yüksek değeri 4 bariyerli 1 yalıtım oranında, tork dalgalanmasının en düşük çıktığı model ise 4 bariyerli ve 0.6 yalıtım oranındadır.

Her iki modelin tüm analiz sonuçlarına bakıldığında; Şekil 4.13 ve 4.14'te görüldüğü üzere tork ve güç faktörü parametrelerinin en yüksek çıkış değerleri 3 ve 4 bariyerli tasarımlardadır. En yüksek tork değerleri 3 bariyerli modellerde olmasına rağmen tork dalgalanmaları 4 bariyerli modellerden ortalama; Model A için %40 ve Model B için %87 oranında fazla çıkmaktadır (Şekil 4.15). Ayrıca 4 bariyerli modellerin çıkıntı oranı ve güç faktörü değerleri de 3 bariyerli tasarımlardan yüksek çıkmıştır. Model A ve Model B 4 bariyerli tasarımların 0.6 yalıtım oranlarındaki tork değeri 1 bariyerli modellerden sırasıyla %17.64 ve %13.96 daha fazla çıkmıştır. Benzetim programındaki analiz sonuçları bariyer sayısı artışının, EA-SRM motor performansındaki etkisini

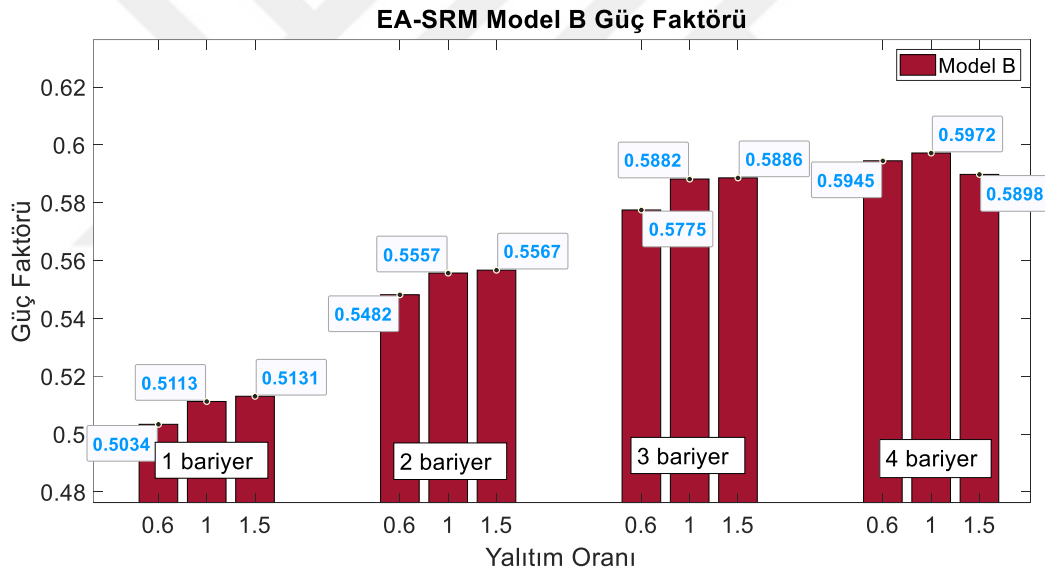
göstermektedir. Bu artış sadece tork ile kalmamakla birlikte güç faktörü, çıkıntı oranı ve mil gücü de artmaktadır. 4 bariyerli tüm yalıtım oranlarındaki EA-SRM tasarım modelleri, 14 Nm'nin üstünde tork değerleri göstererek, 2.2 kW gücünde üretilmiş aynı katalog değerlerindeki örnek bir radyal akılı SRM den ortalama %4.5 daha yüksek çıkmıştır (Anonim, 2014d).



Şekil 4.13. SEY analizi tork sonuçları a) Model A b) Model B

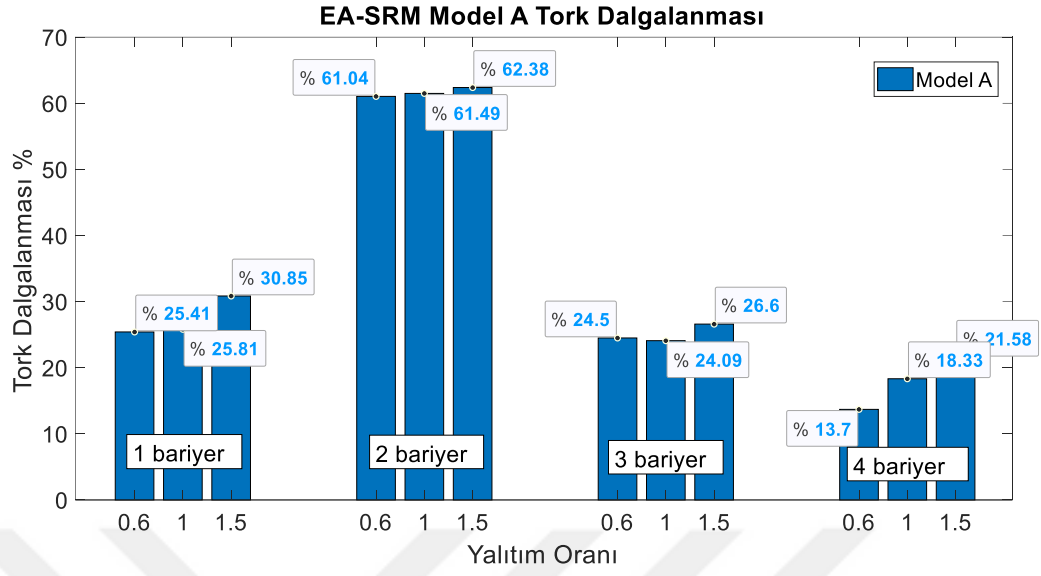


a)

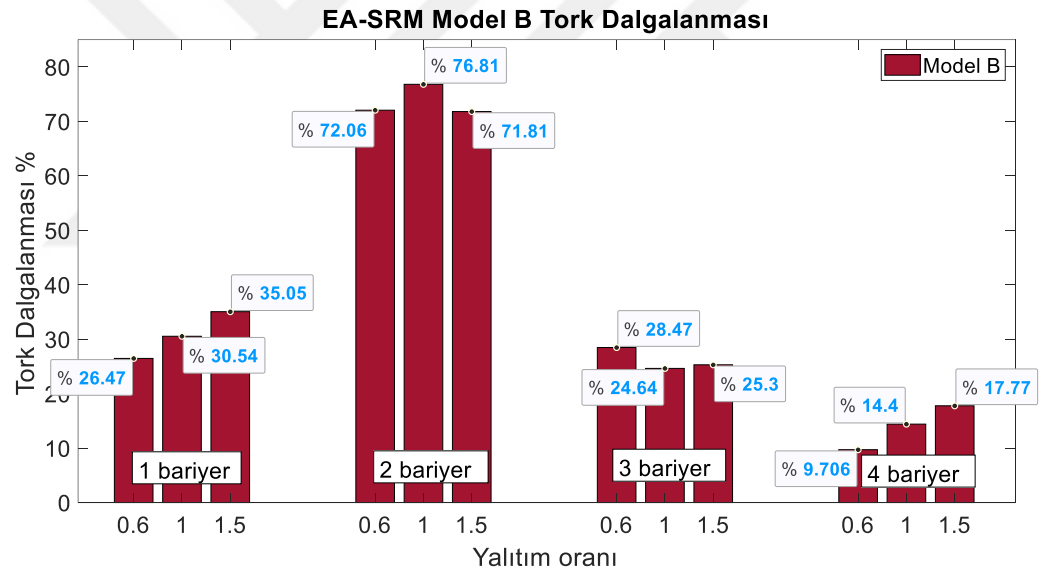


b)

Şekil 4.14. SEY analizi güç faktörü sonuçları a) Model A b) Model B



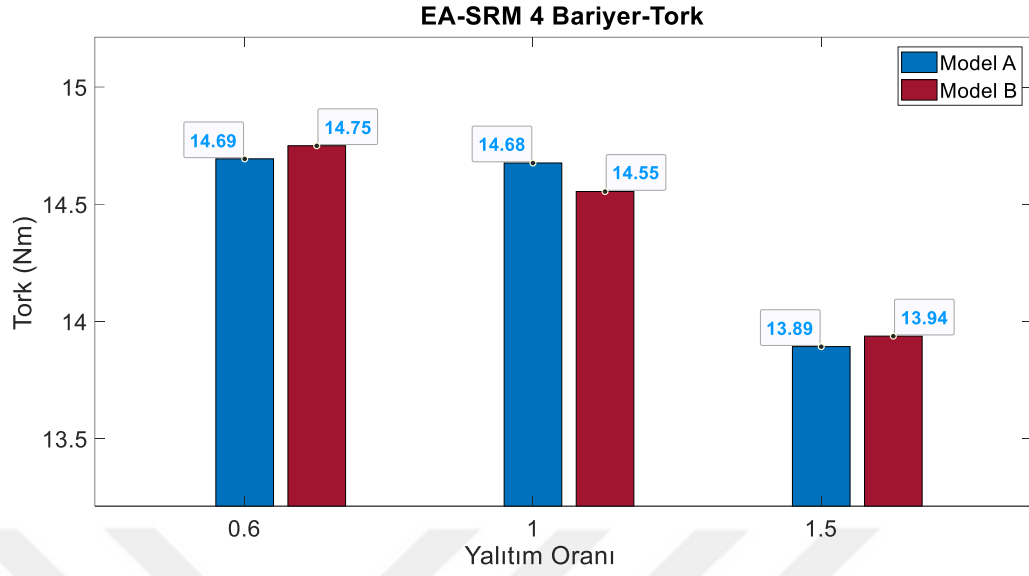
a)



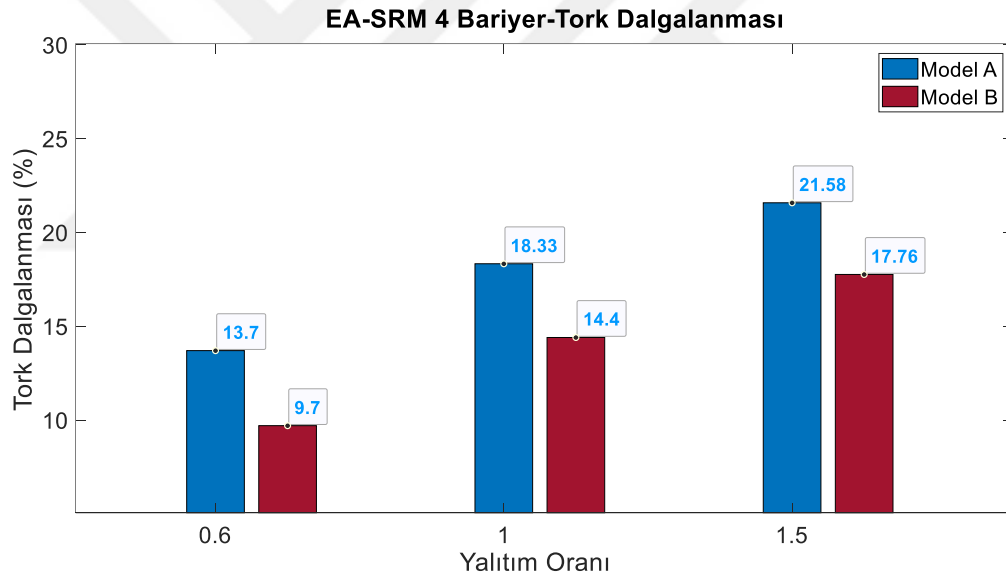
b)

Şekil 4.15. SEY analizi tork dalgalanması sonuçları a) Model A b) Model B

Şekil 4.16’da 4 bariyerli EA-SRM’nin hem bariyer tipi hem de yalıtım oranlarında, tork ve tork dalgalanmasının karşılaştırılması verilmiştir.



a)



b)

Şekil 4.16. 4 bariyerli modellerin karşılaştırması a) Tork b) Tork dalgalanması

Şekil 4.16.a.'da tork değerlerine bakıldığında Model B nin 0.6 ve 1.5 yalıtım oranında Model A dan yüksek çıktığı görülmektedir. En yüksek tork değerleri ise yalıtım oranı $k_{wq} = 0.6$ değerinde çıkmıştır. Model B nin 0.6 yalıtım oranındaki tork değeri $k_{wq} = 1.5$ tasarımdan % 5.5 ve $k_{wq} = 1$ den %1.38 fazla çıkmıştır. Şekil 4.16.b.'ye bakıldığında tork dalgalanmasının en düşük değerleri yine $k_{wq} = 0.6$ yalıtım oranındadır

ve Model B, Model A dan % 4 daha az dalgalanmaya sahiptir. Bu değer oransal olarak % 29.2 etmektedir. EA-SRM modellerinde Şekil 4.16'da görüldüğü üzere yalıtım oranı azaldıkça tork değeri artmakta ve tork dalgalanması azalmaktadır.

4.2.1. Optimizasyon sonuçları

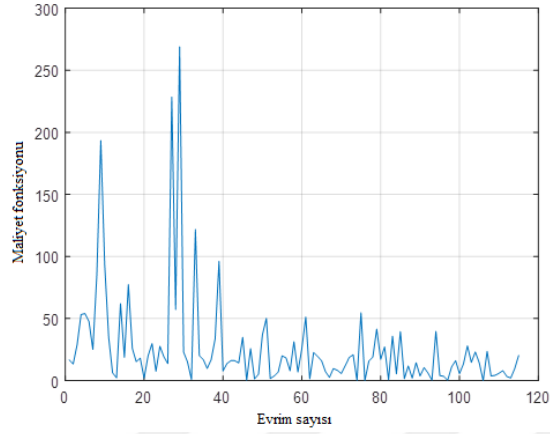
Analitik hesaplamalar sonucunda EA-SRM bariyer tipi ve sayısı üzerinde karşılaştırmalar yapılmış fakat tork dalgalanması parametresi değerinin düşürülmesi üzerine optimizasyon analizleri yapılmalıdır. Önceki bölümlerde detaylı bilgi verilmiş olan GA tabanlı optimizasyon analizleri yapılmıştır. Optimizasyon analizinde, istenilen sonuca ulaşana kadar her bir iterasyonda bariyer ve segment kalınlıkları değişerek hedefe ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar çizelge ve şekiller ile gösterilmiştir.

Model A optimizasyon sonuçları

Tork dalgalanmasını düşürmek amaçlı yapılan optimizasyonun iterasyon süresince gelişimi Şekil 4.17'de grafik olarak gösterilmiştir. Optimizasyon sonrası EA-SRM çıkış parametreleri ise Çizelge 4.13'te sıralanmıştır. Çizelge 4.14'te rotorda tanımlanan her bir değişim noktasının optimizasyon sonucu ölçüleri gösterilmiştir. Bariyer uçlarının genişliği ve q-eksenindeki değişiminin gelişimi Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Şekil 4.17'de "maliyet fonksiyonu" her bir iterasyonun çıkış değeri yani optimizasyon hedefine olan uzaklığı ifade etmektedir. Maliyet fonksiyonunu değerinin yüksek çıkması sonucun hedeften fazla olduğu, küçük çıkması ise hedefe yaklaştığı anlamına gelmektedir. İterasyon sayısı arttıkça hedefe yaklaşıldığı ve analizin durduğu gözlenmiştir.

Bariyer kalınlıkları ve uç noktalarının genişlikleri değişimlerinin tork dalgalanmasına etkisini görmek için her bir iterasyondaki parametreler incelenmiştir. Şekil 4.18'de bariyer uçlarının genişliklerinin analiz süresince değişimleri ayrı ayrı gösterilmiştir. Sonuçlarda ölçümlerin yoğunlaştığı bölgeler, tork dalgalanmasını azaltmak için bariyer uçlarının genişliklerinin olması gerektiği ölçüleri ifade etmektedir. Grafiklerde görüldüğü üzere özellikle *emb11*, *emb21*, *emb22* ve *emb41* noktaları değişimlerinin tork dalgalanmasının düşürülmesinde etkisi büyüktür ve belirli bölgelerde yoğunlaşmıştır. Diğer noktaların gelişimi homojen dağılmış ve genişlik değişiminin etkisi düşük seviyede

olduğu gösterilmiştir. Optimizasyon sonucunda modelin bariyer uçlarının genişlikleri grafiklerde daire ile gösterilen bölgelerde çıkmıştır.



Şekil 4.17. Model A optimizasyon grafiği

Çizelge 4.13. Model A optimizasyon sonuçları

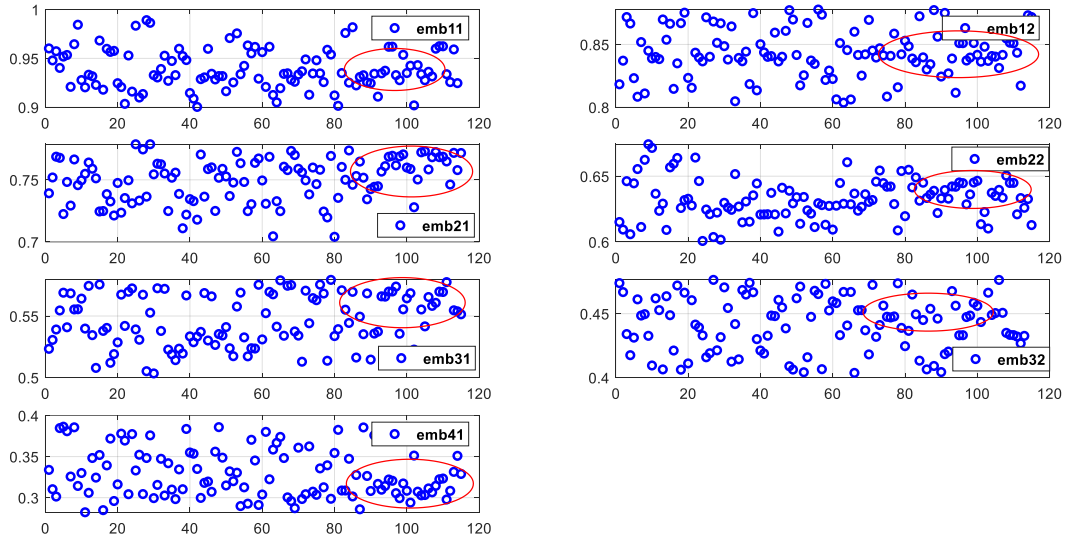
Model A	Optimizasyon öncesi	Optimizasyon sonrası
Tork	14.6938 <i>Nm</i>	14.6232 <i>Nm</i>
Tork dalgalanması (%)	13.7077	7.0295
P_{mil}	2308.0939 <i>Watt</i>	2297.0068 <i>Watt</i>
$\cos \gamma$	0.5855	0.5844
L_d/L_q	3.8265	3.8142
Nm/A	2.5338	2.5216
ind <i>V</i>	227.157 <i>V</i>	224.0720 <i>V</i>
Verim (%)	% 90.106762	% 90.689485

Çizelge 4.14'te ki sonuç değerleri Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da genetik algoritma sonucu yoğunlaşan bölgelerde gözlenmiştir. Buradaki analiz sonuçları istenilen değerlere ulaştığı

için çıkış değerleri aynı ölçülerde yoğunlaşmıştır. Analiz sonucu çıkan ölçülerde bu bölgelerdedir.

Çizelge 4.14. Model A optimizasyon sonucu bariyer ölçüleri

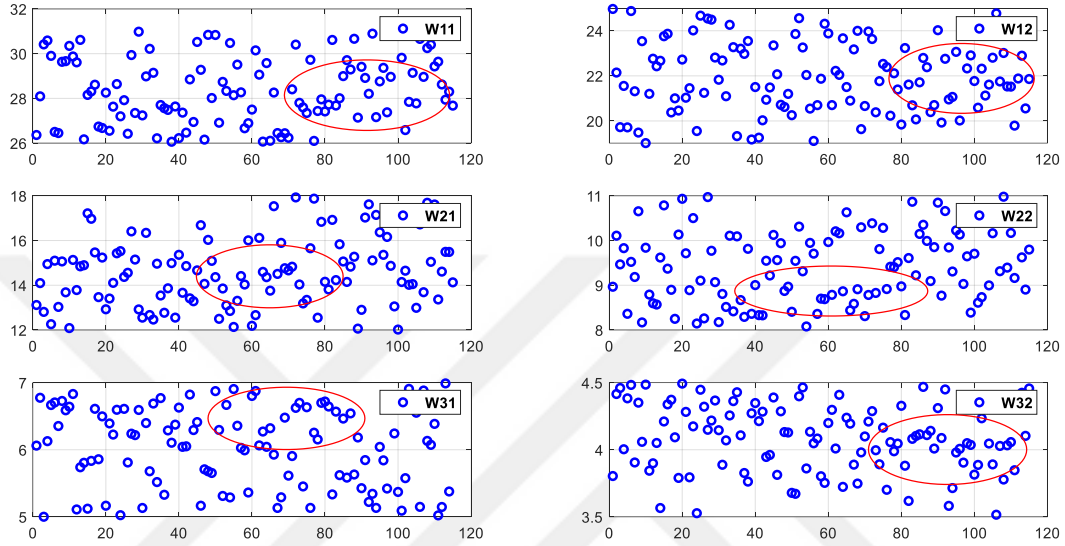
Bariyer uçları	embrace (0 ... 1)	-q eksen	ölçü
<i>emb 11</i>	0.9346	W11	29.7254 mm
<i>emb 12</i>	0.8408	W12	22.3898 mm
<i>emb 21</i>	0.7580	W21	15.6540 mm
<i>emb 22</i>	0.6421	W22	8.9146 mm
<i>emb 31</i>	0.5755	W31	5.1328 mm
<i>emb 32</i>	0.4470	W32	3.7014 mm
<i>emb 41</i>	0.3356	W41	1.489 mm
<i>emb 42</i>	0.2516	W42	1 mm



Şekil 4.18. Model A bariyer uçları genişliği değişimi

-q eksen Model A bariyer uçları genişliği değişimi yönündeki bariyerlerin alt ve üst noktalarının değişerek, kalınlıklarının tork dalgalanmasına etkisi Şekil 4.19’da ki

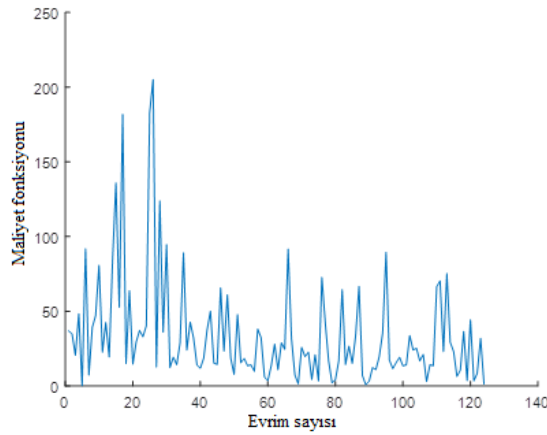
grafiklerde $W21$ ve $W22$ parametrelerinin homojen dağıldığı ve değişimlerinin tork dalgalanmasına etkisinin az olduğu gözlenmiştir. $W12$, $W31$ ve $W32$ parametreleri belirlenen değişim aralıklarında belirli ölçülerde yoğunlaşmıştır ve tork dalgalanmasına etkileri vardır.



Şekil 4.19. Model A q-ekseni genişliği değişimi

Model B optimizasyon sonuçları

Model A optimizasyon analizi ile aynı yol izlenmiştir. Evrim sayısı ve maliyet fonksiyonu grafiği Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Model B optimizasyon grafiği

Şekil 4.20 genetik algoritma ile yapılmış her iterasyonda hedefe ulaşabilme grafiğidir. Görüldüğü üzere iterasyon sayısı arttıkça hedefe yaklaşılmıştır ve durmuştur. Çizelge 4.15'te optimizasyon sonucu motor çıkış değerleri verilmiştir.

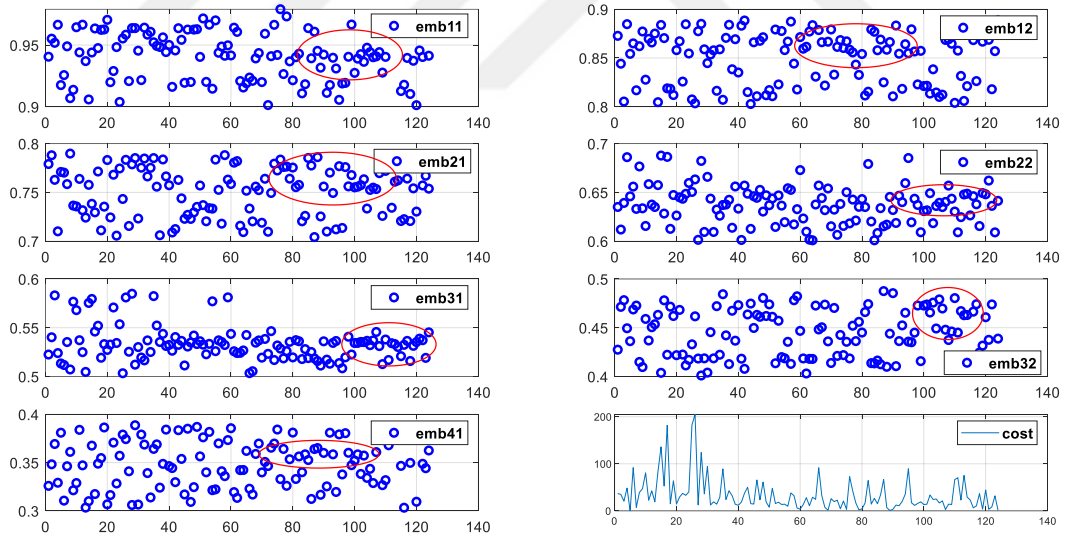
Çizelge 4.15. Model B optimizasyon sonuçları

Model B	Optimizasyon öncesi	Optimizasyon sonrası
Tork	14.7497 <i>Nm</i>	14.5224 <i>Nm</i>
Tork dalgalanması (%)	9.7064	6.8945
P_{mil}	2316.8797 <i>Watt</i>	2281.1707 <i>Watt</i>
$\cos \gamma$	0.5945	0.5809
L_d / L_q	3.9332	3.7740
Nm/A	2.5881	2.5482
ind <i>V</i>	224.3107 <i>V</i>	224.8824 <i>V</i>
Verim (%)	% 90.2499	% 90.0976

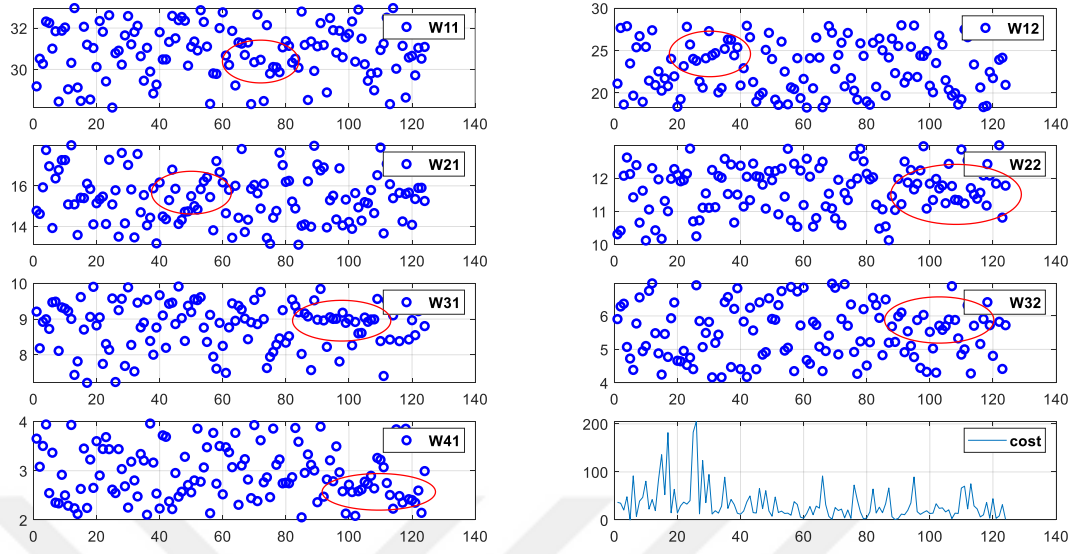
Çizelge 4.16'daki sonuç değerleri Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de genetik algoritma sonucu yoğunlaşan bölgelerde gözlenmiştir. Optimizasyon sonucu bariyer ölçüleri değişmiştir.

Çizelge 4.16. Model B optimizasyon sonucu bariyer ölçüleri

Bariyer uçları	embrace (0 ... 1)	-q eksen	ölçü
<i>emb 11</i>	0.9413	<i>W11</i>	31.0874 mm
<i>emb 12</i>	0.8884	<i>W12</i>	20.9531 mm
<i>emb 21</i>	0.7538	<i>W21</i>	15.2564 mm
<i>emb 22</i>	0.6412	<i>W22</i>	11.7788 mm
<i>emb 31</i>	0.5452	<i>W31</i>	8.8031 mm
<i>emb 32</i>	0.4388	<i>W32</i>	5.7231 mm
<i>emb 41</i>	0.3625	<i>W41</i>	2.9923 mm
<i>emb 42</i>	0.2516	<i>W42</i>	1 mm



Şekil 4.21. Model B bariyer uçları genişliği değişimi



Şekil 4.22. Model B q-ekseni bariyer değişimi

EA-SRM rotorunun boyutlandırmaları, bariyer tipi ve bariyer sayısı analitik olarak hesaplanmış ve optimizasyonları yapılmıştır. Hem analiz sonuçları hem de imalat yöntemi düşünüldüğünde 4 bariyerli ve 0.6 yalıtım oranına sahip Model B üretim yapılabilecek model olarak seçilmiştir. Tork dalgalanması değerinin de optimizasyon ile düşürüldüğü gösterilmiştir. Ayrıca talaşlı imalat yöntemi seçilmesi sebebiyle köşeli tasarım olan Model A, imalata uygun olmamaktadır. Optimizasyon sonucu Model B bariyer ölçüleri değişmiştir. Optimizasyon sonrası ölçüler kontrol edildikten sonra üretimsel süreçlerde bariyer yapısının bütünlüğünü bozmamak için bariyer üretimine uygun ölçüler aralık olarak belirtilerek tekrar optimizasyon yapılmıştır. Üretimsel süreçte uygun bariyer ölçüleri Çizelge 4.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. Model B üretimsel şartlara uygun bariyer ölçüleri

Bariyer uçları	embrace (0 ... 1)	-q eksen	ölçü
<i>emb 11</i>	0.9236	<i>W11</i>	28.6331 <i>mm</i>
<i>emb 12</i>	0.8262	<i>W12</i>	22.7361 <i>mm</i>
<i>emb 21</i>	0.7539	<i>W21</i>	15.9944 <i>mm</i>
<i>emb 22</i>	0.6387	<i>W22</i>	10 <i>mm</i>
<i>emb 31</i>	0.5697	<i>W31</i>	8 <i>mm</i>
<i>emb 32</i>	0.4688	<i>W32</i>	5 <i>mm</i>
<i>emb 41</i>	0.3970	<i>W41</i>	3 <i>mm</i>

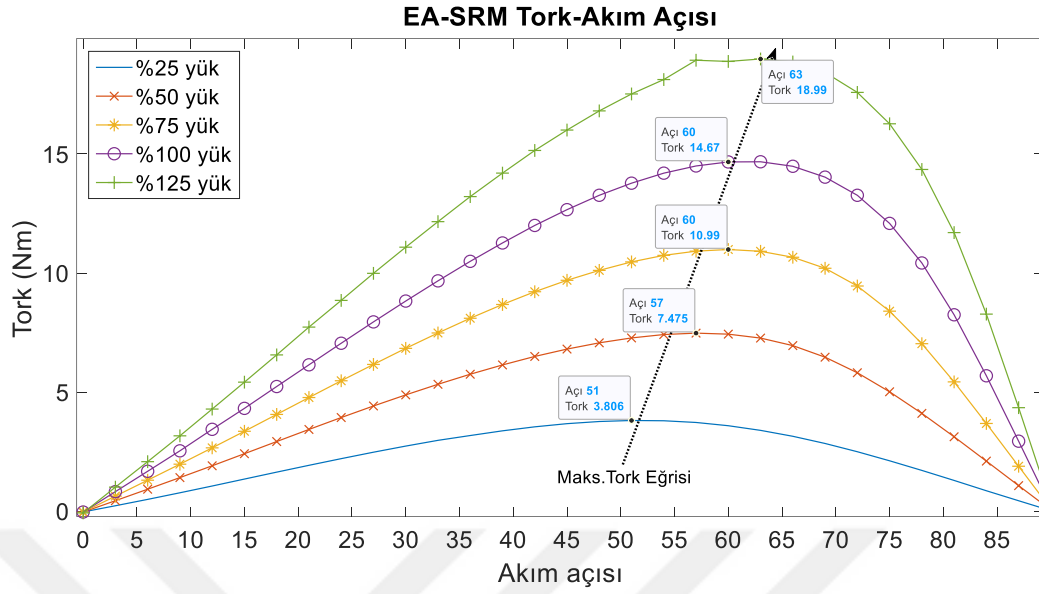
4.2.2. Parametrik analiz sonuçları

Üretimsel süreçler sonucunda motor performansını karşılaştırmak için optimizasyonu yapılmış motorun benzetim sonuçlarına ihtiyaç vardır. Bu sebeple optimizasyon sonrası motor yükü ile akım açısı değişimleri parametrik analiz ile karşılaştırılmıştır. Model 1500 *d/d* çalışacak şekilde analiz edilmiştir. Değişim parametreleri olarak akım açısı 3'er derece artacak şekilde 3° – 90° arası değişimi alınmıştır. EA-SRM'nin akım (yük durumu) ile değişim performansını görmek için maksimum akım değerinin %25, %50, %75, %100 ve %125'i alınarak karşılaştırılmıştır. Analizler optimizasyon analizinde uygulanan 20 *ms* yerine 5 *ms* boyunca yapılmıştır. Bunun sebebi çıkış parametrelerinin zaman ile değişimi, 5 *ms* aralıklarla tekrar etmesi ve analiz süresini kısa tutmaktır. Analiz sonuçları olarak; MTPA, verim, tork, tork dalgalanması, d-q eksenleri akımları, akım başına tork (N_m/A) ve güç faktörü eklenmiştir. Parametrik analiz sonuçları Çizelge 4.18'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.18. EA-SRM parametrik analiz sonuçları

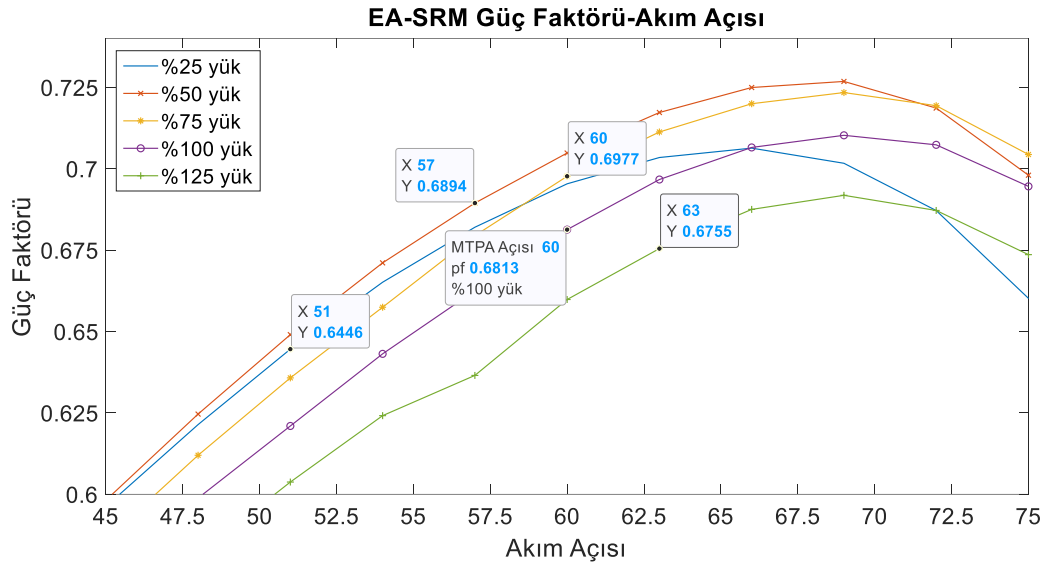
$I_{maks}(A)$	MTPA (derece)	Tork (N_m)	Güç faktörü ($\cos \gamma$)	Verim (%)	$I_d(A)$	$I_q(A)$	Tork Dalgalanması (%)	(N_m/A)
3.0829	51°	3.81	0.65	89.92	1.9353	2.3992	13.74	1.7478
4.8083	57°	7.47	0.69	91.07	2.6223	4.0302	10.89	2.1971
6.4488	60°	10.99	0.7	90.63	3.2292	5.5820	10.59	2.4101
8.2024	60°	14.67	0.7	89.69	3.7238	7.3083	10.02	2.5293
10.2984	60°	18.99	0.68	88.29	4.6753	9.1759	10.13	2.6078

Şekil 4.23'ta tork-akım açısı grafiği gösterilmiştir. Maksimum tork eğrisinden görüldüğü üzere akım değeri arttıkça maksimum tork değerini veren akım açısı da artmaktadır. EA-SRM de tam yük akımında (%100) en yüksek tork değeri 60° çıkmıştır. Bu değer MTPA açısı olan 45° ve hizalama açısı 15.3°'nin toplam değeridir. Akım değerinin %125 'i uygulandığında en yüksek tork değeri 63°'de çıkmıştır. Tam yük akımının %75, %50 ve %25 olduğu durumlarda en yüksek tork değerleri sırasıyla 60°, 57° ve 51° derecelerde çıkmıştır. Teorik olarak maksimum moment 45°'de çıksa da q-eksenindeki bariyerlerin yük akımı artışıyla doyuma gitmeye başlamasıyla birlikte akım açısı da artış göstermektedir.



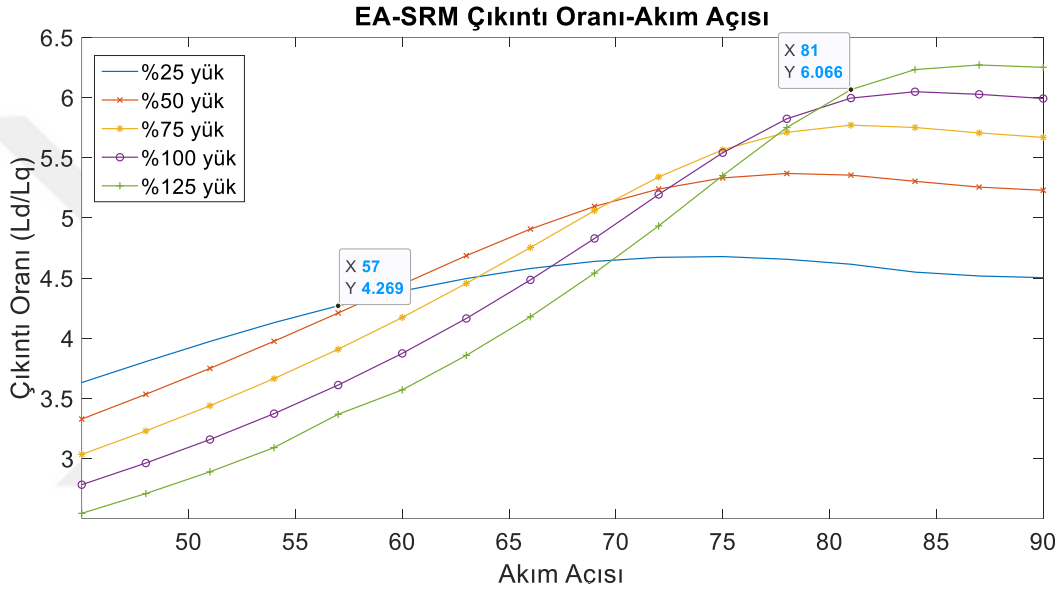
Şekil 4.23. Tork-Akım Açısı grafiği

Güç faktörü grafiği Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Akım açısı arttıkça güç faktörü değerlerinin arttığı gözlenmiştir. EA-SRM'nin tam yük akımındaki güç faktörü, akım açısı 69° dereceye kadar %25 yük hariç tüm yük durumlarında artarak gelişmiştir. Tam yük durumunda en yüksek güç faktörü 69° derece de olmasına rağmen bu açıdaki tork değeri %4.56 daha azdır. Maksimum güç faktörünün görüldüğü 69° derecede en yüksek değer %50 yük durumunda ve en küçük değer ise %125'tedir.

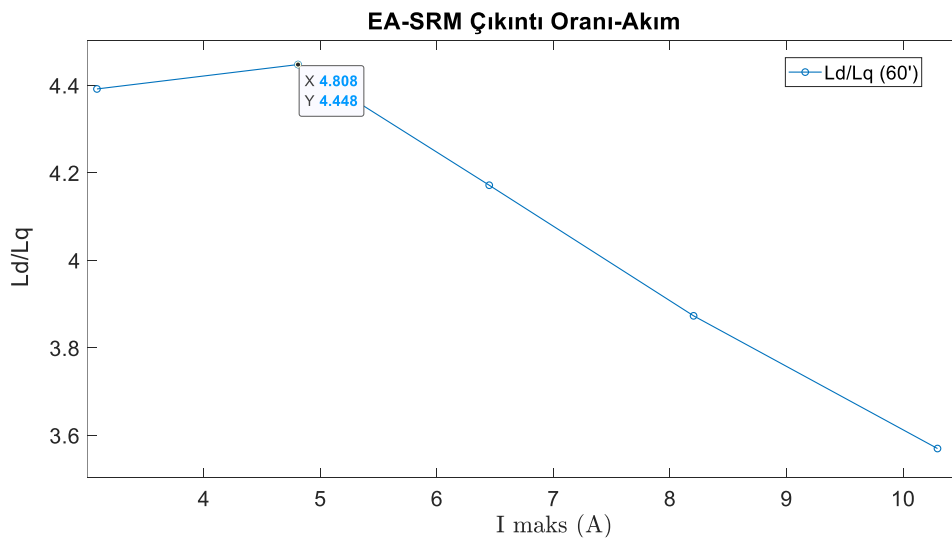


Şekil 4.24. Güç Faktörü-Akım Açısı grafiği

Özgün bir rotor tasarımı olan EA-SRM’de, rotor optimizasyonu ile bariyer geometrisi değişmiş olup çıkıntı oranı gelişimleri Şekil 4.25 ve 4.26’da gösterilmiştir. Akım ve akım açısı değerleri arttıkça çıkıntı oranının da arttığı gözlenmiştir. 57⁰ dereceye kadar yük durumuyla ters orantılı bir çıkıntı oranı var iken, 57⁰ ile 81⁰ derece aralığında durum değişmiştir. 81⁰ dereceden sonra yük durumu ile doğru orantılı bir çıkıntı oranı sıralaması vardır. Tam yük durumundaki akım açısında tüm yük durumlarına baktığımızda, akım arttıkça çıkıntı oranının düştüğü Şekil 3.52’de görülmektedir.

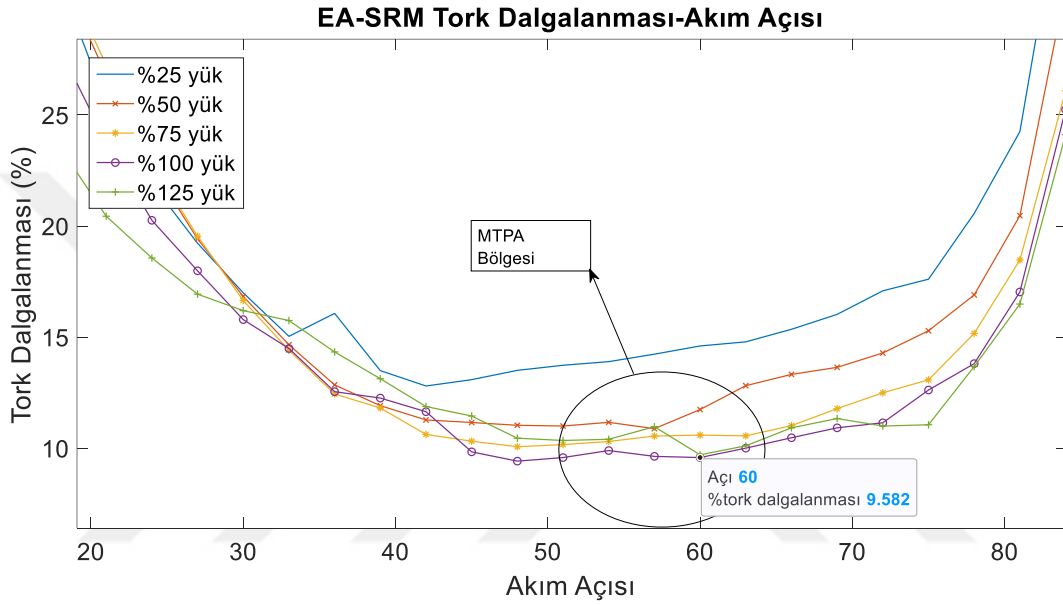


Şekil 4.25. Çıkıntı Oranı-Akım Açısı grafiği



Şekil 4.26. Çıkıntı Oranı-Akım grafiği

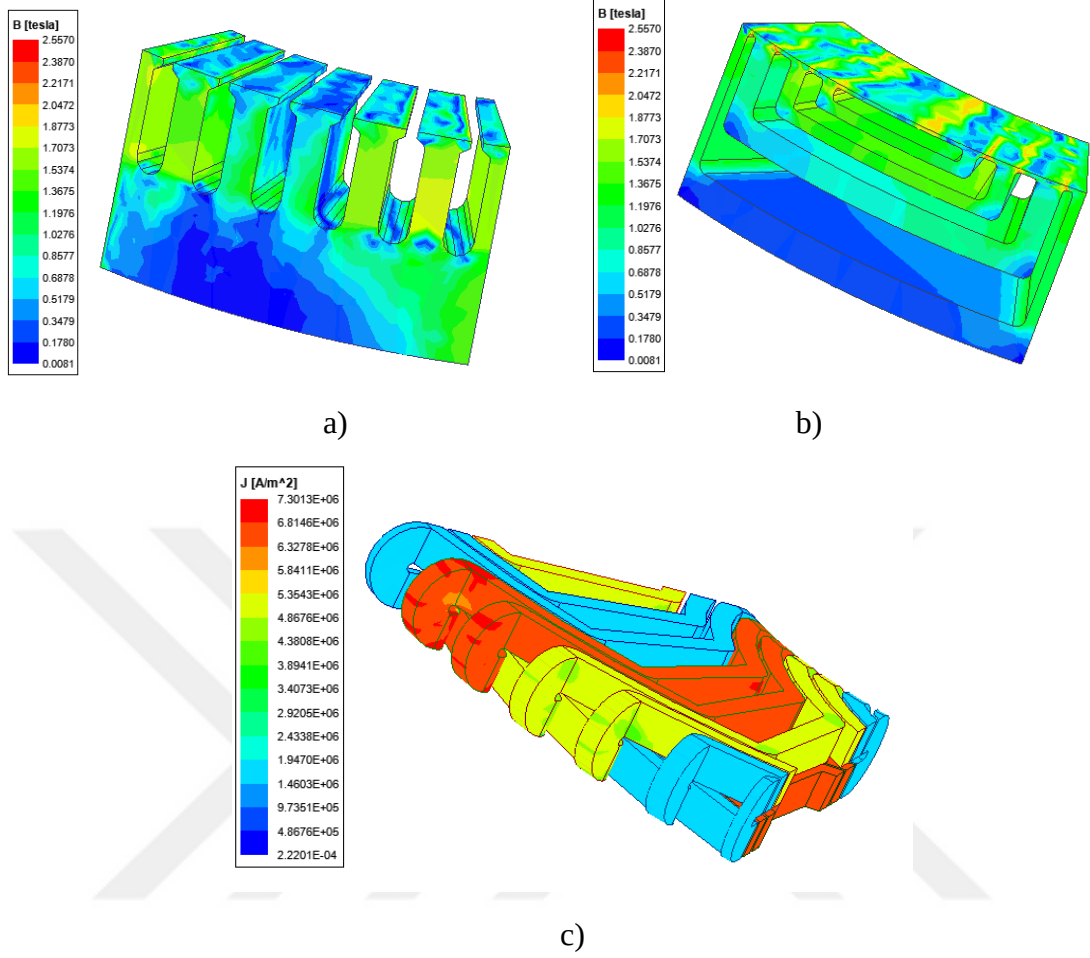
Optimizasyon analizi ile tork dalgalanması değeri hedeflenmiştir. Akım açısı analizine bakıldığında en düşük tork dalgalanması tam yük akımında ve 48^0 'de olduğu (%9.42) görülmüştür. Tam yük MTPA açısı olan 60^0 'de tork dalgalanmasına bakıldığında ise %9.58 ile oransal olarak %1.69 daha fazla tork dalgalanmasına sahip olmasına rağmen en düşük değerdedir. Tork dalgalanması ile akım açısı değişimi Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



Şekil 4.27. Tork Dalgalanması-Akım Açısı grafiği

4.2.3. Manyetik doyum analiz sonuçları

Yapısal ve termal analiz sonuçlarından önce EA-SRM motor parçalarının manyetik doyum analizleri yapılmalıdır. Şekil 4.28' de manyetik doyum analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarında EA-SRM parçalarının doyumda olmadığı gösterilmiştir. Şekil 4.28.a'da stator oluklarındaki akı yoğunluğu değerleri 1.3-1.7 T aralığında ve uygun aralıktadır. Şekil 4.28.b'de gösterilen EA-SRM rotorunda, rotor boyunduruğunda 0.5-0.8 T aralığında ve hava aralığına yaklaştıkça 1.7-1.8 T akım yoğunluğu değerleri ile malzemenin doyumda olmadığı gösterilmiştir. Şekil 4.28.c'de stator sargılarındaki akım yoğunluğu gösterilmiştir ve en yüksek 7.3 A/mm^2 ile motorun nominal çalışma şartlarında sorun oluşturmayacaktır.



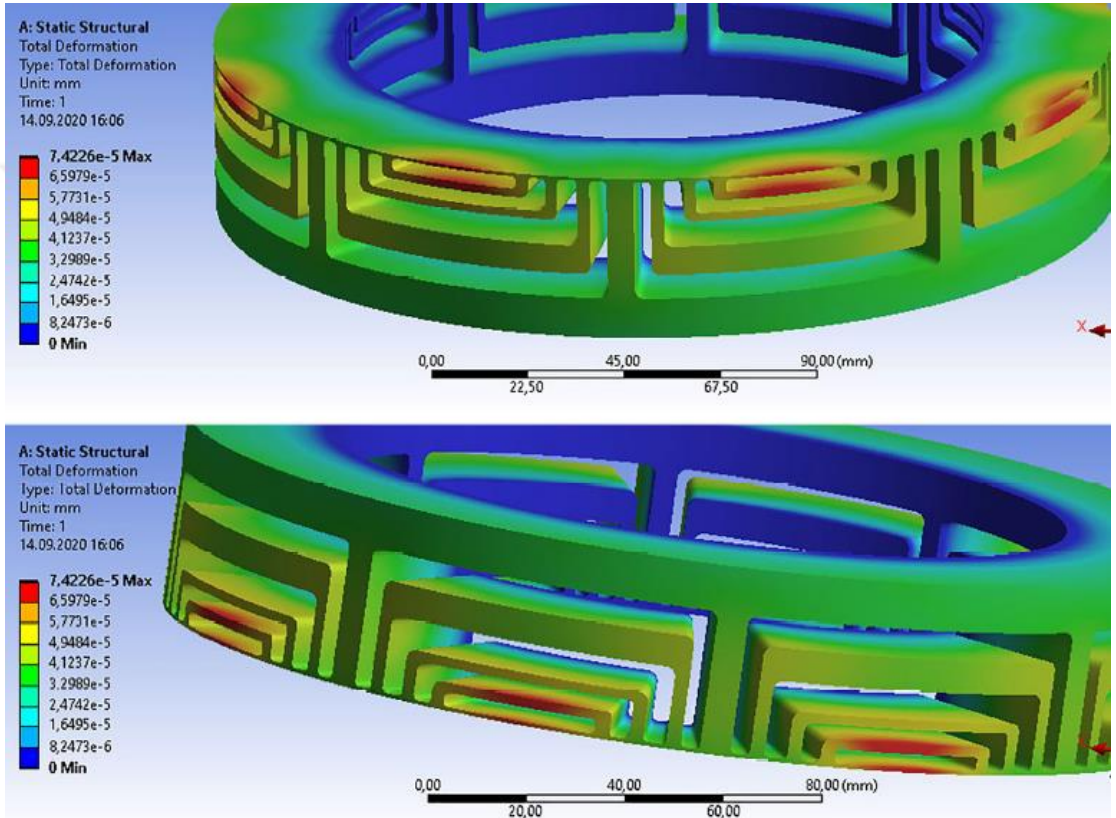
Şekil 4.28. Manyetik doyum analizleri a) Stator manyetik akı yoğunluğu b) Rotor manyetik akı yoğunluğu c) Stator sargıları akım yoğunluğu

4.2.4. Yapısal analiz sonuçları

Tasarımı yapılmış EA-SRM'nin üretime hazır olması ve güvenli şekilde çalışabilmesi için aksenal çekiş kaynaklı yapısal olumsuzluk yaşanmaması adına deformasyon (bozulma) ve stress (gerilme) açısından analizi yapılmalıdır. SEY tabanlı yapısal analiz sonuçları gösterilmiştir. Ortalama toplam deformasyon 0.000029473 mm olarak hesaplanmıştır. Stator ve rotor arasındaki hava aralığının 0.3 mm olmasından ötürü toplam deformasyon oranı güvenli aralıktadır.

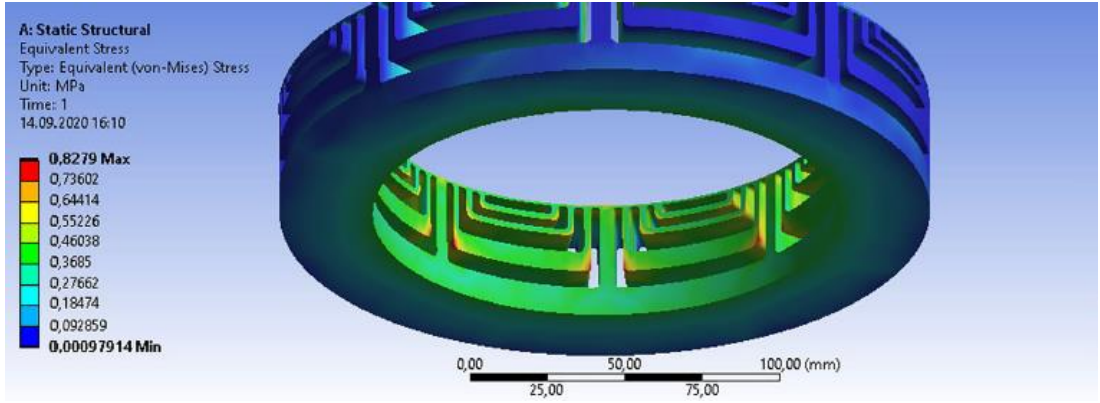
Stres analizinde ise sonuç 0.26747 MPa çıkmıştır. Bu değerler motorun çalışması durumunda sorun oluşturmayacaktır. Rotor mukavemetinin artırılması için rotor bariyer boşluklarının polyester içerikli epoksi malzeme ile doldurulmasına karar verilmiştir.

Toplam deformasyon görüntüleri Şekil 4.29’da gösterilmiştir. Deformasyonun en fazla olduğu yerler bariyer uçlarından statora yakın bölgelerdir. Şekil 3.24’te gösterilen bariyer ve demir bölgelerinin kısaltmalarını kullanacak olursak, özellikle S3,S4 ve S5 segmentlerinin dış çapa yakın olduğu bölgelerde deformasyon görüntülenmiş olup maksimum 0.000074226 mm bozulma değeri ile düşük seviyededir.



Şekil 4.29. EA-SRM yapısal analizleri – toplam deformasyon

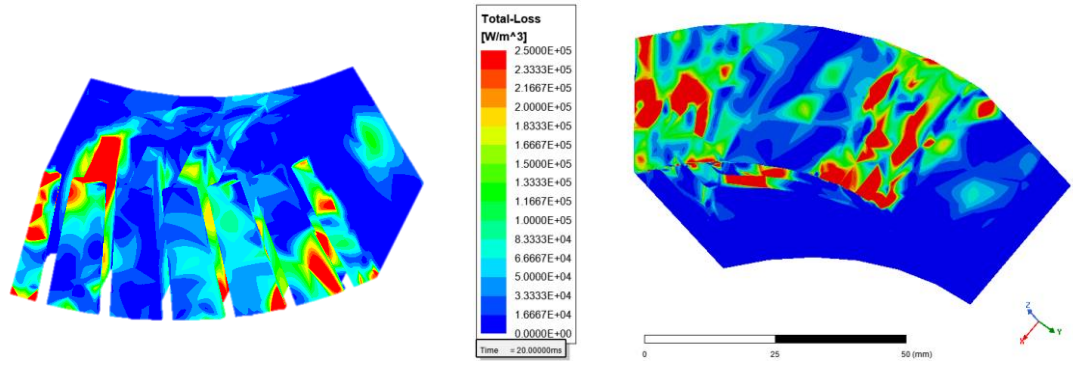
Şekil 4.30’da ise toplam stress yani gerilme görüntülenmiştir. Gerilmelerin rotor bariyerlerinin iç çapa yakın ve demir (segment) köşelerinde olduğu gösterilmiştir. Gerilme maksimum 0.8279 MPa değerini bu bölgelerde görmüştür ve güvenli çalışma durumu için yeterli seviyededir.



Şekil 4.30. EA-SRM yapısal analizleri – toplam gerilme (stres)

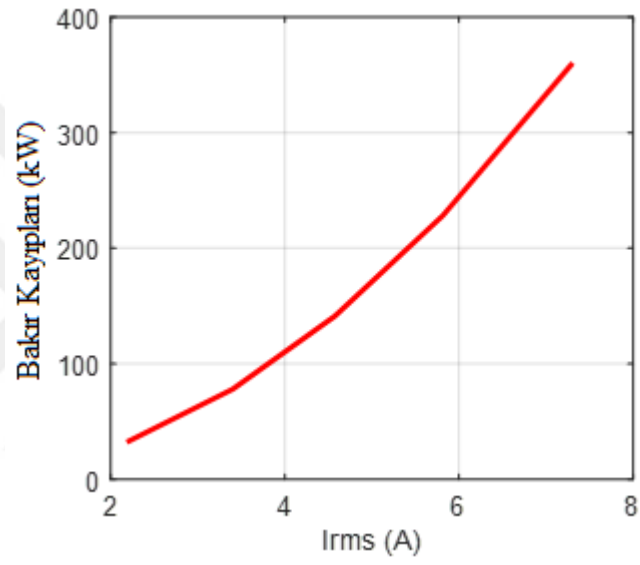
4.2.5. Termal analiz sonuçları

Stator ve rotor kayıpları grafikleri (Şekil 4.31) incelendiğinde statorda iç çapta yer alan dişlerde daha yoğun kayıplar meydana gelirken, rotorda ise hava aralığına en yakın ve en ince bariyerlerde en fazla kayıp yaşandığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak bu bölgelerde meydana gelen manyetik doyumlar gösterilebilir. Aynı şekilde Eşitlik 3.107 bağlı olarak stator sargılarında meydana gelen bakır kayıpları yüke ve buna bağlı olarak akım artışına göre artış göstermektedir. Bu çalışmada geometrik model Ansys Maxwell programından içeri aktarılmıştır. EA-SRM'nin karmaşık yapısından ötürü termal analizde yapısal ağ kullanılmıştır. Motor termal modelinde 2926085 düğüm, 649589 yüzey ve 2773928 hücre yapısı kullanılmıştır. Ortam sıcaklığı $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Sargılardaki kayıp 206.98 W , stator ve rotor çekirdeklerindeki ısı kayıpları 30.4 W ve toplam kayıplar 237.38 W çıkmıştır. Bu durumda yapılan analizlerde stator, rotor ve sargılarda meydana gelen sıcaklık dağılımı Şekil 4.32'de verilmiştir. Daha net görünüm için 1/8 model verilmiştir.



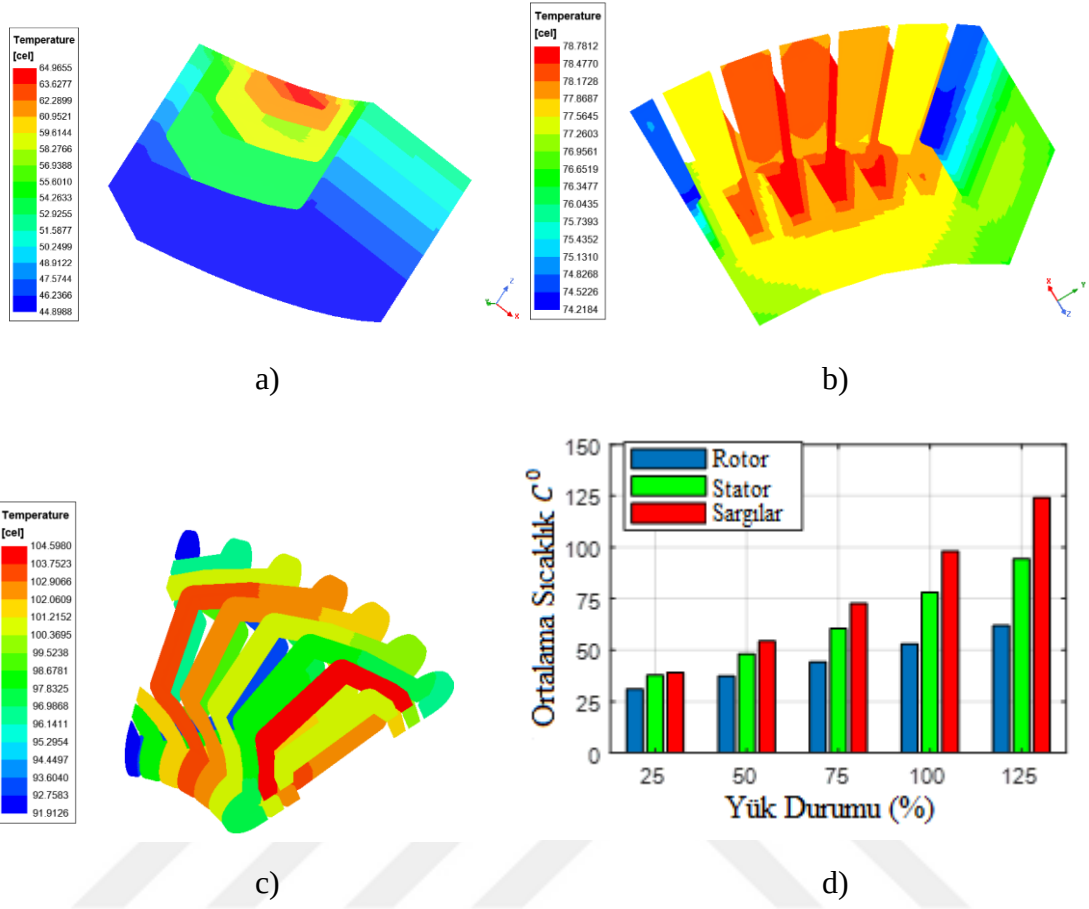
a)

b)



c)

Şekil 4.31. EA-SRM termal analiz a) stator b) rotor kayıpları c) Toplam kayıplar-akım



Şekil 4.32. EA-SRM termal analiz a) stator b) rotor ve c) sargılarda meydana gelen sıcaklık dağılımı d) yük durumuna göre ortalama sıcaklıklar

EA-SRM'nin rotorunda herhangi sargı, kafes veya mıknatıs bulunmamaktadır. Şekil 4.32.a' dan da görüleceği üzere tam yük altında en sıcak noktası hava arlığına en yakın nokta olan bariyer olup $64.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Alt bariyerlere ve boyunduruğa doğru ilerledikçe rotor daha soğuk olup tam yük altında ortalama sıcaklığı $53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Aynı şekilde stator da en sıcak noktalar iç çapta kalan dişler olup tam yük altında en sıcak noktası $78.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, ortalama sıcaklık ise yaklaşık $77.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. EA-SRM için asıl ısı kaynağı olan sargılarda ise bitiş uzantıları kısımları daha sıcak olup tam yük altında maksimum sargı sıcaklığı $104.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken ortalama sargı sıcaklığı $98\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Şekil 4.32.d' de yük durumuna göre ortalama sıcaklıklar görülmektedir. Görüleceği üzere yük seviyesinin artışı ile ortalama sıcaklıklar ve parçalar arasındaki sıcaklık farkı da artmaktadır.

4.3. Deneysel Sonuçların İncelenmesi ve Karşılaştırmalar

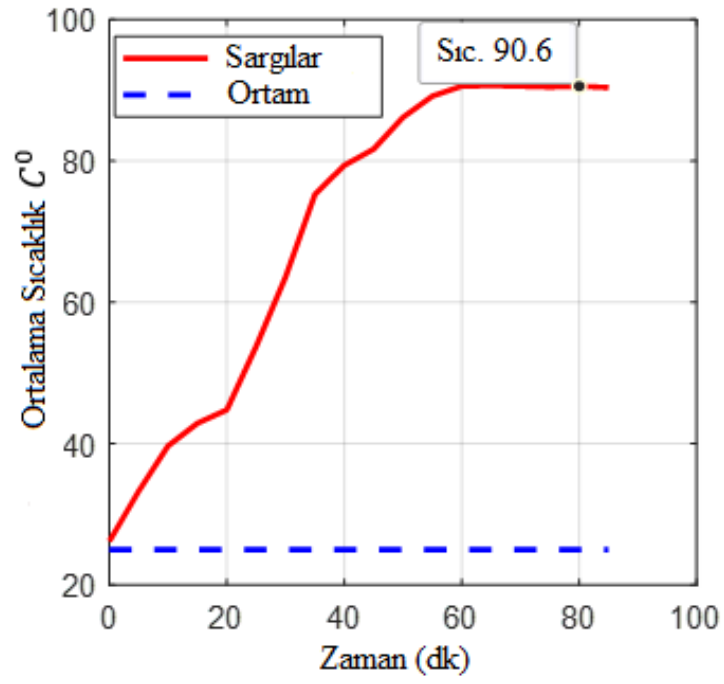
Analitik ve SEY sonuçları sonrası üretimi yapılan prototip motorun deneysel çalışmaları yapılmıştır. Bu bölüm altında deneysel ortamda yapılmış tüm test sonuçlarına yer verilmiştir.

4.3.1. Termal analiz deneysel sonuçları

Deney düzeneği üzerinde yapılan ısınma deneyi IEC 60034-1 standartına uygun olarak yapılmıştır. Motor sıcaklığının izin verilen maksimum sıcaklık değerlerini aşması durumunda motor sargılarının motor gövdesiyle olan yalıtımını sağlayan yalıtkan malzeme zarar görebilir ve motor sargıları arasında kısa devrelere neden olabilir. EA-SRM'ler için sıcaklıktan büyük ölçüde etkilenen kısımlar sargılardır. Sıcaklığın yükselmesiyle birlikte sargı direnci artmaktadır. Doğal soğutmalı olarak imal edilen EA-SRM için ısı analizlerinden çıkarılan sonuçlara göre nominal çalışma sıcaklığının $96\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarı olması düşünülmektedir. IEC 60034-1 standardına göre yapılan ısınma deneyinde motorun belirli bir mil gücü ile yüklenmesi ve belirli aralıklarda sargı direncinin ölçülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Isınma deneyi başlangıç koşulu olarak motor iç sıcaklığının ortam sıcaklığı olarak kabul edilmesidir. Şekil 4.33'te test sistemi verilmiştir. Motor sargı sıcaklığının ölçümünde TS-6801A marka cihaz ve probu kullanılmıştır. Test sistemi ile ilgili detaylı bilgiler önceki bölümlerde sunulmuştur. Şekil 4.34 incelendiğinde deneysel ve SEY sonuçları arasında yaklaşık $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik bir sapma olduğu görülmektedir. Bu sapmanın nedeni SEY ortamında yapılan modellemede kabul edilen çözücü ayarları, ağ yapısı ile deneysel çalışmada tek bir sargıdan ölçüm almak gösterilebilir.



Şekil 4.33. Termal testler için test düzeneği



Şekil 4.34. EA-SRM termal analiz deneysel sonuçlar

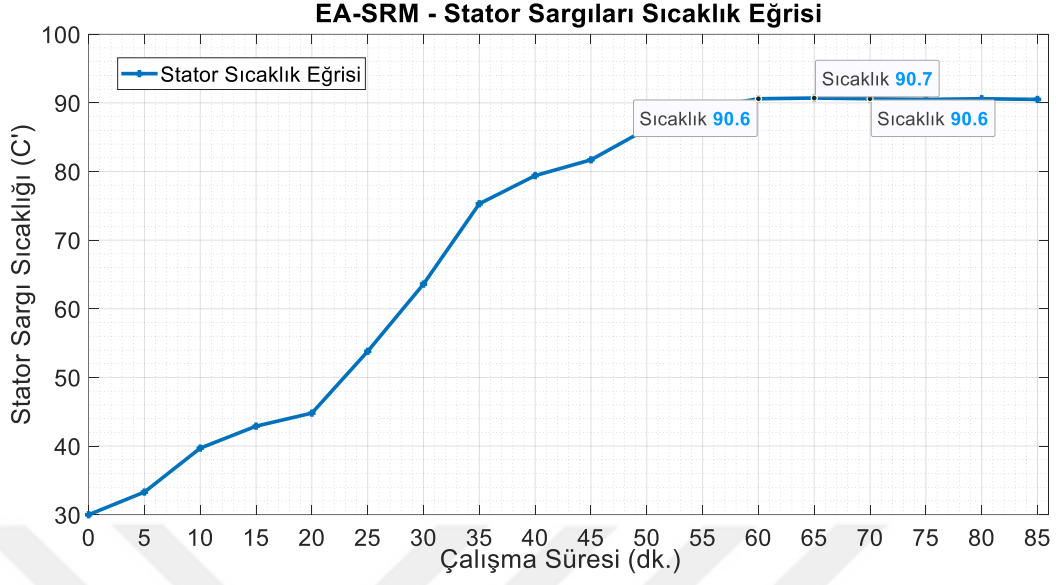
4.3.2. Stator sargı dirençlerinin ölçümü

Direnç ölçümleri ve sıcaklık testi öncesi motor parametrelerine ait veriler Çizelge 4.19’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.19. Sıcaklık testi öncesi direnç ölçümü

Test Zamanı	24.12.2020		
Motor Tipi	EA-SRM		
Gerilim	380 V		
Frekans	100 Hz		
Hız	1500 d/d		
Güç	2.2 kW		
Ortam Sıcaklığı	24.7 C ⁰		
Sıcaklık Testi Öncesi Stator Dirençleri	R_{xu}	R_{yv}	R_{zw}
	1.7592 ohm	1.8852 ohm	1.8007 ohm
	R_{ort}		
	1.8150 ohm		

Motor sargı sıcaklık eğrisini elde etmek için motor test düzeneğinde % 100 yük ile yüklenmiş ve eğrisi gözlenmiştir. Sargı sıcaklığının zaman ile değişim grafiği 4.35’te gösterilmiştir.



Şekil 4.35. Sargı sıcaklığı eğrisi

Şekil 4.35'te görüldüğü üzere sargı sıcaklıkları 60. dakikadan itibaren $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık rejimine oturmuş ve stabil olmuştur. Motor sıcaklık testinden sonra motor çalışması durdurulmuş ve direnç ölçümleri tekrarlanmıştır. Çizelge 4.20'de sıcaklık testi sonrası direnç verileri gösterilmiştir. Görüldüğü üzere ortalama direnç değeri % 35.5 artış göstermiştir.

Çizelge 4.20. Sıcaklık testi ve sonrası alınan veriler

Hat gerilimi	379.4 V		
Akım	5.627 A		
Güç faktörü	0.69		
Tork	14.01 Nm		
Aktif yük	% 100.1		
Hız	1500 d/d		
Mil gücü	2.19 kW		
Çıkış gücü	2.51 kW		
Ortam Sıcaklığı	25.2 C ⁰		
Sıcaklık Testi Sonrası Stator Dirençleri	R_{xu}	R_{yv}	R_{zw}
	2.202 ohm	2.364 ohm	2.258 ohm
	R_{ort}		
	2.274 ohm		

4.3.3. Performans testleri

Bu bölümde test düzeneğine bağlı motorun performansları test edilmiştir. ABB ACS-880 motor sürücüsü üzerinden motor çalıştırılmış ve yük durumlarına göre sonuçlar elde edilmiştir. Motorun SEY analizi sonuçları ile karşılaştırılıp grafikleri elde edilmiştir. Yükleme aralıkları %25, %50, %75, %100 ve %125 olarak alınmıştır. Motor sürücüsü üzerinden okunan değerler MTPA açısında elde edildiğinden SEY analizi üzerinde de

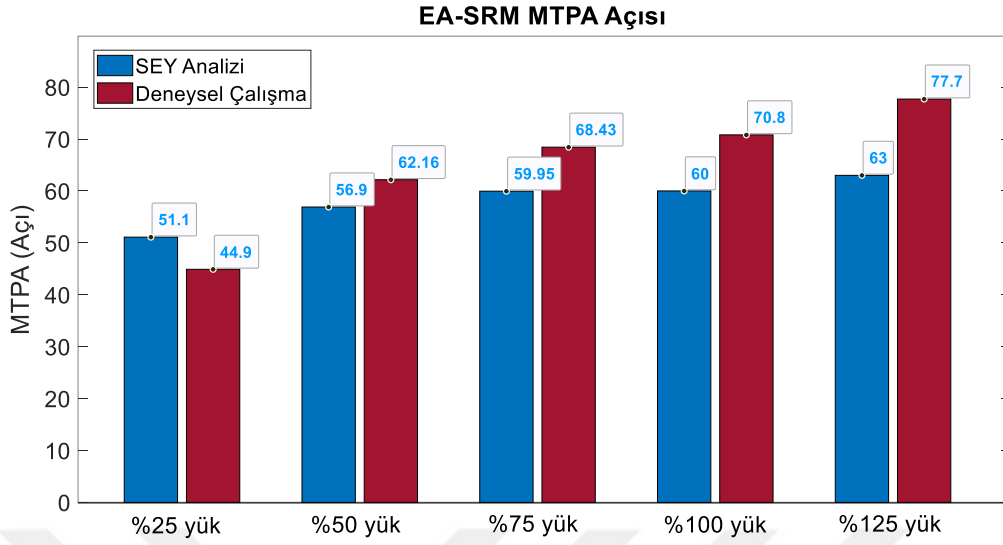
maksimum torkun verildiği değerler baz alınmıştır. Çizelge 4.21’de motorun farklı yük durumlarındaki sürücü üzerinden alınan sonuçları gösterilmiştir.

Motor test düzeneğine bağlandıktan sonra yüklenme testleri yapılmış ve motor çıkış parametreleri sürücü yazılımı üzerinden gözlenmiştir. Tork, akım, gerilim, $I_d - I_q$, güç faktörü, verim ve tork dalgalanması değerleri karşılaştırılmıştır. Motor sürücümüzün bize verdiği değerler MTPA açısında elde edildiğinden simülasyon üzerinde de maksimum torkun verildiği değerler baz alınmıştır.

Çizelge 4.21. EA-SRM prototipi deneysel sonuçları

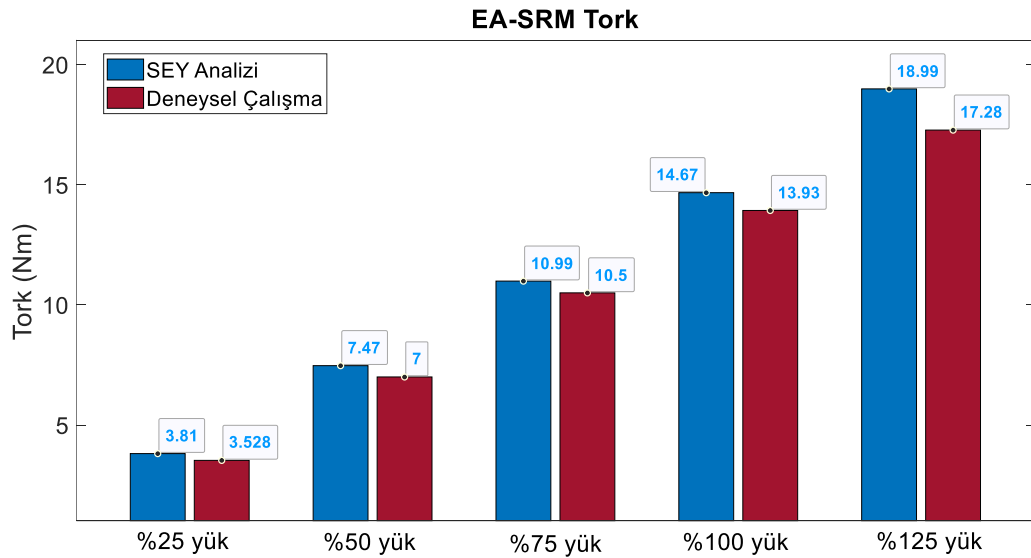
$I_{maks}(A)$	MTPA (derece)	Tork (N_m)	Güç faktörü ($\cos \gamma$)	Verim (%)	$I_d(A)$	$I_q(A)$	Tork Dalgalanması	(N_m /A)
3.0829	44.9 C^0	3.528	0.6	88.88	2.1837	2.1761	36.3	1.6184
4.8083	62.16 C^0	7	0.7	90.75	2.2454	4.2517	13.77	2.0588
6.4488	68.43 C^0	10.5	0.69	89.5	2.3708	5.9971	9.78	2.3026
8.2024	70.8 C^0	13.93	0.67	89.3	2.6974	7.7461	9.52	2.4017
10.2984	77.7 C^0	17.276	0.67	85.8	2.1938	10.062	7.05	2.3724

Motor performanslarını karşılaştırmak için deneysel ve SEY analizi sonuçlarındaki MTPA açılarını belirleyip bu değerlerdeki veriler kullanılmıştır. %25 yük durumu hariç diğer durumlarda deneysel çalışmadaki MTPA değerleri ortalama %16.17 sapma ile yüksek çıkmıştır (Şekil 4.36).



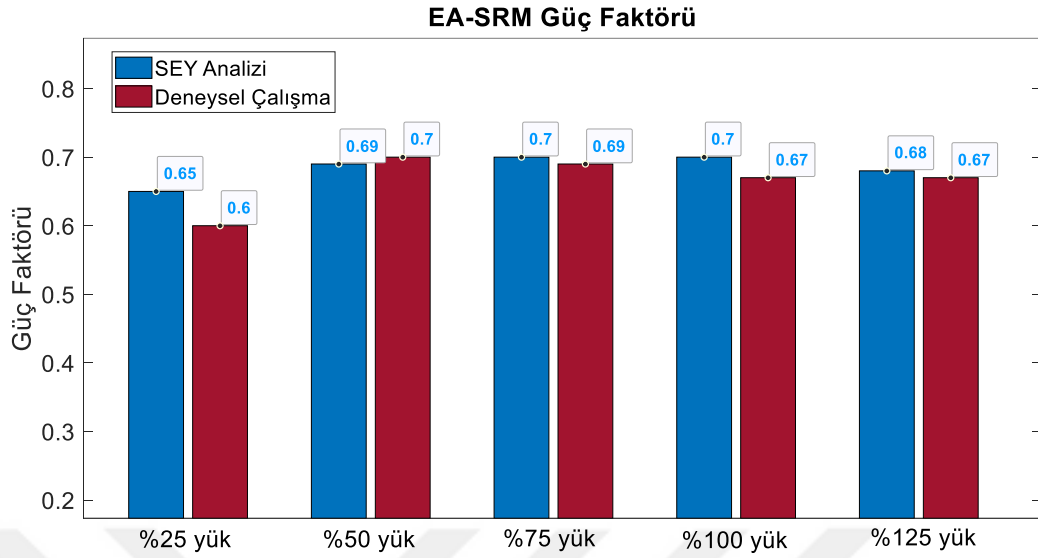
Şekil 4.36. EA-SRM MTPA açısı karşılaştırmaları

Şekil 4.37'deki tüm yük durumlarında, deneysel sonuçlardaki tork değerleri düşük çıkmıştır. Deneysel çalışmadaki tork değerleri ortalama %6.912 sapma ile SEY analizi sonuçlarına yakındır. Bu fark deneysel çalışmada kullanılan endüstriyel sürücünün akım açılarına müdahale edilemeyip otomatik hesaplamasından kaynaklanmaktadır.



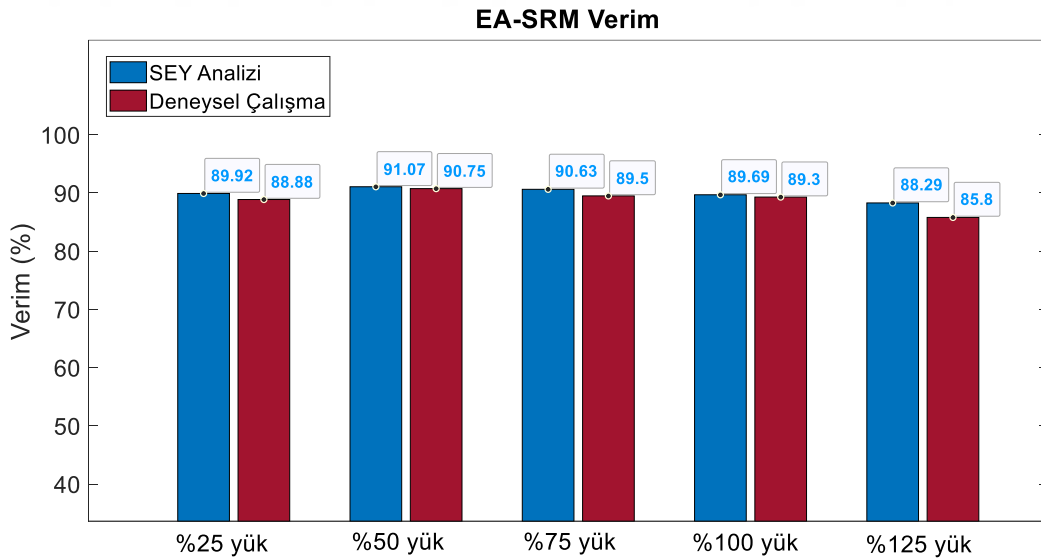
Şekil 4.37. EA-SRM tork karşılaştırmaları

Şekil 4.38'de gösterildiği üzere hem SEY analizi hem de deneysel sonuçlarda düşük yük durumu hariç güç faktörü 0.7 seviyelerindedir ve örtüşmektedir.



Şekil 4.38. EA-SRM güç faktörü karşılaştırmaları

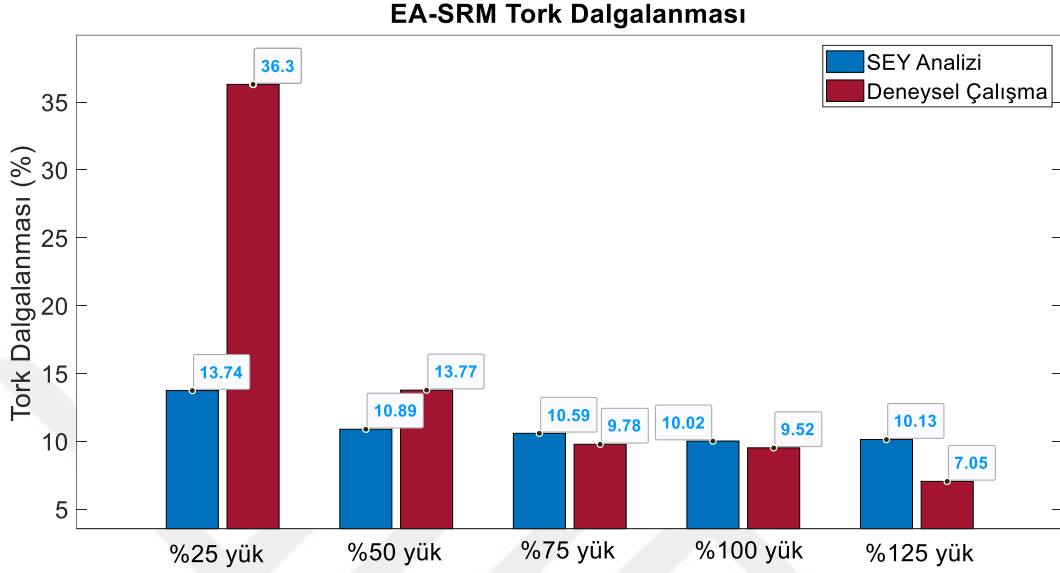
Verim sonuçlarına bakıldığında da örtüşme mevcuttur (Şekil 4.39). Tam yükte deneysel çalışmada %0.39 sapma mevcuttur. Bu değerler deney sonuçlarında beklenen ve uygun aralıkta bir sapmadır. Burada motor verim değeri, akım değeri ile artmış, %100 ve %125 yük durumlarında tepe değerlerinden aşağı değerler almışlardır.



Şekil 4.39. EA-SRM verim karşılaştırmaları

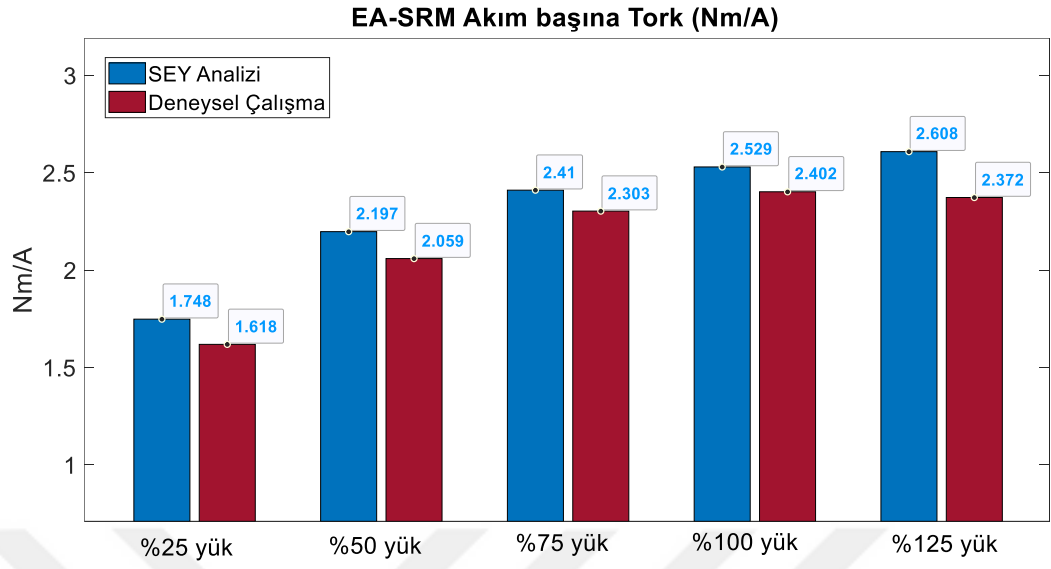
Şekil 4.40'ta gösterilen sonuçlarda örtüşmeler olmakla birlikte yük ve akım değerleri arttıkça tork dalgalanmasının da azaldığı görülmüştür. Özellikle deneysel çalışmanın %125 yük durumunda en düşük değeri almıştır. Deneysel çalışmada kullanılan tork sensörü

değerinin 0 – 100 Nm ölçüm aralığı olması sebebiyle %25 yükteki tork salınım değeri benzetime göre bir miktar yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte yük artışıyla birlikte sonuçlar tutarlıdır.



Şekil 4.40. EA-SRM tork dalgalanması

Akım başına tork değerlerine bakıldığında (Şekil 4.41) ise SEY analizi ve deney sonuçları korelatif olarak değişmektedir. Yük miktarı arttıkça Nm/A oranı da artmıştır. Tork değeri yük ile doğru orantılı artmış olmasına rağmen Nm/A oranı maksimum tam yük değerinde gözlenmiştir. Bu da motorun optimal çalışma noktasında çalıştığının göstergesidir.



Şekil 4.41. EA-SRM akım başına tork (Nm/A)

5. SONUÇ

Bu tez çalışması ile enerji verimliliği ve kompakt yapının öneminin her geçen gün arttığı günümüzde, rotorunda bakır kaybı bulunmayan ve eksenel yapısı ile kompakt yapıda bulunan ve daha önce çalışılmamış özgün bir motor olan EA-SRM tasarımı yapılmış ve prototipi üretilmiştir. Statorunda yüksek sargı faktörü ve relüktans tork üretimi için dağıtılmış sargılardan oluşan 48 oluk 8 kutup kombinasyonu seçilmiştir. Bu çalışmada öne çıkan ve özgün kısım olan rotor tasarımı üzerine odaklanılmıştır.

Prototip üretimi aşamasına kadar Şekil 3.17’de gösterilen tasarım aşamaları izlenmiştir. Rotor geometrisi tasarımı için 2 farklı bariyer tipi, 3 farklı yalıtım oranı ve çoklu bariyer sayısı olmak üzere toplam 24 adet model analitik olarak hesaplanmış ve ANSYS Maxwell 3D SEY analiz ortamına aktarılmış ve tasarlanmıştır. Modelleme sürecinde analiz süresinin kısaltılması açısından 1/8 3D motor modelleri kullanılmıştır. Tasarım sürecinde motor parçalarında materyal olarak, Stator için JFE_Steel_35JN300 ve rotor için Steel_1008 kullanılmıştır. Rotor bariyer tipi olarak iki model seçilmiştir. Bunlardan ilki bariyer yapısı köşeli tasarıma sahip ve Model A olarak isimlendirilmiştir. Diğerisi ise bariyer yapısı açısallı olarak yuvarlatılmış ve Model B olarak isimlendirilmiştir. Her iki model için rotor bariyer/demir oranını ifade eden üç farklı yalıtım oranında tasarımlar yapılmıştır. Bunlar 0.6, 1 ve 1.5 oranlarında ayrı ayrı analitik olarak hesaplanmış ve SEY ortamına aktarılmıştır. Ayrıca literatür araştırmaları da göz önüne alınarak bariyer sayıları 1, 2, 3 ve 4 olarak ayrı ayrı incelenmiştir.

Model A ve Model B 4 bariyerli tasarımların 0.6 yalıtım oranlarındaki tork değeri 1 bariyerli modellerden sırasıyla %17.64 ve %13.96 daha fazla çıkmıştır. Benzetim programındaki analiz sonuçları bariyer sayısı artışının, EA-SRM motor performansındaki etkisini göstermektedir. Bu artış sadece tork ile kalmamakla birlikte güç faktörü, çıkıntı oranı ve mil gücü de artmaktadır. 4 bariyerli tüm yalıtım oranlarındaki EA-SRM tasarım modelleri, 14 Nm’nin üstünde tork değerleri göstererek, 2.2 kW gücünde üretilmiş aynı katalog değerlerindeki örnek bir radyal akıllı SRM den ortalama %4.5 daha yüksek çıkmıştır (Çizelge 4.11 ve 4.12). Model A ve Model B tasarımları tork parametresi açısından yeterliliğe sahip olmasına rağmen tork dalgalanması değerleri yüksek çıkmıştır (en düşük %9.7 ve en yüksek %21.58).

Tork dalgalanmasını düşürmek amaçlı 4 bariyerli ve sezgisel bir optimizasyon algoritması olan GA kullanılmıştır. Optimizasyon analizinde, istenilen sonuca ulaşıncaya kadar her bir iterasyonda bariyer ve segment kalınlıkları değiştirilerek hedefe ulaşılmıştır. Yapılan iyileştirme çalışmalarında rotor bariyer uçlarının konumları ve q-eksenindeki kalınlıkları değiştirilerek tork dalgalanması başarıyla düşürülmüştür. Sonuç olarak optimum sonuçları veren 4 bariyerli, 0.6 yalıtım oranında ve bariyer köşeleri açılmal olarak yuvarlatılmış model seçilmiştir. Rotor bariyerlerinin açılmasında üretim kısıtlamalarından kaynaklı geri bildirimler değerlendirilerek optimizasyon aralıkları yeniden belirlenmiş tekrar optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda 3. bariyer ucu genişliği ile 3. ve 4. bariyer kalınlıklarının tork dalgalanmasını düşürmede önemli rollere sahip oldukları gösterilmiştir.

Üretimsel süreçler sonucunda motor performansını karşılaştırmak için optimizasyonu yapılmış motorun benzetim sonuçlarına ihtiyaç vardır. Bu sebeple optimizasyon sonrası motor yükü ile akım açısı değişimleri parametrik analiz ile karşılaştırılmıştır. Model 1500 d/d çalışacak şekilde analiz edilmiştir. Değişim parametreleri olarak akım açısı 3'er derece artacak şekilde $3^0 - 90^0$ arası değişimi alınmıştır. EA-SRM'nin akım (yük durumu) ile değişim performansını görmek için maksimum akım değerinin %25, %50, %75, %100 ve %125'i alınarak karşılaştırılmıştır.

Prototip üretimine geçmeden motorun yapısal ve termal testleri de yapılmıştır. Yapısal analiz de toplam gerilme ve stress analizleri yapılmıştır. Ortalama toplam deformasyon 0.000029473 mm olarak hesaplanmıştır. Stator ve rotor arasındaki hava aralığının 0.3 mm olmasından ötürü toplam deformasyon oranı güvenli aralıktadır. Gerilme analizinde iç çapa yakın ve demir (segment) köşelerinde maksimum 0.8279 MPa değerini görülmüştür ve güvenli çalışma durumu için yeterli seviyededir.

EA-SRM'nin rotorunda herhangi sargı, kafes veya mıknatıs bulunmamaktadır. Termal analizlerde tam yük altında rotorun en sıcak noktası hava aralığına en yakın nokta olan bariyer olup 64.9 C^0 'dir. Alt bariyerlere ve boyunduruğa doğru ilerledikçe rotor daha soğuk olup tam yük altında ortalama sıcaklığı 53 C^0 'dir. Aynı şekilde statorunda en sıcak noktalar iç çapta kalan dişler olup tam yük altında en sıcak noktası 78.8 C^0 , ortalama sıcaklık ise yaklaşık 77.9 C^0 'dir. EA-SRM için asıl ısı kaynağı olan sargılarda ise bitiş

uzantıları kısımları daha sıcak olup tam yük altında maksimum sargı sıcaklığı $104.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken ortalama sargı sıcaklığı $98\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu sıcaklıklar değerlendirildiğinde motorun üretilebilirliği sonrası çalışma koşulları içinde sıkıntı oluşturmayacağı gösterilmiştir.

Benzetim sonuçları neticesinde prototip motor üretilmiştir. Rotor bariyerlerinin açılmasında talaşlı imalat yöntemi seçilmiştir. Üretimi yapılan prototipin motor sargı dirençlerinin bulunması, motorun termal sonuçları ve performans testleri yapılmıştır. Prototip motorun eşdeğer devre parametrelerinin bulunması amacı ile ABB ACS 880 sürücüsü üzerinden yüksüz olarak çalıştırılmıştır. Test aşamasında motorun sıcaklığı nominal çalışma noktasına kadar yükseltilmiştir. Çalışma sonucunda stator sargı direnci $R_{ort} = 2.274\text{ ohm}$ olarak ölçülmüştür.

Üretilen prototip IEC TS 60034-30-2 kriterlerine göre test edilmiş ve IEC 60034-30-1:2014 IE4 Süper Premium verim sınıfına sahip olmuştur. Tork, tork dalgalanması, güç faktörü, mil gücü, akım başına tork ve verim parametreleri test edilerek benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tam yükte yüzdesel sapma; tork için % 5.312, güç faktörü için % 4.47 ve verim için % 0.43 ile başarılı şekilde örtüşmüştür. Bu değerler üretimsel süreçler göz önüne alındığında motor performansını etkileyecek düzeyde değildir. Ayrıca deneysel çalışmada tork dalgalanması yüzdesel oranda % 5.25 daha düşük çıkmıştır.

Sonuç olarak tamamlanmış olan tez çalışması ile özgün yapıda tasarlanmış 2.2 kW – 1500 d/d ve 8 kutuplu EA-SRM prototipi, başarılı şekilde üretilmiş ve 60034-30-1:2014 IE4 Süper Premium verim sınıfına sahip olduğu belirlenmiştir. Rotorunda kafes bulunmaması sebebiyle bakır kayıplarının olmaması ve mıknatıssız yapısıyla maliyet-bakım masrafının düşüklüğü, yüksek verim ve tork istenilen uygulamalarda iyi bir alternatif olacaktır. Eksenel yapısı ile boyut problemi yaşanan uygulamalarda radyal akılı motorların yerini almaya aday olacaktır.

Yapılan bu tez çalışmasında özgün tarafın rotor kısmı olduğu düşünülürse, ilerleyen çalışmalarda farklı rotor topolojileri tasarlanarak motor performans ve üretilebilirliği konusunda gelişmeler sağlanabilir. Örneğin rotor bariyerlerine mıknatıs ilavelerinin yapılarak motor performansları değerlendirilebilir. Bunlara ilave olarak tek stator-çift rotor veya çift stator-tek rotor topolojileri incelenip bu modellerinde mıknatıslı-mıknatıssız tasarımlarının geliştirilmesi, motor performansları açısından gözlenebilir.

EA-SRM'lerin kontrolünde endüstriyel sürücülerin yerine tüm parametrelerinin ayarlanabileceği bir sürücünün kullanılması yine farklı parametreler girilerek sonuçların karşılaştırılması açısından detaylı analizlerin gözlemini sağlayabilecektir. Motorun termal analizlerinde birden çok noktalardan ölçüm alınarak verilerin doğruluğu artırılıp geri beslemelerle tasarımda farklılıklar sağlanabilir hale gelebilmektedir. EA-SRM'lerde çıkıntı oranı ve bariyer yapısının önemine istinaden bariyer sayısı, bariyer tipleri, bariyerlerin açısal konumlandırılması ve bariyerlere kırımların ilaveleri gibi birçok tasarım geliştirilerek literatüre katkısı ve endüstriyel olarak değerlendirilmesi yapılabilir.



6. KAYNAKLAR

- Adouni, A. ve Cardoso, A.J., 2019. Thermal Analysis of Synchronous Reluctance Machines – A Review. *Electric Power Components and Systems*, 47, 471-485.
- Aghazadeh, H., Afjei, E. ve Siadatan, A., 2019. Sizing and detailed design procedure of external rotor synchronous reluctance machine. *IET Electric Power Applications*, 13(8), 1105-1113.
- Akgün, E., 2018. Motor kullanılan sistemlerde enerji verimliliği, 9. Enerji Verimliliği Forum ve Fuarı, İstanbul.
- Akiki, P., Hage-Hassan, M., Bensetti, M., Vannier, J., Prieto, D. ve McClelland, M. L., 2018. Axial Ferrite-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor. XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 583-589.
- Akyerden, E., 2018. Koaksiyel manyetik dişlinin moment analizinin sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmesi. (Y. Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü/Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Alani, M., Degano, M., Bianchi, N., Mahmoud, H. ve Gerada, C., 2021. Analysis and Design of Dual-Rotor Synchronous Reluctance Machine. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9, 4376-4383.
- Almeida, A. D., Ferreira, F. ve Duarte, A. Q., 2014. Technical and Economical Considerations on Super High-Efficiency Three-Phase Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50, 1274-1285.
- Anonim, 2011. Döner elektrik makinaları- Bölüm 2-2: Büyük makinaların deneylerden ayrı kayıpların tayini için belirli yöntemler, TS EN 60034-2-2.
- Anonim, 2013. Synchronous reluctance motor-drive package for machine builders. High performance for ultimate machine design. <https://www.adsmuhendislik.com.tr/images/Dosyalar/abb-synrm-surucu-secimi-ingilizce.pdf> (10.07.2021).
- Anonim, 2014a. CEMEP/EU deklarasyonu verimlilik sınıfları. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20141211_GuidelinesElectricMotors%20cover.pdf (22.08.2021).
- Anonim, 2014b. Rotating Electrical Machines – Part 30-1: Efficiency Classes of Line Operated AC Motors (IE Code), 60034-30-1:2014 (BS EN 60034-30-1).
- Anonim, 2014c. Rotating Electrical Machines – Part 2-1: Standards Methods for Determining Losses and Efficiency From Tests (Excluding Machines for Traction Vehicles), 60034-2-1:2014 (BS EN 60034-2-1).
- Anonim, 2014d. ABB <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000120962&LanguageCode=en&DocumentPartId=1&Action=Launch>(11.10.2021).
- Anonim, 2015. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), elektrik motorları ile ilgili test ve verim sınıfları hakkında standartlar. https://www.emsd.gov.hk/filemanager/en/content_764/Report%20on%20International%20Efficiency%20Efficiency%20Classes%20for%20Low%20Voltage%20AC%20Motors.pdf (01.09.2021).
- Anonim, 2019a. TEİAŞ 1975-2019 Elektrik Üretim-İletim İstatistikleri. <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri> (20.08.2021).

- Anonim, 2019b. EÜAŞ 2019 yılı yıllık raporu. <https://www.euas.gov.tr/tr-TR/yillik-raporlar> (21.08.2021).
- Anonim, 2019c. TEİAŞ 2019 yılı yıllık raporu. <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/faaliyet-raporlari> (21.08.2021).
- Aramenko, V., Petrov, I., Nerg, J. ve Pyrhönen, J. J., 2020. Influence of the Air-gap Length and Semimagnetic Wedges on the Performance of a High-Speed Synchronous Reluctance Motor with an Axially Laminated Anisotropic Rotor. XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), 1-6.
- Ayhan, E., 2021. Kan tedarik zinciri dağıtım ağı modellemesi ve hibrit genetik algoritma ile çözümü. (Doktora Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü / Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Baka, S., Sashidhar, S. ve Fernandes, B. G., 2021. Design of an Energy Efficient Line-Start Two-Pole Ferrite Assisted Synchronous Reluctance Motor for Water Pumps. IEEE Transactions on Energy Conversion, 36(2), 961-970.
- Balbo, N., D'Andrea, R. M., Malesani, L. ve Tomasin, P., 1993. Synchronous reluctance motors for low-cost, medium performance drives. Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, 6, 77-81.
- Bertotti, G., 1988. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. IEEE Transactions on Magnetics, 24, 621-630.
- Beşer, E., 2004. Senkron Relüktans Makinasının Analizi. (Y. Lisans Tezi), Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kocaeli.
- Betz, R. E., Lagerquist, R., Jovanovic, M., Miller, T. J. E. and Middleton, R. H., 1993. Control of synchronous reluctance machines. Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 29(6), 1110-1122.
- Betz, R. E. ve Jovanović, M. G., 1999. The brushless doubly fed reluctance machine and the synchronous reluctance machine-a comparison. IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370), 2, 854-861.
- Bianchi, N. ve Bolognani, S., 1998. Design optimisation of electric motors by genetic algorithms. IEE, Electric Power Applications, 145, 475.
- Bianchi, N. ve Chalmers, B.J., 2002. Axially laminated reluctance motor: analytical and finite-element methods for magnetic analysis. IEEE Transactions on Magnetics, 38(1), 239-245.
- Bianchi, N., Fornasiero, E. ve Soong, W. L., 2015. Selection of PM Flux Linkage for Maximum Low-Speed Torque Rating in a PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine. IEEE Transactions on Industry Applications, 51(5), 3600-3608.
- Bin Tarek, M. T. ve Sozer, Y., 2019. Design of a Novel Axial Flux Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 3004-3009.
- Boldea, I. ve Nasar, S. A., 2010. The Induction Machines Design Handbook. Second Edition, CRC Press.
- Boldea, I., Fu, Z. X. ve Nasar, S. A., 1992. Performance evaluation of axially-laminated anisotropic (ALA) rotor reluctance synchronous motors. Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1, 212-218.

- Bomela, X. B. ve Kamper, M. J., 1999. Effect of stator chording and rotor skewing on average torque and torque ripple of reluctance synchronous machine. IEEE 5th Africon Conference in Africa (Cat. No.99CH36342), 2, 687-690.
- Bostancı, T., 2002. Eğri eksenli çubukların titreşimlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması. (Y. Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Boztas, G. ve Aydogmus, O., 2019. Comparison of Permanent-Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motors with Different Rotor Structures. 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 166-171.
- Boztaş, G., 2019. Düşük Gerilim ile Beslenen Senkron Relüktans Motor ve Sürücü Tasarımı. (Doktora Tezi), Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektronik Bilim Dalı, Elazığ.
- Castagnaro, E. ve Bianchi, N., 2020. High-Speed Synchronous Reluctance Motor for Electric-Spindle Application. International Conference on Electrical Machines (ICEM), 1, 2419-2425.
- Cebeci, E., 2021. Senkron relüktans motorun gözlemci tabanlı sensörsüz kontrolü. (Y. Lisans Tezi), Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bursa.
- Chalmers, B. J. ve Mulki, A. S., 1972. Design and Performance of Reluctance Motors with Unlaminated Rotors. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 91(4), 1562-1569.
- Chalmers, B. J. ve Musaba, L., 1997. Design and field-weakening performance of a synchronous reluctance motor with axially-laminated rotor. IAS '97, IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting, 1, 271-278.
- Coates, C., Platt, D. ve Perera, B., 1997. Design optimisation of an axially laminated synchronous reluctance motor. IAS '97, IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting, 1, 279-285.
- Çeçen, M., 2018. Güç transformatörünün sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak 2 ve 3 boyutlu tasarımı ve kayıp analizi. (Y. Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü/Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
- Çelik, H., 2021. Genetik algoritma ile dağıtım şebekesinde elektrikli araç şarj süresi optimizasyonu. (Y. Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Düzce Üniversitesi, Düzce.
- Çetin, E., 2008. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motor tasarımı, manyetik analizi ve prototip üretimi. (Doktora Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Degano, M., Murataliyev, M., Wang, S., Barater, D., Buticchi, G., Jara, W., Bianchi, N., Galea, M. ve Gerada, C., 2021. Optimised Design of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines for Household Appliances. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1-1.
- Dinh, B. M., 2017. Optimal rotor design of line start permanent magnet synchronous motor by genetic algorithm. Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, 2(3), 1181-1187.

- Donaghy-Spargo, C., 2017. Electromagnetic–Mechanical Design of Synchronous Reluctance Rotors With Fine Features. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(11), 1-8.
- Douglas, J., 1956. The Theory of Anisotropic Field Structures in Synchronous Machines [includes discussion]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 75(3), 84-86.
- Eker, M., 2017. Şebeke Yol vermeli Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı. (Doktora Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü/Mekatronik Mühendisliği, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat.
- Elhomdy, E., Liu, Z. ve Li, G., 2019. Thermal and Mechanical Analysis of a 72/48 Switched Reluctance Motor for Low-Speed Direct-Drive Mining Applications. *Applied Sciences*, 9, 2722.
- Ersöz, M., 2015. Akı Bariyerli Senkron Relüktans Motor Tasarımı ve Uygulaması. (Y. Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Isparta.
- Fasquelle, A., 2007. Contribution to multi-physics modeling: electro-vibro-acoustic and aerothermal traction machines. (Ph.D.Diss.), Doctoral school SPI 072 (Lille I, Lille III, Artois, ULCO, UVHC, EC Lille), France.
- Fernández-Bernal, F., García-Cerrada, A. ve Faure, R., 1998. Efficient control of reluctance synchronous machines. *IECON '98, 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (Cat. No.98CH36200), 2, 923-928.
- Fernández-Bernal, F., García-Cerrada, A., & Faure, R., 1999. Model-based loss minimization for DC and AC vector controlled motors including core saturation. *IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Forth IAS Annual Meeting* (Cat. No.99CH36370), 3(3), 1608-1615.
- Ferrari, M., Bianchi, N. ve Fornasiero, E., 2015. Analysis of Rotor Saturation in Synchronous Reluctance and PM-Assisted Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(1), 169-177.
- Ferraz, C. ve de Souza, C. R., 2001. Measuring the parameters of a cage-rotor reluctance synchronous motor. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering* (Cat. No.01TH8555), 2, 775-780.
- Fratta, A., Togli, G., Vagati, A. ve Villata, F. 1995. Ripple evaluation of high-performance synchronous reluctance machines. *IEEE Industry Applications Magazine*, 1, 14-22.
- Fratta, A., Vagati, A. ve Villata, F., Franceschini, G., Petrache, C., 1994. Design comparison between induction and synchronous reluctance motors. *ICEM*, 3, 329-334.
- Fukao, T., Chiba, A. ve Matsui, M., 1989. Test results on a super-high-speed amorphous-iron reluctance motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 25(1), 119-125.
- Gerçekcioglu, H. S. ve Akar, M., 2021. Optimal rotor design of novel axial flux synchronous reluctance motor and validation. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(5), 1-24.
- Gerçekcioglu, H. S. ve Akar, M., 2021. Eksenel Akı Konseptindeki Senkron Relüktans ve İndüksiyon Motor'un Verim ve Performans Karşılaştırması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 9(2), 25-38.

- Germishuizen, J., van der Merwe, F., van der Westhuizen, K. ve Kamper, M. J., 2000. Performance comparison of reluctance synchronous and induction traction drives for electrical multiple units. IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129), 1, 316-323.
- Gieras, J. F., Wang, R. J. ve Kamper, M. J., 2004. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines. Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 340 p, United States of America.
- Gray, C. B., 1968. An Equivalent Circuit for the Salient-Pole Synchronous Machine. IEEE Transactions on Education, 11(1), 69-72.
- Gundogdu, T., Zhu, Z. Q. ve Mipo, J. C., 2017. Influence of rotor slot number on rotor bar current waveform and performance in induction machines. 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 1-6.
- Gürdal, O., 2001. Elektrik Makinalarının Tasarımı (1. Basım). Atlas Yayınları, Ankara.
- Hanguang, W., Qihua, L. ve Linjuan, Y., 2001. An investigation of the synchronous reluctance motor. ICEMS'2001, Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (IEEE Cat. No.01EX501), 1, 148-151.
- Hausmann, L., Waldhof, M., Fischer, J., Wößner, W., Oliveira Flammer, M., Heim, M., Fleischer, J. ve Parspour, N., 2020. Review and Enhancements of Rotor Designs for High Speed Synchronous Reluctance Machines. 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC), 1-8.
- Hippner, M. ve Haripersad, P., 1999. Temperature distribution calculation in axially laminated synchronous reluctance motor. IEEE Africon. 5th Africon Conference in Africa (Cat. No.99CH36342), 2, 679-682.
- Hippner, M. ve Harley, R. G., 1996. Design aspects of axially laminated synchronous reluctance motors. IEEE AFRICON '96, 1, 173-177.
- Hofmann, H. F. ve Sanders, S. R., 1996. Synchronous reluctance motor/alternator for flywheel energy storage systems. Power Electronics in Transportation, 199-206.
- Hofmann, H. F. ve Sanders, S. R., 2000. High-speed synchronous reluctance machine with minimized rotor losses. IEEE Transactions on Industry Applications, 36(2), 531-539.
- Honsinger, V. B., 1971. Steady-State Performance of Reluctance Machines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 90(1), 305-317.
- Hu, Y., Chen, B., Xiao, Y., Shi, J., Li, L. ve Li, X., 2019. Rotor Design and Optimization of the Three-phase Line-start Synchronous Reluctance Motor. 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 1-6.
- Hu, Z., Huang, W., Hong, C., ve Bu, F., 2018. Control Strategy of Self-Bearing Dual Stator Solid Rotor Axial Flux Induction Motor for Flywheel Energy Storage. 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 1513-1517.
- Ibrahim, M. N. F., 2017. Design aspects of high performance synchronous reluctance machines with and without permanent magnets. (Ph.D. Diss), Ghent University, Belgium
- Ibrahim, M. N., Sergeant, P. ve Rashad, E. M., 2016. Simple Design Approach for Low Torque Ripple and High Output Torque Synchronous Reluctance Motors. Energies, 9, 1-14.

- Ințe, R. A. ve Jurca, F., 2017. Torque ripple reduction of outer rotor synchronous reluctance machine with concentrated winding. 19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), 248-252.
- Jammali, Y. H., Mirzaeva, G. ve Miller, D., 2020. Development of a PM-Assisted Synchronous Reluctance Motor Drive for an Electric Boat. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 1-6.
- Jia, S., Zhang, P., Liang, D., Dai, M. ve Liu, A.J., 2019. Design of IE4 Level Synchronous Reluctance Machines with Different Number of Poles. 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 1-5.
- Jia, S., Zhang, P., Liang, D., Dai, M. ve Liu, A.J., 2019. Design and Comparison of Three Different Types of IE4 Efficiency Machines. 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 1-4.
- Joksimović, G., Melecio, J. I., Tuohy, P. M. ve Djurović, S., 2019. Towards the optimal 'slot combination' for steady-state torque ripple minimization: an eight-pole cage rotor induction motor case study. Electrical Engineering, 102, 293-308.
- Jurca, N., Ințe, R. A., Popa, D., Vărățeanu, B. D., Minciunescu, P. ve Martis, C. S., 2021. Electromagnetic and Mechanical Analysis of a Modular Outer Rotor Synchronous Reluctance Machine for Light Propulsion Vehicles. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 7, 2798-2811.
- Kamper M. J. ve Volschenk, A. F., 1994. Effect of rotor dimensions and cross magnetization on L_d and L_q inductances of reluctance synchronous machine with cage less flux barrier rotor. IEE Proc.-Electr. Power Appl., 141(4).
- Kamper, M. J., Merwe, F. S. ve Williamson, S., 1996. Direct finite element design optimisation of the cageless reluctance synchronous machine. IEEE Transactions on Energy Conversion, 11(3), 547-555.
- Kang, S. ve Sul, S., 1996. Efficiency optimized vector control of synchronous reluctance motor. IAS '96 Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting, 1, 117-121.
- Kevran, M. M., 2009. Çoklu sensör konumlandırma probleminin genetik algoritmalar ve gen havuzu tabanlı genetik algoritmalar ile çözülmesi. (Y. Lisans Tezi), Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü/Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hava Harp Okulu Komutanlığı, İstanbul.
- Kıyak, E., 2013. Gemi üzeri yedek parça stoklarının genetik algoritma ile optimizasyonu. (Doktora Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Ana Bilim Dalı, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Kilthau, A. ve Pacas, J., 2001. Parameter-measurement and control of the synchronous reluctance machine including cross saturation. IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No.01CH37248), 4, 2302-2309.
- Kim, R., Lee, J., Seo, J. ve Hahn, S., 2021. 2-D Analysis Method for Synchronous Reluctance Motors Considering End-Plate Effect. IEEE Access, 9, 52008-52014.
- Kiriyama, H., Kawano, S., Honda, Y., Higaki, T., Morimoto, S. ve Takeda, Y., 1998. High performance synchronous reluctance motor with multi-flux barrier for the appliance industry. IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No.98CH36242), 1, 111-117.
- Knebl, L., Barta, J., Kurfürst, J. ve Ondrůšek, Č., 2020. High-torque ferrite synchronous reluctance machine design optimization. 19th International Conference on Mechatronics-Mechatronika (ME), 1-5.

- Knebl, L., Ondrůšek, Č. ve Kurfürst, J., 2018. Ferrite Assisted Synchronous Reluctance Motor Design, Manufacturing and Material Influence on Motor Characteristics. 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME), 1-6.
- Korman, O., Nardo, M. D., Degano, M. ve Gerada, C., 2020. Influence of Optimisation Target Functions on Synchronous Reluctance Machines Design. IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1015-1020.
- Kostko, J. K., 1923. Polyphase reaction synchronous motors. Journal of the American Institute of Electrical Engineers, 42(11), 1162-1168.
- Kovan, M. C., 2017. Senkron relüktans motor kontrolü. (Y. Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Bilim Dalı, İstanbul.
- Lawrenson, P.J., 1965. Development and application of reluctance motors. Electronics and Power, 11(6), 195-198.
- Leonardi, F., McCleer, P. J. ve Elantably, A., 1999. Rotors for synchronous reluctance traction motors: a comparative study. IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370), 2, 835-839.
- Liang, J., Liu, G., Wang, H. ve Liu, H., 2018. Torque Performance Analysis of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Based on Rotor Structure Parameters. 2018 IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems, 1-5.
- Lin, C., 1952. Equivalent circuits of reluctance machines. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 71, 1-9.
- Lipo, T. A., 1991. Novel reluctance machine concepts for variable speed drives. 6th Mediterranean Electrotechnical Conference, 1, 34-43.
- Lipo, T. A. ve Krause, P.C., 1967. Stability Analysis of a Reluctance-Synchronous Machine. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 86(7), 825-834.
- Liu, C., Wang, K., Wang, S.P., Wang, Y.H. ve Zhu, J., 2021. Torque ripple reduction of synchronous reluctance machine by using asymmetrical barriers and hybrid magnetic core. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 5(1), 13-20.
- Liu, Y., Zhao, W., Yang, Z. ve Wang, X., 2020. Optimization of PM-Assisted Synchronous Reluctance Motor with Asymmetric Rotor. IEEE 1st China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE), 1-6.
- Longya, X. ve Jiping, Y., 1992. A compensated vector control scheme of a synchronous reluctance motor including saturation and iron losses. IEEE Trans. Ind. Appl., 28(6), 1330-1338.
- Lu, Y., Li, J., Xu, H., Yang, K., Xiong, F., Qu, R. ve Sun, J., 2021. Comparative Study on Vibration Behaviors of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines With Different Rotor Topologies. IEEE Transactions on Industry Applications, 57(2), 1420-1428.
- Lujun, C., Dejun, Y., Jinjian, D. ve Junjie, W., 2021. Study on the influence of the number of pole pairs on torque of synchronous reluctance machines. 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), 893-897.
- Luo, Y., Hwang, G. J. ve Liu, K., 1995. Design of synchronous reluctance motor. Proceedings:Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 373-379.

- Mahmoud, H. ve Bianchi, N., 2015. Eccentricity in Synchronous Reluctance Motors-Part I: Analytical and Finite-Element Models. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(2), 745-753.
- Mahmoudi, A., Kahourzade, S., Rahim, N. A. ve Hew, W. P., 2013. Design, analysis and prototyping of an axial-flux permanent magnet motor based on genetic algorithm and finite-element analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(4), 1479–1492.
- Mahmoudi, A., Kahourzade, S., Roshandel, E. ve Soong, W. L., 2020. Axial-Flux Synchronous Reluctance Motors: Introduction of a New Machine. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 1-6.
- Malan, J., Kamper, M. J. ve Williams, P. T., 1998. Reluctance synchronous machine drive for hybrid electric vehicle. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Proceedings, ISIE'98 (Cat. No.98TH8357)*, 2, 367-372.
- Martinović, M., Stipetić, S., Zarko, D. ve Klanac, M., 2020. Comparison of Synchronous Reluctance Machines Using Topology Optimization. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 472-477.
- Matsuo, T. ve Lipo, T. A., 1993. Field oriented control of synchronous reluctance machine. *IEEE Power Electronics Specialist Conference, PESC '93*, 425-431.
- Matsuo, T. ve Lipo, T. A., 1994. Rotor design optimization of synchronous reluctance machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 9(2), 359-365.
- Miljavec, D. ve Jereb, P., 1996. Can synchronous reluctance motor be compared with induction motor?. *8th Mediterranean Electrotechnical Conference on Industrial Applications in Power Systems, Computer Science and Telecommunications (MELECON 96)*, 1, 317-320.
- Miller, T. J. E., Hutton, A., Cossar, C. ve Staton, D. A., 1991. Design of a synchronous reluctance motor drive. *Industry Applications, IEEE*, 27(4), 741-749.
- Moghaddam, R. R., 2007. Synchronous reluctance machine (SynRM) design. (Master Thesis), Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering, Electrical Machines and Power Electronics. Stockholm, Sweden.
- Mohanarajah, T., Nagrial, M., Hellany, A. ve Rizk, J., 2016. Effect of saturation on performance of synchronous reluctance machines. *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, 802-807.
- Mohanarajah, T., Rizk, J., Hellany, A. ve Nagrial, M., 2019. Design of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines with Rare-Earth Magnets. *International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT)*, 122-1224.
- Moreels, D., 2018. Axial Flux vs Radial Flux: 4 Reasons Why Axial Flux Machines have a Higher Power Density. <https://www.magnax.com/magnax-blog> (01.10.2021).
- Morimoto, S., Sanada, M. ve Takeda, Y., 2000. Performance of PM assisted synchronous reluctance motor for high efficiency and wide constant power operation. *IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129)*, 1, 509-514.
- Murakami, H., Honda, Y., Sadanaga, Y., Ikkai, Y., Morimoto, S. ve Takeda, Y., 2001. Optimum design of highly efficient magnet assisted reluctance motor. *IEEE*

- Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No.01CH37248), 4, 2296-2301.
- Murataliyev, M., Degano, M. ve Galea, M., 2021. A Novel Sizing Approach for Synchronous Reluctance Machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68(3), 2083-2095.
- Mutluer, M., 2018. A fuzzy-genetic based design of permanent magnet synchronous motor. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 6(4), 275–281.
- Mutluer, M., ve Bilgin, O., 2012. Application of Genetic Algorithm In Design Synchronous Motor. Journal of Life Sciences, 1(2), 18–20.
- Nakatsugawa, J., Kawabata, Y., Endoh, T., Kitamura, M. ve Kaneda, J., 2002. A fundamental investigation about maximum torque control of synchronous reluctance motor. Proceedings of the Power Conversion Conference Cat. No.02TH8579), 2, 704-709.
- Ojo, O., 1998. Field orientation control of a doubly-fed synchronous reluctance machine. 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (Cat. No.98CH36196), 2, 1276-1282.
- Orlova, S., Pugachov, V., Auzins, J. ve Rassölkin, A., 2021. Metamodel- based Optimization of Synchronous Reluctance Motor Rotor. 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED), 1-6.
- Ozcelik, N. G., Dogru, U. E., Imeryuz, M., ve Ergene, L.T., 2019. Synchronous Reluctance Motor vs. Induction Motor at Low-Power Industrial Applications: Design and Comparison. Energies, 12, 2190.
- Özçelik, N. G., 2016. IE4 Verim Sınıfı Senkron Relüktans Motor Tasarımı. (Y. Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.
- Özdemir, Ü., 2004. Senkron Relüktans Motorun Vektör Kontrolü. (Y. Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elazığ.
- Parasiliti, F. ve Villani, M., 1995. Optimisation analysis of synchronous reluctance motor design. Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 412), 276-280.
- Parveen, H., Sharma, U. ve Singh, B., 2020. Impacts of Barrier Shape on Torque Ripple and Saliency in Synchronous Reluctance Motor for Solar Water Pumping. 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020), 1-6.
- Payza, Ö. F., 2018. Çamaşır Makinesi Uygulaması için Konsantre Sargılı Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarımı, Üretimi ve Doğrulaması. (Y. Lisans Tezi), Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Bilim Dalı, Kocaeli.
- Pillai, K., 1967. Torque Calculations of Polyphase Reluctance Machines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 86(12), 1571-1579.

- Platt, D., 1990. Reluctance motor with strong rotor anisotropy. Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1, 224-229.
- Pohl, M. ve Gerling, D., 2019. Low Torque Ripple Synchronous Reluctance Machine with Stator Cage Winding. 2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 1-6.
- Pop, A., Piglesan, F. P., Martis, R., Vintiloiu, I. ve Martis, C. S., 2018. First Insights on the Electromagnetic Design of Axial-Flux Synchronous-Reluctance Maschine. IECON 2018- 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 5702-5709.
- Pyrhonen, J. J., Jokinen, T. ve Hrabovcová, V., 2009. Design of Rotating Electrical Machines. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Rakgati, E. T. ve Kamper, M. J., 2006. Torque performance of optimally designed three and five phase reluctance synchronous machines with two rotor structures. SAIEE Africa Research Journal, 97(1), 43-49.
- Ramamoorthy, M. ve Rao, P. S., 1979. Optimization of Polyphase Segmented-Rotor Reluctance Motor Design: A Nonlinear Programming Approach. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 98(2), 527-535.
- Ruba, M., Jurca, F., Czumbil, L., Micu, D. D., Martis, C., Polycarpou, A. ve Rizzo, R., 2018. Synchronous reluctance machine geometry optimisation through a genetic algorithm based technique. IET Electric Power Applications, 12(3), 431-438.
- Sara, D. M., 2019. Tek makineli çok ölçütlü iş sıralama ve çizelgeleme probleminin genetik algoritma ile çözülmesi: Alüminyum sektöründe uygulanması. (Y. Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü / Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Sawhney, A. K., 2016. A Course in Electrical Machine Design. Dhanpat Rai and Sons, 1148 p, New Delhi, India,
- Schmidt, E. ve Brandl, W., 2001. Comparative finite element analysis of synchronous reluctance machines with internal rotor flux barriers. IEMDC 2001, IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No.01EX485), 831-837.
- Shi, J., Chai, F., Li, X. ve Cheng, S., 2011. Study of the number of slots/pole combinations for low speed high torque permanent magnet synchronous motors. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, 1-3.
- Slemon, G., 1962. Equivalent Circuits for Cylindrical-Rotor, Reluctance, and Salient-Rotor Synchronous Machines. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 81(3), 219-224.
- Sooriyakumar, G., 2010, Design optimisation for permanent magnet synchronous motors using genetic algorithm. 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010, Cardiff, Wales.
- Staton, D. A., Miller, T. J., ve Wood, S. E., 1991. Optimisation of the synchronous reluctance motor geometry. Fifth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 341), 156-160.
- Stumberger, G., Stumberger, B. ve Dolinar, D., 2000. Identification of linear synchronous reluctance motor parameters. IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129), 1, 7-14.

- Taghavi, S., ve Pillay, P., 2014. A comparative study of synchronous reluctance machine performance with different pole numbers for automotive applications. IECON, 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 3812-3818.
- Talaat, M. E., 1951. Steady-State and Transient Synthesis of 3-Phase Reluctance Motors (Synchronous Motors Without Field Excitation). Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 70(2), 1963-1970.
- Tap, A., 2017. Sürekli mıknatıs destekli senkron relüktans motor tasarımı. (Y. Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Trickey, P. H., 1946. Performance Calculations on Polyphase Reluctance Motors (Synchronous Motors Without Field Excitation). Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 65(4), 191-193.
- Trubenbach, R. A., Mackay, A. T. ve Kamper, M. J., 1993. Performance of a reluctance synchronous machine under vector control. IEEE Power Electronics Specialist Conference, PESC '93, 803-808.
- Tuncer, A., 2013. Otonom araçlar için yol bulma probleminin genetik algoritmalar ve FPGA ile çözümü ve gerçekleştirilmesi. (Doktora Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Ana Bilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Turan, B., 2021. Genetik algoritma tabanlı SLM tekniği kullanılarak OFDM sistemlerinde PAPR azaltılması. (Y. Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü/Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Uberti, F., Frosini, L. ve Szabó, L., 2020. An Optimization Procedure for a Synchronous Reluctance Machine with Fluid Shaped Flux Barriers. International Conference on Electrical Machines (ICEM), 1, 389-395.
- Vagati, A., 1994. The synchronous reluctance solution: a new alternative in AC drives. 20th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 1(1), 1-13.
- Vagati, A., Franceschini, G., Marongiu ve I., Troglia, G. P., 1992. Design criteria of highperformance synchronous reluctance motors. Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1992 IEEE, 1, 66-73.
- Vagati, A., Pastorelli, M., Franceschini, G. ve Petrache, C. M., 1998. Design of low-torque-ripple synchronous reluctance motors. IEEE Transactions on Industry Applications, 34(4), 758-765.
- Vagati, A., Pastorelli, M., Franceschini, G. ve Petrache, C.M. 1997. Design of low-torque-ripple synchronous reluctance motors. IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting, 1(1), 286-293.
- Viorel, A. C., Viorel, I. ve Strete, L., 2014. On the calculation of the Carter factor in the slotted electric machines. International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), 332-336.
- Wu, H., Depernet, D. ve Lanfranchi, V., 2017. Comparison of Torque Ripple Reductions and Copper Losses of Three Synchronous Reluctance Machines. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 1-6.
- Xu, L. ve Yao, J., 1991. A compensated vector control scheme of a synchronous reluctance motor including saturation and iron losses. Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 28(1), 298-304.

- Xu, L., 2000. Rotor structure selections of nonsine five-phase synchronous reluctance machines for improved torque capability. IEEE Transactions on Industry Applications, 36(4), 1111-1117.
- Xu, L., Xu, X., Lipo, T.A. ve Novotny, D.W., 1990. Vector control of a synchronous reluctance motor including saturation and iron loss. Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1, 359-364.
- Yamazaki, K., ve Fukushima, N., 2010. Iron-Loss Modeling for Rotating Machines: Comparison Between Bertotti's Three-Term Expression and 3-D Eddy-Current Analysis. IEEE Transactions on Magnetics, 46(8), 3121-3124.
- Yıldırım, İ., 2019. Elektrik motorları sektör analizi, 10. Enerji Verimliliği Forum ve Fuarı, İstanbul.
- Zöhra, B., 2019. Şebeke kalkışlı radyal akılı sabit mıknatıslı senkron motor tasarımı ve prototip üretimi. (Doktora Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü/Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat.

7. ÖZGEÇMİŞ

