



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA PROGRAMI

**ELEKTRİKLİ ARAÇ UYGULAMALARI İÇİN EKSENEL AKILI
SABİT MIKNATIS DESTEKLİ SENKRON RELÜKTANS MOTOR
TASARIMI VE ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Emre GÖZÜAÇIK

Danışman: Prof. Dr. Mehmet AKAR

TOKAT- 2025

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Mehmet AKAR danışmanlığında hazırlamış olduğum “Elektrikli Araç Uygulamaları için Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarımı ve Analizi” adlı Doktora tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

17/07/2025

Emre GÖZÜAÇIK

JÜRİ KABUL VE ONAY

Emre Gözüaçık tarafından hazırlanan “**Elektrikli Araç Uygulamaları için Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarımı ve Analizi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 17.07.2025 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

(Başkan) Prof. Dr. Mustafa Ç. AKÜD
Prof. Dr. Mustafa F. AKÜD
Prof. Dr. Mustafa F. AKÜD
Doç. Dr. Zafar HAN

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında katkı ve desteklerini esirgemeyen herkese teşekkür ederim. Başta bilgi, deneyim ve yönlendirmeleriyle bana rehberlik eden danışman hocam Prof. Dr. Mehmet AKAR'a,

Tez izleme komitesi üyeleri değerli hocalarım Doç. Dr. Zafer DOĞAN ve Doç. Dr. Mustafa EKER'e,

Tez sürecim boyunca yardımlarını esirgemeyen ve bu süreçte birlikte çalışma imkânı bulduğum Dr. Öğretim Üyesi Mustafa ÖZSOY, Dr. Öğr. Üyesi Yusuf AVŞAR ve Dr. Öğr. Üyesi Emrah ESER'e,

Bu süreç boyunca bana destek olan tüm hocalarıma, moral ve motivasyonlarıyla yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma içten teşekkürlerimi sunarım. Doğrudan ya da dolaylı olarak emeği geçen herkese minnettarım.

ÖZET

ELEKTRİKLİ ARAÇ UYGULAMALARI İÇİN EKSENEL AKILI SABİT MIKNATIS DESTEKLİ SENKRON RELÜKTANS MOTOR TASARIMI VE ANALİZİ

Gözüaçık, Emre

Doktora, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Akar

Temmuz 2025, xvi + 185 sayfa

Elektrikli araçlar (EAR), modern ulaşımında emisyonları ve fosil yakıt bağımlılığını azaltmak için önemli bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. EAR'lerin temelinde yer alan çekiş motorları, çeşitli sürüş koşullarında yüksek performans, verimlilik ve kompaktlık sağlamalıdır. Bu çalışma, üretilebilirlik, yüksek performans, mekanik ve termal kararlılığa odaklanarak EAR uygulamaları için optimize edilmiş bir elektrik motorunun tasarımını ve analizini sunmaktadır. Bu süreçte Eksenel Akılı Sabit Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor (EA-SMd-SRM) tasarımı ve analizleri yapılmıştır. Düşük hacimli, yüksek tork ve yüksek güç yoğunluğu için EA çift hava aralıklı motor tasarımı tercih edilmiştir. EA-SMd-SRM model yüksek akım yoğunluğuna sahip cebri sıvı soğutma (soğutma ceketi) yöntemi ile desteklenmiştir. EAR'ler için yapılan bu tasarım çok amaçlı optimizasyon ve çok fizikli analizlerle EA-SMd-SRM modelin elektromanyetik, mekanik ve termal yeterlilik seviyesi belirlenmiştir. EA-SMd-SRM tasarımı 3 000 dev/dk nominal hızda, 96.1 Nm tork, 30 kW güç ve %93.8 verim elde etmiştir. Bu motorun maksimum 10 000 dev/dk hıza, 253.1 Nm torka ve 65 kW güce ulaştığı görülmektedir. Bu çalışmada çift stator (ÇS) EA-SMd-SRM modelin rotoru seri üretime uygun bariyer yapısıyla tasarlanmıştır. EA motorlarda mıknatıs ve bariyerlerin dış çaptan içe doğru azalan konik yapısı yeni bariyer tasarımı ile değiştirilmiş ve hacimsel değişimi önlenmiştir. Yeni bariyerler çok amaçlı genetik algoritma (GA) kullanılarak optimize edilmiştir. Model son aşamada soğutma ceketi yöntemi ile soğutulmuş, nominal 30 kW güç değerinde motor sargılarında ortalama sıcaklığı 73.83 °C ve ortalama mıknatıs sıcaklığı 66.44 °C olarak analiz edilmiştir. EA-SMd-SRM modelin verim haritası çıkarılmış, sabit tork ve sabit güç bölgesi elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araçlar, Eksenel Akılı, Sabit Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor, Çok Amaçlı Optimizasyon, Çok Fizikli Analizler.

ABSTRACT

DESIGN AND ANALYSIS OF AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET ASSISTED SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTORS FOR ELECTRIC VEHICLE APPLICATIONS

Gözüaık, Emre

Doctorate Thesis, Department of Electrical and Electronics Engineering

Advisor: Prof. Dr. Mehmet Akar

July 2025, xvi + 185 pages

Electric vehicles (EVs) emerge as an important solution for reducing emissions and dependence on fossil fuels in modern transportation. The traction motors at the hearth of EVs must deliver high performance, efficiency, and compactness under various driving conditions. This study presents the design and analysis of the Axial Flux Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor (AF-PMa-SynRM) optimized for EV applications, with a focus on manufacturability, high performance, and mechanical and thermal stability. The AF double air gap motor design was chosen for its low volume, high torque, and high-power density. The AF-PMa-SynRM model is supported by a forced liquid cooling method with a cooling jacket and high current density. Through multi-objective optimization and multi-physics analyses conducted for EVs, the electromagnetic, mechanical, and thermal performance levels of the AF-PMa-SynRM model have been determined. The motor design achieved 96.1 Nm of torque, 30 kW of power, and 93.8% efficiency at a nominal speed of 3 000 rpm. The motor was found to reach a maximum speed of 10 000 rpm, 253.1 Nm of torque, and 65 kW of power. In this study, the rotor of the double-stator (DS) AF-PMa-SynRM model was designed with a barrier structure suitable for mass production. The conical structure of the magnets and barriers in AF motors, which decreases from the outer to the inner diameter, was replaced with a new barrier design to prevent volumetric changes. The new barriers were optimized using a multi-objective Genetic Algorithm (GA). In the final stage, the model was cooled using the cooling jacket method. The average temperature of the motor winding and the magnets was analyzed as 73.83 °C and 66.44 °C respectively at a nominal power value of 30 kW. An efficiency map of the AF-PMa-SynRM model was obtained, and the constant torque-power regions were determined.

Keywords: Electric Vehicles, Axial Flux, Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor, Multi-Objective Optimization, Multi-Physics Analysis.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ETİK SÖZLEŞME	i
JÜRİ KABUL VE ONAY	ii
ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ / KURAMSAL TEMELLER.....	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	15
3.1. Elektrikli Araçlar	16
3.1.1. Elektrikli araçların tarihçesi.....	17
3.1.2. Elektrikli araçların sınıflandırılması.....	19
3.2. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motor Türleri	23
3.2.1. Asenkron motor.....	25
3.2.2. Sabit mıknatıslı senkron motor	26
3.2.3. Rotoru sargılı senkron motor	27
3.2.4. Anahtarlamalı relüktans motor	28
3.2.5. Senkron relüktans motor.....	29
3.3. Eksenel Akıllı Makineler ve Sınıflandırılması	32
3.3.1. Eksenel akıllı makineler	33
3.3.2. Eksenel akıllı makinelerin kullanım alanları	40

3.4.	Elektrikli Araç Uygulamalarında Tahrik Motoru Parametrelerinin Belirlenmesi	42
3.4.1.	Elektrikli araç verileri ve performans özellikleri	42
3.4.2.	Elektrikli tahrik motorunun gücünün belirlenmesi	44
3.4.3.	Sürüş testleri	50
3.5.	Elektrikli Araçlar için Eksenel Akılı Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarımı.....	54
3.5.1.	Eksenel akılı senkron relüktans motor tasarımı	57
3.6.	Sonlu Elemanlar Yöntemi	83
3.7.	Optimizasyon.....	88
3.7.1.	Çok amaçlı genetik algoritma	89
3.8.	Yapısal Tasarım	91
3.9.	Termal Tasarım.....	93
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	99
4.1.	Eksenel Akılı Çift Hava Aralıklı Senkron Relüktans Motor 2B Model Tasarımı	102
4.1.1.	Eksenel akılı senkron relüktans motor 2B lineer motor tasarımı.....	104
4.1.2.	Eksenel akılı senkron relüktans motor mıknatıs destekli modellerin kıyaslanması.....	105
4.2.	Eksenel Akılı Çift Hava Aralıklı Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarım ve Analizi	113
4.3.	Eksenel Akılı Çift Stator Sabit Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Optimizasyon Çalışması	119
4.4.	Eksenel Akılı Çift Stator Sabit Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Verim Haritası Değerlendirmesi	131
4.5.	Eksenel Akılı Çift Stator Sabit Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Yapısal Analizleri.....	134

4.6. Eksenel Akılı Çift Stator Sabit Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Termal Analizleri	141
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	159
KAYNAKLAR	162
ÖZGEÇMİŞ	184



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. EAR'ler için elektrik motorlarının kıyaslanması.....	31
Çizelge 3.2. Farklı EA makine topolojilerinin karşılaştırılması	40
Çizelge 3.3. Piyasada kullanılan EA motorların özellikleri	41
Çizelge 3.4. Referans araç ve piyasadaki EAR'lerin karakteristik özellikleri	43
Çizelge 3.5. Motor başlangıç parametreleri.....	71
Çizelge 3.6. Soğutma tipine göre akım yoğunlukları.....	74
Çizelge 4.1. Motor tasarım parametreleri	103
Çizelge 4.2. EA-SRM modellerinin 10 A/mm ² akım yoğunluğuna göre kıyaslama sonuçları.....	106
Çizelge 4.3. EA-SRM modellerinin 30 A/mm ² akım yoğunluğuna göre kıyaslama sonuçları.....	108
Çizelge 4.4. EA-ÇS-SMd-SRM modelin temel özellikleri	115
Çizelge 4.5. EA-ÇS-SMd-SRM'nin değişken parametreleri, optimizasyon sınırları ve optimize edilmiş değerler	120
Çizelge 4.6. EA-ÇS-SMd-SRM modelinin farklı güçlerdeki kayıpları	142

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. 2010-2023 yılları arasında elektrikli otomobil stok eğilimleri.....	16
Şekil 3.2. EAR'ler için karakteristik hız-tork ve hız-güç grafiği.....	18
Şekil 3.3. EAR sınıflandırılması	19
Şekil 3.4. BEAR yapısı.....	20
Şekil 3.5. PHEAR yapısı	21
Şekil 3.6. HEAR araç yapısı a) paralel HEAR, b) seri HEAR	21
Şekil 3.7. YHEAR yapısı.....	22
Şekil 3.8. Elektrik makinelerin kesitleri; a) FDAM, b) ASM, c) ARM, d) YMSM, e) DMM	23
Şekil 3.9. ASM stator ve rotor yapısı	25
Şekil 3.10. SMSM çeşitlerinin kesit görünüşü; a) yüzey, b) iç kısım c) spoke tipi d) tek bariyerli e) çoklu bariyerli f) eksenel lamineli g) konvansiyonel h) segmentli i) v-tipi ve j) w-tipi	27
Şekil 3.11. RSSM çeşitlerinin kesit görünüşü; a) yuvarlak kutuplu b) çıkık kutuplu.....	28
Şekil 3.12. ARM stator ve rotor yapısı.....	29
Şekil 3.13. SRM için farklı rotor bariyer tasarımları	30
Şekil 3.14. En çok tercih edilen EAR'lerin verim haritası; a) YMSM, b) DMM, c) ASM, d) SRM, e) DAM, f) SM.....	30
Şekil 3.15. RA ve EA makineler ve akı yönleri.....	32
Şekil 3.16. EA makinelerin sınıflandırılması.....	34
Şekil 3.17. EA makine rotor yapıları a) SRM, b) ASM, c) SMSM	34
Şekil 3.18. EA makine stator yapıları a) nüvesiz, b) oluksuz, c) oluklu	36
Şekil 3.19. Tek hava aralıklı EA-SRM.....	37
Şekil 3.20. Çift hava aralıklı iç rotor SRM, a) 3B model, b) NS tipi akı gösterimi, c) NN tipi akı gösterimi	38
Şekil 3.21. Çift hava aralıklı dış rotor SRM, a) 3B model, b) NS tipi akı gösterimi, c) NN tipi akı gösterimi	38
Şekil 3.22. Çok hava aralıklı EA makine a) 3B model, b) NS tipi akı gösterimi, c) NN tipi akı gösterimi.....	39
Şekil 3.23. Aracın tek boyutta yanal dinamikleri.....	44

Şekil 3.24. İlk hızlanmada araca etkiyen a) kuvvetler, b) güçler.....	48
Şekil 3.25. Otoyol sürüşünde araca etkiyen a) kuvvetler, b) güçler	49
Şekil 3.26. Tırmanma sürüşünde araca etkiyen a) kuvvetler, b) güçler	49
Şekil 3.27. Sürüş testleri; a) ARTEMIS 130, b) ARTEMIS 150, c) ARTEMIS kentsel, d) ARTEMIS kırsal, e) FTP, f) WLTP	51
Şekil 3.28. EAR'ler için EA-SMd-SRM tasarım süreci.....	56
Şekil 3.29. SRM ve akı yolları a) d eksenini akı yolu (yüksek geçirgenlik) , b) q eksenini akı yolu (düşük geçirgenlik).....	57
Şekil 3.30. EA-SRM topolojisi, 3B ve 2B görünümü	58
Şekil 3.31. SRM relüktans tork üretimi.....	59
Şekil 3.32. SRM eşdeğer devresi	61
Şekil 3.33. Üç fazlı iki kutuplu SRM dq eksenine indirgenmiş fazör diyagramı	62
Şekil 3.34. SRM eşdeğer devre modeli a) d referans eksenini, b) q referans eksenini	64
Şekil 3.35. Akıma bağlı d ve q eksenlerinde hava aralığı akı bağının değişimi, a) SRM, b) SMd-SRM.....	64
Şekil 3.36. Vektör diyagramı, a) SRM, b) SMd-SRM.....	65
Şekil 3.37. Alan yönlendirmeli kontrol (FOC) için SRM'nin dq akım düzlemi	69
Şekil 3.38. Hıza bağlı MTPA ve alan zayıflatma bölgelerinde SRM göstergeleri	70
Şekil 3.39. EA-ÇS-SRM manyetik akı yolları.....	76
Şekil 3.40. Senkron relüktans motor rotor geometrisi.....	81
Şekil 3.41. a) d eksenini MMK dağılım grafiği, b) q eksenini MMK dağılım grafiği.....	81
Şekil 3.42. Ağ elemanı geometrileri a) bir boyutlu (1B), b) iki boyutlu (2B) ve c) üç boyutlu (3B).....	87
Şekil 3.43. ÇAGA akış diyagramı.....	90
Şekil 4.1. Çift hava aralıklı 3B motor $\frac{1}{4}$ Modeli (1-Stator, 2-Rotor, 3 Sargı); a) EA-ÇS-SRM b) EA-ÇR-SRM.....	102
Şekil 4.2. Çift hava aralıklı 2B lineer model (1- Stator, 2-Mıknatıs, 3- Sargı); a) EA-ÇS-SMd-SRM, b) EA-ÇR-SMd-SRM.....	105
Şekil 4.3. Çift hava aralıklı mıknatıssız ve mıknatıs destekli 8 kutuplu EA-SRM modellerinin akı yoğunluğu dağılımı	109
Şekil 4.4. EA-SRM tasarım modellerinin güç analizi sonuçlarının karşılaştırılması ...	110
Şekil 4.5. EA-SRM tasarım modellerinin tork analizi sonuçlarının karşılaştırılması ...	111

Şekil 4.6. EA-SRM tasarım modellerinin verim analizi sonuçlarının karşılaştırılması	112
Şekil 4.7. Motor başlangıç tasarımı akış diyagramı	113
Şekil 4.8. EA-ÇS-SMd-SRM 3B model tasarımı	115
Şekil 4.9. Stator ve rotor nüvesi 35JN230 B-H eğrisi	117
Şekil 4.10. N42SH sabit mıknatıs manyetik özellikleri	117
Şekil 4.11. EA-ÇS-SMd-SRM model tasarımı akış şeması	118
Şekil 4.12. EA-ÇS-SMd-SRM 1/10 model rotor bariyer yapısı ve parametreleri	120
Şekil 4.13. EA-ÇS-SMd-SRM optimizasyon sonuçları	121
Şekil 4.14. EA-ÇS-SMd-SRM akım yoğunluğu sonuçları; a) nominal güç 30 kW, b) maksimum güç 65 kW	122
Şekil 4.15. EA-ÇS-SMd-SRM başlangıç ve nihai modelin tork ve tork dalgalanması kıyaslaması	122
Şekil 4.16. EA-ÇS-SMd-SRM başlangıç ve nihai modelin verim kıyaslaması	123
Şekil 4.17. EA-ÇS-SRM ve EA-ÇS-SMd-SRM model tork ve tork dalgalanması kıyaslaması	123
Şekil 4.18. EA-ÇS-SMd-SRM 1/10 3B model akı dağılımı ve akı yoğunluğu	124
Şekil 4.19. EA-ÇS-SMd-SRM farklı yüklerde akım açısına bağlı tork değişimi	125
Şekil 4.20. EA-ÇS-SMd-SRM farklı yüklerde akım açısına bağlı tork dalgalanması değişimi	126
Şekil 4.21. EA-ÇS-SMd-SRM farklı yüklerde akım açısına bağlı verim değişimi	126
Şekil 4.22. EA-ÇS-SMd-SRM farklı yüklerde güç faktörünün akım açısına bağlı değişimi	127
Şekil 4.23. EA-ÇS-SMd-SRM A, B ve C fazları için indüklenen gerilim grafiği	128
Şekil 4.24. EA-ÇS-SMd-SRM faz gerilimi harmonik bileşenler grafiği	128
Şekil 4.25. EA-ÇS-SMd-SRM vuruş torku grafiği	130
Şekil 4.26. EA-ÇS-SMd-SRM hıza bağlı tork ve güç değişimi	131
Şekil 4.27. EA-ÇS-SMd-SRM nihai model tork ve hıza bağlı güç haritası	132
Şekil 4.28. EA-ÇS-SMd-SRM nihai model tork ve hıza bağlı verim haritası	133
Şekil 4.29. EA-ÇS-SMd-SRM nihai model tork ve hıza bağlı güç faktörü haritası	133
Şekil 4.30. EA-ÇS-SMd-SRM nihai model tork ve hıza bağlı akım açısı haritası	134
Şekil 4.31. EA-ÇS-SMd-SRM 3B modelin patlatılmış görünümü	135
Şekil 4.32. EA-ÇS-SMd-SRM model mil gerilme (yer değiştirme-stres) analizi	136

Şekil 4.33. EA-ÇS-SMd-SRM model mil burulma (yer değiştirme-stres) analizi	137
Şekil 4.34. EA-ÇS-SMd-SRM model rotor bağlantı parçası burulma (yer değiştirme-stres) analizi	138
Şekil 4.35. EA-ÇS-SMd-SRM model rotor burulma (yer değiştirme-stres) analizi	139
Şekil 4.36. EA-ÇS-SMd-SRM model rotor muhafazası gerilme (yer değiştirme-stres) analizi	140
Şekil 4.37. EA-ÇS-SMd-SRM model stator burulma (yer değiştirme-stres) analizi	141
Şekil 4.38. EA-ÇS-SMd-SRM 30kW nominal modelin soğutmasız termal analiz sonuçları.....	143
Şekil 4.39. EA-ÇS-SMd-SRM 30 kW güç ve 5 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	145
Şekil 4.40. EA-ÇS-SMd-SRM 40 kW güç ve 5 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	145
Şekil 4.41. EA-ÇS-SMd-SRM 50 kW güç ve 5 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	146
Şekil 4.42. EA-ÇS-SMd-SRM 60 kW güç ve 5 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	146
Şekil 4.43. EA-ÇS-SMd-SRM 65 kW güç ve 5 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	147
Şekil 4.44. EA-ÇS-SMd-SRM 30 kW güç ve 10 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	147
Şekil 4.45. EA-ÇS-SMd-SRM 40 kW güç ve 10 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	148
Şekil 4.46. EA-ÇS-SMd-SRM 50 kW güç ve 10 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	148
Şekil 4.47. EA-ÇS-SMd-SRM 60 kW güç ve 10 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	149
Şekil 4.48. EA-ÇS-SMd-SRM 65 kW güç ve 10 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	149
Şekil 4.49. EA-ÇS-SMd-SRM 30 kW güç ve 15 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	150

Şekil 4.50. EA-ÇS-SMd-SRM 40 kW güç ve 15 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	151
Şekil 4.51. EA-ÇS-SMd-SRM 50 kW güç ve 15 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	151
Şekil 4.52. EA-ÇS-SMd-SRM 60 kW güç ve 15 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	152
Şekil 4.53. EA-ÇS-SMd-SRM 65 kW güç ve 15 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	152
Şekil 4.54. EA-ÇS-SMd-SRM 30 kW güç ve 20 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	153
Şekil 4.55. EA-ÇS-SMd-SRM 40 kW güç ve 20 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	153
Şekil 4.56. EA-ÇS-SMd-SRM 50 kW güç ve 20 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	154
Şekil 4.57. EA-ÇS-SMd-SRM 60 kW güç ve 20 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	154
Şekil 4.58. EA-ÇS-SMd-SRM 65 kW güç ve 20 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi	155
Şekil 4.59. EA-ÇS-SMd-SRM 10 000 dev/dk maksimum hız, 30 kW nominal güç ve 20 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi.....	156
Şekil 4.60. EA-ÇS-SMd-SRM modelin farklı debide soğutma sıvılarına ve farklı güç değerlerine göre stator sargı sıcaklık ortalaması.....	157
Şekil 4.61. EA-ÇS-SMd-SRM modelin farklı debide soğutma sıvılarına ve farklı güç değerlerine göre mıknatıs sıcaklık ortalaması	157

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

Kısaltmalar	Açıklamalar
AA	Alternatif Akım
ARM	Anahtarlamalı Relüktans Motor
ARTEMIS	Ulaşım Emisyon Modelleri ve Envanter Sistemlerinin Değerlendirilmesi ve Güvenilirliği
ASM	Asenkron Motor
BEAR	Bataryalı Elektrikli Araçlar
CADC	Ortak ARTEMIS Sürüş Döngüleri
CFD	Sayısal Akışkanlar Dinamiği
SGHO	Sabit Güç Hız Oranı
ÇAGA	Çok Amaçlı Genetik Algoritma
ÇS	Çift Stator
ÇR	Çift Rotor
DA	Doğru Akım
DAM	Doğru Akım Motor
dev/dk	Devir/dakika
EA	Eksenel Akılı
EAR	Elektrikli Araç
EA-DMM	Eksenel Akılı Dahili Mıknatıslı Motor
EA-SRM	Eksenel Akılı Senkron Relüktans Motor
EA-SMd-SRM	Eksenel Akılı Sabit Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor
EMK	Elektromotor Kuvvet
FDAM	Fırçasız Doğru Akım Motor
FOC	Alan Yönlendirmeli Kontrol

FTP	Federal Test Prosedürü
GA	Genetik Algoritma
GF	Güç Faktörü
HEAR	Hibrit Elektrikli Araçlar
IE	Uluslararası Verim Sınıfları
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
DMM	Dahili Mıknatıslı Motorlar
MMK	Manyeto Motor Kuvvet
MTPA	Akım Başına Maksimum Tork
NEDC	Yeni Avrupa Sürüş Döngüsü
NTE	Nadir Toprak Elementi
ODMD	Otomotiv Distribütörler ve Mobilite Derneği
PHEAR	Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar
RA	Radyal Akılı
RSSM	Rotoru Sargılı Senkron Motor
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SMSM	Sabit Mıknatıslı Senkron Motor
SRM	Senkron Relüktans Motor
THD	Toplam Harmonik Bozulma
VSD	Değişken Hız Sürücüsü
WLTP	Dünya Çapında Uyumlaştırılmış Hafif Hizmet Test Prosedürü
YASA	Nüvesiz ve Segmentli Armatür
YHEAR	Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar
YMSM	Yüzey Mıknatıslı Senkron Motor

1. GİRİŞ

1900'lü yıllardan günümüze kadar elektrik motorları ulaşım teknolojilerinin gelişiminde önemli bir unsur olmuştur. Bu dönemde, Elektrikli Araçlar (EAR'ler) toplam otomobil pazarının yaklaşık %28'ini oluşturuyordu. Ancak, düşük enerji yoğunluğu, yüksek pil maliyeti ve içten yanmalı motor teknolojisinin hızlı gelişimi nedeniyle, EAR'lere karşı piyasanın ilgisi azalmıştır (De Santiago ve ark., 2012; Madichetty ve ark., 2021; Nour ve ark., 2020). EAR'lerin yeniden canlanması, 1960'larda pil ve güç elektroniği teknolojisindeki gelişmelerle başlamış ve 1970'lerde küresel petrol krizleri nedeniyle daha da ivme kazanmıştır (De Santiago ve ark., 2012; Shao ve ark., 2020).

Günümüzde, sera gazı emisyonlarının yarattığı tehdit, sürdürülebilir mobilite çözümlerine geçiş talebini artırmıştır. Toplam emisyonların yaklaşık %14'ü (CO₂, CO, NO ve metan) fosil yakıtların kullanımı nedeniyle sadece ulaşım sektöründen kaynaklanmaktadır (Ehsani ve ark., 1997). İçten yanmalı motorlu araçlarda emisyon azaltma teknikleri uygulanmış olsa da bu girişimlerin artan nüfus, kentleşme ve araç kullanımının artması bağlamında yetersiz olduğu görülmüştür. Buna göre EAR'ler egzoz emisyonu olmaması, mekanik basitliği ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle pazarı domine edebilecek bir alternatif olarak görülmektedir (Barkenbus, 2020; Ehsani ve ark., 1997; S ve ark., 2022).

EAR'ler, enerji kaynağı ve yapılarına göre sınıflandırılır. Yalnızca bataryalardan alınan elektrikle çalışan Batarya Elektrikli Araçlar (BEAR) en basit türdür. Hibrit Elektrikli Araçlar (HEAR), Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEAR) ve Yakıt Hücresel Elektrikli Araçlar (YHEAR); batarya, yakıt hücresi ve içten yanmalı motorların hibrit düzenlemelerine sahiptir (Mohanraj ve ark., 2022; Nour ve ark., 2020). HEAR ve PHEAR emisyon azaltımını hedeflerken, BEAR ve YHEAR sıfır emisyonlu çalışma özelliği ile öne çıkmaktadır. Bu çevresel fayda, verimlilik, maliyet tasarrufu ve performans artışı ile özellikle elektrik motorları, batarya sistemleri ve kontrol yöntemleri konusunda kapsamlı araştırmaların yapılmasını teşvik etmektedir.

EAR'lerin çekiş motoru performans özellikleri oldukça katıdır. Motorlar, düşük hızlarda (kalkış sırasında ve yokuş yukarı sürüş sırasında) yüksek tork, yüksek hızlarda (sürüş sırasında) yüksek güç sağlamalı ve farklı sürüş koşulları için geniş bir Sabit Güç Hız Oranı (SGHO) (Constant Power Speed Ratio-CPSR) elde etmelidir (Bozkurt, 2021; Zou

ve ark., 2023). Başlıca performans parametreleri arasında yüksek tork-güç yoğunluğu, yüksek verimlilik, düşük tork dalgalanması, düşük maliyet, güvenilirlik, mekanik yeterlilik, termal dayanım ve düşük akustik gürültü bulunmaktadır (Bekiroglu & Esmer, 2023; Bozkurt, 2021; Hernandez ve ark., 2017; Jani & Jamnani, 2023; Madichetty ve ark., 2021; Shao ve ark., 2023; Wi ve ark., 2023). Ayrıca, çekiş motoru teknolojileri, gelişmiş termal ve mekanik performans değerlendirmesi sunarken araç yapısı içindeki uyum özelliklerini de karşılamalıdır.

Manyetik akı yönüne bağlı olarak, elektrik motorları Radyal Akılı (RA) makineler ve Eksenel Akılı (EA) makineler olarak sınıflandırılmaktadır. RA makineleri geleneksel uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak EA makineler, kompakt tasarımları, azaltılmış eksenel uzunlukları ve artırılmış tork/güç yoğunlukları nedeniyle giderek daha fazla ilgi çekmektedir (Z. Cao ve ark., 2020; Madichetty ve ark., 2021; Mahmoudi ve ark., 2020; Nishanth ve ark., 2023; Pop ve ark., 2018). Üretimi daha zor olsa da (eksenel tasarımın dış çaptan iç çapa doğru daralması ve lamine rotor-stator diskleri arasındaki yüksek eksenel kuvvetlerin oluşması), EA motorlar EAR'ler gibi ciddi alan kısıtlamaları olan uygulamalarda büyük avantajlara sahiptir (Z. Cao ve ark., 2020; Deepak ve ark., 2023).

EA makine topolojileri, hava aralığı sayısı ve akı yolu konfigürasyonuna göre değişmektedir. Alan sınırlamaları altında performansı artırmak için çift hava aralığı (Çift Rotor (ÇR) veya Çift Stator (ÇS)) ve hatta çok hava aralıklı konfigürasyonlar önerilmiştir (Amin ve ark., 2019; Farrokh ve ark., 2023; Mushid & Dorrell, 2017; Nishanth ve ark., 2023). Özellikle, ÇS tek rotor konfigürasyonu simetrik akı dağılımı, gelişmiş manyetik yükleme ve üstün soğutma kapasitesi sunmaktadır. Bu nedenle hem tork-güç yoğunluğu hem de verimliliğin kritik olduğu çekiş uygulamalarında etkilidir.

EAR'ler için günümüze kadar Fırçasız Doğru Akım Motorlar (FDAM), Asenkron Motorlar (ASM), Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM), Rotoru Sargılı Senkron Motorlar (RSSM), Anahtarlamalı Relüktans Motorları (ARM) ve Senkron Relüktans Motorlar (SRM) kullanılmıştır (Bekiroglu & Esmer, 2023; Bozkurt, 2021; Dmitrievskii, Prakht, ve ark., 2023). FDAM'ler yüksek tork-güç yoğunluğu sunar, ancak maliyet ve gürültü sorunlarına sahiptir. ASM'ler ağır hizmet tipi yapıları (yüksek dayanım, sert çalışma koşulları ve endüstriyel uygulamalara uygunluk) ve düşük maliyet nedeniyle popülerliğini korumaktadır, ancak verimlilik ve güç yoğunluğu açısından SMSM'lerin

gerisinde kalmaktadır (Bekiroglu & Esmer, 2023; Bozkurt, 2021; Shao ve ark., 2020). SMSM'ler, özellikle Dahili Mıknatıslı Motorlar (DMM) (Interior Permanent Magnet Motors-IPM), üstün performansları nedeniyle modern EAR'lerde sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak Nadir Toprak Elementi (NTE) mıknatıslarına bağımlı olmaları nedeniyle maliyet ve sürdürülebilirlik açısından dezavantajlıdır (Ehsani ve ark., 1997).

ARM'ler güç ve geniş hız aralığı sağlar, ancak tork dalgalanması ve gürültü sorunları bulunmaktadır. SRM ise dengeli bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır. SRM'ler rotor sargıları veya mıknatıslar gerektirmez, böylece rotor kayıplarını azaltır, demanyetizasyona uğrama riskini ortadan kaldırır (Bekiroglu & Esmer, 2023; Deepak ve ark., 2023; Nour ve ark., 2020). Kolay üretim, nispeten yüksek verimlilik ve gelişmiş kontrol yöntemleriyle kabul görmektedir. SRM'ler daha düşük güç faktörüne ve daha yüksek tork dalgalanmasına sahip olma eğiliminde olsa da, rotor geometrisi optimizasyonu ve gelişmiş kontrol yöntemleri ile bu dezavantajları en aza indirmek için araştırmalar devam etmektedir (Bekiroglu & Esmer, 2023; Jani & Jamnani, 2023).

Performansı daha da artırmak için SRM'ler genellikle sabit mıknatıslarla desteklenir ve bu da Sabit Mıknatıs Destekli SRM'ler (SMd-SRM) ile sonuçlanmaktadır. SMd-SRM'ler, iyileştirilmiş güç faktörü, yüksek tork ve verimlilik sağlar ve bu sayede DMM'lerle rekabet edebilmektedir (Al-ani ve ark., 2023; Jani & Jamnani, 2023; Shao ve ark., 2020, 2023). SMd-SRM'ler, DMM'lere kıyasla daha az NTE mıknatıs kullanımı gerektirir, manyetik ve relüktans tork katkılarının birleşimi sayesinde daha geniş sabit SGHO sunmaktadır.

NTE mıknatıslarının kullanımının avantajları olsa da bunlara bağımlılık ekonomik ve çevresel sorunlar yaratmaktadır. NTE yoğun fiyat dalgalanmaları, kısıtlı tedarik zinciri ve jeopolitik kısıtlamalarla tanımlanmaktadır (Al-ani ve ark., 2023; Credo ve ark., 2023). NTE mıknatıslar ayrıca şiddetli termal strese maruz kaldıklarında manyetikliklerini yitirirler. Bu durum, ferrit mıknatıs destekli SRM'ler gibi NTE içermeyen alternatiflerine ilgiyi artırmıştır. Ferrit mıknatıslar daha ucuz, daha az maliyetli ve termal olarak stabildir, ancak akı yoğunluğu daha düşüktür (Dmitrievskii, Kazakbaev, ve ark., 2023; Tarek & Sozer, 2020).

Yüksek performanslı SRM tabanlı motor topolojilerinde yüksek performans ve üretilebilirlik koşullarına göre motor tasarımı özel bir rol oynamaktadır. EA makinelerde eksenel geometri bazı özel zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Klasik anlamda akı

bariyerlerinin radyal olarak incelenmesi, üretimi karmaşıktır ve yapısal mukavemeti azaltmaktadır. Dış çaptan iç çapa kadar değişmeyen yeni bariyer geometrileri, büyük ölçekli, düşük maliyetli ve yüksek performanslı EA-SMd-SRM tasarımlarına öncülük etmesi düşünülmektedir.

Bu bağlamda EAR uygulamalarında motor tasarımı; çekiş gücü hesaplaması, sürüş döngüsü simülasyonu (ör. FTP, WLTP, ARTEMIS), mekanik boyutlandırma ve elektromanyetik modellemeyi içeren bir süreçle desteklenmelidir (Edwards ve ark., 2004; Rosca, 2013). Tasarım süreci teorik boyutlandırma ve analitik denklemler, 2B (2 Boyutlu) Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) simülasyonları ve ardından yüksek doğruluklu 3B (3 Boyutlu) modelleme ile doğrulanmalıdır. Tasarım yinelemeleri, tork, verimlilik ve tork dalgalanması arasında uzlaşma sağlamak için çok amaçlı optimizasyon içermelidir. Elektromanyetik tasarım sonrasında çok fizikli mekanik ve termal simülasyonlar, farklı yükleme koşullarında yapısal sağlamlığı ve termal kararlılığı doğrulamalıdır (Song ve ark., 2020). Yüksek güçlü çalışma için termal dayanım gereksinimlerini karşılamak üzere, elektromanyetik ve mekanik tasarım sırasında soğutma stratejileri dikkatlice tasarlanmalıdır.

Motor tasarımında yapısal analizler stator, rotor, mil ve bağlantı ekipmanları gibi birincil parçaların eğilme ve burulma gerilimini tespit etmek için gerçekleştirilmektedir. Bu analizler doğrusal yükleme, dairesel yükleme ve merkezkaç kuvveti etkisine karşı yeterli mekanik bütünlüğün varlığını doğrulamak amacıyla yapılmaktadır. Simülasyonlara dayalı gerilme analizlerinden elde edilen güvenlik katsayıları tasarımı güncelleme ve iyileştirme imkanı sağlamaktadır (Avşar, 2023; Özsoy, 2023). Bu da EAR uygulamaları için tasarlanan motorun yüksek tork ve hız durumlarında mekanik açıdan yeterliliğini belirlemektedir. Ayrıca, akım kaynaklı kayıplar ve sıcaklık artışı arasındaki bağlantıyı doğru bir şekilde modellemek için termal-elektromanyetik bağlantı kullanılmalıdır. Tasarımcılar, termal ve elektromanyetik alanlar arasında geçiş yaparak, fiziksel prototipleme aşamasına geçmeden bu tür dengesizlikleri tespit edip ortadan kaldıracırlar.

EAR'ler tahrik sistemi uygulamalarında paketleme kısıtlamaları ısı yayılım hacmini sınırlar ve termal performans sürekli ve maksimum güç çalışmasında birinci dereceden kısıtlayıcı bir faktördür. Termal analizler genellikle sargılar ve mıknatıslar gibi ekipmanların termal sınırları sebebiyle elektromanyetik performansın artmasına engel

olabilmektedir (Mutlu, 2011; Özsoy, 2023; Roy ve ark., 2023; Y. Yang ve ark., 2017). Bunun için de elektrik motoru tasarımında soğutma yöntemlerinin önemi ortaya çıkmaktadır. Hava soğutma, sıvı soğutma, doğrudan ve dolaylı soğutma gibi soğutma yöntemleri motor tasarımına uygun olarak entegre edilebilmektedir. Kullanılan çeşitli soğutma teknikleri arasında yer alan cebri sıvı soğutma, çekiş sistemi uygulamaları için yüksek performans göstermektedir (Gai ve ark., 2019; Konda ve ark., 2024; Zhang ve ark., 2022).

EA-ÇS makine topolojisinde stator boyunduruğu ve uç kapakları etrafına sarılmış soğutma kanalları ile kapalı devre soğutma sistemleri uygulanmaktadır. Bu sistemler, yüksek yüklerde genellikle en büyük ısı kaynağı olan stator sargılarından eşit ısı giderimi sağlayarak termal stabilite sağlamaktadır. Soğutucu sıvının akış hızı kontrol edilerek motorun yüksek akım yoğunluklarında güvenli bir şekilde çalıştırılması ve böylece güvenilirlikten ödün vermeden tork seviyelerinin artırılması sağlanmaktadır.

Sonuç olarak, EAR'ler için motor tasarımı iş akışı (analitik boyutlandırma, döngü ve çekişe dayalı gereksinim tanımı, 2B/3B SEY modelleme, çok amaçlı optimizasyon ve çok fizikli doğrulama) yeni nesil EA çekiş motoru oluşturmak için uçtan uca bir süreç olarak tasarlanmıştır.

Bu tez çalışmasında NS topolojisine sahip ve seri üretime uygun bariyer geometrileriyle üretilebilirlik açısından tasarlanmış bir EA-ÇS-SMd-SRM analizini incelemektedir. Motor performansı elektromanyetik, mekanik ve termal analizler aracılığıyla değerlendirilmektedir. Genel yaklaşım, yeni EA-ÇS-SMd-SRM tasarımının sadece EAR çekiş performans ve verimlilik beklentilerini karşılamasını değil, aynı zamanda seri üretim için gerekli olan üretilebilirliğe de uymasını sağlamayı amaçlamaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ / KURAMSAL TEMELLER

Özsoy ve ark., (2022) EAR uygulamalarında kullanılmak üzere EA-ASM modelde oluk sayısı, kutup sayısı ve rotor ortada/stator ortada topolojisinin performansa etkisini incelemiştir. Motor güç ve hız parametrelerini belirlemek için referans araç özellikleri üzerinden çekiş kuvveti hesabı yapılmıştır. Çekiş hesabı ile ihtiyaç duyulan performans kriterlerine göre motor boyutlandırma analizleri yapılmıştır. Nominal 4 000 dev/dk hız ve 50 kW güç için 6-8-10 kutup, rotor ortada ve stator ortada olmak üzere üretilen modeller analiz edilmiştir. 8 Kutup EA-ÇR-ASM'de 246.77 A_{rms} akım için 4 000 dev/dk hızda 179.24 Nm tork ve 75 kW güç değerine ulaşmıştır. Bu modelde akım yoğunluğu 10.55 A/mm², güç faktörü 0.84 ve verim %92.94 olarak hesaplanmıştır (Özsoy ve ark., 2022).

Gragger ve ark., (2016) yaptıkları çalışmada EAR'ler için RA-SMd-SRM tasarımı gerçekleştirmiştir. Tasarım hedefleri Avrupa sürüş döngüsü (NEDC, WLTP) prosedürüne uygun maksimum 130 km/sa ve %20 minimum yokuş tırmanışı gerekliliklerini sağlamak üzere belirlenmiştir. SMd-SRM 3700 dev/dk hızda 133 Nm maksimum tork ve 4 900 dev/dk'da 56.7 kW maksimum güç değerlerine ulaşmaktadır. Verim haritası çıkarılmış modelde 4 000-5 000 dev/dk hız aralığı ve 30-70 Nm tork aralığında maksimum %96 verim elde edilmiştir. SMd-SRM model için elektromanyetik analizlerin yanı sıra yapısal analizler yapılmış ve rotor için 0.1 mm toplam deformasyon gözlemlenmiştir. Kanatlı kabuk tasarımı ile hava soğutma uygulanan SMd-SRM modelde WLTP sürüş döngüsüne göre maksimum sıcaklık 52 °C altında kalmıştır. Elektromanyetik, termal ve mekanik yeterliliğin ardından EAR'ler için uygulanabilir tasarım önermektedir (Gragger ve ark., 2016).

Trancho ve ark., (2018) HEAR ve BEAR'ler için akı zayıflatma kontrol yöntemini kullandıkları EA-SMd-SRM uygulaması gerçekleştirmiştir. Maksimum 51 kW güç 12 000 dev/dk devir değerlerine sahip EA-SMd-SRM'nin maksimum 130 Nm torka ulaştığı görülmektedir. Farklı hızlardaki sürüş testinde (WLTP test prosedürü) motorun akım ve tork analizleri yapılmıştır (Trancho ve ark., 2018).

Pop ve ark., (2018) EAR'ler için sundukları yeni EA-SRM topolojisini RA-DMM referans motor modeliyle kıyaslamış ve SEY analizlerini gerçekleştirmiştir. Disk tipindeki motor yapısı, kısıtlanabilir eksenel uzunluğu ve tork/güç yoğunluğu açısından

avantajları ile EA motorları otomotiv uygulamalarında avantajlı görmektedir. Yüksek tork ve düşük tork dalgalanması için optimize edilmiş nihai modelde konsantre sargı tercih edilmiştir. EA-SRM modelin RA muadillerine göre yüksek tork-güç yoğunluğuna sahip olduğu görülmüştür (Pop ve ark., 2018).

Hesari ve ark., (2024) EAR uygulamaları için bağımsız ÇR ve ortada stator yapısına sahip EA-ASM tasarımı gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada elektronik veya mekanik diferansiyel uygulaması olmamasına rağmen bağımsız rotor ve kontrolcü ile motor kendinden diferansiyel uygulaması gerçekleştirmiştir. Motor tasarımı için öncelikle çekiş gücü hesabı yapılmıştır. Küçük ölçekli (bir ya da iki yolcu kapasiteli) araç özelliklerine göre üzerine etkiyen kuvvetler, ihtiyaç duyulan güç ve hız hesaplamaları yapılmıştır. Dört kutuplu 1 kW'lık EA-ASM tasarımı 0.8 güç faktörü ve %58 verim ile performans göstermiştir (Hesari ve ark., 2024).

Goli ve ark., (2021) EAR'lerde çekiş uygulamalarıyla ilgili elektrikli motor teknolojilerini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada güç yoğunluğunun önemine dikkat çekmiştir. Otomotiv sektöründe kullanılan EAR motorları hakkında değerlendirme yapmıştır. Güncel ve gelecek vaat eden rotor yapılarında farklı bariyer yapılarına sahip motor örnekleri incelenmiştir. Mıknatıs destekli modellerin farklı bariyer yapısına sahip rotora eklendiği gözlemlenmiştir. Toyota Prius, Jaguar I-Pace, Tesla 3, BMW i3 ve Chevy Bolt gibi EAR'lerin özgün bariyer yapıları incelenmiştir (Goli ve ark., 2021).

Mahmoudi ve ark., (2020) EA-SRM tasarımı gerçekleştirmiştir. EA motor topolojisinin aynı hacimdeki RA modellere kıyasla daha geniş hava aralığı alanına dolayısıyla daha yüksek tork-güç yoğunluğuna sahip olduğu belirtilmiştir. Bunun için 2 kutuplu ve 4 kutuplu, EA motor analiz sonuçlarını RA motorlarla kıyaslamıştır. EA 4 kutup motor RA muadiline göre %12 düşük hacme sahip olmasına karşın daha yüksek tork elde etmiştir. Ayrıca 2 ve 4 kutuplu tasarlanan EA-SRM 2B ve 3B model SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. Başlangıç tasarımı için 2B model yaklaşımının kabul edilebilir doğruluğa sahip olduğu görülmüştür (Mahmoudi ve ark., 2020).

Nyitrai ve Kuczmam (2023) çift hava aralıklı EA-SMSM tasarımı gerçekleştirmiştir. EA-ÇS-SMSM mıknatıs yerleşimi için ortadaki rotor yapısına iki adet açık kollara sahip 'U' şekli bariyer eklenmiştir. Bariyerlerin ortasına yerleştirilen mıknatıslar sayesinde mıknatıs torku elde edilmiştir. EA-SMSM modeli için 2B ve 3B SEY analizleri yapılmıştır (Nyitrai & Kuczmam, 2023).

Akiki ve ark., (2018), 'U' tipi bariyerlere sahip ferrit mıknatıs destekli EA-SRM analizi gerçekleştirmiştir. EA-SRM modelini RA 18/16, 48/8 ve 27/24 kutup oluk oranına sahip endüstriyel motorlarla ile kıyaslamıştır. Bu modelde bariyer yapısı maksimum verim ve minimum maliyet amaç fonksiyonlarına göre optimize edilmiştir. 2B ve 3B SEY analizleri yapılmış ve 3B modelde 219.4 Nm tork, 0.852 güç faktörü ve %92.6 verim elde edilmiştir. RA muadiline göre EA-SRM modelin %50 daha yüksek tork yoğunluğuna sahip olduğu görülmektedir (Akiki ve ark., 2018).

Yu ve ark., (2024) boyunduruksuz stator ve çift rotor ile çift hava aralıklı EA-SMSM modelini EAR'ler için önermiştir. Nominal 70 kW, maksimum 120 kW güç değerine sahip EA-SMSM 6 000 dev/dk nominal ve 15 000 dev/dk maksimum hız değerine sahiptir. Farklı hız ve frekans değerleri için titreşim analizi yapılmıştır. EA-SMSM rotor yapısında mıknatıslar 'U' şeklindeki iki bariyere yerleştirilmiştir. Tork dalgalanması ve vuru torku dolayısıyla titreşimi azaltmak için rotor yapısında kaydırma (skew) uygulanmıştır. Ortalama tork, vuru torku ve tork dalgalanması sırasıyla 123 Nm'den 98 Nm'ye, 4.8 Nm'den 2.21 Nm'ye ve %11.4'ten %5.1'e düşmüştür (Yu ve ark., 2024). Credo ve ark., (2023) H2020 European Project ReFreeDrive projesi kapsamında özgün bariyer yapısına sahip RA-SRM tasarımı ve üretimi gerçekleştirmiştir. Motor tork, hız, ivmelenme ve güç değerlerini belirlemek için çekiş gücü hesaplamaları yapılmıştır. Akım Başına Maksimum Tork (MTPA-Maximum Torque per Ampere) ve akı zayıflatma yöntemi kullanılarak kontrol edilmiştir. 4, 6 ve 8 kutup için üretilen modeller performans açısından karşılaştırılmıştır. 6 kutuplu modelde maksimum 110 kW güce ulaşırken minimum tork dalgalanması 4 ve 8 kutuplu modellerde %14 olarak hesaplanmıştır. Maksimum verim yine 4 kutuplu RA-SRM modelde %97.3 değerine ulaşmıştır. Sürüş döngüsü (WLTP ve CLTC-P) testlerine göre yapılan hesaplamalarda ortalama verimin %92.41 civarında olduğu gözlemlenmiştir. Verim değerleri 12 000 dev/dk maksimum hıza kadar verim haritasında verilmiştir (Credo ve ark., 2023).

Mohammadi ve ark., (2023), EAR uygulamaları için ÇS topolojisi ve spoke tipi tek rotora sahip EA-SMSM tasarlamıştır. Statorlardan sadece birine çift katmanlı sargı eklenmiştir. Ayrıca araç teker içine uygun motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Modelin iç ve dış çapı sırasıyla 150 mm ve 300 mm olarak verilmiştir. 10 A/mm² akım yoğunluğuna kadar 540 Nm maksimum tork ve aşırı yükleme durumunda 85 kW maksimum elektromanyetik güç elde edilmiştir (A. Mohammadi ve ark., 2023).

Gerçekcioğlu ve Akar (2021) iki farklı bariyer tipi, üç farklı yalıtım oranı ve çoklu bariyer sayısına göre yirmi dört farklı EA-SRM modelinin 3B SEY analizini gerçekleştirmiştir. Dört oval köşeli bariyere ve 0.6 yalıtım oranına sahip model GA ile optimize edilmiştir. Nihai model %25'ten %125'e kadar farklı yükler altında analiz edilmiş simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları kıyaslanmıştır. MTPA yük açısına ve yükleme derecesine göre tork, güç faktörü, çıkıntı oranı ve tork dalgalanması sonuçları alınmıştır. Tam yük altında 8.2024 A_{tepe} akım için 13.98 Nm tork, 0.67 güç faktörü, %89.3 verim, %9.52 tork dalgalanması ve 2.4017 Nm/A tork-amper oranı elde edilmiştir. 1 500 dev/dk nominal hız ve 2.2 kW güce sahip 8 kutuplu EA-SRM modeli IE4 Süper Premium verim sınıfına dahil edilmiştir (Gerçekcioğlu & Akar, 2021).

Eser ve Üstkoyuncu (2024), farklı bariyerlere yerleştirilmiş mıknatısların EA-SRM üzerindeki etkisini incelemiştir. Rotor yapısında dikey kolları açılı olarak tasarlanmış dört adet bariyer bulunmaktadır. Rotor bariyer parametreleri üzerinde Çok Amaçlı Genetik Algoritma (ÇAGA) optimizasyon yöntemi ile yüksek tork ve düşük tork dalgalanması amaç fonksiyonuna göre en iyi model çıkarımı yapılmıştır. Nihai model üzerinden mıknatıs sayısı, mıknatısların yerleştirildiği bariyerler ve mıknatıssız olmak üzere dokuz farklı modelin analizleri gerçekleştirilmiştir. Mıknatısların tork, tork dalgalanması, güç faktörü ve verim üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Mıknatısların sayısının artması ve hava aralığına yakınlığının motor tork, güç faktörü ve verim üzerinde sırasıyla %140, %93 ve %10'a kadar artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir. Aynı şekilde tork dalgalanmasının %30'a kadar artış göstermesi dezavantaj olarak incelenmiştir (Eser & Üstkoyuncu, 2024).

Tarek ve Sozer (2020), yaptıkları çalışmada 5.9 kW güce sahip EA ferrit mıknatıs destekli SRM tasarımı gerçekleştirmiştir. SRM rotor tasarımı için 'köpek kemiği' şekline sahip bariyerler kullanılmıştır. Bariyerlere yerleştirilen ferrit mıknatıslarla relüktans torkuna ek olarak mıknatıs torku ile motor performansına katkıda bulunmuştur. Rotor bariyer tasarım parametreleri ÇAGA kullanılarak 28.17 Nm tork ve %7.48 tork dalgalanması amaç fonksiyon değerlerine ulaşmak için optimize edilmiştir. Optimizasyon sonucunda başlangıç torkunun %3.52 arttırıldığı, tork dalgalanmasının ise %0.43 oranında azaltıldığı görülmektedir (Tarek & Sozer, 2020).

Tarek ve Sozer (2021), yaptıkları çalışmada 'H' tipi bariyer yapısına sahip rotor modeli ile EA-ÇS-DMM tasarımı gerçekleştirmiştir. Çift hava aralığı EA motor topolojisi

kullanarak rotor ve stator arasındaki dengesiz manyetik çekim etkisini simetrik stator yapısıyla önlemiştir. Tork ve tork dalgalanması amaç fonksiyonuna bağlı ÇAGA optimizasyonu sonucunda EA-ÇS-DMM 6 kW güç, 28.67 Nm tork, %7.62 tork dalgalanması ve %94.1 verim elde etmiştir (Bin Tarek & Sozer, 2021).

Xing ve ark., (2024) asimetrik rotor bariyer yapısına sahip RA-SMd-SRM tasarımı yapmıştır. Çalışmada farklı hız-tork değerleri için verim haritası çıkarılmıştır. Rotor bariyer parametrelerine bağlı olarak maksimum tork ve minimum tork dalgalanması amaç fonksiyonlarını elde etmek için çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Optimum model tork ve tork dalgalanması sonuçları başlangıç modeline göre sırasıyla %25.32 ve %76.92 oranında iyileşme göstermiştir. RA-SMd-SRM model MTPA ve akı zayıflatma yöntemi kullanılarak farklı hız, tork ve güç değerlerine göre SGHO performans kıyaslaması yapılmıştır. Maksimum 6 000 dev/dk hıza kadar güç ve tork değişimi gözlemlenmiş, maksimum güç 6 kW ve maksimum tork 33 Nm olarak gözlemlenmiştir. Optimum modelin yaklaşık 2 000 dev/dk hız ve yüksek torklarda %95.5 verim elde edilmiştir (Xing ve ark., 2024).

Shao ve ark., (2023) EAR uygulamaları için RA-SMd-SRM tasarımı ve optimizasyonunu incelemiştir. European Horizon 2020 projesi kapsamında orta ölçekli araç için çekiş gücü hesabın ve standart sürüş döngü testlerine göre kayıp enerji hesaplaması yapılmıştır. Rotor ve stator tasarım parametreleri üzerinden kayıpları minimuma indirmek, tork ve tork dalgalanmasını referans değere ulaştırmak için çok amaçlı optimizasyon kullanılmıştır. Optimum model ve başlangıç modelinin standart sürüş testlerine (NEDC, WLTP, Artemis Kentsel) göre analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Farklı hız ve tork değerleri için üretilen verim haritası üzerinden sürüş testi performans değerleri incelenmiştir. Nihai modelde nominal 3 000 dev/dk hız, 10 kW güç, 23 Nm tork ve sırasıyla maksimum 7 000 dev/dk hız, 25 kW güç, 83 Nm tork ve %96.2 verim elde edilmiştir (Shao ve ark., 2023). Akar ve ark., (2022) yaptıkları çalışmada değişken hızlarda EA-SRM performans analizini gerçekleştirmiş ve verim haritası üzerinden sonuçları analiz etmiştir. Rotor yapısı dört adet 'U' şeklinde bariyere sahip 2.2 kW güç değerinde EA-SRM'nin 0-3 000 dev/dk hız aralığında ve farklı yüklerde performans analizi yapılmıştır. Farklı hız-tork değerlerine bağlı olarak yük açısı, gerilim, akım, güç faktörü, bakır kayıpları, toplam kayıplar ve verim değişimi deneysel ve analiz sonuçları kullanarak incelenmiştir. Nominal hız 1 500 dev/dk'da ve %50 yük altında yaklaşık olarak %90 verim elde edilen

EA-SRM'de yüksek hızlarda ve %50'nin altındaki yük değerlerinde %86 verim değeri elde edilmiştir (Akar ve ark., 2022).

Ge ve ark., (2022) yaptıkları çalışmada Wang ve ark., (2022)'nin kullandığı yeni akı yolu tasarımını EA-ÇS-SMSM için denemiştir. EAR uygulamaları için yine halbach, spoke ve 'U' (halbach ve spoke tipi mıknatısların ortak yerleştirilmesiyle) tipi mıknatıs yerleşimi modelleri kıyaslanmıştır. Üretilen yeni modelin 130 kW maksimum güce ulaştığı, sırasıyla 73.25 Nm/m³ tork yoğunluğu ve 7.64 kW/kg güç yoğunluğu elde ettiği, verim haritasında maksimum %97.3 verimle çalıştığı gözlemlenmiştir (Ge ve ark., 2022).

Kumar ve ark., (2022) farklı mıknatıs kombinasyonları kullanarak RA-SMd-SRM tasarımı için çok amaçlı optimizasyon ve mekanik analizleri gerçekleştirmiştir. Farklı hızlarda tork, demanyetizasyon etkisi ve mıknatıs hacmini iyileştirmek için çok amaçlı optimizasyon kullanılmıştır. Mıknatıs sıcaklıkları -20 °C ve 150 °C için mıknatısların demanyetizasyonu incelenmiştir. Eklenen NTE ve ferrit mıknatıslı modellerin her biri için verim haritası üzerinden farklı hız-tork değerlerinde verim değişimi analiz edilmiştir. Üretilen modellerde maksimum 366.4 Nm tork ve minimum %7 tork dalgalanması elde edilmiştir. Mekanik analizler sonucunda ise 350 MPa akma mukavemetine sahip malzeme için güvenlik faktörü 1.05 olarak hesaplanmıştır (P. Kumar ve ark., 2022).

Al-ani ve ark., (2023) ağır hizmet araçları için yüksek performans değerlerine sahip RA-SMd-SRM tasarımını ferrit mıknatıs destekli olarak modifiye etmiştir. Bu çalışmada çok amaçlı ve çok fizikli analizleri gerçekleştirilmiştir. Başlangıç tasarımı üzerinden motor parametreleri maksimum güç, maksimum verim, minimum mıknatıs ağırlığı, minimum motor ağırlığı ve minimum tork dalgalanması amaç fonksiyonları için optimize edilmiştir. Üretilen ferrit mıknatıs destekli RA-SRM model maksimum 15 000 dev/dk hız, 173 kW güç ve 706 Nm tork elde etmiştir. Nominal güç yoğunluğu 1.06 kW/kg ve 6 kW/L olarak hesaplanmıştır. Farklı hız-tork değerleri için RA-SMd-SRM modelin verim haritası çıkarılmıştır. NTE mıknatıslarla kıyaslandığında ferrit mıknatıs destekli RA-SRM modelin daha yüksek hızlarda yüksek verim elde ettiği görülmüştür. Mekanik stres analizi maksimum hızın %10 fazlası için maksimum gerilme 655 MPa ve maksimum deformasyon 0.05329 mm olarak hesaplanmıştır. Termal analizler soğutma sıvısı (EGW50/50-Etilen Glikol Su (%50-%50)), 65 °C sıcaklığı ve 9.6 L/dk akışkan hızına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Maksimum sargı sıcaklığı 177 °C, maksimum mıknatıs

sıcaklığı 72 °C ve maksimum nüve sıcaklığı 93 °C olarak hesaplanmıştır. Sargı yalıtımı düşünülerek maksimum sıcaklık 180 °C ile sınırlandırılmıştır (Al-ani ve ark., 2023).

Wang ve ark., (2024) kapalı sistem boyunduruksuz dağıtılmış sargılı yüksek güçlü bir EA-SMSM tasarlamış çok fizikli analizler yapılmıştır. Maksimum 15 000 dev/dk hız, 120 kW güç ve 310 Nm tork performans değerlerine ulaşan EA-SMSM çift hava aralıklı ve stator ortada olarak tasarlanmıştır. Doğrudan cebri soğutma uygulanan motor tasarımı 20 A/mm² akım yoğunluğuna göre yapılmıştır. Termal analizler Sayısal Akışkanlar Dinamiği (CFD / Computational Fluid Dynamics) analizi ile hava soğutmalı, soğutma kanalları sayesinde su soğutmalı ve yağa daldırılmalı cebri soğutma yöntemlerine göre yapılmıştır. Hava akış hızının 10 m/s, sıvı akış hızının ise 10 L/dk olduğu analizlerde maksimum sargı sıcaklığı yaklaşık olarak 180 °C olarak hesaplanmıştır. Sargı yalıtımının dayanım sıcaklığı olarak belirlenen 180 °C'ye sargı sıcaklıkları hava soğutmada 5.3 A/mm², su soğutmada 7 A/mm² ve kapalı yağ soğutmada 14.1 A/mm² yoğunluğunda ulaşmaktadır. Burada güç yoğunluğu yağa daldırılmış soğutmada %153 oranında artmaktadır ve maksimum güç yoğunluğu 7.2 kg/kW olarak hesaplanmıştır. 250 A akım için sadece kapalı sistem yağ soğutmada sargıların 180 °C altında kaldığı gözlemlenmiştir. Yüksek akımlarda rotor ve stator eksenel çekim kuvvetinin artması sebebiyle mekanik stres analiz yapılmıştır. 0.8 mm eksenel sapma için eksenel kuvvetler 2000 N'den fazla olmaktadır ancak malzemenin akma mukavemetine oldukça uzak dolayısıyla mekanik dayanımı kabul edilebilirdir (Y. Wang ve ark., 2024).

Wang ve ark., (2022) EAR uygulamaları için konsantre sargıya sahip RA-SMSM tasarımı gerçekleştirmiştir. Yüksek tork-güç yoğunluğu amaçlanan çalışmada 'U' tipi bariyer yapısı tercih edilmiş ve çok fizikli analizler yapılmıştır. Mıknatısların bariyerlere yatayda ve dikeyde eklenmesi ile halbach ve spoke tipi SMSM tiplerinden birbirini destekleyen farklı akı yolları üretilmiştir. Yeni üretilen modelin halbach ve spoke tipi modellere kıyaslanması sonucu en iyi model 200 A akım için 217.1 Nm tork, 58.2 kW güç ve %97.3 verim elde etmiştir. Spoke tipi SMSM ile kıyaslandığında tork-güç yoğunluğu değerlerinde sırasıyla %13.7 ve %8.21 iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. Üretilen modelin 6 000 dev/dk devire kadar farklı hız-tork değerlerinde verim haritası çıkarılmıştır. Çalışmada 7 200 dev/dk devirde yapılan mekanik analizde rotor kısmında maksimum 250 MPa stres meydana gelmiştir ve güvenlik katsayısı 1.6 olarak hesaplanmıştır. Stator sargı sıcaklığı 30 kW ve 60 kW güç değerleri için termal kararlı durum analizi ile tespit

edilmiştir. Su soğutma kanalları ile soğutulan motorda 30 kW ve 60 kW güç değerleri için maksimum sargı sıcaklığı sırasıyla 125.19 °C ve 222.39 °C olarak belirlenmiştir (J. Wang ve ark., 2022).

Geng ve ark., (2024) soğutma çubuklarının kullanıldığı hava soğutma sistemine sahip Nüvesiz ve Segmentli Armatür (YASA / Yokeless and Segmented Armature) tipi motor tasarımı ve termal analizini yapmıştır. Nominal 1 200 dev/dk ve 35 kW güç değeri için konsantre sargıların arasına yerleştirilen soğutucu çubuklarıyla soğutma uygulanmıştır. YASA motor modeli nominal devirde 165 A akım için sargı, nüve, mıknatıs ve soğutma çubuklarının kayıpları (W/m^3) hesaplanmıştır. Bu kayıplara bağlı olarak geleneksel hava soğutmayla maksimum sargı sıcaklığı 220.87 °C iken soğutma çubukları sayesinde 149.86 °C'ye kadar düşmüştür. Termal değerlendirme matematiksel model, akışkan analizi ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasıyla yapılmıştır. 3B termal akışkan analizinin deneysel sonuçlara karşı %2.12 sapmayla kabul edilebilir bir doğruluğa sahip olduğu gözlemlenmiştir (Geng ve ark., 2025).

Roy ve ark., (2022) EA-SMSM için mekanik bir yaklaşım ve soğutmaya bağlı termal davranışını incelemiştir. Geniş bir literatüre sahip çalışmada soğutma yöntemlerine bağlı 8 kW ve 65 kW EA-SMSM analiz sonuçları verilmiştir. YASA tipi tasarımda stator sargılarını soğutmak amacıyla soğutma ceketi kullanılmıştır. Soğutma sıvısının farklı debilerde sıcaklığa etkisi araştırılmıştır. Soğutma sıvısının 5 L/dk'dan 10 L/dk debiye çıkması ile sargı sıcaklığında %4.81 oranında azalma tespit edilmiştir. 65 kW modelde sargı sıcaklığı maksimum 161.85 °C olarak analiz edilmiştir. Soğutma sıvısı debisinin 20 L/dk'dan 30 L/dk'ya çıkarılması ise stator sargı sıcaklığını %6.17 azaltmaktadır (Roy ve ark., 2023).

Zhao ve ark., (2024) yaptıkları çalışmada EAR uygulamaları için tekere monte EA-ÇS-ASM önermiştir. 6 kutuplu EA-ÇS-ASM nominal 8.5 kW güç, 23.9 Nm tork ve 3 400 dev/dk hız değerine sahip yaklaşık %80 verim elde etmektedir. Termal analiz için stator ve rotor nüve kayıpları, stator ve rotor bakır kayıpları, mekanik kayıplar hesaplanmıştır. Kayıplara bağlı ısı kaynağı olan motor parçaları rotora eklenen fan yapısı ile cebri hava soğutma yöntemiyle soğutulmuştur. EA-ÇS-ASM 3 000 dev/dk devirde yapılan SEY analizleri sonucunda stator sargılarında ve rotor barında maksimum sıcaklık sırasıyla 112 °C ve 106 °C olarak ölçülmüştür. EA-ÇS-ASM deneysel çalışmaları sonucunda SEY

analizi ve deneysel veri sonuçları arasından 3 000 dev/dk'da 7 °C'lik sıcaklık fark olduğu gözlemlenmiştir (A. Zhao ve ark., 2024).

Geng ve ark., (2020), yüksek tork yoğunluğu için konsantre sargılı YASA tipi EA-SMSM tasarımı gerçekleştirmiştir. YASA motorda elektromanyetik analizler sonucunda nominal 2 000 dev/dk hızda, 30 kW güç, 150 Nm tork elde edilmiştir. Maksimum 7 500 dev/dk hız için maksimum güç ve tork değeri sırasıyla 40 kW ve 350 Nm'dir. Farklı hızlardaki kayıplar hesaplanmış ve verim haritası sonuçlarına göre maksimum verim %90 civarında görülmektedir. Bu çalışmada yüksek akım yoğunluğu elde etmek için yağa daldırılmalı cebri soğutma gerçekleştirilmiştir. Nominal güç için 20 A/mm² akım yoğunluğunda sargı sıcaklığı ortalama 100 °C olarak analiz edilmiştir. Soğutma sistemi için özel olarak tasarlanan kabuk, stator ve rotor mekanik analizler sonucunda deformasyonları malzeme akma değerlerinden uzaktadır (Weiwei ve ark., 2020).

Chapter 4 (t) See

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde EA-SRM tasarımında kullanılan tanımlar, hesaplamalar, yöntemler ve analizler hakkında detaylı bilgi verilmiştir. EA-SRM tasarımı için literatürdeki EAR'ler ve yapıları incelenmiştir. EAR'lerde kullanılan motor türlerinin avantaj ve dezavantajları ortaya çıkarılmıştır. Motor seçimiyle birlikte EA motor yapısı ve farklı topolojilerde kullanımı araştırılmıştır. Bu aşamaya kadar literatürde kullanılan materyal ve yöntemler detaylı şekilde incelenmiştir. Uygun topolojilerin belirlenmesiyle tasarım sürecine başlanmıştır.

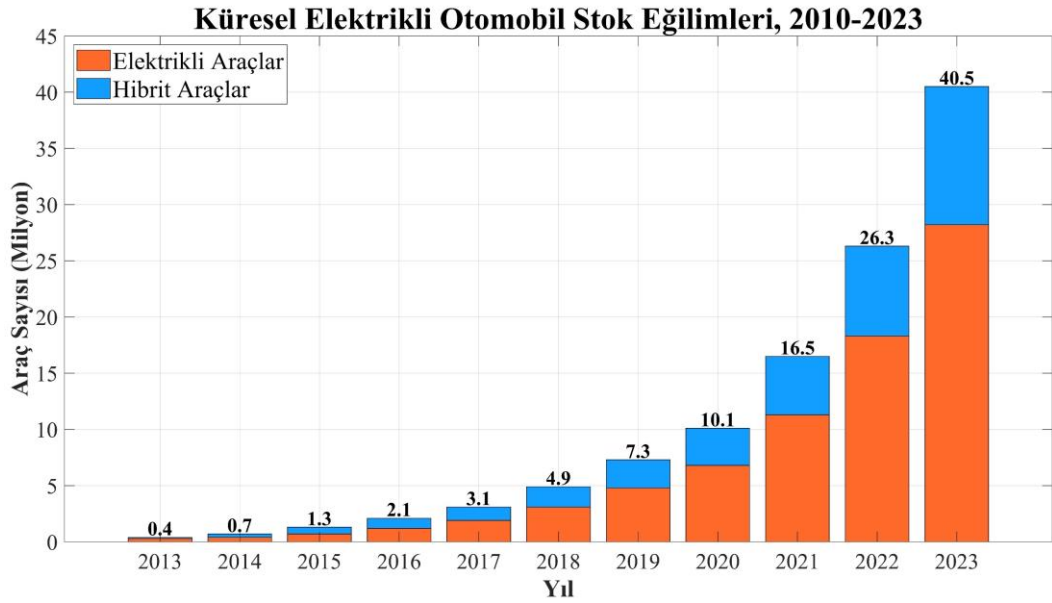
EA-SRM tasarımı SRM modelinin çalışma mantığı, eşdeğer devresi ve fazör diyagramı üzerinden incelenmiştir. Üç fazlı SRM için eşdeğer devre denklemleri çıkarılmıştır. Eşdeğer devreye bağlı Park-Clark dönüşümü yapılmış ve devre d-q eksenlerine bağlı olarak sadeleştirilmiştir. Ardından matematiksel model ile SRM performansı incelenmiştir. EAR'ler için yapılan tasarımda EA-SRM başlangıç parametreleri araç özellikleri, ihtiyaç duyulan performans ölçütleri ve sürüş testleri hesaplamalara göre belirlenmiştir. İhtiyaç duyulan güç ve hız aralığına sahip EA-SRM parametrelerinin (stator/rotor boyutları, stator oluk tasarımı, stator sargı tasarımı, rotor bariyer tasarımı, vb.) matematiksel hesaplamaları yapılarak başlangıç tasarım kriterleri oluşturulmuştur. Matematiksel model üzerinden motor performans değerleri incelenmiştir.

Hesaplanan EA-SRM matematiksel modelinin doğruluğunun kanıtlanması ve performans analizleri için SEY kullanılmıştır. Elektromanyetik motor tasarımı ve testleri SEY ile ANSYS Maxwell kullanılarak yapılmıştır. Başlangıç tasarımında daha hızlı sonuçlar almak için 2B model analizi tercih edilmiştir. Elde edilen sonuçlar 2B analizlere göre daha yüksek doğruluğa sahip 3B model üzerinden tekrar analiz edilmiştir. Stator yapısı, rotor yapısı, sargı özellikleri gibi temel parçaları oluşturulan 3B model elektromanyetik tasarımın nihai sonuca ulaşması için birden fazla değişken ve amaç fonksiyonuna sahip çok amaçlı optimizasyon yöntemi tercih edilmiştir.

Yüksek performans kriterleri ve çalışma şartları düşünülerek EA-SRM model çok fizikli tasarım yöntemleri ve sınırlamaları belirlenmiştir. Elektromanyetik performans kriterlerine bağlı tasarım sonuçları mekanik ve termal açıdan değerlendirilmiştir. Nihai modelin mekanik dayanım kriterleri ve termal sınırları açısından çalışmalar yapılmıştır. Çok fizikli analizlerin amacı, yöntemi ve katkısı bu bölümde incelenmiştir.

3.1. Elektrikli Araçlar

Ulaşım ve taşımacılık insanlığın ihtiyaç duyduğu, sürekli araştırma ve geliştirme yaptığı alanlardan biridir. Geçmişten günümüze ulaşım aracı teknolojisi enerji kaynağına göre buharlı, elektrikli ve fosil yakıtlı olarak insanların kullanımına sunulmuştur. Günümüzde yoğun şekilde kişisel ulaşım araçlarında da kullanılan fosil yakıtlar; nitrojen oksit (NO), karbondioksit (CO₂), karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonlarına sebep olmaktadır. İnsan sağlığı, çevresel faktörler ve dünya fosil yakıt rezervlerinin azalması göz önüne alındığında yeni araç teknolojilerine ihtiyaç olduğu görülmektedir (Serttaş, 2019; Yıldırım, 2022). Avrupa Birliği, Kyoto Protokolü kapsamında bu sera gazı emisyonlarını 1990 yılı seviyelerini referans alarak 2050 yılına kadar %80-95 oranında azaltmayı hedeflemektedir. Bu hedefin gerçekleşmesi için taşımacılık (kara, hava ve su) alanında emisyonların %60 oranından azaltılması gerekmektedir. Bunun için de HEAR ve EAR'ler alternatif olarak görülmektedir (De Gennaro ve ark., 2019).



Şekil 3.1. 2010-2023 yılları arasında elektrikli otomobil stok eğilimleri (Anonim, 2024)

Elektrikli ve hibrit (Plug-in) araçların dünya genelinde 2010-2023 yılları arasındaki araç sayısı Şekil 3.1’de verilmiştir. Global EV Outlook 2023 (GEVO-2023) raporunda verilen bu bilgilere göre 2013 yılında toplamda 400 000 olan EAR sayısı 2023’te 40 milyonu geçmiştir. EAR satışı açısından değerlendirildiğinde 2023’te bir önceki yıla göre %35

daha fazla satış gerçekleştirilmiştir. 2018 yılında EAR'ler satılan tüm araçların sadece %2'sini oluştururken bu oran 2022'de %14 ve 2023'te %18 olarak hesaplanmıştır. 2023 yılında EAR stoğunun %70'ini BEAR'ler oluşturmaktadır (Anonim, 2024).

Aynı raporun 2024 yılı verilerine göre 2024 yılı ilk çeyreğinde EAR satışı dünya genelinde bir önceki yıl aynı döneme göre 3 milyonun üstüne çıkarak %25 artış göstermiştir. EAR'lerin geleceği için yapılan çalışmalarda 2023 yılında 14.2 milyon olan EAR satışları Belirtilen Politikalar Senaryosu (Stated Policies Scenario) verilerine göre 2030 yılında 45 milyon ve 2035 yılında 63.5 milyona ulaşması beklenmektedir. Stated Policies Scenario verileri dünya çapında EAR'lerle ilgili hükümet politikaları, yatırımlar, teknolojik gelişmeler, pazar eğilimi gibi birçok etkene göre hazırlanan tahmin verilerini kapsamaktadır (Anonim, 2024).

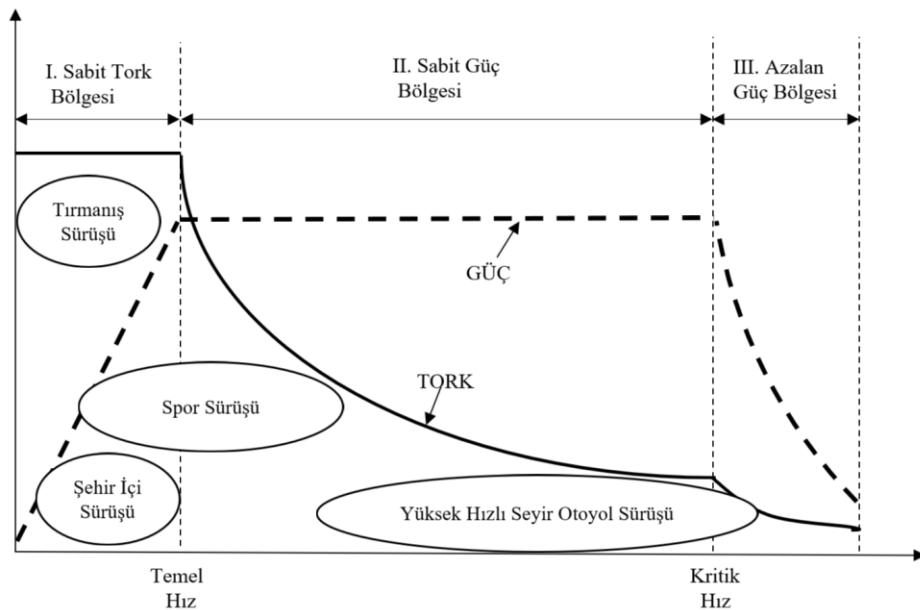
Gelecekte EAR pazarının büyümesi ve dünya genelinde satışlarının artması öngörülmektedir. Bazı gelişmiş ülkelerde pazar payının %80 üzerinde olacağı tahmin edilmektedir. Bu durumun araç tasarımı, kullanım şekli, geri dönüşüm olanakları, verimlilik sınıflandırması, kaynakların dönüştürülmesi ve alt yapı gibi çevresel etkenler tarafından etkilenmesi beklenmektedir. Tüketicilerin ise sürüş menzilli, maliyet, performans ve sürdürülebilirlik gibi kaygılarına üreticilerin cevap vermesi gerekmektedir. Bu beklentiler kullanıcıların ekonomik durumları, yaşam standartları, coğrafi koşullar ve kullanım amaçları gibi durumlara göre öncelik kazanmaktadır (Katona & Orosz, 2024).

3.1.1. Elektrikli araçların tarihçesi

Elektromanyetizmanın 1820'lerde keşfiyle beraber ilk EAR 1835 yılında içten yanmalı rakiplerinden yaklaşık 50 yıl önce geliştirilmiştir. Ancak elektrik ve pillerin sınırlı durumu, şarj istasyonları ihtiyacının karşılanamaması sebebiyle sadece şehirlerde ve sınırlı bir kullanımda kalmıştır (W. Cao ve ark., 2019). 1880'ler ve sonrasındaki 20 yıl boyunca geliştirilen EAR'ler, hız ve kullanım açısından muadilleri ile rekabet edebilmiş hatta ticari olarak kullanılmıştır. Sonrasında düşük performans ve düşük menzil gerekçeleriyle yerini fosil yakıtlı araçlara bırakmıştır. 1980'lere kadar sadece golf arabası, dağıtım araçları gibi alternatif alanlarda tercih edilmiştir. 1945 transistör ve sonrasındaki anahtarlama elemanlarının gelişimi, Alternatif Akım (AA) motorların kullanılması, güç

elektronik ve pil teknolojisi alanında yaşanan gelişmeler dahilinde tekrar gündeme gelmiştir. 1980 ve 1990’larda tekrar piyasaya EAR’lerle girmek isteyen üreticiler fosil yakıt tüketen araçlarla rekabette başarıya ulaşamamıştır. 2000’li yıllara gelindiğinde fosil yakıt tüketimini azaltmak amacıyla EAR ve HEAR kullanılmaya başlanmıştır. 2010 yılıyla beraber birçok firma EAR satışına başlamıştır (Yıldırım, 2022). Günümüzde fosil yakıt rezervlerinin azalması, fosil yakıt tüketiminin çevreye olan olumsuz etkileri, maddi avantajlar ve gelişen teknolojiyle beraber EAR kullanımı günden güne artmaktadır. Kullanımını yaygınlaştırmak ve tercih edilebilirliğini arttırmak için EAR’lerin başlıca gereklilikleri aşağıda verilmiştir (W. Cao ve ark., 2019);

- Yüksek anlık güç ve güç yoğunluğu,
- Kalkış ve tırmanma için düşük hızlarda yüksek tork ve seyir için yüksek hızda yüksek güç,
- Sabit tork ve sabit güç bölgeleri dahil çok geniş hız aralığı,
- Hızlı tork tepkisi,
- Geniş hız ve tork aralıklarında yüksek verimlilik,
- Regeneratif frenleme kapasitesi,
- Çeşitli araç çalışma koşulları için yüksek güvenilirlik ve sağlamlık,
- Yüksek hata toleransı,
- Gelişmiş güç elektroniği ve sürücü teknolojisi,
- Düşük maliyet.

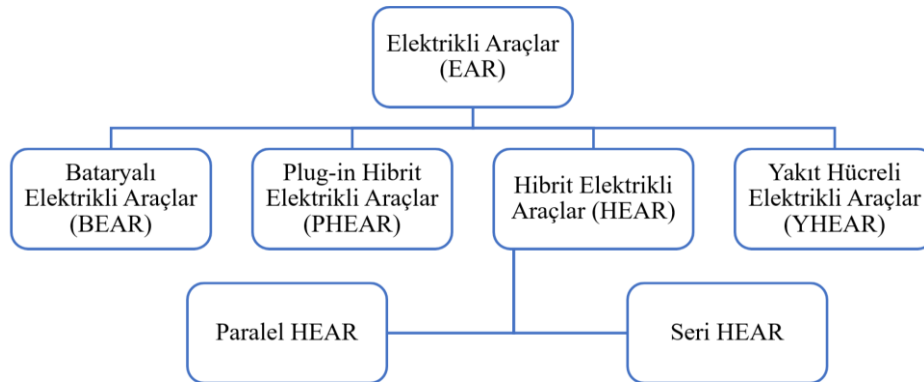


Şekil 3.2. EAR’ler için karakteristik hız-tork ve hız-güç grafiği

EAR motorlarında sürüş koşullarına bağlı olarak farklı hızlarda farklı tork ve güç değerleri elde edilmektedir. Bu durum Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Birinci bölgede tork, hızlı ve düzgün bir hızlanma sağlamak için yüksek ve sabit olmalıdır. Maksimum tork kapasitesi sıcaklıkla sınırlıdır ve inverter akım değerine bağlı olarak değişmektedir. İkinci bölgede akı zayıflatma tekniği kullanarak Zıt Elektromekanik Kuvvet (Zıt-EMK) azaltılır ve geniş hız aralığı elde edilebilir. Üçüncü bölgede, azaltılmış güç gereksinimlerine sahip bir aşırı hız bölgesi mevcut olmalıdır. Aşırı hız bölgesinde güvenlik kısıtlamaları için Zıt-EMK’nin artması nedeniyle tork ve gücün azalması gerekmektedir (Yılmaz, 2015). İdeal bir EAR için sabit tork bölgesinin mümkün olduğu kadar dar, sabit güç bölgesinin ise mümkün olduğu kadar geniş olması istenmektedir (Xue ve ark., 2008). Elektrik motorları geniş SGHO ve yüksek performansa sahiptir. Bu durum kayıpları, gürültü ve titreşimi azaltarak otomotiv sektöründe önemli bir avantaj sağlamaktadır (Gobbi ve ark., 2024; Shao ve ark., 2021). SGHO’ya atfedilebilen yüksek hızlarda alan zayıflatma bölgesinin genişliği, sürüş özellikleri ve EAR’ler için sabit güç sağlandığı hız aralığı üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir (Nyitrai & Kuczmam, 2023; Zou ve ark., 2023).

3.1.2. Elektrikli araçların sınıflandırılması

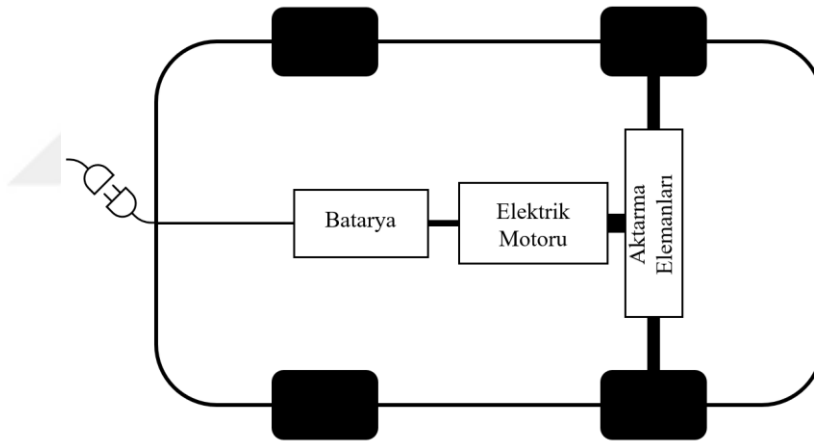
EAR’ler motor teknolojisi, motor bağlanma şekli ve dışarıdan şarj durumuna göre beş farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Bu araçlar sadece batarya ile çalışabilirken aynı zamanda içten yanmalı motorları da sisteme entegre ederek hibrit olarak da çalışabilmektedir. Enerji kaynağı olarak yakıt hücresinin kullanıldığı EAR’ler de bulunmaktadır. Şekil 3.3’te EAR’lere ait sınıflandırılmaya yer verilmiştir (Sanguesa ve ark., 2021).



Şekil 3.3. EAR sınıflandırılması

3.1.2.1. Bataryalı Elektrikli Araçlar

EAR'lerin ilk üretiminden itibaren kullanılan çeşididir. Sadece elektrik enerjisi ile çalışır. Çevre kirliliği ve gaz emisyonu açısından en sağlıklı araçlardır. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi enerji kaynağı olarak aracın içinde veya dışında şarj edilebilir bir batarya ünitesine sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak ya da harici kaynaklarla şarj edilebilir ve enerjiyi depolayabilmektedir. Sürüş esnasında frenleme ve yavaşlama anlarında rejeneratif frenleme yaparak bataryayı şarj edebilmektedir. Bu araçlar sürüş menzili ve enerji ihtiyacı düşünüldüğünde büyük pil paketleri bulundurlar. Büyük pil paketleri hem ağırlık hem de maliyet açısından dezavantaj olarak görülmektedir. BEAR'lere örnek olarak Nissan Leaf, 62 kWh pil desteğiyle tek şarjda 360 km yol alabilmektedir. Ayrıca hızlı şarj üniteleri veya pil takas istasyonlarının geliştirilmesi ile daha yaygın olarak kullanılabilir (Nour ve ark., 2020; Sanguesa ve ark., 2021).

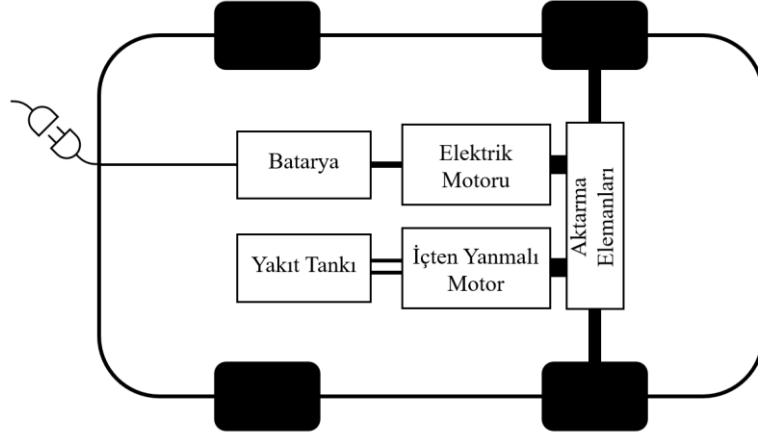


Şekil 3.4. BEAR yapısı

3.1.2.2. Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar

PHEAR hibrit araçlar sınıfına dahil olup yapısında içten yanmalı bir motor, elektrikli motor, yakıt tankı ve pil paketi mevcuttur. Hibrit araçlardan farklı olarak şebekeden harici enerji depolayabilmektedir. PHEAR yapısı Şekil 3.5'te verilmiştir. Hibrit araçlara kıyasla daha büyük bir elektrikli motor ve pil paketine sahiptir. Araç hem fosil yakıt hem de elektrik enerjisi ile yol alabilmektedir. Enerji dönüşümü sayesinde hareket halinde şarj olma özelliğine de sahiptir. Bu yapıya sahip Mitsubishi Outlander PHEV 12 kWh pil

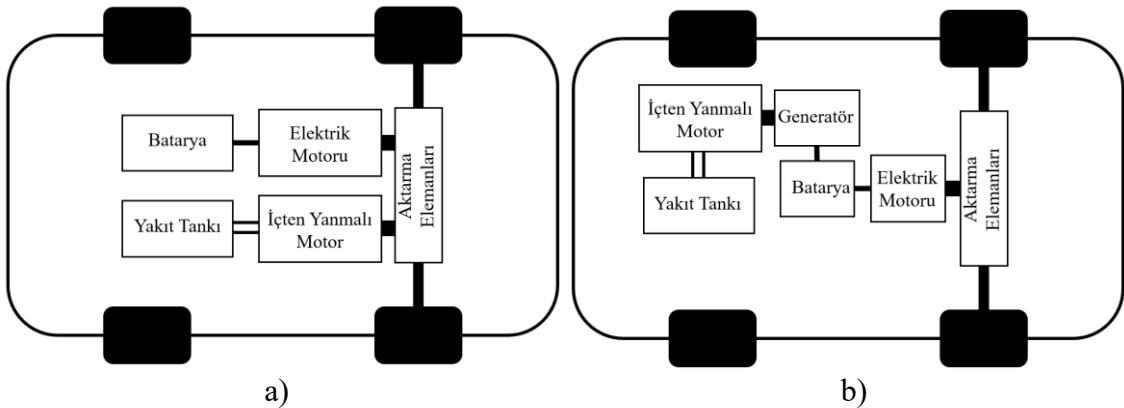
desteğiyle sadece elektrik motor kullanarak 50 km yol alabilmektedir (Nour ve ark., 2020; Sanguesa ve ark., 2021).



Şekil 3.5. PHEAR yapısı

3.1.2.3. Hibrit Elektrikli Araçlar

Hibrit araçlar iki veya daha fazla güç kaynağı içermektedir. HEAR Şekil 3.6’da verildiği gibi içten yanmalı ve elektrikli motoru beraber kullanan bir yapıya sahiptir. Elektrikli motorun bu yapıdaki temel görevi yakıt verimliliği sağlamaktır. Rejeneratif fren enerjisi ve hareket halinde şarj edilebilir özelliğiyle aracın harici şarja ihtiyaç duymadan yol almasını sağlamaktadır. HEAR içten yanmalı motorların verimsiz olduğu kalkış anında elektrikli motoru, seyir hızı gibi verimli olduğu anlarda içten yanmalı motoru kullanarak verimliliği arttırmaktadır (Nour ve ark., 2020; Yıldırım, 2022).



Şekil 3.6. HEAR araç yapısı a) paralel HEAR, b) seri HEAR

Toyota Prius 4. jenerasyon bir hibrit model olarak piyasaya sürülmüştür. 1.3 kWh pil desteği ile elektrik modunda yaklaşık olarak 25 km menzile sahiptir (Sanguesa ve ark.,

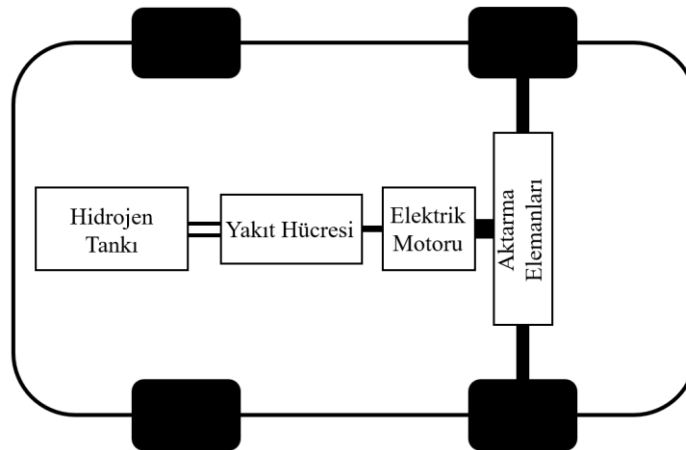
2021). HEAR yapısında bulundurduğu içten yanmalı motorun çalışması sebebiyle “kısmi sıfır emisyonlu araçlar” olarak adlandırılmaktadır.

Paralel HEAR içten yanmalı motor ve elektrikli motorun paralel olarak güç aktarım sistemine bağlanmasıyla oluşmaktadır. Burada iki motor da ayrı ayrı aracı hareket ettirebilecektir. Aynı zamanda ikisi beraber çalışarak da hareket sağlamaktadır. Mekanik ve elektriksel bağlantılar içeren bir yapıya sahiptir ve bu yapı Şekil 3.6.a’da verilmiştir (Demir, 2018).

Seri HEAR yapısında ise aracın çekiş gücü sadece elektrik motoru tarafından sağlanır. Bu elektrikli motor, içten yanmalı bir motorla çalıştırılan jeneratör ya da pil paketinden aldığı enerji ile aracı hareket ettirmektedir (Demir, 2018; Yıldırım, 2022). Şekil 3.6.b’de verilen bu yapıda içten yanmalı motorun sadece şarj için kullanılması ‘genişletilmiş menzilli EAR’ler’ olarak da sınıflandırılmasını sağlamaktadır. BMW i3, 42.2 kWh pil desteğiyle 260 km yol alabilmektedir. Yapısında bulundurduğu içten yanmalı motor sayesinde 130 km daha genişletilmiş menzilden yararlanabilir (Sanguesa ve ark., 2021).

3.1.2.4. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar

YHEAR bataryalı EAR’lere benzer bir yapıya sahiptir. Ancak yapısında pil paketi yerine Şekil 3.7’de görüldüğü gibi yakıt hücresi bulundurmaktadır. Yakıt hücresi, hidrojen gazı kimyasal enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlamaktadır. Hidrojen gazı doğalgaz gibi fosil yakıtlardan veya su elektrolizi gibi yöntemlerle üretilebilir ve harici olarak tanka doldurulabilmektedir. İçten yanmalı motorlar gibi hızlı yakıt ikmali süresine sahiptir (Nour ve ark., 2020).

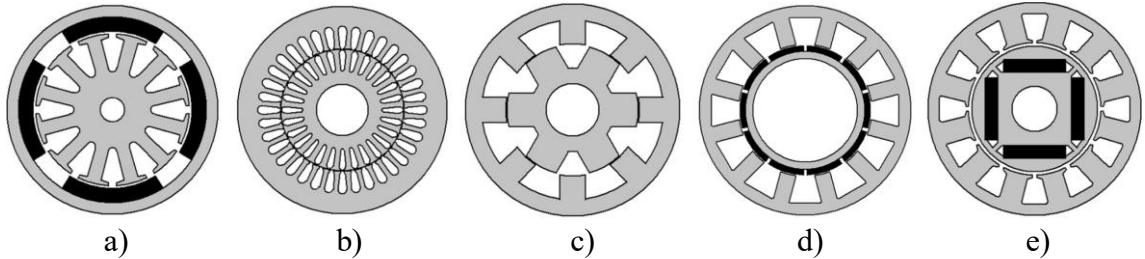


Şekil 3.7. YHEAR yapısı

3.2. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motor Türleri

Günümüzde elektrik motorları endüstriyel kullanımının yanında ulaşım sektöründe de ciddi gelişim göstermektedir. Bu gelişim alternatif enerjili araç talepleri düşünüldüğünde farklı etkenlere bağlı olarak sağlanmaktadır. EAR'lerin enerji tüketimi, hava kirliliği ve ekonomiye katkısı gibi küresel değerlere ek olarak şehir içi veya şehir dışı sürüş performansı, ivmelenme, maksimum seyir hızı, tırmanma kabiliyeti ve frenleme gibi kişisel sürücü isteklerine de cevap vermesi beklenmektedir. Tasarım aşamasında bu gibi beklentiler ağırlık, hacim, maliyet, motor kontrolü topolojisi ve hız-tork karakteristiği gibi özelliklerin dikkate alınmasını gerektirmektedir (Rind ve ark., 2018). Bu tarz ihtiyaçlara yönelik Şekil 3.8'de kesit görselleri verilen; DAM'ler, SM ve ASM'ler, FDAM'ler, SMSM'ler, ARM'ler ve SRM'ler gibi çok farklı tipte motorlar üretilmiş ve EAR motor topolojisine eklenmiştir (Madichetty ve ark., 2021).

EAR motorları nominal hız veya nominal bir güç değerine sahip değildir. Bunun için motor tasarımında ağırlık ve verim üzerine bir denge kurmak gerekir. Bu değerlendirme değişken hızlı motorlar için, hız-güç veya hız-tork verimlilik haritasına bağlı olarak yapılmaktadır. Elektrik motorlarının optimal çalışma noktaları motor çeşidine göre değişkenlik gösterdiği gibi, sürüş döngüsü de bu optimal çalışma noktalarına etki etmektedir (Madichetty ve ark., 2021).



Şekil 3.8. Elektrik makinelerin kesitleri; a) FDAM, b) ASM, c) ARM, d) YMSM, e) DMM
(Yilmaz, 2015)

EAR'lerde motorun yüksek verim ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olması gerekmektedir. Başlama ve tırmanma için düşük hızlarda yüksek torka, seyir durumunda ise yüksek hızlarda yüksek güce gereksinim duymaktadır. Sürüş dinamikleri için sabit tork ve sabit güç bölgelerini içeren geniş bir hız aralığına sahip olmalıdır. Motorlar ayrıca hızlı tork cevabına, geniş hız ve tork aralığında yüksek verime, çeşitli çalışma koşulları için güvenilirlik ve sağlamlığa, küçük boyutlar ve azaltılmış ağırlığa, düşük atalet momenti

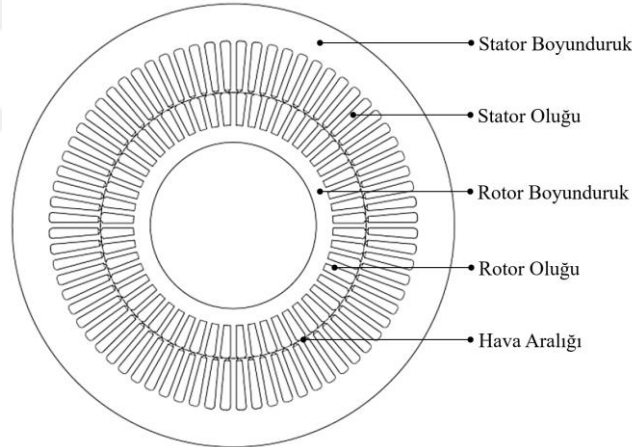
ve kabul edilebilir maliyete bağılı olarak tasarlanmalıdır (Madichetty ve ark., 2021; Rind ve ark., 2018). Motorların bu tasarım kriterlerini tork dalgalanması, titreşim, gürültü, mekanik ve termal sınırlar gibi etkenler sebebiyle sınırlandırılması da gerekebilir. Tasarım aşamasında bu özelliklerin dengelenmesi ve uygun model seçimi yapılması gerekmektedir (Shao ve ark., 2020).

DAM'ler geçmişte EAR'ler için yaygın olarak kullanılan bir motor çeşididir. Düşük hızlarda yüksek torka sahiptir. DAM'ler düşük maliyeti, kontrol kolaylığı, bataryalara direk bağlanabilir olması, düşük tork dalgalanması gibi avantajları sayesinde EAR motor teknolojisinde yer alabilmiştir. Bunların aksine komütatör ve fırça bulundurması sebebiyle düzenli bakıma ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca komütatör ve fırça arasındaki sürtünmeye bağılı olarak maksimum hızı sınırlandırmaktadır. Düşük güç yoğunluğu, düşük verimlilik ve düşük güvenilirliği ise EAR'ler için tercih edilmesine engel olmaktadır (Yılmaz, 2015). Zaten güç elektroniği alanında yaşanan gelişmelerle birlikte EAR'ler AA motorlarına doğru yönelime geçmiştir (Madichetty ve ark., 2021). 1989 yılına kadar bütün EAR'lerde tercih edilen DAM'ler, 2000'li yılların başlarına kadar Fiat Panda Elettra, Citroen Berlingo Electrique gibi EAR'lerde kullanılmıştır (Yılmaz, 2015). FDAM'ler EAR motorlarının önemli rakiplerinden biridir. Rotor yapısının içinde bulundurduğu sabit mıknatıslar sayesinde fırça ve komütatör ihtiyacı yoktur. Bu sayede düşük kayıp, yüksek verimliliğe sahiptir ve bakım ihtiyacı yoktur. Gelişmiş güç elektroniği yöntemlerini konverter olarak kullanır ancak rotor pozisyon bilgisi gerekmektedir. FDAM yüksek güç yoğunluğuna sahiptir ve daha düşük ağırlık ve hacimlerde üretilebilir. Yapısında bulundurduğu sabit mıknatıslara bağılı olarak yüksek maliyete sahiptir. Yüksek hızlarda alan zayıflatma sebebiyle demanyetizasyonla karşılaşabilir, tork dalgalanması ve akustik gürültüye maruz kalabilir (Madichetty ve ark., 2021). Ayrıca kullanım şekillerine göre içten ve dıştan rotorlu yapıları bulunmaktadır. Dıştan rotorlu FDAM içten rotorlu FDAM'ye göre daha düşük tork dalgalanmasına sahiptir. Düşük güçlü EAR'ler için en uygun motorlardan olan dıştan rotorlu FDAM, tekerlek içine entegre edildiği için aracın genel ağırlık dengesini bozmaktadır (Mohanraj ve ark., 2022). FDAM EAR'lerden Toyota Prius 2005 modelinde kullanılmıştır. Toyota sonrasında ürettiği Prius modellerinde SMSM'leri tercih etmiştir (R. M. R. Kumar ve ark., 2019).

3.2.1. Asenkron motor

Asenkron motorlar düşük maliyet, yüksek güvenilirlik ve sağlamlığı, olgunlaşmış bir teknoloji yapısı, az bakım ihtiyacı ve zorlu şartlarda çalışmaya uygunluk açısından avantajlı motorlardır. Şekil 3.9’da ASM için stator ve rotor yapısı verilmiştir. Yüksek rotor bakır kayıpları, düşük verim, sınırlı sabit güç-hız oranı ve düşük yük altında düşük güç faktörü gibi dezavantajları bulunmaktadır (Lan, 2018).

Genel yapısı itibariyle ASM statorunda 3 faz sargılar yerleştirilmiştir. Bu sargılar ürettikleri manyetik alanı hava aralığı üzerinden rotora aktaracaktır. Rotor çekirdeği ise üst üste yerleştirilmiş silikon çelik laminasyonlardan oluşmaktadır. Laminasyonlara yerleştirilen alüminyum veya bakır iletken çubuklar statorda üretilen manyetik alana maruz kaldıklarında üzerlerinde gerilim indüklenir ve akım akmaya başlar. Rotor, stator manyetik alanı ile aynı yönde sürüklenmeye başlar. ASM kayma değerine bağlı olarak senkron hıza ulaşmadan hareketini devam ettirmektedir (Laitinen ve ark., 2017).



Şekil 3.9. ASM stator ve rotor yapısı

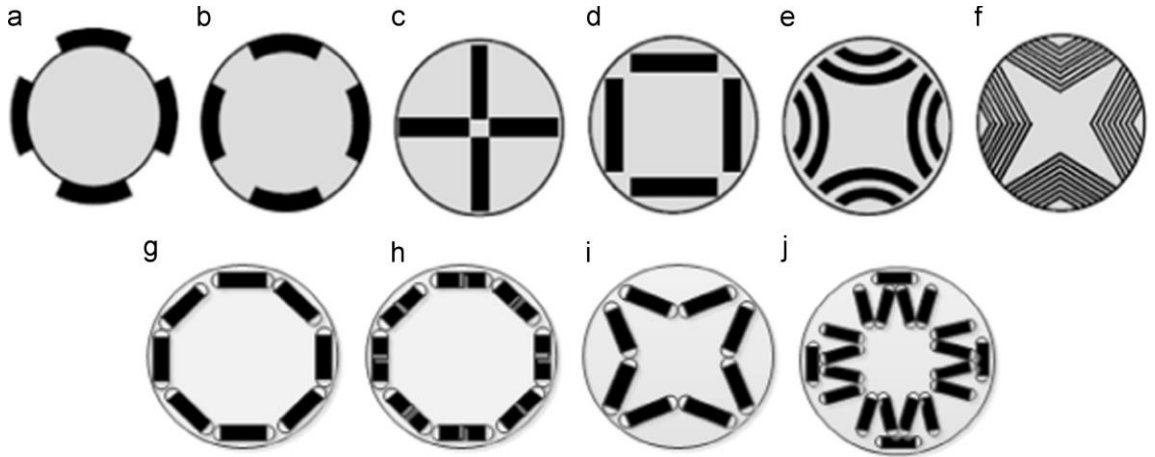
ASM verimliliği, rotor çubuklarının varlığı nedeniyle doğal olarak SMSM’lerden daha düşüktür. Bu, yüksek hız aralıklarında motor veriminin düşük olması ve daha yüksek rotor bakır kayıpları anlamına gelmektedir. Bu tarz olumsuz yönlerini geliştirmek adına, vektör kontrolü, çok fazlı kutup değiştiren ASM sürücü veya ikili inverterler gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bir diğer yöntem ise EA-ASM tasarımıdır (Madichetty ve ark., 2021).

Piyasada bulunan EAR’lerden Nissan Micra HK10, Ford Focus EV, Tesla Model S, Tesla Model X, Toyota RAV4, GM EV1, Audi e-Tron SUV 2016, Mercedes-Benz EQC gibi

modellerinde ASM kullanılmıştır. SMSM'lere kıyasla daha az tercih edilse de ASM mıknatıssız yapısıyla EAR'ler için alternatif olmaya devam etmektedir (Credo ve ark., 2023; Goli ve ark., 2021; Huynh ve ark., 2022; R. M. R. Kumar ve ark., 2019; Yılmaz, 2015).

3.2.2. Sabit mıknatıslı senkron motor

SMSM özellikle son yıllarda EAR ve HEAR'ler için çoğunlukla tercih edilen motor çeşitlerindendir. Fırçasız AA makineler olarak tanımlanır ve yapısındaki mıknatısların yerleşimlerine göre YMSM veya DMM olarak sınıflandırılabilir. Bu yerleştirme şekilleri de kendi içinde sınıflandırılır ve Şekil 3.10'da SMSM çeşitlerinin kesit görünüşü verilmiştir. Rotorda bulunan mıknatıslar sayesinde uyarma akımına ihtiyaç duymadan hava aralığında yüksek manyetik alanlar oluşturur ve yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Rotor kaybı ASM'lere göre daha az olduğundan daha az kayıp ve daha yüksek verimliliğe sahiptir (Shao ve ark., 2020). Benzer EAR motorlarına göre daha iyi ısı dağılımına sahiptir bu sayede zorlu şartlarda tercih edilebilir. SMSM için düşük hızlarda bakır kayıpları baskın, yüksek hızlarda ise demir kayıpları daha baskın olmaktadır. Mıknatıslara bağlı oluşan harmonik demir kayıpları akı zayıflatma işleminde belirgin hale gelmektedir. Yüksek hızlarda ve yüksek sıcaklıkta bir diğer dezavantaj ise verimi düşürecek olan demanyetizasyon etkisidir (Zeraoulia ve ark., 2006). Rotor kayıpları, stator bakır ve demir kayıplarına göre küçük olsa da yüksek hızlarda ve yüksek kutup sayısına bağlı olarak artış göstermektedir. Optimum tasarım yaparken mıknatısların yerleri, çeşitleri, yerleşim şekilleri ve açılarının yanı sıra, motorun boyutları ve performansına direk etki eden kutup ve oluk sayısına dikkat edilmelidir (Shao ve ark., 2020).

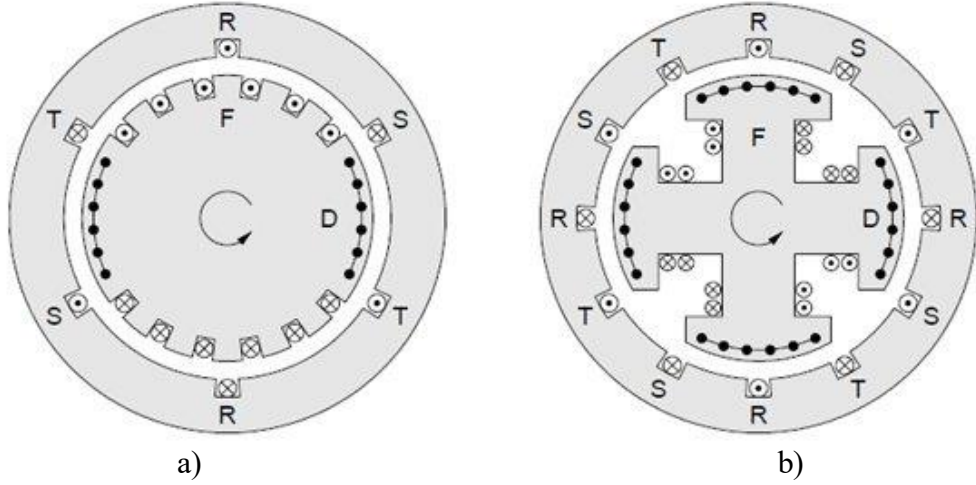


Şekil 3.10. SMSM çeşitlerinin kesit görünüşü; a) yüzey, b) iç kısım c) spoke tipi d) tek bariyerli e) çoklu bariyerli f) eksenel lamineli g) konvansiyonel h) segmentli i) v-tipi ve j) w-tipi (Yılmaz, 2015)

SMSM EAR'ler için en çok tercih edilen motor türüdür. Piyasada bulunan motorlar da dahil olmak üzere mıknatısların farklı bariyer yapılarına yerleşimi, mıknatıs sayısı, mıknatıs yönleri, ayrıık mıknatısların yerleştirilmesi, kaydırma (skew) uygulaması gibi yöntemlerle literatürde farklı topolojilerde kullanılmaktadır (Zheng ve ark., 2022). Bu topolojilerde SMSM BMW 325-316i-ActiveE, Toyota Prius 1997-2004-2010-2011, Honda EV Plus-Civic-Accord-Jazz, Nissan Leaf, Peugeot 308, Chevrolet Volt, Volvo C30 DriveE, Audi A8, Jaguar I-Pace, Mercedes SLS, Kia Soul EV39-EV64, Opel Mokka-e, Volkswagen eGolf-eup-ID.3-ID.4 ve daha bir çok BEAR ve HEAR modelinde tercih edilmiştir (Credo ve ark., 2023; Goli ve ark., 2021; Huynh ve ark., 2022; R. M. R. Kumar ve ark., 2019; Yılmaz, 2015).

3.2.3. Rotoru sargılı senkron motor

RSSM genel olarak, düşük maliyet, yüksek güç yoğunluğu, yüksek hızlarda yüksek verim, yüksek SGHO, yüksek güç faktörü, sıcaklığa duyarlılık gibi avantajlar göstermektedir. Bunların aksine yüksek rotor ağırlığı ve atalet momenti, bilezik ve fırçaya bağlı düşük güvenilirlik ve hız sınırlanması, düşük hızlarda düşük verim ve kontrol kriterlerinin belirlenmesindeki zorluklar gibi dezavantajlara da sahiptir (Lan, 2018). RSSM Şekil 3.11'de görüldüğü gibi çıkık kutuplu ve yuvarlak kutuplu olmak üzere sınıflandırılmaktadır.

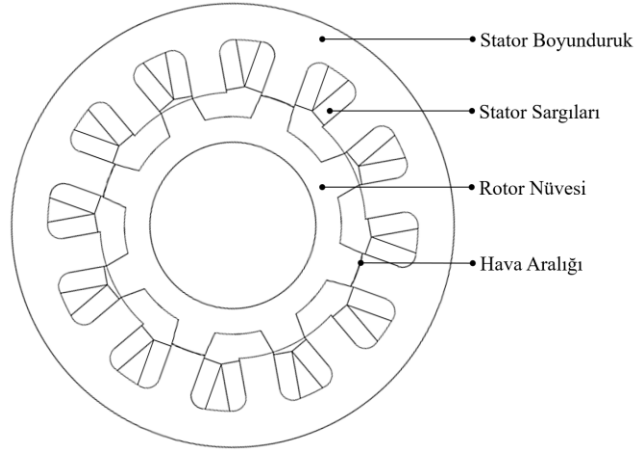


Şekil 3.11. RSSM çeşitlerinin kesit görünüşü; a) yuvarlak kutuplu b) çıkık kutuplu

RSSM stator gibi rotor yapısında da sargı bulunduran senkron makinalardır. Rotorda manyetik alan oluşturmak için DA uyartıma ihtiyaç duymaktadır. RSSM yüksek güç yoğunluğuna sahip olması sebebiyle EAR'ler için alternatif olarak düşünülmektedir. Ayrıca rotor alan akımı harici olarak DA kaynaktan kontrol edilebildiği için alan akım zayıflatma işlemini oldukça kolaylaştırmaktadır. Bunların aksine rotor kayıpları, fırça ve bilezik kullanımı, düşük verimlilik gibi dezavantajlara da sahiptir. Özellikle fırça ve bilezik yapısı sürtünme sebebiyle yıpranmaktadır ve düzenli bakıma ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca yüksek alan akımında güç kaybını arttıran ve makinenin verimliliğini azaltan bir gerilim düşüşü meydana gelmektedir. Mıknatıssız yapısı sayesinde tercih sebebi olan bu motorlar, harici uyartım ihtiyacı ve düşük verim sebebiyle piyasadaki rakiplerinin gerisinde kalmaktadır (Hussain Bukhari ve ark., 2022). Piyasada Renault Kangoo-Fluence ZE, Twizy ve ZOE gibi EAR modellerinde RSSM tercih edilmiştir (Hussain Bukhari ve ark., 2022; Yilmaz, 2015).

3.2.4. Anahtarlamalı relüktans motor

ARM düşük maliyet, basit ve sağlam yapı, yüksek SGHO, yüksek hızlarda çalışma kabiliyeti, kolay soğutma ve sıcaklıktan etkilenmeme gibi avantajlara sahiptir (Lan, 2018). ARM, elektrik araçlarda kullanılan mevcut motor tiplerine yeni bir rakip olarak ortaya çıkmıştır. Bu durum, esas olarak manyetik malzeme üzerine artan ilgiden kaynaklanmaktadır. Şekil 3.12'de görüldüğü gibi ARM temel yapısında çıkıntılı kutuplu rotor bulunmaktadır.



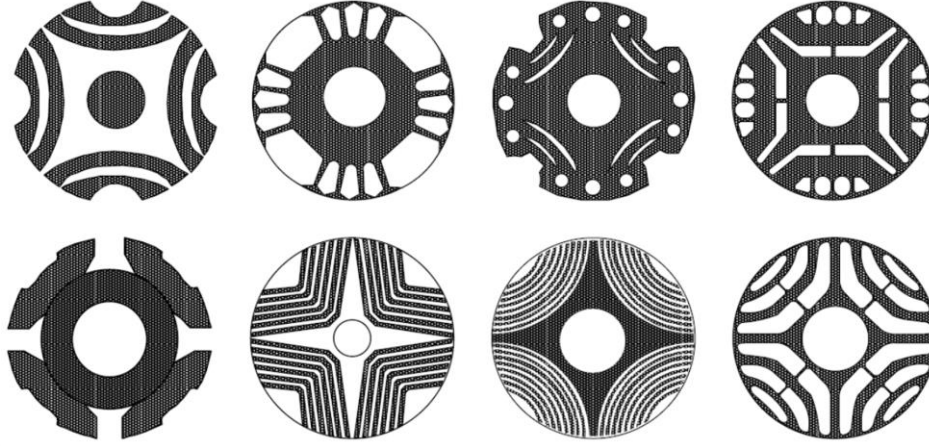
Şekil 3.12. ARM stator ve rotor yapısı

Rotorda uyarma alanı olmadığı için bu motorlarda tork üretimi, rotorun d ve q eksenlerinde relüktans farkı sayesinde üretilir. Relüktans motorların tepe verimliliği ASM ile kıyaslanabilir ancak geniş hız aralığı için verimliliği yüksektir. ARM’de en önemli avantaj geniş sabit güç bölgesidir. Diğer motorlarda genellikle düşük olan bu bölge güç elektroniği ve benzeri ekipmanlarla arttırılmaya çalışılır (Madichetty ve ark., 2021). Bütün bu avantajlarına rağmen yüksek tork dalgalanması, yüksek akustik ve gürültü, özel ve pahalı inverter ihtiyacı ve SMSM’lere kıyasla daha düşük tork yoğunluğuna sahip olması gibi dezavantajları sebebiyle EAR’lerde yaygın olarak kullanılmamaktadır (Lan, 2018). ARM’ler EAR piyasasında Chloride Lucas, Holden/ECOMmdore modellerinde tercih edilmiştir (R. M. R. Kumar ve ark., 2019; Yilmaz, 2015).

3.2.5. Senkron relüktans motor

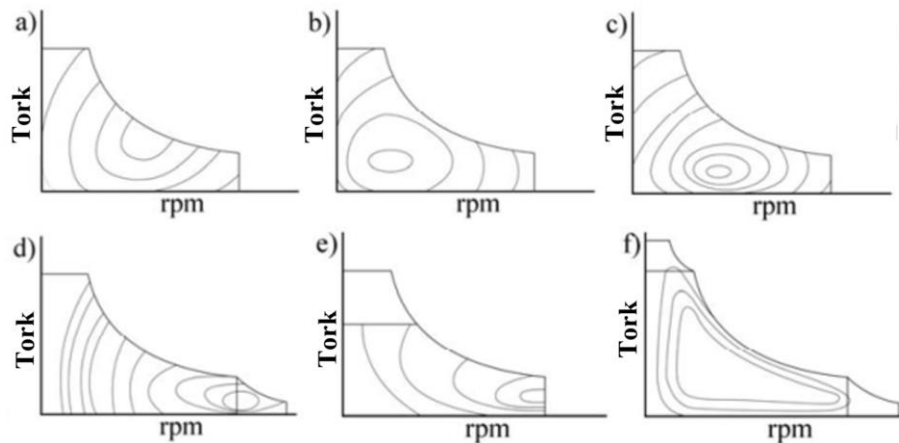
SRM basit mekanik bir yapıya sahiptir, mıknatıs içermez, düşük maliyetlidir ve rotor üzerinde uyarım sargıları yoktur. Bunun yerine rotor yüksek oranda anizotropik bir yapıya sahiptir. Rotor Şekil 3.13’te görüldüğü gibi üzerinde bulundurduğu bariyerli yapı sayesinde relüktans farkı oluşturmaktadır. Sahip olduğu relüktans farkına bağlı olarak hava aralığında bir akı üretebilmektedir (Lan, 2018). SRM’de rotor üzerinden akım akmamaktadır. Rotor, stator üzerinde akan akım ve oluşan sinüzoidal manyetik alan ile hizaya girmeye çalışacaktır. Stator akımı hem mıknatıslanma hem de alan bozulmasını azaltmaya çalışan moment üretiminden sorumludur. Referans çatıda bu senkronizasyon,

rotor d eksen ve stator sargılarının akım vektörü arasındaki açı olan akım açısı kontrol edilerek yapılabilir (Boztaş, 2019).



Şekil 3.13. SRM için farklı rotor bariyer tasarımları (Agamloh ve ark., 2020)

SRM, SMSM'lere kıyasla daha düşük maliyet, daha basit ve güvenilir yapı, kolay kontrol edilebilmesi, sıcaklığa karşı dayanıklı olması gibi avantajlara sahiptir. ASM'lerle karşılaştırıldığında ise rotor kayıplarının az olması sebebiyle yüksek tork yoğunluğu ve yüksek verime sahiptir (Gulbis ve ark., 2022). SRM EAR'lerde ABB isimli modelde kullanılmıştır. Bariyerli yapısının mıknatısla desteklenmesine bağlı olarak çok daha fazla tercih edilmektedir. BMW i3, Tesla Model 3-X-Y-S, Nissan Leaf, Chevy Spark, Brusa gibi piyasadaki EAR'lerde SMd-SRM tercih edilmiştir (Credo ve ark., 2023; Goli ve ark., 2021; R. M. R. Kumar ve ark., 2019; Yilmaz, 2015).



Şekil 3.14. En çok tercih edilen EAR'lerin verim haritası; a) YMSM, b) DMM, c) ASM, d) SRM, e) DAM, f) SM (De Santiago ve ark., 2012)

Elektrik motorlarının verimliliği, içten yanmalı motorlarda olduğu gibi her sürüş döngüsünün motora uyguladığı çalışma noktalarına bağlıdır. Değişken hızlı motorlar için verimlilik ifadesinin standart bağımsız bir değeri yoktur. Güç-hız veya tork-hız verimlilik haritaları ile karakterize edilirler. Her motor tipinin karakteristik bir tork-hız ilişkisi olmasına rağmen, motorun geniş hız ve güç aralığı için performansı tasarım açısından önemlidir. Şekil 3.14'te bazı elektrikli motorların verimlilik haritaları verilmiştir. Aynı tepe verimliliğine sahip motorlar karşılaştırıldığında, SMSM'ler sabit hızda aşırı yük geçişlerinde daha verimliken, SRM'ler yüksek hızlı aşırı yüklenmelerde daha iyi performans gösterir. SRM'lerin kontrolü, yüksek hızda çalışmaya izin verir, ancak verimliliği düşük hızda hızla düşer. SM, SMSM'den daha düşük tepe verimliliğine sahiptir, ancak verimliliği geniş bir çalışma aralığında yüksek kalır ve kontrolü yüksek hızda çalışmaya izin verir. Verimlilik ayrıca gerilim seviyesine de bağlıdır. Yüksek gerilimli güç aktarma organları özünde daha verimlidir. Öte yandan, aktarma organları nominal geriliminin altında çalıştırıldığında verimlilik düşer. Bu durum, düşük 'şarj durumunda' gerçekleşmektedir (De Santiago ve ark., 2012).

Çizelge 3.1. EAR'ler için elektrik motorlarının kıyaslanması
(Dmitrievskii, Prakht, ve ark., 2023; Yilmaz, 2015)

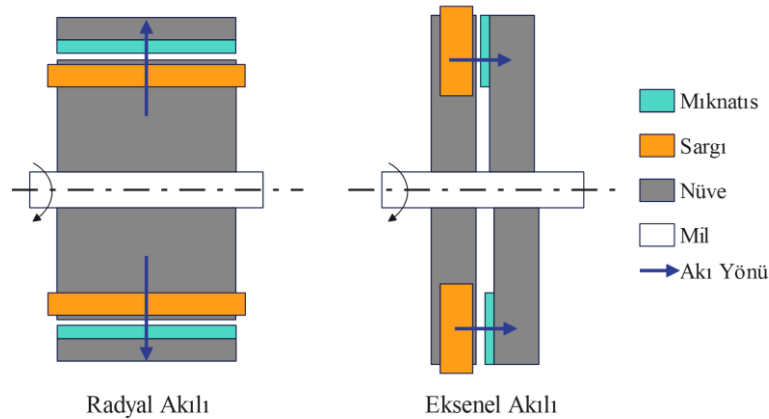
Kriterler	Motor Çeşitleri							
	DAM	ASM	FDAM	SMSM	RSSM	ARM	SRM	SMd-SRM
Maliyet	0	++	-	-	-	+	++	+
Tork/Güç Yoğunluğu	-	0	++	++	+	0	0	+
Verimlilik	-	+	++	++	+	+	+	++
Basitlik/Üretilebilirlik	++	++	+	0	0	++	++	+
Kontrol Edilebilirlik	++	+	+	+	++	0	+	+
Güvenilirlik	-	++	+	+	0	++	++	+
Boyut/Ağırlık/Hacim	-	+	++	++	+	+	+	+
Aşırı Yük Kapasitesi	-	+	+	+	+	+	++	++
Sağlamlık	0	++	+	+	0	++	++	+
Alan Zayıflatma Kapasitesi	++	++	-	+	++	++	++	++
Hata Toleransı	+	++	-	-	0	++	+	+
Termal Sınırlamalar	0	+	-	-	0	++	++	+
Gürültü/Titreşim/Tork Dalgalanması	-	++	0	++	+	-	-	0
Kullanım Ömrü	-	++	+	+	+	++	++	+
Olgunluk	++	++	+	+	+	+	+	-
Gelecek Beklentileri/Potansiyel	-	++	0	++	++	++	+	++

* '++': Çok Avantajlı, '+': Avantajlı, '0': Nötr, '-': Dezavantajlı

Elektrikli motorların kullanım alanlarının çeşitlenmesi ve EAR kullanımının artmasıyla, bu alandaki çalışmalar da artmıştır. EAR'ler için motorların yüksek güç yoğunluğu, verimlilik, güvenilirlik, yüksek hata toleransı, aşırı yük kapasitesi, geniş hız aralığı, sağlamlık, düşük maliyet, küçük boyut ve hacim gibi gereksinimleri ön plana çıkmaktadır. Bu gereksinimler elektrikli motor tasarımını zor hale getirmektedir. Ayrıca kullanım şartları ve özel ihtiyaçlara yönelik doğru seçim yapmak da başlıca zorunluluk haline gelmiştir. Çizelge 3.1'de EAR'ler için uygun motor çeşitlerinin avantajlı ve dezavantajlı olduğu kriterleri verilmiştir. Şu anda SMSM'ler baskın olsa da, ASM, ARM, SRM ve SMd-SRM gibi hibrit uyarılmış ve mıknatıssız veya düşük hacimli mıknatısa sahip EA topolojilerinin, motor performanslarında önemli bir artış görmesi beklenmektedir (Yılmaz, 2015).

3.3. Eksenel Akılı Makineler ve Sınıflandırılması

Elektromekanik enerji dönüşümü sağlayan makineler hava aralığındaki akı yönlerine göre Şekil 3.15'te verildiği RA ve EA makineler olarak sınıflandırılabilir. Geleneksel RA makinelerde iletkenler birbirine paralel olarak yerleştirilmiştir ve hava aralığı akısının yönü mil eksenine radyaldır. EA makinelerde ise iletkenler mile radyal ve hava aralığı akısı mile paralel olarak oluşturulmaktadır (Neelima ve ark., 2014).



Şekil 3.15. RA ve EA makineler ve akı yönleri

EA makineler, yeni teknoloji ürünleri değildir. Geçmişten günümüze birden fazla topolojide çalışılmıştır. Elektrikli makinelerin tarihi düşünüldüğünde, 1831 yılında Michael Faraday tarafından EA bir makine biçiminde çalışan ilkel bir disk motoru icat

edilmiştir. 1889'da Nicola Tesla eksenel akı ilkesini de kullanan bir makinenin patentini almıştır (Shao ve ark., 2020). 1837'de Davenport'un RA motor patentini alması ile EA makine çalışmaları neredeyse durmuştur. EA makineler için stator ve rotor arasındaki çekim gücü, eşit hava aralığının (uniform air gap) ayarlanamaması gibi üretim ve montaj aşamasında yaşanan zorluklar RA makinelerine karşı tercih edilmemesini sağlamıştır (Mushid & Dorrell, 2017). 20.yy'da yapılan sabit mıknatıs keşifleriyle (1931-alnico, 1950-baryum ferrit ve 1983-neodyum demir bor, vb.) SMSM'ler, daha çok ilgi gören RA motor topolojisiyle araştırılmıştır. 1990'lı yıllara gelindiğinde sabit mıknatıslardaki gelişim EA motorların tekrar çalışılmasını sağlamıştır (Çetin, 2018).

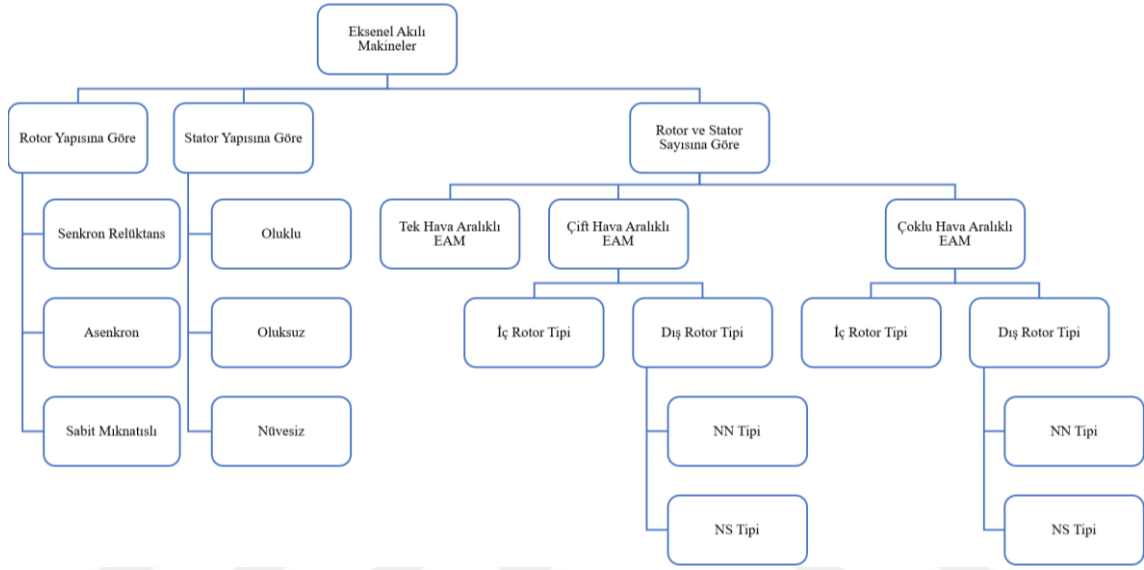
3.3.1. Eksenel akı makineler

EA makinelerde stator halka yapılıdır ve rotor disk şeklindedir. Stator iç yarıçapından dış yarıçapa kadar olan radyal uzunluk, torku üreten aktif kısımdır ve kutup sayısının artmasına rağmen değişiklik göstermez. Eksenel uzunluk ise stator ve rotorun uygun boyunduruk tasarımı, yani stator ve rotor boyunduruklarındaki akı yoğunluğuna bağlıdır. EA makineler yüksek kutup sayısına sahip olma esnekliğine sahiptir ve bu da makinenin yüksek frekans ya da düşük hızlı uygulamalar için çekici bir alternatif olmasını sağlar. Motor toplam uzunluğunun motor dış çapına oranı 1'den büyük (>1) olduğunda RA tip, 0.3'den küçük (<0.3) olduğunda ise EA tip makine tercih edilmektedir (Neelima ve ark., 2014).

EA makineler, RA makinelerine göre, yüksek verim, yüksek tork-güç yoğunlukları ve düşük rotor kayıplarına sahiptir (Shao ve ark., 2020). RA makinelerine göre daha küçük boyutlara ve daha az nüve malzemesine sahiptir, bu sayede daha yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca RA makinelerin sahip olmadığı düzlemsel ve ayarlanabilir hava aralığına sahiptirler. Hava aralığı akısının yönünün değiştirilebilmesi sayesinde de birden fazla topolojide çalışılabilir (Aydın ve ark., 2010). EA makine (özellikle geniş çaplarda) yapısı EMK ve hız nedeniyle sapmalara neden olacak şekilde etkilenebilir. Bu sapmalar öncelikle düzensiz hava aralığı, bu nedenle tork dalgalanmaları ve en sonunda motor yataklarındaki mekanik gerilimi arttıracak seviyelere çıkabilir (Bayazıt, 2021).

EA makineler literatürde ilk olarak sabit mıknatıslı makinelerle tanınmıştır. Bu durumda verilen sınıflandırmalar da ona göre yapılmaktadır. Son zamanlarda ASM, SRM gibi

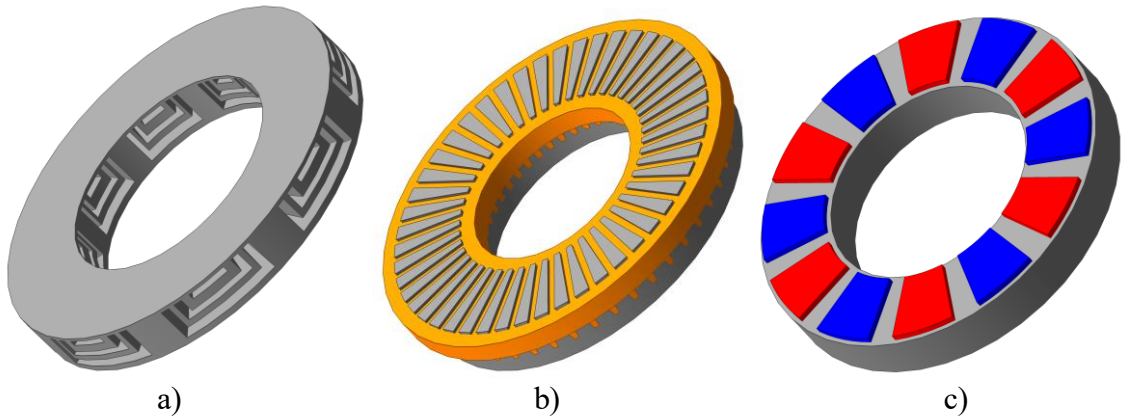
motorlar EA makine çalışmalarına katkı sağlamıştır. Genel olarak Şekil 3.16’da verildiği gibi stator ve rotorun düzenine ve sayısına (Tek hava aralıklı, çift hava aralıklı, çok hava aralıklı), mıknatısların yerleşim şekillerine (İçe gömülü sabit mıknatıs, yüzeye yerleştirmeli sabit mıknatıs), oluk, nüve ve boyunduruk yapısına (oluklu, oluksuz, çekirdeksiz/nüvesiz, boyunduruksuz) göre sınıflandırılmaktadır (Akıncı, 2020; Huang ve ark., 2022; J. Zhao ve ark., 2023).



Şekil 3.16. EA makinelerin sınıflandırılması

3.3.1.1. Rotor Yapısına Göre Eksenel Akıllı Makineler

EA makineler literatürde rotor yapısına göre sınıflandırıldığında Şekil 3.17’de görüldüğü gibi EA-SRM rotor yapısı, EA-ASM’lerde kullanılan sincap kafesli rotor yapısı ve EA-SMSM rotor yapısı düşünülebilir (Gerçekcioğlu & Akar, 2021). Farklı rotor tiplerine göre motor performansında avanta ve dezavantajlar belirlenmektedir.



Şekil 3.17. EA makine rotor yapıları a) SRM, b) ASM, c) SMSM

Şekil 3.17.a’da gösterilen EA-SRM, rotor yapısında sadece nüve ve bariyerleri bulunduran rotor yapısıdır. Bariyerlere bağlı endüktans farkından yararlanarak tork üretimi sağlamaktadır. Rotorunda mıknatıs ve sargı bulundurmadığı için kayıpları azaltıp yüksek verim sağlamaktadır. Ancak tork dalgalanması, titreşim ve gürültü gibi dezavantajlara sahiptir. EA-SRM rotor bariyer yapısı dış çaptan iç çapa doğru daraldığı için RA motorlara göre üretim açısından da dezavantajlı konumdadır (Eser, 2024; Gerçekcioğlu, 2021).

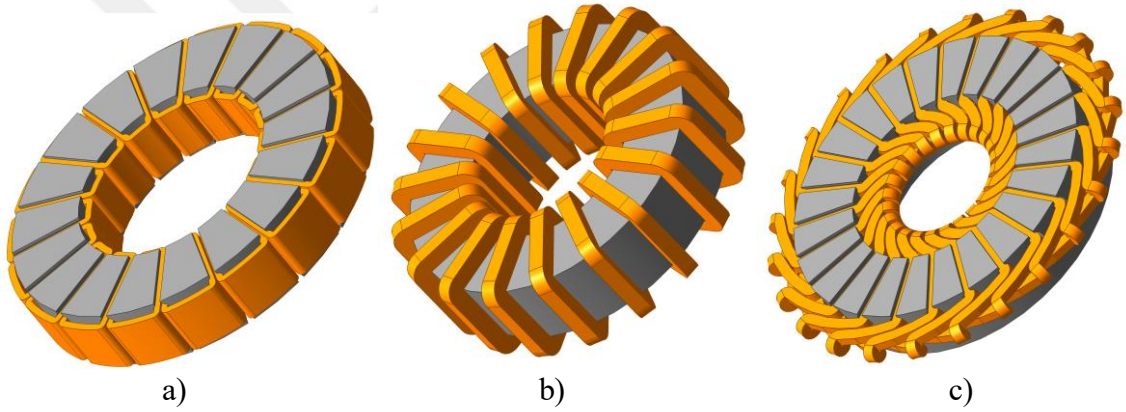
EA-ASM rotor modeli Şekil 3.17.b’de verilmiştir. Rotorunda bulundurduğu sincap kafesli yapı sayesinde mıknatıs veya harici uyartım olmaksızın tork üretimi sağlamaktadır. Özellikle yüksek güçlü motorlarda mıknatıs bağımlılığına alternatif olarak kullanılmaktadır (Özsoy, 2023).

Sabit mıknatıslı rotor yapısı EA makineler için daha çok çalışılan yapıdır. EA makinelere bu sabit mıknatısları yerleştirmek için de iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin ilkinde mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirilmesiyle Şekil 3.17.c’de verilen EA-YMSM meydana gelir. Yerleştirilen mıknatısların şekli ve boyutu makine uygulamasına göre değişebilmektedir. Sabit mıknatısların şekli akı bağlantısı ve akı dağılımını doğrudan etkilemektedir, bu da tasarımda zorluklar çıkarmaktadır. Diğer bir dezavantajı ise sabit mıknatısların havaya yakın bir akı geçirgenliğine sahip olmasıdır (Amin ve ark., 2019). Diğer bir yöntemde ise sabit mıknatıslar rotor çekirdeğinin içine gömülür. İmalat süreci zor olduğu için hakkında daha az çalışma vardır. Ancak yüksek hızlı çalışmalarda merkezkaç kuvvetine bağlı olumsuzluklara karşı avantajlı konuma sahiptir (Çetin, 2018).

3.3.1.2. Stator Yapısına Göre Eksenel Akılı Makineler

EA makineler oluklu, oluksuz ve nüvesiz stator yapıları ile üretilir. Farklı stator yapısına sahip tasarımlar Şekil 3.18’de verilmiştir. Akının stator çekirdeğinden değil de doğrudan rotora geçtiği uygulamalarda, Şekil 3.18.a’da görülen statorda yalnızca sargıların bulunduğu nüvesiz stator yapısı da kullanılmaktadır. Stator nüvesinin olmaması, düşük ağırlık, düşük vuruş momenti ve düşük manyetik yüklemeye neden olmaktadır. Düşük manyetik yükleme sebebiyle neredeyse hiç doyuma ulaşmazlar ve rotor çekirdeğinin daha az sapmasına neden olurlar. Düşük güçlü uygulamalar için

avantajlıdır. Şekil 3.18.b’de verilen oluksuz stator tasarımları olukluların tersine daha düşük bir mekanik mukavemete ve kayıplar daha az olacağından daha yüksek bir verimliliğe sahiptir (Akıncı, 2020; Amin ve ark., 2019). Oluklu stator tasarımı Şekil 3.18.c’de verilmiştir. Akı dalgalanması, stator diş kayıpları ve vuruş momenti gibi istenmeyen bileşenlere sahiptir. Ayrıca lamine şeklinde sarılmış stator yapısında oluk açma işlemi kısa devre ihtimali de düşünüldüğünde zor ve masraflı bir iştir. Bunların aksine sağlamlık, daha az etkili hava aralığı ve oluk yapısı sebebiyle farklı sargılara ve farklı akı dağılım seviyelerine sahip olması gibi avantajlara da sahiptir. Geniş hava aralığına, yüksek relüktansa ve dolayısıyla düşük endüktansa sahiptir. Düşük endüktans daha yüksek güç faktörü sağlamakla birlikte makinenin kontrolünü zorlaştırmaktadır (Bayazıt, 2021).



Şekil 3.18. EA makine stator yapıları a) nüvesiz, b) oluksuz, c) oluklu

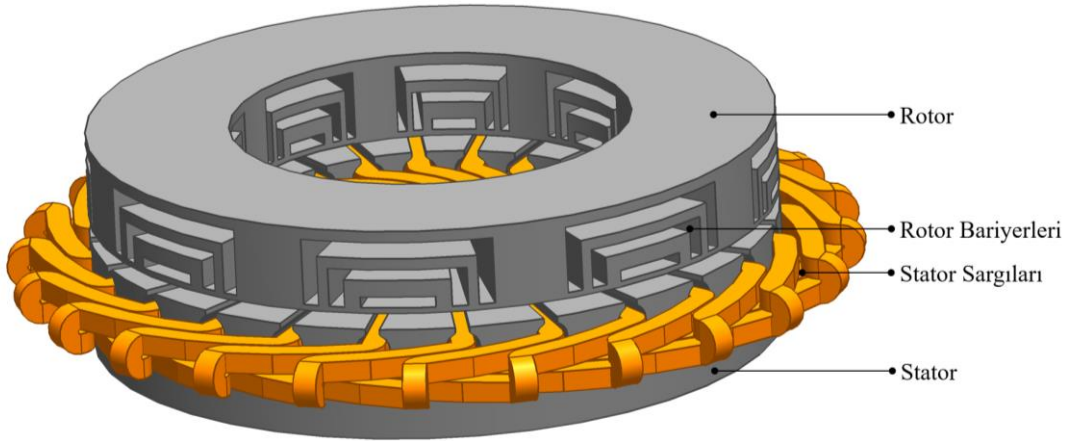
3.3.1.3. Rotor ve Stator Sayısına Göre Eksenel Akılı Makineler

EA makineler rotor ve stator yapılarına göre sınıflandırıldığı gibi rotor ve stator sayılarına göre de tanımlanabilir. Tek stator-tek rotor gibi temel EA makinelere ÇR veya ÇS yapılar da eklenmiştir. Çok yüzlü denilen başka bir versiyonu da çalışılmaya devam etmektedir. Bu EA makine modelleri hava aralıklarına bağlı olarak da isimlendirilmektedir (J. Zhao ve ark., 2023).

3.3.1.3.1. Tek Hava Aralıklı Eksenel Akılı Makineler

EA makinelerinin temel yapısıdır ve ilgili modeller Şekil 3.19’da verilmiştir. Stator ve rotor katmanlarının ferromanyetik yapısı sayesinde stator ve rotor oluşturdıkları

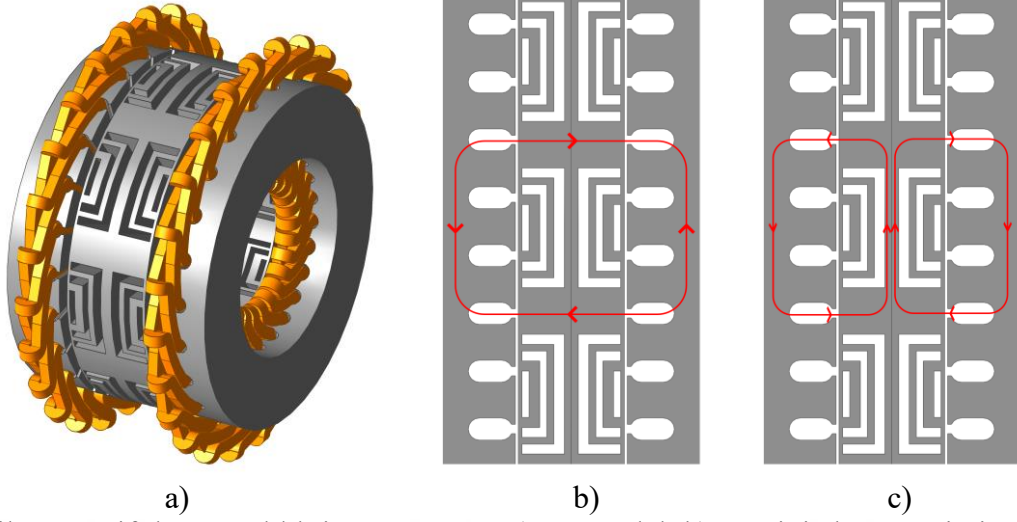
manyetik akı kendi içlerinde devrelerini tamamlayabilir. RA makineler gibi stator ve rotorda ayrı ayrı oluşturulan manyetik alanların birbirini etkilemesi ve bir itme-çekme kuvveti oluşturması prensibiyle çalışır. İçerdikleri nüve yapısı sebebiyle demir kayıpları yüksektir, ancak mıknatıslı tasarımlarda kendi içerisinde sabit bir akıya sahip nüvede girdap etkisine bağlı kayıplar oldukça sınırlıdır (Çetin, 2018). Rotor ve stator arasında büyük bir çekme kuvveti vardır. Bu kuvvete bağlı rotoru sabitlemek için özel yapıda bilezikler ya da ek bir stator yapısı kullanılabilir (Akıncı, 2020).



Şekil 3.19. Tek hava aralıklı EA-SRM

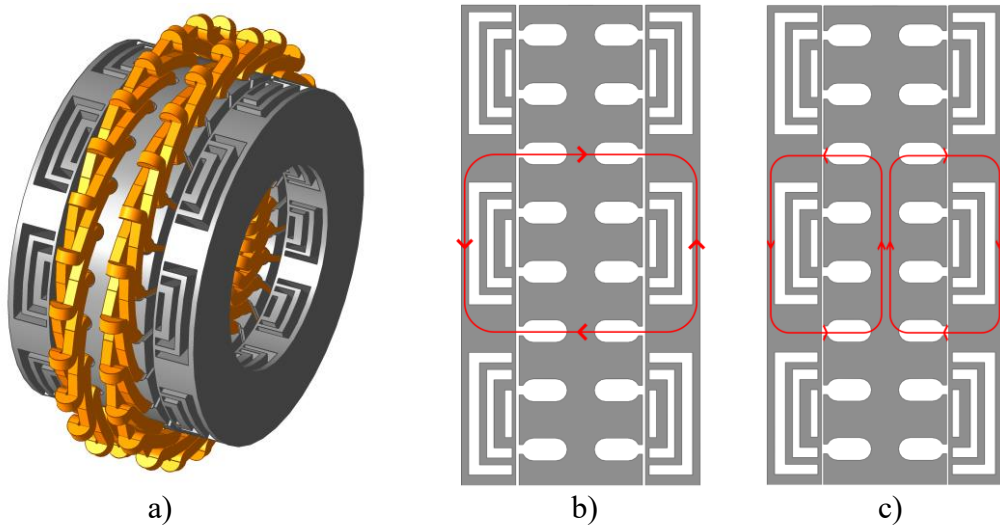
3.3.1.3.2. Çift Hava Aralıklı Eksenel Akıli Makineler

Çift hava aralığı iki stator tek rotor (iç rotor tipi) ve iki rotor tek stator (dış rotor tipi) olmak üzere iki sınıfta incelenir. İkili stator yapısıyla rotor ve stator arasındaki eksenel kuvvetler dengelenir. Bakır sargıların uzunluğu sebebiyle bakır kayıpları fazladır, daha fazla endüktans üretir ve düşük verime sahiptir (Amin ve ark., 2019). Mıknatıslı motorlarda mıknatısları bir arada tutmak ve mukavemeti arttırmak için manyetik olmayan malzeme ile üretilen boyunduruksuz rotor yapısı kullanılabilir. Nüvesiz yapıya sahip bu makinelerde rotor ağırlığı azalmasıyla, atalet momenti de düşüktür (Çetin, 2018).



Şekil 3.20. Çift hava aralıklı iç rotor SRM, a) 3B model, b) NS tipi akı gösterimi, c) NN tipi akı gösterimi

Çift hava aralıklı EA makinelerde akı yolunun rotor nüvesinden doğrudan diğer statora geçmesi NS yapısı olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.20.b’de iç rotor yapısına sahip NS tipi EA-SRM modelin akı yolu verilmiştir. Bu modellerde rotor boyunduruğunun azaltılması dolayısıyla hacim ve kütle açısından avantaj sağlamak mümkündür. NN yapısı ise akı yolu tek hava aralıklı EA makinelerde olduğu gibi stator ve rotor boyunduruqları arasından tamamlanmaktadır. Şekil 3.20.c’de NN tipi EA-SRM model akı yolu verilmiştir. NN ve NS tipi EA makinelerde stator sargıları faz akımlarının yönüne bağlı olarak akı yolu değiştirilmektedir.

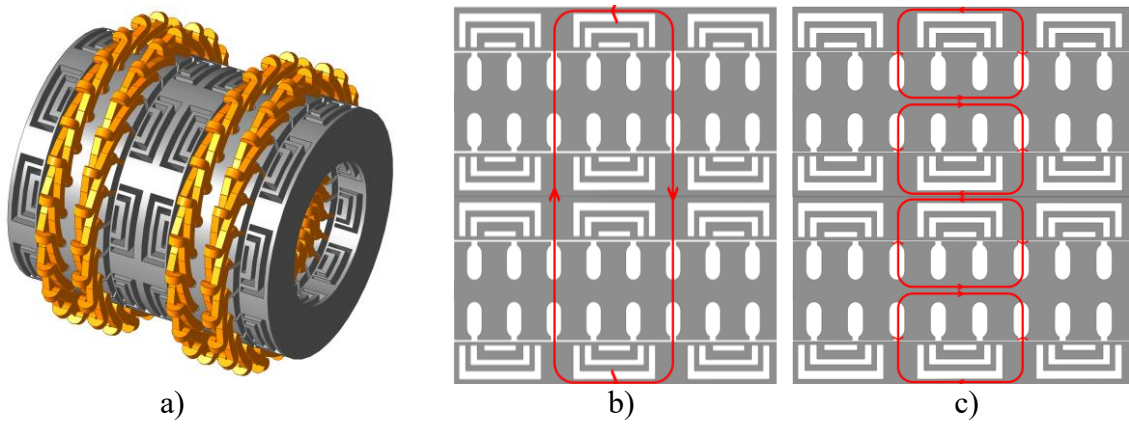


Şekil 3.21. Çift hava aralıklı dış rotor SRM, a) 3B model, b) NS tipi akı gösterimi, c) NN tipi akı gösterimi

Dış rotor tipinde iki rotor arasına stator yerleştirilmektedir. Şekil 3.21’de oluk yapısı ve akı yönlerine göre sınıflandırılması verilmiştir. Şekil 3.21.b’de görüldüğü gibi NS modelinde akı bir rotordan diğerine eksenel olarak geçmektedir. Bu durumda stator nüvesiz tasarımı yapılabilir. Akı yolunun stator boyunduruğundan tamamladığı NN tipi EA-SRM modeli Şekil 3.21.c’de verilmiştir. Dış rotor yapısına EA makinelerde demir ve bakır kayıpları azalmaktadır, ayrıca güç yoğunluğu artar. Rotorlar sargıların etrafında dönerken bir bakıma fan görevi görecektir ve soğutma daha kolay olmaktadır (Amin ve ark., 2019). NS ve NN tipi karşılaştırıldığında ise NS yapısı, yüksek verim, yüksek tork-güç yoğunluğuna sahiptir (Akıncı, 2020).

3.3.1.3.3. Çok Hava Aralıklı Eksenel Akılı Makineler

Çok hava aralıklı EA makineleri N sayıda stator veya rotorun N+1 sayıda rotor veya stator ile oluşturduğu yapıdır. Çift hava aralıklı EA makinelerle benzer özelliklere sahiptir. Şekil 3.22’de NN tipi ve NS tipi akı yollarına göre stator rotor dizilimi verilmiştir. İç ve dış rotor tipi bulunmaktadır. Radyal olarak boyut kısıtlaması olduğu durumlarda makinenin eksenel uzunluğunun artırılması yüksek güç ve tork gereksiniminde kullanılabilir. Ayrıca birden fazla rotor kullanılacağı için, mil üzerine monte edilen rotorların herhangi bir eksen kayması veya dengesizliğe sebep olmadığından emin olmak gerekir (Amin ve ark., 2019; Çetin, 2018).



Şekil 3.22. Çok hava aralıklı EA makine a) 3B model, b) NS tipi akı gösterimi, c) NN tipi akı gösterimi

Çizelge 3.2’de EA makine topolojilerinin avantaj ve dezavantajları verilmiştir. İhtiyaca ve özelliklerine göre seçim yapmak ve tasarıma eklemek mümkündür. Literatürde her biri ile ilgili çalışmalar yapılmış olup, yenileri de gelmeye devam etmektedir.

Çizelge 3.2. Farklı EA makine topolojilerinin karşılaştırılması

EA Makine Topolojisi	Avantajlar	Dezavantajlar
Tek Stator- Tek Rotor	Tasarımı ve üretimi kolay	Düşük güçlü uygulamalar için uygun, rotor ve stator arasındaki çekim kuvveti yüksek.
Çift Stator- Tek Rotor	Akı içinden geçmediği için rotor nüvesi elimine edilebilir. Rotor ortada olduğu için stator ve rotor arasındaki çekim kuvvetleri dengelenir.	Uzun sargı uçlarından dolayı yüksek bakır kayıpları vardır. Verimliliğin azalmasına yol açan daha yüksek endüktans üretilir.
Tek Stator Çift Rotor	Daha düşük demir ve bakır kayıpları, yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Stator sargılarının etrafındaki rotorların dönüşü, sargılar için soğutma fanı görevi görür.	Etkin hava aralığı alanı çift stator tek rotorlu motordan daha büyüktür. Çekim kuvvetleri daha büyüktür.
Çok Hava Aralıklı	Makinenin aynı radyal boyundan daha yüksek güç üretilir.	Makinenin eksenel uzunluğu artar.

3.3.2. Eksenel akıli makinelerin kullanım alanları

EA makineler yüksek ve düşük hızlarda çalışmasının yanı sıra yüksek güç yoğunluğu, modüler yapısı, yüksek verim ve diğer mekanik yapılara kolay entegrasyonu ile birçok farklı alanda kullanım için oldukça avantajlıdır (Habib ve ark., 2022). Yapısal olarak EA-SMSM piyasada ağırlıklı olarak tercih edilmektedir. EA makineler taşıt uygulamaları için, düşük hacim, yüksek verim, disk şeklindeki geometrisi, yüksek tork-güç yoğunluğu sebebiyle tercih edilen makine çeşitleridir. Tekere monte yapılan uygulamalarda, hacmin ve ağırlığın yanı sıra aktarma elemanlarının sayısını da azaltabilir. EAR’lerin yapısında motor olarak; hibrit otomobil, uçak ve gemi gibi yapılarda da generatör olarak kullanım örnekleri vardır. İnsansız hava araçları için çok fazlı nüvesiz EA-SM motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Literatürde rüzgar türbini, güneş enerjili araçlar ve hidroelektrik santraller için özellikle nüvesiz stator ve rotor yapılarında tasarlanmış EA generatörler de bulunmaktadır (Habib ve ark., 2022).

Çizelge 3.3. Piyasada kullanılan EA motorların özellikleri

Motorlar	Güç (kW) Nominal	Tork (Nm) Nominal	Hız (dev/dk) Maksimum	Verim (%) Maksimum	Referans
YASA 750R	70	400	3 250	-	(Anonim, 2025j)
Magnax AXF 275	150	260	8 000	95	(Deepak ve ark., 2023)
Turntide EVO AF130	64	145	8 000	98	(Anonim, 2025i)
EMRAX 208	56	90	7 000	96	(Anonim, 2025c)
Beyond AXM2	75	120	7 500	-	(Anonim, 2025a)
PanGood ICD180K	75	180	9 000	96	(Anonim, 2025e)
SeMotor 100K	100 (maks.)	240 (maks.)	5 000	-	(Anonim, 2025h)
PhiPower Phi27S	45	92	12 000	95.5	(Anonim, 2025g)
Evolito D250	207	208	10 000	-	(Anonim, 2025d)
Brogen EV K180-ICD100K	75	180	9 000	96	(Anonim, 2025b)
Fluxe F345-X	80	230	8 000	-	(Anonim, 2022)

Çizelge 3.3'te piyasada yüksek güçlü EAR'lerde kullanıma uygun EA motorların özellikleri verilmiştir. Yüksek hız aralığı, yüksek tork ve güç değerlerine sahip motorlar yüksek verim açısından da başarılı sonuçlar vermektedir. YASA motor nüvesiz EA motor tasarımı ile Jaguar CX75 Concept hibrit aracının dört tekerinde de kullanılmıştır (Anonim, 2025j). Emrax farklı boyut ve güç değerlerinde ürettiği EA motorlar ile araçlar, uçaklar, drone (İnsansız hava araçları) ve botlar gibi birçok alanda kullanılabilir. Aynı boyuttaki motorları birbirine entegre ederek oluşturulan Emrax Twin yapısı sayesinde iki kat güç ve tork sağlayabilmektedir (Anonim, 2025c). Aynı şekilde Beyond Motor ikili veya üçlü yığın (double/triple stacked) olarak motorları entegre edip performans değerlerini arttırabilmektedir (Anonim, 2025a). Brogen firması EA motorları EAR'ler (ticari araçlar, deniz araçları, motosikletler, vb.), inşaat ekipmanları, endüstriyel makineler, ağır taşımacılık ve daha bir çok alanda kullanıma sunmaktadır (Anonim, 2025b).

Bunlara ek olarak yapılan araştırmalarda, disk sürücü, düşük torklu servo motorlar, fan, uçak ve denizaltı gemi tahriki, elektrikli scooter, asansör, vb. uygulamalarda yapılan

birçok çalışmaya rastlanmıştır. EA makineler geometrik özellikleri, düşük kayıpları, yüksek tork-güç yoğunluğu, yüksek verim ve basit yapısıyla RA makinelere göre avantajlı olduğu çeşitli alanlar bulunmaktadır (Amin ve ark., 2019). Gelecekte de özellikle düşük güçlü uygulamalarda nüvesiz yapısıyla uygunluk göstereceği beklenmektedir. Çok fazlı ve çok yüzlü EA makineler yüksek performanslı uygulamalara da önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Ayrıca hibrit olarak farklı sistemlere entegre edilebilmesi kullanım alanını arttırmaktadır (Habib ve ark., 2022).

3.4. Elektrikli Araç Uygulamalarında Tahrik Motoru Parametrelerinin Belirlenmesi

EAR tasarımının enerji verimliliği üstüne etkisi, genel yasa ve yönetmeliklerin yanı sıra otomotiv sektöründeki tüketicilerin özel gereksinimleri gibi birçok etkene bağlıdır. Burada genel boyutlar, yolcu kapasitesi, gövde tipi, bagaj kapasitesi, spesifik ön alan, lastik tipi ve şekli, HVAC (ısıtma, havalandırma ve klima) sistemi gibi özellikler tasarımcıya yol göstermektedir. Bir EAR'ın tasarımı, hareket halindeki araca etki eden tüm kuvvetler göz önünde bulundurularak Newton'un ikinci hareket yasasına uygun olarak fiziksel ilişkilerden başlamaktadır (Varga ve ark., 2019). Newton'un ikinci yasası, bir cismin ivmelenmesinin üzerine uygulanan net kuvvetle orantılı olduğunu belirtmektedir. Benzer şekilde, bir araç, tahrik ünitesinde (güç aktarma organları) üretilen kuvvetin, aracın karayoluna uyguladığı yerçekimi kuvvetini, hava direncini ve lastik yuvarlanma direncini yenmesi nedeniyle hareket etmektedir (Adegbohun ve ark., 2021).

3.4.1. Elektrikli araç verileri ve performans özellikleri

Aracın hareket ettiği ivme ve hız, güç aktarma organları tarafından tekerleğe iletilen güce, aracın boş kütlelerine (tüm bileşenler ve araçtaki yolcular dahil), karayolunun durumuna ve aracın karayolu üzerindeki aerodinamik özelliklerine bağlıdır (Adegbohun ve ark., 2021). Araç hareket değerlendirmesi ilk hızlanma, aracın nominal hızında seyri ve maksimum hızda seyir olmak üzere üç ana bölümden oluşur. Bunlar EAR ve HEAR aktarma organları için temel tasarım kısıtlamalarını sağlamaktadır. Bu kısıtlamaları karşılayabilen bir aktarma organı diğer operasyonel rejimlerde de yeterli şekilde

çalışacaktır. Gerçek bir araç tasarımında aracın bütün kısıtlamalar ve aksamalarında iyileştirmeler yapılması gerekecektir (Ehsani ve ark., 1997). Bu çok daha kapsamlı bir çalışma gerektirmektedir. Bu çalışmada EAR'ler için uygun motor tasarımını gerçekleştirmek ve literatürde bulunan kısıtlamaları minimum güçle karşılamak amaçlanmıştır.

Bu durumda EAR tahrik motoru için gerekli güç ve tork değerlerini hesaplamak üzere referans araç belirlemek gerekmektedir. Otomotiv Distribütörler ve Mobilite Derneği (ODMD) yayınladığı basın bülteninde 2022 yılında Türkiye'deki araç piyasası ile ilgili detaylı bilgiler vermektedir. Bu rapora göre dikkat çekici konulardan birincisi Türkiye'de sayıları az olmasına rağmen 2021 yılına göre HEAR'larda %104, EAR'lerde ise %252 oranında bir pazar artışının olduğu gözlenmektedir. Diğer bir husus ise 2022 yılında Türkiye araç kullanıcılarının A, B ve C gibi düşük segmentli araçları daha çok tercih ettiğidir. Segmentlere göre araç pazarı değerlendirildiğinde C segment araçların %51.1'lik pay ile ilk sırada olduğu gözlemlenmektedir (Erce, 2023). Piyasadaki yeni EAR'ler incelendiğinde de A segment veya mini olarak tanımlanan araçların da fazlaca tercih edildiği görülmektedir. EAR'ler için verim, tasarruf, menzil gibi faktörlerin daha önemli olduğu düşünülünce piyasada daha küçük araçlara yönelim olmaktadır. Çizelge 3.4'te literatürden bir referans araç örneği ve piyasada son yıllarda tercih edilen EAR'lerin karakteristik özellikleri verilmiştir (Amirian, 2010; Demir & Aküner, 2018; Edwards ve ark., 2004).

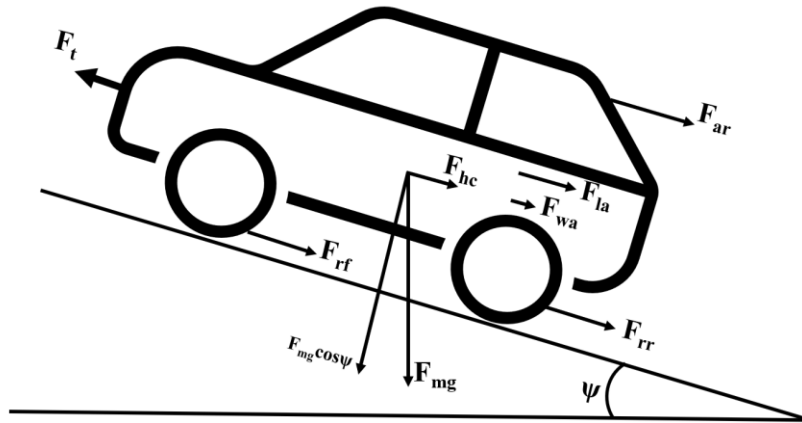
Çizelge 3.4. Referans araç ve piyasadaki EAR'lerin karakteristik özellikleri

Karakteristik Özellikler		Referans Araç	2017 Nissan Leaf SL	2019 Fiat 500e	2019 Renault ZOE	2019 Renault ZOE Q90	2020 Volkswagen e-up	2023 Chevrolet Bolt
Maksimum Hız	km/sa	130	145	141	141	135	145	130
Araç Ağırlığı	kg	1200	1536	1355	1577	1480	1644	1229
Yerçekimi İvmelenmesi	m/s ²	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
Hava Yoğunluğu	kg/m ³	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
Aerodinamik Sürtünme Katsayısı	-	0.25	0.28	0.311	0.29	0.29	0.308	0.308
Yuvarlanma Direnci Katsayısı	-	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Ön Yüzey Alanı	m ²	2.2	2.74	2.48	2.7	2.7	2.84	2.45
Teker Çapı	m	0.381	0.438	0.381	0.438	0.381-0.438	0.438	0.381
Final Dişli Oranı	-	7.05	8.19	9.59	-	9.3	7.05	-
Rüzgâr Hızı (v _{rw}) – Beaufort ölçeğine göre	m/s	5	5	5	5	5	5	5
0-100 Hızlanma Süresi	s	12	11.5	9.5	11.4	13.2	6.5	11.9
Eğim (45km/sa)	%	30	30	30	30	30	30	30

Araç sınıflandırılması Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu (UNECE / United Nations Economic Commission for Europe) tarafından tekerlek sayısı, motor hacmi, azami hızı, azami gücü, yolcu ve yük taşıma durumu, azami kütlesi ve faaliyet alanına göre yapılmaktadır. Bu durumda Çizelge 3.4 verildiği gibi referans araç yolcu taşımada kullanılan en az dört tekerli, motorlu taşıtlar standartlarına uygun M Sınıfı araç olarak tanımlanmaktadır (United Nations Economic Commission for Europe, 2017). Avrupa Komisyonu'nun, 1999'da alınan Hyundai/Kia birleşme kararında verildiği gibi otomotiv pazarında kullanılan sınıflandırmaya göre referans araç A segment şehir içi küçük araç sınıfına dahil edilmektedir (European Commission, 1999).

3.4.2. Elektrikli tahrik motorunun gücünün belirlenmesi

Bir EAR modellenmesi için araç dinamiğinin incelenmesi gerekmektedir. Bu durumda sürüş döngüsü içindeki aracın üzerine etki eden net kuvvetler bulunmaktadır (Al Halabi & Al Tarabsheh, 2020). Araç performansını belirlemek için gerekli çekiş gücünün bulunması ve tahrik motorunun bileşke kuvveti karşılaması gerekmektedir. Aracın etkisi altında kalacağı kuvvetler Şekil 3.23'te verildiği gibi yuvarlanma direnci kuvveti, aerodinamik sürtünme kuvveti, ivmelenme kuvveti ve tırmanma kuvveti olarak verilmiştir (Larminie & Lowry, 2012).



Şekil 3.23. Aracın tek boyutta yanal dinamikleri

Denklem (3.1)'de Δh dikey, d ise yatay uzunluk olarak verilmiştir. Eğim, yatay ve dikey uzunlukların yüzdesel oranı olarak ifade edilmektedir. Buna göre yolun eğim açısı ψ olarak denklemde hesaplanmaktadır (Demir & Aküner, 2018). Tırmanma kuvveti yolun

eğimine bağlı olarak aracın ağırlığını temsil eden kuvvettir. Denklem (3.1)'de verilen m araç kütlesini, g yerçekimi ivmelenmesini ve F_{hc} ise tırmanma kuvvetini vermektedir (Larminie & Lowry, 2012).

$$F_{hc} = mg \sin \psi$$

$$\%egim = 100 \times \frac{\Delta h}{d} \quad \psi = \arctan \frac{\%egim}{100} \quad (3.1)$$

Tırmanma kuvveti yol eğimine bağlı olarak yokuş yukarı durumlarda pozitif değer, yokuş aşığı durumlarda negatif değer almaktadır (Ehsani ve ark., 1997).

Aerodinamik sürtünme kuvveti, hareket eden araç üzerinde hava sürtünmesi kaynaklı oluşan kuvvetlerdir. Aracın, ön alanı, aynaları, soğutma kanalları, hava geçiş çıkıntıları ve benzeri teçhizata bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Larminie & Lowry, 2012). Standart olarak Denklem (3.2)'de ρ_a havanın yoğunluğu, C_d aerodinamik sürtünme katsayısı, A ön yüzey alanı, v araç hızı, v_{fw} ise rüzgar hızı olarak verilmiştir (Amirian, 2010).

$$F_{ar} = \frac{1}{2} \rho_a C_d A (v + v_{fw})^2 \quad (3.2)$$

Sürtünme katsayısı C_d araç tasarımına bağlı değişkenlik gösterebilmektedir. Ortalama bir sedan araç için 0.3 tercih edilse de EAR'ler için 0.19 değerine kadar düşürülebilir. Çünkü EAR tasarımında soğutma kanalları ve araç altı boru tesisatı ihtiyacı daha azdır (Larminie & Lowry, 2012). Sürtünme katsayısı araç tipine göre değişkenlik göstermektedir; otobüslerde bu değer 0.7, kamyonlarda ise 1.5 seviyelerine çıkmaktadır. Optimal araç tasarımında ise 0.2-0.3 aralığı tercih edilmektedir (Kiyakli & Solmaz, 2018).

Yuvarlanma kuvveti araç tekerlekleri ve yol arasındaki sürtünmeye bağlı olarak dairesel hareket kaynaklı kuvvettir (Al Halabi & Al Tarabsheh, 2020; Kiyakli & Solmaz, 2018). Rulmanlar ve dişli sistemindeki sürtünme etkisi de bu kuvvet üzerinde rol oynamaktadır. Yuvarlanma kuvveti yaklaşık olarak sabittir, aracın hızına bağlı değildir (ihmal edilebilir seviyede) (Larminie & Lowry, 2012).

$$F_r = F_{rr} + F_{rf} = c_r mg \cos \psi \quad (3.3)$$

Yuvarlanma kuvveti F_r Denklem (3.3)'te verildiği gibi aracın ağırlığına, yolun eğimine ve c_r yuvarlanma katsayısına bağlı olarak değişmektedir. F_{rr} ve F_{rf} (bkz. Şekil 3.23) sırasıyla arka ve ön tekerler için ayrıca verilmiştir. Yuvarlanma katsayısı genelde 0.015, EAR'ler için geliştirilen lastiklerle de 0.005 olarak kabul edilebilir (Amirian, 2010). Yuvarlanma katsayısına etki eden bir diğer faktör ise yol yüzeyi olarak ifade edilebilir. Beton-asfalt yollar için bu değer 0.013 gibi yaklaşık bir değer alırken, toprak yollarda yuvarlanma katsayısı 0.35 değerlerine ulaşmaktadır (Kiyakli & Solmaz, 2018).

Newton'un II. Hareket yasasına göre, bir cismin hızlanması ve yavaşlaması sırasında, bu harekete zıt yönde bir eylemsizlik kuvveti oluşur. Aracın pozitif ve negatif ivmelenmesi sırasında karşılaşılan bu kuvvete atalet direnci denir (Kiyakli & Solmaz, 2018). Denklem (3.4)'te verildiği gibi ivmelenme kuvveti F_{la} aracın ağırlığına ve ivmesine a bağlı olarak değişmektedir.

$$\begin{aligned} F_{la} &= m.a \\ F_{wa} &= I \frac{G^2}{\eta_g r^2} a \end{aligned} \quad (3.4)$$

Aracın doğrusal ivmelenmesine göre hesaplanan ivmelenme kuvvetine, ek olarak az da olsa dairesel ivmelenmenin de dahil edilmesi gerekmektedir. Aracın hızlanma hareketini sağlamak için motorun daha hızlı dönmesi, dişli sistemiyle tekerlere iletmesi gerekmektedir. Bu durumda da Denklem (3.4)'te verilen F_{wa} dairesel ivmelenme kuvvetinin toplam kuvvete eklenmesi gerekir. I motor atalet momenti, G dişli oranı, r teker yarıçapı ve η_g dişli sistemi verimi olmak üzere dairesel ivmelenme kuvveti hesaplanmaktadır. Bileşenlerinin değişkenlik göstermesi ve etkisinin az olması sebebiyle F_{wa} değeri F_{la} değerinin yaklaşık %5'i olarak değerlendirilebilir ya da ihmal edilebilir (Larminie & Lowry, 2012).

$$F_t = F_{hc} + F_{ar} + F_r + F_{la} + F_{wa} \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)'te araca etkiyen kuvvetlerin toplamı F_t çekiş kuvveti olarak verilmiştir. Çekiş kuvveti aracın kalkış veya hareket halinde üstesinden gelmesi gereken kuvvetlerin toplamına verilen isimdir.

Fizikte güç, birim zamanda harcanan enerjiyi ya da yapılan işi ifade etmektedir. İş ise üzerine kuvvet etki eden cismin yer değişimi olarak ifade edilebilir. Bu durumda güç cismin hareket hızı ve üzerine etki eden kuvvete bağlıdır.

$$P = \frac{dW}{dt} = T \frac{d\theta}{dt} = TW = T 2\pi \frac{n_{rpm}}{60} = \frac{1000}{9550} T n_{rpm} \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'da P gücü, T döndürme kuvveti (tork), W işi, w açısal hıza bağlı dönüşümleri verilmiştir (Urazel & Keskin, 2020). Açısal hızdan n_{rpm} dakikadaki dönüş sayısı dönüşümü yapıldığında belirli güce sahip motorun ne kadar hızda ne kadar tork uygulayacağı hesaplanabilmektedir.

$$\begin{aligned} T_{teker} &= T_{motor} G_{dif} G_{vites} \\ T_{teker} &= F_t r, \end{aligned} \quad (3.7)$$

Denklem (3.7)'de dişli sistemindeki dişli oranlarına bağlı olarak T_{motor} motorda üretilen torkun, T_{teker} tekerde üretilen torka etkisi gösterilmektedir. Tekerde üretilecek torkun ise r teker yarıçapına göre F_t toplam çekiş kuvvetini karşılaması beklenmektedir.

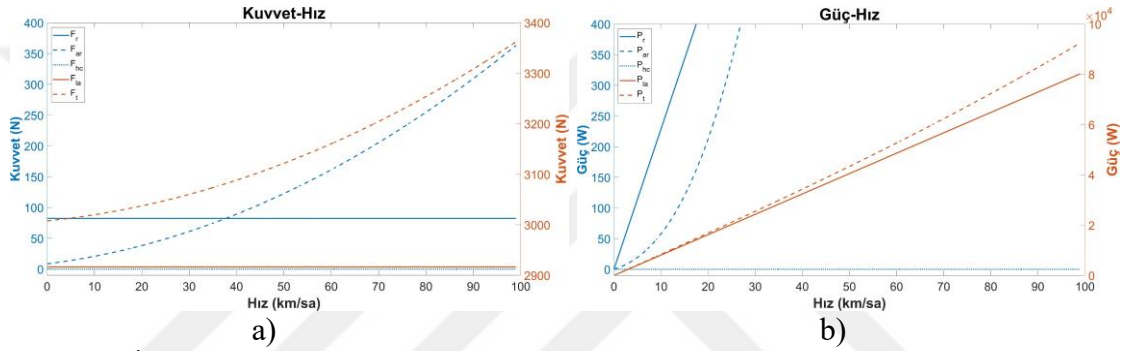
$$v(m/s) = wr = 2\pi fr = \pi \frac{n_{rpm}}{60} d \quad (3.8)$$

$$P_d = F_d v \quad (3.9)$$

Denklem (3.8)'de devri ve yarıçapı verilen tekerin çizgisel hızı m/s cinsinden bulunmaktadır. Denklem (3.9)'da ise F_d motora iletilen kuvvet değeri ve motor hızından güç değerinin hesaplaması yapılmaktadır (Rosca, 2013). Temel araç tasarımı için gerekli güç hesaplamaları yapmak üzere bazı kısıtlamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Araca etki eden kuvvetlerden yola çıkarak ilk hızlanma, maksimum hızda seyir ve yokuş tırmanma

olmak üzere üç aşamada araç tasarım kısıtlamaları oluşturulabilir. Bu durumda gereksinimleri sağlayan aktarma organı normal sürüş standartlarında da yeterlilik sağlayacaktır (Ehsani ve ark., 1997).

İlk hızlanma aşaması aracın durma noktasından istenilen hıza belirli bir sürede çıkması olarak ifade edilir (Ehsani ve ark., 1997). İvmelenme kuvvetinin ağırlıklı yer aldığı bu aşamada birinci seviye toplam çekiş kuvveti ve gerekli güç hesaplaması yapılmaktadır. İlk hızlanma hızı olarak 100 km/sa (27.7 m/s) belirlenmiştir (Amirian, 2010). Bu durumda araca etkiyen kuvvetler ve bu kuvvetleri karşılamak için gerekli güç değerleri Şekil 3.24’de verilmiştir.

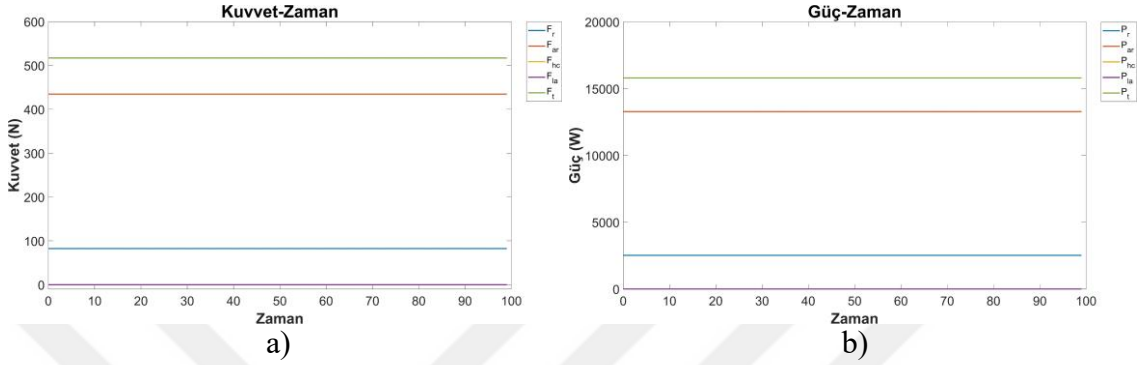


Şekil 3.24. İlk hızlanmada araca etkiyen a) kuvvetler, b) güçler

Referans aracın sıfırdan 100 km/sa (0-27.7 m/s) hıza sabit bir ivme ile ulaşması durumunda üzerine etkiyen kuvvetlerin değişimi Şekil 3.24.a’da verilmiştir. Yuvarlanma direnci F_r araç sabitleri dışında yol eğimine bağlı değişmektedir. Bu durumda hızlanma boyunca 82.404 N sabit kuvvete sahiptir. Doğrusal ivmelenme F_{la} (daireysel ivmelenme F_{wa} %5 oranında eklenmiştir.) ivmelenmenin sabit olması sebebiyle hızlanma süresince 2 917 N’de sabit kalmaktadır. Eğimin sıfır alması sebebiyle tırmanma kuvveti sıfırdır. Aerodinamik sürtünme kuvveti F_{ar} hıza bağlı sürekli bir artış göstermektedir. Bu durumda referans aracın 0-100 km/sa ilk hızlanma için karşılaması gereken toplam kuvvet F_{int} 3 368 N olarak hesaplanmıştır. Denklem (3.9)’da verilen kuvvet ve hıza bağlı güç formülüyle ihtiyaç duyulan güç değerleri Şekil 3.24.b’de verilmiştir. İlk hızlanma güç değeri P_{int} 93 567 W olarak hesaplanmıştır.

Diğer sürüş durumu aracın maksimum sabit hız ile eğimsiz bir yolda seyir halinde devam etmesidir. Bu durumda araca etkiyen kuvvetler ivmelenme olmadığı için düşük seyredecektir. Ancak maksimum hızın etkisinin araç dinamikleri için belirlenmesi

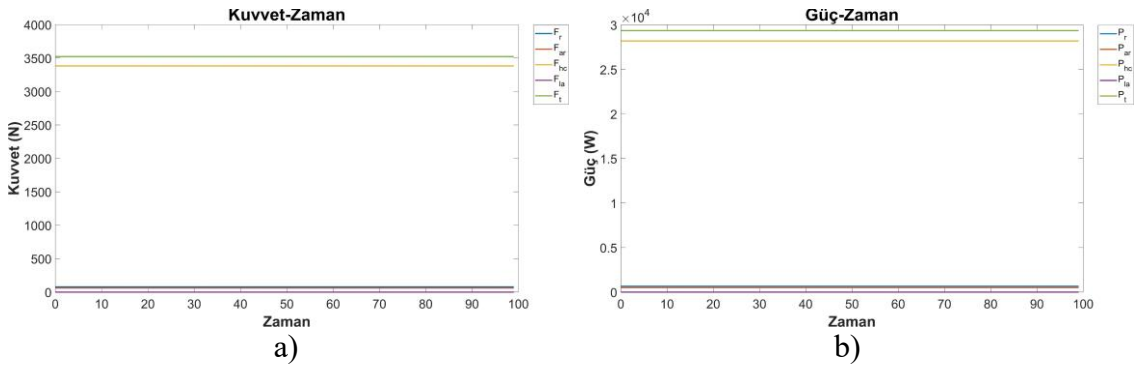
gerekmektedir. Otoyol sürüşü olarak da ifade edilen bu sürüş aşamasında seyir hızı 110 km/sa (30.5 m/s) olarak alınmıştır (Amirian, 2010). Bu sürüş esnasında araca etkiyen kuvvetler ve ihtiyaç duyulan güç değerleri Şekil 3.25'te verilmiştir.



Şekil 3.25. Otoyol sürüşünde araca etkiyen a) kuvvetler, b) güçler

İvmelenmenin ve eğimin sıfır olduğu sabit yüksek hızda yapılan sürüş dinamiği boyunca araca etkiyen kuvvet değerleri Şekil 3.25.a'da verilmiştir. Bu durumda ivmelenme kuvveti F_{la} ve tırmanma kuvveti F_{hc} etkisi sıfırdır. Yuvarlanma kuvveti ve aerodinamik sürtünme kuvvetine bağlı araca etkiyen toplam kuvvet F_{hw} 516.9 N sabit kuvvettir. Bu kuvvetlere karşı motorun üretmesi gereken güç değerleri Şekil 3.25.b'de verilmiştir. İhtiyaç duyulan toplam güç değeri P_{hw} ise 15 796 W olarak bulunur.

Tırmanma sürüş testi, eğimli bir yolda aracın ihtiyacı olan gücü hesaplamak için tercih edilmektedir. İvmelenme olmaması ve eğimli yol olması sebebiyle tırmanma kuvvetinin daha çok etkin olduğu bir sürüştür. Bunun için %30 yol eğimi ve 30 km/sa (12.5 m/s) sabit hızda hesaplamalar gerçekleştirilmiştir (Amirian, 2010).



Şekil 3.26. Tırmanma sürüşünde araca etkiyen a) kuvvetler, b) güçler

Yokuş tırmanırken araca etkiyen toplam kuvvet ve gereken güç değerleri Şekil 3.26'da verilmiştir. Yuvarlanma kuvveti ve aerodinamik kuvveti 100 N'un altında kalırken asıl

kuvvet tırmanma kuvveti F_{hc} olarak görülmektedir. Toplam yokuş tırmanma kuvveti F_{tir} 3 522.7 N ve gerekli güç $P_{tir} = 29\,355.8$ W olarak hesaplanmıştır.

$$V_{km/sa} = 0.1885 \frac{n_{rpm}}{G_{dif} G_{vites}} d \quad (3.10)$$

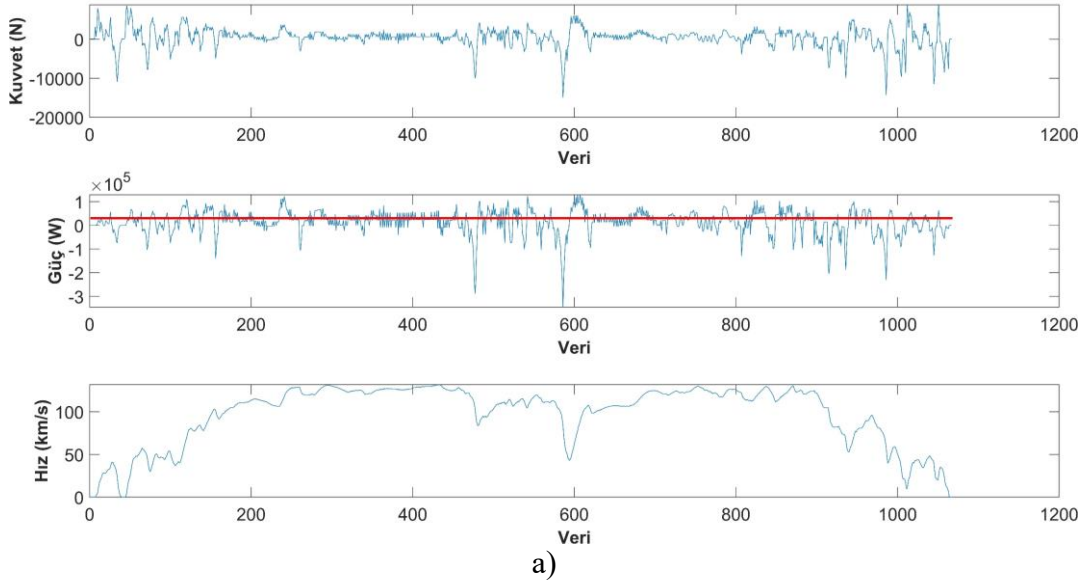
Denklem (3.10)'da d motor çapı G_{dif} ve G_{vites} dişli oranı olmak üzere motor devrine bağlı aracın hızı km/sa cinsinden hesaplanmaktadır. Referans aracın ilk hızlanmada harcadığı güç maksimumdur, otoyol sürüşünde ise minimum güç ihtiyacı vardır. Bu durumların araç genel sürüşü karşılamaması sebebiyle tırmanma gücünü 29 355.8 W sağlamak gerekmektedir. Bu sebeple nominal güç değeri 30 kW olarak belirlenmiştir. Verilen dişli oranı ve tekerlek çapına bağlı olarak 30 km/sa araç hızı için yaklaşık 3 000 dev/dk nominal motor hızı belirlenmiştir. Maksimum hızın 110 km/sa olması için ise devir sayısının yaklaşık 9 539≈10 000 dev/dk olması gerektiğine karar verilmiştir. Bu değerlerin araç teker çapı ve dişli oranına bağlı olarak değiştirilebildiği gözlemlenmektedir. Motor tasarımı yapılırken bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

3.4.3.Sürüş testleri

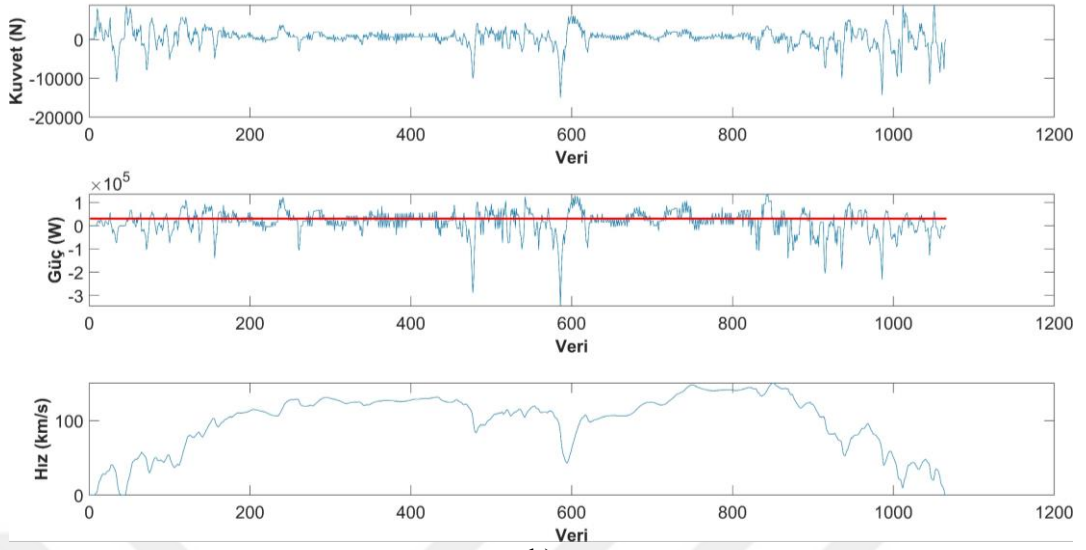
EAR tasarımında dikkat edilmesi gereken problemlerden biri de düşük menzil problemidir. Elektrik enerjisinin depolanmasında yaşanan problemler de düşünüldüğünde verimli bir araç tasarlamak için sürüş aşamasında ihtiyaç duyulan enerjiyi tasarım aşamasında simüle etmek gerekmektedir. Standartları verilmiş sürüş döngüsü testleriyle bu durum kesin sonuçlar vermese de yaklaşık olarak simüle edilebilir (Larminie & Lowry, 2012).

Bu sürüş testleri ilk olarak içten yanmalı araçların emisyon seviyelerini ölçmek için kullanılmıştır. Aracın belirli şartlar altında durak ve hızlanmaları bulunduran testlerdir (Larminie & Lowry, 2012). Literatürde Avrupa'da tercih edilen Yeni Avrupa Sürüş Döngüsü (NEDC-New European Driving Cycle), Japonya'da tercih edilen Japon Sürüşü (JC08-Japanese Cycles), Amerika'da kullanılan FTP-75 ya da Federal Test Prosedürü (EPA Federal Test Procedure) ve bu sürüş testlerinden geliştirilen Dünya Çapında

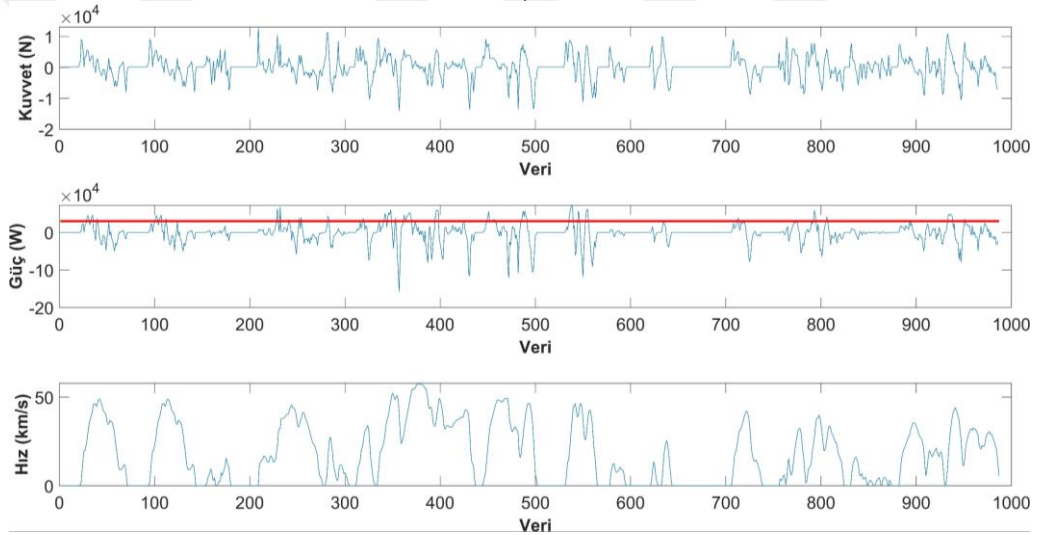
Uyumlaştırılmış Hafif Hizmet Test Prosedürü (WLTP-Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure) sürüş testleri kullanılmaktadır (Laitinen ve ark., 2017; Rosca, 2013). Sürüş testlerinin genel olarak otomotiv devi ülkelere ait test koşulları olduğu görülmektedir. Özellikle emisyon ölçümünde araç üreticilerinin yatırımının bulunduğu sürüş testlerinin güvenilirliği tartışmaya açıktır. Bu duruma karşı daha iyi sonuçlar elde etmek adına Avrupa Ulaşım Emisyon Modelleri ve Envanter Sistemlerinin Değerlendirilmesi ve Güvenilirliği (ARTEMIS-Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems) projesi, Ortak Artemis Sürüş Döngüleri (CADC-Common Artemis Driving Cycle) kapsamında oluşturulmuştur. Bu testlerin gerçek dünyada Avrupa sürüş verilerini daha iyi temsil ettiği düşünülmektedir (Rosca, 2013). ARTEMIS sürüş prosedürü ortak bir referans sürüş testi belirlemek için, Avrupa ülkelerinde vites oranları ve hız profilleri dikkate alınarak, gerçek sürüş şartlarında denenmiş ve kırsal, kentsel, otoyol (130-150 km/sa) olmak üzere üç gerçek dünya sürüşüne sahip sonuçlar elde edilmiştir (André, 2004).



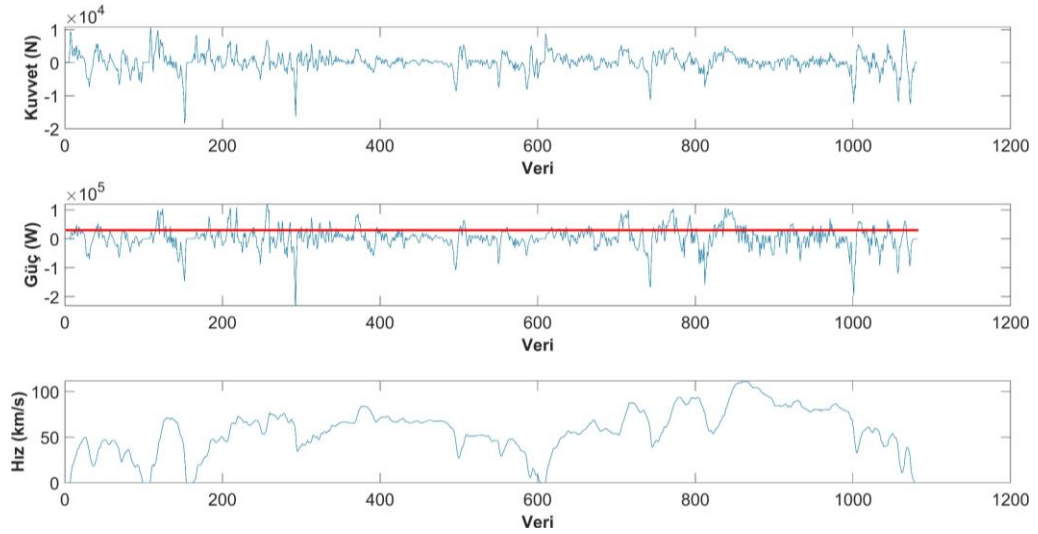
Şekil 3.27. Sürüş testleri; a) ARTEMIS 130, b) ARTEMIS 150, c) ARTEMIS kentsel, d) ARTEMIS kırsal, e) FTP, f) WLTP



b)

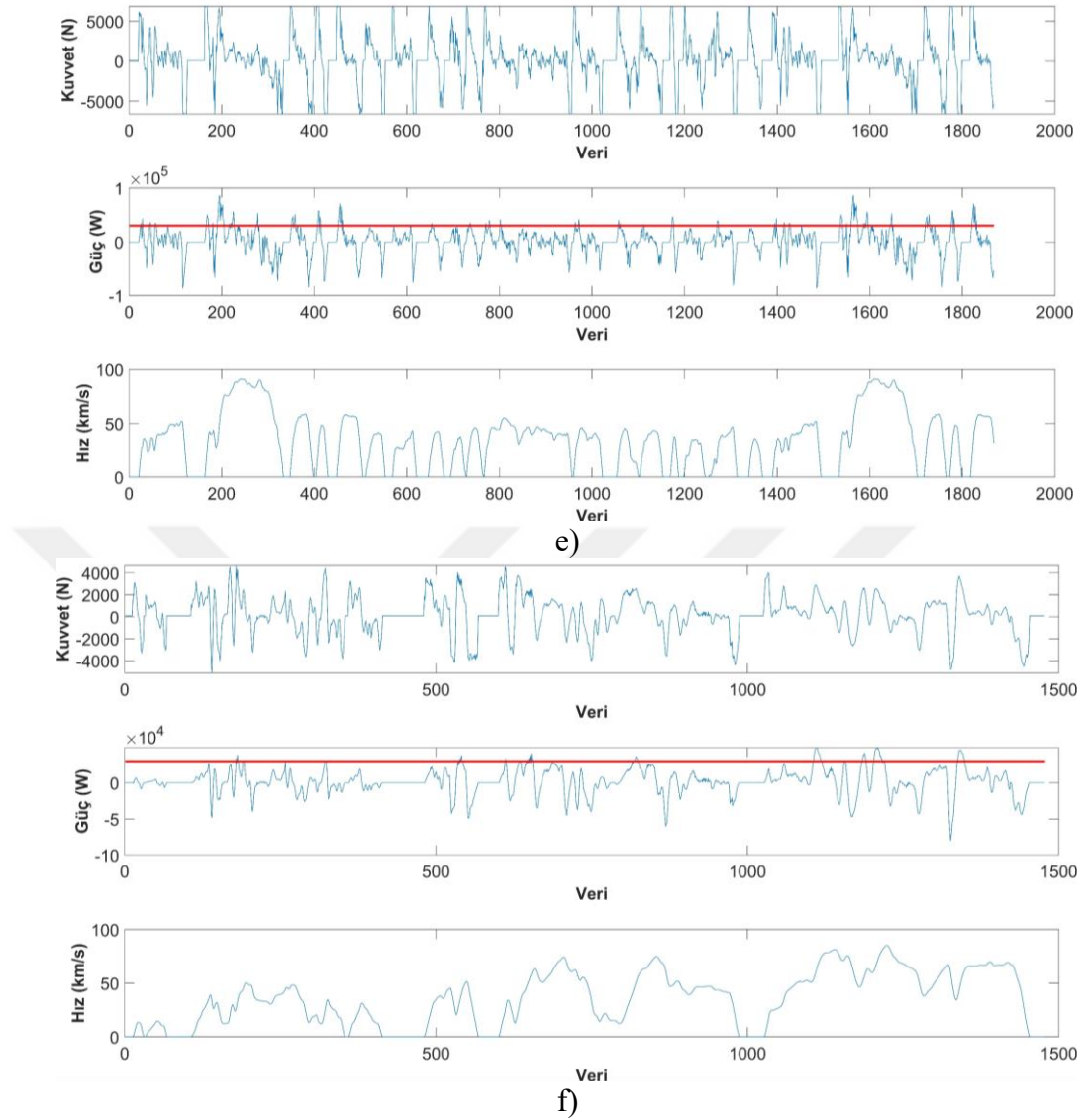


c)



d)

Şekil 3.27. (Devam) Sürüş testleri; a) ARTEMIS 130, b) ARTEMIS 150, c) ARTEMIS kentsel, d) ARTEMIS kırsal, e) FTP, f) WLTP



Şekil 3.27. (Devam) Sürüş testleri; a) ARTEMIS 130, b) ARTEMIS 150, c) ARTEMIS kentsel, d) ARTEMIS kırsal, e) FTP, f) WLTP

Şekil 3.27’de ARTEMIS 130 (otoyol), ARTEMIS 150 (otoyol), ARTEMIS kentsel, ARTEMIS kırsal, WLTP ve FTP sürüş döngüleri çekiş kuvveti, güç ve hız grafikleri verilmiştir. Literatürdeki sürüş döngüsü testlerine göre referans aracın kuvvet güç ve hız değerleri incelenmiştir. Şekil 3.27’de grafiklerin alt kısmı sürüş döngülerine göre aracın sürüş sırasındaki hız değişimlerini göstermektedir. Grafiklerin üst kısmında ise bu hız değişimlerine bağlı kuvvet değişimi verilmiştir. Grafiklerin orta kısımda kuvvet ve hız değişimine bağlı ihtiyaç duyulan güç değerleri gösterilmektedir. Grafiklerde güç bölümüne 30 kW nominal gücü temsil eden kırmızı çizgi eklenmiştir. Bu çizgi ile sürüş döngüsü sırasında çekişin yeterli ya da yetersiz olduğu görülebilmektedir. Şekil 3.27.a ve

Şekil 3.27.b’de otoyol sürüşünü baz almış ARTEMIS 130 (maksimum hız 130 km/s) ve ARTEMIS 150 (maksimum hız 150 km/s) sürüş testleri incelenmiştir. İki sürüş testi için de ortalama güç değeri nominal 30 kW güç yakınlarında gerçekleşmektedir. Tepe güç değeri belli aralıkla yüksek akım performansı ile sağlanabilecektir. Bu durumda motor nominal yükün üstünde de performans gösterebilecektir. Şekil 3.27.c ve Şekil 3.27.d’de ARTEMIS kentsel ve kırsal sürüş testlerinin gerekli motor performansı verilmiştir. ARTEMIS kentsel sürüş testi maksimum hızın 100 km/sa olduğu ve aracın daha az duraklatıldığı bir sürüş performansındır. Artemis kırsal sürüş testi ise çoğunlukla 50 km/s altındaki hızlarla daha sık duraklamanın olduğu sürüş performansı için hazırlanmıştır. Her iki durumda da 30 kW nominal güç değerinin sürüş boyunca çoğunlukla yeterli olduğu görülmektedir.

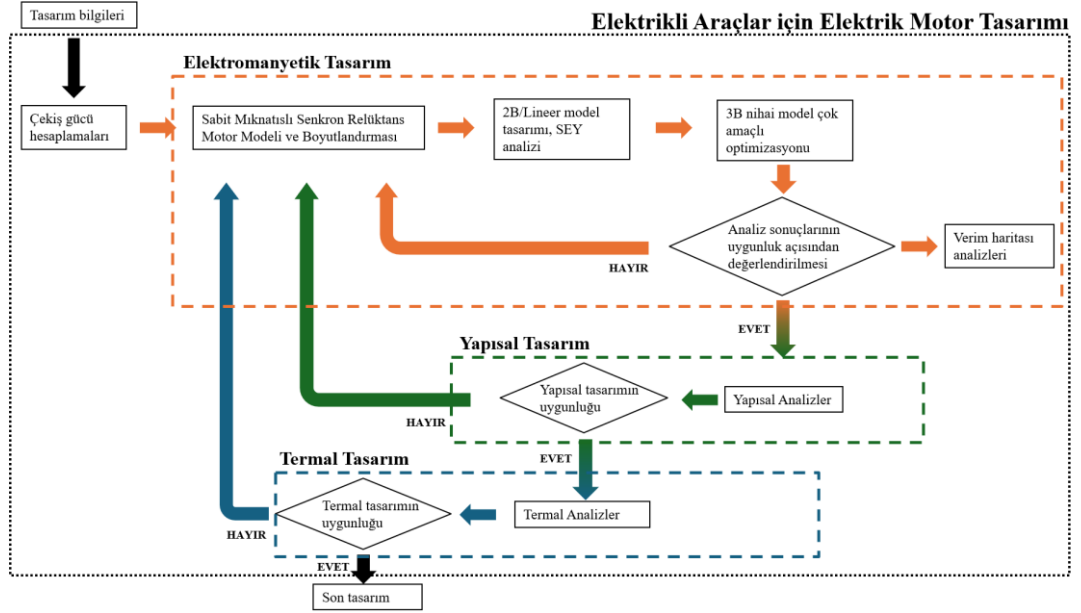
Şekil 3.27.e’de FTP sürüş döngüsünün belirli bir zaman aralığındaki hız değerleri ve referans aracımızın güç eğrisi gösterilmektedir. FTP sürüş döngüsünde şehir içinde trafiğin daha yoğun olduğu bir sürüş dinamiği tercih edilmiştir. Nominal 30 kW güç sınırını nadir geçtiği için motor hesaplamalarının yeterli olduğu görülmektedir. Şekil 3.27.f’de WLTP sürüş çevrimindeki araç performansı verilmiştir. Güç değerleri 30 kW olan nominal güç değerinin altındadır. Grafikler, nominal gücün sürüş için yeterli olduğunu göstermektedir. Nominal güç aşıldığında, motorun tepe gücü performansı önemli olacaktır. Şekil 3.27’de aracımızın literatürdeki sürüş döngüsü standartlarına uygun olarak ihtiyaç duyduğu güç değerleri zamanın bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Tasarlanan bu EAR’nin nominal güç değeri (30 kW), ilgili literatürde açıklanan metodolojiler kullanılarak sürüş testlerinin tamamlanmasıyla da doğrulanmıştır.

3.5. Elektrikli Araçlar için Eksenel Akılı Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarımı

Enerji üretimi ve tüketimin çok önemli olduğu günümüzde, dünya genelinde üretilen elektrik enerjisinin %40’ı endüstriyel uygulamalarda kullanılan elektrik motorları tarafından tüketilmektedir. Bu oran Avrupa Birliği ülkelerinde ise %70’leri bulmaktadır (Gerçekcioğlu & Akar, 2021). Endüstriyel uygulamalarda en çok kullanılan motor tipi de ASM’lerdir. Halen üzerinde çalışmalar yapılan ve üretilen bu motorlara alternatif motor

tasarım çalışmaları da devam etmektedir. Geleneksel AA motorların stator yapısını kullanabilen, rotor tasarımı sebebiyle ASM'lere göre rotor kayıplarını azaltan SRM'ler bu konuda dikkat çekmektedir. SRM, basit yapısı, sağlamlığı, ısınma sorunu olmaması, yüksek tork yoğunluğu ve hız kontrol kolaylığı gibi avantajlara sahiptir (Gerçekcioglu & Akar, 2021).

SRM'ler muadillerine göre sağlamlıkları ve düşük maliyetleriyle ön plana çıkmaktadır. Yüksek hızlarda çalışabilir ve ARM'lere göre daha az titreşim ve gürültüye sahiptir. Rotor kayıplarının az olması sebebiyle daha yüksek verimliliğe sahip olabileceği gibi, ASM'lere göre daha yüksek tork yoğunluğu elde edebileceğini göstermiştir. Rotor nüvesinde sadece ferromanyetik malzeme kullandığı için basit bir yapıya sahiptir ve SMSM'lere göre daha düşük maliyete sahiptir. Yapısında mıknatıs olmaması zorunlu şartlarda çalışmasına ve dayanıklılık seviyesinin artmasına katkı sağlamaktadır (Mahmoudi ve ark., 2020). SRM'lerde diğer motor tiplerinde olduğu gibi EA ve RA olmak üzere iki farklı tasarımla karşılaşılmaktadır. Boyut problemlerinin yaşandığı ve katı sınırlandırılmaların olduğu (örn; fanlar, tekerlek içi çekiş motorları, vb.) uygulamalarda EA motor topolojileri tercih edilmektedir (Pop ve ark., 2018). İki tip motorda da çalışma mantığı aynı iken, sargıların yerleşimi ve buna bağlı olarak akı vektörünün yönü gibi farklılıklar bulunmaktadır. EA topolojisi, elektromanyetik özellikler açısından RA motorlardan daha verimlidir. Akı yolu, RA topolojisine göre daha kısadır ve RA motorlarda uzun stator boyunduruğundan geçen akı, EA motorlarda doğrudan hava aralığından geçerek yolunu tamamlar. Bu özellik EA motorun verimini ve güç yoğunluğunu artırır. EA motorlar, EAR'lerde, pompalarda, fanlarda, santrifüj makine parçalarında, robotlarda ve birçok endüstriyel uygulamada kullanılma avantajı sağlar (Akar ve ark., 2022).



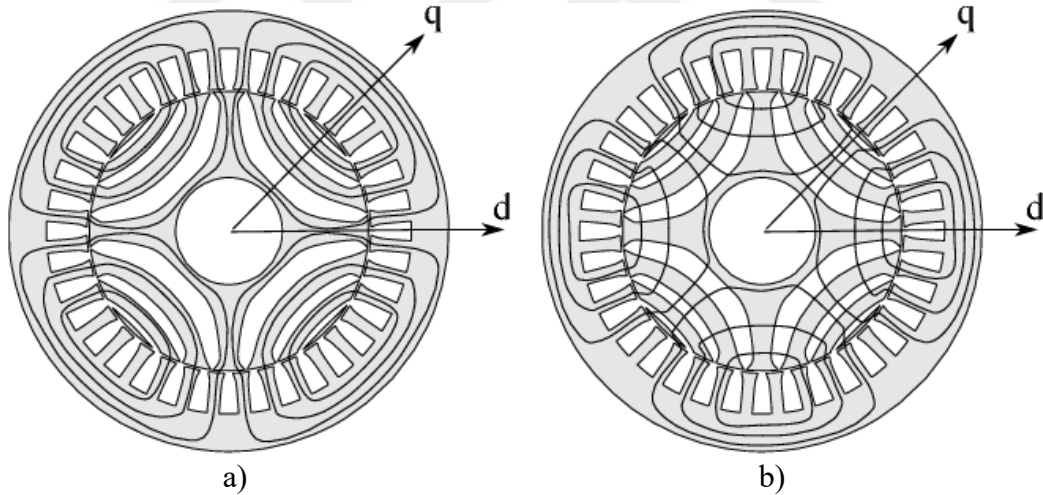
Şekil 3.28. EAR’ler için EA-SMd-SRM tasarım süreci

EAR’ler için EA-SMd-SRM tasarım süreci Şekil 3.28’de verilmiştir. EAR için literatürde bulunan araç parametreleri ve tasarım bilgisi çekiş gücü hesabı yapılmak için kullanılmaktadır. Çekiş gücü araca etkiyen kuvvetler toplamı ve sürüş döngüsü standartlarına göre yapılmaktadır. İhtiyaç duyulan güç, tork ve hız değerleri EA-SMd-SRM tasarım sürecini başlatmaktadır. Matematiksel model ve boyutlandırma analizlerinden elde edilen veriler SEY kullanılarak 2B ve 3B olarak simüle edilmektedir. Başlangıç tasarımı çok amaçlı optimizasyon kullanılarak nihai modele ulaştırılır. Verim haritası değişken hız ve tork için verim, güç, güç faktörü, kayıplar gibi motor performans değerlerinin değişimini test etmektedir. Elektromanyetik analizlerin ardından motorun çok fizikli analizleri gerçekleştirilir. Yapısal analiz mekanik parçaların maruz kaldığı mekanik yükler karşısında uygunluğunu ölçmek için SEY kullanılarak yapılmaktadır. Malzeme tanımı yapısal analiz süreci içinde değişkenlik göstererek yeterlilik konusunda avantaj sağlamaktadır. Yapısal analizin bir parçası da soğutma sistemi uygulanacak motor için sıvı soğutma kanallarının tasarımını içermektedir. Termal analizler yüksek performans koşulları altında kayıplara bağlı ısı açığa çıkaracak motor parçalarını ve soğutma sürecini ele almaktadır. Farklı yüklerde yapılacak analizlerle motor soğutma sisteminin performansını ölçmektedir. Burada sıcaklık açısından sargı ve mıknatıs gibi yüksek sıcaklıkta deformasyona uğrayacak malzemelerin termal sınırların içinde çalışmasını test etmek amaçlanmaktadır. EA-SMd-SRM tasarım süreci elektromanyetik,

yapısal ve termal analizler olmak üzere sınıflandırılrsa da süreç içinde yaşanacak olumsuzluklar süreci motor başlangıç modeli ve boyutlandırma analizine kadar geriye taşıyabilir. Bu nedenle motor performans testleri bütün şartları sağlamış motor modeli üzerinden yapılmalıdır.

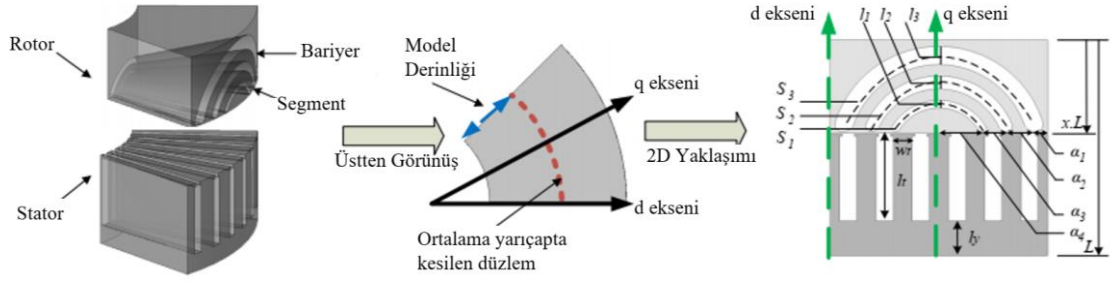
3.5.1. Eksenel akılı senkron relüktans motor tasarımı

SRM'ler rotorunda bulundurduğu bariyerler ile iki eksen (d ve q) arasındaki manyetik geçirgenlik farkına bağlı olarak tork üreten bir çalışma mantığına sahiptir. Bu motorlar Şekil 3.29'da verildiği gibi rotorunda d ve q olmak üzere, sırasıyla yüksek geçirgenliğe ve düşük geçirgenliğe sahip iki akı yolu bulundurmaktadır. Bu eksenlerin endüktanslarının (L_d ve L_q) farkını arttırmak, üretilen torku arttırabilmektedir. Bu farkı arttırmak için de bariyer yapılarının tasarımı ön plana çıkmaktadır (Bianchi, 2013; Gerçekcioglu & Akar, 2021).



Şekil 3.29. SRM ve akı yolları a) d eksen akı yolu (yüksek geçirgenlik), b) q eksen akı yolu (düşük geçirgenlik) (Bianchi, 2013)

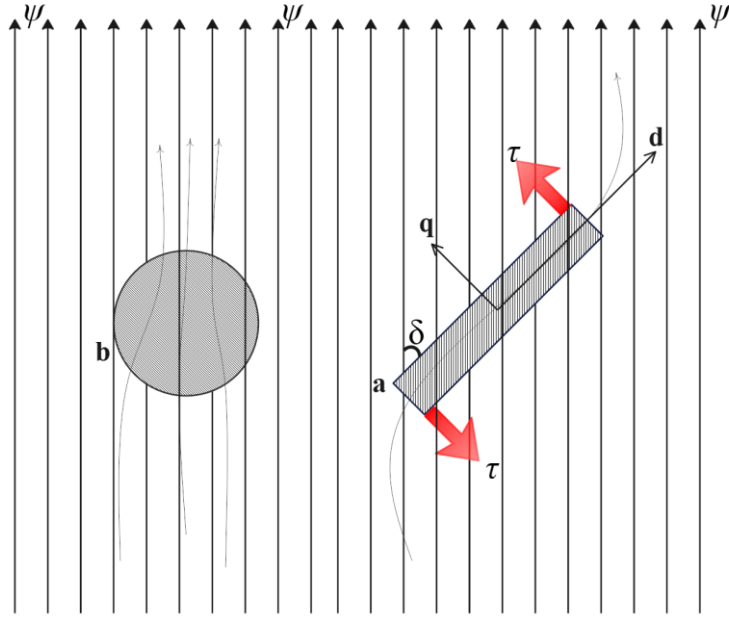
RA-SRM'lerin tork yoğunluğu, yapılarını EA'ya değiştirilerek arttırılabilir. Şekil 3.30'da SRM'lerin EA topolojisi gösterilmektedir. Bu topolojide, stator diski, rotor diskinden eksenel yönde geçen bir akı yoğunluğu üretir (Mahmoudi ve ark., 2020).



Şekil 3.30. EA-SRM topolojisi, 3B ve 2B görünümü (Mahmoudi ve ark., 2020)

EA-SRM tasarımının 3B model görünüşü Şekil 3.30’da verilmiştir. Aynı modelin üstten görünümünde model derinliği ve 2B lineer görünüm için ortalama yarıçaptan kesilen düzlem verilmiştir. 2B model üzerinden de bariyer yapısının yanı sıra d ve q eksenleri gösterilmiştir.

SRM, ASM’ler ile aynı stator yapısını kullanan, moment üretimini rotorunda yer alan relüktans farkının yardımı ile oluşturan AA ile çalışan motorlardır. SRM basit mekanik yapıya sahiptir, mıknatıs içermez, düşük maliyetlidir ve geleneksel AA senkron makineye benzer bir çalışma prensibine sahiptir ancak rotor üzerinde uyarım sargıları yoktur. Bunun yerine rotor yüksek oranda anizotropik bir yapıya sahiptir. Rotor Şekil 3.31’de görüldüğü gibi üzerinde bulundurduğu bariyerli yapı sayesinde relüktans farkı oluşturmaktadır. Sahip olduğu relüktans farkına bağlı olarak tork üretebilmektedir (Lan, 2018). SRM’de rotor üzerinden akım akmamaktadır. Rotor, stator üzerinde akan akım ve oluşan sinüzoidal manyetik alan ile hizaya girmeye çalışacaktır. Stator akımı hem mıknatıslanma hem de alan bozulmasını azaltmaya çalışan tork üretiminden sorumludur. Referans çatıda bu senkronizasyon, rotor d eksen ve stator sargılarının akım vektörü arasındaki açı olan akım açısı kontrol edilerek yapılabilir (Mohanraj ve ark., 2022). Yük açısının sıfır olduğu durumda ($\delta \rightarrow 0$), q eksenindeki bozulma alanını azaltarak tüm sistemin potansiyel enerjisini azaltmak için hareket eden bir tork her zaman olacaktır. Yük açısı sabit tutulursa, elektromanyetik enerji sürekli olarak mekanik enerjiye dönüştürülür (Moghaddam, 2007).



Şekil 3.31. SRM relüktans tork üretimi

SRM'ler akı yolundaki relüktans farkına göre bir relüktans torku üretmektedir. Temel olarak akının düşük relüktansa sahip yolu takip etmesi mantığına dayanmaktadır. Denklem (3.11)'de R relüktans, l iletken uzunluğu, μ_0 havanın geçirgenliği, μ_r ferromanyetik malzemenin geçirgenliği ve A akı yolunun kesit alanı olarak verilmiştir. Elektrik makinelerinin temel yasasına göre akı kaynağa dönerken en düşük relüktansa sahip yolu tercih edecektir. Bu durumda geçirgenlik sabiti havaya göre çok daha yüksek olan ferromanyetik malzemenin relüktansı havaya göre oldukça küçük olacaktır. Şekil 3.31'de de gösterildiği gibi akı nüvenin akı yoluna paralel olduğu şartlarda toplamda daha düşük relüktans, akı yoluna dik olduğu şartlarda ise yol üstündeki hava aralığı maksimum olacağı için yüksek bir relüktansa sahip olacaktır (Bal, 2011).

$$R = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A}; \quad \begin{array}{ll} \delta = 0, \pi, 2\pi, \dots & \text{için } R_{\min} \\ \delta = \pi/2, 3\pi/2, \dots & \text{için } R_{\max} \end{array} \quad (3.11)$$

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{l} = \frac{N^2}{R} \quad (3.12)$$

Denklem (3.12)'de relüktans ile endüktans arasındaki bağlantı formülü verilmektedir. Burada N sarım sayısıdır. Relüktans ile ters orantılı olduğu için yük açısı paralel

durumdayken $L_{\max}$ dik durumdayken $L_{\min}$ elde edilir. Denklem (3.13)'te ise bir L fonksiyonu için maksimum ve minimum değerlerine bağlı bir endüktans formülü çıkarılır (Bal, 2011).

$$L = a + b \cos 2\delta \quad \text{için}; \quad L_{\max} = a + b, L_{\min} = a - b$$

$$\text{ve} \quad L = \frac{1}{2}[(L_{\max} + L_{\min}) + (L_{\max} - L_{\min}) \cos 2\delta] \quad (3.13)$$

Dönen bir rotor için endüktansın değişimi açısal harekete bağlı olarak kosinüs sinyaline benzemektedir. Denklem (3.14)'te bir bobinin üzerinde depolanan enerji formülü verilmiştir. Manyetik alan tarafından üretilen tork ise Denklem (3.15)'te verildiği gibi dairesel harekete göre bu enerjinin açığa bağlı değişiminden üretilmektedir. Denklem (3.13)'te verilen endüktans sinyali denkleme eklendiğinde, Denklem (3.16)'da verilen torkun endüktans ve yük açısına bağlı denklemini ortaya çıkarmaktadır (Bal, 2011).

$$W_c = \frac{1}{2} Li^2 \quad (3.14)$$

$$T = \frac{\partial W_c}{\partial \delta} \quad (3.15)$$

$$T = i^2 \cdot \frac{1}{2} [(L_{\min} - L_{\max}) \sin 2\delta] = -\frac{1}{2} i^2 \Delta L \sin 2\delta$$

$$\delta = w_r t + \delta_0 \text{ ve } i(t) = I_m \cos wt \text{ için};$$

$$T = -\frac{1}{8} \Delta L I_m^2 \left[\sin(2(w_r t + \delta_0)) + \frac{1}{2} \sin(2(w_r t + \delta_0) + \dots \right. \quad (3.16)$$

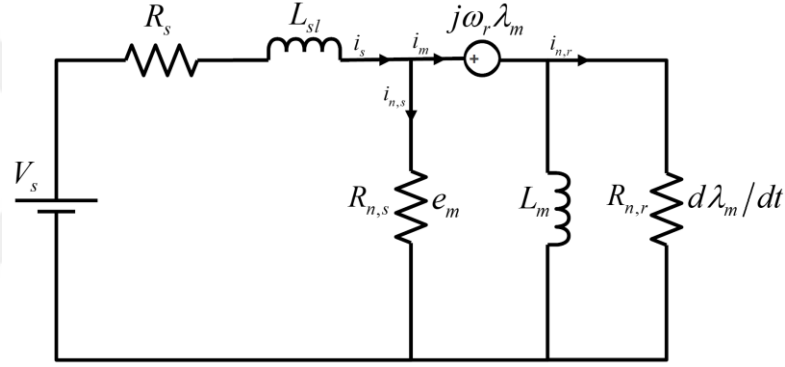
$$\left. \dots 2\delta_0) - \frac{1}{2} \sin(2(w_r t + \delta_0) - 2\delta_0) \right]$$

Denklem (3.16)'da üç farklı sinüzoidal terimin her birinin ortalaması sıfırdır. Sadece $|w_r| = |w_s|$ durumunda son iki terimin ortalaması sıfır olmamaktadır. Bu durumda rotorun saat yönü ve tersinde senkron hızda dönmesi bir tork üretimine sebep olacaktır. Denklem (3.17)'de verilen formüle göre bu torka relüktans torku da denir (Bal, 2011).

$$T = -\frac{1}{8} I_m^2 \Delta L \sin 2\delta \quad (3.17)$$

3.5.1.1. Senkron Relüktans Motor Eşdeğer Devre ve Matematiksel Modeli

SRM, stator sargısı yapısı ASM’lerde olduğu gibi sinüzoidal bir akı dağılımına sahiptir. Bu durumda matematiksel modeli için geleneksel alan sargılı senkron motor modeli temel alınarak bulunabilir. SRM için rotorunda alan sargısı ve kafes yapısı bulunmadığı göz önüne alınarak matematiksel model çıkarılmaktadır. Bu model için hava aralığındaki akı harmonikleri stator kaçak endüktansında ek olarak ifade edilebilir. (Boztaş, 2019; Taghavi, 2015).



Şekil 3.32. SRM eşdeğer devresi

Şekil 3.32’de alan sargıları olmayan senkron makinanın eşdeğer devresi verilmiştir. Devrede V_s kaynak gerilimi, R_s stator sargı direnci, L_{sl} toplam sargı kaçak endüktansı, $R_{n,s}$ stator demir direnci, L_m mıknatıslanma endüktansı, $R_{n,r}$ rotor demir direnci, e_m hava aralığı EMK gerilimi (stator sargısı iç gerilimi), ω_r açısal hız, λ_m hava aralığı akı bağı olarak ifade edilmektedir (Boztaş, 2019; Gunnarson & Johansson, 2022; Moghaddam, 2007).

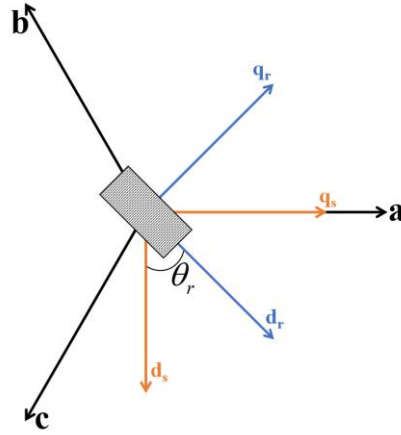
$$V_s = R_s i_s + j\omega_r L_{sl} i_s + e_m \quad (3.18)$$

$$e_m = \frac{d\lambda_m}{dt} + j\omega_r \lambda_m, \quad i_s = i_{ns} + i_m \quad (3.19)$$

Şekil 3.32’de verilen devre modelinin eşitlikleri Denklem (3.18)’de ve Denklem (3.19)’da verilmiştir (Moghaddam, 2007). Sürekli durumda hava aralığı akı bağının değişmeyeceği ve dolayısıyla $\frac{d\lambda_m}{dt}=0$ olacağından demir kayıpları stator direnç kayıplarına eklenebilir ve rotor demir kayıpları ihmal edilmektedir. Toplam sargı kaçak endüktansı mıknatıslanma endüktansına eklenerek L_s stator toplam endüktansını meydana getirmektedir (Boztaş, 2019; Gerçekcioğlu, 2021).

$$V_s = R_s i_s + j\omega_r L_s i_s + j\omega_r \lambda_m \quad (3.20)$$

Denklem (3.20)’de elde edilen eşdeğer devre model eşitliğinin sadeleşmiş hali verilmiştir. Üç fazlı bir makinede faz endüktansları ve ortak endüktanslar zamana ve rotor açısına göre farklılık göstermektedir. Hava aralığı akı bağı ise stator akımı ve değişken endüktanslara bağlı olarak değişime uğramaktadır. Bu durumda makine tasarımında üç fazlı model analizi yapmanın zorluğu sebebiyle devre modeli indirgenmiştir (Tap, 2017).



Şekil 3.33. Üç fazlı iki kutuplu SRM dq eksenine indirgenmiş fazör diyagramı

Şekil 3.33’te üç fazlı iki kutuplu SRM’nin fazlara bağlı ‘ abc ’ referans çerçevede yerleşimi verilmiştir. Relüktans farklarına bağlı olarak rotor ve stator ‘ dq ’ referans çerçeveleri gösterilmektedir. θ_r , rotor elektriksel açısını ifade etmektedir (Gedera, 2019; R. Li, 2022).

Üç faz ‘ abc ’ referans çerçevede matematiksel analizin getirdiği zorluğu aşmak için model Park-Clark dönüşümü ile ‘ dq ’ referans eksenine indirgenerek çözüm basitleştirilmektedir (R. Li, 2022; Tap, 2017).

$$T_{abc \rightarrow dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta_e & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ 0 \end{bmatrix} = T_{abc \rightarrow dq0} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Park-Clark dönüşümü için $T_{abc \rightarrow dq0}$ dönüşüm matrisi Denklem (3.21)'de verilmiştir. Dönüşüm matrisi üç fazlı bir makinede gerilim, akım ve akı gibi değişkenler için kullanılabilir. Bu durumda Denklem (3.22)'de X değişkenleri belirlenerek Park-Clark dönüşümü sağlanmaktadır (Gerçekcioğlu, 2021; R. Li, 2022).

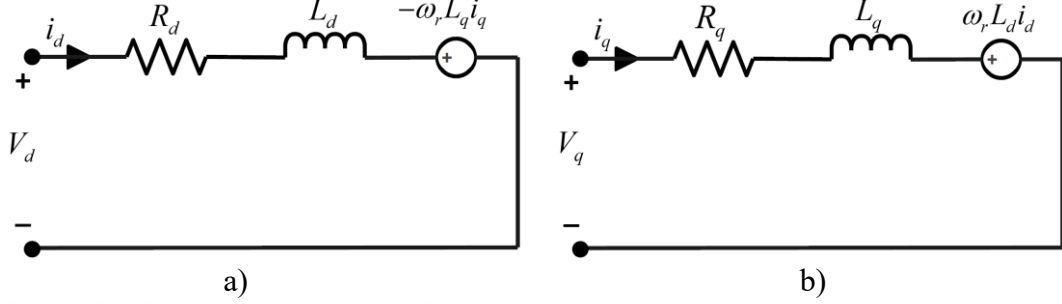
$$V_s = V_d + jV_q, \quad i_s = i_d + ji_q \quad (3.23)$$

$$\lambda_m = L_m i_m = \lambda_d i_{dm} + j\lambda_q i_{qm} \quad (3.24)$$

Park-Clark dönüşümü sonunda gerilim, akım ve endüktans değerlerinin ' dq ' referans eksenindeki eşitlikleri Denklem (3.23)'te verilmiştir (Boztaş, 2019). Manyetik olarak d eksenini doymaya daha yakın haliyle akımın doğrusal bir fonksiyonu olarak değerlendirilmemektedir. Aynı durum q ekseninde doymaya uzak olduğu için endüktansın sabit kalmasını sağlamaktadır (Gerçekcioğlu, 2021; Tap, 2017). Denklem (3.24)'te hava aralığı akı bağı d ve q eksenine bağlı eşitlik verilmiştir. Makine tasarımında d - q eksenleri akı ve endüktansları, çalışma noktasının yanı sıra çapraz kuplaj (cross-coupling) etkisine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. d eksenini endüktansı akım seviyesine göre değiştiği gibi q eksenini akımının d eksenini üzerinde oluşturduğu akı sebebiyle de değişime uğramaktadır. Aynı durum q eksenini için de geçerlidir (Gunnarson & Johansson, 2022).

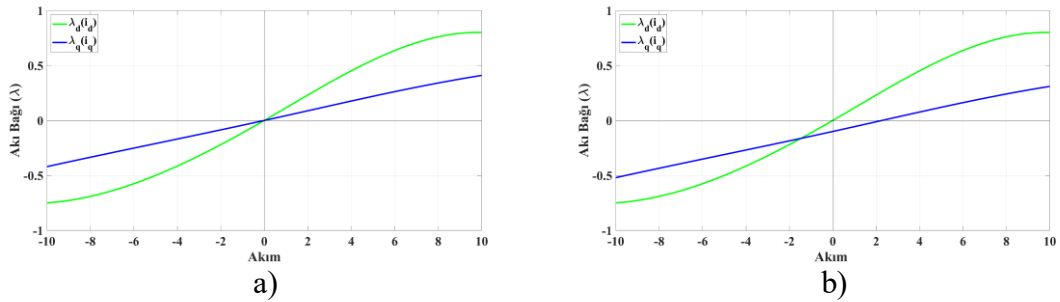
$$\begin{aligned} V_d &= R_d i_d + j\omega_r L_d i_d - \omega_r \lambda_q \\ V_q &= R_q i_q + j\omega_r L_q i_q + \omega_r \lambda_d \end{aligned} \quad (3.25)$$

Denklem (3.20) Park-Clark dönüşümü sonrasında dq referans ekseninde Denklem (3.25) 'te verildiği gibi d ve q eksenlerinde iki eşitlik meydana getirmektedir. Bu eşitliklere bağlı olarak demir kaybı ihmal edilmiş SRM dq eksen eşdeğer modeli Şekil 3.34'te verilmiştir (Boztaş, 2019; Gunnarson & Johansson, 2022; Knebl, 2021).



Şekil 3.34. SRM eşdeğer devre modeli a) d referans eksen, b) q referans eksen

SRM'ler rotor yapısında bulundurduğu bariyer yapısı sayesinde relüktans farkına bağlı tork üretmektedir. Ayrıca güç faktörü ve motor performansına doğrudan katkıda bulunmaktadır. Yapısal avantajı sayesinde bariyerlerine yerleştirilen mıknatıslarla mıknatıs destekli olarak tasarlanmaktadır. Özellikle yüksek tork-güç yoğunluğu ihtiyacının olduğu çalışmalarda tercih edilmektedir (Payza, 2018). SMD-SRM'lerde q eksen akı bağına negatif şekilde etki eden mıknatıs akı bağı eklenmektedir. Bu durumda q eksen endüktansı azalmaktadır (Bozkurt, 2021; Dulanto, 2015).

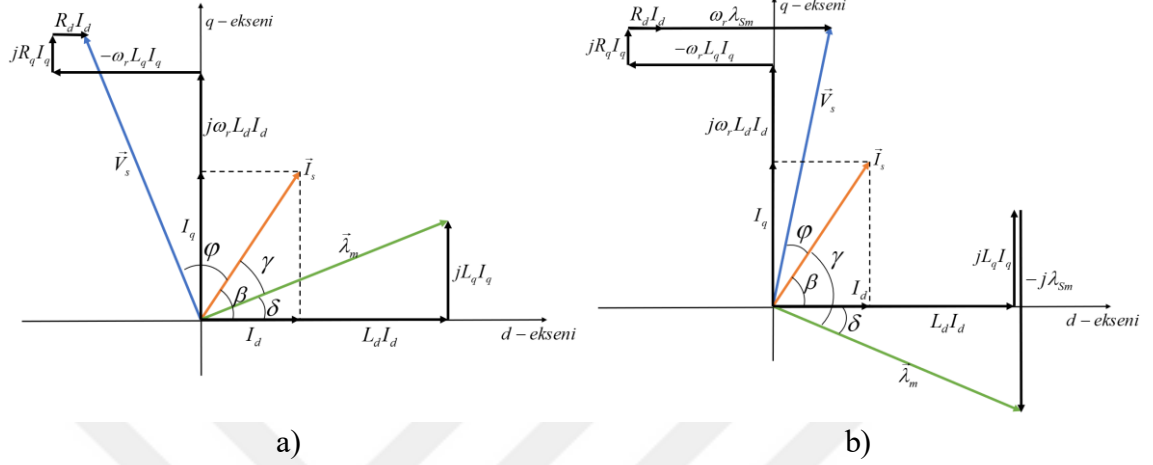


Şekil 3.35. Akıma bağlı d ve q eksenlerinde hava aralığı akı bağına değişimi, a) SRM, b) SMD-SRM

$$\lambda_d = L_d i_d, \quad \lambda_q = L_q i_q - \lambda_{Sm} \quad (3.26)$$

Şekil 3.35'te hava aralığı akı bağına d ve q eksenlerinde SRM ve SMD-SRM için değişimi gösterilmiştir. Şekil 3.35.b'de q eksen akı bağı λ_q değerinin mıknatıs akı bağı λ_{Sm} kadar azaldığı görülmektedir. Aynı durum Denklem (3.26)'da izah edilmektedir. Hava aralığı akı bağındaki değişime bağlı olarak SRM ve SMD-SRM için eşdeğer devre

eşitliği ve vektör diyagramı değişmektedir. Şekil 3.36’da SRM ve SMd-SRM’nin dq eksenine indirgenmiş eşdeğer devre modellerinden elde edilmiş vektör diyagramları verilmiştir (Bozkurt, 2021; Dulanto, 2015; Knebl, 2021).



Şekil 3.36. Vektör diyagramı, a) SRM, b) SMd-SRM

φ : Stator gerilimi ve stator akımı arasındaki açı

β : Akım vektörü ile d ekseninde kalan akım açısı

γ : Akım vektörü ile akı vektörü arasındaki açı tork açısı

δ : Akı vektörü ile d ekseninde kalan akım açısı

SRM tasarımı dq eksenleri arasındaki relüktans farkına bağlı gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla d ve q eksenlerindeki endüktans değerleri ve bariyer tasarımı motor performansı için önemli bir etkidir. SRM için d ve q ekseninde endüktanslarının oranı çıkıntı oranı $\xi = \frac{L_d}{L_q}$ olarak isimlendirilmektedir. Çıkıntı oranının artması üretilen torkun ve güç faktörünün artmasına katkıda bulunmaktadır (Bozkurt, 2021; Payza, 2018).

$$T = \frac{3}{2} p (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (3.27)$$

$$T = \frac{3}{2} p (L_d - L_q) I_s^2 \sin(2\beta)$$

SRM’lerde elektromanyetik tork T üretmek dönen rotorun stator manyetik alanı yönünde hizalanmaya çalışmasına bağlıdır. Bu durumda tork, akım ve hava aralığı akısına dolayısıyla dq eksenleri endüktans farkına göre değişmektedir. Denklem (3.27)’de p kutup çiftini ifade etmektedir (Bozkurt, 2021; Mohanarajah, 2019; Payza, 2018).

Tasarımda maksimum torku elde etmek için en uygun akım açısının belirlenmesi gerekmektedir. SRM kontrolünde bu MTPA açısı olarak ifade edilmektedir (Ingemansson & Kambrin, 2022; Mohanarajah, 2019). Smd-SRM’de ise relüktans torkuna ek olarak mıknatıs torku verilmektedir. Bu durumda tork formülü Denklem (3.28)’de gösterildiği güncellenmektedir (Bozkurt, 2021; Moghaddam, 2011; Payza, 2018).

$$T_{Smd-SRM} = \frac{3}{2} p (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d + \lambda_{Sm} i_d) \quad (3.28)$$

Diğer performans parametrelerinden biri de güç faktörüdür ve doğrudan çıkıntı oranıyla orantılı olarak değişmektedir. SRM’lerde genellikle düşük görülen güç faktörü çıkıntı oranının arttırılmasıyla optimize edilmeye çalışılır (Mohanarajah, 2019).

$$GF = \cos(\varphi) = \frac{P_e}{S} = \frac{V_d i_d + V_q i_q}{|V_s| |I_s|} \quad (3.29)$$

Güç faktörü GF Denklem (3.29)’da verildiği gibi aktif gücün P_e görünür güce S oranı olarak ifade edilmektedir. Gerilim ve akım vektörleri arasındaki açıya bağlı olarak değişmektedir. SRM’lerde güç faktörü düşüklüğü çıkıntı oranının artması ve φ açısının azalmasıyla önlenmektedir. Smd-SRM’lerde ise rotor bariyerlerine eklenen mıknatıslar L_q değerinin azalmasına dolayısıyla GF ’nin artmasına sebep olmaktadır (bkz. Şekil 3.36.b) (Bozkurt, 2021; Gunnarson & Johansson, 2022; Moghaddam, 2007). İç (hava aralığı ya da görünür) güç faktörü IGF ise çıkıntı oranı ve akım açısına bağlı olarak Denklem (3.30)’da verildiği gibi hesaplanmaktadır (Moghaddam, 2007; Mohanarajah, 2019).

$$IGF = \frac{(\xi - 1)}{\sqrt{\xi^2 (\sin(\beta))^{-2} + (\cos(\beta))^{-2}}} \quad (3.30)$$

$$IGF_{\max} = \frac{\xi - 1}{\xi + 1} \quad (3.31)$$

Maksimum iç güç faktör değeri akım açısının $\beta = \tan^{-1}(\sqrt{\xi})$ eşitliğine bağlı olarak Denklem (3.31)'de verilmiştir. Bu durumda çıkıntı oranı arttıkça IGF artacaktır (Eser, 2024). SMd-SRM'lerde iç güç faktörü değeri mıknatıs akısının eşitliğe dahil edilmesiyle Denklem (3.32)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Moghaddam, 2011).

$$IGF_{SMd-SRM} = \frac{\cos(\beta) \left((\xi - 1) \sin(\beta) - \frac{\lambda_{sm}}{L_q i_q} \right)}{\sqrt{\xi^2 (\cos^2(\beta)) + \left(\sin(\beta) + \frac{\lambda_{sm}}{L_q i_q} \right)^2}} \quad (3.32)$$

SRM'lerde rotor anizotropik yapısı dolayısıyla tork dalgalanması tasarımı etkileyen önemli faktörlerden biridir. Tork dalgalanması demir kayıplarının artmasını, mekanik titreşimlerin oluşmasını ve akustik gürültülere sebep olmaktadır. Stator oluklarından kaynaklanan tork dalgalanmasının birinci harmoniğine bağlı tork denklemi rotor pozisyonuna bağlı olarak Denklem (3.33)'te verilmiştir (Bozkurt, 2021; Eser, 2024).

$$T(\theta) \cong \frac{3}{2} p (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) + \frac{1}{2} (i_d \frac{\partial \lambda_d}{\partial \delta} + i_q \frac{\partial \lambda_q}{\partial \delta}) \quad (3.33)$$

SMd-SRM'ler için tork dalgalanmasına ek olarak vurutu momentini azaltmak tasarım inceliklerindendir. Vurutu momenti yüksüz durumda rotor mıknatısları ile stator dişleri arasındaki etkileşimden meydana gelmektedir (Mohanarajah, 2019).

$$T_{vur} = \frac{\partial \left(\frac{1}{2\mu} \left(\int_v B^2 dv \right) \right)}{\partial \delta_{(r)}} \quad (3.34)$$

Denklem (3.34)'te vurutu momenti T_{vur} , stator dişleri akı yoğunluğu B ve manyetik geçirgenliğine μ ve açısal değişime bağlı olarak hesaplanmaktadır (Mohanarajah, 2019). SRM tasarım kriterlerinden bir diğeri performans karakteristiğini doğrudan etkileyen güç ve verim değerleridir. Verim çıkış gücünün giriş gücüne oranı olarak hesaplanabilir. Çıkış

ve giriş gücü arasındaki farkı meydana getiren kayıp güç değerlerini azaltmak SRM verimini arttıracaktır (Ingemansson & Kambrin, 2022; Mohanarajah, 2019).

$$P_{out} = T.\omega_r \quad (3.35)$$

$$P_{his} = k_h B_m^2 f \quad (3.36)$$

$$P_{gird} = k_g B_m^2 t^2 f^2 H \quad (3.37)$$

$$P_a = k_a f^{3/2} B_m^{3/2} \quad (3.38)$$

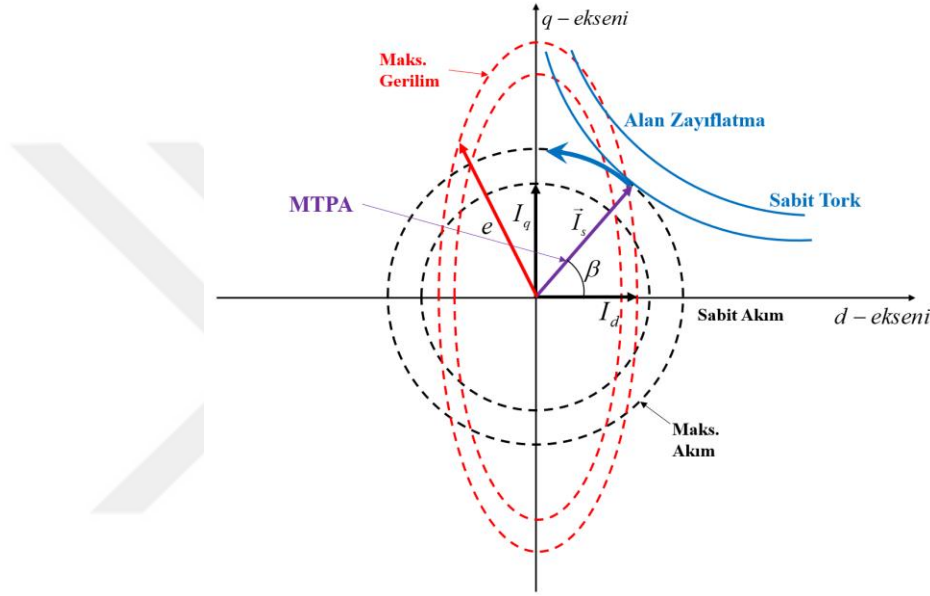
$$P_b = 3R_s I_{rms}^2 \quad (3.39)$$

Denklem (3.35)'te tork ve açısal hıza bağlı değişen çıkış gücü P_{out} verilmiştir. Çıkış gücünün azalmasına neden olan demir kayıpları SRM'lerde histerezis, girdap (eddy) ve anormal (yüksek frekans girdap kayıpları) kayıplar olarak incelenmektedir. Denklem (3.36)'da histerisiz sabiti k_h , akı yoğunluğu genliği B_m ve frekansa f bağlı olarak histerisiz kayıpları P_{his} hesaplanmaktadır. Denklem (3.37)'de girdap akımı kayıpları P_{gird} , histerisiz kayıplarından ayrı olarak girdap akımı sabiti k_g , demir laminasyon kalınlığına t ve manyetik malzeme hacmine H bağlı olarak değişmektedir. Yüksek frekanslarda oluşacak kayıp P_a ise Denklem (3.38)'de verilmiştir. Motorlarda yüksek kayba sebep olan bakır kayıpları P_b ise sargı direnci ve akımına göre hesaplanmaktadır (Bozkurt, 2021; Eser, 2024; Ingemansson & Kambrin, 2022; Payza, 2018).

$$\eta(\%) = 100 \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{his} + P_{gird} + P_a + P_b} \quad (3.40)$$

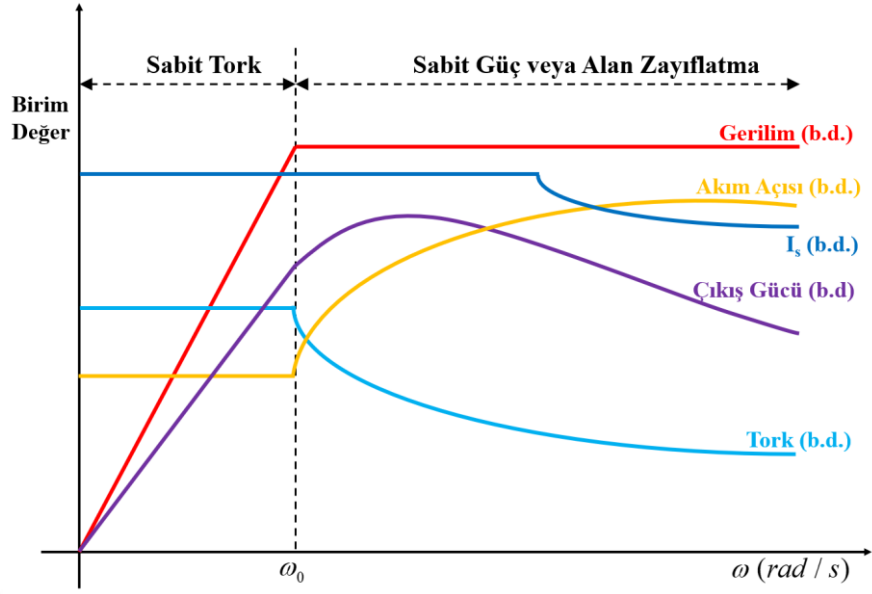
Kayıplara ve çıkış gücüne bağlı verim η formülü Denklem (3.40)'da verilmiştir. Tasarım aşamasında yüksek verim tork-amper dengesine T/I bağlı olarak değişmektedir. Akıma bağlı yüksek bakır kayıplarının yanında demir kayıpları ihmal edilebilecek seviyede olmasına rağmen frekansa bağlı yüksek hızlarda demir kayıplarının da etkisi ihmal edilmemelidir (Eser, 2024).

SRM kontrolünün sağlanması için değişken hızlarda Değişken Hız Sürücüsü (VSD-Variable Speed Drive) kullanılmaktadır. VSD, Alan Yönlendirmeli Kontrol (FOC-Field Oriented Control) algoritması kullanarak SRM'yi vektörel olarak kontrol etmektedir. Şekil 3.37'de SRM akım vektörünün dq düzleminde gösterimi verilmiştir. İdeal bir makinede besleme frekansının sabit olduğu düşünülerek maksimum tork MTPA bölgesinde akım açısının 45° olduğu görülmektedir. MTPA ve alan zayıflatma bölgeleri maksimum akım ve gerilim sınırlarına göre belirlenmiştir (Mohanarajah, 2019) .



Şekil 3.37. Alan yönlendirmeli kontrol (FOC) için SRM'nin dq akım düzlemi (Mohanarajah, 2019)

Düşük ve orta hızlarda MTPA yöntemi ile ayarlanan akım açısı sabit tork sağlayarak tork verimliliğini arttırmaktadır. Nominal hıza kadar olan bu bölümde motor manyetik alanı dolayısıyla i_d sabit tutulmaktadır. Nominal hıza kadar olan bu süreçte tork ve hava aralığı manyetik alanı sabit tutulmuştur. Ayrıca terminal gerilimi maksimum seviye ulaşmıştır. Daha yüksek hızlara çıkıldığında ise indüklenen gerilimin artışı inverter destekleyemeyecek seviyeye gelmektedir. Bu durumda alan zayıflatma yöntemi ile hava aralığı manyetik alanı azaltılır ve motor hızının artışıyla indüklenen gerilim seviyesi sabit tutulmaya çalışılmaktadır. Bu yöntem motor kontrolünde alan zayıflatma veya akı zayıflatma yöntemi denmektedir. Yüksek hızlarda alan zayıflatma i_d akımını azaltarak rotor akısını zayıflatma mantığıyla çalışmaktadır. Bunun için de akım açısı artırılmaktadır (Mohanarajah, 2019).



Şekil 3.38. Hıza bağlı MTPA ve alan zayıflatma bölgelerinde SRM göstergeleri (Mohanarajah, 2019)

MTPA ve alan zayıflatma bölgeleri hızın değişimine bağlı olmak üzere sırasıyla sabit tork ve sabit güç bölgesi olarak da ifade edilmektedir. Şekil 3.38’de hıza bağlı olarak SRM’nin gerilim, akım, akım açısı, tork ve çıkış gücü değerlerinin birim değerinde değişimi verilmiştir. Sabit tork bölgesinde akım ve akım açısının sabit tutulup maksimum torkun elde edildiği görülmektedir. Bu aşamada güç ve gerilim hızla doğru orantılı olarak artış göstermektedir. Nominal hız ω_0 sonrasında ise alan zayıflatma yöntemi kullanılmıştır. Hızın artmasına rağmen gerilim seviyesi sabit tutulmuş, akım açısı artırılarak i_d dolayısıyla rotor akısı azaltılmıştır. Bu durum torkun azalmasına sebep olmaktadır (Mohanarajah, 2019).

3.5.1.2. Eksenel Akılı Senkron Relüktans Motor Analitik Hesaplamaları

EA makineler yüksek tork-güç yoğunluğuna sahip makinelerdir. Daha düşük hacim ve daha düşük atalet momentine sahip bu makineler RA muadillerine göre daha iyi soğutma performansı göstermektedir. Uygun çap/uzunluk oranı sayesinde birbirinden farklı uygulamalar için tercih edilebilmektedir. Özellikle kısa eksenel uzunluk tasarım ve kullanım açısından kritik özellik taşımaktadır (Bitsi ve ark., 2020).

Önceki bölümde belirlenen referans araç ve üzerine etkiyen kuvvetler sayesinde çeşitli durumlarda ihtiyaç duyulan güç hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalara göre tercih edilen güç ve hız değerinde motor başlangıç parametreleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Motor başlangıç parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Motor Gücü	W	30 000
Verim	%	>92
Güç Faktörü	-	0.7
DA Bara Gerilimi	V	400
Senkron Hız	dev/dk	3 000
Faz Sayısı	3	3
Stator Bağlantı Tipi	-	Yıldız
Kutup Çifti	-	4

Motor gücü, motor hızının yanı sıra aracın hedeflenen performans verileri olarak verim ve güç faktörü değerleri de Çizelge 3.5'te verilmiştir. Kutup çifti dört (sekiz kutup) olarak belirlense de kutup sayısının verim, güç faktörü ve ortalama tork üzerinde etkisi bilindiğinden farklı kutup sayısında analizler gerçekleştirilmiştir (Bitsi ve ark., 2020). Başlangıç tasarımı için sekiz kutup model tercih edilmiştir.

$$f = \frac{2 \cdot p \cdot n_{rpm}}{120} \quad (3.41)$$

$$I_{in} = \frac{P_{out}}{\sqrt{3} \cdot V_{in} \cdot \eta \cdot \cos(\varphi)} \quad (3.42)$$

Denklem (3.41)'de p kutup çifti ve n_{rpm} devir sayısı belirlenmiş olan motorun frekansı f hesaplanmıştır. Denklem (3.42)'de ise I_{in} , stator faz akımını (yıldız bağlantı) temsil etmektedir. Faz akımı; çıkış gücü P_{out} , giriş faz gerilimi V_{in} , verim η ve güç faktörüne $\cos(\varphi)$ göre hesaplanmaktadır (Boldea, 2020).

EA motorlarda manyetik alan mile paralel oluşmaktadır. Yapısı gereği de dış çaptan iç çapa doğru yaşanan daralma önemli bir faktör haline gelmektedir. Stator iç çapın dış çapa oranı k_d olarak verilmiştir. (Gieras ve ark., 2004), k_d oranının $1/\sqrt{3}$ olarak tasarıma dahil edilebileceğini öngörmüştür. Maksimum momente ulaşmak için farklı kutup sayılarında k_d oranı değişebilmektedir (Özsoy, 2023).

$$k_d = \frac{D_{in}}{D_{out}}, \quad k_D = \frac{1}{8}(1+k_d)(1-k_d^2) \quad (3.43)$$

Motor boyutlandırması için diğer bir değişken k_D Denklem (3.43)'te verilmiştir. Motor iç çapının D_{in} , dış çapa D_{out} oranı k_d olarak özellikle iç çap ölçüsünün belirlenmesinde kullanılmaktadır. k_D ise k_d oranına bağlı bir değişken olarak verilmiştir. k_D tasarım aşamasında güce bağlı dış çap hesaplaması için önemli bir faktördür.

RA motorlarda iç çap ve paket boyu ile doğru orantılı ($\propto D_{in}^2 L$) olan güç değeri EA motorlarda dış çapın küpü ($\propto D_{out}^3$) ile orandır. Denklem (3.44)'te verilen parametrelere göre dış çap hesaplanmıştır (Gieras ve ark., 2004).

$$D_{out} = \sqrt[3]{\frac{\varepsilon.P_{out}.60}{\pi^2.k_D.k_{w1}.n.B_{mg}.A_m.\eta.\cos(\varphi)}} \quad (3.44)$$

Motorun dış çapını hesaplarken literatüre göre bazı kabuller kullanmak gerekmektedir.

Buna göre Denklem (3.44)'te sargılardaki Zıt-EMK'nin faz gerilimine oranı $\varepsilon = \frac{E_f}{V_{in}}$, sargı faktörü k_{w1} , saniyedeki devir sayısı n , hava aralığındaki maksimum akı yoğunluğu B_{mg} , metre başına düşen akım değer A_m olarak verilmiştir (Boldea, 2020; Gieras ve ark., 2004).

$$N_1 = \frac{\pi.D_{out}.(1+k_d).A_m}{4.m.\sqrt{2}.I_{in}} = \frac{\varepsilon V_{in}}{\pi\sqrt{2}f k_{w1}\phi_p} \quad (3.45)$$

Stator sarım sayısı A_m 'ye ve sargılardan geçen akıma bağlı olarak hesaplanmaktadır (Prongué ve ark., 2020). Denklem (3.45)'te m faz sayısı olmak üzere bir faza düşen sarım sayısı N_1 olarak hesaplanmaktadır.

$$\phi_p = B_{ort} \frac{\pi}{8p} D_{out}^2 (1-k_d^2) \quad (3.46)$$

$$E_f = \varepsilon.V_{in} = \pi.\sqrt{2}.f.N_1.k_{w1}.\phi_p \quad (3.47)$$

Denklem (3.46)'da manyetik akı ϕ_p , hava aralığı manyetik alan yoğunluğu B_{ort} ve kutup sayısına bağlı olarak hesaplanmıştır. Sargılarda indüklenen Zıt-EMK'nin giriş gerilimine oranı ε yaklaşık olarak 0.9 kabul edilmektedir. Denklem (3.47)'de E_f değerinin frekans, sarım sayısı, sargı faktörü ve manyetik akıya bağlı formülü verilmiştir (Gieras ve ark., 2004).

$$S_1 = 2.p.q.m \quad (3.48)$$

Bir kutupta faz başına düşen oluk sayısı q literatüre göre ikiden büyük değer alabilir ve motor gücüne göre değişiklik göstermektedir (Boldea, 2020). Denklem (3.48)'de ise kutup çifti, bir kutupta faz başına düşen oluk sayısı ve faz sayısına bağlı olarak stator oluk sayısı S_1 hesaplanmaktadır.

$$N_c = \frac{a_p.a_w.N_1}{2.p.q} \quad (3.49)$$

Stator sarım sayısı paralel iletken sayısı a_w ve paralel akım yolu sayısına a_p bağlı olarak bir fazdaki sarım sayısı ile doğru orantılıdır. Denklem (3.49)'da bir bobindeki iletken sayısı N_c formülü verilmiştir (Boldea, 2020). Tasarım aşamasında N_c değerinin yaklaşık değeri hesaplamalara göre belirlenmektedir.

Stator sargılarında sargı kesit alanı ve çapının bulunabilmesi için sargıların akım yoğunluğunun bilinmesi gerekmektedir. Yüksek güçlü ve EAR'ler gibi yüksek performans gerektiren motorlarda yüksek akım ihtiyacı bulunmaktadır. İstenilen performansa ulaşmak için çekilen yüksek akım uzun süreli çalışmada sargıların ısınmasına ve sargılara zarar vermeye başlayacaktır (Ponomarev, 2013).

Çizelge 3.6. Soğutma tipine göre akım yoğunlukları
(Gai ve ark., 2019)

Soğutma şekli	Akım yoğunluğu [A/mm ²]
Konveksiyonel soğutma	1.5-5
Cebri gaz soğutma	Hava
	5-10
Cebri sıvı soğutma	Hidrojen
	7-12
	Dolaylı
	7-20
	Doğrudan
	10-30

Sargı kesit alanını azaltmak ve sargılardan geçen akım yoğunluğunu arttırmak için bazı soğutma yöntemleri kullanılmaktadır. Çizelge 3.6'da soğutma şekline bağlı olarak motorlardaki akım yoğunluğu aralıkları verilmiştir (Gai ve ark., 2019).

$$J_{\cos} = 10 \text{ A/mm}^2 \text{ için; } A_{Co} = \frac{I_{\ln}}{J_{\cos} a_p}; \quad d_{Co} = \sqrt{\frac{4A_{Co}}{\pi}}; \quad d'_{Co} = \sqrt{\frac{4A_{Co}}{\pi a_w}} \quad (3.50)$$

Çizelge 3.6'da verildiği gibi cebri sıvı soğutma yapılması planlanan motor tasarımı için akım yoğunluğu $J_{\cos}$ değeri 10-30 A/mm² aralığında tercih edilmiştir. Nominal güçte başlangıç tasarımı için akım yoğunluğu 10 A/mm² olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Bu durumda Denklem (3.50)'da verildiği gibi sargı kesit alanı A_{Co} akım ve akım yoğunluğuna bağlı olarak hesaplanmaktadır. Sargı kesitini etkileyen bir diğer faktör ise paralel iletken yoludur. Sargı kesit alanının belirlenmesiyle iletken çapı d_{Co} hesaplanmaktadır. Paralel iletken sayısının değişimi iletken çapının da değişmesine sebep olmaktadır (Boldea, 2020).

$$A_{su} = \frac{A_{co} \cdot N_c \cdot q}{k_{fill}} \quad (3.51)$$

Denklem (3.51)'de verildiği gibi stator oluğunda kullanılabilir alan A_{su} sargı kesit alanı, bobindeki iletken sayısı ve faz başına düşen oluk sayısı ile doğru orantılıdır (Gieras ve ark., 2004). Motorlarda oluk genişliğinin değişmemesi ve EA motorların dışarıdan içeriye doğru daralan yapısı gereği dış kalınlığı ölçüsü ciddi değişkenlik göstermektedir. Burada oluk ölçüsünü bulabilmek için öncelikle dış çapa ve iç çapa göre sırasıyla oluk adımı hesaplanmalıdır.

$$B_{mg} = \hat{B}_{mg} \sin(p\theta - w_s t) \quad (3.52)$$

Manyetik akı yoğunluğunun sinüzoidal bir şekilde dağıldığı düşünülürse ortalama akı yoğunluğunu bulmak için kutup başına düşen akının ortalaması bulunabilir. Denklem (3.52)'de $\hat{B}_{mg}$ hava aralığı akı yoğunluğu genliğini, θ mekanik açığı, w_s açısal hızı temsil etmektedir. Hava aralığı akı yoğunluğunun zamana bağlı sinüzoidal değişimi verilmiştir (Bitsi, 2022).

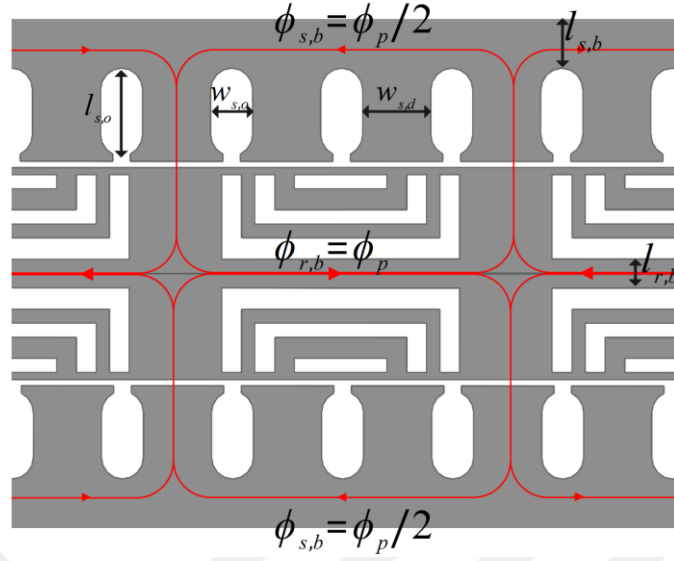
$$B_{ort} = \frac{1}{\pi/p} \int_0^{\pi/p} B_{mg} \sin(pa) da = -\frac{1}{\pi} B_{mg} [\cos \pi - \cos 0] = \frac{2}{\pi} B_{mg}$$

$$a_i = \frac{B_{ort}}{B_{mg}} = \frac{2}{\pi} \quad (3.53)$$

Bir kutup başına düşen ortalama akı yoğunluğunun (B_{ort}), hava aralığı akı yoğunluğuna (B_{mg}) oranı a_i sabiti olarak Denklem (3.53)'te verilmektedir (Gieras ve ark., 2004). Ortalama akı yoğunluğu ve manyetik iletken nüve kesit alanına bağlı olarak ortalama akı hesaplanabilmektedir.

$$\phi_p = B_{ort} \frac{\pi}{8p} (D_{out}^2 - D_{in}^2) \quad (3.54)$$

Kutup başına düşen hava aralığı manyetik akısı ϕ_p Denklem (3.54)'te verildiği gibi hesaplanan yüzey alanı ile ortalama akı yoğunluğunun çarpımının kutup sayısına bölünmesiyle bulunmaktadır (Gieras ve ark., 2004). Hesaplanan hava aralığı manyetik akısı stator ve rotor nüvesinde devresini tamamlayan manyetik akıyı bulmak için kullanılmaktadır (Bitsi, 2022).



Şekil 3.39. EA-ÇS-SRM manyetik akı yolları

Şekil 3.39’da NN tipi EA makinenin akı dağılımı gösterilmektedir. Çift hava aralığına sahip EA-ÇS-SRM’nin hava aralığından ϕ_p kadar akı geçmektedir. Rotor boyunduruğunda ($\phi_{r,b} = \phi_p$) ve stator boyunduruğunda ($\phi_{s,b} = \phi_p/2$) akı geçişi görülmektedir (Bitsi ve ark., 2020).

$$\phi_{s,t} = \frac{\pi \cdot (D_{out}^2 - D_{in}^2) \cdot \hat{B}_{mg}}{4 \cdot S_1} \quad (3.55)$$

Hava aralığı akısı bulunurken hava aralığı akı yoğunluğunun sinüzoidal bir dalga olduğu kabul edilmiş ve ortalaması alınmıştır. Stator boyunduruğundan geçecek akı için yine B_{ort} kullanılmaktadır. Stator dişlerinde hava aralığı akısının ortalama değil maksimum olduğu kabul edilebilir. Denklem (3.55)’te görüldüğü gibi stator dişlerindeki akı bulunurken hava aralığı akısının genliği kullanılmıştır.

$$l_{s,b} = \frac{2 \cdot \phi_{s,b}}{(D_{out} - D_{in}) \cdot \hat{B}_{mg,b} \cdot C_{s,lam}} = \frac{\hat{B}_{mg} \cdot (D_{out} + D_{in})}{p \cdot \hat{B}_{mg,b} \cdot C_{s,lam}} \quad (3.56)$$

Denklem (3.56)'da stator boyunduruğu eksenel uzunluğunun ($l_{s,b}$) bulunması için stator boyunduruk maksimum akı yoğunluğu $\hat{B}_{mg,b}=1.55$ T olarak kabul edilir. Laminasyon katsayısı $C_{s,lam}=0.96$ olarak denkleme eklenmiştir (Bitsi ve ark., 2020; Boldea, 2020).

$$t_{1min} = \frac{\pi \cdot D_{in}}{S_1}, t_{1max} = \frac{\pi \cdot D_{out}}{S_1}, \quad w_{so,in} \approx \frac{B_{mg} \cdot t_{1min}}{B_{sd,max}} \quad (3.57)$$

Oluk adımı bir oluk ve bir dış kalınlığının toplamına verilen isimdir. Denklem (3.57)'de minimum oluk adımı t_{1min} ve maksimum oluk adımı t_{1max} sırasıyla stator iç çap çevresinin ve dış çap çevresinin oluk sayısına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Silikon lamine çelik materyal için maksimum akı yoğunluğunun $B_{sd,max}$ (<2.2 T) hava aralığı maksimum akı yoğunluğuna oranı minimum oluk adımının minimum dış kalınlığına $w_{so,in}$ (stator iç çap dış kalınlığı) oranına yaklaşık olarak eşit olduğu kabul edilmektedir (Gieras ve ark., 2004).

$$w_{s,o} = t_{1min} - w_{sd,in}; \quad w_{sd,out} = t_{1max} - w_{s,o} \\ B_{sd,min} \approx \frac{B_{mg} \cdot t_{1max}}{w_{sd,out}} \quad (3.58)$$

Denklem (3.58)'de oluk kalınlığı $w_{s,o}$ minimum dış kalınlığının oluk adımından çıkarılmasıyla hesaplanmaktadır. Oluk ölçüsünün stator çap değişimine rağmen sabit kalması sebebiyle maksimum dış kalınlığı $w_{sd,out}$, oluk kalınlığının maksimum oluk adımından çıkarılmasıyla hesaplanmaktadır. Stator dişlerinin maksimum kalınlığında en düşük akı yoğunluğu oluşacağı düşünülerek; maksimum dış kalınlığının maksimum oluk adımı değerine oranı, minimum akı yoğunluğunun $B_{sd,min}$ maksimum hava aralığı akısına oranı yaklaşık olarak eşittir (Gieras ve ark., 2004).

$$h_{s,o} = \frac{A_{su}}{w_{s,o}} \quad (3.59)$$

Denklem (3.59)'da oluk alanı (A_{su}) oluk genişliğine ($w_{s,o}$) bölünerek stator oluk yüksekliği $h_{s,o}$ hesaplanmaktadır (Bitsi, 2022; Gieras ve ark., 2004).

$$S_{elm} = \frac{\varepsilon \cdot P_{out}}{\eta \cdot \cos \varphi} = \pi^2 \cdot k_D \cdot k_{w1} \cdot \frac{n}{60} \cdot B_{mg} \cdot A_m \cdot \eta \cdot D_{out}^3 \quad (3.60)$$

Görünür elektromanyetik güç Denklem (3.60)'da çıkış gücü, Zıt-EMK, verim ve güç faktörüne bağlı olarak hesaplanmaktadır (Özsoy, 2023).

$$T_d = \frac{S_{elm} \cdot 60 \cdot \cos \psi}{2 \cdot p \cdot n} \quad (3.61)$$

Denklem (3.61)'de maksimum elektromanyetik tork T_d hesaplanmaktadır. Stator akımı ve Zıt-EMK arasındaki açı ψ olarak verilmiştir. Maksimum elektromanyetik tork için $\psi = 0$ tercih edilmiştir.

Sargı direncini hesaplamak için öncelikle sargı boyu ve iletkenin çalışma sıcaklığındaki direncini belirlemek gerekmektedir.

$$L = \frac{(D_{out} - D_{in})}{2}, \quad L_c = 2(L + l_{end}) \quad (3.62)$$

Denklem (3.62)'de stator radyal uzunluğu (L) stator çap ölçüleri kullanılarak hesaplanmıştır. Disk şeklindeki motorlar için ortalama sargı sonu uzunluğu l_{end} olarak ifade edilmiştir (Gieras ve ark., 2004). Bu durumda sargı uzunluğu stator radyal uzunluğu ve sargı sonu uzunluğunun toplamının iki katı olarak hesaplanmıştır.

$$(\rho_{cu})_{\theta} = (\rho_{cu})_{20^{\circ}C} \left(1 + \frac{1}{273}(\theta - 20)\right) \quad (3.63)$$

HEAR'ler içinde de kullanılan elektrik makineleri için maksimum sargı sıcaklığı 180 °C'ye izin verilen H termal sınıfı sargılar seçilmiştir. Sargılarda kullanılacak bakır iletkenin 180 °C'deki direncini hesaplamak için öncelikle bu sıcaklıktaki öz direncinin

hesaplanması gerekmektedir (Amirian, 2010). Bakırın 180 °C'deki öz direncini hesaplamak için Denklem (3.63) kullanılmaktadır (Özsoy, 2023).

$$R_s = \rho_{cu} \frac{L_c \cdot N_1}{A_{co} \cdot a_p} \quad (3.64)$$

Bu durumda stator sargı direnci R_s Denklem (3.64)'te verildiği gibi sargı uzunluğu, bir fazdaki sarım sayısı, sargı kesit alanı ve paralel iletken yolu sayısına bağlı olarak hesaplanmaktadır (Boldea, 2020).

Stator kaçak reaktansı X_1 ; oluk kaçak reaktansı X_{1s} , sargı sonu reaktansı X_{1e} ve yüksek harmoniklere bağlı olarak türevsel kaçak reaktansın X_{1d} toplamı olarak ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} X_1 &= X_{1s} + X_{1e} + X_{1d} \\ &= 4\pi f \mu_0 \frac{L(N_i)^2}{pq} (\lambda_{1s} k_{1x} + \frac{l_{1in}}{L} \lambda_{1ein} + \frac{l_{1out}}{L} \lambda_{1eout} + \lambda_{1d}) \end{aligned} \quad (3.65)$$

Denklem (3.65)'te stator kaçak reaktansı formülü verilmiştir. Bu denklemde μ_0 manyetik geçirgenlik, k_{1x} deri etkisi (skin effect) sabiti olarak verilmiştir. λ_{1s} , λ_{1ein} , λ_{1eout} ve λ_{1d} sırasıyla oluk kaçağı, iç çap sargı sonu kaçağı, dış çap sargı sonu kaçağı ve türevsel kaçak geçirgenlik sabiti olarak verilmiştir. l_{in} ve l_{out} iç çap ve dış çap sargı sonu uzunluğu olarak verilmiştir ve $l_{in} = l_{out} = l_{end}$ (bkz. Denklem (3.62)) olarak alınmıştır (Gieras ve ark., 2004).

$$\lambda_{1s} = 0.1424 + \frac{h_{11}}{3b_{11}} + \frac{h_{12}}{b_{12}} + 0.5 \arcsin[\sqrt{1 - (\frac{b_{13}}{b_{12}})^2}] + \frac{h_{14}}{b_{13}} \quad (3.66)$$

Denklem (3.66)'da oluk kaçak geçirgenlik sabiti λ_{1s} oluk ölçülerine göre verilmiştir. Denklemde $h_{11} = h_{s,o}$ oluk yüksekliğini belirtmektedir. Oluk ağız yüksekliği ve oluk üst yüksekliği sırasıyla h_{13} ve h_{14} olarak verilmiştir. Oluk alt genişlik, oluk üst genişlik ve

oluk ağız genişliği sırasıyla b_{11} , b_{12} ve b_{13} olarak verilmiştir. Oluk genişliği $b_{11} = b_{12} = w_{s,o}$ olarak hesaplamalar yapılmaktadır (Gieras ve ark., 2004)

$$\lambda_{1ein} \approx \lambda_{1eout} \approx 0.21q(1 - \frac{2w_c}{\pi l_{1end}})k_{w1}^2 \quad (3.67)$$

$$\lambda_{1e} = \lambda_{1ein} + \lambda_{1eout} \approx 0.3q$$

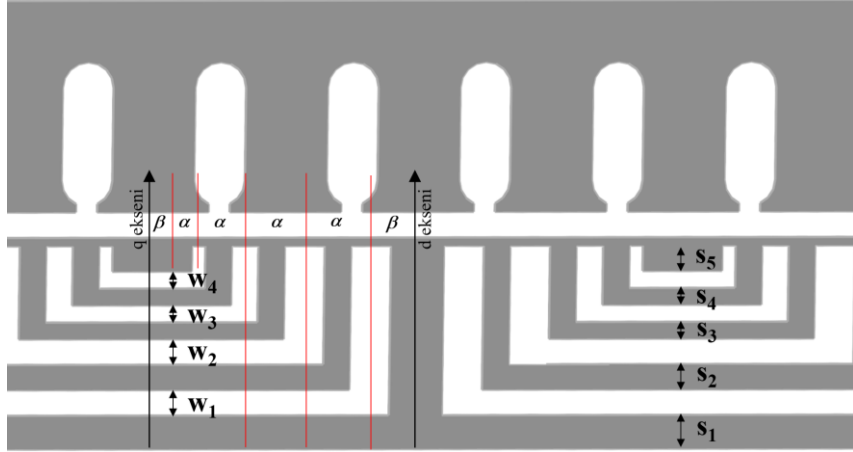
Denklem (3.67) sargı sonu kaçak geçirgenlik sabitini bulmak için kullanılmaktadır. Denklemde w_c ortalama sargı aralığı olarak verilmiştir. Dış çap ve iç çap sargı sonu kaçak geçirgenlik sabiti yaklaşık olarak eşit kabul edilmiştir (Gieras ve ark., 2004).

$$\lambda_{1d} = \frac{mq\tau k_w}{\pi^2 g' k_{sat}} \tau_{d1}, \quad \tau_{d1} = \frac{\pi(10q^2 + 2)}{27} \sin(\frac{30^\circ}{q}) - 1 \quad (3.68)$$

$$\lambda_{1t} \approx \frac{5g/b_{14}}{5 + 4g/b_{14}} \quad (3.69)$$

Denklem (3.68) türevsel kaçak sabiti denklemini vermektedir. Doyum katsayısı k_{sat} , karter katsayısının ferromanyetik olmayan hava aralığı g' ve türevsel kaçak faktörü τ_{d1} olarak verilmiştir. Denklem (3.69)'da stator dişlerinin baş kısmındaki geçirgenlik katsayısı λ_{1t} verilmiştir (Gieras ve ark., 2004).

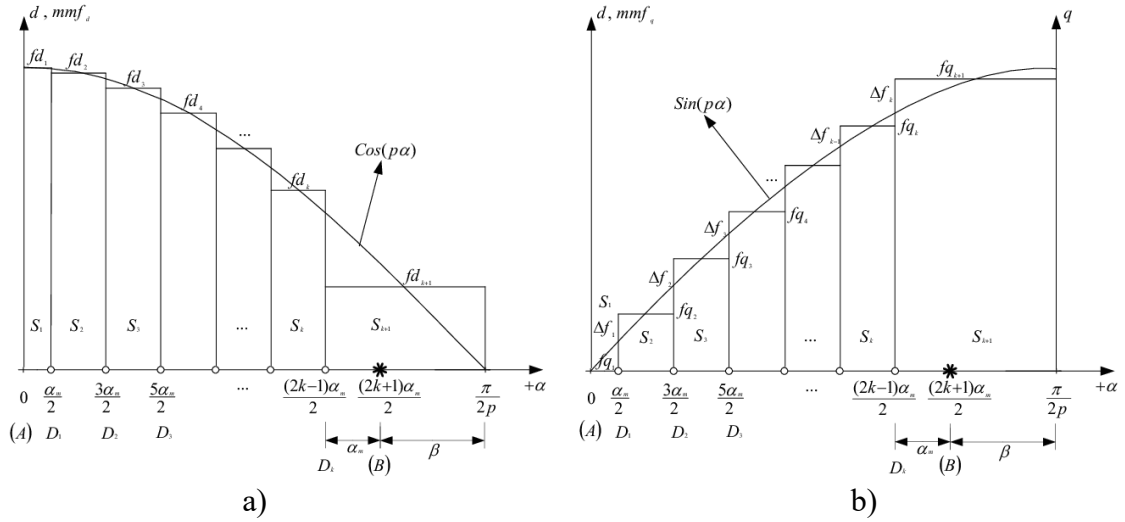
Rotor kutuplarında bulunan segment ve bariyerlerin açısal olarak pozisyonları tork ve tork dalgalanmasında önemli parametrelerdir. Şekil 3.40'da α bariyerler arasındaki açı, β ise α açısının kontrolü için gerekli ilave yardımcı açıdır. α açısı ile tork dalgalanması minimize edilebilmektedir. Optimizasyon çalışmaları ile β açısının da değişebileceği çalışmalar ile gösterilmiştir. Bu çalışmada $\beta = 2\alpha$ alınarak hesaplamalar yapılmıştır (Gerçekcioğlu, 2021; Moghaddam, 2007; Özçelik, 2016)



Şekil 3.40. Senkron relüktans motor rotor geometrisi
(Gerçekcioglu & Akar, 2021)

$$\alpha = \frac{\frac{\pi}{2p} - \beta}{n_{katman} + \frac{1}{2}} \quad (3.70)$$

Denklem (3.70)'de α açısının $\beta = 2\alpha$ için formülü verilmiştir. α açısı n_{katman} bariyer sayısı ve kutup çiftine bağlı olarak değişmektedir (Moghaddam, 2007).



Şekil 3.41. a) d eksenli MMK dağılım grafiği, b) q eksenli MMK dağılım grafiği
(Moghaddam, 2007)

SRM rotorunun segment yani bariyerler arasından kalan nüve kalınlığı Şekil 3.41.a'da verilen d eksenli Manyeto Motor Kuvvet (MMK) dağılımına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Her bir segmentin maruz kaldığı ortalama MMK, α açısı ve bariyer

sayısına bağılı olarak segmentlerin arasındaki oranın hesaplanmasını sağlamaktadır (Moghaddam, 2007).

$$fd_h = \frac{\int_{\frac{2h-3}{2}}^{\frac{2h-1}{2}} \cos(pa) da}{a_m} = \frac{\sin(p \frac{2h-1}{2} a_m) - \sin(p \frac{2h-3}{2} a_m)}{pa_m} \quad h = 1, 2, \dots, k \quad (3.71)$$

$$fd_{k+1} = \frac{\int_{\frac{2k-1}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos(pa) da}{a_m + \beta} = \frac{1 - \sin(p \frac{2k-1}{2} a_m)}{p(a_m + \beta)} \quad (3.72)$$

$$\frac{2S_1}{S_2} = \frac{fd_1}{fd_2} \quad \& \quad \frac{2S_h}{S_{h+1}} = \frac{fd_h}{fd_{h+1}} \quad h = 2, 3, \dots, k \quad (3.73)$$

Denklem (3.71), Denklem (3.72) ve Denklem (3.73) sırasıyla bariyerler arasında kalan segment genişliklerinin oranını vermektedir. Burada h bariyer sayısını ifade etmektedir. Bariyer sayısına bağılı olarak d eksenini ortalama MMK'nin değişimi ile her bariyer sayısı kadar yeni bir fd_h değeri üretilmektedir. Denklem (3.73)'te üretilen fd_h değerleri ilk segment dışında segment genişlikleri S_h ile doğru orantılı olarak verilmiştir (Moghaddam, 2007). Bariyer sayısı ve sırasına bağılı olarak belirlenen bu oranlar rotor toplam genişliği ile kıyaslanarak segment genişliklerine ulaşılmaktadır.

$$\sum_{h=1}^{k+1} S_h = l_y = \frac{(L)}{1 + k_{wq}} \quad (3.74)$$

Bariyer genişliklerini belirlemek için benzer hesaplamalar Şekil 3.41.b'de verilen dağılıma göre yapılmaktadır. Rotor eksenel uzunluğu L olarak alınmıştır (Moghaddam, 2007). RA motorlarda stator yarıçapından mil yarıçapına kadar olan rotor genişliği EA motorlarda değişken değer alabilmektedir. Bu durum tasarım aşamasında geniş bir optimizasyon aralığı sağlamaktadır. Denklem (3.74)'te k_{wq} yalıtım oranını yani toplam bariyer genişliğinin toplam segment genişliğine oranını temsil etmektedir (Moghaddam, 2007). Bu oran ortalama torku değiştiren faktörlerden biridir ve motor performansına

doğrudan etki etmektedir (Öner ve ark., 2016). (Aghazadeh ve ark., 2019), yaptıkları çalışmaya göre yalıtım oranı 0.2-1.2 değerleri arasında test edilmiştir. En yüksek ortalama torkun yaklaşık olarak $k_{wq}=0.6$ değerinde alındığı görülmektedir. Yalıtım oranının değişimiyle d ve q eksenindeki endüktans oranı yani çıkıntı oranı L_d/L_q değişmektedir. Güç faktörü de SRM'ler için çıkıntı oranına bağlı olarak değişmektedir (Gözüaçık & Akar, 2023; Özçelik, 2016).

$$f_{q_1} = 0$$

$$f_{q_h} = \frac{\int_{\frac{2h-3}{2}a_m}^{\frac{2h-1}{2}a_m} \sin(pa) da}{a_m} = \frac{\cos(p \frac{2h-3}{2} a_m) - \cos(p \frac{2h-1}{2} a_m)}{pa_m} \quad h = 2, 3, \dots, k \quad (3.75)$$

$$f_{q_{k+1}} = \frac{\int_{\frac{2k-1}{2}a_m}^{\frac{\pi}{2p}} \sin(pa) da}{a_m + \beta} = \frac{\cos(p \frac{2k-1}{2} a_m)}{p(a_m + \beta)}$$

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

$$\sum_{h=1}^k B_h = l_a = \frac{(L)}{1 + \frac{1}{k_{wq}}} \quad (3.76)$$

Denklem (3.75)'te segment hesaplamalarında olduğu gibi bariyer genişlikleri de q eksenini ortalama MMK dağılım oranı farkına (Δf_h) bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bariyer genişliklerinin optimum değeri Δf_h kullanılarak, q ekseninden akan akıyı azaltmak üzere belirlenmektedir. Denklem (3.76)'da ise bariyer genişlikleri rotor genişliği ve yalıtım oranına bağlı olarak hesaplanmaktadır (Gözüaçık & Akar, 2023; Moghaddam, 2007).

3.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi

SEY, karmaşık fiziksel sistemlerin analizinde kullanılan sayısal yöntemlerdendir. Termal analiz, akışkanlar dinamiği, yapısal test, elektriksel ve manyetik analizlerin yanı sıra

birçok mühendislik uygulamasının tasarım ve analiz kısmında sayısal çözümler üretmek için SEY kullanılmaktadır (Eser, 2024; Niazi, 2005). SEY karmaşık geometriler ve lineer olmayan malzeme özelliklerinden kaynaklanan problemleri modeli küçük parçalara ayırarak çözümlemeyi amaçlamaktadır. Bunun için de bir dizi sınır koşuluna bağlı yüzey veya alan üzerinde kısmi diferansiyel denklemler kullanılmaktadır (Avşar, 2023; Gerçekcioğlu, 2021; M. H. Mohammadi, 2015).

Elektrik makineleri tasarımı ve analizi de oldukça karmaşık sistemleri ve lineer olmayan yapısıyla SEY ile çözüm üretilen problemlerdendir. Elektrik makineleri temel elektriksel ve manyetik yapısı ile motor performansının analiz edilmesi, yapısal analizlerle mekanik dayanımlarının belirlenmesi, termal karakteristiğinin analiz edilmesi, optimizasyon yöntemleriyle optimum sonuç elde edilmesini amaçlayan, kontrol ve sürücü tekniklerinin geliştirilmesi gibi pek çok problemin çözülmesinde SEY kullanılmaktadır (Gerçekcioğlu, 2021; Niazi, 2005).

Elektrik makine tasarımı temelinde elektrik ve manyetik alan problemlerini çözmek için Maxwell denklemleri kullanılmaktadır. Gerçek geometrilerdeki zorlukların üstesinden gelmek için sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Elektromanyetik enerji dönüşümü kapsamında hava aralığı manyetik alanından tork üretimi sağlayan elektrik makinelerinde elektrik alan şiddeti E , manyetik alan şiddeti H , elektrik akı yoğunluğu D , manyetik akı yoğunluğu B , akım yoğunluğu J ve elektrik yükü yoğunluğu ρ gibi vektör ve skaler büyüklükler kullanılmaktadır (Gerçekcioğlu, 2021; Zöhra, 2019).

$$dF = dQ(E + v \times B) = dQE + \frac{dQ}{dt} dl \times B = dQE + idl \times B \quad (3.77)$$

Elektrik makinelerinde tork üretimi, üzerinden akım geçen bir tel veya yüklü bir cisme etki eden elektriksel manyetik alanın ürettiği kuvvet prensibine dayanmaktadır. Denklem (3.77)'de Lorentz kuvvet eşitliği verilmektedir. Lorentz kuvvet vektörü F , hareket eden dQ yükünün v hızına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Akım taşıyan iletken dl üzerinde etki eden manyetik alan da Denklem (3.77)'de verildiği gibi Lorentz kuvvet eşitliği ile ifade edilmektedir (Zöhra, 2019).

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.78)$$

Denklem (3.78)'de süreklilik denklemi olarak bilinen elektrik yükünün korunumu durumu ifade edilmektedir. Elektrik yük yoğunluğunun belirli bir bölgede azalması, bu bölgede dışarıya doğru bir akım olduğu anlamına gelmektedir (Zöhra, 2019).

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3.79)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.80)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.81)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.82)$$

Maxwell denklemleri olarak bilinen elektrik alan yasası (Gauss) Denklem (3.79)'da, manyetik alan yasası (Gauss) Denklem (3.80)'de, indüksiyon (Faraday) yasası Denklem (3.81)'de ve Ampere yasası Denklem (3.82)'de verilmiştir. Elektromanyetik alanın durağan olduğu durumda elektrik akı yoğunluğunun zamana bağlı değişimi ihmal edilebilir. Bu durumda Ampere yasası $\nabla \times H = J$ olarak güncellenmektedir (Eker, 2017; Zöhra, 2019).

$$J = \sigma E \quad (3.83)$$

$$D = \varepsilon E = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (3.84)$$

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (3.85)$$

Denklem (3.83)'ten Denklem (3.85)'e kadar olan yapısal ilişkileri ifade eden eşitlikler makroskobik malzemenin özelliklerini tanımlamak için kullanılmaktadır. Burada elektriksel iletkenlik σ , elektriksel geçirgenlik ε ve manyetik geçirgenliğe μ bağlı eşitlikler verilmiştir. Elektriksel ve manyetik geçirgenliklerde kullanılan ' θ ' ve ' r ' alt indisleri sırasıyla boşluk ve bağlı geçirgenlik olarak ifade edilmektedir (Eker, 2017; Eser, 2024; Zöhra, 2019).

$$\nabla_x A = B \quad (3.86)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V \quad (3.87)$$

Denklem (3.86)'da verilen denklem vektör potansiyelinin (A) hesaplanması için kullanılmaktadır. Bu eşitlik tüm problem bölgesinde tanımlanmaktadır. Denklem (3.87)'de Faraday yasasının V skaler potansiyeli ile birleştirilmiş hali verilmiştir (Zöhra, 2019).

$$J = \sigma E = -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) = \nabla_x H = \nabla_x \frac{B}{\mu} = \frac{1}{\mu} \nabla (\nabla_x A) \quad (3.88)$$

Maxwell denklemlerinde verilen eşitliklerin kullanılması sonucunda Denklem (3.88)'de manyetik akı yoğunluğu ve akım yoğunluğu hesaplanmaktadır.

$$\nabla_x A = 0 \quad (3.89)$$

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla_x A \right) = \nabla_x H_c - \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) + \frac{1}{\mu} \nabla (\nabla \cdot A) \quad (3.90)$$

Yerelleştirilmiş bakışım kuramı kullanılarak kuramsal fizikte temel etkileşmeleri eklemek için Denklem (3.89) kullanılmaktadır. Denklem (3.90)'da giderici kuvvete karşılık olarak H_c verilmektedir.

$$\nabla^2 \nabla = \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \vec{A}) = -\frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (3.91)$$

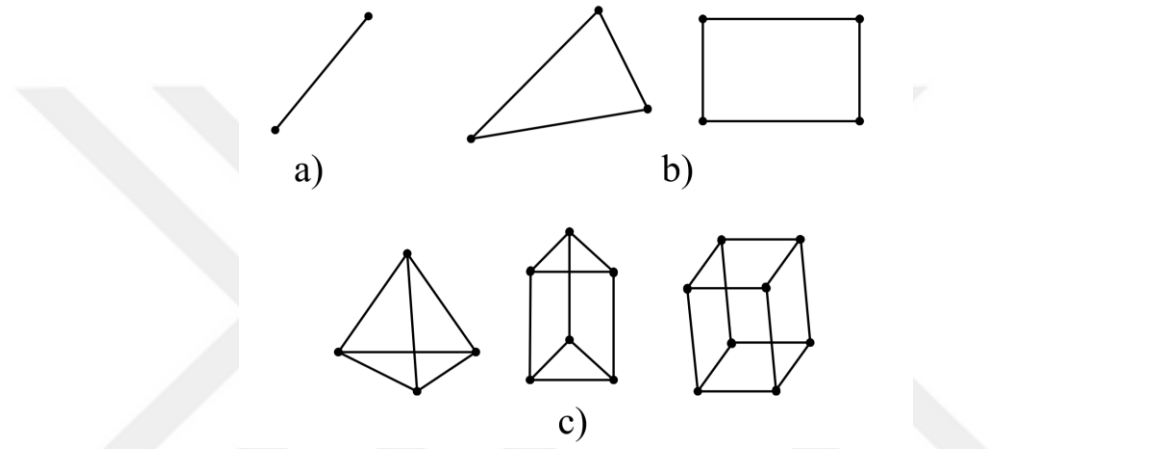
$$\nabla V = \nabla^2 V = 0 \quad (3.92)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (3.93)$$

Denklem (3.91)'de Gauss yasasına Denklem (3.87)'in eklenmesi ile Poission denklemi elde edilmektedir. Denklem (3.92)'de elektrostatik problemlerin çözümü için Laplace denklemi verilmektedir. Laplace denklemi kartezyen koordinat sistemine göre yazıldığında Denklem (3.93) elde edilmektedir. Laplace ve Poission denklemlerinin

çözümünde, problemin tamamında gerçek bir çözüm elde edilmediği durumda SEY ile problem sonlu sayıda parçaya bölünerek çözüm aranmaktadır (Zöhra, 2019).

SEY ile yapılan analizlerde sistem üzerinden kurulan model ve denklemlerin çözümlenmesi için sınır değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Sınır koşullarının belirlenmesinden sonra bir diğer önemli husus modelin periyodikliğidir. Periyodik modelleri için simetri eksenlerinin tanımlanması gerekmektedir. Modelin en küçük tekrar eden geometrisi için modelin küçültülmesi ve denklemlerin azaltılması dolayısıyla analiz süresinin kısaltılması sağlanmaktadır (Tap, 2017).



Şekil 3.42. Ağ elemanı geometrileri a) bir boyutlu (1B), b) iki boyutlu (2B) ve c) üç boyutlu (3B)

SEY bir sistemin eleman adı verilen daha küçük alt alanlara ayrıştırılması ve bir ağ yapısı oluşturulmasına dayanmaktadır. Bu ağın kalitesi ve yoğunluğu, çözümün doğruluğunu ve verimliliğini önemli ölçüde etkiler. Daha ince bir ağ daha doğru sonuçlar sağlar, ancak hesaplama süresini ve bellek kullanımını artırır. Ağ elemanları Şekil 3.42’de verildiği gibi modelin boyutuna göre 1B için çizgiler, 2B için üçgenler veya dikdörtgenler ve 3B için prizmalar veya piramitlerle ifade edilmektedir. Ağ yoğunluğunu optimize etmek için yüksek yoğunluklu ağlar, fiziksel parametrelerin hızla değiştiği bölgelerde kullanılırken, seyrek ağlar nispeten tekdüze bölgelerde yeterlidir. Bu sayede doğruluk ve hesaplama verimliliği dengelenmektedir (Avşar, 2023; Tap, 2017).

SEY, mühendislik ve fizik bilimlerinde yaygın olarak kullanılan bir sayısal tekniktir. Eksik sonuçlar verebilen geleneksel nokta tabanlı yaklaşımların aksine, SEY fiziksel sistemi daha küçük elemanlara bölerek daha doğru ve gerçekçi bir analiz sağlar. Daha fazla eleman ile hesaplama süresindeki artışa rağmen, yöntem sistemin daha iyi temsil edilmesini sağlar. SEY gerilme analizi, ısı transferi, sıvı akışı, titreşim ve elektromanyetik

alan modellemesi gibi alanlarda yaygın olarak uygulanmakta ve çeşitli simülasyon yazılım araçları aracılığıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Zöhra, 2019).

3.7. Optimizasyon

Elektrik makineleri çok fazla değişken tasarım parametresine sahip ve farklı performans kriterleri ile karmaşık sistemlere dahil edilmektedir. Motor tasarımında kullanılan malzemelerin doğrusal olmayan davranışları motor parametreleri üzerinde karmaşık etkiye ve doğrusal olmayan sonuçlara neden olmaktadır. Bu değişken parametrelerin performans kriterleri üzerindeki etkisini optimum hale getirmek için optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır (Özsoy, 2023). Üretici, ihtiyacına yönelik elektrik motorundan yüksek tork, yüksek verim, düşük titreşim ve gürültü gibi beklentilerini optimizasyon işlemi ile optimum sonuca ulaşarak karşılamayı hedeflemektedir. Optimum sonuç motor tasarımındaki en iyi sonucu değil probleme yönelik en iyi çözümlemeyi içermektedir. Bu sebeple üreticinin tasarım aşamasında amacını ve problemlerini net şekilde belirlemesi gerekmektedir (Akıncı, 2020). Elektrikli motor tasarımında sıklıkla tercih edilen bu optimizasyon yöntemlerinden bir tanesi de Genetik Algoritma (GA) olarak görülmektedir (Akıncı, 2020; Eser, 2024; Gerçekcioğlu, 2021; Özsoy, 2023).

Optimizasyon işlemi karmaşık problemlere çözüm üretmek için oluşturulan algoritmaların hızlı, yüksek doğrulukta ve maliyetsiz şekilde sonuca ulaşmasını sağlamaktadır. GA klasik optimizasyon yöntemlerine kıyasla rastlantısal çözüm bulma yöntemi ile yüksek uygunlukta küresel optimum sonuç bulma aracı olarak kullanılmaktadır (Akıncı, 2020; Özsoy, 2023). İlk olarak 1970'lerde Michigan Üniversitesi'nden John Holland tarafından doğal seçim ve doğal sistemin adaptasyonuna dayanan bir bilgisayar algoritması olarak ortaya çıkmış ve günümüzde bilim, mühendislik, işletme gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Akıncı, 2020).

GA doğanın biyolojik sürecini inceleyen bir evrim algoritmasıdır. Algoritmada kullanılan her bir parametre genleri ve bu genlerin oluşturduğu kümeleri (kromozom/bireyler) temsil etmektedir. Amaç fonksiyonlarının hedefe ulaşması için bireylerin dahil olduğu popülasyon genişletilir ve yeni nesil bireyler rastlantısal olarak üretilmektedir (Çunkaş, 2004). GA temelinde, belirli sınırlamalar ve koşullara bağlı olarak üretilen popülasyonun meydana getirdiği; yeni nesil bireylerden en uygun olanların hayatta kalması ve

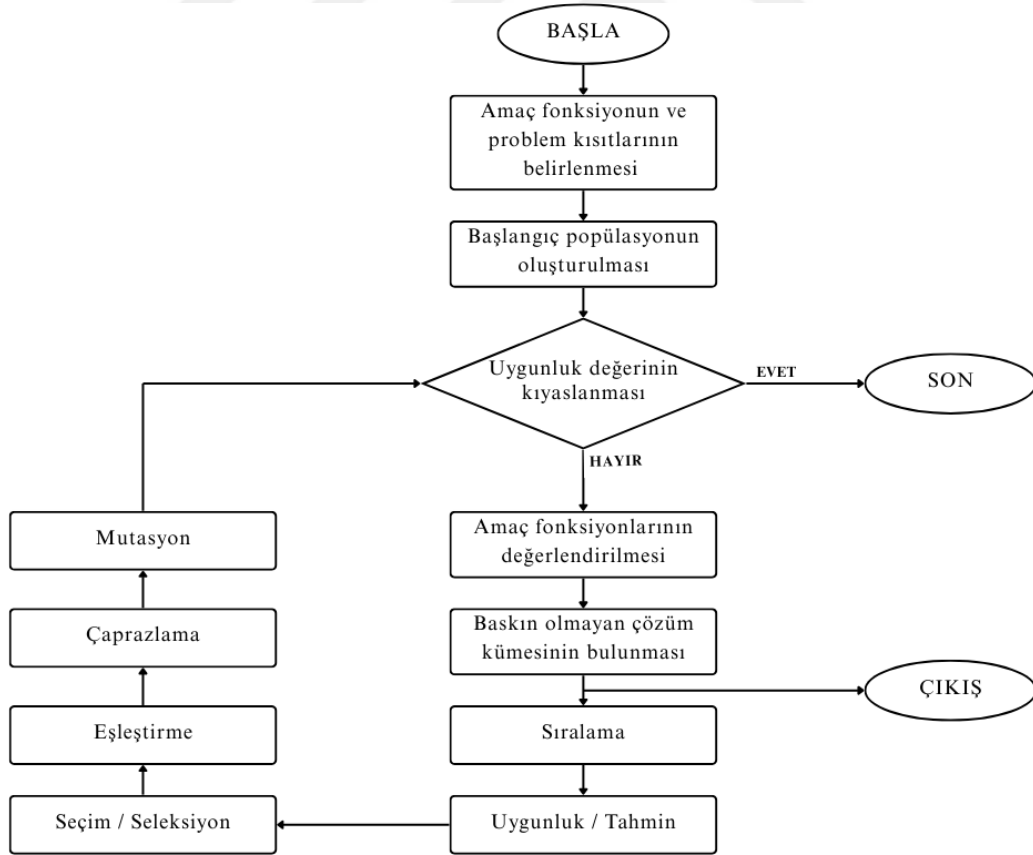
uyumsuzların popülasyondan atılmasına dayanmaktadır. Bu sayede üretilen her uyumlu yeni neslin, popülasyonu geliştirerek optimum sonuca ulaşılması sağlanmaktadır (Eser, 2024; Özsoy, 2023). GA arama uzayında genel ve paralel arama yaparak çözüm sağlamaktadır. Bu da çok fazla parametre bulunan sistemlerde bile hızlı sonuçlar almasını sağlamaktadır. Ancak üretilen sonuçlar her zaman en iyi çözüm olmayabilmektedir (Gerçekcioğlu, 2021).

GA optimizasyon süreci amaç fonksiyonunun belirlenmesiyle başlamaktadır. Amaç fonksiyonu belirlenen başlangıç popülasyon problemin büyüklüğüne, parametrelerin derinliğine ve çeşitliğine göre belirli sınırlar içinde rastgele olarak oluşturulmaktadır. Popülasyonda bulunan her bir kromozom için uygunluk değeri hesaplanmaktadır. Sonraki aşamada bireyler yeniden nesiller üretmek üzere eşleştirilmektedir. Bu işlem seçim veya seleksiyon olarak adlandırılmaktadır. Eşleşme işleminden sonra bir takım genetik işlem ile yeni nesiller üretilir. Bunlardan ilki aile bireylerinin çaprazlama noktasına göre sahip oldukları gen diziliminin kendi arasından değiştirilmesi yani çaprazlama işlemidir. Bu sayede bir önceki neslin ortak genetik özelliklerini taşıyan yeni nesiller üretilmiştir. Bir diğer genetik işlem üretilen yeni nesillerin devamlılığını sağlamak ve tekrarlanmasını engellemek amacıyla kromozomlara ait genlerinin bir veya birkaçının yer değiştirilmesini sağlayan mutasyon işlemidir. Bu işlemler sonucunda üretilen yeni bireylerin de uygunluk değeri hesaplanıp popülasyon büyüklüğü değiştirilmeden sıralama yapılmaktadır. Sıralama işlemi ile en uyumlu nesiller popülasyonda kalmış ve uyumsuzlar popülasyondan atılmıştır. İterasyon sayısının artması ile en optimum sonuca yaklaşılmaktadır (Akıncı, 2020; Eser, 2024; Gerçekcioğlu, 2021).

3.7.1. Çok amaçlı genetik algoritma

Geleneksel optimizasyon yöntemlerinde olduğu gibi GA yönteminde de tek amaç fonksiyonunu maksimize veya minimize etme üzerine algoritma geliştirilmiştir. Günümüzde daha karmaşık problemlerin çözümünde kullanılan bu algoritmalar çözüm üretmekte zorlanmaktadır. Özellikle elektrikli motorlar gibi çok fazla parametre değişiminin doğrusal olmayan sonuçlar verdiği birden fazla performans kriterine sahip sistemlerde ÇAGA tercih edilmektedir. ÇAGA birden fazla amaç fonksiyonuna sahip GA

yöntemidir. 1985 yılında Schaffer tarafından ilk kez önerilen yöntemde amaç fonksiyonu yerine her bir elemanı bir amaç fonksiyonunu hedefleyen amaç vektörü kullanılmaktadır. Vektör değerlendirmeli GA çalışmalarından sonra ağırlık tabanlı ve ağırlıklı toplam yöntemi gibi amaç fonksiyonuna veya bireylere tanımlanan ağırlık vektörü sayesinde karmaşık sistemlere uygun GA yöntemleri geliştirilmiştir (Eser, 2024; Özsoy, 2023). Bunun üzerine Fonseca ve Fleming tarafından 1992 yılında ÇAGA kullanılmıştır. ÇAGA çok amaçlı problemlerin çözümünde GA çözüm uzayını baskın olmayan çözüm kümesi üzerinde de aktif hale getirmektedir. Bu sayede çözüm uzayının farklı bölgelerinde baskın olmayan bireyleri kullanarak farklı hedeflere çözüm üretmektedir. Bu da ÇAGA'nın karmaşık sistemlerin optimizasyonunda tercih edilen bir yöntem olmasını sağlamaktadır. ÇAGA akış diyagramı Şekil 3.43'de verilmiştir (Eser, 2024; Jafferi & Tokhi, 2009). Optimizasyon süreci, uygunluk değerinin kıyaslanması üzerinden iterasyonlar oluşturmaktadır. Genetik işlemler ile üretilen yeni nesillerin popülasyona eklenmesi ile farklı amaç fonksiyonlarına bağlı en uygun çözüm kümesi aranmaktadır.



Şekil 3.43. ÇAGA akış diyagramı

3.8. Yapısal Tasarım

Elektrik motorlarında elektromanyetik analizlerin ve optimizasyon sürecinin tamamlanmasıyla motorun yapısal dayanımı analiz edilmelidir. Bunun için yapılacak testler ile malzemelerin dayanım özelliklerine göre motorun mekanik dayanım sınırları belirlenmektedir (P. Kumar ve ark., 2024). EAR'ler için tasarlanan elektrik motorlarının çok fizikli analizlerinin içinde yapısal analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu analizler motora etki eden statik ve dinamik yüklere karşı motorun dayanımını ortaya çıkarmaktadır. Yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi için motor gövdesi ve kapağı, iç ve dış muhafazalar (stator ve rotor sabitlemesi için), motor mili ve rulmanlar gibi mekanik ekipmanlar tasarlanmaktadır. Bu tasarım kriterli EAR'ler için motor ağırlığı, boyutları ve performansı dikkate alınarak ve uygun malzeme seçimi yaparak tamamlanmaktadır (Özsoy, 2023; Yu ve ark., 2024). Rotor hareketinin mil üzerinden aktarım organlarına dolayısıyla yüke aktarılması için kullanılan rulmanların eş eksenli ve düzgün şekilde yataklanması gerekmektedir (Özsoy, 2023).

EA makinelerde RA muadillerine göre stator ve rotor arasındaki eksenel manyetik çekim kuvvetinin etkisi balans problemi sebebiyle tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken bir konudur. Çift hava aralıklı EA motor tasarımında eksenel kuvvetlerin birbirini dengelemesi sebebiyle bu manyetik çekim en aza indirilmektedir. Dolayısıyla eksenel manyetik çekimden kaynaklı balans problemi önlenabilmektedir (Aydın ve ark., 2010; Özsoy, 2023). EA-SRM yapısal tasarımında ise stator kısmında konik yapı sebebiyle dıştan içe doğru stator dişlerinin incelmesi mekanik dayanım açısından incelenmelidir. Rotor kısmında da bariyer tasarımı sebebiyle köprü, kılçık ve segment gibi rotor nüvesinin ince bölümlerinde mekanik dayanım önemli hale gelmektedir (Al-Ani ve ark., 2019; Song ve ark., 2020; Yu ve ark., 2024).

Elektrik motorunun yapısal analizler sonucu mekanik dayanımını belirlemek için normal gerilme, kesme gerilmesi ve burulma gerilmesi analizleri yapılmaktadır. Normal gerilme malzeme kesit alanı üzerine dik olarak etki eden kuvvetin malzeme kesit alanına göre uyguladığı gerilmedir. Kesme gerilmesi malzeme kesit yüzeyine paralel olarak etki eden kuvvet sonucu oluşan gerilmedir.

$$\sigma_x = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F^x}{\Delta A} \quad (3.94)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu \sigma_y}{E} - \frac{\nu \sigma_z}{E}$$

$$\tau_{xy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V_y^x}{\Delta A}, \quad \tau_{xz} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V_z^x}{\Delta A}, \quad \tau_{yz} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V_z^y}{\Delta A} \quad (3.95)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$$

Normal gerilme ve kesme gerilmesi malzemeye etkin kuvvetin kesit yüzeyine dik ve paralel olmasına bağlı olarak değişmektedir. Denklem (3.94) ve Denklem (3.95)'te normal gerilme ve kesme gerilmesi sırasıyla σ ve τ olarak verilmiştir. Malzeme yüzey alanı A , dik kuvvetler F ve paralel kuvvetler V olarak gösterilmiştir. Kuvvetlerin doğrultusuna bağlı olarak çok eksenli olarak gerilme analizi yapılabilir (Beer, 2015). Normal gerilme sonucunda malzeme deformasyonu Hooke yasasına göre Denklem (3.94)'te ε birim uzama, ν Poisson oranı (enine şekil değişiminin aksel şekil değişimine oranı) ve E elastisite modülü olarak verilmiştir. Birim eksenlerdeki uzama diğer eksenlerde daralmaya sebep olacaktır. Yine Hooke yasasına göre Denklem (3.95)'te γ kesme şekil değiştirmesi ve G kayma modülü olarak verilmiştir (Beer, 2015).

$$J = \frac{\pi}{2} c^4 \Rightarrow \tau_{maks} = \frac{Tc}{J} \quad (3.96)$$

$$\phi = \frac{TL}{JG}$$

Burulma gerilmesi malzeme eksenine dik olarak etki eden döndürme momentinin malzeme üzerinde meydana getirdiği gerilmedir (Megson, 2005). Denklem (3.96)'da J atalet momentine, c mil yarıçapına ve T döndürme momentine bağlı olarak maksimum τ burulma gerilmesi hesaplanmaktadır. Burulmaya bağlı malzemedeki deformasyon ϕ burulma açısı ile ifade edilmektedir. Burulma açısı; döndürme momenti T , malzeme aksel uzunluğu L , atalet momenti J ve kayma modülüne G bağlı olarak hesaplanmaktadır (Beer, 2015).

$$F_{mk} = mr_r \omega^2 \quad (3.97)$$

Özellikle mıknatıslı ve rotoru sargılı motorlar için merkez kaç kuvveti F_{mk} Denklem (3.97)'de verilmiştir. Yüksek hızlarda dönen rotor dış çapında sargılar ve mıknatıslar için m dönen parça ağırlığı, r_r dönme yarıçapı ve ω açısal hıza bağlı olarak merkez kaç kuvveti hesaplanmaktadır (Pyrhönen ve ark., 2013). Merkez kaç kuvvetinin üstesinden gelmek için rotor malzemelerin sabitlenmesi ya da muhafaza altına alınması gerekmektedir.

Bütün bu hesaplamalar motor malzeme tanımlamalarının yapılmasından sonra kütle yoğunluğu, Poisson oranı, Young modülü, kayma modülü gibi özelliklere bağlı SEY kullanarak analiz edilmektedir. Maksimum gerilme ve gerilmeye bağlı maksimum yer değiştirme analiz sonuçlarıyla malzeme dayanım sınırları belirlenmektedir. Uygulanan gerilmenin malzeme akma mukavemetine oranı ile malzemenin güvenlik katsayısı belirlenmektedir (Kang ve ark., 2024).

3.9. Termal Tasarım

EAR'ler için EA-SRM tasarımında çok fizikli analiz şartlarından biri de termal analizdir. Yüksek performans ihtiyacı duyulan bu motorda akım yoğunluğunun yükselmesi, kayıpların artması ve dolayısıyla motor sıcaklığının artması doğal sonuç olarak görülmektedir. Bu sebeple elektromanyetik analizlerin sonuçları mekanik ve termal analizlerin sonucuna bağlı olarak kabul edilebilmektedir (Özsoy, 2023; Rosu ve ark., 2018; Song ve ark., 2020). Elektrik makinelerinin aşırı yüklenme kapasitesini ve güvenli çalışma sınırlarını belirleme aşamasında sıcaklık değişimi önemli hale gelmektedir. Motor tasarımında sargı yalıtımı, mıknatıslar, yapıştırıcılar gibi malzemelerin sıcaklık dayanımı makinenin termal sınırlarını belirlemektedir. Sıcaklık değişimi aynı zamanda sargı direncinin artması ve mıknatıs akısının azalması gibi performans özelliklerini de doğrudan etkilemektedir. Tasarım için bu üç boyutlu ve karmaşık problemin çözümünde SEY ve CFD gibi yöntemler ile hesaplamalar simüle edilebilmektedir (Sahin, 2001).

Elektrik makinelerinde verimi düşüren kayıplar ısı kaynağı olarak motorun sıcaklığının artmasına sebep olmaktadır. Sargılardaki direnç kayıpları, manyetik alan değişimine bağlı histerisiz ve girdap akımlarından kaynaklanan kayıplar, sürtünme kaynaklı mekanik

kayıplar ve akışkan sürtünmesi kaynaklı hava aralığı ve iç hacim rüzgâr kayıpları temel ısı kaynakları olarak gösterilmektedir. Bunlara manyetik direnci değiştiren relüktans kayıpları, sargı MMK harmonikleri, mıknatıs harmonikleri ve akım harmonikleri nedeniyle değişken manyetik alan kayıpları motor yapısına bağlı olarak ısı kaynağı olarak görev almaktadır (Malloy, 2014).

Elektrik makinelerinde üretilen enerjinin bir kısmı ısı olarak açığa çıkmaktadır. Bu ısı iletim, konveksiyon (taşıma) ve radyasyon yoluyla transfer edilmektedir. Elektrik makinelerinde sargılar, nüve, mıknatıslar gibi katı parçaları iletim yoluyla ısının yayılmasını sağlamaktadır. Hava ve sıvı soğutmalı sistemlerde kullanılan akışkan ise konveksiyon yöntemi ile ısı transferinde görev almaktadır. Radyasyon enerjinin elektromanyetik dalga formunda yayılmasıyla ilgili bir ısı modu olarak verilmektedir. Radyasyonun ısı transferindeki etkisi toplam ısı enerjisinin en fazla %1-%2'si kadar olduğu için elektrik makineleri incelemelerinde ihmal edilmektedir (Özsoy, 2023; Polikarpova, 2014; Sahin, 2001).

Bir malzemenin termal iletkenliği moleküllerin kafes titreşimi ve elektronların serbest hareketinden kaynaklanmaktadır. Bu malzemenin ısı iletimi, malzemenin ısı iletim katsayısına λ , malzeme boyunca iki nokta arasındaki sıcaklık farkına T ve bu noktalar arasındaki uzunluğa L bağlı olarak değişmektedir. Bir malzeme boyunca ısı iletimi hızı Denklem (3.98)'de verilmiştir (Polikarpova, 2014).

$$Q_x = -\lambda \frac{dT}{dL} \quad (3.98)$$

Termal iletkenlik açısından iyi elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerin termal iletkenlikleri de yüksektir. Elektrik makinelerinde ise iyi elektrik yalıtımına sahip ve yüksek termal iletkenliğe sahip malzemeler tercih edilmektedir (Rosu ve ark., 2018). Bunun yanı sıra malzemelerin pürüzlü yapıları ve bileşenler arasındaki boşluklar (stator ve rotor lamine saç arasındaki boşluklar vb.) hava dolu mikroskobik alanlar oluşturmaktadır. Bu da malzemeler arasından termal temas direnci oluşturup, termal iletkenliğin azalmasına sebep olabilmektedir (Polikarpova, 2014).

Kararlı durumdaki sistemin ısı iletimi, enerjinin korunumu ve Fourier ısı iletimi yasasına bağlı olarak karakterize edilmektedir. Enerji korunumu yasasına göre bir bölgedeki ısı akı

vektörünün diverjansı, o bölgedeki ısı kaynağı yoğunluğuna bağlıdır. Bu sayede enerjinin kaybolmadığı, sistemin tüm girdi ve çıktıların bir kaynak ya da bir yutucu tarafından dengelendiği görülmektedir (Özsoy, 2023; Sahin, 2001).

$$\omega = \nabla \cdot \vec{\psi} \quad (3.99)$$

Denklem (3.99)'da ısı akı yoğunluğu ω olarak verilmiştir. Yüzeyin birim alanına göre normal yönde geçen ısı transfer miktarını temsilen $\vec{\psi}$ ısı akı vektörü verilmiştir. Fourier ısı iletimi bir noktadaki ısı akısının o noktadaki sıcaklık değişimi (sıcaklık gradyanı) ile orantılı olarak değiştiğini ifade etmektedir (Özsoy, 2023; Sahin, 2001).

$$\vec{\psi} = -\lambda \nabla T \quad (3.100)$$

Isı akı yoğunluğu, Denklem (3.100)'de λ malzeme ısı iletim katsayısı ve T sıcaklık değişim hızına bağlı olarak verilmiştir. Denklemden yer alan eksi işareti ısı akısının yüksek sıcaklık bölgelerinden düşük sıcaklık bölgelerine doğru aktığını göstermektedir. Bu durum termodinamiğin ikinci yasasını ifade etmektedir.

$$\nabla^2 T = -\frac{\omega}{\lambda} \quad (3.101)$$

Isı akı vektörü formülünün Denklem (3.99)'da yerine konulmasıyla Poisson denklemi ortaya çıkmaktadır. Poisson denklemi Denklem (3.101)'de verilmiştir ve ısı iletim problemlerinin temel matematiksel modelini oluşturmak için kullanılmaktadır. Bu sayede motorun herhangi bir noktasında sıcaklığın hesaplanması sağlanmaktadır (Özsoy, 2023; Sahin, 2001).

Konveksiyon, katı malzeme yüzeyi ve temas eden akışkan (hava, su, yağ, vb.) arasındaki sıcaklık farkı ile akışkan hareketine bağlı olarak oluşmaktadır. Akışkan ve molekül hareketinden kaynaklanan ısı transferine sırasıyla adveksiyon ve difüzyon adı verilmektedir. Denklem (3.102)'de Newton yasasıyla tanımlanan doğal konveksiyonla ısı yayılımı formülü verilmiştir (Özsoy, 2023; Polikarpova, 2014).

$$Q_{konv} = h_c A (T_s - T_a) \quad (3.102)$$

Denklem (3.102)'de h_c konveksiyon ısı transfer katsayısını ifade etmektedir ve akışkan özellikleri, malzeme yüzey özellikleri, pürüzlülük gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Isı veren yüzeyin alanı A , yüzey sıcaklığı T_s ve ortam sıcaklığı/akışkan sıcaklığı T_a olarak ifade edilmektedir (Özsoy, 2023; Polikarpova, 2014).

$$R_e = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (3.103)$$

$$G_r = \frac{\beta g \rho^2 (T_s - T_a) L^3}{\mu^2} \quad (3.104)$$

$$P_r = \frac{c_p \mu}{k} \quad (3.105)$$

$$N_u = \frac{h_c L}{k} = f(R_e, G_r, P_r) \quad (3.106)$$

ρ : Akışkan yoğunluğu (kg/m³),

v : Akışkan hızı (m/s),

L : Yüzeyin karakteristik uzunluğu (m),

μ : Akışkanın dinamik viskozitesi (kg/s.m),

β : Akışkanın hacimsel genleşme katsayısı (1/°C),

g : Yerçekimi ivmesi (m/s²),

c_p : Akışkanın özgül ısı kapasitesi (kJ/kg.°C),

k : Akışkanın ısı iletkenliği (W/m.°C).

Konveksiyonun ayrıntılı tanımlanması için bir dizi boyutsuz sayı kullanılmaktadır. Bunlardan Reynolds sayısı, Grashof sayısı, Prandtl sayısı ve Nusselt sayısı sırasıyla Denklem (3.103)'den, Denklem (3.106)'ya kadar olan denklemlerde verilmiştir. Reynold sayısı akışkanın rejimini belirlemek için kullanılmaktadır. Prandtl sayısı ısı yayılımı ve momentum yayılımı arasındaki oranı vermektedir. Grashof sayısı, doğal konveksiyon (akışkan yoğunluğundaki fark ve yerçekimi etkisiyle oluşan ısı transferi) durumlarını

ifade etmektedir. Nusselt sayısı ise taşınımın iletme oranı olarak gösterilir ve konveksiyon ısı transfer katsayısının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Nusselt sayısı aynı zamanda Reynolds, Grashof ve Prandtl sayısının bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Nusselt sayısı doğal iletim, cebri iletim, kapalı kanal cebri iletim gibi soğutma şekline göre farklı fonksiyonlar olarak değerlendirmeye alınmaktadır (Polikarpova, 2014; Rosu ve ark., 2018).

$$Q_{rad} = e\sigma A(T_s^4 - T_a^4) \quad (3.107)$$

Radyasyon ile ısı iletimi Denklem (3.107)'de verilen Stephan-Boltzmann denkleminin siyah bir cisim radyasyonu ile tanımlanmaktadır. Burada e yüzeylerin ışıma / emisivite katsayısı ve σ Stephan-Boltzmann sabiti ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) olarak verilmiştir. Elektrik motorlarında yüzeylerin emisivite katsayılarının çok düşük olması sebebiyle transfer edilen ısı akısı ihmal edilebilmektedir (Özsoy, 2023; Polikarpova, 2014).

Elektrik makinelerinde üç boyutlu ısı akışını tanımlamak için Denklem (3.108)'de verilen difüzyon denklemi kullanılmaktadır. Difüzivite (ısı yayılımı) sabiti $\zeta = k/\rho c_p$ olarak da ifade edilmektedir. Elektrikli makineler gibi karmaşık üç boyutlu yapılarda hem ısı yayılımını hem de zamanla değişen ısı kaynaklarını hesaba katmak için difüzyon denklemi kullanılmaktadır. Denklemin uzay ve zaman değişkenlerini içermesi, konveksiyon fonksiyonunun karmaşıklığı ve elektrik makinesi sınır koşulları karmaşıklığı sebebiyle analitik olarak hesaplanması oldukça zor olmaktadır. Bunun için SEY ile yapılan analizler çözüm sürecini kolaylaştırmaktadır (Özsoy, 2023; Sahin, 2001).

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho \cdot c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{k} \frac{\partial q}{\partial t} \quad (3.108)$$

Elektrik motorlarında yüksek verim ve güç yoğunluğu gerektiren çalışmalarda çeşitli soğutma yöntemleri kullanılmaktadır. Havayla soğutma, ortam hava akışının motor üzerine termal etkisine dayanan doğal soğutma ve fan gibi mekanizmaların hava akışını arttırmak için kullanıldığı cebri hava soğutma yöntemlerini içermektedir. Özellikle düşük ve orta güçlü motorlarda düşük maliyet ve basit uygulamaya sahip hava soğutma sistemi tercih edilmektedir. Sıvı soğutmada, sistem içinde akışına devam eden sıvının motor

malzemelerinin sıcaklığını düşürmesi amaçlanmaktadır. Stator ve rotorun tamamen sıvı içinde kaldığı soğutma doğrudan sıvı soğutma olarak tanımlanmaktadır. Dolaylı soğutma ise motor malzemelerine dışardan teması sağlanan akışkan sayesinde yapılan soğutma şeklidir. Dolaylı soğutma için motor mekanik tasarımı stator, rotor ve sargılar gibi ısı kaynağı malzemelere doğrudan veya dolaylı olarak temas etmesi üzere yapılmaktadır. Bunun için soğutma çubukları ya da soğutma kanalları / soğutma ceketleri (radyal, eksenel, helisel, spiral, serpantin, manifold, vb.) tasarımları motor mekanik tasarımına eklenmektedir (Chenqi ve ark., 2024; Konda ve ark., 2024; Madhavan ve ark., 2022; Mutlu, 2011). Sıvı soğutmada akışkan için su veya yağ tercih edilebilmektedir. Farklı alıştırın yağlar sayesinde yüksek termal iletkenliğe sahip akışkanlar soğutma ve çalıştırma sınırları açısından avantajlı hale gelmektedir. Termal verimlilik cebri sıvı soğutmaya sahip motorlarda akışkan debisine bağılı olarak da değışmektedir. Yüksek hızdaki akışkanın sıcak yüzey ile temas süresinin azalması soğutma sıvısının ortalama sıcaklığının artmamasını dolayısıyla malzeme yüzeyindeki soğumayı arttırmayı amaçlamaktadır (Madhavan ve ark., 2022; Rosu ve ark., 2018).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında EAR'ler için çift hava aralıklı EA-ÇS-SMd-SRM tasarımı gerçekleştirilmiştir. Orta ve küçük ölçekli araçlar için piyasada bulunan araç parametreleri öncelik alınarak çekiş gücü hesaplamaları yapılmıştır. Araç parametreleri ve sürüş şartları (kalkış, ivmelenme, yokuş tırmanma, vb.) için hesaplamalara göre aracın üretmesi gereken kuvvet ve ihtiyaç duyulan güç değeri bulunmuştur (Hesari ve ark., 2024; Rodrigues Bruzinga ve ark., 2022). Elde edilen güç ve kuvvet hesaplamalarının standart bir sürüş testinde yeterli olup olmadığını belirlemek için WLTP, NEDC ve ARTEMIS gibi sürüş testleri kullanılmıştır (De Gennaro ve ark., 2019). Bu testler sonucunda da 30 kW nominal güce ve 3 000 dev/dk nominal hıza sahip bir motorun kentsel ve kırsal şartlar olmak üzere ortalama sürüş testi standartlarına uygun olduğu görülmüştür.

Nominal hız, güç ve tork değerlerinin belirlenmesi ile motor tasarım süreci başlamaktadır. Bu aşamada hacimsel avantajı ve disk yapısı sebebiyle EA motor yapısı, yüksek güç ve tork yoğunluğu ihtiyacı sebebiyle de çift hava aralıklı EA topolojisi tercih edilmiştir (Islam ve ark., 2022; H. Wang ve ark., 2022). Motor tercihinde bariyerli rotor yapısı sebebiyle manyetik akışın kontrol edilebildiği bu sayede performans ve verimlilik açısından avantajlı olan SMd-SRM yapısı tercih edilmiştir. Hem relüktans hem de sabit mıknatıs torku üretebilen bu modelde geniş hız aralığında düzgün tork dağılımı ve yüksek verim amaçlanmaktadır (Adăscăliței ve ark., 2024). Buna göre EA-ÇS-SMd-SRM motor tasarımı gerçekleştirilmiştir.

EA-ÇS-SMd-SRM modeli matematiksel tasarımı aynı stator yapısı sebebiyle ASM stator tasarımına bağlı kalarak yapılmıştır. Dış çap, iç çap, eksenel uzunluk, oluk ölçüleri, sargı çapı, sarım sayısı gibi başlangıç tasarım parametreleri belirli standartlara göre hesaplanmıştır (Boldea, 2020; Özsoy, 2023). Stator tasarımından sonra rotor için bariyer sayısı, bariyer/segment ölçüleri, literatürdeki yalıtım oranına göre hesaplanmıştır (Moghaddam, 2007).

Matematiksel modelin tamamlanmasından sonra daha doğru sonuçlar elde etmek amacıyla SEY ile analizler gerçekleştirilmiştir. ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak 2B model üzerinden ilk analizler gerçekleştirilmiştir. EA motor 2B model analizleri akı dağılımının eksenel olması sebebiyle lineer motor modeli üzerinden elde edilmektedir. 2B model analizleri 3B model analizleriyle kıyaslandığında yüksek doğrulukta ve çok

daha düşük analiz süresi sayesinde kolaylık sağlamaktadır (Gözüaçık ve ark., 2023). Lineer model üzerinden EA-SMd-SRM modelinin hacmine (dış çap, iç çap, eksenel uzunluk), kutup sayısına, bariyer yapısına, bariyer sayısına, mıknatıs destek durumuna (mıknatıssız, ferrit mıknatıs destekli, NTE destekli), EA motor hava aralığı topolojisine (çift hava aralığı, ÇS-ÇR) ve akı dağılımına (NS, NN) bağlı olarak aldığı sonuçlar gözlemlenmiştir.

EA-SMd-SRM model 2B lineer motor analizleri literatürde daha önce de kullanılmış ‘U’ bariyer türüyle gerçekleştirilmiştir (Gerçekcioğlu, 2021). Bu sayede daha hızlı bir şekilde motor parametreleri ve performans sonuçları hakkında yorumlama yapılmış ve nihai model kararı verilmiştir. EA motor topolojisinde özellikle SRM ve SMSM modellerin rotor yapısı dış çaptan iç çapa doğru daralan konik yapısı sebebiyle dezavantajlı görülmektedir. Mıknatısların ve bariyerlerin içe doğru değişken ölçülere sahip olması üretim aşamasında problemlere sebep olmaktadır (Eser & Üstkoyuncu, 2024; Geng ve ark., 2024). Bu çalışmada benzer problemlere çözüm bulmak amacıyla dış çaptan iç çapa doğru sabit ölçülerde bariyer yapısına sahip rotor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sayede kalıp-zımba (punch) kesim kullanılarak seri üretime uygun şekilde rotor bariyerlerinin üretilmesi amaçlanmıştır.

Üretilen 2B modeller üzerinden yapılan analizlerde nihai modele en yakın tasarım, en doğru sonucu almak üzere 3B modelde üretilmiştir. 2B lineer modellerde alınan sonuçlara göre 10 kutup ve NTE mıknatıs destekli EA-ÇS-SMd-SRM tasarımının EAR’ler için ihtiyaç duyulan özelliklere en yakın model olduğu gözlemlenmiştir. Çift hava aralıklı EA-ÇS-SMd-SRM model NTE N42SH Neodyum mıknatıs desteği ve seri üretime uygun ayırık bariyer tasarım kullanılarak oluşturulmuştur. SEY kullanılarak yapılan analizlerle EA-ÇS-SMd-SRM’nin tork, tork dalgalanması, güç ve verim gibi performans değerleri incelenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalara bağlı olarak motor performans kriterleri aranmıştır.

EA-ÇS-SMd-SRM 3B modeli üzerinden ÇAGA kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Motor performans kriterlerinden tork ve verim EAR’lerin çalışma performansını doğrudan etkileyen faktörlerdir. SRM motor rotor yapısında bulunan anizotropik bariyer yapısı tork dalgalanmasının yüksek olmasına dolayısıyla gürültü ve titreşim gibi motor performansına olumsuz etkiye sahiptir (Xing ve ark., 2024). Bu amaçla tork ve verimi arttırmak, tork dalgalanmasını ise azaltmak üzere amaç fonksiyonu

geliştirilmiştir (Gedera, 2019). Amaç fonksiyonuna ulaşmak için rotor bariyer parametreleri üzerinden optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

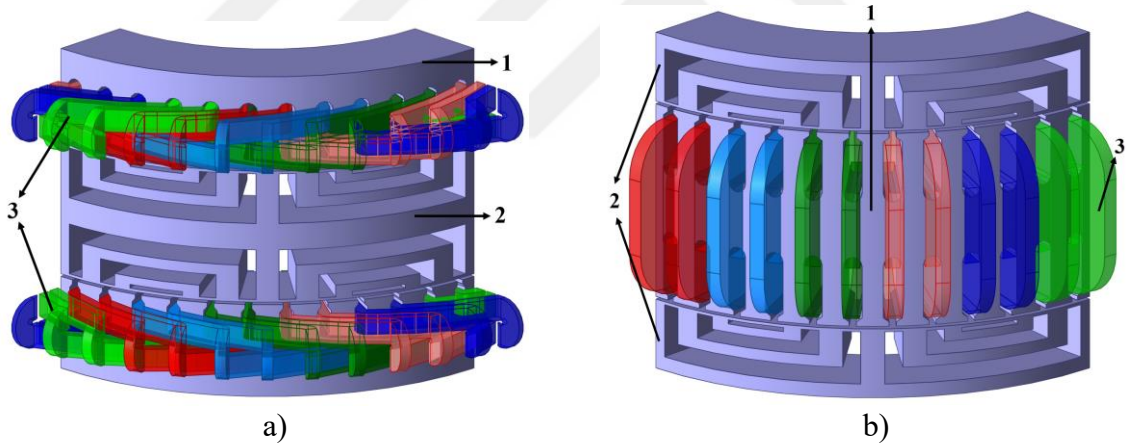
EA-ÇS-SMd-SRM optimizasyon analizlerinden sonra elektromanyetik performans açısından optimum model oluşturulmuştur. Nihai modelin akım yoğunluğuna ($10\text{-}30\text{ A/mm}^2$) bağlı nominal ve maksimum tork, güç verim gibi performans sonuçları alınmıştır. EAR'ler için tasarlanan EA-ÇS-SMd-SRM için değişken hız aralığında performansının değişimini izlemek amacıyla verim haritası oluşturulmuştur. Verim haritası incelemelerine göre motorun nominal ve maksimum performans değerleri belirlenmiştir. Aynı zamanda farklı hız, tork, güç, akım, güç faktörü, akım yoğunluğu gibi performans kriterlerinin değişimi incelenmiştir. Bu durumda motorun optimum çalışma parametreleri de oluşturulmuştur.

Elektromanyetik analiz sonuçlarına bağlı performans sonuçlarının belirlenmesi tasarlanan EA-ÇS-SMd-SRM modelinin elektrik ve manyetik açıdan yeterliliğini ve sınırlarını belirlemektedir. Ancak benzeri karmaşık sistemlerde performans verilerini etkileyecek diğer değişkenler için çok fizikli analizler yapılmaktadır (Song ve ark., 2019). EAR motorları kompakt sistem içinde maruz kaldığı yüklere karşı mekanik dayanım sağlamalıdır. Özellikle EA-SRM rotor yapısı sebebiyle segment, köprü, kılçık gibi ince nüve tasarımının yapısal analizler sonucunda dayanım sınırları belirlenmektedir (Al-Ani ve ark., 2019). EA-ÇS-SMd-SRM'nin rotor, stator ve mil gibi parçaları üzerinden yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çok fizikli analizler için motor kapağı, soğutma olukları ve sabitleme ekipmanları tasarlanmıştır. Mekanik tasarım aşaması aynı zamanda termal performans beklentilerine uygun olarak yapılmıştır. EA-ÇS-SMd-SRM, EAR'ler için yüksek performans şartlarında çalıştırılmak üzere yüksek akım yoğunluğuna sahip cebri sıvı soğutmalı olarak tasarlanmıştır. Elektrikli motorlar için elektrik, manyetik ve mekanik kayıplar ayrı ayrı termal kaynak olarak işlev görmektedir. Termal iletkenlik katsayısına, stator soğutma ceketine ve dolaşımdaki soğutma sıvısına bağlı olarak soğutma gerçekleştirilmektedir (Cavazzuti ve ark., 2019). Farklı debilerde ve farklı güçlerde EA-ÇS-SMd-SRM termal sınırları ve performans değerleri incelenmiştir.

4.1. Eksenel Akılı Çift Hava Aralıklı Senkron Relüktans Motor 2B Model Tasarımı

Bu tez çalışmasında EA çift hava aralıklı SRM tasarımı yapılmıştır. Analitik tasarımın ardından Ansys Maxwell kullanılarak motor modeli oluşturulmuştur. Tasarıma literatürde örneği olan U şeklindeki bariyer yapısına (Akiki ve ark., 2018; Gerçekcioglu & Akar, 2021) sahip rotor ile başlanmıştır. EA motorların RA muadillerine göre hacimsel avantajı dolayısıyla tork ve güç yoğunluğu açısından avantaja sahip olması, eksenel uzunluğunun daha az olması gibi sebeplerden dolayı EAR'ler için yapılan bu motor EA (Nishanth ve ark., 2023) olarak tasarlanmıştır. EA motor topolojisi hava aralığı sayısına bağlı olarak ÇS, ÇR veya çoklu hava aralığına sahip motorlar şeklinde sınıflandırılmaktadır. Ortalama tork değerinde avantaj sağlaması, rotor-stator arasındaki manyetik çekim kuvvetinin olumsuz etkilerini sıfırlayacağı düşünüldüğünden yapılan çalışmada çift hava aralıklı (Nyitrai & Kuczmanski, 2023; Özsoy ve ark., 2022) EA topolojisi tercih edilmiştir.



Şekil 4.1. Çift hava aralıklı 3B motor ¼ Modeli (1-Stator, 2-Rotor, 3 Sargı); a) EA-ÇS-SRM b) EA-ÇR-SRM

Şekil 4.1’de EA-SRM 8 kutuplu ÇS ve ÇR ¼ modelleri verilmiştir. Modeller üstünde stator, rotor, sargılar sırasıyla 1-2-3 olarak numaralandırılmıştır. SRM tasarımında bariyer sayısının özellikle tork dalgalanması üzerindeki etkisine rağmen çift hava aralığı ve eksenel uzunluğun aşırı uzamaması için bariyer sayısı 3 ile sınırlandırılmıştır. Yapılan ön tasarım çalışmalarında rotor yalıtım oranı $k_{wq} = 1$ ve bariyer/kontrol açısı oranı $\beta = 0.5\alpha$ olarak belirlenmiştir.

EA-SRM motor tasarımında 0.95 sarım faktörü ve %65-70 doluluk oranına sahip dağıtılmış sargı tercih edilmiştir. Dağıtılmış sargı, konsantre sargıya göre daha yüksek

relüktans torku sağlamaktadır (Gerçekcioglu & Akar, 2021). Walker ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada dağıtılmış ve konsantre sargıları kıyaslamıştır. Bu çalışmada dağıtılmış sargılı tasarım biraz daha yüksek akım çekse de konsantre sargılı tasarım ile beraber maksimum hızda benzer tork değerlerine ulaşılmıştır (Walker ve ark., 2016). Konsantre sargılar daha kısa sargı sonu, daha düşük bakır kayıpları, kolay imalat ve yüksek güç yoğunluğu gibi avantajlar göstermektedir. Ancak dağıtılmış sargıya göre bu alanda ciddi farklara sahip değildir. Yüksek hızlarda daha verimli olması, daha düşük maliyete sahip olması, yüksek doluluk oranı ve konsantre sargıların sinüzoidal olmayan gerilim indüklemesi sebebiyle dağıtılmış sargılar EAR motorları için de daha popüler duruma gelmektedir (Goli ve ark., 2021; Walker ve ark., 2016).

Literatürde de belirtildiği üzere SRM optimum model tasarımı için farklı kutup ve oluk sayısına sahip motor modelleri oluşturulmuştur. Boyutlandırma analizleri sonucuna göre 6 kutup, 8 kutup ve 10 kutup EA-SRM tasarım parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Motor tasarım parametreleri

	6 Kutup	8 Kutup	10 Kutup
Stator/Rotor Dış Çap (mm)	203	210	242
Stator/Rotor İç Çap (mm)	142	150	181.5
Stator Oluk Sayısı	36	48	60
Stator Eksenel Uzunluğu (Tek Stator)	35	35	35
Rotor Eksenel Uzunluğu (Tek Rotor)	25	25	25
Hava Aralığı (mm)	1	1	1
Stator ve Rotor Malzemesi	JFE Steel 35JN250		

Çizelge 4.1’de verilen parametreler 3 bariyerli bir EA-SRM tasarımı için modellenmiştir. Bu parametreler SEY kullanarak motor analizlerini gerçekleştirebilen Ansys Maxwell yazılımına eklenerek modeller oluşturulmuştur. Çift hava aralıklı motor yapısı için ÇS ve ÇR yapıları sargı yapısında değişiklikler yapılarak programa eklenmiştir. Her ne kadar çift hava aralıklı EA motor tasarımlarında rotor ve stator arasındaki manyetik çekim etkisi nötrlense de üretim problemleri de düşünülerek hava aralığı 1 mm olarak alınmıştır.

4.1.1. Eksenel akıllı senkron relüktans motor 2B lineer motor tasarımı

Motor tasarımı için kullanılan analiz programları SEY ile 2B veya 3B analiz yapabilmektedir. Yapılan çalışmalarda bu analiz programlarının 3B SEY model ile aldığı sonuçlar deneysel çalışmalarla onaylanmıştır (Özsoy ve ark., 2023). 3B analiz sonuçları hassas ve doğru sonuçlar vermesine rağmen yüksek mesh sayısına sahip ve dolayısıyla uzun işlem süresine ihtiyaç duymaktadır. Bu durumda araştırmacılar daha az mesh sayısına sahip hızlı ve doğru sonuçlar veren 2B analizleri tercih etmektedir (Ajamloo ve ark., 2023).

RA makineler eksenel simetrik yapısı sebebiyle 2B analizler için uygunken, EA makineler üç boyutlu akı yolu ve eksenel simetrik olmayan yapısı sebebiyle 3B analize ihtiyaç duymaktadır. EA motorlar 2B analiz avantajlarından faydalanmak üzere lineer model şeklinde modellenenmektedir (Huang ve ark., 2022). EA motorun dış çap çevre uzunluğu ve iç çap çevre uzunluğunun ortalaması alınarak bir moment kolu oluşturulur ve dairesel hareket yerine lineer hareket benimsenmektedir. Literatürde 2B EA motor analizlerinin 3B analizleriyle yakın sonuçları çok daha kısa bir sürede verdiği görülmüştür (Gözüaçık ve ark., 2023). Özellikle başlangıç tasarımı ve model oluşturma aşamasında kısa sürede çok fazla model ve analiz şansı tanımaktadır.

Bu çalışmada, parametreleri Çizelge 4.1’de verilen motorların çift hava aralıklı 2B model tasarımları gerçekleştirilmiştir. Çift hava aralığı topolojisinden dolayı her bir motor için ÇS ve ÇR olmak üzere iki farklı tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlar 2B lineer analizde akım kaynağı kullanılarak analiz edilmiştir.

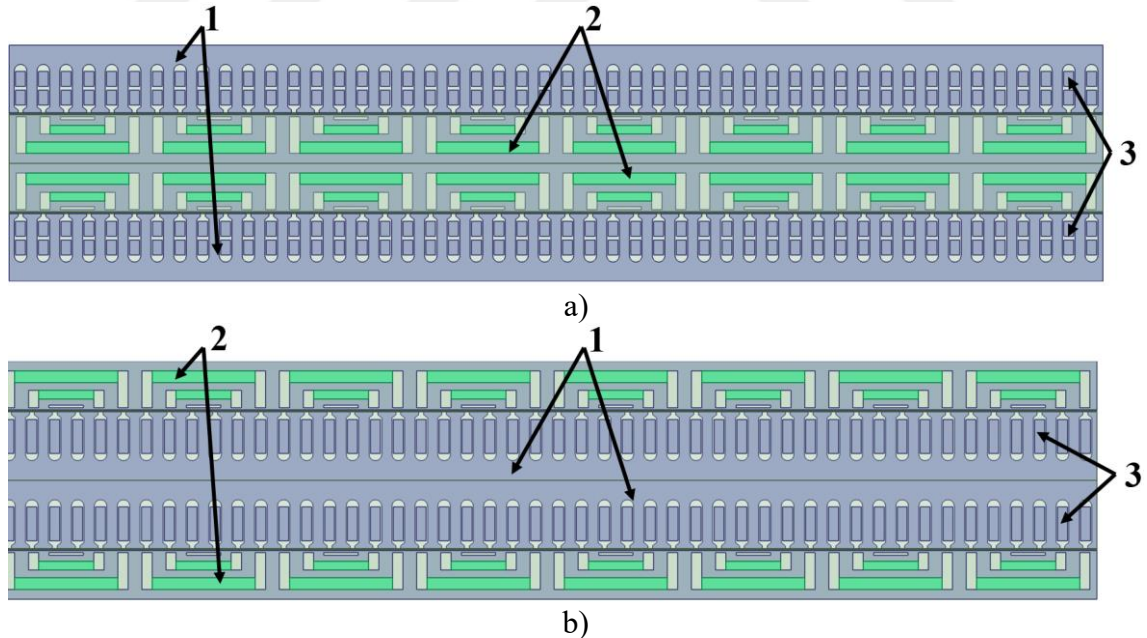
$$\begin{aligned} I_{faz(a)} &= I_{\max} \cdot \sin\left(N \cdot \frac{2p}{60} \cdot \pi \cdot t + \gamma - \mathfrak{U}\right) \\ I_{faz(b)} &= I_{\max} \cdot \sin\left(N \cdot \frac{2p}{60} \cdot \pi \cdot t + \gamma - \frac{2\pi}{3} - \mathfrak{U}\right) \\ I_{faz(c)} &= I_{\max} \cdot \sin\left(N \cdot \frac{2p}{60} \cdot \pi \cdot t + \gamma - \frac{4\pi}{3} - \mathfrak{U}\right) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Akım kaynağı için üç fazlı akım formülleri ($I_{faz(a)}, I_{faz(b)}, I_{faz(c)}$) Denklem (4.1)'de verilmiştir. Bu denklemde, N dakika başına devir (dev/dk) sayısını, p kutup çiftini, t zamanı, γ akım açısını ve $\mathfrak{U}$ başlangıç açısını temsil etmektedir (Gerçekcioglu & Akar,

2021). İlk modellerde MTPA noktasını bulmak için akım açısı (γ) üzerinden parametrik analiz gerçekleştirilmiştir. Diğer analizler, maksimum torkun elde edildiği MTPA akım açısının bir fonksiyonu olarak gerçekleştirilmiştir.

4.1.2. Eksenel akılı senkron relüktans motor mıknatıs destekli modellerin kıyaslanması

Tasarlanan EA-SRM'nin daha yüksek tork-güç yoğunluğuna ulaşması için tasarımın bariyerlerine mıknatıs eklenmiştir. Çalışmada Y30 – ferrit mıknatıs (0.4 T) desteği ile hem EA-SRM modelin performansını arttırmak hem de NTE mıknatısına göre maliyeti azaltmak amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra EAR'ler için yapılacak EA-SRM tasarımının yüksek performans ihtiyacı sebebiyle modelin NTE mıknatısı N42SH – Neodyum mıknatıs (1.451 T) destekli analizleri de yapılmıştır. Bu sayede EA-SRM modelinin mıknatıs desteği olmadan ve mıknatıs desteği ile elde edebileceği tork, güç ve verim gibi performans değerleri kıyaslanmıştır.



Şekil 4.2. Çift hava aralıklı 2B lineer model (1- Stator, 2-Mıknatıs, 3- Sargı); a) EA-ÇS-SMd-SRM, b) EA-ÇR-SMd-SRM

EA çift hava aralıklı mıknatıs destekli SRM (EA-ÇS-SMd-SRM/EA-ÇR-SMd-SRM) 2B lineer modelleri Şekil 4.2.a ve Şekil 4.2.b'de verilmiştir. Mıknatıslar geniş bariyerlerin

yatay boşluklarına yerleşecek şekilde eklenmiştir. Bu durum bariyerlere etki eden eksenel kuvvetlere karşı dayanıklılığı da arttıracaktır.

Analizlerden elde edilen ÇR ve ÇS modellerinin sonuçları $J = 10 \text{ A/mm}^2$ minimum akım yoğunluğuna göre Çizelge 4.2’de sunulmuştur. EA-SRM ve EA-SMd-SRM (Y-30 (Ferrit mıknatıs) ve N42SH (NTE mıknatıs) destekli) modellerinin ÇR ve ÇS topolojileri akım yoğunluğuna bağlı olarak 6, 8 ve 10 kutuplu tasarımlar olarak karşılaştırılmıştır. EAR motorları gibi düşük hacimde yüksek güç gerektiren motorlar özellikle yüksek akımlarda soğutma ihtiyacı duymaktadır. İzin verilen stator akım yoğunluğu da farklı soğutma yöntemlerine (bkz. Çizelge 3.6) göre değişmektedir (Özsoy ve ark., 2022). Stator soğutma ceketini ve doğrudan cebri sıvı soğutma seçimi, tasarımda 10 A/mm² ile 30 A/mm² arasında akım yoğunluklarına izin vermektedir (Gai ve ark., 2019). Akım yoğunluğu değerleri aralığında kutup sayısı, çeşitli motor hacmi ve farklı mıknatıs tipi (mıknatıssız, ferrit mıknatıs, NTE mıknatıs) değerlerinin etkilerini araştırmak için analizler yapılmıştır.

Çizelge 4.2. EA-SRM modellerinin 10 A/mm² akım yoğunluğuna göre kıyaslama sonuçları

Akım Yoğunluğu (J)		10 (A/mm ²)								
Parametreler		EA-SRM			EA-SMd-SRM (Y-30)			EA-SMd-SRM (N42SH)		
EA-ÇS-SRM	Kutup Sayısı	6	8	10	6	8	10	6	8	10
	MTPA Akım Açısı (γ)	44	42	42	37	37	36	9	11	14
	Tork (Nm)	24.68	35.23	52.58	32.46	50.14	77.48	40.77	61.15	94.04
	Tork/Amper	0.77	0.80	0.83	1.03	1.16	1.23	1.14	1.34	1.45
	Güç (kW)	7.75	11.06	16.51	10.2	15.75	24.34	12.81	19.21	29.54
	Güç Yoğunluğu (kW/kg)	0.54	0.78	1.02	0.59	0.93	1.28	0.74	1.13	1.55
	Verim (%)	85.5	87.71	88.07	89	91.39	91.85	88.93	92.12	92.75
	Stator Sargı Direnci (Ω)	0.342	0.203	0.139	0.342	0.203	0.139	0.342	0.203	0.139
Parametreler		EA-SRM			EA-SMd-SRM (Y-30)			EA-SMd-SRM (N42SH)		
EA-ÇR-SRM	Kutup Sayısı	6	8	10	6	8	10	6	8	10
	MTPA Akım Açısı (γ)	31	28	28	25	23	23	2	3	4
	Tork (Nm)	29.7	43.38	61.71	41.05	62.95	92.45	47.55	79.97	120.53
	Tork/Amper	0.82	0.82	0.83	1.13	1.19	1.24	1.21	1.36	1.46
	Güç (kW)	9.33	13.63	19.39	12.9	19.77	29.04	14.94	25.12	37.8
	Güç Yoğunluğu (kW/kg)	0.67	0.93	1.12	0.77	1.13	1.44	0.90	1.44	1.88
	Verim (%)	83.91	86.79	87.41	87.65	90.47	91.14	87.88	90.95	91.91
	Stator Sargı Direnci (Ω)	0.377	0.198	0.132	0.377	0.198	0.132	0.377	0.198	0.132

Çizelge 4.2’de 10 A/mm² akım yoğunluğu ve 3 000 dev/dk nominal hız için EA-SRM modelleri karşılaştırması ve analiz sonuçlarını verilmiştir. Analizlerde ÇR-ÇS topolojisine, kutup sayısına ve mıknatıs durumuna göre değişen MTPA akım açıları maksimum torka göre hesaplanmıştır. Kutup sayısı ve motor hacmi arttıkça modellerin performansı iyileşmektedir. En iyi çıkış gücü 10 kutuplu NTE mıknatıs destekli EA-ÇR-SRM modeli ile elde edilmiştir. Bu modelde motor 37.8 kW güç, 120.53 Nm tork ve %91.91 verimlilik değerine ulaşmıştır. Maksimum güç 6 kutuplu ve 8 kutuplu NTE mıknatıs destekli EA-ÇR-SRM modelleri için sırasıyla 14.94 kW ve 25.12 kW olarak analiz edilmiştir. Bu durumda 6 ve 8 kutuplu modellerin 30 kW nominal güce ulaşamadığı görülmüştür. Çizelge 4.2’de gösterildiği gibi, EA-ÇR-SRM modelleri EA-ÇS-SRM modellerine göre daha yüksek güç ve tork çıkışı elde etmektedir. 10 kutuplu NTE mıknatıs destekli EA-ÇS-SRM modeli, %92.75’lik maksimum verimlilikle nominal güce yakın 29.54 kW’a ulaşmaktadır. Minimum akım yoğunluğu cebri soğutma uygulanacak EA-SRM modelleri için olumlu sonuçlar elde etmektedir.

Ferit mıknatıs destekli EA-ÇR-SRM modelleri, kutup sayısı arttıkça 30 kW nominal güç performans kriterine yaklaşmakta ancak ulaşamamaktadır. 10 A/mm² akım yoğunluğunda, 6-8-10 kutuplu ferit mıknatıs destekli EA-SRM’ler sırasıyla 12.9 kW, 19.77 kW ve 29.04 kW güç değeri elde etmiştir. 6 ve 8 kutuplu modellerin hiçbiri minimum akım yoğunluğunda 30 kW nominal güce ulaşamamıştır. En iyi mıknatıssız EA-SRM modeli 19.39 kW güç, 61.71 Nm tork ve %87.41 verimlilik ile 10 kutuplu EA-ÇR-SRM olmuştur.

Sabit 3 000 dev/dk hızda gerçekleştirilen bu analizlerde güç ve tork birbiriyle doğru orantılı olarak değişmektedir. Stator sargısının direnci bobin sayısına ve bobin çapına bağlıdır. Sargı direncinin bakır kaybı üzerinde doğrudan bir etkisi olduğundan, verimlilik üzerinde olumsuz bir etkisi vardır. 10 kutuplu EA-SRM modellerinde yüksek verimin nedenlerinden biri düşük sargı direncidir. Tork akımla doğru orantılıdır dolayısıyla Çizelge 4.2’de Tork/Amper değeri akımdaki bir değişikliğin tork üzerindeki etkisini belirtmek için verilmiştir. NTE mıknatıs destekli EA-ÇR-SRM 10-kutuplu model, 10 A/mm² akım yoğunluğunda en yüksek Tork/Amper oranı 1.46 ve güç yoğunluğu 1.88 kW/kg değerini elde etmiştir. Yetersiz performans değerlerini iyileştirmek için, tüm EA-SRM modelleri daha yüksek akımda (30 A/mm² akım yoğunluğu) tekrar analiz edilmiştir.

Çizelge 4.3. EA-SRM modellerinin 30 A/mm² akım yoğunluğuna göre kıyaslama sonuçları

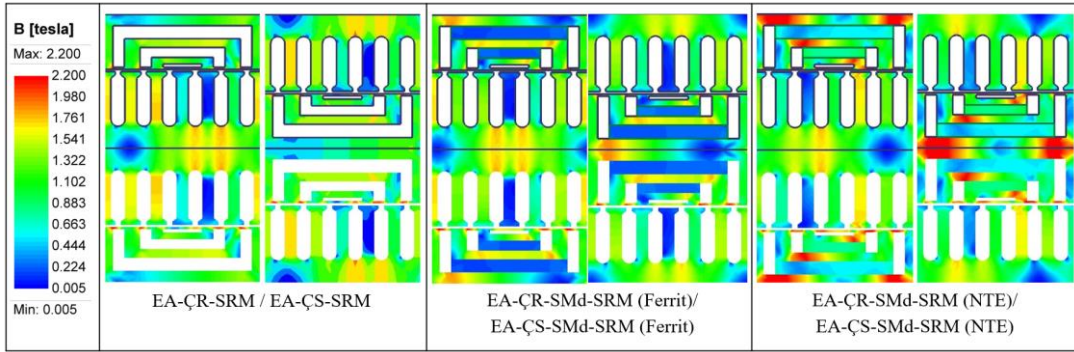
Akım Yoğunluğu (J)		30 (A/mm ²)								
Parametreler		EA-SRM			EA-SMd-SRM (Y-30)			EA-SMd-SRM (N42SH)		
EA-ÇS-SRM	Kutup Sayısı	6	8	10	6	8	10	6	8	10
	MTPA Akım Açısı (γ)	44	44	42	36	35	33	33	35	36
	Tork (Nm)	59.33	86.61	123.78	79.76	114.34	166.59	109.35	175.74	270.47
	Tork/Amper	0.62	0.65	0.65	0.85	0.88	0.89	1.17	1.35	1.44
	Güç (kW)	18.64	27.21	38.89	25.06	35.92	52.34	34.35	55.21	84.97
	Güç Yoğunluğu (kW/kg)	1.29	1.92	2.40	1.46	2.11	2.75	2.00	3.25	4.47
	Verim (%)	63.8	69.54	69.84	71.48	75.8	76.37	76.65	82.77	83.79
EA-ÇR-SRM	Stator Sargı Direnci (Ω)	0.342	0.203	0.139	0.342	0.203	0.139	0.342	0.203	0.139
	Parametreler	EA-SRM			EA-SMd-SRM (Y-30)			EA-SMd-SRM (N42SH)		
	Kutup Sayısı	6	8	10	6	8	10	6	8	10
	MTPA Akım Açısı (γ)	26	27	27	19	18	23	19	20	21
	Tork (Nm)	66.27	97.34	136.49	87.93	128.83	176.43	131.87	206.86	307.94
	Tork/Amper	0.61	0.62	0.61	0.80	0.80	0.79	1.20	1.29	1.37
	Güç (kW)	20.82	30.58	42.88	27.62	39.53	55.43	41.43	64.99	96.74
EA-ÇR-SRM	Güç Yoğunluğu (kW/kg)	1.50	2.08	2.47	1.66	2.26	2.75	2.49	3.72	4.80
	Verim (%)	58.8	65.58	66.61	65.09	70.23	71.75	72.12	79.47	81.26
	Stator Sargı Direnci (Ω)	0.377	0.198	0.132	0.377	0.198	0.132	0.377	0.198	0.132

Çizelge 4.3'te 30 A/mm² akım yoğunluğu ve 3 000 dev/dk nominal hızda EA-SRM 6-8-10 kutuplu modelleri için farklı MTPA akım açılarındaki analiz sonuçları verilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre en yüksek güç değeri 96.74 kW ile NTE mıknatıs destekli EA-ÇR-SRM modelinde elde edilmiştir. Bu modelde 307.94 Nm tork ve %81.26 verimlilik değerine ulaşılmıştır. 30 kW nominal güçte değerlendirildiğinde, 6 kutuplu ferrit mıknatıs destekli modellerin yanı sıra 6-8 kutuplu mıknatıssız modeller de yüksek akım yoğunluğuna rağmen yeterli değildir. Düşük akımda 10 A/mm² akım yoğunluğunda yapılan analizler ile karşılaştırıldığında yüksek akımda 30 A/mm² akım yoğunluğunda yapılan analizlerde verim değerleri düşmüştür.

Kutup sayısının motor performansı üzerindeki olumlu etkisi nedeniyle, 10 kutuplu mıknatıssız, ferrit mıknatıs destekli ve NTE mıknatıs destekli EA-ÇR-SRM modellerinin maksimum gücü sırasıyla 41.43 kW, 64.99 kW ve 96.4 kW olarak analiz edilmiştir. 10 kutuplu modelin maksimum güç yoğunluğu 4.8 kW/kg'dır. Düşük akım yoğunluğunda olduğu gibi, en verimli model NTE mıknatıs destekli EA-ÇS-SRM maksimum verimliliği

%83.79 olarak hesaplanmıştır. Analiz edilen modellerde akımdaki artış torkta artışa neden olsa da Çizelge 4.2'ye göre tork/amper oranları düşmektedir. Maksimum tork/amper oranı 10 kutuplu NTE mıknatıs destekli EA-ÇS-SRM modeli için 1.44 olarak hesaplanmıştır.

Mıknatıs destekli (ferrit mıknatıs ve NTE mıknatıs) EA-ÇR-SRM ve EA-ÇS-SRM analizlerinde 8 kutuplu ve 10 kutuplu modeller güç ve tork açısından yeterlidir. Güç ve verimlilik açısından 10 kutuplu modeller öne plana çıkmaktadır ancak 8 kutuplu modellere göre daha büyük hacme sahiptirler (bkz. Çizelge 4.1). Bu durumda 10 kutuplu modellerin daha yüksek performans, 8 kutuplu modellerin ise düşük hacim avantajına sahip olduğu görülmektedir.



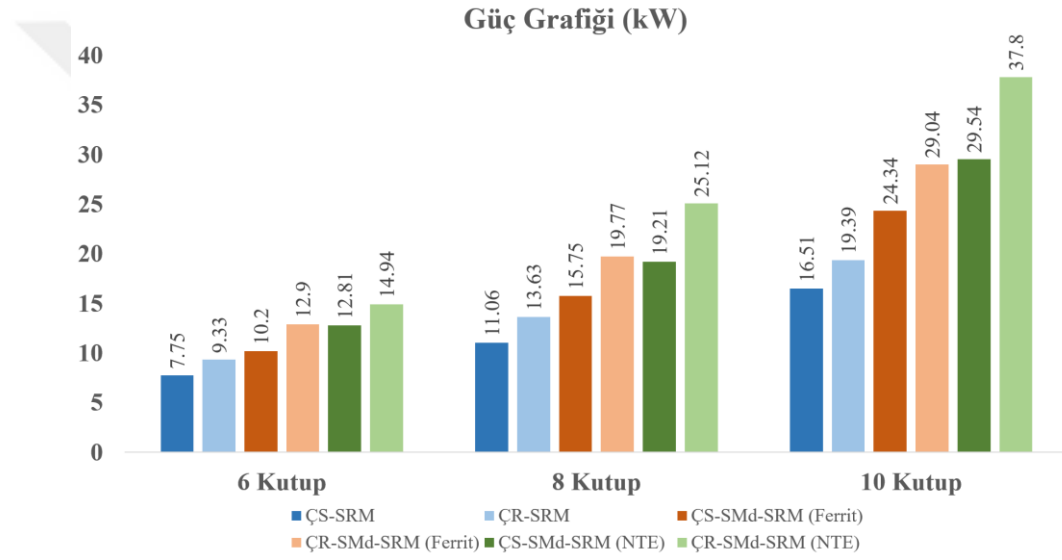
Şekil 4.3. Çift hava aralıklı mıknatıssız ve mıknatıs destekli 8 kutuplu EA-SRM modellerinin akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 4.3'te EA-SRM tasarım çalışmasında 8 kutuplu modellerinin akı dağılımı grafiklerini göstermektedir. Bu sonuçlar 6, 8 ve 10 kutuplu motor modellerinin çift hava aralıklı yapısına manyetik durum dahil edilerek elde edilmiştir. Mıknatıssız, ferrit mıknatıs destekli ve NTE mıknatıs destekli modeller farklı kutup sayılarında benzer farklılıklar gösterdiğinden, Şekil 4.3'te sadece 8 kutuplu analiz sonuçları verilmiştir.

Şekil 4.3'te bariyerler ve hava aralığı arasındaki ince nüve üzerinde akı yoğunluğunun her model için yaklaşık 2.2 T değerini verdiğini göstermektedir. EA-SMd-SRM'nin (NTE mıknatıs destekli) hem ÇR hem de ÇS modellerinde rotor boyunduruğundaki akı yoğunluğu beklendiği gibi diğer modellerden daha yüksektir. Çünkü mıknatıslar manyetik akı yoğunluğu için artırıcı bir etkiye sahiptir. Ayrıca diğer modellerden farklı olarak EA-SMd-SRM (NTE mıknatıs destekli) modelinde bariyerler arasındaki nüvede (segmentler) akı yoğunluğu artmaktadır. Mıknatıssız EA-SRM ve mıknatıs destekli EA-SMd-SRM (ferrit mıknatıs destekli) modellerinin ÇS ve ÇR tasarımlarında gözlemlenen

akı yoğunlukları çoğunlukla 1.5 T'nin altındadır. Sadece bariyerler ve hava aralığı arasında kalan nüvede beklendiği gibi yaklaşık 2.2 T ve üzerinde sonuçlar elde edilmiştir. Bölgesel olarak akı dağılımının doyuma gitmesi rotor tasarımındaki en ince bölgeye sahip olması sebebiyle normal karşılanmıştır.

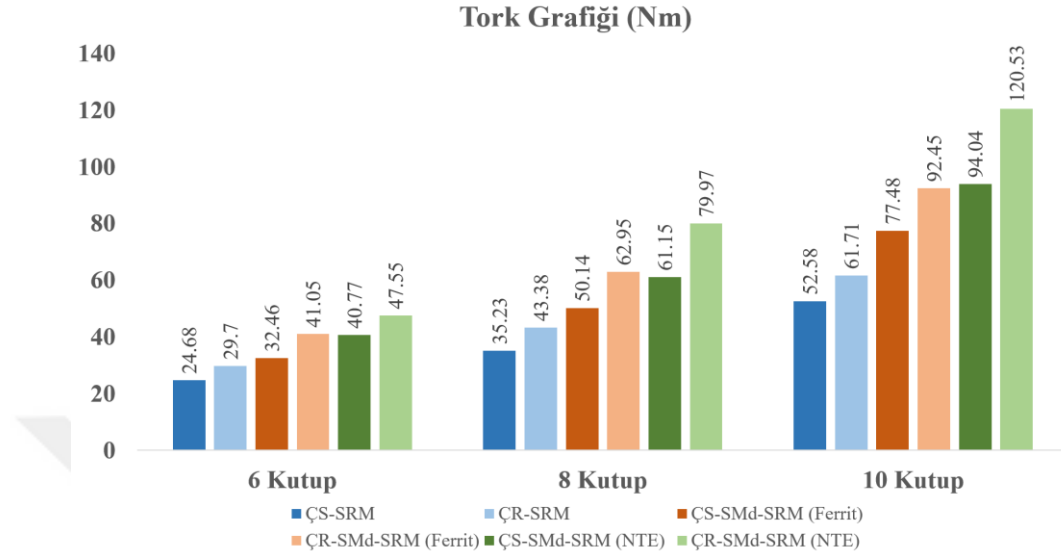
Çift hava aralığı yapısındaki EA-SRM modellerinin mıknatıssız ve mıknatıs destekli (ferrit ve NTE) tasarımları karşılaştırılmıştır. Aynı akım yoğunluğunda ($J = 10 \text{ A/mm}^2$) çift hava aralıklı (ÇS / ÇR) ve mıknatıs durumu (mıknatıssız / ferrit mıknatıs destekli / NTE mıknatıs destekli) 6, 8, 10 kutuplu motor modellerinin tork, güç ve verimlilik sonuçları analiz edilmiştir.



Şekil 4.4. EA-SRM tasarım modellerinin güç analizi sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.4'te tüm modellerin sadece ÇS ve ÇR topolojileri karşılaştırıldığında, performans sonuçlarında maksimum %30'luk bir güç farkı görülmektedir (8 kutuplu NTE mıknatıs destekli ÇS-SMd-SRM/ÇR-SMd-SRM modeller için). Diğer ÇS ve ÇR modelleri arasındaki bu farklılığın %17-%30 civarında olduğu hesaplanmıştır. 6 kutuplu EA-SRM modellerinin (ÇR ve ÇS) ortalama gücü ile karşılaştırıldığında, 8 kutuplu modeller %45 daha yüksek güç sonuçları elde ederken, 10-kutuplu modeller %110 daha yüksek güç sonuçları elde etmektedir. Bu modele ferrit mıknatıs eklendiğinde, 6 kutuplu modele kıyasla; 10 kutuplu model %132, 8 kutuplu model ise %54 daha yüksek güç değeri ortalamasına sahip olmaktadır. NTE mıknatıslı 6 kutuplu EA-SMd-SRM modellerinin (ÇR ve ÇS) ortalama gücüne bakıldığında, 8 kutuplu ve 10 kutuplu modeller sırasıyla

%72 ve %161 daha yüksek güç değerlerine ulaşmaktadır. Kutup sayısının artırılmasının tüm modeller için daha iyi sonuçlar verdiği açık bir şekilde görülmektedir.

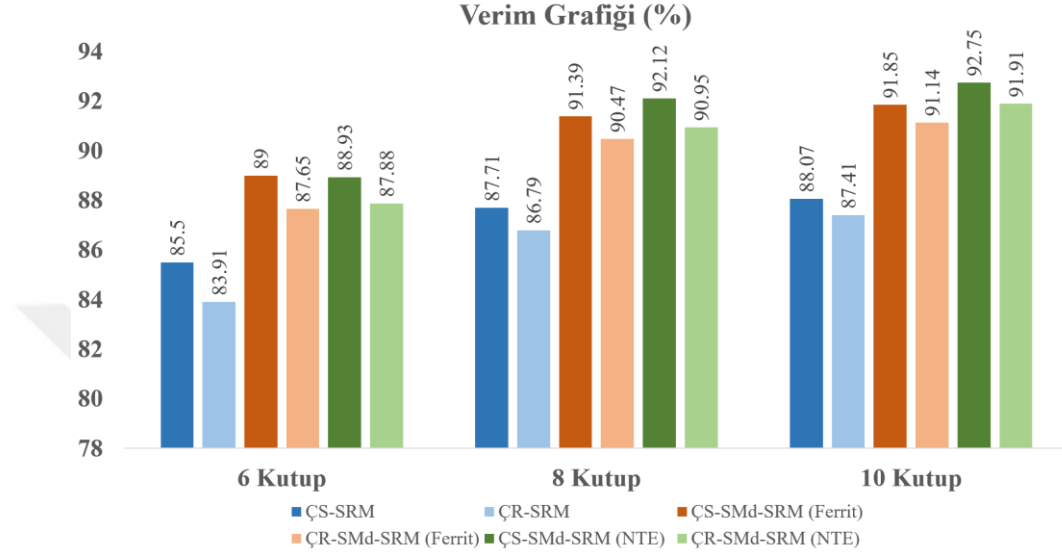


Şekil 4.5. EA-SRM tasarım modellerinin tork analizi sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.5'te EA-SRM (ÇR/ÇS) modellerinin (6-8-10 kutuplu) analizinden elde edilen tork sonuçlarını gösterilmektedir. Bu modeller için tork ve güç değerleri 3 000 dev/dk sabit hızda yapılan analizlerle doğru orantılı olarak değişmiştir. Şekil 4.5'te, 6 kutuplu mıknatıssız EA-SRM motor modellerinin (ÇR ve ÇS) ortalama tork değerlerine kıyasla ferrit mıknatıs destekli model için %35 ve NTE mıknatıs destekli model için %51'lik bir tork artışı görülmektedir. Benzer şekilde, 8 kutuplu mıknatıssız EA-SRM motor modellerinin (ÇR ve ÇS) ortalama torku ile karşılaştırıldığında, ferrit mıknatıs destekli modelde %44 ve NTE mıknatıs destekli modelde %80'lik bir tork artışı gözlenmektedir. 10 kutuplu mıknatıssız EA-SRM motor modeli performansında (ÇR ve ÇS'nin ortalaması), ferrit mıknatıs destekli model için %49 ve NTE mıknatıs destekli model için %88'lik bir tork artışı elde edilmiştir. Beklendiği gibi, NTE mıknatıs desteği her modelde daha iyi sonuçlar vermektedir.

EAR'ler için tasarlanan EA-SRM modellerinin performans karşılaştırması Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Analizlerin sonuçlarına göre, aynı akım yoğunluğunda istenen 30 kW güç değerine sadece EA-ÇR-SMd-SRM (NTE mıknatıs destekli) modellerde ulaşılmıştır. 10 kutuplu EA-ÇR-SMd-SRM (ferrit mıknatıs destekli) ve EA-ÇS-SMd-SRM (NTE mıknatıs destekli) modellerinde 30 kW nominal güç değerine çok yakın uygun sonuçlar elde edilmiştir. Maliyet ve NTE mıknatıslara bağımlılık göz önüne

alındığında, ferrit mıknatısların kullanımı özellikle 10 kutuplu model için avantajlı hale gelmektedir. Mıknatıssız modellerle nominal güce (≥ 30 kW) ulaşmak için daha yüksek akımlarda (akım yoğunluğu dikkate alınarak) veya daha yüksek hacimlerde yeniden tasarım yapılması gerekmektedir.



Şekil 4.6. EA-SRM tasarım modellerinin verim analizi sonuçlarının karşılaştırılması

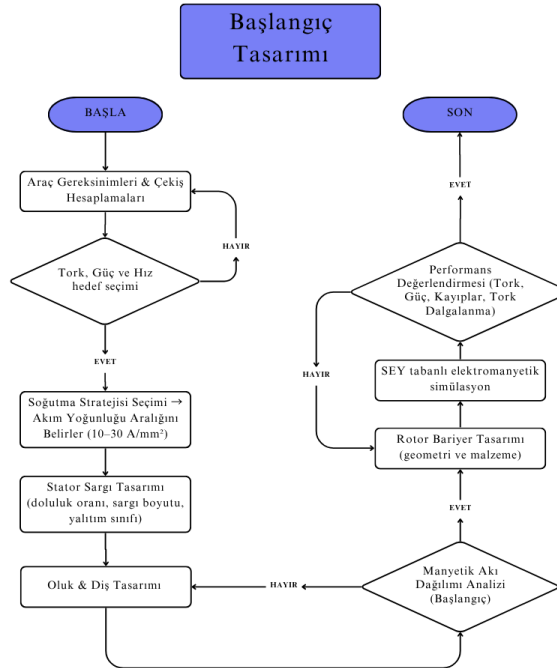
Analizler sonucunda EA-SRM modellerinin verimlilik karşılaştırması Şekil 4.6'da verilmiştir. Kutup sayısı arttıkça ÇS topolojisinin ÇR topolojisine göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca kutup sayısının artırılmasının tüm modeller için olumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Şekil 4.6'da 6-8-10 kutup için NTE mıknatıs destekli modeller ferrit mıknatıs destekli modellerden sırasıyla %1, %6 ve %1 daha verimlidir.

Bu çalışmada kullanılan modellerin tork, güç ve verimlilik sonuçları Şekil 4.4 ile Şekil 4.6 arasında gösterilmektedir. Bu grafikler incelendiğinde, 10 kutuplu motorun her bir performans değeri için diğer motor modellerinden daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. EAR motor tasarımı için 6 kutuplu motor performans değerleri yetersizdir. Bu durumda diğer modellere göre tercih edilmesi zordur. 8 kutuplu mıknatıssız motor modeli gerekli performansı sağlayamamaktadır. Ancak EA-ÇR-SMd-SRM (NTE mıknatıs destekli) model için yeterli performansa yakın sonuçlar elde edilmiştir. 8 kutuplu modeller, 6 kutuplu ve 10 kutuplu rakiplerine göre hacim avantajına da sahiptir. 6 kutuplu ve 10 kutuplu modeller 8 kutuplu modellere göre sırasıyla %1.7 ve %15 daha fazla hacme sahiptir. Tork/güç yoğunluğu açısından değerlendirildiğinde, 8 kutuplu mıknatıssız model 10 A/mm^2 akım yoğunluğunda 10 kutuplu mıknatıssız modele göre %45 daha az

tork/güç üretmektedir. Bu durumda 10 kutuplu modelin tork/güç yoğunluğu açısından dezavantajını önemli ölçüde azaltmaktadır. EAR'ler gibi özel yapılarda ve motor hacminin sınırlı olduğu çalışmalarda 8 kutuplu EA-SMd-SRM modelinin performans değerinden tasarruf edilerek tercih edilebilir. Hacim sınırlamasının olmadığı uygulamalarda ise 10 kutuplu EA-SMd-SRM (NTE mıknatıs destekli) tercih edilebilir. Benzer şekilde maliyete duyarlı uygulamalarda NTE mıknatıs destekli motorlar yerine 10 kutuplu mıknatıssız veya ferrit mıknatıs destekli EA-SRM modeller tercih edilebilir.

4.2. Eksenel Akılı Çift Hava Aralıklı Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarım ve Analizi

Bu tez çalışmasında EAR uygulamalarında kullanılmak üzere EA-ÇS-SMd-SRM tasarımı geliştirilmiştir. Kentsel sürüş döngüsünde kullanım amaçlı küçük segmentli bir araç prototipi oluşturulmuştur. Araca etkiyen kuvvetlerin ve sürüş gereksinimlerinin dikkate alınarak nominal güç, tork ve hız hesaplaması yapılmıştır. Sürüş sırasında hızlanma gereksinimlerine bağlı olarak, 130 km/s maksimum araç hızı için gerekli motor hızı 10 000 dev/dk olarak belirlenmiştir. İlk hızlanma, yokuş tırmanma ve yüksek hızlı otoyol sürüşü hesaplamalarına dayanarak, EA-ÇS-SMd-SRM 30 kW nominal güç ve 3 000 dev/dk nominal hızda çalışacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 4.7. Motor başlangıç tasarımı akış diyagramı

Şekil 4.7’de EA-ÇS-SMd-SRM için ilk tasarım sürecini gösteren bir akış şeması verilmiştir. Tasarım süreci, araç parametrelerinin belirlenmesi ve çekiş gücünün hesaplanmasıyla başlamaktadır. Hedef tork, güç ve hız değerleri bu aşamada tanımlanmaktadır. İlk tasarım parametreleri belirlendikten sonra, motor matematiksel yöntemler kullanılarak boyutlandırılmaktadır. RA makinelerde, motor gücü dış çapın karesi ve paket boyu ile orantılıdır. Ancak EA makinelerde güç, motorun dış çapının küpüne bağlı olarak değişmektedir (Özsoy ve ark., 2022).

Akım yoğunluğu cebri sıvı soğutmalı yapıda 10–30 A/mm² olarak belirlenmiştir (Gai ve ark., 2019). Seçilen akım yoğunluğuna göre, faz akımı, iletken kesiti ve iletken sayısı hesaplanmaktadır. Stator dış genişliği, stator boyunduruğu ve rotor akı yolu kalınlığı gibi nüve boyutlarını belirlemek için manyetik akı dağılımı analizi yapılmaktadır. Rotor bariyerlerinin sayısı, yapısı ve geometrisi belirlendikten sonra, SEY kullanılarak elektromanyetik analizler gerçekleştirilmektedir. Elde edilen motor performansı temel alınarak tasarım parametrelerinde revizyonlar yapılmaktadır.

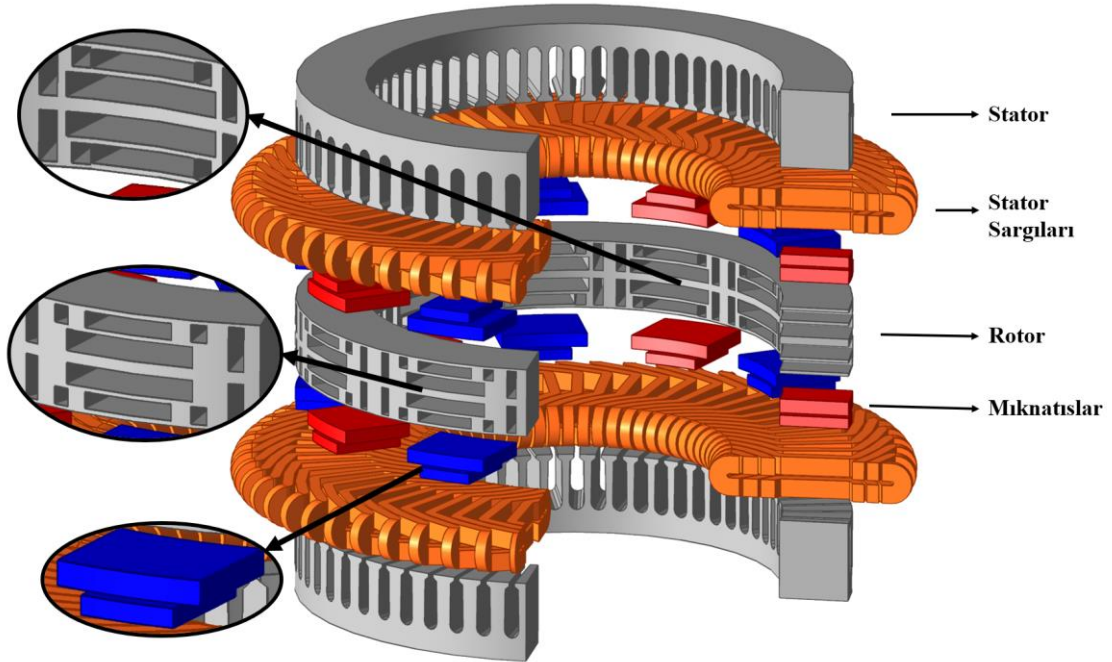
Bir önceki bölümde 6-8-10 kutuplu 2B lineer EA-SRM ve mıknatıs destekli (ferrit ve NTE) modelleri incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda NTE mıknatıs destekli 10 kutuplu EA-ÇR-SMd-SRM modelin elektromanyetik analizler sonucunda en yüksek tork ve güç değerine, EA-ÇS-SMd-SRM modelin ise en yüksek verim değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. EAR uygulamaları için hem tork hem de verim açısından yüksek performansa sahip motor tasarımı öncelenmiştir.

Yüksek performansa sahip EA-SMd-SRM modelleri 30 A/mm² akım yoğunluğunda yüksek akım değerlerinde analizleri yapılmıştır. Bu modeller motora cebri sıvı soğutma uygulanması dahilinde oluşturulmuştur. Yapılan çalışmalarda elektrikli motorlarda en yüksek ısı kaynağının stator sargıları olduğu gözlemlenmiştir (Özsoy, 2023; Y. Yang ve ark., 2017). Nihai incelemede EA-ÇR-SMd-SRM ortada stator yapısıyla stator sargıları ve stator nüvesinin soğutma uygulanacak yüzeyinde azalmaya sebep olmaktadır. EA-ÇS-SMd-SRM modelde ise rotor ortada kaldığından iki stator boyunduruğu soğutma kanallarıyla doğrudan temas edebilmektedir. Soğutma kanallarının stator nüvesine temas eden yüzeyinin artması stator nüvesi ve sargılarını soğutmada avantaj sağlamaktadır. Bu sayede hem soğutma kanalları arttırılabilir hem de geniş alanda kanal tasarımı gerçekleştirilmektedir. Termal kaygılar düşünülerek bu çalışmada EA-ÇS-SMd-SRM model tercih edilmiştir.

EA-ÇS-SMd-SRM modeli EAR uygulamaları için rotor ortada çift hava aralıklı EA motor tasarımıdır. Çizelge 4.4'te tasarım parametreleri ve performans değerleri verilmiştir. EA-ÇS-SMd-SRM modelde 10 kutup 60 oluklu stator, 2 bariyerli mıknatıs destekli rotor ve toplam eksenel uzunluğu 102 mm olacak şekilde bir tasarım belirlenmiştir. Nominal hız, tork ve güç değeri EAR'ler için yapılan hesaplamalarda küçük ölçekli bir aracın ihtiyaçları ve sürüş testleri göz önüne alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4. EA-ÇS-SMd-SRM modelin temel özellikleri

Parametre	Değer
Kutup / Oluk Sayısı	10 / 60
Dış Çap (mm) / İç Çap (mm)	242 / 181.5
Stator Eksenel Uzunluk (mm) / Rotor Eksenel Uzunluk (mm)	35x2 / 30
Hava Aralığı Genişliği (mm)	1
Nominal Hız (dev/dk) / Maksimum Hız (dev/dk)	3 000 / 10 000
Nominal Güç (kW) / Maksimum Güç (kW)	30 / 65
Nominal Tork (Nm) / Maksimum Tork (Nm)	96.1 / 253.1
Nominal Faz Akımı (A_{tepe}) / Maksimum Faz Akımı (A_{tepe})	115 / 283
Stator Malzemesi (Lamine) / Rotor Malzemesi (Lamine)	JFE_35JN230
Laminasyon Faktörü	0.97
Stator Oluk Ağız Genişliği (mm)	2.5
Stator Oluğu Maksimum Kama Genişliği (mm)	6.5
Stator Oluğu Üst Gövde Genişliği (mm)	6.5
Stator Oluk Ağız Yüksekliği (mm)	1.5
Stator Oluğu Maksimum Kama Yüksekliği (mm)	1.5
Stator Oluğu Gövde Yüksekliği (mm)	18.75
Stator Ağırlığı (kg) / Rotor Ağırlığı (kg)	6.76 / 2.26
Mıknatıslar	N42SH
Mıknatıs 1 (Alt Bariyer) Ağırlığı (kg) / Mıknatıs 2 (Üst Bariyer) Ağırlığı (kg)	0.0517 / 0.0257
Stator Sargı Malzemesi	Bakır
Stator Sargı Ağırlığı (kg)	9.64



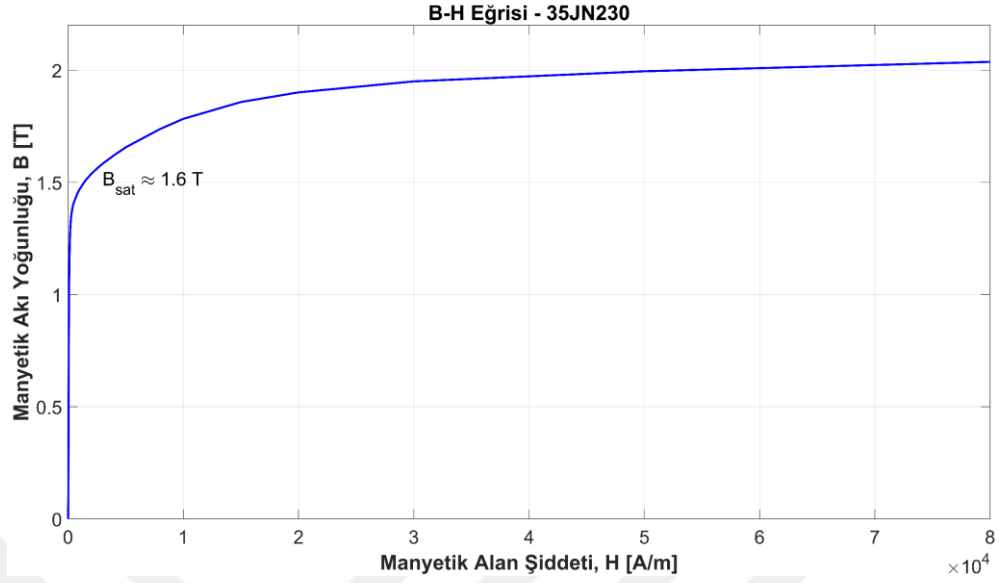
Şekil 4.8. EA-ÇS-SMd-SRM 3B model tasarımı

EA-ÇS-SMd-SRM 3B modeli Şekil 4.8’de verilmiştir. Bu model NS topolojisine uygun olarak tasarlanmıştır (Özsoy ve ark., 2024). EA model tasarımında en büyük dezavantajlardan biri aksenel yapının dış çaptan içe doğru daralmasıdır. EA-SMd-SRM ve EA-SMSM tasarımında bu durum bariyerlerin ve mıknatısların içe doğru daralmasını gerektirmektedir (Eser & Üstkoyuncu, 2024; Geng ve ark., 2024). Konik yapıdaki bu tasarım değişken ölçüleriyle üretim aşamasında problemlere neden olmaktadır.

Şekil 4.8’de görülen EA-ÇS-SMd-SRM modelin bariyer yapısı seri üretime uygun bir şekilde tasarlanmıştır. Konik yapıya rağmen bariyerlerin ve mıknatısların dış çaptaki ve iç çaptaki boyutları değişmemektedir. Dış ve iç çaptaki bu değişim stator dişlerinin daralması gibi bariyerlerin arasındaki nüvenin daralmasıyla telafi edilmiştir. Yapısal tasarımda, dış çaptan iç çapa kadar tutarlı bariyer boyutlarını korumak, iç çap bölgesindeki nüve hacmini azaltmaktadır. Ancak, dış çap bölgesindeki manyetik akı dağılımı kabul edilebilir seviyede kalmakta ve rotor dış çap hacmi etkin bir şekilde kullanılmaktadır. İç çaptaki nüve hacminin azalması ve konik yapı nedeniyle bariyerlerin birbirine yakınlığı, akı yoğunluğunda yerel artışlara neden olmaktadır. Ancak bu durum motor performansı üzerinde önemli bir olumsuz etkiye sahip değildir ve seri üretime uygun bariyer geometrisi göz önüne alındığında ihmal edilebilir düzeydedir.

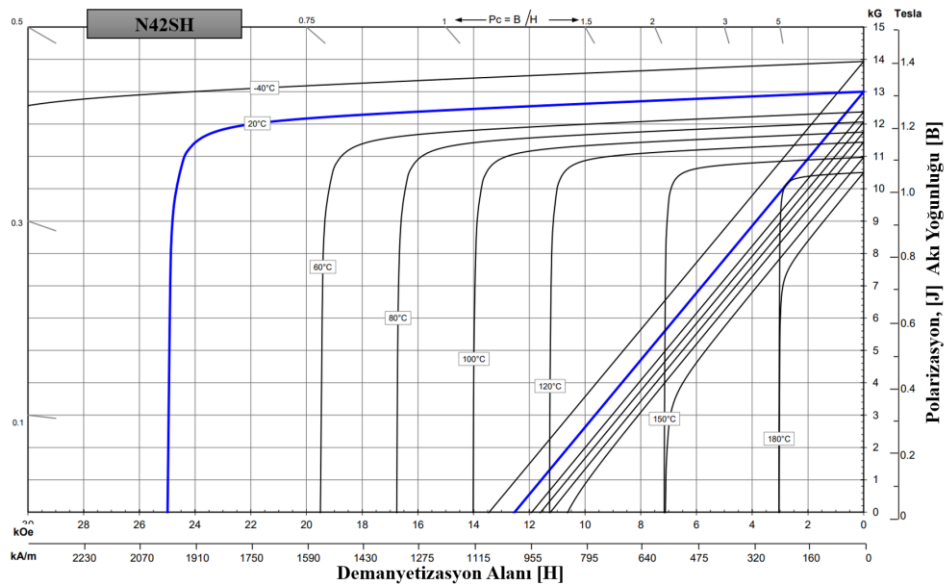
Bu modelde stator oluklarında olduğu gibi bariyer kalıplarının oluşturulması ve kalıp/zımba yöntemiyle üretilmesi kolaylaşmaktadır. EA-ÇS-SMd-SRM rotor bariyer kalıpları, seri üretime uygun laminasyonlu çelik saclara işlenebilmektedir. Dış çapından iç çapına kadar değişken boyutlara sahip standart EA makine rotor bariyer yapısı tek bir kalıpla üretilmemektedir.

Bu çalışmada, EA-ÇS-SMd-SRM 3B modeline dayalı elektromanyetik analizleri ANSYS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hesaplama süresini optimize etmek için 1/10 3B model kullanılmıştır. Analizler için TAU mesh yöntemi kullanılmış ve toplam mesh eleman sayısı 145.891 adet olmuştur. Analiz süresi 0.008 sn ve analiz adım süresi 0.000133 sn olarak ayarlanmıştır. Tüm analizler, AMD Ryzen 9 7950X 4.50 GHz işlemci ve 64 GB RAM ile donatılmış bir bilgisayar sisteminde gerçekleştirilmiştir.



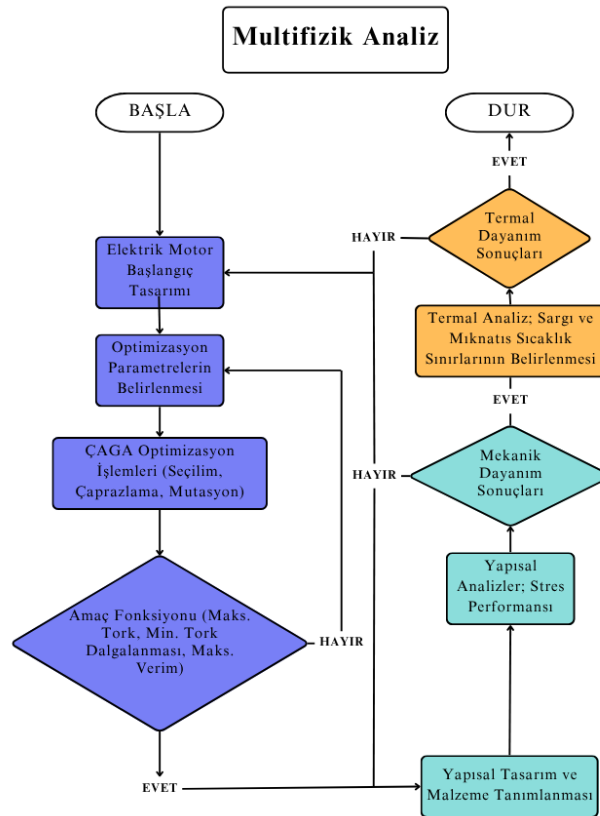
Şekil 4.9. Stator ve rotor nüvesi 35JN230 B-H eğrisi

EA-ÇS-SMd-SRM modelin rotor ve stator nüvesi için 35JN230 kristal taneleri rastgele yönelenmiş (non-grain oriented) silisli sac kullanılmıştır. Rastgele kristal dağılımı sayesinde her yönde benzer manyetik özelliğe sahip olup düşük maliyetli malzemelerdir (Kwon & Lim, 2023; Wi ve ark., 2023). 35JN230 silisli sac 0.35 mm kalınlığa, 7.6 kg/dm³ yoğunluğa, 50 Hz 1.5T için 2.3 W/kg nüve kaybına sahiptir (Anonim, 2025k). Şekil 4.9’da EA-ÇS-SMd-SRM rotor ve stator nüvesi 35JN230 elektrik çeliğinin B-H eğrisi verilmiştir. Manyetik alan şiddeti 5000 A/m için manyetik akı yoğunluğu satürasyon noktası yaklaşık 1.6 T olarak verilmiştir.



Şekil 4.10. N42SH sabit mıknatıs manyetik özellikleri (Anonim, 2025f)

Mıknatıs desteği için N42SH NTE Neodyum mıknatısları kullanılmıştır (Geng, Hou, ve ark., 2022; Geng, Wang, ve ark., 2023; Geng, Zhu, ve ark., 2023; Geng ve ark., 2025; S.-H. Yang ve ark., 2023; Zhang ve ark., 2022). N42SH mıknatıslar yatay iki bariyere (bkz. Şekil 4.8) yerleştirilmiştir. Şekil 4.10'da N42SH sabit mıknatısın -40°C 'den 180°C 'ye kadar manyetik değişim grafiği verilmiştir. N42SH artık mıknatısiyeti nominal 1.31 T ve mıknatıs yoğunluğu 7.6 g/cm^3 'tür. Yüksek sıcaklıkta stabil manyetik performans beklenen uygulamalarda 330 kJ/m^3 yüksek enerji yoğunluğu ve 987 kA/m yüksek koersivite kuvveti sayesinde tercih edilmektedir. N42SH mıknatıslar maksimum çalışma sıcaklığı 150°C 'ye kadar manyetik özelliklerini korumaktadır. Ayrıca Curie sıcaklığı $\approx 310^{\circ}\text{C}$ 'de mıknatıs özelliğini tamamen kaybetmektedir (Anonim, 2025f).



Şekil 4.11. EA-ÇS-SMd-SRM model tasarımı akış şeması

EAR uygulamaları için tasarlanan motorlarda sürüş testlerine bağlı olarak başlangıç tasarımı, optimizasyon çalışması, verim haritası, yapısal analizi ve termal analizi karakteristik özellikleri belirlenmektedir (Al-ani, 2021; Kwon & Lim, 2023; Song ve ark., 2020). EA-ÇS-SMd-SRM model tasarımı Şekil 4.11'de optimizasyon, yapısal analiz ve termal analiz basamakları ile akış şemasında verilmiştir. Bu çalışmada iş süreci de bu adımlara uygun olarak belirlenmiştir.

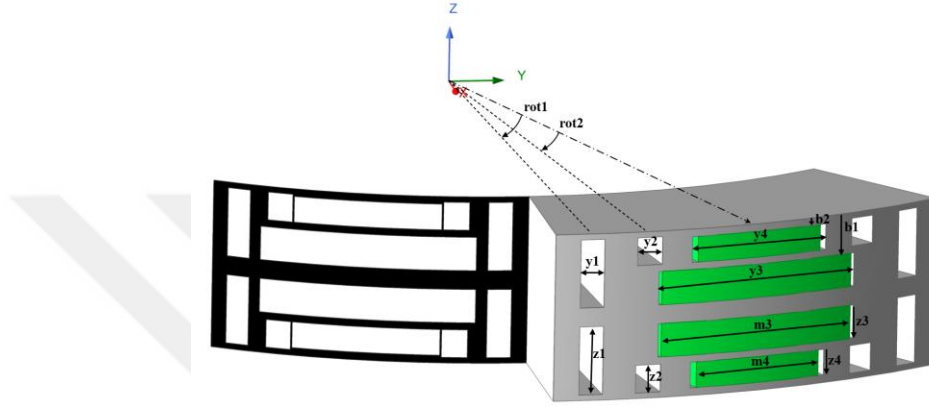
4.3. Eksenel Akılı Çift Stator Sabit Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Optimizasyon Çalışması

SRM karakteristik olarak rotor kısmına eklenen bariyerler sayesinde akı yolu oluşturmaktadır. Bu bariyerler sayesinde d - q eksenlerindeki relüktans/endüktans farkından tork üretmektir. Rotor bariyer yapısı rotor d eksen endüktansının q eksen endüktansına oranı olan çıkıntı oranını ve dolayısıyla motor performansını doğrudan etkilemektedir (Eser & Üstkoyuncu, 2024). Bu nedenle rotor tasarım parametrelerinin optimizasyonu en ideal modele ulaşmamızı sağlamaktadır. SMd-SRM için tork dalgalanmasını azaltmak, tork ve verimi arttırmak başlıca performans kriterleri olarak alınmaktadır (Gedera, 2019; Wi ve ark., 2023). Optimizasyon çalışması için biyolojik gen aktarımından yola çıkılarak geliştirilmiş GA kullanılmaktadır. GA rastgele yeni bireylerin üretildiği, bu bireylerin seçim, çaprazlama, mutasyon, sıralama gibi işlemler sonucunda amaç fonksiyonuna en uygun bireyleri seçmeye dayalı bir optimizasyon yapısına sahiptir. Birden fazla amaç fonksiyonuna sahip sistemlerde ise ÇAGA kullanılmaktadır (Eser & Üstkoyuncu, 2024; Kwon & Lim, 2023; Wi ve ark., 2023). Bu çalışmada EAR uygulamaları için EA-ÇS-SMd-SRM modeli sürüş testi şartlarına bağlı yüksek tork (düşük hızlarda ivmelenme ve yokuş tırmanma), yüksek güç (otoyol sürüşü ve yüksek hızda ilerleme) ve yüksek verim gerekmektedir. Gürültü ve titreşime sebep olacağı için tork dalgalanmasının da mümkün olduğu kadar azaltılması amaçlanmaktadır. Bu durumda birden fazla amaç fonksiyonu için ÇAGA ile rotor bariyer tasarım parametreleri tork, tork dalgalanması ve verimi optimize etmek için kullanılmıştır (Wi ve ark., 2023).

$$A_{macFonk} = 0.2[T_{ort} - T_{maks}]^2 + 0.6[T_{dalg.} - T_{dalg.min}]^2 + 0.2[\eta_{ort} - \eta_{maks}]^2 \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'de amaç fonksiyonu tork, tork dalgalanması ve verime bağlı tek bir fonksiyona indirgenerek verilmiştir. SRM'lerde, relüktans tabanlı rotor yapıları nedeniyle önemli tork dalgalanmaları yaşanmaktadır (Adăscăliței ve ark., 2024). EA-ÇS-SMd-SRM'nin başlangıç tasarımında, 120.9 Nm tork, %23.5 tork dalgalanması ve %92.8 verimlilik elde edilmiştir. Motor modeli sadece maksimum tork elde etmek için optimize edildiğinde $T_{maks}=125$ Nm olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde minimum tork dalgalanması

$T_{dalg.min}=\%6$ ve maksimum verim $\eta_{maks}=\%95$ olarak analiz edilmiştir. Başlangıç modelinde maksimum tork ve verimlilik değerleri tork dalgalanmasına göre daha dengeli sonuçlar vermektedir. Gedera (2019) tarafından yapılan çalışmaya benzer şekilde, Denklem (4.2)'deki amaç fonksiyonu bu optimum değerlere yaklaşmak üzere oluşturulmuştur. Bu fonksiyonda tork T_{ort} ve verimlilik η_{ort} için ağırlık %20, tork dalgalanması $T_{dalg.}$ için ise %60 olarak belirlenmiştir (Gedera, 2019).



Şekil 4.12. EA-ÇS-SMd-SRM 1/10 model rotor bariyer yapısı ve parametreleri

Şekil 4.12’de EA-ÇS-SMd-SRM rotor modeli ve değişken parametreler verilmiştir. Bu parametreleri belirli sınırlar içinde değiştirerek amaç fonksiyonunun değerini sıfıra yaklaştırmak amaçlanmıştır. ‘y1’, ‘y2’, ‘y3’ ve ‘y4’ rotor bariyerlerinin genişlikleri, ‘m3’ ve ‘m4’ ise mıknatısların genişlikleri olarak verilmiştir. ‘b2’ ve ‘b1’ mıknatısların hava aralığına uzaklığı olarak gösterilmektedir. ‘z1’ ve ‘z2’ dikey bariyerlerin uzunlukları ‘z3’ ve ‘z4’ ise yatay bariyerlerin uzunluklarıdır. Rotor tasarımında mekanik dayanımı arttırmak için hava aralığı ile bariyerler arasında nüve kısmı 1 mm olarak sabitlenmiştir. Bu durumda ‘z1’ ve ‘z2’ optimizasyona eklenmemiş ve $z1=b1+z3+1$ mm, $z2=b2+z4+1$ mm denklemleri ile sabit tutulmuştur. ‘rot1’ ve ‘rot2’ dikey bariyerlerin konumunu kutup orta noktasına göre belirleyen açılardır.

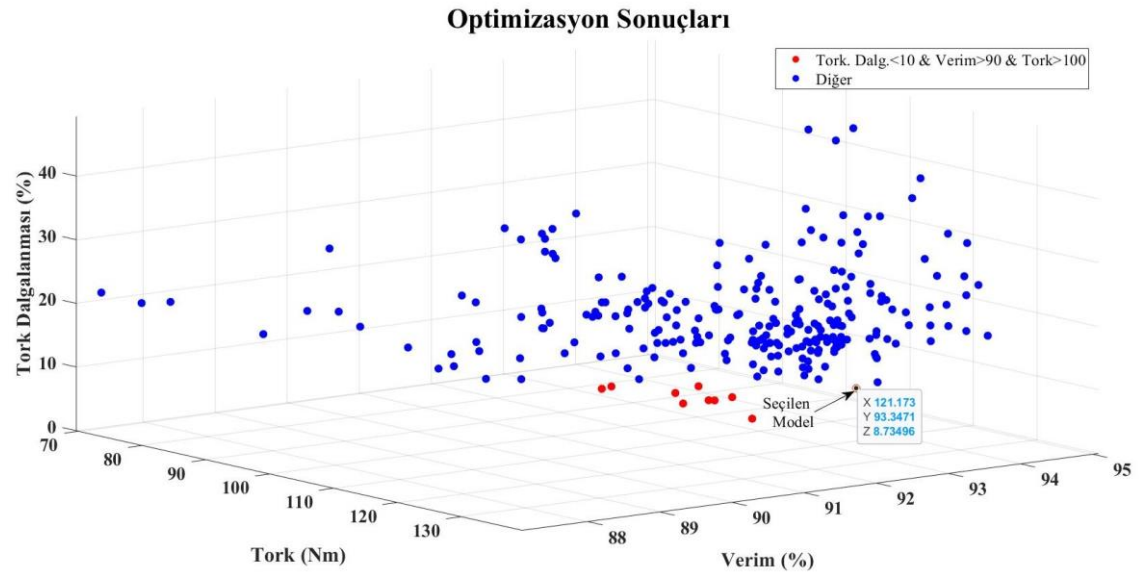
Çizelge 4.5. EA-ÇS-SMd-SRM’nin değişken parametreleri, optimizasyon sınırları ve optimize edilmiş değerler

Parametreler	Başlangıç Değeri	Minimum Sınır Değeri	Maksimum Sınır Değeri	Optimize Edilmiş Değerler
b1 (mm)	7.5	7	7.9	7.281709009
b2 (mm)	1.5	1	2	1.359964308
y1 (mm)	6.2	4	7	4.273731954
y2 (mm)	3.2	3	5	4.578323399
y3 (mm)	40	30	46	38.40619239
y4 (mm)	25	20	30	26.29369015

Çizelge 4.5. EA-ÇS-SMd-SRM'nin değişken parametreleri, optimizasyon sınırları ve optimize edilmiş değerler

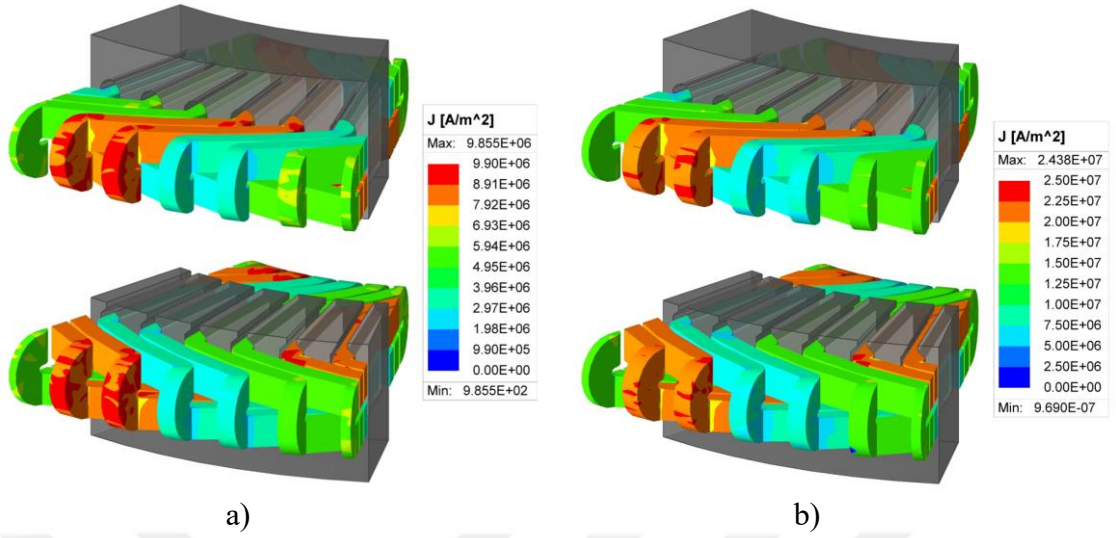
m3 (mm)	37	25	45	37.17054926
m4 (mm)	22	15	29	24.01390593
z3 (mm)	7	5	7	6.027811951
z4 (mm)	4	3	4.9	4.654978277
rot1 (derece)	14.5	14	15	14.853
rot2 (derece)	9.5	9	10	9.94377551

Çizelge 4.5'te değişken bariyer parametreleri, bu parametrelerin sınır değerleri ve optimize edilmiş parametre değerleri verilmiştir. Optimizasyon esnasında yapısal bozuklukların önüne geçmek için rotor parametreleri bariyer yapılarının kesişmemesi ve karışmaması için maksimum ve minimum değerler aralığında analiz edilmiştir. Optimizasyon analizleri değişken parametreler, 3 000 dev/dk nominal hız ve 106 A_{rms} akıma göre gerçekleştirilmiştir.



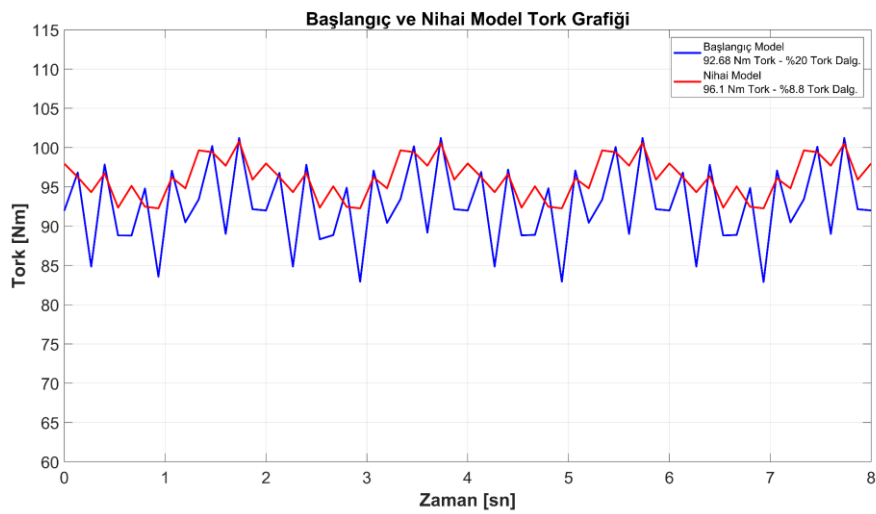
Şekil 4.13. EA-ÇS-SMd-SRM optimizasyon sonuçları

EA-ÇS-SMd-SRM modelinin optimizasyon sonuçları Şekil 4.13'te verilmiştir. Grafikte tork dalgalanmasının %10'dan küçük olduğu, tork ve verimin sırasıyla 100 Nm ve %90'dan büyük olduğu değerler kırmızı renkte vurgulanmıştır. Optimizasyon sonuçlarına göre nihai EA-ÇS-SMd-SRM modelin 106 A_{rms} için 121.17 Nm tork, %8.73 tork dalgalanması ve %93.34 verim elde ettiği görülmektedir.

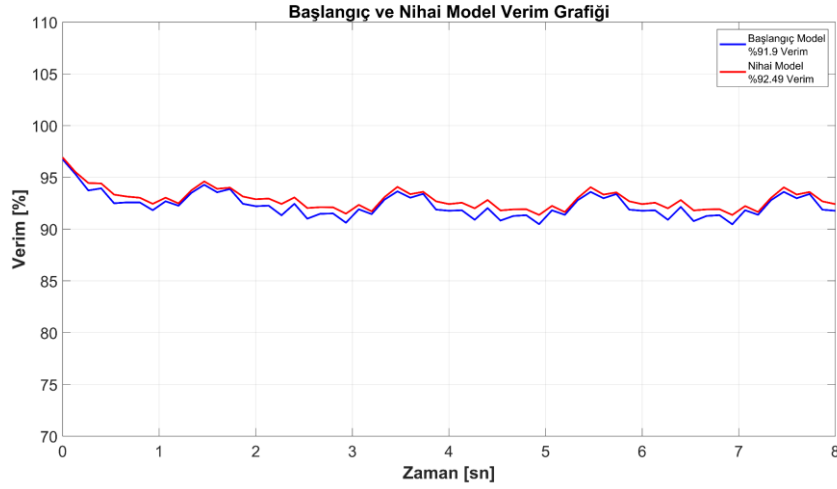


Şekil 4.14. EA-ÇS-SMd-SRM akım yoğunluğu sonuçları; a) nominal güç 30 kW, b) maksimum güç 65 kW

Optimizasyon çalışmalarının ardından nihai model nominal ve tepe değerleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.14'te nominal 30 kW ve maksimum 65 kW güç değeri için stator sargılarının akım yoğunluğu dağılım grafiği verilmiştir. Cebri sıvı soğutma uygulanan EA-ÇS-SMd-SRM için nominal 30 kW güç değeri 81.3 A_{rms} akım ve maksimum 9.8 A/mm² akım yoğunluğuna sahiptir. Aynı modelde 200 A_{rms} akım ve maksimum 24.4 A/mm² akım yoğunluğunda 65 kW maksimum güç değerine ulaşılmıştır. Cebri sıvı soğutma uygulanan EA-ÇS-SMd-SRM modelin 10-30 A/mm² akım yoğunluğu sınırları içinde olduğu gözlemlenmiştir.

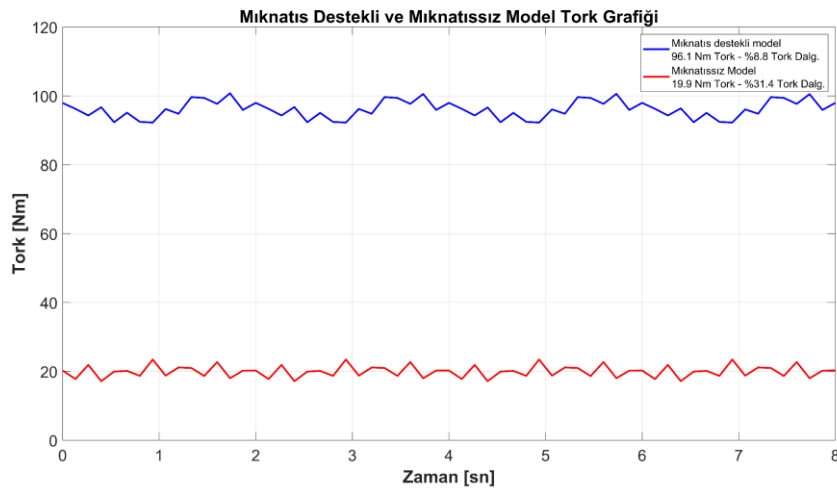


Şekil 4.15. EA-ÇS-SMd-SRM başlangıç ve nihai modelin tork ve tork dalgalanması kıyaslaması



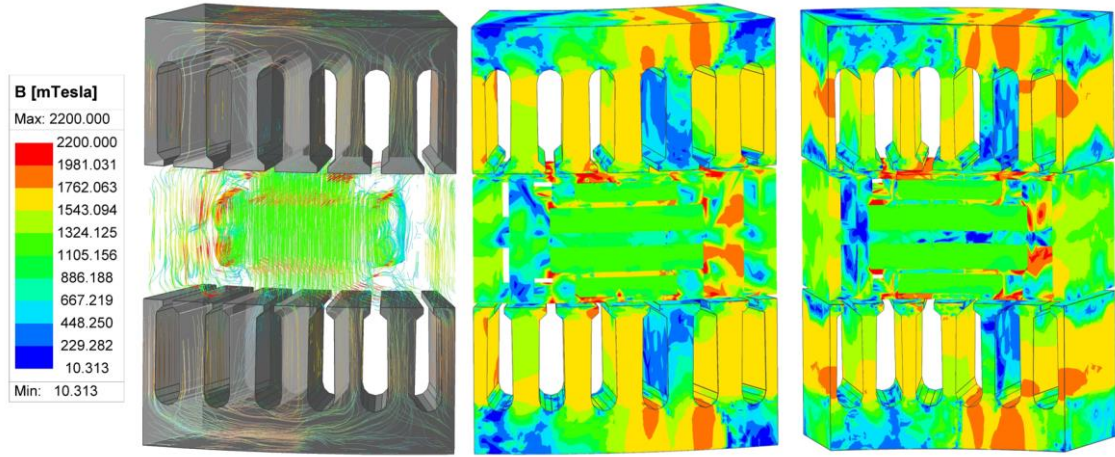
Şekil 4.16. EA-ÇS-SMd-SRM başlangıç ve nihai modelin verim kıyaslaması

EA-ÇS-SMd-SRM başlangıç ve nihai model kıyaslaması 81.3 A_{rms} akımda nominal 30 kW güç değeri için yapılmıştır. Şekil 4.15'te iki modelin tork ve tork dalgalanması sonuçları incelenmiştir. Başlangıç modelinde 92.68 Nm tork üretilirken, %20 tork dalgalanması meydana gelmektedir. Optimizasyon sonrası nihai modelde ise %60 ağırlıkla amaç fonksiyonuna eklenen tork dalgalanmasında %8.8'e düşüş olurken, tork değerinin 96.1 Nm'ye ulaştığı görülmektedir. Şekil 4.16'da başlangıç modeli %91.9 verim elde etmektedir. Nihai modelde ise verim %92.49'a çıkmaktadır. EA-ÇS-SMd-SRM'de tork dalgalanması bariyerli tasarım sebebiyle yüksek olmaktadır. Rotor bariyerlerinde (bkz. Denklem (4.2)) tork dalgalanmasının daha yüksek ağırlığa sahip olduğu amaç fonksiyonu ile ÇAGA optimizasyonu yapılmıştır. Bunun sonucunda EA-ÇS-SMd-SRM modelde optimum sonuç tercih edilmiştir.



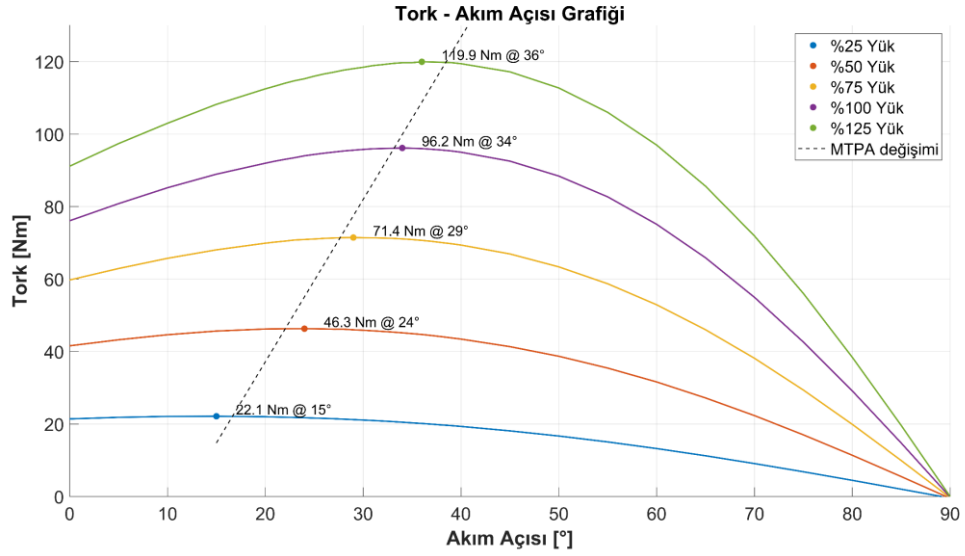
Şekil 4.17. EA-ÇS-SRM ve EA-ÇS-SMd-SRM model tork ve tork dalgalanması kıyaslaması

Şekil 4.17’de EA-ÇS-SRM modelin mıknatıssız ve mıknatıs destekli analizleri gerçekleştirilmiştir. Mıknatıssız modelde 55° MTPA akım açısında yapılan analizlerde saf relüktans motor özelliğiyle 19.9 Nm tork ve %31.4 tork dalgalanması elde edilmiştir. EA-ÇS-SMd-SRM model ile kıyaslandığında rotor bariyerlerine eklenen mıknatıslar sayesinde tork %383 artış, tork dalgalanması ise %72 azalış göstermiştir. EA-ÇS-SRM modeli EAR uygulamaları için yeterli performans kriterlerine sahip olmadığı için bu çalışmada mıknatıs destekli model tercih edilmiştir.



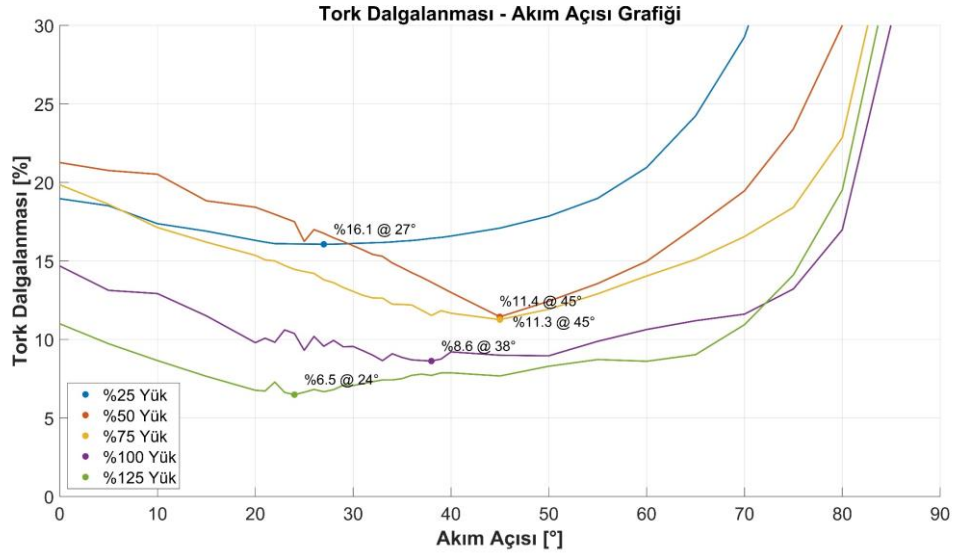
Şekil 4.18. EA-ÇS-SMd-SRM 1/10 3B model akı dağılımı ve akı yoğunluğu

Şekil 4.18’de EA-ÇS-SMd-SRM akı dağılımı ve akı yoğunluğu analiz sonuçları verilmiştir. Akı yoğunluğu grafiği incelendiğinde rotorun hava aralığına yakın en ince bölümlerinde ve iç çapa doğru daralan nüvenin en inceldiği bölümlerde akının 2.2 T’ya yakın sonuçlar verdiği ve doyuma uğradığı gözlemlenmiştir. Rotor nüvesindeki genel dağılım ise ortalama 1.5 T’yı geçmemektedir. Stator akı yoğunluğu stator dişlerinde ortalama 1.7 T civarındayken, boyundurukta ise akı yoluna bağlı olarak 0.4-1.9 T aralığında değerler almaktadır. EA-ÇS-SMd-SRM akısı NS tipi EA motor topolojisine uygun dağılıma sahiptir. Stator boyunduruğundan geçen akı rotor üzerinden karşı stator boyunduruğuna aktarılmaktadır. Bu sayede rotor boyunduruğu dolayısıyla rotor eksenel uzunluğu azaltılmıştır. Akı dağılımında mıknatıslar sebebiyle rotor merkezinde yoğun akı çizgileri gözlemlenmektedir.



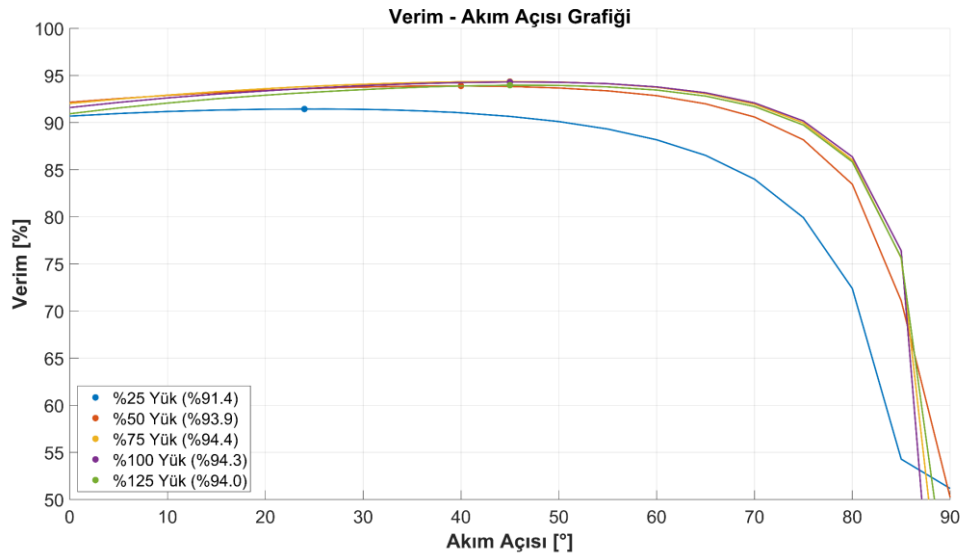
Şekil 4.19. EA-ÇS-SMd-SRM farklı yüklerde akım açısına bağlı tork değişimi

EA-ÇS-SMd-SRM farklı yüklerde akım açısının değişimine göre parametrik analiz yapılmıştır. Sırasıyla %25, %50, %75, %100 ve %125 yükler için ayrı ayrı yapılan analizlerde torkun akım açısına bağlı değişimi Şekil 4.19’da verilmiştir. Farklı yüklerde ulaşılan maksimum tork noktaları grafik üzerinde gösterilmiştir. MTPA kontrol yöntemiyle maksimum torkun elde edildiği akım açısının yükün artmasıyla arttığı görülmektedir. SRM rotor yapısı sebebiyle d eksenine nüve dağılımı q eksenine (nüve bariyerlere kesilir) göre daha fazladır. Yükün artması akımın artmasına dolayısıyla d ekseninde doyum oluşmasına (bkz. Denklem (3.26)) sebep olacaktır. Akım açısının artırılması i_d akımının azalmasına dolayısıyla doyumun ve hava aralığı akısının azalmasını sağlayacaktır. Bu durumda L_d artacak ve torktaki düşüşü telefi ederek torkun artmasını (bkz. Denklem (3.28)) sağlayacaktır (Moghaddam, 2007). MTPA değişim hızında en düşük yükten en yüksek yüke akım açısı sırasıyla 15°, 24°, 29°, 34° ve 36° olmaktadır. 90° akım açısında torkun sıfırlandığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada nominal yük ve yüksek yük performansının etkili olması sebebiyle 35° akım açısı kullanılmıştır.



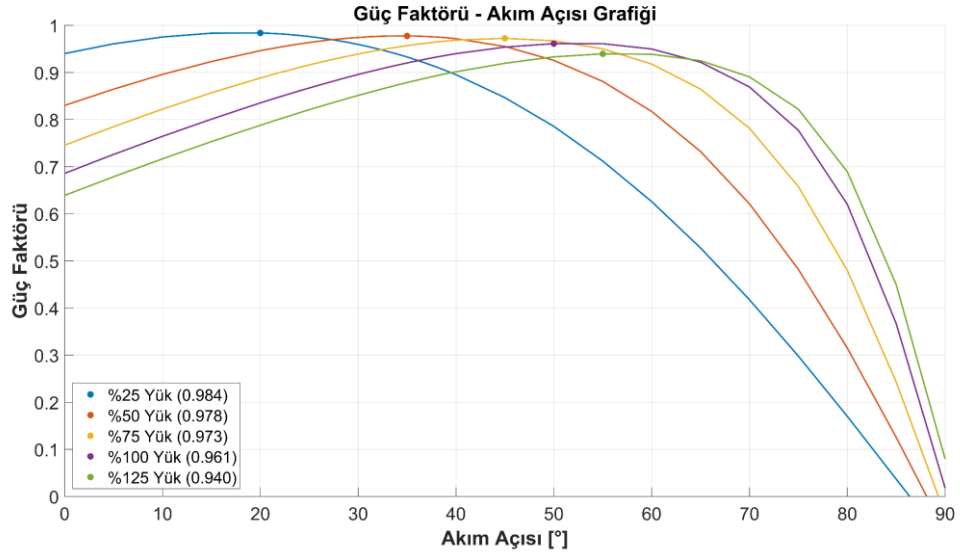
Şekil 4.20. EA-ÇS-SMd-SRM farklı yüklerde akım açısına bağlı tork dalgalanması değişimi

Şekil 4.20’de farklı yüklerde ve akım açısının 0-90° aralığında tork dalgalanması değişim grafiği verilmiştir. %25’ten %125 yüke kadar sırasıyla tork dalgalanmasının %16.1, %11.4, %11.3, %8.6 ve %6.5 olduğu görülmektedir. Akım açısının 24-45° aralığında EA-ÇS-SMd-SRM farklı yüklerde minimum tork dalgalanması elde etmektedir. Yük arttıkça tork dalgalanmasında düşüş meydana gelmektedir. Akım açısının 60° ve üstünde olduğu durumlarda tork dalgalanması her yük için hızla artmaktadır. Nominal %100 yük değerinde 36°’de tork dalgalanması minimum değere ulaşmaktadır. Maksimum tork noktası da dikkate alınarak 35° akım açısı tercih edilmiştir.



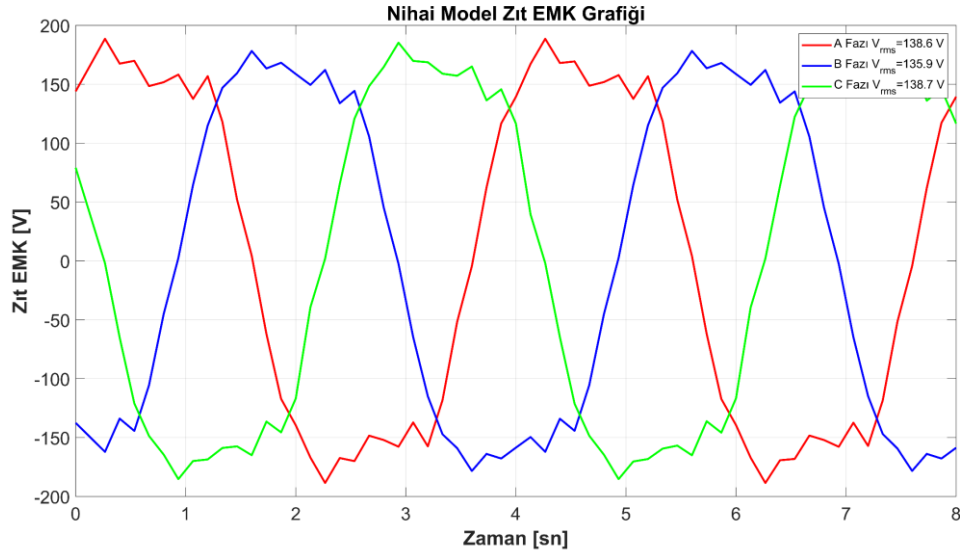
Şekil 4.21. EA-ÇS-SMd-SRM farklı yüklerde akım açısına bağlı verim değişimi

EA-ÇS-SMd-SRM'nin farklı yüklerde ve akım açısında verim analizleri sonucu Şekil 4.21'da verilmiştir. 0-60° akım açısı aralığında verimin yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. 60-90° aralığında da düşüşe geçti ve 90°'de verimin %50 altına düştüğü görülmektedir. Farklı yüklerde maksimum verim değerleri 24-45° akım açısı aralığında alınmıştır. %25 yükte yapılan analizler daha yüksek yüklere göre daha az verim elde etmektedir. EA-ÇS-SMd-SRM'nin %50, %75 ve %125 yük durumunda nominal yüke daha yakın verimlilikte çalıştığı görülmektedir. En düşük yükten en yüksek yük değerine kadar sırasıyla %91.4, %93.9, %94.4, %94.3 ve %94 verim elde edilmiştir. MTPA açısının değişmesiyle verim değerleri de değişmektedir.



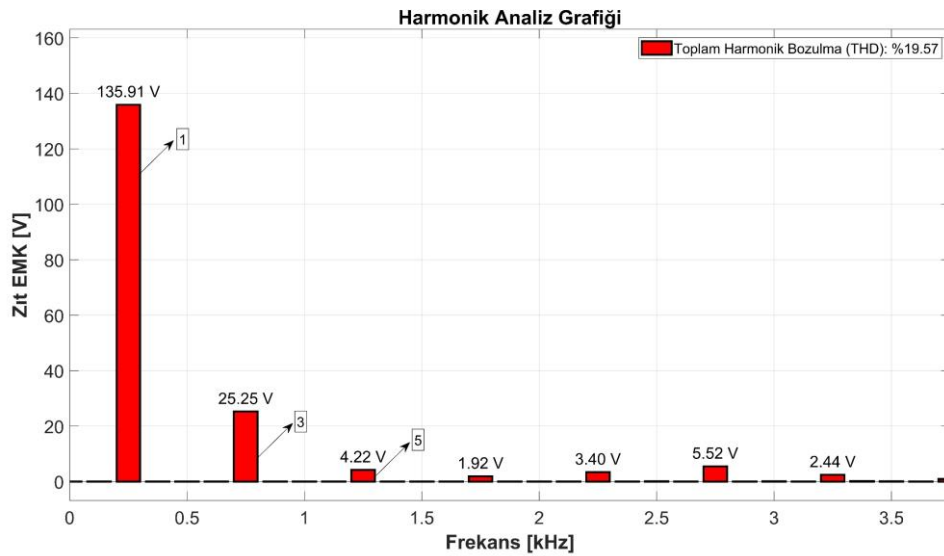
Şekil 4.22. EA-ÇS-SMd-SRM farklı yüklerde güç faktörünün akım açısına bağlı değişimi

Şekil 4.22'de güç faktörünün farklı yüklere ve akım açısına göre değişim grafiği verilmiştir. Yük değeri arttıkça maksimum güç faktörünün elde edildiği akım açısı da artmaktadır. Her bir yük için akım açısındaki artış güç faktörünün azalmasına (bkz. Denklem (3.29)) ve 90° akım açısına gelindiğinde güç faktörünün sıfıra geldiği görülmektedir. %25'ten %125 yüke kadar sırasıyla 0.984, 0.979, 0.973, 0.961 ve 0.94 maksimum güç faktörü elde edilmektedir. Nominal yükte maksimum güç faktörü 50° akım açısında elde edilirken tork 88.61 Nm'ye düşmektedir. Bu sebeple MTPA açısı maksimum torka göre 35° olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.23. EA-ÇS-SMd-SRM A, B ve C fazları için indüklenen gerilim grafiği

EA-ÇS-SMd-SRM nihai modelin 35° akım açısında yapılan analizler sonucunda sargılarda indüklenen gerilim / zıt EMK Şekil 4.23'te verilmiştir. Üç faz için zıt EMK değerleri sırasıyla $138.6 \text{ V}_{\text{rms}}$, $135.9 \text{ V}_{\text{rms}}$ ve $138.7 \text{ V}_{\text{rms}}$ olarak analiz edilmiştir. Yıldız bağlantı kullanılmış motorda giriş hat gerilimi $280 \text{ V}_{\text{rms}}$ 'tur. Bu durumda zıt EMK'nin faz gerilimine oranı $\varepsilon = 0.86$ olarak hesaplanmıştır.



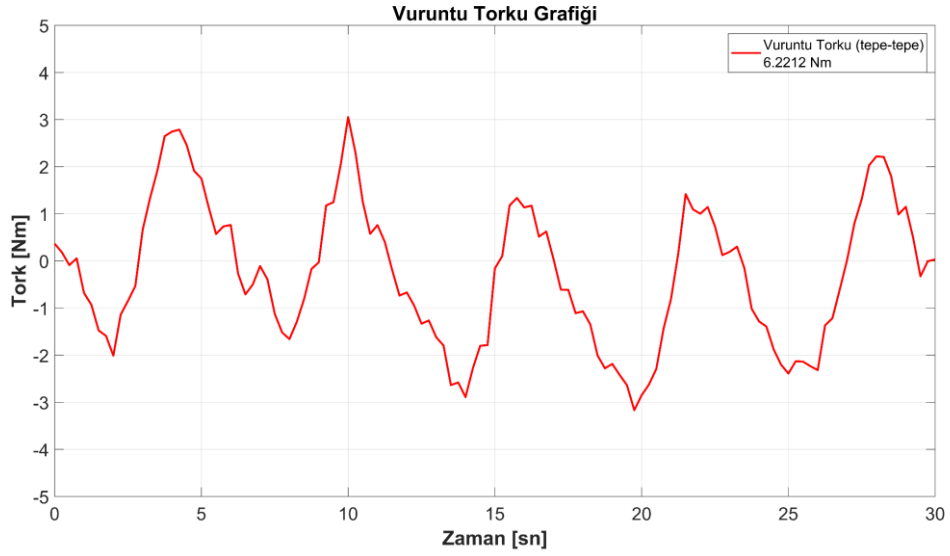
Şekil 4.24. EA-ÇS-SMd-SRM faz gerilimi harmonik bileşenler grafiği

Elektrikli motorlarda indüklenen gerilim sinyalinin sinüsten farklı olması durumunda, gerilimin temel frekansının katları olan bileşenlerine harmonikler denmektedir.

Motorlarda inverterlerin kullanılması, manyetik doygunluk, tasarım bozuklukları ve sürücü modülasyonları gibi sebeplerden harmonikler meydana gelmektedir. Şekil 4.24'te EA-ÇS-SMd-SRM bir faz geriliminin harmonik bileşenleri verilmiştir. Harmonik bileşenler zıt EMK'nin Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT – Fast Fourier Transform) analiziyle tespit edilmektedir (Avşar, 2023). Temel frekansı (1. Harmonik) 250 Hz olan motorda sırasıyla 750 Hz (3. Harmonik), 1 250 Hz (5. Harmonik), vb. harmonikler frekans domaininde Şekil 4.24'te verilmiştir. Baskın harmoniklerde (1., 3. ve 5. Harmonik) sırasıyla indüklenen gerilim değerleri 135.91 V_{rms}, 25.25 V_{rms} ve 4.22 V_{rms} olarak analiz edilmiştir.

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (4.3)$$

Toplam Harmonik Distorsiyon (THD – Total Harmonic Distortion) harmoniklere sahip bir dalga şeklinin sinüs tam dalga şeklinden sapmasını hesaplamak için kullanılmaktadır. İndüklenen gerilim temel bileşeni dışındaki harmoniklerin efektif değerinin temel bileşen efektif değerine oranı olarak tanımlanmaktadır (Güneri, 2015). Denklem (4.3)'te V_1 temel bileşeni ve $V_2, \dots, V_n$ ise harmonik bileşenleri temsil etmektedir. Şekil 4.24'te verilen harmonik analizine göre EA-ÇS-SMd-SRM'nin Zıt-EMK THD değeri %19.57 olarak hesaplanmıştır. Literatürde RA-SMd-SRM nihai modelinde Zıt-EMK THD değeri %22 (Vartanian, 2014), EAR için tasarlanan EA-SMSM modelde %27.7 (Srikhumphun ve ark., 2024), düşük tork dalgalanması için tasarlanan RA-SMd-SRM modelinde ise en düşük THD değeri %20.96 (X. Li ve ark., 2023) olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak literatürdeki çalışmalarla kıyaslandığında tasarlanan EA-ÇS-SMd-SRM modelinin THD açısından yeterli bir model olduğu görülmektedir.



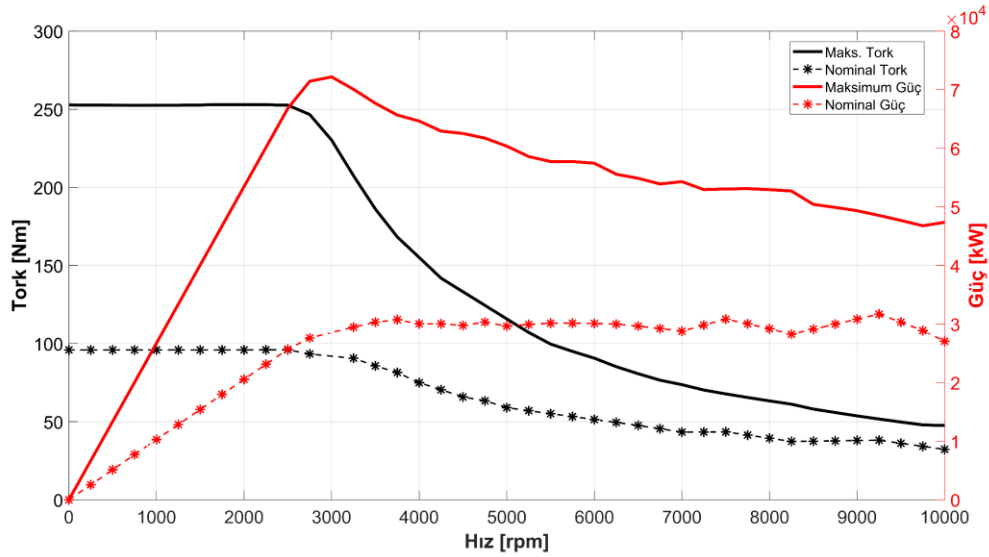
Şekil 4.25. EA-ÇS-SMd-SRM vuruntu torku grafiği

Vuruntu torku stator sargılarında akım akmadığı durumda rotor mıknatıslarının stator dişleri ile etkileşimi sebebiyle ortaya çıkmaktadır. Mıknatısların özellikle kutup geçişlerinde stator dişleri ile hizalanmaya çalışması vuruntu torkuna sebep olmaktadır (Çetin, 2018; Güneri, 2015; Zöhra, 2019). EA-ÇS-SMd-SRM vuruntu torku için 0 A akım ve 1 derece/saniye hızda analiz yapılmıştır (Avşar, 2023). Analiz sonucunda Şekil 4.25'te verildiği gibi vuruntu torkunun tepe-tepe değeri 6.2212 Nm olarak elde edilmiştir. Vuruntu torku nominal torkun (96.1 Nm) yaklaşık %6.5'i ve maksimum torkun (253.1 Nm) yaklaşık %2.45'i olarak hesaplanmıştır. Vartanian (2014), yaptıkları çalışmada RA-SMd-SRM'nin sekiz farklı rotor yapısında vuruntu torkunu incelemiştir. Bu modeller arasında maksimum tork vuruntu torkunun yaklaşık %1.5 ve %10.2'si aralığında olduğu görülmüştür (Vartanian, 2014). Li ve ark. (2023), RA-SMd-SRM modelin vuruntu torku (5.9 Nm), nominal torkun (74.34 Nm) %7.9'u olarak hesaplanmıştır (X. Li ve ark., 2023). Geng ve ark. (2022) EAR için tasarladıkları RA-SMSM motorda konsantre sargı yapısında yaptıkları değişikliklerle vuruntu torku maksimum torkun %5.45'inden %2'sine kadar düşürmeyi başarmıştır (Geng, Zhu, ve ark., 2022). Li ve ark. (2019), HEAR için yaptıkları çalışmada BMW i3 RA-DMM motorun maksimum torka göre vuruntu torkunun yaklaşık %1.4 oranında olduğuna değinmiştir (Y. Li ve ark., 2019). Song ve ark. (2020), RA-DMM için tasarladıkları üç farklı modelde yaklaşık 208 Nm maksimum tork için tepe-tepe vuruntu torkunu 6.94 Nm'den 1.34 Nm'ye indirmeyi başarmıştır (Song ve ark., 2020). Srikhumphun ve ark. (2024) EAR için tasarladıkları EA-SMSM

modelinde vuruuntu torku (14.5 Nm) maksimum torkun (248.52 Nm) yaklaşık %5.8'i olarak hesaplanmıştır (Srikhumphun ve ark., 2024). Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde EA-ÇS-SMd-SRM modelin vuruuntu torkunun literatür sonuçlarına yakın ya da daha iyi sonuçlar elde ettiği görülmüştür. Bu durumda vuruuntu torkunu iyileştirmek için ekstradan çalışma yapılmamıştır.

4.4. Eksenel Akılı Çift Stator Sabit Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Verim Haritası Değerlendirmesi

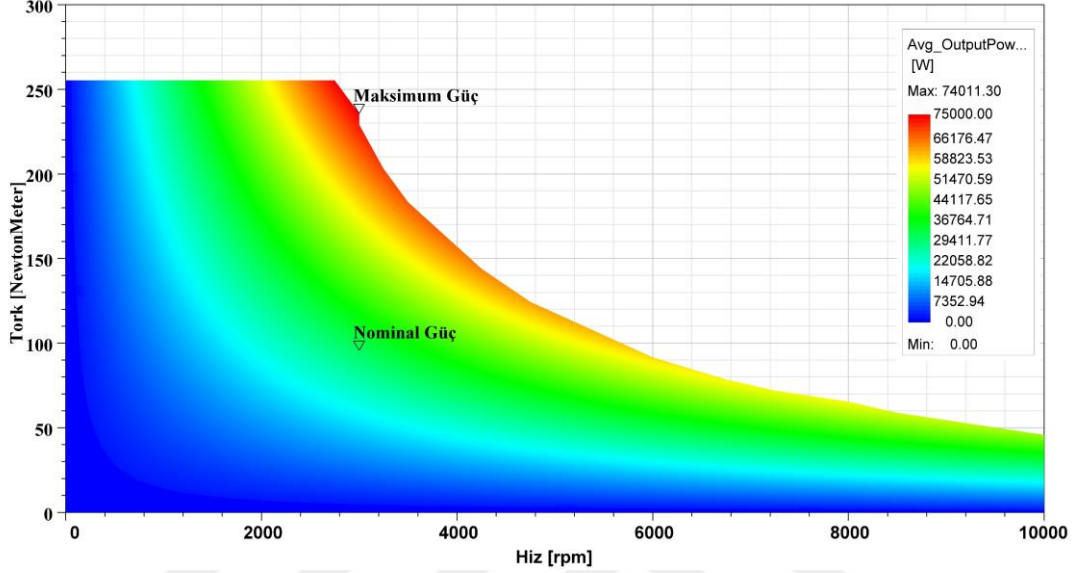
EAR uygulamalarında farklı hızlarda ve farklı yüklerde motorun performansının incelenmesi gerekmektedir. Farklı hız aralığında tork-güç değişimi elektrikli motorun SGHO değerinin belirlenmesi açısından da önemlidir. Tork ve hız değişiminin çıkış gücüne, verime, güç faktörüne, akım açısına etkisi verim haritalarında incelenmiştir. Bu sayede EA-ÇS-SMd-SRM'nin sürüş esnasında farklı durumlara tepkisi görülmektedir (Gözüaık & Akar, 2025).



Şekil 4.26. EA-ÇS-SMd-SRM hızı bağlı tork ve güç değişimi

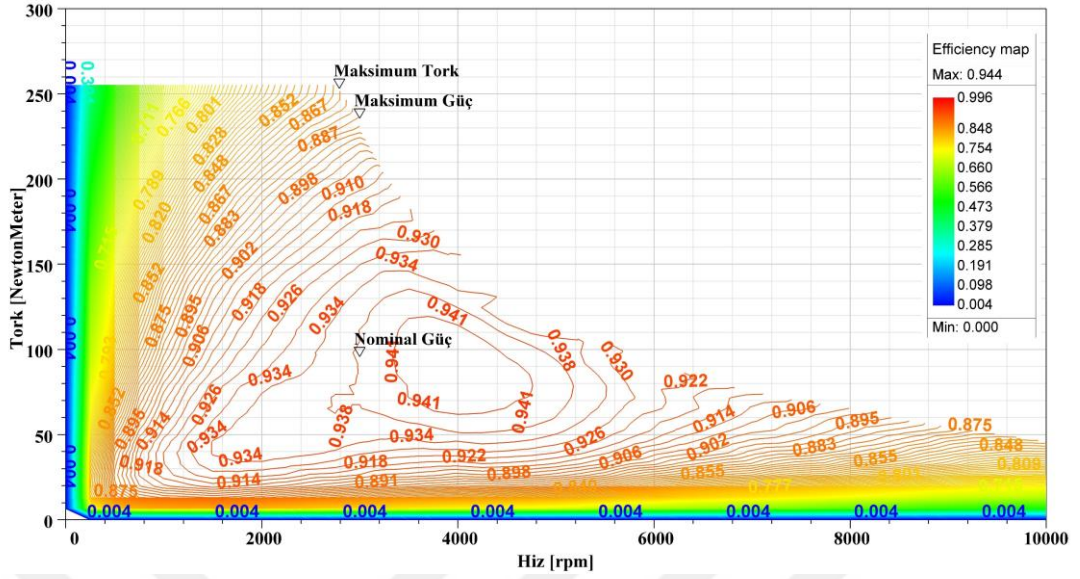
Şekil 4.26'da hızı bağlı tork-güç grafiği verilmiştir. Elektromanyetik analizler sonucunda termal ve mekanik kısıtlamalara bakılmaksızın EA-ÇS-SMd-SRM tork ve güç değerleri analiz edilmiştir. Düşük hızlarda (0-3 000 dev/dk) sabit tork bölgesinde 253.1 Nm maksimum tork ve 96.1 Nm nominal tork elde edilmiştir. Nominal 3 000 dev/dk hızda maksimum güç 74 kW'tır. 3 000-10 000 dev/dk hız aralığında sabit güç bölgesinde

minimum 45 kW sabit güç vermektedir. Bu durumda 30 kW nominal güç değeri maksimum hıza kadar sabit güç bölgesinde elde edilmektedir. Yüksek hızlardaki alan zayıflatma bölgesinin genişliği ve maksimum hızda nominal güçten fazla sabit güç elde eden EA-ÇS-SMd-SRM modeli SGHO değerinin 3.3'ten büyük olduğu görülmektedir.



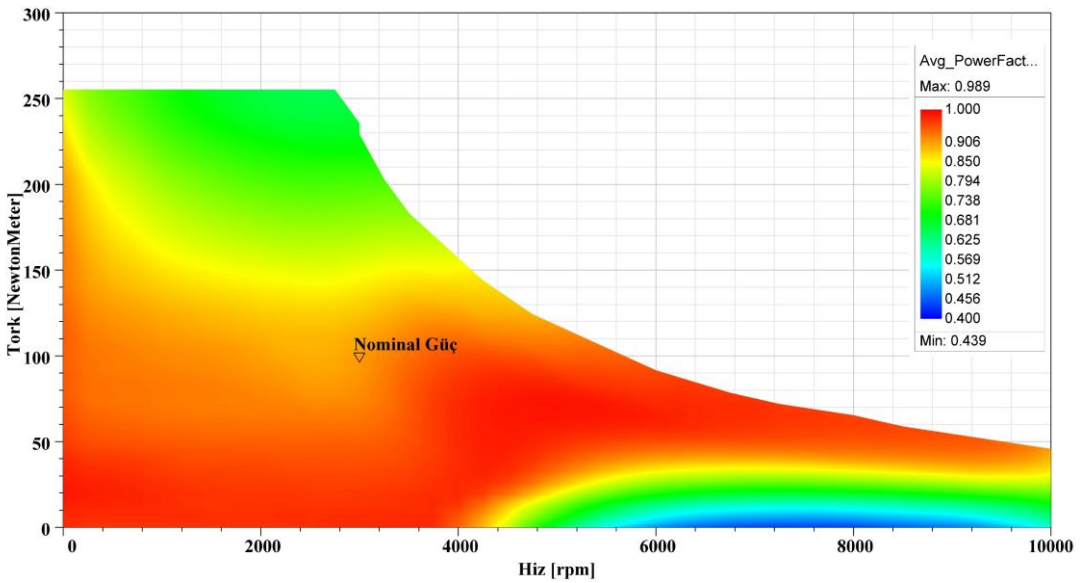
Şekil 4.27. EA-ÇS-SMd-SRM nihai model tork ve hıza bağlı güç haritası

Şekil 4.27’de EA-ÇS-SMd-SRM nihai modelin tork ve hıza bağlı güç değerleri analiz edilmiştir. Nominal hız 3 000 dev/dk’da maksimum güç değeri 74 kW ve nominal güç değeri 30 kW olarak görülmektedir. 10 000 dev/dk maksimum hızda da nominal 30 kW güç değeri elde edilmektedir. Bu durum araç hızının artmasıyla geniş bir aralıkta ihtiyaç duyulan güç değerinin elde edildiğini göstermektedir. EAR uygulamaları için bu durum geniş hız değişimine uygun bir sürüş deneyimi sağlamaktadır.



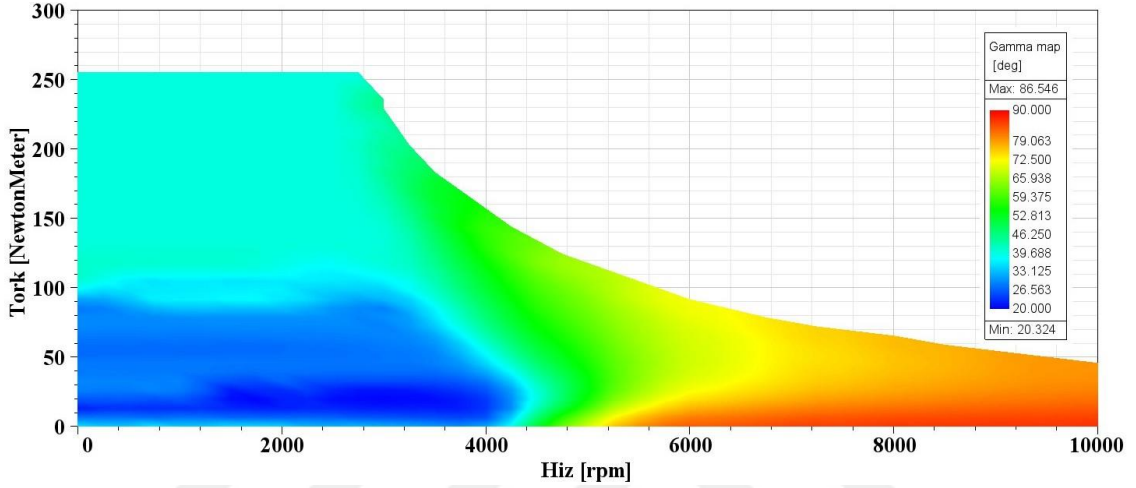
Şekil 4.28. EA-ÇS-SMd-SRM nihai model tork ve hıza bağlı verim haritası

EA-ÇS-SMd-SRM nihai modelin nominal hız 3 000 dev/dk ve maksimum hız 10 000 dev/dk için verim haritası sonuçları Şekil 4.28’de verilmiştir. Verim haritası üzerinde nominal güç, maksimum güç ve maksimum tork bölgeleri işaretlenmiştir. Nominal 3 000 dev/dk hızda 30 kW nominal güç elde edilmiş ve verim %93.8 olarak görülmektedir. Nihai model yaklaşık 3 000-5 000 dev/dk hız aralığında %94.4’e kadar maksimum verimde çalışmaktadır. Maksimum tork ve maksimum güç bölgelerinde sırasıyla %86.7 ve %88.7 verim elde edilmiştir. Maksimum 10 000 dev/dk’da motorun %80 ve üzeri verimle çalışabildiği görülmektedir. Bu durumda EAR uygulamalarında kullanılmak üzere yüksek verim ihtiyacı giderilmektedir.



Şekil 4.29. EA-ÇS-SMd-SRM nihai model tork ve hıza bağlı güç faktörü haritası

Şekil 4.29’da EA-ÇS-SMd-SRM nihai modelin farklı hız ve tork değerleri için güç faktörü değişimi verilmiştir. Nominal hız 3 000 dev/dk ve 30 kW güç bölgesinde güç faktörü yaklaşık 0.91 değerini almaktadır. 3 000-5 000 dev/dk hız aralığında yüksek verimde çalışan nihai modelin bu aralıkta güç faktörü 0.98’e kadar çıkmaktadır. Maksimum güç ve tork bölgesinde ise güç faktörü 0.66’ya kadar düşmektedir. Aynı zamanda verimin düşmesine de sebep olmaktadır.



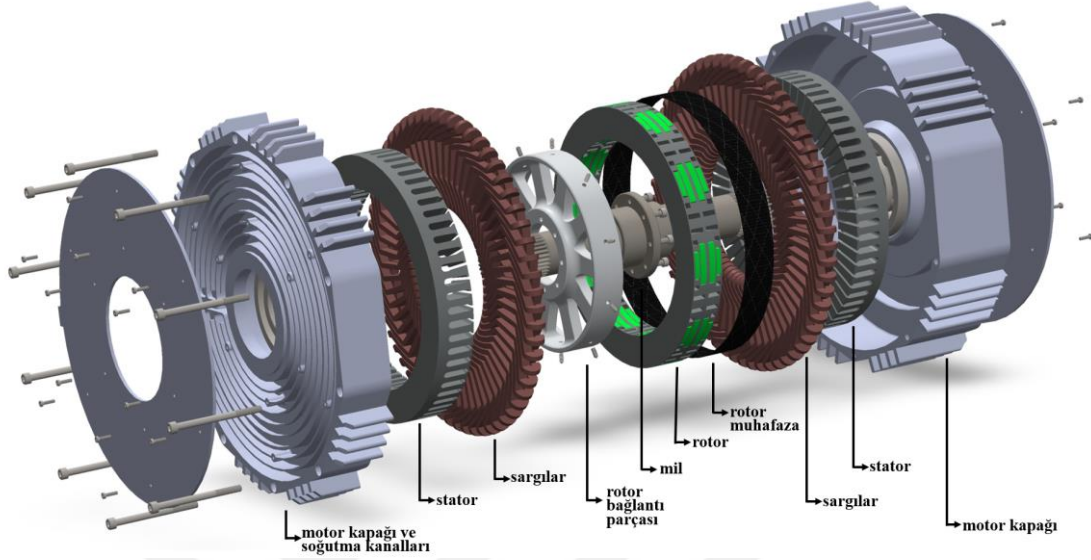
Şekil 4.30. EA-ÇS-SMd-SRM nihai model tork ve hıza bağlı akım açısı haritası

EA-ÇS-SMd-SRM nihai modelin hız ve torka bağlı akım açısı değişimi Şekil 4.30’da verilmiştir. Sabit tork bölgesinde 20°-35° aralığında olan akım açısı hızın artmasıyla artmaktadır. Alan zayıflatma yöntemiyle yüksek hızlarda akım açısı arttırılmış ve rotor manyetik alanı azaltılmıştır. Gerilim sabit tutulduğu bu durumda torkta da düşüş gözlemlenmiştir. Şekil 4.30’da nominal 3 000 dev/dk hızdan sonra devrin artmasıyla akım açısında net bir artış gözlemlenmektedir.

4.5. Eksenel Akıllı Çift Stator Sabit Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Yapısal Analizleri

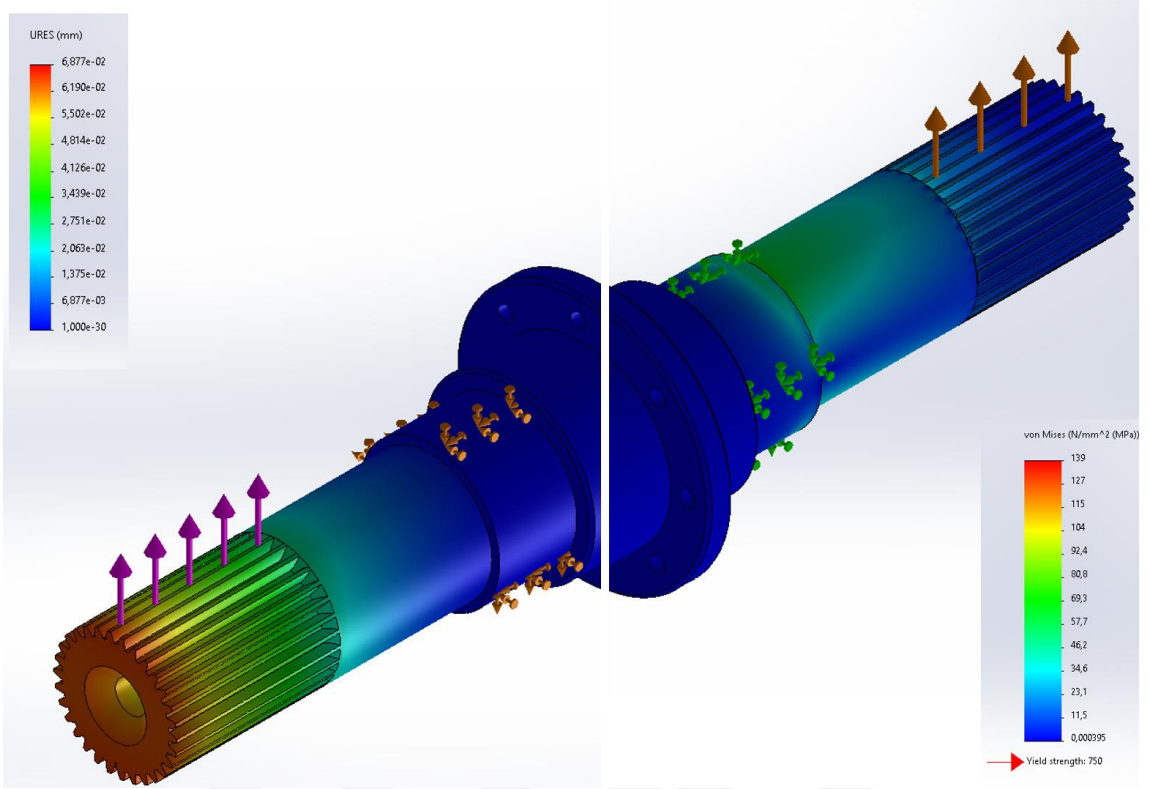
EAR’ler için tasarlanan EA-ÇS-SMd-SRM modelin bir önceki bölümde elektromanyetik yeterlilikleri test edilmiştir. 253.1 Nm maksimum tork, 74 kW maksimum güç, 10 000 dev/dk maksimum hız ve maksimum akım yoğunluğu 30.84 A/mm² olarak belirlenmiştir. Yüksek akım yoğunluğuna sahip elektrikli motorlarda manyetik ve mekanik kayıplar yüksek ısı kaynağı görevi görmektedir. Bu ısı dağılımının dengelenmesi için motorlarda

soğutma gereksinimi artmaktadır. Elektrikli motorlarda 10-30 A/mm² akım yoğunluğu için cebri sıvı soğutma yöntemi önerilmektedir (Gai ve ark., 2019).



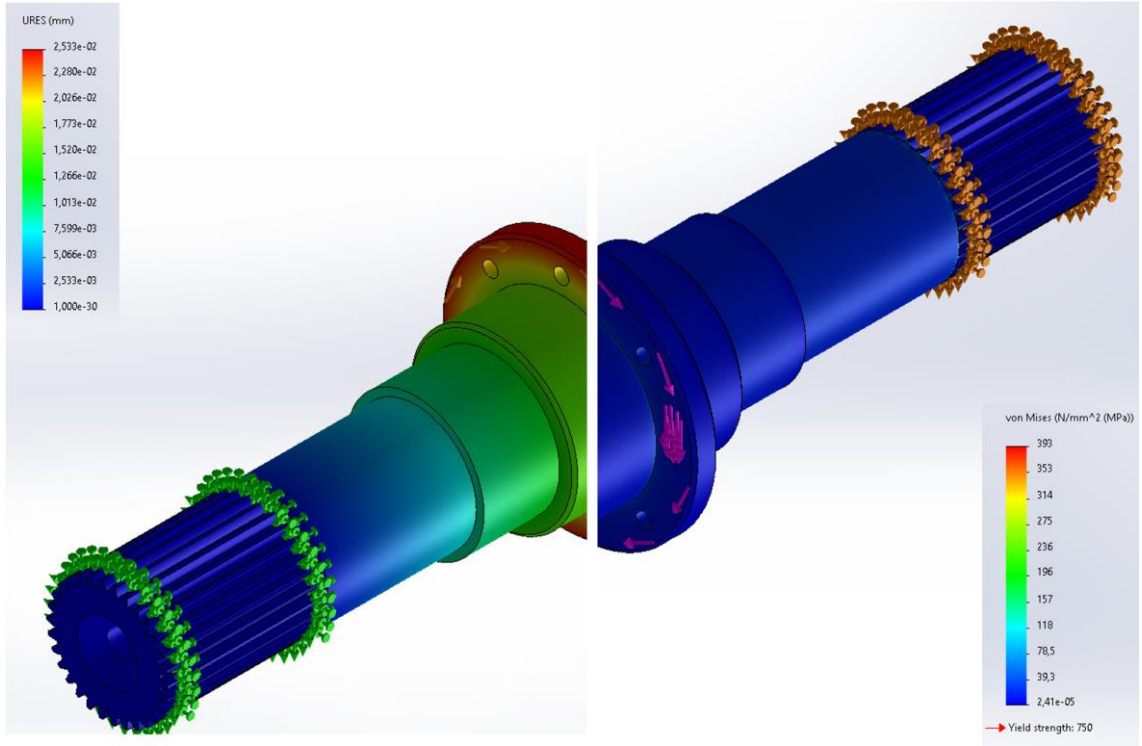
Şekil 4.31. EA-ÇS-SMd-SRM 3B modelin patlatılmış görünümü

Yüksek elektromanyetik performans değerleri, termal kaygılar ve EAR gereksinimleri düşünülerek tasarlanan EA-ÇS-SMd-SRM modelin 3B patlatılmış görünümü Şekil 4.31’de verilmiştir. Bu modelde motor gücünün aktarım organı olan motor milinde yüksek strese karşı dayanıklı 42CrMo4 ıslah çelik kullanılmıştır. Stator ve rotor lamine çelik (JFE 35N230), rotor bağlantı parçası ve motor kapakları ise termal iletkenliği ve hafiflik açısından Al6061 Alüminyum olarak tercih edilmiştir (Özsoy, 2023). EA-ÇS-SMd-SRM tasarımında, rotorun etrafına 2 mm kalınlığında karbon fiber takviyeli plastik (Carbon Fiber Reinforced Plastic-CFRP) bir muhafaza eklenmiştir. Rotor bağlantı parçası 3x12 mm setskur vidaları kullanılarak rotora sabitlenmektedir. Manyetik akı yolundaki bozulmayı en aza indirmek için çelik vidalar kullanılmıştır (Gözüaçık & Akar, 2025). Mekanik tasarımın tamamlanması ile yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. EA-ÇS-SMd-SRM model yapısal analizleri stres ve yer değiştirme olarak ayrı ayrı eklenmiştir. Motorun EAR’ler için tasarlanmış olması sebebiyle olası durumlarda araç ağırlığının motor mili üzerine etkisi milin gerilme analizi ile test edilmiştir. Maksimum torkta kilitlenme durumunda mil, rotor, stator ve rotor bağlantı parçası için burulma analizleri yapılmıştır. Rotor muhafazası merkezkaç kuvvetine bağlı olarak mıknatısların bariyerlerden ayrılmasını önlemek üzere yapısal olarak test edilmiştir.



Şekil 4.32. EA-ÇS-SMd-SRM model mil gerilme (yer değıştirme-stres) analizi

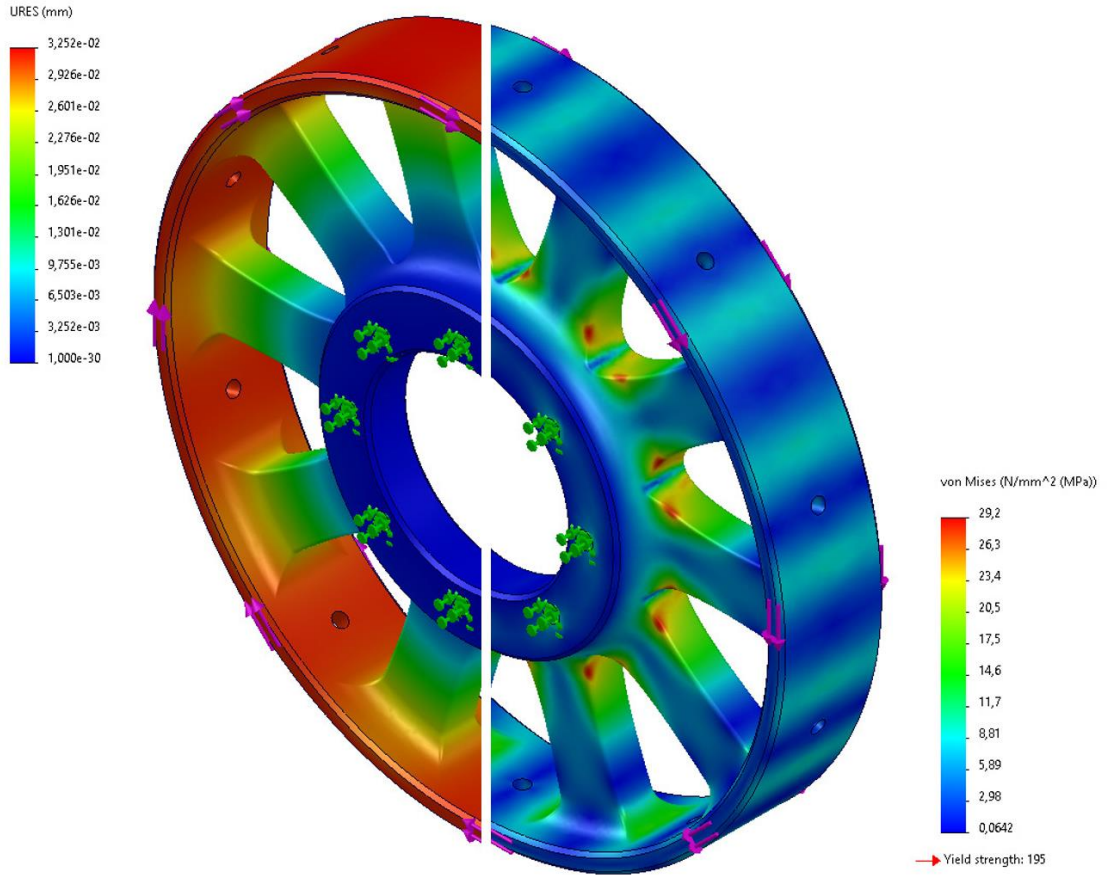
Şekil 4.32'de, motor mili (42CrMo4 sertleştirilmiş çelik) 750 MPa akma dayanımına sahiptir (Özsoy, 2023). Eğilme gerilimi analizi için, EAR ağırlığı, yolcu ağırlığı vb. faktörlerin motor mili üzerindeki etkisi, arıza durumunda yaklaşık 11 kN'luk bir yük olarak hesaplanmıştır. Bu durumda şaft üzerinde maksimum 139 MPa bir gerilme olduğu ve bu gerilme nedeniyle maksimum yer değıştirmenin 0.0687 mm olduğu görülmektedir. Güvenlik faktörü, akma dayanımının maksimum gerilme değeriye bölünmesi ile hesaplanabilir (Kwon & Lim, 2023). Motor milinin akma dayanımına bağı olarak 5.44 kat daha güvenilir olduğu görülmektedir.



Şekil 4.33. EA-ÇS-SMd-SRM model mil burulma (yer değıştirme-stres) analizi

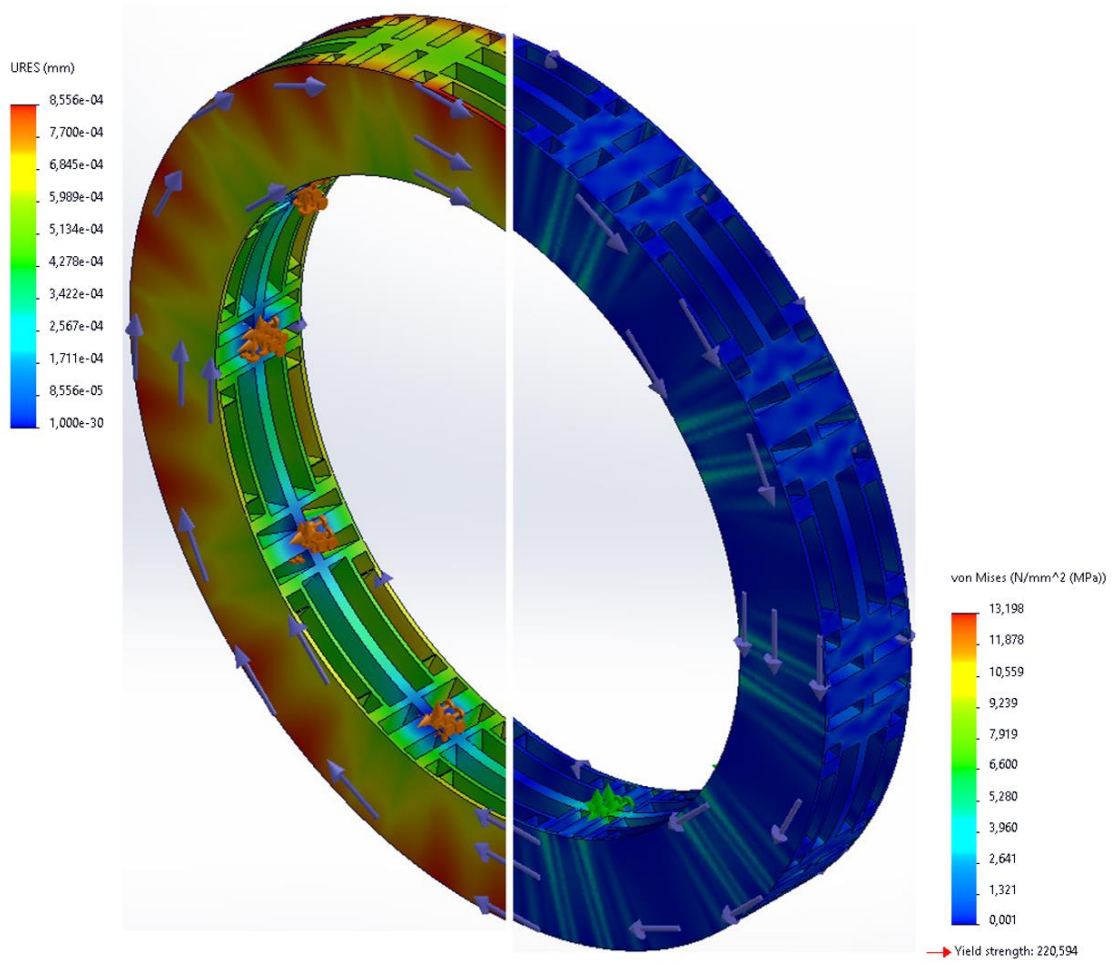
$$gk = \frac{0.58x(akma\ mukavemeti)}{ma\ ksimum\ burulma\ mukavemeti} \quad (4.4)$$

Şekil 4.33’te motor milinin kilitlenmesi ve üretilen maksimum torkun %25 fazlasının (~316 Nm) mile etkisi analiz edilmiştir. Maksimum burulma 101 MPa ve bu strese bağlı maksimum yer değıştirme 0.0253 mm olarak gözlemlenmiştir. Denklem (4.4)’te mekanik parçanın burulma analizine bağlı güvenlik katsayısı gk formülü verilmiştir (Özsoy, 2023). Buna göre milin burulma açısından 4.31 kat güvenilir olduğu görülmüştür.



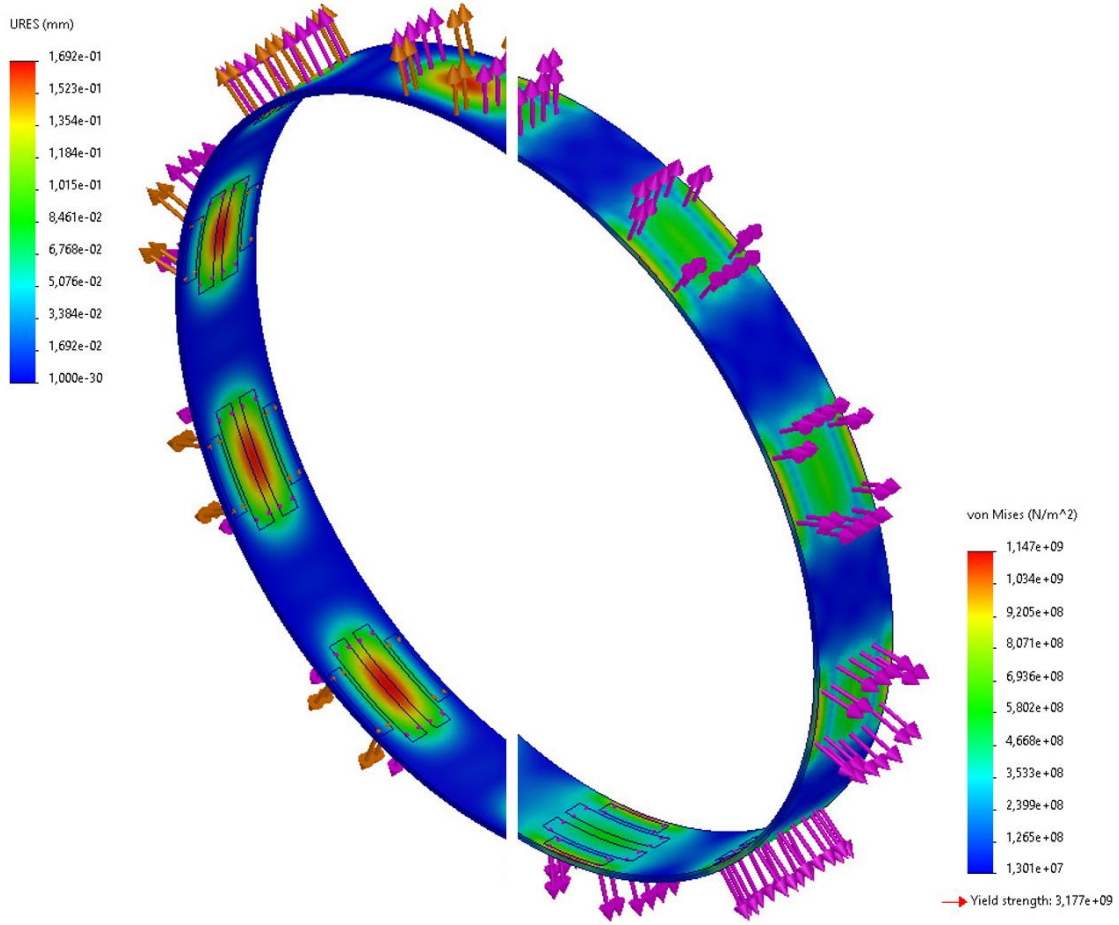
Şekil 4.34. EA-ÇS-SMd-SRM model rotor bağlantı parçası burulma (yer değıştirme-stres) analizi

Şekil 4.34'te EA-ÇS-SMd-SRM model rotor bağlantı parçası burulma analizi gerçekleştirilmiştir. Rotor bağlantı parçası tasarımında Al 6061 alüminyum malzeme tercih edilmiştir. Alüminyum çelikle kıyaslandığında mekanik dayanım açısından zayıf ancak daha hafif bir malzemedir. Ayrıca ısı iletim katsayısı fazla olduğu için soğutma performansına da katkı sağlamaktadır. Rotor ve mil arasında bağlantı sağlayan bu parçanın yaklaşık 316 Nm torka maruz kalması durumunda burulma analizi gerçekleştirilmiştir. 195 Nm akma mukavemeti için yapılan analizlerde maksimum 29.2 MPa stres iç çapa yakın bağlantı kollarında meydana gelmektedir. Rotor bağlantı parçasının dış çapında ise maksimum 0.0325 mm yer değıştirme meydana gelmiştir. Güvenlik katsayısı 3.87 olarak hesaplanmıştır.



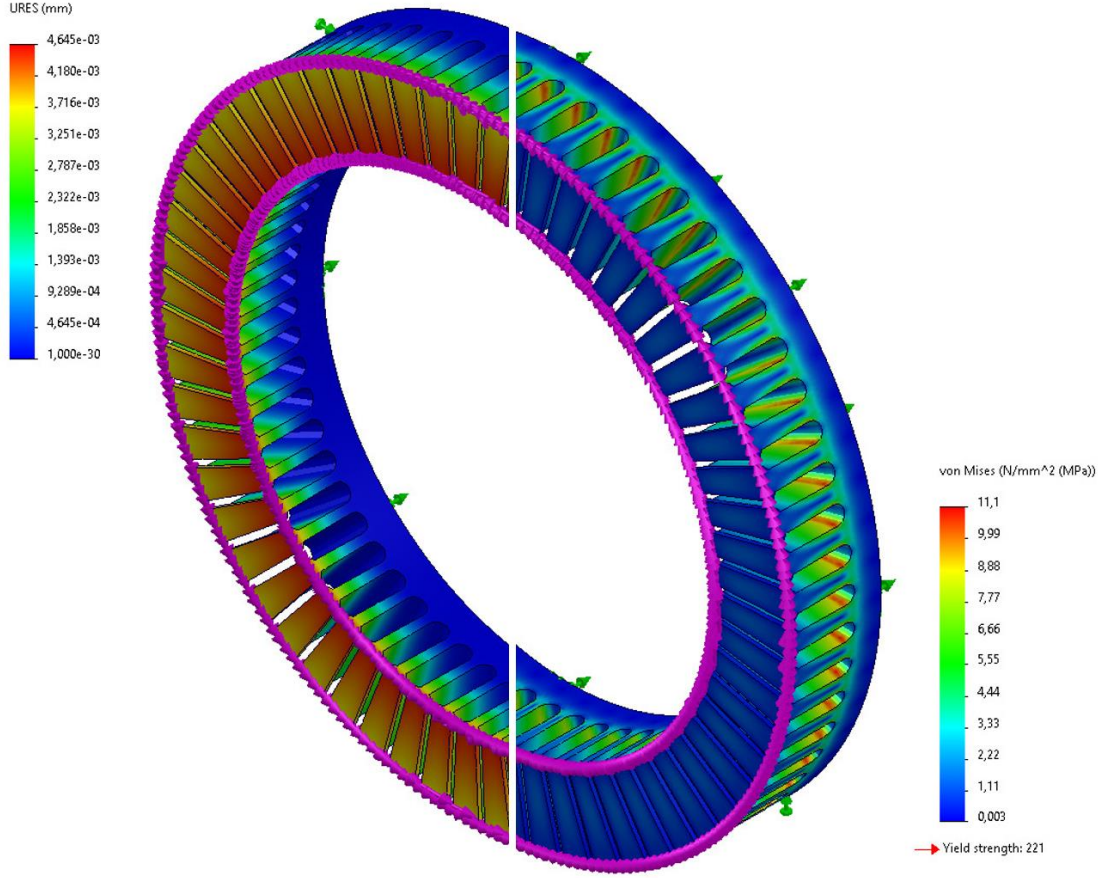
Şekil 4.35. EA-ÇS-SMd-SRM model rotor burulma (yer değıştirme-stres) analizi

Şekil 4.35'te EA-ÇS-SMd-SRM modelin bariyerli yapısıyla mekanik olarak incelenmesi gereken parçası rotorun yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Rotor lamine çelik malzeme tanımıyla 220.6 MPa akma mukavemetine sahiptir. Motor mili ile benzer kilitlenme durumunda rotor bağlantı cıvataları üzerinde maksimum 13.2 MPa stres meydana gelmektedir. Buna rağmen maksimum yer değıştirme rotorun hava aralığına yakın bölgesinde 0.0008 mm olarak gerçekleştiğı görülmektedir. Denklem (4.4)'te verildiğı gibi rotorun güvenlik katsayısı 9.67 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.36. EA-ÇS-SMd-SRM model rotor muhafazası gerilme (yer değıştirme-stres) analizi

Rotor muhafazası maksimum 10 000 dev/dk hızda merkezkaç kuvveti nedeniyle mıknatısların yerinden çıkmasını önlemeyi amaçlamaktadır. CFRP muhafaza (T300 tipi) 3 530 MPa çekme mukavemetine ve 230 GPa elastik modüle sahiptir (Grace ve ark., 2018). Maksimum hızda, mıknatıs 1 (alt bariyer – 0.0517 kg) ve mıknatıs 2 (üst bariyer – 0.02576 kg) üzerine etkiyen merkezkaç kuvvetleri sırasıyla 6 006.67 N ve 2 989.8 N olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.36’da gösterildiği gibi, rotor gövdesi ile mıknatıslar arasında herhangi bir yapıştırıcı bağ, sürtünme direnci veya manyetik çekim olmaksızın rotor gövdesinin yapısal analizi yapılmıştır. Bu analiz, rotor gövdesinin güvenlik faktörünün 2.77 ve maksimum yer değıştirmesinin 0.169 mm olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 4.37. EA-ÇS-SMd-SRM model stator burulma (yer değıştirme-stres) analizi

Şekil 4.37’de stator üzerinde burulma momentinin etkisi gözlemlenmiştir. Yaklaşık 316 Nm tork stator dişleri üzerine yayılmıştır. Bu durumda analiz sonuçlarına göre Şekil 4.37 maksimum stres stator dişlerinin stator boyunduruğuna yakın olan bağlantı kısmında gerçekleşmiştir. Yapısal analizler sonucunda 11.1 MPa maksimum stres için EA-ÇS-SMd-SRM statorunun 11.55 kat güvenli bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Stator dişlerinin hava aralığına yakın kısımlarında maksimum 0.0046 mm yer değıştirme meydana gelmektedir.

4.6. Eksenel Akılı Çift Stator Sabit Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Termal Analizleri

Çok fizikli analizin son parçası termal analiz olarak belirlenmiştir. Elektromanyetik ve mekanik açıdan yeterliliği belirlenen EA-ÇS-SMd-SRM modelinin cebri sıvı soğutma yöntemiyle soğutulması amaçlanmıştır. Stator boyunduruklarına doğrudan temas eden

sıvı kanalları (sıvı soğutma ceketı) (bkz. Şekil 4.31) ile stator ve en büyük ısı kaynağı motor sargılarını soğutmak amaçlanmıştır (Madhavan ve ark., 2022). Soğutma ceketı EA-ÇS makineler için uygun görülen tandem kanal yöntemiyle tasarlanmıştır (Roy ve ark., 2023; J. Zhao ve ark., 2019).

Tandem kanal tasarımındaki en büyük sorun, kanalın dönüş alanlarında ölü bölgelerin varlığıdır (Konda ve ark., 2024). Bunu önlemek için kanallar birbiriyle kesişecek şekilde tasarlanmıştır. Roy ve ark. (2023), tandem kanal tasarımı ile spoiler, helisel elemanlar ve Z şekilli kanal modellerine göre daha iyi termal sonuçlar elde etmiştir (Roy ve ark., 2023). Motorlarda manyetik ve mekanik kayıplar ısı kaynağı olarak termal zorluklara sebep olmaktadır (Gai ve ark., 2019; Madhavan ve ark., 2022). Termal değişimleri görmek için Ansys Maxwell üzerinden EA-ÇS-SMd-SRM modelin stator, rotor, mıknatıs ve sargıların termal özellikler tanımlanmıştır. Stator/rotor (JFE_35JN230), bakır sargılar ve mıknatısın (N42SH) termal iletkenlikleri sırasıyla 50 W/mK, 400 W/mK ve 8.7W/mK olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 4.6. EA-ÇS-SMd-SRM modelinin farklı güçlerdeki kayıpları

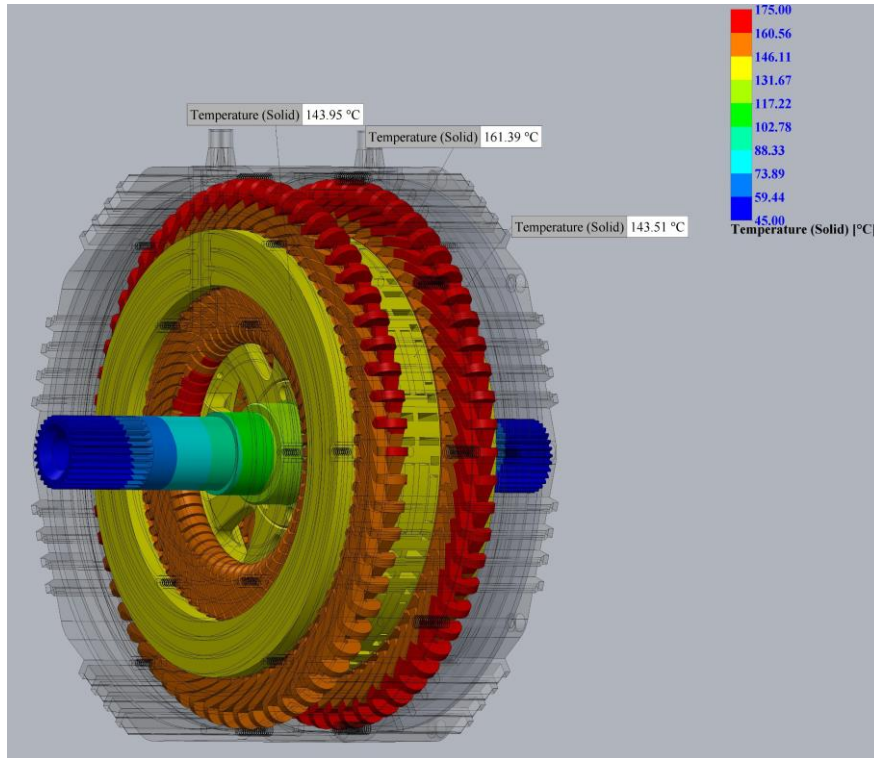
Model	Hacim (m ³)	Kayıplar W/m ³				
		30kW	40kW	50kW	60kW	65kW
Stator	8.8862x10 ⁻⁴	82625.42	94553.92	115899.93	131152.8	138735.34
Rotor	2.9702 x10 ⁻⁴	5630.02	8885.33	10877.15	13001.78	13898.73
Sargılar	8.9461 x10 ⁻⁶	690053.77	1283911.43	2137635.39	3474989.1	4280021.46
Mıknatıs 1	6.8132 x10 ⁻⁵	1210.71	1088.1	2095.99	5540.33	7558.55
Mıknatıs 2	3.3885 x10 ⁻⁵	3575.83	5205.73	5382.38	6021.31	6829.1

Enerji dönüşümünden malzemeler üzerindeki manyetik kayıplar bir ısı kaynağı gibi işlev görmektedir. Burada oluşan ısı yayılımının da termal etkiye sebep olacağı görülmektedir (Gai ve ark., 2019). Kayıpları belirlemek için 3 000 dev/dk nominal hızda EA-ÇS-SMd-SRM modelin farklı güçlerde elektromanyetik analizi yapılmıştır. Çizelge 4.6’da EA-ÇS-SMd-SRM modele ait stator, rotor, sargı ve mıknatısların nominal 30 kW güçten maksimum 65 kW güce kadar olan hacme göre kayıpları (W/m³) verilmiştir. 30 kW, 40 kW, 50 kW, 60 kW ve 65 kW için akım yoğunlukları sırasıyla 10.13 A/mm², 13.66 A/mm², 17.62 A/mm², 22.47 A/mm² ve 24.4 A/mm² olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.6’da verilen sargı kayıplarının stator, rotor ve mıknatıslara göre en yüksek kayıplara sahip olduğu ve en büyük ısı kaynağı olacağı görülmektedir. Sargı kayıpları 30 kW ve 65 kW güç değerinde stator kayıplarının sırasıyla 8.35 ve 30.85 katı olarak hesaplanmıştır (Gözüaçık & Akar, 2025).

EA-ÇS-SMd-SRM modelin yapısal analizleri sebebiyle eklenen kapaklar, mil ve rotor bağlantı parçasına da termal tanımlamalar malzeme seçimiyle yapılmıştır. Kapaklar ve rotor bağlantı parçası hem hafiflik hem de termal iletkenlik sebebiyle alüminyum olarak tercih edilmiştir. Termal modele eklenen bu parçalar Al6061 kodlu alüminyum olarak belirlenmiş ve termal iletkenlik katsayısı 170 W/mK'dir. Motor mili ise 304 kalite paslanmaz 42CrMo4 ıslah çelik olarak tanımlanmıştır ve iletkenlik katsayısı 16 W/mK olarak verilmiştir (Özsoy, 2023).

Sıvı soğutmalı EA-ÇS-SMd-SRM modelde kapaklara minimum 8x8 mm ölçülere sahip tandem kanallar yerleştirilmiştir. Bu kanallar iki stator boyunduruğuna da arkadan ve yanlardan oluklara kadar temas etmektedir. En önemli ısı kaynağı sargılarının doğrudan temas ettiği stator nüvesi sayesinde soğutulması amaçlanmıştır.

Termal analizler Solidworks arayüzünü kullanan bir Siemens çözüm motoruna sahip FLOEFD programında gerçekleştirilmiştir. Termal analizler için mekanik tasarım parçaları tamamen programa eklenmiştir. EA-ÇS-SMd-SRM modelindeki bütün parçalar Çizelge 4.6'da verilen kayıplar ile ısı kaynağı olarak termal modelde kullanılmıştır. Soğutma sıvısının debisi ayrı ayrı analizlerde tanımlanmıştır. Dış yüzey normal şartlar altında 25 °C ortam sıcaklığına sahip hava olarak tanımlanmıştır.

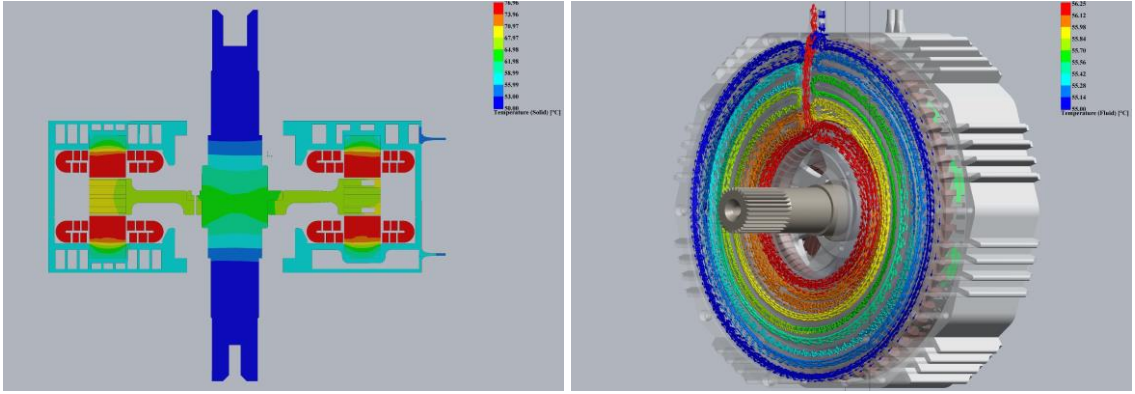


Şekil 4.38. EA-ÇS-SMd-SRM 30kW nominal modelin soğutmasız termal analiz sonuçları

Şekil 4.38’de EA-ÇS-SMd-SRM modelin nominal 30 kW güçte soğutma olmadan ortaya çıkan termal sonuçları verilmiştir. Ortam sıcaklığı 25 °C için EA-ÇS-SMd-SRM modelin maksimum sıcaklığı stator sargılarında 161.39 °C, mıknatıs sıcaklığı 143.51 °C, stator boyunduruğu ise 143.95 °C olarak görülmektedir. EAR için tasarlanmış EA-ÇS-SMd-SRM modelimizde IEC 60034-1 standartlarına göre H sınıfı yalıtım stator sargılarının dayanabildiği maksimum sıcaklık 180 °C olarak değerlendirilmiştir (Geng ve ark., 2025; Sun ve ark., 2020). N42SH mıknatısın maksimum çalışma sıcaklığı ise 150 °C olarak belirlenmiştir (Anonim, 2025f). Motor nominal 30 kW güçte soğutma olmaksızın termal sınırların altında kalmaktadır. Ancak termal sınırlara yaklaşan sargı ve mıknatıs sıcaklıkları özellikle daha yüksek güçlerde soğutmaya ihtiyaç duymaktadır.

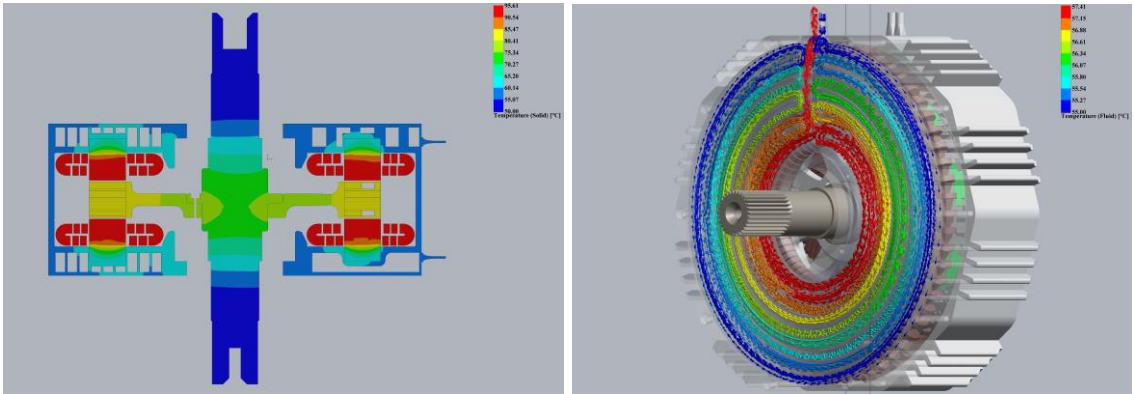
Termal modelde kullanılacak cebri sıvı soğutma yönteminde soğutma sıvısı olarak Etilen-Glikol ve su (EGW) karışımı tercih edilmiştir (Rivière & Popescu, 2021). Bu karışım antifrizli su olarak da ifade edilebildiği gibi elektrik motorlarının soğutmasında kullanılmaktadır. EGW 106 °C kaynama noktasına ve -37 °C donma noktasına sahiptir (Gai ve ark., 2019; Madhavan ve ark., 2022; Özsoy, 2023). Bu sayede kaynama noktasına kadar ısı emmeye devam edecektir. Ayrıca donma noktasının düşüklüğü soğuk iklimlerde de rahatlıkla kullanılabilmesi anlamına gelmektedir. EAR’lerde kullanılacak olması açısından insanla bizzat temasında bir zarar görülmemektedir yani toksik değildir. Korozyon önleyici yapısı sayesinde pas ve korozyon açısından oluşabilecek risklere karşı durmaktadır. Ayrıca maliyet açısından ucuz ve kullanışlıdır (Özsoy, 2023). FLOEFD yazılımında üretilen termal modele eklenen EGW oranları %50 Etilen-Glikol, %50 Su olarak belirlenmiştir (Gai ve ark., 2019). Soğutma sıvısı karışım yüzdeleri kullanım alanı ve şartlarına bağlı olarak değiştirilebilmektedir.

EA-ÇS-SMd-SRM için yapılan bu soğutma sisteminde 5 L/dk, 10 L/dk, 15 L/dk ve 20 L/dk farklı debilerde analizler gerçekleştirilmiştir. Soğutma sıvısı EGW kapalı bir sistemde harici olarak sisteme pompa ile iletilecektir. Bu sebeple EGW ortalama sıcaklığı 55 °C olarak belirlenmiştir (Mutlu, 2011; Özsoy, 2023; Sun ve ark., 2020). ÇS yapıya sahip modelde her iki stator nüvesine doğrudan temas eden sıvı kanalları ve içerisinden geçen soğutma sıvısı sayesinde termal değişim incelenmiştir. Nominal hız 3 000 dev/dk’da EA-ÇS-SMd-SRM modelinin termal çalışma aralığı Çizelge 4.6’da verildiği gibi 30 kW-65 kW güç değerleri arasında test edilmiştir.



Şekil 4.39. EA-ÇS-SMd-SRM 30 kW güç ve 5 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

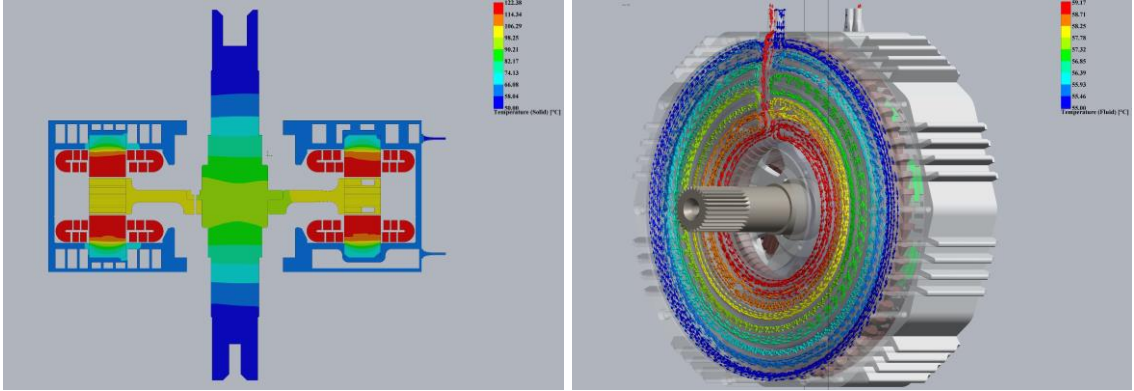
EA-ÇS-SMd-SRM 30 kW güç için ve 5 L/dk akışkan hızında termal analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.39.a’da motor kesit görüntüsünde bütün parçaların sıcaklık dağılımı verilmiştir. En yüksek sıcaklık sargılarda $75.69\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve en düşük sıcaklık motor milinde $50.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak görülmektedir. Soğutma sıvısı sayesinde mıknatıs sıcaklığı $68.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar düşmektedir. Şekil 4.39.b’de soğutma sıvısının termal değişimi verilmiştir. $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ giriş sıcaklığına sahip soğutma sıvısı 5 L/dk hız ile soğutma kanallarından geçmektedir. Akış hızına bağlı olarak soğutma sıvısının $56.21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar ısındığı görülmektedir.



Şekil 4.40. EA-ÇS-SMd-SRM 40 kW güç ve 5 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

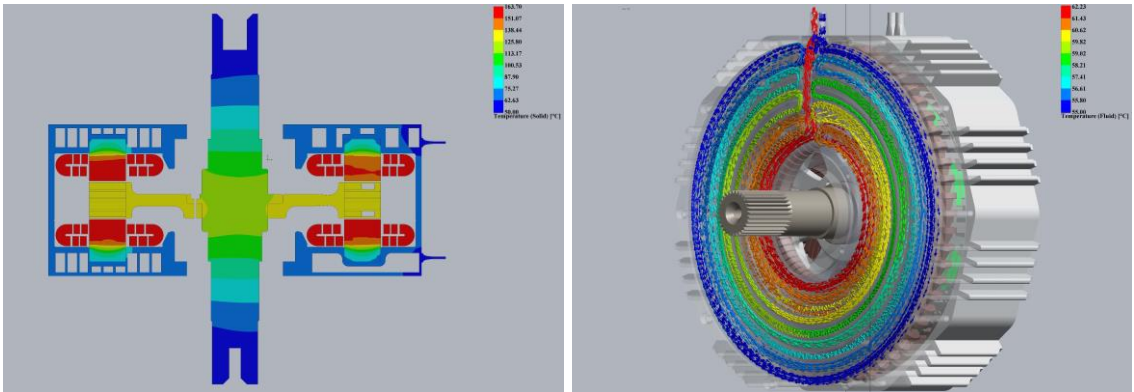
EA-ÇS-SMd-SRM gücü 40 kW’a çıkarıldığında 5 L/dk akışkan hızı için termal analiz sonuçları Şekil 4.40’da verilmiştir. Stator sargılarında maksimum sıcaklık $93.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ olurken mıknatıslardaki maksimum sıcaklık $82.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak analiz edilmiştir. Stator, rotor, rotor bağlantı parçası ve motor milinde ortalama sıcaklıklar sırasıyla $79.15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $82.67\text{ }^{\circ}\text{C}$, $80.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $59.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır. 30 kW motor modeline göre kıyasla en yüksek sıcaklıkta yaklaşık %23 artış olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.40.b’de 5

L/dk hıza sahip akışkanın 55 °C giriş sıcaklığı ve 57.4 °C çıkış sıcaklığına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.41. EA-ÇS-SMd-SRM 50 kW güç ve 5 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

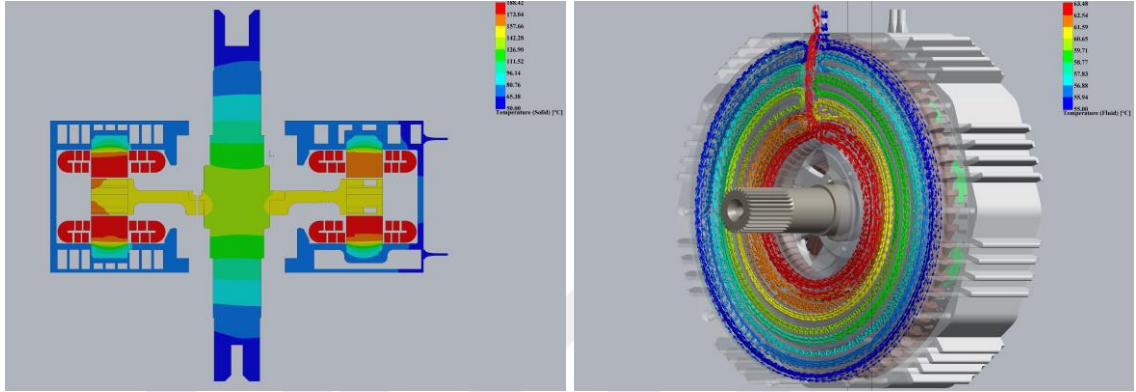
Şekil 4.41’de EA-ÇS-SMd-SRM modelin akım artışıyla 50 kW güç değeri ve 5 L/dk akışkan hızında termal sonuçları verilmiştir. Stator sargıları ve mıknatıslarda en yüksek sıcaklığın sırasıyla 118.36 °C ve 103.56 °C olduğu gözlemlenmiştir. En düşük sıcaklık başlıca ısı kaynağı sargılara uzaklığı sebebiyle yine motor milinde 71.77 °C olarak hesaplanmıştır. Soğutma sıvısının 5 L/dk hızla soğutma kanallarından geçmesinden dolayı akışkan giriş ve çıkış arasındaki sıcaklık farkı 4.10 °C’dir. Güç arttıkça ısınan motorun, soğutma sıvısı sıcaklığını da arttırdığı görülmektedir.



Şekil 4.42. EA-ÇS-SMd-SRM 60 kW güç ve 5 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

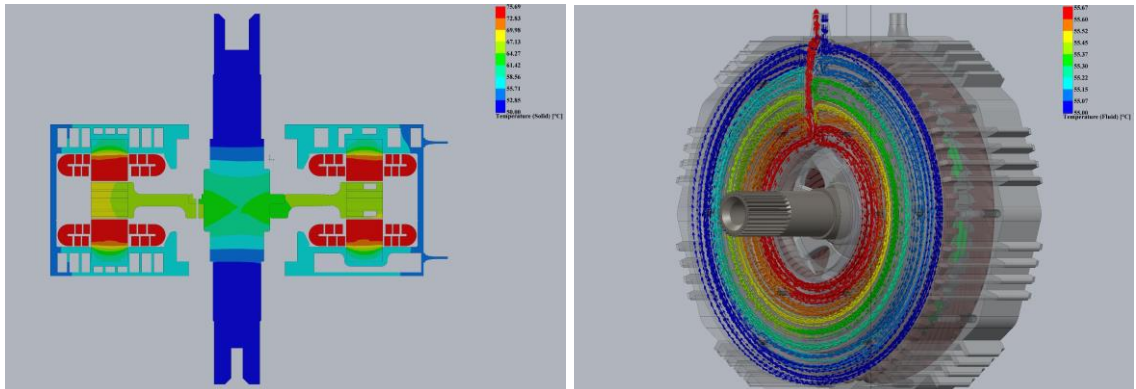
EA-ÇS-SMd-SRM’nin 5 L/dk akışkan hızında gücü 60 kW’a çıkarılmış ve termal analizi yapılmıştır. Şekil 4.42.a’da motor parçalarının sıcaklık dağılımı motor kesit görünüşü ile verilmiştir. H sınıfı sargı yalıtımı ve sıcaklığa bağlı mıknatıs demanyetizasyonu düşünüldüğünde en kritik ekipmanlar sargılar ve mıknatıslar olarak görülmektedir. 60 kW

güç değerine sahip modelde sargılar ve mıknatısların maksimum sıcaklığı sırasıyla 158.12 °C ve 136.06 °C olarak hesaplanmıştır. Bu analiz sonuçlarına göre sargı ve mıknatısların termal sınırların içinde olduğu görülmektedir. Şekil 4.42.b’de soğutma sıvısının 55 °C’den 61.72 °C’ye kadar ısındığı ve soğutma kanallarını terk ettiği görülmüştür.



Şekil 4.43. EA-ÇS-SMd-SRM 65 kW güç ve 5 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

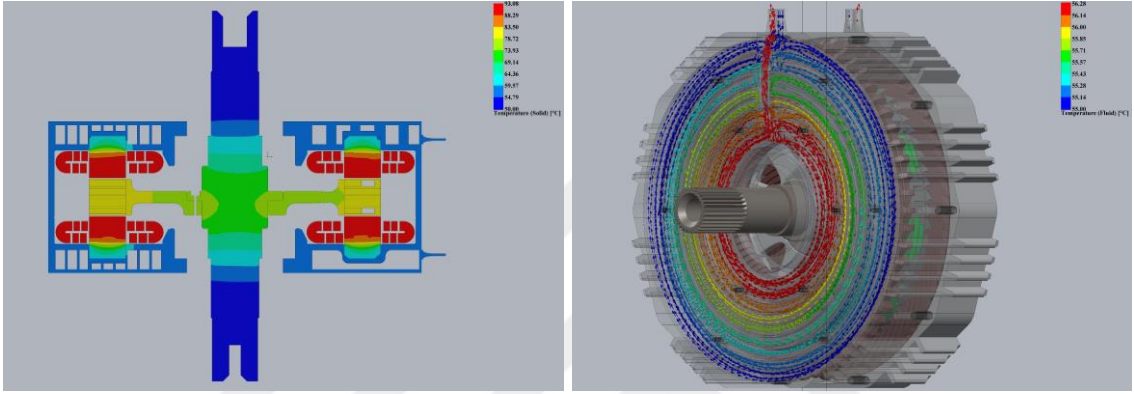
EA-ÇS-SMd-SRM 65 kW güç ve 5 L/dk akışkan hızı için termal analizi Şekil 4.43’te verilmiştir. Stator sargıları ve mıknatıslardaki maksimum sıcaklık sırasıyla 181.52 °C ve 155.86 °C olarak analiz edilmiştir. 65 kW güç değerinde ulaşılan sargı ve mıknatıs sıcaklıkları sırasıyla 180 °C ve 150 °C termal sınırların üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durumda 5 L/dk akışkan hızında EA-ÇS-SMd-SRM modelinin termal olarak 65 kW güç elde edemediği görülmüştür. Akışkan sıcaklığının 63.32 °C’lere kadar çıkması soğutma performansını da olumsuz etkilemektedir.



Şekil 4.44. EA-ÇS-SMd-SRM 30 kW güç ve 10 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

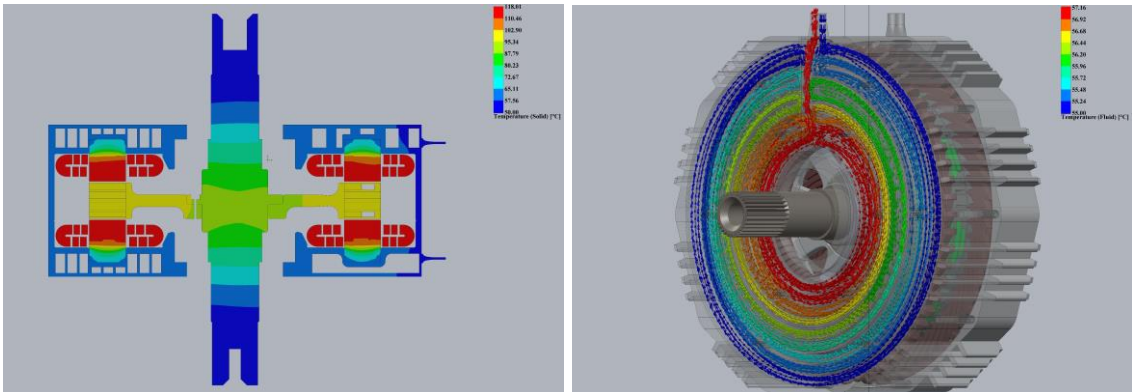
Şekil 4.44’te EA-ÇS-SMd-SRM nominal 30 kW güç için akışkan hızının 10 L/dk’ya çıkarıldığı termal analizler gerçekleştirilmiştir. Aynı güç değeri için 5 L/dk akışkan

hızında yapılan deneylere göre sargı (75.7°C - 74.46°C) ve mıknatıslarda (68.02°C - 67°C) maksimum sıcaklığın sırasıyla 1.24°C ve 1.02°C azaldığı görülmektedir. Soğutma sıvısının akış hızındaki artış termal analizlerde olumlu sonuç vererek motor soğutmasında fayda sağlamaktadır. Stator, rotor, rotor bağlantı parçası ve motor mili için ortalama sıcaklıklar sırasıyla 66.79°C , 67.02°C , 65.35°C ve 50.16°C 'dir. Soğutma sıvısının soğutma kanallarında 10 L/dk hızla ilerlemesi, 5 L/dk hızdaki modele göre ısınmasını yavaşlatmıştır. Soğutma sıvısının maksimum sıcaklığı 55.66°C olarak hesaplanmıştır.



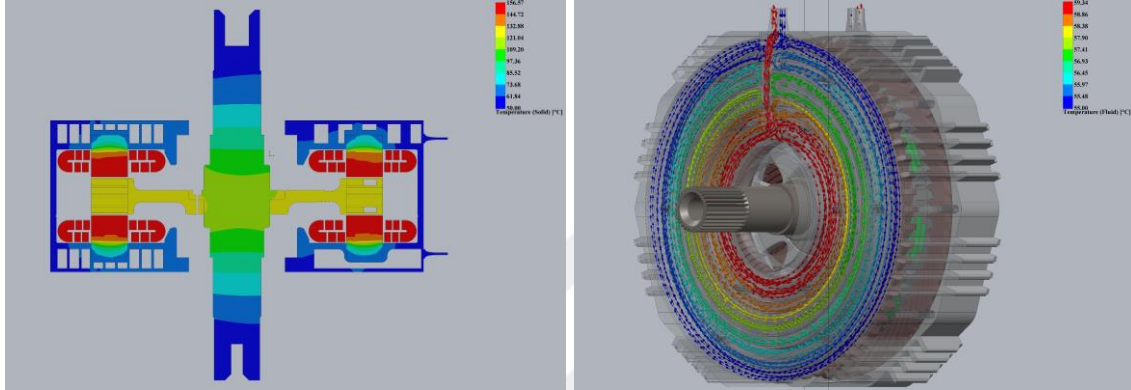
Şekil 4.45. EA-ÇS-SMd-SRM 40 kW güç ve 10 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

Akışkan hızının 10 L/dk ve EA-ÇS-SMd-SRM gücünün 40 kW olduğu termal analizler Şekil 4.45'te verilmiştir. Stator sargıları ve mıknatıs maksimum sıcaklığı sırasıyla 91.11°C ve 80.54°C olarak analiz edilmiştir. Motorda en düşük sıcaklıklar 57.05°C ile motor kapağında ve 58.12°C ile motor milinde gözlemlenmiştir. Ana ısı kaynağı sargıların doğrudan temas etmemesi ve diğer parçalar üzerinden ısının yayılması mil ve kapakta sıcaklık artışını minimuma indirmektedir. Akışkan sıcaklığı ise 55°C 'den 56.26°C 'ye kadar artış göstermektedir.



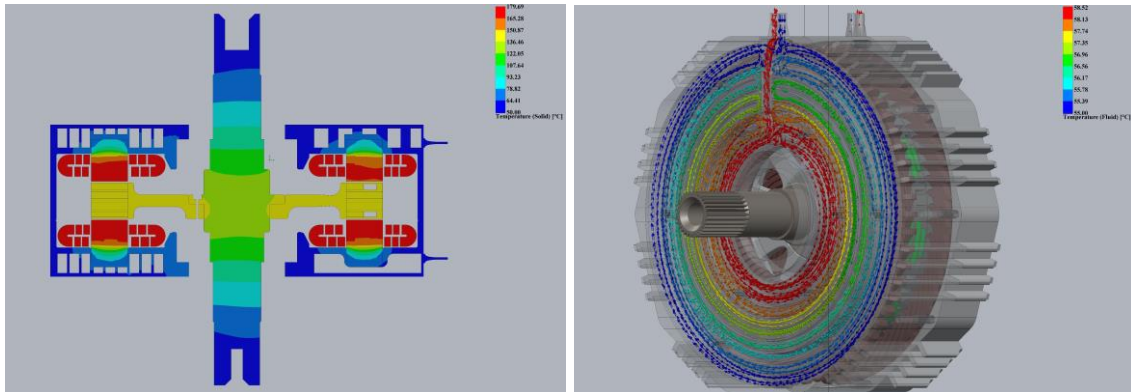
Şekil 4.46. EA-ÇS-SMd-SRM 50 kW güç ve 10 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

Şekil 4.46’da EA-ÇS-SMd-SRM 50 kW güç ve 10 L/dk akışkan hızı için termal analizi gerçekleştirilmiştir. Motor 50 kW güç değerine çıktığında akımdaki artış sargılardaki ısınmayı arttırmaktadır. Bu durumda en yüksek sıcaklık stator sargılarında 114.17 °C olarak hesaplanmıştır. Stator, rotor, mıknatıslar, rotor bağlantı parçası ve mil üzerinde ortalama sıcaklıklar ise sırasıyla 90.79 °C, 99.88 °C, 99.82 °C, 96.74 °C ve 69.56 °C’dir. Akışkanın soğutma kanallarını 57.12 °C’ye kadar ısınarak terk ettiği görülmüştür.



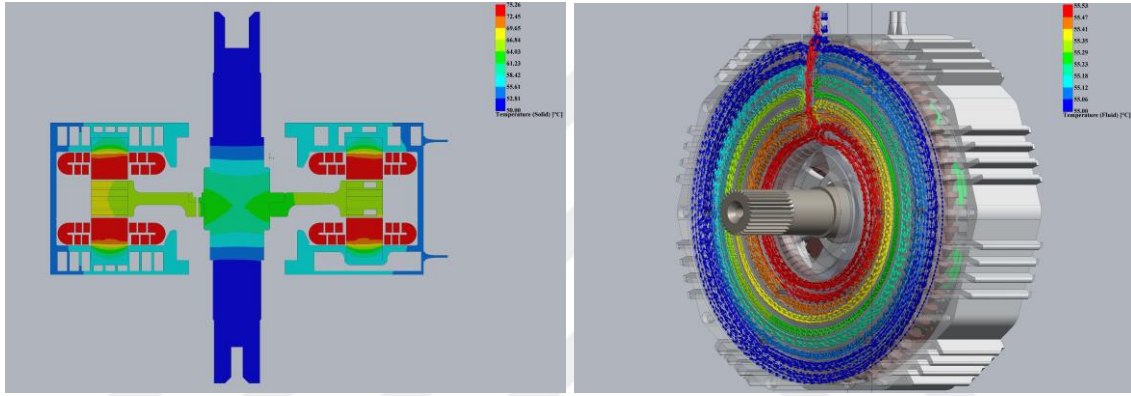
Şekil 4.47. EA-ÇS-SMd-SRM 60 kW güç ve 10 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

EA-ÇS-SMd-SRM 60 kW güç ve 10 L/dk akışkan hızı için termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.47.a’da motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü olarak verilmiştir. Sargılar ve mıknatıslar için maksimum sıcaklık 151.27 °C ve 129.98 °C olarak hesaplanmıştır. Stator, rotor, rotor bağlantı parçası, mil ve motor kapağında analiz edilen ortalama sıcaklıklar sırasıyla 112.67 °C, 130.03 °C, 125.51 °C, 87.48 °C ve 61.44 °C’dir. Şekil 4.47.b’de soğutma sıvısının 10 L/dk hızla soğutma kanallarında ilerleyişi verilmiştir. Soğutma sıvısının 55 °C sıcaklıkta giriş yaptığı ve 58.45 °C’lere kadar ısındığı gözlemlenmiştir.



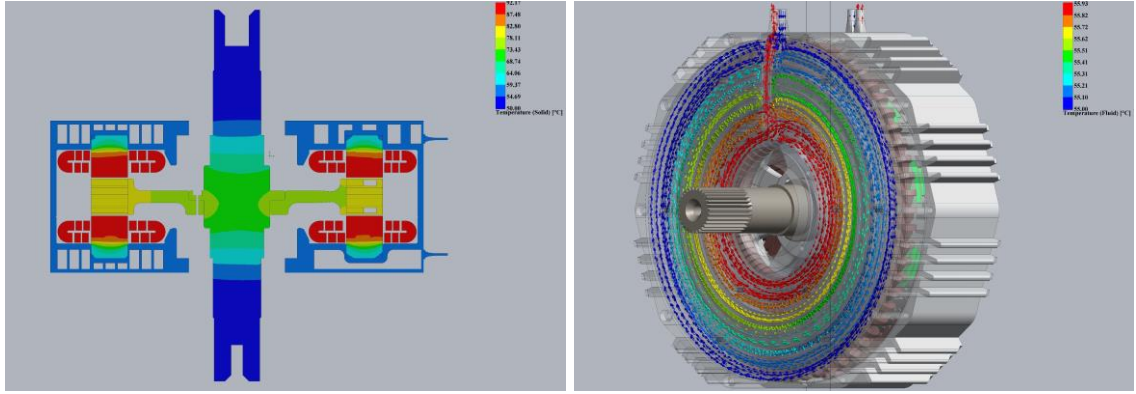
Şekil 4.48. EA-ÇS-SMd-SRM 65 kW güç ve 10 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

EA-ÇS-SMd-SRM termal analizlerinde maksimum 65 kW güç ve 10 L/dk akışkan hızı kullanılmıştır. Şekil 4.48.a’da motor sıcaklık dağılımı kesit görünüş olarak verilmiştir. Sargı yalıtımı ve demanyetizasyon açısından değerlendirildiğinde sargı ve mıknatıslar maksimum 179.69 °C ve 148.95 °C sıcaklıklara ulaşarak termal sınıra (sargılar için 180 °C ve mıknatıslar için 150 °C) çok yakın sonuçlar vermektedir. Bu durumda 5 L/dk akışkan hızı için termal sınırların üzerinde olan sıcaklık, akışkan hızın 10 L/dk’ya artırılmasıyla termal sınırların altına indirilmiştir. 10 L/dk akışkan hızına sahip EA-ÇS-SMd-SRM 65 kW güç değerlerine çıkabilecek termal yeterliliklere sahiptir. Şekil 4.48.b’de soğutma sıvısının 55 °C’den 59.26 °C’ye kadar ısındığı görülmektedir.



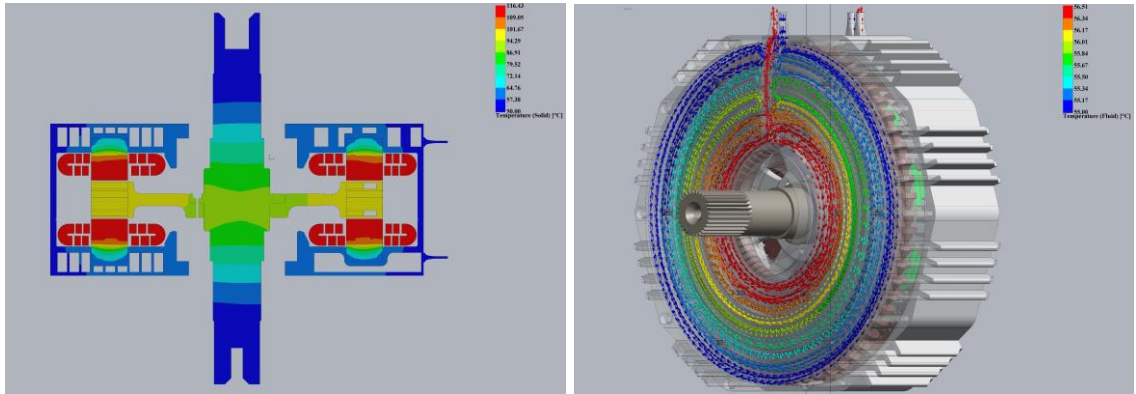
Şekil 4.49. EA-ÇS-SMd-SRM 30 kW güç ve 15 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

EA-ÇS-SMd-SRM 30 kW güç için ve 15 L/dk akışkan hızında termal analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.49.a’da motor kesit görüntüsünde bütün parçaların sıcaklık dağılımı verilmiştir. En yüksek sıcaklık sargılarda 74.04 °C ve en düşük sıcaklık motor milinde 49.91 °C olarak görülmektedir. Soğutma sıvısı sayesinde mıknatıs sıcaklığı 66.49 °C’ye kadar düşmektedir. Şekil 4.49.b’de soğutma sıvısının termal değişimi verilmiştir. 55 °C giriş sıcaklığına sahip soğutma sıvısı 15 L/dk hız ile soğutma kanallarından geçmektedir. Akış hızına bağlı olarak soğutma sıvısının 55.22 °C’ye kadar ısındığı görülmektedir.



Şekil 4.50. EA-ÇS-SMd-SRM 40 kW güç ve 15 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

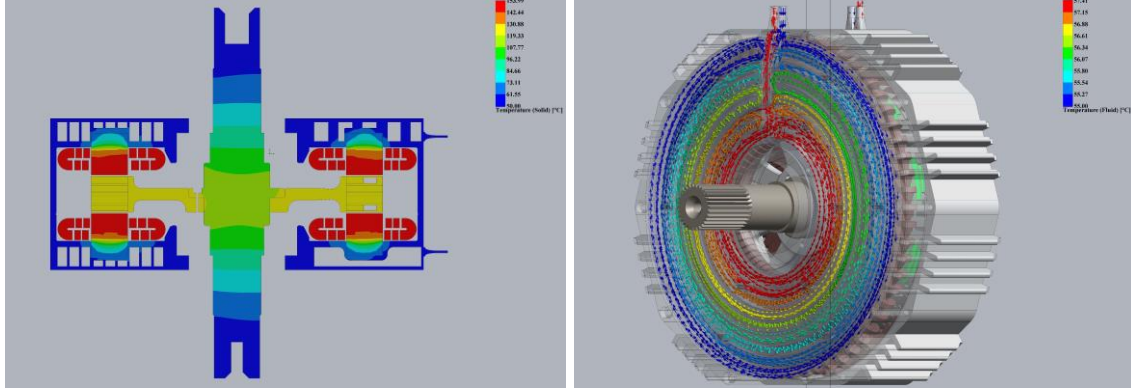
EA-ÇS-SMd-SRM gücü 40 kW'a çıkarıldığında 15 L/dk akışkan hızı için termal analiz sonuçları Şekil 4.50'de verilmiştir. Stator sargılarında maksimum sıcaklık 90.24 °C olurken mıknatıslardaki maksimum sıcaklık 79.77 °C olarak analiz edilmiştir. Stator, rotor, rotor bağlantı parçası ve motor milinde ortalama sıcaklıklar sırasıyla 75.77 °C, 79.81 °C, 77.56 °C ve 57.69 °C olarak hesaplanmıştır. 30 kW motor modeline göre kıyasla en yüksek sıcaklıkta yaklaşık %21 artış olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.50.b'de 15 L/dk hıza sahip akışkanın 55 °C giriş sıcaklığı ve 55.92 °C çıkış sıcaklığına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.51. EA-ÇS-SMd-SRM 50 kW güç ve 15 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

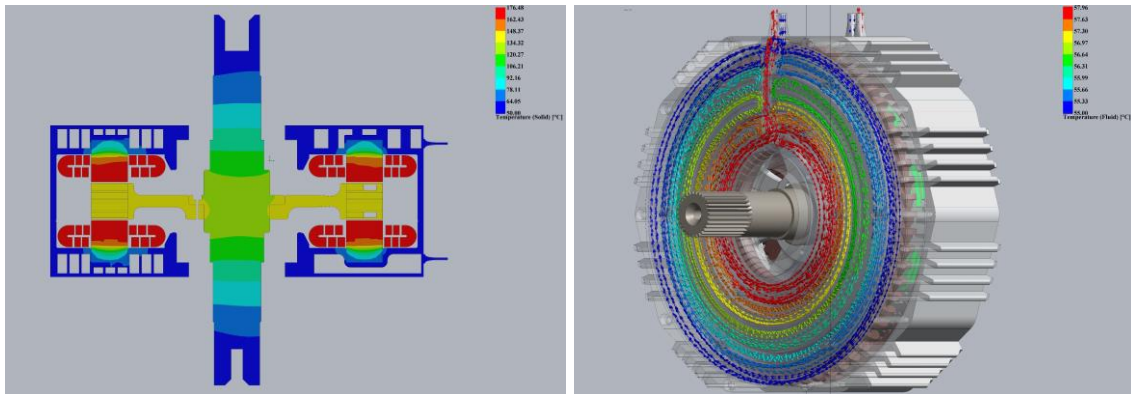
Şekil 4.51'de EA-ÇS-SMd-SRM modelin akım artışıyla 50 kW güç değeri ve 15 L/dk akışkan hızında termal sonuçları verilmiştir. Stator sargıları ve mıknatıslarda en yüksek sıcaklığın sırasıyla 112.66 °C ve 98.53 °C olduğu gözlemlenmiştir. En düşük sıcaklık başlıca ısı kaynağı sargılara uzaklığı sebebiyle yine motor milinde 68.71 °C olarak hesaplanmıştır. Soğutma sıvısının 15 L/dk hızla soğutma kanallarından geçmesinden

dolayısı akışkan giriş ve çıkış arasındaki sıcaklık farkı 1.5 °C'dir. Güç arttıkça ısınan motorun, soğutma sıvısı sıcaklığını da arttırdığı görülmektedir.



Şekil 4.52. EA-ÇS-SMd-SRM 60 kW güç ve 15 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

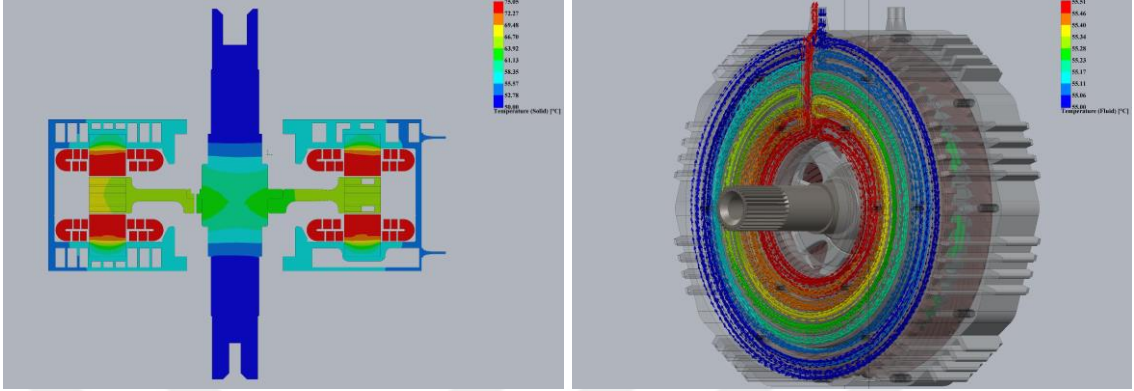
EA-ÇS-SMd-SRM'nin 15 L/dk akışkan hızında gücü 60 kW'a çıkarılmış ve termal analizi yapılmıştır. Şekil 4.52.a'da motor parçalarının sıcaklık dağılımı motor kesit görünüşü ile verilmiştir. H sınıfı sargı yalıtımı ve sıcaklığa bağlı mıknatıs demanyetizasyonu düşünüldüğünde en kritik ekipmanlar sargılar ve mıknatıslar olarak görülmektedir. 60 kW güç değerine sahip modelde sargılar ve mıknatısların maksimum sıcaklığı sırasıyla 148.77 °C ve 127.74 °C olarak hesaplanmıştır. Bu analiz sonuçlarına göre sargı ve mıknatısların termal sınırların içinde olduğu görülmektedir. Şekil 4.52.b'de soğutma sıvısının 55 °C'den 57.39 °C'ye kadar ısınarak soğutma kanallarını terk ettiği görülmüştür.



Şekil 4.53. EA-ÇS-SMd-SRM 65 kW güç ve 15 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

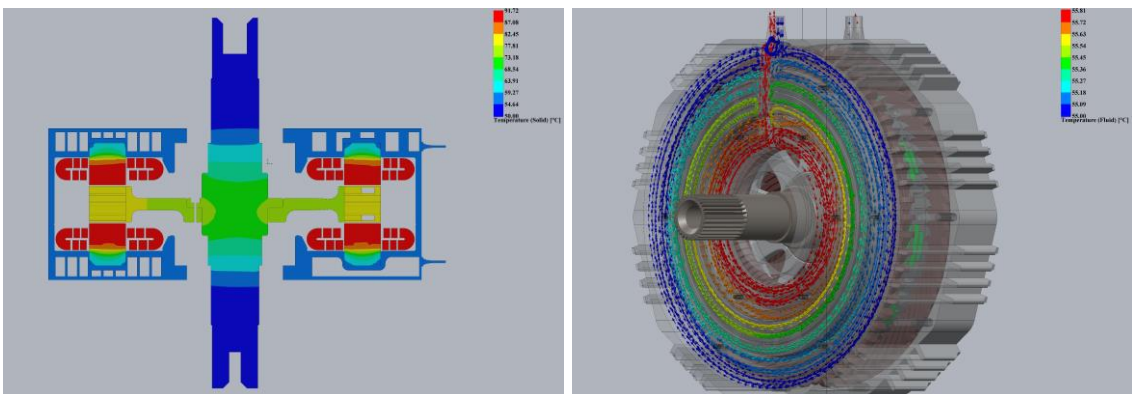
EA-ÇS-SMd-SRM 65 kW güç ve 15 L/dk akışkan hızı için termal analizi Şekil 4.53'te verilmiştir. Stator sargıları ve mıknatıslardaki maksimum sıcaklık sırasıyla 170.06 °C ve 145.67 °C olarak analiz edilmiştir. 65 kW güç değerinde ulaşılan sargı ve mıknatıs

sıcaklıkları sırasıyla 180 °C ve 150 °C termal sınırlarının altında olduğu görülmektedir. Bu durumda 15 L/dk akışkan hızında EA-ÇS-SMd-SRM modelinin termal olarak 65 kW güce çıkabildiği görülmüştür. Akışkan sıcaklığının 57.92 °C'lere kadar çıkmaktadır.



Şekil 4.54. EA-ÇS-SMd-SRM 30 kW güç ve 20 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

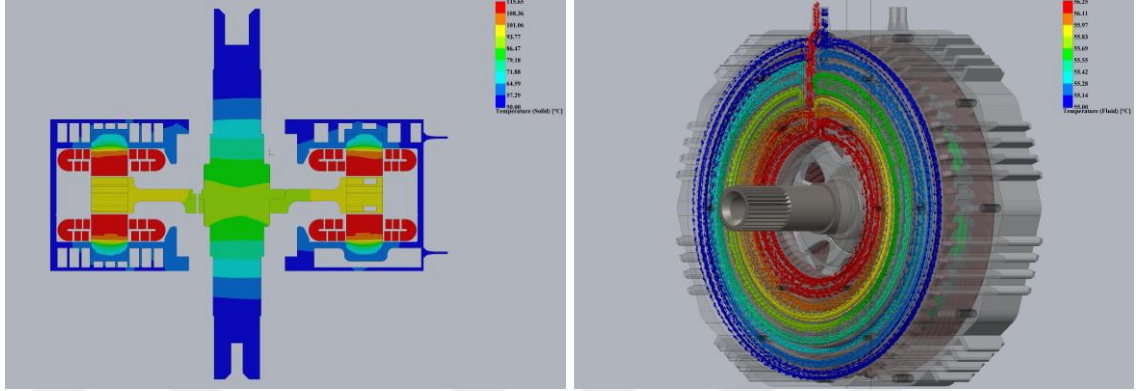
Şekil 4.54'te EA-ÇS-SMd-SRM nominal 30 kW güç için akışkan hızının 20 L/dk'ya çıkarıldığı termal analizler gerçekleştirilmiştir. Aynı güç değeri için 15 L/dk akışkan hızında yapılan deneylere göre sargı (74.04 °C – 73.83 °C) ve mıknatıslarda (66.5 °C – 66.45°C) maksimum sıcaklığın sırasıyla 0.21 °C ve 0.05 °C azaldığı görülmektedir. Soğutma sıvısının akış hızındaki artış termal analizlerde olumlu sonuç verse de akışkan hızı yükseldikçe motor soğutmasındaki fayda azalmaktadır. Stator, rotor, rotor bağlantı parçası ve motor mili için ortalama sıcaklıklar sırasıyla 66.15 °C, 66.47 °C, 64.83 °C ve 49.84 °C'dir. Soğutma sıvısının maksimum sıcaklığı 55.5 °C olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.55. EA-ÇS-SMd-SRM 40 kW güç ve 20 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

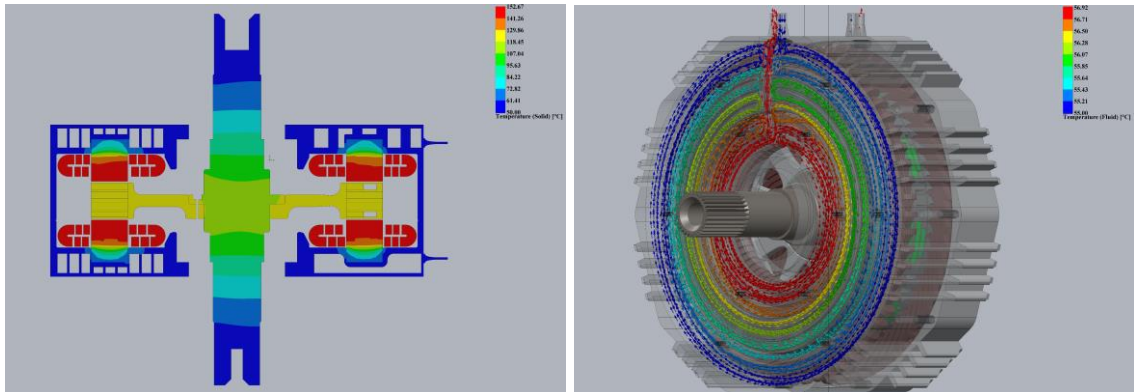
Akışkan hızının 20 L/dk ve EA-ÇS-SMd-SRM gücünün 40 kW olduğu termal analizler Şekil 4.55'te verilmiştir. Stator sargıları ve mıknatıs maksimum sıcaklığı sırasıyla 89.8 °C ve 79.4 °C olarak analiz edilmiştir. Motorda en düşük sıcaklıklar 57.43 °C ile motor

milinde gözlemlenmiştir. Ana ısı kaynağı sargıların doğrudan temas etmemesi ve diğer parçalar üzerinden ısının yayılması mil sıcaklık artışını minimuma indirmektedir. Akışkan sıcaklığı ise 55 °C’den 55.8 °C’ye kadar artış göstermektedir.



Şekil 4.56. EA-ÇS-SMd-SRM 50 kW güç ve 20 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

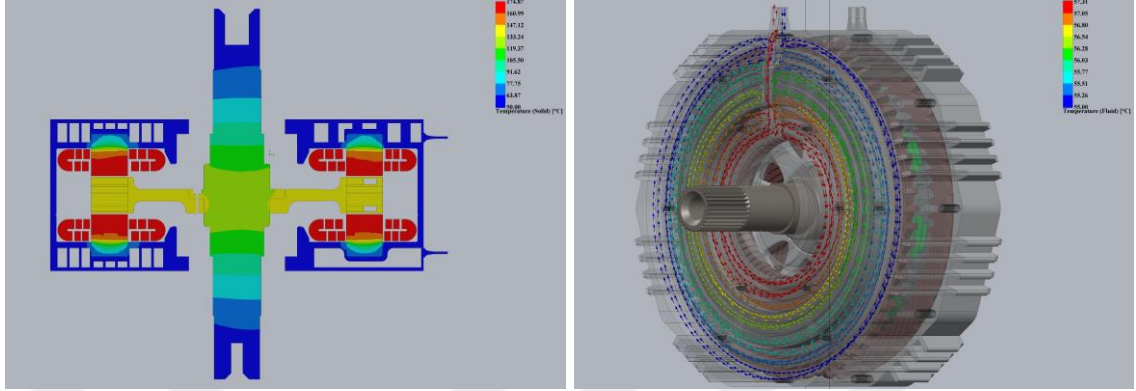
Şekil 4.56’da EA-ÇS-SMd-SRM 50 kW güç ve 20 L/dk akışkan hızı için termal analizi gerçekleştirilmiştir. Motor 50 kW güç değerine çıktığında akımdaki artış sargılardaki ısınmayı arttırmaktadır. Bu durumda en yüksek sıcaklık stator sargılarında 111.91 °C olarak hesaplanmıştır. Stator, rotor, mıknatıslar, rotor bağlantı parçası ve mil üzerinde ortalama sıcaklıklar ise sırasıyla 88.51 °C, 97.89 °C, 97.83 °C, 94.82 °C ve 68.36 °C’dir. Akışkanın soğutma kanallarını 56.23 °C’ye kadar ısınarak terk ettiği görülmüştür.



Şekil 4.57. EA-ÇS-SMd-SRM 60 kW güç ve 20 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

EA-ÇS-SMd-SRM 60 kW güç ve 20 L/dk akışkan hızı için termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.57.a’da motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü olarak verilmiştir. Sargılar ve mıknatıslar için maksimum sıcaklık 147.51 °C ve 126.66 °C olarak hesaplanmıştır. Stator, rotor, rotor bağlantı parçası, mil ve motor kapağında analiz edilen ortalama sıcaklıklar sırasıyla 108.88 °C, 126.71 °C, 122.32 °C, 85.43 °C ve 58.15 °C’dir.

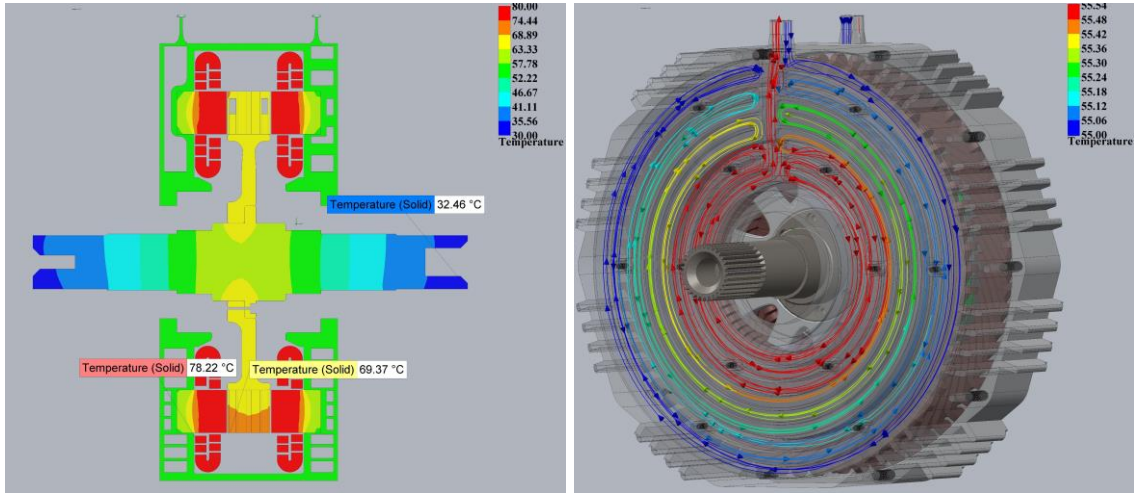
Şekil 4.58.b’de soğutma sıvısının 20 L/dk hızla soğutma kanallarında ilerleyişi verilmiştir. Soğutma sıvısının 55 °C sıcaklıkta giriş yaptığı ve 56.9 °C’lere kadar ısındığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.58. EA-ÇS-SMd-SRM 65 kW güç ve 20 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

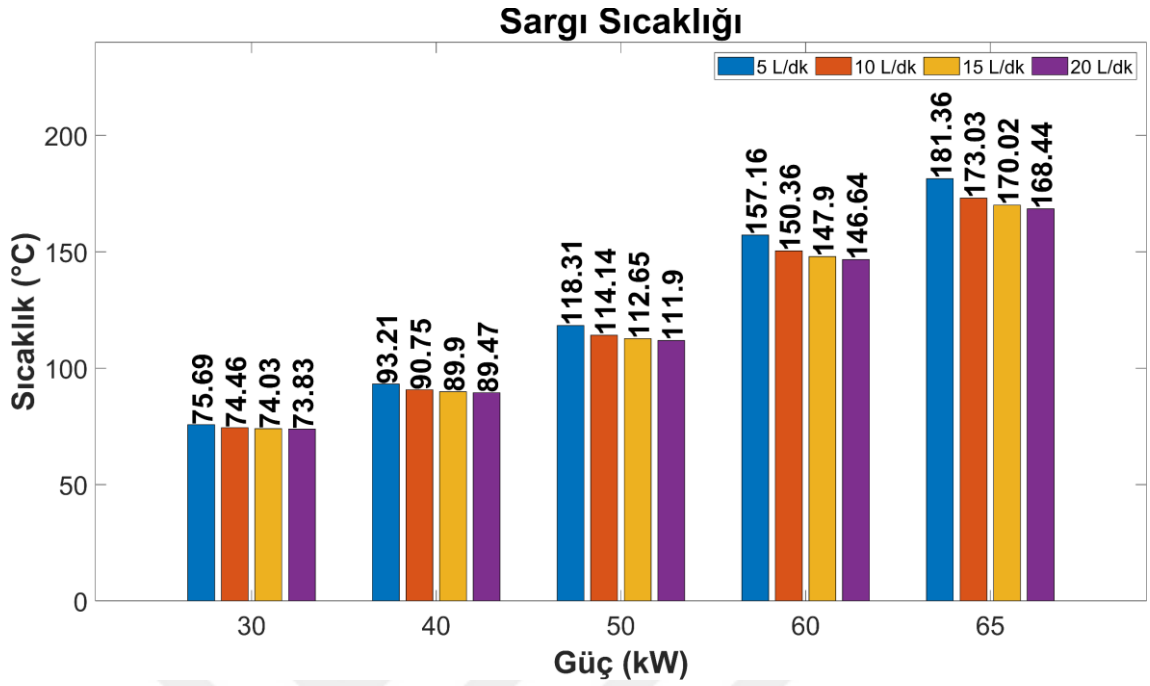
EA-ÇS-SMd-SRM termal analizlerinde maksimum 65 kW güç ve 20 L/dk akışkan hızı kullanılmıştır. Şekil 4.58.a’da motor sıcaklık dağılımı kesit görünüş olarak verilmiştir. Sargı yalıtımı ve demanyetizasyon açısından değerlendirildiğinde sargı ve mıknatıslar maksimum 168.46 °C ve 144.24 °C sıcaklıklara ulaşarak termal sınırın (sargılar için 180 °C ve mıknatıslar için 150 °C) altında sonuçlar vermektedir. Bu durumda 20 L/dk akışkan hızı ile en iyi soğutma performansı sağlanmıştır. 20 L/dk akışkan hızına sahip EA-ÇS-SMd-SRM 65 kW güç değerlerine çıkabilecek termal yeterliliklere sahiptir. Şekil 4.58.b’de soğutma sıvısının 55 °C’den 57.31 °C’ye kadar ısındığı görülmektedir.

Bu çalışmada, EA-ÇS-SMd-SRM motorunun farklı güç seviyelerindeki termal performansı incelenmiştir. Analiz, bakır kayıplarının daha yüksek akım seviyelerinde önemli ölçüde arttığını ve birincil ısı kaynağı olarak ortaya çıktığını ortaya koymuştur. Nominal hız 3 000 dev/dk’da yapılan termal analizler sonucunda farklı güç değerlerinde motorun sıcaklık değişimi detaylı bir şekilde incelenmiştir. EAR uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanan EA-ÇS-SMd-SRM modelin 10 000 dev/dk’ya kadar yüksek hızlarda çalışması beklenmektedir. Sabit akım için hızdaki artış demir kayıplarını arttırmaktadır (Mısır & Akar, 2022). Buna göre Şekil 4.54’te nominal hızda (3 000 dev/dk), nominal 30 kW güç değerinde ve en iyi soğutma akış hızı 20 L/dk için analiz edilen modelin maksimum hızda (10 000 dev/dk) termal analiz sonuçları alınmıştır.

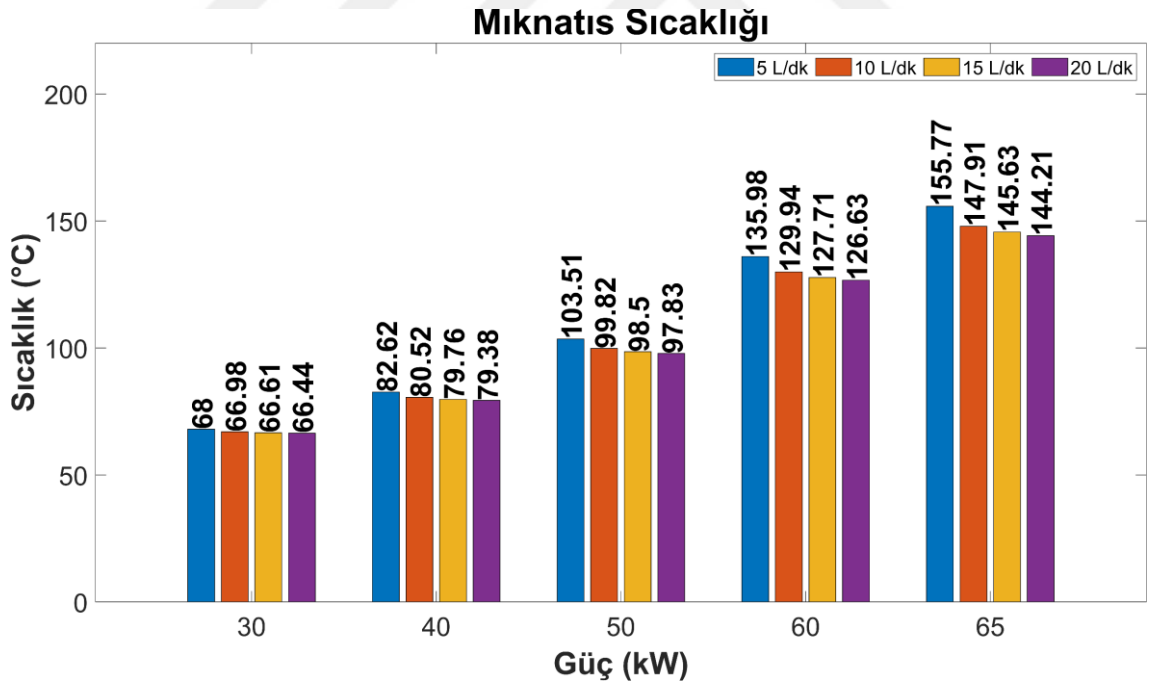


Şekil 4.59. EA-ÇS-SMd-SRM 10 000 dev/dk maksimum hız, 30 kW nominal güç ve 20 L/dk akışkan hızı için termal analizi a) motor sıcaklık dağılımı kesit görünüşü, b) soğutma sıvısı termal değişimi

Şekil 4.54 ve Şekil 4.59’da farklı hızlarda (3 000 dev/dk ve 10 000 dev/dk) termal değişiklikleri değerlendirmek için aynı 81.3 A_{rms} akımı (30 kW nominal güç) ve 20 L/dk soğutma sıvısı akış hızı kullanılmıştır. Maksimum 10 000 dev/dk hızda elde edilen analiz sonuçları Şekil 4.59’da sunulmuştur. Bu durumda, bakır kayıplarının (706 741 W/m³) nominal hızdaki değerlerine benzer kaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, histerezis ve girdap akımları nedeniyle stator nüve kayıplarında (303 308 W/m³) %266’lık bir artış meydana gelmiştir. Soğutma kanalları ile stator arasındaki doğrudan temas nedeniyle, sargı ve rotor bölgelerindeki sıcaklık artışları sırasıyla sadece 3.22 °C ve 2.26 °C olarak ölçülmüştür. 30 kW nominal güç değeri ve 20 L/dk akışkan hızında yapılan analizlerde motor hızının 3 000 dev/dk’dan 10 000 dev/dk’ya kadar artması motorda nüve kayıplarının artmasına sebep olmuştur. Soğutma kanallarının doğrudan stator çekirdeğine temas etmesi nüve kayıplarındaki artışı kolaylıkla telafi edebilmektedir. İki model arasındaki sıcaklık değişiminin fazla olmaması sebebiyle farklı güç değerlerinde hız değişiminin termal etkisinin az olacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.60. EA-ÇS-SMd-SRM modelin farklı debide soğutma sıvılarına ve farklı güç değerlerine göre stator sargı sıcaklık ortalaması



Şekil 4.61. EA-ÇS-SMd-SRM modelin farklı debide soğutma sıvılarına ve farklı güç değerlerine göre mıknatıs sıcaklık ortalaması

Şekil 4.60 ve Şekil 4.61’de 5 L/dk, 10 L/dk, 15 L/dk ve 20 L/dk soğutma sıvısı akış hızlarında 30 kW, 40 kW, 50 kW, 60 kW ve 65 kW güç değerleri için EA-ÇS-SMd-SRM modelin termal sonuçları verilmiştir. Akışkan hızı arttıkça motor sargıları ve

mıknatıs sıcaklığı düşmektedir. EA-ÇS-SMd-SRM modelin elektromanyetik sonuçlarda belirlenen 74 kW'lık maksimum gücü, termal sınırların üzerinde olduğu için değerlendirmeye alınmamıştır. Bu durumda motorun maksimum gücü termal analizler sonucunda 65 kW olarak belirlenmiştir (Gözüaçık & Akar, 2025).

Termal analizler sonucunda soğutma sıvısı akış hızının artışı motor ekipmanları üzerindeki ortalama sıcaklığı düşürmektedir. Akış hızına bağlı sıcaklık değişimi en belirgin olarak 65 kW modelinde görülmektedir. Soğutma sıvısı akış hızının 5 L/dk'dan 10-15-20 L/dk'ya çıkarılması, Şekil 4.60'da gösterildiği gibi ortalama motor sargı sıcaklığının sırasıyla %4.6, %6.2 ve %7.2 oranında düşmesine sebep olmuştur. 5 L/dk ve 10 L/dk akış hızında modeller arasındaki sıcaklık değişimi %4.6 olurken, 15 L/dk ve 20 L/dk akış hızında modeller arasındaki değişim %0.9 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda akışkan hızının çok artırılması termal açıdan yüksek avantaj sağlamamaktadır. Şekil 4.61'de aynı durum, akış hızının 5 L/dk'dan 10-15-20 L/dk'ya çıkarılması ile ortalama mıknatıs sıcaklığının sırasıyla %5.1, %6.5 ve %7.4 oranında azaldığını göstermektedir.

EA-ÇS-SMd-SRM model termal analizleri sonucunda en iyi soğutma performansı maksimum akışkan hızı 20 L/dk'da elde edilmiştir. 20 L/dk akışkan hızında 30 kW, 40 kW, 50 kW ve 65 kW arasındaki ortalama motor sargı sıcaklıkları sırasıyla 73.83 °C, 89.47 °C, 111.9 °C, 146.64 °C ve 168.44 °C olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, ortalama mıknatıs sıcaklıkları sırasıyla 66.44 °C, 79.38 °C, 97.83 °C, 126.63 °C ve 144.21 °C'dir. Bu durumda, 168.44 °C motor sargı sıcaklığı ve 144.21 °C mıknatıs sıcaklığına sahip 20 L/dk akışkan hızındaki model maksimum 65 kW güç değerinde de termal sınırların (180 °C maksimum sargı sıcaklığı ve 150 °C maksimum mıknatıs sıcaklığı) içindedir. Sadece 5 L/dk akış hızında soğutulan model maksimum 65 kW güç için 181.36 °C motor sargı sıcaklığı ve 155.77 °C mıknatıs sıcaklığı ile termal sınırların altındadır. Maksimum 65 kW güç değerinde de motorun termal sınırların altında kalabilmesi için akışkan hızının 5 L/dk'dan büyük olması gerekmektedir. EA-ÇS-SMd-SRM modeli elektromanyetik analizde 74 kW'lık bir maksimum güce ulaşmış olsa da, termal analiz nedeniyle maksimum güç 65 kW olarak revize edilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, EAR'lerde tahrik sistemleri için yeni bir EA-ÇS-SMd-SRM tasarlanmıştır. Motor, simetrik akı dağılımı sağlayan ve elektromanyetik verimliliği artıran ÇS NS topolojisine sahiptir. Eksenel akı konfigürasyonunun kullanılması, kompakt EAR paketlemesi için kritik öneme sahip olan hacimde önemli azalmalar sağlamaktadır. Tork-güç yoğunluğunu artırmak için sabit NTE mıknatıs desteği eklenmiştir. Önerilen model, yüksek performans, yapısal basitlik ve üretilebilirliği bir araya getirerek seri üretime uygun hale getirilmiştir.

Tasarım süreci, EAR uygulaması için gereken optimum motor gücünü belirlemek üzere ayrıntılı çekiş hesaplamalarıyla başlamaktadır. Bu hesaplamalarda, ilk hızlanma, yokuş tırmanma ve yüksek hızda seyir gibi önemli dinamik performans senaryoları dikkate alınmıştır. Ayrıca, gerçek dünya çalışma profillerini simüle etmek için FTP, WLTP ve ARTEMIS kentsel gibi standartlaştırılmış uluslararası sürüş döngüleri analiz edilmiştir. Bu koşullara göre, nominal motor gücü yaklaşık 30 kW ve nominal hız yaklaşık 3 000 dev/dk olarak belirlenmiştir. Bu güç seviyesi, dikkate alınan tüm senaryolarda performans taleplerini karşılamak için yeterli olup motor boyutlandırma ve parametre seçimi için temel oluşturmaktadır.

Nominal güç belirlendikten sonra, motor analitik ve matematiksel modelleme yoluyla boyutlandırılmıştır. Bu durumda, akım, akım yoğunluğu, stator tasarımı (boyut, oluk, boyunduruk tasarımı vb.), rotor tasarımı (boyut, bariyer, mıknatıs tasarımı vb.) manyetik akı dağılımı ve tasarım sınırları belirlenmiştir. İlk tasarım aşaması, kabul edilebilir doğruluk ve düşük hesaplama maliyeti ile birden fazla tasarım yinelemesinin hızlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlayan 2B SEY kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler çift hava aralıklı eksenel topoloji bağlamında 6, 8 ve 10 kutuplu motor modelleri kullanılarak tamamlanmıştır. Bu aşamada ÇS-ÇR topolojileri, mıknatıslı (ferrit ve NTE mıknatıs) ve mıknatıssız modeller karşılaştırılmıştır.

Ön değerlendirmenin ardından, nihai modeli daha yüksek doğrulukla temsil etmek için 3B motor geometrisi geliştirilmiştir. Bu tasarımdaki temel yenilik, EA motorların tipik doğal konik şekline karşı koyan, yarıçap boyunca sabit boyutlu rotor bariyerleri ve mıknatısların kullanılmasıdır. Bu sayede EA-ÇS-SMd-SRM, EA motorlarda dış çaptan iç çapa doğru daralan bariyer ve mıknatıs yapısına karşın sabit bariyer ve mıknatıs

yapısıyla seri üretime uygun olarak tasarlanmıştır. Bu tasarım yaklaşımı, rotor üretimini önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır.

EA-ÇS-SMd-SRM rotor geometrisini iyileştirmek için ÇAGA optimizasyon süreci uygulanmıştır. Optimizasyon işleminde amaç fonksiyonu ortalama torku ve verimi en üst düzeye çıkarmak, tork dalgalanmasını en aza indirmek için oluşturulmuştur. Optimizasyon sonucunda, 3 000 dev/dk nominal hızda 96.1 Nm tork ve 30 kW nominal güç üretebilen bir motor elde edilmiştir. Nihai modelde maksimum tork 253.1 Nm, maksimum hız 10 000 dev/dk ve maksimum güç 74 kW olarak analiz edilmiştir. EA-ÇS-SMd-SRM, 3 000 dev/dk ile 5 000 dev/dk arasında yüksek verimliliği (%94.4'e kadar) korumaktadır. Nominal 3 000 dev/dk hıza kadar sabit tork bölgesi ve nominal hızın üzerinde sabit güç bölgesi ile geniş bir hız aralığında çalışmayı desteklemektedir. Sabit güç bölgesinde SGHO minimum 3.3 olarak hesaplanmıştır.

Motorun mekanik ve yapısal bütünlüğü, ayrıntılı SEY gerilme analizi ile incelenmiştir. Motor milinin, eğilme ve burulma gerilmeleri açısından mekanik analizlerde sırasıyla 5.44 ve 4.31 güvenlik faktörüne sahip olduğu hesaplanmıştır. Rotor bağlantı parçası, rotor, rotor muhafazası ve stator için yapılan mekanik analizler sonucunda en kötü yükleme koşullarında sırasıyla 3.87, 9.67, 11.55 ve 2.77 güvenlik katsayısı elde ederek sağlam bir tasarım elde edilmiştir. Bu sonuçlar, önerilen geometrinin hem nominal hem de aşırı çalışma koşullarında mekanik olarak uygulanabilir olduğunu doğrulamıştır. Ayrıca, özellikle yüksek akım çalışması için etkili termal düzenleme sağlamak amacıyla soğutma ceketini stator boyunduruğuna temas edecek şekilde motor kapaklarına entegre edilmiştir.

Motorun termal analizi hem pasif hem de aktif soğutma senaryoları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Pasif koşullar altında (aktif soğutma yok), motor 30 kW nominal güçte ortalama sargı ve mıknatıs sıcaklıkları sırasıyla 161.69 °C ve 143.51 °C'ye ulaşmıştır. Her ikisi de sargı yalıtımı için 180 °C ve mıknatıs demanyetizasyonu için 150 °C kabul edilebilir termal sınırlar içinde bulunmaktadır. Daha yüksek güç seviyelerinde, 55°C giriş sıcaklığında 50/50 EGW karışımı kullanan kapalı devre sıvı soğutma sistemi modellenmiştir. Termal performans, motorun 74 kW güce ulaşan elektromanyetik kapasitesine rağmen, maksimum termal sınır olarak belirlenen 65 kW'a kadar değerlendirilmiştir. Sargı ve mıknatıs sıcaklıklarının nominal yükten maksimum yüke artışı sırasıyla %128 ve %117 olmuştur. Ayrıca, soğutma sıvısı akışının 5 L/dk'dan 20

L/dk'ya çıkarılması, sargı sıcaklığında %7.1'lik bir azalmaya neden olmuş ve sistemin akış hızına duyarlılığını göstermiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma EAR uygulamaları için bir EA-ÇS-SMd-SRM'nin kapsamlı tasarımını, geliştirilmesini ve doğrulanmasını sunmaktadır. Tasarım süreci, ilk çekiş ve sürüş döngüsü tabanlı güç tahmininden, ayrıntılı matematiksel modelleme, 2B ve 3B SEY tabanlı tasarım, çok amaçlı optimizasyon ve son olarak mekanik ve termal performans dahil olmak üzere çok fizikli değerlendirmeye kadar tüm geliştirme döngüsünü kapsamaktadır. Önerilen tasarım, performans ve verimlilik beklentilerini karşılamakla kalmaz, aynı zamanda EA motor üretimini basitleştiren üretilebilir bir rotor yapısı da sunmaktadır. Bu bulgular, EA-ÇS-SMd-SRM'nin yeni nesil EAR tahrik sistemleri için kompakt ve yüksek performanslı bir alternatif olarak uygulanabilirliğini desteklemektedir.

Gelecekte, geliştirilen EA-ÇS-SMd-SRM motorunun performansını daha da artırmak amacıyla, dinamik testler, gürültü ve titreşim analizleri, tork dalgalanması azaltma stratejileri ve EAR tahrik sistemlerine entegre edilebilecek kontrol odaklı modelleme çalışmaları yapılması planlanmaktadır. Bu doğrultuda, stator ve rotor geometrilerinde yapılacak optimizasyonlar ile vuru torku, THD ve tork dalgalanmalarının azaltılması hedeflenmektedir.

Bununla birlikte, dinamik yapısal ve termal analizler, farklı sürüş döngülerine bağlı senaryolar ile birleştirilerek, motorun yapısal ve termal dayanımının daha geniş kapsamlı olarak değerlendirilmesi sağlanabilir. Termal modelin geliştirilmesine yönelik olarak, soğutma sıvısının seçimi ve soğutma kanalları geometrisinin optimizasyonu, motor verimliliği ve güvenilirliği açısından önemli katkılar sunacaktır.

Ayrıca, EAR uygulamaları için araç prototipleme süreci, aktarma organları, bağlantı elemanları, motor sürücüsü, batarya sistemleri gibi kompakt tahrik bileşenlerinin seçimi ve sistem entegrasyonuna yönelik çalışmalarla desteklenmelidir. Bu kapsamda yapılacak sistem düzeyindeki tasarım ve entegrasyon çalışmaları, EA-ÇS-SMd-SRM modelinin gerçek araç uygulamalarındaki performans kriterlerini daha da genişletmesi ve geliştirmesi açısından önemli bir adım olacaktır.

KAYNAKLAR

- Adăscăliței, C., Marțiș, R. A., Karaisas, P., & Marțiș, C. S. (2024). In-Depth Exploration of Design and Analysis for PM-Assisted Synchronous Reluctance Machines: Implications for Light Electric Vehicles. *Machines*, 12(6), 361. <https://doi.org/10.3390/machines12060361>
- Adegbohun, F., Von Jouanne, A., Phillips, B., Agamloh, E., & Yokochi, A. (2021). High Performance Electric Vehicle Powertrain Modeling, Simulation and Validation. *Energies*, 14(5), 1493. <https://doi.org/10.3390/en14051493>
- Agamloh, E., Von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2020). An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles. *Machines*, 8(2), 20. <https://doi.org/10.3390/machines8020020>
- Aghazadeh, H., Afjei, E., & Siadatan, A. (2019). Sizing and detailed design procedure of external rotor synchronous reluctance machine. *IET Electric Power Applications*, 13(8), 1105-1113. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5802>
- Ajamloo, A. M., Ibrahim, M. N., & Sergeant, P. (2023). Design, Modelling and Optimization of a High Power Density Axial Flux SRM with Reduced Torque Ripple for Electric Vehicles. *Machines*, 11(7), 759. <https://doi.org/10.3390/machines11070759>
- Akar, M., Eker, M., Özsoy, M., & Gerçekçioğlu, H. S. (2022). Efficiency Analysis of Axial Flux SynRM in Variable Speed Applications. *Machines*, 10(10), 838. <https://doi.org/10.3390/machines10100838>
- Akıncı, R. (2020). *Elektrikli Araçlar için Eksenel Akılı Çift Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Üretimi* [Yüksek Lisans Tezi]. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Akiki, P., Hage-Hassan, M., Bensetti, M., Vannier, J.-C., Prieto, D., & McClelland, M. (2018). Axial Ferrite-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 583-589. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8507245>
- Al Halabi, M., & Al Tarabsheh, A. (2020). *Modelling of Electric Vehicles Using Matlab/Simulink*. 2020-01-5086. <https://doi.org/10.4271/2020-01-5086>

- Al-ani, M. (2021). Multi-physics design and analyses of dual rotor synchronous reluctance machine. *eTransportation*, 8, 100113. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2021.100113>
- Al-Ani, M., Paciura, K., McQueen, A., Walker, A., Vakil, G., Ramanathan, R., Zou, T., La Rocca, S., La Rocca, A., Gerada, D., & Gerada, C. (2019, Ekim). Multi-physics Design Optimisation of PM-assisted Synchronous Reluctance Motor for Traction Application. *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal. <https://doi.org/10.1109/iecon.2019.8926697>
- Al-ani, M., Walker, A., Vakil, G., Gerada, D., Gerada, C., & Paciura, K. (2023). Modifications to PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine to Achieve Rare-Earth Free Heavy-Duty Traction. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 11(2), 2029-2038. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2022.3203184>
- Amin, S., Khan, S., & Hussain Bukhari, S. S. (2019). A Comprehensive Review on Axial Flux Machines and Its Applications. *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICOMET.2019.8673422>
- Amirian, H. (2010). *Design of a Novel Rotary Compact Power Pack for the Series Hybrid Electric Vehicle*. [Degree of Doctor of Philosophy]. University of Bradford.
- André, M. (2004). The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *Science of The Total Environment*, 334-335, 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.04.070>
- Anonim. (2022, Mart 28). *FLUXE MOTOR - E-MOTORS*. <https://fluxemotor.com>. <https://fluxemotor.com/index.php/e-motors/>
- Anonim. (2024). *Global EV Outlook 2024, Moving towards increased affordability*. International Energy Agency.
- Anonim. (2025a). *Beyond Motors | Axial Flux Electric Motors Technology*. <https://www.beyondelectric.io/>. <https://www.beyondelectric.io/>
- Anonim. (2025b). *BROGEN Axial Flux Motor for Electric Vehicles | OEM / ODM Supplier*. Brogen EV Solution | Shanghai OE Industrial Co., Ltd.

- <https://brogenevsolution.com/axial-flux-motor-technology-for-electric-vehicles/>
- Anonim. (2025c). *EMRAX 208 (86kW | 150Nm)*. EMRAX. <https://emrax.com/e-motors/emrax-208/>
- Anonim. (2025d). *EVOLITO Axial Flux Motors | Electric Motors For Aerospace*. Evolito LTD. <https://evolito.aero/axial-flux-motors/>
- Anonim. (2025e). *ICD180K-PanGood Power*. <https://en.pan-good.com/>. <https://en.pan-good.com/products/ICD180K.shtml>
- Anonim. (2025f). *N42SH, Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets*. Arnold Magnetic Technologies Corp.
- Anonim. (2025g). *Phi-Power Motor Series*. Phi-Power AG. <https://www.phi-power.com/en/phi-power-motor-series-2/>
- Anonim. (2025h). *SEMOTOR Eksenel Alan Motorları/Ürünleri*. <https://www.semotor.cn>. <https://www.semotor.cn/product.html>
- Anonim. (2025i). *Turntide Axial Flux Motors Deliver High Torque*. <https://Turntide.Com>. <https://turntide.com/products/motors/>
- Anonim. (2025j). *YASA P400R & 750R | YASA Axial Flux Motors | YASA Ltd*. <https://Yasa.Com>. <https://yasa.com/yasa-p400-r/>
- Anonim. (2025k, Mayıs 25). *JFE Electrical Steel Sheet*. JFE Steel Corporation. <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/electrical/catalog/fl e-001.pdf>
- Avşar, Y. (2023). *Kayıslı Asansör Sistemleri için Tümlerik Mekanizmalı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Uygulaması* [Doktora Tezi]. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tokat.
- Aydin, M., Huang, S., & Lipo, T. A. (2010). *Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review* (Research Report 2004-10). University of Wisconsin-Madison College of Engineering.
- Bal, G. (2011). *Özel Elektrik Makinaları* (4. bs). Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Barkenbus, J. N. (2020). Prospects for Electric Vehicles. *Sustainability*, 12(14), 5813. <https://doi.org/10.3390/su12145813>
- Bayazıt, G. H. (2021). *Analysis and Fault Tolerant Control of a Five-Phase Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine* [Master of Science]. Middle East Technical University, Ankara.

- Beer, F. P. (2015). *Mechanics of Materials* (Seventh edition). McGraw-Hill Education, New York.
- Bekiroglu, E., & Esmer, S. (2023). Design and Double-Stage Optimization of Synchronous Reluctance Motor for Electric Vehicles. *Electric Power Components and Systems*, 51(20), 2557-2572. <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2240792>
- Bianchi, N. (2013). Synchronous Reluctance and Interior Permanent Magnet Motors. *2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 75-84. <https://doi.org/10.1109/WEMDCD.2013.6525167>
- Bin Tarek, M. T., & Sozer, Y. (2021). Axial Flux Interior Permanent Magnet Motor with a Novel Symmetric Flux Barrier. *2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ITEC51675.2021.9490065>
- Bitsi, K. (2022). *On Electrical Machine Topologies for Electric Vehicle Applications* [Doctoral Thesis]. KTH Vetenskap Och Konst, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Bitsi, K., Beniakar, M. E., Wallmark, O., & Bosga, S. G. (2020). Preliminary Electromagnetic Sizing of Axial-Flux Induction Machines. *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 284-290. <https://doi.org/10.1109/ICEM49940.2020.9270719>
- Boldea, I. (2020). *Induction Machines Handbook; Transients, Control Principles, Design and Testing*. CRC Press, Boca Raton.
- Bozkurt, A. (2021). *Elektrikli Araçlar için Dış Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Relüktans Motor (SMsSynRM) Tasarımı, Analizi ve Uygulaması* [Doktora Tezi]. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Boztaş, G. (2019). *Düşük Gerilim ile Beslenen Senkron Relüktans Motor ve Sürücü Tasarımı* [Doktora Tezi]. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Cao, W., Bukhari, A. A. S., & Aarniovuori, L. (2019). Review of Electrical Motor Drives for Electric Vehicle Applications. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 38(3), 525-540. <https://doi.org/10.22581/muet1982.1903.01>

- Cao, Z., Mahmoudi, A., Kahourzade, S., Soong, W. L., & Summers, J. R. (2020). A Comparative Study of Axial-Flux versus Radial-Flux Induction Machines. *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/PEDES49360.2020.9379868>
- Cavazzuti, M., Gaspari, G., Pasquale, S., & Stalio, E. (2019). Thermal Management of a Formula E Electric Motor: Analysis and Optimization. *Applied Thermal Engineering*, 157, 113733. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113733>
- Chenqi, T., Zhongjun, Y., Zhixin, L., Jia, F., & Juntan, Y. (2024). Research Status and Development Trends of Thermal Management Technologies for Motors. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 48(4), 2025-2057. <https://doi.org/10.1007/s40997-024-00755-0>
- Credo, A., Villani, M., Fabri, G., & Popescu, M. (2023). Adoption of the Synchronous Reluctance Motor in Electric Vehicles: A Focus on the Flux Weakening Capability. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 9(1), 805-818. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3204435>
- Çetin, E. (2018). *Eksenel Akıllı Sürekli Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor Tasarımı, Manyetik Analizi ve Prototip Üretimi* [Doktora Tezi]. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Çunkaş, M. (2004). *Elektrik Motorlarında Genetik Algoritma ile Tasarım Optimizasyonu* [Doktora Tezi]. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- De Gennaro, M., Jürgens, J., Zanon, A., Gragger, J., Schlemmer, E., Fricassè, A., Marengo, L., Ponick, B., Olabarri, E. T., Kinder, J., Cavallini, A., Mancinelli, P., Hernandez, M., & Messagie, M. (2019). Designing, prototyping and testing of a ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance machine for hybrid and electric vehicles applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 31, 86-101. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.12.002>
- De Santiago, J., Bernhoff, H., Ekergård, B., Eriksson, S., Ferhatovic, S., Waters, R., & Leijon, M. (2012). Electrical Motor Drivelines in Commercial All-

- Electric Vehicles: A Review. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(2), 475-484. <https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2177873>
- Deepak, K., Frikha, M. A., Benômar, Y., El Baghdadi, M., & Hegazy, O. (2023). In-Wheel Motor Drive Systems for Electric Vehicles: State of the Art, Challenges, and Future Trends. *Energies*, 16(7), 3121. <https://doi.org/10.3390/en16073121>
- Demir, U. (2018). *Elektrikli Araçlar için Doğrudan Tahrikli Radial Akı Asenkron Motor Tasarımı ve Uygulaması* [Doktora Tezi]. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Demir, U., & Aküner, M. C. (2018). Elektrikli bir araç için tekerlek içi asenkron motorun tasarım ve optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(4), 1517-1530. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416448>
- Dmitrievskii, V., Kazakbaev, V., & Prakht, V. (2023). Performance Comparison of Traction Synchronous Motors with Ferrite Magnets for a Subway Train: Reluctance versus Homopolar Variants. *Applied Sciences*, 13(17), 9988. <https://doi.org/10.3390/app13179988>
- Dmitrievskii, V., Prakht, V., Valeev, E., Paramonov, A., Kazakbaev, V., & Anuchin, A. (2023). Comparative Study of Induction and Wound Rotor Synchronous Motors for the Traction Drive of a Mining Dump Truck Operating in Wide Constant Power Speed Range. *IEEE Access*, 11, 68395-68409. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3292244>
- Dulanto, A. O. (2015). *Design of a Synchronous Reluctance Motor Assisted with Permanent Magnets for Pump Applications*. [Degree Project]. KTH Vetenskap Och Konst, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Edwards, R., Mahieu, V., Griesemann, J.-C., Larivé, J.-F., & Rickeard, D. J. (2004). *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*. 2004-01-1924. <https://doi.org/10.4271/2004-01-1924>
- Ehsani, M., Rahman, K. M., & Toliyat, H. A. (1997). Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 44(1), 19-27. <https://doi.org/10.1109/41.557495>

- Eker, M. (2017). *Şebeke Yol Vermeli Eksenel Akıllı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı* [Doktora Tezi]. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- Erce, H. (2023, Nisan 1). *Basın Bülteni*. Otomotiv Distribütörleri ve Mobilite Derneği (ODMD).
- Eser, E. (2024). *Eksenel Akıllı Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarımı ve Prototip Üretimi* [Doktora Tezi]. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Eser, E., & Üstkoyuncu, N. (2024). Effects of Permanent Magnets on Different Flux Barriers for the AF-SynRMs. *Electric Power Components and Systems*, 52(10), 1936-1945. <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2293951>
- European Commission. (1999). *Case No COMP/M.1406 – Hyundai / Kia* (M.1406). Directorate-General for Competition (DG COMP). https://ec.europa.eu/competition/mergers/cases/decisions/m1406_en.pdf
- Farrokh, F., Vahedi, A., Torkaman, H., & Banejad, M. (2023). Design and comparison of dual-stator axial-field flux-switching permanent magnet motors for electric vehicle application. *IET Electrical Systems in Transportation*, 13(2), e12074. <https://doi.org/10.1049/els2.12074>
- Gai, Y., Kimiabeigi, M., Chuan Chong, Y., Widmer, J. D., Deng, X., Popescu, M., Goss, J., Staton, D. A., & Steven, A. (2019). Cooling of Automotive Traction Motors: Schemes, Examples, and Computation Methods. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(3), 1681-1692. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2835397>
- Ge, S., Geng, W., & Li, Q. (2022). A New Flux-Concentrating Rotor of Double Stator and Single Rotor Axial Flux Permanent Magnet Motor for Electric Vehicle Traction Application. *2022 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/VPPC55846.2022.10003393>
- Gedera, I. H. (2019). *Design Optimization and Performance Improvement of Synchronous Reluctance Machines.pdf* [Master of Science]. University of Manitoba, Winnipeg.

- Geng, W., Hou, J., & Li, Q. (2022). Electromagnetic Analysis and Efficiency Improvement of Axial-Flux Permanent Magnet Motor With Yokeless Stator by Using Grain-Oriented Silicon Steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, 58(2), 1-5. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3081186>
- Geng, W., Wang, J., Fu, Y., Guo, J., & Li, W. (2024). Design and Performance Analysis of a Novel Axial-flux IPM Machine for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3486158>
- Geng, W., Wang, Y., Wang, J., Hou, J., Guo, J., & Zhang, Z. (2023). Comparative Study of Yokeless Stator Axial-Flux PM Machines Having Fractional Slot Concentrated and Integral Slot Distributed Windings for Electric Vehicle Traction Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(1), 155-166. <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3151963>
- Geng, W., Zhang, Y., Ge, S., Guo, J., Li, Q., & Zhang, Z. (2025). 3-D Thermal Network Modeling and Thermal Analysis of an Air-Cooled Yokeless Stator Axial Flux PM Motor With Heat Pipes. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 11(1), 961-971. <https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3395655>
- Geng, W., Zhu, T., Wang, Y., Li, L., & Guo, J. (2022). Electromagnetic-Thermal Coupling Optimization of Concentrated Winding PM Motor with Auxiliary Teeth for Electric Vehicle. *2022 Joint MMM-Intermag Conference (INTERMAG)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/INTERMAG39746.2022.9827870>
- Geng, W., Zhu, T., Zhang, Y., Wu, C., Wang, Y., Li, Q., & Zhang, Z. (2023). Rotor Air-Friction Loss and Thermal Analysis of IPM Rotors for High Speed Axial-Flux Machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(1), 779-788. <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3210896>
- Gerçekcioglu, H. S., & Akar, M. (2021). Optimal rotor design of novel axial flux synchronous reluctance motor and validation. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(5). <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12866>
- Gerçekcioglu, H. S. (2021). *Eksenel Akıllı Senkron Relüktans Motor Tasarımı, Prototip Üretimi ve Testleri* [Doktora Tezi]. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tokat.

- Gerçekcioğlu, H. S., & Akar, M. (2021). Efficiency and Performance Comparison Between Synchronous Reluctance and Induction Motor in Axial Flux Concept. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 9(2), 297-316. <https://doi.org/10.29109/gujsc.910521>
- Gieras, J. F., Wang, R.-J., & Kamper, M. J. (2004). *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. Kluwer Academic, New York.
- Gobbi, M., Sattar, A., Palazzetti, R., & Mastinu, G. (2024). Traction motors for electric vehicles: Maximization of mechanical efficiency – A review. *Applied Energy*, 357, 122496. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122496>
- Goli, C. S., Manjrekar, M., Essakiappan, S., Sahu, P., & Shah, N. (2021). Landscaping and Review of Traction Motors for Electric Vehicle Applications. *2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, 162-168. <https://doi.org/10.1109/ITEC51675.2021.9490129>
- Gözüağık, E., & Akar, M. (2023). Senkron Relüktans Motor Analitik Hesabı ve Tasarımı. *Gaziosmanpasa Journal of Scientific Research (GBAD)*, 12(1), 86-100.
- Gözüağık, E., & Akar, M. (2025). Multi-Physics and Multi-Objective Design of an Axial Flux Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor for Use in Electric Vehicles. *Machines*, 13(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/machines13070555>
- Gözüağık, E., Eker, M., & Akar, M. (2023). Multislice Analysis of Axial Flux Synchronous Reluctance Motor Based on 2d Finite Element Method Linear Model. *Journal of Magnetism*, 28(2), 219-226. <https://doi.org/10.4283/JMAG.2023.28.2.219>
- Grace, K., Galioto, S., Bodla, K., & El-Refaie, A. M. (2018). Design and Testing of a Carbon-Fiber-Wrapped Synchronous Reluctance Traction Motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(5), 4207-4217. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2836966>
- Gragger, J., Zanon, A., De Gennaro, M., Juergens, J., Fricassè, A., Marengo, L., Olavarria, I., & Kinder, J. (2016). *Design Features of an Innovative Synchronous Reluctance Machine for Battery Electric Vehicles Applications*. 2016-01-1235. <https://doi.org/10.4271/2016-01-1235>

- Gulbis, K., Brakanskis, U., Kamolins, E., Gorobecs, M., Potapovs, A., Sejejs, K., Zarembo, J., & Burenin, V. (2022). Analysis of Test Results of the Developed Synchronous Reluctance Motor for Public Transport Application. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 59(4), 36-52. <https://doi.org/10.2478/lpts-2022-0032>
- Gunnarson, A., & Johansson, L. (2022). *Synchronous Reluctance Motor and Drive System Design for Handheld Applications* [Master Thesis]. Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Güneri, S. (2015). *Kompresör Uygulaması için Sürekli Miknatıslı Senkron Motor Tasarımı* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Habib, A., Mohd Zainuri, M. A. A., Che, H. S., Ibrahim, A. A., Rahim, N. A., Alaas, Z. M., & Ahmed, M. M. R. (2022). A systematic review on current research and developments on coreless axial-flux permanent-magnet machines. *IET Electric Power Applications*, 16(10), 1095-1116. <https://doi.org/10.1049/elp2.12218>
- Hernandez, M., Messagie, M., Hegazy, O., Marengo, L., Winter, O., & Van Mierlo, J. (2017). Environmental impact of traction electric motors for electric vehicles applications. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(1), 54-65. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0973-9>
- Hesari, A., Darabi, A., & Pourmirzaei Deylami, F. (2024). Dual Independent Rotor Axial Flux Induction Motor for Electric Vehicle Applications. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2024(1), 5594289. <https://doi.org/10.1049/2024/5594289>
- Huang, R., Song, Z., Zhao, H., & Liu, C. (2022). Overview of Axial-Flux Machines and Modeling Methods. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(2), 2118-2132. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3144594>
- Hussain Bukhari, S. S., Yu, J., Shah, M. A., Bajaj, M., & Ro, J.-S. (2022). Brushless Wound Rotor Synchronous Machine Based on a Consequent-Pole Rotor Structure with Better Torque Attributes. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2022, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2022/6289596>

- Huynh, T.-A., Chen, P.-H., & Hsieh, M.-F. (2022). Analysis and Comparison of Operational Characteristics of Electric Vehicle Traction Units Combining Two Different Types of Motors. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(6), 5727-5742. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3179868>
- Ingemansson, A., & Kambrin, E. (2022). *Comparison of a highly sustainable PMSynRM with a traditional PMSM* [Master Thesis]. Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Islam, Z., Khan, F., Ullah, B., Milyani, A. H., & Ahmed Azhari, A. (2022). Design and Analysis of Three Phase Axial Flux Permanent Magnet Machine with Different PM Shapes for Electric Vehicles. *Energies*, 15(20), 7533. <https://doi.org/10.3390/en15207533>
- Jafferi, N., & Tokhi, M. O. (2009). Multi-Objective Genetic Algorithm Optimisation Approach for the Geometrical Design of an Active Noise Control Systems. *International Journal of Integrated Engineering, Issue on Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering*, 73-86.
- Jani, S. N., & Jamnani, J. G. (2023). A comparative study of electric motor for low-power density electric vehicles. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26320-x>
- Kang, S.-G., Kang, D. H., Kim, H.-W., Jung, S.-W., Lee, J. H., & Jung, S.-Y. (2024). Coupled Problem Study with Structural Analysis Considering Barrier Filling of PMSynRM for Railway Vehicle. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 19(8), 5135-5152. <https://doi.org/10.1007/s42835-024-01924-6>
- Katona, M., & Orosz, T. (2024). Circular Economy Aspects of Permanent Magnet Synchronous Reluctance Machine Design for Electric Vehicle Applications: A Review. *Energies*, 17(6), 1408. <https://doi.org/10.3390/en17061408>
- Kiyakli, A. O., & Solmaz, H. (2018). Modeling of an Electric Vehicle with MATLAB/Simulink. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 2(4), 9-15. <https://doi.org/10.30939/ijastech..475477>
- Knebl, L. (2021). *Design and Optimization of High-Torque Ferrite Assisted Synchronous Reluctance Motor* [Doctoral Thesis]. Brno University of Technology, Brno.

- Konda, Y. R., Ponnaganti, V. K., Reddy, P. V. S., Singh, R. R., Mercorelli, P., Gundabattini, E., & Solomon, D. G. (2024). Thermal Analysis and Cooling Strategies of High-Efficiency Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors—A Review. *Computation*, 12(1), 6. <https://doi.org/10.3390/computation12010006>
- Kumar, P., Ma, Q., Al-Qarni, A., Chowdhury, T., & El-Refaie, A. (2022). Design Optimization and Comparison of PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine using Different Magnet Combinations. *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/ECCE50734.2022.9947844>
- Kumar, P., Wilson, R., & EL-Refaie, A. (2024). Electromagnetic Design Optimization Integrated with Mechanical Stress Analysis of PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine Topologies Enabled with a Blend of Magnets. *Energies*, 17(8), 1873. <https://doi.org/10.3390/en17081873>
- Kumar, R. M. R., Fernandes, B. G., Zou, T., Rocca, A. L., Vakil, G., Gerada, D., Walker, A., Gerada, C., Paciura, K., & McQueen, A. (2019). High Power High Speed PM-Assisted SynRel Machines with Ferrite and Rare Earth Magnets for Future Electric Commercial Vehicles. *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1083-1088. <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927523>
- Kwon, M.-S., & Lim, D.-K. (2023). A Study on the Optimal Design of PMA-SynRM for Electric Vehicles Combining Random Forest and Genetic Algorithm. *IEEE Access*, 11, 52357-52369. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279126>
- Laitinen, H., Lajunen, A., & Tammi, K. (2017). Improving Electric Vehicle Energy Efficiency with Two-Speed Gearbox. *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2017.8330889>
- Lan, B. (2018). *Design Simulation and Experiments on Electrical Machines for Integrated Starter- Generator Applications* [Doctoral Thesis]. The University of Sheffield, Sheffield.
- Larminie, J., & Lowry, J. (2012). *Electric Vehicle Technology Explained* (2nd ed). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118361146>

- Li, R. (2022). *Design and Optimise Synchronous Reluctance Machines in Sensorless Control* [The University of New South Wales]. <https://doi.org/10.26190/UNSWORKS/24488>
- Li, X., Sun, Z., Sun, W., Guo, L., & Wang, H. (2023). Design of Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor with Low Torque Ripple. *World Electric Vehicle Journal*, 14(4), 82. <https://doi.org/10.3390/wevj14040082>
- Li, Y., Yang, H., Lin, H., Fang, S., & Wang, W. (2019). A Novel Magnet-Axis-Shifted Hybrid Permanent Magnet Machine for Electric Vehicle Applications. *Energies*, 12(4), 641. <https://doi.org/10.3390/en12040641>
- Madhavan, S., P B, R. D., Gundabattini, E., & Mystkowski, A. (2022). Thermal Analysis and Heat Management Strategies for an Induction Motor, a Review. *Energies*, 15(21), 8127. <https://doi.org/10.3390/en15218127>
- Madichetty, S., Mishra, S., & Basu, M. (2021). New trends in electric motors and selection for electric vehicle propulsion systems. *IET Electrical Systems in Transportation*, 11(3), 186-199. <https://doi.org/10.1049/els2.12018>
- Mahmoudi, A., Kahourzade, S., Roshandel, E., & Soong, W. L. (2020). Axial-Flux Synchronous Reluctance Motors: Introduction of a New Machine. *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/PEDES49360.2020.9379345>
- Malloy, A. (2014). *Thermal Management of the Permanent Magnets in a Totally Enclosed Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine* [Doctor of Philosophy Thesis]. Imperial College London, Department of Mechanical Engineering, London.
- Megson, T. H. G. (2005). *Structural and Stress Analysis* (2nd ed). Elsevier Butterworth Heineman, Amsterdam Boston.
- Mısır, O., & Akar, M. (2022). Efficiency and Core Loss Map Estimation with Machine Learning Based Multivariate Polynomial Regression Model. *Mathematics*, 10(19), 3691. <https://doi.org/10.3390/math10193691>
- Moghaddam, R. R. (2007). *Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design* [Master Thesis]. KTH Vetenskap Och Konst, Royal Institute of Technology, Stockholm.

- Moghaddam, R. R. (2011). *Synchronous Reluctance Machine (SynRM) in Variable Speed Drives (VSD) Applications* [Doctoral Thesis]. Royal Institute of Technology, KTH School of Electrical Engineering, Stockholm.
- Mohammadi, A., Chulaee, Y., Cramer, A. M., Boldea, I., & Ionel, D. M. (2023). Axial Flux Permanent Magnet Vernier Machine with Single-wound Dual-stator and Spoke Permanent Magnet Rotor for Electric Vehicle In-wheel Traction. *2023 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ITEC55900.2023.10187109>
- Mohammadi, M. H. (2015). *Rotor Design Optimization of Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Machines for Traction Applications* [Master of Engineering thesis]. McGill University, Motreal Quebec.
- Mohanarajah, T. (2019). *Analysis, Design Optimisation and Experimental Performance of Synchronous Reluctance and Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines* [Doctor of Philosophy]. Western Sydney University, Sydney.
- Mohanraj, D., Gopalakrishnan, J., Chokkalingam, B., & Mihet-Popa, L. (2022). Critical Aspects of Electric Motor Drive Controllers and Mitigation of Torque Ripple—Review. *IEEE Access*, 10, 73635-73674. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3187515>
- Mushid, F. C., & Dorrell, D. G. (2017). Review of axial flux induction motor for automotive applications. *2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 146-151. <https://doi.org/10.1109/WEMDCD.2017.7947738>
- Mutlu, Y. (2011). *Elektrikli Araç Motorunun Soğutma Sistem Tasarımı* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Neelima, P., Manjeera, M. C., & Babu, M. V. R. (2014). Modelling of Axial Flux Induction Machines and it Application as Differential in Electrical Vehicles. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, 1(12).
- Niazi, P. (2005). *Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Design and Performance Improvement* [Doctor of Philosophy Thesis]. Texas A&M University, Texas.

- Nishanth, F., Van Verdeghe, J., & Severson, E. L. (2023). A Review of Axial Flux Permanent Magnet Machine Technology. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(4), 3920-3933. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3258933>
- Nour, M., Chaves-Ávila, J. P., Magdy, G., & Sánchez-Miralles, Á. (2020). Review of Positive and Negative Impacts of Electric Vehicles Charging on Electric Power Systems. *Energies*, 13(18), 4675. <https://doi.org/10.3390/en13184675>
- Nyitrai, A., & Kuczmann, M. (2023). Magnetic equivalent circuit and finite element modelling of anisotropic rotor axial flux permanent magnet synchronous motors with fractional slot distributed winding. *IET Electric Power Applications*, 17(5), 709-720. <https://doi.org/10.1049/elp2.12298>
- Öner, Y., Ersöz, M., & Bingöl, O. (2016). Akı Bariyerli TLA Tipi Senkron Relüktans Motor Tasarımı ve Optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(4). <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.278449>
- Özçelik, N. G. (2016). *IE4 Verim Sınıfı Senkron Relüktans Motor Tasarımı* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özsoy, M. (2023). *Elektrikli Araçlar için Eksenel Akı Asenkron Motor Tasarımı, Mekanik ve Isıl Analizi* [Doktora Tezi]. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Özsoy, M., Kaplan, O., & Akar, M. (2022). The effect of stator slot number and pole number on motor performance in double-sided axial flux induction motors for electric vehicles. *Electrical Engineering*, 104(6), 4289-4304. <https://doi.org/10.1007/s00202-022-01623-3>
- Özsoy, M., Kaplan, O., & Akar, M. (2023). Implementation of Different 2D Finite Element Modeling Approaches in Axial Flux Induction Motors. *Electric Power Components and Systems*, 51(19), 2385-2396. <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2240806>
- Özsoy, M., Kaplan, O., & Akar, M. (2024). FEM-based analysis of rotor cage material and slot geometry on double air gap axial flux induction motors. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(2), 102393. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102393>

- Payza, Ö. F. (2018). *Çamaşır Makinesi Uygulaması için Konsantre Sargılı Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarımı, Üretimi ve Doğrulaması* [Yüksek Lisans Tezi]. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Polikarpova, M. (2014). *Liquid Cooling Solutions for Rotating Permanent Magnet Synchronous Machines* [Doctor of Science (Technology) Thesis]. Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta.
- Ponomarev, P. (2013). *Tooth-Coil Permanent Magnet Synchronous Machine Design for Special Applications* [Doctor of Science (Technology) Thesis]. Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta.
- Pop, A.-C., Pop Piglesan, F., Martis, R., Vintiloiu, I., & Martis, C. (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. <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591235>
- Prongué, L., Broch, N., & Wellerdieck, T. (2020). Induction motor design tool for drivetrain applications. *Rethinking Transport*. Proceedings of 8th Transport Research Arena TRA 2020, Helsinki, Finland.
- Pyrhönen, J., Jokinen, T., & Hrabovcová, V. (2013). Properties of Rotating Electrical Machines. İçinde *Design of Rotating Electrical Machines* (ss. 331-494). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118701591.ch7>
- Rind, S. J., Jamil, M., & Amjad, A. (2018). Electric Motors and Speed Sensorless Control for Electric and Hybrid Electric Vehicles: A Review. *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2018.8541871>
- Rivière, N., & Popescu, M. (2021). Multi-Physics Optimisation of a High Speed Copper Rotor Induction Motor for a Traction Application Using a Metamodel Based Approach. *IET Conference Proceedings*, 2020(7), 461-466. <https://doi.org/10.1049/icp.2021.1121>
- Rodrigues Bruzinga, G., Filho, A. J. S., & Pelizari, A. (2022). Analysis and Design of 3 kW Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Car.

- IEEE Latin America Transactions*, 20(5), 855-863.
<https://doi.org/10.1109/TLA.2022.9693571>
- Rosca, A. (2013). *Light Duty Vehicle Test Cycle Generation Based on Real-World Data* [Master of Science Degree]. Tecnico Lisboa University, Lisbon.
- Rosu, M., Zhou, P., Lin, D., Ionel, D., Popescu, M., Blaabjerg, F., Rallabandi, V., & Staton, D. (2018). *Multiphysics Simulation by Design for Electrical Machines, Power Electronics, and Drives* (1. bs). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781119103462>
- Roy, R., Ramasami, S., & Chokkalingam, L. N. (2023). Review on Thermal Behavior and Cooling Aspects of Axial Flux Permanent Magnet Motors—A Mechanical Approach. *IEEE Access*, 11, 6822-6836.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3235782>
- S, S. R., Venugopal, P., V, R., Haes Alhelou, H., Al-Hinai, A., & Siano, P. (2022). Analysis of Electric Vehicles with an Economic Perspective for the Future Electric Market. *Future Internet*, 14(6), 172.
<https://doi.org/10.3390/fi14060172>
- Sahin, F. (Funda). (2001). *Design and development of a high-speed axial-flux permanent-magnet machine*. Technische Universiteit Eindhoven.
<https://doi.org/10.6100/IR544267>
- Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*, 4(1), 372-404. <https://doi.org/10.3390/smartcities4010022>
- Serttaş, T. N. (2019). *Parameter Optimization of Electric Vehicles According to Driving Behavior* [Doctor of Philosophy Thesis]. Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, Eskişehir.
- Shao, L., Karci, A. E. H., Tavernini, D., Sornioti, A., & Cheng, M. (2020). Design Approaches and Control Strategies for Energy-Efficient Electric Machines for Electric Vehicles—A Review. *IEEE Access*, 8, 116900-116913.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993235>
- Shao, L., Navaratne, R., Popescu, M., & Liu, G. (2021). Design and Construction of Axial-Flux Permanent Magnet Motors for Electric Propulsion Applications—A Review. *IEEE Access*, 9, 158998-159017.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3131000>

- Shao, L., Tavernini, D., Hartavi Karci, A. E., & Sorniotti, A. (2023). Design and optimisation of energy-efficient PM-assisted synchronous reluctance machines for electric vehicles. *IET Electric Power Applications*, 17(6), 788-801. <https://doi.org/10.1049/elp2.12303>
- Song, T., Liu, H., Zhang, Q., & Zhang, Z. (2020). Multi-physics and multi-objective optimisation design of interior permanent magnet synchronous motor for electric vehicles. *IET Electric Power Applications*, 14(11), 2243-2254. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2020.0136>
- Song, T., Zhang, Z., Liu, H., & Hu, W. (2019). Multi-objective optimisation design and performance comparison of permanent magnet synchronous motor for EVs based on FEA. *IET Electric Power Applications*, 13(8), 1157-1166. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0069>
- Srikhumphun, P., Seangwong, P., Jongudomkarn, J., Siritaratiwat, A., Fernando, N., Somkun, S., & Khunkitti, P. (2024). Design Optimization and Comparative Study of Skewed Halbach-Array Magnets TORUS Axial-Flux Permanent Magnet Motors for Electric Vehicles. *IEEE Access*, 12, 99912-99920. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3429552>
- Sun, Y., Zhang, S., Chen, G., Tang, Y., & Liang, F. (2020). Experimental and numerical investigation on a novel heat pipe based cooling strategy for permanent magnet synchronous motors. *Applied Thermal Engineering*, 170, 114970. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114970>
- Taghavi, S. (2015). *Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications* [Degree of Doctor of Philosophy (Electrical and Computer Engineering)]. Concordia University, Montreal Quebec.
- Tap, A. (2017). *Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarımı* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tarek, M. T. B., & Sozer, Y. (2020). Design Optimization of a Novel Axial Flux Ferrite Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor. *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 1392-1398. <https://doi.org/10.1109/ECCE44975.2020.9235819>
- Trancho, E., Ibarra, E., Arias, A., Kortabarria, I., Jurgens, J., Marengo, L., Fricasse, A., & Gragger, J. V. (2018). PM-Assisted Synchronous Reluctance

- Machine Flux Weakening Control for EV and HEV Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(4), 2986-2995. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2748047>
- United Nations Economic Commission for Europe. (2017). *Consolidated resolution on the construction of vehicles (R.E.3) – Revision 6* (ECE/TRANS/WP.29/78/Rev.6; Consolidated Resolution on the Construction of Vehicles). UNECE. <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29resolutions/ECE-TRANS-WP.29-78r6e.pdf>
- Urazel, B., & Keskin, K. (2020). Electric Drive Vehicle Model and Simulation with MATLAB. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(4), 2461-2473. <https://doi.org/10.21597/jist.705205>
- Varga, B. O., Sagoian, A., & Mariasiu, F. (2019). Prediction of Electric Vehicle Range: A Comprehensive Review of Current Issues and Challenges. *Energies*, 12(5), 946. <https://doi.org/10.3390/en12050946>
- Vartanian, R. (2014). *Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine (Pma-Synrm) Design and Performance Analysis for Fan and Pump Applications* [Doctor of Philosophy Thesis]. Texas A&M University, Texas.
- Walker, A., Galea, M., Gerada, D., Gerada, C., Mebarki, A., & Brown, N. (2016). Development and design of a high performance traction machine for the FreedomCar 2020 traction machine targets. *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 1611-1617. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2016.7732739>
- Wang, H., Pei, X., Yin, B., Eastham, J. F., Vagg, C., & Zeng, X. (2022). A Novel Double-Sided Offset Stator Axial-Flux Permanent Magnet Motor for Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 13(3), 52. <https://doi.org/10.3390/wevj13030052>
- Wang, J., Geng, W., Li, Q., Li, L., & Zhang, Z. (2022). A New Flux-Concentrating Rotor of Permanent Magnet Motor for Electric Vehicle Application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(11), 10882-10892. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3116558>

- Wang, Y., Zhu, T., Geng, W., Guo, J., & Sun, Y. (2024). Cooling System Analysis of an Enclosed Yokeless Stator for High-Power Axial Flux PM Motor With Distributed Winding. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(3), 2789-2799. <https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3270540>
- Weiwei, G., Zhuoran, Z., & Qiang, L. (2020). High Torque Density Fractional-Slot Concentrated-Winding Axial-Flux Permanent-Magnet Machine with Modular SMC Stator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2992576>
- Wi, C.-H., Kim, J.-Y., Choi, J.-W., Yeo, H.-K., & Lim, D.-K. (2023). Optimal Design of PMa-SynRM for Electric Vehicles Using Grain-Oriented Electrical Steel and Surrogate Model Based on Stacking Ensemble. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 18(2), 991-1001. <https://doi.org/10.1007/s42835-022-01362-2>
- Xing, F., Zhang, J., Zhang, M., & Qin, C. (2024). Design and Multi-Objective Optimization of an Asymmetric-Rotor Permanent-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor for Improved Torque Performance. *Applied Sciences*, 14(15), 6734. <https://doi.org/10.3390/app14156734>
- Xue, X. D., Cheng, K. W. E., & Cheung, N. C. (2008). *Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicles*. 1-6.
- Yang, S.-H., Pyo, H.-J., Jung, D.-H., & Kim, W.-H. (2023). A Study on Optimal Design Process of Dual Rotor Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Motors. *Machines*, 11(4), 445. <https://doi.org/10.3390/machines11040445>
- Yang, Y., Bilgin, B., Kasprzak, M., Nalakath, S., Sadek, H., Preindl, M., Cotton, J., Schofield, N., & Emadi, A. (2017). Thermal management of electric machines. *IET Electrical Systems in Transportation*, 7(2), 104-116. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2015.0050>
- Yıldırım, M. (2022). *Elektrikli Araçlarda Güvenlik Önlemleri* [Doktora Tezi]. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Yilmaz, M. (2015). Limitations/capabilities of electric machine technologies and modeling approaches for electric motor design and analysis in plug-in electric vehicle applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 80-99. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.033>

- Yu, X., Wang, Q., Fu, Y., Chen, H., Zhang, J., & Geng, W. (2024). Vibration Performance Analysis of a Yokeless Stator Axial Flux PM Motor with Distributed Winding for Electric Vehicle Application. *World Electric Vehicle Journal*, 15(8), 335. <https://doi.org/10.3390/wevj15080335>
- Zeraoulia, M., Benbouzid, M. E. H., & Diallo, D. (2006). Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 55(6), 1756-1764. <https://doi.org/10.1109/TVT.2006.878719>
- Zhang, Y., Geng, W., & Li, Q. (2022). Thermal Design of Air-Cooled YASA AFPM Motor with Heat Pipes. *2022 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ITECAsia-Pacific56316.2022.9942017>
- Zhao, A., Chen, H., Boßer, C., & Leksell, M. (2024). FEM and CFD thermal modeling of an axial-flux induction machine with experimental validation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 53, 103879. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103879>
- Zhao, J., Han, Q., Dai, Y., & Hua, M. (2019). Study on the Electromagnetic Design and Analysis of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motors for Electric Vehicles. *Energies*, 12(18), 3451. <https://doi.org/10.3390/en12183451>
- Zhao, J., Liu, X., Wang, S., & Zheng, L. (2023). Review of Design and Control Optimization of Axial Flux PMSM in Renewable-energy Applications. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 36(1), 45. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00868-8>
- Zheng, S., Zhu, X., Xiang, Z., Xu, L., Zhang, L., & Lee, C. H. T. (2022). Technology trends, challenges, and opportunities of reduced-rare-earth PM motor for modern electric vehicles. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 1(1), 100012. <https://doi.org/10.1016/j.geits.2022.100012>
- Zou, T., Gerada, D., Rocca, S. L., Rocca, A. L., Walker, A., Vakil, G., Arevalo, S. L., Xu, Z., Cui, M., Bardalai, A., Wang, M., Kumar, R. M. R., Marfoli, A., Paciura, K., Barden, R., Ernest, E., Zhu, S., Qayyum, N., McQueen, A., ... Gerada, C. (2023). Airgap Length Analysis of a 350 kw PM-Assisted Syn-

Rel Machine for Heavy Duty EV Traction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(2), 1557-1570. <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3225255>

Zöhra, B. (2019). *Şebeke Kalkışlı Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Prototip Üretimi* [Doktora Tezi]. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.



ÖZGEÇMİŞ

Adı	
Soyadı	
Kişisel Bilgiler	
İletişim Bilgileri	
Öğrenim Bilgileri	Mekatronik Mühendisliği Bölümü Mühendislik Fakültesi Tarih: 2019 Gözetim: Doç. Dr. Mustafa Kemal Bilimsel Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği
İş Deneyimi	2017-halihazırda Okan Ziosunlu Şişa Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tarih: 2021 Gözetim: Doç. Dr. Mustafa Kemal
Bildiriler	

Yayınlar

--

