



**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN SÜREKLİ MIKNATIS DESTEKLİ
SENKRON RELÜKTANS MOTORUN TASARIMI, OPTİMİZASYONU VE
UYGULAMASI**

Burak YENİPİNAR

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Burak YENİPİNAR

18/10/2024

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN SÜREKLİ MİKNATIS DESTEKLİ SENKRON RELÜKTANS MOTORUN TASARIMI, OPTİMİZASYONU VE UYGULAMASI

(Doktora Tezi)

Burak YENİPİNAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2024

ÖZET

Bu tez çalışmasında, elektrikli araçlarda kullanılmak üzere optimize edilmiş dış rotorlu 8 kutuplu yeni bir mıknatıs destekli senkron relüktans motor (MD-SRM) tasarlanmış, prototip üretimi ve performans testleri yapılmıştır. Tez çalışmasında öncelikle optimizasyon algoritması ve amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Elektrik motorlarının tasarım optimizasyon sürecinde yaygın olarak kullanılan NSGA-II algoritması kullanılmıştır. Ayrıca amaç fonksiyonu belirlenirken elektrikli araçlarda kullanılan tahrik motor performans parametreleri dikkate alınmıştır. Bu kapsamda yüksek verimlilik, düşük ve yüksek hızda yüksek moment üretimi, mıknatıs tüketimi ve moment dalgalanmasını minimize etmeyi amaçlayan beş adet amaç fonksiyonu birlikte kullanılmıştır. Üç farklı mıknatıs yerleşim geometrisine sahip dış rotorlu MD-SRM modeli oluşturulmuş ve optimize edilmiştir. Optimizasyon çalışmasında her bir iterasyonda motora ait verimlilik haritası oluşturulmuştur. Tasarım optimizasyon çalışmaları sonlu eleman analizi yöntemini kullanan (SEA) JMAG Designer 22.1 programı ile gerçekleştirilmiştir. Tasarım optimizasyon çalışmaları sonucunda üç farklı geometride isterleri karşılayan üç adet optimum aday tasarım elde edilmiştir. Optimizasyon çalışması sonrasında elde edilen optimum 3 aday geometriye ait relüktans moment üretim kabiliyeti, demagnetizasyon analizleri, sürüş saykıl performansı, sabit güç ve moment bölgelerinin incelenmesini içeren detay analizler karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda optimum tasarımın prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. Prototip imalat sonrası gerçekleştirilen MD-SRM'nin titreşim, farklı hız, yük ve yük açılarındaki performans testi, amper başına maksimum moment üretme testi, sıcaklık artış testi gerçekleştirilerek simülasyon sonuçları ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Bilim Kodu : 93413
Anahtar Kelimeler : MD-SRM, elektrikli araç motoru, dış rotorlu elektrik motoru
Sayfa Adedi : 143
Danışman : Doç. Dr. Ali SAYGIN
İkinci Danışman : Prof. Dr. Yusuf SÖNMEZ

DESIGN, OPTIMIZATION AND IMPLEMENTATION OF PERMANENT MAGNET
ASSISTED SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTORS FOR ELECTRIC VEHICLES

(Ph. D. Thesis)

Burak YENİPINAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2024

ABSTRACT

In this thesis, a novel 8-pole outer rotor magnet-assisted synchronous reluctance motor (PMaSynRM), optimized for use in electric vehicles, has been designed, and the prototype production along with performance tests have been carried out. In the thesis study, the optimization algorithm and the objective function were determined first. The Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II), which is widely used in the design optimization process of electric motors, was utilized. Additionally, while determining the objective function, the performance parameters of traction motors used in electric vehicles were taken into consideration. In this context, five objective functions aimed at maximizing efficiency, producing high torque at both low and high speeds, minimizing magnet consumption, and reducing torque ripple were utilized together. A model of the outer rotor PMaSynRM with three different magnet placement geometries has been developed and optimized. In the optimization study, an efficiency map for the motor was created at each iteration. The design optimization studies were carried out using the JMAG Designer 22.1 software, which employs the Finite Element Analysis (FEA) method. As a result of the design optimization studies, three optimal candidate designs that meet the requirements have been obtained in three different geometries. The detailed analyses conducted after the optimization study, which include the reluctance torque production capability, demagnetization analyses, drive cycle performance, and examination of constant power and torque regions for the three optimal candidate geometries obtained, have been compared. As a result of the comparisons made, the prototype manufacturing of the optimal design has been carried out. After the prototype manufacturing, performance tests of the PMaSynRM under vibration, different speeds, loads, and load angles, as well as maximum torque production per ampere tests and temperature rise tests, have been conducted and presented in comparison with simulation results.

Science Code : 93413
Key Words : PMaSynRM, electric vehicle motor, external rotor electric motor
Page Number : 143
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Ali SAYGIN
Co-Supervisor : Prof. Dr. Yusuf SÖNMEZ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım Doç. Dr. Ali SAYGIN'a, ikinci danışmanım Prof. Dr. Yusuf SÖNMEZ'e, tez izleme komitesi üyelerim Prof. Dr. Cemal YILMAZ'a ve Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ'e teşekkür ederim.

Çalışmanın içerik ve kapsamının şekillenmesinde kıymetli görüş ve katkılarını esirgemeyen Doç. Dr. Cemil OCAK'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım ve imalat sürecinde desteklerini esirgemeyen Engin BAHAR'a, Dr. Muhammed Ali OKKA'ya, Yakup ÜLKER'e ve laboratuvar imkanları için Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği yönetici ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarına proje katkılarıyla maddi olarak destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığına (FDK-2022-7686 nolu proje) teşekkür ederim.

Son olarak, bu tez çalışması süresince çalışmalarımda bana gösterdiği anlayışı, sabrı ve manevi desteği için canım eşim Özlem YENİPİNAR'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu doktora tezi, canım oğlum Aybars YENİPİNAR'a ithaf olunur.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR TEKNOLOJİLERİ.....	11
2.1. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Tahrik Motorları	11
2.2. YY-SMSM ve GT-SMSM	13
2.3. İç Rotorlu ve Dış Rotorlu SMSM	15
2.4. Sargı Konfigürasyonu	16
2.5. Matematiksel Model.....	18
2.6. Referans Düzlem Dönüşümleri	19
2.6.1. Clarke dönüşümü	20
2.6.2. Ters clarke dönüşümü.....	21
2.6.3. Park dönüşümü	21
2.7. Moment Üretimi.....	22
2.8. Kontrol Yöntemleri	24
2.8.1. Skaler kontrol	24
2.8.2. Vektörel kontrol.....	26
2.9. Kontrol Stratejileri	29

	Sayfa
2.9.1 Amper başına maksimum tork (MTPA)	29
2.9.2. Id=0	30
2.9.3. Alan zayıflatma.....	30
2.10. Demagnetizasyon	31
3. OPTİMİZASYON ALGORİTMASI VE AMAÇ FONKSİYONUNUN BELİRLENMESİ	33
3.1. Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması II (NSGA-II).....	34
3.2. Amaç Fonksiyonunun Belirlenmesi.....	35
3.2.1. Amaç fonksiyonu-1	38
3.2.2. Amaç fonksiyonu-2	39
3.2.3. Amaç fonksiyonu-3	42
3.2.4. Amaç fonksiyonu-4	44
3.2.5. Amaç fonksiyonu-5	45
3.3. Sonuçların Değerlendirilmesi.....	47
4. TASARIM OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI.....	51
4.1. V-Tipi Rotor Tasarım Optimizasyon Çalışması	52
4.2. 2V-Tipi Rotor Tasarım Optimizasyon Çalışması	56
4.3. 3 Kat Rotor Tasarım Optimizasyon Çalışması.....	60
5. DETAY ELEKTROMANYETİK ANALİZLER	65
5.1. Moment Karakteristiği	65
5.2. Verimlilik Haritalarının Karşılaştırması	68
5.3. Moment-Güç-Hız Performans Karşılaştırması	72
5.4. Manyetik Analizler.....	73
5.5. Demagnetizasyon Riski Analizi	76
5.6. Sürüş Saykılı Performans Analizleri	77
5.7. Sonuçların Yorumlanması.....	80

	Sayfa
6. MEKANİK TASARIM VE PROTOTİP ÜRETİM.....	81
6.1. Rotor ve stator nüvesinin üretilmesi	84
6.2. Sıkıştırma ve Paketleme	86
6.3. Bobinaj İşlemi	90
6.4. Mıknatıs tasarımı ve tedariki.....	91
6.5. Gövde, kapak ve milin işlenmesi	91
6.6. Montaj Faaliyetleri	97
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	105
7.1. İzolasyon Direnci Ölçüm Testi	107
7.2. Sargı Direnci Ölçüm Testi	108
7.3. Endüktans Ölçümü	109
7.4. ZIT EMK Testi.....	111
7.5. Titreşim Testi	113
7.6. Tasarım Doğrulama Testleri	114
7.7. Farklı Yük Açılarında Performans Karşılaştırma	116
7.8. Maksimum Moment Testi.....	123
7.9. Sıcaklık Artış Testi.....	124
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	129
KAYNAKLAR	133
ÖZGEÇMİŞ	143

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik motorları	11
Çizelge 2.2. DTC seçim tablosu	28
Çizelge 3.1. Motora ait temel parametreler	37
Çizelge 3.2. Örnek V tipi motor tasarım parametreleri değer aralığı	37
Çizelge 3.1. Amaç fonksiyonlarının motor performansına etkisi	48
Çizelge 4.1. Optimum tasarım seçim kriterleri	51
Çizelge 4.2. V Tipi tasarım parametreleri değer aralığı.....	53
Çizelge 4.3. V Tipi optimum aday çözümler	55
Çizelge 4.4. V Tipi pareto optimum sonuçların karşılaştırılması	56
Çizelge 4.5. 2V Tipi tasarım parametreleri değer aralığı.....	58
Çizelge 4.6. 2V Tipi optimum aday çözümler	59
Çizelge 4.7. 2V Tipi pareto optimum sonuçların karşılaştırılması	60
Çizelge 4.8. 3 Katlı tasarım parametreleri değer aralığı	62
Çizelge 4.9. 3 Katlı rotor pareto optimum sonuçların karşılaştırılması	63
Çizelge 4.10. 3 Katlı rotor için pareto optimum sonuçların karşılaştırılması	64
Çizelge 5.1. Optimum tasarımların karşılaştırılması	65
Çizelge 5.2. Citroën Ami araç özellikleri	78
Çizelge 7.1. Faz sargı direnç değerleri.....	109
Çizelge 7.2. MD-SRM Titreşim testi düzeneği	114
Çizelge 7.3. ZAPI BLE3 bazı parametreleri	115
Çizelge 7.4. 600 d/dk hızda performans test sonuçları	121
Çizelge 7.5. 1000 d/dk hızda performans test sonuçları	121
Çizelge 7.6. 1400 d/dk hızda performans test sonuçları	121
Çizelge 7.7. Yüksek hız bölgesinde performans test sonuçları	122
Çizelge 7.8. Yüzde akımlarda MTPA değerleri.....	123

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.9. Isı testi sonrası sargı direncinin zamanla değişimi	125
Çizelge 7.10. Isı testi sonrası motor performans parametreleri	127

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Tahrik uygulamalarında elektrik motor tiplerinin karşılaştırılması.....	5
Şekil 2.1. Elektrikli araçlarda kullanılan rotor geometrileri, (a) Jaguar I-Pace, (b) Nissan Leaf, (c) Tesla Model 3, (d) BMW 225xe, (e) Chevy Bolt, (f) Audi A3 e-tron, (g) BMW i3, (h) Chevy Volt.....	13
Şekil 2.2. YY-SMSM ve GT-SMSM'nin geometrik gösterimi.....	14
Şekil 2.3. YY-SMSM'lerde kullanılan koruma bileziği	14
Şekil 2.4. YY-SMSM ve GT-SMSM'nin performans karşılaştırması	15
Şekil 2.5. İç ve dış rotorlu motorların gösterimi.....	16
Şekil 2.6. Bobin yerleşimi, (a) toplu sargı, (b) dağıtılmış sargı.....	17
Şekil 2.7. Dağıtılmış sargı ve toplu sargının bobin başlarının gösterimi.....	17
Şekil 2.8. d ve q eksenlerinin gösterimi, (a) SRM, (b) MD-SRM.....	18
Şekil 2.9. MD-SRM eşdeğer devresi, (a) –d eksen, (b) –q eksen.....	19
Şekil 2.10. Referans düzlemler arası ilişkinin gösterimi	20
Şekil 2.11. Clarke dönüşümü	20
Şekil 2.12. Ters Clarke dönüşümü.....	21
Şekil 2.13. Park dönüşümü	22
Şekil 2.14. Ters Park dönüşümü	22
Şekil 2.15. Senkron makinelerin moment üretme kabiliyetlerine göre sınıflandırılması.....	23
Şekil 2.16. SMSM'lerde kullanılan kontrol teknikleri.....	24
Şekil 2.17. V/f kontrol blok diyagramı	25
Şekil 2.18. DTC blok diyagramı	27
Şekil 2.19. Seçilen gerilim vektörünün, stator akısı modülü ve tork üzerindeki etkisi ..	27
Şekil 2.20. FOC blok diyagramı	29
Şekil 2.21. MTPA gösterimi	30
Şekil 2.22. Sabit moment ve güç bölgelerinin gösterimi	31

Şekil	Sayfa
Şekil 2.23. N30SH mıknatısa ait B-H Eğrisi	32
Şekil 3.1. Lokal ve global optimum noktaların gösterimi	33
Şekil 3.2. NSGA II akış şeması	34
Şekil 3.3. Amaç fonksiyonu noktaları	35
Şekil 3.4. Amaç fonksiyonunun belirlenmesinde kullanılan örnek tasarım	36
Şekil 3.5. Örnek V tipi motora ait tasarım değişkenleri	37
Şekil 3.6. Amaç fonksiyonu-1 için optimum çözüm adayları	38
Şekil 3.7. Amaç fonksiyonu-1'e göre optimum aday tasarım.....	39
Şekil 3.8. Amaç fonksiyonu-1 kullanılarak elde edilen optimum tasarıma ait verimlilik haritası.....	39
Şekil 3.9. Amaç fonksiyonu-2 için pareto optimum çözüm adayları	40
Şekil 3.10. Amaç fonksiyonu-2'ye göre optimum aday tasarım	41
Şekil 3.11. Amaç fonksiyonu-2 kullanılarak elde edilen optimum tasarıma ait verimlilik haritası.....	41
Şekil 3.12. Amaç fonksiyonu-3 için pareto optimum çözüm adayları	42
Şekil 3.13. Amaç fonksiyonu-3'e göre optimum aday tasarım	43
Şekil 3.14. Amaç fonksiyonu-3 kullanılarak elde edilen optimum tasarıma ait verimlilik haritası.....	43
Şekil 3.15. Amaç fonksiyonu-4 için pareto optimum çözüm adayları	44
Şekil 3.16. Amaç fonksiyonu-4'e göre optimum aday tasarım	45
Şekil 3.17. Amaç fonksiyonu-4 kullanılarak elde edilen optimum tasarıma ait verimlilik haritası.....	45
Şekil 3.18. Amaç fonksiyonu-5 için pareto optimum çözüm adayları	46
Şekil 3.19. Amaç fonksiyonu-5'e göre optimum aday tasarım	47
Şekil 3.20. Amaç fonksiyonu-5 kullanılarak elde edilen optimum tasarıma ait verimlilik haritası.....	47
Şekil 4.1. V Tipi tasarıma ait başlangıç modeli.....	52
Şekil 4.2. V Tipi başlangıç modeli verimlilik haritası.....	52

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. V tipi başlangıç modeli tork-güç-hız eğrisi	53
Şekil 4.4. V Tipi optimizasyon değişkenleri	53
Şekil 4.5. V Tipi pareto optimum tasarımın seçilmesi	54
Şekil 4.6. 2V Tipi tasarıma ait başlangıç modeli.....	56
Şekil 4.7. 2V Tipi başlangıç modeli verimlilik haritası.....	57
Şekil 4.8. 2V tipi başlangıç modeli tork-güç-hız eğrisi	57
Şekil 4.9. 2V Tipi optimizasyon değişkenleri	57
Şekil 4.10. 2V Tipi pareto optimum tasarımın seçilmesi.....	58
Şekil 4.11. 3 Kat tasarıma ait başlangıç modeli.....	60
Şekil 4.12. 3 kat başlangıç modeli verimlilik haritası.....	61
Şekil 4.13. 3 Kat başlangıç modeli tork-güç-hız eğrisi.....	61
Şekil 4.14. 3 Kat optimizasyon değişkenleri	61
Şekil 4.15. 3 Katlı rotor pareto optimum tasarımın seçilmesi	62
Şekil 5.1. V Tipi optimum tasarım moment bileşenlerinin gösterimi	66
Şekil 5.2. 2V Tipi optimum tasarım moment bileşenlerinin gösterimi	66
Şekil 5.3. 3 Kat optimum tasarım moment bileşenlerinin gösterimi	67
Şekil 5.4. Relüktans moment üretim kapasitelerinin karşılaştırılması	68
Şekil 5.5. V Tipi optimum tasarımın farklı hız ve momentlerde motor verimi.....	68
Şekil 5.6. V Tipi optimum tasarımın farklı hız ve momentlerde güç faktörü	69
Şekil 5.7. V Tipi optimum tasarımın farklı hız ve momentlerde yük açısı	69
Şekil 5.8. 2V Tipi optimum tasarımın farklı hız ve momentlerde motor verimi.....	69
Şekil 5.9. 2V Tipi optimum tasarımın farklı hız ve momentlerde güç faktörü	70
Şekil 5.10. 2V Tipi optimum tasarımın farklı hız ve momentlerde yük açısı.....	70
Şekil 5.11. 3 Kat optimum tasarımın farklı hız ve momentlerde motor verimi.....	70
Şekil 5.12. 3 Kat optimum tasarımın farklı hız ve momentlerde güç faktörü	71
Şekil 5.13. 3 Kat optimum tasarımın farklı hız ve momentlerde yük açısı	71

Şekil	Sayfa
Şekil 5.14. Optimum tasarımların moment-hız performansının karşılaştırılması.....	72
Şekil 5.15. Optimum tasarımların güç-hız performansının karşılaştırılması.....	73
Şekil 5.16. Maksimum yükte manyetik akı yoğunluğu dağılımı, (a) V tipi tasarım, (b) 2V tipi tasarım, (c) 3 katlı tasarım, (d) Manyetik akı yoğunluğu renk skalası	74
Şekil 5.17. Demagnetizasyon analiz sonuçları, (a) V Tipi, (b) 2V Tipi, (c) 3 Katlı.....	76
Şekil 5.18. Motorun sürüş saykılı içerisinde çalıştığı bölgelerin gösterimi.....	77
Şekil 5.19. V Tipi optimum tasarımın sürüş saykılı içerisinde çalıştığı bölgelerin gösterimi	78
Şekil 5.20. 2V Tipi optimum tasarımın sürüş saykılı içerisinde çalıştığı bölgelerin gösterimi	79
Şekil 5.21. 3 Kat optimum tasarımın sürüş saykılı içerisinde çalıştığı bölgelerin gösterimi	79
Şekil 6.1. MD-SRM 3 boyutlu tasarımı.....	82
Şekil 6.2. MD-SRM 3 boyutlu detay görünümü.....	83
Şekil 6.3. MD-SRM 3 boyutlu montajlı görünümü.....	83
Şekil 6.4. M235-35A silisli saca ait B-H eğrisi	84
Şekil 6.5. M235-35A silisli saca ait frekansa bağlı kayıpların değişimi	85
Şekil 6.6. Optimum tasarıma ait mıknatıs geometrisi, (a) 1. Kat mıknatısı, (b) 2. Kat mıknatısı, (c) 3. Kat mıknatısı	91
Şekil 6.7. Motor mil teknik resmi.....	92
Şekil 6.8. Motor ön kapak teknik resmi.....	93
Şekil 6.9. Motor arka kapak teknik resmi.....	94
Şekil 6.10. Rotor tutucu teknik resmi	95
Şekil 6.11. Stator tutucu teknik resmi.....	96
Şekil 6.12. Mıknatıs montajı yapılan rotor paketleri	100
Şekil 7.1. MD-SRM'nin indüktanslarının ölçümü	109
Şekil 7.2. Akım ve gerilimlerin gösterimi, (a) q eksen endüktans ölçümünde akım ve gerilim, (b) d eksen endüktans ölçümünde akım ve gerilim.....	110

Şekil	Sayfa
Şekil 7.3. 1500 d/dk hızda ZIT Emk dalga şeklinin gösterimi	112
Şekil 7.4. ZIT EMK tasarım ve test sonuçlarının karşılaştırılması.....	112
Şekil 7.5. Zapi PC Can Console arayüzü, (a) Giriş ekranı, (b) Parametre sayfası	114
Şekil 7.6. Kayıp kaçak akı dahil edilmiş moment dağılımı	115
Şekil 7.7. 0° yük açısında maksimum akımda üretilen mıknatıs momenti.....	116
Şekil 7.8. 48V sürücü ile çalışan MD-SRM'nin performans grafikleri, (a) Verimlilik haritası (b) Yük açısı haritası	117
Şekil 7.9. Sabit yük açısında verimlilik haritaları, (a) 0°, (b) 10°, (c) 20°, (d) 30°, (e) 40°	118
Şekil 7.10. Performans test sistemi bağlantı şeması	120
Şekil 7.11. Yüzde akımlarda MTPA değerleri.....	123
Şekil 7.12. 60 dakika süreli termal analiz	124
Şekil 7.13. Motor üzerinde ısıнын dağılımı	125
Şekil 7.14. Test sonu sargı direncinin tespit edilmesi.....	126

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Toyota Prius tahrik motorunun tarihsel gelişimi, (a) 2003 Toyota Prius, (b) 2004 Toyota Prius, (c) 2010 Toyota Prius, (d) 2017 Toyota Prius.....	12
Resim 6.1. Numune rotor ve stator sacları.....	85
Resim 6.2. Rotor ve stator laminasyonları.....	86
Resim 6.3. Stator dizme ve sıkıştırma aparatı	86
Resim 6.4. Rotor dizme ve sıkıştırma aparatı	87
Resim 6.5. Rotor laminasyonlarının aparat yardımı ile dizilmesi	87
Resim 6.6. Rotor paketine paslanmaz plaka kapağın yerleştirilmesi	88
Resim 6.7. Stator laminasyonlarının aparat yardımı ile dizilmesi	88
Resim 6.8. Lazer kaynak işlemi, (a) rotor lazer kaynak işlemi, (b) stator lazer kaynak işlemi	89
Resim 6.9. Rotor ve stator paketlerinin oluşturulması, (a) Stator, (b) Rotor.....	89
Resim 6.10. Sargılı statorun elde edilmesi.....	90
Resim 6.11. Stator sargı bağlantılarının yapılması	90
Resim 6.12. Teknik resme uygun üretilmiş motor mili	92
Resim 6.13. Teknik resme uygun üretilmiş motor ön kapağı, (a) ön görünüş, (b) arka görünüş	93
Resim 6.14. Teknik resme uygun üretilmiş motor arka kapağı, (a) ön görünüş, (b) arka görünüş	94
Resim 6.15. Teknik resme uygun üretilmiş rotor tutucu	95
Resim 6.16. Teknik resme uygun üretilmiş stator tutucu	96
Resim 6.17. Teknik resme uygun üretilmiş motor gövdesi, (a) yan görünüş, (b) üst görünüş	96
Resim 6.18. Rulman yerleştirilmiş arka kapak	97
Resim 6.19. Arka kapak ve stator tutucu parçanın montajı	97
Resim 6.20. Arka kapak ve stator tutucu parçanın montajı	98
Resim 6.21. Motor mili ve rotor tutucu montajı, (a) montaj öncesi, (b) montaj sonrası	98

Resim	Sayfa
Resim 6.22. Mıknatıs montajı yapılan rotor paketleri	99
Resim 6.23. Rotor paketlerinin rotor tutucu parçaya yerleştirilmesi	100
Resim 6.24. Ön rulman montajı	101
Resim 6.25. Motor dış gövde montajı, (a) önden görünüş, (b) arkadan görünüş	101
Resim 6.26. Tamamlanmış motor montajı	102
Resim 7.1. İzolasyon direnci test cihazı	105
Resim 7.2. Dijital mikro Ohm metre	106
Resim 7.3. Titreşim Ölçer	106
Resim 7.4. Güç analizörü	107
Resim 7.5. İzolasyon direnci ölçümü	108
Resim 7.6. Sargı direnci ölçümü	108
Resim 7.7. ZIT Emk ölçüm test düzeneği	111
Resim 7.8. MD-SRM Titreşim testi düzeneği	113
Resim 7.9. 0° yük açısında faz akımı ve fazlar arası gerilimlerinin gösterimi	116
Resim 7.10. Performans test sistemi	120

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

d/dk	Devir/dakika
gr	Gram
kg	Kilogram
kw	Kilowatt
Nm	Newtonmetre
sn	Saniye

Kısaltmalar

Açıklamalar

AA	Alternatif akım
AB	Avrupa Birliği
ASM	Asenkron motor
CPRS	Sabit Güç Hız Aralığı
DA	Doğru akım
DAM	Doğru Akım Motorları
DE	Farksal Gelişim
EA	Elektrikli araç
GA	Genetik Algoritma
GT-SMSM	Gömülü tip sürekli mıknatıslı senkron motor
HEA	Hibrit elektrikli araç
İHA	İnsansız hava araçları
MD-SRM	Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor
NSGA-II	Baskın Olmayan Sıralamalı Genetik Algoritma II
OANA	Oriented Auto-Tuning Niching Algorithm
PMR	Güç-ağırlık oranı
RSM	Yanıt Yüzey Yöntemi
SMSM	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

Kısaltmalar**Açıklamalar****SNP**

Sequential Nonlinear Programming

SRM

Senkron Relüktans Motor

THD

Toplam Harmonik Distorsiyonu

WLTC

Dünya Harmonize Hafif Araç Test Döngülerini

WLTP

Hafif Araç Test Prosedürü

YY-SMSM

Yüzey yerleştirmeli sürekli mıknatıslı senkron motor

1. GİRİŞ

Elektrikli (EA) ve hibrit elektrikli araçların (HEA) gelişmesi ile birlikte çevre dostu araçların kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Buna paralel olarak da bu araçlarda kullanılan yüksek performanslı ürünlerin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Dünyada her geçen gün kullanımı yaygınlaşan elektrikli bisiklet, ATV, UTV, motosiklet elektrik tahrikli kara araçlarına, şu an tarımsal ilaçlama ve askeri sanayide kullanılan İnsansız Hava Araçları (İHA) ise elektrik tahrikli hava araçlarına örnek olarak verilebilir. Genel olarak elektrikli araç teriminin, bir elektrik motoru ile tahrik edilen her türlü aracı kapsadığı söylenebilir.

Elektrik tahrikli araçlarda performansın en belirleyici faktörlerinden birisi menzildir. Araç menzili ise doğrudan kullanılan tahrik motorunun verimi ile orantılı olarak değişmektedir. Ancak elektrik tahrikli araçlarda kullanılan tahrik motorlarının yalnızca yüksek verimli olması tek başına yeterli değildir. Tahrik motorunun aynı zamanda yüksek birim güç yoğunluğuna, geniş bir moment ve hız aralığında yüksek verime, yüksek maksimum momente, yüksek mekanik mukavemete, sabit güç bölgesinin geniş olması ve fiyat istikrarına sahip olması beklenmektedir [1-3].

Tarihteki ilk EA uygulamaları, 19. yüzyılın başlarına kadar uzanmaktadır. Tarihteki ilk EA'ların, günümüzdekiler ile karşılaştırıldığında oldukça farklı olduğunu ve günümüze kadar çok büyük değişimler yaşandığını söylemek mümkündür [4]. Ayrıca, EA'ların tarihsel gelişiminin elektrik makinelerin gelişimiyle güçlü bir şekilde bağlantılı olduğu da görülmektedir.

1827 yılında Macar mühendis Ányos Jedlik tarafından geliştirilen bir elektromıknatıs tarafından çalıştırılan küçük bir model araba, EA'ların ilk örneklerinden birisini sunmaktadır [5-6]. Daha sonra, 1830'larda İskoç mucit Scotsman Robert Anderson tarafından yapılan yeniden şarj edilmeyen piller kullanılarak maksimum hızı 12 km/h olan bir EA geliştirilmiştir. Ancak Scotsman Robert Anderson'un tasarımının da yalnızca bir prototip olarak kaldığı söylenebilir [6]. 1835 yılına gelindiğinde Hollandalı Sibrandus Stratingh, küçük bir model EA geliştirdiği görülmektedir [7]. Dünyanın farklı ülkelerinde benzer zamanlarda EA'lar ile ilgili yapılan çalışmaların paralellik gösterdiği

anlaşılmaktadır. Bu süreçte Amerika Birleşik Devletleri'nde ise elektrik motoru ile ilgili ilk patenti ise Thomas Davenport Şubat 1837'de almıştır [8].

Elektrik motoru ve pillerdeki gelişme birbirine paralel olarak ilerlediğini söylemek mümkündür. İlk kimyasal batarya 1799 yılında Alessandro Volta tarafından icat edilmiştir [9]. Ancak geliştirilen bu pil şarj edilebilir olmadığı için ticari kullanımı yaygınlaşmamıştır. İlk şarj edilebilir ticari pillerin 1859 yılında Fransız Gaston Plante tarafından icat edilmesi ile birlikte EA'ların da gelişim süreci de hızlanmıştır [10]. Şarj edilebilir ticari pillerin geliştirilmesi ile birlikte bu tarihten sonra geliştirilen EA'larında ticarileştiğini ve kullanımının yaygınlaşmaya başladığını söylemek mümkündür.

Batarya teknolojinin gelişmesi ile birlikte EA'lar ile ilgili yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. İlk seri üretilen EA, 1888'de Alman mühendis Flocken tarafından üretilen Flocken Elektrowagen'dir [11]. Ayrıca Elektrowagen ile yakın tarihlerde, Oliver Fritchle 1905-1907 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri'nde Denver bölgesinde ticari olarak 20 adet EA üretmiştir. Üretilen bu araçların tek şarj ile 100 mile varan menzile sahip olması sebebiyle döneminde nadir görünen bir yetenek olduğu söylenebilir. Ayrıca, ilk rejeneratif frenleme uygulamasının bu araç tarafından kullanıldığını da söylemek mümkündür [12]. 1899 yılına gelindiğinde, Belçikalı Camille Jenatzy, 100 km/h hız sınırını aşan ilk EA'yı geliştirmiştir [13].

Literatürde yer alan çalışmalar değerlendirildiğinde EA'ların 1895-1905 yılları arasında altın çağını yaşadığı söylenebilir [14]. Sonraki yıllarda içten yanmalı motorlu araçların hızlı gelişimi nedeniyle EA'lar araç pazarındaki payını kaybetmeye başladı [5]. Petrol fiyatlarının düşmesi ve petrole erişimin kolaylaşması, EA'ların içten yanmalı motora sahip araçlara göre yaklaşık üç kat daha pahalı olması, yeni yolların inşa edilmesi ile birlikte uzun yolculuk yapılma ihtiyacı ve yakıt doldurma süresinin hızlı olması gibi nedenlerle EA'ların 1960'lı yıllara kadar kullanımı sınırlı kalmıştır [4, 5, 15, 16]

İlerleyen yıllarda çevresel kaygıların artması, fosil yakıt rezervinin azalması, daha az bakım gerektirmesi ve konforlu ulaşımı nedeniyle EA'lar giderek popüler hale gelmiştir [17]. Güç elektroniği, pil ve malzeme teknolojisinde meydana gelen gelişmeler ile motor sürücü teknolojisi, yüksek enerji yoğunluğuna sahip mıkmatıslar, düşük kayıplı nüve malzemeleri gelişmiş ve EA ve HEA'lar ve bileşenleri ile ilgili yapılan çalışmalar hız

kazanmıştır. Belirtilen gelişmeler doğrultusunda 1997 yılında Toyota firması PRIUS isimli HEV aracını piyasaya sürmüş ve ilk büyük ölçekli seri üretim elektrikli araba olma unvanını kazanmıştır [18].

EA ve HEA'ların en kritik bileşenlerinden birisi ise elektrik tahrik motorudur. Elektrik tahrikli araçlarda kullanılan motorların dayanıklı, yüksek moment üretebilen, geniş bir hız aralığında yüksek verimli, düşük maliyetli ve küçük boyutlu olması beklenmektedir [19, 20]. Literatürde EA ve HEA'larda tahrik motoru olarak farklı motor tipleri ile ilgili çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Bunlardan en önemlileri Asenkron Motor (ASM), Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM), Senkron Relüktans Motor (SRM) ve Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motordur (MD-SRM) olarak ifade edilebilir [20, 21].

İlk elektrik tahrikli araçlarda kullanılan elektrik motorları Doğru Akım Motorları (DA) olsa da sık bakım ihtiyacı, düşük birim güç yoğunluğu gibi sebepler ve güç elektroniğindeki gelişmeler ile birlikte yerini ASM'lere bırakmıştır. ASM'ler DAM'lere kıyasla daha yüksek birim güç yoğunluğuna, sağlam yapısı ve daha az bakıma ihtiyaç duyması gibi özellikleriyle öne çıkmaktadır [20, 22]. Ancak, EA ve HEA'lardaki menzil problemi daha yüksek verimli elektrik tahrik motorları ile ilgili araştırmalar yapılmasını gerektirmiştir. Bu ihtiyaca paralel olarak malzeme teknolojisindeki gelişmelerle sayesinde nadir element içeren yüksek enerji yoğunluklu neodmiyum mıknatısların elektrik motorlarında kullanımı mümkün olmuştur. Neodmiyum mıknatısların SMSM'lerde kullanılması ile birlikte ASM'lere kıyasla daha yüksek güç yoğunluğuna, daha yüksek maksimum momente, geniş bir moment ve hız aralığında yüksek verime sahip, daha kompakt tahrik motorları elde edilebilmiştir [22, 23]. SMSM'ler bu özelliklerinden dolayı EA ve HEA'larda yaygın olarak tercih edilmektedir.

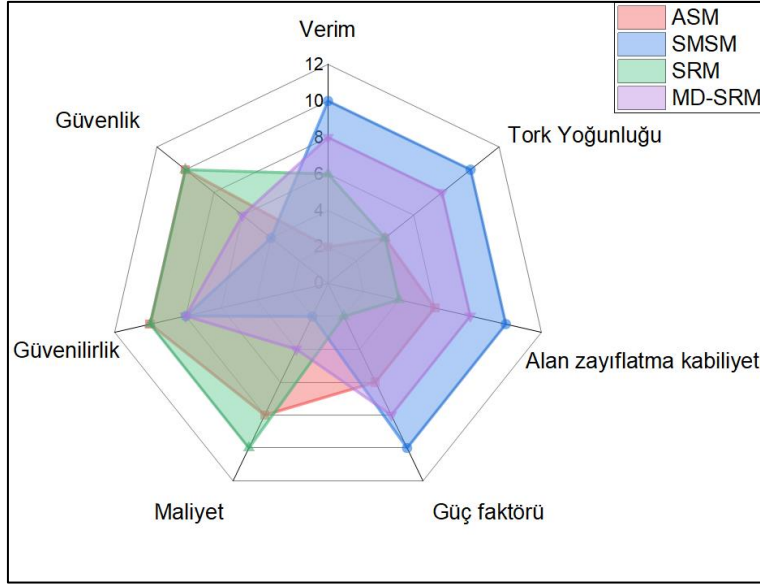
EA uygulamalarında kullanılan yüksek birim güç yoğunluğuna sahip SMSM'lerin rotorlarında yüksek akı yoğunluğuna sahip Neodmiyum mıknatıslar kullanılmaktadır. Bu mıknatıslar nadir toprak elementler içermektedir ve bu sebeple yüksek BHmaks (kJ/m^3) çarpımına sahiptirler [24]. Ancak, bu nadir toprak elementlerin ham madde olarak çok büyük bölümünün Çin sınırları içerisinde olması temin ve fiyat istikrarsızlığını beraberinde getirmektedir. Bu duruma 2011 yılında yaşanan Nadir Toprak Element Krizi örnek olarak verilebilir [25]. Bu tarihten sonra yapılan çalışmalar daha az nadir toprak element içeren mıknatıs kullanarak tahrik motorlarının geliştirilmesine yoğunlaşmıştır [26]. Bu amaçla

izlenen yollardan birincisi nadir toprak element içeren mıknatıs yerine ferit mıknatıs kullanılmasıdır [27]. Ancak ferit mıknatıslar neodmiyum mıknatıslara kıyasla daha düşük birim güç yoğunluğuna, remanans akı üretimine ve sıcaklık dayanımına sahip olmakla birlikte daha kolay demagnetize olmaktadır [28]. Belirtilen özelliklerinden dolayı ferit mıknatıs kullanılarak geliştirilen motorların kg/kw oranları artmakta ve bu sebeple EA ve HEA uygulamaları için uygun aday olmaktan çıkmaktadır.

Bir diğer yol ise rotorunda mıknatıs bulunmayan motorların kullanılmasıdır. Bunlardan ilki Senkron Relüktans Motorlardır (SRM). SRM'lerin yapısında mıknatıs bulunmaması demagnetizasyon riskini ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca SRM'ler yüksek sıcaklıklarda ve yüksek hızlarda çalışabilmektedirler [29, 30]. SRM'ler üstünlüklerinin yanında ASM ve SMSM ile karşılaştırıldığında yüksek moment dalgalanması, düşük güç faktörü, yüksek akustik gürültü, kontrol algoritmalarının karmaşıklığı gibi eksiklikleri bulunmaktadır [16, 31]. SRM'lerin EA ve HEA'larda tercih edilmemelerinin sebebi olarak bu eksiklikleri gösterilebilir.

Rotorunda mıknatıs bulundurmeyen bir diğer motor tipi ise ASM'lerdir. İndüksiyon prensibine göre çalışan ASM'lerin rotorlarında alüminyum veya bakır kısa devre çubukları ve kısa devre bileziği yer almaktadır. ASM'lerin sağlam yapıları, ucuz maliyetleri ve iyi alan zayıflatma kabiliyetleri üstünlükleri iken birim güç yoğunluğunun yeteri kadar yüksek olmaması ve rotor bakır kayıplarından dolayı SRM ve SMSM'ler kadar verimli olmaması en önemli eksikliğidir [32]. Özellikle EA'larda menzil doğrudan tahrik motorunun verimliliği ile ilgili olduğundan dolayı günümüzde ASM'lerin tahrik motoru olarak kullanımının gün geçtikçe azaldığını söylemek mümkündür [21].

İzlenen bir diğer yol ise SRM'lerin akı bariyerleri içerisine uygun şekilde mıknatısların yerleştirilmesidir. Bu durumda motor, SRM'nin üretmiş olduğu relüktans momente ilave olarak mıknatıs moment de üretilmektedir. Gerçekleştirilen bu işlem ile elde edilen motorlar Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor (MD-SRM) olarak adlandırılmaktadır. MD-SRM'ler ASM ve SRM'lerden daha üstün performans sergilerken tahrik motoru uygulamalarında SMSM ile rekabet edebilecek bir performans sunduğu söylenebilir. EA ve HEA'larda yaygın olarak kullanılan dört motor tipinin karşılaştırması aşağıdaki Şekil 1.1 de görülebilir.



Şekil 1.1. Tahrik uygulamalarında elektrik motor tiplerinin karşılaştırılması [33]

Bir elektrik motorunun tahrik motoru olarak EA ve HEA’larda kullanılabilmesi için birim güç yoğunluğunun yüksek olması, geniş bir moment-hız aralığında yüksek verime ve güç faktörüne sahip olması, yüksek maksimum moment üretebilmesi, alan zayıflatma kabiliyetinin iyi olması, maliyet etkin ve düşük bakım gerektirmesi gerekmektedir. Bu isteklerin hepsini birden sağlayan motor ise MD-SRM’dir. Belirtilen üstünlükleri sebebiyle MD-SRM’lerin popülaritesi giderek artmaktadır.

MD-SRM’lerin performansı mıknatıs yerleşim geometrisi ile doğrudan ilişkilidir. Mıknatıs yerleşim geometrisi ise motorun akı bağı, hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, nüve kayıpları ve d ve q eksenlerindeki indüktansları gibi birçok parametresini doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple, tasarım isteklerine en uygun geometriyi bulmak için temelde iki farklı yöntem uygulanmaktadır. Bunlardan birincisi, farklı mıknatıs yerleşim geometrilerinin performans analizlerinin karşılaştırmalı olarak sunulması ve istekleri karşılayan tasarımın tespit edilmesidir. Bu yöntemi kullanan literatürdeki bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Ref. [3]’de altı farklı MD-SRM rotor tasarımının performans, maliyet ve demagnetizasyon karakteristiği ve mıknatıs tüketim miktarı dikkate alınarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda MD-SRM’lerde mıknatıs miktarının artırılmasının tek başına momenti arttırmak için yeterli olmadığı anlaşılmıştır. Ref. [23]’de düz tip, V tipi, 2V tipi, üçgen tip ve U tipi olmak üzere beş farklı rotor

geometrisine sahip motorun performans analizlerini yaparak sonuçları karşılaştırmalı olarak sunmuşlardır. Bu çalışmada, V tipi rotora sahip motor, en düşük demagnetizasyon riskine sahip, en düşük üretim maliyetine sahip ve en yüksek çıkıntılılık oranına sahip olarak rakiplerine üstünlük sağladığı görülmüştür. Ref. [34]'de dört farklı MD-SRM'nin mıknatıs yerleşim topolojini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. V-tipi geometrinin en yüksek relüktans moment bileşenine sahip olduğu, düz tip mıknatısın ise en yüksek ortalama moment ve en düşük vuruğu momenti, moment dalgalanması ve THD (%) ye sahip olduğu belirtilmiştir.

En uygun tasarımın tespit edilmesi için kullanılan bir diğer yöntem ise tasarım optimizasyon çalışmasıdır. Elektrik motorlarının performansını belirleyen çok sayıda performans parametresi bulunmaktadır. Verim, relüktans moment bileşeni, maksimum moment, alan zayıflatma kabiliyeti, mıknatıs tüketimi, güç faktörü ve moment dalgalanması buna örnek olarak verilebilir. Bu sebeple elektrik motorlarının tasarım optimizasyon sürecinde birden çok amaç fonksiyonu ve farklı optimizasyon algoritmaları kullanılabilmektedir. Literatürde bu konuda yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Zhu ve arkadaşları, bir SMSM performansını iyileştirmek için sıralı optimizasyon çalışması Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) ve Sequential Nonlinear Programming (SNP) algoritmaları birlikte kullanılmıştır. Önce moment ve maliyet optimizasyonu yapılmış akabinde elde edilen optimum motor modelinin moment dalgalanması, vuruğu momenti ve verim optimizasyonu yapılmıştır [35]. Zakirul Islam ve arkadaşları, nadir element içermeyen mıknatıs kullanılarak tasarım optimizasyon çalışması yapılan MD-SRM'nin tasarım optimizasyon sürecinde Farksal Gelişim (DE) algoritması kullanılmıştır. Çalışma 20 iterasyon ve her iterasyonda 50 aday çözüm üretilerek tamamlanmıştır. Çalışmada amaç fonksiyonu olarak verim, moment ve moment dalgalanması tek bir eşitlik içerisinde yazılmış ve tek bir amaç fonksiyonu elde edilmiştir [36]. Hua ve arkadaşları, iç rotorlu bir MD-SRM'nin tasarım optimizasyon sürecinde Baskın Olmayan Sıralı Genetik Algoritma II (NSGA-II) kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon çalışmasında moment dalgalanması, süspansiyon kuvveti dalgalanması ve güç faktörünün iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada çok amaçlı optimizasyon problemi çözülmeden önce hassasiyet analizi yapılmıştır. Sonrasında optimizasyon problemi 50 iterasyonda çözdürülmüştür. Çalışmanın sonucunda sonrasında düşük moment dalgalanmasına, düşük

süspansiyon dalgalanmasına ve yüksek güç faktörüne sahip MD-SRM tasarımı elde edilmiştir [37]. Literatürde GA kadar popüler olmayan yeni algoritmalar da elektrik motorlarının tasarım optimizasyon sürecinde kullanılmaktadır. Lee ve arkadaşları, Ref. [38]'da sunmuş oldukları çalışmada iç rotorlu üç katmanlı V tipi mıknatıs geometrisine sahip bir MD-SRM'nin Oriented Auto-Tuning Niching Algorithm (OANA) algoritması yardımı ile vuruğu momenti minimize etmişlerdir. Ref. [39]'de yapılan bir başka çalışmada iç rotorlu V tipi mıknatıs geometrisine sahip başlangıç tasarım modeli sunulmuştur. Başlangıç motor modelinin öncelikle hassasiyet analizi yapılmıştır. Sonrasında ise optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışması ise iki bölüm halinde yapılmıştır. İlk bölümde stator parametreleri, ikinci bölümde rotor parametrelerinin optimizasyon çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışmada RS ve NSGA-II kullanılmış olup moment dalgalanması, ortalama moment ve moment dalgalanma kuvveti olmak üzere üç farklı amaç fonksiyonu kullanılarak motorun tasarım optimizasyon çalışmasını gerçekleştirilmiştir.

Tez konusu ile ilgili olabilecek literatürde yer alan güncel çalışmalar özetle:

- MD-SRM'lerin performansı doğrudan mıknatıs ve akı bariyerlerinin geometrisine bağlıdır.
- Her yerleşim geometrisinin üstünlüğü ve eksikliği bulunmaktadır.
- Yapılan çalışmalar iç rotorlu motorlara yoğunlaşmış durumdadır.
- Elektrik makinalarının tasarım optimizasyon sürecinde farklı optimizasyon algoritmaları ve amaç fonksiyonları kullanılmaktadır. Amaç fonksiyonu tasarım optimizasyon sürecinde en az optimizasyon algoritması kadar önemlidir.
- Yapılan çalışmalar yüksek CSCR, düşük mıknatıs tüketimi, yüksek maksimum moment ve verim, düşük moment dalgalanması ve maliyet isteklerini karşılamaya odaklanmış durumdadır.
- Aynı zamanda motor performansını iyileştirmek için yapılan çalışmalar belli bir çalışma noktasında (hız, moment ve yük açısı) yapıldığı gözlemlenmiştir.

Araştırmanın amacı, önemi ve katkısı

Dış rotorlu olarak gerçekleştirilen çalışmalar genellikle doğrudan yol verme uygulamalarında kullanılan, mıknatısların rotor yüzeyinde yüzey yerleştirmeli

SMSM'lerdir. Ayrıca MD-SRM'ler ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar genel olarak iç rotorlu MD-SRM'lerin tasarım optimizasyon çalışmasına yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada bunlardan farklı olarak dış rotorlu MD-SRM geliştirilmiştir.

MD-SRM'lerin tasarım optimizasyon çalışmaları incelendiğinde yapılan iyileştirme çalışmalarının tek bir noktada (sabit hız, moment ve yük açısı) yapıldığı görülmektedir. Tez çalışmasında her bir iterasyonda verimlilik haritası oluşturulmaktadır. Bu sayede farklı hız ve güç değerlerinde motorun performansı eş zamanlı iyileştirilmiştir.

Literatürde mıknatıs yerleşim geometrilerinin motor performansına etkilerinin karşılaştırmalı olarak sunulduğu çalışmalar iç rotorlu MD-SRM'lere aittir. Tez kapsamında iç rotorlu MD-SRM'lerde yaygın olarak kullanılan üç adet mıknatıs yerleşim geometrisi belirlenmiştir. Belirlenen geometriler dış rotorlu yapıya uyarlanmış ve her birisi aynı amaç fonksiyonu kullanılarak optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Yapılan optimizasyon sonucunda seçilen optimum tasarımlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Karşılaştırma sonucunda elde edilen optimum tasarımın prototip imalatı yapılmış ve performans testleri gerçekleştirilmiştir.

Dış rotorlu olarak geliştirilen motorlar incelendiğinde mekanik yapılarının teker içi motor (hub) şeklinde olduğu görülmektedir. EA ve HEA'larda tek oranlı bir aktarma organı kullanıldığı ve motorların bu aktarma organlarına mil vasıtası ile bağlandığı değerlendirildiğinde literatürde yer alan motorlar yalnızca teker içi uygulamalar için uygun olduğu söylenebilir. Tez kapsamında geliştirilen motor dış rotorlu olmasına rağmen yapılan mekanik tasarım vasıtasıyla motor çıkış gücü milden alınmakta ve motor gövdesi iç rotorlu motorlar gibi sabit olmaktadır. Tez kapsamında gerçekleştirilen mekanik tasarım da tezin yenilikçi yönlerinden birisidir.

Tez bölüm içerikleri

Bu doktora tez çalışması yedi bölümden meydana oluşmaktadır.

Bu bölümde literatürde EA'ların tarihsel gelişimi, EA'larda kullanılan tahrik motorları, optimum tahrik motorlarının geliştirilmesinde kullanılan yöntemler sunulmuştur.

İkinci bölümde; MD-SRM'lerin kullanım alanları, mıknatıs yerleşim geometrileri, rotor pozisyonları, matematiksel model, moment üretimi, demagnetizasyon ve alan zayıflatma kabiliyetleri ile ilgili bilgiler detaylı olarak verilmiştir.

Üçüncü bölümde, belirlenen tasarım isterleri sunularak tasarımın belirlenen bu isterleri karşılayabilmesi için kullanılacak amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Amaç fonksiyonu belirlenirken uygulanan her bir adım detaylı olarak analiz edilmiş ve bu bölümde sunulmuştur. Ayrıca, tasarım optimizasyon sürecinde kullanılan optimizasyon algoritması ile ilgili detaylı bilgi bu bölümde verilmiştir.

Dördüncü bölümde, belirlenen optimizasyon algoritması ve amaç fonksiyonu kullanılarak üç farklı mıknatıs yerleşim topolojisinin optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu bölümün sonunda üç farklı optimum aday tasarım elde edilmiştir.

Beşinci bölümde, üç aday topoloji içerisinde seçilen optimum adayların detay elektromanyetik analizleri yapılmış ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu bölümün sonunda diğer iki adaya üstün özellikler gösteren üç katlı mıknatıs yerleşim geometrisinin belirlenen isterleri karşılayan en uygun aday olduğunu karar verilmiştir.

Altıncı bölümde, motorun mekanik tasarımı, prototip üretim süreci ve montajı hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

Yedinci bölümde, prototip imalatı tamamlanan motorun performans testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen test sonuçları tasarım çıktıları ile karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve sunulmuştur.

Sekizinci ve son bölümde sonuçlar ve önerilere yer verilmiştir.

2. SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON MOTOR TEKNOLOJİLERİ

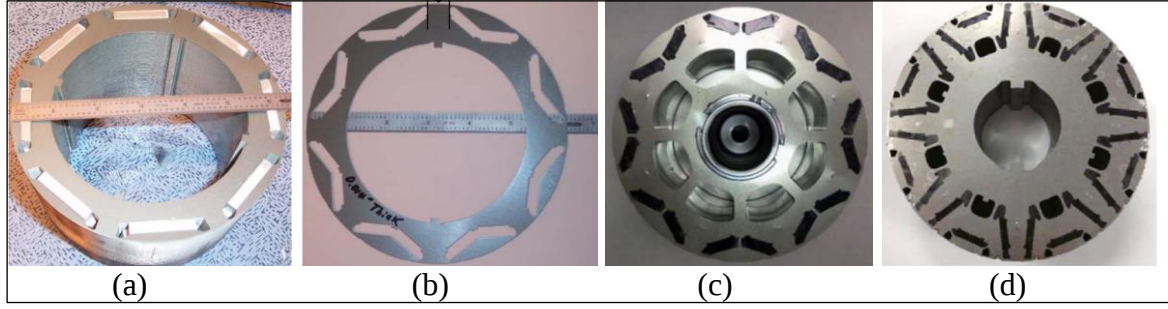
2.1. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Tahrik Motorları

Bir elektrik motorunun EA ve HEA’larda tahrik motoru olarak kullanılabilmesi için ivmelenme için yüksek başlangıç momentine, düşük hacim için yüksek güç yoğunluğuna ve uzun menzil için geniş bir moment ve hız aralığında yüksek verimli ve geniş sabit güç bölgesine sahip olmalıdır [46]. Günümüzdeki EA ve HEA’lar incelendiğinde ASM ve SMSM olmak üzere iki motor topolojisinin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir [21, 46, 47].

Çizelge 2.1. Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik motorları

	Motor Tipi	Rotor Pozisyonu	Gerilim	Akım
Jaguar I-Pace 2019 [21]	MD-SRM	İç rotorlu	-	-
Nissan Leaf 2019 [48]	MD-SRM		-	-
Tesla M3 2018 [21]	MD-SRM-ASM		-	-
Chevy Bolt 2017 [49]	MD-SRM		-	-
Toyota Prius 2017 [50]	MD-SRM		600	-
Audi e-Tron SUV 2016 [46,51]	ASM		396	-
BMW i3 2016 [50]	MD-SRM		355	375
Chevy Volt 2016 [49]	MD-SRM		350	400
Honda Accord 2014 [50]	GT-SMSM		700	300
Nissan Leaf 2012 [52]	MD-SRM		375	442
Sonata HSG 2012 [50]	GT-SMSM		-	-
Toyota Prius 2010 [50]	GT-SMSM		650	170
Lexus 2008 [49]	GT-SMSM		650	304
Toyota Camry 2007 [50]	GT-SMSM		650	282
Honda Accord 2006 [50]	SMSM		-	-
Toyota Prius 2004 [50]	SMSM		500	225

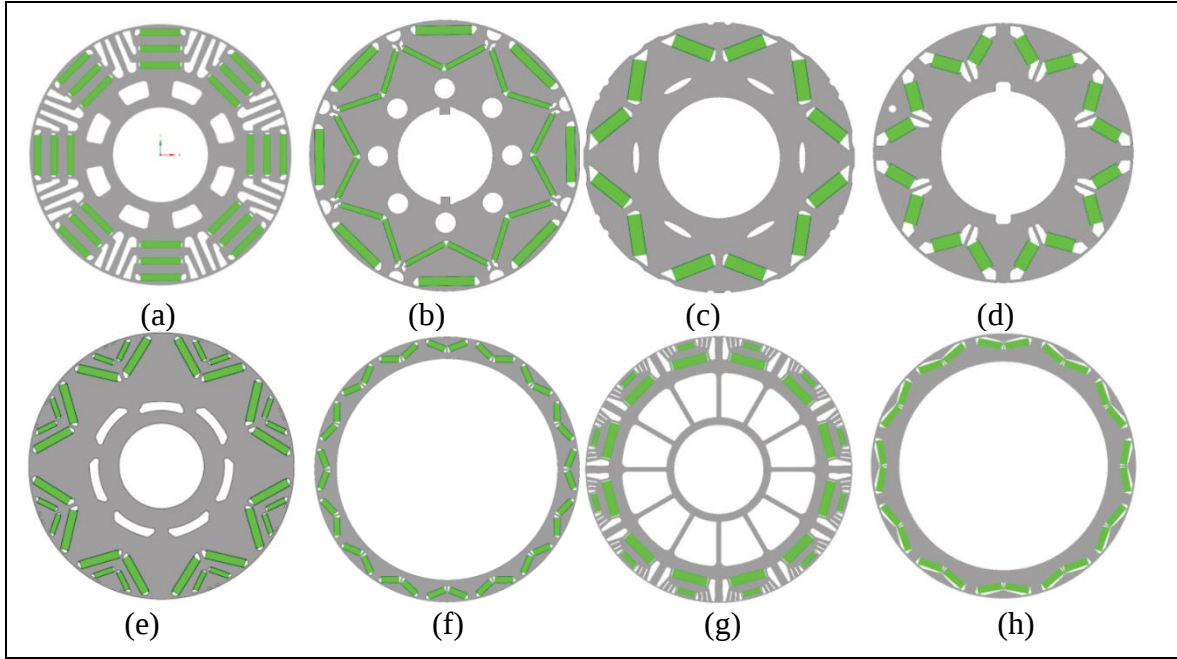
Çizelge 2.1 incelendiğinde ticari EA ve HEA’larda kullanılan motor tipleri incelendiğinde temel olarak mıknatıslı senkron motorların ve asenkron motorlar olmak üzere iki motor tipinin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. SMSM’lerin ise yüzey yerleştirmeli değil, mıknatısların rotor içerisine gömülü olduğu topolojilerin kullanılmaktadır. Bununla birlikte özellikle son 10 yılda yapılan çalışmaların nadir toprak element içeren mıknatıs tüketimini azaltan MD-SRM’lere yoğunlaştığını söylemek mümkündür. Buna örnek olarak Toyota Prius’un gelişimi örnek verilebilir [53,56]



Resim 2.1. Toyota Prius tahrik motorunun tarihsel gelişimi, (a) 2003 Toyota Prius, (b) 2004 Toyota Prius, (c) 2010 Toyota Prius, (d) 2017 Toyota Prius

Literatürde yer alan Toyota Prius araçlarında kullandığı tahrik motorları, EA ve HEA’larda kullanılan tahrik motorlarının tarihsel gelişimine en güzel örneklerden birisidir. Birinci nesilden itibaren mıknatıslar rotor içerisine gömülü vaziyette olduğu görülmektedir. İlk nesilde kullanılan motor düşük relüktans moment bileşenine sahip olduğu için SMSM topolojisi içerisinde değerlendirilebilir. İkinci nesilde mıknatıs yerleşim geometrisinin V tipine dönüştürüldüğü görülmektedir. Rotor geometrisinde yapılan değişiklik ile birlikte daha yüksek relüktans moment bileşenine sahip bir tasarım elde edilmiştir [53]. Üçüncü nesile gelindiğinde çok büyük bir geometrik değişiklik yok gibi görünmesine rağmen motor performansında önemli değişiklikler meydana gelmiştir. İkinci nesil motorda 6000 d/dk olan maksimum çalışma hızı 13500 d/dk’ya çıkartılırken maksimum gücü ise 50kW’dan 60 kW’a yükseltilmiştir [54, 56]. Ayrıca mıknatıs tüketimi 1.232 kg’dan 0.768 kg düşürülmüş, maksimum güç yoğunluğu ise 3.3 kW/L değerinden 4.8 kW/L değerine arttırılmıştır [56, 57]. Dördüncü nesile gelindiğinde ise relüktans moment bileşeninden maksimum fayda sağlamak için mıknatıs yerleşim geometrisi büyük ölçüde değiştirilmiştir. Çift katmanlı U tipi olarak adlandırılabilen bir geometri ile birlikte yüksek relüktans moment bileşeni sayesinde mıknatıs tüketimi 0.544 kg’a düşürülmüştür [56]. Bununla birlikte motorun maksimum çalışma hızı 17000 d/dk’ya çıkartılırken maksimum güç yoğunluğu 5.7 kW/L değerine ulaşmıştır [57].

Toyota Prius’un haricinde Çizelge 2.1’de temel özellikleri sunulan bazı tahrik motorlarının mıknatıs yerleşim geometrileri aşağıdaki Şekil 2.1’de sunulmuştur [58].



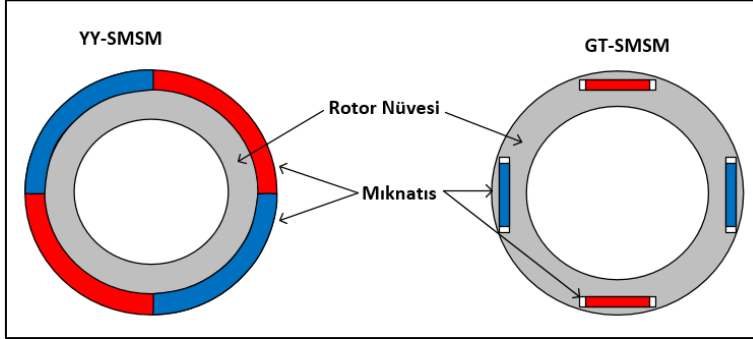
Şekil 2.1. Elektrikli araçlarda kullanılan rotor geometrileri, (a) Jaguar I-Pace, (b) Nissan Leaf, (c) Tesla Model 3, (d) BMW 225xe, (e) Chevy Bolt, (f) Audi A3 e-tron, (g) BMW i3, (h) Chevy Volt

SMSM’lerde rotor içerisinde veya yüzeyinde bulunan mıknatısların boyutu ve BH_{maks} değeri motorun momentini ve maliyetini etkileyen önemli faktörlerden birisidir. Aynı moment değerini elde edebilmek için GT- SMSM’lerde kullanılan mıknatıs miktarı MD-SRM’ye göre daha fazladır. Bunun ana sebebi, GT-SMSM’lerin MD-SRM’lere göre daha düşük relüktans moment bileşenine sahip olmasıdır. MD-SRM’lerde relüktans momentini etkileyen en önemli parametrelerden birisi ise rotorda yer alan akı bariyerleridir. Bu bilgiler doğrultusunda Şekil 2 incelendiğinde tüketiminin daha az olduğu ama aynı zamanda yüksek relüktans moment bileşenine sahip tasarımlar elde edilmenin amaçlandığı görülmektedir [47]. Her rotor topolojisinin üstünlüğü ve eksikliği olmakla birlikte bu durum literatürde de kendisine yer edinmiştir. Bu sebeple farklı mıknatıs yerleşim geometrilerinin karşılaştırmalı olarak performans analizini ve optimizasyon çalışmasını sunan çok sayıda çalışma vardır.

2.2. YY-SMSM ve GT-SMSM

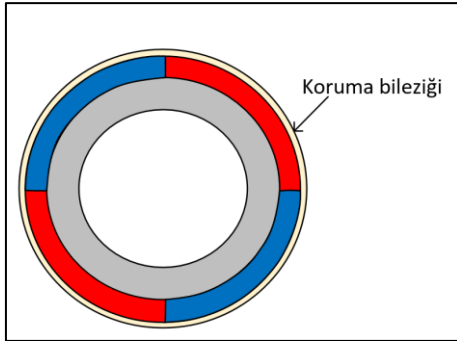
Bu bölümde yüzey yerleştirmeli SMSM (YY-SMSM) ve GT-SMSM’nin birbirlerine göre üstünlükleri ve kullanım alanları detaylı olarak sunulmuştur. Aşağıdaki şekilde görüleceği

üzere YY-SMSM’lerde mıknatıslar rotor nüvesi üzerinde bulunurken, GT-SMSM’lerde mıknatıslar rotor nüvesi içerisine yerleştirilmektedir.



Şekil 2.2. YY-SMSM ve GT-SMSM’nin geometrik gösterimi

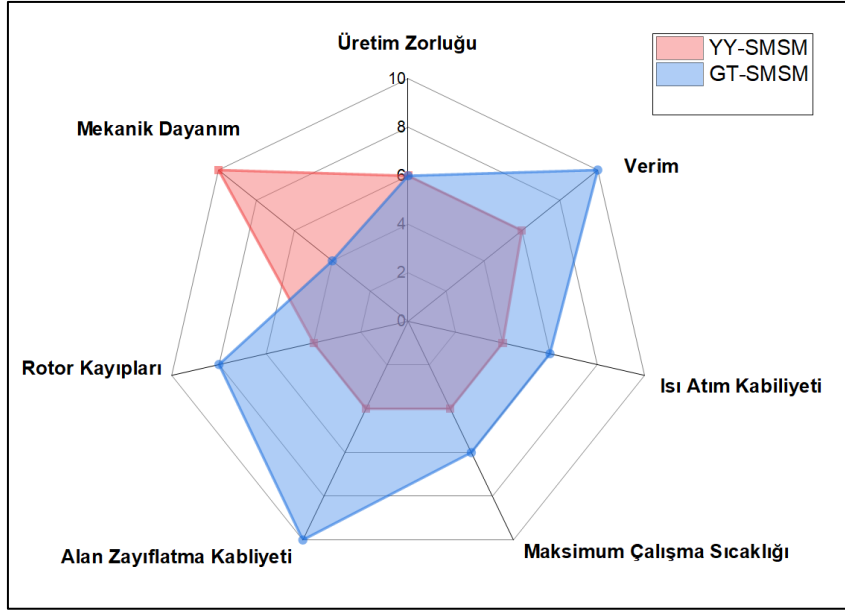
YY-SMSM’lerde mıknatıslar rotor nüvesinin üzerine monte edilmektedir. Bu durum mıknatısların rotora montajını kolaylaştırırken, rotorun stator içerisine yerleştirilirken mıknatısların zarar görme riskini de arttırmaktadır. Ayrıca YY-SMSM’lerde yüksek hızlı uygulamalarda merkez kaç kuvvetine maruz kalan mıknatıslarda kopmalar meydana gelebilmektedir. Bunu önlemek amacıyla mıknatısların dışına aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi manyetik olmayan bir malzeme kullanılarak bir bilezik kullanılmaktadır.



Şekil 2.3. YY-SMSM’lerde kullanılan koruma bileziği

YY-SMSM’lerde kullanılan bu bilezik mekanik dayanımı arttırırken aynı zamanda hava aralığı uzunluğu arttırmaktadır. Hava aralığı uzunluğunun artması ise hava aralığı akısını düşürmekte böylece motorun moment yoğunluğu azalmaktadır. Koruma bileziğinin kalınlığı hava aralığı akı yoğunluğu ile birlikte rotor yüzeyindeki stresi, kullanılan mıknatısın kalınlığını, mıknatıs kayıplarını da etkilemektedir [1].

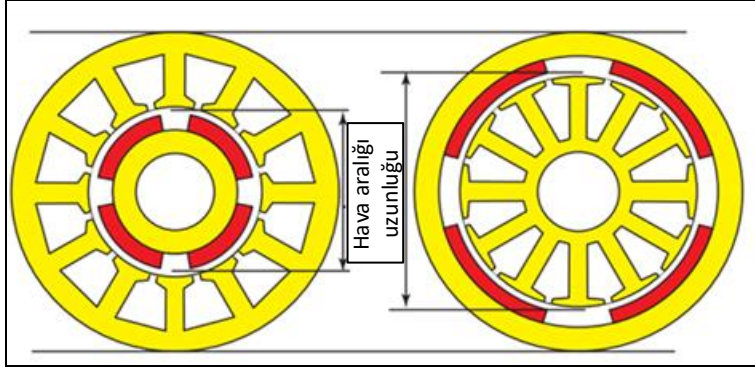
GT-SMSM'ler ise YY-SMSM'lere göre yüksek çıkıntılılığa (L_d/L_q) sahip olması sebebiyle daha iyi alan zayıflatma kabiliyetine [6, 59] , daha düşük maliyete [1, 6], daha iyi demagnetizasyon dayanımına [1], daha düşük sıcaklık artışına sahiptir [60], daha düşük mıknatıs maliyetine [59] sahiptir. Özetle YY-SMSM ve GT-SMSM'lerin performansı karşılaştırmalı olarak aşağıdaki Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4. YY-SMSM ve GT-SMSM'nin performans karşılaştırması [1, 59, 60]

2.3. İç Rotorlu ve Dış Rotorlu SMSM

Elektrik makinaları birçok şekilde kategorize edilebilmektedir. Bunlar besleme gerilimlerine göre (AA ve DA), rotor hızına göre (senkron ve asenkron), fırçalı ve ya fırçasız olmalarına göre, hava aralığı akısına göre (radyal akılı ve eksenel akılı) ve rotor pozisyonuna bağlı olarak kategorize edilebilmektedir. Elektrik motorları rotorlarının pozisyonuna göre ikiye ayrılabilir. Bunlar; iç rotorlu motor ve dış rotorlu motor olarak adlandırılmaktadır ve aşağıdaki Şekil 2.5'de görülmektedir.



Şekil 2.5. İç ve dış rotorlu motorların gösterimi [61]

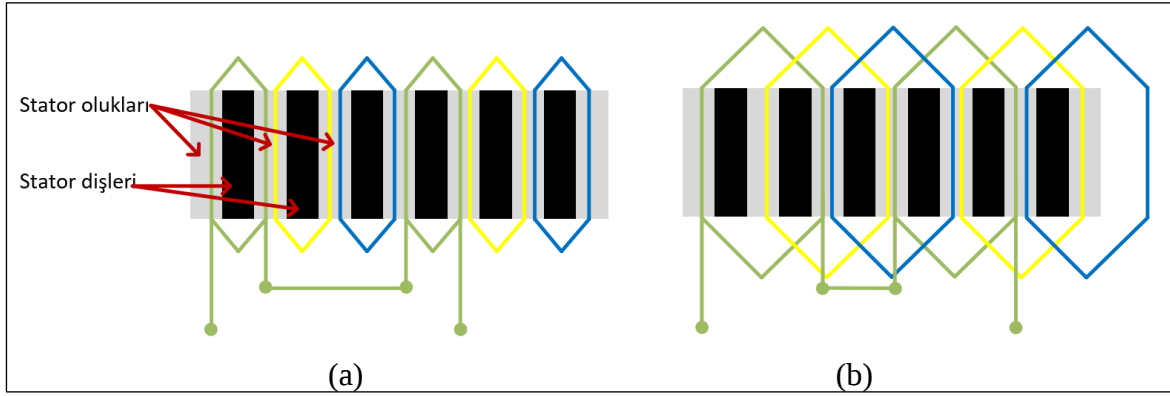
Aynı dış çapta dış rotorlu motorun hava aralığı çapı daha büyük olmaktadır. Motorun ürettiği moment ise hava aralığı çapının karesi ile ilişki olup bu durum aşağıdaki eşitlikte verilmiştir [61].

$$T = \frac{4}{\pi} S_1 B_\delta k_{w1} (D - \delta)^2 L \sin \beta \quad (2.1)$$

Burada S_1 spesifik elektrik yüklenmesini, B_δ spesifik manyetik yüklenmeyi, k_{w1} sargı faktörünü, D rotor iç çapını, δ hava aralığı uzunluğunu, L nüve uzunluğunu ve β ise akım ile d eksenindeki açıyı ifade etmektedir. Dış rotorlu motorlarda hava aralığı çapının daha büyük olması, aynı anma gücüne ve hacme sahip iç rotorlu motorlara kıyasla daha yüksek moment yoğunluğuna sahip motor elde edilebilmektedir [62]. Ancak, dış rotorlu MD-SRM’lerde mıknatısların yerleştirileceği alanın limitli olması sebebiyle optimum mıknatıs moment/relüktans moment oranına sahip tasarımı elde etmek için detaylı geometrik optimizasyon çalışması yapılmalıdır.

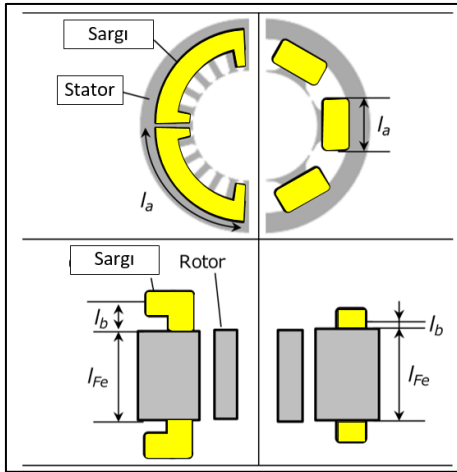
2.4. Sargı Konfigürasyonu

Elektrik motorlarında stator sargıları stator oluklarına dağıtılmış sargı ve toplu sargı olarak adlandırılan iki temel şekilde yerleştirilmektedir. Aşağıdaki Şekil 2.6’da görüldüğü gibi toplu sargıda bir bobin tek bir stator dişi etrafına sarılırken dağıtılmış sargıda en az iki farklı stator dişine sarılmaktadır.



Şekil 2.6. Bobin yerleşimi, (a) toplu sargı, (b) dağıtılmış sargı

MD-SRM'lerin en önemli özelliklerinden olan relüktans moment üretimi dağıtılmış sargı konfigürasyonu ile daha da belirginleşmektedir [67]. Dağıtılmış sargı konfigürasyonunda toplam MMF ve EMF toplu sargı konfigürasyonu kullanımına göre daha sinüsoidal bir dalga formundadır [68]. Buna karşın aşağıdaki Şekil 8'de görüldüğü gibi toplu sargıda ise toplam sargı uzunluğunun daha kısa olması ve stator doluluk oranının daha yüksek olması sebebiyle için stator bakır kayıpları daha azdır ve [68-70]. Dağıtılmış sargının stator oluklarına yerleştirilmesi daha kolay ve ucuzdur. Ayrıca dağıtılmış sargı kullanılan motorlarda adım kısaltma işlemi çok kolay bir şekilde yapılabilmektedir.

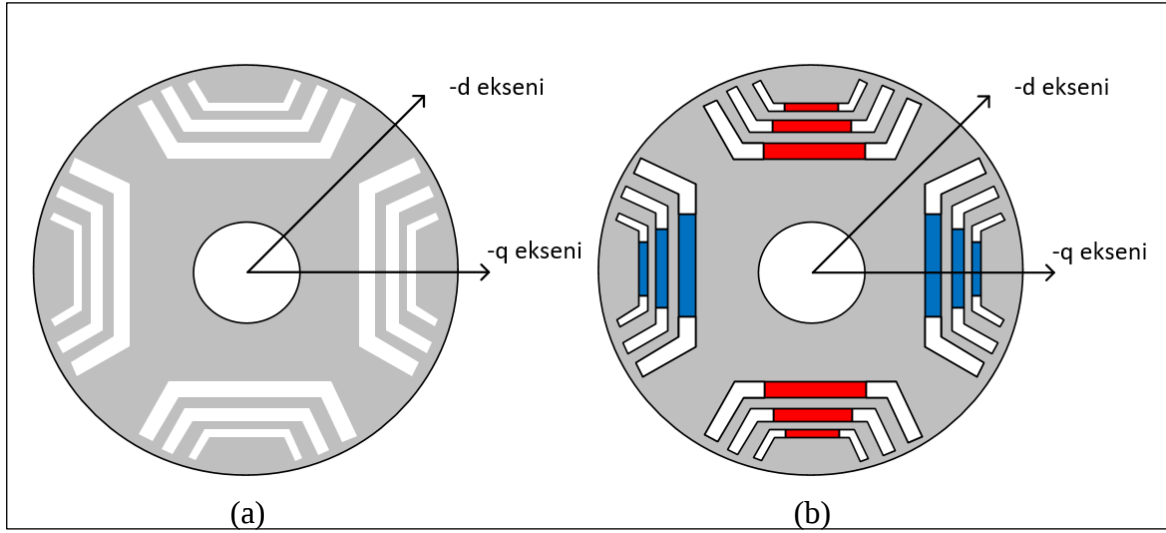


Şekil 2.7. Dağıtılmış sargı ve toplu sargının bobin başlarının gösterimi [69]

Genel olarak, tahrik motorlarının düşük hızlarda yüksek moment ihtiyacı motorlarının düşük hızlı dönüş aralığında büyük tork gerekir, ancak konsantre sargının akı kullanımı düşüktür ve büyük tork üretmede zorluk vardır [69]. Bu sebeple bu tez çalışması kapsamında dağıtılmış sargı konfigürasyonu tercih edilmiştir.

2.5. Matematiksel Model

Her bir tasarım parametresinin MD-SRM performansı üzerindeki etkisini açıklamak için makinenin matematiksel modelini incelemek gerekmektedir [63]. MD-SRM’lerde kullanılan mıknatıslar, bir SRM’nin rotoruna gömülerek yerleştirildiği değerlendirildiğinde, MD-SRM’nin matematiksel modeli için SRM’ye ait d-q referans modelden faydalanılabilir. SRM’lerde eksenler belirlenirken relüktansın düşük olduğu manyetik akı yolu genellikle -d eksen, relüktansın yüksek olduğu yol ise q eksen olarak kabul edilmektedir. Aşağıdaki Şekil 2.8’de SRM ve MD-SRM’nin d ve q eksenleri gösterilmektedir.



Şekil 2.8. d ve q eksenlerinin gösterimi, (a) SRM, (b) MD-SRM

Burada -d eksen, daha az manyetik relüktansa sahip eksen, q eksen ise yüksek manyetik relüktansa sahip olan (akı bariyerlerinden geçen) yoldur. Rotor içine mıknatıslar yerleştirilerek, yukarıdaki şekilde tanımlanan eksenlere sahip MD-SRM yapısı elde edilmektedir. SRM ve MD-SRM’lerde çok katmanlı bariyerler, d eksen ile q eksen arasındaki indüktans farkını artırmak ve relüktans tork bileşenini daha da geliştirmek için tercih edilmektedir [71]. MD-SRM’nin için d-q eksenindeki gerilim eşitlikleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir [72-74].

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r L_q i_q + \omega_r \psi_m \quad (2.2)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r L_d i_d \quad (2.3)$$

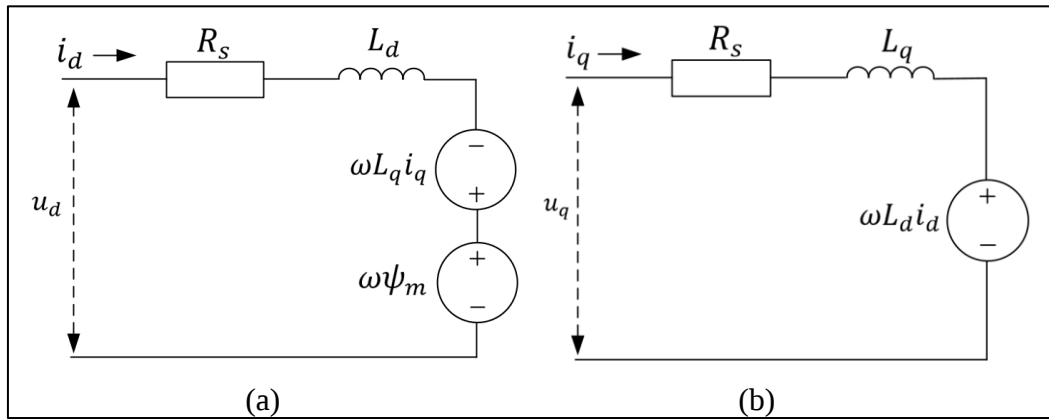
Yukarıdaki eşitlikte R_s stator sargı direncini, L_d ve L_q -d ve -q eksenlerindeki indüktansı, i_d ve i_q -d ve -q eksenlerindeki akımı, ψ_d -d eksenindeki akı bağlantısını, ψ_q eksenindeki akı bağlantısını, ω_r rotor mekanik hızını, ψ_m ifadesi rotorda bulunan mıknatısların manyetik akı bağlantısını ifade etmektedir.

Akı bağlantılarına ait eşitlikler aşağıdaki Eş. 2.4 ve Eş. 2.5’de verilmiştir.

$$\psi_d = L_d i_d \quad (2.4)$$

$$\psi_q = L_q i_q - \psi_m \quad (2.5)$$

MD-SRM’ye ait elektriksel eşdeğer devre Eş. 2.2- Eş. 2.5 kullanılarak aşağıdaki Şekil 2.9’daki gibi elde edilir.

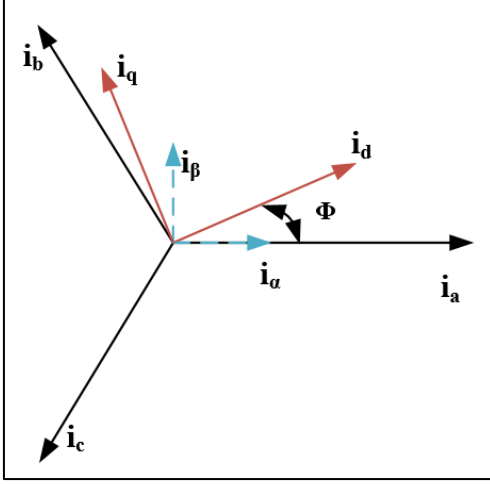


Şekil 2.9. MD-SRM eşdeğer devresi, (a) -d eksen, (b) -q eksen

2.6. Referans Düzlem Dönüşümleri

Üç fazlı elektrik makinaları genellikle akım ve gerilim denklemleri ile tanımlanırlar. Bu elektrik makinalarının davranışlarını tanımlayan diferansiyel denklemlerin katsayıları da zamanla değişkenlik göstermektedir. Böyle bir sistemin matematiksel modelinin oluşturulması, hareket halindeyken akı bağlantılarının, indüklenen gerilimlerin ve akımların sürekli olarak değiştiğinden dolayı sistem karmaşık bir yapıdadır. Böyle karmaşık bir sistem için değişkenleri ayrıştırmak ve tüm değişkenleri ortak bir referans çerçevesinde değerlendirerek zamanla değişen nicelikleri içeren denklemleri çözmek için matematiksel dönüşümler sıklıkla kullanılır. Mevcut çeşitli dönüşüm yöntemleri arasında,

iyi bilinen Clarke ve Park dönüşümleri elektrik makinalarının eksen dönüşümlerinde sıklıkla kullanılır [75,78].

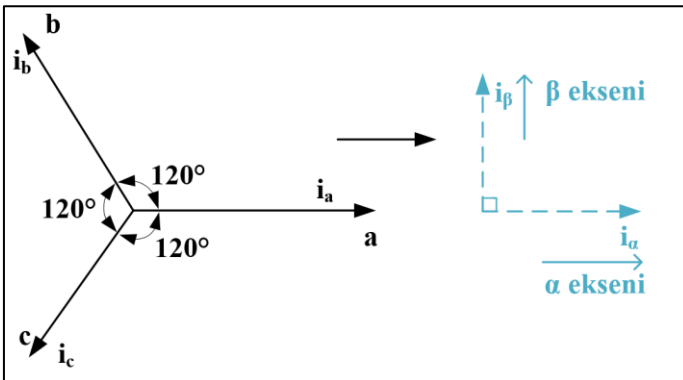


Şekil 2.10. Referans düzlemler arası ilişkinin gösterimi [76]

2.6.1. Clarke dönüşümü

3-Faz sabit eksenden 2-Faz sabit eksene dönüşüm Clarke dönüşümü ile sağlanır [75]. Şekil 2.11’de Clarke dönüşümünün referans düzlemler arası geçişi yer almaktadır.

Şekil 2.11’de a, b, c birbirinden 120° faz farklı 3-faz sabit referans düzleminin α ve β ’dan oluşan ve birbirinden 90° faz farklı 2-faz sabit referans düzlemine dönüşümü görülmektedir.



Şekil 2.11. Clarke dönüşümü [77]

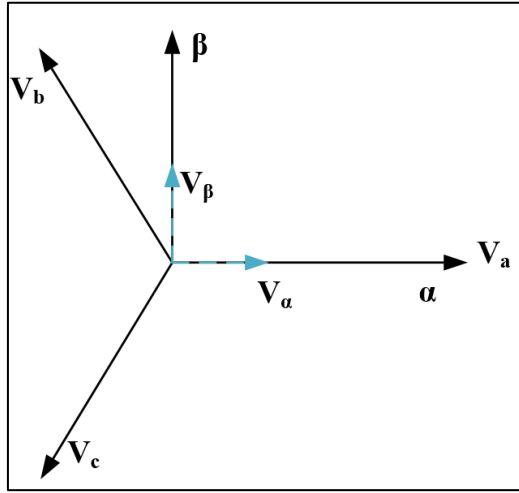
Clarke dönüşümünün genel matematiksel ifadesi Eş. 2.6 ve Eş. 2.7’de verildiği gibidir.

$$i_{\alpha} = \frac{2}{3}(i_a) - \frac{1}{3}(i_b + i_c) \quad (2.6)$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_b - i_c) \quad (2.7)$$

2.6.2. Ters clarke dönüşümü

2-Faz sabit eksenden 3-Faz sabit eksene dönüşüm Ters Clarke dönüşümü ile sağlanır[75] Bu dönüşümün referans düzlem üzerindeki gösterimi Şekil 2.12’de görüldüğü gibidir ve ilgili eşitlikler Eş.2.8 ve Eş. 2.9 ‘da verildiği gibidir.



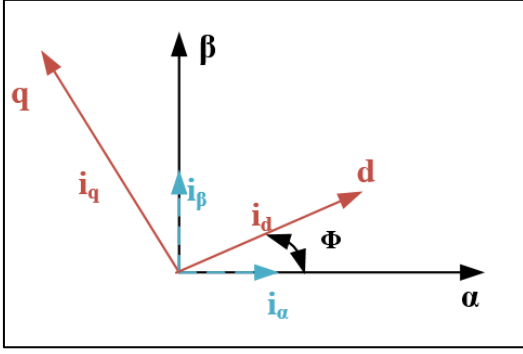
Şekil 2.12. Ters Clarke dönüşümü [77]

$$i_a = i_{\alpha} \quad (2.8)$$

$$i_b = -\frac{1}{2}i_{\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{\beta} \quad (2.9)$$

2.6.3. Park dönüşümü

Park dönüşümü ile dengeli 2-Faz ortogonal durağan sistemdeki vektörler, ortogonal dönen referans sistemine dönüştürülür. Bu dönüşümün referans düzlem üzerinde gösterimi Şekil 2.13’de verilmiştir.



Şekil 2.13. Park dönüşümü [77]

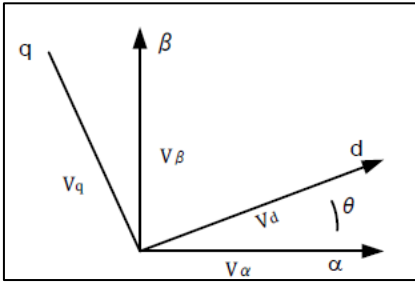
Burada θ rotor akı pozisyonudur ve yukarıdaki diyagramdan aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$i_d = i_\alpha * \cos(\theta) + i_\beta * \sin(\theta) \quad (2.10)$$

$$i_q = i_\beta * \cos(\theta) - i_\alpha * \sin(\theta) \quad (2.11)$$

4- Ters Park Dönüşümü

Ortogonal dönen referans sisteminden, dengeli 2-Faz ortogonal durağan sisteme Ters Park dönüşümü ile sağlanır.



Şekil 2.14. Ters Park dönüşümü [77]

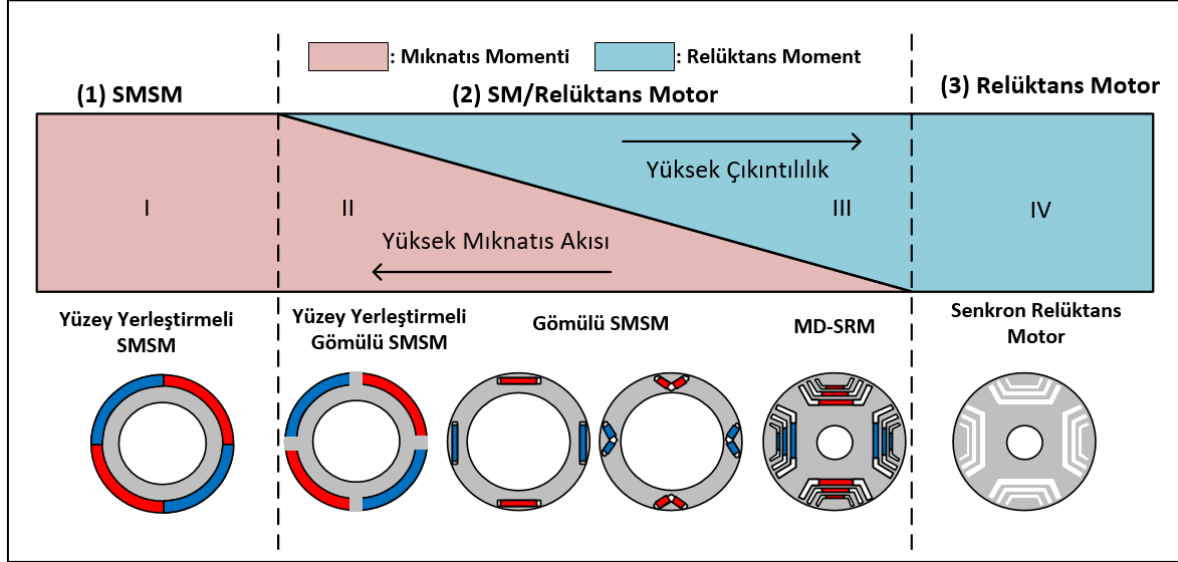
$$i_\alpha = i_d * \cos(\theta) - i_q * \sin(\theta) \quad (2.12)$$

$$i_\beta = i_d * \sin(\theta) + i_q * \cos(\theta) \quad (2.13)$$

2.7. Moment Üretimi

MD-SRM'ler doğaları gereği SRM ve SMSM'ler arasında bir yerdedir. Yüzey yerleştirmeli SMSM'ler yalnızca mıknatıs momenti üretirken, SRM'ler yalnızca relüktans

moment üretmektedirler. Rotor yapılarına göre motorların literatürde nasıl adlandırıldıkları aşağıdaki Şekil 2.15’de görülmektedir [111].



Şekil 2.15. Senkron makinelerin moment üretme kabiliyetlerine göre sınıflandırılması

MD-SRM’ler ise bu iki motor topolojisinden farklı olarak rotorlarında bulunan mıknatıslar sayesinde mıknatıs momenti hem de d ve q eksenlerindeki indüktans farkı sebebiyle relüktans moment üretebilmektedirler. Bu bağlamda moment üretim eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir [27].

$$T = \frac{3}{2}p \left((L_d - L_q)I_d I_q + \lambda_{km} I_q \right) \quad (2.14)$$

Burada T motorun toplam momentini, p kutup çifti sayısını ifade etmektedir. Toplam momenti oluşturan relüktans ve mıknatıs momenti ifadeleri aşağıdaki eşitliklerde görüldüğü gibi ayrılabilir [27,31].

$$T_{rel} = \frac{3}{2}p(L_d - L_q)I_d I_q \quad (2.15)$$

$$T_m = \frac{3}{2}p\lambda_{km}I_q \quad (2.16)$$

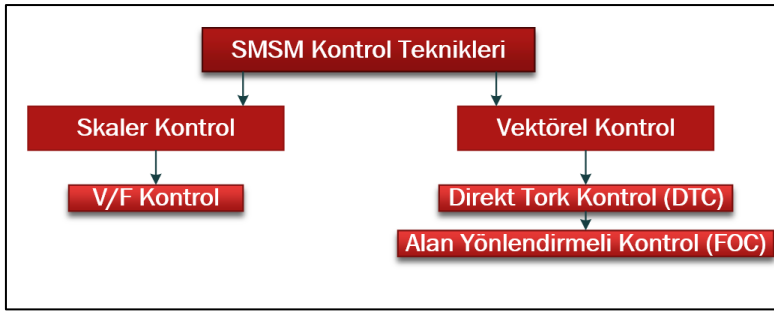
Burada T_{rel} relüktans momenti, T_m ise mıknatıs momenti akımı ifade etmektedir. Bu motorlarda moment dalgalanması da aşağıdaki eşitlikte olduğu gibi ifade edilebilir [39],

$$T_R = (T_{Maks} - T_{Min})/T_{ort} \quad (2.17)$$

Burada T_R moment dalgalanmasını, T_{Maks} momentin maksimum değerini, T_{Min} momentin minimum değerini ve T_{ort} momentin ortalama değerini ifade etmektedir.

2.8. Kontrol Yöntemleri

SMSM'lerin potansiyellerini tam anlamıyla kullanabilmek için doğru kontrol yöntemlerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır. SMSM'lerin kontrol edilmesi için geliştirilen yöntemler temel olarak, motorun dinamik performansını iyileştirmek, hassas tork, hız ve pozisyon kontrolü yapmak ve sistemin güvenilir bir şekilde çalışmasını amaçlamak üzere geliştirilmişlerdir. Bu doğrultuda SMSM sürücü sistemleri, iyi performans, hızlı dinamik yanıt, yüksek güvenilirlik ve verimlilik gibi doğal avantajları nedeniyle her tür yüksek güçlü AC sürücülerde giderek daha fazla uygulanmaktadır [79].



Şekil 2.16. SMSM'lerde kullanılan kontrol teknikleri [80]

Kontrol yöntemleri, motorun farklı çalışma koşullarında istenilen performansı göstermesine olanak tanıyarak, endüstriyel otomasyon, otomotiv ve enerji sektörü gibi alanlarda kritik bir rol oynar.

Bu bölümde, SMSM'lerde kullanılan başlıca kontrol yöntemleri detaylı bir şekilde ele sunulmuştur.

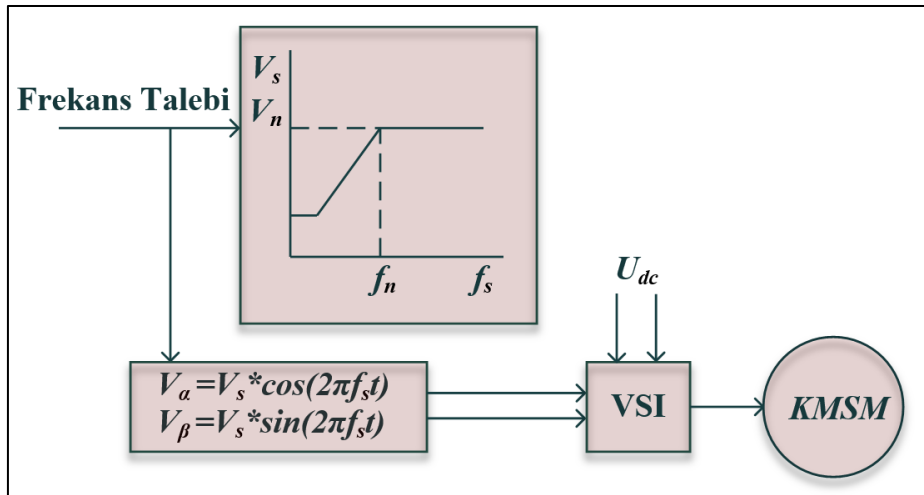
2.8.1. Skaler kontrol

Skaler kontrolde yalnızca motor giriş gerilimi ve frekansı kontrol edilmektedir. Bu sebeple skaler kontrolün elektrik motorlarında kullanılan en basit kontrol yöntemlerinden birisi olduğu söylenebilir.

FOC ve DTC gibi yüksek performanslı kontrol yöntemleri gelişmiş teknolojiler olarak kabul edilirken, skaler kontrol, genellikle sensörsüz ve düşük maliyetli sürücülerde tercih edilmektedir. Bu kontrol yöntemi, kurulu güç açısından çoğunluğu oluşturan pompalar, kompresörler ve havalandırma cihazları gibi uygulamalarda tercih edilmektedir [81].

Bu kontrol yönteminde motor, anma hızına ulaşana kadar stator akısı anma değerinde sabit tutulmaktadır. Stator akısının sabit olması durumu V/f oranı sabit tutularak sağlanmaktadır. Bu nedenle bu kontrol yöntemine V/f kontrol denmektedir [82].

V/f kontrolde, öncelikle sabit bir V/f oranı belirlenmektedir. Daha sonra kontrolöre istenilen hız referansı uygulanır. Kontrolöre uygulanan hız referansına göre V/f oranına bağlı kalarak motora uygulanacak gerilim belirlenir ve motor kontrolü sağlanmış olur [83].



Şekil 2.17. V/f kontrol blok diyagramı [82]

V/f kontrolde V/f oranı nominal değerden farklıysa, motor aşırı uyarılmış veya yetersiz uyarılmış durumda çalışabilir. İlk durum, gerilim sabitken frekans değeri nominal olandan düşük olduğunda veya frekansın sabit gerilimin daha yüksek olduğu durumlardaü durumlarda gerçekleşir ve bu duruma aşırı uyarım denir. Aşırı uyarım durumunda mıknatıslanma akısı da nominal değerinden yüksek olmaktadır. Bu durum mıknatısların demagnetizasyonu ile sonuçlanabilmektedir. İkinci durum ise yetersiz uyarım olarak ifade edilmektedir. V/f oranının anma değerinden daha düşük olması anlamına gelen bu durumda motorun anma yükünde yüklenememesi ile sonuçlanabilmektedir.

2.8.2. Vektörel kontrol

Vektör kontrolü, PMSM'de tork ve manyetik akı kanalları arasında ayrışmayı sağlar ve kanıtlar. Ancak, bu tür bir ayrışma, bir sürücü sistemi için tek performans gereksinimi olmak zorunda değildir. Performans ölçütleri, daha basit bir kontrol stratejisi, birim güç faktörü (UPF) operasyonu, karşılıklı manyetik akı bağlanmaları kontrolü, birim akım başına optimum tork, maksimum verimlilik kontrolü ve maksimum tork-hız sınır kontrolü olabilir. Bu performans ölçütleri, stator akımı faz kontrolü ile sağlanabilir ve birçok durumda tork ve manyetik akının ayrışık kontrolüne olanak sağlamaktadır [84].

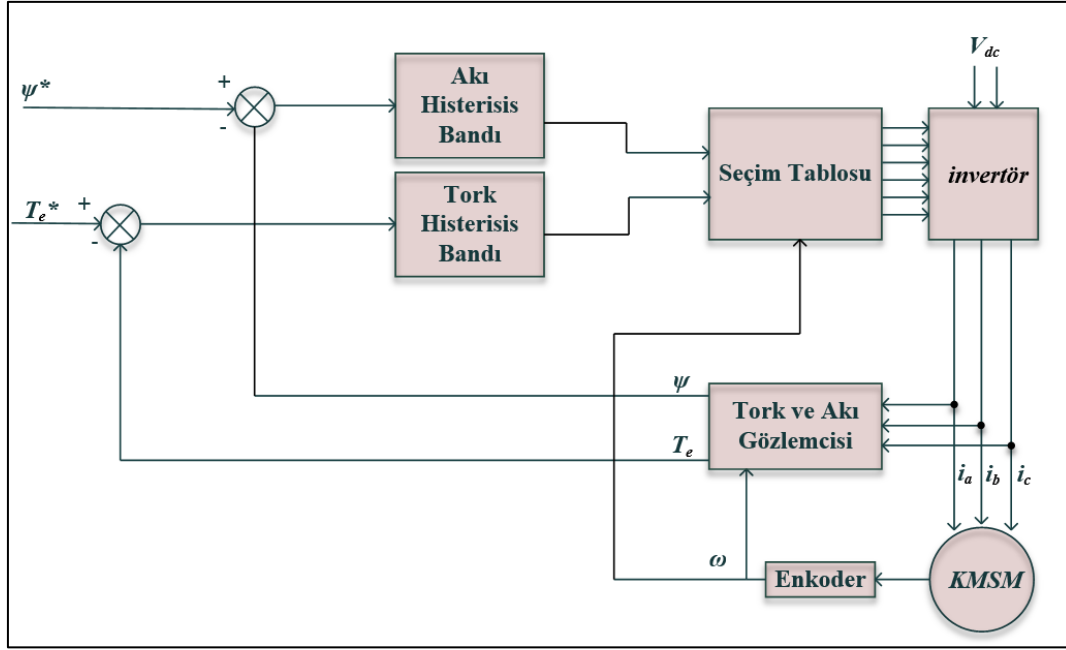
Doğrudan tork kontrolü (DTC)

MD-SRM'lerin ürettiği tork ifadesi relüktans ve mıknatıs torku olmak üzere iki bileşenden meydana geldiği Eş. 2.6'dan farklı olarak aşağıdaki gibi de ifade edilebilir [85].

$$T = K_1 ||\psi_s| ||\psi_r| \sin(\gamma) + K_2 ||\psi_s|^2 \sin(2\gamma) \quad (2.18)$$

Bu eşitlikteki K_1 ve K_2 sabitleri, motorun geometrik boyutları ve sargı konfigürasyonuna bağlı olarak belirlenmektedir. ψ_s ve ψ_r sırasıyla stator akısı ve rotor akısını ve γ ise stator akısı ile rotor akısı arasındaki açıyı ifade etmektedir. Stator akısı ve rotor akısının büyüklüklerinin sabit olması durumunda, tork yalnızca γ açısına bağlı olarak değişmektedir. DTC, uygun voltaj vektörünü stator sargılarına uygulayarak stator akısının büyüklüğünü ve açısını ayarlayarak istenen torku elde etmektedir [85]. Bir başka şekilde ifade etmek gerekirse DTC, invertör ile beslenen alternatif akım motorlarının tork ve manyetik akı üretme yeteneklerini kullanan bir kontrol yöntemidir [86].

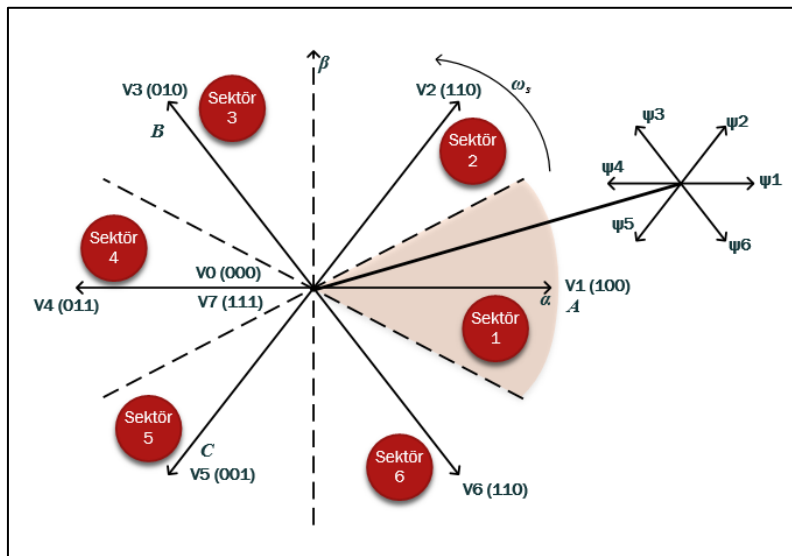
DTC'nin temel çalışma prensibinde, elektromanyetik tork ve stator akısı için iki ayrı histerezis kontrolörü bulunmaktadır. Motor tork ve stator akı büyüklüğünü kontrol etmek için histerezis kontrolünün kullanıldığı geleneksel DTC sistemini gösteren blok diyagram aşağıdaki Şekil 2.18'de sunulmuştur [87, 88].



Şekil 2.18. DTC blok diyagramı

DTC içerisinde tork histerezis kontrolörü, üç seviyeli bir karşılaştırıcıdan meydana gelirken, akı histerezis kontrolörü ise iki seviyeli bir karşılaştırıcıdır [88]. Ayrıca, DTC stator akısının ve torkun tahmin edilmesi gerekmektedir [89].

Aşağıdaki Şekil 2.19, $\alpha\beta$ düzlemi altı farklı sektöre bölünerek düzlemdeki stator akısını ve invertörün farklı durumlarının tork ve stator akısı değişimi üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 2.19. Seçilen gerilim vektörünün, stator akısı modülü ve tork üzerindeki etkisi [86]

Histerezis kontrolörlerinin çıkış sinyallerinin anlamı aşağıdaki Eş. 19'daki gibi tanımlanabilir [88, 89]:

$$H_T = \begin{cases} +1: & T_e \uparrow \\ 0: & T_e \rightarrow \\ -1: & T_e \downarrow \end{cases}, \quad H_\psi = \begin{cases} +1: & \psi_s \uparrow \\ -1: & \psi_s \downarrow \end{cases} \quad (2.19)$$

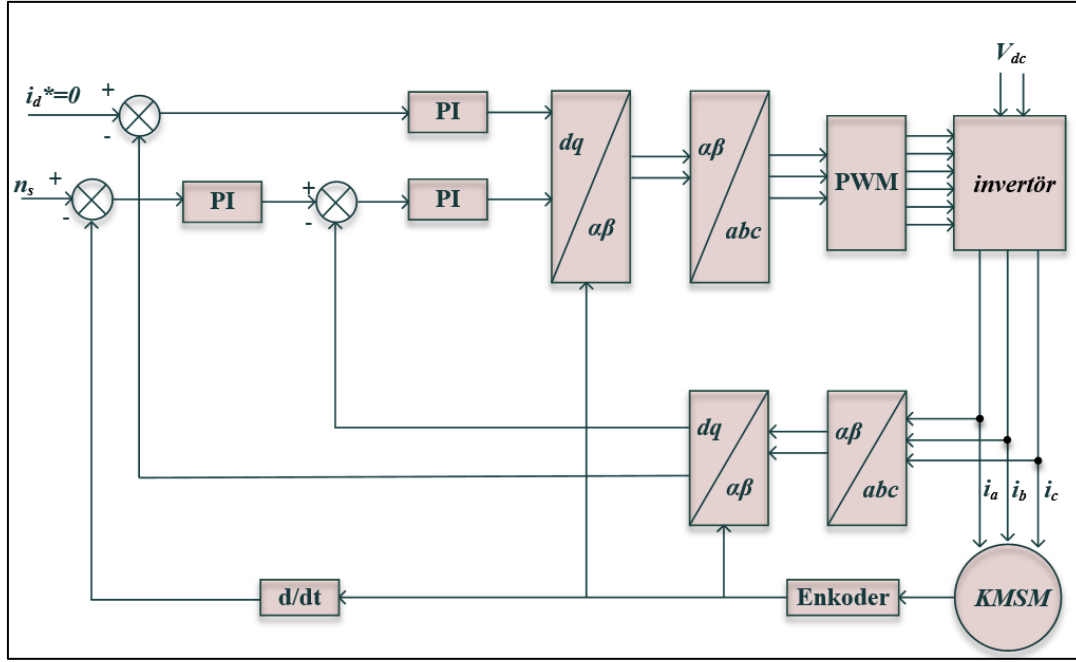
Çizelge 2.2. DTC seçim tablosu [86, 89]

ψ_s	T_e	1	2	3	4	5	6
1	1	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	0	V7	V0	V7	V0	V7	V0
	-1	V6	V1	V2	V3	V4	V5
-1	1	V3	V4	V5	V6	V1	V2
	0	V0	V7	V0	V7	V0	V7
	-1	V5	V6	V1	V2	V3	V4

Örneğin, 1. sektör için, V2 hem stator akısını hem de torku artırabilir.

Alan yönelimli kontrol (FOC)

Alan Yönelimli Kontrol (FOC) SMSM'lerde tork ve akıyı basitleştirerek her iki parametrenin de hassas kontrolünü sağlayan ve verimliliği artıran gelişmiş bir kontrol yöntemidir. Bu yöntem, stator akımlarını Clark ve Park dönüşümlerinden faydalanarak sabit bir referans düzleminden döner bir referans düzlemine dönüştürerek motorun manyetik alanlarını hizalayarak tork üretimini maksimize etmektedir [90]. Bu sebeple son yıllarda, SMSM'lerde FOC yönteminin kullanılması birçok araştırmacının odak noktası olmuştur [91].



Şekil 2.20. FOC blok diyagramı [89, 92, 93]

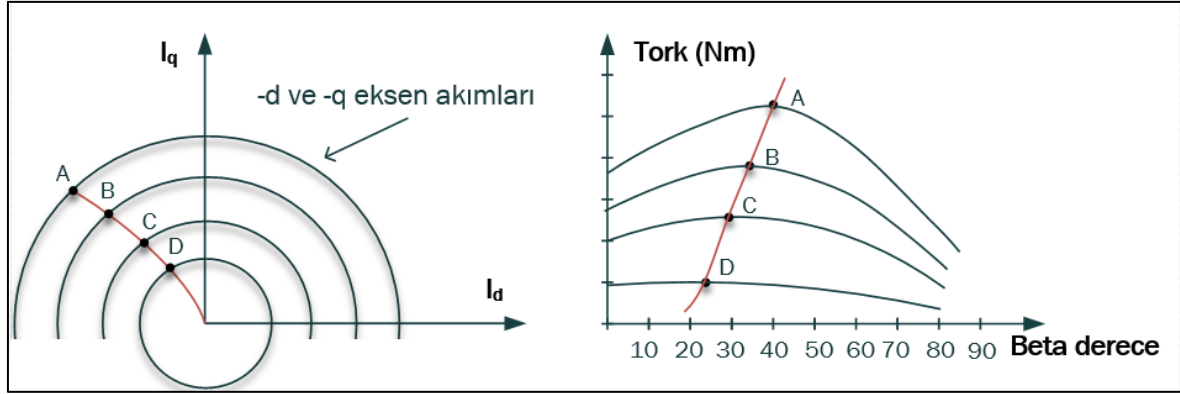
2.9. Kontrol Stratejileri

YY-SMSM'lerde relüktans tork bileşeni olmadığından, tork yalnızca q eksen akımı tarafından belirlenmektedir. Ancak, MD-SRM'lerde tork üretiminde relüktans tork önemli bir rol oynamaktadır. Eş 2.18'de de görüldüğü gibi motorun ürettiği toplam tork ifadesinde q eksen akımı ve d eksen akımı belirleyicidir ve motorun aynı tork değerini üretebileceği birçok kombinasyonu mümkündür. Bu sebeple motor kontrol algoritmaları q eksen akımını ve d eksen akımını kontrol etmek için farklı stratejiler kullanmaktadır. Bu bölümde en yaygın olarak kullanılan kontrol stratejileri sunulmuştur.

2.9.1 Amper başına maksimum tork (MTPA)

Amper Başına Maksimum Tork (MTPA) terimi, verimli bir elektrik tahrik sisteminde elektriksel sınırlar ve verimliliği maksimize etmek amacıyla ortaya çıkmıştır [94]. Bir başka deyişle MTPA kaynak akımını minimize ederken motor torkunu maksimize etmeye çalışan bir optimizasyon problemi olarak ifade edilebilir.

Şekil 2.21'de gösterildiği gibi, akım-tork karakteristiklerini karşılayan bir dizi akım değeri seçilir ve bu değerler, optimum akım altında aynı torku üretir, böylece akımlarla ilişkili kayıpları azaltır.



Şekil 2.21. MTPA gösterimi [95]

2.9.2. $I_d=0$

$I_d=0$ kontrol stratejisinin avantajı, elektromanyetik tork ile q eksen akımı arasında doğrusal bir ilişki sağlamasıdır. Relüktans moment bileşeni olmadığından genellikle YY-SMSM’lerde kullanılmaktadır [96]. d eksen akımının dahil edilmediği tork eşitliği aşağıda verilmiştir [97],

$$T = \frac{3}{2}p(\lambda_{km}I_q) \quad (2.20)$$

$I_q = I_s$ ve $I_d = 0$ olması durumu YY-SMSM’nin maksimum tork üretecek şekilde kontrol etmenin en uygun yaklaşımı olduğu söylenebilir [97].

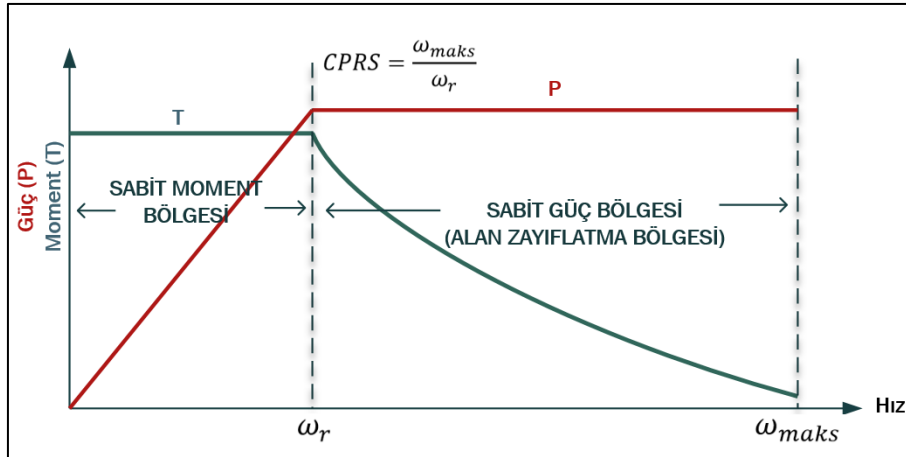
2.9.3. Alan zayıflatma

Elektrik motorunun yüksek maksimum hızda çalışabilmesi, güç yoğunluğunun artmasına ve toplam ağırlığın azalması ile sonuçlanmaktadır. Ancak, bu durumda EA ve HEA’larda motor hızının azaltılması için daha yüksek redüksiyon yapılmasını gerekmektedir. Elektrik motorunun hızının artması ile birlikte zıt EMK’da artmaktadır. Bu durumu aşmanın iki temel yolu vardır. Bunlardan birincisi daha düşük hava aralığı manyetik akısına sahip bir tasarım gerçekleştirmektir. Ancak bu durumda motorun birim güç yoğunluğu düşük olacaktır. İkinci seçenek ise DA bara gerilim seviyesini yükseltmektir. Bu durum güncel olarak kullanılmakla birlikte günümüzde 600 V DA ve üzeri gerilim seviyelerinin kullanıldığı söylenebilir [50,51].

Sabit Güç Hız Aralığı (CPRS), tahrik motorları için kritik bir performans parametresi olmakla birlikte manyetik akının zayıflatılması yeteneğini ifade etmektedir. Bir SMSM'nin alan zayıflatma kabiliyeti ise genellikle çıkıntılılık oranı ile aşağıdaki eşitlikte verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\xi = L_d/L_q \quad (2.21)$$

Burada ξ çıkıntılılık oranını temsil etmektedir. ξ değeri relüktans moment üretme kabiliyetini ifade ettiğinden dolayı, ξ değerinin yüksek olması daha geniş bir CPRS anlamına gelmektedir [34]. CPRS aynı zamanda sabit güç bölgesinin uzunluğunu ifade etmektedir. Klasik olarak sabit moment ve güç bölgesinin CPRS ile ilişkisi aşağıdaki Şekil 2.11'de görüldüğü gibidir [64].



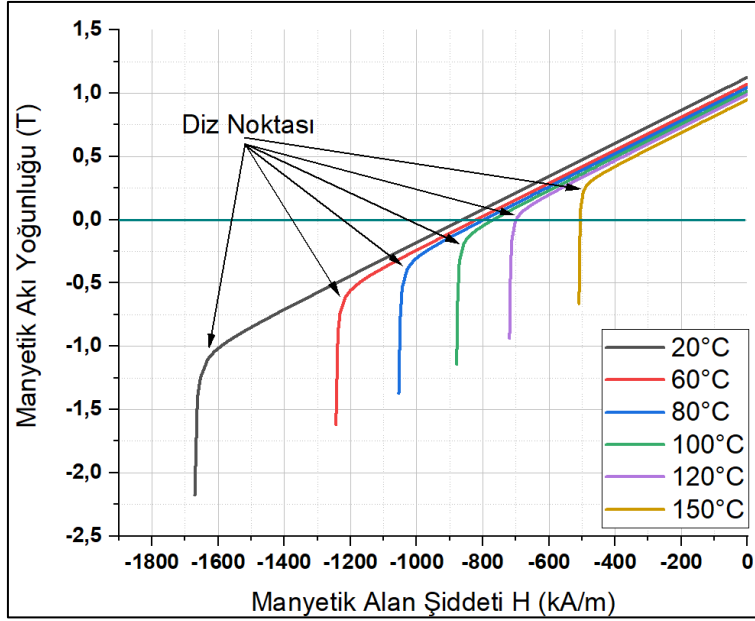
Şekil 2.22. Sabit moment ve güç bölgelerinin gösterimi

Elektrik motorunun maksimum çalışma hızındaki sınırlamalar, motorun ve sürücünün yüksek frekansta çalışması sonucu kayıplarının artmasından ve mekanik tasarım limitlerinden kaynaklanmaktadır. Mevcut EA ve HEA'larda kullanılan tahrik motorları için CPRS değerinin en az 3–4 aralığında olması gerekmektedir [46].

2.10. Demagnetizasyon

Rotorun mıknatıs bulunan elektrik motorlarında mıknatısların özelliklerini kaybetmesi durumu demagnetizasyon olarak ifade edilmektedir. Mıknatıslar yüksek sıcaklık ve yüksek giderici kuvvet olarak iki durumda demagnetize olmaktadır. Bir motorda mıknatısın

demagnetize olması durumunda motorun çıkış gücü düşmekte ya da aynı çıkış gücü için daha yüksek faz akımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple rotorunda mıknatıs bulunan motorların demagnetizasyon karakteristikleri motor performansı açısından incelenmesi gereken önemli bir parametredir. Bu çalışmada kullanılan N30SH mıknatısına ait B-H eğrisi farklı sıcaklık değerlerinde aşağıdaki Şekil 2.23’de görülmektedir.



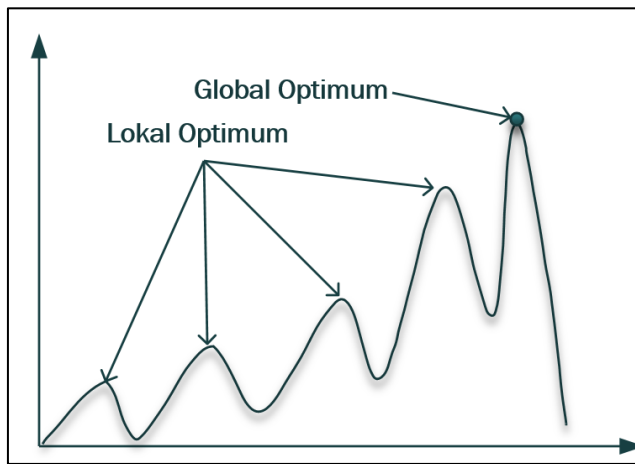
Şekil 2.23. N30SH mıknatısına ait B-H Eğrisi

Şekil 2.23 incelendiğinde B-H eğrisinin kırılma noktalarının sıcaklığa bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Kırılma noktaları aynı zamanda mıknatısın demagnetizasyon limitini de belirlemektedir. Mıknatısların çalışma noktasının B-H eğrisinde verilen diz noktasının altında olması durumunda mıknatıslarda geri dönüşü olmayan enerji kayıpları meydana gelmektedir [65].

3. OPTİMİZASYON ALGORİTMASI VE AMAÇ FONKSİYONUNUN BELİRLENMESİ

Elektrik makinalarının tasarım süreci lineer olmayan birçok problemin eş zamanlı çözümünü gerektirmektedir. Bu süreci parametrik analizler ile gerçekleştirmek uzun zamanlar alabilmektedir. Süreci kısaltmak ve en uygun çözüme ulaşmak için farklı optimizasyon algoritmaları elektrik makinalarını tasarım optimizasyon sürecinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Optimizasyon sürecinde optimizasyon algoritması kadar amaç fonksiyonunun doğru belirlenmesinin de optimum sonuca ulaşmak için önemlidir. Optimizasyon sürecinde kullanılan amaç fonksiyonu, tasarım sürecinde ulaşılması istenen hedefleri belirleyen matematiksel bir ifade olarak tanımlanabilir. Elektrik makinalarının optimizasyon sürecinde verimin artırılırken maliyetin azaltılması gibi birbiri ile çelişen ve çözülmesi gereken birçok problem bulunabilmektedir. Ayrıca bu problemler, elektrik motorunun tasarım isterlerine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Bu sebeple her bir tasarım optimizasyon sürecinde tasarım isterlerine uygun bir şekilde amaç fonksiyonunun belirlenmesi optimum tasarımın elde edilebilmesi açısından önemli bir husustur. Amaç fonksiyonunun uygun olarak belirlenmemesi ya da yeteri kadar çözüm yapılmaması durumunda optimum çözüm gibi gözükse ancak optimum olmayan sonuçlar ile karşılaşılabilir.

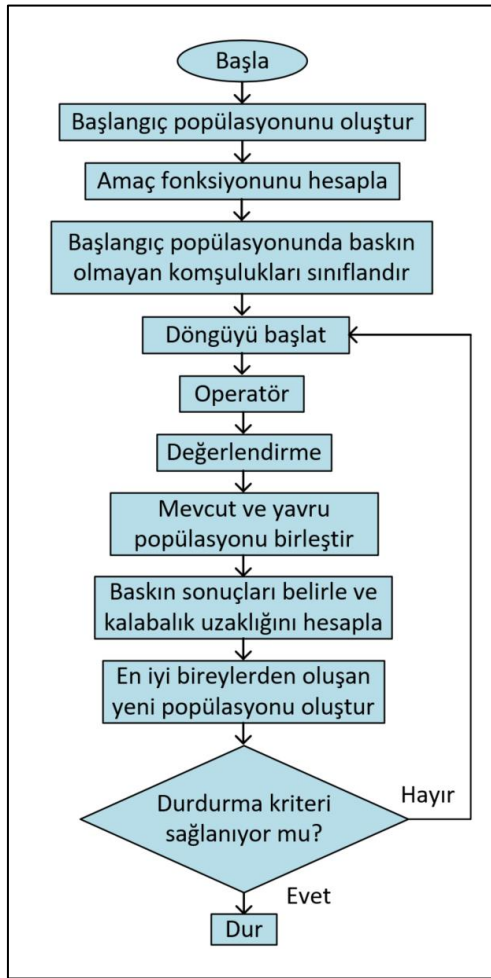


Şekil 3.1. Lokal ve global optimum noktaların gösterimi

Bu sebeple bu bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan optimizasyon algoritması açıklanarak kullanılan amaç fonksiyonunun elde edilme aşamaları detaylı olarak sunulmuştur.

3.1. Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması II (NSGA-II)

Tez çalışması kapsamında, JMAG Designer 22.1 içerisinde gömülü olarak bulunması ve hesaplama karmaşıklığının azlığı, hızlı ve verimli olması gibi avantajlarından dolayı tasarım optimizasyon sürecinde NSGA-II kullanılmıştır [98]. NSGA-II, evrimsel ve elitist bir genetik algoritmadır [66]. NSGA-II'ye ait akış şeması aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 3.2. NSGA II akış şeması [99-100]

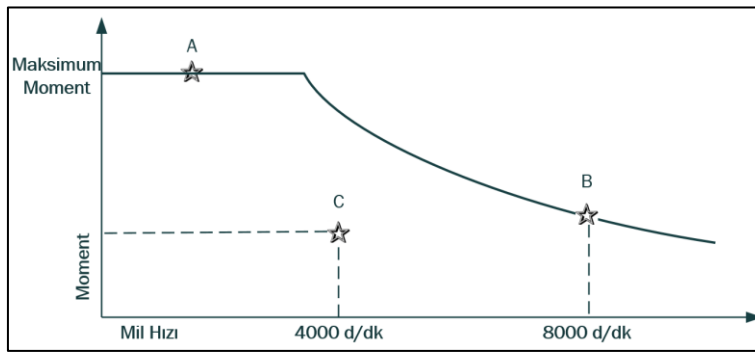
Bir sonraki neslin popülasyonu, yavruların ve önceki neslin kombinasyonu kullanılarak bulunur. Popülasyon, her üyenin maliyet fonksiyonları ve kalabalık mesafeleri değerlerini karşılaştırarak baskın olmayan şekilde sıralanır. Bir sonraki nesil, önceki nesil tarafından

oluşturulan komşuluğu kullanarak mutasyona uğrattırılır. Bu nedenle, her nesilde Pareto komşuluğu, daha optimum bir bölgeye doğru hareket etmektedir.

Optimizasyon sürecinde nesil sayısı arttıkça çözümün doğruluğu artırmaktadır ancak bu durum çözüm süresini de arttırmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada tasarım değişkenleri ve önceden tanımlanan amaç fonksiyonu kriterlerine ek olarak, popülasyon büyüklüğü 25 ve 40 nesli kapsayacak şekilde ayarlanmıştır.

3.2. Amaç Fonksiyonunun Belirlenmesi

Tasarım optimizasyon sürecinde amaç fonksiyonu en az kullanılan optimizasyon algoritması kadar önem arz etmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar değerlendirildiğinde her bir çalışmada farklı amaç fonksiyonu kullanıldığını söylemek mümkündür. Bu sebeple tasarım kriterlerine ulaşmak için amaç fonksiyonunun belirlenmesinin kritik derecede önemli olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmada, geliştirilecek motorun elektrikli araçlarda kullanılabilmesi için toplamda 5 adet amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Amaç fonksiyonları belirlenirken bir tahrik motorunun sahip olması gereken özellikler dikkate alınmıştır. Belirlenen amaç fonksiyonlarının optimum sonuca etkisini tespit etmek amacıyla analizler 5 kez tekrar edilmiş, her tekrarda bir amaç fonksiyonu ilave edilerek son analizde nihai amaç fonksiyonu ile optimizasyon süreci tamamlanmıştır.



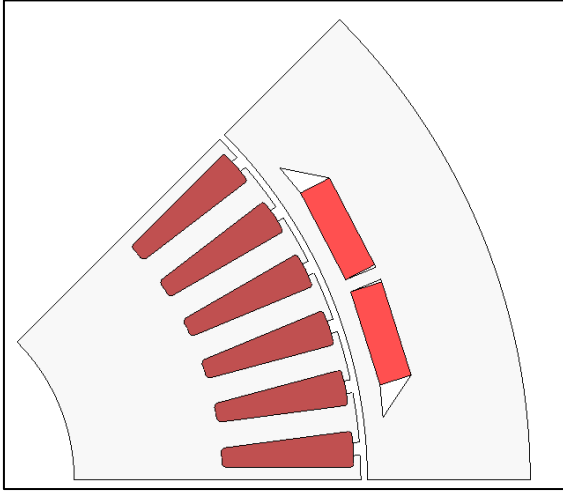
Şekil 3.3. Amaç fonksiyonu noktaları

Elektrikli araçlarda kullanılacak tahrik motorlarını düşük hızlarda yüksek maksimum moment ihtiyacını karşılama gerekliliği vardır. Bu sebeple öncelikle Şekil 3.3'de görülen A noktasında momentin maksimize edilmesi amaçlanmıştır.

Nadir toprak element malzemelerin fiyat istikrarsızlığı sebebiyle mıknatıs tüketiminin azaltılması literatürde önemli bir konudur. Bundan dolayı ikinci amaç fonksiyonuna A noktasında minimum mıknatıs kullanılarak maksimum moment üreten geometrinin elde edilmesi amacıyla mıknatıs tüketiminin minimize edilmesi ilave edilmiştir.

Üçüncü adımda mevcut amaç fonksiyonuna, elektrik motorunun yüksek hızda yüksek güç üretilmesi için B noktasındaki momentin iyileştirilmesi eklenmiştir.

Elektrikli araçlarda menzil doğrudan kullanılan tahrik motorunun verimliliği ile ilişkilidir. Bu sebeple, mıknatıs tüketimi ve moment üretme kabiliyeti iyileştirilen tasarımın aynı zamanda geniş bir hız ve moment aralığında yüksek verimli olması istendiğinden dolayı C noktasındaki motor veriminin maksimize edilmesi amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir. Son olarak elde edilen tasarımın moment dalgalanmasının da minimize edilmesi amaç fonksiyonuna eklenerek 5 adet eşitlikten oluşan bir amaç fonksiyonuna ulaşılmıştır.



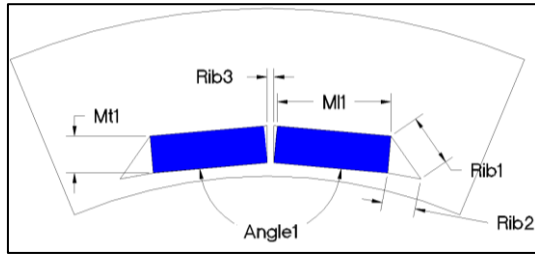
Şekil 3.4. Amaç fonksiyonunun belirlenmesinde kullanılan örnek tasarım

Her bir amaç fonksiyonunda aynı başlangıç motor modeli kullanılmış olup motora ait parametreler aşağıdaki Çizelge 3.1’de verilmiştir. Ayrıca, her bir amaç fonksiyonunda yapılan optimizasyon çalışmalarında aynı kısıtlar ve tasarım değişkenleri kullanılmış olup motora ait görsel Şekil 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Motora ait temel parametreler

Stator oluk sayısı	48
Kutup sayısı	8
Nüve malzemesi	M270-35A
Sipir sayısı	3
Adım sayısı	5
İletken	18x0,90 mm
Sarım tipi	Yarım kalıp
Paralel kol sayısı	1
Bağlantı	Yıldız
Stator dış çapı	148
Stator iç çapı	50
Rotor dış çapı	200
Rotor iç çapı	150

Tasarım optimizasyon sürecinde örnek tasarım motora ait optimizasyon sürecinde kullanılan tasarım değişkenleri Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Örnek V tipi motora ait tasarım değişkenleri

Tasarım parametrelerinin başlangıç tasarımındaki değerleri ve optimizasyon çalışması süresinde alabilecekleri en az ve en çok değerler aşağıdaki Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Örnek V tipi motor tasarım parametreleri değer aralığı

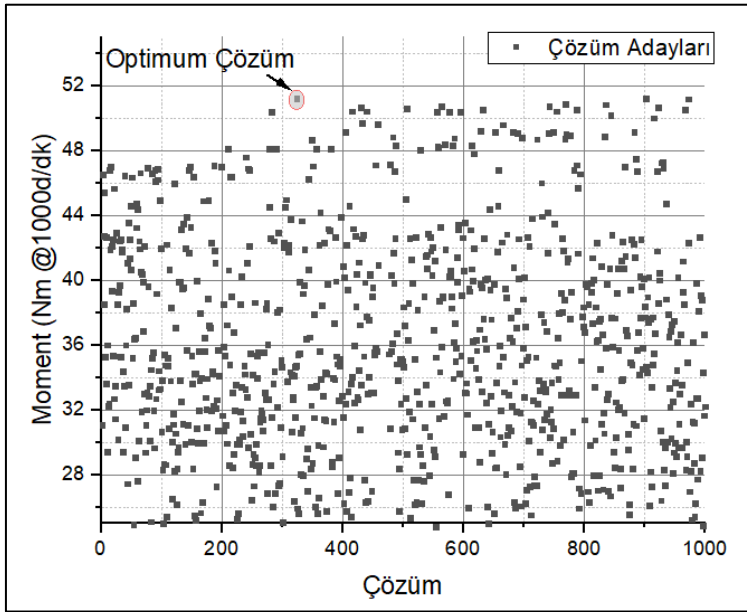
Parametre	V-Tipi		
	Başlangıç	En az değer	En çok değer
Mt1	5	5	10
Ml1	15	12	20
Rib1	5	4	10
Rib2	1	0.3	1
Rib3	3	0.2	3
Mc	3	2.5	6
Angle1	95	95	140

3.2.1. Amaç fonksiyonu-1

Çalışma başlangıcında öncelikle Şekil 3.3’de verilen A noktasındaki momentin yükseltilmesi hedeflenmiştir. Tahrik motorlarının yüksek ivmelenme, yük altında kalkış yapabilme ve rampa performansı açısından düşük hızlarda yüksek moment üretmesi beklenmektedir. Bu sebeple V tipi geometrideki başlangıç motor modeline uygulanan ilk amaç fonksiyonu aşağıdaki Eş. 3.1’de verilmiştir.

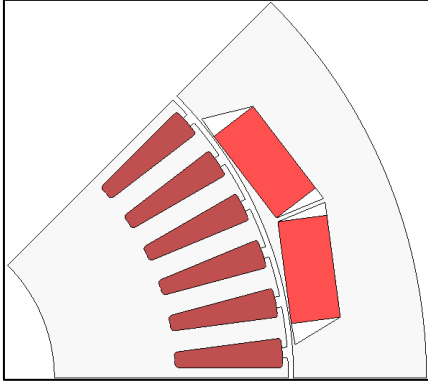
$$\text{Maksimizasyon: } \{ f_1(x) = T_{@1000 \text{ d/dk}} \quad (3.1)$$

Gerçekleştirilen optimizasyon çalışması süresince her bir çözümde elde edilen 1000 d/dk hızdaki moment değerleri aşağıdaki Şekil 3.6’da görülmektedir.



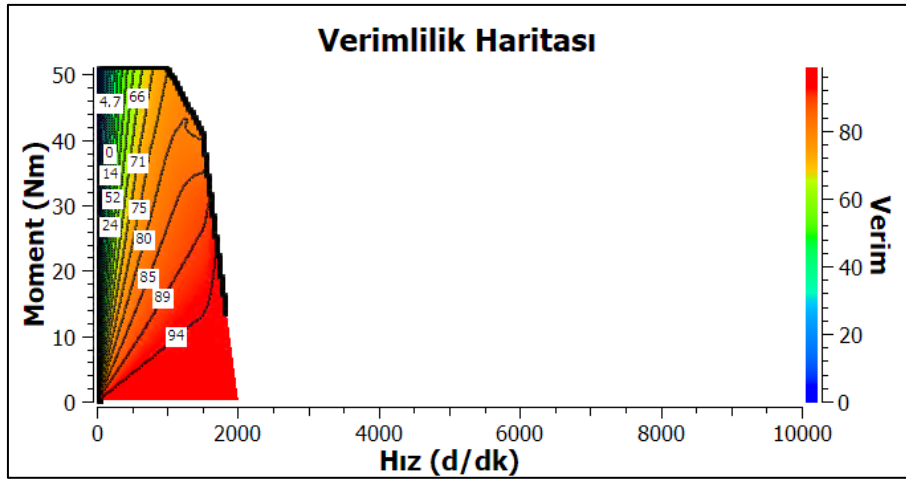
Şekil 3.6. Amaç fonksiyonu-1 için optimum çözüm adayları

Burada tek bir amaç fonksiyonu olduğundan pareto optimum sonuç bulunmamaktadır. Bu çalışmada amaç yalnızca momenti arttırmak olduğundan, 1000 d/dk hızda 51.09 Nm ile en yüksek momenti veren sonuç optimum sonuç olarak seçilmiştir. Optimum sonuca ait rotor geometrisi Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Amaç fonksiyonu-1'e göre optimum aday tasarım

İlk olarak kullanılan amaç fonksiyonu motorun yalnızca düşük hızlardaki momentini yükseltmeyi amaçladığı için mıknatıs miktarını artırarak amaca ulaştığı görülmektedir.



Şekil 3.8. Amaç fonksiyonu-1 kullanılarak elde edilen optimum tasarıma ait verimlilik haritası

Optimum sonuca ait verimlilik haritası incelendiğinde, motorun amaç fonksiyonunda belirtildiği gibi başlangıç modelinde 31.34 Nm olan düşük hızdaki momentinin 51.09 Nm'ye arttırıldığı görülmektedir. Ancak bu optimizasyon çalışmasında yüksek hız performansı ile ilgili bir amaç olmadığından motorun maksimum 2000 d/dk hıza çıkabildiği görülmektedir.

3.2.2. Amaç fonksiyonu-2

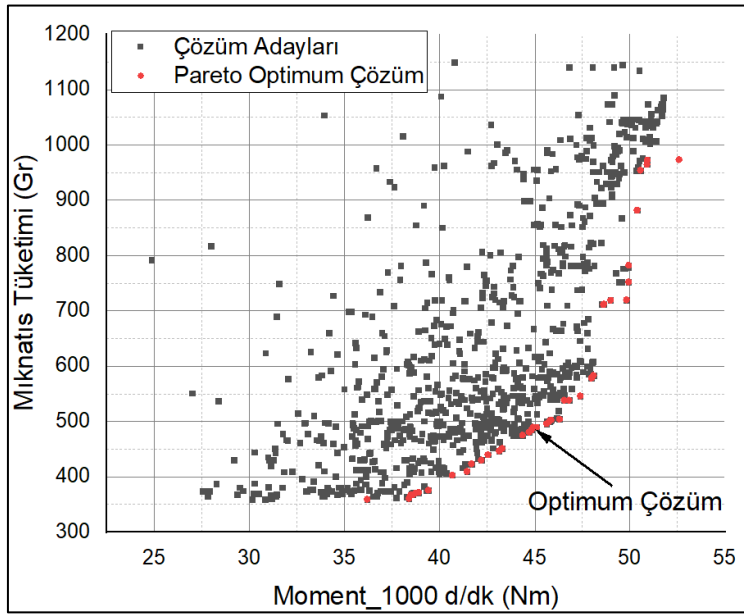
Bir elektrik motorunun yalnızca momentinin yükseltilmesi çözülmesi kolay bir problemdir. Ancak, bu çalışmanın da amaçlarından birisi olan en az mıknatıs tüketimi ile en çok

momenti üreten geometrinin elde edilmesi için mıknatıs miktarının da azaltılması gerekmektedir. Bu sebeple Eş. 3.2’de görüldüğü gibi amaç fonksiyonuna mıknatıs hacminin en aza indirilmesi de eklenerek analizler tekrarlanmıştır.

$$\text{Maksimizasyon: } \{ f_1(x) = \text{Moment}_{@1000 \text{ d/dk}} \quad (3.2)$$

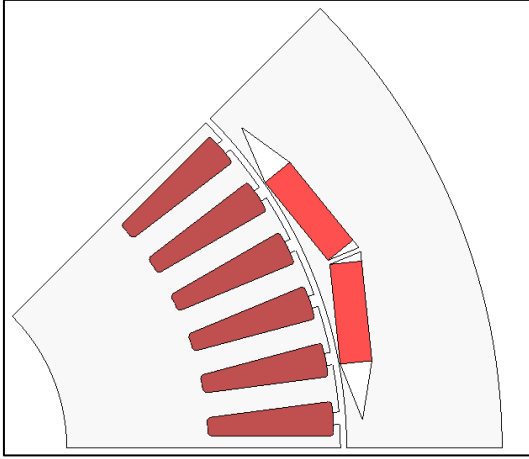
$$\text{Minimizasyon: } \{ f_1(x) = \text{Mıknatıs}_{\text{Hacim}}$$

Yeni amaç fonksiyonu birbirine zıt iki problemin çözümünü gerektirmektedir. Bu sebeple bundan sonraki amaç fonksiyonları ile gerçekleştirilen çalışmalarda optimum çözüm seçilirken pareto komşuluk yönteminden faydalanılmıştır.



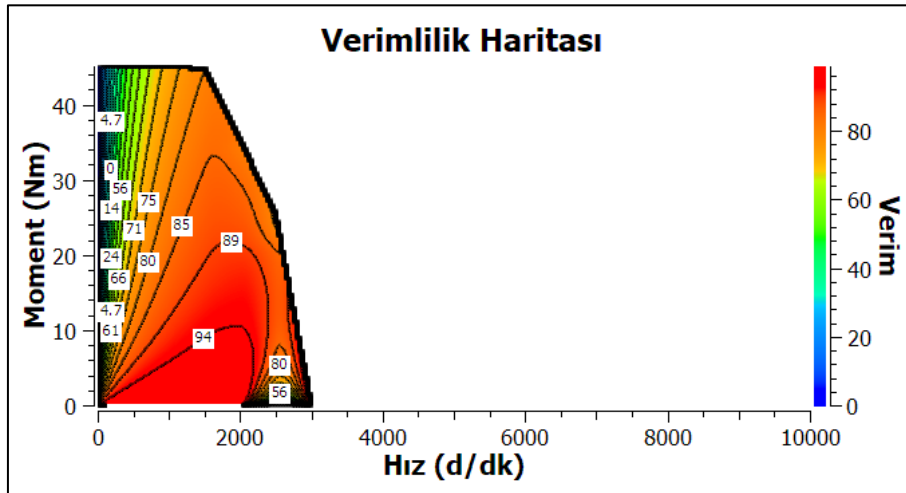
Şekil 3.9. Amaç fonksiyonu-2 için pareto optimum çözüm adayları

Şekil 3.9. incelendiğinde Eş. 3.2’de verilen amaç fonksiyonuna uygun şekilde motorun düşük hızlardaki momenti artırılırken mıknatıs tüketiminin de dikkate alındığı görülmektedir. Optimum sonuca ait motor geometrisi aşağıdaki Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10. Amaç fonksiyonu-2'ye göre optimum aday tasarım

Eş. 3.1'de verilen amaç fonksiyonu ile elde edilen tasarım 1 Nm maksimum moment üretimi için 20.78 gram mıknatıs tüketimine ihtiyaç duyarken, mıknatıs miktarının da en aza indirilmesini içeren Eş. 3.2'deki amaç fonksiyonu ile elde edilen tasarım 1 Nm maksimum moment üretimi için 10.85 gr mıknatıs tüketimine ihtiyaç duymaktadır.



Şekil 3.11. Amaç fonksiyonu-2 kullanılarak elde edilen optimum tasarıma ait verimlilik haritası

Optimum tasarıma ait sonuçlar değerlendirildiğinde, başlangıç tasarımına göre momentin %43.9 oranında artarken mıknatıs tüketiminin yalnızca %10.1 arttığı görülmektedir.

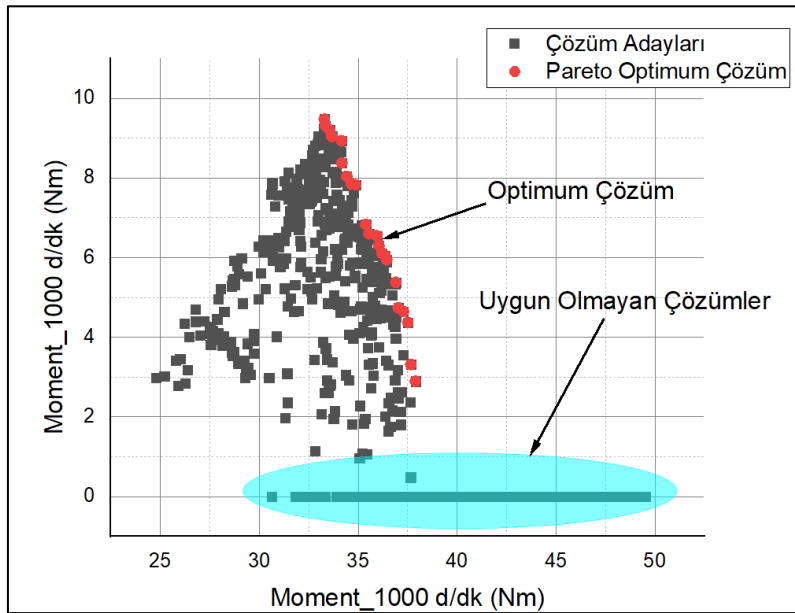
3.2.3. Amaç fonksiyonu-3

Elektrikli araçlarda kullanılan motorların yüksek hızlarda yüksek moment üretmesi yani dolayısıyla geniş sabit güç bölgesine sahip olması beklenmektedir. Bu sebeple amaç fonksiyonuna 8000 d/dk hızda momentin arttırılması da eklenmiştir. Bu durumda amaç fonksiyonu aşağıdaki halini almıştır.

$$\text{Maksimizasyon: } \begin{cases} f_1(x) = \text{Moment}_{@1000 \text{ d/dk}} \\ f_2(x) = \text{Moment}_{@8000 \text{ d/dk}} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\text{Minimizasyon: } \{ f_1(x) = \text{Mıknatıs}_{\text{Hacim}} \}$$

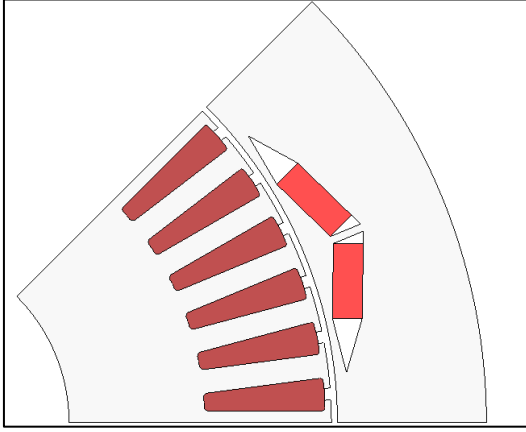
Yukarıda verilen amaç fonksiyonunun uygulanması ile birlikte elde edilen çözümün grafiği aşağıdaki Şekil 3.12’de verilmiştir. Burada, 1000 d/dk ve 8000 d/dk da motorun ürettiği moment değerlerinin pareto optimumu seçilmiştir.



Şekil 3.12. Amaç fonksiyonu-3 için pareto optimum çözüm adayları

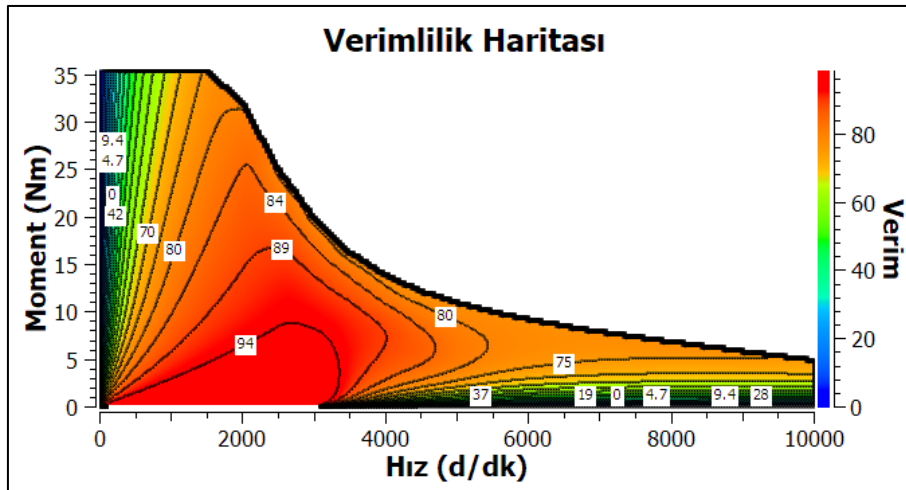
MD-SRM’lerde düşük hızlarda yüksek moment için mıknatısların hava aralığına yaklaştırılmak suretiyle hava aralığı manyetik akısı arttırılmaktadır. Böylece alan zayıflatma bölgesinin başladığı hız düşmekte ancak maksimum moment artmaktadır. Elektrik motorunun yüksek hızlara ulaşabilmesi için ise hava aralığı akısının daha düşük olması, mıknatısın hava aralığından uzaklaşması veya akı bariyerleri ile manyetik akının zayıflatılması gerekmektedir. Bu sebeple pareto optimum çözüm seçilirken bu iki

parametre dikkate alınmış ayrıca optimum çözümün mıknatıs tüketim miktarının 600 gr altında olması şartı dikkate alınmıştır. Belirlenen şartları sağlayan motor geometrisi Şekil 3.13’de sunulmuştur.



Şekil 3.13. Amaç fonksiyonu-3'e göre optimum aday tasarım

Bir önceki amaç fonksiyonu ile elde edilen tasarıma göre mıknatıs tüketimi 1 Nm maksimum moment üretimi için 10.85 gram mıknatıs tüketiminden 10.51 grama düşmüştür. Ayrıca optimum tasarım 8000 d/dk hızda 6.83 Nm moment ürettiği aşağıdaki Şekil 3.14’de verilen verimlilik haritasında görülmektedir.



Şekil 3.14. Amaç fonksiyonu-3 kullanılarak elde edilen optimum tasarıma ait verimlilik haritası

Optimum tasarıma ait sonuçlar değerlendirildiğinde, bir önceki amaç fonksiyonu ile elde edilemeyen yüksek hızlarda moment üretme kabiliyeti kazandığı görülmektedir.

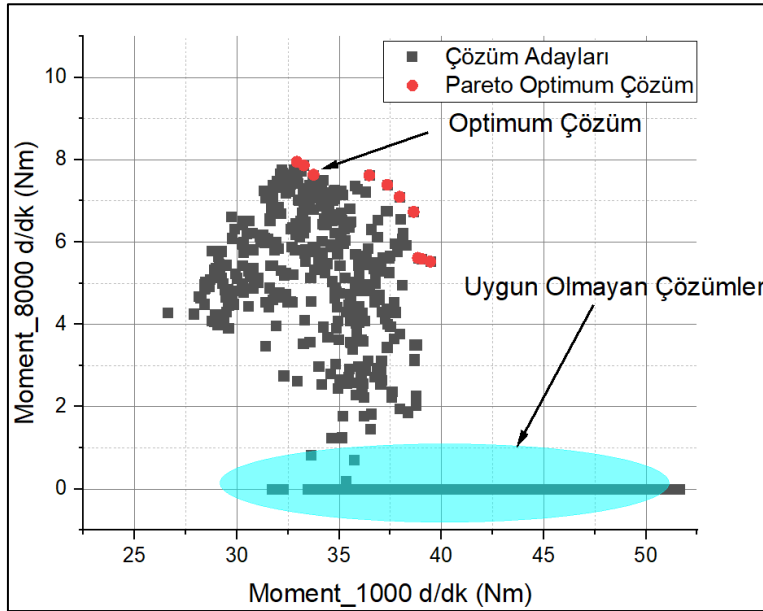
3.2.4. Amaç fonksiyonu-4

Yapısında mıknatıs bulunan elektrik tahrik motor tiplerinin yalnızca mıknatıs tüketimini azaltarak moment üretim kabiliyeti iyileştirmek motorun tahrik motoru olarak kullanılabilmesi için yeterli olmamaktadır. Bir motorun tahrik motoru olabilmesi için geniş bir moment ve hız aralığında da yüksek verimlilik sunabilmesi gerekmektedir. Motorun yüksek hızlarda da yüksek verim sunabilmesi için 3000 d/dk hızda veriminin yükseltilmesi amaç fonksiyonuna Eş. 3. 4’de görüldüğü gibi eklenmiştir.

$$\text{Maksimizasyon: } \begin{cases} f_1(x) = \text{Moment}_{@1000 \frac{d}{dk}} \\ f_2(x) = \text{Verim}_{@3000 \frac{d}{dk}} \\ f_3(x) = \text{Moment}_{@8000 \frac{d}{dk}} \end{cases} \quad (3.4)$$

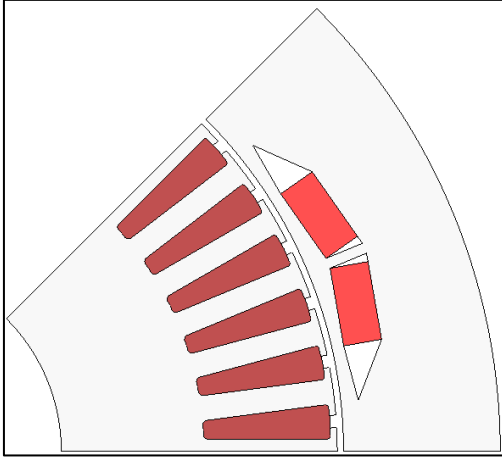
Minimizasyon: $\{ f_4(x) = \text{Mıknatıs}_{Hacim} \}$

Yukarıda verilen amaç fonksiyonunun uygulanması ile birlikte elde edilen çözümün grafiği aşağıdaki Şekil 3.15’de verilmiştir.



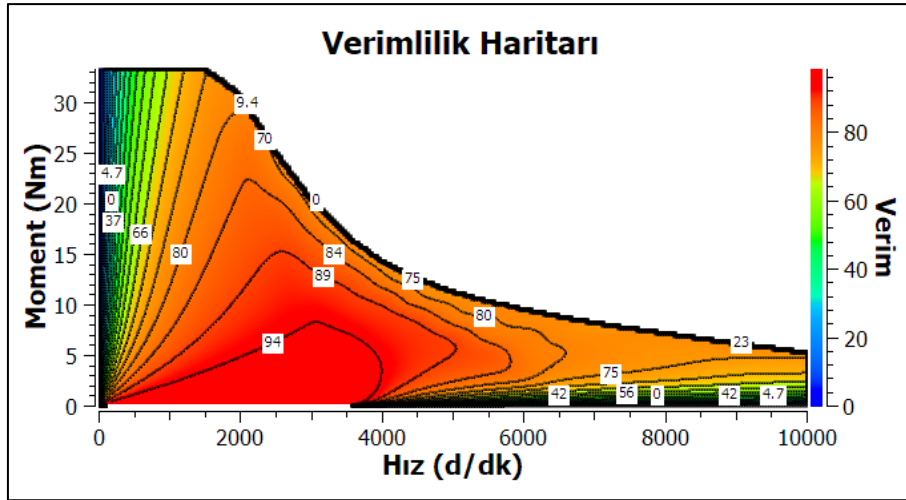
Şekil 3.15. Amaç fonksiyonu-4 için pareto optimum çözüm adayları

Burada, 1000 d/dk ve 8000 d/dk da motorun ürettiği moment değerlerinin pareto optimumu seçilmiştir. Optimum sonucun mıknatıs tüketim miktarının 600 gramdan az olması ve verim değerinin en az % 84 olması şartı aranmıştır.



Şekil 3.16. Amaç fonksiyonu-4'e göre optimum aday tasarım

Şekil 3.14'de verilen verimlilik haritası ile aşağıdaki Şekil 3.17'de verilen verimlilik haritası karşılaştırıldığında %80 verim limitinin 4500 d/dk'dan 6500 d/dk'ya kadar genişlediği görülmektedir.



Şekil 3.17. Amaç fonksiyonu-4 kullanılarak elde edilen optimum tasarıma ait verimlilik haritası

Bu bölümde kullanılan amaç fonksiyonu ile birlikte motorun daha geniş bir moment ve hız aralığında yüksek verimli olması sağlanmıştır.

3.2.5. Amaç fonksiyonu-5

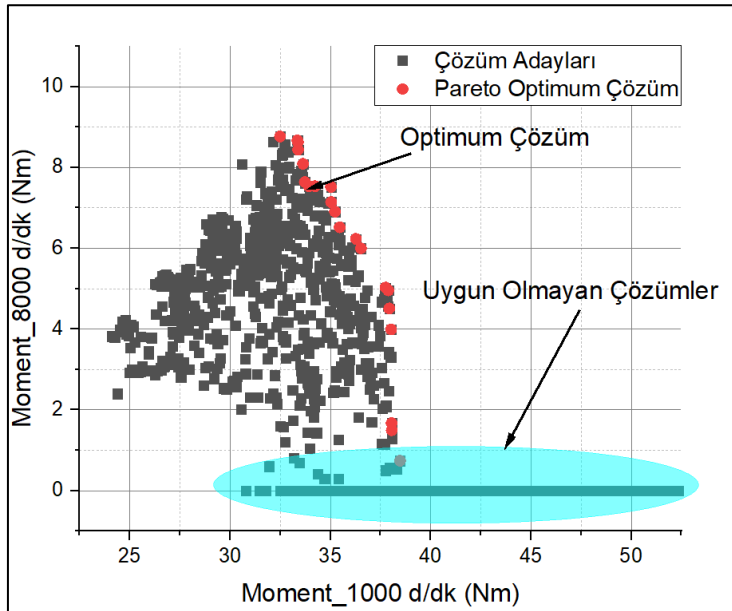
Elektrik motorlarında moment dalgalanması, motorun çıkış momentinde zaman içinde meydana gelen dalgalanmalar olarak ifade edilmektedir. Moment dalgalanması elektrik

motorlarında kritik bir performans parametresi olmakla birlikte var olması durumunda istenmeyen sonuçlar meydana gelebilmektedir. Moment dalgalanmasının düşük olması durumunda motorun daha hassas kontrol edilebilmesine imkân sağlamaktadır. Ayrıca moment dalgalanmasının azaltılması, titreşim ve gürültü seviyesini de düşürmektedir. Sonuç olarak, moment dalgalanmasının azaltılması, motorun daha iyi performans sergilemesine olanak sağlamaktadır. Önemli bir performans parametresi olması sebebiyle aşağıdaki Eş. 3.5’de görüldüğü amaç fonksiyonuna eklenmiştir.

$$\text{Maksimizasyon: } \begin{cases} f_1(x) = \text{Moment}_{@1000 \text{ d/dk}} \\ f_2(x) = \text{Verim}_{@3000 \frac{d}{dk}} \\ f_3(x) = \text{Moment}_{@8000 \frac{d}{dk}} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\text{Minimizasyon: } \begin{cases} f_2(x) = \text{Moment Dalgalanması} \\ f_1(x) = \text{Mıknatıs}_{Hacim} \end{cases}$$

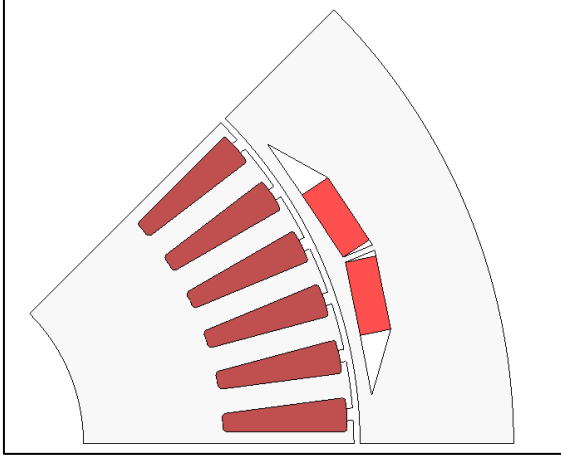
Yukarıda verilen amaç fonksiyonunun uygulanması ile birlikte elde edilen çözümün grafiği aşağıdaki Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.18. Amaç fonksiyonu-5 için pareto optimum çözüm adayları

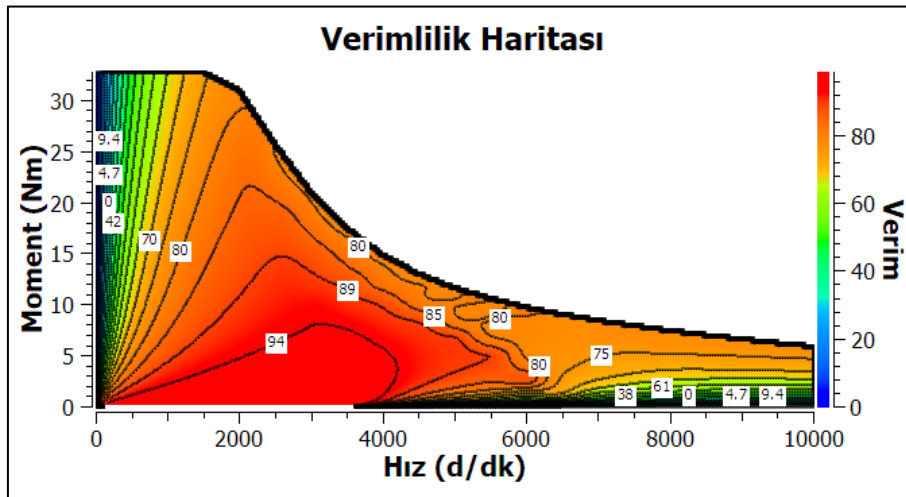
Burada, 1000 d/dk ve 8000 d/dk da motorun ürettiği moment değerlerinin pareto optimumu seçilmiştir. Optimum sonucun mıknatıs tüketim miktarının 500 gramdan az olması, verim

değerinin en az % 84 olması ve moment dalgalanmasının en az %15 olması şartı aranmıştır.



Şekil 3.19. Amaç fonksiyonu-5'e göre optimum aday tasarım

Bu bölümde kullanılan amaç fonksiyonu ile birlikte motorun moment dalgalanmasının amaç fonksiyonu 4 ile elde edilen optimum sonuca göre %15,83'den %12,56'ya düştüğü görülmüştür.



Şekil 3.20. Amaç fonksiyonu-5 kullanılarak elde edilen optimum tasarıma ait verimlilik haritası

3.3. Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu bölümde amaç fonksiyonu değiştirilerek toplamda beş adet optimizasyon süreci tamamlanmıştır. Aşağıdaki Çizelge 3.1'de farklı amaç fonksiyonları ile optimize edilen

motorların performans verileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Amaç fonksiyonunun belirlenmesi ile ilgili gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarında zaman tasarrufu sağlamak amacıyla demir kayıpları, mekanik kayıplar ve kayıp-kaçak akılar ihmal edilmiştir.

Çizelge 3.1. Amaç fonksiyonlarının motor performansına etkisi

	Moment @ 1000 d/dk	Moment @ 8000 d/dk	Mıknatıs Ağırlık (Gr)	Mıknatıs /Moment	Verim @ 3000 d/dk	Moment Dalgalanması %
Başlangıç	31,06	5,87	444	14,29	%81,19	13,5
Amaç F. 1	51,09	NA	1062	20,78	NA	44,1
Amaç F. 2	45,09	NA	489	10,85	NA	25,0
Amaç F. 3	35,38	6,83	372	10,51	%81,31	23,03
Amaç F. 4	33,10	7,68	460	13,91	%86,30	15,83
Amaç F. 5	32,74	7,43	364,77	11,14	%88,49	12,56

Çizelge 3.1 incelendiğinde, her bir amaç fonksiyonunun optimum sonuca istenildiği gibi etki ettiği görülmektedir. Amaç fonksiyonu-1 kullanıldığında A noktasındaki momentin 31.06 Nm'den 51.09 Nm'ye ulaştığı görülmektedir. Amaç fonksiyonu-1 içerisinde mıknatıs tüketiminin azaltılması olmadığından dolayı geometrinin izin verdiği sınırlar çerçevesinde mıknatıs miktarı artırılarak moment yükseltilmiştir. Mıknatıs tüketiminin minimize edilmesinin eklenmesiyle elde edilen amaç fonksiyonu-2 kullanıldığında ise A noktasındaki momentin 31.06 Nm'den 45.09 Nm'ye ulaşırken bir Nm için gerekli olan mıknatıs ağırlığı (Mıknatıs/Moment, M/M) oranının 14,29'dan 10,85'e düştüğü görülmektedir. Ancak bu durumda da motor halen yüksek hızlarda çalışmaya uygun olmadığı görülmektedir. Çizelgede yer alan NA ifadeleri motorun belirtilen hızlara ulaşamadığı için gerekli hesaplamaların yapılamadığı ifade etmektedir. Yüksek hızda yüksek moment ihtiyacının dikkate alınarak elde edilen amaç fonksiyonu-3 ile yüksek hızlarda çalışabilen bir tasarım elde edilmiştir. Elde edilen tasarımın M/M oranı 10,51 olurken, yüksek hızdaki moment üretimi başlangıç tasarımında 5.87 Nm iken 6.83 olarak elde edilmiştir. Amaç fonksiyonu-4' ait sonuçlar incelendiğinde, M/M oranı 13,72 olarak elde edilirken motor veriminin %81.19'dan %85.32'ye yükseldiği görülmektedir. İlk dört amaç fonksiyonunda moment dalgalanması ile ilgili bir ister olmadığından dolayı dört optimum sonucun da moment dalgalanması başlangıç modelinden yüksektir. Son olarak moment dalgalanmasının da amaç fonksiyonuna dahil edilmesiyle birlikte her bir performans parametresi başlangıç tasarımından daha iyi olan bir optimum sonuç elde

edilmiştir. Bu sebeple üç farklı motor modelinin tasarım optimizasyon sürecinde de amaç fonksiyonu-5 kullanılacaktır.

4. TASARIM OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI

Bu bölümde üç farklı mıknatıs yerleşim geometrisinin tasarım optimizasyon çalışması yapılmıştır. Tasarım optimizasyon sürecinde öncelikle her bir topolojiye ait başlangıç motor modelleri elde edilmiştir. Üç farklı başlangıç modelinin optimizasyon çalışmasında bir önceki bölümde kullanılmasına karar verilen amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Amaç fonksiyonu belirlenirken yapılan çalışmadan farklı olarak bu bölümde demir kayıpları da tasarım optimizasyon sürecine dahil edilmiştir.

Bu çalışmada optimum sonuç seçilirken iki farklı hız noktasında (1000 d/dk ve 8000 d/dk) moment değerinin pareto optimumu dikkate alınmıştır. Optimum sonucun seçilmesi esnasında aynı zamanda aşağıdaki Çizelge 4.1’de verilen verim, moment dalgalanması ve mıknatıs tüketimi kriterleri dikkate alınarak lokal optimum sonuçlardan kaçınılmıştır. Pareto optimum sonuç seçilirken çözümü zıtlık içeren sabit moment bölgesinde (düşük hız) ve sabit güç bölgesinde (yüksek hız) moment üretimi dikkate alınmıştır. Bunun sebebi, hava aralığı manyetik akı değerinin yüksek olması durumunda düşük hızlarda yüksek moment ve yüksek hızlarda düşük moment elde edilmektedir. Bu değer optimum olabilmesi motorun her iki noktada da maksimum moment üretmesini sağlamaktadır.

Çizelge 4.1. Optimum tasarım seçim kriterleri

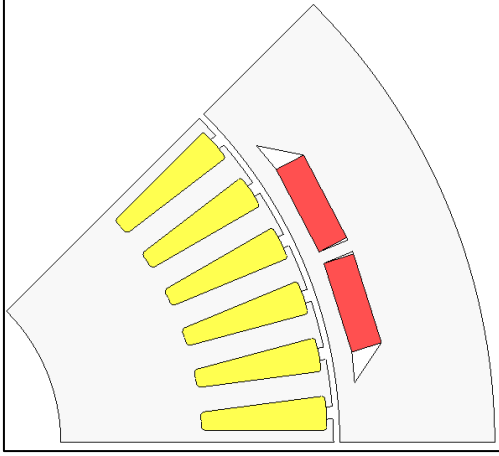
Moment @ 1000 d/dk	>30
Moment @ 8000 d/dk	>7
Mıknatıs Ağırlık (Gr)	<500
Verim @ 3000 d/dk	>84
Moment Dalgalanması %	<15

Optimizasyon sürecinde üç farklı motor modelinin stator iç-dış çapı, rotor iç-dış çapı, nüve uzunluğu, malzeme tipi ve sarım sayıları sabit tutulmuştur. Bu süreçte kullanılan amaç fonksiyonu Eş. 3.5’de verildiği gibidir. Ayrıca kısıtlar ise aşağıdaki gibidir.

$$\begin{cases} g_1(x) = Rotor Dış Çapı = 200 \text{ mm} \\ g_2(x) = Rotor İç Çapı = 150 \text{ mm} \\ g_3(x) = Nüve Uzunluğu = 50 \text{ mm} \\ g_3(x) = Rotor Dış Çapı = 148 \text{ mm} \end{cases} \quad (4.1)$$

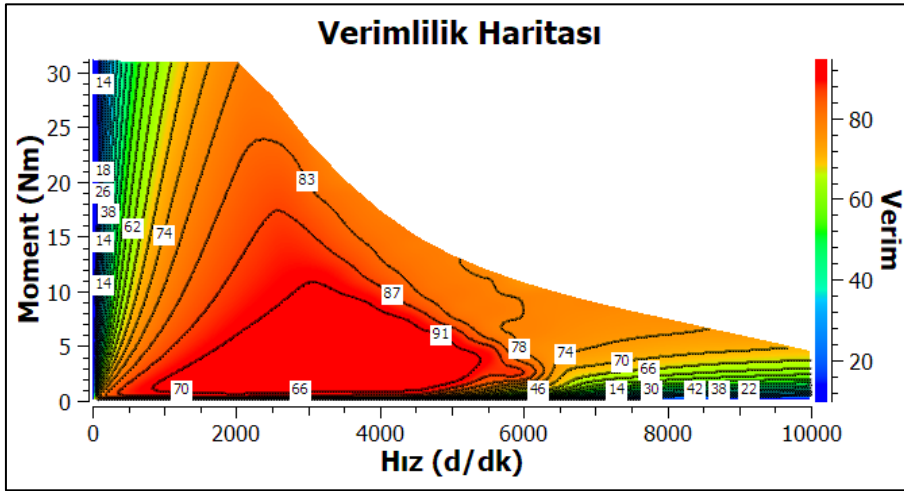
4.1. V-Tipi Rotor Tasarım Optimizasyon Çalışması

GT-SMSM’lerde yaygın olarak kullanılan V Tipi mıknatıs yerleşim geometrisine sahip motor başlangıç modeli aşağıdaki şekilde verilmiştir.



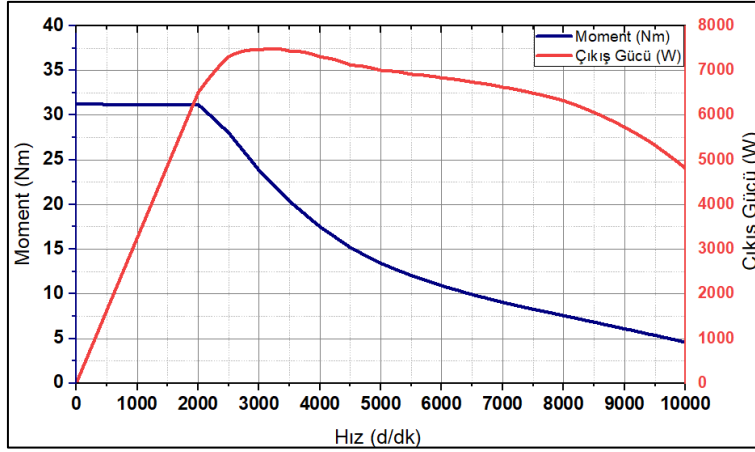
Şekil 4.1. V Tipi tasarıma ait başlangıç modeli

Başlangıç modeline ait verimlilik haritası Şekil 4.2’de verilmiştir.



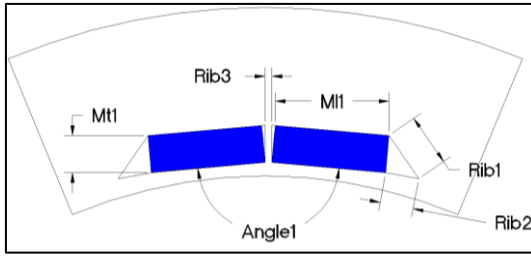
Şekil 4.2. V Tipi başlangıç modeli verimlilik haritası

Başlangıç durumunda motorun yüksek hızlarda moment kabiliyetinin düşük olması sebebiyle sabit güç bölgesindeki performansının kabul edilebilir olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.3. V tipi başlangıç modeli tork-güç-hız eğrisi

Tasarım optimizasyon sürecinde V Tipi motora ait optimizasyon sürecinde kullanılan tasarım değişkenleri Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



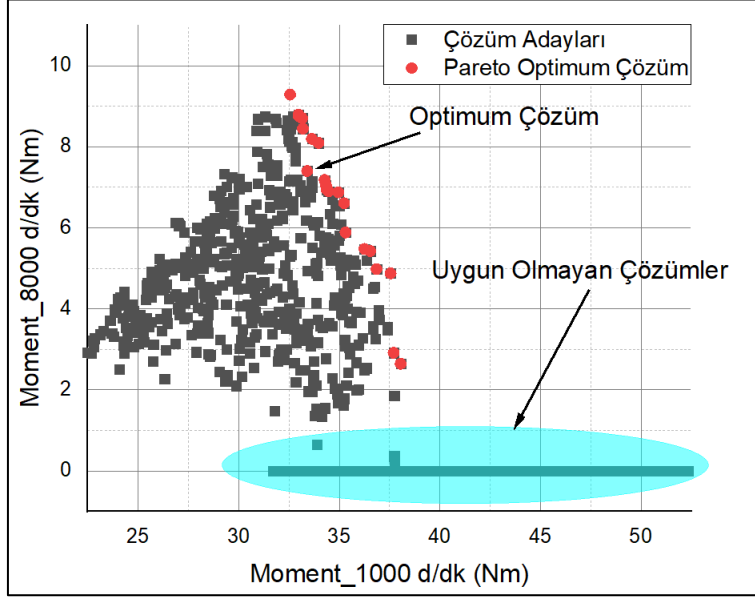
Şekil 4.4. V Tipi optimizasyon değişkenleri

Mıknatısın rotor içerisinde pozisyonu, V açısı, mıknatıs kalınlık ve uzunluğu ile birlikte akı bariyerlerinin ölçüleri tasarım parametresi olarak ayarlanmıştır. Tasarım parametrelerinin başlangıç tasarımındaki değerleri ve optimizasyon çalışması süresinde alabilecekleri en az ve en çok değerler aşağıdaki Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. V Tipi tasarım parametreleri değer aralığı

Parametre	V-Tipi		
	Başlangıç	En az değer	En çok değer
Mt1	5	5	10
Ml1	15	12	20
Rib1	5	4	10
Rib2	1	0,3	1
Rib3	3	0,2	3
Mc	3	2,5	6
Angle1	95	95	140

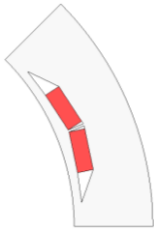
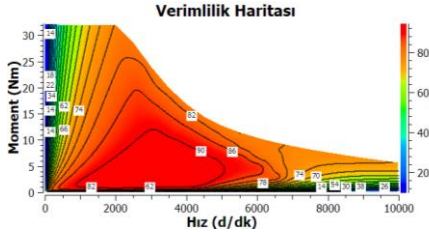
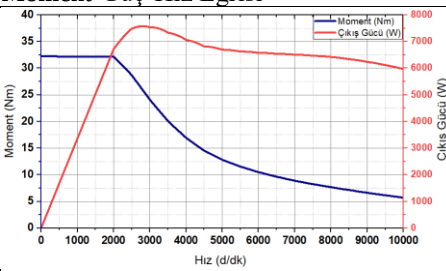
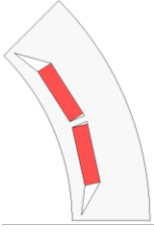
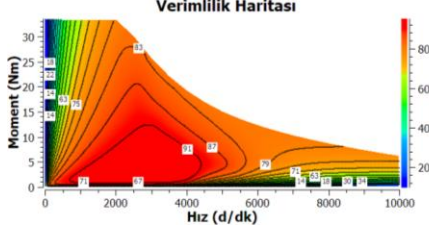
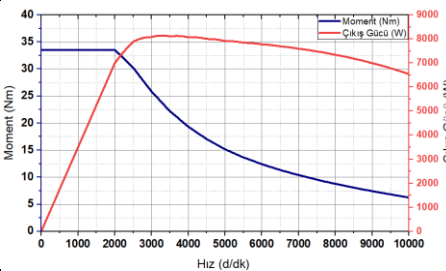
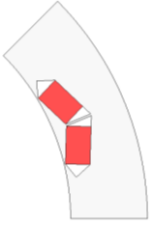
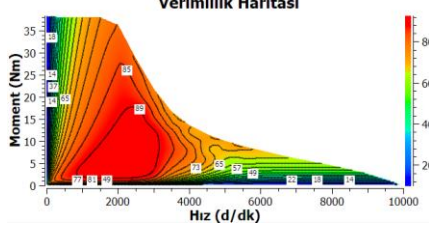
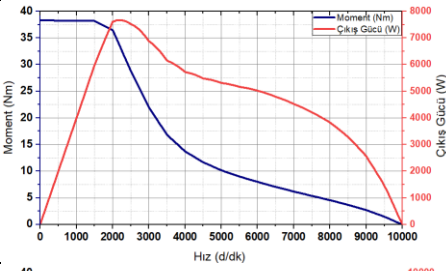
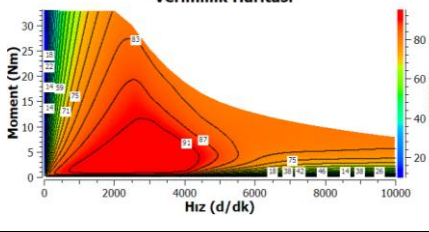
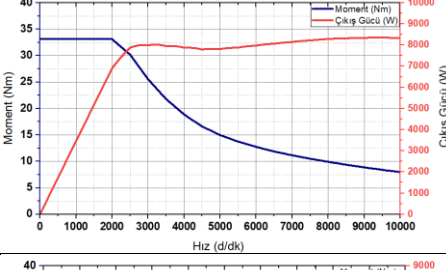
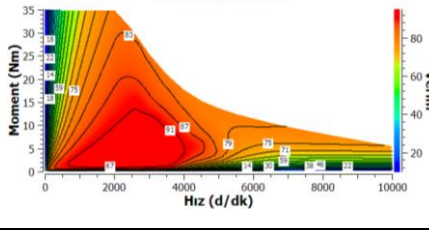
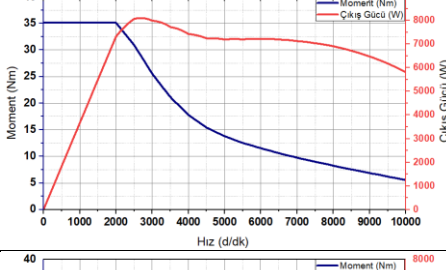
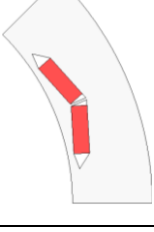
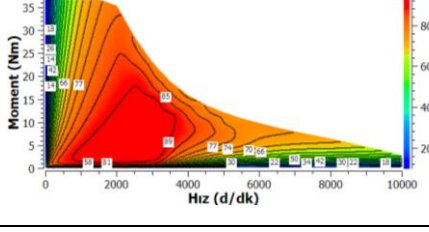
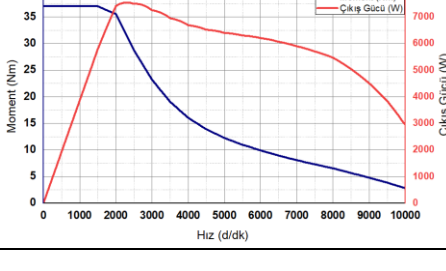
Optimizasyon çalışmasının tamamlanması ile birlikte Şekil 4.5’de görüldüğü gibi pareto optimum sonuç seçilmiştir. Optimum sonuç seçilirken Çizelge 4.1’deki kriterler dikkate alınmıştır.



Şekil 4.5. V Tipi pareto optimum tasarımın seçilmesi

Aşağıdaki Çizelge 4.3’de optimum çözüm ve çalışma süresince pareto komşuluk dikkate alınarak seçilen beş farklı tasarıma ait rotor geometrileri, verimlilik haritaları ve moment-güç-hız eğrileri sunulmuştur.

Çizelge 4.3. V Tipi optimum aday çözümler

No.	Geometri	Verimlilik Haritası	Moment-Güç-Hız Eğrisi
Opt.			
911			
292			
104 8			
971			
70			

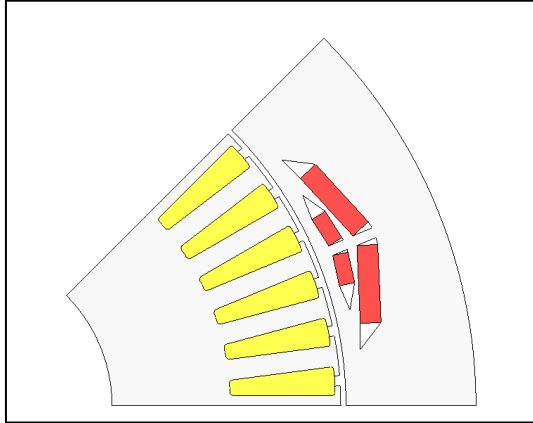
Çizelge 4.4. V Tipi pareto optimum sonuçların karşılaştırılması

Çözüm Adayı	Moment @ 1000 d/dk	Moment @ 8000 d/dk	Mıknatıs Ağırlık (Gr)	Verim @ 4000 d/dk	Moment Dalgalanması %
Başlangıç	31,06	7,55	444,00	87,75	13,51
744	32,05	7,68	397,94	89,58	6,13
911	33,41	8,76	567,43	88,81	9,42
292	38,04	4,57	587,03	74,87	28,41
1048	32,97	9,89	712,77	86,91	17,02
971	34,95	8,24	578,98	86,52	13,24
70	36,85	6,53	443,76	86,07	29,02

Çizelge 4.3 ve 4.4 incelendiğinde optimizasyon süresince çok farklı geometrilerin denendiği görülmektedir. Burada yalnızca 744 numaralı aday tasarım Çizelge 4.1’de verilen kriterleri sağlaması sebebiyle optimum tasarım olarak seçilmiştir.

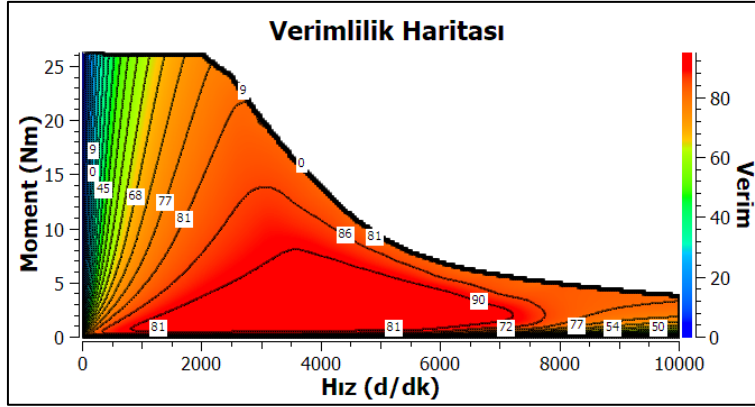
4.2. 2V-Tipi Rotor Tasarım Optimizasyon Çalışması

2V Tipi mıknatıs yerleşim geometrisine sahip motor başlangıç modeli aşağıdaki şekilde verilmiştir.



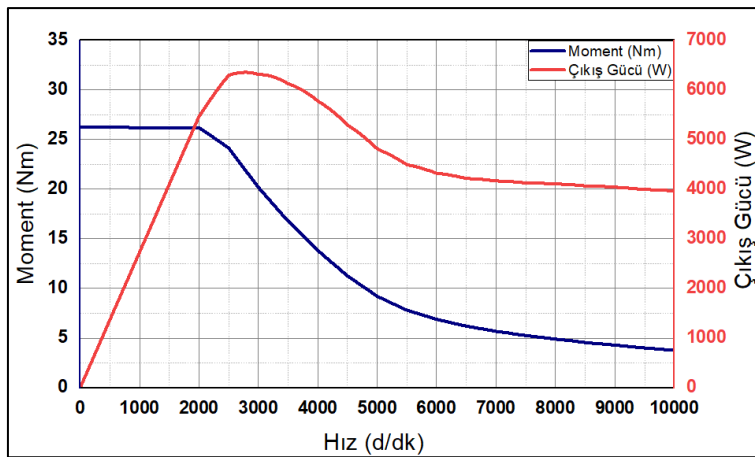
Şekil 4.6. 2V Tipi tasarıma ait başlangıç modeli

Başlangıç modeline ait verimlilik haritası Şekil 4.7’de verilmiştir.



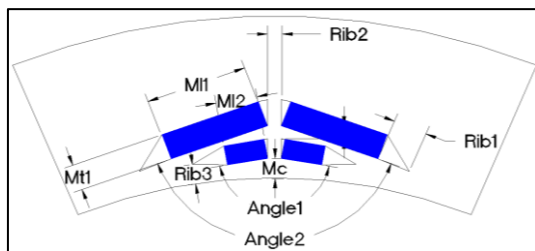
Şekil 4.7. 2V Tipi başlangıç modeli verimlilik haritası

Başlangıç durumunda motorun hem düşük hem de yüksek hızlarda moment kabiliyetinin düşük olması sebebiyle hem sabit moment hem de sabit güç bölgesindeki performansının kabul edilebilir olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.8. 2V tipi başlangıç modeli tork-güç-hız eğrisi

Tasarım optimizasyon sürecinde 2V Tipi motora ait optimizasyon sürecinde kullanılan tasarım değişkenleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



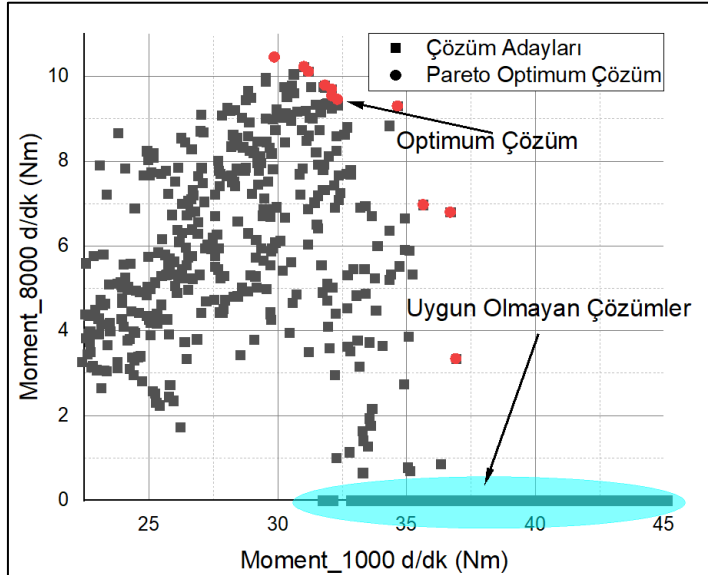
Şekil 4.9. 2V Tipi optimizasyon değişkenleri

Mıknatısın rotor içerisinde pozisyonu, her iki mıknatıs grubunun V açısı, mıknatıs kalınlık ve uzunlukları ile birlikte akı bariyerlerinin ölçüleri tasarım parametresi olarak ayarlanmıştır. Tasarım parametrelerinin başlangıç tasarımındaki değerleri ve optimizasyon çalışması süresinde alabilecekleri en az ve en çok değerler aşağıdaki Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. 2V Tipi tasarım parametreleri değer aralığı

Parametre	2V-Tipi		
	Başlangıç	Minimum	Başlangıç
Mt1	4	3	8
Ml1	15	10	20
Mt2	3	1	5
Ml2	6	5	12
Rib1	5	4	10
Rib2	1	0.3	1
Rib3	3	0.2	3
Rib4	2	1	4
Mc	3	2.5	7
Angle1	100	90	140
Angle2	110	90	140

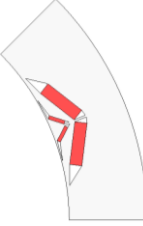
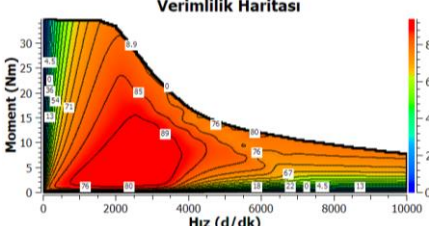
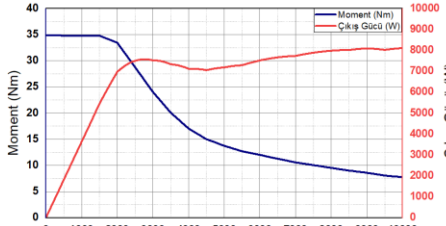
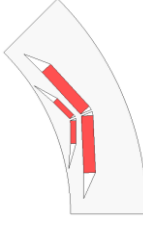
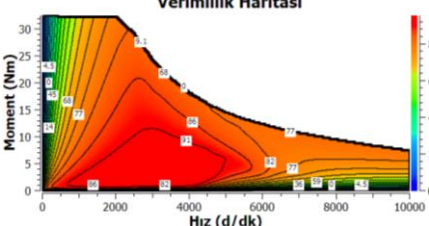
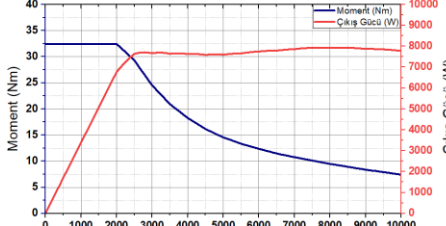
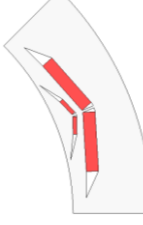
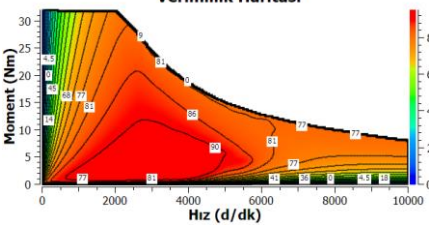
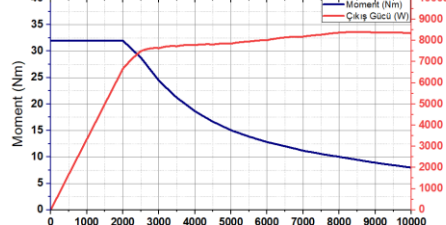
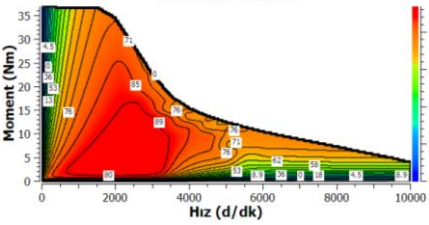
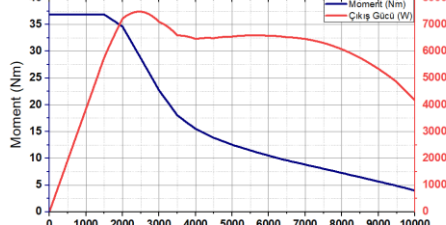
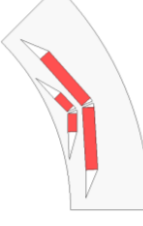
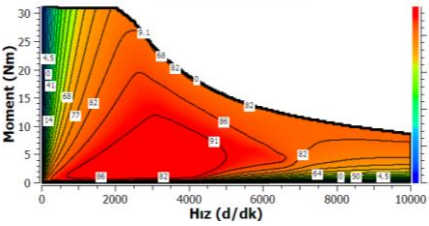
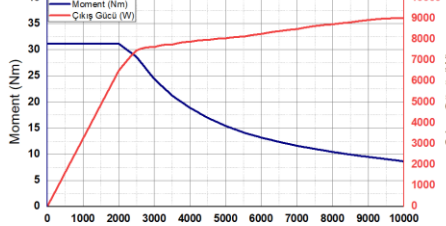
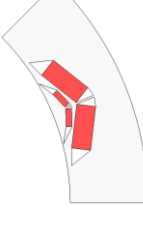
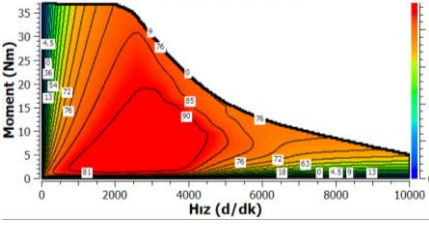
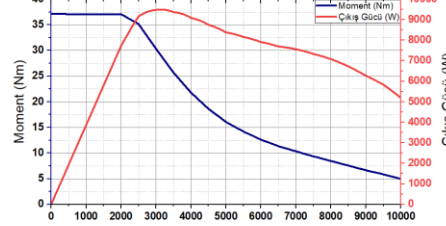
Optimizasyon çalışmasının tamamlanması ile birlikte Şekil 4.10’da görüldüğü gibi pareto optimum sonuç seçilmiştir. Optimum sonuç seçilirken Çizelge 4.1’deki kriterler dikkate alınmıştır.



Şekil 4.10. 2V Tipi pareto optimum tasarımın seçilmesi

Aşağıdaki Çizelge 4.6’da pareto optimum aday çözümlerden seçilen beş farklı tasarıma ait rotor geometrileri, verimlilik haritaları ve moment-güç-hız eğrileri sunulmuştur.

Çizelge 4.6. 2V Tipi optimum aday çözümler

No.	Geometri	Verimlilik Haritası	Moment-Güç-Hız Eğrisi
308			
433			
655			
697			
873			
912			

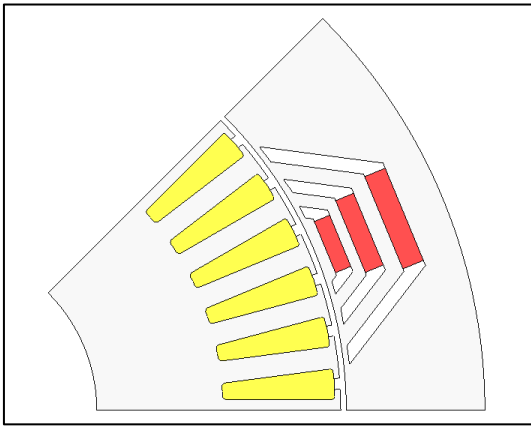
Çizelge 4.7. 2V Tipi pareto optimum sonuçların karşılaştırılması

Çözüm Adayı	Moment @ 1000 d/dk	Moment @ 8000 d/dk	Mıknatıs Ağırlık (Gr)	Verim @ 4000 d/dk	Moment Dalgalanması %
Başlangıç	26,07	4,90	461,76	86,74	14,48
308	34,65	9,53	354,67	86,59	37,08
433	32,31	9,46	507,16	89,66	10,64
655	31,83	9,95	473,36	89,51	14,38
697	36,69	7,25	541,21	84,61	38,63
873	31,01	10,40	533,92	90,25	11,14
912	36,91	8,45	576,31	91,65	28,10

Düşük ve yüksek hızlarda moment üretme kabiliyeti temelli seçilen optimum aday tasarımlardan 433, 655 ve 873 numaralı çözümler tüm seçim kriterlerini sağlamaktadır. Bu aday tasarımlar kendi içerisinde değerlendirildiğinde, 655 numaralı çözümün moment dalgalanmasının diğer iki aday tasarımdan yaklaşık %35 kadar fazla olduğu görülmektedir. Diğer iki aday tasarımdan ise 433 numaralı çözümün en yüksek maksimum moment üretimine sahip tasarım olması, mıknatıs tüketiminin ve yüksek hızda moment üretim kabiliyetinin kabul edilebilir seviyede olması sebebiyle optimum tasarım olarak seçilmiştir.

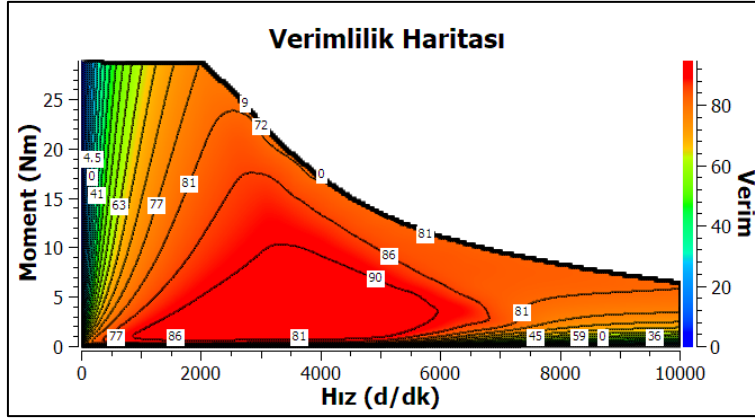
4.3. 3 Kat Rotor Tasarım Optimizasyon Çalışması

3 Katlı tasarıma ait mıknatıs yerleşim geometrisine sahip motor başlangıç modeli aşağıdaki şekilde verilmiştir.



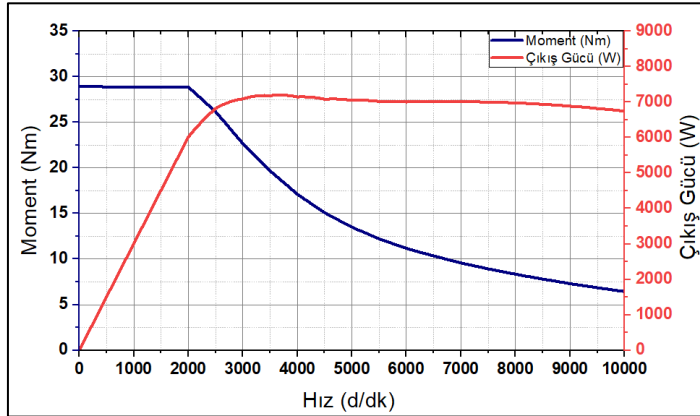
Şekil 4.11. 3 Kat tasarıma ait başlangıç modeli

Başlangıç modeline ait verimlilik haritası Şekil 4.12’de verilmiştir.



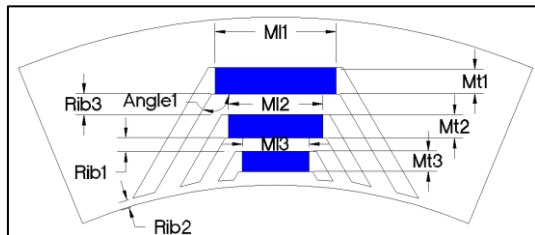
Şekil 4.12. 3 kat başlangıç modeli verimlilik haritası

Başlangıç durumunda motorun yüksek hızlarda seçim kriterini sağladığı, düşük hızlarda ise limitte kaldığı görülmektedir. Ayrıca sabit güç bölgesinde motorun geniş bir hız aralığında sabit güç verebiliyor olması 3 katlı rotor tasarımının dikkat çekici bir özelliği olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 4.13. 3 Kat başlangıç modeli tork-güç-hız eğrisi

Tasarım optimizasyon sürecinde 3 katlı rotora sahip motora ait optimizasyon sürecinde kullanılan tasarım değişkenleri Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



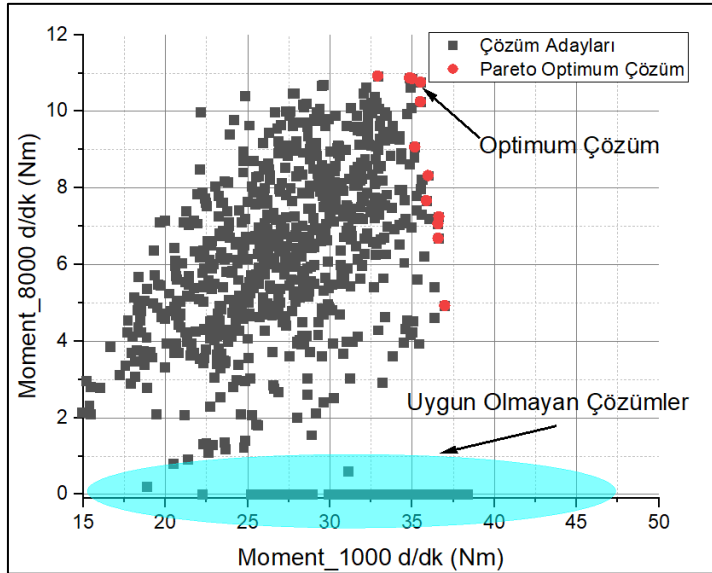
Şekil 4.14. 3 Kat optimizasyon değişkenleri

Mıknatısın rotor içerisinde pozisyonu, her üç mıknatısın kalınlık ve uzunlukları ile birbirleri arasındaki mesafeyle birlikte akı bariyerlerinin ölçüleri tasarım parametresi olarak ayarlanmıştır. Tasarım parametrelerinin başlangıç tasarımındaki değerleri ve optimizasyon çalışması süresinde alabilecekleri en az ve en çok değerler aşağıdaki Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. 3 Katlı tasarım parametreleri değer aralığı

Parametre	3 Kat		
	Başlangıç	Minimum	Başlangıç
Mt1	4	4	16
Ml1	18	14	40
Mt2	3.5	4	16
Ml2	14	14	40
Mt3	3	4	16
Ml3	10	10	20
Rib1	2	0.5	4
Rib2	1	0.2	2
Rib3	3	0.5	4
Angle1	120	90	140

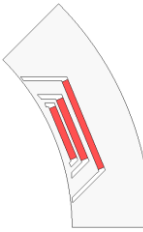
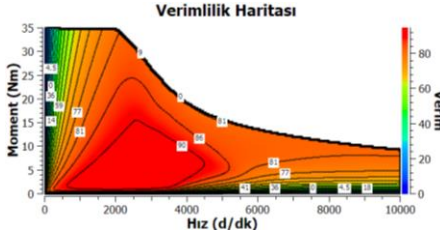
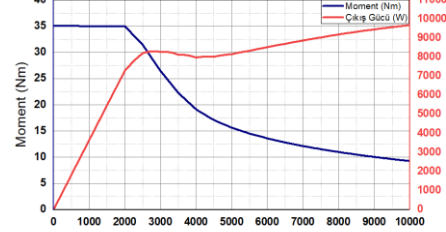
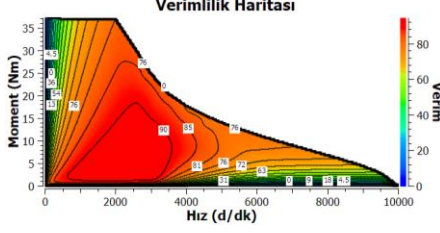
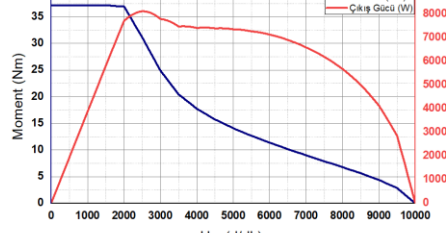
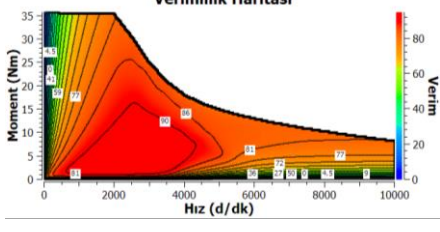
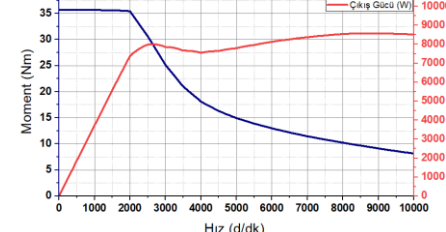
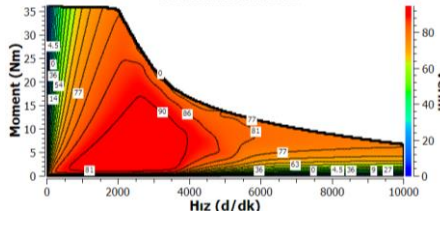
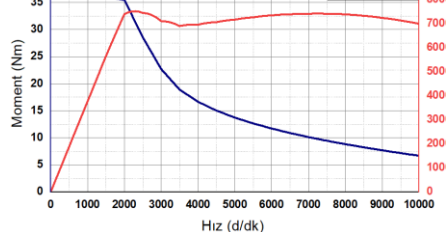
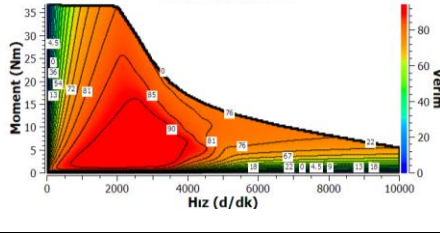
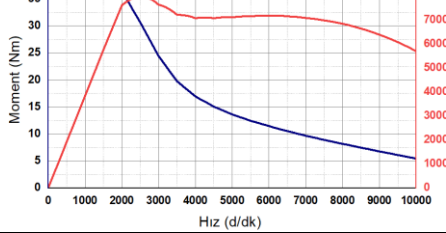
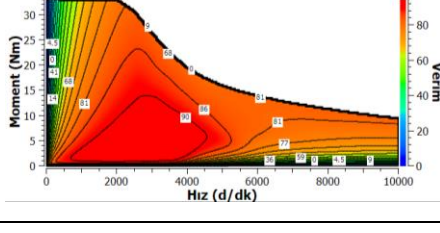
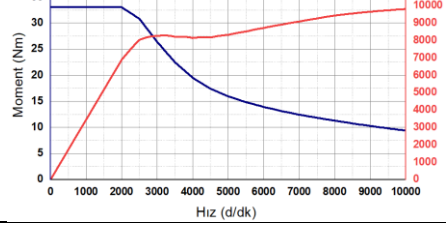
Optimizasyon çalışmasının tamamlanması ile birlikte Şekil 4.15’de görüldüğü gibi pareto optimum sonuç seçilmiştir. Optimum sonuç seçilirken Çizelge 4.1’deki kriterler dikkate alınmıştır.



Şekil 4.15. 3 Katlı rotor pareto optimum tasarımın seçilmesi

Aşağıdaki Çizelge 4.9’da optimum çözüm ve çalışma süresince rastgele seçilen beş farklı tasarıma ait rotor geometrileri, verimlilik haritaları ve moment-güç-hız eğrileri sunulmuştur.

Çizelge 4.9. 3 Katlı rotor pareto optimum sonuçların karşılaştırılması

No.	Geometri	Verimlilik Haritası	Moment-Güç-Hız Eğrisi
247			
255			
Opt.			
325			
1055			
1073			

Çizelge 4.10. 3 Katlı rotor için pareto optimum sonuçların karşılaştırılması

Çözüm Adayı	Moment @ 1000 d/dk	Moment @ 8000 d/dk	Mıknatıs Ağırlık (Gr)	Verim @ 4000 d/dk	Moment Dalgalanması %
Başlangıç	28,74	8,31	446,96	89,51	25,36
247	34,84	10,96	430,35	89,52	16,45
255	36,97	6,78	604,52	87,17	10,04
286	35,50	10,70	441,24	89,88	12,86
325	35,96	8,81	440,45	89,42	11,66
1055	36,62	8,17	517,76	83,55	22,56
1073	32,90	11,26	547,45	89,43	22,90

Düşük ve yüksek hızlarda moment üretme kabiliyeti temelli seçilen optimum aday tasarımlardan 286 ve 325 numaralı çözümler tüm seçim kriterlerini sağlamaktadır. Bu aday tasarımlar kendi içerisinde değerlendirildiğinde, mıknatıs tüketim miktarlarının ve verimlerinin çok yakın olduğu görülmektedir. Düşük hız moment üretimleri arasında yaklaşık %1.5 fark varken yüksek hızda 286 numaralı aday tasarım rakibinden yaklaşık %22 daha yüksek moment ürettiği görülmektedir. Bu sebeple 286 numaralı aday tasarım optimum tasarım olarak seçilmiştir.

5. DETAY ELEKTROMANYETİK ANALİZLER

Bu bölümde V tipi, 2V tipi ve 3 katlı mıknatıs yerleştirme geometrisine sahip optimum tasarımların detay elektromanyetik analiz çalışmaları yapılarak karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Amaç fonksiyonlarının optimum tasarımlar üzerindeki performansa etkisi ile ilgili olarak aşağıdaki Çizelge 5.1 incelenebilir.

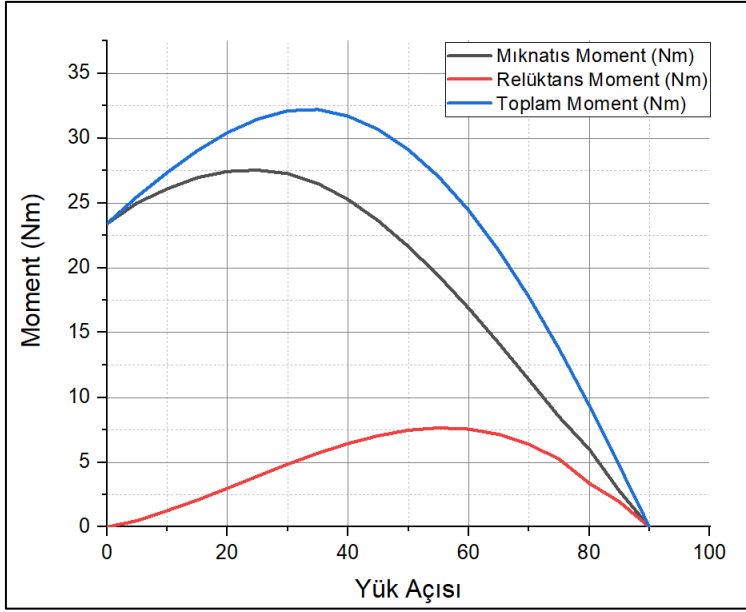
Çizelge 5.1. Optimum tasarımların karşılaştırılması

Parametre/Çözüm Adayı	V Tipi	2V Tipi	3 Kat
Moment @ 1000 d/dk	32,05	32,31	35,50
Moment @ 8000 d/dk	7,68	9,46	10,70
Mıknatıs Ağırlık (Gr)	397,94	507,16	441,24
Mıknatıs Ağırlık/Maksimum Moment	12,42	15,70	12,43
Verim @ 4000 d/dk	89,58	89,66	89,88
Moment Dalgalanması %	6,13	10,64	12,86

Tasarım optimizasyon çalışması kapsamında birçok performans parametresi dikkate alınmış olsa dahi hangi tasarımının elektrik tahrikli araçlar için daha uygun olduğunu tespit etmek amacıyla ilave karşılaştırmalı analiz çalışmaları yapılmıştır. Bunlar; relüktans moment üretme kabiliyeti, geniş bir hız ve moment aralığında yüksek verimlilik ve yüksek güç faktörü olarak sıralanabilir.

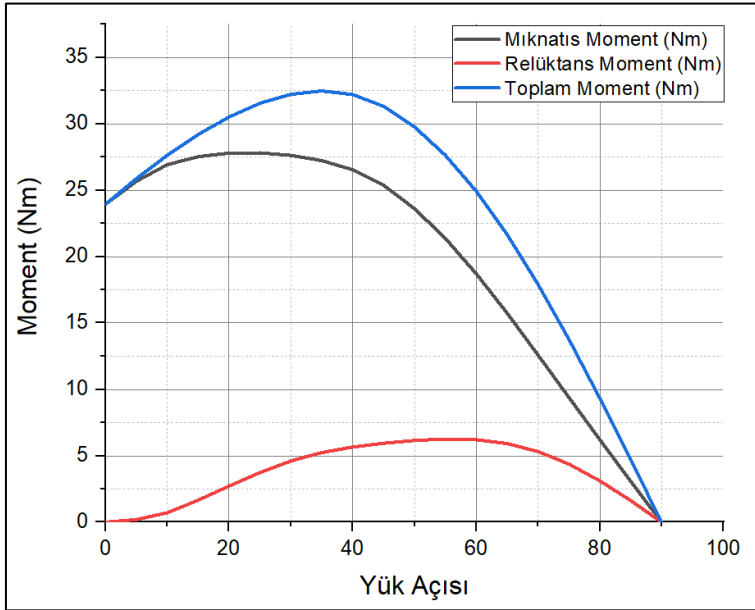
5.1. Moment Karakteristiği

Bu bölümde üç farklı optimum sonuca ait moment üretim kabiliyetleri incelenmiştir. Çalışmanın amaçlarından birisi olan mıknatıs miktarını azaltırken toplam momenti arttırma hedefi doğrultusunda motorların geometrileri relüktans moment bileşenini arttıracak şekilde optimize edilmiştir. Aşağıdaki Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3’de optimum tasarımların moment bileşenleri görülmektedir.



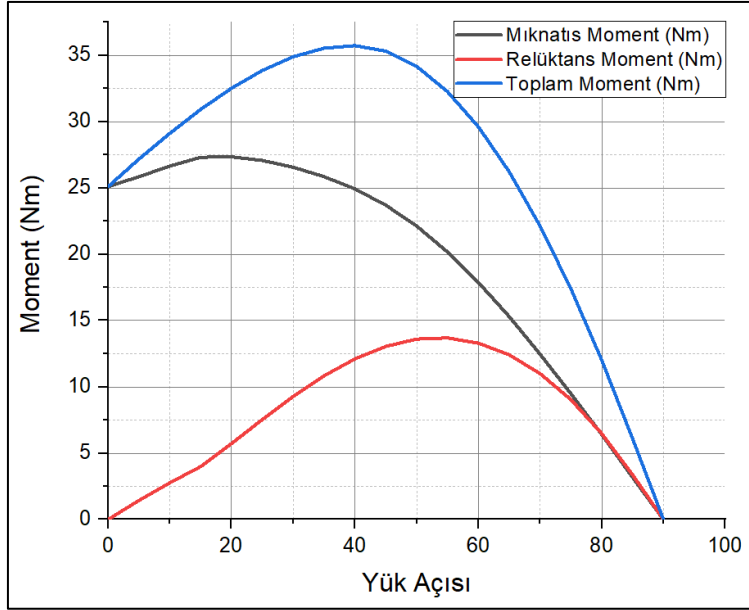
Şekil 5.1. V Tipi optimum tasarım moment bileşenlerinin gösterimi

V tipi tasarımın moment bileşenleri incelendiğinde relüktans moment üretiminin mıknatıs moment üretiminin altında kaldığı görülmektedir. V tipi tasarımda maksimum relüktans moment üretimi 85° yük açısında %38,6 olarak gerçekleşmiştir. Bu noktada motorun toplam momentini 4.69 Nm, mıknatıs momentini 2.88 Nm ve relüktans momentini 1.81 Nm olarak elde edilmiştir.



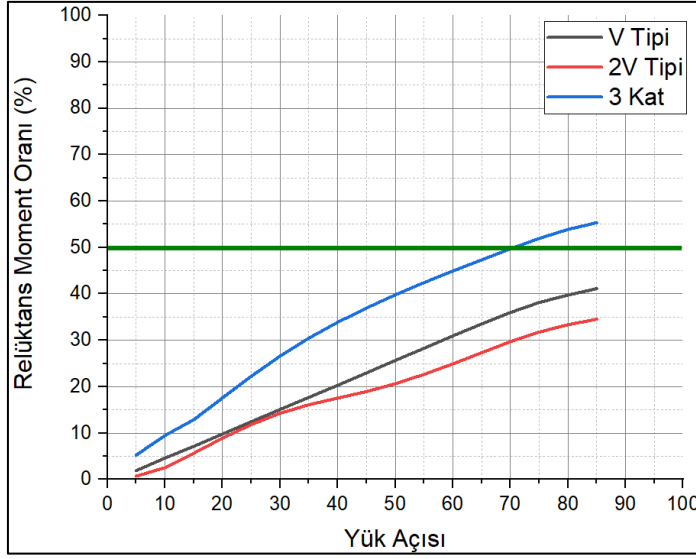
Şekil 5.2. 2V Tipi optimum tasarım moment bileşenlerinin gösterimi

2V tipi tasarımın moment karakteristiği incelendiğinde tıpkı V tipi geometriye sahip motorda olduğu gibi relüktans moment üretiminin mıknatıs moment üretiminin altında kaldığı görülmektedir. 2V tipi tasarımda relüktans moment üretimi maksimum olarak 85° yük açısında %34,2 olarak gerçekleşmiştir. Bu noktada motorun toplam momenti 4.68 Nm, mıknatıs momenti 3,08 Nm ve relüktans momenti 1.60 Nm olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.3. 3 Kat optimum tasarım moment bileşenlerinin gösterimi

3 Katlı optimum tasarımın 75° yük açısından itibaren mıknatıs momentten daha fazla relüktans moment ürettiği görülmektedir. Maksimum relüktans moment oranına 80 ve 85 yük açılarında ulaşan tasarımda relüktans momentin toplam momente oranı %55.3'tür. Aşağıdaki Şekil 5.4'de yük açısına bağlı olarak üç farklı tasarımın relüktans moment üretim kabiliyetleri karşılaştırılmıştır.

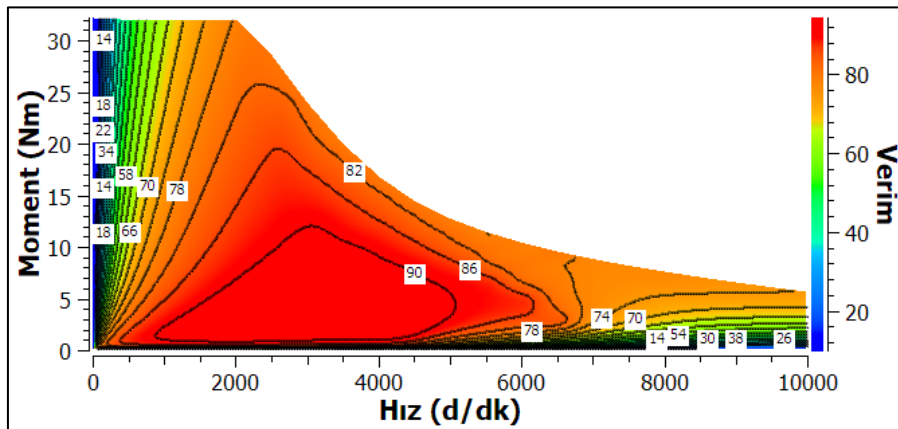


Şekil 5.4. Relüktans moment üretim kapasitelerinin karşılaştırılması

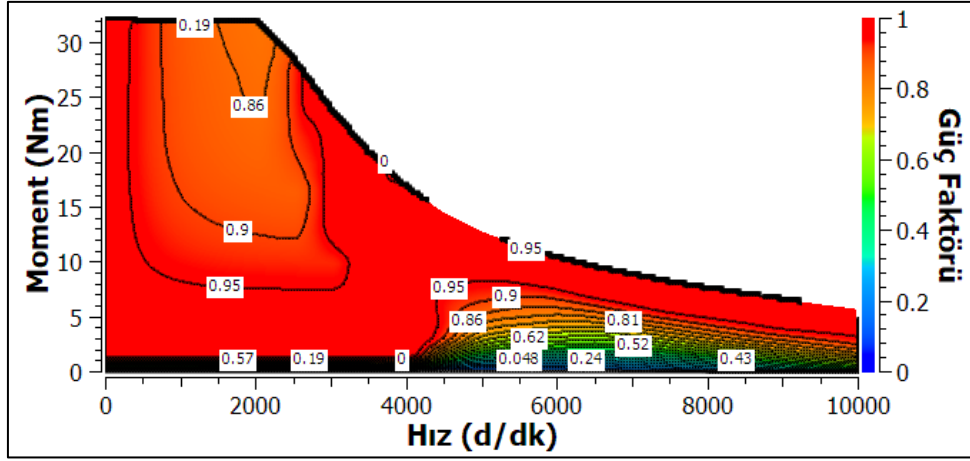
Bu bölümde üç farklı tasarıma ait moment bileşenleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda 3 katlı mıknatısa sahip olan tasarımın daha yüksek relüktans moment üretme kabiliyetine sahip olduğu görülmüştür.

5.2. Verimlilik Haritalarının Karşılaştırması

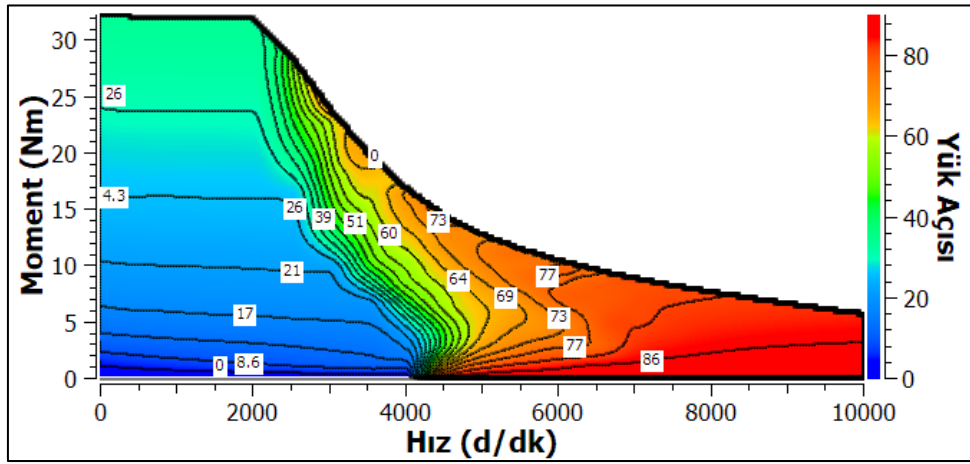
Bu bölümde üç farklı optimum sonuca ait verimlilik haritaları incelenmiştir. Verimlilik haritaları elektrik motorunun farklı hız ve moment değerindeki verimini, güç faktörünü ve yük açısını tek bir görsel üzerinde gösterdiğinden dolayı performans analizinde önemlidir. Aşağıdaki Şekil 5.5’den başlayan ve Şekil 5.13’de tamamlanan sonuçlarda her üç optimum tasarıma ait belirtilen verimlilik haritaları sunulmuştur.



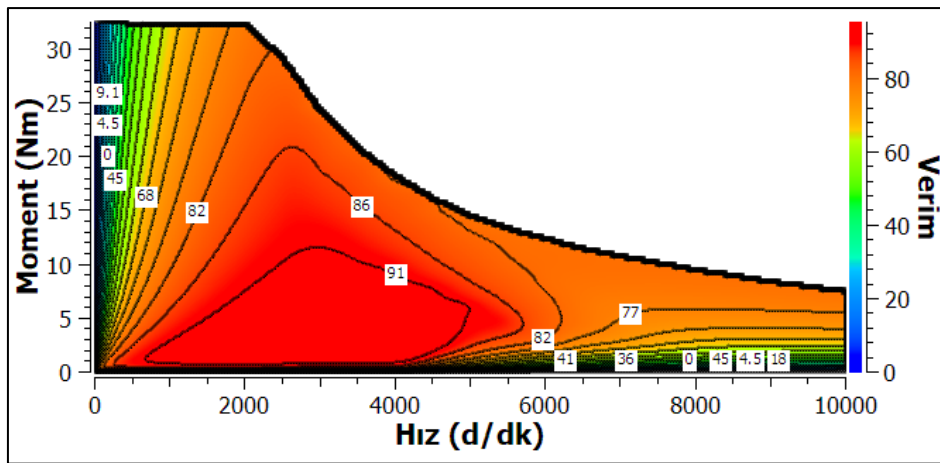
Şekil 5.5. V Tipi optimum tasarımın farklı hız ve momentlerde motor verimi



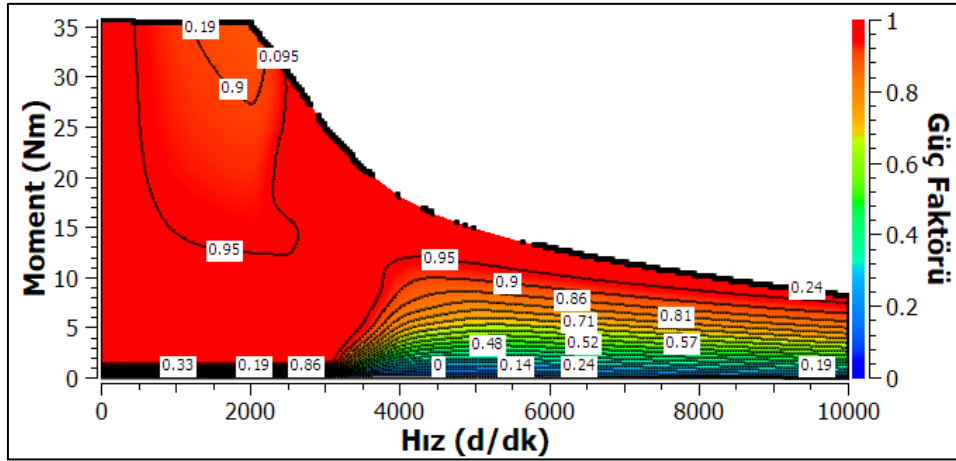
Şekil 5.6. V Tipi optimum tasarımın farklı hız ve momentlerde güç faktörü



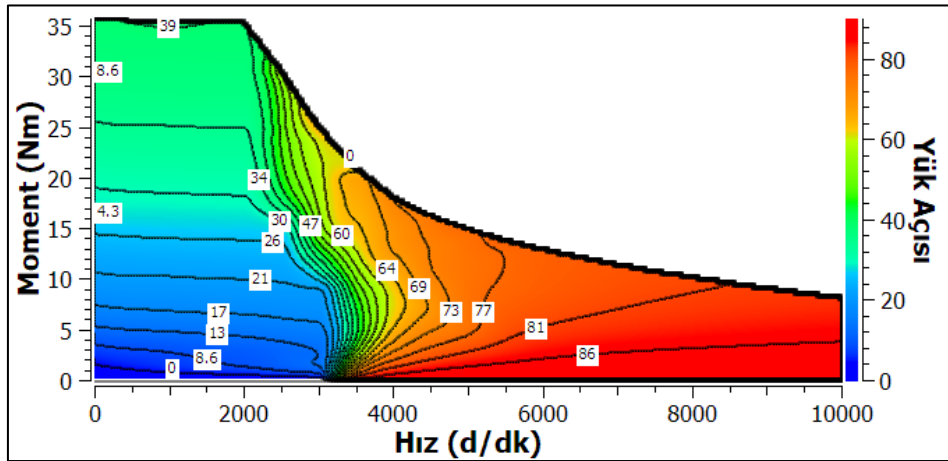
Şekil 5.7. V Tipi optimum tasarımın farklı hız ve momentlerde yük açısı



Şekil 5.8. 2V Tipi optimum tasarımın farklı hız ve momentlerde motor verimi



Şekil 5.12. 3 Kat optimum tasarımının farklı hız ve momentlerde güç faktörü

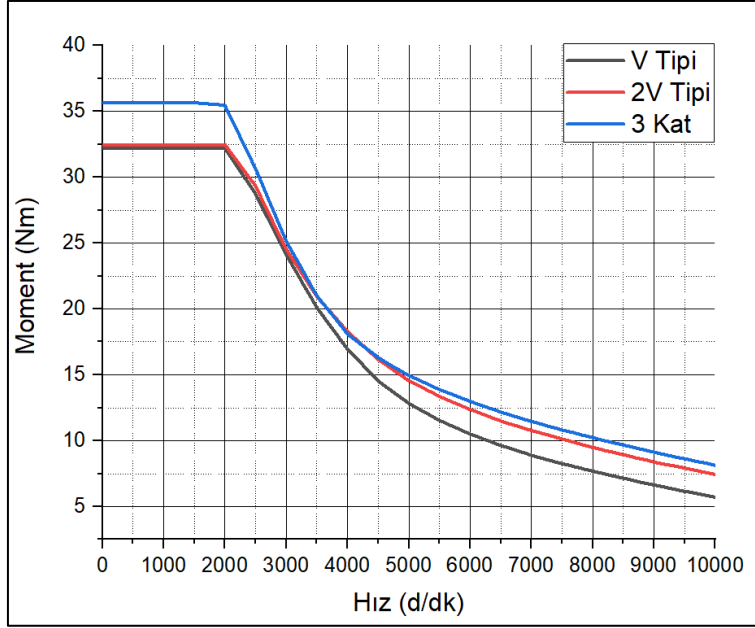


Şekil 5.13. 3 Kat optimum tasarımının farklı hız ve momentlerde yük açısı

Şekil 5.5, 5.8 ve 5.11 incelendiğinde, hem yüksek hızlarda hem de düşük hızlarda farklı yüklerde 2V tipi ve 3 katlı optimum tasarımlarının daha yüksek verimlilik sundukları net bir şekilde görülmektedir. Şekil 5.6, 5.9 ve 5.12 incelendiğinde, 3000-10000 d/dk hız aralığında güç faktörleri farklı yüklerde benzer davranış göstermektedir. Maksimum momentin alındığı 2000 d/dk hız bölgesinde ise motor yükü arttıkça güç faktörünün düştüğü gözlenmiştir. Ancak burada en az düşüş gösteren ve %90 mertebelerinde kalan 3 katlı tasarımın en iyi sonucu verdiği söylenebilir. Bu durum Çizelge 5.1'de verildiği gibi aynı akımda daha yüksek moment ürettiğinin bir başka göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

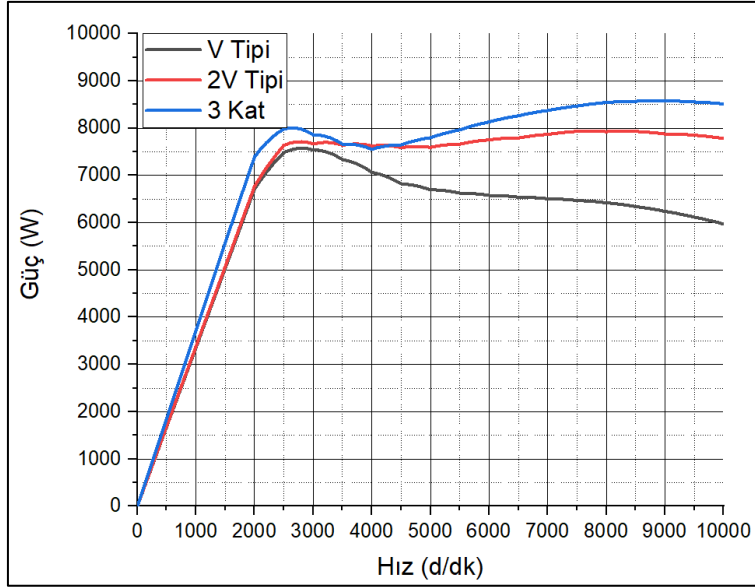
5.3. Moment-Güç-Hız Performans Karşılaştırması

Bu bölümde üç farklı optimum sonuca ait moment-hız ve güç-hız eğrileri üzerinden performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu performans eğrileri ile motorların sabit güç ve sabit moment bölgeleri net olarak incelenebilmekte ve CSPR performansı değerlendirilebilmektedir.



Şekil 5.14. Optimum tasarımların moment-hız performansının karşılaştırılması

Şekil 5.14 incelendiğinde sabit moment bölgesinde, 3 katlı rotor geometrisine sahip optimum tasarım rakiplerinden yaklaşık %10 daha fazla moment üretmektedir. Sabit moment bölgesinde V tipi ve 2V tipi tasarım benzer bir karakter gösterdiği görülmektedir.



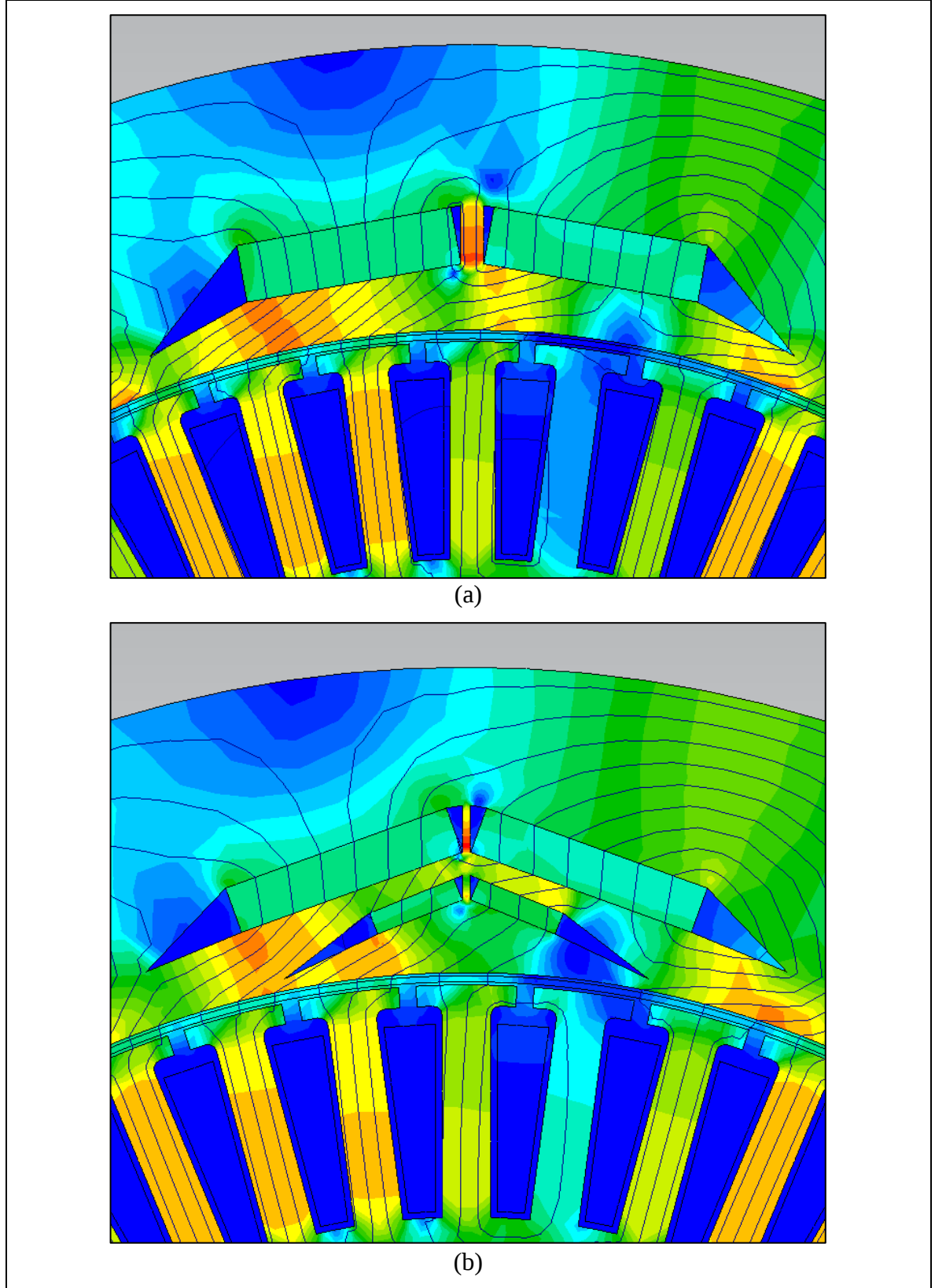
Şekil 5.15. Optimum tasarımların güç-hız performansının karşılaştırılması

Şekil 5.15 incelendiğinde sabit güç bölgesinde, hız arttıkça gücün azaldığı ve maksimum hızda 6 kW güç üretebildiği görülmektedir. 2V tipi tasarım maksimum hızda yaklaşık 7.9kW güç üretirken 3 katlı 8.5kW güç üretebildiği net bir şekilde görülmektedir.

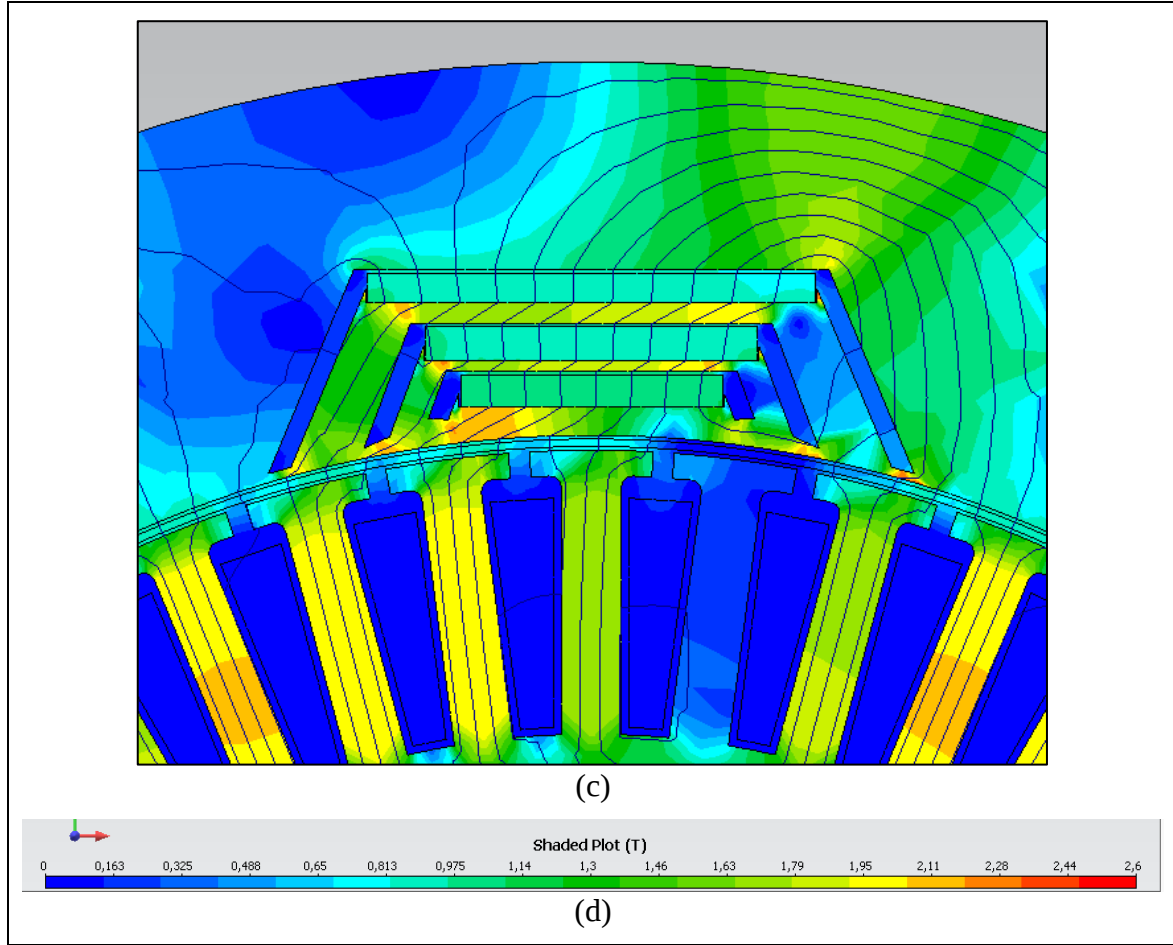
Bu bölümde sabit moment ve sabit güç bölgesindeki aday tasarımların performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. 3 katlı optimum tasarımın rakiplerinden üstün özelliklere sahip olduğu görülmüştür.

5.4. Manyetik Analizler

Bu bölümde aday tasarımların 200A tepe faz akımında manyetik akı yoğunluğunun nüve üzerindeki dağılımı incelenmiştir. Bu analizde Siemens MotorSolve yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca aynı analizler JMAG Designer 22.1 yazılımında da yapılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.16. Maksimum yükte manyetik akı yoğunluğu dağılımı, (a) V tipi tasarım, (b) 2V tipi tasarım, (c) 3 katlı tasarım, (d) Manyetik akı yoğunluğu renk skalası

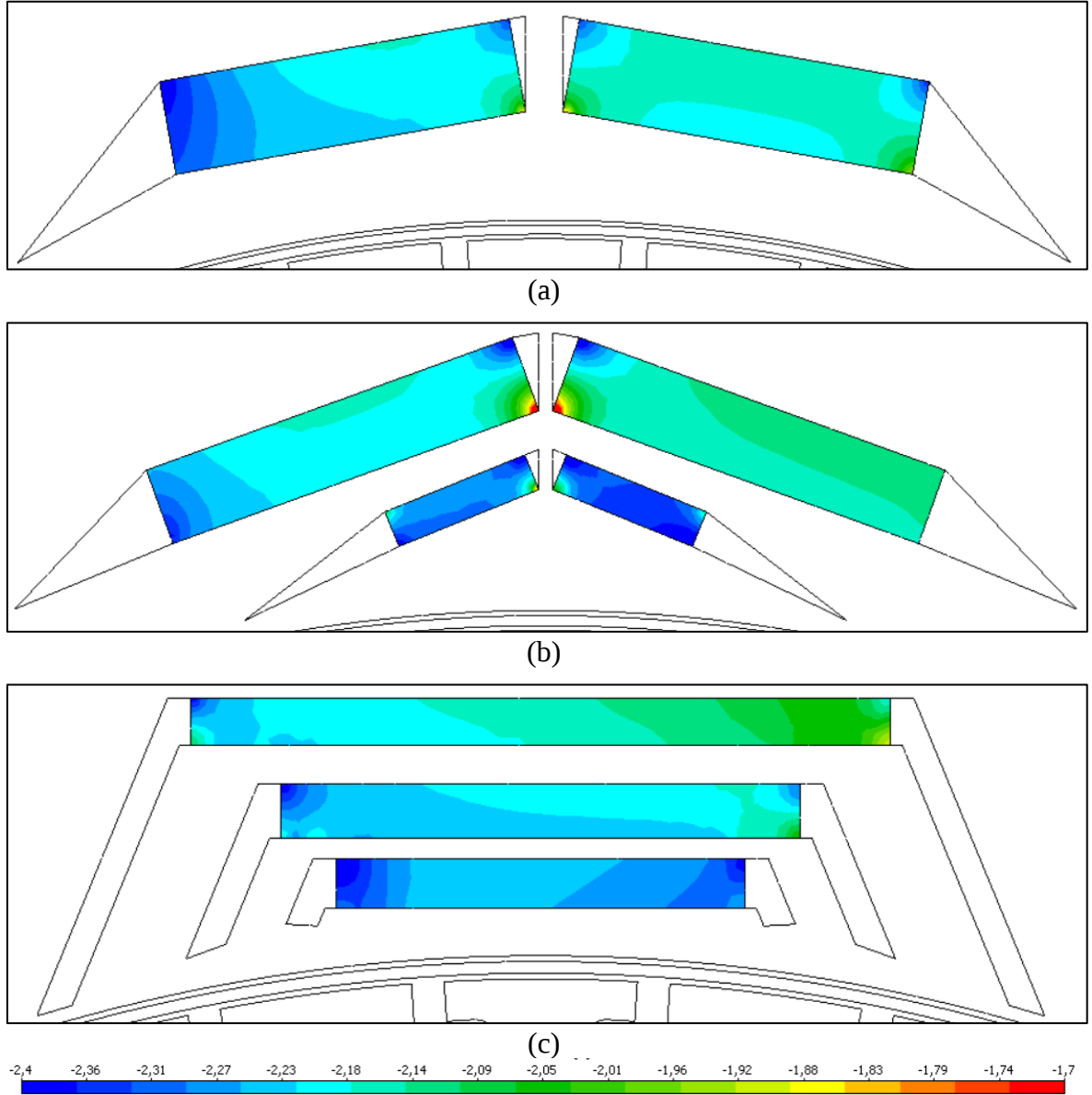


Şekil 5.16. (devam) Maksimum yükte manyetik akı yoğunluğu dağılımı, (a) V tipi tasarım, (b) 2V tipi tasarım, (c) 3 katlı tasarım, (d) Manyetik akı yoğunluğu renk skalası

Akı yoğunluğunun dağılımı 3 aday tasarımda da benzerlik göstermektedir. Burada faz akımları, stator oluk geometrileri ve hava aralığı uzunlukları sabit olduğunsan stator dişlerinde maksimum 1,9 Tesla manyetik akı yoğunluğu değeri görülmektedir. Stator sırt bölgesinde ise V tipi tasarım maksimum 1,38 Tesla, 2V tipi tasarım 1,5 Tesla ve 3 katlı tasarım ise 1,57 Tesla manyetik akı yoğunluğu değerine sahiptir. Bu farkın sebebi 2V tipi ve 3 katlı tasarımda stator sırt mesafesinin kısalmasıdır. Ancak buna rağmen M270-35A malzemesine sahip nüve, doyum değeri olan 1.8 Tesla değerinden uzaktadır. Akı bariyerlerinin altında kalan kısımlarda ise nüvenin doyuma gittiği görülmüştür. Bu durum akı bariyerlerinin görevini yerine getirdiğini, kaçak akıları engellediğini gösteren önemli bir bulgudur.

5.5. Demagnetizasyon Riski Analizi

Bu bölümde üç farklı aday tasarımın farklı yük durumlarındaki demagnetizasyon performansı incelenmiş ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Demagnetizasyon analizinde kullanılan yöntem Bölüm 2.10’da detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 5.17. Demagnetizasyon analiz sonuçları, (a) V Tipi, (b) 2V Tipi, (c) 3 Katlı

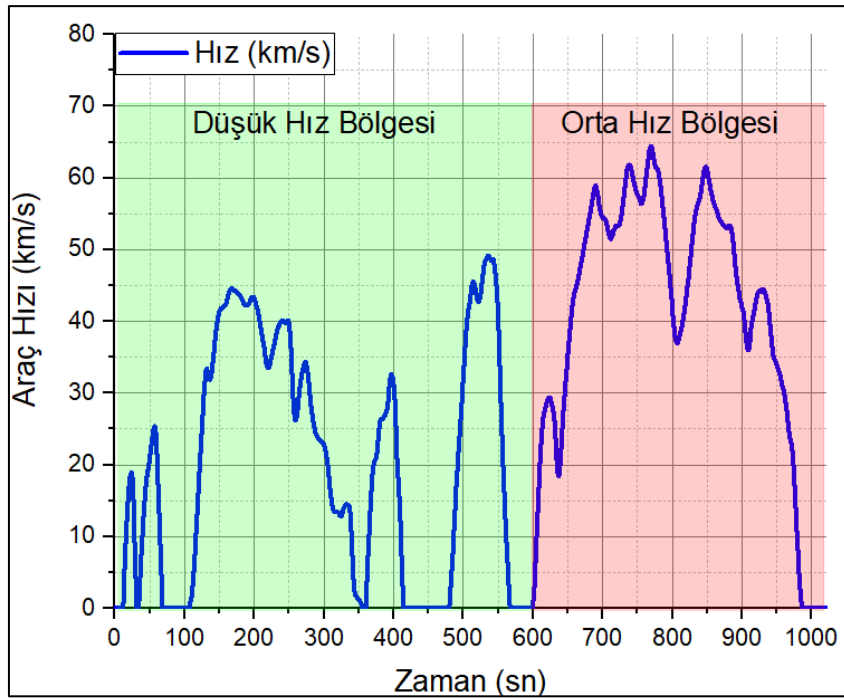
Sonuçlar incelendiğinde V tipi ve 2V tipi tasarımda mıknatısların birbirlerine en yakın oldukları köşeden başlayan bir demagnetizasyon riski olduğu görülmektedir. 3 katlı tasarımda ise maksimum moment üretirken bir demagnetizasyon riskinin diğer adaylara göre çok daha az olduğu görülmemektedir.

5.6. Sürüş Saykılı Performans Analizleri

Elektrik tahrikli araçlarda kullanılan motorlar sabit bir hız ve moment değerinde değil değişken hız ve moment noktalarında çalıştıklarından dolayı performanslarının incelenmesi için farklı sürüş saykılıları geliştirilmiştir. Uluslararası Uyumlu Hale Getirilmiş Hafif Araç Test Prosedürü (WLTP) geliştirilen bu saykılar içerisinde Avrupa Birliği (AB) tarafından geliştirilmiş ve uygulama alınmıştır. WLTP prosedürleri araç kategorilerine göre güç-ağırlık oranına (PMR) dayalı olarak tanımlanan çeşitli Dünya Harmonize Hafif Araç Test Döngülerini (WLTC) içermektedir. Üç farklı WLTC test döngüsü bulunmaktadır [101]. Bunlar;

- Klas 1—Düşük güçlü araçlar için $PMR \leq 22$;
- Klas 2—Araçlar için $22 < PMR \leq 34$;
- Klas 3— Yüksek güçlü araçlar için $PMR > 34$ olarak verilmektedir.

Tez kapsamında geliştirilen motor Klas 1 sınıfı araçlarda kullanılmak üzere geliştirildiğinden dolayı performans analizleri de bu kapsamda gerçekleştirilmiştir. WLTC Klas 1'e ait araç hızının zamana bağlı olarak değişimi aşağıdaki Şekil 5.18'de görülmektedir.



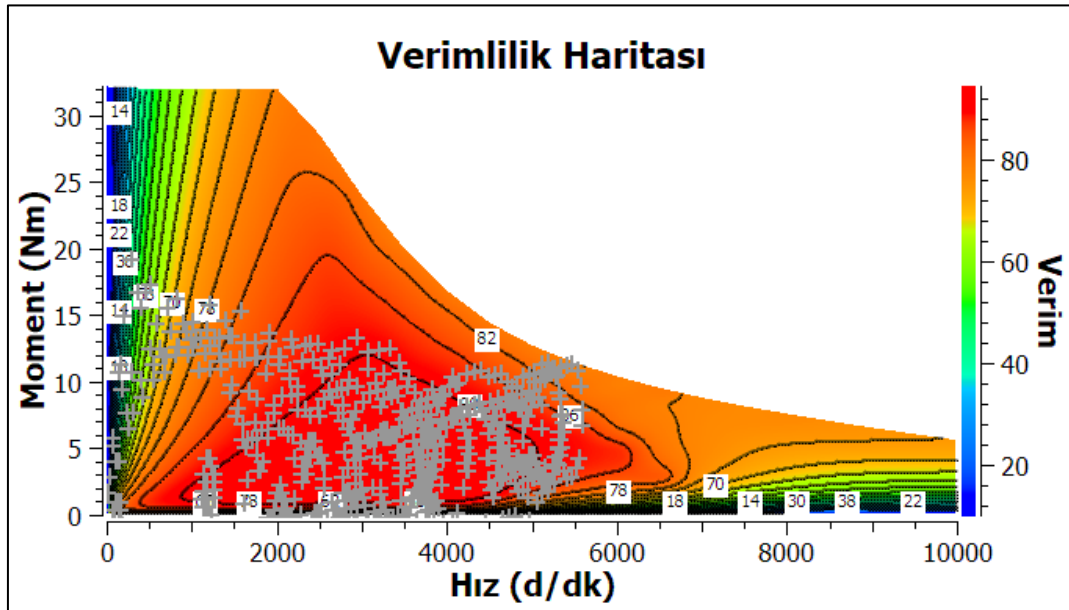
Şekil 5.18. Motorun sürüş saykılı içerisinde çalıştığı bölgelerin gösterimi

Araç hızına karşılık ihtiyaç duyulan motor momentinin hesaplanmasında teker çapı, sürtünme katsayısı, rüzgar direnci, aktarma oranı gibi araç dinamikleri etkilidir. Bu bölümde gerçekleştirilen analizlerde araç özellikleri Citroën Ami referans alınarak gerçekleştirilmiştir [102].

Çizelge 5.2. Citroën Ami araç özellikleri

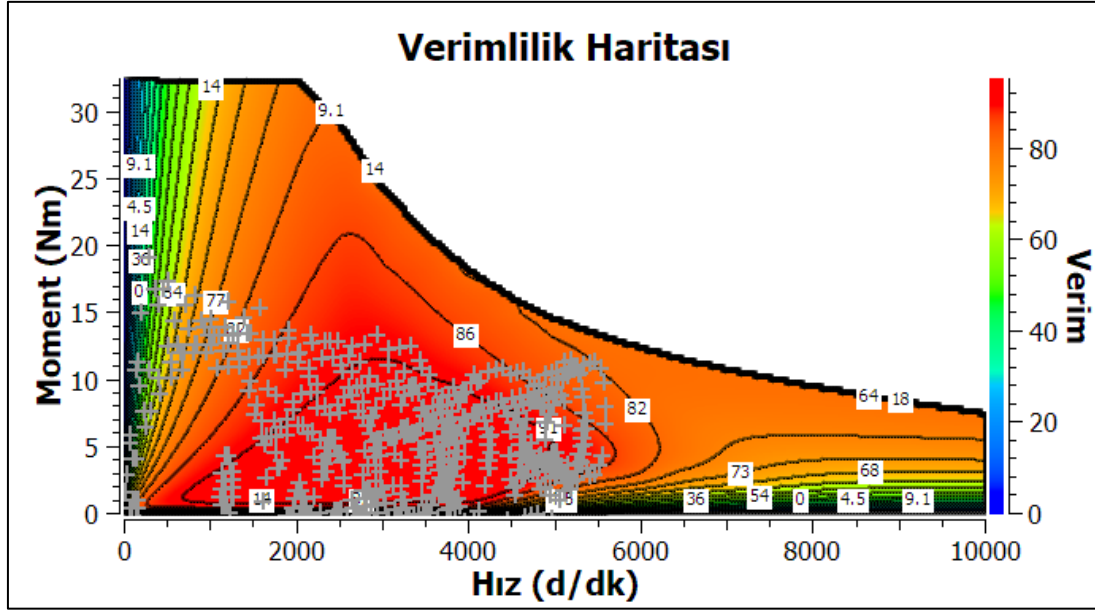
Teker Çapı	490 mm
Aktarma Oranı	8
Hava Yoğunluğu	1.205 kg/m ³
Sürtünme Katsayısı	0.3
Araç Kesit Alanı	2.88 m ²
Tekerlek Sürtünme Katsayısı	0.008
Toplam Ağırlık	710

Çizelgedeki araç bilgilerine göre WLTP sürüş saykılında performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Bir saykıl süresince Çizelge 5.2’de verilen özelliklere sahip bir aracın bir saykıl süresince çalışacağı hız ve moment noktaları aday tasarımların verimlilik haritaları üzerinde gösterilmiştir.



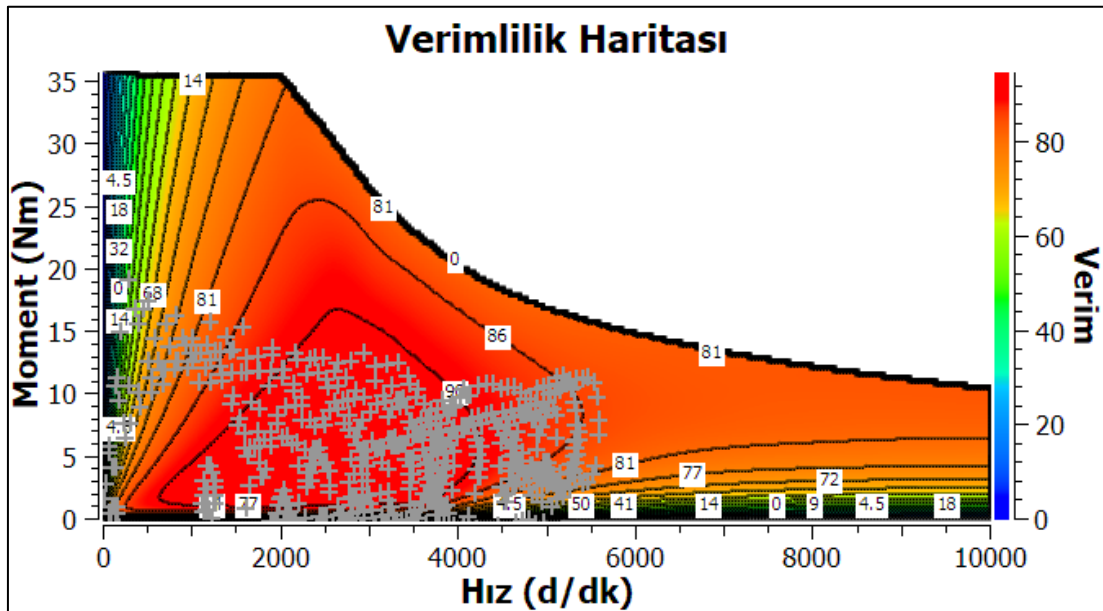
Şekil 5.19. V Tipi optimum tasarımın sürüş saykılı içerisinde çalıştığı bölgelerin gösterimi

V tipi tasarımın WLTP klas 1 dikkate alınarak gerçekleştirilen analiz sonucunda bir saykıl süresince ortalama %59.59 verimlilik sunduğu görülmüştür.



Şekil 5.20. 2V Tipi optimum tasarımın sürüş saykılı içerisinde çalıştığı bölgelerin gösterimi

V tipi tasarımın WLTP klas 1 dikkate alınarak gerçekleştirilen analiz sonucunda bir saykıl süresince ortalama %60.12 verimlilik sunduğu görülmüştür.



Şekil 5.21. 3 Kat optimum tasarımın sürüş saykılı içerisinde çalıştığı bölgelerin gösterimi

3 Kat tipi tasarımın WLTP klas 1 dikkate alınarak gerçekleştirilen analiz sonucunda bir saykıl süresince ortalama %61.35 verimlilik sunduğu görülmüştür.

5.7. Sonuçların Yorumlanması

Bu bölümde tasarım optimizasyon çalışması sonrası elde edilen üç farklı optimum tasarımın detay analizleri karřılařtırılmalđ olarak sunulmuştur. Yapılan karşılaştırma çalışmasında mıknatıs başına moment üretim kabiliyeti, CSPR, relüktans moment üretim kabiliyeti, demagnetizasyon karakteriştiği, sürüş saykılı performansı parametreleri karřılařtırılmalđ olarak sunulmuştur.

3 Kat tipi tasarımın diğer iki optimum tasarıma göre WLTP klas 1 saykıl süresince ortalama %61.35 verimlilik sunduğu, daha yüksek relüktans moment bileşenine sahip olduğu, yüksek hızda yüksek moment üretme kabiliyetinin yüksek olduğu görülmüştür. Belirtilen karşılaştırma sonucunda belirlenen amaçlar doğrultusunda en uygun tasarımın 3 katlı MD-SRM olduğuna karar verilmiştir. Bir sonraki bölümde bu motorun prototip üretim süreci ile ilgili detaylar sunulmuştur.

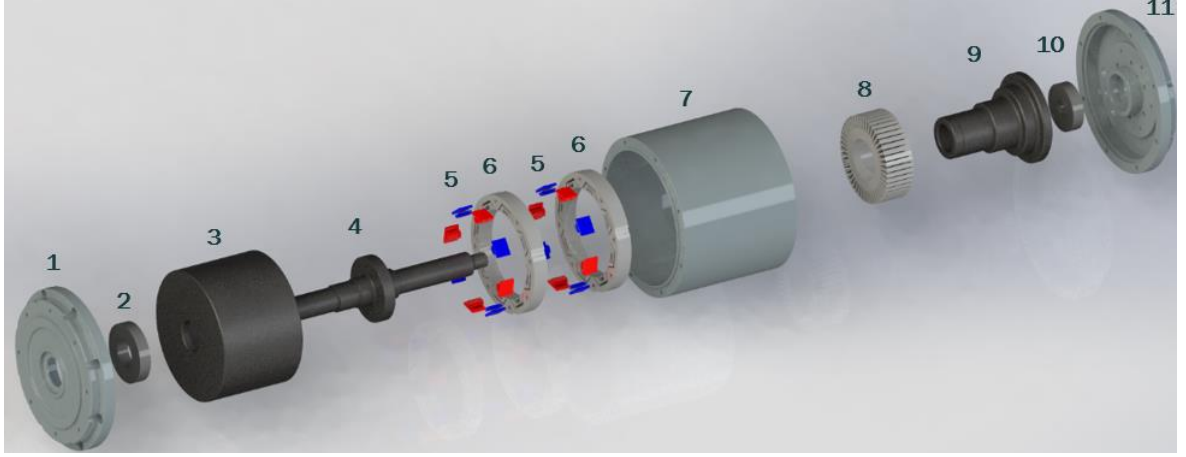
6. MEKANİK TASARIM VE PROTOTİP ÜRETİM

Bu bölümde tez kapsamında üretimi gerçekleştirilen dış rotorlu MD-SRM'nin imalat sürecinden detaylı olarak bahsedilecektir.

Mekanik tasarım sürecindeki aşamalar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Prototip üretimi planlanan 48 oluklu 8 kutuplu dış rotorlu MD-SRM motoruna ait nüve uzunluğu, stator-rotor iç ve dış çapları, bobin başı uzunluğu gibi motor gövdesinin tasarımını etkileyen ölçüler mekanik tasarım sürecinde dikkate alınmıştır.
- Mekanik tasarım sürecinde standart dış rotorlu motorlarda olduğu gibi motor gövdesinin hareketli olmamasına dikkat edilmiştir. Bunun sebebi, bu motorun elektrik tahrikli sistemler için geliştirilmiş olması sebebiyle bir aktarma organına bağlanması gerekliliğidir. Bu sebeple, dış rotorlu olmasına rağmen momenti motor miline aktaran bir tasarım gerçekleştirilmiştir.
- Mekanik tasarım sürecinin tamamlanmasının akabinde imalat için teknik resimler hazırlanmıştır.
- Talaşlı imalat, lazer kesim, lazer kaynak süreçlerini içeren imalat çalışmaları sonrasında motor montaja hazır hale getirilmiştir.
- Rotor tutucu, mil ve rotor nüvesinin montajının tamamlanmasının ardından balanslama işlemi yapılmıştır.
- Balanslama işleminin ardından motor montajı yapılmış ve laboratuvar testlerine hazır hale getirilmiştir.

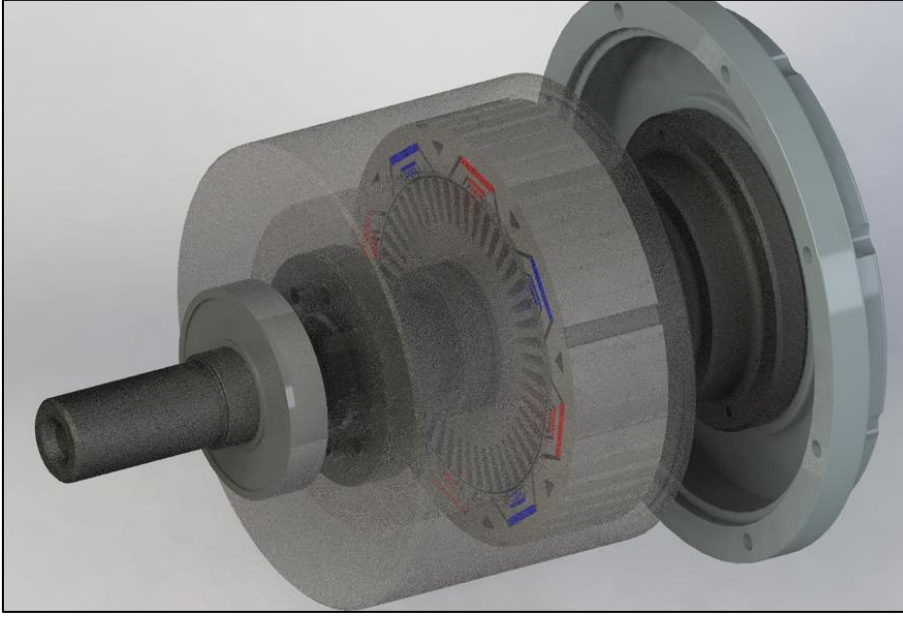
Mekanik tasarım aşamaları yukarıdaki gibi açıklanan MD-SRM'nin tasarımına ait detaylar aşağıdaki Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. MD-SRM 3 boyutlu tasarımı

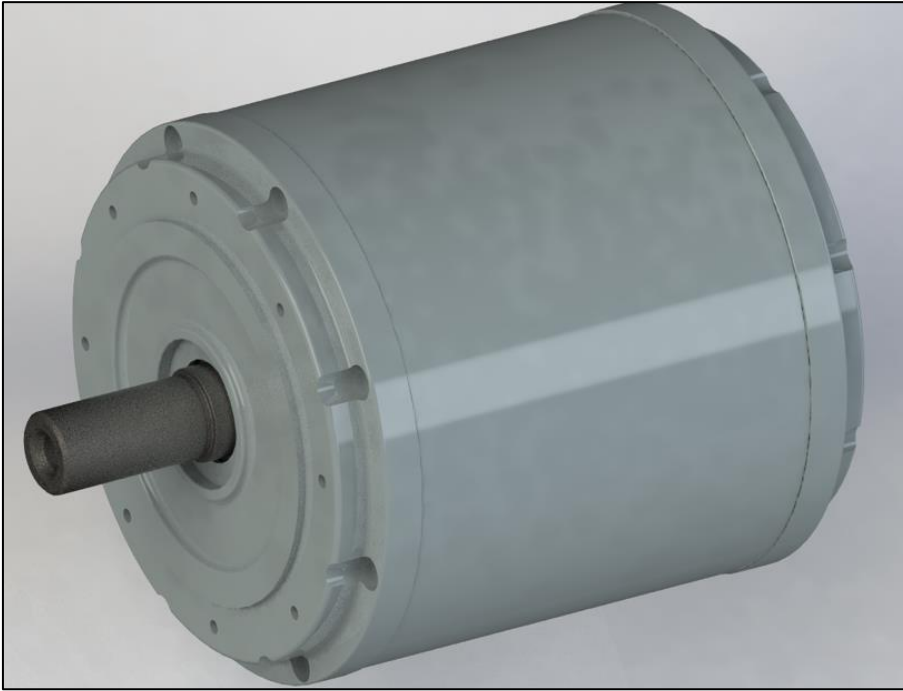
- (1) Motor ön kapağı
- (2) Ön rulman
- (3) Rotor tutucu
- (4) Mil
- (5) Mıknatıslar
- (6) Rotor paketleri
- (7) Dış gövde
- (8) Stator paketi
- (9) Stator tutucu
- (10) Arka rulman
- (11) Arka kapak.

Dış rotorlu MD-SRM'nin sıradan dış rotorlu motorlar gibi mekanik tasarımının yapılması durumunda hedef kitlesi olan elektrik tahrikli sistemlere montajı mümkün olmayacaktır. Çünkü ister hafif elektrikli araç ister otomotiv grubu olsun tahrik motoru aktarma organına mil vasıtası ile bağlanmaktadır. Bu sebeple bu tez çalışmasındaki dış rotorlu motorun üretmiş olduğu mekanik gücü mil vasıtası ile aktarması gerekmektedir. Aşağıdaki Şekil 6.2'de motorun dış gövde ve ön kapak hariç yapısı görülmektedir. Burada rotor nüvesi rotor tutucu parçaya bağlanmış ve motor mili rotor tutucu parçaya göbekten sabitlenmiştir. Mil ön ve arka kapaklarda bulunan rulmanlar vasıtası ile merkezlenerek motorun üretmiş olduğu dönme hareketini rotor tutucu üzerinden mile aktarmaktadır.



Şekil 6.2. MD-SRM 3 boyutlu detay görünümü

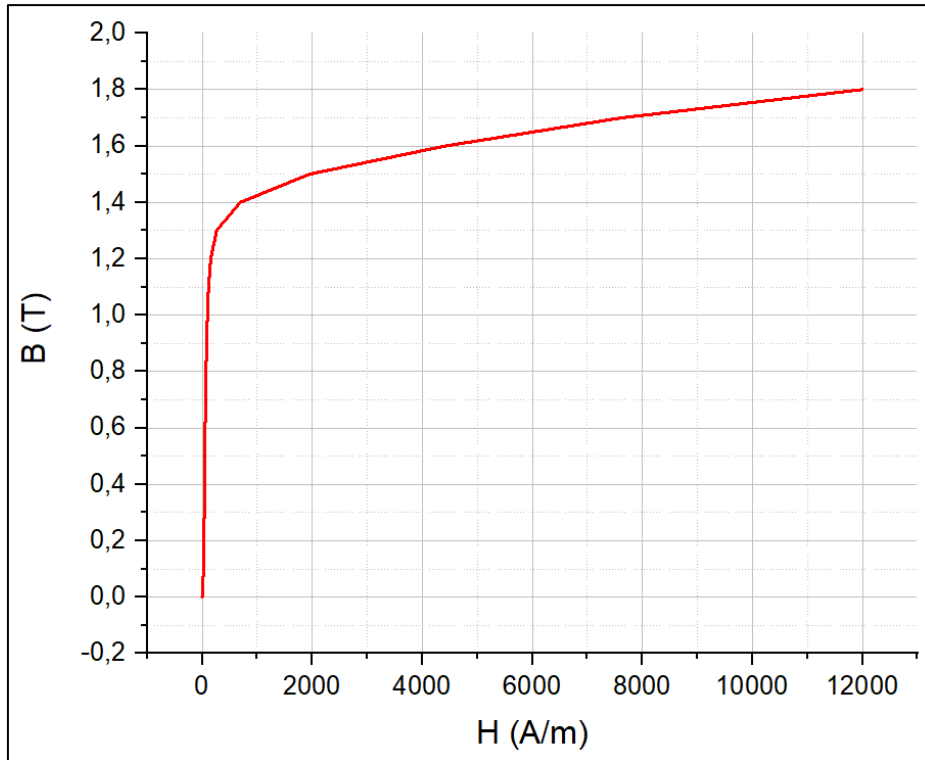
Ön kapak ve dış gövdenin de eklenmesi ile aşağıdaki Şekil 6.3'deki tasarım elde edilmektedir. Yapılan tasarım ile birlikte MD-SRM aktarma organlarına doğrudan akupile edilebilen bir yapıya dönüşmektedir.



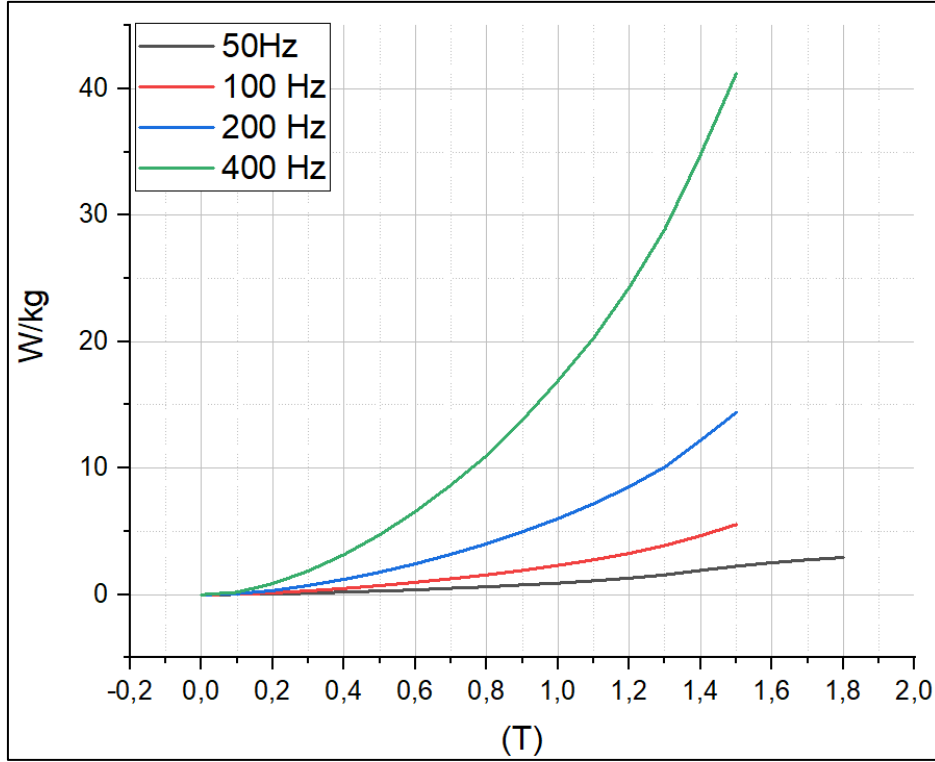
Şekil 6.3. MD-SRM 3 boyutlu montajlı görünümü

6.1. Rotor ve stator nüvesinin üretilmesi

Elektrik motorlarının performansını etkileyen en önemli parçalardan birisi rotor ve statorda kullanılan nüve malzemesidir. Nüve malzemeleri elektrik makinalarında genellikle 0.2, 0.35 ve 0.50 mm kalınlıklarda kullanılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında 0.35 mm kalınlığa sahip M235-35A tipinde yüksek manyetik geçirgenliğe ve düşük elektriksel kayba sahip silisli sac kullanılmıştır.

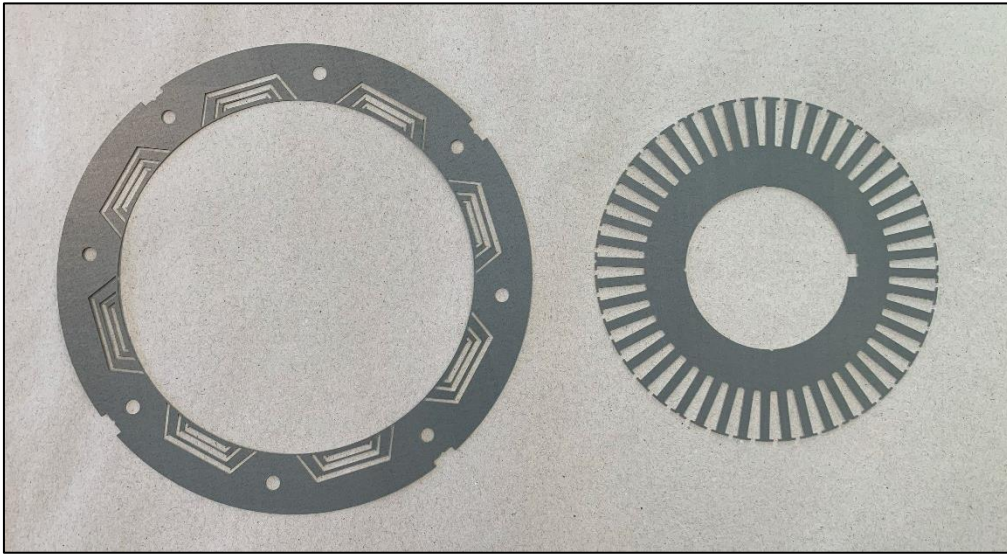


Şekil 6.4. M235-35A silisli saca ait B-H eğrisi [103]



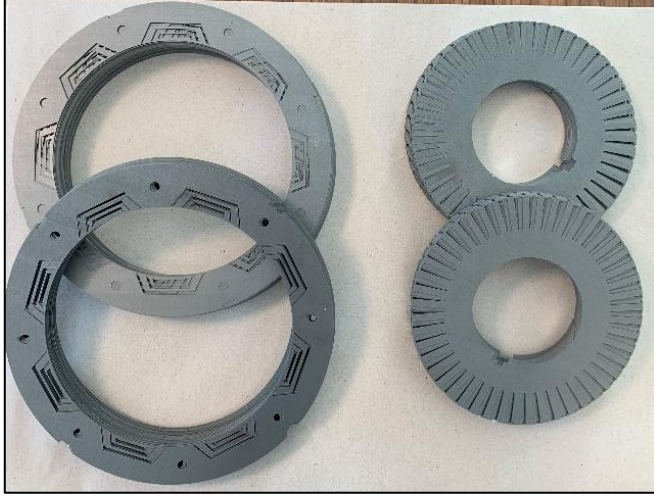
Şekil 6.5. M235-35A silisli saca ait frekansa bağlı kayıpların değişimi [103]

Nüveler farklı yöntemler kullanılarak üretilebilmektedir. Lazer kesim, kalıp, su jeti ve tel erezyon laminasyon üretiminde kullanılan başlıca yöntemlerdir. Bu çalışmada üretim miktarı, hassasiyeti, maliyeti ve üretim hızı dikkate alınarak lazer kesim yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle numune kesim işlemi yaptırılmış ve laminasyonlar incelenmiştir.



Resim 6.1. Numune rotor ve stator sacları

Çapak ve toleranslarının uygun olduğuna karar verildikten sonra her birisinden 150'şer adet üretim yaptırılmıştır.



Resim 6.2. Rotor ve stator laminasyonları

6.2. Sıkıştırma ve Paketleme

Tez çalışması kapsamında lazer kesim yöntemi ile üretilen laminasyonların rotor ve stator paketi haline getirilmesi için sıkıştırma aparatı kullanılması gerekmektedir. Hem rotor hem de stator paketlerini elde etmek için tasarlanan ve üretilen sıkıştırma aparatları aşağıdaki Resim 6.3 ve Resim 6.4'de görülmektedir.



Resim 6.3. Stator dizme ve sıkıştırma aparatı



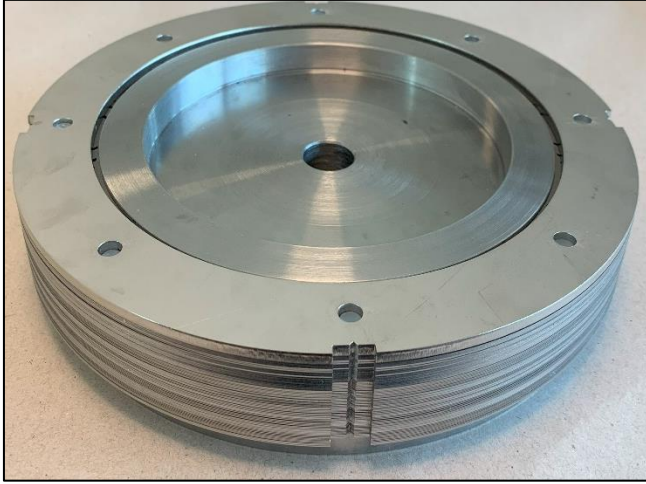
Resim 6.4. Rotor dizme ve sıkıştırma aparatı

Sıkıştırma aparatları ile rotor paket uzunluğu 25 mm, stator paket uzunluğu ise 50 mm'dir. Rotor paket uzunluğunun 25 mm olarak belirlenmesi rotorda kaykışılmanın uygulanabilir olmasını sağlamaktır.



Resim 6.5. Rotor laminasyonlarının aparat yardımı ile dizilmesi

Rotor laminasyonlarının sıralı bir şekilde dizilebilmesi için yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi hizalama pinleri kullanılmıştır. 25 mm rotor laminasyonu elde edildikten sonra 3 mm kalınlığında paslanmaz çelik bir kapak malzemesi de rotor laminasyonunun üzerine yerleştirilmiştir.



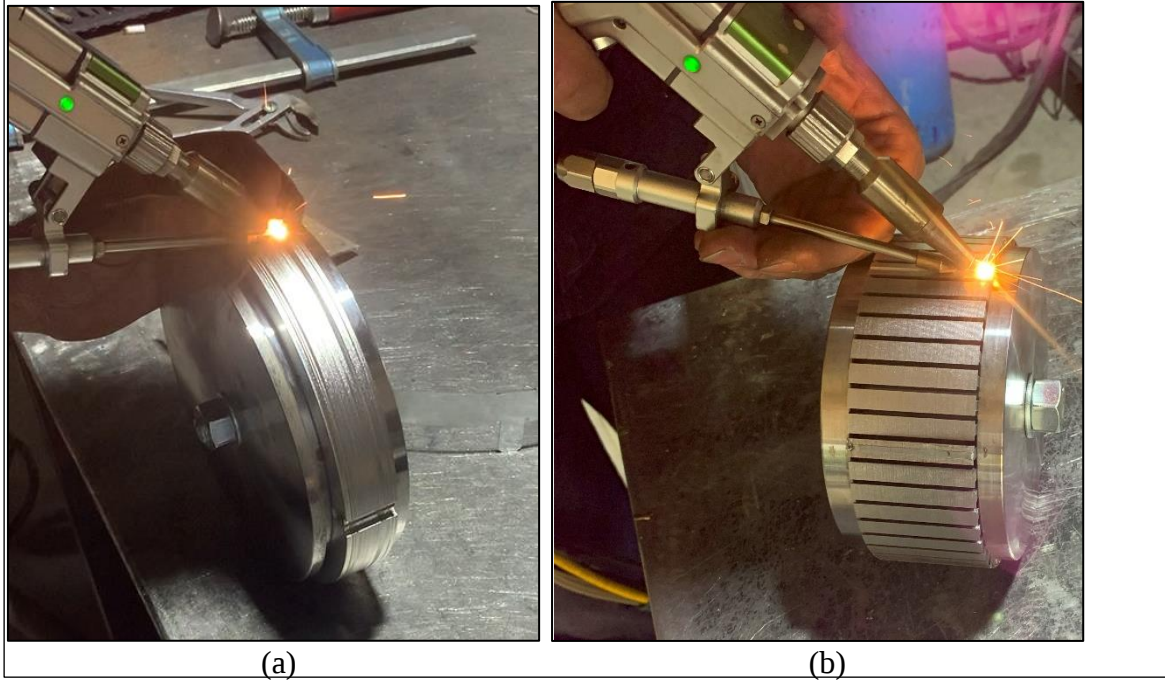
Resim 6.6. Rotor paketine paslanmaz plaka kapağın yerleştirilmesi

Yerleştirilen bu kapak malzemesi ile birlikte rotorda yer alan mıknatısların rotordan çıkmasının önüne geçilmiştir.



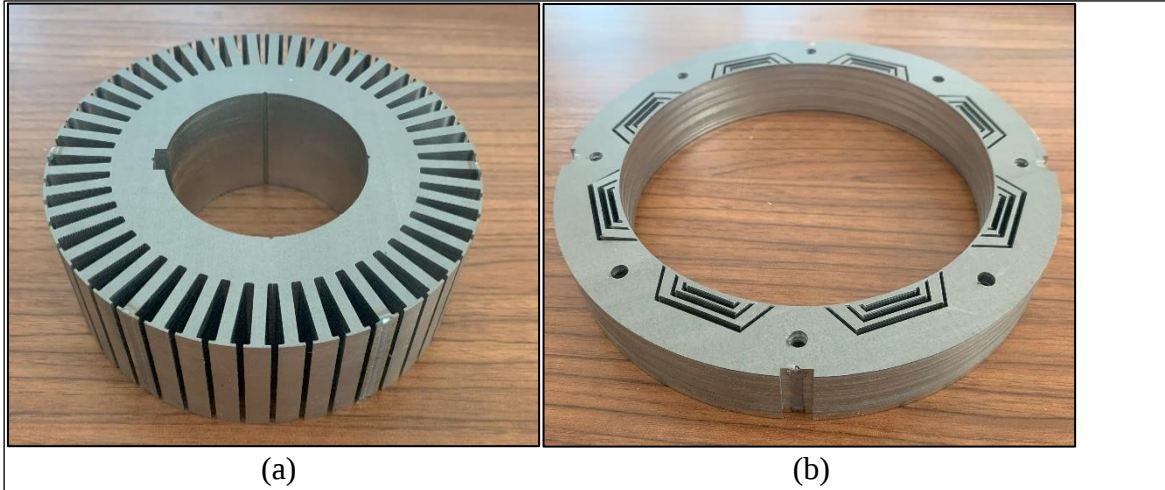
Resim 6.7. Stator laminasyonlarının aparat yardımı ile dizilmesi

Stator laminasyonlarının sıralı bir şekilde dizilebilmesi için de yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi kama kullanılmıştır. 50 mm stator laminasyonu elde edildikten sonra kaynak işlemine hazır hale gelmiştir.



Resim 6.8. Lazer kaynak işlemi, (a) rotor lazer kaynak işlemi, (b) stator lazer kaynak işlemi

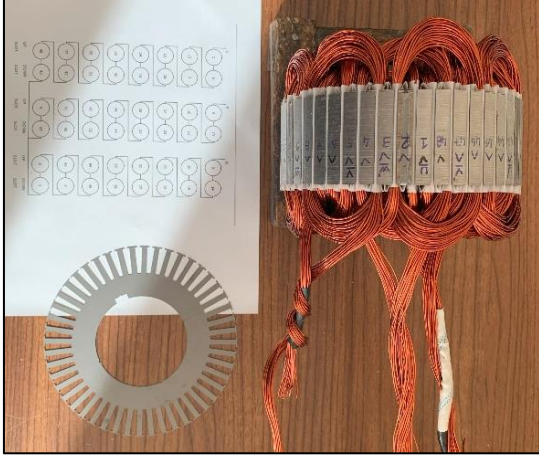
Lazer kaynak yöntemi kullanılarak kaynak oyukları boyunca kaynak işlemi yapılmış ve rotor ve stator paketleri elde edilmiştir.



Resim 6.9. Rotor ve stator paketlerinin oluşturulması, (a) Stator, (b) Rotor

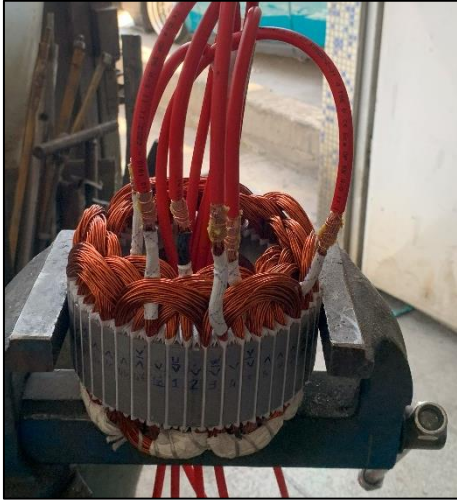
6.3. Bobinaj İşlemi

Stator paketi üretildikten sonra bobinaj işlemi sarım şemasına uygun bir şekilde yapılmıştır. Öncelikle bobinler stator oluklarına yerleştirilmiştir. Stator oluklarına yerleşim sonrası statorun genel görüntüsü aşağıdaki Resim 6.13’de verilmiştir.



Resim 6.10. Sargılı statorun elde edilmesi

Bu işlemin akabinde aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere bobin giriş ve çıkışlarına kablo bağlantısı yapılmıştır.

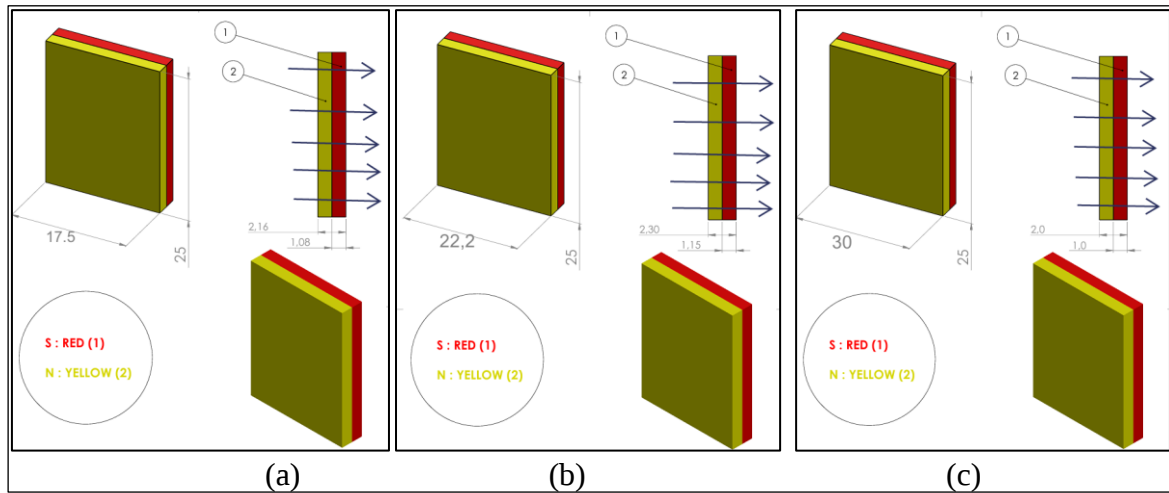


Resim 6.11. Stator sargı bağlantılarının yapılması

Kablo bağlantısının yapılmasının akabinde ise bobin başlarına şekil verilmiş ve bandaj ipi kullanılarak sabitlenmiştir. Motor gövdesinden dışarıya her faza ait bobinlerin giriş ve çıkış uçları çıkartılmıştır.

6.4. Mıknatıs tasarımı ve tedariki

Optimum tasarıma ait mıknatıs ölçülerinin elde edilmesi ile birlikte mıknatıslara ait aşağıdaki Şekil 6.6’da görülen imalat resimleri oluşturulmuştur.

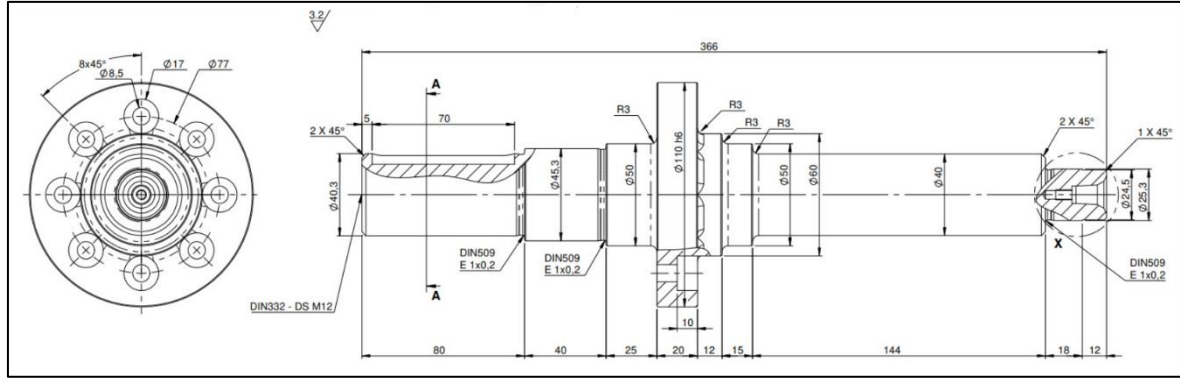


Şekil 6.6. Optimum tasarıma ait mıknatıs geometrisi, (a) 1. Kat mıknatısı, (b) 2. Kat mıknatısı, (c) 3. Kat mıknatısı

Yurtdışı büyük bir tedarikçiden tez kapsamında kullanılmak üzere optimum ölçülere uygun maksimum çalışma sıcaklığı 150°C olan N30SH mıknatıslar tedarik edilmiştir.

6.5. Gövde, kapak ve milin işlenmesi

Bu bölümde motorun mekanik parçalarının imalat süreci ile ilgili bilgi verilmiştir. Bu bölümde önce mekanik tasarıma ait imalat teknik resmi, daha sonra da imalat sonrası ürünün resmi sunulmuştur. Gövde, kapak ve mil malzemesi olarak ST37 kullanılmıştır. Aşağıdaki Şekil 6.7’de mile ait teknik resim görülmektedir.



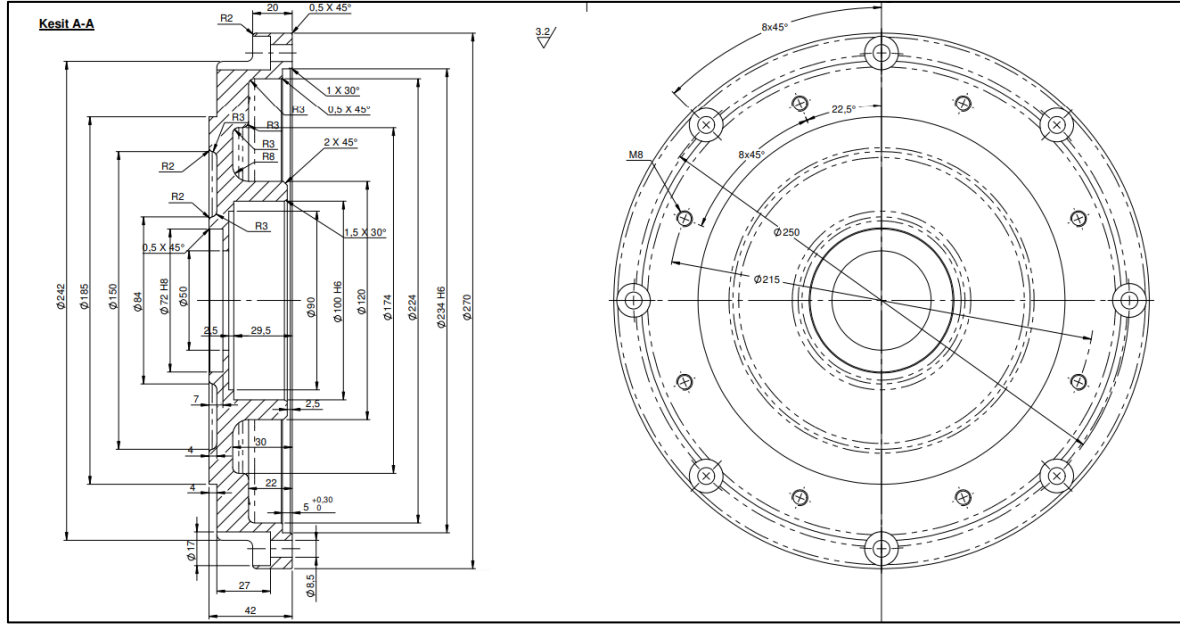
Şekil 6.7. Motor mil teknik resmi

Mil öncelikle dolu bir malzemedan tornada işlenmiştir. Akabinde rulman ve kaplin geçecek bölgeleri için taşlama işlemi yapılmıştır. Yapılan taşlama işlemi ile mil hazır hale gelmiştir. İmal edilen mil aşağıdaki Resim 6.12’de görülmektedir.



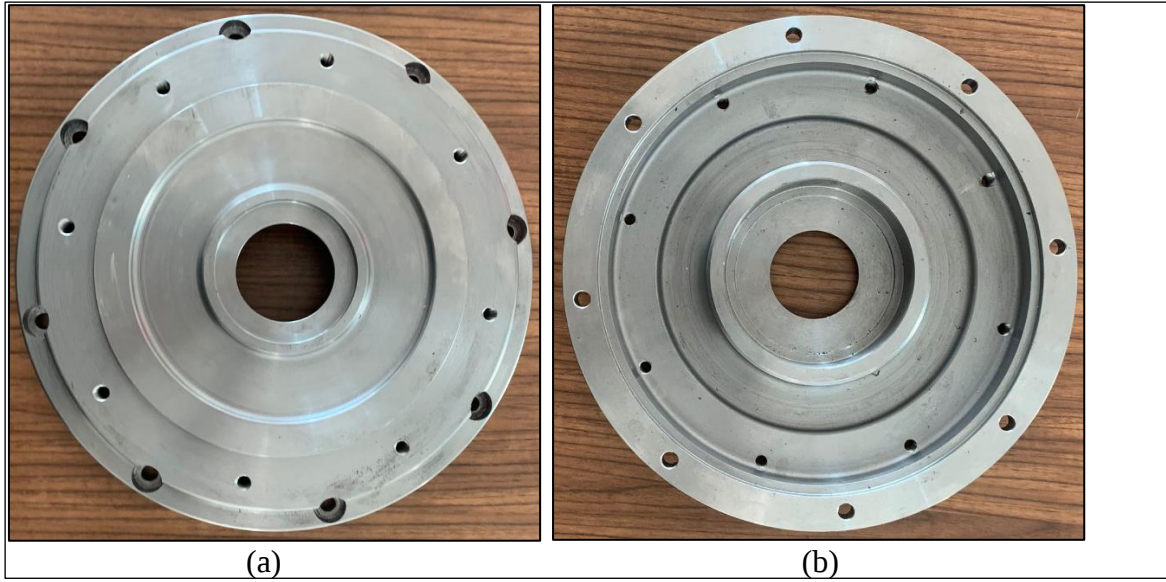
Resim 6.12. Teknik resme uygun üretilmiş motor mili

Ön kapak ve arka kapak için de benzer süreç işletilmiştir. Aşağıdaki Şekil 6.8’de motora ait ön kapağın teknik resmi görülmektedir.



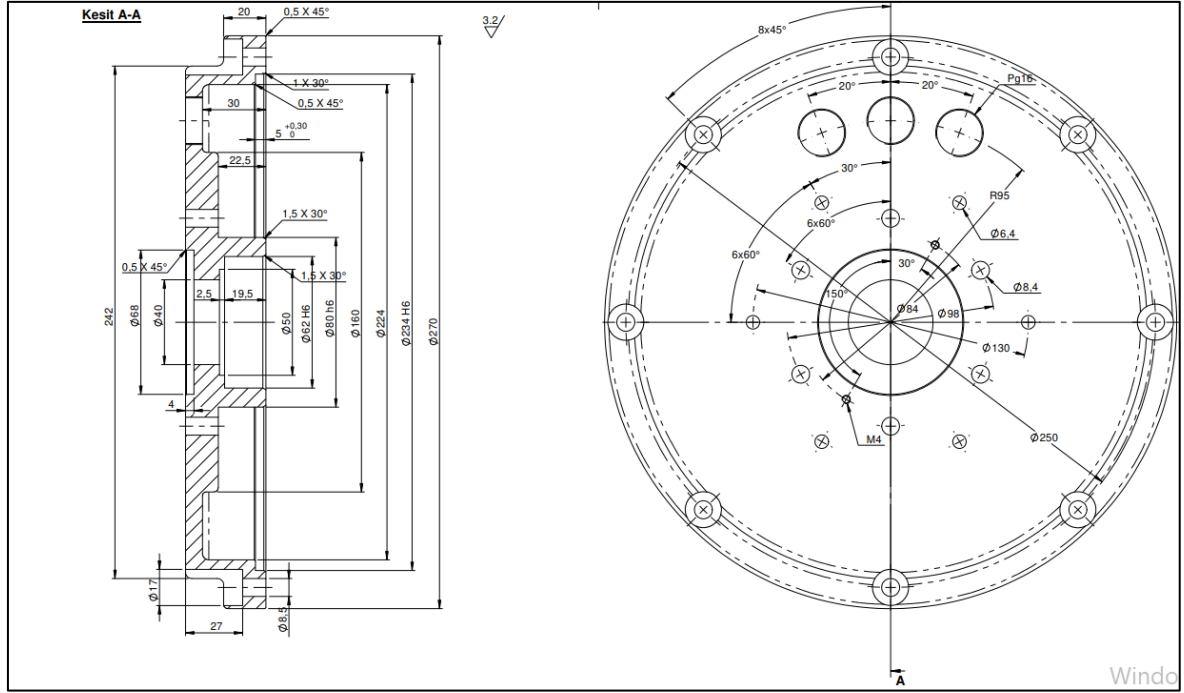
Şekil 6.8. Motor ön kapak teknik resmi

Torna ile dairesel işlemler yapılmış olup delik işlemleri için 3 eksen dik işleme merkezinde delikler delinerek hazır hale getirilmiştir. İmal edilen ön kapak aşağıdaki Resim 6.13’de görülmektedir.

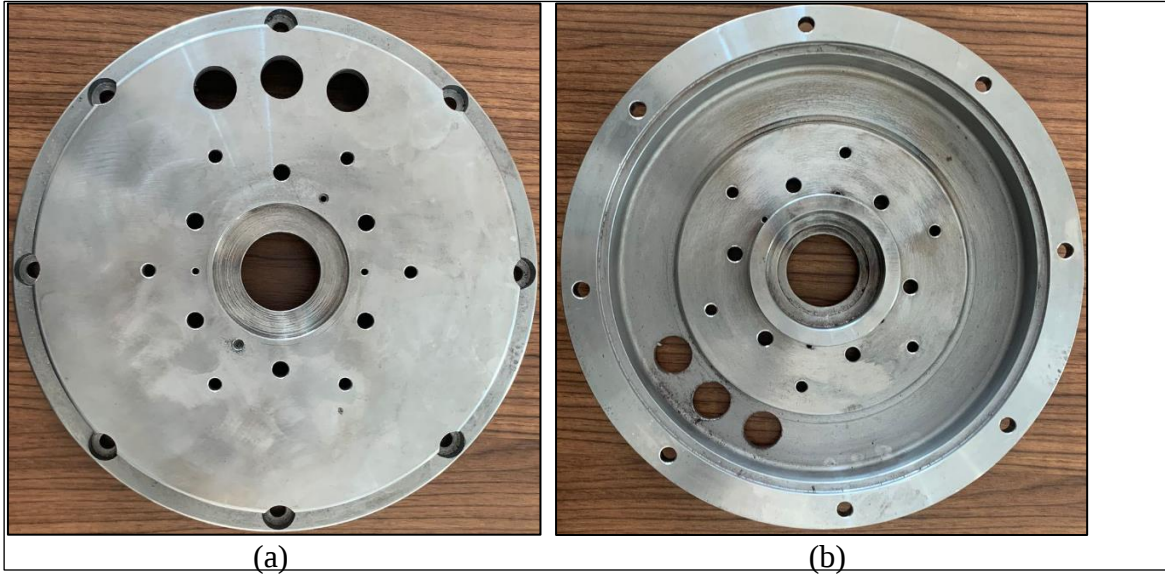


Resim 6.13. Teknik resme uygun üretilmiş motor ön kapağı, (a) ön görünüş, (b) arka görünüş

Arka kapakta da ön kapakta yapılan işlemlerin aynısı yapılmıştır. Bu kapsamda Şekil 6.9’da teknik resim, Resim 6.14’de imal edilen ürün görülmektedir.

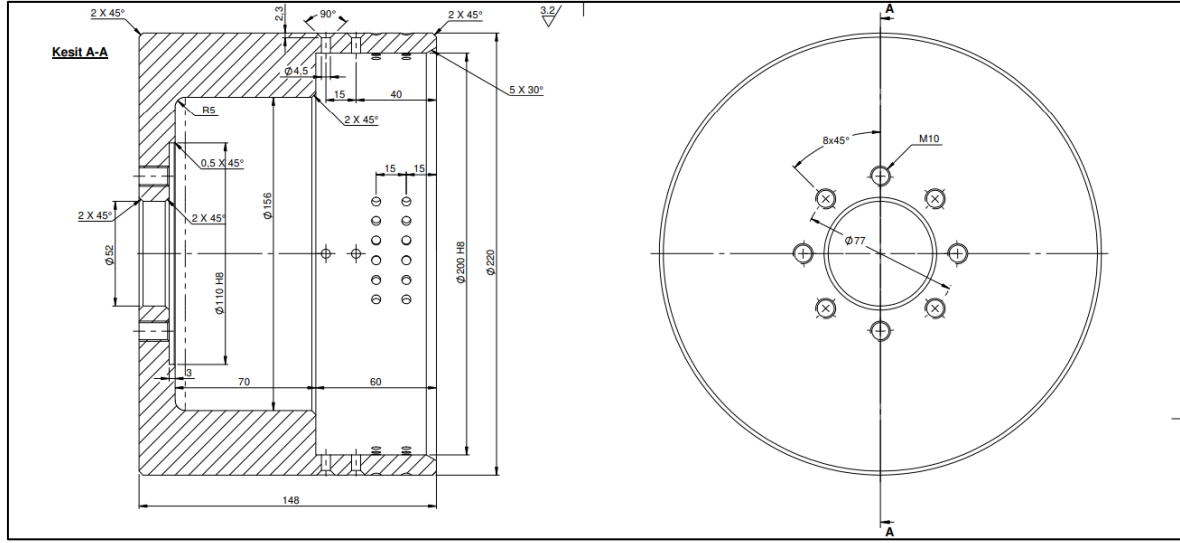


Şekil 6.9. Motor arka kapak teknik resmi



Resim 6.14. Teknik resme uygun üretilmiş motor arka kapağı, (a) ön görünüş, (b) arka görünüş

Tez çalışmasının özgün yönlerinden birisi olan dış rotorlu ama hareketin milden alınması durumu için kritik öneme sahip iki ilave parça bulunmaktadır. Bunlar rotor tutucu ve stator tutucu olarak adlandırılmıştır. Rotor tutucu içerisine rotor nüvesi yerleştirilmekte ve rotor tutucu motor miline göbekten bağlanmaktadır. Rotor tutucuya ait teknik resim ve imal edilen ürün aşağıda görülmektedir.

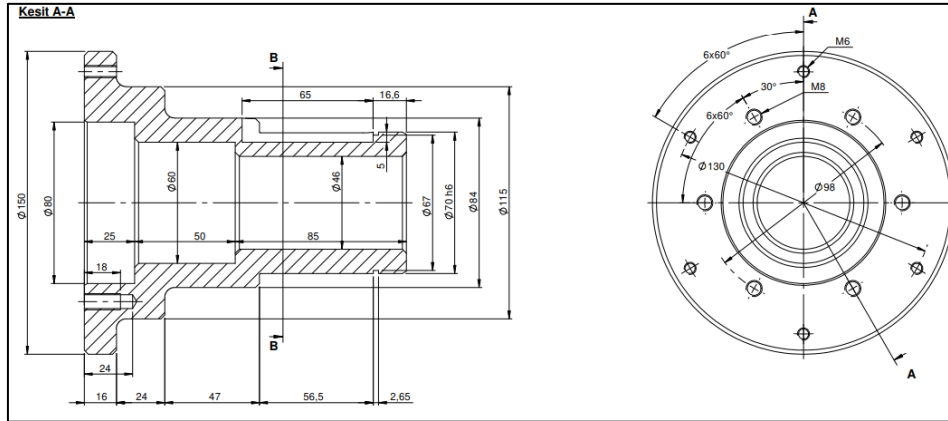


Şekil 6.10. Rotor tutucu teknik resmi



Resim 6.15. Teknik resme uygun üretilmiş rotor tutucu

Bir diğer kritik parça olan stator tutucu ise arka kapağa monte edilmektedir. Stator tutucuya ait teknik resim ve imal edilen ürün aşağıda görülmektedir.

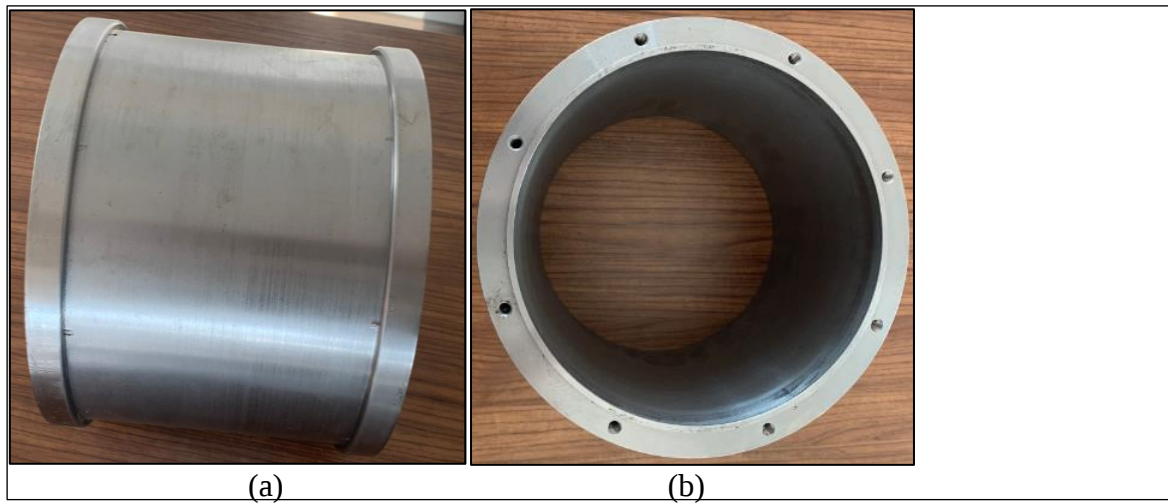


Şekil 6.11. Stator tutucu teknik resmi



Resim 6.16. Teknik resme uygun üretilmiş stator tutucu

Motor gövdesine ait imalat teknik resmi ve imal edilen ürün aşağıda verilmiştir.



Resim 6.17. Teknik resme uygun üretilmiş motor gövdesi, (a) yan görünüş, (b) üst görünüş

6.6. Montaj Faaliyetleri

Bu bölümde prototip imalat süreci tamamlanan MD-SRM'nin montaj faaliyetleri detaylı bir şekilde görsellerden faydalanılarak açıklanmıştır.

İlk olarak aşağıdaki Resim 6.18'de görüldüğü gibi arka kapağa rulman montajı yapılmıştır. Rulman montajı sırasında rulmanın zorlanmamasına özen gösterilmiş ve pres yardımı ile yavaş bir şekilde yuvasına yerleştirilmiştir.



Resim 6.18. Rulman yerleştirilmiş arka kapak

Rulman yerleştirildikten sonra stator tutucu parçanın arka kapağa montajı gerçekleştirilmiştir.



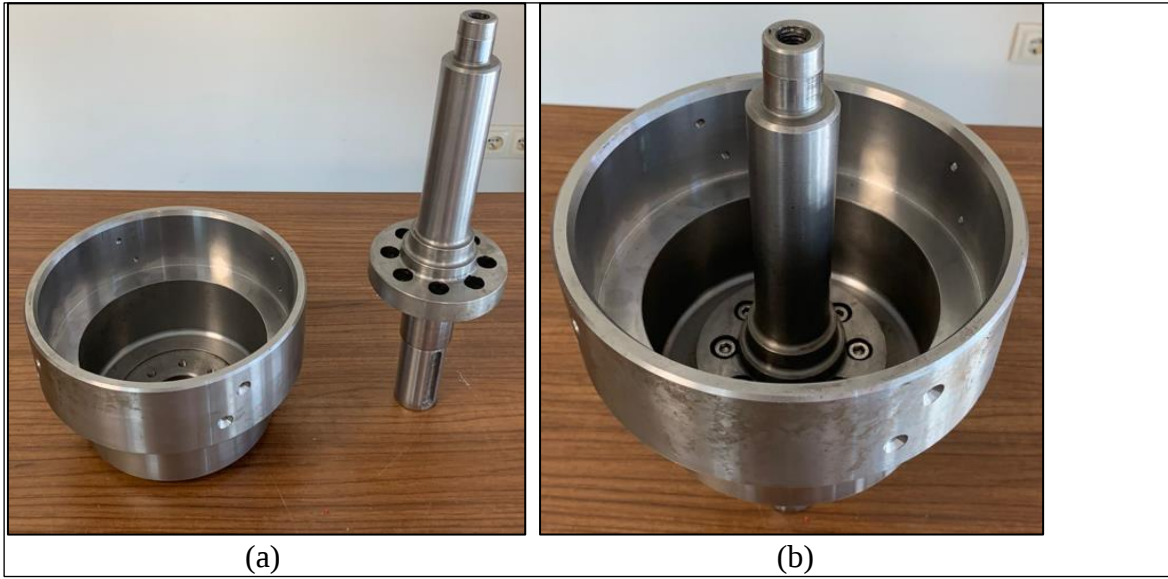
Resim 6.19. Arka kapak ve stator tutucu parçanın montajı

Bu işlemten sonra stator paketinin montaj işlemi gerçekleştirilmiştir. Stator paketinin stator tutucu parçada hareket etmemesi için kamadan faydalanılmıştır. Ayrıca, stator paketi parçaya ait mile geçtikten sonra bir segman yardımı ile sıkıştırılmıştır.



Resim 6.20. Arka kapak ve stator tutucu parçanın montajı

Daha sonra rotor tutucu parça ile motor milinin montajı yapılmıştır.



Resim 6.21. Motor mili ve rotor tutucu montajı, (a) montaj öncesi, (b) montaj sonrası

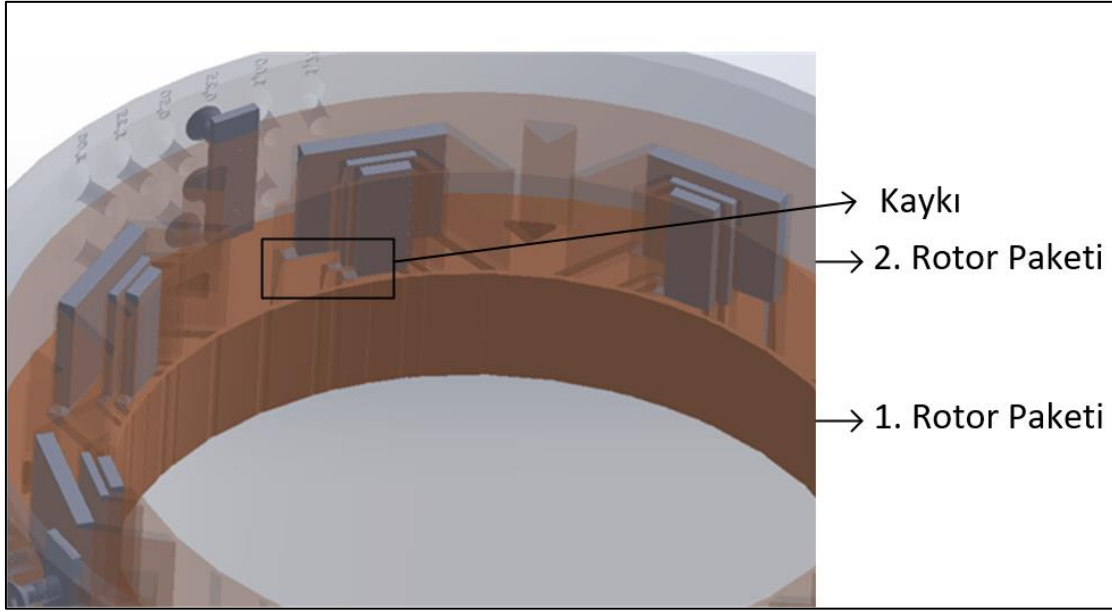
Bu işlemden sonra rotor paketine mıknatısların yerleştirilmesi yapılmıştır. N ve S kutuplarının doğru sıralanmasına dikkat edilerek yapılan montaj işlemi sonrası rotor paketleri aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Resim 6.22. Mıknatıs montajı yapılan rotor paketleri

Rotor paketlerinin de hazır hale gelmesi ile birlikte rotor paketlerinin rotor tutucu parçaya yerleştirilmesi işlemine geçilmiştir. Burada rotor tutucu parçanın dış çapında her iki kutupta bir sabitleme vidası bulunmaktadır. Bu vidalar yukarıdaki Resim 6.22’de görülen rotor paketi dış çapında yer alan paslanmaz kamalara baskı yapmakta ve rotor paketlerinin rotor tutucu içerisindeki hareketini engellemektedir.

Sabitleme vidalarının her iki rotor paketinde aynı noktada olmadığına dikkat edilmelidir. Bu çalışmada bir stator oluğu kadar rotor paketi kaydırılmıştır. Bu işlemin sebebi, vuruş momentini en aza indirmek için rotora kaykış işlemini uygulayabilmektir. Uygulama ile ilgili detay aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 6.12. Mıknatıs montajı yapılan rotor paketleri



Resim 6.23. Rotor paketlerinin rotor tutucu parçaya yerleştirilmesi

Rotor paketlerinin kaykılı bir şekilde rotor tutucuya yerleştirilmesinden sonra rotor tutucu parçanın dış çapında bulunan sabitleme cıvataları ile sabitlenmiştir. Bu işlemden sonra bu parçaya sabitlenen motor miline ön rulman montajı yapılmıştır. Bu süreçte öncelikle rulman ısıtıcıda rulman 60°C'ye kadar ısıtılmış sonrasında genişleyen rulman motor miline yerleştirilmiştir.



Resim 6.24. Ön rulman montajı

Ön rulmanın mile montajından sonra motor ön kapağına montajı ve dış gövdenin sabitlenmesi işlemi yapılmıştır.



(a)



(b)

Resim 6.25. Motor dış gövde montajı, (a) önden görünüş, (b) arkadan görünüş

Daha önce Resim 6.20’de görülen montajı tamamlanan stator ve arka kapağın gövdeye sabitlenmesi ile birlikte montaj işlemi tamamlanmıştır. Montaj sonrası motorun testlerinin yapılabilmesi için imal ettirilen test sehpasına sabitlenmiş ve teste hazır hale getirilmiştir.



Resim 6.26. Tamamlanmış motor montajı

6.7. Sonuç

Tez kapsamında özgün bir şekilde elektromanyetik ve mekanik tasarımı yapılan motorun prototip üretim süreci tamamlanmıştır. Üretim aşamalarını şu şekilde özetlemek mümkündür:

- Dış rotorlu ama momentin mile aktarıldığı mekanik tasarımın yapılması,
- Elektromanyetik tasarım optimizasyon süreci sonunda elde edilen rotor ve stator laminasyonlarının üretime dönük detay analizlerinin gerçekleştirilmesi ve üretim için teknik resimlerinin hazırlanması,
- Elektromanyetik tasarım optimizasyon süreci sonucunda elde edilen mıknatıs geometrisine uygun mıknatısların tedarik edilmesi,
- Rotor ve stator laminasyonlarının lazer kesim yöntemi ile üretilmesi,
- Tasarlanan sıkıştırma aparatları yardımı ile rotor ve stator paketlerinin hazırlanması ve lazer kaynak yöntemi ile paketlenmesi,
- Gövde, kapak ve mil gibi mekanik parçaların teknik resimlerinin hazırlanması ve akabinde torna ve dik işleme merkezinde mekanik imalatının yapılması,
- Üretimi tamamlanan mekanik parçaların kalite kontrol işlemlerinin yapılması,
- Bobinaj işleminin yapılması,
- Montaj işleminin yapılması şeklinde özetlenebilir.

Üretimi yapılan motorun montaj işleminin yapılması ile birlikte imalatın tamamlanması ile birlikte deneysel çalışmalar başlamıştır.

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde prototip imalatı tamamlanan MD-SRM'nin performans testleri yapılmıştır. Bu kapsamda stator sargı direncinin bulunması, izolasyon direncinin ölçülmesi, titreşim testi, farklı yük profillerinde motor performans testi ve ısı performans testi bu bölümde tamamlanmıştır. Test çalışmaları Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümü laboratuvarında yapılmıştır. Ayrıca test süresince kullanılan ekipmanlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Unit UT513 İzolasyon Direnci Test Cihazı: 100V'dan 5000V gerilim seviyesine kadar seçilebilir test gerilim seçeneği ile birlikte 500k Ω - 10G Ω arasında izolasyon direnci ölçümü yapabilmektedir [104].



Resim 7.1. İzolasyon direnci test cihazı

- Unit UT620A Dijital Mikro Ohm Metre: Doğru akımda düşük dirençleri ölçmek için 4 telli yöntem kullanmaktadır. Farklı çözünürlükte direnç ölçebilen bu cihaz, 120m Ω 'a kadar olan dirençleri hassas bir şekilde ölçebilmektedir [105].



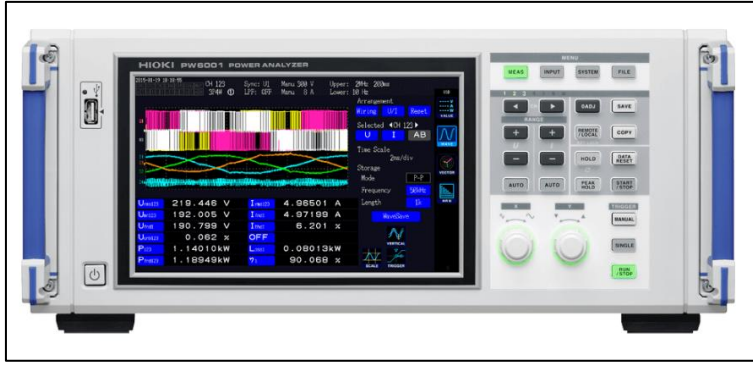
Resim 7.2. Dijital mikro Ohm metre

- Unit UT 315A Titreşim Ölçer: El tipi titreşim test cihazı, mıknatıslı ölçüm ucu ile birlikte bağlandıkları noktanın yer değiştirmesini, hızını ve ivmesini ölçebilmektedir [106].



Resim 7.3. Titreşim Ölçer

- Yokogawa DLM4038: 8 kanallı, 1.25 GS/s örnekleme hızına sahip bir osiloskop.
- Mitsubishi d700sc: FR-D700 SC frekans inverteri, şebeke güç kaynağının sabit gerilim ve frekansını, değişken frekanslardaki değişken gerilimlere dönüştüren bir cihazdır.
- Asenkron Motor: Siemens Marka 112 Tip gövde yapısında 4 kW gücünde 4 kutuplu asenkron motor.
- Hioki PW6001-16: 6 Kanallı akım ve gerilim ölçebilen, motor ve sürücü verimliliğini ayırtılabilen ve güç ölçümünde $\pm 0,02\%$ hassasiyet sunan bir güç analizörüdür [107].

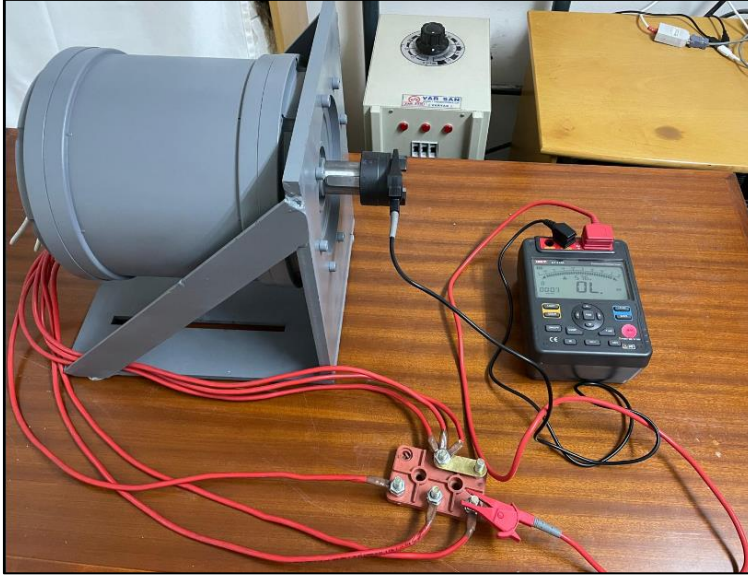


Resim 7.4. Güç analizörü

- Magtrol Dinamometre: 2 WB 115 + 1 PB 115 modellerinden bir araya gelen bu dinamometre bir adet Eddy akım dinamometresi ve bir adet toz frenin birlikte kullanılmasıyla tandem olarak kullanılmaktadır. Bu sayede hem düşük hızlarda hem de yüksek hızlarda motor yük testleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu test sistemi 15000 d/dk hız ve 100 Nm momente kadar olan motorların testlerinde kullanılabilir [108].
- ZAPI BLE3 36/48-650A Motor Sürücü: 36V-48V aralığında DA bara geriliminde çalışabilen, maksimum 650A akım kapasitesine sahip, FOC algoritması kullanan, MD-SRM kontrol edebilmektedir [109].

7.1. İzolasyon Direnci Ölçüm Testi

Bu test kapsamında motor faz-faz ve faz-gövde arasında kaçak olup olmadığı tespit edilmektedir.

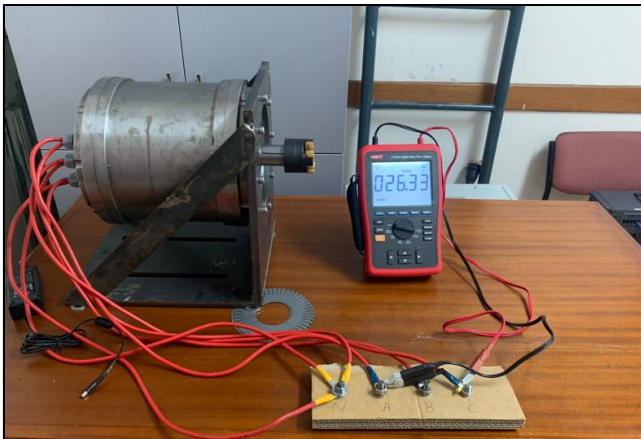


Resim 7.5. İzolasyon direnci ölçümü

Fazlar arasında ve faz-gövde arasında sargı izolasyonunda bir kaçak olup olmadığının tespit edilmesi için 1000V DA gerilim kademesinde 1 dakika süre ile test yapılmıştır. Test tamamlandığında izolasyon direncinin 10 GΩ değerinden daha yüksek olduğu yani bir kısa devre ya da kaçak olmadığı gözlemlenmiştir.

7.2. Sargı Direnci Ölçüm Testi

Bu test kapsamında motor faz sargılarının dirençleri ölçülerek fazlar arasında bir dengesizlik olup olmadığı gözlemlenmiştir.



Resim 7.6. Sargı direnci ölçümü

Oda sıcaklığında her bir faz direnci ayrı ayrı ölçülerek Çizelge 7.1'e kaydedilmiştir.

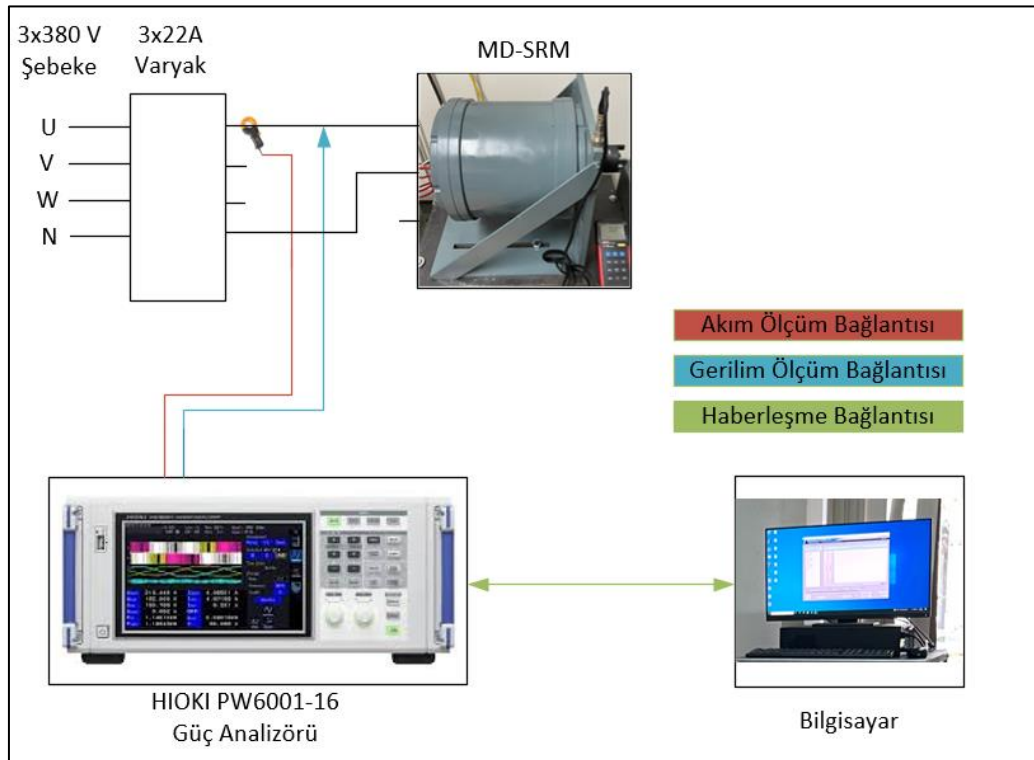
Çizelge 7.1. Faz sargı direnç değerleri

	FazA	FazB	FazC
Sargı Direnci (mohm)	13.03	12.97	13.13

Sargı direnç değerleri incelendiğinde hem fazlar arası hem de her bir faz için sargı dirençleri arasındaki farkın %2'den daha az olduğu görülmektedir. Bu fark kabul edilebilir değerler içerisinde olup dengeli üç faz sargısı olduğu görülmektedir.

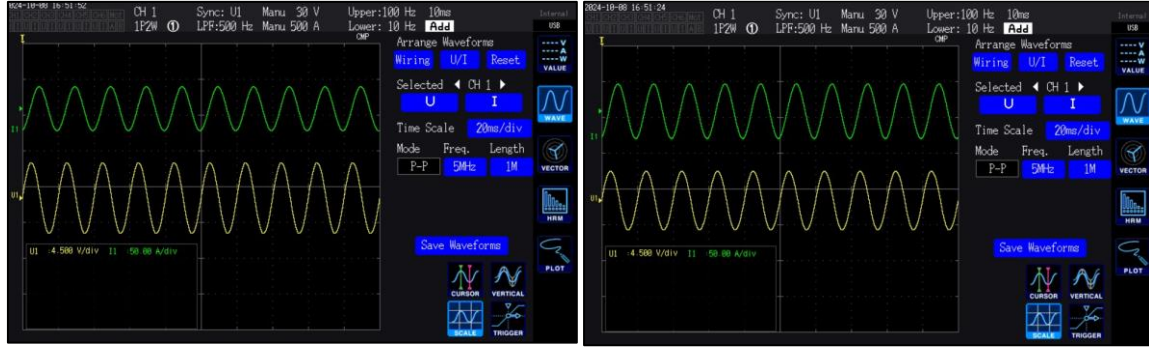
7.3. Endüktans Ölçümü

Bu test kapsamında MD-SRM'nin d ve q eksenlerindeki indüktansları ölçülmüştür. İki faza ait L_{AB} endüktansın ölçümü için aşağıdaki Şekil 7.1'de görüldüğü gibi ayarlı AA gerilim kaynağı A ve B fazları arasına bağlanmıştır.



Şekil 7.1. MD-SRM'nin indüktanslarının ölçümü

Test süresince AA kaynağının akım ve gerilim değerleri HIOKI güç analizörü vasıtası ile kayıt altına alınmıştır.



Şekil 7.2. Akım ve gerilimlerin gösterimi, (a) q eksen endüktans ölçümünde akım ve gerilim, (b) d eksen endüktans ölçümünde akım ve gerilim

MD-SRM’lerde endüktans değerleri rotorun geometrik yapısından dolayı rotor pozisyonuna bağlı olarak değişmektedir. Rotor döndürülerek L_{AB} endüktansının maksimum olacağı konuma getirilir. Bu konumdaki akım ve gerilim kayıt altına alınır. Akabinde tekrar rotor döndürülerek L_{AB} değerinin minimum olduğu konum belirlenir. Bu konumda da akım ve gerilim kayıt altına alınır. Yapılan bu test ile L_{AB} ’nin minimum ve maksimum endüktans değerleri belirlenmiş olur [110].

$$L_{AB} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\left(\frac{V}{I}\right)^2 - 4R_s^2} \quad (7.1)$$

Kayıt altına alınan akım ve gerilim değerleri Eş. 7.1’de kullanıldığında L_{AB} elde edilmiş olur. Elde edilen L_{AB} değeri aşağıdaki Eş. 7.2 ve Eş. 7.3 yardımı ile d ve q eksen endüktansları hesaplanmıştır.

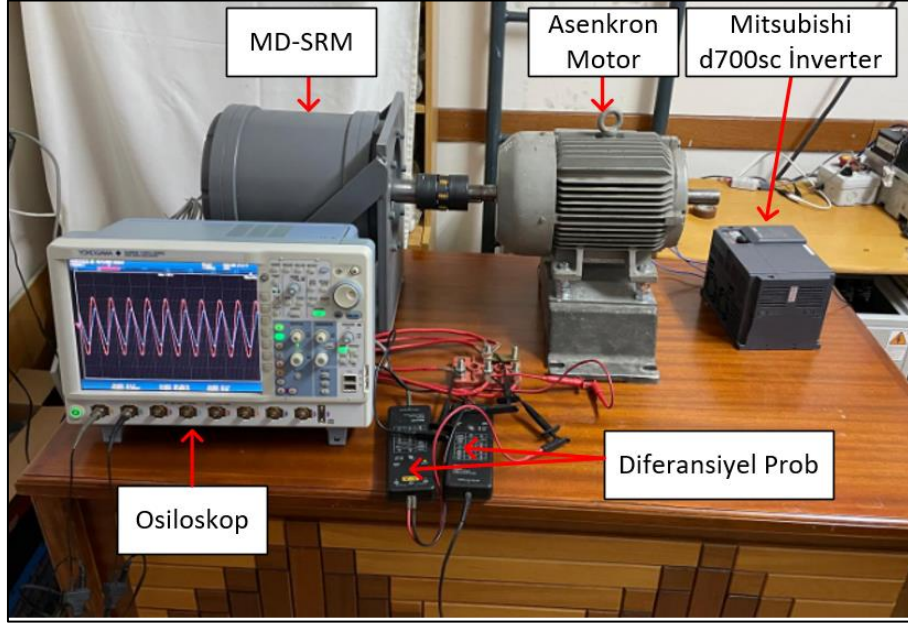
$$L_d = \frac{L_{AB_{max}}}{2} \quad (7.2)$$

$$L_q = \frac{L_{AB_{min}}}{2} \quad (7.3)$$

Endüktans ölçülürken rotor döndürülerek endüktansın en yüksek ve en düşük değerleri kayıt altına alınmıştır. Bu test üç kez tekrar edilmiştir. Elde edilen endüktansların ortalaması alınarak hata oranı azaltılmıştır. Elde edilen değerler kullanılarak d ve q eksen endüktanslarının ölçümü gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde d eksen endüktansı 272,65 uH, q eksen endüktansı ise 140,82 uH olarak ölçülmüştür.

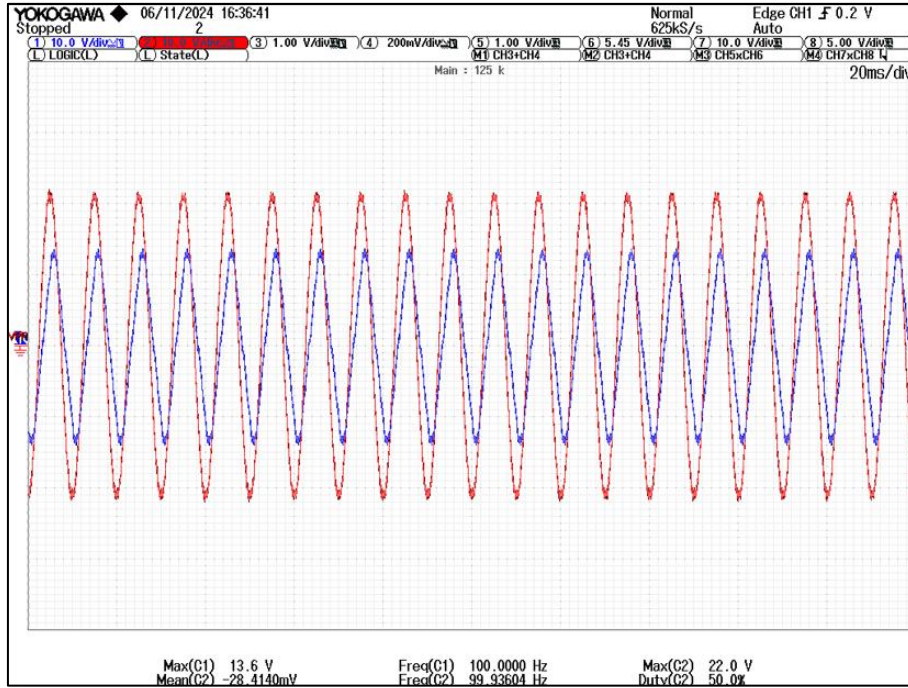
7.4. ZIT EMK Testi

Bu test kapsamında motorun yüksüz durumdaki Zıt EMK değeri ölçülmüş ve analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

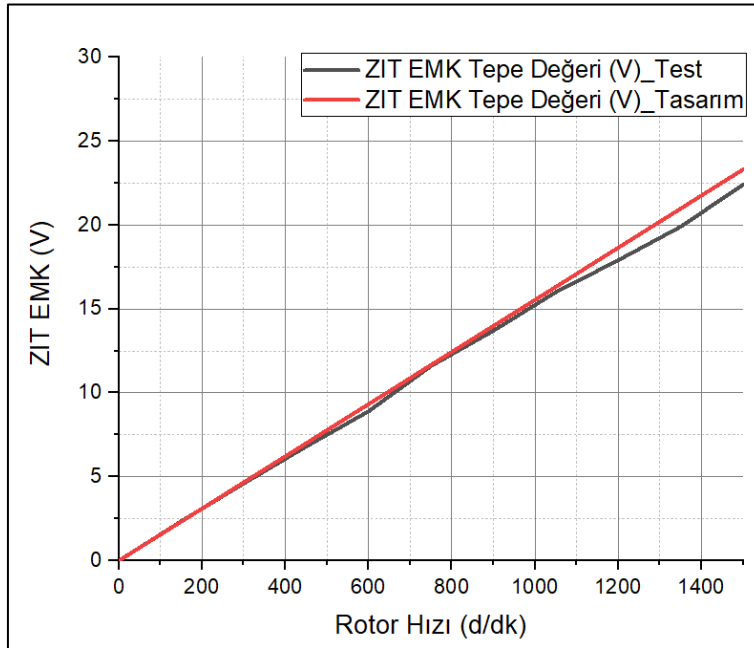


Resim 7.7. ZIT Emk ölçüm test düzeneği

Test yapılırken MD-SRM miline kaplin ile bağlanan asenkron motor tarafından tahrik edilmiştir. Asenkron motorun hızı Mitsubishi d700sc asenkron motor sürücüsü ile kontrol edilmiştir. Asenkron motorun 1500 d/dk hıza kadar kademeli arttırılarak MD-SRM'nin yüksüz durumdaki üretmiş olduğu ZIT EMK değeri osiloskop yardımı ile kayıt altına alınmıştır.



Şekil 7.3. 1500 d/dk hızda ZIT Emk dalga şeklinin gösterimi



Şekil 7.4. ZIT EMK tasarım ve test sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 7.3’de, 1500 d/dk hızda faz-nötr ve faz-faz gerilimler görülmektedir ve dalga formlarının yaklaşık olarak sinüzoidal olduğu görülmektedir. Şekil 7.3’de görüldüğü üzere, yüksüz geri EMF’lerin tepe-tepe değeri, hız arttıkça doğrusal olarak artmaktadır. Yüksüz ZIT EMK testi 1500 d/dk ile sınırlandırılmıştır. Farklı hızlardaki ölçülen değer ve

benzetim sonuçları Şekil 7.4’de görülmektedir. Bu şekilden de görülebileceği gibi, hesaplanan ve ölçülen ZIT EMK iyi bir uyum içindedir ve bu da benzetim sonuçlarını doğrulamaktadır.

7.5. Titreşim Testi

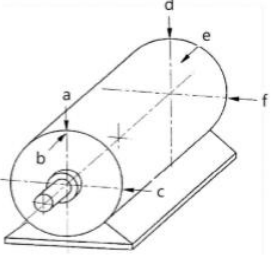
Motorun hareketli parçası olan rotor ve rotora bağlı mekanik elamanların balans işlemi montaj öncesinde gerçekleştirilmiştir. Ancak, eksenel kaçıklık, rulman yerleştirme toleranslarının uygun olmaması gibi sebeplerden dolayı motorda yüksek titreşim meydana gelebilmektedir. Aşağıdaki Resim 7.8’de test düzeneği görülmektedir.



Resim 7.8. MD-SRM Titreşim testi düzeneği

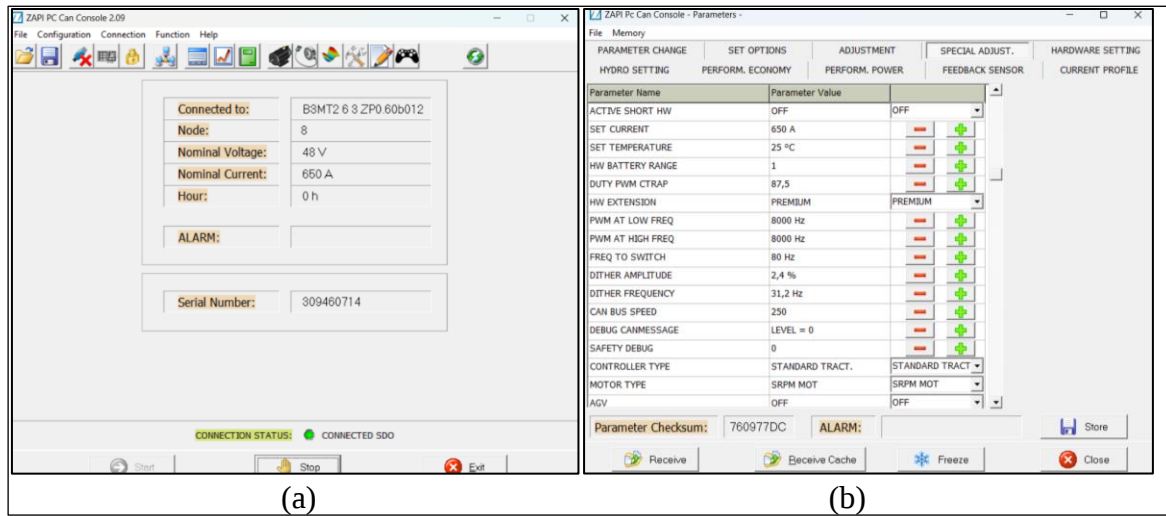
IEC 60034-14 standardına göre titreşim testi iki farklı şekilde yapılabilmektedir. Bunlardan birincisi motorun askıya alınması diğeri ise sağlam bir şekilde sabitlenmesi şeklinde yapılmaktadır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen titreşim testinde ikinci yöntem olan motorun sabitlenmesi tercih edilmiştir. Tercih edilen yöntemde kabul kriteri titreşimin ivme cinsinden 2,5’den küçük olmasıdır. Bu test ile birlikte uzun süreli çalışma durumlarında meydana gelebilecek arızaları engellemek için önlem alınabilmektedir. Aşağıdaki Çizelge 7.2’de farklı hızlarda ve motor konumlarında yapılan titreşim ölçüm sonuçları görülmektedir.

Çizelge 7.2. MD-SRM Titreşim testi düzeneği

	Hız (d/dk)	Kriter (mm/saniye ²)	Titreşim (mm/saniye ²)		
			a	b	c
	250	< 2.8	0,2	0,2	0,2
	500		0,3	0,3	0,3
	750		0,7	0,7	0,3
	1000		1,0	1,0	0,8
	1250		1,3	1,7	1,6
	1500		1,9	2,4	2,0
	1750		2,4	2,3	1,7

7.6. Tasarım Doğrulama Testleri

Yüksüz testleri tamamlanan motorun tasarım doğrulama faaliyetleri kapsamında performans testleri gerçekleştirilmiştir. Performans testleri süresince 48V DA gerilimde çalışan ZAPI BLE3 sürücü kullanılmıştır. Bu sebeple Bölüm 7.4’de sunulan ZIT EMK testi sonuçlarının da simülasyon ortamına yansıtılarak motorun 48V gerilimdeki performans analizleri tekrarlanmıştır.



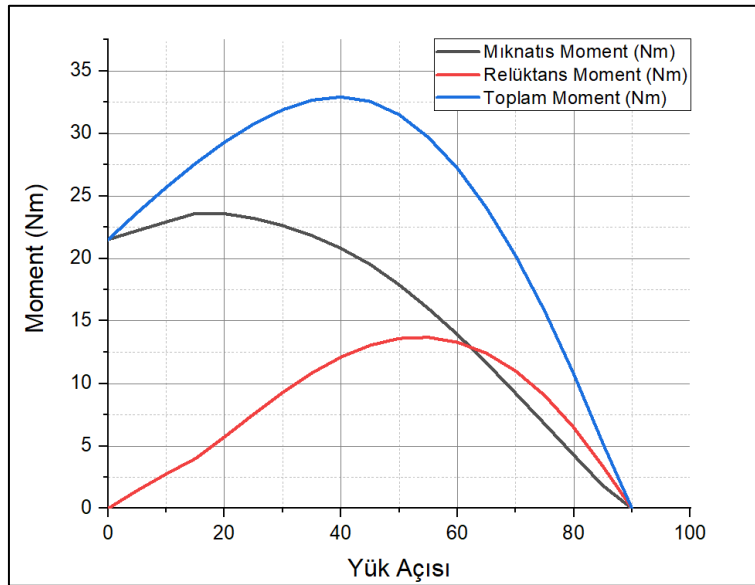
Şekil 7.5. Zapi PC Can Console arayüzü, (a) Giriş ekranı, (b) Parametre sayfası

Tasarım/test karşılaştırması yapılırken elde edilen yeni analiz sonuçları dikkate alınmıştır. Ayrıca, MD-SRM’lerin performansını kullandıkları sürücü parametreleri doğrudan etkilemektedir. Bu amaçla, testlerde kullanılan ZAPI BLE3’ün bazı parametreleri aşağıdaki Çizelge 7.3’de verilmiştir.

Çizelge 7.3. ZAPI BLE3 bazı parametreleri

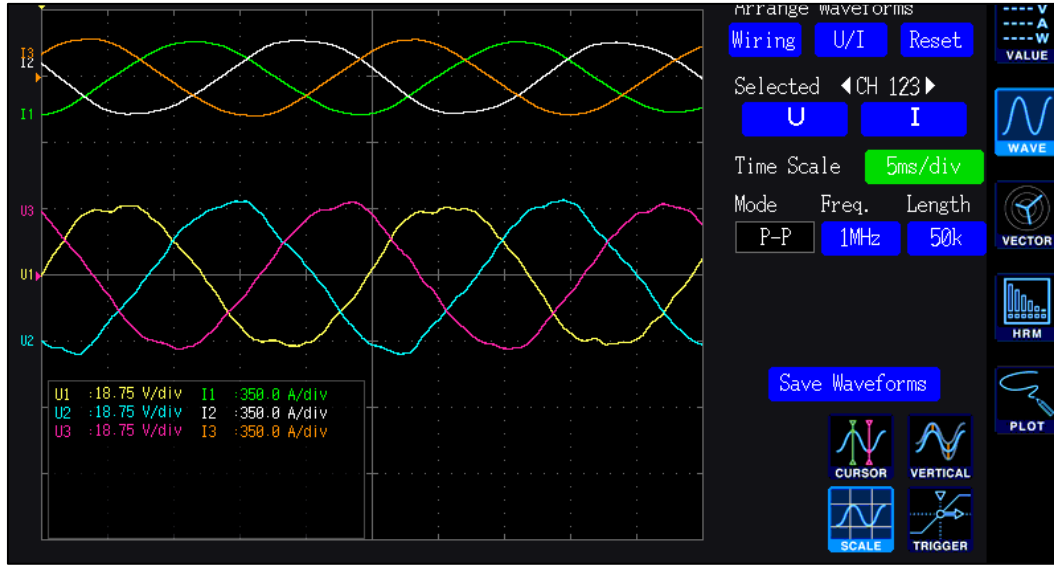
Parametre	Değer
Alan zayıflatma	Aktif
Aşırı akım koruma	Aktif
Kontrol yöntemi	Tork kontrol
Motor tipi	MD-SRM
Maksimum frekans	200 Hz
Akım açısı	0-50°
Hızlanma süresi	2 sn
Yavaşlama süresi	2 sn
Rejeneratif frenleme	Kapalı
Maksimum akım	200 A
Anahtarlama frekansı	8000 Hz

Performans testleri kapsamında ölçümü yapılabileceğinden dolayı testlere, 0° yük açısında maksimum akımda yani d eksen akımının 0 A olduğu, yalnızca mıknatıs momentin üretildiği noktada başlanmıştır. Üretim toleransları ve kaçak akılar dikkate alınarak daha önceki analizler tekrarlandığında elde edilen net manyetik akılar neticesinde oluşturulan moment dağılımı grafiği aşağıda görülmektedir.

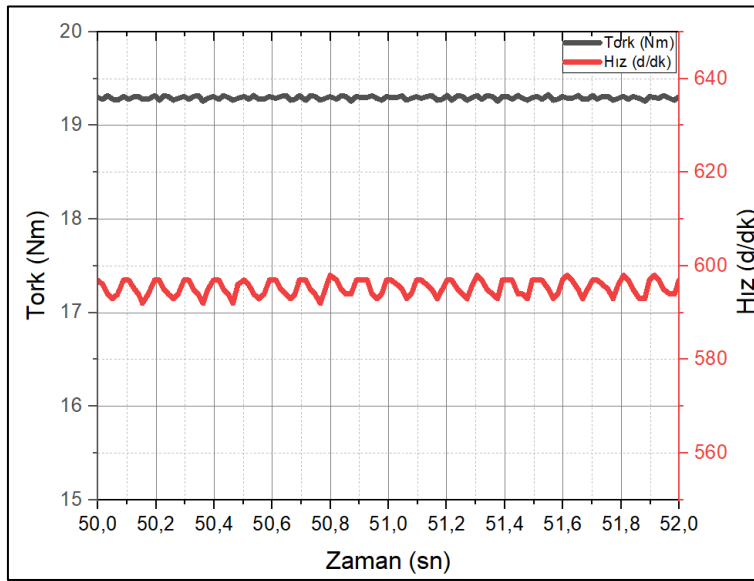


Şekil 7.6. Kayıp kaçak akı dahil edilmiş moment dağılımı

Bu kapsamda sürücüyü yük açısı 0° olarak girilmiş ve faz akımının tepe değeri 200A olana kadar motor mil yükü arttırılmıştır.



Resim 7.9. 0° yük açısında faz akımı ve fazlar arası gerilimlerinin gösterimi



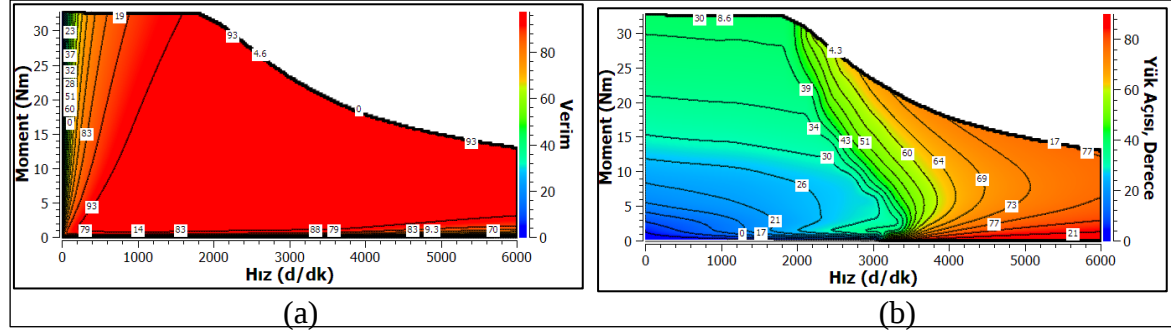
Şekil 7.7. 0° yük açısında maksimum akımda üretilen mıknatıs momentini

Test sonucu incelendiğinde Şekil 7.6’da verilen benzetim çalışmalarında 21,51 Nm olarak elde edilen mıknatıs momentini gerçekleştirilen test sonucunda 19,4 Nm olarak ölçülmüştür.

7.7. Farklı Yük Açılarında Performans Karşılaştırma

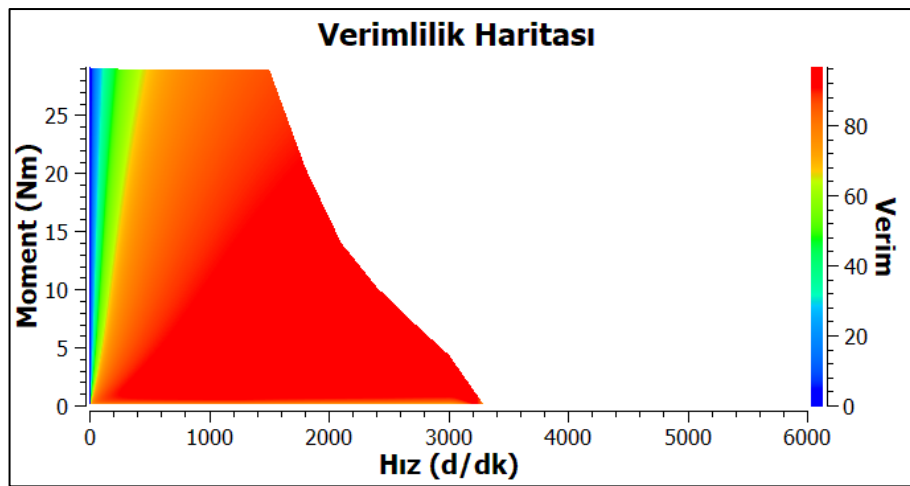
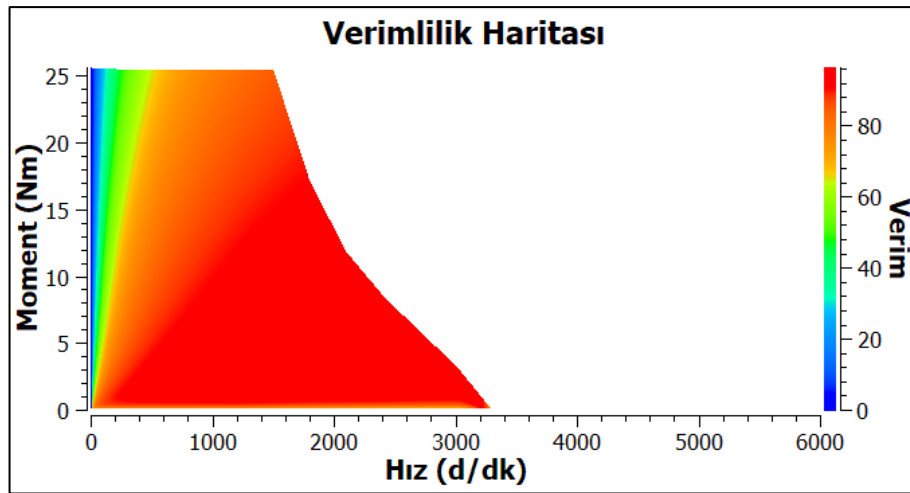
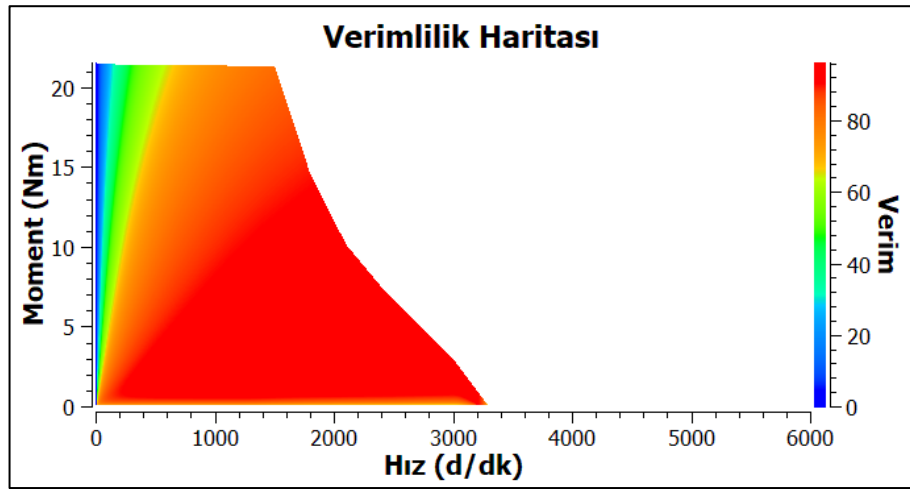
Tasarım optimizasyon sürecinde 60V batarya gerilim seviyesinde çalışacak şekilde süreci tamamlanan MD-SRM’nin performans testleri 48V gerilimde çalışmaya uygun sürücü ile

yapılmıştır. Bu amaçla motorun 48V batarya gerilimde çalışırken verimlilik haritası analizleri tekrar edilmiş ve aşağıdaki Şekil 7.8’de sunulmuştur.

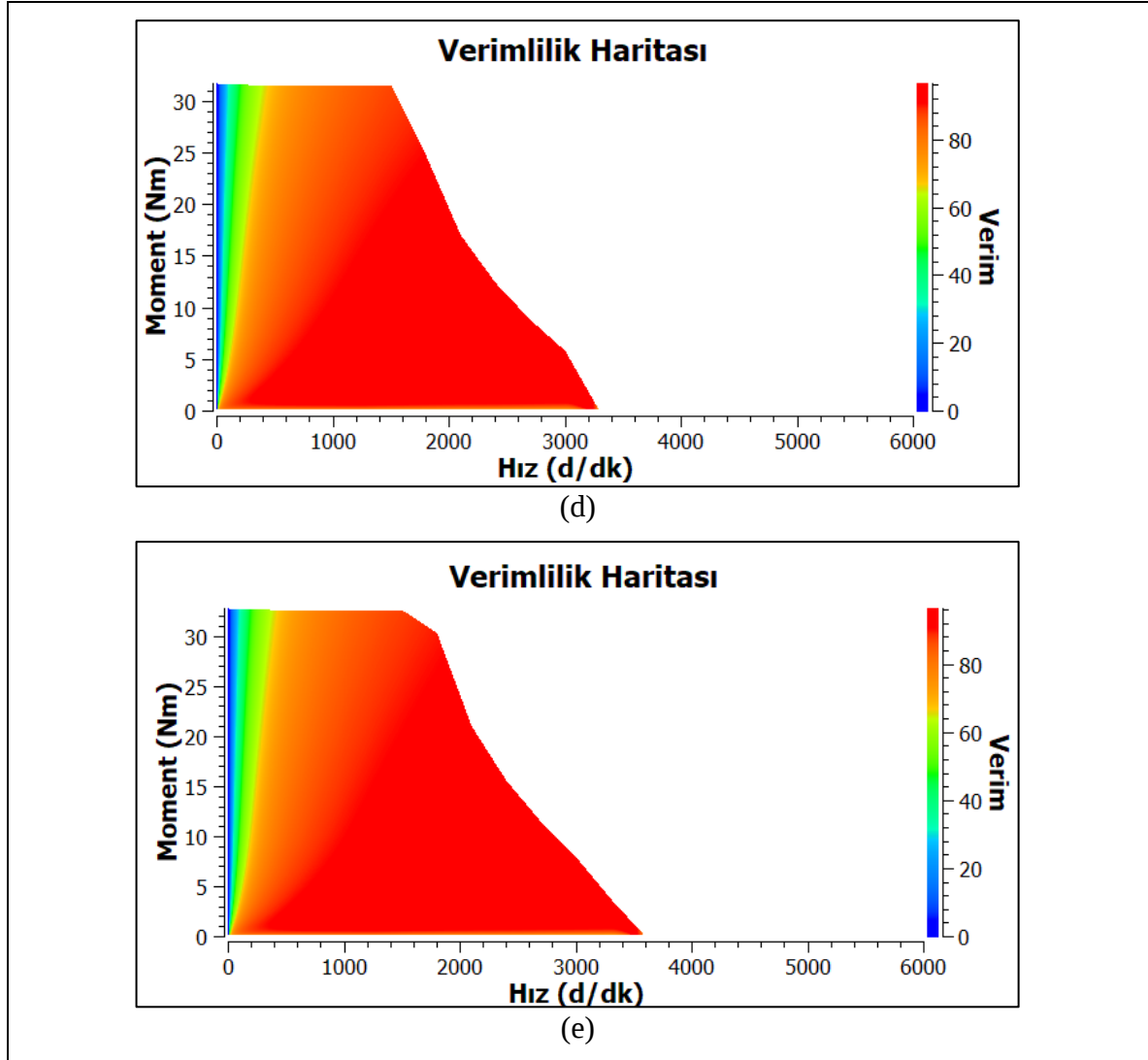


Şekil 7.8. 48V sürücü ile çalışan MD-SRM’nin performans grafikleri, (a) Verimlilik haritası (b) Yük açısı haritası

Simülasyon ortamında motorun çalışma hızı ve torkuna bağlı olarak yük açısı tercih edilecek algoritmaya göre otomatik olarak belirlenmektedir. Test sürecinde yapılan çalışmalar sonucunda simülasyon ortamındaki Şekil 7.8’de görülen yük açısı dağılımı sürücüden kaynaklı sebeplerle benzer şekilde elde edilmesi mümkün değildir. Ancak kullanılan sürücü ile sabit yük açısında motorun kontrolü yapılabilir. Tasarım/test karşılaştırmasının doğru olarak yapılabilmesi için simülasyon ortamında verimlilik haritaları sabit yük açılarındaki tekrar elde edilmiş ve aşağıdaki Şekil 7.9’da sunulmuştur.



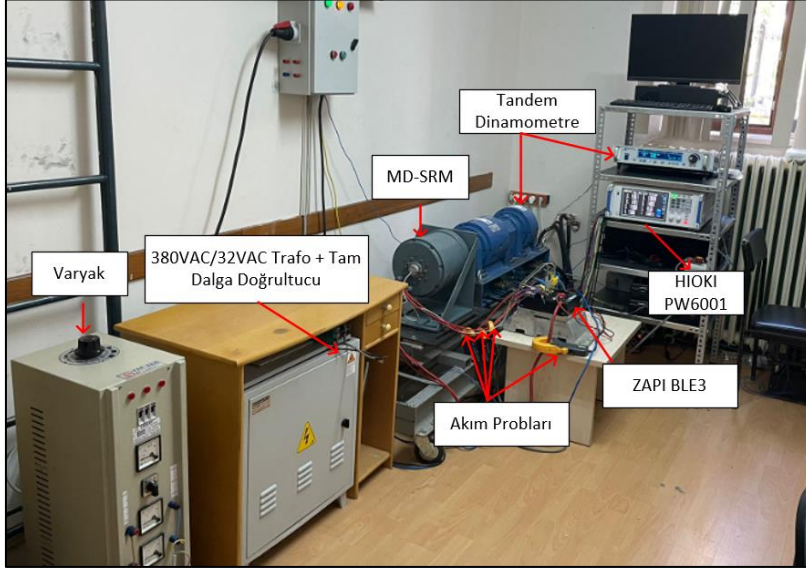
Şekil 7.9. Sabit yük açısında verimlilik haritaları, (a) 0° , (b) 10° , (c) 20° , (d) 30° , (e) 40°



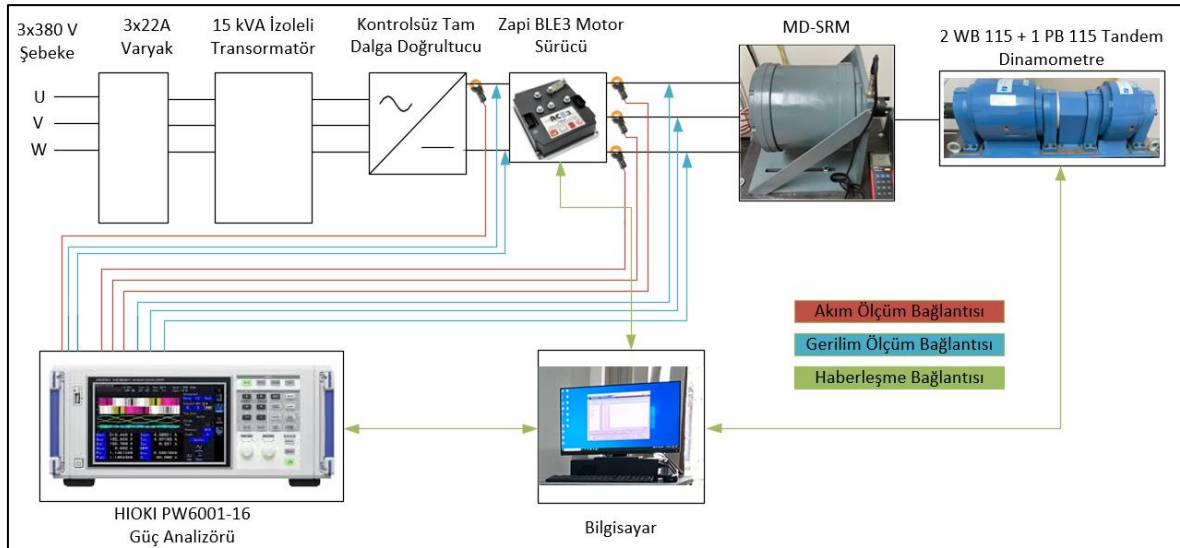
Şekil 7.9. (devam) Sabit yük açısında verimlilik haritaları, (a) 0° , (b) 10° , (c) 20° , (d) 30° , (e) 40°

Testin uygulama sürecinde motor giriş gücü için güç analizöründen, motor çıkış gücü için dinamometreden, d ve q eksen akımları ise ZAPI arayüz programından eş zamanlı kaydedilmiştir. Verim ölçüm sistemi aşağıdaki Resim 7.10'da görülmektedir. Ayrıca bağlantı şeması da Şekil 7.10'da detaylı olarak verilmiştir. Sürücü DA gerilim beslemeli olarak çalışmaktadır. Testler için 380V giriş gerilimini 32V, 40V, 48V, 56V ve 64V gerilim seviyelerine düşüren izoleli transformatör yaptırılmıştır. Transformatör çıkışı tam dalga kontrolsüz doğrultucu ile doğrultulmuş ve filtre kapasitörleri ile regüle edilmiştir. Motor yükü arttıkça transformatörde meydana gelecek gerilim düşümünü engellemek ve hassas bir şekilde DA bara gerilimi ayarlamak için şebeke gerilimi öncelikle 3x22A çıkış akımı olan varyaka girmekte, varyak çıkışı transformatörün primerine girmektedir. Böylelikle gerekli olması durumunda gerilim hassas bir şekilde ayarlanabilmektedir.

Ayrıca, DA bara geriliminde sürücüye paralel olarak yük direnci bağlanmıştır. Bunun sebebi, sürücünün rejeneratif frenleme özelliği kapalı olmasına rağmen oluşabilecek kısa süreli ters akımlarda sürücüyü korumaktır.



Resim 7.10. Performans test sistemi



Şekil 7.10. Performans test sistemi bağlantı şeması

Test kapsamında, dört farklı hız noktasında, iki farklı moment değerinde ve beş farklı yük açısında toplamda 30 farklı noktada motor veriminin tasarım/test karşılaştırması yapılmıştır. Test süresince performans parametreleri 10 saniye süre ile kayıt alınmış ve

alınan değerlerin ortalaması kullanılmıştır. Test süresince alınan veriler ve karşılaştırmalı sonuçlar aşağıdaki Çizelge 7.4-7.7’de sunulmuştur.

Çizelge 7.4. 600 d/dk hızda performans test sonuçları

Faz-Faz Gerilim (VAC)	Faz Akımı (A)	Giriş Gücü (W)	Hız (d/dk)	Moment (Nm)	Çıkış Gücü (W)	Yük Açısı	Yüzde Verim (Test)	Yüzde Verim (Tasarım)
7,45	30,46	336,77	597,1	5	312,60	0,00	92,82	93,76
9,71	62,47	767,15	597,8	10	626,01	0,23	81,60	83,05
7,23	29,76	338,88	598,0	5	313,10	9,17	92,39	94,18
9,28	59,13	772,62	596,8	10	624,96	9,87	80,89	83,30
7,02	29,81	344,04	597,6	5	312,80	19,32	90,91	94,26
8,82	57,20	768,80	597,7	10	625,84	19,99	81,41	84,03
6,64	30,23	337,57	596,2	5	312,14	29,94	92,47	94,06
8,29	57,74	768,25	597,3	10	625,42	29,40	81,40	84,37
6,34	32,66	349,50	596,0	5	312,04	42,50	89,28	91,08
7,78	60,71	784,15	595,7	10	623,77	40,22	79,55	82,45

Çizelge 7.5. 1000 d/dk hızda performans test sonuçları

Faz-Faz Gerilim (VAC)	Faz Akımı (A)	Giriş Gücü (W)	Hız (d/dk)	Moment (Nm)	Çıkış Gücü (W)	Yük Açısı	Yüzde Verim (Test)	Yüzde Verim (Tasarım)
11,83	33,85	540,31	976,2	5	511,12	0,00	94,60	95,58
15,34	66,99	1191,85	972,3	10	1018,08	0,00	85,42	87,46
11,27	32,51	535,16	970,5	5	508,10	8,88	94,94	95,87
14,39	62,21	1172,41	970,6	10	1016,31	9,59	86,69	89,35
10,78	32,34	536,23	969,4	5	507,53	18,85	94,65	95,95
13,56	59,85	1167,62	973,4	10	1019,27	19,94	87,29	90,17
10,31	33,26	542,02	966,3	5	505,93	29,36	93,34	95,85
12,60	60,8	1166,60	962,6	10	1007,99	29,72	86,40	89,14
9,69	35,49	550,13	962,6	5	503,99	40,00	91,61	91,70
11,74	61,75	1138,00	961,6	10	1006,91	40,22	88,4	89,28

Çizelge 7.6. 1400 d/dk hızda performans test sonuçları

Faz-Faz Gerilim (VAC)	Faz Akımı (A)	Giriş Gücü (W)	Hız (d/dk)	Moment (Nm)	Çıkış Gücü (W)	Yük Açısı	Yüzde Verim (Test)	Yüzde Verim (Tasarım)
17,02	37,23	768,13	1405,8	5	736,04	0,68	95,82	96,41
22,31	69,95	1692,34	1407,1	10	1473,38	0,13	87,06	89,98
16,15	35,98	760,64	1406,3	5	736,29	8,90	96,80	95,65
20,70	65,39	1653,25	1406,6	10	1472,88	9,66	89,09	92,07
15,44	35,83	762,23	1404,8	5	735,47	19,71	96,49	96,72
19,25	63,25	1633,68	1408,9	10	1475,27	19,90	90,30	92,97
14,60	36,62	763,55	1399,8	5	732,89	30,36	95,98	96,67
17,92	63,68	1632,42	1410,9	10	1477,33	30,11	90,50	92,98
13,72	38,53	769,33	1398,1	5	731,98	39,53	95,15	96,43
16,65	66,71	1656,74	1407,9	10	1474,22	40,29	88,98	92,46

Sonuçlar incelendiğinde sürücüye parametre olarak girilen yük açıları kontrol sağlanıp sağlanmadığı sürücünden alınan d ve q eksen akımları incelenerek elde edilmiştir. Tasarım doğrulama amacıyla yapılan test sonuçları incelendiğinde 30 farklı noktada karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda tasarım ve test arasındaki farkın %3'den daha az olduğu görülmüştür. Tasarım ve test farkının yüksek olduğu değerlerin motor yükünün arttığı noktalarda meydana gelmesinin sebebi, stator sargılarının bobin başı mesafesinin tasarım sürecinde öngörülenden daha uzun olmasıdır. Daha uzun bobin başı mesafesi sebebiyle motor yükü arttıkça stator bakır kayıpları hesaplanandan daha fazla artmıştır. Bu sebeple test sonucunda elde edilen motor verimleri tasarım değerlerinin altında kalmıştır.

Motorun verimlilik haritasının sağ tarafında yani yüksek hızlardaki performans testleri 4000 d/dk hız değerine kadar yapılmıştır. Yüksek hız bölgesinde gerçekleştirilen testlerde sürücünün, parametre olarak girilen yük açısı değerinden bağımsız bir şekilde motoru kontrol ettiği görülmüştür.

Çizelge 7.7. Yüksek hız bölgesinde performans test sonuçları

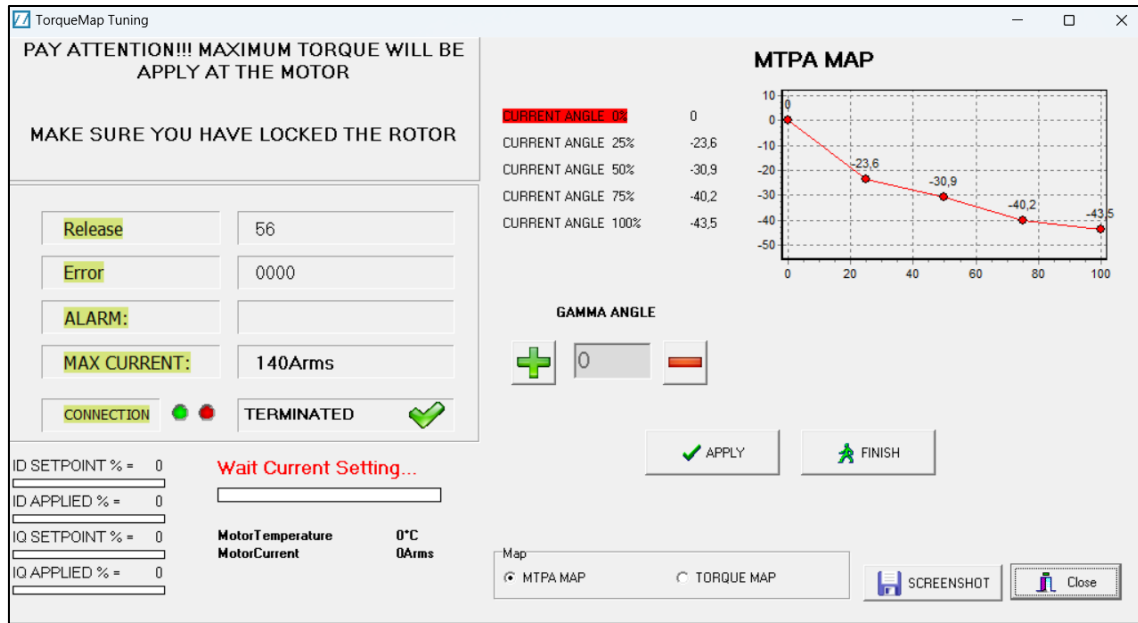
Giriş Gücü (W)	Hız (d/dk)	Moment (Nm)	Çıkış Gücü (W)	Yük Açısı (Tasarım)	Yük Açısı (Test)	Yüzde Verim (Tasarım)	Yüzde Verim (Test)
1019,25	1846,5	5	966,74	10	8,85	95,65	94,85
1023,69	1849,4	5	968,26	20	19,54	97,03	94,58
1013,00	1850,0	5	968,59	30	29,42	97,01	95,62
1015,98	1859,2	5	973,42	40	39,49	96,85	95,81
2134,18	1851,0	10	1938,19	40	40,34	93,69	90,82
1212,50	2120,0	5	1109,95	40	40,12	91,89	91,54
2429,00	2107,0	10	2206,28	40	40,15	92,47	90,83
1462,81	2610,0	5	1366,49	16,05	5,62	96,21	93,42
2870,16	2555,0	10	2675,39	27,86	34,11	95,33	93,21
1592,65	2865,9	5	1500,47	16,06	20,53	96,32	94,21
3150,67	2842,2	10	2976,13	41,18	45,62	95,33	94,46
1994,82	3545,32	5	1856,19	54,01	45,64	95,72	93,05
2980,44	3537,46	7,5	2778,11	53,68	53,85	95,74	93,21
2253,03	3985,03	5	2086,40	64,69	57,37	94,68	92,60

Çizelge 7.7 incelendiğinde yüksek hızlarda 14 farklı noktada tasarım doğrulaması gerçekleştirilmiştir. 2600 d/dk hız değerindeki testlere kadar sürücü ayarlanan yük açısında motor kontrolüne devam ettiği görülmektedir. Bu hız değerinden sonra sürücünün girilen parametrelerden bağımsız olarak yük açısını kendisinin kontrol ettiği görülmektedir. Bu sebeple bu hız değerinden sonraki tasarım performans parametreleri Şekil 7.8'de verilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Hızın artışına bağlı olarak mekanik kayıpların artması

sebebiyle tasarım ve test arasındaki farkın açıldığı görülmektedir. Aynı zamanda yük açılarının farklı olması farklı d ve q eksen akımları ile kontrol edilmeleri ve buna bağlı olarak motor performansının etkilendiği görülmektedir.

7.8. Maksimum Moment Testi

Testin amacı, test edilen motor için doğru MTPA'yı elde etmektir. Test gerçekleştirilirken ZAPI motor sürücünün MTPA test prosedürü uygulanmıştır. Test prosedürü ZpCanConsole yazılımı içerisinde yer alan TorqueMapTuning bölümünde yer almaktadır. Bu testte talimatlar gereği motor mili kilitlenmiştir. Sırasıyla belirlenen maksimum akımın %25, %50, %75 ve %100 değerleri motora uygulanmıştır. Her bir akım değerinde motorun ürettiği maksimum momentlerin yük açıları sırasıyla belirlenmiştir.



Şekil 7.11. Yüzde akımlarda MTPA değerleri

Test süresince motor faz akımı güç analizörü ile takip edilmiş ve aşağıdaki Çizelge 7.8’de kaydedilmiştir.

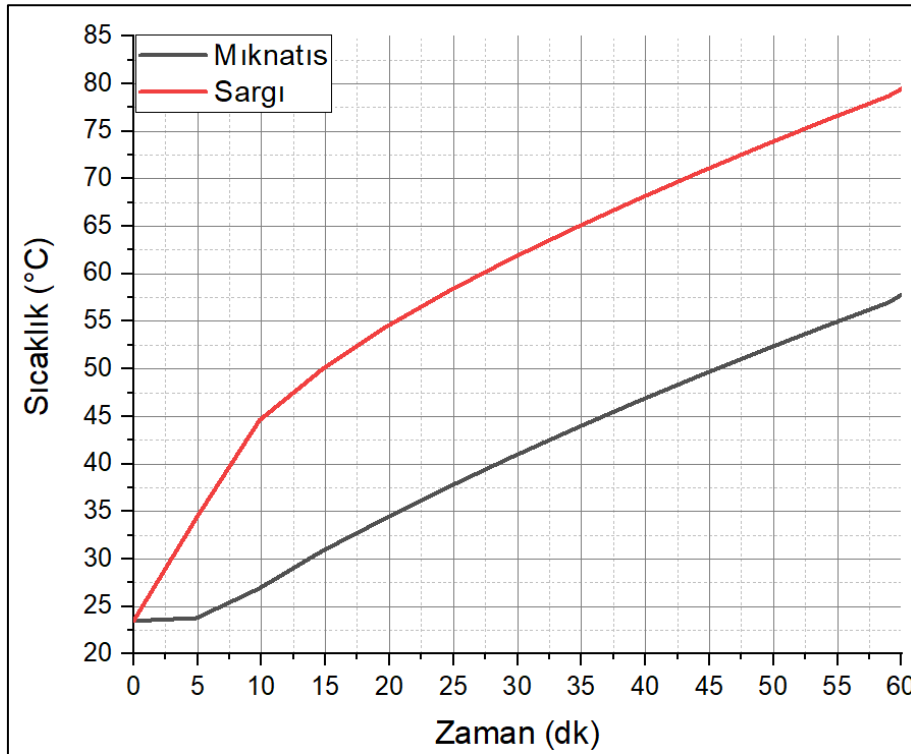
Çizelge 7.8. Yüzde akımlarda MTPA değerleri

Maksimum Faz Akımı Oranı	Faz Akımı (A)	Yük Açısı	Moment (Nm)
25%	29,40	23,60	6,00
50%	65,30	30,90	12,90
75%	101,50	40,20	21,20
100%	142,80	43,50	32,20

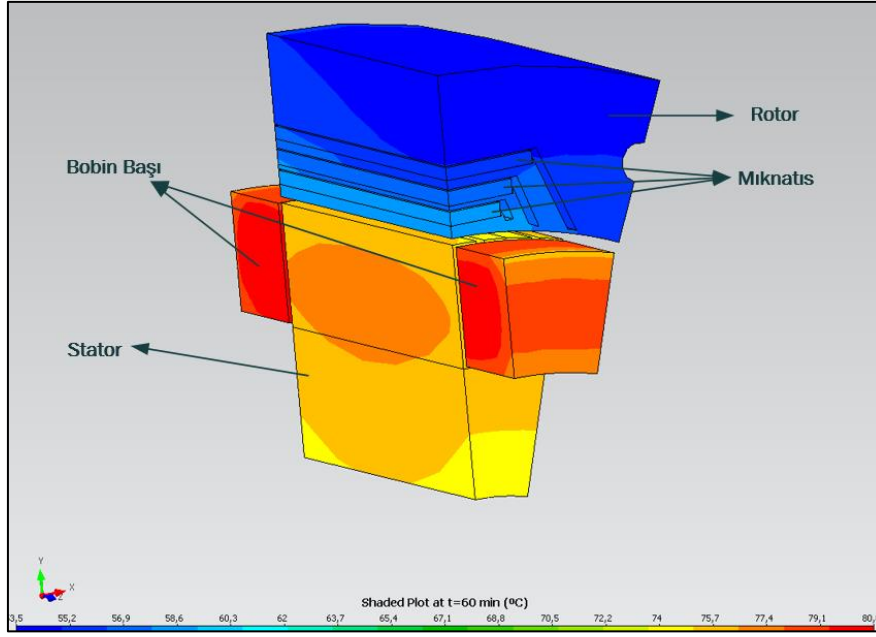
Şekil 7.6’da verilen benzetim sonuçlarında 200A tepe akımında motorun 40° yük açısında 32,5 Nm moment ürettiği görülmektedir. Gerçekleştirilen test sonucunda ise 142,8 A etkin akım ve 201,3 A tepe akımında $43,5^\circ$ yük açısında 32,2 Nm moment ürettiği görülmektedir. Gerçekleştirilen bu test ile birlikte motorun maksimum moment üretme kabiliyeti $3,5^\circ$ yük açısı farkı ve 1 Nm momentin altında bir fark ile doğrulanmıştır.

7.9. Sıcaklık Artış Testi

Farklı hız ve moment noktalarında performans doğrulaması tamamlanan motorun S2-60 dakika çalışma rejiminde sıcaklık artış testi yapılmıştır. Sıcaklık artış testinde motor gücü ve hızı seçilirken tasarımın başlangıcında kabul edilen 3000 d/dk hızda 3 kW güçte S2-60 dakika çalışma rejiminde çalışmaya uygun kriteri dikkate alınmıştır. Aynı zamanda belirlenen çalışma noktasında Siemens MotorSolve yazılımı ile 60 dakika süren termal analiz işlemi yapılmıştır. Bu analiz ile birlikte motorun ısı artışının H izolasyon limitleri içerisinde olup olmadığı ve mıknatısın demagnetizasyon riski olup olmadığı incelenmiştir. 60 dakika süresince sargı ve mıknatıs sıcaklıklarının değişimi aşağıdaki Şekil 7.12’de verilmiştir. Ayrıca motor üzerinde ısının dağılımı da 3 boyutlu olarak incelenmiş ve Şekil 7.13’de sunulmuştur.



Şekil 7.12. 60 dakika süreli termal analiz



Şekil 7.13. Motor üzerinde ısının dağılımı

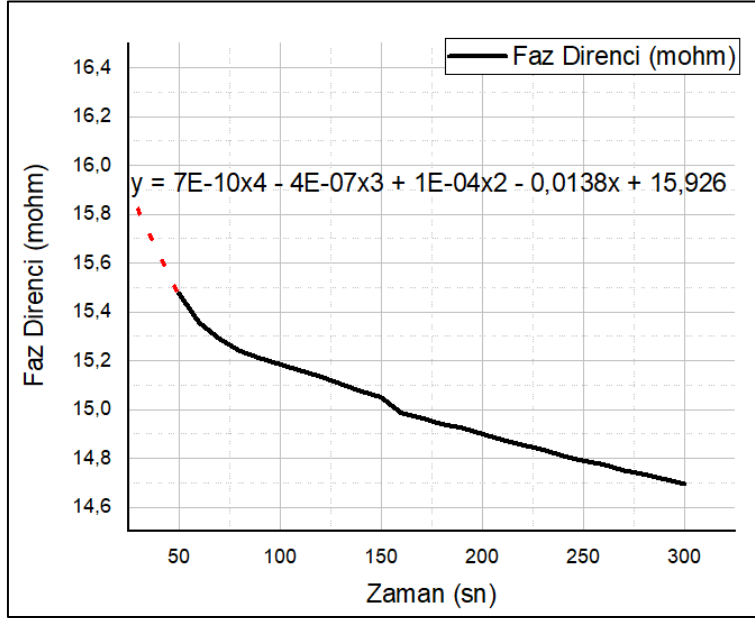
Şekil 7.12 ve Şekil 7.13 incelendiğinde sıcaklık artışının termal limitler içerisinde kaldığı görülmekte olup testin gerçekleştirilmesi için bir engel bulunmamaktadır.

Motorun termal performansının incelenmesi açısından önemli olan bu test süresince motor yükü sabit tutulmuş, test başlangıcında ortam sıcaklığı ve sargı direnci kayıt edilmiştir. Bir saat süren testin sonunda motor faz sargı bağlantıları sürücüden sökülerek tekrar sargı direnci kayıt edilmiştir. Ancak, faz sargılarının sürücüden sökülmesi belirli bir süre aldığı için net olarak test sonu direnci ölçülememektedir. Bu sebeple test sonu sargı direncini en az hata ile tespit edebilmek için eğri uydurma yönteminden faydalanılmıştır. Bu yöntemde, sargı dirençleri 10 saniye aralıklar ile yaklaşık dört dakika ölçülmüş ve Çizelge 7.9’da görüldüğü gibi kayıt edilmiştir.

Çizelge 7.9. Isı testi sonrası sargı direncinin zamanla değişimi

ZAMAN (Saniye)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Direnç (mΩ)						15,475	15,355	15,29	15,24	15,21	15,185
ZAMAN (Saniye)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
Direnç (mΩ)	15,16	15,135	15,105	15,075	15,05	14,985	14,965	14,94	14,925	14,9	14,875
ZAMAN (Saniye)	220	230	240	250	260	270	280	290	300		
Direnç (mΩ)	14,855	14,835	14,81	14,79	14,775	14,75	14,735	14,715	14,695		

Kayıt edilen direnç değerlerinin zamana bağlı olarak grafiği aşağıdaki Şekil 7.14’de görüldüğü gibi çizdirilmiş ve eğrinin denklemi elde edilmiştir. Elde edilen denklemden faydalanarak test sonu sargı direnci en az hata ile belirlenmiştir.



Şekil 7.14. Test sonu sargı direncinin tespit edilmesi

Şekil 7.14’de verilen grafik yardımı ile test sonu sargı direnci 15,926 mohm olarak belirlenmiştir. Sargı direncinin belirlenmesi ile birlikte test sonu sıcaklığı ve sıcaklık artış değerleri aşağıdaki Eş. 7.4 ile hesaplanmıştır.

$$T_{Artis} = \frac{R_2}{R_1} x (K + t_1) - (T + t_a) \quad (7.4)$$

Burada test t_1 başı sıcaklığı, R_1 test başı direnci, R_2 test sonu direnci, t_a son sıcaklığı ve K ise malzemenin ısıl katsayısını ifade etmekte olup bakır için bu değer 235’dir. Eşitlikten faydalanarak elde edilen test süresince sıcaklık artışı 65,78 °C ve test sonu sıcaklığı 85,78 °C olarak ölçülmüştür. Termal analizler ve test arasındaki yaklaşık 5°C sıcaklık farkının sebebi testlerdeki bobin başı mesafesinin daha uzun olması ve buna bağlı olarak da stator bakır kayıplarının daha yüksek olması olarak açıklanabilir. Ayrıca ısı testi sonrası motor performans parametreleri de kayıt altına alınarak aşağıdaki Çizelge 7.10’da sunulmuştur.

Çizelge 7.10. Isı testi sonrası motor performans parametreleri

Giriş Gücü (W)	Hız (d/dk)	Moment (Nm)	Çıkış Gücü (W)	Yük Açısı (Test)	Yüzde Verim (Test)
3249,5	2879,1	10	3,01	39,28	92,78

Stator sargıları için kullanılan H izolasyon malzemeler 180°C sıcaklığa kadar dayanabilirken, kullanılan mıknatısların termal sınıfı ise SH yani 150 °C'dir. Tamamlanan sıcaklık artış testi ile birlikte prototip imalat sürecinde kullanılan malzemelerin termal limitlerine ulaşılmadığı görülmüştür.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tamamlanan tez çalışmasında, elektrikli araçların yaygınlaşması ile birlikte kullanımı gün geçtikçe artan MD-SRM'nin özgün bir şekilde geliştirilmesini temel alan; hafif elektrikli araç gruplarının tahrik sistemlerinde kullanılması uygun görülen 60 V, 3 kW'lık yeni bir dış rotorlu yeni bir MD-SRM tasarım optimizasyon çalışması yapılmış ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasını literatürdeki diğer çalışmalardan ayıran üç önemli yenilik unsuruna sahiptir. Bunlardan birincisi, tahrik motoru isterlerine uygun özgün amaç fonksiyonun belirlenmesidir. İkincisi, literatürde MD-SRM tahrik motorları ile ilgili yapılan çalışmalar iç rotorlu motorlara yoğunlaşmıştır. Dış rotorlu olan çalışmalar ise YY-SMSM yapısındadır. Bu tez çalışması ile özgün amaç fonksiyonu ile özgün bir dış rotorlu MD-SRM geliştirilmiştir. Üçüncü yenilik unsuru, elektrik motorlarının tasarım optimizasyon sürecinde hızlı olması sebebiyle analitik hesaplama yapan yazılımlar tercih edilmektedir. Bu yazılımların hızlı olması tasarım ve test sonuçları arasında yüksek farklılıkları beraberinde getirebilmektedir. Ayrıca, mevcut çalışmalar motorun anma noktası ya da maksimum moment noktası gibi tek bir noktada optimizasyonuna odaklanmış durumdadır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen optimizasyon sürecinde her bir adımda motorun moment-hız-verim haritasının oluşturularak performans parametrelerini iyileştirmesi ve bu analizlerde SEA yöntemi kullanması önemli yenilik unsurlarından birisidir. Motorun optimizasyonunun tamamlanması ile birlikte motorun prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. Akabinde motor sürücü ile motor entegrasyonu yapılmıştır. Sonrasında tasarım sürecinde elde edilen performans parametreleri detaylı laboratuvar testleri ile doğrulanmıştır.

Motorun tasarım ve uygulaması aşamasında gerçekleştirilen işlemleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

- Öncelikle iç rotorlu motorlarda yaygın olarak kullanılan üç farklı temel mıknatıs yerleşim geometrisinde dış rotorlu başlangıç tasarımları oluşturulmuştur. Daha sonra elektrikli araçlar için gerçekleştirilen tez çıktısının uygulama alanına uygun optimizasyonunun yapılabilmesi için beş farklı amaç fonksiyonu belirlenmiş ve üç temel motor modeline uygulanmıştır. Burada değişken olarak mıknatıs ve akı bariyer geometrisinin motor performansı üzerinde etkisi incelenmiş, en uygun geometrinin

elde edilmesi amacıyla NSGA-II ile optimizasyon çalışması tamamlanmıştır. Tasarım optimizasyon süresince JMAG Designer 22.1 paket programı kullanılmıştır.

- Elde edilen optimum tasarımların relüktans moment üretme kabiliyetleri, mıknatıs tüketim miktarı, demagnetizasyon karakteristiği, moment üretim kabiliyeti ve verimliliklerinin dikkate alındığı bir karşılaştırma çalışması yapılmıştır. Demagnetizasyon analizlerinde Siemens MotorSolve paket programından faydalanılmıştır.
- Optimum tasarıma sahip 3 katlı mıknatıs geometrisine sahip MD-SRM'nin başlangıç durumundaki tasarıma göre neredeyse aynı miktarda mıknatıs kullanarak (%1.3 daha az) maksimum moment üretiminin yaklaşık %23 arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yüksek hızlardaki moment üretme kabiliyetinin de %29 oranında arttığı ve moment dalgalanmasının da yaklaşık %50 oranında azaldığı belirlenmiştir.
- Demagnetizasyon riskinin daha az olması, daha yüksek maksimum moment ve güç üretmesi sebebiyle yapılan karşılaştırma sonrasında en iyi performansı sunan 3 katlı mıknatıs yerleştirme geometrisine ait optimum tasarımın imalat süreci başlamıştır. Elde edilen mıknatıs geometrisinde mıknatıslar yurtdışında özel olarak imal ettirilerek tedarik edilmiştir.
- Tez kapsamında geliştirilen motorun elektrik araçlar için geliştirilmesi sebebiyle araç üzerinde diferansiyelle bağlanabilmesi için iç rotorlu bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Bu sebeple dış rotorlu olarak geliştirilen motorun gerçekleştirilen özel mekanik tasarım faaliyeti ile hareketi iç rotorlu bir motor gibi mile aktarılmıştır. Mekanik tasarımın tamamlanması ile birlikte talaşlı imalat yöntemi ile mekanik parçaların imalat süreci gerçekleştirilmiştir.
- Laminasyonların üretimi hassas lazer kesim yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve lazer kaynak yöntemi ile rotor ve stator paketleri üretilmiştir. Özel ölçülerde imal ettirilen mıknatıslar rotor yerleştirilmiş ve stator bobinaj işlemi yapılmıştır.
- Üretim sürecinin tamamlanarak motor montajının yapılmasından sonra motor-sürücü entegrasyonu yapılarak motorun laboratuvar testlerine başlanmıştır.
- 60V olarak tasarım optimizasyon süreci yürütülen motorun performans testleri 48V gerilim seviyesinde yapıldığından, motorun 48V gerilim altında çalıştığı durumdaki performans analizleri tekrarlanmış ve tasarım/test sonuçlarının karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

- Yük açısının 0° olduğu durumda yani MD-SRM'nin yalnızca mıknatıs momenti ürettiği durum test edilmiş, benzetim çalışmalarında 21,51 Nm olarak elde edilen mıknatıs momenti gerçekleştirilen test sonucunda 19,4 Nm olarak ölçülmüştür.
- MD-SRM'nin maksimum moment üretme kabiliyeti benzetim çalışmalarında 200A tepe akımında motorun 40° yük açısında 32,5 Nm moment ürettiği tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen test sonucunda ise 201,3 A tepe akımında $43,5^\circ$ yük açısında 32,2 Nm moment ürettiği görülmektedir. Gerçekleştirilen bu test ile birlikte motorun maksimum moment üretme kabiliyeti $3,5^\circ$ yük açısı farkı ve 1 Nm momentin altında bir fark ile doğrulanmıştır.
- Sıcaklık artış testinde ise test sonu sıcaklığı Siemens MotorSolve yazılımında 80°C olarak elde edilirken testlerde $85,78^\circ\text{C}$ olarak gerçekleşmiştir.
- Motorun JMAG Designer 22.1 ve Siemens MotorSolve ortamında gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları, laboratuvar testlerinden elde edilen veriler ile doğrulanarak karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.
- Tasarımın doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen test sonuçları incelendiğinde tez çalışmasının amaca ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

Bunun yanında çalışmada esnasında eksik olduğu düşünülen ve gelecek çalışmalara ışık tutması açısından önemli olduğu değerlendirilen noktalar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Gelecekte yapılacak çalışmalarda tez kapsamında geliştirilecek motor için termal model geliştirilebilir. Geliştirilecek termal model ile motorun daha yüksek güçlerde termal rejime girmeden çalışmasına yardımcı olabilir.
- Bobin başı uzunluğunun daha kısa olabilmesi ve dolayısıyla sargı direncinin azalması için daha profesyonel bobinaj işlemi yapılabilir. Bu durumda yük ve termal testlerdeki tasarım/test oranı bire yaklaşabilir.
- Tasarlanan MD-SRM, farklı kontrol algoritmaları ve anahtarlama frekansına sahip sürücüler kullanılarak karşılaştırmalı performans testleri gerçekleştirilebilir.
- Geliştirilen MD-SRM, mekanik tasarım optimizasyon sürecine tabi tutulabilir, böylelikle toplam ağırlık mukavemet kaybı olmaksızın azalabilir. Bu durumda atalet azalacağından dinamik tepkisi iyileşebilir.
- Mekanik imalat sürecinde daha hassas toleranslar kullanılması durumunda tasarım/test oranı bire yaklaşabilir.

KAYNAKLAR

1. Ou, J., Liu, Y., Doppelbauer, M. (2020). Comparison study of a surface-mounted PM rotor and an interior PM rotor made from amorphous metal of high-speed motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(10), 9148-9159.
2. Li, L., Zhang, J., Zhang, C. and Yu, J. (2016). Research on electromagnetic and thermal issue of high-efficiency and high-power-density outer-rotor motor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(4), 1-5.
3. Huynh, T. A., Hsieh, M. F. (2017). Comparative study of PM-assisted SynRM and IPMSM on constant power speed range for EV applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(11), 1-6.
4. Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M. and Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385.
5. Iulia, V., Loránd, S. (2022). A brief history of electric vehicles. *Journal of Computer Science & Control Systems*, 15(1), 45-52.
6. Guarnieri, M. (2012). *Looking back to electric cars*. 2012 Third IEEE HISTory of ELection-technology Conference (HISTELCON), Pavia, 1-6.
7. Guarnieri, M. (2011). When cars went electric, part one [historical]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 5(1), 61-62.
8. Hopkins, W. (2022). *The Davenport Electric Motor: A look at how the First Electric Motor Can Teach the Fundamentals of Magnetism and Motion* (Interactive Qualifying Project). Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA.
9. Pancaldi, G. (1990). Electricity and life. Volta's path to the battery. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 21(1), 123-160.
10. Calborean, A., Murariu, T., Morari, C. (2021). Optimized lead-acid grid architectures for automotive lead-acid batteries: An electrochemical analysis. *Electrochimica Acta*, 372, 137880.
11. Wetzel, E. (2004). Multifunctional composites for future energy storage in aerospace structures. Communications, and structure. *AMPTIAC Q*, 8, 91-95.
12. Sulzberger, C. (2006). 100 miles on one charge. *IEEE Power and Energy Magazine*, 4(6), 68-70.
13. Martínez-Lao, J., Montoya, F. G., Montoya, M. G. and Manzano-Agugliaro, F. (2017). Electric vehicles in Spain: An overview of charging systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 970-983.
14. Wakefield, E. H. (1993). *History of the electric automobile: battery-only powered cars*. New York: SAE International, 78-93.

15. Kocabey, S. (2018). Elektrikli otomobillerin dünü, bugünü ve geleceği. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 1(1), 16-23.
16. Un-Noor, F., Padmanaban, S., Mihet-Popa, L., Mollah, M. N. and Hossain, E. (2017). A comprehensive study of key electric vehicle (EV) components, technologies, challenges, impacts, and future direction of development. *Energies*, 10(8), 1217.
17. Lipu, M. H., Hannan, M. A., Hussain, A., Hoque, M. M., Ker, P. J., Saad, M. H. M. and Ayob, A. (2018). A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 205, 115-133.
18. Lipu, M. H., Hannan, M. A., Hussain, A., Hoque, M. M., Ker, P. J., Saad, M. H. M. and Ayob, A. (2018). A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 205, 115-133.
19. Sun, X., Li, Z., Wang, X. and Li, C. (2019). Technology development of electric vehicles: A review. *Energies*, 13(1), 90.
20. Mohammad, K. S., Jaber, A. S. (2022). Comparison of electric motors used in electric vehicle propulsion system. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 27(1), 11-19.
21. Goli, C. S., Manjrekar, M., Essakiappan, S., Sahu, P. and Shah, N. (2021). *Landscaping and review of traction motors for electric vehicle applications*. 2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), Online, 162-168.
22. Ehsani, M., Singh, K. V., Bansal, H. O. and Mehrjardi, R. T. (2021). State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 967-984.
23. Ding, L., Cheng, Y., Zhao, T., Yao, K., Wang, Y. and Cui, S. (2023). Design and optimization of an Asymmetric Rotor IPM motor with high demagnetization prevention capability and robust torque performance. *Energies*, 16(9), 3635.
24. Özdemir, M. S., Ocak, C., Dalcı, A. (2021). *Permanent magnet wind generators: neodymium vs. ferrite magnets*. 2021 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), Online, 1-6.
25. Coey, J. (2020). Perspective and prospects for rare earth permanent magnets. *Engineering*, 6(2), 119-131.
26. Morimoto, S., Ooi, S., Inoue, Y. and Sanada, M. (2014). Experimental evaluation of a rare-earth-free PMASynRM with ferrite magnets for automotive applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(10), 5749-5756.
27. Montalvo-Ortiz, E. E., Foster, S. N., Cintron-Rivera, J. G. and Strangas, E. G. (2013). *Comparison between a spoke-type PMSM and a PMASynRM using ferrite magnets*. 2013 International Electric Machines & Drives Conference, Chicago, 1080-1087.

28. Galioto, S. J., Reddy, P. B., El-Refaie, A. M. and Alexander, J. P. (2014). Effect of magnet types on performance of high-speed spoke interior-permanent-magnet machines designed for traction applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(3), 2148-2160.
29. Ozcelik, N. G., Dogru, U. E., Imeryuz, M. and Ergene, L. T. (2019). Synchronous reluctance motor vs. Induction motor at low-power industrial applications: Design and comparison. *Energies*, 12(11), 2190.
30. Heidari, H., Rassölkin, A., Kallaste, A., Vaimann, T., Andriushchenko, E., Belahcen, A. and Lukichev, D. V. (2021). A review of synchronous reluctance motor-drive advancements. *Sustainability*, 13(2), 729.
31. Ozcelik, N. G., Dogru, U. E., Imeryuz, M. and Ergene, L. T. (2019). Synchronous reluctance motor vs. Induction motor at low-power industrial applications: Design and comparison. *Energies*, 12(11), 2190.
32. Zechmair, D. and Steidl, K. (2012). Why the induction motor could be the better choice for your electric vehicle program. *World Electric Vehicle Journal*, 5(2), 546-549.
33. Nategh, S., Boglietti, A., Liu, Y., Barber, D., Brammer, R., Lindberg, D. and Aglen, O. (2020). A review on different aspects of traction motor design for railway applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(3), 2148-2157.
34. Liu, X., Chen, H., Zhao, J. and Belahcen, A. (2016). Research on the performances and parameters of interior PMSM used for electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(6), 3533-3545.
35. Zhu, X., Wu, W., Quan, L., Xiang, Z. and Gu, W. (2018). Design and multi-objective stratified optimization of a less-rare-earth hybrid permanent magnets motor with high torque density and low cost. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34(3), 1178-1189.
36. Islam, M. Z., Choi, S., Elbuluk, M. E., Bonthu, S. S. R., Arafat, A. and Baek, J. (2021). Design of external rotor ferrite-assisted synchronous reluctance motor for high power density. *Applied Sciences*, 11(7), 3102.
37. Hua, Y., Zhu, H., Gao, M. and Ji, Z. (2020). Multiobjective optimization design of permanent magnet assisted bearingless synchronous reluctance motor using NSGA-II. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(11), 10477-10487.
38. Lee, T. H., Kang, Y. R., Son, J. C. and Lim, D. K. (2021). Optimized design of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor using oriented auto-tuning niching algorithm. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 16, 1495-1503.
39. Shi, Z., Sun, X., Lei, G., Tian, X., Guo, Y. and Zhu, J. (2021). Multiobjective optimization of a five-phase bearingless permanent magnet motor considering winding area. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 27(5), 2657-2666.

40. Martínez-Lao, J., Montoya, F. G., Montoya, M. G. and Manzano-Agugliaro, F. (2017). Electric vehicles in Spain: An overview of charging systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 970-983.
41. Chakali, A. K., Toliyat, H. A. and Abu-Rub, H. (2010). *Observer-based sensorless speed control of PM-assisted SynRM for direct drive applications*. 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bari, 3095-3100
42. Hsu, J. S., Ayers, C. W. and Coomer, C. L. (2004). Report on Toyota/Prius motor design and manufacturing assessment, *USDE*, New York, 1-15.
43. Morimoto, S., Ooi, S., Inoue, Y. and Sanada, M. (2014). Experimental evaluation of a rare-earth-free PMASynRM with ferrite magnets for automotive applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(10), 5749-5756.
44. Krings, A., Monissen, C. (2020). *Review and trends in electric traction motors for battery electric and hybrid vehicles*. 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Göteborg, 1807-1813.
45. Takahashi, A., Hatsuse, W. (2021). Difference in base frequency and torque between distributed and concentrated windings in permanent magnet motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36(4), 2803-2813.
46. Husain, I., Ozpineci, B., Islam, M. S., Gurpinar, E., Su, G. J., Yu, W. and Sahu, R. (2021). Electric drive technology trends, challenges, and opportunities for future electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 1039-1059.
47. Krings, A., Monissen, C. (2020). *Review and trends in electric traction motors for battery electric and hybrid vehicles*. 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Göteborg, 1807-1813.
48. Burress, T. A., Campbell, S. L., Coomer, C., Ayers, C. W., Wereszczak, A. A., Cunningham, J. P. and Lin, H. T. (2011). *Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system* (No. ORNL/TM-2010/253). Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). Power Electronics and Electric Machinery Research Facility.
49. Liu, J., Anwar, M., Chiang, P., Hawkins, S., Jeong, Y., Momen, F. and Song, S. (2016). Design of the Chevrolet Bolt EV propulsion system. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 5(1), 79-86.
50. İnternet: Burress, T. (2017). Electrical performance, reliability analysis, and characterization. *DoE VTO Annual Merit Review*, Web: https://www.energy.gov/sites/default/files/2017/06/f34/edt087_burress_2017_o.pdf, Son Erişim Tarihi: 20/03/2024.
51. Grunditz, E. A., Thiringer, T. (2016). Performance analysis of current BEVs based on a comprehensive review of specifications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2(3), 270-289.

52. Reimers, J., Dorn-Gomba, L., Mak, C. and Emadi, A. (2019). Automotive traction inverters: Current status and future trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(4), 3337-3350.
53. Hsu, J. S., Ayers, C. W., Coomer, C. L. (2004). Report on Toyota/Prius motor design and manufacturing assessment, *USDE*, New York, 8-12.
54. Hendershot, J. R. (2015). *Motorsolve analysis of the 2010 toyota prius traction motor*. Infolytica Engage User Conference, Orlando, 32-38.
55. Sano, S., Yashiro, T., Takizawa, K. and Mizutani, T. (2016). Development of new motor for compact-class hybrid vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 8(2), 443-449.
56. Zheng, S., Zhu, X., Xiang, Z., Xu, L., Zhang, L. and Lee, C. H. (2022). Technology trends, challenges, and opportunities of reduced-rare-earth PM motor for modern electric vehicles. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 1(1), 100012.
57. None, N. (2018). FY2017 Electrification Annual Progress Report, *EERE*, Washington, 85-93.
58. Krings, A., Monissen, C. (2020). *Review and trends in electric traction motors for battery electric and hybrid vehicles*. 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Göteborg, 1807-1813.
59. Mukherjee, P., Paitandi, S. and Sengupta, M. (2020). Comparative analytical and experimental study of fabricated identical surface and interior permanent magnet BLDC motor prototypes. *Sādhanā*, 45(1), 26.
60. Zhao, N., Liu, W. (2015). Loss calculation and thermal analysis of surface-mounted PM motor and interior PM motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), 1-4.
61. Meier, F. (2008). *Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications*. Doctoral Dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 102-108.
62. Vu Xuan, H. (2012). *Modeling of exterior rotor permanent magnet machines with concentrated windings*. Doctoral Dissertation, Delft University of Technology, Delft, 88-102.
63. Vartanian, R. (2014). *Permanent magnet assisted synchronous reluctance machine (PMA-SynRM) design and performance analysis for fan and pump applications*. Doctoral Dissertation, Texas A&M University, College Station, 102-105.
64. Li, M., He, J., Demerdash, N. A. (2014). *A flux-weakening control approach for interior permanent magnet synchronous motors based on Z-source inverters*. 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Michigan, 1-6.
65. Almandoz, G., Gómez, I., Ugalde, G., Poza, J. and Escalada, A. J. (2019). Study of demagnetization risk in PM machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(4), 3490-3500.

66. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
67. Husain, T., Ma, C., Taran, N. and Wan, Z. (2021). *A comprehensive comparison of concentrated winding and distributed continuous winding machine topologies for hybrid electric vehicles*. 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Online, 3683-3689.
68. Vu Xuan, H. (2012). *Modeling of exterior rotor permanent magnet machines with concentrated windings*. Doctoral Dissertation, Delft University of Technology, Delft, 88-102.
69. Takahashi, A., Hatsuse, W. (2021). Difference in base frequency and torque between distributed and concentrated windings in permanent magnet motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36(4), 2803-2813.
70. Metwly, M. Y., Abdel-Khalik, A. S., Hamad, M. S., Ahmed, S. and Elmalhy, N. A. (2022). Multiphase stator winding: New perspectives, advanced topologies, and futuristic applications. *IEEE Access*, 10, 103241-103263.
71. Zheng, S., Zhu, X., Xiang, Z., Xu, L., Zhang, L. and Lee, C. H. (2022). Technology trends, challenges, and opportunities of reduced-rare-earth PM motor for modern electric vehicles. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 1(1), 100012.
72. Sriprang, S., Nahid-Mobarakeh, B., Takorabet, N., Pierfederici, S., Kumam, P., Bizon, N. and Thounthong, P. (2020). Design and control of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor with copper loss minimization using MTPA. *Journal of Electrical Engineering*, 71(1), 11-19.
73. Knebl, L., Ondrusek, C., Kurfürst, J. (2018). *Ferrite assisted synchronous reluctance motor design, manufacturing and material influence on motor characteristics*. 2018 18th International Conference on Mechatronics-Mechatronika (ME), Brno, 1-6.
74. Chakali, A. K., Toliyat, H. A., Abu-Rub, H. (2010). *Observer-based sensorless speed control of PM-assisted SynRM for direct drive applications*. 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bari, 3095-3100.
75. Pyrhonen, J. (2013). *Design of Rotating Electrical Machines* (Vol. 1). New York: Wiley-VCH, 45-52.
76. Magnussen, F. (2004). *On design and analysis of synchronous permanent magnet machines for field-weakening operation in hybrid electric vehicles*. Doctoral Dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Sweden, 78-85.
77. İnternet: Microsemi. *Park, Inverse Park and Clarke, Inverse Clarke Transformations MSS Software Implementations User Guide*, Web: https://ww1.microchip.com/downloads/aemdocuments/documents/fpga/ProductDocuments/UserGuides/sf2_mc_park_invpark_clarke_invclarke_transforms_ug.pdf, Son Erişim Tarihi: 17/10/2024.

78. Özçira, S. (2013). *Sürekli mıknatıslı senkron motorun doğrudan moment kontrolünün DSP tabanlı yeni bir algoritma geliştirilerek gerçekleştirilmesi*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 75-93.
79. Wang, Q., Wang, S., Chen, C. (2019). Review of sensorless control techniques for PMSM drives. *IEEJ Transactions on electrical and electronic engineering*, 14(10), 1543-1552.
80. Ghanayem, H., Alathamneh, M., Nelms, R. M. (2023). Decoupled speed and flux control of three-phase PMSM based on the proportional-resonant control method. *Energies*, 16(3), 1053.
81. Boldea, I., Moldovan, A., Tutelea, L. (2015). *Scalar V/f and If control of AC motor drives: An overview*. 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION), Antalya, 8-17.
82. Štulrajter, M., Hrabovcova, V., Franko, M. (2007). Permanent magnets synchronous motor control theory. *Journal of Electrical Engineering*, 58(2), 79-84.
83. Hurmola, J. (2019). *Enhanced scalar control of permanent magnet synchronous motors in electrical submersible pump applications*. Master's Thesis, Aalto University, Espoo, 98-102.
84. Krishnan, R. (2017). *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*. New York: CRC Press, 45-63.
85. Niu, F., Wang, B., Babel, A. S., Li, K. and Strangas, E. G. (2015). Comparative evaluation of direct torque control strategies for permanent magnet synchronous machines. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(2), 1408-1424.
86. Farid, N., Sebti, B., Mebarka, K. and Tayeb, B. (2007). *Performance analysis of field-oriented control and direct torque control for sensorless induction motor drives*. 2007 Mediterranean Conference on Control & Automation, Atina, 1-6.
87. De Klerk, M. L., Saha, A. K. (2021). A comprehensive review of advanced traction motor control techniques suitable for electric vehicle applications. *IEEE Access*, 9, 125080-125108.
88. Liu, C., Chau, K. T., Lee, C. H. and Song, Z. (2020). A critical review of advanced electric machines and control strategies for electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 1004-1028.
89. Garcia, X. D. T., Zigmund, B., Terlizzi, A. A., Pavlanin, R. and Salvatore, L. (2011). Comparison between FOC and DTC strategies for permanent magnet synchronous motors. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 5(1), 76-81.
90. Carter, S. R., Praveen, P., Varadhan, N. V., Kowshik, S. and Gopinath, G. (2023, December). *Field-Oriented Control (FOC) for Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) In Electric Vehicle*. 2023 International Conference on Next Generation Electronics (NEleX), Vellore, 1-5.

91. Mohd Zaihidee, F., Mekhilef, S., Mubin, M. (2019). Robust speed control of PMSM using sliding mode control (SMC)—A review. *Energies*, 12(9), 1669.
92. Wang, X., Reitz, M., Yaz, E. E. (2018). Field oriented sliding mode control of surface-mounted permanent magnet AC motors: Theory and applications to electrified vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(11), 10343-10356.
93. Rusu, C., Radulescu, M. M., Enikö, S., Melinda, R. K. and Jakab, Z. L. (2014). *Embedded motor drive prototype platform for testing control algorithms*. 2014 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova, 1-6.
94. Kumar, P. (2020). *Permanent magnet synchronous motor control for efficient motor drives*. Doctoral Dissertation, Free University of Bozen-Bolzano, 88-93.
95. Nam, K. H. (2018). *AC motor control and electrical vehicle applications*. New York: CRC Press, 45-52.
96. Erkol, H. O. (2019). Optimized field oriented control design by multi objective optimization. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 10(2), 26-32.
97. Ünsal, A. H. (2016). *Maximum Torque per Ampere and Flux Weakening Control of IPM Motors for Electrical Vehicles*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 45-63.
98. Zhou, Y., Chen, W. and Lin, D. (2022). Design of optimum portfolio scheme based on improved NSGA-II algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022(1), 7419500.
99. Malagoli, J. A., Camacho, J. R. and da Luz, M. V. F. (2021). Optimal electromagnetic torque of the induction motor generated automatically with Gmsh/GetDP software. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(3), e12773.
100. Karakoç, G. and Türkşen, Ö. Karma veri içeren çok yanıtlı problemlerde NSGA-II'ye dayalı bir optimizasyon yaklaşımı. *İstatistikçiler Dergisi: İstatistik ve Aktüerya*, 16(2), 57-80.
101. Micari, S., Foti, S., Testa, A., De Caro, S., Sergi, F., Andaloro, L. and Napoli, G. (2022). Effect of WLTP CLASS 3B driving cycle on lithium-ion battery for electric vehicles. *Energies*, 15(18), 6703.
102. İnternet: Citroen, Teknik Özellikler, Web: <https://talep.citroen.com.tr/dijital-katalog/ami/teknik-ozellikler>, Son Erişim Tarihi: 08/07/2024.
103. İnternet: Tatasteel Europe, Web: <https://www.tatasteeleurope.com/sites/default/files/m235-35a.pdf>, Son Erişim Tarihi: 15/08/2024.

104. İnternet: Unit Türkiye, Unit UT513 İzolasyon Direnci Test Cihazı – İzolasyon Megeri, Web: <https://www.unitturkiye.com/urun/ut-513-izolasyon-direnci-test-cihazı-izolasyon-megeri>, Son Erişim Tarihi: 28/04/2024.
105. İnternet: Unit Türkiye, Dijital Mikro OHM Metre, Web: <https://www.unitturkiye.com/urun/unit-ut620a-dijital-mikro-ohm-metre>, Son Erişim Tarihi: 17/03/2024.
106. İnternet: Uni-t, Titreşim test cihazı, Web: https://www.uni-t.com.tr/unit-ut-315a-titresim-test-cihazı?srsId=AfmBOoo8fF8yURH_J_Aj8X_BzTJKhHR3NqSAI8e2raepM2rnXtgVIP7Z, Son Erişim Tarihi: 22/10/2024.
107. İnternet: Hioki, Power Analyzer, Web: https://www.hioki.com/euro-en/products/power-meters/power-analyzer/id_6029, Son Erişim Tarihi: 21/10/2024.
108. İnternet: Magtrol, Tandem series in line double dynamometers, Web: <https://www.magtrol.com/product/tandem-series-in-line-double-dynamometers/#&gid=1&pid=1>, Son Erişim Tarihi: 20/10/2024.
109. İnternet: Zapi Group, AC Evolution series inverters, <https://www.zapigroup.com/en/ac-evolution-series-inverters#ACE3-2uC>, Son Erişim Tarihi: 18/03/2024.
110. Boztaş, G. (2018). *Düşük gerilim ile beslenen senkron relüktans motor ve sürücü tasarımı*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, 88-93.
111. Morimoto, S. (2007). Trend of permanent magnet synchronous machines. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2(2), 101-108.



Gazili olmak ayrıcalıktır...