

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇ UYGULAMALARINDA
KULLANILAN SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON
MOTORUN FARKLI ROTOR TOPOLOJİLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI

Bektaş Aybars BALTA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK

Eş Danışman

Öğr. Gör. Dr. Mustafa Gürkan AYDENİZ

Temmuz, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇ UYGULAMALARINDA
KULLANILAN SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON
MOTORUN FARKLI ROTOR TOPOLOJİLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

Bektaş Aybars BALTA tarafından hazırlanan tez çalışması 23.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği, Anabilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Öğr. Gör. Dr. Mustafa Gürkan AYDENİZ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kamuran Nur Bekiroğlu, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Murat TEZCAN, Üye
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Danışmanlarım Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK ve Öğr. Gör. Dr. Mustafa Gürkan AYDENİZ sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Elektrikli Araç Uygulamalarında Kullanılan Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Farklı Rotor Topolojilerinin Karşılaştırılması” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Bektaş Aybars BALTA

İmza



Sevgili Aileme...

TEŞEKKÜR

Değerli rehberlikleri, sabırları ve bilgi birikimleri sayesinde bu çalışmayı başarıyla tamamlamama olanak sağlayan değerli tez danışmanlarım Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK ve Öğr. Gör. Dr. Mustafa Gürkan AYDENİZ 'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen sevgili annem Kadriye BALTA, babam Hasan BALTA ve kardeşim Berkay BALTA'ya koşulsuz destekleri için teşekkürü bir borç bilirim.

Tez sürecimde gösterdikleri anlayış, destek ve teşvikleri için değerli arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Bektaş Aybars BALTA

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	9
1.3 Hipotez	9
2 ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN ELEKTRİK MOTORLARI	11
2.1 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Elektrik Motorlarının Sınıflandırılması...	12
2.1.1 Fırçalı DA Motoru	12
2.1.2 Asenkron Motor	12
2.1.3 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor	13
2.1.4 Anahtarlamalı Relüktans Motoru.....	14
2.1.5 Senkron Relüktans Motoru	14
3 SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR	16
3.1 Sürekli Mıknatıslar.....	16
3.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Sınıflandırılması	19
3.3 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Moment İfadesi.....	22
4 REFERANS SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN MODELLENMESİ	24
5 FARKLI ROTOR TOPOLOJİLERİNİN MODELLENMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI	32
5.1 V Şekilli GSMSM.....	32
5.1.1 Rib Uzunluğunun Motor Performansına Etkisi	33
5.1.2 Mıknatıs Kalınlığının Motor Performansına Etkisi	34
5.1.3 Mıknatıs Genişliğinin Motor Performansına Etkisi.....	35
5.1.4 O Mesafesinin Motor Performansına Etkisi	37
5.1.5 Nihai Yapıdaki V Şekilli GSMSM Analizleri	38

5.2 Düz Şekilli GSMSM	43
5.2.1 Rib Uzunluğunun Motor Performansına Etkisi	43
5.2.2 Mıknatıs Kalınlığının Motor Performansına Etkisi	44
5.2.3 Mıknatıs Genişliğinin Motor Performansına Etkisi.....	46
5.2.4 O Mesafesinin Motor Performansına Etkisi	47
5.2.5 Nihai Yapıdaki Düz Şekilli GSMSM Analizleri	49
5.3 U Şekilli GSMSM.....	53
5.3.1 Rib Uzunluğunun Motor Performansına Etkisi	53
5.3.2 Mıknatıs Kalınlığının Motor Performansına Etkisi	54
5.3.3 Mıknatıs Genişliğinin Motor Performansına Etkisi.....	56
5.3.4 O Mesafesinin Motor Performansına Etkisi	57
5.3.5 Nihai Yapıdaki U Şekilli GSMSM Analizleri	59
5.4 Modellerin Karşılaştırılması	63
6 SONUÇ	66
KAYNAKÇA	69
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	73

SİMGE LİSTESİ

μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği
V_d	D eksenı uç gerilimi
E_d	D eksenı iç gerilimi
I_d	D eksenı akımı
L_d	D eksenı akımı
Ψ_d	Doyum noktasındaki manyetik alan şiddeti
$\omega_{s,r}$	Elektriksel açısal hız
P_e	Endüklenen güç
T_e	Endüklenen moment
R_{ib}	İki kutup arası mesafe
B_r	Kalıcı manyetik akı yoğunluğu
B_{sat}	Manyetik akı yoğunluğu doyum noktası
Ψ_m	Mıknatıs Akısı
O	Mıknatıs alt uçlarının rotor iç çapına uzaklığı
BH	Mıknatıs enerji yoğunluğu
l	Mıknatıs genişliği
w	Mıknatıs kalınlığı
V_q	Q eksenı uç gerilimi
E_q	Q eksenı iç gerilimi
I_q	Q eksenı akımı
L_q	Q eksenı akımı
B_i	Yapısal akı yoğunluğu
H_{ci}	Yapısal zorlayıcılık
H_c	Zorlayıcı manyetik alan şiddeti

KISALTMA LİSTESİ

AA	Alternatif Akım
ASM	Asenkron Motor
ARM	Anahtarlamalı Relüktans Motor
DA	Doğru Akım
EA	Elektrikli Araç
EMK	Elektromotor Kuvvet
FDAM	Fırçasız Doğru Akım Motoru
GSMSM	Gömülü Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
GSM	Gömülü Sürekli Mıknatıs
HEA	Hibrit Elektrikli Araç
İYM	İçten Yanmalı Motor
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
SMSM	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
SM	Sürekli Mıknatıs
SMFDAM	Sürekli Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru
SRM	Senkron Relüktans Motor
YMSM	Yüzey Mıknatıslı Senkron Motor

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Elektrik motorlarının sınıflandırılması	12
Şekil 2.2	Tesla Roadster asenkron motoru	13
Şekil 2.3	Hyundai Sonata SMSM.....	13
Şekil 2.4	Nissan Leaf SMSM	14
Şekil 3.1	Sürekli mıknatısa ait B-H eğrisi ve demanyetizasyon karakteristiği	16
Şekil 3.2	Farklı sürekli mıknatıslara ait B-H eğrisi ve demanyetizasyon karakteristiği	18
Şekil 3.3	Mıknatıs konumuna göre SMSM çeşitleri a) Dış yüzeye yapıştırmalı SMSM b) İç yüzeye yapıştırmalı SMSM c,d,e) Farklı yapıdaki GSMSM	21
Şekil 3.4	SMSM d-q eksen eşdeğer devresi	22
Şekil 4.1	NdFeB N36Z sürekli mıknatıs B-H karakteristiği ve demanyetizasyon eğrisi	26
Şekil 4.2	Referans GSMSM modeli	27
Şekil 4.3	Referans GSMSM ağ yapısı	28
Şekil 4.4	Referans GSMSM manyetik akı dağılımı	28
Şekil 4.5	Referans GSMSM moment grafiği.....	29
Şekil 4.6	Referans GSMSM moment dalgalanması	29
Şekil 4.7	Referans GSMSM vuru moment grafiği	30
Şekil 5.1	Rib uzunluğuna bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları	34
Şekil 5.2	Mıknatıs kalınlığına bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları.....	35
Şekil 5.3	Mıknatıs genişliğine bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları.....	36
Şekil 5.4	O mesafesine bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları	38
Şekil 5.5	V şekilli GSMSM nihai tasarım 2D modeli	39
Şekil 5.6	V şekilli GSMSM ağ yapısı.....	39
Şekil 5.7	V şekilli GSMSM manyetik akı yoğunluğu dağılımı.....	40
Şekil 5.8	V şekilli GSMSM moment grafiği	41
Şekil 5.9	V şekilli GSMSM moment dalgalanması.....	41
Şekil 5.10	V şekilli GSMSM vuru moment grafiği.....	42
Şekil 5.11	Rib uzunluğuna bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları	44

Şekil 5.12 Mıknatıs kalınlığına bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları.....	45
Şekil 5.13 Mıknatıs genişliğine bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları.....	47
Şekil 5.14 O mesafesine bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları	48
Şekil 5.15 Düz şekilli GSMSM nihai tasarım 2D modeli	49
Şekil 5.16 Düz şekilli GSMSM ağ yapısı.....	50
Şekil 5.17 Düz şekilli GSMSM manyetik akı yoğunluğu dağılımı.....	50
Şekil 5.18 Düz şekilli GSMSM moment grafiği	51
Şekil 5.19 Düz şekilli GSMSM moment dalgalanması.....	51
Şekil 5.20 Düz şekilli GSMSM vuruşu momenti grafiği.....	52
Şekil 5.21 Rib uzunluğuna bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları	54
Şekil 5.22 Mıknatıs kalınlığına bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları.....	55
Şekil 5.23 Mıknatıs genişliğine bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları.....	57
Şekil 5.24 O mesafesine bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları	58
Şekil 5.25 U şekilli GSMSM nihai tasarım 2D modeli	59
Şekil 5.26 U şekilli GSMSM ağ yapısı.....	60
Şekil 5.27 U şekilli GSMSM manyetik akı yoğunluğu dağılımı.....	60
Şekil 5.28 U şekilli GSMSM moment grafiği	61
Şekil 5.29 U şekilli GSMSM moment dalgalanması.....	61
Şekil 5.30 U şekilli GSMSM vuruşu momenti grafiği.....	62
Şekil 5.31 Moment ve moment dalgalanması karşılaştırma grafiği	63
Şekil 5.32 Verim karşılaştırma grafiği	64
Şekil 5.33 Vuruşu momenti karşılaştırma grafiği	64

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motor türleri	11
Tablo 2.2 Elektrik araçlarda kullanılan elektrik motorları karşılaştırması	14
Tablo 4.1 Referans GSMSM özellikleri.....	24
Tablo 4.2 M19-29G Elektriksel çelik B-H karakteristiği.....	25
Tablo 4.3 Referans GSMSM stator oluk ve sürekli mıknatıs ölçüleri	26
Tablo 4.4 Referans GSMSM analiz sonuçları.....	30
Tablo 5.1 V şekilli GSMSM başlangıç parametreleri	32
Tablo 5.2 V şekilli GSMSM’de Rib uzunluğunun etkisi	33
Tablo 5.3 V şekilli GSMSM’de mıknatıs kalınlığının etkisi	34
Tablo 5.4 V şekilli GSMSM’de mıknatıs genişliğinin etkisi	36
Tablo 5.5 V şekilli GSMSM’de O mesafesinin etkisi.....	37
Tablo 5.6 V şekilli GSMSM nihai boyutları	38
Tablo 5.7 V şekilli GSMSM analiz sonuçları	42
Tablo 5.8 Düz şekilli GSMSM başlangıç parametreleri	43
Tablo 5.9 Düz şekilli GSMSM’de Rib uzunluğunun etkisi	43
Tablo 5.10 Düz şekilli GSMSM’de mıknatıs kalınlığının etkisi.....	45
Tablo 5.11 Düz şekilli GSMSM’de mıknatıs genişliğinin etkisi	46
Tablo 5.12 Düz şekilli GSMSM’de O mesafesinin etkisi.....	47
Tablo 5.13 Düz şekilli GSMSM nihai boyutları	49
Tablo 5.14 Düz şekilli GSMSM analiz sonuçları	52
Tablo 5.15 U şekilli GSMSM başlangıç parametreleri	53
Tablo 5.16 U şekilli GSMSM’de Rib uzunluğunun etkisi	53
Tablo 5.17 U şekilli GSMSM’de mıknatıs kalınlığının etkisi	55
Tablo 5.18 U şekilli GSMSM’de mıknatıs genişliğinin etkisi	56
Tablo 5.19 U şekilli GSMSM’de O mesafesinin etkisi.....	57
Tablo 5.20 U şekilli GSMSM nihai boyutları	59
Tablo 5.21 U şekilli GSMSM analiz sonuçları	62

Elektrikli Araç Uygulamalarında Kullanılan Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Farklı Rotor Topolojilerinin Karşılaştırılması

Bektaş Aybars BALTA

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr.Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK

Eş-Danışman: Öğr. Gör. Dr. Mustafa Gürkan AYDENİZ

Fosil yakıtların azalması, çevre kirliliği ve küresel ısınmanın giderek artması gibi sebeplerle elektrikli araçların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Elektrikli araçlar; yüksek verimlilik, sessiz ve titreşimsiz çalışma, çevre dostu olması gibi pek çok avantaja sahiptir. Bunların yanında elektrik motoru, batarya ve kontrolcü teknolojilerinin de gelişmesiyle birlikte elektrikli araçlara olan ilgi artmaktadır. Elektrik motorları, yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim, geniş moment-hız aralığı sunmaktadır. Bu sebeplerle elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorları için mühendislik anlamında pek çok araştırma, inceleme ve karşılaştırma çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında seri üretime geçmiş ve iyi satış rakamlarına ulaşmış olan elektrikli bir araçta kullanılmakta olan gömülü sürekli mıknatıslı senkron motor referans alınarak farklı rotor topolojilerine sahip gömülü sürekli mıknatıslı senkron motorların modelleme, analiz ve karşılaştırmaları yapılmıştır. Referans GSMSM ile ilgili literatürdeki modelleme ve test çalışmaları

incelenmiştir. Bu çalışmalar yardımıyla referans GSMSM ANSYS Maxwell programında iki boyutta modellenmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmalar ile benzerlik taşıdığı görülmüştür. Karşılaştırılması yapılacak V şekilli, düz şekilli ve U şekilli gömülü sürekli mıknatıslı senkron motorlar, referans GSMSM'nin stator boyutları, sargı yapısı, rotor boyutları, manyetik malzeme türü ve sürekli mıknatıs malzeme türü aynı kalmak koşulu ile modellenmiş ve mıknatıs kalınlığı, mıknatıs genişliği gibi rotor geometri parametrelerinin performansa etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak dört farklı yapıdaki gömülü sürekli mıknatıslı senkron motorun analizleri gerçekleştirilerek karşılaştırmaları yapılmıştır. Düz şekilli gömülü sürekli mıknatıslı senkron motor momenti 279,85 Nm ile en yüksek değere sahiptir. Moment dalgalanması bakımından V şekilli ve U şekilli gömülü sürekli mıknatıslı senkron motorlar sırasıyla 15,9 Nm ve 17,1 Nm ile düşük değerler elde edilmiştir. U şekilli gömülü sürekli mıknatıslı senkron motor %91 ile en düşük verime sahipken diğerleri benzer seviyededir. Vuruntu momentin de ise düz şekilli gömülü sürekli mıknatıslı senkron motorda en yüksek değer elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, gömülü sürekli mıknatıslı senkron motor, moment, sonlu elemanlar analizi.

Comparison Of Different Rotor Topologies Of Permanent Magnet Synchronous Motor Used In Electric Vehicle Applications

Bektaş Aybars BALTA

Department of Electrical Engineering

Master of Science

Supervisor: Asst. Prof. Engin AYÇİÇEK

Co-supervisor: Lect. PhD Mustafa Gürkan AYDENİZ

Due to reasons such as the depletion of fossil fuels, increasing environmental pollution, and global warming, the use of electric vehicles is becoming more widespread. Electric vehicles offer many advantages such as high efficiency, quiet and vibration-free operation, and environmental friendliness. Additionally, advancements in electric motor, battery, and controller technologies have further fueled interest in electric vehicles. Electric motors provide high power density, high efficiency, and a wide torque-speed range. Consequently, numerous research, examination, and comparison studies are being conducted in engineering for electric motors used in electric vehicles. In this study, interior permanent magnet synchronous motors with different rotor topologies were modeled, analyzed, and compared, taking as reference a commercially produced electric vehicle with interior permanent magnet synchronous motor that has achieved good sales figures. Modeling and testing studies from the literature related to the reference motor were reviewed. Using these studies, the reference motor was modeled and analyzed in two dimensions using ANSYS Maxwell software. The results obtained showed similarities to the studies in the literature. Interior permanent magnet synchronous

motors with V-shaped, flat-shaped, and U-shaped rotor topologies were modeled under the condition that the stator dimensions, winding structure, rotor dimensions, magnetic material type, and permanent magnet material type were kept the same as the reference motor. The influence of rotor geometry parameters such as magnet thickness and magnet width on performance was examined. As a result, analyses of four different types of interior permanent magnet synchronous motors were conducted, and comparisons were made. The flat-shaped interior permanent magnet synchronous motor exhibited the highest torque at 279.85 Nm. In terms of torque ripple, the V-shaped and U-shaped interior permanent magnet synchronous motors achieved lower values of 15.9 Nm and 17.1 Nm, respectively. The U-shaped interior permanent magnet synchronous motor had the lowest efficiency at 91%, while the others were at similar levels. The flat-shaped interior permanent magnet synchronous motor also obtained the highest cogging torque moment.

Keywords: Electric vehicles, interior permanent magnet synchronous motor, torque, finite elements analysis.

1.1 Literatür Özeti

Fosil yakıtların azalması, çevre kirliliği ve küresel ısınmanın giderek artması gibi sebeplerle elektrikli araçların kullanımı yaygınlaşmaktadır. İçten yanmalı motora sahip araçlar özellikle büyük şehirlerde hava kirliliğini yüksek oranda arttırmaktadır. Çevre kirliliğinin azaltılması ve sıfır emisyon elde edebilmek için elektrikli araçlar iyi bir tercihtir [1].

Elektrikli araçlar; yüksek verimlilik, sessiz ve titreşimsiz çalışma, çevre dostu olması gibi pek çok avantaja sahiptir. Bunların yanında elektrik motoru, batarya ve kontrolcü teknolojilerinin de gelişmesiyle birlikte elektrikli araçlara olan ilgi artmaktadır. Elektrik motorları, yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim, geniş moment-hız aralığı sunmaktadır.

Tarihte bilinen ilk elektrikli araç, T. Davenport tarafından 1835 yılında Amerika Vermont'ta, iki elektromıknatıs, bir pivot ve bir bataryadan oluşan küçük bir lokomotif. Aynı dönemde İskoçya'da Robert Anderson'da başka bir elektrikli araç icat edilmiştir. 1800'lü yılların sonuna doğru elektrikli araçların kullanımı artarak yaygınlaşmıştır. 1897 yılında ilk elektrikli taksiler New York caddelerinde yerini almıştır.

1900 yılına gelindiğinde Amerika Birleşik Devletleri'nde üretilen 4.192 otomobilden %28'i elektrikle çalışıyordu. Bu dönemde benzinli araçların gürültü, ses ve titreşim gibi problemleri sebebiyle elektrikli araçlar tercih edilmekteydi. 1908 yılında Henry Ford benzinli araç Model T'yi tanıttı ve bu hamle Amerikan otomobil pazarını tamamen değiştirdi. 1920'lerde elektrikli araçlara göre daha ucuz bir alternatif olan benzinli araçlar daha çok tercih edilir olmuştur. 1970'lerde petrol krizi, çevre kirliliği gibi sebeplerle elektrikli araçlar tekrar ön plana çıkmaya başlamıştır. 1990'larda pek çok otomobil üretici elektrikli araç üretilerek piyasaya sunulmuştur.

2000'li yılların başında ise Tesla'nın, tek şarjla 200 kilometre yol alabilen aracı piyasaya sürmesi ile elektrikli araç konusunda devrim niteliğinde bir adım atmıştır.

2010'lu yıllardan günümüze de elektrikli araçlar popülerliğini giderek arttırmıştır [2].

Elektrikli araçlarda kullanılan motor çeşitleri ve sürekli mıknatıslı motorlarla ilgili literatür özeti aşağıda verilmiştir.

Ehsani ve diğerleri, 2003 yılında yaptıkları bu çalışmada motor özelliklerinin elektrikli aracın performansına olan etkisini ve elektrikli araçlarda kullanılan üç temel elektrik motorunun karakteristiklerini incelemişlerdir. EA ve HEA'larda elektrik motorunun ideal karakteristiği; hızlı ivmelenme, yokuş tırmanma ve engel aşma için düşük hız bölgesinde yüksek moment, normal sürüş için ise yüksek hızda düşük momenttir. EA'larda elektrik motorunun moment ve hız talebini karşılamak için uzun bir sabit güç aralığına sahip olması gerekmektedir. Yapılan çalışma sonucunda SMFDAM'ın en yüksek moment yoğunluğuna sahip olduğu, buna rağmen alan zayıflatmanın zor olması sebebiyle sabit güç bölgesinin sınırlı olduğu belirtilmiştir. Anahtarlama relüktans motorunun moment-hız karakteristiği bakımından elektrikli araç uygulamaları için daha uygun olduğu paylaşılmıştır [3].

Hashemnia ve Asaei, 2008 yılında yaptıkları çalışmada EA uygulamalarında kullanılan farklı elektrik motorlarını karşılaştırmışlardır. Karşılaştırılan yapılar; DA motoru, asenkron motor, SMSM, anahtarlama relüktans motoru ve fırçasız DA motorudur. Çalışma sonucunda, asenkron motorların; sağlam yapısı, düşük maliyet ve daha az bakıma ihtiyaç duyması gibi avantajlarla EA uygulamaları için yüksek oranda tercih edildiği belirtilmiştir. Buna rağmen, yüksek verim ve güç yoğunluğu gibi avantajları sebebiyle SMSM ve fırçasız DA motorlarının da EA uygulamaları için ilgi çekici olduğu belirtilmiştir [4].

Yıldırım ve diğerleri, 2014 yılında yaptıkları bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan farklı elektrik motor tiplerini ve sürücülerini verimlilik, maliyet, ağırlık, soğutma, maksimum hız, güvenilirlik, hata toleransı, güç seviyesi ve araç hızlanma süresi gibi çeşitli faktörlere göre karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, SMFDAM ve sürücülerinin daha verimli ve daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olduğu, fırçasız doğru akım motorlarının (FDAM) uygun maliyetli olduğu, asenkron motorların (ASM) kontrol edilebilirlik ve maliyet bakımından uygun olduğu, anahtarlama relüktans motorlarının (ARM) da düşük ağırlığa, yüksek güvenilirliğe sahip olduğunu belirtilmiştir. ARM'lerin hızlanma süresi açısından

ASM ve FDAM'den daha iyi performans gösterdiği ve EA'lar için en uygun motor olarak kabul edilebileceği belirtmiştir [5].

Rind ve diğerleri, 2017 yılında yaptıkları bu çalışmada farklı konfigürasyon ve yapıdaki elektrikli ve hibrit elektrikli araçlarda, elektrik çekiş sistemlerinde kullanılan çekiş motorları ve yüksek performanslı sensörsüz hız kontrol yöntemlerini incelemişlerdir. Çalışmada DA motorlar, asenkron motor, sürekli mıknatıslı senkron motor ve anahtarlama relüktans motorların elektrikli ulaşımında kullanılan temel çekiş motorları olduğunu, her bir motor türünün de kendine göre avantaj ve dezavantajı olduğu belirtilmiştir. Bunların yanında güç elektroniği, dijital sinyal işleme gibi alanlardaki gelişmelerle birlikte alternatif akım (AA) motor türlerinin daha yaygın olarak kullanılmaya başlandığı paylaşılmıştır [6].

Thakar ve Patel, 2019 yılında yaptıkları çalışmada elektrikli araç uygulamaları için geleneksel ve gelişmiş motorları karşılaştırmışlardır. Geçmişte doğru akım (DA) motorlar popüler iken teknolojinin gelişmesiyle sürekli mıknatıslı motorlar daha popüler hale gelmeye başlamıştır. Radyal yapıya sahip bu motorların yerini günümüzde eksenel yapıya sahip motorlar almaya başlamıştır. Çalışma kapsamında DA motoru, asenkron motor, radyal SMFDAM ve senkron relüktans motorun moment-hız karakteristikleri verilmiş, bu yapılar eksenel yapı motorları ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, geleneksel motorlar arasında SMFDAM ve asenkron motorların elektrikli araç uygulamaları için moment-hız karakteristiği, dinamik tepki, verimlilik, moment dalgalanması gibi kriterler bakımından daha iyi olduğu paylaşılmıştır. Öte yandan eksenel akı motorlarının da radyal yapı motorlardan daha iyi olduğu belirtilmiştir [7].

Krings ve Monissen, 2020 yılında yaptıkları bu çalışmada elektrikli ve hibrit araçlarda elektrikli çekiş motorlarında tercih edilen tasarımları, performans karakteristiklerini ve gelecek konseptleri üzerine inceleme gerçekleştirmiştir. Başlıca otomobil üreticilerine ait sürekli mıknatıslı çekiş motorları incelenmiş ve kullanılan manyetik malzemeler ile motor tasarımları karşılaştırılmıştır. Bunlarla birlikte motorların güç yoğunluğu, hız ve alan zayıflatma kabiliyetleri gibi performans karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Elektrikli çekiş motorlarında sürekli mıknatıslı motorlara doğru bir eğilim olduğu, ayrıca güç yoğunluğu, maksimum hız artışı ve farklı tasarımlar ile gürültü ve titreşimlerin azaltılması gibi konularda çalışmalar yapıldığı belirtilmiştir [8].

Jahns ve diğerkleri, 2006 yılında yaptıkları çalışmada 850 rpm ile 4250 rpm hız aralığında 50 kW sabit güç verebilen ve güç çıkışı 25 kW iken 8000 rpm hıza ulaşabilen GSM motor tasarımı gerçekleştirmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen motor, kutup başına iki katlı mıknatıs yapısına ve dağıtık stator sargısına sahiptir. Ayrıca motor, atalet momentinin düşük olması için derin stator oluk yapısı ve dört katlı sargıya sahiptir. Prototip üretimi ve deneysel testleri gerçekleştirilen motorun tasarım isterlerini sağladığı paylaşılmıştır [9].

Kim ve diğerkleri, 2009 yılında yaptıkları çalışmada rotoru V şekilli kalıcı mıknatısa sahip GSMSM'nin yüksek performans vermesi için optimizasyon yöntemi sunmuşlardır. Genelde GSMSM'nin temel tasarımı için eşdeğer manyetik devreye dayalı tasarım yöntemi kullanılmaktadır; ancak bu yöntem ile yapılan tasarımlarda hava boşluğu akısının hesaplanma yöntemi sebebiyle yanlış sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca bu yöntem ile kalıcı mıknatıslar ve bariyerlerin yerleşiminde de problem yaşanabilmektedir. Etkili bir V şekilli kalıcı mıknatıslı GSMSM tasarımı için beş çok amaçlı fonksiyonu benimseyen Taguchi yöntemi önerilmektedir. Her bir amaç fonksiyonunun ağırlığı ayarlanarak, farklı optimal tasarımlar elde edilebilmektedir. Elde edilen optimal tasarımlardan, beklenen isterlere en yakın olan tasarımın prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Prototip motora uygulanan testler sonuçları ile tasarım kriterleri karşılaştırılarak optimizasyon yöntemi doğrulanmıştır [10].

F.Rong ve D. Manfeng, 2012 yılında yaptıkları çalışmada elektrikli otobüs için 30kW'lık gömülü sürekli mıknatıslı SM tasarımı ve analizi gerçekleştirmiştir. Tasarım optimizasyonu için sonlu elemanlar analizi (SEA) yöntemi kullanılmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen motor V şeklinde mıknatısa sahip rotor ile 36 oluk ve çift katlı sargıya sahip statordan oluşmaktadır. Tasarım optimizasyonu için parametre olarak rotor, stator ve mıknatıs boyutları ile hava aralığı uzunluğu tercih edilmiştir. Bu parametrelere bağlı olarak 4 farklı tasarım gerçekleştirilmiştir. SEA yöntemi sonucunda elde edilen çıktılarına göre 2 ve 4 numaralı tasarımların stator yapısı temele alınarak optimizasyon gerçekleştirilmiş ve tasarım nihailendirilmiştir. Nihai tasarımda hava aralığı akı yoğunluğu 0,54 T, gövde akı yoğunluğu 1,7 T elde edilmiştir. Son olarak performans, vuruuntu momenti, Back-EMF, d ve q endüktansları analiz edilmiştir. Tasarımı ve analizleri tamamlanan motorun prototip

üretimi gerçekleştirilmiş ve testleri yapılmıştır. Motorun istenilen performans ve karakteristiği sağladığı görülmüştür [11].

Benlamaine ve diğerleri, 2014 yılında yaptıkları bu çalışmada elektrikli araç için gömülü sürekli mıknatıslı eksenel akılı motor tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu motor, çift stator ve tek rotorlu yapıda olup, her stator 18 oluğa ve rotor 16 kutba sahiptir. Ardından tasarımı gerçekleştirilen bu motor, piyasadaki elektrikli araçlarda kullanılan gömülü sürekli mıknatıslı radyal akılı motorlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda eksenel akılı motorun özellikle moment/ağırlık oranı bakımından avantajlı olduğu paylaşılmıştır [12].

Liu ve diğerleri, 2016 yılında yaptıkları çalışmada farklı rotor topolojilerine sahip GSMSM'lerin tasarım ve karşılaştırmalı analizleri gerçekleştirmiştir. Yapılan analizler sonucunda V şekilli mıknatısa sahip GSMSM'lerin daha avantajlı olduğu görülmüştür. Çalışma kapsamında ayrıca V şekilli mıknatısa sahip GSMSM'nin farklı geometrik parametrelerinin motor performansına etkisi incelenmiştir. Bu parametreler değiştirilerek farklı analizler gerçekleştirilmiştir. Motor performansının bu parametrelere göre oldukça değişken olduğu görülmüştür. Bu sebeple motor tasarımı gerçekleştirilirken pek çok parametrenin dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir [13].

Yan ve diğerleri, 2017 yılında yaptıkları bu çalışmada hafif elektrikli araçlarda oldukça fazla tercih edilen gömülü sürekli mıknatıslı senkron motorların farklı rotor yapıları SEA yöntemi ile karşılaştırmıştır. Karşılaştırılan rotor yapıları; geleneksel, düz şekilli mıknatısa sahip rotor ile V şekilli mıknatısa sahip rotordur. Performans karakteristikleri, alan zayıflatma kabiliyetleri SEA yöntemi ile karşılaştırılan bu motorların prototip üretimleri de gerçekleştirilerek, SEA yönteminin doğruluğu da deneysel olarak test edilmiştir. V şekilli mıknatısa sahip motor ortalama moment, geniş hız aralığında çalışma, alan zayıflatma kabiliyeti ve yüksek verimlilik gibi özellikleri bakımından düz şekilli yapıya göre avantaj sağlamaktadır [14].

Zhou ve diğerleri, 2018 yılında yaptıkları çalışmada temel motor boyutları ve sürekli mıknatıs miktarı aynı olan dört farklı rotor topolojisine sahip SMSM tasarımı ve karşılaştırmalarını gerçekleştirmişlerdir. Bu rotor topolojileri yüzey montajlı SMSM, V şekilli mıknatıslı GSMSM, delta şekilli mıknatıslı GSMSM ve düz mıknatıslı GSMSM'dir. Yapılan analizler sonucunda aynı akım değeri için

relüktans momentinin da etkisiyle GSMSM'lerin daha yüksek başlangıç momentine sahip olduğu görülmüştür. Benzer şekilde moment dalgalılığı, verim ve demanyetizasyon gibi konularda da GSMSM'lerin daha iyi olduğu görülmüştür [15].

Pastellides ve diğerleri, 2019 yılında yaptıkları bu çalışmada 2 kW gücünde farklı rotor topolojilerine sahip SMSM'lerin tasarım optimizasyonu gerçekleştirmiş ve karşılaştırmıştır. Karşılaştırılan rotor topolojileri; yüzeye montajlı mıknatıslı, düz şekilli gömülü mıknatıslı ve V şekilli gömülü mıknatıslı yapılarıdır. Tasarımlar malzeme maliyetleri dikkate alınarak optimize edilmiştir. Çekiş uygulamaları için GSM motorları popüler olsa da YMSM motorlarının ciddi bir alternatif olacağı görülmüştür [16].

Husain ve Lee, 2019 yılında yaptıkları çalışmada yüksek hızlı çekiş uygulamaları için farklı mıknatıs konfigürasyonlarına sahip GSM rotorları tasarımları incelenmiştir. Çalışma kapsamında aynı stator ile tasarımı gerçekleştirilmiş; V şekilli, çift katlı V şekilli ve U şekilli mıknatıslı rotora sahip motorlar performans karakteristikleri bakımından karşılaştırılmıştır. V şekilli mıknatıslı rotor yapısı düşük mıknatıs kullanımı ve en iyi performansa sahiptir. Ancak bu yapı ile çift katlı V şekilli mıknatıslı rotor yapısı karşılaştırıldığında yüksek hızlarda daha düşük verim ve elektromotor kuvvet değerine sahip olduğu görülmüştür. U şekilli mıknatıslı rotor yapısının performansı ise bu iki yapı arasında elde edilmiştir. Genel olarak çift katlı V şekilli mıknatıslı rotor yapısı yüksek verime sahip olsa da kayıplarının da yüksek olması sebebiyle soğutma sistemi gerektirdiği belirtilmiştir [17].

Vascan ve diğerleri, 2019 yılında yaptıkları çalışmada bir ısıtma, havalandırma ve klima sistemi için farklı rotor topolojisine sahip SMSM'leri karşılaştırmalı bir şekilde analiz etmişlerdir. Bu rotor topolojileri yüzeye montajlı sürekli mıknatıslı, dikey gömülü mıknatıslı (spoke), düz şekilli GSMSM ve V şekilli GSMSM yapılarıdır. Tüm yapılar için stator boyutları, sargı yapısı ve sürekli mıknatıs hacmi aynıdır. Motorlar; elektromanyetik moment, kayıplar, verim ve maliyetleri bakımından karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, en iyi verim için GSM topolojisi öne çıkarken, düşük vuruş momenti, moment dalgalılığı ve ağırlık bakımından YMSM'in avantajlı olduğu belirtilmiştir [18].

A.H.Levent, A.Lordoğlu ve M.G. Aydeniz, 2020 yılında yaptıkları çalışmada elektrikli araç uygulamaları için 50 kW gücünde SMSM tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Tasarım limitleri ve elektrikli araç isterleri belirlenerek makine boyutları hesaplanmıştır. Sonlu Elemanlar yöntemi tabanlı motor tasarım programı ile motorun elektromanyetik ve çalışma performansı incelenmiştir. Bu çalışmada temel olarak mıknatısların boyut ve konumlarının uzay harmonikleri üzerindeki etkisi, hava boşluğu akı yoğunluklarının radyal bileşenleri karşılaştırılarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, mıknatıs optimizasyonunun manyetik performans, hava boşluğu akı yoğunluğu dağılımının radyal bileşeni ve moment dalgalanması üzerinde olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür. Mıknatıs boyut ve konumu optimize edilen motorda, moment dalgalanmasının %46'dan %16'ya kadar düştüğü gözlemlenmiştir [19].

Zhao ve diğerleri, 2020 yılında yaptıkları çalışma SMSM verim ve moment performansını aynı anda optimize edebilmek adına genetik algoritma tabanlı çok amaçlı bir optimizasyon tasarım yöntemi sunmuşlardır. Bu yöntem motor-cad aracılığıyla oluşturulmuş olup, stator iç ve dış çapları, hava boşluğu uzunluğu, oluk boyutu, çekirdek uzunluğu parametreleri değişkenler olarak kullanılmışlardır. Çok amaçlı bu optimizasyon yöntemi ağırlık katsayısı yöntemi ile tek amaçlı optimizasyon yöntemine dönüştürülerek basitleştirilmiştir. Çalışmada, 18 oluk, 6 kutuplu 6 kW gücündeki yüzey montajlı SMSM üzerinde sunulan optimizasyon yöntemi uygulanmıştır. Sunulan bu yöntemde optimize edilen parametreler aynı anda motor-cad kullanılarak modellenerek simüle edilmektedir. Elektromanyetik performans verileri ve eğrileri çıkartılarak motor optimizasyonunun sonuçları doğrulanmaktadır. Gerçekleştirilen optimizasyon sonrası motor hacmi çok değişmese de moment ve moment yoğunluğunda artış gözlemlenmiştir. Ayrıca moment dalgalılığı da azalmıştır. Sonuç olarak yapılan çalışmada, genetik algoritma tabanlı optimizasyon yönteminin hızlı çözüm hızı ve doğru optimizasyon avantajlarına sahip olduğu görülmüştür [20].

Murali ve diğerleri, 2020 yılında yaptıkları çalışmada EA'larda yaygın olarak kullanılan SMSM'lerin farklı rotor topolojilerinin tasarım ve karşılaştırılmasını gerçekleştirmişlerdir. 4 kutuplu, 2 kW gücünde, 150 0rpm hıza sahip yüzey montajlı SMSM, dikey gömülü mıknatıslı (spoke), GSMSM, U şekilli GSMSM, V şekilli GSMSM tasarımları Maxwell yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan

motorlar; hava aralığı akı yoğunluğu, vurutu momenti, verim gibi performans karakteristikleri bakımından karşılaştırılmıştır. Maxwell yazılımı ile elde edilen analiz sonuçlarına göre V şekilli GSMSM'nin diğer rotor topolojilerine göre daha iyi performansa sahip olduğu paylaşılmıştır [21].

Constantin ve diğerleri, 2021 yılında yaptıkları çalışmada elektrikli otobüsler için tasarlanmış 150kW gücünde sıvı soğutmalı GSMSM'nin farklı mıknatıs yerleşimine sahip iki farklı topolojisini karşılaştırmıştır. Rotordaki mıknatısların yerleşimi V ve ters üçgen yapısındadır. Bu iki topoloji; vurutu momenti, moment dalgalılığı, back-EMF, moment-hız karakteristikleri, kalıcı hal sıcaklıkları gibi pek çok açıdan analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda ters üçgen mıknatıs yerleşimine sahip GSMSM'in: %35 düşük vurutu momenti, %13,22 düşük faz akımı, %15,45 düşük maksimum moment için gereken faz akımı, %16,13 düşük maksimum stator sargı sıcaklığı gibi avantajlara sahip olması gibi sebeplerle elektrikli araç uygulamaları için daha uygun bir topoloji olduğu görülmüştür [22].

Balasubramanian ve diğerleri, 2022 yılında yaptıkları bu çalışmada GSMSM'lerin performanslarını etkileyen tasarım parametrelerini incelemiştir. Mıknatıs boyutu, motor çapı, kutup sayısı, stator oluk ölçüleri gibi parametrelerin moment, güç ve moment dalgalılığı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında iki farklı tasarım gerçekleştirilmiş ve bu tasarımlar optimize edilerek moment dalgalılıkları sırasıyla %32 ve %77 azaltılmıştır. Bununla birlikte farklı mıknatıs sınıflarının motor performansına etkisi analiz edilmiş ve malzeme maliyetiyle birlikte karşılaştırma yapılmıştır [23].

Li ve diğerleri, 2023 yılında yaptıkları bu çalışmada sonlu elemanlar analizine (SEA) alternatif olarak herhangi bir oluk/kutup kombinasyonuna sahip gömülü sürekli mıknatıslı (GSM) motorların performans karakteristiklerini tahmin etmek için hibrit analitik bir model önermiştir. İlgili motorların mıknatısları; V şekilli, U şekilli ve düz şekilli bir yapıda olabilir. Önerilen bu model, farklı rotor topolojilerine sahip GSM motorlarda hava aralığı manyetik alanını, elektromotor kuvvetini ve motor momentini hesaplamak için kullanılmıştır. Çalışma sonucunda; önerilen modelin, SEA ile karşılaştırıldığında GSM motorların performansını kabul edilebilir bir doğruluk ile hesaplayabildiği ve ön tasarım ile optimizasyon için kolaylık sağladığı görülmüştür. Hibrit model ile SEA arasındaki ortalama moment hata oranı %6; EMK genliği hata oranı ise %3 olarak elde edilmiştir [24].

Cheng ve diğerkleri, 2024 yılında yaptıkları bu çalışmada rotor topolojisi ve üretim belirsizlikleri dikkate alınarak elektrikli araçlar için GSM motorların tasarım ve optimizasyonlarını gerçekleştirmiştir. İlk olarak çalışma kapsamında farklı rotor topolojilerinin motor performanslarına etkisi incelenmiştir. V şekilli mıknatıslı rotor yapısının performans bakımından daha iyi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca rotor üretimlerinde ortaya çıkan belirsizliklerin önüne geçmek adına bir yöntem önerilmiş ve bu yöntem ile moment dalgalılığının azaldığı ve daha sağlam bir tasarım ortaya çıktığı deneysel testler ile gösterilmiştir [25].

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışma kapsamında,

- Hibrit elektrikli Prius 2004 aracının elektrik motoru hakkında yayın ve test çalışmaları incelenmiştir.
- İncelenen çalışmalar sonrası ilgili motor referans model olarak ele alınarak ANSYS Maxwell programında iki boyutlu modelleme ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.
- Referans model statoru aynı şekilde kullanılarak farklı rotor topolojilerine sahip GSMSM modelleme ve analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tasarımlardan elde edilen analiz sonuçlarına göre; moment, moment dalgalanması ve vuruuntu momenti gibi performans karakteristikleri bakımından karşılaştırılarak referans GSMSM'ye göre daha optimize bir motor ortaya konulması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

EA'da kullanılan elektrik motoru ile bu motor referans alınarak farklı rotor topolojilerinde GSMSM tasarımlarını karşılaştırmak amacıyla yapılan bu çalışmada, öncelikle EA'ların tarihçesi, literatürde EA'lar ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Çalışmanın diğerk aşamalarında da aşağıdaki adımlar izlenmiştir,

Bölüm 2'de EA'larda kullanılan elektrik motorları incelenmiş ve bu motorlar farklı özellikleri üzerinden karşılaştırılmıştır.

Bölüm 3'te SMSM'lerde kullanılan sürekli mıknatıslar ile bu mıknatısların özellikleri, çalışma koşulları, çalışma sıcaklıkları ve bu özellikleri etkileyen faktörler incelenmiştir. Bununla birlikte SMSM'lerin sınıflandırılması ve matematiksel modeli paylaşılmıştır.

Bölüm 4'te çalışma kapsamında referans olarak seçilen motorun genel özellikleri verilmiştir. Bununla birlikte referans GSMSM'nin ANSYS Maxwell programında modellemesi gerçekleştirilmiş ve performans analizi sonuçları paylaşılmıştır.

Bölüm 5'te V şekilli, düz şekilli ve U şekilli sürekli mıknatıslara sahip farklı rotor topolojilerinin belli parametrelere göre analizleri gerçekleştirilmiş ve uygun görülen parametreler seçilerek modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Ardından modellerin performans analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar ile grafikler paylaşılmıştır. Çalışma kapsamında analizi gerçekleştirilen tüm motorların karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 6'da çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve öneriler paylaşılmıştır.

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN ELEKTRİK MOTORLARI

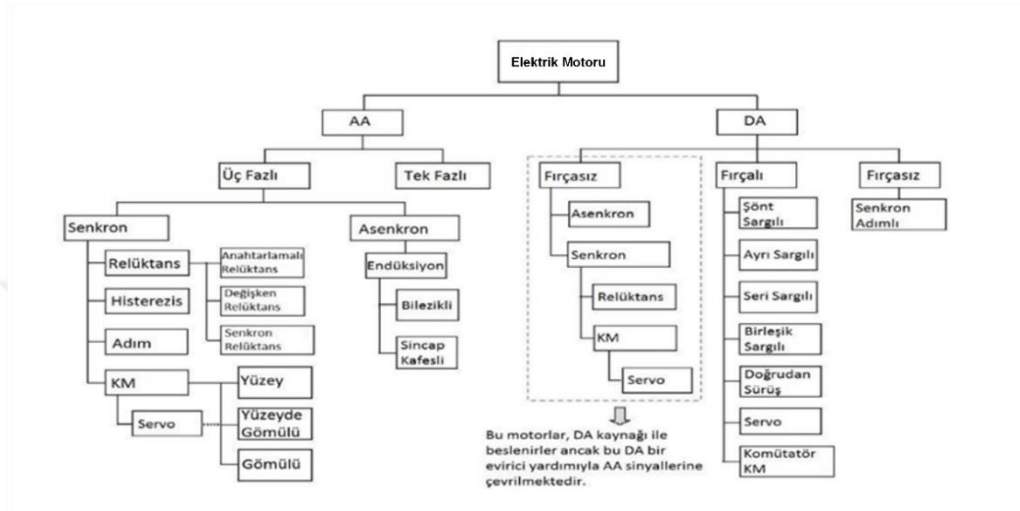
Elektrikli araçların çekiş sisteminde; batarya, batarya yönetim sistemi, elektrik motoru ve sürücüsü gibi birimler bulunmaktadır. Elektrik motorları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren makinalar olup, aracın hareketini sağlayan temel birimdir. Aynı zamanda elektrikli aracın frenlemesi durumunda da generatör gibi çalışarak bataryanın şarj olmasını sağlamaktadır. Geçmişten günümüze kadar elektrikli araçlarda kullanılan farklı topolojilere sahip elektrik motorları Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motor türleri [26, 27]

Araç Markası	Modeli	Motor Türü
Honda	EV Plus	DA Motoru
Fiat	Panda Elettra	DA Motoru
Toyota	Prius	SMSM
Chevrolet	Bolt	SMSM
Hyundai	Sonata	SMSM
Jaguar	I-Pace	SMSM
Tesla	Model 3	SMSM
Tesla	Roadster	ASM
BMW	X5	ASM
Ford	Focus Electric	ASM
Mercedes	EQC	ASM
Audi	E-Tron	ASM
Holden	Ecommadore	ARM
Lucas	Chloride	ARM

2.1 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Elektrik Motorlarının Sınıflandırılması

Elektrik motorları, elektrik gücü kaynağına göre alternatif akım (AA) ve doğru akım (DA) motorları olarak sınıflandırılabilir. Elektrik motorları ile ilgili sınıflandırma görseli Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 Elektrik motorlarının sınıflandırılması

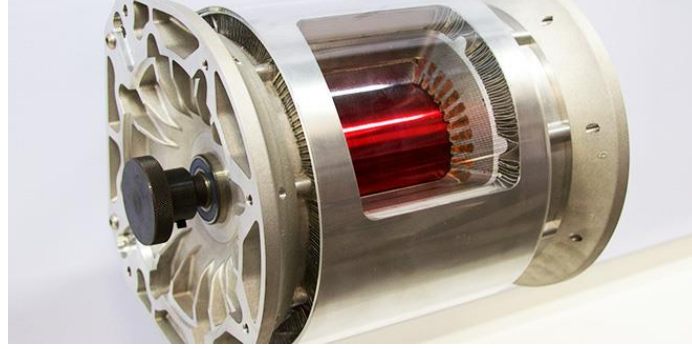
2.1.1 Fırçalı DA Motoru

Fırçalı DA motoru; kolay kontrol edilebilirliği, düşük üretim maliyeti, moment-hız karakteristiğinin çekiş sistemleri için uygun olması bakımından geçmişte EA’larda kullanılmıştır. Ancak fırça ve komütatörlerin kullanımı sebebiyle bakım gereksiniminin fazla olması ve maksimum hızın sınırlanması, düşük verim ve düşük güvenilirlik gibi dezavantajları sebebiyle günümüzde EA’larda çekiş motoru olarak tercih edilmemektedir [26], [27].

2.1.2 Asenkron Motor

Asenkron motor, statordaki dönen manyetik alanın rotorda bulunan kısa devre çubuklarda gerilim endükleme prensibi ile çalışan elektrik motorudur. Asenkron motor; basit yapısı, sağlamlığı, düşük bakım gereksinimi ve mıknatıs bulunmamasında kaynaklı düşük maliyeti gibi avantajlarla EA’larda yaygın olarak kullanılmaktadır. Avantajlarının yanında rotorunda meydana gelen bakır kayıplarının fazla olması sebebiyle düşük verim ve düşük güç faktörüne sahiptir.

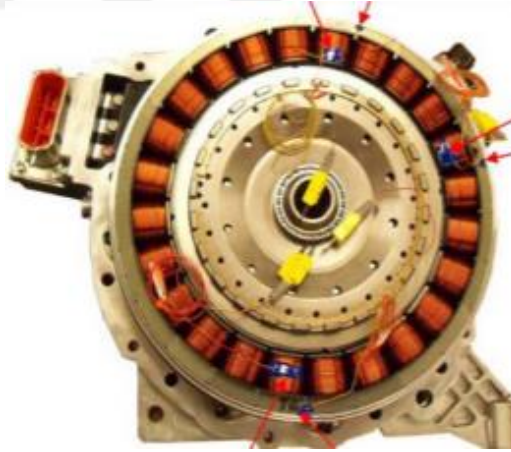
Asenkron motorun rotorunda meydana gelen bu kayıplar sebebiyle soğutma sistemi ihtiyacı da ortaya çıkmaktadır [26], [27].



Şekil 2.2 Tesla Roadster asenkron motoru

2.1.3 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

Sürekli mıknatısların ve sürücü teknolojisinin gelişmesiyle birlikte SMSM'lerden yüksek performans ve verim elde edilmeye başlanmıştır. Seri üretimi gerçekleştirilen pek çok elektrikli araçta SMSM kullanılmaktadır. Nadir element içeren sürekli mıknatısların kullanımı sayesinde daha küçük hacimlerden yüksek moment ile güç ve yüksek verim sağlanabilmektedir [26], [27].



Şekil 2.3 Hyundai Sonata SMSM



Şekil 2.4 Nissan Leaf SMSM

2.1.4 Anahtarlama Relüktans Motoru

Anahtarlama relüktans motorunun rotorunda sürekli mıknatıs veya sargı yer almaz. Bu sebeple üretimi kolay ve maliyeti düşüktür. Ancak bu avantajlarının yanında; sadece relüktans momentine sahip olması sebebiyle moment yoğunluğunun düşük olması, yüksek moment dalgalanması ve yüksek gürültü gibi dezavantajları bulunmaktadır [26], [27].

2.1.5 Senkron Relüktans Motoru

Senkron relüktans motoru, relüktans değişimine dayalı relüktans momenti üretmektedir. Düşük maliyeti ve kabul edilebilir düzeydeki moment yoğunluğu sebebiyle elektrikli araçlarda kullanılmaya uygun olarak değerlendirilebilir. Ancak sürekli mıknatıslı motorlara göre performans ve verimleri düşüktür [26], [27].

Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarına ilişkin karşılaştırma tablosu Tablo 2.2’de verilmiştir. Tablo 2.2’de “+” işareti avantaj, “-” işareti dezavantaj ve “0” rakamı ise nötr anlamına gelmektedir.

Tablo 2.2 Elektrik araçlarda kullanılan elektrik motorları karşılaştırması [28]

Özellik	Motor Türü				
	DA	ASM	SMSM	ARM	SRM
Moment/Güç Yoğunluğu	-	0	++	0	0
Verim	-	+	++	+	+

Tablo 2.2 Elektrik araçlarda kullanılan elektrik motorları karşılaştırması (devamı)

Moment Dalgalılığı/ Gürültü	-	++	++	-	-
Maliyet	0	++	-	+	++
Dayanıklılık	0	++	+	++	++
Üretilbilirlik	++	++	0	++	++
Aşırı Yük Kapasitesi	-	+	+	+	++
Güvenilirlik	-	++	++	++	+
Kontrol Kolaylığı	++	+	+	0	+
Hacim/ Boyut/ Ağırlık	-	+	++	+	+
Servis Ömrü	-	++	+	++	++

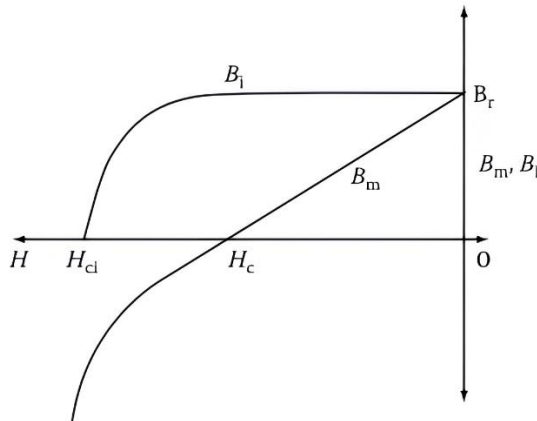
3

SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON MOTORLAR

1950’lerde elektrikli makinalarda yüksek enerji yoğunluğuna sahip sürekli mıknatısların kullanılmaya başlamasıyla, bu konudaki çalışmalar hız kazanmıştır. Sürekli mıknatısların geliştirilmesiyle birlikte sürekli mıknatıslı senkron makinaların performansı ve kullanımı yaygınlaşmıştır [29]. Sürekli mıknatısların kullanıldığı elektrik makinalarında; harici bir uyarma sargısı, fırça ve bilezik gibi yapılar kullanılmamaktadır. Bu yapıların kullanılmaması sonucunda da mekanik bakım gereksinimleri, uyarma sargısı kayıpları ve bu kayıplara bağlı olarak oluşan termal kısıtlamalar ortadan kalkmaktadır. Bu sebeplerle de sürekli mıknatıslı makinalarda aynı hacimde daha yüksek güçler elde edilebilmektedir.

3.1 Sürekli Mıknatıslar

Manyetik malzemeler, yumuşak manyetik malzemeler ve sert manyetik malzemeler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Yumuşak manyetik malzemeler, üzerinde manyetik uyarı olduğu sürece mıknatıs özelliği gösteren; bu uyarı ortadan kalktığında mıknatıs özelliğini yitiren malzemelerdir. Sert manyetik malzemeler ise üzerindeki manyetik uyarı ortadan kalksa dahi mıknatıs özelliğini korurlar. Sürekli mıknatıslar, sert manyetik malzemeler sınıfındadır. Sürekli mıknatısları manyetize ve demanyetize etmek oldukça zordur. Sürekli mıknatıslar, herhangi bir uyarma alanı veya manyetomotor kuvvet olmadan manyetik alan üretebilirler [30].



Şekil 3.1 Sürekli mıknatısa ait B-H eğrisi ve demanyetizasyon karakteristiği [29]

Şekil 3.1’de sürekli mıknatısa ait B-H eğrisi ve demanyetizasyon karakteristiği verilmiştir. B-H eğrisinde yer alan ve sürekli mıknatısın karakteristiğini ortaya koyan parametreler aşağıda tanımlanmıştır [30].

- B_{sat} ve H_{sat} , sırasıyla sürekli mıknatısın manyetik akı yoğunluğu doyum noktası ve bu akı yoğunluğuna karşılık gelen manyetik alan şiddetidir.
- Kalıcı manyetik akı yoğunluğu (B_r), manyetik alan şiddetinin sıfır olduğu durumda sürekli mıknatıs üzerinde mevcut olan manyetik akı yoğunluğudur. Bu noktada, sürekli mıknatısın manyetik iletkenlik katsayısı sonsuzdur. B_r değeri ne kadar büyük olursa hava aralığı manyetik akı yoğunluğu da o kadar yüksek olur.
- Zorlayıcı alan şiddeti (H_c), bir sürekli mıknatısın B_r değerini sıfırlayacak ters yönlü bir manyetik alan uygulandığında oluşan manyetik alan şiddetidir. Bu noktada, sürekli mıknatısın manyetik iletkenlik katsayısı sıfırdır. H_c değeri ne kadar yüksek olursa, sürekli mıknatısın karşıt bir manyetik alana karşı demanyetizasyon direnci o kadar artar.
- Yapısal manyetizasyon eğrisi, $B_i = f(H)$ histerezis döngüsünün bir bölümüdür. Şekil 3.1’deki yapısal manyetizasyon eğrisi Eşitlik (3.1) ile ifade edilir.

$$B_i = B - \mu_0 \cdot H \quad (3.1)$$

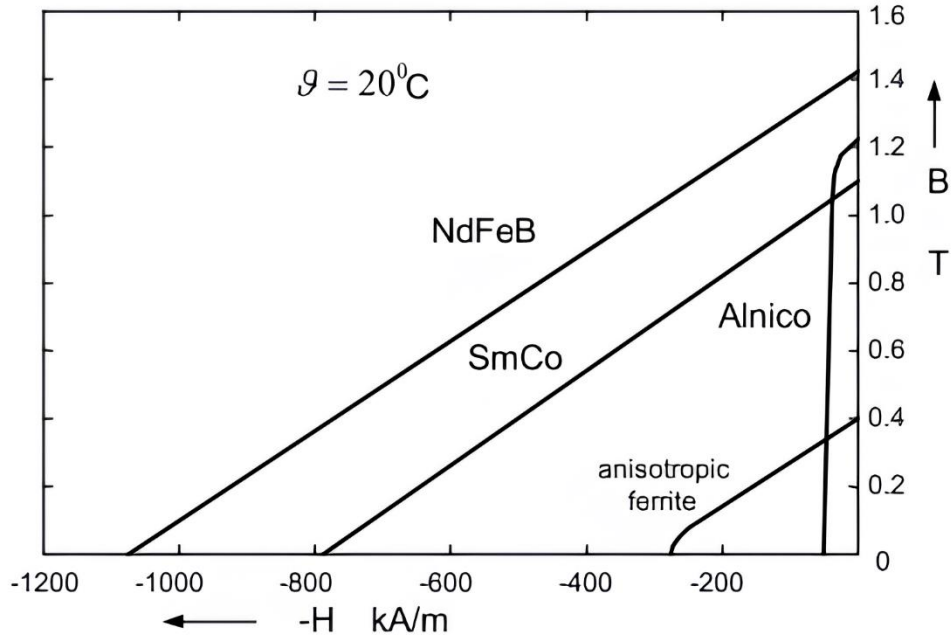
Eşitlik (1.1)’e göre $H=0$ olduğunda $B_i=B_r$ ’dir.

- Yapısal zorlayıcılık (H_{ci}), sürekli mıknatısın $B_i = f(H)$ eğrisi ile tanımlanan yapısal akı yoğunluğu (B_i) değerini sıfıra indirmek yani sürekli mıknatısı tamamen demanyetize etmek için gereken manyetik alan şiddetidir. Sürekli mıknatıslarda $H_{ci} > H_c$ ’dir.

Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda kullanılan sürekli mıknatıslar yapılarında bulunan temel bileşenlere göre verilmiştir;

- Alüminyum (Al), Nikel (Ni) ve Kobalt (Co) elementlerinden oluşan AlNiCo mıknatıslar,
- Demir-Oksit, Baryum (Ba) ve Stronsiyum’dan (Sr) oluşan Ferrit mıknatıslar,
- Nadir toprak elementleri içeren Samaryum (Sm), Kobalt (Co), Neodim (Nd) ve Bor’dan (B) oluşan SmCo ve NdFeB mıknatıslar.

Bu mıknatıslara ait B-H eğrisi ve demanyetizasyon karakteristiği Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Farklı sürekli mıknatıslara ait B-H eğrisi ve demanyetizasyon karakteristiği [30]

AlNiCo mıknatıslar, sürekli mıknatıslar arasında ilk olarak geliştirilenlerdendir. Bu mıknatısların temel avantajları, yüksek kalıcı manyetik akı yoğunluğu (1,2 T) ve düşük sıcaklık katsayısıdır. AlNiCo mıknatısların maksimum çalışma sıcaklığı 520°C ve Curie sıcaklığı 900°C 'dir. Bu avantajları sayesinde yüksek sıcaklıklarda bile hava aralığında yüksek bir manyetik akı yoğunluğuna olanak sağlar. Avantajlarının yanında, zorlayıcı manyetik alan şiddeti değeri çok düşüktür (50 kA/m) ve demanyetizasyon eğrisi doğrusal değildir. Bu sebeple AlNiCo mıknatısların manyetize ve demanyetize olmaları çok kolaydır. AlNiCo mıknatıslar; 1940'lar ile Ferrit mıknatısların yaygınlaştığı 1960'ların sonları arasında çeşitli güç seviyelerinde sürekli mıknatıslı uygulamalarında kullanılmıştır. AlNiCo mıknatısların, hacim başına maksimum enerji miktarı $(BH)_{\text{max}} 45\text{ kJ/m}^3$ civarında olup mekanik olarak sert ve kırılgandırlar [30].

Ferrit mıknatıslar, 1950'lerde geliştirilmiştir. AlNiCo mıknatıslara göre daha yüksek zorlayıcı manyetik alan şiddetine (250 kA/m) sahip olmakla birlikte, daha düşük kalıcı manyetik akı yoğunluğuna ($0,45\text{ T}$) sahiptir. Sıcaklık katsayıları da

nispeten yüksek olan bu mıknatısların, maksimum çalışma sıcaklığı 400 °C ve Curie sıcaklığı 450 °C'dir. Ferrit mıknatısların en önemli avantajları düşük maliyeti ve yüksek elektrik dirençleridir. Ferrit mıknatıslar otomobillerdeki küçük DA motorlarında (fan, cam sileceği, pompa vb.) yaygın olarak kullanılmaktadır. Ferrit mıknatısların, hacim başına maksimum enerji miktarı $(BH)_{\max}$ 30 kJ/m³ civarındadır. Mekanik olarak sert ve kırılğan bir yapıya sahip olsalar da korozyona karşı dirençlidirler [30].

Son yıllarda, nadir toprak elementi mıknatısların geliştirilmesiyle birlikte enerji yoğunluğu $(BH)_{\max}$ konusunda ciddi ilerleme kaydedilmiştir. Bu gelişmelerin sonucunda elektrik makinalarında mıknatısların kullanımı konusunda daha fazla önem kazanmıştır. SmCo mıknatıslar, yüksek kalıcı manyetik akı yoğunluğu (1-1,12 T) yüksek zorlayıcı manyetik alan şiddetine (600-730 kA/m), yüksek enerji yoğunluğuna (200 kJ/m³), lineer demanyetizasyon eğrisine ve düşük sıcaklık katsayısına sahiptir. Bu mıknatısların maksimum çalışma sıcaklığı 350 °C ve Curie sıcaklığı 800 °C'dir. Düşük hacimli ve yüksek güç yoğunluğu istenen uygulamalar kullanımı uygundur. Tek dezavantajı yüksek maliyetidir.

SmCo mıknatısların ardından daha uygun maliyetli Neodim (Nd) bazlı nadir toprak elementi mıknatısların geliştirilmesi, ham madde maliyetlerinin düşürülmesi konusunda önemli bir adım olmuştur. NdFeB mıknatıslar, sadece oda sıcaklığı koşullarında SmCo mıknatıslara göre daha iyi manyetik özelliklere sahiptir. Demanyetizasyon eğrisi ve zorlayıcı manyetik alan şiddeti değeri, sıcaklık ile değişebilmektedir. NdFeB mıknatıslar; yüksek kalıcı manyetik akı yoğunluğu (1,35 T), yüksek zorlayıcı manyetik alan şiddeti (1050 kA/m) ve yüksek enerji yoğunluğu (325 kJ/m³) gibi özellikleri ile dikkat çekmektedir. Bu mıknatısların maksimum çalışma sıcaklığı 250 °C ve Curie sıcaklığı 350 °C'dir. Korozyona karşı hassas olan bu mıknatıslar, performans-maliyet oranını ciddi anlamda iyileştirmek için büyük potansiyele sahiptir [30].

3.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Sınıflandırılması

Senkron motorlar, dönen elektrik makinalarda da olduğu gibi iki temel kısımdan oluşur. Bu kısımlardan sabit olan stator, diğer hareketli parça ise rotor olarak adlandırılır. Alternatif akım ile beslenecek olan sargılar farklı teknikler ile stator üzerine yerleştirilir. Elektromanyetik momentin endüklenebilmesi, statorda üretilen

akı ve rotor üzerinde doğru akımla beslenen uyarma sargıları tarafından üretilen akı arasındaki bağlantıya bağlıdır. Rotorda bulunan uyarma sargıları yerine sürekli mıknatısların kullanılması ile uyarma akısının mıknatıs tarafından oluşturulur ve bu şekilde sürekli mıknatıslı senkron motor oluşur. Uyarma sargıları yerine mıknatıs kullanılması çalışma, bakım ve onarım bakımında oldukça faydalıdır. Ayrıca uyarma sargıları yerine mıknatıs kullanılması sargı kayıplarını azaltır ve bu durum motorun güç ile verim yoğunluğunun artmasını sağlar. Sürekli mıknatıslı senkron motorlar; rotorun yerleşimi, mıknatısların konumu ve akı yolu gibi farklı şekillerde sınıflandırılabilir.

Rotor yerleşimine göre;

- İç rotorlu SMSM
- Dış Rotorlu SMSM

Mıknatıs konumuna göre;

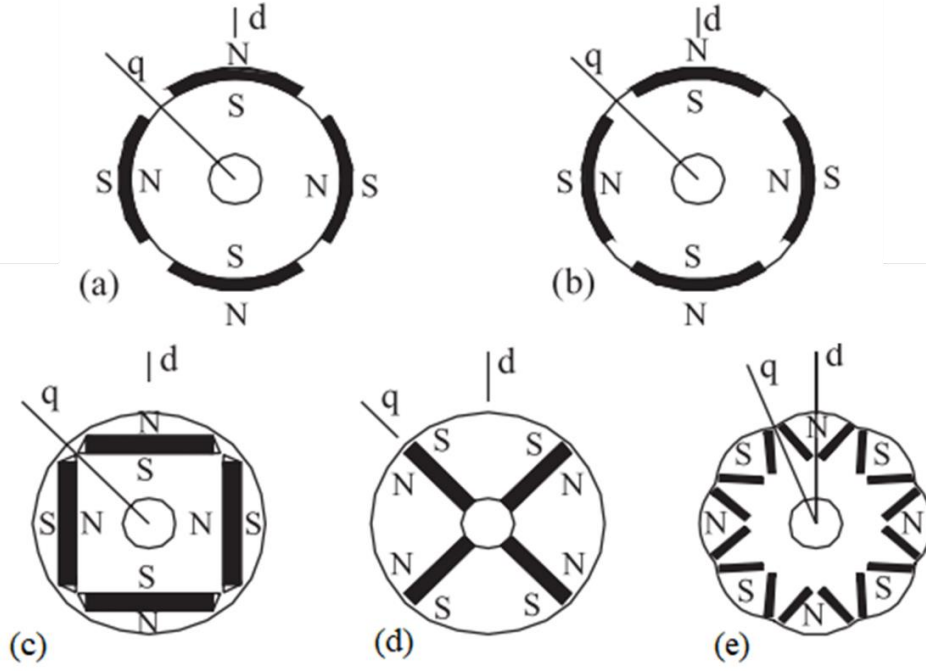
- Dış Yüzeye Yapıştırılmalı SMSM
- İç Yüzeye Yapıştırılmalı SMSM
- Gömülü SMSM

Akı yoluna göre;

- Radyal Akılı
- Eksenel Akılı

Olarak sınıflandırılabilir.

Şekil 3.3'te mıknatıs konumuna göre sınıflandırılmış sürekli mıknatıslı senkron motor yapıları verilmiştir [31].



Şekil 3.3 Mıknatıs konumuna göre SMSM çeşitleri a) Dış yüzeye yapıştırmalı SMSM b) İç yüzeye yapıştırmalı SMSM c,d,e) Farklı yapıdaki GSMSM

Şekil 3.3 (a)'da mıknatısların kuvvetli yapıştırıcılar ile rotorun dış yüzeyine yapıştırıldığı “Dış Yüzeye Yapıştırmalı SMSM” yapısı verilmiştir. Bu SMSM’lerde hava aralığı akı yoğunluğu yüksektir. Kullanılan sürekli mıknatısın bağıl manyetik geçirgenliğinin hava aralığı ile yakın değerde olması sebebiyle d ve q eksen endüktansları eşit kabul edilir ve rotor pozisyonuna göre değişmez. Endüktansların eşit olması kabul edilmesi sebebiyle relüktans momenti üretilemez. Üretimi kolay ve ucuz olması sebebiyle yaygın olarak kullanılsa da yüksek hızlı uygulamalar için uygun değildir.

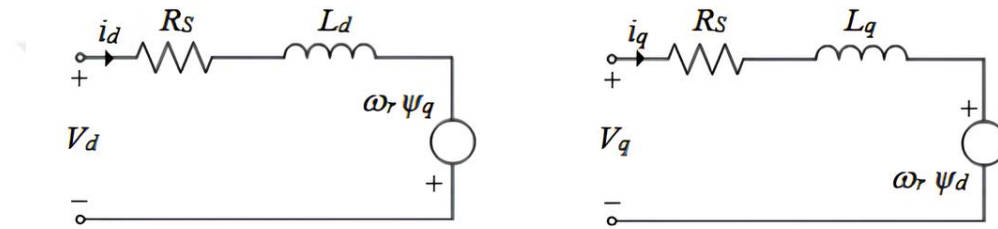
Şekil 3.3 (b)’de rotorun iç yüzeyine sabitlenen mıknatısların dış yüzeyleri hava aralığına açık olacak şekilde düzenlendiği “İç Yüzeye Yapıştırmalı SMSM” yapısı verilmiştir. Bu yapıda düzgün bir hava aralığı elde edilir. Bu yapının, dış yüzeye yapıştırmalı SMSM yapısına göre mekanik dayanıklılığı daha yüksektir. Ayrıca d ve q eksenleri endüktansları farklılık gösterir.

Şekil 3.3 (c), (d) ve (e)’de farklı mıknatıs yerleşimlerine sahip gömülü SMSM yapıları verilmiştir. Bu yapılarda mıknatıslar, rotor içerisine yerleştirilirler. Gömülü SMSM yapılarında d ve q eksen endüktansları arasında fark mevcuttur ve bu

sebeple relüktans momenti üretirler. Böylece sabit güç bölgesinde alan zayıflatma yöntemi ile kontrole uygundur. Ayrıca mıknatısların rotora gömülü olması sebebiyle mekanik olarak oldukça dayanıklı ve yüksek hızlı uygulamalarda kullanılmaya uygundur [30].

3.3 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Moment İfadesi

SMSM'lerin sınıflandırılmasının ardından elektriksel eşdeğer devre ve matematiksel model oluşturularak SMSM'lerin moment ifadesi çıkarılacaktır. SMSM'nin d-q eksen takımına ait eşdeğer devresi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4 SMSM d-q eksen eşdeğer devresi

Şekil 3.44'te verilen eşdeğer devre üzerinden Eşitlik (3.2) ve Eşitlik (3.3) yazılabilir:

$$V_d = R_s \cdot I_d \cdot \frac{d}{dt} \cdot \Psi_d - \omega_r \cdot \Psi_q \quad (3.2)$$

$$V_q = R_s \cdot I_q \cdot \frac{d}{dt} \cdot \Psi_q + \omega_r \cdot \Psi_d \quad (3.3)$$

Eşitlik (3.2) ve Eşitlik (3.3)'te verilen V_d , d eksen gerilimini; V_q , q eksen gerilimini; I_d ve I_q , d ve q eksen akımlarını; Ψ_d ve Ψ_q , d ve q eksen akılarını; ω_r ve ω_s , sırasıyla rotor elektriksel açısal hızı ve stator akımları açısal hızını temsil etmektedir.

Ψ_d ve Ψ_q , d ve q eksen akılarını oluşturan ifadeler Eşitlik (3.4) ve Eşitlik (3.5)'te verilmiştir.

$$\Psi_d = L_d \cdot I_d + \Psi_m \quad (3.4)$$

$$\Psi_q = L_q \cdot I_q \quad (3.5)$$

Eşitlik (3.4) ve Eşitlik (3.5)'te yer alan L_d ve L_q , d ve q eksenli endüktanslarını; Ψ_m , mıknatıs akısını temsil etmektedir. Böylece Eşitlik (3.4) ve Eşitlik (3.5)'te elde edilen akı ifadeleri ile Eşitlik (3.6) ve Eşitlik (3.7) yazılabilir.

$$V_d = R_s \cdot I_d + L_d \cdot \frac{d}{dt} \cdot I_d - \omega_r \cdot L_q \cdot I_q \quad (3.6)$$

$$V_q = R_s \cdot I_q + L_q \cdot \frac{d}{dt} \cdot I_q + \omega_r \cdot L_d \cdot I_d + \omega_r \cdot \Psi_m \quad (3.7)$$

Elektriksel güç ifadesi Eşitlik (3.8)'de verilmiştir.

$$P_e = \frac{3}{2} \cdot (E_q \cdot I_q + E_d \cdot I_d) \quad (3.8)$$

Eşitlik (3.8)'de verilen E_q ve E_d gerilimleri, d ve q eksenli iç gerilimleridir. Eşdeğer devrede de görüldüğü gibi sırasıyla $\omega_s \cdot \Psi_d$ ve $\omega_s \cdot \Psi_q$ değerlerine eşittirler. Bu değerler Eşitlik (3.8)'e yazılarak Eşitlik (3.9) elde edilir.

$$P_e = \frac{3}{2} \cdot (\omega_s \cdot \Psi_d \cdot I_q + \omega_s \cdot \Psi_q \cdot I_d) \quad (3.9)$$

Endüklenen moment ifadesi Eşitlik (3.10)'da verilmiştir.

$$T_e = P_e \cdot \omega_m = P_e \cdot \frac{\omega_s}{p} \quad (3.10)$$

$$T_e = \frac{3p}{2} \cdot (\Psi_d \cdot I_q + \Psi_q \cdot I_d) \quad (3.11)$$

Eşitlik (3.4) ve Eşitlik (3.5)'te verilen Ψ_d ve Ψ_q eksen akıları Eşitlik (3.11)'de yerine yazılırsa endüklenen moment ifadesinin son hali Eşitlik (3.12)'deki gibi bulunur.

$$T_e = \frac{3p}{2} \cdot (\Psi_m \cdot I_q + I_d \cdot I_q \cdot (L_d - L_q)) \quad (3.12)$$

Eşitlik (3.12)'de görüldüğü gibi endüklenen moment ifadesinde iki bileşen bulunmaktadır. İlk bileşen, uyarma alanı ve mıknatıs etkileşiminden meydana gelen momenttir. Diğer bileşen ise d-q eksenlerinin relüktans farkından meydana gelen relüktans momentidir.

REFERANS SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON MOTORUN MODELLENMESİ

Elektrikli araçlar; yüksek moment yoğunluğu, yüksek güç faktörü, yüksek verim, yüksek hızlarda sabit güç aralığının geniş olması, yüksek hızlarda moment kapasitesinin yüksek olması, maksimum hızın yüksek olması gibi performans gereksinimlerine sahiptir. Aynı zamanda bu uygulamalarda kullanılan motorlar da küçük boyut, düşük ağırlık, düşük maliyet, yüksek güvenilirlik gibi özelliklere sahip olmalıdır. Bu sebeplerle EA’larda çoğunlukla SMSM’ler tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında, seri üretime geçmiş ve satış rakamları yüksek olan Toyota Prius modelinde bulunan 50 kW gücünde 8 kutuplu GSMSM referans olarak tercih edilmiştir. Referans GSMSM ile ilgili olarak literatürde farklı modelleme ve test çalışmaları mevcuttur. Bu motora ait genel bilgiler Tablo 4.1’de verilmiştir [34],[35].

Tablo 4.1 Referans GSMSM özellikleri

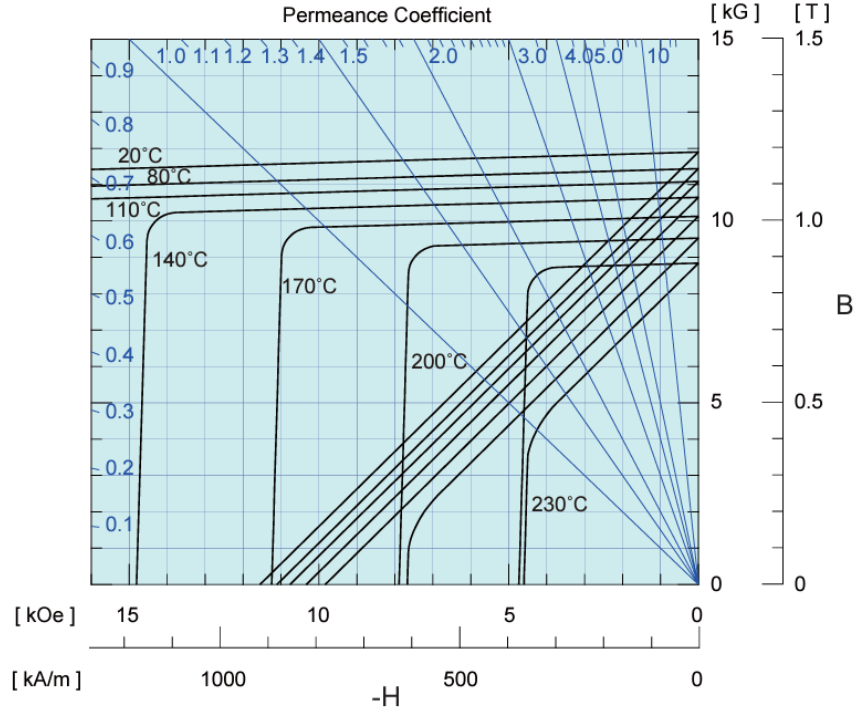
Maksimum motor gücü	50 kW
Maksimum moment	400 Nm
Nominal hız	1200 rpm
Stator dış çapı	269.24 mm
Stator iç çapı	161.9 mm
Stator oluk sayısı	48
Rotor dış çapı	160.4 mm
Rotor iç çapı	110.64 mm
Kutup sayısı	8
Eksenel uzunluk	83.82 mm

Modellenmesi gerçekleştirilen referans GSMSM, stator oluk sayısı 48’dir. Stator ve rotor manyetik malzemesi M19-29G elektriksel çeliktir. Manyetik malzemeye ait B-H karakteristiği Tablo 4.2’de verilmiştir. Referans GSMSM’de sürekli mıknatıs NdFeB N36Z’dir. Sürekli mıknatısa ait B-H karakteristiği ve demantizasyon eğrisi Şekil 4.1’de verilmiştir. Bununla birlikte stator

iletkenlerinde, iletken malzeme olarak bakır kullanılmıştır [34]. Stator iç çapı 161.9 mm ve rotor dış çapı 160.4 mm'dir. Bu değerlere göre hava aralığı 0.75 mm'dir.

Tablo 4.2 M19-29G Elektriksel çelik B-H karakteristiği [34]

B (T) 50 Hz	H (A/m) 50 Hz	W/kg 50 Hz	W/kg 100 Hz	W/kg 200 Hz	W/kg 400 Hz	W/kg 1000 Hz
0,1	25,5	0,03	0.04	0.09	0.21	0.99
0,2	34,5	0,07	0.16	0.37	0.92	3.67
0,3	40,6	0,13	0.34	0.79	1.99	7.63
0,4	46,3	0,22	0.55	1.31	3.33	12.7
0,5	60,2	0,31	0.8	1.91	4.94	18.9
0,6	71,4	0,43	1.08	2.61	6.84	26.4
0,7	83,2	0,54	1.38	3.39	9	35.4
0,8	98,7	0,68	1.73	4.26	11.4	46
0,9	124,8	0,83	2.1	5.23	14.2	58.4
1	159,15	1,01	2.51	6.3	17.3	73
1,1	241,5	1,2	2.98	7.51	20.9	90.1
1,2	318,3	1,42	3.51	8.88	24.9	-
1,3	636,61	1,7	4.15	10.5	29.5	-
1,4	1592	2,12	4.97	12.5	35.4	-
1,5	3183	2,47	5.92	14.9	41.8	-
1,6	6366	2,8	-	-	-	-
1,7	7957	3,05	-	-	-	-
1,8	15915	3,25	-	-	-	-



Şekil 4.1 NdFeB N36Z sürekli mıknatıs B-H karakteristiği ve demanyetizasyon eğrisi [36]

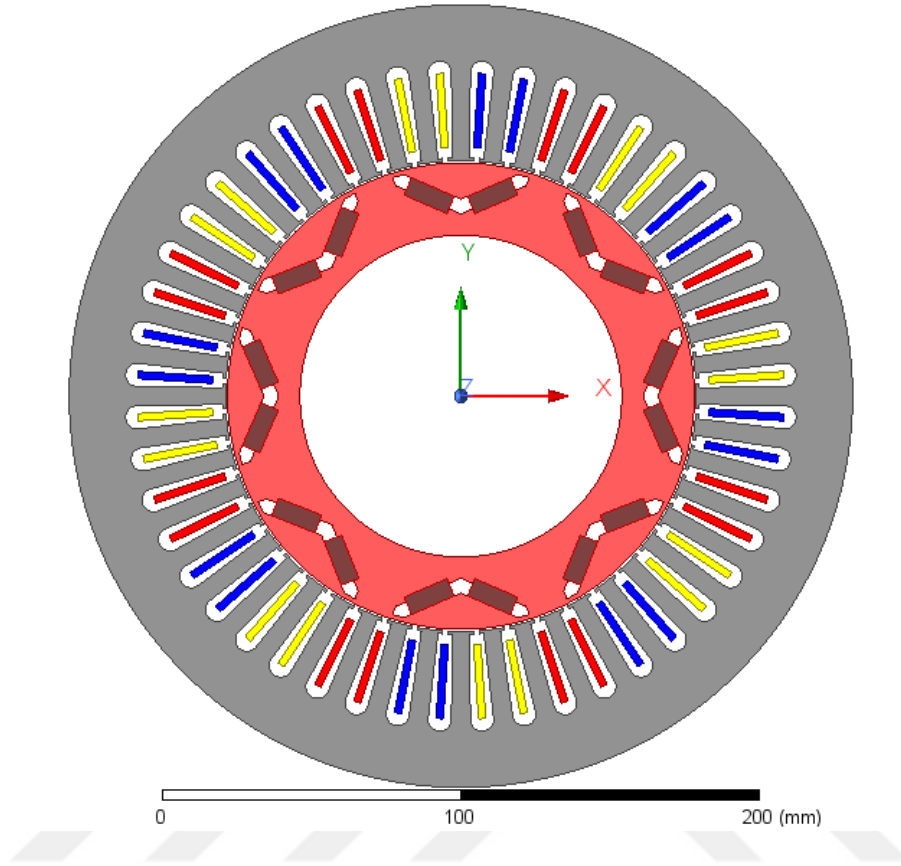
Referans GSMSM'nin kutup sayının 8 ve stator oluk sayısının 48 olması sebebiyle kutup başına düşen oluk sayısı 6'dır. Stator sargı yapısı, her bir fazda seri bağlı 8 bobin ve her bir bobinde de 9 sarım şeklindedir. Her bir sarımda, kalınlığı AWG 19 olan 13 adet tel bulunmaktadır. Oluk doluluk oranı %45 seviyelerindedir.

Referans GSMSM'nin stator oluk ölçüleri ve sürekli mıknatıs ölçüleri Tablo 4.3'te verilmiştir [34].

Tablo 4.3 Referans GSMSM stator oluk ve sürekli mıknatıs ölçüleri

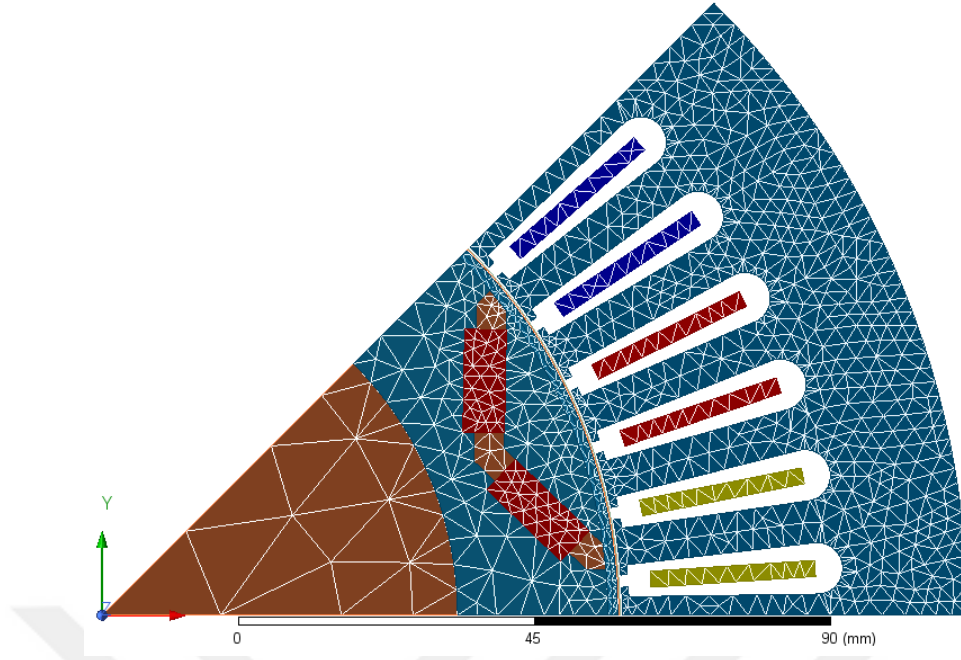
Oluk ağzı yüksekliği	1,3 mm
Oluk ağzı genişliği	2,11 mm
Oluk derinliği	29,7 mm
Oluk genişliği	5,65 mm
Mıknatıs kalınlığı	6,48 mm
Mıknatıs genişliği	32 mm
Kutuplar arası uzaklık	14 mm
Mıknatısların rotor iç çapına uzaklığı	7,3 mm

Referans GSMSM modeli Şekil 4.2’de verilmiştir.



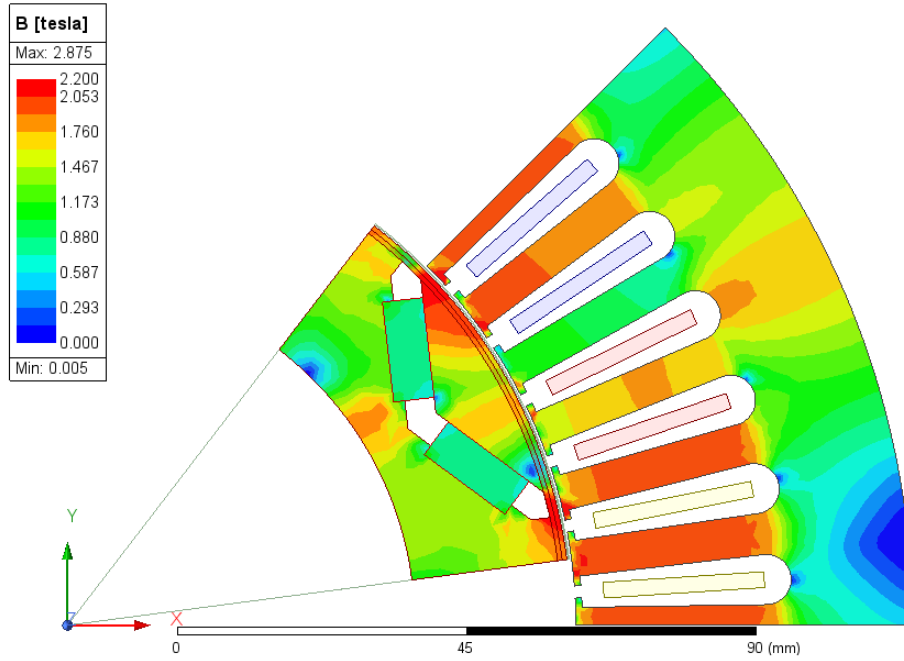
Şekil 4.2 Referans GSMSM modeli

Referans GSMSM’nin analizlerinde kullanılan ağ yapısı Şekil 4.3’te verilmiştir. Referans GSMSM analizleri, motorun 8 kutuplu olması sebebiyle motorun sekizde birlik bölümü yani bir kutbu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.3 Referans GSMSM ağ yapısı

Referans GSMSM analizler sonucu elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 4.4'te verilmiştir.

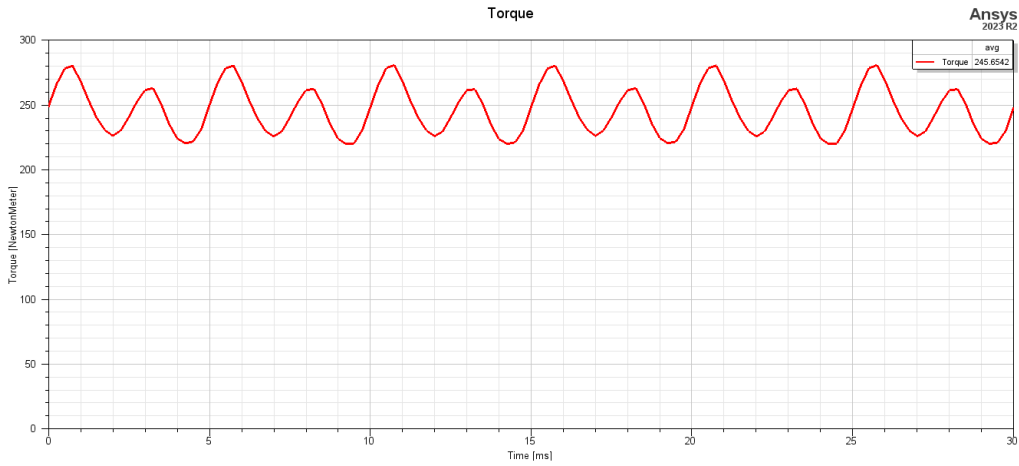


Şekil 4.4 Referans GSMSM manyetik akı dağılımı

Şekil 4.4'te verilen referans GSMSM manyetik akı yoğunluğu dağılımı incelendiğinde; stator dişlerinde 2,2 T, stator boyunduruğunda 1,7 T değerleri aldığı görülmektedir. Stator dişlerinin hava aralığına yakın bölgelerinde 2,4 ile 2,5 T

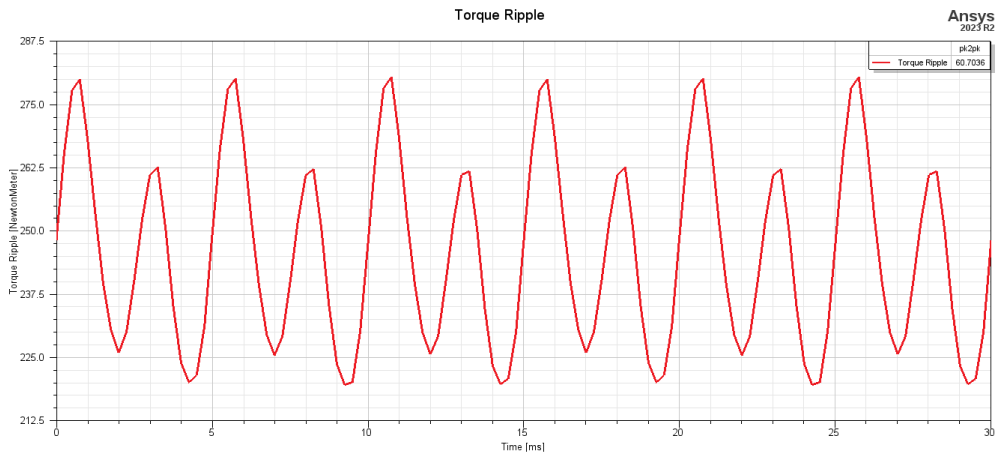
arasında manyetik akı yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Rotor boyunduruğunda 1,7 ile 1,8 T ve rotorun hava aralığına yakın bölgelerde ise 2,7 ile 2,8 T arasında manyetik akı yoğunluğu değerleri elde edilmiştir.

Referans GSMSM'nin ANSYS Maxwell programında modellenmesi sonrası iki boyutta (2D) analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir. Şekil 4.5'te analizler sonucu elde edilen moment grafiği verilmiştir.



Şekil 4.5 Referans GSMSM moment grafiği

250 A besleme akımı ve 1200 rpm hızda referans GSMSM momenti ortalama 245 Nm olarak edilmiştir. Şekil 4.6'da aynı şartlar altında momentte meydana gelen dalgalanma verilmiştir.

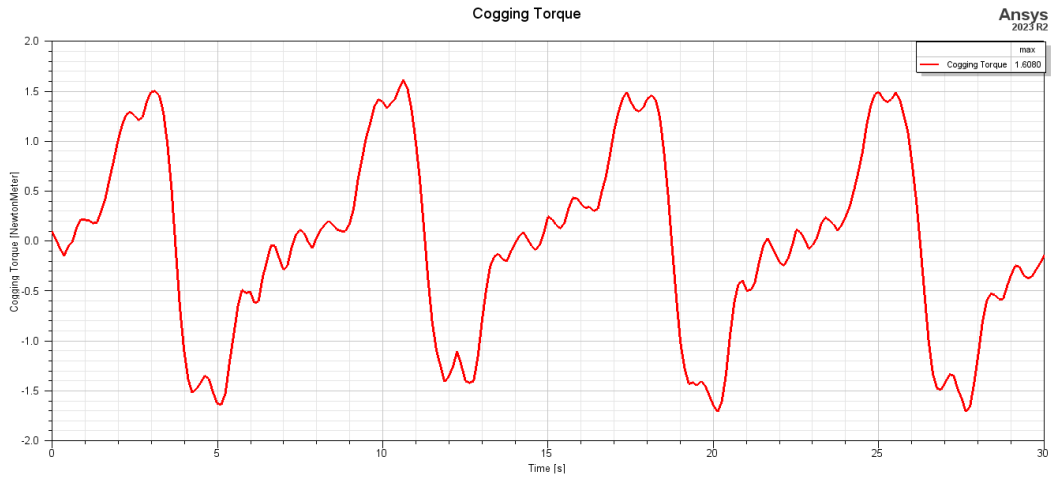


Şekil 4.6 Referans GSMSM moment dalgalanması

Ortalama 245 Nm moment elde edildiği durumda moment meydana gelen dalgalanma miktarı %24,7 (60,7 Nm)'dir. Bu dalgalanma miktarı nispeten yüksek bir değerdir. Moment dalgalanması hesabına ait Eşitlik (4.1)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$T_{dalgalanma} = \frac{T_{maksimum} - T_{minimum}}{T_{ortalama}} \quad (4.1)$$

Vuruntu momenti grafiği de Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7 Referans GSMSM vuruntu momenti grafiği

Referans GSMSM'nin vuruntu momenti ölçümü herhangi bir besleme olmaksızın 1 derece/saniye dönüş hızı altında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonucunda vuruntu momenti 1,6 Nm olarak elde edilmiştir.

Referans GSMSM ile gerçekleştirilen analizler sonrası elde edilen sonuçlar Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 Referans GSMSM analiz sonuçları

Moment	245Nm
Moment dalgalanması	%24,7 (60,7 Nm)
Vuruntu momenti	1,6 Nm
Verim	%94

Sonuç olarak bu bölümde, referans olarak seçilen Toyota Prius motoru ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelenmiştir. Ardından elde edilen bilgiler kapsamında referans GSMSM'nin ANSYS Maxwell programında modellenmiş ve

performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, incelenen literatür çalışmaları ile benzerlik göstermektedir [34],[35],[37],[38].



5

FARKLI ROTOR TOPOLOJİLERİNİN MODELLENMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

Referans GSMSM'nin modellenmesi ve analizleri sonrası, çalışma kapsamında referans ile karşılaştırılması yapılacak olan V şekilli, düz şekilli ve U şekilli mıknatısa sahip GSMSM'ler modellenmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu GSMSM'ler; stator boyutları, sargı yapısı, rotor boyutları, manyetik malzeme türü ve sürekli mıknatıs malzeme türü gibi bilgiler referans GSMSM ile aynı olacak şekilde modellenmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir.

Karşılaştırılacak GSMSM modelleri; mıknatıs kalınlığı (w), mıknatıs genişliği (l), iki kutup arası mesafe (Rib) ve mıknatıs alt uçlarının rotor iç çapına uzaklığı (O) parametreleri değiştirilerek optimize edilmiştir. Bu bölümde, belirtilen parametrelerin moment, moment dalgalılığı, verim ve d-q eksenli endüktanslarına etkileri de incelenmiştir.

5.1 V Şekilli GSMSM

Referans GSMSM ile aynı mıknatıs şekline sahip bu model için başlangıç parametreleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 V şekilli GSMSM başlangıç parametreleri

Rib	2 mm
Mıknatıs kalınlığı	5,5 mm
Mıknatıs genişliği	18 mm
O	4,5 mm

Tablo 5.1'de verilen başlangıç parametreleri kullanılarak referans GSMSM ile aynı besleme şartları altında analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda; moment 169 Nm, moment dalgalılığı 17 Nm ve verim %92,78 olarak elde edilmiştir. Bu analizlerin gerçekleştirilmesinin ardından parametreler değiştirilerek V şekilli GSMSM optimize edilmiştir.

5.1.1 Rib Uzunluğunun Motor Performansına Etkisi

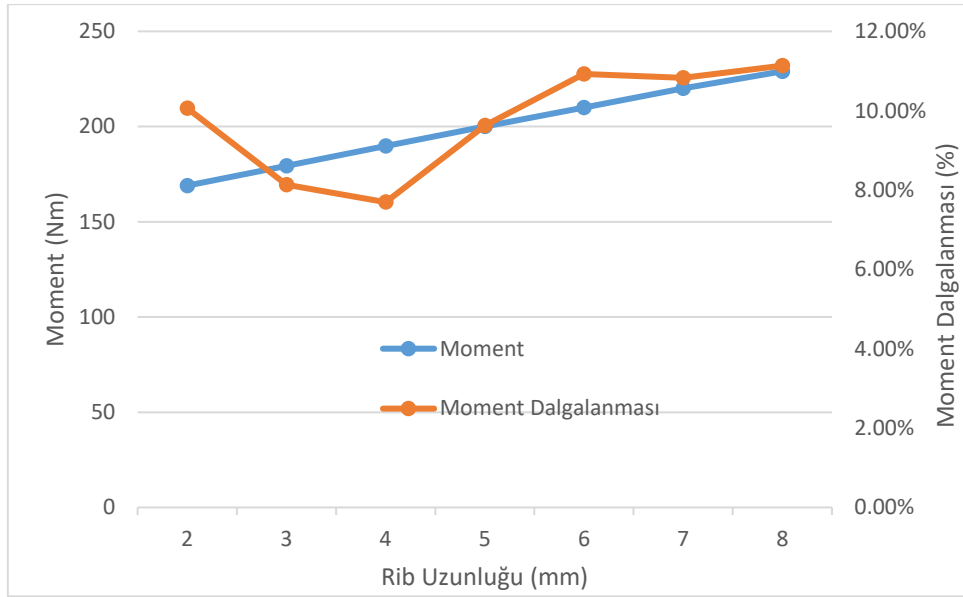
İki kutup arası mesafe olan Rib uzunluğunun motor performansına etkisi; moment, moment dalgalılığı ve verim gibi karşılaştırma kriterleri üzerinden değerlendirilmiştir. Tablo 5.2’de Rib uzunluğunun etkisi 2 mm ile 8 mm arasında 1 mm’lik artışlarla incelenmiş ve motor performansına etkisi paylaşılmıştır.

Tablo 5.2 V şekilli GSMSM’de Rib uzunluğunun etkisi

Rib (mm)	Moment (Nm)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Ld (mH)	Lq (mH)
2	169	10,06	92,78	4,101	6,325
3	179,35	8,13	92,77	4,092	6,322
4	189,75	7,69	92,79	4,085	6,339
5	200	9,63	92,77	4,079	6,341
6	210	10,93	92,76	4,077	6,336
7	220	10,83	92,75	4,074	6,335
8	229	11,14	92,54	4,073	6,346

Tablo 5.2’de görüldüğü üzere Rib uzunluğunun artışı ile birlikte momentte doğrusal bir artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte moment dalgalanması 4 mm için en düşük seviyede elde edilmiştir. Verimde de çok büyük bir değişim meydana gelmediği görülmektedir.

Şekil 5.1’de Rib uzunluğuna bağlı “moment ve moment dalgalanması” analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.1 Rib uzunluğuna bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi moment ve moment dalgalanması dikkate alındığında Rib uzunluğunun 4 mm olmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. Tasarımın diğer aşamalarında Rib uzunluğu 4 mm olarak tercih edilmiştir. Seçilen bu Rib uzunluğu değeri ile moment ve çıkış gücünde %11 artış, moment dalgalanmasında %23,5 iyileşme gözlenmiştir.

5.1.2 Mıknatıs Kalınlığının Motor Performansına Etkisi

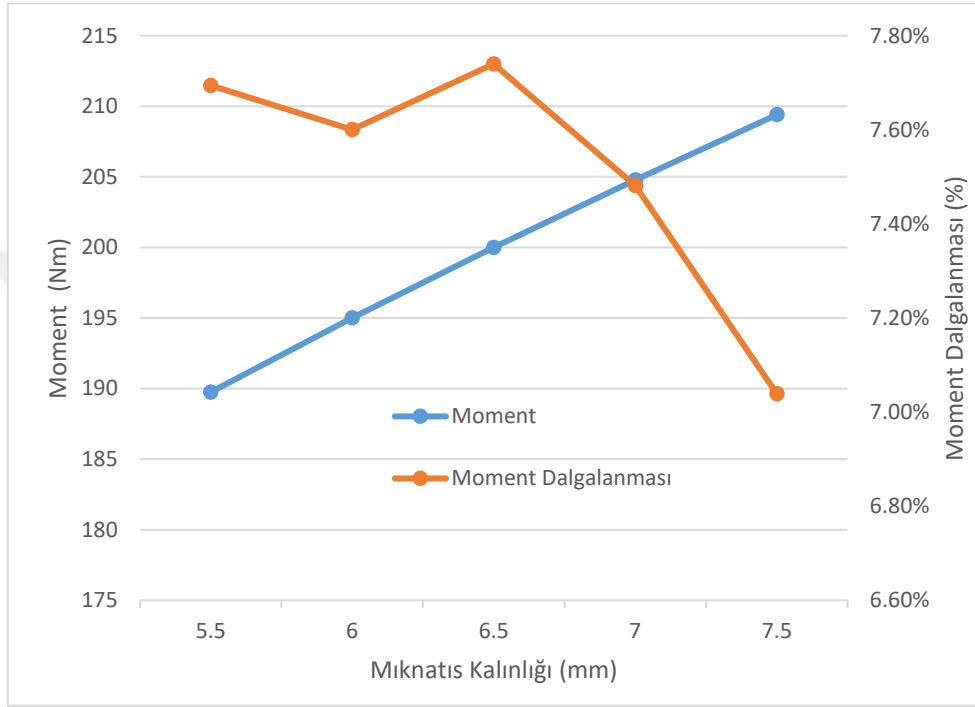
Rib uzunluğunun belirlenmesinin ardından uygun mıknatıs kalınlığı için rotor geometrisinin imkanları dahilinde analizler gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.3’te mıknatıs kalınlığının etkisi 5,5 mm ile 7,5 mm arasında 0,5 mm’lik artışlarla incelenmiş ve motor performansına etkisi paylaşılmıştır.

Tablo 5.3 V şekilli GSMSM’de mıknatıs kalınlığının etkisi

Mıknatıs Kalınlığı (mm)	Moment (Nm)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Ld (mH)	Lq (mH)
5,5	189,75	7,69	92,79	4,085	6,339
6	195	7,60	92,79	4,067	6,337
6,5	200	7,74	92,80	4,051	6,334
7	204,78	7,48	92,81	4,037	6,331
7,5	209,4	7,04	92,81	4,024	6,327

Tablo 5.3'te görüldüğü üzere mıknatıs kalınlığının artışı ile birlikte momentte doğrusal bir artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte moment dalgalanması 7,5 mm için en düşük seviyede elde edilmiştir. Verim genel olarak aynı seviyede kalmıştır.

Şekil 5.2'de mıknatıs kalınlığına bağlı “moment ve moment dalgalanması” analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.2 Mıknatıs kalınlığına bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi moment ve moment dalgalanması dikkate alındığında mıknatıs kalınlığının 7,5 mm olmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. Tasarımın diğer aşamalarında mıknatıs kalınlığı 7,5 mm olarak tercih edilmiştir. Seçilen bu mıknatıs kalınlığı değeri ile moment ve çıkış gücünde %10 artış, moment dalgalanmasında %8,4 iyileşme gözlenmiştir.

5.1.3 Mıknatıs Genişliğinin Motor Performansına Etkisi

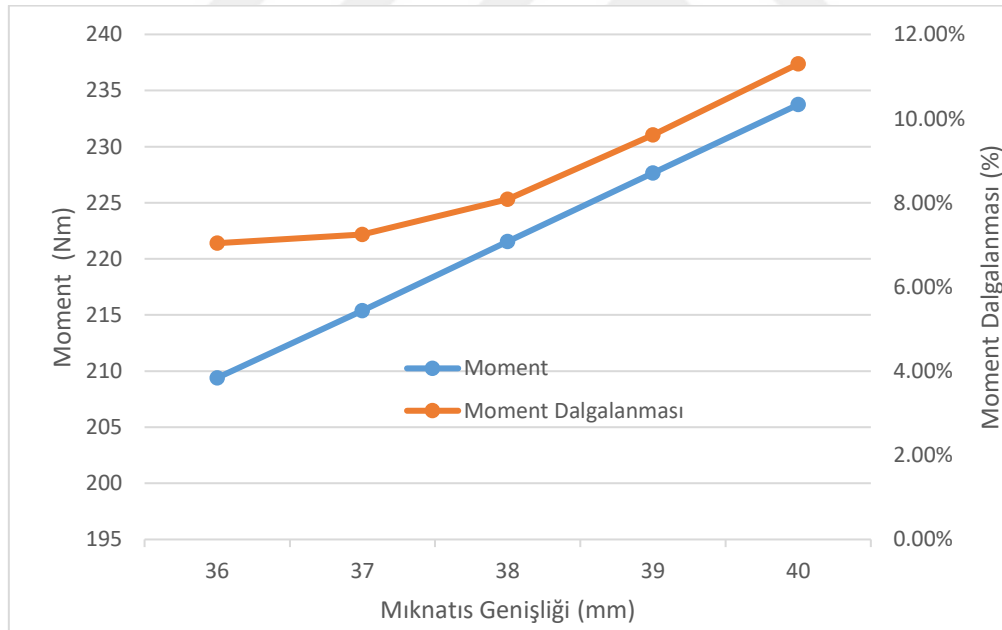
Rib uzunluğu ve mıknatıs kalınlığının belirlenmesinin ardından uygun mıknatıs genişliği için rotor geometrisinin imkanları dahilinde analizler gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.4'te mıknatıs genişliğinin etkisi 36 mm ile 40 mm arasında 1 mm'lik artışlarla incelenmiş ve motor performansına etkisi paylaşılmıştır.

Tablo 5.4 V şekilli GSMSM’de mıknatıs genişliğinin etkisi

Mıknatıs Genişliği (mm)	Moment (Nm)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Ld (mH)	Lq (mH)
36	209,4	7,04	92,81	4,024	6,327
37	215.38	7,25	92,9	3,965	6,319
38	221.55	8,08	92,98	3,907	6,311
39	227.65	9,61	93,04	3,855	6,304
40	233.74	11,30	93,1	3,8	6,296

Tablo 5.4’te görüldüğü üzere mıknatıs genişliğinin artışı ile birlikte momentte doğrusal bir artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte moment dalgalanması ve verimde de artış olduğu görülmektedir.

Şekil 5.3’te mıknatıs genişliğine bağlı “moment ve moment dalgalanması” analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.3 Mıknatıs genişliğine bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları

Şekil 5.3’te görüldüğü gibi moment ve moment dalgalanması dikkate alındığında mıknatıs genişliğinin 38 mm olmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. Moment dalgalanmasında 36 mm ve 37 mm ‘ye göre artış olsa da moment ve verim değerleri dikkate alınarak tasarımın diğer aşamalarında mıknatıs genişliği 38mm olarak

tercih edilmiştir. Seçilen bu mıknatıs genişliği değeri ile moment ve çıkış gücünde %5,5 artış, moment dalgalanmasında da %10 artış gözlenmiştir.

5.1.4 O Mesafesinin Motor Performansına Etkisi

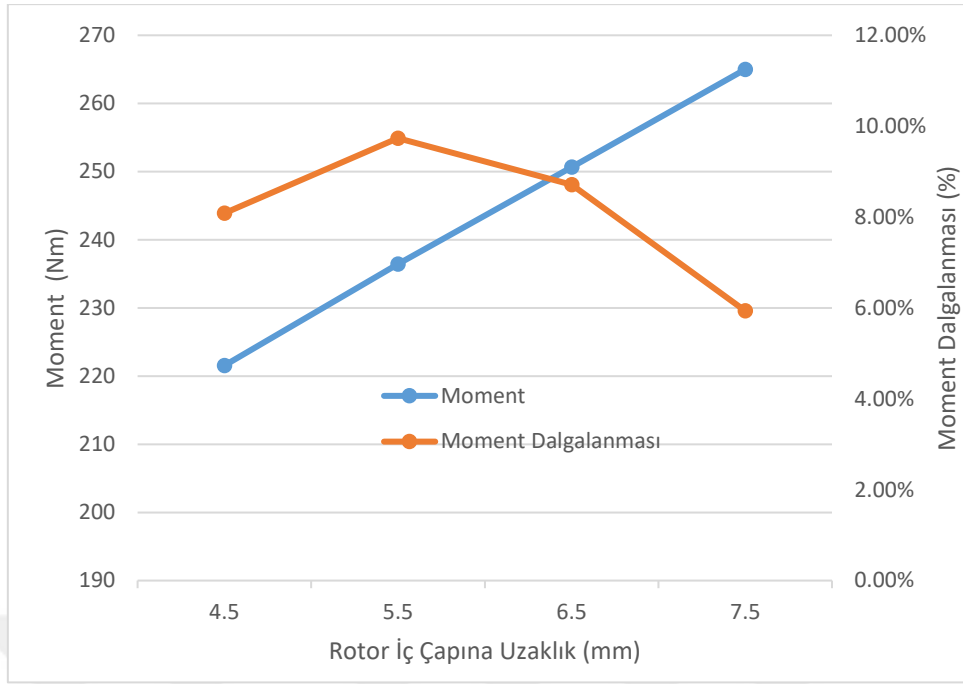
Diğer parametrelerin belirlenmesinin ardından mıknatıs alt uçlarının rotor iç çapına uzaklığı olan O mesafesi için rotor geometrisinin imkanları dahilinde analizler gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.5'te O mesafesinin etkisi 4,5 mm ile 7,5 mm arasında 1 mm'lik artışlarla incelenmiş ve motor performansına etkisi paylaşılmıştır.

Tablo 5.5 V şekilli GSMSM'de O mesafesinin etkisi

O (mm)	Moment (Nm)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Ld (mH)	Lq (mH)
4,5	221,55	8,08	92,98	3,907	6,311
5,5	236,45	9,74	92,95	3,898	6,293
6,5	250,65	8,71	92,94	3,879	6,291
7,5	264,7	6	92,93	3,863	6,277

Tablo 5.5'te görüldüğü üzere O mesafesinin artışı ile birlikte momentte doğrusal bir artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte moment dalgalanması 7,5 mm için oldukça düşük seviyelere gelmiştir.

Şekil 5.4'te O mesafesine bağlı “moment ve moment dalgalanması” analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.4 O mesafesine bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları

Şekil 5.4'te görüldüğü gibi moment ve moment dalgalanması dikkate alındığında O mesafesinin 7,5 mm olmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. Bu seçilen değer ile moment değeri en yüksek seviyede olup moment dalgalanması değeri de en düşük seviyede elde edilmiştir. Seçilen bu O mesafesi değeri ile moment ve çıkış gücünde %16,4 artış, moment dalgalanmasında da %36 iyileşme gözlenmiştir.

O mesafesinin de belirlenmesi ile nihai boyutlandırma tamamlanmıştır.

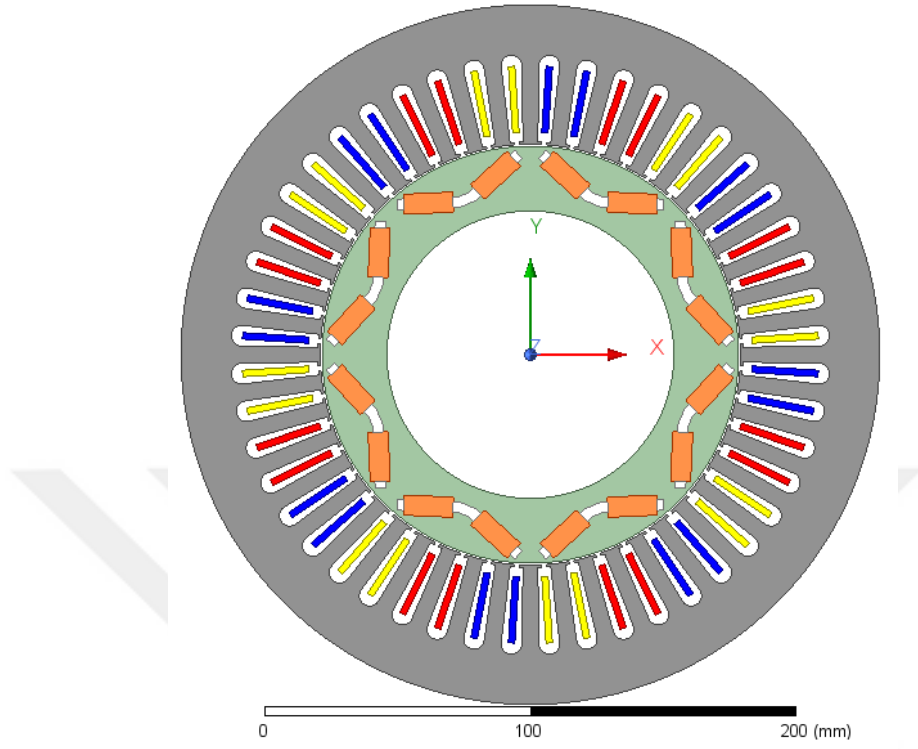
5.1.5 Nihai Yapıdaki V Şekilli GSMSM Analizleri

V şekilli GSMSM nihai yapısı; Rib uzunluğu 2 mm ile 8 mm arasında 1 mm artışlarla, mıknatıs kalınlığı 5,5 mm ile 7,5 mm arasında 0,5 mm artışlarla, mıknatıs genişliği 36 mm ile 40 mm arasında 1 mm artışlarla, O mesafesi 4,5 mm ile 7,5 mm arasında 1 mm artışlarla analizler yapılarak belirlenmiştir. Tablo 5.6'da V şekilli GSMSM için parametrik analizler sonucu belirlenen boyutlar paylaşılmıştır.

Tablo 5.6 V şekilli GSMSM nihai boyutları

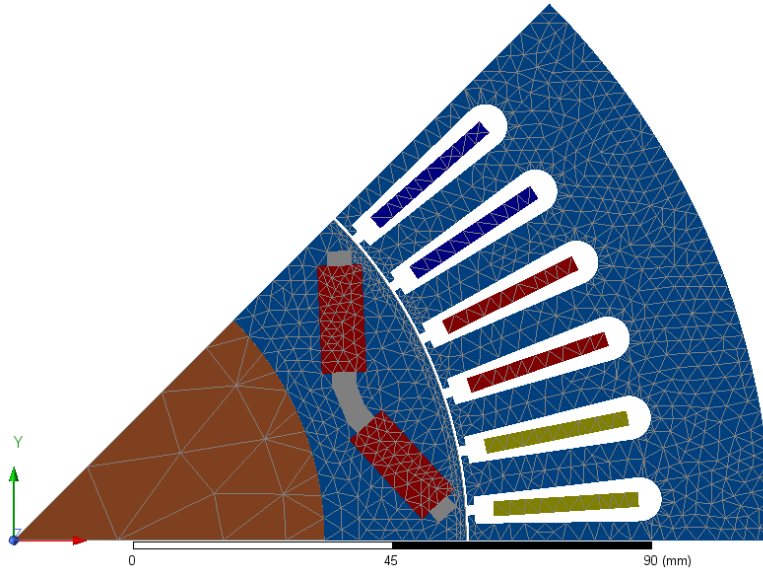
Rib	4 mm
Mıknatıs kalınlığı	7,5 mm
Mıknatıs genişliği	38 mm
O	7,5 mm

Belirlenen nihai boyutlar ile ANSYS Maxwell programında oluşturulan 2D model
Şekil 5.5'te verilmiştir.



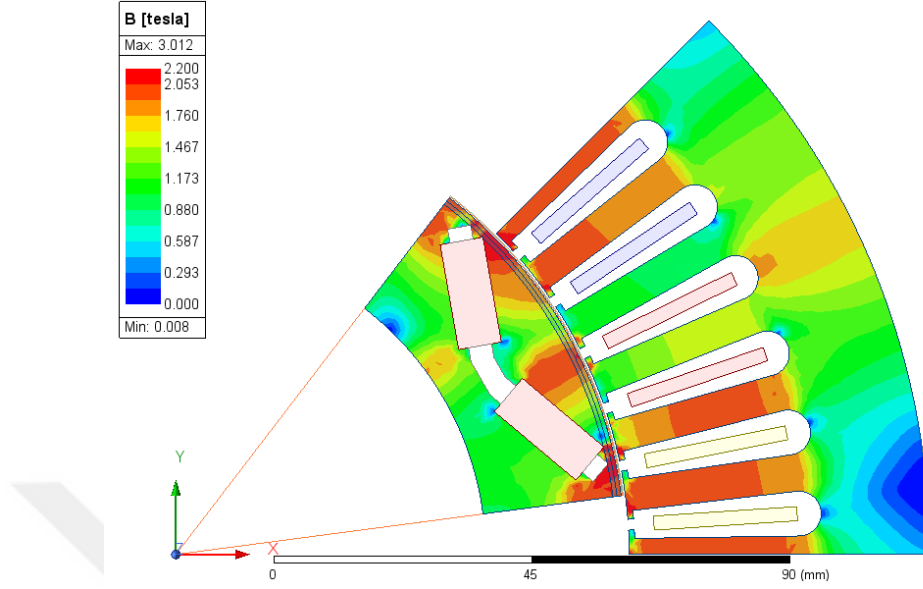
Şekil 5.5 V şekilli GSMSM nihai tasarım 2D modeli

Nihai tasarım sonra gerçekleştirilen analizlerde kullanılan ağ yapısı Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6 V şekilli GSMSM ağ yapısı

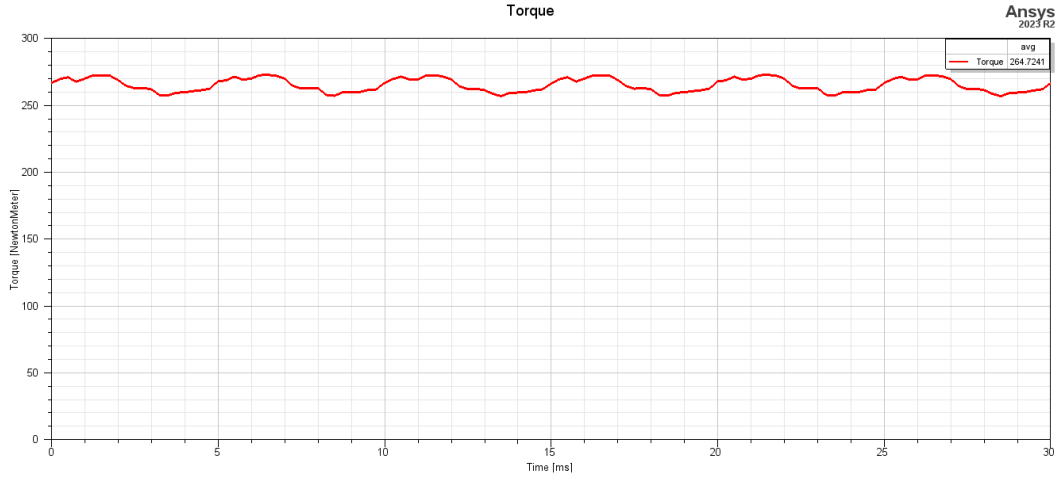
Nihai V şekilli GSMSM'nin manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7 V şekilli GSMSM manyetik akı yoğunluğu dağılımı

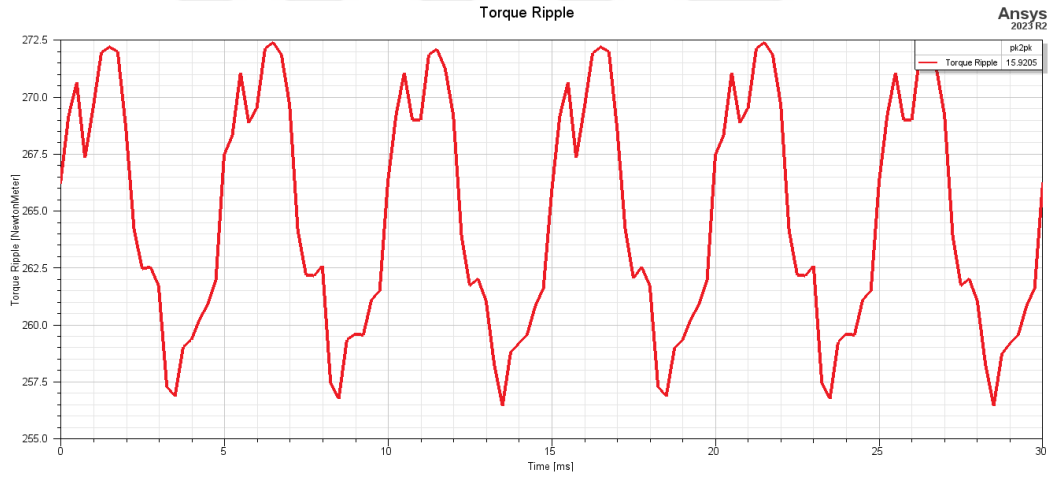
Şekil 5.7'de verilen V şekilli GSMSM manyetik akı yoğunluğu dağılımı incelendiğinde; stator dişlerinde 2,2 T, stator boyunduruğunda 1,3 ile 1,4 T değerleri aldığı görülmektedir. Stator dişlerinin hava aralığına yakın bölgelerinde 2,3 ile 2,4 T arasında manyetik akı yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Rotor boyunduruğunda 1,4 ile 1,5 T ve rotorun hava aralığına yakın bölgelerde ise 2,9 ile 3 T arasında manyetik akı yoğunluğu değerleri elde edilmiştir.

V şekilli GSMSM nihai yapısı ile gerçekleştirilen analizlerde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir. Analizler sonucu elde edilen moment grafiği Şekil 5.8'de verilmiştir.



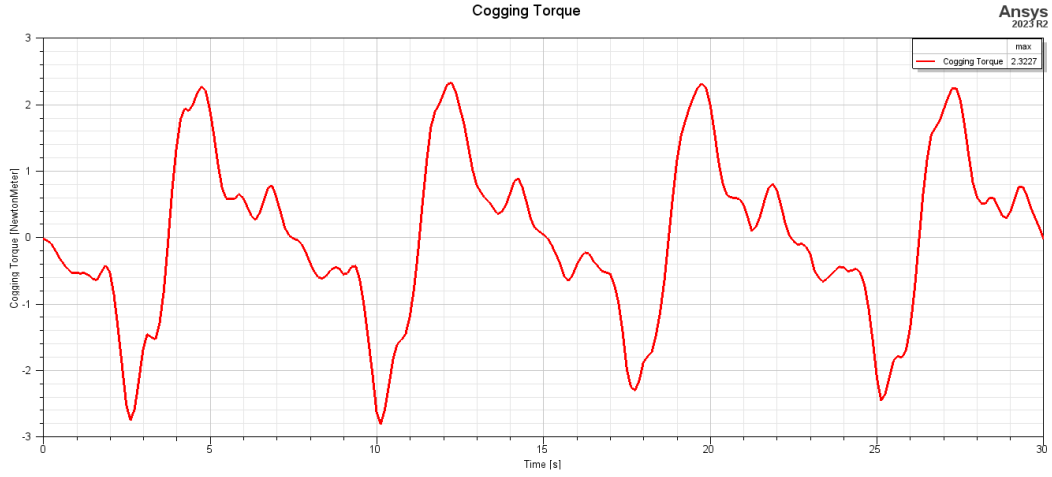
Şekil 5.8 V şekilli GSMSM moment grafiği

250 A besleme akımı ve 1200 rpm hızda V şekilli GSMSM momenti ortalama 264,7 Nm olarak edilmiştir. Şekil 5.9’da aynı şartlar altında momentte meydana gelen dalgalanma verilmiştir.



Şekil 5.9 V şekilli GSMSM moment dalgalanması

Ortalama 264,7 Nm moment elde edildiği durumda moment meydana gelen dalgalanma miktarı %6 (15,9 Nm)’dir. Bu dalgalanma miktarının, moment değerine göre oldukça iyi seviyede olduğu değerlendirilebilir. Vuruntu momenti grafiği de Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.10 V şekilli GSMSM vuruntu momenti grafiği

V şekilli GSMSM vuruntu momenti ölçümü, referans GSMSM ile benzer şekilde herhangi bir besleme olmaksızın 1 derece/saniye dönüş hızı altında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonucunda vuruntu momenti 2,3 Nm olarak elde edilmiştir.

V şekilli GSMSM ile gerçekleştirilen analizler sonrası elde edilen sonuçlar Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.7 V şekilli GSMSM analiz sonuçları

Moment	264,7 Nm
Moment dalgalanması	%6 (15,9 Nm)
Vuruntu momenti	2,3 Nm
Verim	%93

Sonuç olarak bu başlıkta, V şekilli GSMSM ile parametrik analizler gerçekleştirilmiş ve nihai bir tasarım elde edilmiştir. Ardından nihai V şekilli GSMSM, ANSYS Maxwell programında modellenmiş ve performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde elde sonuçlara göre V şekilli GSMSM, referans GSMSM’ye göre daha yüksek moment ve vuruntu momentine sahiptir. Bununla birlikte moment dalgalanması değeri oldukça düşük seviyelerdedir. İki motorun verim değerleri ise oldukça benzerdir.

5.2 Düz Şekilli GSMSM

Referans GSMSM'den farklı olarak düz ve tek parça mıknatısa sahip bu GSMSM için başlangıç parametreleri Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.8 Düz şekilli GSMSM başlangıç parametreleri

Rib	3,5 mm
Mıknatıs kalınlığı	6 mm
Mıknatıs genişliği	38 mm
O	8 mm

Tablo 5.8'de verilen başlangıç parametreleri kullanılarak referans GSMSM ile aynı besleme şartları altında analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda; moment 181,23 Nm, moment dalgalılığı 16.3 Nm ve verim %92,96 olarak elde edilmiştir. Bu analizlerin gerçekleştirilmesinin ardından parametreler değiştirilerek düz şekilli GSMSM optimize edilmiştir.

5.2.1 Rib Uzunluğunun Motor Performansına Etkisi

İki kutup arası mesafe olan Rib uzunluğunun motor performansına etkisi; moment, moment dalgalılığı ve verim gibi karşılaştırma kriterleri üzerinden değerlendirilmiştir. Tablo 5.9'da Rib uzunluğunun etkisi 3,5 mm ile 7,5 mm arasında 1 mm'lik artışlarla incelenmiş ve motor performansına etkisi paylaşılmıştır.

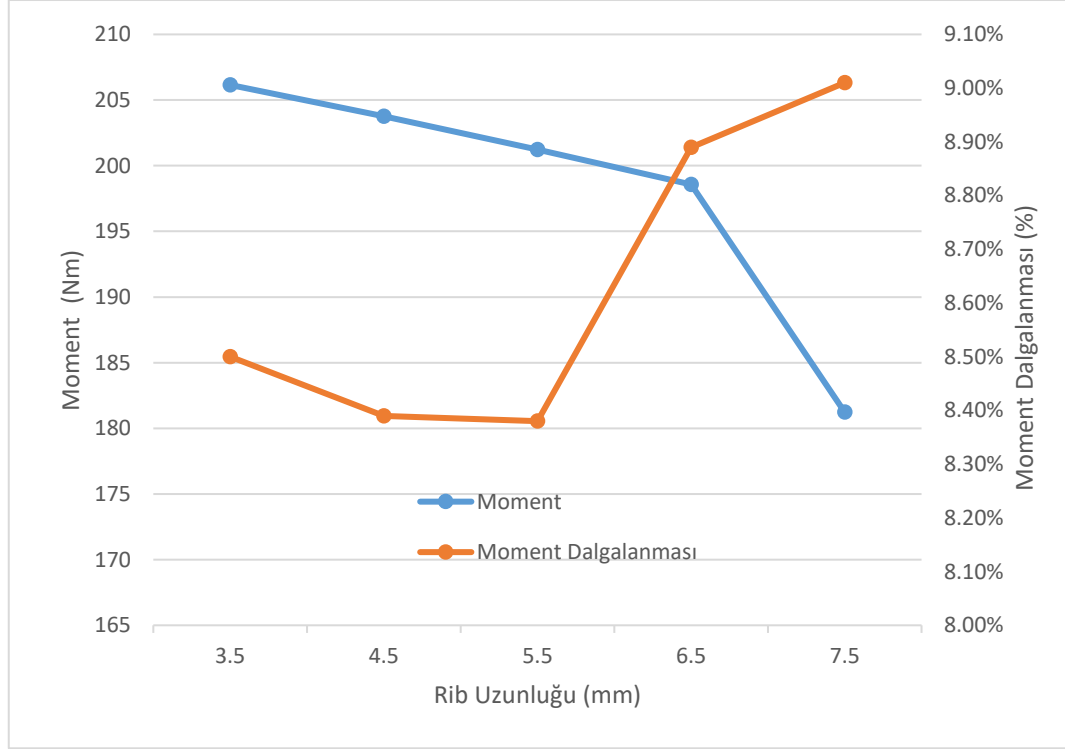
Tablo 5.9 Düz şekilli GSMSM'de Rib uzunluğunun etkisi

Rib (mm)	Moment (Nm)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Ld (mH)	Lq (mH)
3,5	206,15	8,5	92,62	2,52	6,08
4,5	203,77	8,39	92,90	2,564	6,2
5,5	201,22	8,38	92,93	2,590	6,29
6,5	198,56	8,89	93	2,622	6,362
7,5	181,23	9,01	92,96	2,616	6,4

Tablo 5.9'da görüldüğü üzere Rib uzunluğunun artışı ile birlikte momentte azalma meydana gelmiştir. Bunun sebebi kutuplar arası akı yolunun daralmasıdır. Bununla

birlikte moment dalgalanması 4,5 mm ve 5,5mm için düşük seviyelerde elde edilmiştir. Genel olarak verim, 3,5 mm dışında aynı seviyelerde elde edilmiştir.

Şekil 5.11’de Rib uzunluğuna bağlı “moment ve moment dalgalanması” analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.11 Rib uzunluğuna bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları

Şekil 5.11’de görüldüğü gibi moment ve moment dalgalanması dikkate alındığında Rib uzunluğunun 4,5 mm olmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. Tasarımın diğer aşamalarında Rib uzunluğu 4,5 mm olarak tercih edilmiştir. Seçilen bu Rib uzunluğu değeri ile moment ve çıkış gücünde %1 azalma, moment dalgalanmasında %1,2 iyileşme gözlenmiştir.

5.2.2 Mıknatıs Kalınlığının Motor Performansına Etkisi

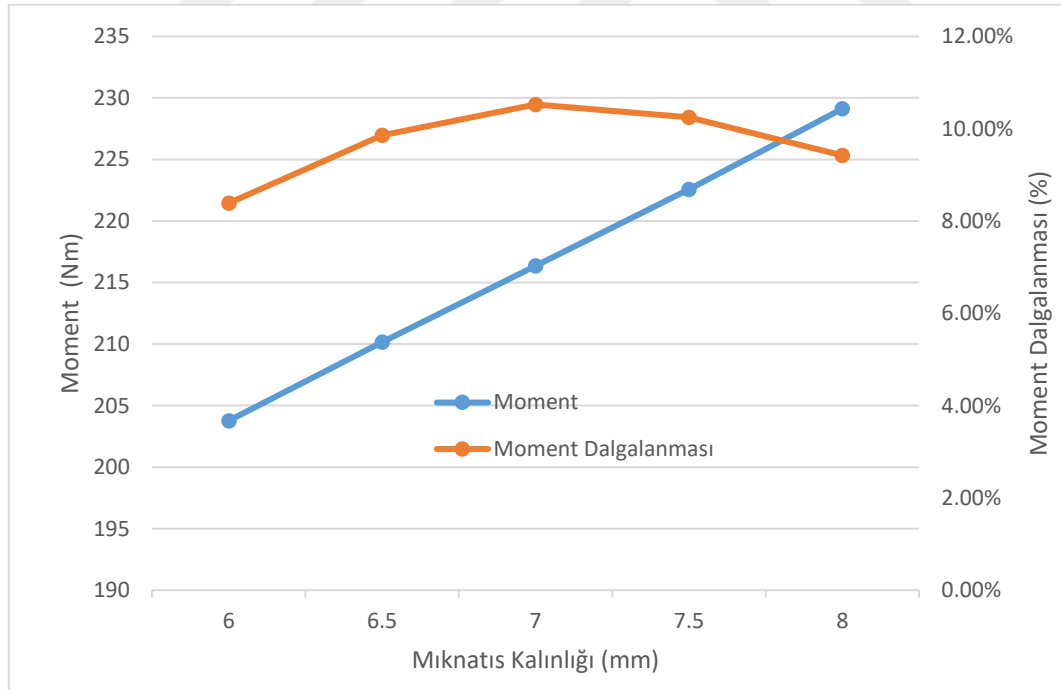
Rib uzunluğunun belirlenmesinin ardından uygun mıknatıs kalınlığı için rotor geometrisinin imkanları dahilinde analizler gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.10’da mıknatıs kalınlığının etkisi 6 mm ile 8 mm arasında 0,5 mm’lik artışlarla incelenmiş ve motor performansına etkisi paylaşılmıştır.

Tablo 5.10 Düz şekilli GSMSM’de mıknatıs kalınlığının etkisi

Mıknatıs Kalınlığı (mm)	Moment (Nm)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Ld (mH)	Lq (mH)
6	203,77	8,39	92,90	2,564	6,2
6,5	210,16	9,86	92,85	2,564	6,2
7	216,35	10,52	92,59	2,564	6,2
7,5	222,58	10,24	92,62	2,564	6,2
8	229,12	9,42	92,66	2,564	6,2

Tablo 5.10’da görüldüğü üzere mıknatıs kalınlığının artışı ile birlikte momentte doğrusal bir artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte moment dalgalanması 6 mm için en düşük seviyede elde edilmiştir. Mıknatıs kalınlığının artması ile verimin de düştüğü görülmektedir.

Şekil 5.12’de mıknatıs kalınlığına bağlı “moment ve moment dalgalanması” analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.12 Mıknatıs kalınlığına bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları

Şekil 5.12’de görüldüğü gibi moment ve moment dalgalanması dikkate alındığında mıknatıs kalınlığının 6 mm olmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. Tasarımın

diğer aşamalarında mıknatıs kalınlığı 6 mm olarak tercih edilmiştir. Seçilen bu mıknatıs kalınlığı değeri başlangıçta belirlenen değer olduğu için Rib uzunluğunun belirlenmesi sonrası moment, çıkış gücü ve moment dalgalanmasında değişiklik olmamıştır.

5.2.3 Mıknatıs Genişliğinin Motor Performansına Etkisi

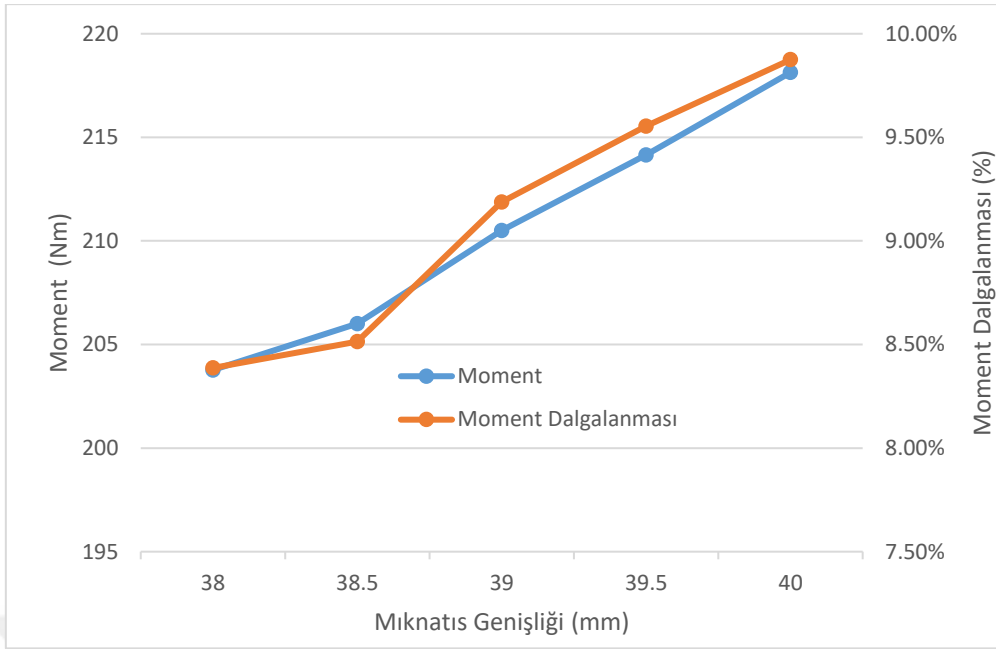
Rib uzunluğu ve mıknatıs kalınlığının belirlenmesinin ardından uygun mıknatıs genişliği için rotor geometrisinin imkanları dahilinde analizler gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.11’de mıknatıs genişliğinin etkisi 38 mm ile 40 mm arasında 0,5 mm’lik artışlarla incelenmiş ve motor performansına etkisi paylaşılmıştır.

Tablo 5.11 Düz şekilli GSMSM’de mıknatıs genişliğinin etkisi

Mıknatıs Genişliği (mm)	Moment (Nm)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Ld (mH)	Lq (mH)
38	203,77	8,39	92,90	2,564	6,2
38,5	206	8,51	92,85	2,554	6,21
39	210,5	9,19	92,73	2,544	6,219
39,5	214,15	9,55	92,69	2,533	6,23
40	218,13	9,87	92,65	2,525	6,242

Tablo 5.11’de görüldüğü üzere mıknatıs genişliğinin artışı ile birlikte momentte az miktarda da olsa doğrusal bir artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte moment dalgalanmasının arttığı, verim de ise düşüş olduğu görülmektedir.

Şekil 5.13’te mıknatıs genişliğine bağlı “moment ve moment dalgalanması” analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.13 Mıknatıs genişliğine bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları

Şekil 5.13'te görüldüğü gibi moment ve moment dalgalanması dikkate alındığında mıknatıs genişliğinin 38,5 mm olmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. Moment dalgalanması çok az artsa da momentin de artması sebebiyle 38,5 mm değeri tercih edilmiştir. Seçilen bu mıknatıs genişliği değeri ile moment ve çıkış gücünde %1 artış, moment dalgalanmasında da %1 artış gözlenmiştir.

5.2.4 O Mesafesinin Motor Performansına Etkisi

Diğer parametrelerin belirlenmesinin ardından mıknatıs alt uçlarının rotor iç çapına uzaklığı olan O mesafesi için rotor geometrisinin imkanları dahilinde analizler gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.12'de O mesafesinin etkisi 8 mm ile 12 mm arasında 1 mm'lik artışlarla incelenmiş ve motor performansına etkisi paylaşılmıştır.

Tablo 5.12 Düz şekilli GSMSM'de O mesafesinin etkisi

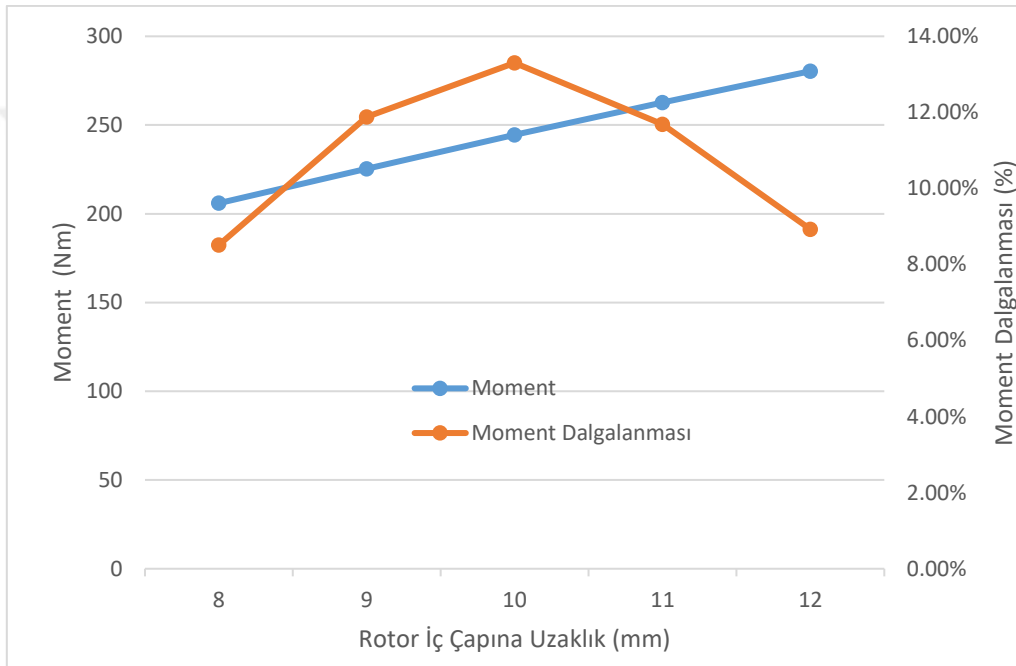
O (mm)	Moment (Nm)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Ld (mH)	Lq (mH)
8	206	8,51	92,85	2,554	6,21
9	225,42	11,88	92,39	2,494	6,031
10	244,5	13,30	92,70	2,548	6,046

Tablo 5.12 Düz şekilli GSMSM’de O mesafesinin etkisi (devamı)

11	262,71	11,69	92,67	2,612	6,062
12	279,85	8,92	93,5	2,687	6,08

Tablo 5.12’de görüldüğü üzere O mesafesinin artışı ile birlikte momentte doğrusal bir artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte moment dalgalanması 8 mm ve 12 mm için düşük seviyelerdedir. Verim ise 12 mm değeri için en yüksek seviyedir.

Şekil 5.14’te O mesafesine bağlı “moment ve moment dalgalanması” analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.14 O mesafesine bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları

Şekil 5.14’te görüldüğü gibi moment ve moment dalgalanması dikkate alındığında O mesafesinin 12 mm olmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. Bu seçilen değer ile moment değeri en yüksek seviyede olup moment dalgalanması değeri de referans GSMSM’ye göre düşük seviyededir. Seçilen bu O mesafesi değeri ile moment ve çıkış gücünde %36 artış, moment dalgalanmasında da %4 artış gözlenmiştir.

O mesafesinin de belirlenmesi ile birlikte nihai boyutlandırma tamamlanmıştır.

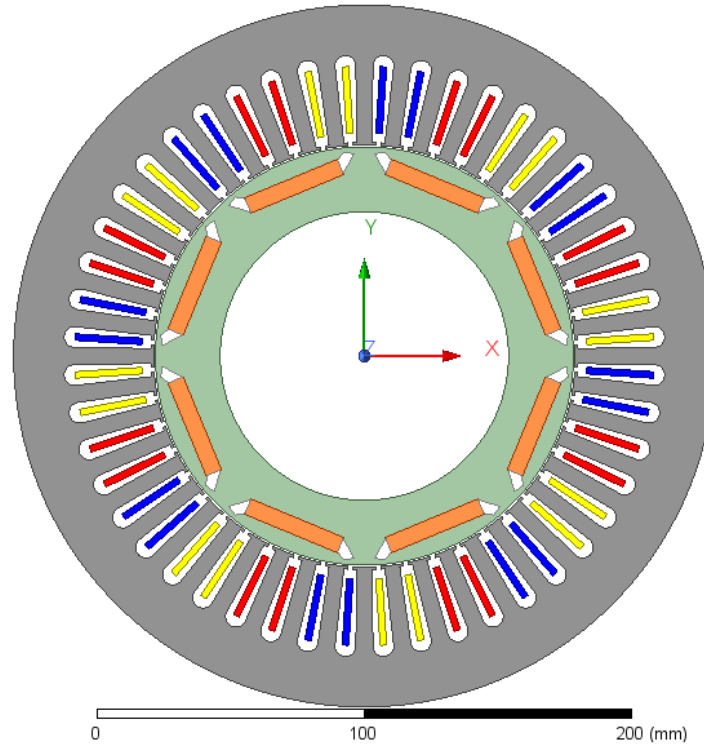
5.2.5 Nihai Yapıdaki Düz Şekilli GSMSM Analizleri

Düz şekilli GSMSM nihai yapısı; Rib uzunluğu 3,5 mm ile 7,5 mm arasında 1 mm artışlarla, mıknatıs kalınlığı 6 mm ile 8 mm arasında 0,5 mm artışlarla, mıknatıs genişliği 38 mm ile 40 mm arasında 0,5 mm artışlarla, O mesafesi 8 mm ile 12 mm arasında 1 mm artışlarla analizler yapılarak belirlenmiştir. Tablo 5.13'te düz şekilli GSMSM için parametrik analizler sonucu belirlenen boyutlar paylaşılmıştır.

Tablo 5.13 Düz şekilli GSMSM nihai boyutları

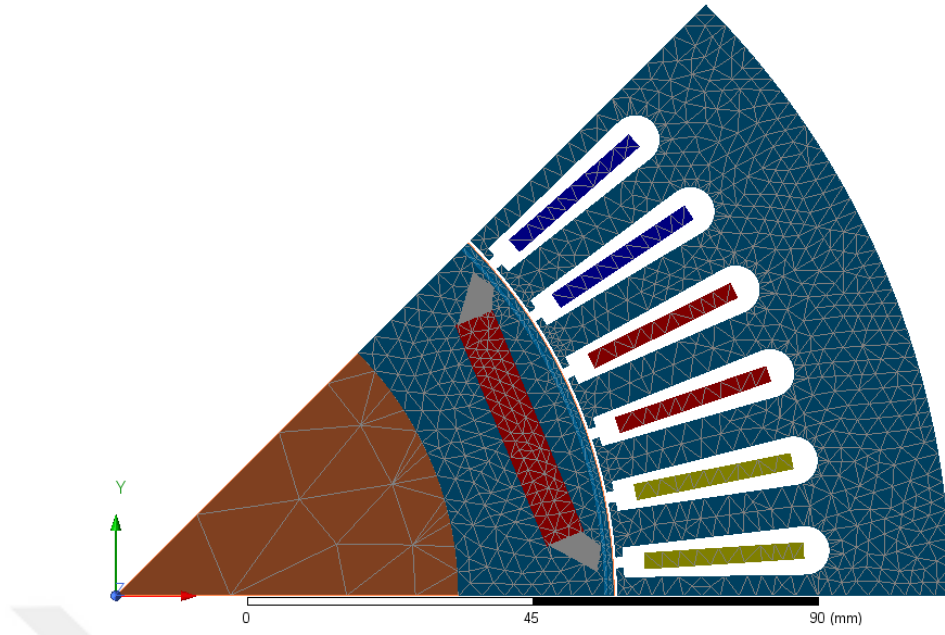
Rib	4,5 mm
Mıknatıs kalınlığı	6 mm
Mıknatıs genişliği	38,5 mm
O	12 mm

Belirlenen nihai boyutlar ile ANSYS Maxwell programında oluşturulan 2D model, Şekil 5.15'te verilmiştir.



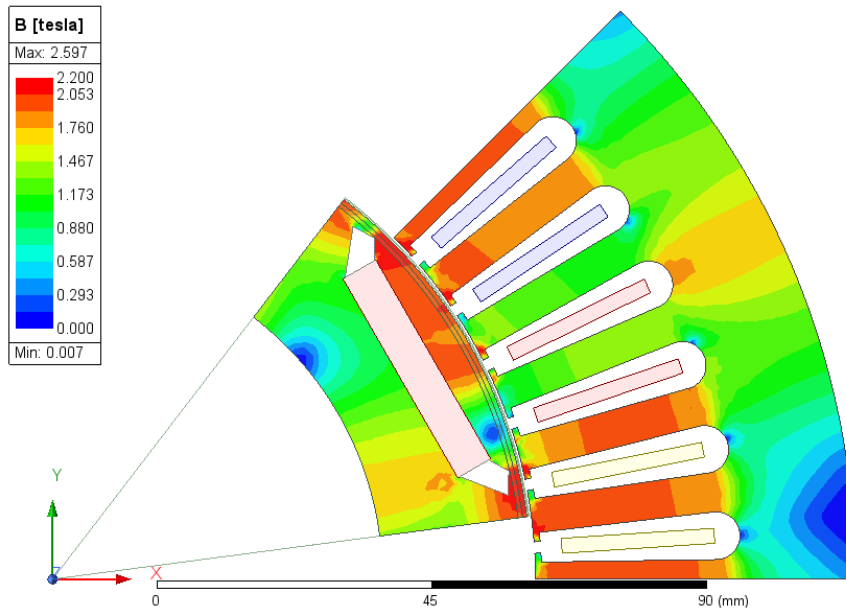
Şekil 5.15 Düz şekilli GSMSM nihai tasarım 2D modeli

Nihai tasarım sonrası gerçekleştirilen analizlerde kullanılan ağ yapısı Şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.16 Düz şekilli GSMSM ağ yapısı

Nihai düz şekilli GSMSM'nin manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 5.17'de verilmiştir.

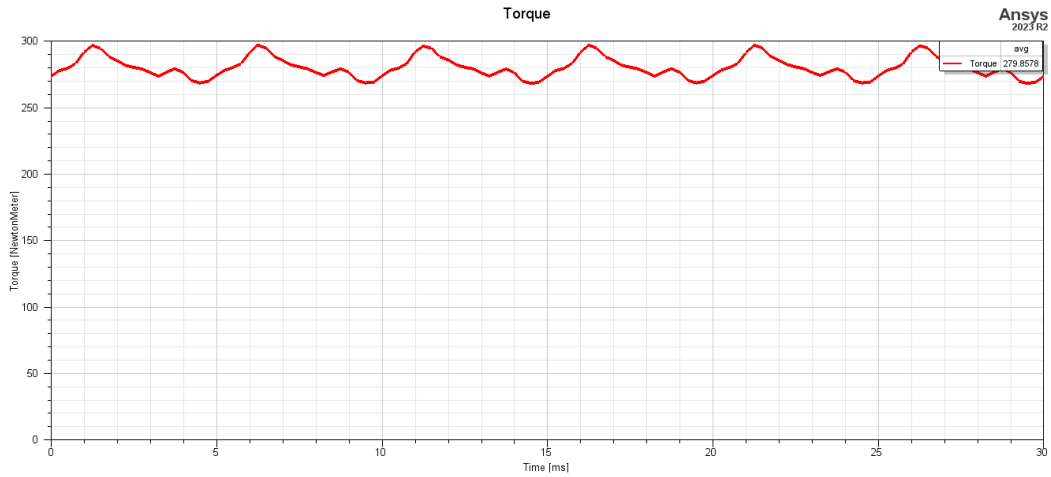


Şekil 5.17 Düz şekilli GSMSM manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 5.17'de verilen düz şekilli GSMSM manyetik akı yoğunluğu dağılımı incelendiğinde; stator dişlerinde 2 ile 2,1 T arasında, stator boyunduruğunda 1,1 ile 1,2 T değerleri aldığı görülmektedir. Stator dişlerinin hava aralığına yakın bölgelerinde 2,2 T manyetik akı yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Rotor

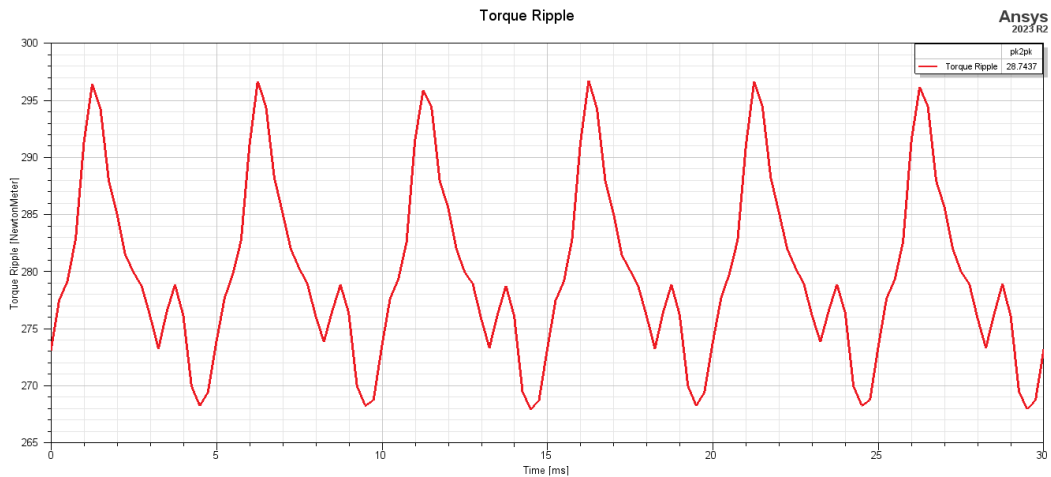
boyunduruğunda 1,4 ile 1,6 T ve rotorun hava aralığına yakın bölgelerde ise 2,5 ile 2,6 T arasında manyetik akı yoğunluğu değerleri elde edilmiştir.

Düz şekilli GSMSM nihai yapısı ile gerçekleştirilen analizlerde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir. Analizler sonucu elde edilen moment grafiği Şekil 5.18’de verilmiştir.



Şekil 5.18 Düz şekilli GSMSM moment grafiği

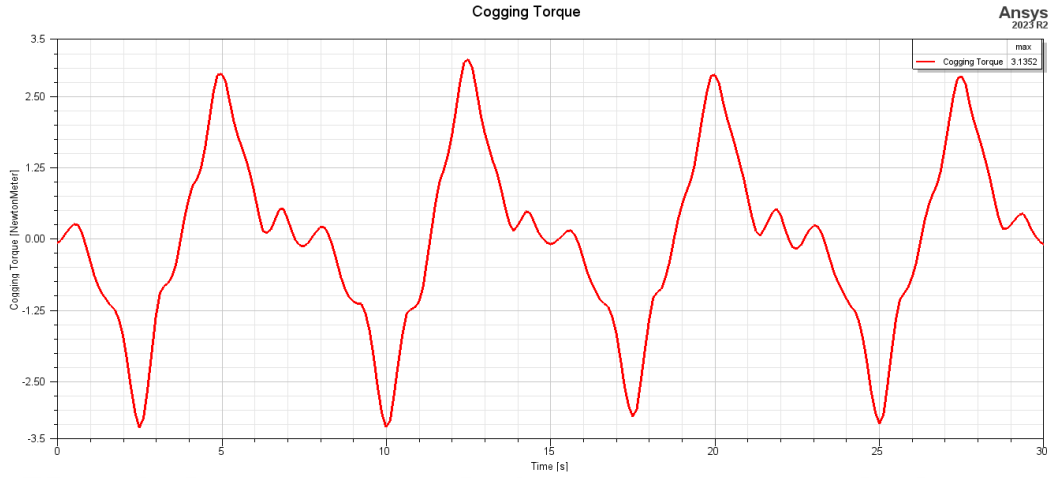
250 A besleme akımı ve 1200 rpm hızda referans GSMSM momenti ortalama 279,85 Nm olarak edilmiştir. Şekil 5.19’da aynı şartlar altında momentte meydana gelen dalgalanma verilmiştir.



Şekil 5.19 Düz şekilli GSMSM moment dalgalanması

Ortalama 279,85 Nm moment elde edildiği durumda moment meydana gelen dalgalanma miktarı %9 (26 Nm)’dir. Bu dalgalanma miktarının, moment değerine

göre iyi bir seviyede olduğu değerlendirilebilir. Vuruntu momenti grafiği de Şekil 5.20’de verilmiştir.



Şekil 5.20 Düz şekilli GSMSM vuruntu momenti grafiği

Düz şekilli GSMSM vuruntu momenti ölçümü, referans GSMSM ile benzer şekilde herhangi bir besleme olmaksızın 1 derece/saniye dönüş hızı altında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonucunda vuruntu momenti 3,1 Nm olarak elde edilmiştir.

Düz şekilli GSMSM ile gerçekleştirilen analizler sonrası elde edilen sonuçlar Tablo 5.14’te verilmiştir.

Tablo 5.14 Düz şekilli GSMSM analiz sonuçları

Moment	279,85 Nm
Moment dalgalanması	%9 (29 Nm)
Vuruntu momenti	3,1 Nm
Verim	%93,5

Sonuç olarak bu başlıkta, düz şekilli GSMSM ile parametrik analizler gerçekleştirilmiş ve nihai bir tasarım elde edilmiştir. Ardından nihai düz şekilli GSMSM, ANSYS Maxwell programında modellenmiş ve performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde elde sonuçlara göre düz şekilli GSMSM, referans GSMSM’ye göre daha yüksek moment ve vuruntu momentine sahiptir. Bununla birlikte moment dalgalanması değeri, referans GSMSM’ye göre düşük seviyelerdedir. İki motorun verim değerleri ise oldukça benzerdir.

5.3 U Şekilli GSMSM

Referans GSMSM'den farklı olarak U şekilli mıknatısa sahip bu GSMSM için başlangıç parametreleri Tablo 5.15'te verilmiştir.

Tablo 5.15 U şekilli GSMSM başlangıç parametreleri

Rib	8 mm
Mıknatıs kalınlığı	6 mm
Mıknatıs genişliği	42 mm
O	2,5 mm

Tablo 5.15'te verilen başlangıç parametreleri kullanılarak referans GSMSM ile aynı besleme şartları altında analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda; moment 200,25 Nm, moment dalgalılığı 17,9 Nm ve verim %90,69 olarak elde edilmiştir. Bu analizlerin gerçekleştirilmesinin ardından parametreler değiştirilerek U şekilli GSMSM optimize edilmiştir.

5.3.1 Rib Uzunluğunun Motor Performansına Etkisi

İki kutup arası mesafe olan Rib uzunluğunun motor performansına etkisi; moment, moment dalgalılığı ve verim gibi karşılaştırma kriterleri üzerinden değerlendirilmiştir. Tablo 5.16'da Rib uzunluğunun etkisi 8 mm ile 13 mm arasında 1 mm'lik artışlarla incelenmiş ve motor performansına etkisi paylaşılmıştır.

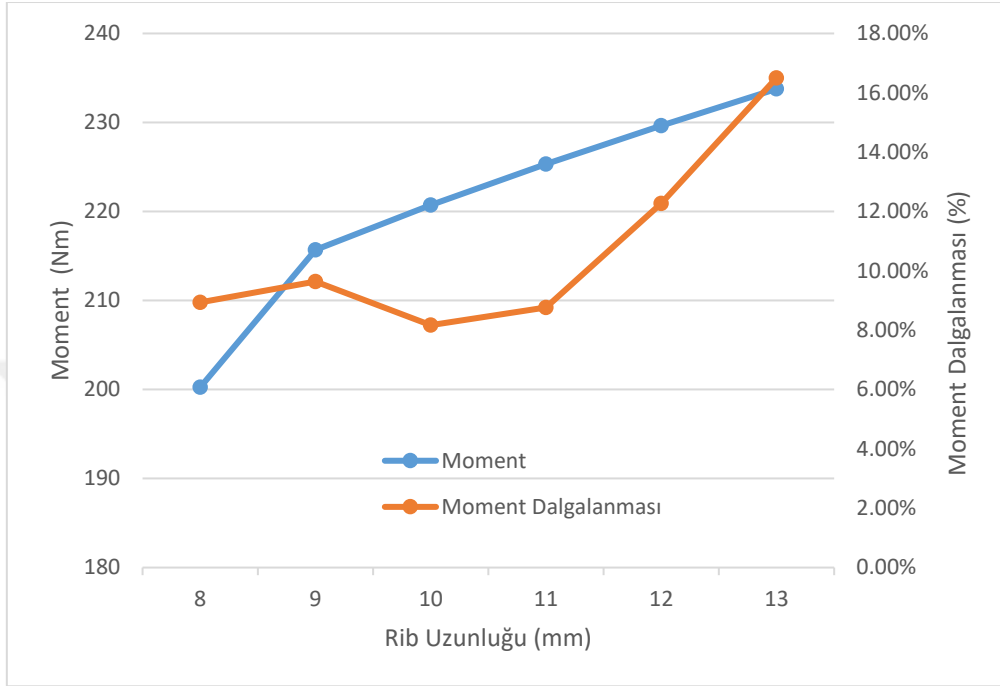
Tablo 5.16 U şekilli GSMSM'de Rib uzunluğunun etkisi

Rib (mm)	Moment (Nm)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Ld (mH)	Lq (mH)
8	200,25	8,93	90,69	2,645	6,237
9	215,7	9,64	90,85	2,630	6,197
10	220,71	8,17	90,88	2,623	6,189
11	225,33	8,76	90,86	2,610	6,128
12	229,63	12,27	90,81	2,599	6,099
13	233,77	16,50	90,81	2,602	6,060

Tablo 5.16'da görüldüğü üzere Rib uzunluğunun artışı ile birlikte momentte artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte moment dalgalanması 10 mm en düşük

seviyede elde edilmiştir. Genel olarak verim, 8 mm dışındaki uzunluklar için aynı seviyelerde elde edilmiştir.

Şekil 5.21’de Rib uzunluğuna bağlı “moment ve moment dalgalanması” analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.21 Rib uzunluğuna bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları

Şekil 5.21’de görüldüğü gibi moment ve moment dalgalanması dikkate alındığında Rib uzunluğunun 10 mm olmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. Tasarımın diğer aşamalarında Rib uzunluğu 10 mm olarak tercih edilmiştir. Seçilen bu Rib uzunluğu değeri ile moment ve çıkış gücünde %10 artış, moment dalgalanmasında %9 iyileşme gözlenmiştir.

5.3.2 Mıknatıs Kalınlığının Motor Performansına Etkisi

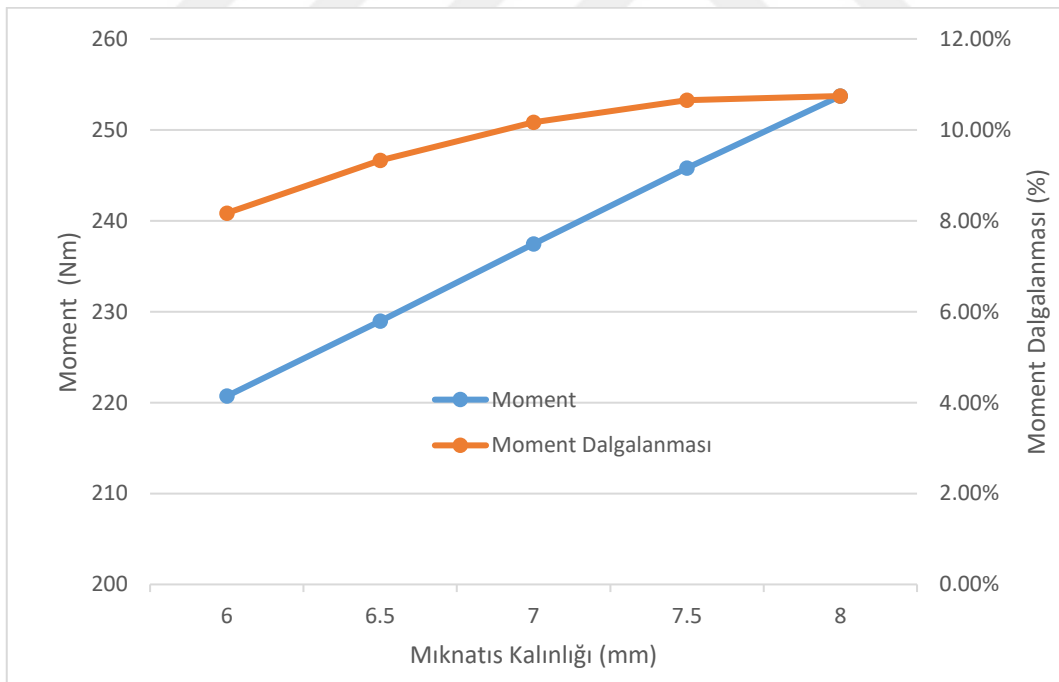
Rib uzunluğunun belirlenmesinin ardından uygun mıknatıs kalınlığı için rotor geometrisinin imkanları dahilinde analizler gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.17’de mıknatıs kalınlığının etkisi 6 mm ile 8 mm arasında 0,5 mm’lik artışlarla incelenmiş ve motor performansına etkisi paylaşılmıştır.

Tablo 5.17 U şekilli GSMSM’de mıknatıs kalınlığının etkisi

Mıknatıs Kalınlığı (mm)	Moment (Nm)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Ld (mH)	Lq (mH)
6	220,71	8,17	90,88	2,623	6,189
6,5	228,97	9,33	90,64	2,588	6,178
7	237,45	10,17	90,14	2,415	6,002
7,5	245,8	10,65	89,89	2,382	5,976
8	253,72	10,74	89,61	2,342	5,946

Tablo 5.17’de görüldüğü üzere mıknatıs kalınlığının artışı ile birlikte momentte doğrusal bir artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte moment dalgalanması 6 mm için en düşük seviyede elde edilmiştir. Mıknatıs kalınlığının artması ile verimin de düştüğü görülmektedir.

Şekil 5.22’de mıknatıs kalınlığına bağlı “moment ve moment dalgalanması” analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.22 Mıknatıs kalınlığına bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları

Şekil 5.22’de görüldüğü gibi moment ve moment dalgalanması dikkate alındığında mıknatıs kalınlığının 6 mm olmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. Tasarımın

diğer aşamalarında mıknatıs kalınlığı 6 mm olarak tercih edilmiştir. Seçilen bu mıknatıs kalınlığı değeri başlangıçta belirlenen değer olduğu için Rib uzunluğunun belirlenmesi sonrası moment, çıkış gücü ve moment dalgalanmasında değişiklik olmamıştır.

5.3.3 Mıknatıs Genişliğinin Motor Performansına Etkisi

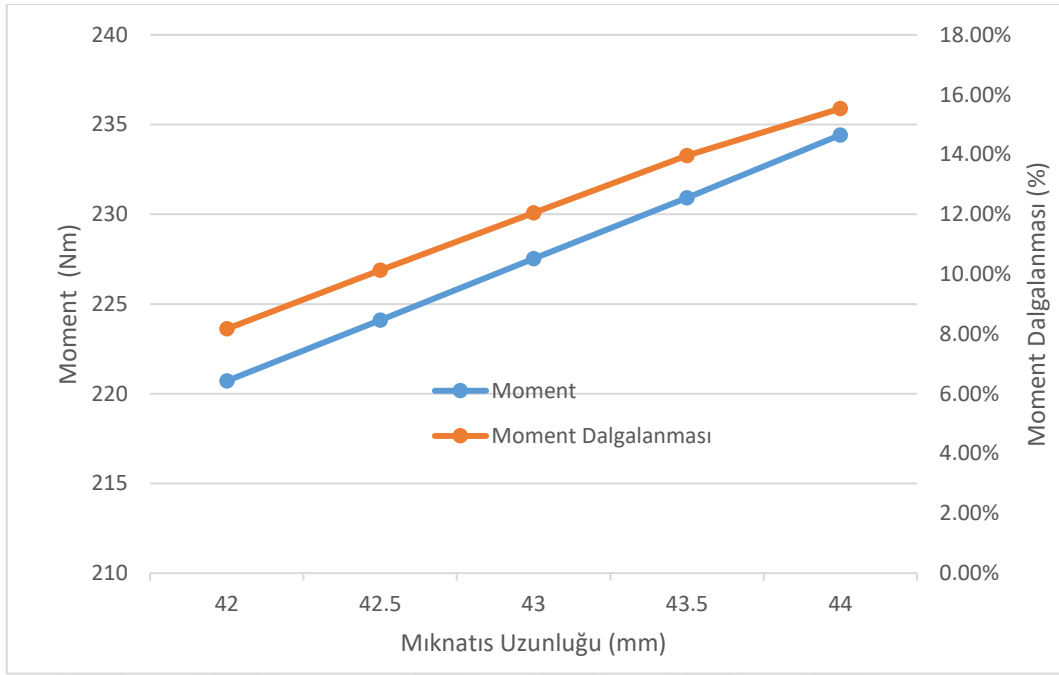
Rib uzunluğu ve mıknatıs kalınlığının belirlenmesinin ardından uygun mıknatıs genişliği için rotor geometrisinin imkanları dahilinde analizler gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.18’de mıknatıs genişliğinin etkisi 42 mm ile 44 mm arasında 0,5 mm’lik artışlarla incelenmiş ve motor performansına etkisi paylaşılmıştır.

Tablo 5.18 U şekilli GSMSM’de mıknatıs genişliğinin etkisi

Mıknatıs Genişliği (mm)	Moment (Nm)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Ld (mH)	Lq (mH)
42	220,71	8,17	90,88	2,623	6,189
42,5	224,1	10,13	90,88	2,560	6,110
43	227,53	12,05	90,77	2,539	6,084
43,5	230,92	13,96	90,67	2,520	6,059
44	234,42	15,54	90,54	2,496	6,022

Tablo 5.18’de görüldüğü üzere mıknatıs genişliğinin artışı ile birlikte momentte az miktarda da olsa doğrusal bir artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte moment dalgalanmasının arttığı, verim de ise düşüş olduğu görülmektedir.

Şekil 5.23’te mıknatıs genişliğine bağlı “moment ve moment dalgalanması” analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.23 Mıknatıs genişliğine bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları

Şekil 5.23'te görüldüğü gibi moment ve moment dalgalanması dikkate alındığında mıknatıs genişliğinin 42 mm olmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. Diğer mıknatıs genişliği değerleri için moment dalgalanması 42 mm değerine moment dalgalanmasına göre daha yüksektir. Bu sebeple tasarımın diğer aşamalarında mıknatıs genişliği değeri 42 mm tercih edilmiştir. Seçilen bu mıknatıs genişliği değeri başlangıçta belirlenen değer olduğu için mıknatıs kalınlığının belirlenmesi sonrası moment, çıkış gücü ve moment dalgalanmasında değişiklik olmamıştır.

5.3.4 O Mesafesinin Motor Performansına Etkisi

Diğer parametrelerin belirlenmesinin ardından mıknatıs alt uçlarının rotor iç çapına uzaklığı olan O mesafesi için rotor geometrisinin imkanları dahilinde analizler gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.19'da O mesafesinin etkisi 2,5 mm ile 5,5 mm arasında 1 mm'lik artışlarla incelenmiş ve motor performansına etkisi paylaşılmıştır.

Tablo 5.19 U şekilli GSMSM'de O mesafesinin etkisi

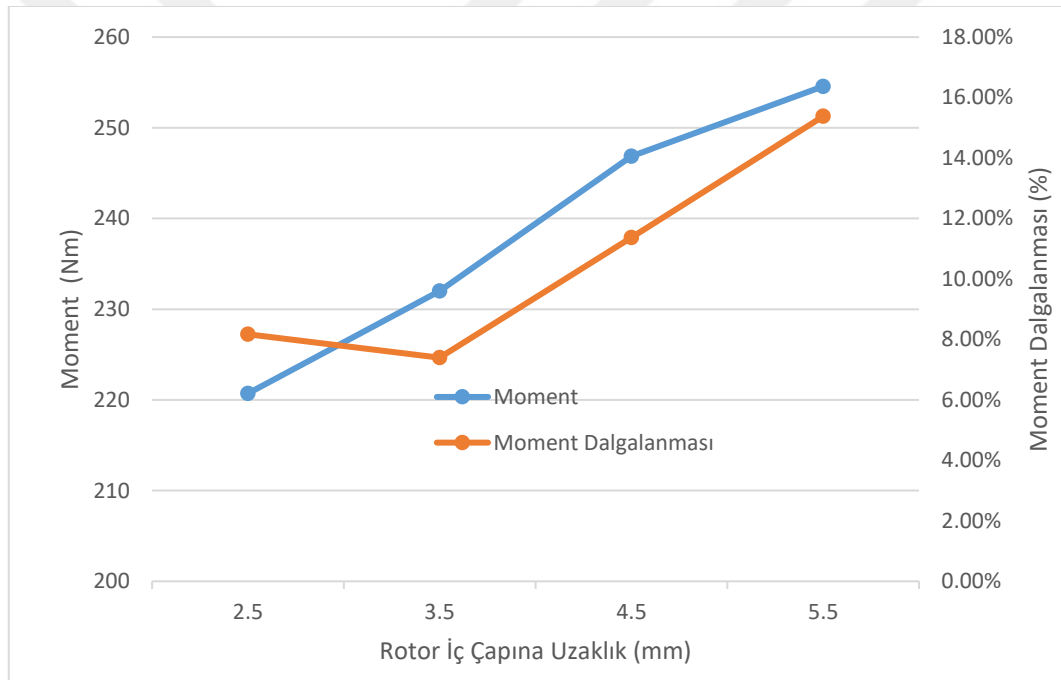
O (mm)	Moment (Nm)	Moment Dalgalanması (%)	Verim (%)	Ld (mH)	Lq (mH)

Tablo 5.19 U şekilli GSMSM’de O mesafesinin etkisi (devamı)

2,5	220,71	8,17	90,88	2,623	6,189
3,5	232,1	7,40	90,64	2,558	6,129
4,5	246,85	11,37	90,67	2,536	6,122
5,5	254,57	15,38	90,85	2,514	6,115

Tablo 5.19’da görüldüğü üzere O mesafesinin artışı ile birlikte momentte doğrusal bir artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte moment dalgalanması 3,5 mm için düşük seviyededir. Verim ise 2,5 mm değeri için en yüksek seviyedir.

Şekil 5.24’te O mesafesine bağlı “moment ve moment dalgalanması” analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.24 O mesafesine bağlı moment ve moment dalgalanması analiz sonuçları

Şekil 5.24’te görüldüğü gibi moment ve moment dalgalanması dikkate alındığında O mesafesinin 3,5 mm olmasının uygun olduğuna karar verilmiştir. Bu seçilen değer ile moment dalgalanması en düşük seviyede olup, moment değeri de referans GSMSM ile yakın bir değer elde edilmiştir. Seçilen bu O mesafesi değeri ile moment ve çıkış gücünde %5 artış, moment dalgalanmasında da %10 iyileşme gözlenmiştir.

O mesafesinin de belirlenmesi ile birlikte nihai boyutlandırma tamamlanmıştır.

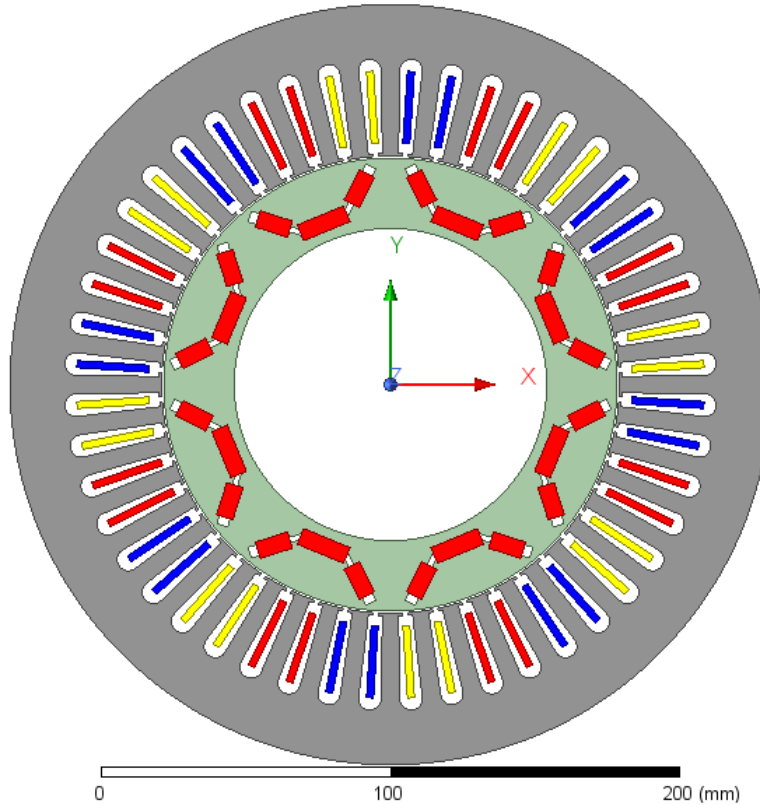
5.3.5 Nihai Yapıdaki U Şekilli GSMSM Analizleri

U şekilli GSMSM nihai yapısı; Rib uzunluğu 8 mm ile 13 mm arasında 1 mm artışlarla, mıknatıs kalınlığı 6 mm ile 8 mm arasında 0,5 mm artışlarla, mıknatıs genişliği 42 mm ile 44 mm arasında 0,5 mm artışlarla, O mesafesi 2,5 mm ile 5,5 mm arasında 1 mm artışlarla analizler yapılarak belirlenmiştir. Tablo 5.20’de U şekilli GSMSM için parametrik analizler sonucu belirlenen boyutlar paylaşılmıştır.

Tablo 5.20 U şekilli GSMSM nihai boyutları

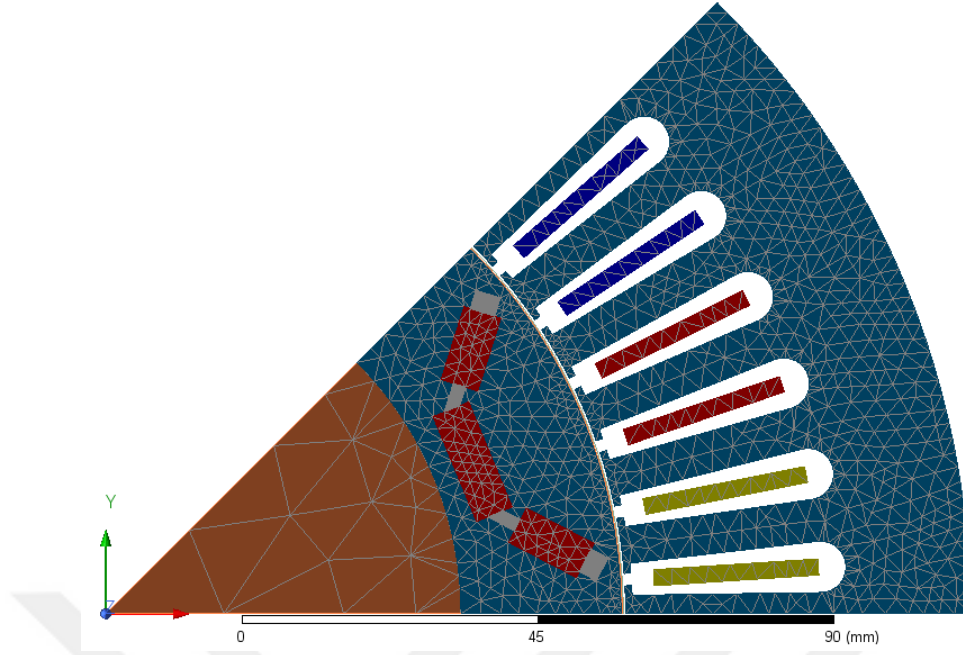
Rib	10 mm
Mıknatıs kalınlığı	6 mm
Mıknatıs genişliği	42 mm
O	3,5 mm

Belirlenen nihai boyutlar ile ANSYS Maxwell programında oluşturulan 2D model, Şekil 5.25’te verilmiştir.



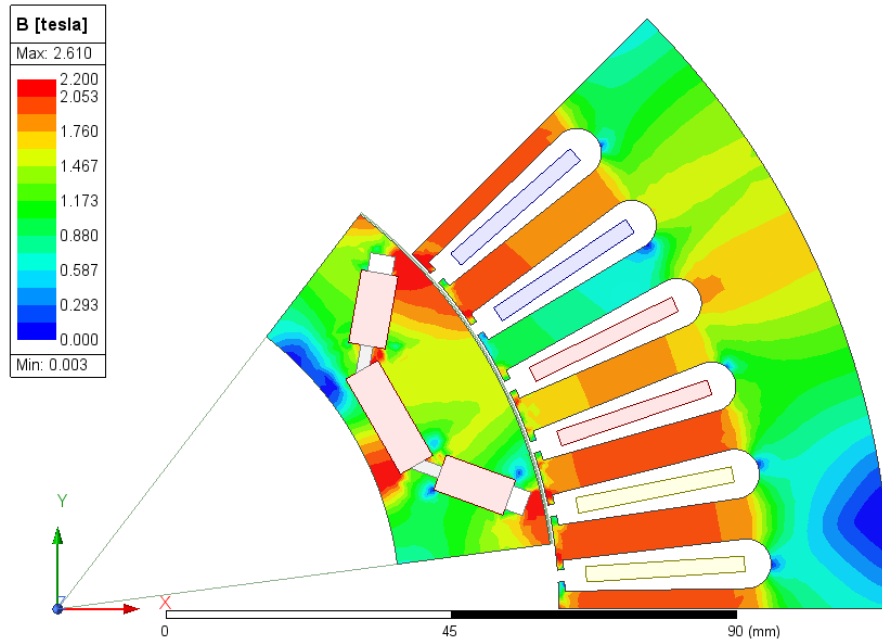
Şekil 5.25 U şekilli GSMSM nihai tasarım 2D modeli

Nihai tasarım sonrası gerçekleştirilen analizlerde kullanılan ağ yapısı Şekil 5.26’da verilmiştir.



Şekil 5.26 U şekilli GSMSM ağ yapısı

Nihai U şekilli GSMSM'nin manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 5.27'de verilmiştir.

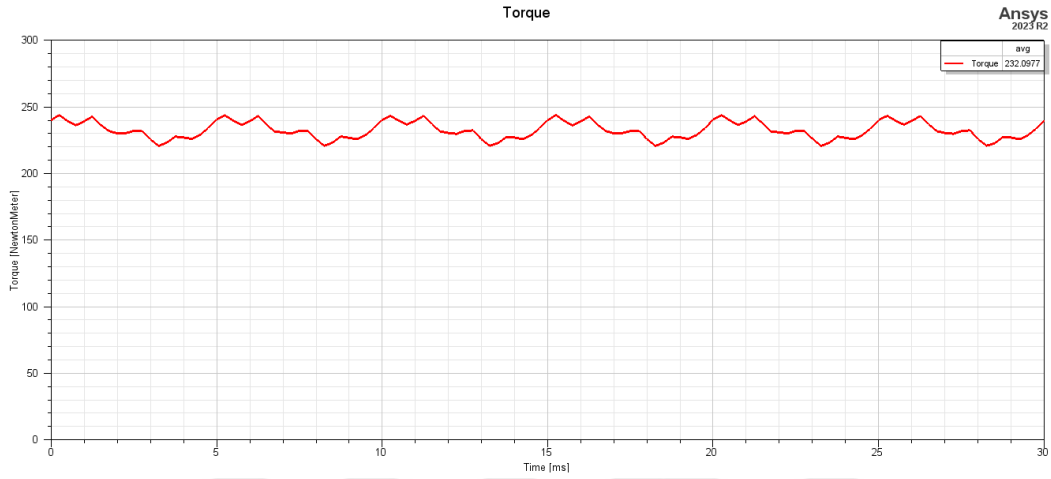


Şekil 5.27 U şekilli GSMSM manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 5.27'de verilen U şekilli GSMSM manyetik akı yoğunluğu dağılımı incelendiğinde; stator dışlarında 1,8 ile 2 T arasında, stator boyunduruğunda 1,1 ile 1,2 T değerleri aldığı görülmektedir. Stator dışlarının hava aralığına yakın

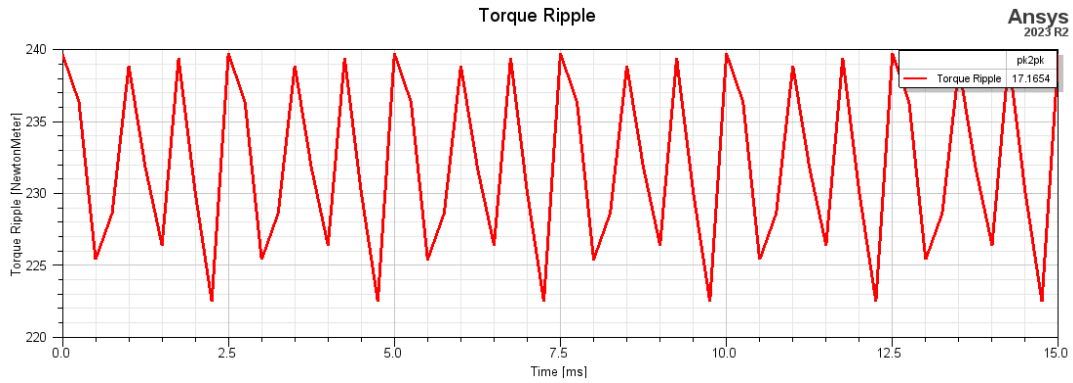
bölgelerinde 2,1 T manyetik akı yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Rotor boyunduruğunda 1,4 ile 1,6 T ve rotorun hava aralığına yakın bölgelerde ise 2,5 ile 2,6 T arasında manyetik akı yoğunluğu değerleri elde edilmiştir.

U şekilli GSMSM nihai yapısı ile gerçekleştirilen analizlerde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir. Analizler sonucu elde edilen moment grafiği Şekil 5.28’de verilmiştir.



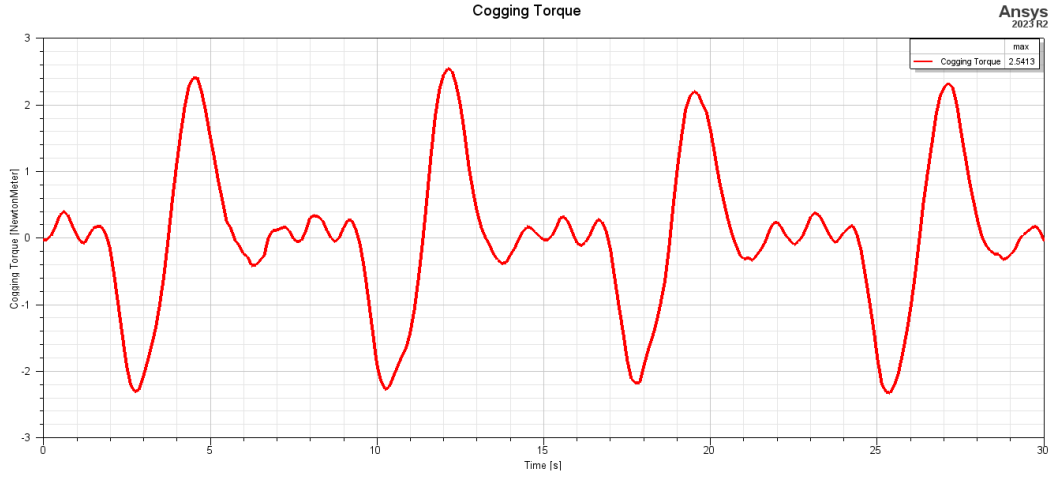
Şekil 5.28 U şekilli GSMSM moment grafiği

250 A besleme akımı ve 1200 rpm hızda referans GSMSM momenti ortalama 232,1 Nm olarak edilmiştir. Şekil 5.29’da aynı şartlar altında momentte meydana gelen dalgalanma verilmiştir.



Şekil 5.29 U şekilli GSMSM moment dalgalanması

Ortalama 232,1 Nm moment elde edildiği durumda moment meydana gelen dalgalanma miktarı %7,4 (17 Nm)’dir. Bu dalgalanma miktarının, moment değerine göre iyi bir seviyede olduğu değerlendirilebilir. Vuruntu momenti grafiği de Şekil 5.30’da verilmiştir.



Şekil 5.30 U şekilli GSMSM vurunu momenti grafiği

Düz şekilli GSMSM vurunu momenti ölçümü, referans GSMSM ile benzer şekilde herhangi bir besleme olmaksızın 1 derece/saniye dönüş hızı altında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonucunda vurunu momenti 2,54 Nm olarak elde edilmiştir.

Düz şekilli GSMSM ile gerçekleştirilen analizler sonrası elde edilen sonuçlar Tablo 5.21’de verilmiştir.

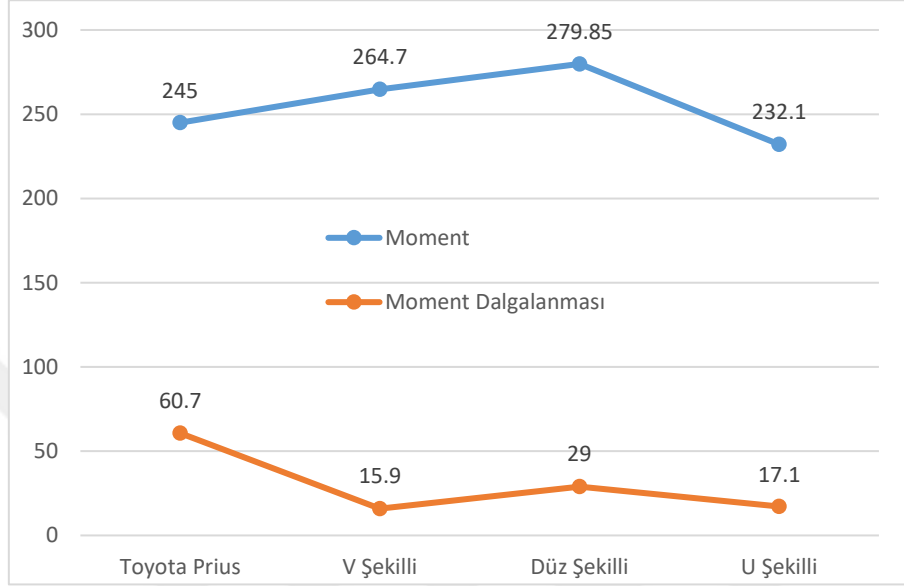
Tablo 5.21 U şekilli GSMSM analiz sonuçları

Moment	232,1 Nm
Moment dalgalanması	%7,4 (17 Nm)
Vurunu momenti	2,54 Nm
Verim	%90,6

Sonuç olarak bu başlıkta, U şekilli GSMSM ile parametrik analizler gerçekleştirilmiş ve nihai bir tasarım elde edilmiştir. Ardından nihai U şekilli GSMSM, ANSYS Maxwell programında modellenmiş ve performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde elde sonuçlara göre U şekilli GSMSM, referans GSMSM’den daha az moment ve vurunu momentine sahiptir. Bununla birlikte moment dalgalanması değeri, referans GSMSM’ye göre düşük seviyelerdedir. Ayrıca U şekilli GSMSM’nin verim değeri de referans GSMSM’ye göre düşüktür.

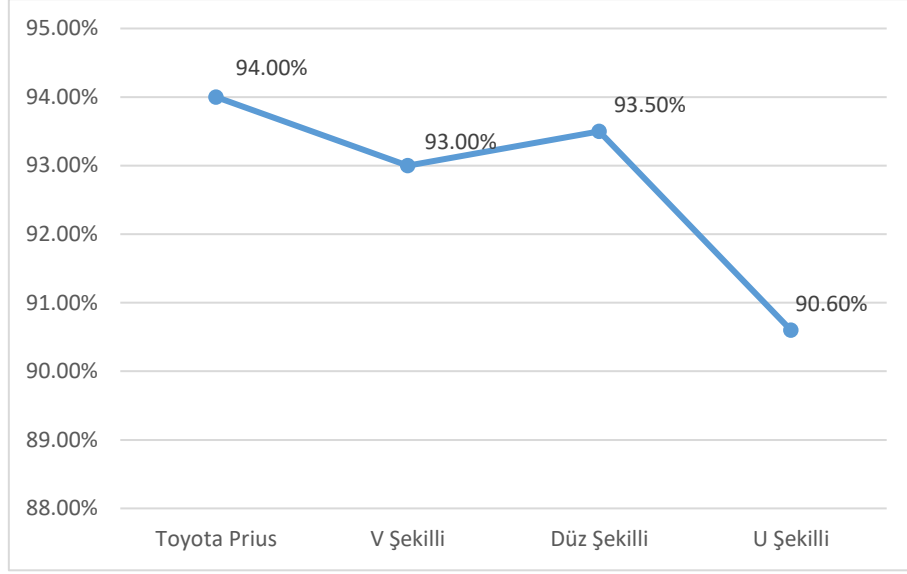
5.4 Modellerin Karşılaştırılması

Toyota Prius elektrik motoru ve karşılaştırılacak diğer modellerin analizleri sonrası elde edilen sonuçlar bu başlık altında karşılaştırılmıştır. Modellerin moment ve moment dalgalanması karşılaştırma grafiği Şekil 5.31’de verilmiştir.



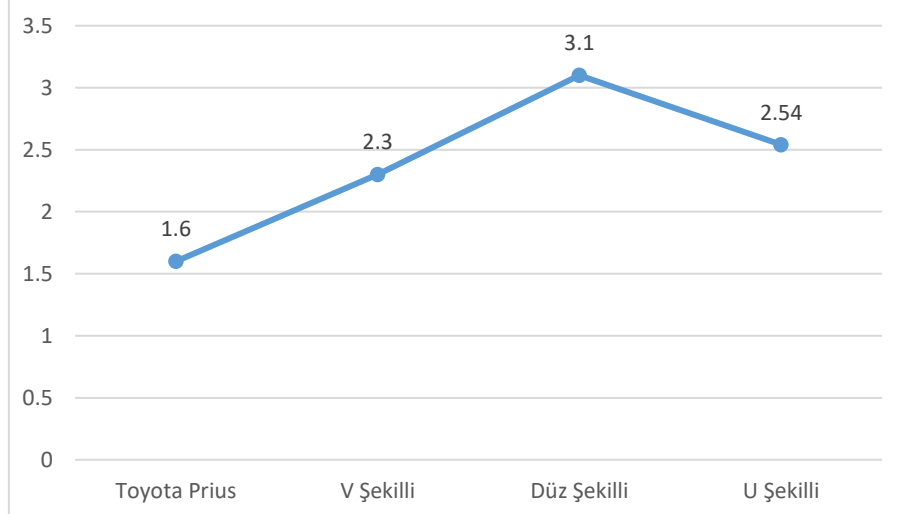
Şekil 5.31 Moment ve moment dalgalanması karşılaştırma grafiği

Şekil 5.31’de görüldüğü üzere düz şekilli ve V şekilli GSMSM referans GSMSM’den daha yüksek moment sahipken, U şekilli GSMSM daha düşük momente sahiptir. Moment dalgalanması bakımından da tüm GSMSM’ler referans GSMSM’den daha iyi seviyededir. Moment ve moment dalgalanması oranlarına bakıldığında V şekilli GSMSM en iyi seviyededir. Modellerin verim karşılaştırma grafiği Şekil 5.32’te verilmiştir.



Şekil 5.32 Verim karşılaştırma grafiği

Analizler sonucu referans GSMSM'nin verimi en yüksek seviyededir. Ancak V şekilli ve düz şekilli GSMSM'nin verim değerleri de referans GSMSM'ye yakın elde edilmiştir. U şekilli GSMSM'nin ise verim değeri en düşük seviyededir. Son olarak vuru mentu momenti karşılaştırma grafiği Şekil 5.33'te verilmiştir.



Şekil 5.33 Vuruntu momenti karşılaştırma grafiği

Mıknatıs yapılarının değişmesi ve hacimlerinin artmasının da etkisiyle tüm GSMSM'lerde vuru mentu moment değeri referans GSMSM'den yüksek elde edilmiştir. Ancak moment ve güç seviyeleri dikkate alındığında elde edilen değerler kabul edilebilir sınırlar içinde kalmaktadır.

Sonuç olarak bu bölümde, farklı rotor topolojilerine sahip GSMSM’lerin modellenmesi ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Ardından elde edilen sonuçlar, referans GSMSM’den elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.



6 SONUÇ

EA’larda kullanılan GSMSM’nin analizi ve farklı rotor topolojilerinin karşılaştırılması aşamalarında elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda verilmiştir.

- Tasarım ve analiz çıktıları paylaşılan Toyota Prius elektik motorunun; literatürdeki modelleme, analiz ve test çalışmaları incelenmiştir.
- Bu incelemeler sonrası Toyota Prius elektrik motorunun ANSYS Maxwell programında iki boyutta modelleme ve performans analizleri gerçekleştirilmiştir.
- Analiz sonuçları; moment, moment dalgalanması, vurutu momenti ve verim olmak üzere paylaşılmıştır. Referans GSMSM’nin analiz sonuçlarında 245 Nm moment, %24,5 (60,7 Nm), vurutu momenti 1,6 Nm ve verim değeri %94 olarak elde edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarının literatürde incelenen çalışmalar ile örtüştüğü görülmüştür.
- Farklı rotor topolojilerinin modellemesi ve analizi için Toyota Prius elektrik motorunun; stator boyutları, sargı yapısı, rotor boyutları, manyetik malzeme türü ve sürekli mıknatıs malzeme türü gibi bilgiler referans GSMSM ile aynı olacak şekilde modellenmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir.
- Farklı rotor topolojilerinin başlangıç parametreleri literatürde yapılan farklı çalışmalardan ve daha önce üretilmiş elektrik motoru bilgileri göz önünde bulundurularak belirlenmiştir.
- Bu modeller; iki kutup arası mesafe (Rib), mıknatıs kalınlığı (w), mıknatıs genişliği (l) ve mıknatıs alt uçlarının rotor iç çapına uzaklığı (O) parametreleri değiştirilerek optimize edilmiştir.
- Referans GSMSM’nin ardından ilk olarak referans GSMSM ile aynı mıknatıs şekline sahip V şekilli GSMSM modellemesi ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Başlangıç parametreleri ile gerçekleştirilen analizler sonucunda; moment 169 Nm, moment dalgalılığı %10 (17 Nm) ve verim %92,78 olarak elde edilmiştir.
- Bunun akabinde sırasıyla Rib, mıknatıs kalınlığı, mıknatıs genişliği ve O mesafesi parametreleri değiştirilerek tasarım optimize edilmiştir.

- Ardından optimize tasarım ANSYS Maxwell programında iki boyutta modellenmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda; moment 264,7 Nm, moment dalgalılığı %6 (15,9 Nm), verim %93 ve vuruuntu momenti 2,3 Nm olarak elde edilmiştir. Başlangıç tasarımına göre momentte %56 artış, moment dalgalanmasında da moment artışına rağmen %40'lık bir iyileşme sağlanmıştır.
- V şekilli GSMSM'nin ardından düz şekilli GSMSM'nin modelleme ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Başlangıç parametreleri ile gerçekleştirilen analizler sonucunda; moment 206,15 Nm, moment dalgalılığı %8,5 (17,5 Nm) ve verim %92,62 olarak elde edilmiştir.
- Bunun akabinde sırasıyla Rib, mıknatıs kalınlığı, mıknatıs genişliği ve O mesafesi parametreleri değiştirilerek tasarım optimize edilmiştir. Daha sonra optimize tasarım ANSYS Maxwell programında iki boyutta modellenmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda; moment 279,85 Nm, moment dalgalılığı %9 (29 Nm), verim %93,5 ve vuruuntu momenti 3,1 Nm olarak elde edilmiştir. Başlangıç tasarımına göre momentte %35, moment dalgalanmasında ise %5'lik bir artış sağlanmıştır.
- Son olarak U şekilli GSMSM'nin modelleme ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Başlangıç parametreleri ile gerçekleştirilen analizler sonucunda; moment 200,25 Nm, moment dalgalılığı %8,9 (17,9 Nm) ve verim %90,69 olarak elde edilmiştir.
- Ardından sırasıyla Rib, mıknatıs kalınlığı, mıknatıs genişliği ve O mesafesi parametreleri değiştirilerek tasarım optimize edilmiştir. Daha sonra optimize tasarım ANSYS Maxwell programında iki boyutta modellenmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda; moment 232,1 Nm, moment dalgalılığı %7,4 (17,1 Nm), verim %90,6 ve vuruuntu momenti 2,54 Nm olarak elde edilmiştir. Başlangıç tasarımına göre momentte %16 artış, moment dalgalanmasında ise %17'lik iyileşme sağlanmıştır.
- Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar dikkate alındığında moment ihtiyacının yüksek olduğu uygulamalarda düz şekilli GSMSM tercih edilebilir. Ancak moment dalgalanmasının da kritik olduğu uygulamalarda yüksek moment seviyesine rağmen düşük moment dalgalanması sahip V şekilli GSMSM tercih edilebilir. Verimler bakımından da V şekilli ve düz

şekilli GSMSM ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte vurutu momenti bakımından V şekilli ve U şekilli GSMSM’ler düşük değerlere sahiptir.

Gelecek çalışmalar kapsamında da;

- Tasarımı gerçekleştirilen GSMSM’lerde rotor veya statora kayk verılarak moment dalgalanması ve vurutu momenti değişiminin incelenmesi
- Mıknatıs türü değiştirilerek performans karakteristiklerinin incelenmesi
- Mıknatısların kenarında bulunan akı köprülerinin manyetik akı, moment, moment dalgalılığı üzerindeki etkilerin incelenmesi
- Rotor topolojisi ve mıknatıs geometrisinin relüktans momenti üzerindeki etkilerinin incelenmesi

gibi çalışmalar gerçekleştirilebilir.

- [1] Z. Cao, A. Mahmoudi, S. Kahourzade and W. L. Soong, "An Overview of Electric Motors for Electric Vehicles," 2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Perth, Australia, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/AUPEC52110.2021.9597739.
- [2] <https://ev.hedeffilo.com/> erişim tarihi 10/01/2024
- [3] M. Ehsani, Yimin Gao and S. Gay, "Characterization of electric motor drives for traction applications," IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No.03CH37468), Roanoke, VA, USA, 2003, pp. 891-896 vol.1, doi: 10.1109/IECON.2003.1280101.
- [4] N. Hashemnia and B. Asaei, "Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles," 2008 18th International Conference on Electrical Machines, Vilamoura, Portugal, 2008, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800157.
- [5] M. Yildirim, M. Polat and H. Kürüm, "A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles," 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, Turkey, 2014, pp. 218-223, doi: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980715.
- [6] S. J. Rind, Y. Ren, Y. Hu, J. Wang and L. Jiang, "Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review," in Chinese Journal of Electrical Engineering, vol. 3, no. 3, pp. 1-17, December 2017, doi: 10.23919/CJEE.2017.8250419.
- [7] D. U. Thakar and R. A. Patel, "Comparison of Advance and Conventional Motors for Electric Vehicle Application," 2019 3rd International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE), Noida, India, 2019, pp. 137-142, doi: 10.1109/RDCAPE47089.2019.8979092.
- [8] A. Krings and C. Monissen, "Review and Trends in Electric Traction Motors for Battery Electric and Hybrid Vehicles," 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg, Sweden, 2020, pp. 1807-1813, doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9270946.
- [9] T. M. Jahns et al., "Design and Experimental Verification of a 50 kW Interior Permanent Magnet Synchronous Machine," Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, FL, USA, 2006, pp. 1941-1948, doi: 10.1109/IAS.2006.256801.
- [10] K.-C. Kim, J. Lee, H. J. Kim and D.-H. Koo, "Multiobjective Optimal Design for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 3, pp. 1780-1783, March 2009, doi: 10.1109/TMAG.2009.2012820.
- [11] F. Rong and D. Manfeng, "Optimization design and analysis of a 30kW interior permanent magnet synchronous motor used in electric vehicles," 2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sapporo, Japan, 2012, pp. 1-5.

- [12] R. Benlamine, F. Dubas, C. Espanet, S. A. Randi and D. Lhotellier, "Design of an Axial-Flux Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor for Automotive Application: Performance Comparison with Electric Motors Used in EVs and HEVs," 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Coimbra, Portugal, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2014.7007043.
- [13] X. Liu, H. Chen, J. Zhao and A. Belahcen, "Research on the Performances and Parameters of Interior PMSM Used for Electric Vehicles," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 6, pp. 3533-3545, June 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2524415.
- [14] J. Yan, K. Yang, S. Zhang, Y. Feng, Y. Chen, and H. Yang, "Comparative investigation of inset-type and V-type IPMSM for light electric vehicle," International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 54, no. 4, pp. 515–524, Jan. 2017.
- [15] C. Zhou, X. Huang, Y. Fang and L. Wu, "Comparison of PMSMs with Different Rotor Structures for EV Application," 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece, 2018, pp. 609-614, doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8507258.
- [16] S. Pastellides, S. Gerber and R.-J. Wang, "Design Strategy and Comparison of Four PM Motor Topologies for a 2kW Traction Application," 2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA), Bloemfontein, South Africa, 2019, pp. 358-363, doi: 10.1109/RoboMech.2019.8704829.
- [17] T. Husain and S. T. Lee, "Design Considerations for Magnet Configurations in IPM Rotor for High Speed Traction Applications," 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 6062-6069, doi: 10.1109/ECCE.2019.8912958.
- [18] I. Văscan, F. P. Piglesan, C. Marțiș and I. Bârsan, "PMSM Rotor Topologies for Automotive HVAC System," 2019 Electric Vehicles International Conference (EV), Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/EV.2019.8892852.
- [19] A. H. Levent, A. Lordoglu and M. G. Aydeniz, "Design and Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Applications," 2020 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Izmir, Turkey, 2020, pp. 148-151.
- [20] X. Zhao, Z. Sun and Y. Xu, "Multi-Objective Optimization Design of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Genetic Algorithm," 2020 2nd International Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence (MLBDBI), Taiyuan, China, 2020, pp. 405-409, doi: 10.1109/MLBDBI51377.2020.00086.
- [21] N. Murali, S. Ushakumari and M. V. P, "Performance comparison between different rotor configurations of PMSM for EV application," 2020 IEEE REGION 10 CONFERENCE (TENCON), Osaka, Japan, 2020, pp. 1334-1339, doi: 10.1109/TENCON50793.2020.9293844.
- [22] A.-I. Constantin, C. Dumitru, E. Tudor, G. Circiumaru and M. Arsene, "Design and Comparison of Different Rotor Topologies at Liquid-Cooled Permanent

- Magnet Synchronous Machines for Electric Vehicles," 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ATEE52255.2021.9425122.
- [23] L. Balasubramanian, N. A. Bhuiyan, A. Javied, A. A. Fahmy, F. Belblidia and J. Sienz, "Design and Optimization of Interior Permanent Magnet (IPM) Motor for Electric Vehicle Applications," in CES Transactions on Electrical Machines and Systems, vol. 7, no. 2, pp. 202-209, June 2023, doi: 10.30941/CESTEMS.2023.00021.
- [24] S. Li, W. Tong, S. Wu and R. Tang, "Analytical Model for Electromagnetic Performance Prediction of IPM Motors Considering Different Rotor Topologies," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 59, no. 4, pp. 4045-4055, July-Aug. 2023, doi: 10.1109/TIA.2023.3268639.
- [25] Y. Cheng, L. Ding, T. Zhao and S. Cui, "Design and Optimization of Electric Vehicle Traction Motor Considering Rotor Topology and Manufacturing Uncertainty," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 71, no. 5, pp. 5034-5044, May 2024, doi: 10.1109/TIE.2023.3288195.
- [26] P. Ramesh and N. C. Lenin, "High Power Density Electrical Machines for Electric Vehicles—Comprehensive Review Based on Material Technology," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 55, no. 11, pp. 1-21, Nov. 2019, Art no. 0900121, doi: 10.1109/TMAG.2019.2929145.
- [27] Y. A. Alamoudi, A. Ferrah, R. Panduranga, A. Althobaiti and F. Mulolani, "State-of-the Art Electrical Machines for Modern Electric Vehicles," 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), Dubai, United Arab Emirates, 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/ICASET.2019.8714343.
- [28] M. Yilmaz, "Limitations/capabilities of electric machine technologies and modeling approaches for electric motor design and analysis in plug-in electric vehicle applications," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 52, pp. 80–99, Dec. 2015.
- [29] Krishnan, R. (2017). Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives. CRC press.
- [30] Gieras, J. F. (2009). Permanent magnet motor technology: design and applications. CRC press.
- [31] Pyrhonen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova, V. (2013). Design of rotating electrical machines. John Wiley & Sons.
- [32] Hanselman, D. C. (2003). Brushless permanent magnet motor design. The Writers' Collective.
- [33] Hendershot, J. R., & Miller, T. J. E. (1995). Design of brushless permanent-magnet motors. Oxford university press.
- [34] https://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell2D_V15.pdf erişim tarihi 01/11/2023
- [35] Staunton, R. H., Ayers, C. W., Marlino, L. D., Chiasson, J. N., & Burrell, B. A. (2006). Evaluation of 2004 Toyota Prius hybrid electric drive system (No. ORNL/TM-2006/423). Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).

- [36] <https://www.shinetsu.co.jp/serem/e/download/N36Zsheet.pdf> erişim tarihi 12/12/2023
- [37] Hsu, J. S. (2004). Report on Toyota/Prius motor torque-capability, torque-property, no-load back EMF, and mechanical losses (No. ORNL/TM-2004/185). Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).
- [38] E. Mese, M. Tezcan, M. Ayaz, Y. Yasa and K. Yilmaz, "Design considerations for dual winding permanent magnet synchronous machines," 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Raleigh, NC, USA, 2012, pp. 1894-1901, doi: 10.1109/ECCE.2012.6342581.
- [39] A. Das, A. Konwar, A. Dalal and P. Kumar, "Investigation of PMSM motor performance with different magnet configurations and rotor surface profiling," 2015 IEEE International Transportation Electrification Conference (ITEC), Chennai, India, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/ITEC-India.2015.7386906.
- [40] E. A. Grunditz and T. Thiringer, "Performance Analysis of Current BEVs Based on a Comprehensive Review of Specifications," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 2, no. 3, pp. 270-289, Sept. 2016, doi: 10.1109/TTE.2016.2571783.
- [41] F. Momen, K. Rahman and Y. Son, "Electrical Propulsion System Design of Chevrolet Bolt Battery Electric Vehicle," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 1, pp. 376-384, Jan.-Feb. 2019, doi: 10.1109/TIA.2018.2868280.
- [42] Y. Yang et al., "Design and Comparison of Interior Permanent Magnet Motor Topologies for Traction Applications," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 3, no. 1, pp. 86-97, March 2017, doi: 10.1109/TTE.2016.2614972.
- [43] M.-H. Hwang, J.-H. Han, D.-H. Kim, and H.-R. Cha, "Design and Analysis of Rotor Shapes for IPM Motors in EV Power Traction Platforms," Energies, vol. 11, no. 10, p. 2601, Sep. 2018.
- [44] Z. Yang, M. Krishnamurthy and I. P. Brown, "Electromagnetic and vibrational characteristic of IPM over full torque-speed range," 2013 International Electric Machines & Drives Conference, Chicago, IL, USA, 2013, pp. 295-302, doi: 10.1109/IEMDC.2013.6556267.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. B. A. BALTA, E. AYÇİÇEK, M. G. AYDENİZ “A Comparative Analysis of the Effect of Different Magnet Configurations on the Performance of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors”, 13th International Congress on Engineering, Architecture and Design, ss.627, İstanbul, Türkiye, 08-09 Haziran, 2024.

