KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YENİ GÖMÜLÜ MIKNATISLI DÜŞÜK HIZLI BİR SENKRON TORK MOTOR TASARIMI, OPTİMİZASYONU, ÜRETİMİ VE DOĞRULAMASI

MURAT ÖNSAL

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YENİ GÖMÜLÜ MIKNATISLI DÜŞÜK HIZLI BİR SENKRON TORK MOTOR TASARIMI, OPTİMİZASYONU, ÜRETİMİ VE DOĞRULAMASI

MURAT ÖNSAL

Doç. Dr. Metin Aydın Danışman,	Kocaeli Üniversitesi	.....
Prof. Dr. Zafer Bingül Jüri Üyesi,	Kocaeli Üniversitesi	.....
Dr. Öğr. Üyesi Emin Yıldırız Jüri Üyesi,	Düzce Üniversitesi	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 11.06.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Dünya üzerinde sürekli mıknatıslanmayı sağlayan yüksek enerjili elementlerin bulunmasının ardından sürekli mıknatıslı motor teknolojisine dönük adımlar atılmaya başlanmıştır. Özellikle eşdeğer ağırlıkta ve hacimde olan diğer motor çeşitlerine göre yüksek verim ve güç sağlamalarından dolayı birçok uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanında sürekli mıknatıslı motorların uygulama bazlı tasarımlarının kolay gerçekleştirebilir olması özel uygulamalarda da tercih sebeplerinden biridir.

Bu açıdan yüksek moment düşük hız uygulamalarında geleneksel redüktör ihtiyacını kaldıran sürekli mıknatıslı motorlar, son yıllarda çok fazla sayıda kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada da özel bir uygulama için özgün bir rotor yapısına sahip, yüksek moment düşük hızlı sürekli mıknatıslı bir senkron motor tasarımı gerçekleştirilmiş ve üretilen prototip üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır.

Bu bağlamda, tecrübesini ve bilgi birikimi esirgemeyen, lisans döneminden buyana bu meslekte daha iyiye doğru ilerlemem adına durmadan tavsiyelerde bulunan, fikirleri sayesinde bugüne gelmeme neden olan ve tez çalışmam süresince de ilgilerini yakından hissettiğim Sn. Doç. Dr. Metin AYDIN'a çok teşekkür ederim. Ayrıca fikirleri ve yönlendirmelerinden dolayı Sn. Yücel DEMİR'e, yardımlarından dolayı çalışma arkadaşım olan Barış CUMHUR'a ve araştırma görevlisi hocam Sn. Ersin YOLAÇAN'a teşekkür ederim.

Motorun prototip üretimini büyük bir özveri ile gerçekleştiren AKIM METAL A.Ş.' ye ve AKIM METAL A.Ş. çalışanı olan Ramazan AKYÜZ'e teşekkürü borç bilirim.

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar ayrıca 7150863 numaralı proje ile Tübitak TEYDEB biriminden ve 2017/112 numaralı proje ile de Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi Koordinasyon Biriminden destek alarak gerçekleştirilmiştir. Katkılarından dolayı her iki kuruma teşekkür ederim.

Son olarak yıllardır her konuda olduğu gibi tez çalışmam süresince de ilgilerini esirgemeyen ve yıllarca manevi destek kaynağım olan babam Adem ÖNSAL'a, annem Zeytin ÖNSAL'a, kardeşlerim Ertan ve Özer ÖNSAL'a ve eğitim hayatım boyunca daimî öğretmenim olan amcam Hakkı ÖNSAL'a sonsuz minnetlerini sunarım.

Haziran - 2018 Murat ÖNSAL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix
ÖZET xi
ABSTRACT xii
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 4
1.1. Sürekli Mıknatıslı Motorlar 6
1.1.1. Radyal akılı sürekli mıknatıslı motor rotor yapıları 7
1.1.2. SM motor temel denklemleri ve matematiksel model 10
1.2. Doğrudan Sürüşlü Sistemler ve SM Senkron Tork Motorları 12
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 13
2.1. Yayın Araştırması 13
2.2. Patent Araştırması 21
2.3. Mevcut Ürünler 27
3. GÖMÜLÜ MIKNATISLI MOTOR ÖN TASARIMI 29
3.1. Tasarım Kriterleri 29
3.2. ÇTGM Motor Ön Tasarım SPEED® Yazılımı ile Kontrolü 30
3.3. Referans Motor Performans Verileri 32
4. GÖMÜLÜ MIKNATISLI MOTOR SONLU ELEMANLAR ANALİZİ 33
4.1. ÇTGM Motor Ön Tasarım SEA Sonuçları 34
4.1.1. Yüksüz durum sonuçları 35
4.1.2. Yüklü durum sonuçları 36
4.2. Klasik ÇTGM Motor Performansının Yüzeyden Mıknatıslı Referans Motor ile Karşılaştırılması 37
4.3. Nihai Tasarım için Rotor Yapısının Değişmesi-Yeni Bir SKGM Motor 39
4.3.1. Manyetik alan destekleyici küçük mıknatıs eklenmesi 40
4.3.2. Küçük mıknatıs açı optimizasyonu 42
4.3.3. Değişken hava aralığı optimizasyonu 43
4.3.4. Değişken hava aralığı SEA sonuçları ve motor için nihai tasarım ortaya çıkması 44
4.4. SKGM Motorun Nihai Tasarım SEA Performans Sonuçları 46
4.4.1. 2B Yüksüz durum performans sonuçları 46
4.4.2. 2B Yüklü durum performans sonuçları 49
4.5. SKGM Motorun 3B SEA ile Doğrulanması ve 2B Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması 49
4.5.1. 3B Yüksüz durum performans sonuçları 50
4.5.2. 3B Yüklü durum performans sonuçları 52
4.6. SKGM Motor Moment-Hız Karakteristiği ve Referans Motor ile Klasik ÇTGM Motorla Karşılaştırılması 52

4.7. SKGM Motorun Referans Motor ve Klasik ÇTGM Motor ile Performans Değerlerinin Karşılaştırılması ve Sonuçlar 55
5. SM MOTOR KAYIP BİLEŞENLERİ VE ÖZGÜN SKGM MOTOR KAYIP DEĞERLERİNİN ELDE EDİLMESİ 56
5.1. SM Motorlarda Demir Kaybı 56
5.1.1. Bertotti demir kaybı hesabı 57
5.1.2. Steinmetz demir kaybı hesabı 58
5.2. SM Motorlarda Bakır Kaybı 61
5.3. SM Motorlarda Deri Etkisi Ve Yakınlık Kayıpları 61
5.4. SM Motorlarda Mıknatıs Kayıpları 63
5.5. SM Motorlarda Mekanik Kayıplar 64
5.5.1. Sürtünme kayıpları 64
5.5.2. Ortam akışkanı kaynaklı kayıplar 65
5.6. SKGM Motor Kayıp Büyüklükleri ve Referans Motor ile Klasik Çubuk Tip GM Motorla Karşılaştırılması 67
6. ÖZGÜN SKGM MOTOR YAPISAL VE TERMAL ANALİZLERİ 70
6.1. Nihai Motorun Yapısal Analizleri ve Sonuçları 70
6.1.1. Statik yapısal analizler 72
6.1.2. Statik yapısal analiz sonuçları 77
6.2. Termal Analizler ve Sonuçlar 77
7. ÖZGÜN SKGM MOTOR PROTOTİP ÜRETİMİ VE DENEYSEL DOĞRULAMASI 82
7.1. Motor Prototip Üretimi 82
7.1.1. Üretimde kullanılan malzemeler 82
7.1.2. Üretim aşamaları 82
7.2. Deneysel Doğrulama Testleri 86
7.2.1. Motor test düzeneği 86
7.2.2. Yüksüz durum performans verilerinin deneysel doğrulanması 87
7.2.3. Yüklü durum performans verilerinin deneysel doğrulanması 90
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 92
KAYNAKLAR 93
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 97
ÖZGEÇMİŞ 98

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması 4
Şekil 1.2. SM motor yapıları, a) iç rotorlu RASM motor, b) dış rotorlu RASM motor, c) tek-stator-tek-rotor EASM motor, d) tek-stator-çift-rotor EASM motor, e) çift-stator-tek-rotor EASM motor..... 7
Şekil 1.3. SM motor yapıları, a) yüzeyden mıknatıslı, b) gömülü mıknatıslı 8
Şekil 1.4. En çok kullanılan üç adet yüzeyden mıknatıslı rotor yapısı, a) radyal mıknatıslanmaya sahip dairesel rotor, b) paralel mıknatıslanmaya sahip köşegen rotor, (c) paralel mıknatıslanmaya sahip dairesel rotor 9
Şekil 1.5. En çok kullanılan iki adet gömülü mıknatıslı rotor yapısı, a) klasik gömülü mıknatıslı rotor yapısı, b) literatürde çubuk yapı olarak adlandırılan gömülü mıknatıslı rotor yapısı..... 10
Şekil 1.6. Sürekli mıknatıslı senkron motorun d-q eksen eşdeğer devresi..... 10
Şekil 1.7. Doğrudan sürüşlü SMST motorkullanış amacı..... 12
Şekil 2.1. Makalede ele alınan stator diş yapısı, a) eşit olmayan diş boyu, b) eşit olan diş boyu 14
Şekil 2.2. Atallah K. ve diğerleri tarafından tasarlanan motor yapısı, (a) motora ait kısımlar, (b) manyetik fren ile birlikte motor yapısı 15
Şekil 2.3. Farklı iki stator yapısına sahip motor yapısı, (a) karşıdan görünüş ve motor parçaları, (b) motora ait üç boyutlu (3B) görünüm 16
Şekil 2.4. Castellini I. ve diğerleri tarafından yapılan çalışma, (a) Stator sargı yapısı, (b) Rotor yapısı 17
Şekil 2.5. Liu G. ve diğerleri tarafından yapılan çalışma, (a) motor yapısı, (b) prototip motor..... 18
Şekil 2.6. Onsal M. ve diğerleri tarafından yapılan çalışmadaki rotor yapısı..... 19
Şekil 2.7. Optimum tasarım yüksüz durum akı yoğunlukları, (a) yüzeyden mıknatıslı rotor, (b) sıralı mıknatıslı rotor 20
Şekil 2.8. Çubuk tip gömülü mıknatıslı motor yapısı, (a) geleneksel yapı, (b) alternatif yapı 21
Şekil 2.9. 36 oluk 46 kutuplu motor yapısı 22
Şekil 2.10. Gömülü mıknatıslı rotor yapısı ve mıknatısların yapısı..... 22
Şekil 2.11. Motor ve sargı yapısı 23
Şekil 2.12. Motora ait rotor yapısı ve akı dağılımı 23
Şekil 2.13. Tork motoru ve koruma elemanı..... 24
Şekil 2.14. Oluk kutup etkileşimi sonucu hava aralığı akı dağılımı 25
Şekil 2.15. Mıknatısların yerleştirildiği ve 2 iki farklı tasarıma sahip olan yan koruma çıkıntıları..... 25
Şekil 2.16. Doğrudan sürüşlü motor yapısı..... 26
Şekil 2.17. Sürekli mıknatıslı motor stator yapısı..... 26
Şekil 2.18. Kollmorgen TBM serisi tork motorları..... 27
Şekil 2.19. Etel firması tok motor ürünleri 28
Şekil 2.20. Fischer firmasına ait TI serisine ait bir tork motoru 28
Şekil 2.21. Allied Motion firmasına ait HT serisine ait bir tork motoru..... 28

Şekil 3.1. Tasarım kriterlerini göz önüne alındığında motor moment-hız karakteristiği 30
Şekil 3.2. ÇTGM motora ait SPEED® modeli, MMF dağılımı ve sargı şeması..... 31
Şekil 3.3. ÇTGM motora ait SPEED® performans analiz sonuçları ve motor moment-hız karakteristiği 31
Şekil 4.1. Ön tasarım sonucu oluşan klasik ÇTGM motor, (a) Flux® SEA modeli, (b) mesh yapısı..... 35
Şekil 4.2. Ön tasarım sonucu ortaya çıkan klasik ÇTGM motora ait, (a) yüksüz durum akı yoğunluğu seviyeleri, (b) akı çizgileri 35
Şekil 4.3. Ön tasarım sonucu elde edilen yapının vuruntu momenti değişimi..... 36
Şekil 4.4. Ön tasarım sonucu elde edilen yapının faz ve hat Zıt-EMK değişimi..... 36
Şekil 4.5. Ön tasarım sonucu elde edilen yapının ortalama moment değişimi..... 37
Şekil 4.6. Büyük mıknatıs yapısında lm ve wm büyüklüklerinin anlamı 38
Şekil 4.7. Farklı mıknatıs genişliklerinde ortalama moment değerinin değişimi..... 38
Şekil 4.8. Farklı mıknatıs genişliklerinde moment dalgalanması değerinin değişimi..... 39
Şekil 4.9. Yüzeyden mıknatıslı referans motora ve klasik ÇTGM motora ait moment-hız karakteristikleri..... 39
Şekil 4.10. Küçük mıknatıs eklenmesi sonucu ortaya çıkan farklı yapılarda ortalama moment değerleri 40
Şekil 4.11. Küçük mıknatıs optimizasyonu, (a) standart küçük mıknatıs eklenmemiş yapı, (b) küçük mıknatıs eklenmiş ilk durum (durum-1), (c) küçük mıknatıs eklenmiş ikinci durum (durum-2)..... 41
Şekil 4.12. Akı destekliyi küçük mıknatısların x-eksenine göre yerleştirilme açısı 42
Şekil 4.13. Mıknatıs açısına bağlı ortalama moment değişimi 42
Şekil 4.14. Mıknatıs açısına bağlı moment dalgalanması değişimi 43
Şekil 4.15. Mıknatıs optimizasyonları sonucu ortaya çıkan mıknatıs yerleşimleri için nihai yapı 43
Şekil 4.16. Hava aralığı boyutları, (a) sabit hava aralığı boyu, (b) değişken hava aralığı boyu..... 44
Şekil 4.17. Farklı hava aralıkları için ortalama moment değişimleri..... 44
Şekil 4.18. Farklı hava aralıkları için moment dalgalanması değişimleri..... 45
Şekil 4.19. Optimizasyonlar sonucu ortaya çıkan SKGM motor rotor yapısı ve mıknatıs akı yönleri..... 46
Şekil 4.20. SKGM motor nihai tasarım için, (a) Flux® SEA modeli, (b) mesh yapısı 47
Şekil 4.21. Nihai tasarımda motora ait yüksüz durum akı yoğunluğu seviyeleri ve akı çizgileri 47
Şekil 4.22. Nihai tasarım sonucu elde edilen SKGM motorun vuruntu momenti değişimi 48
Şekil 4.23. Nihai tasarım sonucu elde edilen SKGM motorun faz ve hat Zıt-EMK gerilimleri değişimi..... 48

Şekil 4.24. Nihai tasarım sonucu elde edilen SKGM motorun faz ve hat gerilim harmonikleri değişimi 48
Şekil 4.25. Nihai tasarım sonucu elde edilen SKGM motorun ortalama moment değişimi..... 49
Şekil 4.26. Nihai tasarım sonucu elde edilen SKGM motorun yüklü durumda terminal (hat) gerilimi değişimi..... 49
Şekil 4.27. Nihai motor, (a) 3B SEA modeli, (b) 3B SEA model mesh yapısı 50
Şekil 4.28. Nihai tasarımda motora ait 3B yüksüz durum akı yoğunluğu seviyeleri..... 51
Şekil 4.29. Nihai tasarımda elde edilen yapının 3B analizler sonucu faz ve hat Zıt-EMK gerilimleri değişimi..... 51
Şekil 4.30. 3B ve 2B analizler sonucu elde edilen faz ve hat Zıt-EMK gerilimleri değişimi..... 51
Şekil 4.31. 3B analizler sonucu elde edilen ortalama moment değişimi ve 2B sonuçlar ile karşılaştırılması 52
Şekil 4.32. SM motorlarda gerilim akım vektörleri diyagramı..... 53
Şekil 4.33. SKGM motorun SEA sonucu elde edilen moment-hız karakteristiği 54
Şekil 4.34. SKGM motorun SEA sonucu elde edilen moment-hız karakteristiğinin yüzeyden mıknatıslı referans motor ve klasik ÇTGM motorların moment-hız değişimleri ile karşılaştırılması 54
Şekil 5.1. Motor sargılarında görülen deri etkisi ve akımın sargı içinde yayılımı 62
Şekil 5.2. Mıknatısta oluşan eddy girdap akımları etkisini azaltmak için radyal yönde ince dilimler halinde kesilip birleştirilen mıknatıs yapısı..... 64
Şekil 5.3. Mıknatısta oluşan eddy girdap akımları etkisini azaltmak için eksenel yönde ince dilimler halinde kesilip birleştirilen mıknatıs yapısı..... 64
Şekil 5.4. Rotor hızından kaynaklı oluşan hava akışının mıknatıs üzerinde oluşturduğu basınç alanları 66
Şekil 5.5. SKGM motorun SEA sonucu elde edilen demir kaybının hıza bağlı değişimi..... 68
Şekil 5.6. SKGM motorun SEA sonucu elde edilen mıknatıs kaybının hıza bağlı değişimi..... 68
Şekil 5.7. Her üç motora ait SEA sonucu elde edilen demir kaybının hıza bağlı değişimleri 69
Şekil 5.8. Her üç motora ait SEA sonucu elde edilen mıknatıs kaybının hıza bağlı değişimleri..... 69
Şekil 6.1. Loctite 330 yapıştırıcı özellikleri, (a) yapıştırıcının kuruma süresince dayanımının zamanla değişimi, (b) farklı yapıştırıcı miktarları için kuruma süresince dayanımının zamanla değişimi, (c) dayanımın sıcaklığa bağlı olarak değişimi, (d) yapıştırıcı maddenin 100°C ve 120°C sıcaklıklarda dayanımın zamanla değişimi..... 71
Şekil 6.2. Nihai motor yapısal SEA ağ yapısı..... 72
Şekil 6.3. Rotora uygulanan sınır koşulları..... 73
Şekil 6.4. Rotora uygulanan temas koşulları..... 73
Şekil 6.5. Tüm rotor üstündeki Von-Mises eşdeğer gerilme kontürleri..... 74

Şekil 6.6. Rotor nüvesi üstündeki Von-Mises eşdeğer gerilme kontürleri 74
Şekil 6.7. Kestamit üstündeki Von-Mises eşdeğer gerilme kontürleri..... 74
Şekil 6.8. Mıknatıslar üstündeki Von-Mises eşdeğer gerilme kontürleri 75
Şekil 6.9. Toplam yer değiştirme kontürleri 75
Şekil 6.10. Temas durumları 76
Şekil 6.11. Yüzeyler arası kayma stresi kontürleri 76
Şekil 6.12. Yüzeyler arası basınç kontürleri 76
Şekil 6.13. SKGM motorun MotorCAD® ısıl modeli 78
Şekil 6.14. SKGM motorun MotorCAD® 3B modelinin görünümü..... 78
Şekil 6.15. Motora ait, (a) motor ısıl eşdeğer devresi (kayıplar 85 rpm'de alınmıştır) ve (b) kararlı durum çalışma aralığı verisi (20000 saniyeye kadar) 79
Şekil 6.16. 39,11 Nm yük altında ve 85 rpm'de kararlı durumda aktif malzemelerdeki sıcaklıkların, (a) eksenel, (b) radyal değişimi (25°C ortamda sıcaklığında) 80
Şekil 6.17. Geçici durumda motor flanşa bağlı değilken 39,11 Nm ve 85 rpm'de aktif malzemelerde sıcaklığın zamana bağlı değişimi..... 81
Şekil 7.1. Kesilmiş stator ve rotor sacı..... 83
Şekil 7.2. Kesilen stator ve rotor saclarının paketlenmiş durumu..... 83
Şekil 7.3. Stator sargıları ve stator nüvesine yerleşim işlemi 84
Şekil 7.4. Mıknatısların rotor nüvesine yerleşimi 85
Şekil 7.5. Prototip üretim sonucu ortaya çıkan stator ve rotor yapısı 85
Şekil 7.6. Motorun test düzeneğine yerleştirilmesi kolaylaştıracak gövde içine yerleştirilmiş hali..... 86
Şekil 7.7. Motorun test düzeneğine yerleştirilmiş görüntüsü..... 87
Şekil 7.8. Motor yıldız bağlantı şekli 88
Şekil 7.9. 100 rpm hızda üç faza ait Zıt-EMK faz gerilimlerinin değişimi 88
Şekil 7.10. 100 rpm hızda Zıt-EMK faz gerilimlerinin karşılaştırılması 89
Şekil 7.11. 100 rpm hızda üç faza ait Zıt-EMK hat gerilimlerinin değişimi 89
Şekil 7.12. 100 rpm hızda Zıt-EMK hat gerilimlerinin karşılaştırılması 89
Şekil 7.13. 7,07 Arms faz akımında moment çıkışı ve SEA ile karşılaştırılması..... 90
Şekil 7.14. 18,4 Arms faz akımında moment çıkışı ve SEA ile karşılaştırılması..... 91
Şekil 7.15. 50 rpm hızda moment-akım ilişkisi 91

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Gömülü ve yüzeyden mıknatıslı motor tasarım kriterleri 29
Tablo 3.2. Referans motor performans sonuçları 32
Tablo 4.1. Motor performanslarının karşılaştırılması 55
Tablo 5.1. Bazı yatak tiplerinin sahip olduğu sürtünme katsayıları [46] 65
Tablo 6.1. Motorda kullanılan malzemeler ve mekanik özellikleri 71
Tablo 6.2. Yapıştırıcının yapıştığı malzeme türüne göre mekanik özellikleri 72
Tablo 6.3. Analizler sonucu elde edilen maksimum ve minimum gerilmeler 77
Tablo 6.4. SKGM motorda tüm kayıp bileşenleri 77
Tablo 7.1. Motor sargı dirençleri ölçümü 87
Tablo 7.2. Farklı hızlarda maksimum faz ve hat zıt-EMK gerilimleri 90
Tablo 7.3. Test sonucunda 50 rpm hızda farklı faz akımlarında motor momentleri 91

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

V_d : d-eksen gerilimi, (V)
V_q : q-eksen gerilimi, (V)
R : Direnç, (Ω)
L_d : d-eksen endüktansı, (H)
L_q : q-eksen endüktansı, (H)
Ψ_d : d-eksen akısı, (Wb)
Ψ_q : q-eksen akısı, (Wb)
ω_e : Elektriksel açısal hız, (rpm)
i_d : d-eksen akımı, (A)
i_q : q-eksen akımı, (A)
T_e : Elektriksel moment, (Nm)
m : Faz sayısı
p : Kutup çifti sayısı
l_m : Mıknatıs genişliği , (mm)
w_m : Mıknatıs uzunluğu, (mm)
g_1 : Rotor segmenti üstü hava aralığı boyu, (mm)
g_2 : Mıknatıs üstüne denk gelen hava aralığı boyu, (mm)
I_s : Faz akımı, (A)
Kt : Moment katsayısı, (Nm/A)
Kv : Gerilim katsayısı, (V/rpm)
P_{fe} : Demir kaybı, (W)
P_h : Histerezis kaybı, (W)
P_{he} : Eddy girdap akımı kaybı, (W)
P_{ex} : Ekstra demir kaybı, (W)
P_{al} : Değişen manyetik alanda toplam demir kaybı, (W)
P_r : Dönen manyetik alanda toplam demir kaybı, (W)
P_{hr} : Dönen manyetik alanda histerezis kaybı, (W)
K_h : Histerezis kayıp katsayısı
K_e : Eddy girdap akımı kayıp katsayısı
K_{ex} : Ekstra demir kaybı kayıp katsayısı
B_m : Akı yoğunluğu, (T)
F : Frekans, (Hz)
C_{se} : Steinmetz 1. kayıp katsayısı
α : Steinmetz 2. kayıp katsayısı
β : Steinmetz 3. kayıp katsayısı
f_r : Mıknatıslanma frekans, (Hz)
f_{eq} : Eşdeğer frekans, (Hz)
B_{max} : Maksimum akı yoğunluğu, (T)
T : Periyot zamanı, (s)
P_{cu} : Bakır kaybı, (W)
μ_s : Sürtünme katsayısı
M_s : Sürtünme momenti, (Nm)
F : Yatak yükü, (N)

d	: Yatak deli çapı, (m)
F_s	: Sürtünme kuvveti, (N)
l	: Hava ile temas eden eğrisel yüzey yarıçapı, (m)
M	: Havanın dönmesiyle oluşan moment, (Nm)
u	: Teğetsel yöndeki çizgisel hız, (m/s)
τ_w	: Kayma gerilmesi, (N/m^2)
μ	: Dinamik viskozite, (Ns/m^2)
U	: Motor 1.fazı ifadesi
V	: Motor 2.fazı ifadesi
W	: Motor 3.fazı ifadesi

Kısaltmalar

AC	: Alternating Current (Alternatif Akım)
Arms	: Amper Root Mean Square (Akımın Efektif Değeri)
CP	: Consequent Pole (Sıralı Kutup)
ÇTGM	: Çubuk Tip Gömülü Mıknatıslı
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
EASM	: Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı
EMK	: Elektro Motor Kuvveti
GM	: Gömülü Mıknatıslı
NdFeB	: Neodymium Iron Boron (Neodium Demir Bor)
Nm	: Newton Meter (Newton Metre)
RASM	: Radyal Akılı Sürekli Mıknatıslı
RPM	: Revolute Per Minute (Dakikadaki Dönüş Sayısı)
SE	: Sonlu Elemanlar
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SK	: Sıralı Kutuplu
SKGM	: Sıralı Kutuplu Gömülü Mıknatıslı
SM	: Sürekli Mıknatıs
SmCo	: Samarium Cobalt (Samaryum Kobalt)
SMST	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Tork
THB	: Toplam Harmonik Bozunumu
Zıt-EMK	: Zıt Elektro Motor Kuvveti

YENİ GÖMÜLÜ MIKNATISLI DÜŞÜK HIZLI BİR SENKRON TORK MOTOR TASARIMI, OPTİMİZASYONU, ÜRETİMİ VE DOĞRULAMASI

ÖZET

Sürekli mıknatıslı (SM) motorlar son yıllarda birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tip motorların yüksek verim ve güç yoğunluğu sağlamaları ve moment-ağırlık oranlarının yüksek olması son yıllarda diğer motor türlerine göre kullanım sayılarının artmasına neden olmuştur. Özellikle özel uygulamalara yönelik tasarımlarının da kolay gerçekleştirilebilir olması bu motorların tercih sebeplerinden biridir. Uygulamaya dönük yapılan çalışmalara bakacak olursak da yüksek moment, düşük hızlı uygulamalar için redüktör sistemleri yerine SM motorların tercih edildiği söylenebilir. Tork motoru olarak adlandırılan yüksek momenti düşük hızlı SM senkron motorlar redüktör ihtiyacını ortadan kaldırır ve sisteme doğrudan bağlanırlar. Yüksek moment ihtiyaçlarından dolayı genelde yüksek sayıda kutup içeren motorlardır. Yapılan çalışmada da yüksek moment düşük hızlı doğrudan sürüşlü uygulamalara yönelik yeni bir SM tork motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ancak yüzeyden mıknatıslı motorlara göre maksimum çalışma hızlarının ve moment-mıknatıs ağırlığı oranların yüksek olması nedeniyle bu çalışmada gömülü SM senkron tork motor tasarımı üzerinde durulmuştur. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonrasında yeni bir gömülü mıknatıslı düşük hızlı senkron tork motor tasarımı, üretimi ve deneysel doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler sonucu elde edilen performans verileri aynı oluk-kutup sayısına ve dış boyutlara sahip yüzeyden mıknatıslı başka bir senkron tork motoru ile karşılaştırılıp gömülü mıknatıslı yeni yapının avantajları ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: AC Senkron Motor Tasarımı, Gömülü Mıknatıslı Rotor, Mıknatıs Optimizasyonu, Sıralı Kutuplu Gömülü Mıknatıslı Rotor Yapısı, Sürekli Mıknatıslı Tork Motor.

DESIGN, MANUFACTURING AND VERIFICATION OF A LOW SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS TORQUE MOTOR WITH A NEW INNER POLE STRUCTURE

ABSTRACT

Permanent magnet (PM) motors have been used in many applications in recent years. The usage of permanent magnet motor has increased than other type motor because of high efficiency, high power density and high torque-weight ratio. Another reason for preference this type motor is design of permanent magnet motor that can be realized easily for special applications. When we consider high-torque low-speed application, PM motors are preferred instead of gearbox systems. High-torque low-speed permanent magnet synchronous motor that is called "Torque Motor" removes the gearbox and connects directly to the system. Torque motors are usually high-pole motors due to their high torque requirements. In this work, a new permanent magnet torque motor is designed for high-torque low-speed direct drive applications. In many conventional torque motor designs, surface permanent magnet motor is preferred because of their ease production. However, in this study focused on the design of the embedded magnet type synchronous torque motor instead of surface PM torque motor. The embedded magnet type synchronous motor is also called inner type PM motor in literature. The inner type PM motors can reach higher maximum speed and have more torque-magnet weight ratio than the surface PM motors. Therefore, a new inner magnet low speed synchronous torque motor was designed, manufactured and tested. After tests, the results were obtained and compared with another synchronous torque motor which has same slot-pole combination and outer dimensions to show advantages of the new design.

Keywords: AC Synchronous Motor Design, Consequent Pole Rotor Structure, Magnet Optimization, Consequent Pole Inner PM Rotor, Permanent Magnet Torque Motor.

GİRİŞ

Doğal enerji kaynaklarının gün geçtikçe azalması yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmaktadır. Günümüzde de bu alanda bulunan ihtiyaçlara yönelik birçok çalışma yapılmaktadır. Elektrik motorları da bu alandaki çalışmaların başında gelmekte ve gelişen teknoloji ile birlikte birçok alanda kullanılmaktadır. Askeri uygulamalardan elektrikli ev aletlerine, elektrikli taşıtlardan bilgisayarlara kadar aklımıza gelen hemen hemen birçok sistem ve alette elektrik motorları karşımıza çıkmaktadır.

Enerji kaynaklarının azalmasının dışında günümüz dünyasında yaşanan çevre kirliliği, çevreci sistemlerin artması ihtiyacını doğurmuştur. Örneğin son yıllarda taşıt sistemlerinde kullanılan yakıtların hava kirliliğine neden olmasından dolayı elektrikli araçların kullanılmasına yönelik bir çaba sarf edilmektedir. Bu nedenle özellikle son 10 yılda taşıt sektöründe içten yanmalı motorların yerini elektrik motorlarına bıraktığı söylenebilir. Ayrıca taşıt uygulamaları dışında elektrik motorlarının kullanıldığı sayısız örnek bulunmaktadır. Tüm bu gelişmeleri göz önüne aldığımızda diğer motor türlerine göre özellikle yüksek verim ve yüksek güç yoğunluğu sağlamasından dolayı sürekli mıknatıslı (SM) motorlara önemli bir yönelim söz konusudur. SM motorlarında çok sayıda avantajına rağmen hala gelişmeye açık olduğu söylenebilir. Özellikle uygulama bazlı motor kullanımında, SM motor tasarımının ciddi bir özveri ile yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmanın amacı, doğrudan tahrik sistemleri için yeni bir rotor yapısına sahip düşük hızlı sürekli mıknatıslı senkron tork (SMST) motor tasarımını, üretimini ve deneysel doğrulamasını gerçekleştirmektir. Rotor yapısı olarak yeni bir özgün gömülü mıknatıslı yapı kullanılacaktır. Elde edilecek tasarımda düşük hızlı bir uygulama olması nedeniyle düşük vuruntu momenti verecek doğru oluk-kutup kombinasyonun belirlenmesi, yüksek kutup sayısı ile yüksek moment yoğunluğuna sahip ve sinüzoidal bir zıt elektro motor kuvveti (Zıt-EMK) geriliminin olması hedeflenmiştir. Yeni bir rotor yapısı ile gidilmesinin temel amacı ise, moment yoğunluğunu düşürmeden daha

yüksek hızlara çıkma isteğidir. Bu amaçla stator yapıları, elde edilecek nihai tasarım ile aynı tutulan iki farklı klasik rotor yapısının da temel analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu klasik yapılarda nihai tasarım ile karşılaştırılarak, yeni rotor yapısının klasik rotor yapılarına karşı avantajları da gösterilmiştir.

Sonuç olarak üretilecek motor düşük vuruntu momenti seviyesine, gerilimde de düşük toplam harmonik seviyesine sahip olacaktır. Üretilecek motorun en büyük avantajı klasik rotor yapılarından farklı olarak mümkün olan en düşük mıknatıs ağırlığında en yüksek momenti verebilmesi ve daha yüksek hızlara çıkabilmesi olacaktır.

Tez kapsamında, yapılan çalışmalar ile göz önüne alınan hedefler, tasarım sonucu elde edilmiştir. Hedeflerin doğrulanması açısından, sonlu elemanlar analizi sonuçları ile prototip üretimi sonucu gerçekleştirilen motorun test sonuçları karşılaştırılmış ve tasarlanan motor doğrulanmıştır.

Bölüm 1'de elektrik motorlarından ve elektrik motor çeşitleri hakkında bilgiler verilmiştir. Elektrik motorlarının nasıl sınıflandırıldığından ve günümüz dünyasında en çok kullanılan bazı elektrik motor çeşitlerinin özellikleri ve uygulamalarından bahsedilmiştir. Sonrasında SM motorlar hakkında bilgiler verilmiş ve rotor yapıları gösterilmiştir. Rotor yapıları performans ve uygulama olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca SM senkron motorlara ait elektriksel eşdeğer devre hakkında bilgiler verildikten sonra son olarak doğrudan sürüşü sistemlerde kullanılan SMST motorlarından bahsedilmiş ve bölüm sonlandırılmıştır.

Bölüm 2'de detaylı bir literatür kısmı oluşturulmuştur. Bu bölümde tez sonunda ortaya çıkacak olan düşük hızlı SMST motoru kapsayacak şekilde yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Yapılan literatür taramasında sadece yayınlarla yetinilmemiş, aynı zamanda konuya dair patent ve mevcut ürünler de araştırılmıştır.

Bölüm 3'de tasarımı amaçlanan rotor yapısı için ön tasarım çalışmaları yapılmış ve oluşturulan tasarım kodları ile uygun oluk-kutup kombinasyonu belirlenmiştir. Bu bölümde aynı zamanda üretilecek motorun avantajlarını göstermek adına aynı oluk-kutup sayısına ve stator yapısına sahip yüzeyden mıknatıslı motora ait sonlu elemanlar (SE) analizi sonuçları da verilmiştir.

Bölümde 4’de tasarın hedefleri göz önüne alınıp yeni bir rotor yapısına ait optimizasyon çalışmaları yapılmış ve elde edilen sonuçlar her adımda detaylı olarak açıklanmış ve sonuç olarak yeni bir rotor yapısında nihai tasarım ortaya çıkmıştır. Bölüm sonunda ise nihai tasarıma ait sonlu elemanlar analizi (SEA) sonuçları, yüzeyden mıknatıslı rotor ve klasik çubuk tip gömülü mıknatıslı (ÇTGM) rotor yapılarına sahip motorlar ile karşılaştırılmış ve tasarımın avantajları gösterilmiştir.

Bölüm 5’de SM motorlarda karşılaşılan güç kaybı bileşenlerinden bahsedilmiş ve nihai motorda elde edilen kayıp büyüklükleri diğer iki motorda elde edilen kayıp değerleri ile karşılaştırılıp verilmiştir.

Bölüm 6’da tasarımı sonlandırılan motor için yapısal ve termal analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar verilmiştir. Alınan sonuçlar göz önüne alınıp rotora etki edecek olan gerilmeleri en aza indirecek yapısal değişimler gerçekleştirilmiş ve motor kayıplarının motor sıcaklıklarına olan etkisi incelenmiştir.

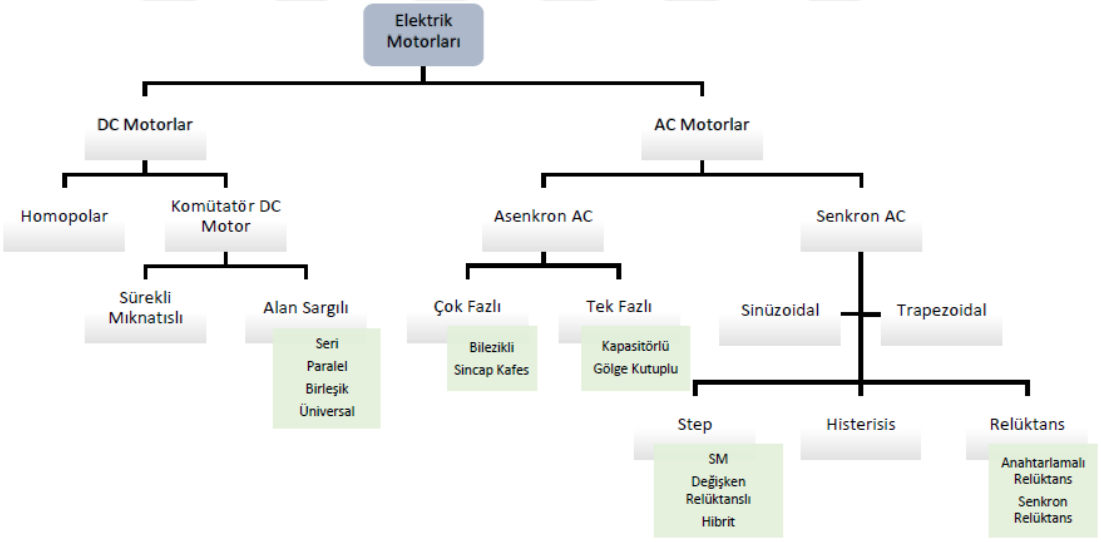
Bölüm 7’de motor prototip üretiminden bahsedilmiş ve üretim basamakları, üretim sırasında çekilen görüntüler aracılığıyla verilmiştir. Bu bölümde aynı zamanda motor test düzeneği tanıtılmış olup, gerçekleştirilen motor performans testleri daha önce SEA ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Son olarak Bölüm 8’de ise yapılan çalışmalar hakkında genel bir değerlerdirme yapılmış olup elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

Elektrik motoru basitçe, aldığı elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bir makine olarak tanımlanabilir. Temel olarak iki ana parçadan oluşur. Bunlardan sabit parça olan stator ve döner parça olan ise rotor olarak adlandırılır. Statorda bulunan sargılara elektrik uygulanması ile manyetik alan oluşur. Rotor da ise bu manyetik alanın kaynağı sargılardan geçen akım olabileceği gibi sürekli bir manyetik alan yaratan sabit mıknatıs da bulunabilir.

Elektrik motorlarını sınıflandırmada farklı kriterler kullanılabilir. Faz sayısına göre, rotor yapısına vb. şekillerde sınıflandırılabilmektedir. Ancak en temel sınıflandırma durumu Şekil 1.1'de gösterildiği gibi beslenme şekillerine göre DC ve AC motorlar adıyla 2 temel gruba ayırma yöntemidir.



Şekil 1.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması

İlk kullanılan alan sargılı DC motor hız kontrolünün rahat uygulanmasından dolayı uzun yıllar kullanılmıştır. Son yıllarda ise birçok uygulamada AC sürücüler DC sürücülerin yerine kullanılmaya başlanmıştır. Ancak düşük sürücü ve motor maliyeti nedeniyle günümüzde hala bazı uygulamalarda tercih edilmektedir. Ayrıca elektrikli tren gibi uygulamalarda da DC motorlar hala tercih edilmektedir. Son yıllarda DC motorların ortadan kaybolmasının sebepleri arasında anma değeri yüksek

dönüştürücülere ihtiyaç duyulması, bakım maliyetinin AC motorlara göre yüksek olması ve düşük moment yoğunluğuna sahip olması sayılabilir [1].

Elektrik motorları içerisinde uzun yıllardır en sık kullanılan tür asenkron motordur Asenkron motorlar basit yapısı, düşük maliyetleri, güvenilir olmasının yanında birçok dezavantaja da sahiptir ve asenkron motorların kullanılamayacağı birçok endüstriyel uygulama da mevcuttur. Bunun temel nedenleri ise asenkron motorun veriminin düşük olması, yüksek hızlarda sorun oluşturması, hacim olarak fazla yer tutması, moment dalgalanması, ses ve titreşim problemleri sayılabilir. Ayrıca, asenkron motorları yüksek hızlarda çalıştırabilmek için motorun gücünün artırılması gerekir. Bu da gereksiz boyut ve güç artırma anlamına gelmektedir [1].

DC ve asenkron motorlar dışında senkron motorlar da endüstride ve savunma sanayisinde kullanılmaktadır. Senkron motorlar kendi içinde birçok alt gruba ayrılmıştır ve her bir senkron motor yapısının kullanılacakları uygulamaya göre avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Örneğin senkron relüktans motorları endüstri de sıkça kullanılmaktadır. Basit ve sağlam rotor ve stator yapılarının maliyeti diğer tür elektrik motorlarına göre ciddi boyutlarda düşüktür. Ancak düşük güç yoğunluğu ve verim bu motorların en temel problemleri arasındandır. Relüktans değişimi fazla olduğu için titreşim ve duyulabilir gürültüsü en yüksek olan motordur. Bir başka senkron motor türü olan alan sargılı senkron makinelerin verimi DC ve asenkron makinelere göre daha yüksek olabilir. Ancak, bu motorlar karmaşık ve pahalı motorlardır ve yol vermek için alan sargısına ihtiyaç duyarlar. Genelde elektik üretimi gibi yüksek güçlü uygulamalarda kullanılırlar. Bu tip motorların alan sargıları sürekli mıknatıslarla değiştirilirse sürekli mıknatıslı senkron makineler elde edilir. Bu tip motorlar da birçok endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır.

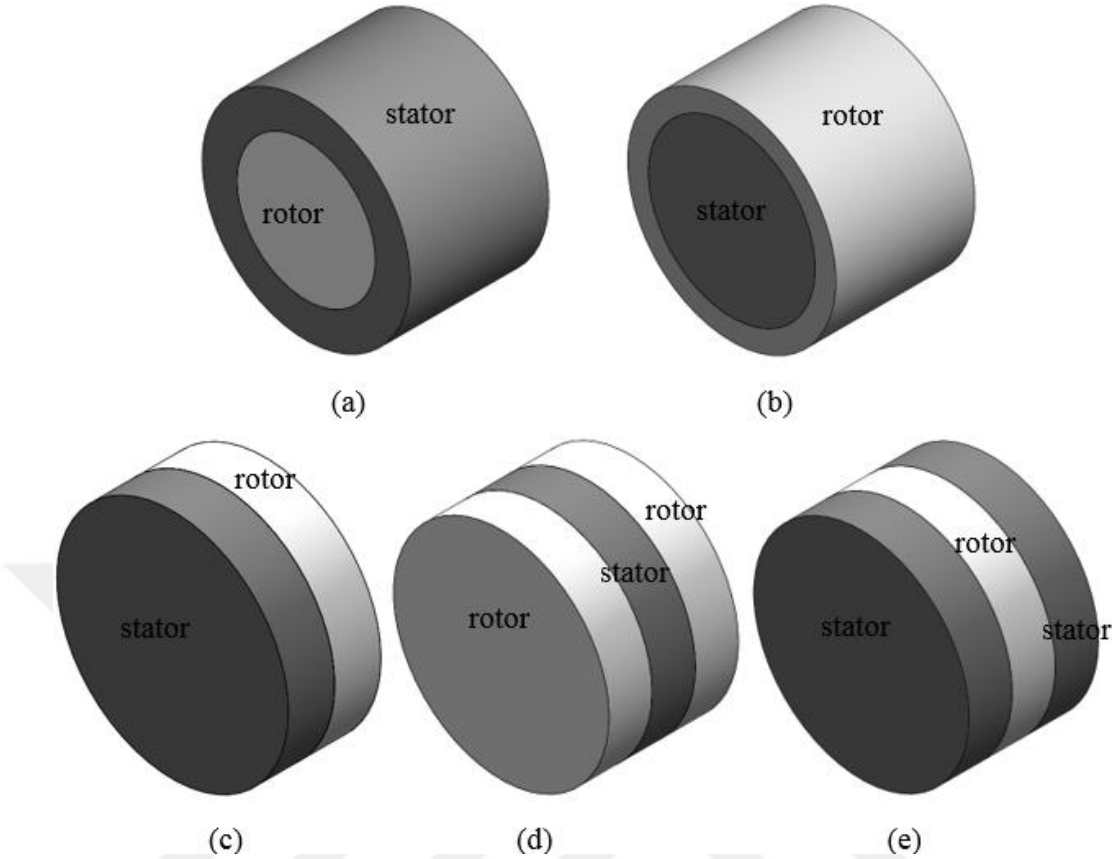
Bu sınıflandırma yöntemleri dışında elektrik motorlarını faz sayısına göre de incelemek mümkündür. Elektrik motorlarının faz sayısı uygulamaya ve tasarımcıya bağlı olarak belirlenmektedir. Günümüzde birçok uygulamada 3 fazlı motorlar tercih edilmektedir. Bununla birlikte, motor tasarımında ortaya çıkan faz sayısı, tasarım ihtiyacı doğrultusunda 1 fazlı sistemlerden 15 fazlı gibi çok fazlı (faz sayısı 3'den büyük olan) sistemlere kadar değişebilmektedir. Faz sayısının artması güç ve moment yoğunluğunun artmasını, daha kompakt bir motor tasarımının ortaya çıkmasını

sağlarken, maliyet olarak da artışı beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, uygulama ihtiyacı için optimum tasarım girdilerinin belirlenebilmesi bu noktada önem arz etmektedir.

1.1. Sürekli Mıknatıslı Motorlar

Özellikle 1980'li yılların başlangıcından buyana NdFeB (Neodymium Iron Boron) ve SmCo (Samarium Cobalt) nadir toprak elementi mıknatıslarının kullanımıyla birlikte SM motorlar birçok uygulamada rotor yapılarında mıknatıs bulundurmayan DC, senkron ve asenkron motorların yerine kullanılmaya başlanmıştır. Moment ve güç yoğunluklarının diğer motor türlerine göre daha fazla olması ve verimlerinin yüksek olması nedeniyle son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bunlara ek olarak, bu motorların fırçasız oluşu rotor yapısının daha da basit olmasını ve rotoru fırçalı yapılara göre daha uzun yıllar kullanılmasını sağlar. NdFeB tip mıknatısların, SM motorların yapılarında kullanılan diğer mıknatıslara göre akı değerlerinin oldukça fazla olması, motor manyetik devresinin en iyi biçimde kullanılmasına imkân verir ve aynı hacimde daha fazla moment ve güç alınmasını sağlar. Bu da elektrik motorunun aynı çıkış gücü için boyutlarının küçülmesi, moment ve güç yoğunluğunun artması, kayıpların azalması ve veriminin yükselmesi anlamına gelmektedir. Tüm bu nedenler sürekli mıknatıslı motorların birçok uygulamada potansiyel motor olarak kullanılmasına imkân sağlamaktadır.

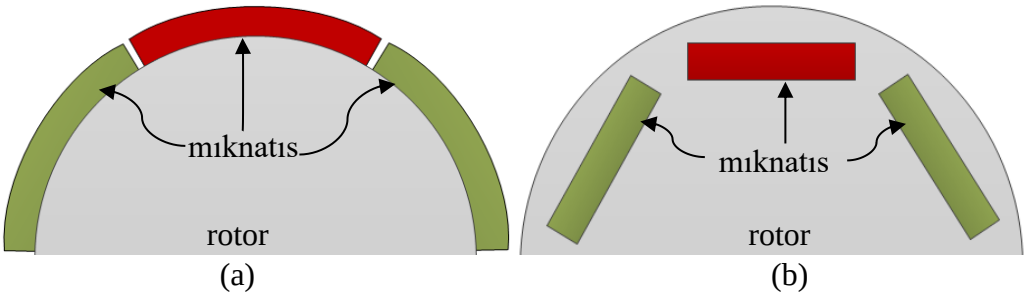
SM motorların yapıları incelendiğinde bu motorları hava aralığındaki akı yönüne bağlı olarak iki farklı kategoriye ayırmak mümkündür: radyal akılı sürekli mıknatıslı (RASM) motor ve eksenel akılı sürekli mıknatıslı (EASM) motor. RASM motorlar kendi içinde temel olarak dış rotorlu ve iç rotorlu olmak üzere ikiye ayrılır. Aynı şekilde EASM motorlarında tek-stator tek-rotor, tek-stator çift-rotor ve çift-stator-tek rotorlu yapıları da mevcuttur. Şekil 1.2'de RASM motorlar için iç ve dış rotorlu yapılar, EASM motorlar için de farklı rotor ve stator yapıları gösterilmiştir.



Şekil 1.2. SM motor yapıları, a) iç rotorlu RASM motor, b) dış rotorlu RASM motor, c) tek-stator-tek-rotor EASM motor, d) tek-stator-çift-rotor EASM motor, e) çift-stator-tek-rotor EASM motor

1.1.1. Radyal akılı sürekli mıknatıslı motor rotor yapıları

RASM motorların rotor yapıları incelendiğinde yüzeyden mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı gibi iki temel farklı yapıda olduğu görülmektedir (Şekil 1.3). Bu motorlar çok farklı endüstriyel ve servo uygulamalarda yer bulmaktadır. Uygulama, sürekli mıknatıslı motorun rotor yapısını belirleyici unsurdur. Örnek vermek gerekirse, gömülü mıknatıslı rotorun mekanik dayanımı yüzeyden mıknatıslı rotorlara göre yüksek olduğundan, çok yüksek hızlı uygulamalarda gömülü mıknatıslı motorlar tercih edilir.



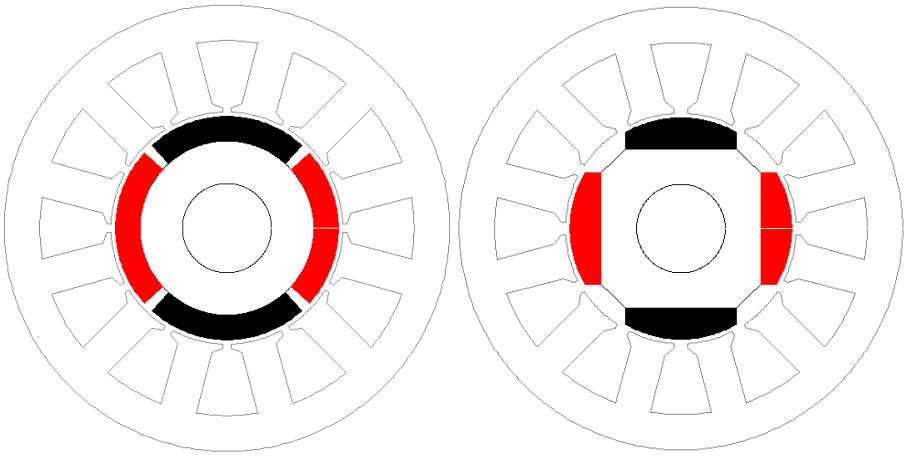
Şekil 1.3. SM motor yapıları, a) yüzeyden mıknatıslı, b) gömülü mıknatıslı

SM motorlarda akı yönlerini ifade eden iki önemli eksen bulunur. Bu eksenlere d ve q-eksen adı verilir. Mıknatıs akısı doğrultusunda bulunan eksen d-eksen olarak adlandırılır. Elektriksel olarak 90°farkla ise q-eksen yerleştirilir. Yüzeyden mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı motorlar sabit moment ve sabit güç bölgesi adında iki ayrı bölgede çalışırlar. Sabit moment bölgesi motorun ilk konumundan anma hızına kadar olan çalışma bölgesidir. Sabit güç bölgesi ise anma hızından sonraki çalışma bölgesini ifade eder. Yüzeyden mıknatıslı motorda hava aralığı akısı etkisi fazla olduğundan ve rotor yapısından dolayı d ve q-eksen manyetik alanları arasında yüksek bir fark yoktur ve aynı kabul edilir.

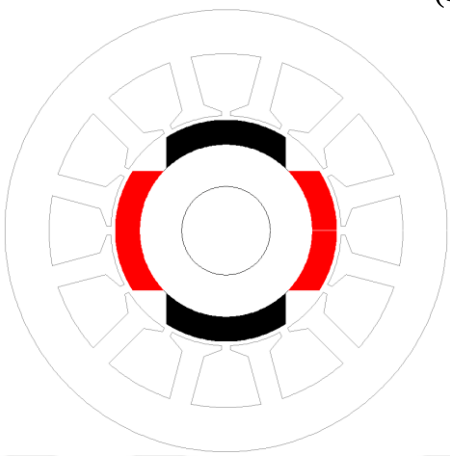
Gömülü mıknatıslı motorda ise rotor yapısından dolayı q-eksen relüktansı fazladır dolayısıyla hava aralığından geçen akı stator akımının bir fonksiyonudur ve hava aralığının da yüzeyden mıknatıslı motorlara göre daha ufak olmasından kaynaklı stator akımı etkisi fazladır.

Bu nedenle özellikle sabit güç bölgesinde gömülü mıknatıslı motorların kontrolü daha etkilidir ve motor boyutlarını büyütmeden sabit güç bölgesini artırmak için yine gömülü mıknatıslı motorlar tercih edilebilir. Üretim maliyetinin düşük ve kontrolün basit olmasını istiyorsak ise yüzeyden mıknatıslı motorlar iyi bir seçimdir.

Yüzeyden ve gömülü mıknatıslı yapılarda kendi aralarında farklı şekillerde bulunabilir. Örneğin Şekil 1.4'de en çok tercih edilen üç farklı yüzeyden mıknatıslı rotor yapısı görülmektedir. Şekil 1.4 (a)'da radyal mıknatıslanmaya sahip yüzeyden mıknatıslı motor varken, Şekil 1.4 (b) ve (c)'de ise paralel yönde mıknatıslanmaya sahip yüzeyden mıknatıslı rotor yapıları görülmektedir.



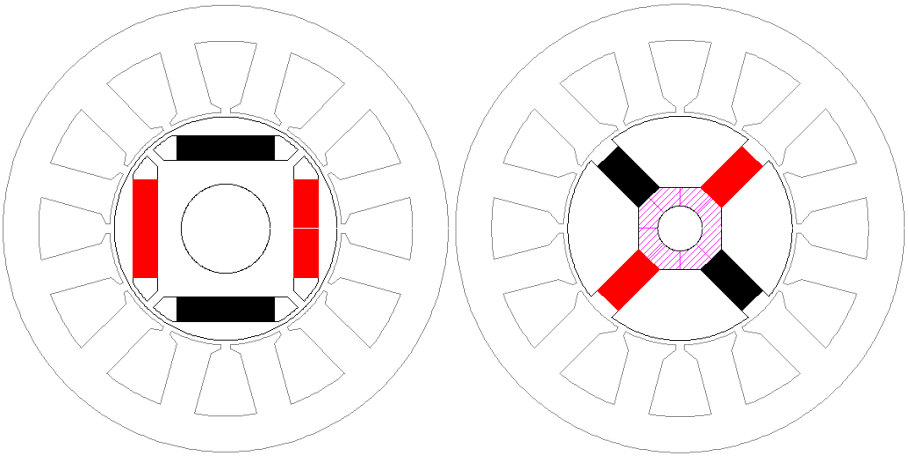
(a) (b)



(c)

Şekil 1.4. En çok kullanılan üç adet yüzeyden mıknatıslı rotor yapısı, a) radyal mıknatıslanmaya sahip dairesel rotor, b) paralel mıknatıslanmaya sahip köşegen rotor, (c) paralel mıknatıslanmaya sahip dairesel rotor

Aynı şekilde gömülü mıknatıslı rotor yapılarında da gömülü mıknatıslar farklı şekillerde rotor nüvesine yerleştirilebilir. Bu yerleşim şekli genelde uygulama gereksinimlerine göre tercih edilir. Şekil 1.5'de gömülü mıknatıslı yapılarda mıknatısın faklı yerleştirildiği iki farklı yapı verilmiştir. Bu yapılar gömülü mıknatıslı rotor yapılarında en çok tercih edilen iki yapıdır. Şekilde görülen ilk yapı klasik gömülü mıknatıslı (GM) yapı iken ikinci yapı ise literatürde ÇTGM yapı olarak adlandırılan ve mıknatıs akısının önce rotor nüvesine sonra hava aralığına geçtiği rotor yapısıdır.

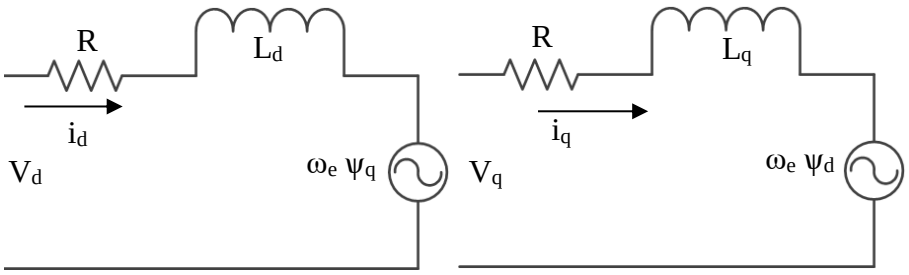


(a) (b)

Şekil 1.5. En çok kullanılan iki adet gömülü mıknatıslı rotor yapısı, a) klasik gömülü mıknatıslı rotor yapısı, b) literatürde çubuk yapı olarak adlandırılan gömülü mıknatıslı rotor yapısı

1.1.2. SM motor temel denklemleri ve matematiksel model

SM senkron motorların temel denklemleri park dönüşümü uygulanarak incelenir. 3-fazlı SM bir senkron motorun 3 fazına ait gerçek zamanlı büyüklükler d ve q eksene indirgenir. SM senkron motora ait d-q eksen matematiksel eşdeğer devresi Şekil 1.6'da verilmiştir.



Şekil 1.6. Sürekli mıknatıslı senkron motorun d-q eksen eşdeğer devresi

Şekilde de görüleceği gibi V_d ve V_q ifadeleri d-q eksen gerilimlerini, R stator sargı direncini, L_d ve L_q d-q eksen endüktanslarını, ψ_d ve ψ_q her bir eksenden geçen manyetik akıyı, i_d ve i_q d-q eksen akımlarını ifade etmektedir. Son olarak ω_e ise elektriksel açısal hızı götermektedir. V_d ve V_q eksen gerilimlerinin ifadalerini verilen büyüklükler cinsinden yazarsak,

$$V_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e \psi_q \tag{1.1}$$

$$V_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_e \psi_d \tag{1.2}$$

ifadeleri ortaya çıkar. Denklem (1.1) ve Denklem (1.2) de yer alan ψ_d ve ψ_q ifadelerini mıknatıs akısı cinsinden yazarsak d ve q eksen akilari,

$$\psi_d = L_d i_d - \psi_m \tag{1.3}$$

$$\psi_q = L_q i_q \tag{1.4}$$

şeklinde elde edilmiş olur. Denklem (1.3) ve Denklem (1.4) sırasıyla Denklem (1.2) ve Denklem (1.1)'de ki yerlerine yazılırsa,

$$V_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \tag{1.5}$$

$$V_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_e L_d i_d + \psi_m \tag{1.6}$$

SM senkron motorda gerilim eşitlikleri Denklem (1.5) ve Denklem (1.6)'da ki gibi en geniş şekilde elde edilir.

SM senkron motorlarda elektriksel moment ifadesi olan T_e ise tek bir faz için Denklem (1.7)'de verilmiştir;

$$T_e = \frac{1}{2} p(\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \tag{1.7}$$

Çok fazlı bir sistemde ise bu ifade,

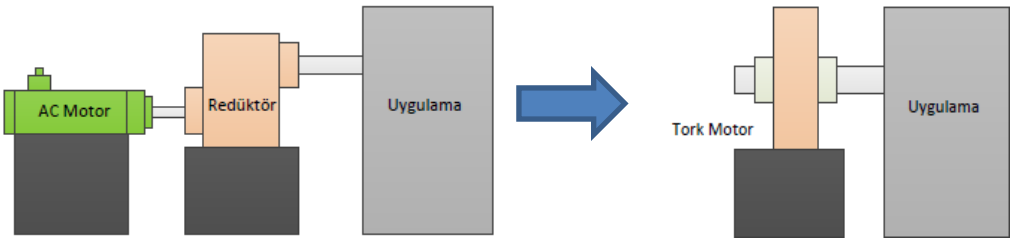
$$T_e = \frac{m}{2} p(\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \tag{1.8}$$

şeklinde yazılır. Burada m faz sayısını, p kutup çifti sayısını ifade etmektedir.

1.2. Doğrudan Sürüşlü Sistemler ve SM Senkron Tork Motorları

SM senkron motor çeşitlerinden biri olan doğrudan sürüşlü SMST motorları kullanıcıya düşük anma hızlarında yüksek moment yoğunluğu sağlamaktadır. Bu nedenle genelde yüksek kutup sayılarına sahiptir. Doğrudan sürüşlü bir SM senkron motor, yüksek kutup sayılı bir tork motor olabileceği gibi düşük kutup sayılı klasik bir SM senkron motorda olabilir. Şekil 1.7 (a)'da görüldüğü üzere birçok uygulamada kullanılan çok sayıda motordan yüksek moment elde edilmesi adına redüktör sistemleri kullanılmaktadır.

SMST motorlarının en büyük avantajı redüktörü ortadan kaldırarak sistem verimini artırıp maliyetini azaltmak, düşük hızlarda hassas motor kontrolü yapabilmek ve güç ve moment yoğunluğu yüksek senkron motor elde etmektir. Rotor yapısında bulunan sürekli mıknatıslar sayesinde yüksek moment yoğunluğuna sahip olduğu bilinen SM senkron motorlardan doğrudan sürüşlü SMST motorlarına geçişte, kutup sayısının genelde yüksek tutulması elde edilen moment yoğunluğunun yüksek olmasına neden olan başlıca sebeptir. Bunun yanında sıcaklıktan etkilenen bileşenler, mıknatıs maliyeti, karmaşık kontrol ve karmaşık tasarım süreci, doğrudan sürüşlü SMST motorların başlıca dezavantajları arasında gösterilebilir.



Şekil 1.7. Doğrudan sürüşlü SMST motorkullanış amacı

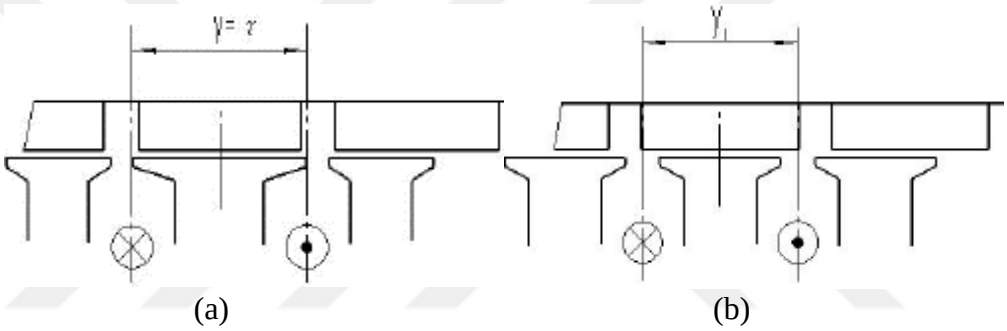
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde yapılan literatür çalışmaları üç ana başlık altında incelenmiştir. İlk bölümde doğrudan sürüşlü SM senkron motorlar ile ilgili incelenen makaleler taranmış ve [2]-[21] arasında özetlenmiştir. Aynı şekilde sıralı (İngilizce literatür de consequent) mıknatıslı motor yapıları ve gömülü mıknatıslı motor yapıları da incelenmiş olup sırasıyla [22]-[24] ve [25]-[28] arasında verilmiştir. İkinci bölümde ise detaylı patent taraması gerçekleştirilmiş ve konuya dair önemli bulunanlar incelenmiştir. Literatür taramasında son olarak önemli elektrik motor firmalarına ait SMST motor ürünleri incelenmiş ve başlıca önemli görülenlere yer verilmiştir.

2.1. Yayın Araştırması

Tasarımı ya da kontrolü yapılan doğrudan sürüşlü SM senkron motorların bulunduğu çok sayıda makalenin özetlenmiş hali bu bölümde verilmektedir. Jia Shi ve diğerleri [2] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, oluk-kutup kombinasyonunun düşük hızda yüksek moment verebilen SM senkron motorların performansına olan etkisi incelenmiştir. Çalışmada bir rüzgâr türbini uygulamasında kullanılan doğrudan sürüşlü farklı oluk/kutup sayısına sahip olan 8 adet SM senkron motor incelenmiş ve oluk/kutup sayısının sırasıyla motorun performans verileri olan ve çıkış momentini etkileyen sargı faktörüne, akı yoğunluğuna, bakır kaybına ve vuruntu momentine olan etkisine bakılmıştır. Elde edilen sonuçlar çalışma sonunda özetlenmiştir. Yoshika Kano ve Noboyuki Matsui [3] tarafından gerçekleştirilen diğer bir çalışmada, doğrudan sürüşlü SM senkron motor tasarımına yönelik yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Hedef performans değerleri belirlenen motora ait bir tasarım gerçekleştirme yolu belirlenmiş ve gerekli optimizasyonlar uygulanarak hem analitik hem de SEA yöntemleriyle motora ait performans sonuçları belirlenmiştir. Çalışma sonunda tasarım yöntemi doğrulanmış ve 8 adet motora ait tasarım verileri okuyucuya sunulmuştur. Y. Kano ve N. Matsui [4] tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise, doğrudan sürüşlü gömülü mıknatıslı senkron tork motoruna ait optimizasyon çalışmaları verilmiştir.

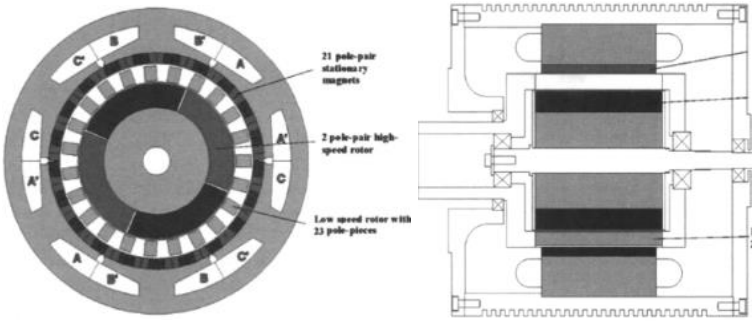
Yapılan çalışmalarda sürekli mıknatısların gömülü olmasından kaynaklı motora ait manyetik devrenin oluşturulmasının zorluğundan ve bir genetik algoritma yöntemi izlenerek motora ait tasarım boyutlarının belirlenmesinden bahsedilmiştir. Son olarak elde edilen optimum tasarım verileri SEA kullanılarak doğrulanmış ve sonuçlar verilmiştir. Jiakuan Xia ve diğerleri [5] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, sayısal kontrol tezgâhında kullanılan benzer oluk-kutup sayısına ve Şekil 2.1'de görüldüğü üzere eşit boyda olmayan stator diş yapısına sahip iki tork motorun tasarım sürecinden bahsedilmiştir. Eşit boyda olmayan stator diş yapısının stator üzerinde bulunan akı yoğunluğunu arttırdığının ve dolayısıyla da çıkış momentini arttırdığı söylenmiştir. Teorik olarak bahsedilen yapıların motor performansına etkisi SEA ve yapılan testlerle doğrulanmış ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.



Şekil 2.1. Makalede ele alınan stator diş yapısı, a) eşit olmayan diş boyu, b) eşit olan diş boyu [5]

Stephane Mouty ve diğerleri [6] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada SM bir motorda moment yoğunluğunu yüksek değerlere çıkarma adına yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen motorun düşük frekans değerlerinde çalıştığı dolayısıyla demir kayıplarının bakır kayıplarına oranla bir öneminin olmadığı vurgulanmıştır. Sargı sonlarının ve vuruntu momentinin etkisi incelenmiş ve elde edilen tasarım boyutlarına göre çıkış momenti ve kayıpların karşılaştırılması yapılıp sonuçlar makale sonunda verilmiştir. Kais Atallah ve diğerleri [7] tarafından yapılan çalışmada ise düşük hız ve yüksek moment yoğunluğuna sahip doğrudan sürüşlü SM senkron motora ait yeni bir topolojiden bahsedilmiştir. Yapısında manyetik fren bulunan ve 3 ana kısımdan oluşan motorun Şekil 2.2'de yapısı görülmektedir. Şekilde de görüleceği üzere 4 kutuplu yüksek hızlı bir rotor, statik kutup yerleştirilmiş olan düşük hızlı bir rotor ve yine yapısında mıknatıs bulunan bir stator tasarımından bahsedilmiştir. Yapılan çalışmada yeni tasarıma ait parametrelerin ve kazanımların

üzerinde durulmuştur. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle doğrulanmış ve sonuçlar çalışma sonunda özetlenmiştir.

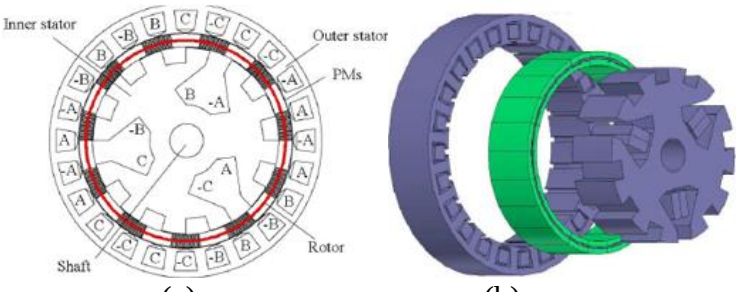


(a) (b)

Şekil 2.2. Atallah K. ve diğerleri tarafından tasarlanan motor yapısı, (a) motora ait kısımlar, (b) manyetik fren ile birlikte motor yapısı [7]

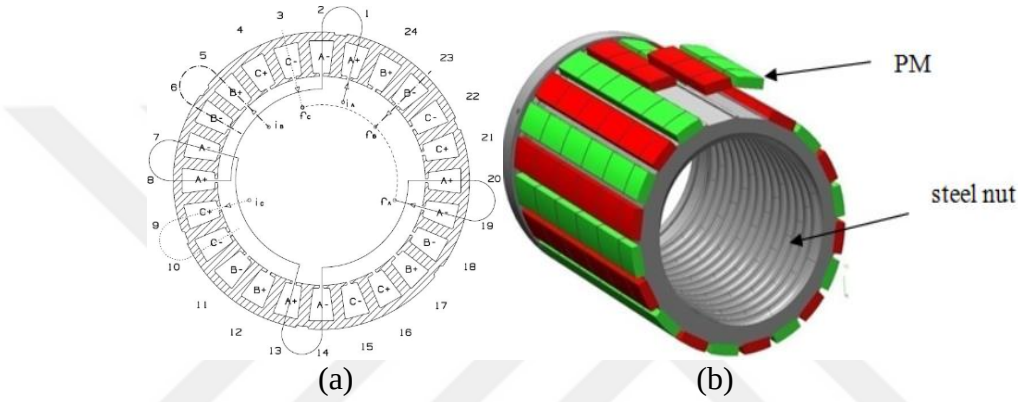
A. Kaddouri ve H. Le-Huy [8] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, statorunda oluk bulunmayan bir doğrudan sürüşlü yüzeyden mıknatıslı senkron tork motor tasarımına yer verilmiştir. Çalışmada öncelikle oluklu ve oluksuz yapıların karşılaştırılmış performans değerleri sunulmuştur. Sonrasında oluksuz yapının üzerinde durulmuş ve bu yapıya ait teorik denklemlerden ve tasarım aşamalarından bahsedilmiştir. Y. Kai ve F. Yaojing [9] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, dış rotorlu mıknatıslarına kaykı verilmiş bir SMST motorun tasarımı gerçekleştirilmiştir. İlk olarak basitçe yapısal kısımları ve özellikleri verilmiştir. Motor yapısında bulunan eksenel soğutma sisteminin motorun daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasına ve motorun daha kompakt bir yapıya kavuşmasına neden olduğundan bahsedilmiştir. Sonrasında motor tasarımı gerçekleştirilmiş olup elde edilen SEA sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılıp makale sonunda özetlenmiştir. Wang Sen ve diğerleri [10] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, bir pompa uygulamasında kullanılan düşük hızlı yüksek momentli bir motorunun vuruntu momentini azaltmaya yönelik yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Çalışmada vuruntu momentine neden olan parametrelerin teorik olarak açıklanması yapılıp SEA yardımıyla hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Son olarak elde edilen değerler, deneysel çalışmalar ile doğrulanıp okuyucuya sunulmuştur. E. Mese ve diğerleri [11] tarafında yapılan çalışmada, 36/32 ve 39/12 oluk/kutup sayısına sahip iki adet doğrudan sürüşlü SMST motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada motorun kullanıldığı uygulamadan bahsedilmiş ve uygulama nedenli bazı motor parametrelerinin önemi vurgulanmıştır. Sonrasında

tasarıma ait optimum parametrelerin ve motor performansının belirlenmesinde yararlanılan SEA sonuçları verilmiştir. Son olarak elde edilen SEA sonuçları deneysel veriler ile doğrulanıp yapılan çalışmanın son kısmında özetlenmiştir. R. Scoot ve diğerleri [12] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada yüksek güçlü rüzgâr türbini uygulamasında kullanılan doğrudan sürüşlü SM bir generatör çalışması üzerinde durulmuştur. Yapılan çalışmada bu tarz generatörlerin son yıllarda çok kullanıldığından bahsedilmiştir. Yine bu tarz generatörlerin yararları ve limitleri yapılan teorik hesaplamalar ile birlikte verilmiştir. Elde edilen sonuçlar dişli kutusuna sahip olan generatörler ile karşılaştırılmıştır. K. Reis ve A. Binder [13] tarafından yapılan çalışmada bir taşıt uygulaması için kullanılan doğrudan sürüşlü dış rotorlu yüzeyden mıknatıslı senkron motorun tasarımının geliştirilmesi üzerinde durulmuştur. Öncelikle kutup ve oluk sayısının belirlenmesi için elektro manyetik tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen motor aynı zamanda termal olarak incelenmiş ve motorun soğutmasına ait yapı çalışmada verilmiştir. Son olarak prototipi üretilen motorda açık devre, kısa devre ve yüklenme testleri yapılmış, elde edilen sonuçlar çalışma sonunda verilmiştir. S. Niu ve diğerleri [14] tarafından gerçekleştirilen çalışmada doğrudan sürüş uygulaması için yeni bir SM senkron motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen motor Şekil 2.3'de de görüleceği üzere çok kutuplu çift stator yapısına sahiptir. Rotorun dışında ve içinde iki farkı yapıda iki adet stator bulunmaktadır. Dış stator kesir oluklu dağıtılmış sargı yapısına sahipken iç stator verniyer yapısına sahiptir. Çalışmada yeni bir yapı denenmesinin amacı daha yüksek moment, daha az vuruntu momenti elde ederek verimin artırılması olarak bahsedilmiştir.



Şekil 2.3. Farklı iki stator yapısına sahip motor yapısı, (a) karşıdan görünüş ve motor parçaları, (b) motora ait üç boyutlu (3B) görünüm [14]

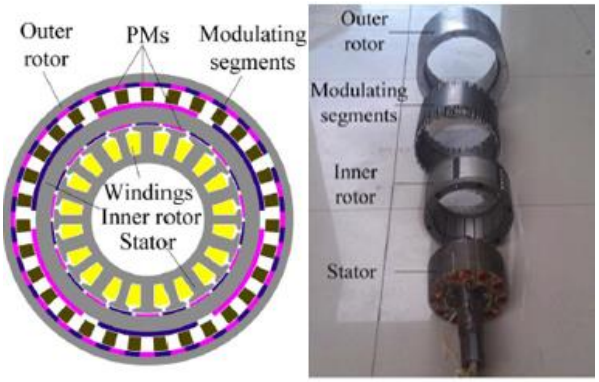
I. Castellini ve diğerleri [15] tarafından yapılan çalışmada, sac metal bükme makinası için kullanılacak olan yüksek moment kabiliyetine sahip SM senkron motorun tasarımı gerçekleştirmiştir. Toplam atalet momentini azaltmak adına motorun vidalı mil sistemine direk bağlantısı yapılmıştır. Statorda kesir oluk yapısına sahip konsantre sargılar bulunurken rotora mıknatıslar segmentli yapıda yapıştırılmıştır (Şekil 2.4). Manyetik tasarım sırasında farklı oluk kutup sayılarında optimizasyonlar yapılmış ve 20 kutuplu 24 oluklu yapı belirlenmiştir. SEA sonuçları çalışma sonunda deneysel veriler ile karşılaştırılıp doğrulanmıştır.



Şekil 2.4. Castellini I. ve diğerleri tarafından yapılan çalışma, (a) Stator sargı yapısı, (b) Rotor yapısı [15]

O. Cote ve diğerleri [16] tarafından yapılan çalışmada, bir arazi uygulamasında kullanılan ATV aracına ait dış rotorlu yüksek moment kabiliyetine sahip SM senkron motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Motor tasarım kriterleri belirlenmeden önce sağlanması gereken mekanik gerekliliklerden bahsedilmiştir. Sonrasında sırasıyla manyetik model, elektriksel model ve termal model oluşturulmuştur. Belirlenen modeller temel alınarak 2 boyutta gerçekleştirilen SEA optimizasyon çalışmaları ile 10.75 kW nominal güce sahip bir SM senkron motor optimum tasarım boyutları belirlenip makale sonunda yapılan çalışmalar kısaca özetlenmiştir. G. Liu ve diğerleri [17] tarafından yapılan çalışmada, doğrudan sürüşe sahip bir uygulama için yeni bir 5 fazlı hata toleransı yüksek manyetik dişli yapısına sahip SM senkron motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın özgünlüğünün yeni bir manyetik dişli yapısının SM senkron motor yapısına entegre edilmesi olduğu belirtilmiştir. Dış ve iç rotorlu yapıya sahip motorda Şekil 2.5'de verilmiştir. Burada iç rotorun her iki yanında bulunan yüzeyden mıknatısların kutup sayılarını aynı olmadığı bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu yapının da yüksek moment yoğunluğuna, yüksek çevrim oranına ve düşük hıza

neden olduğu açıklanmıştır. İki boyutlu (2B) SEA çalışmaları yapıldıktan sonra elde edilen performans verileri deneysel çalışmalara ile karşılaştırılıp özetlenmiştir.

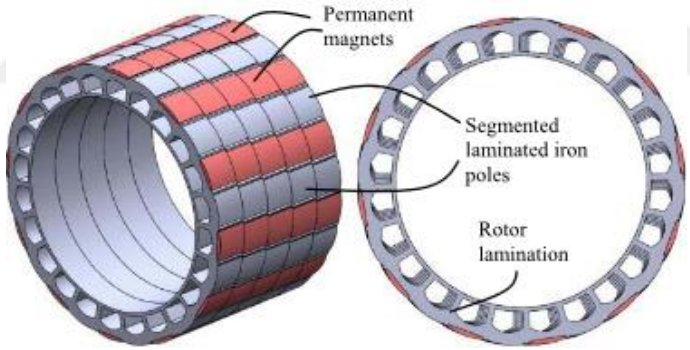


(a) (b)

Şekil 2.5. Liu G. ve diğerleri tarafından yapılan çalışma, (a) motor yapısı, (b) prototip motor [17]

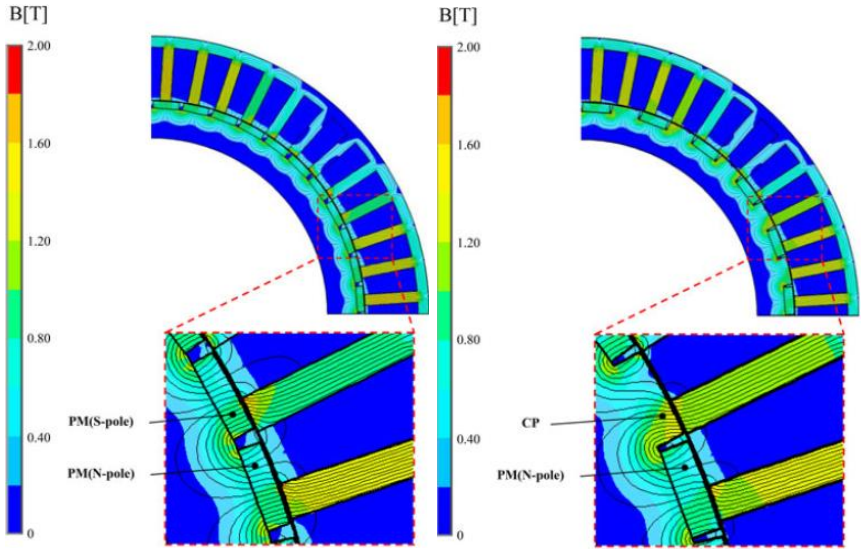
H. Jussila ve diğerleri [18] tarafından yapılan çalışmada, 37 kW güce ve konsantre sargı yapısına sahip SM senkron motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada 4 farklı yapıda mıknatıs incelenmiş ve bunların motor performansına olan etkileri gözlemlenmiştir. Özellikle eddy girdap akım kayıplarının etkisini görmek adına; plastik kalıplanmış, neodinyum mıknatıs ve sinterlenmiş mıknatıs çeşitleri Flux® SEA paket programı ile incelenmiş olup elde edilen karşılaştırmalı büyüklükler çalışma sonunda özetlenmiştir. Sonuçlara göre daha az kayıp elde etmek için sinterlenmiş mıknatıs yerine plastik kalıplanmış mıknatıs kullanılması ve mıknatıslarında segmenti yapıda olması gerekmektedir. E. Meşe ve diğerleri [19] tarafından yapılan çalışmada, bir asansör uygulaması için doğrudan sürüşlü SMST motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Öncelikle sistem için gerekli büyüklükler belirlenmiş sonrada sisteme uygun olacağı düşünülen iki farklı oluk-kutup sayısında motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. 2B Maxwell® SEA programı ile elde edilen performans sonuçlarının yanında aynı zamanda iki motora ait malzeme tüketimi, ağırlık ve maliyet miktarları da karşılaştırılıp çalışma sonunda tablo halinde özetlenmiştir. L. Jian ve diğerleri [20] tarafından yapılan çalışmada, yine bir elektrikli araç uygulaması için doğrudan sürüşlü yüksek moment yoğunluğuna sahip motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Doğrudan sürüşlü motorların mekanik dişli kutusuna sahip motorlara göre avantajlarından bahsedilmiştir. Tasarımda dikkat çekici nokta, motorun yine bir çift rotor yapısına sahip olmasıdır. Literatürde motorların bu yapıya

sahip olması, kendinden manyetik bir dişli sisteme sahip olmasını sağladığı görülmektedir. Çalışmada hem statik hem de dinamik SEA çalışmaları yapılmış, 500W güce sahip prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve elde edilen tüm sonuçlar çalışma sonunda verilmiştir. R. Wrobel ve P. H. Mellor [21] tarafından yapılan çalışmada konsantre sargı yapısına sahip doğrudan sürüşlü dış rotorlu SM senkron motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Farklı oluk kutup sayılarından sargı faktörlerine bakılmış hangi sargı şeklinin çıkış momenti dalgalanmasını azalttığı belirlenmeye çalışılmıştır. Altı farklı oluk kutup sayısına sahip tasarımlar SEA çalışmaları ile incelenmiş olup 24 oluk 28 kutuplu yapının prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar çalışma sonunda verilmiştir. M. Onsal ve diğerleri [22] tarafından yapılan çalışmada yeni bir 9-fazlı SM sıralı kutuplu (SK) bir rotor yapısına (Şekil 2.6) sahip motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada dış boyutları aynı olan başka bir 9-fazlı yüzeyden mıknatıslı motor ile karşılaştırılmış ve SK motorun avantajlarından bahsedilmiştir. Özellikle moment/mıknatıs ağırlığı olarak SK motorun üstün olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 2.6. Onsal M. ve diğerleri tarafından yapılan çalışmadaki rotor yapısı [22]

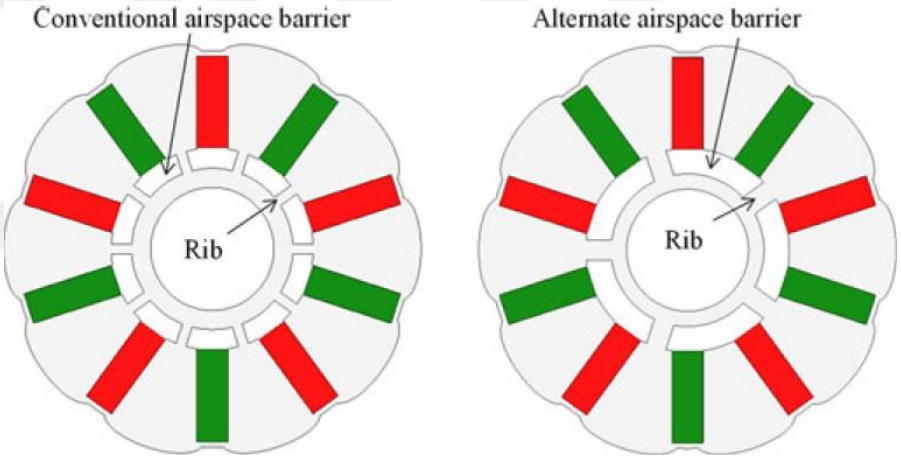
Shi-Uk Chung ve diğerleri [23] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, 44 kutup 46 oluklu konsantre sargı yapısına sahip sürekli mıknatıslı senkron motor tasarımı üzerinde durulmuştur. Tek statoru bulunan bu yapıya iki farklı rotor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yüzeyden mıknatıslı ve sürekli mıknatıslı SK olan bu iki farklı rotor yapısı üzerinde yüksek moment elde etmek adına çeşitli optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmaları genelde mıknatıs boyutlarında yapılan çalışmalar olarak dikkat çekmektedir. Şekil 2.7'da iki farklı motor yapısına ait yüksüz durum akı yoğunlukları görülmektedir. Elde edilen SEA sonuçları deneysel verilerle desteklenip çalışma sonunda verilmiştir.



Şekil 2.7. Optimum tasarım yüksüz durum akı yoğunlukları, (a) yüzeyden mıknatıslı rotor, (b) sıralı mıknatıslı rotor [23]

Yine Shi-Uk Chung ve diğerleri [24] tarafından gerçekleştirilen başka bir uygulamada, kesir oluklu konsantre sargı yapısına ve SM rotor yapısına sahip SM senkron motor tasarım çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışmada öncelikle amaçlanan motor performans verileri ve bu değerleri elde etmek için sahip olunması gereken motor boyutları üzerinde durulmuştur. Elde edilen tasarım, sonlu elemanlar programı yardımıyla incelenmiş ve deneysel olarak da doğrulanmıştır. C.Sung Jin ve diğerleri [25] tarafından gerçekleştirilen çalışmada çamaşır makinası için kullanılan gömülü mıknatıslı senkron tork motorun moment seviyesini iyileştirme çalışmalarından bahsedilmiştir. Mıknatısların gömülü bulunduğu yuva kısmına ait 3 farklı tasarım verilmiştir. Her bir tasarım için motor performans verileri olan d-q eksen endüktansları, Zıt-EMK, vuruntu ve ortalama moment SEA yardımıyla incelenmiştir. Elde edilen 3 farklı tasarıma ait bilgiler deneysel sonuçlarla doğrulanmış olup makalede yer verilmiştir. D. M. Jonel ve diğerleri [26] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise yine bir yüksek moment kabiliyetine düşük hıza sahip motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada çubuk tip gömülü mıknatıslı ve yüzeyden mıknatıslı senkron motorlar karşılaştırılmış ve aynı mıknatıs çeşidine sahip motorlarda yüksek akı yoğunluğu sağlaması nedeniyle çubuk tip rotora sahip motorların daha avantajlı olduğu açıklanmıştır. Aynı çalışmada SM motorlar ile asenkron motor sürücü avantajları karşılaştırılıp SM motor sürücülerinin daha yüksek bir verime sahip olduğu belirtilmiştir. J. Nerg ve diğerleri [27] tarafından yapılan çalışmada, bir elektrik spor

araba tahrik sistemi için geliştirilen 25 kW güce ve 1000 rpm nominal değerlere sahip gömülü mıknatıslı doğrudan sürüşlü senkron motor tasarımına yer verilmiştir. Rotor paketi içinde gömülü mıknatıslar ikili katmanlar içinde bulunmaktadır. Relüktans torku artırması adına tam oluk adımına sahip sargı dağılımı seçilmiştir. Doyumun d ve q eksen endüktanslarına olan etkisini incelemek adına motor aynı zamanda mıknatısları çıkartılarak senkron relüktans motor olarak da incelenmiştir. 2B SEA çalışmaları ile yüklü ve yüksüz durum analizleri yapılan motorlara ait performans sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılıp çalışma sonunda verilmiştir. Z. Q. Zhu ve diğerleri [28] tarafından yapılan çalışmada ÇTGM motor tasarımı yapılmıştır. Moment yoğunluğu anlamında ÇTGM avantajlarından bahsedilmiştir. Şekil 2.8'de de görüleceği üzere yapılan çalışmada çubuk yapıdan dolayı rotor iç çapına doğru oluşan kaçak akıların önlenmesi amaçlanarak akı bariyerleri eklenmiştir.

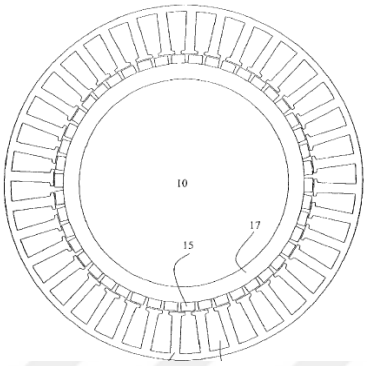


Şekil 2.8. Çubuk tip gömülü mıknatıslı motor yapısı, (a) geleneksel yapı, (b) alternatif yapı [28]

2.2. Patent Araştırması

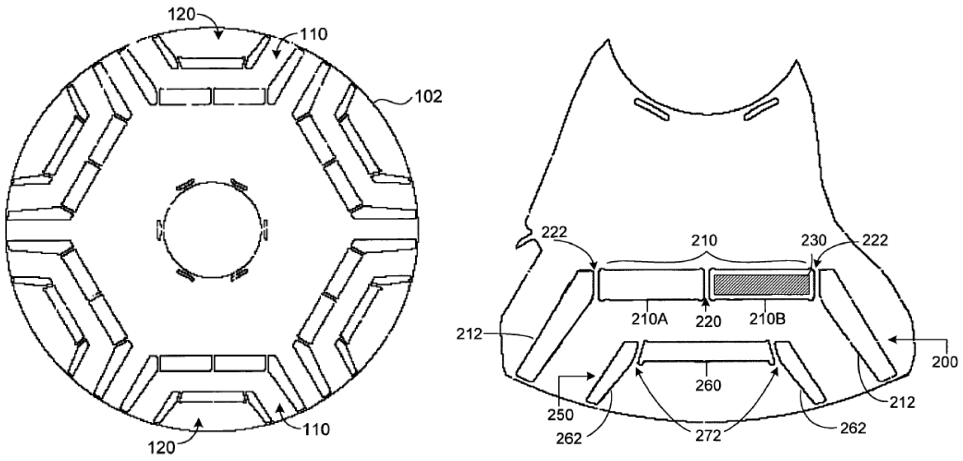
US7105973B2 numaralı patentte elde edilen moment değerini küçük boyutlarda yüksek değerlere çekme adına tasarlanan motorun optimizasyon çalışmaları üzerinde durulmuştur. Motorda oluk kutup kombinasyonunun iyi ayarlanması nedeniyle yumuşak bir kalkış yapması ve düşük hızlarda yüksek moment vermesi sağlanmıştır. Yapılan çalışmada yenilikçi nokta olarak oluk/kutup oranın 1'in altında 0.5' in üstünde tutarak verimliliği artırması gösterilmiştir. Çalışmada çok sayıda oluk/kutup sayısına sahip motor tasarımı değerlendirilmiş ve her bir seçenekte elde edilen değerler

çalışmada yer verilmiştir. Farklı oluk/kutup oranlarında yapılan hesaplamalar sonucunda 36 oluklu 46 kutuplu yapının (Şekil 2.9) en yüksek verimliğe sahip olduğu belirtilmiştir. Bunlar dışında tasarımın son derece düşük vuruntu momenti ve toplam harmonik bozunum (THB) değerleri getirdiği saptanmıştır.



Şekil 2.9. 36 oluk 46 kutuplu motor yapısı [29]

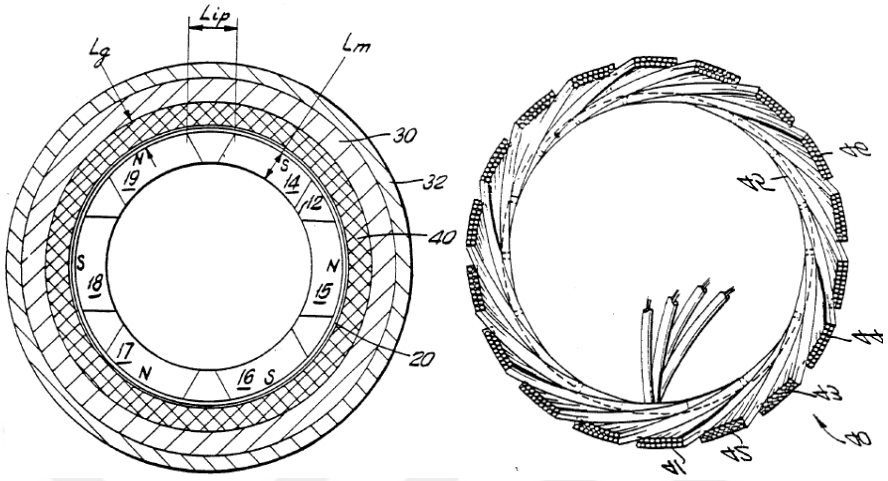
US7498708B2 numaralı patentte ise gömülü mıknatıslı motorda mıknatısların yerleşim konusu üzerinde çalışma yapılmıştır. Gerçekleştirilen çalışma yeni bir gömülü mıknatıslı rotor yapısı (Şekil 2.10) ile mıknatıslar üzerine düşmesi ihtimal dâhilinde olan mekanik stresleri minimize etmekte ayrıca kaçak akıyı azaltmaktır. Detaylı tasarım notları çalışmada verilmiştir



Şekil 2.10. Gömülü mıknatıslı rotor yapısı ve mıknatısların yapısı [30]

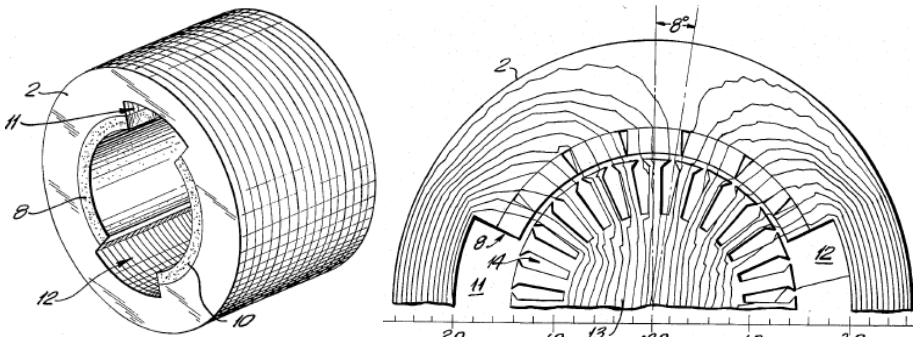
US4954739 numaralı patentte 1990 yılında tasarımı gerçekleştirilen sürekli mıknatıslı motor tasarımı (Şekil 2.11) üzerinde durulmuştur. Çalışmada sürekli mıknatıs teknolojisinin getirdiği yeniliklerden, oluklu ve oluksuz stator yapılarının farklılıklarından bahsedilmiştir. Patenti alınan çalışmada son derece yüksek

geçirgenliğe sahip mıknatıs kullanılmış ve çalışmanın yenilikçi yönü olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Motor ve sargı yapısı [31]

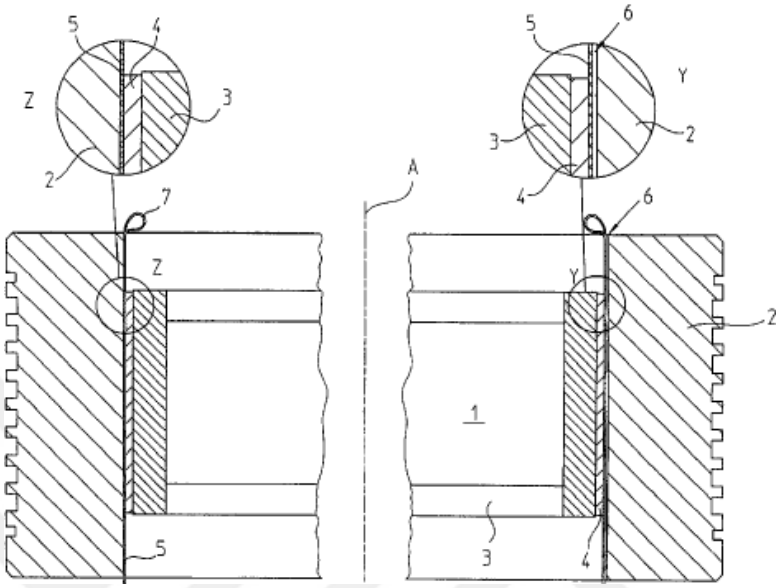
US4508988 numaralı patentte sürekli mıknatıslı DC komütatör motoru tasarımı gerçekleştirilmiştir. Motor yapısı kısaca karşılıklı iki yöne toplanmış mıknatıslara sahip dış rotor ve içte bulunan statordan meydana gelmektedir (Şekil 2.12). Rotor kutup ayakları arasına yardımcı sargılar eklemek için boşluklar bırakılmış ve bu yapının sargılarda oluşması ihtimal akı reaksiyonlarını azaltarak, moment değerini arttırdığından bahsedilmiştir. Kısacası bu yapının motorun birçok performans büyüklüğünü artırdığı söylenebilir.



Şekil 2.12. Motora ait rotor yapısı ve akı dağılımı [32]

US7394177B2 numaralı patentte gövdesiz tork motorunda rotorda bulunan mıknatıslar ile stator yapısının arasına motorun daha sağlam olması ve taşınma sırasında zarar görmemesi adına eklenen bir ara parça (Şekil 2.13) çalışması üzerinde durulmuştur. Yapılan çalışmada tork motorların çok sayıda oluk ve kutup sayısına

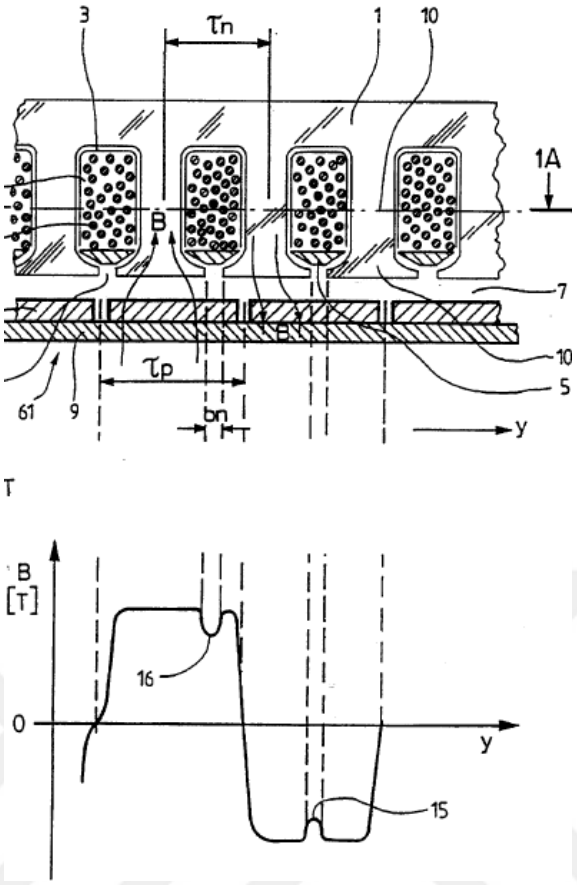
sahip olduğu bu nedenle montajlarının sağlam olması gerektiği vurgulanmıştır. Hava aralığında kullanılan bu manyetik olmayan parça sayesinde daha kompakt bir rotor yapısı gerçekleştirilmiştir.



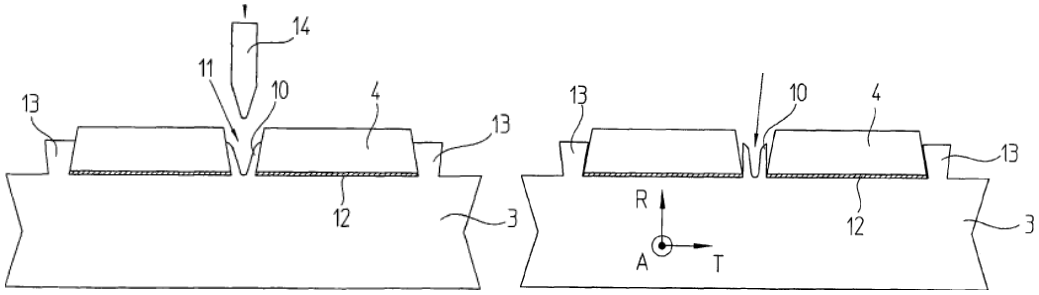
Şekil 2.13. Tork motoru ve koruma elemanı [33]

US5642013 numaralı patentte motorlarda bulunan oluk kutup etkileşimi sonucu oluşan hava aralığı akı dağılımı üzerinde durulmuştur. Yapılan çalışmada özel bir oluk ağzı tasarımı ile (Şekil 2.14) motorlarda relüktans değişiminden meydana gelen negatif etkiler ortadan kaldırılmıştır. Aynı zamanda yeni tasarım ile üretim kolaylığı sağlanmış ve maliyet azaltılmıştır.

US7701100B2 numaralı patentte rotor yüzeyine monte edilen mıknatısların yerleştirilmesinde yeni bir yöntem üzerinde durulmuştur. Mıknatısların koyulacağı alanların etrafında bulunan metal şeritler bu işlem için kullanılmıştır (Şekil 2.15). Bu yöntem rotor nüvesinin işlenmesi bakımından üretimde zorluk getirse de mıknatısların daha sağlam yerleşimini ve rotorun yüksek hızlara çıkma kabiliyetini geliştirmektedir.

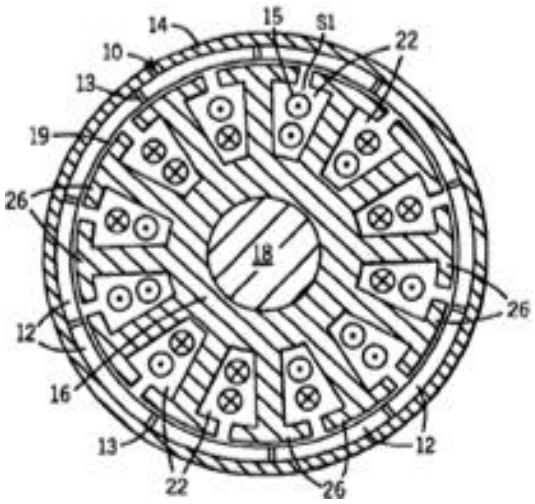


Şekil 2.14. Oluk kutup etkileşimi sonucu hava aralığı akı dağılımı [34]



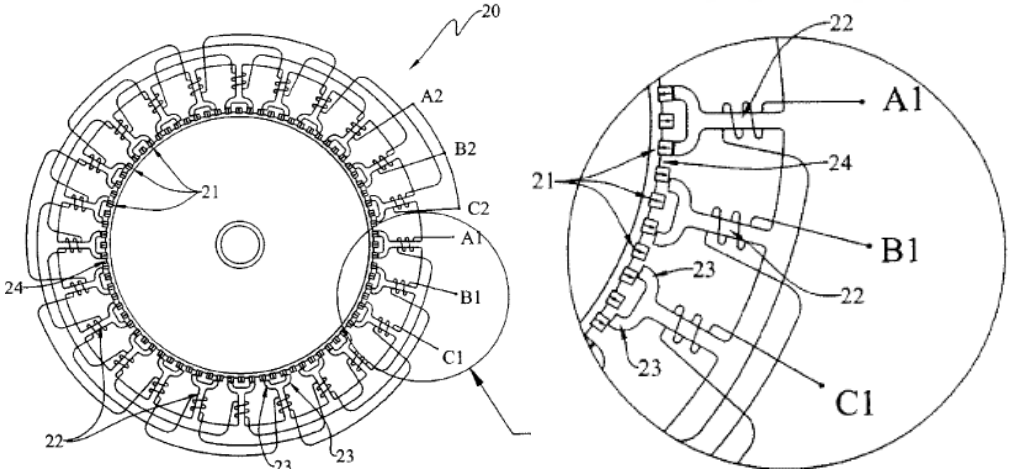
Şekil 2.15. Mıknatısların yerleştirildiği ve 2 iki farklı tasarıma sahip olan yan koruma çıkıntıları [35]

US6710505B1 numaralı patentte silindir makara sistemi içine entegre edilmiş bir doğrudan sürüşlü motor tasarımı üzerinde durulmuştur. Çalışmanın yenilikçi yüzü olarak her bir silindirin içinde motor bulunması ve tahrik sistemine doğrudan etki etmesi olarak açıklanmıştır. Şekil 2.16'de motorun yapısı görülmektedir. Motor silindir makaralar içine doğrudan yerleştirildiğinden dış gövdeye sahip değildir. Dış rotor yapısına sahip olan motora, yerleştirileceği alan kısıtlı olmasına rağmen maksimum sayıda kutup yerleştirilmiştir.



Şekil 2.16. Doğrudan sürüşlü motor yapısı [36]

US9006941B2 numaralı patentte farklı stator tasarımlarına sahip yeni sürekli mıknatıslı bir step motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada stator oluk ağızlarına verilen farklı tasarımlarla moment yoğunluğunu artırmaya ve step motorda senkron hız yakalanmaya çalışılmıştır. Şekil 2.17'da ise stator oluk yapıları görülmektedir.



Şekil 2.17. Sürekli mıknatıslı motor stator yapısı [37]

2.3. Mevcut Ürünler

Piyasada doğrudan sürüşlü ve yüksek moment kabiliyeti bulunan SM senkron motorların kullanıldığı alanlara bakıldığında elektrikli araç tasarım alanları dikkati çekmektedir. Bunlar dışında doğrudan sürüş ihtiyacının fazla olduğu endüstriyel uygulamalarda ihtiyaçların çoğu bu motorlar ile sağlanmaktadır. Uygulama ihtiyacının mevcut ürünler ile giderilemediği yerlerde, yüksek moment değerine sahip SM senkron motorlar kendilerine yer bulmaktadır. Özellikle, havacılık, uzay ve askeri uygulamalarda ürün güvenilirliği ve hata dayanım toleransı en üst seviyede istenildiği için bu tür yapılar ile gidilerek çözümler üretilebilmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda bu alanda doğrudan sürüşlü SMST motor ürünlerine sahip birçok firma olduğu görülmüştür. Kollmorggen, Etel ve Fischer firmaları en fazla ürün ortaya koyan firmalar olarak dikkati çekmektedir. Şekil 2.18'de Kollmorgen firmasına ait TMB serisi tork motorları görülmektedir. Firmaya ait ayrıca RBE ve KBM serisi tork motorlarıda 5 Nm'den 700 Nm'ye kadar geniş bir moment çalışma aralığına sahiptir. Şekil 2.19'da çok sayıda tork motoru ürününe sahip olan Etel firmasına ait tork motor ailesi görülmektedir. Detaylı bilgi ilgili referansta mevcuttur. Şekil 2.20'da Fischer firmasına ait TI serisine ait bir tork motoru ve son olarak Şekil 2.21'de de Allied Motion fismasına ait HT serisi tork motoru görülmektedir. Bu motorlar incelendiğinde 0,15 Nm büyüklüğünden 4125 Nm moment büyüklüğüne sahip olan çeşitli kutup sayılarında motorlar görülmektedir. Bu firmalar dışında Parker, Moog, Tecnotion, Celera Motion gibi çok sayıda firmaya ait ürünler de mevcuttur.



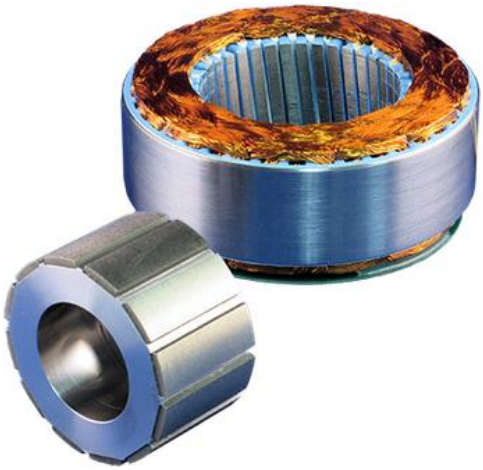
Şekil 2.18. Kollmorgen TBM serisi tork motorları [38]



Şekil 2.19. Etel firması tok motor ürünleri [39]



Şekil 2.20. Fischer firmasına ait TI serisine ait bir tork motoru [40]



Şekil 2.21. Allied Motion firmasına ait
HT serisine ait bir tork motoru [41]

3. GÖMÜLÜ MIKNATISLI MOTOR ÖN TASARIMI

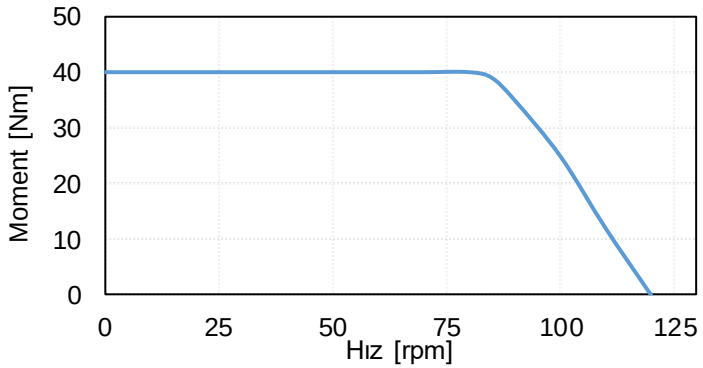
Bu bölümde tasarımı amaçlanan gömülü mıknatıslı düşük hızlı ve doğrudan sürüşlü motor ön tasarımı, belirlenen tasarım kriterleri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Tasarımı tamamlanacak olan gömülü mıknatıslı motorla aynı stator yapısına, boyutlarına ve oluk\kutup sayısına sahip olan başka bir yüzeyden mıknatıslı motor referans alınacaktır. Referans motora ait tasarım denklemleri sonucu uygun oluk-kutup sayısı belirlendikten sonra referans motora ait SEA sonucu performans değerleri de elde edilmiş ve yine bu bölümde verilmiştir.

3.1. Tasarım Kriterleri

Tasarımı gerçekleştirilecek olan GM motorda performans değerinin iyileştirildiğini göstermek adına daha önce tasarımı gerçekleştirilmiş ve üretilip doğrulanmış yüzeyden mıknatıslı bir senkron motor referans alınacaktır. Göz önüne alınacak olan tasarım kriterleri Tablo 3.1 de verilmiştir. GM motorun da yüzeyden mıknatıslı motorda olduğu gibi 24 V DC bara seviyesinde çalışması, anma noktasında 40 Nm moment ve 85 rpm de dönecek şekilde tasarlanması amaçlanmıştır. Bu tasarım kriterleri doğrultusunda GM motorda da hedeflenen moment-hız karakteristiği Şekil 3.1 de görülmektedir.

Tablo 3.1. Gömülü ve yüzeyden mıknatıslı motor tasarım kriterleri

Tasarım Kriterleri	Değer
DC bara gerilimi	24 V
Anma momenti	40 Nm
Anma hızı	85 rpm



Şekil 3.1. Tasarım kriterlerini göz önüne alındığında motor moment-hız karakteristiği

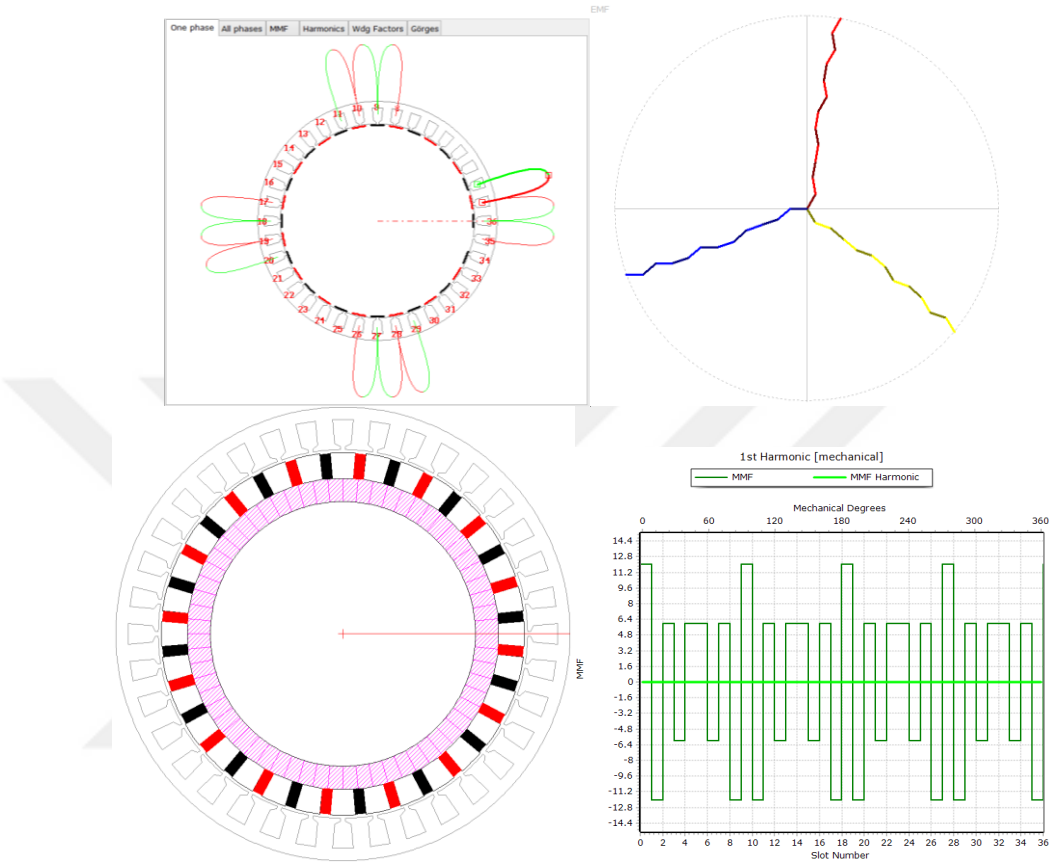
Adil bir karşılaştırma olması açısından stator yapıları aynı tutulacak sadece rotor yapıları değiştirilerek performans farkı belirlenecektir. Burada ki tasarım hedefi, daha az mıknatıs kullanılarak güç ve moment seviyesi bakımından referans motoru yakalamak ve hatta daha üstüne çıkmaktır. Aynı zamanda GM motorların avantajlarından biri olan yüzeyden mıknatıslı motorlara göre daha yüksek hızlarda çalışma kabiliyetini göstermektir.

Tasarımda bu kriterler doğrulusunda ilk olarak referans motor oluk/kutup sayısını belirleyen optimizasyon çalışması sonuçları verilecektir. Sonrasında tasarımı tamamlanmış yüzeyden mıknatıslı motorun SEA sonuçları verilecektir. Referans motor olarak seçilen yüzeyden mıknatıslı motorla aynı dış boyutlara ve oluk\kutup sayısına sahip yeni bir çubuk tip GM motor ön tasarımı yapılacak ve SEA ile kontrol edilecektir. Ardından referans motor ile karşılaştırılacaktır. Son adım da ise tasarım tekniği değiştirilerek, özgün yeni bir GM motor tasarımı tamamlanacaktır. Performans değerleri yüzeyden mıknatıslı referans motor ve ÇTGM motorla karşılaştırılacaktır.

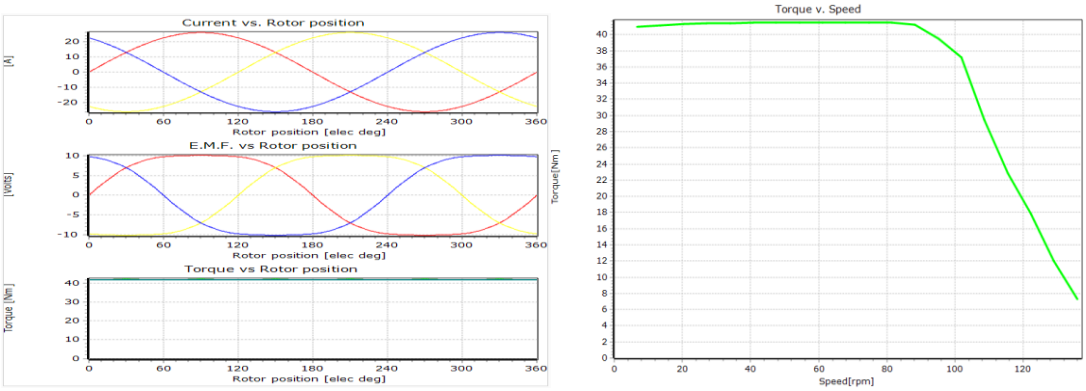
3.2. ÇTGM Motor Ön Tasarım SPEED® Yazılımı ile Kontrolü

Referans motor kutup sayısı optimizasyonu sonuçlarından sonra aynı dış çaplarda, stator yapısında ve oluk\kutup sayısında ÇTGM motor ön tasarımı SPEED® manyetik eşdeğer devre analizi programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ÇTGM motor referans motorda da olduğu gibi 32 kutuplu 36 oluklu bir yapıya sahiptir. Rotor ve stator manyetik devresinde M270-35A veya benzeri bir malzeme kullanılmıştır. Mıknatıs Br değeri ise 1,3 T seviyelerindedir. Dengeli bir sargı yapısına sahiptir ve MMF dağılımı Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Motor performans analizi ve moment-hız karakteristiği de

Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Ön tasarım sonucu anma hızı 85 rpm, anma momenti 41,64 Nm olarak elde edilmiştir. Sonraki bölümde bu yapıya ait SEA yapılacak ve performans sonuçlarına bakılacaktır.



Şekil 3.2. ÇTGM motora ait SPEED® modeli, MMF dağılımı ve sargı şeması



Şekil 3.3. ÇTGM motora ait SPEED® performans analiz sonuçları ve motor moment-hız karakteristiği

3.3. Referans Motor Performans Verileri

Tasarımı gerçekleştirelecek olan GM senkron motorun performans verilerinin karşılaştırılması için daha önce üretimi gerçekleştirilen ve doğrulanan ve aynı zamanda gömülü mıknatıslı senkron motorla aynı stator dış çapına, oluk kutup sayısına ve akım değerine sahip yüzeyden mıknatıslı senkron motor referans motor olarak ele alınacaktır. Böylece tez kapsamında tasarımı gerçekleştirilecek GM motorun performansının referans motora göre avantaj ve dezavantajları koloyca görülebilecektir. Daha önce üretimi gerçekleştiren yüzeyden mıknatıslı referans motorun tüm performans verileri Tablo 3.2'de gösterilmiştir. Tabloda görülen değerlere baktığımızda, anma momentinin %0,0075'i gibi küçük bir oranda vuruntu momenti, hat geriliminde %0,17 gibi düşük %THB değerleri referans motorun iyi bir tasarıma sahip olduğunu gösterir. Sıradaki amaç tüm bu performans verilerini kaybetmeden performans olarak daha da üstün yeni bir özgün GM motor tasarımını gerçekleştirmektir.

Tablo 3.2. Referans motor performans sonuçları

	Yüzeyden Mıknatıslı Referans Motor
Oluk/kutup	36/32
Paket boyu	40
Sargı bağlantısı	Yıldız
Anma akımı	18,4 Arms
Anma hızı	85 rpm
Vuruntu momenti tepe değeri	0,003 Nm
Zıt-EMK tepe değeri (Hat@100rpm)	18,91 V
%THD (Hat)	%0,17
Anma momenti	40,46 Nm
Moment dalgalanması	%0,54
Kv	0,189 Vmax/rpm
Kt	2,2 Nm/Arms
Toplam mıknatıs ağırlığı	0,691 kg
Moment /Mıknatıs Ağırlığı	58,48 Nm/kg

4. GÖMÜLÜ MIKNATISLI MOTOR SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Bu bölümde yeni bir GM motor manyetik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Stator yapısının hem yapısal hem de elektriksel olarak referans motor ile aynı tutulmasına karar verilmiş ve rotor yapısı üzerinde manyetik analizler yapılmış, nihai tasarım ortaya çıkarılmıştır. Bu kısımda ilk olarak ön tasarımlar sonucu elde edilen boyutlarda klasik ÇTGM motora ait SEA sonuçları verilmiştir. Ardında bu motora ait toplam mıknatıs ağırlığı, yüzeyden mıknatıslı referans motorla aynı seviyeye çekilmiş ve her iki motor performans olarak karşılaştırılmıştır. Son olarak farklı bir tasarım üzerinde yapılan çalışmalar sonucu yeni bir sıralı kutuplu gömülü mıknatıslı (SKGM) motor yapısı ortaya çıkarılmış ve referans motor (yüzeyden mıknatıslı motor) ile klasik ÇTGM motor performans değerleri karşılaştırılmıştır. Manyetik analizler tamamlanıp yeni bir SKGM motor nihai tasarımının ortaya çıkmasından sonra motora ait mekanik ve termal analizler de gerçekleştirilip motor tasarımı tamamen tamamlanmıştır.

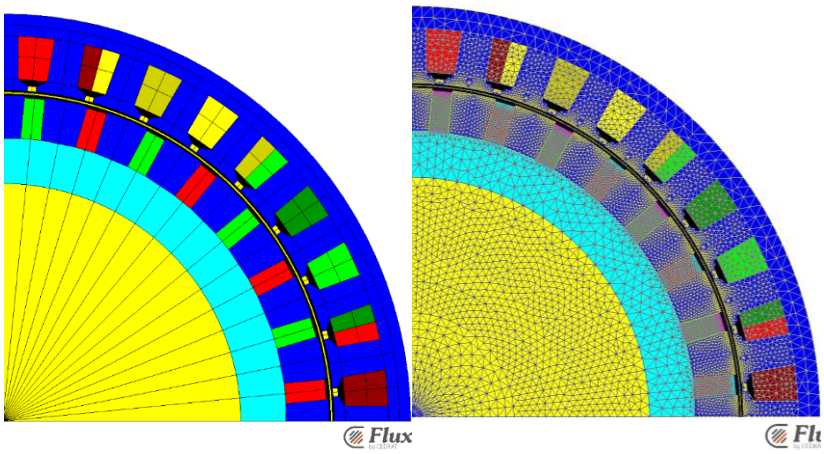
Manyetik analizler de ilk olarak motorun sargılarında akım akmadığı yüksüz durum analizleri gerçekleştirilmiş sonrasında motor sargılarına akım uygulanarak yük altında verebileceği moment seviyesi belirlenmiştir. Yüksüz durum akı yoğunluğunda SM senkron motorlarda incelenen iki önemli büyüklük bulunmaktadır. Bunlar vuruntu momenti ve zıt-EMK büyüklükleridir. Sürekli mıknatıslı bir motorda rotordaki sürekli mıknatıslarla statordaki oluk ağızları arasındaki etkileşimden dolayı oluşan momente vuruntu momenti denir. Tetik ya da akımsız moment diye de adlandırılır. Momentin pozisyonu ve değeri her bir dönüşteki manyetik kutup sayısına ve statorun oluk sayısına bağlıdır. Düşük hızlarda titreşim ve gürültü ile kendini gösterir ve çıkış momentine önemli düzeyde negatif etki eder. Yüksek hızlarda ise motorun eylemsizlik momenti sayesinde vuruntu momentinin çıkış momentine etkisi fazla görülmez. Vuruntu momenti istenmeyen bir büyüklüktür ve minimize edilmesi gerekir. Bu nedenle çeşitli minimize yöntemleri hem eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorlara hem de radyal akılı sürekli mıknatıslı motorlara uygulanır.

Rotorun manyetik etki altında dönmeye başladığı andan itibaren, motorun yapısına göre uygulanan voltaja karşı yönde bir zıt EMK gerilimi oluşur. Elektro motor kuvveti (EMK) ya da gerilimi olarak adlandırılan bu büyülük Faraday kanunu ile açıklanabilir. Faraday kanununa göre; rotorun dönüşüyle beraber rotor üzerinde ki akının zamanla değişimi sonucu elektro motor gerilimi oluşur. Bu gerilim kendisini oluşturan kuvvete ters yönde olduğundan zıt elektro motor gerilimi ya da kuvveti olarak adlandırılır. SM motorlarda bu gerilimin ölçümü, motorun statorunda herhangi bir akım geçirilmeden gerçekleştirilir. Bu gerilim üzerinde oluşan harmonik bileşenler çıkış momentini bozduğundan azaltılmak zorundadır. Oluşan bu harmonikler aslında stator sarımlarının dağıtımından ve mıknatısların şeklinden kaynaklanır. Stator gerilimi sinüs ya da trapezoidal olabilir. Bu giriş gerilimlerine bağlı olarak zıt elektro motor geriliminde girişe göre saf sinüs ya da saf trapezoidal oluşması beklenir. Ama gerçekte bu gerilim dalga şekli mutlaka harmonik bileşenler içerir. Bu harmonik bileşenlerin azaltılmasında çeşitli yöntemler kullanılır.

Yüksüz durum analizleri ardından motor sargılarına akım uygulanarak yüklü durum analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu durumda motorun yük altında çıkabileceği moment büyüklüğü belirlenmiş ve analiz sonucu elde edilen momenti kalitesi incelenmiştir. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

4.1. ÇTGM Motor Ön Tasarım SEA Sonuçları

Ön tasarım sonucu ortaya çıkan klasik ÇTGM motora ait geometrinin Flux® SEA paket programı ile oluşturulmuş modeli ve bu modele ait mesh yapısı Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Motorda bütün enerji dönüşümünün gerçekleştiği hava aralığında ağ yapısı yoğunluğu olması gerektiği gibi yüksektir. Motor analizlerin daha hızlı sürmesi için 1/4 simetri incelenmiştir.

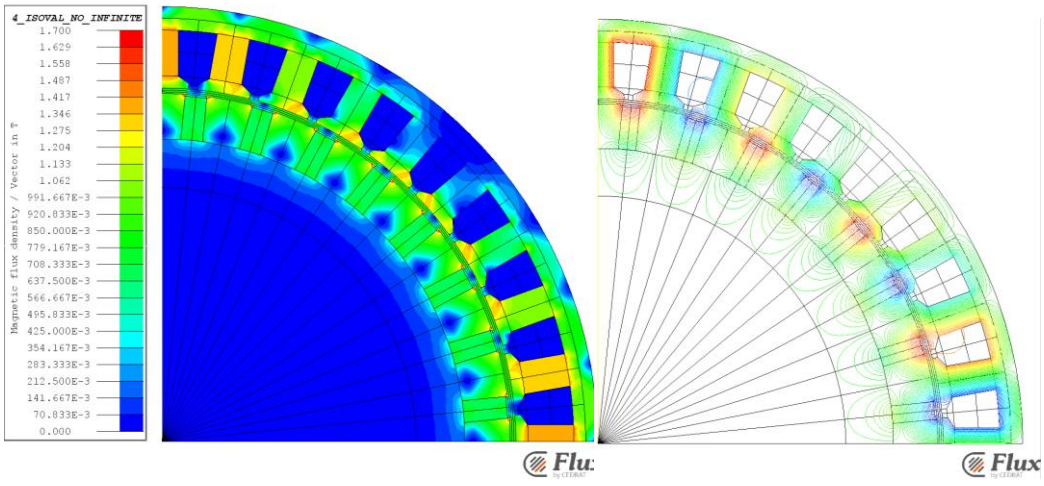


(a) (b)

Şekil 4.1. Ön tasarım sonucu oluşan klasik ÇTGM motor, (a) Flux® SEA modeli, (b) mesh yapısı

4.1.1. Yüksüz durum sonuçları

Yapılan analizler sonucu ilk olarak motor sargılarına herhangi bir elektriksel enerjinin uygulanmadığı varsayılmış ve yüksüz durum analizleri gerçekleştirilmiştir. Motorun yüksüz durum analizi sonucu elde edilen akı yoğunlukları ve akı çizgileri Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Maksimum akı yoğunluğu dişlerde 1,42 T seviyelerinde gözlenmiştir.

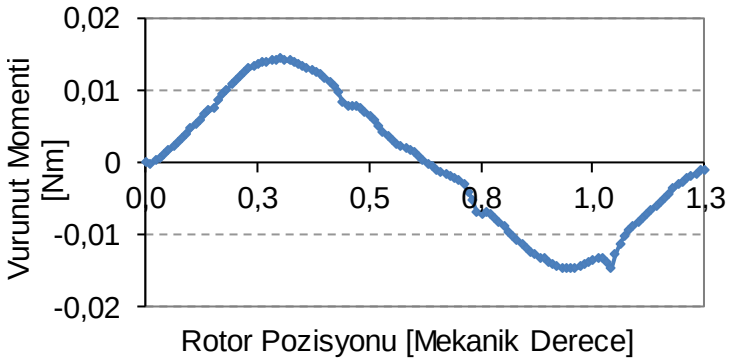


(a) (b)

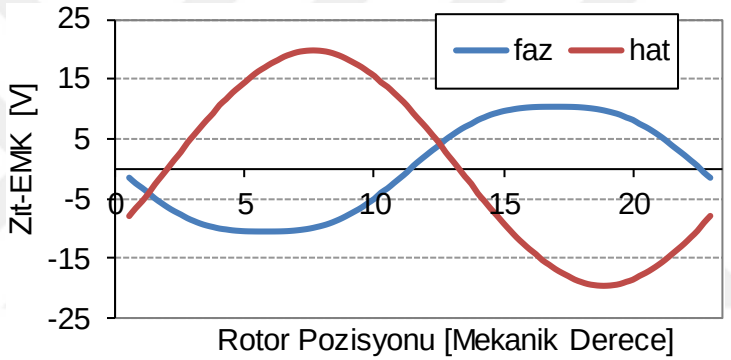
Şekil 4.2. Ön tasarım sonucu ortaya çıkan klasik ÇTGM motora ait, (a) yüksüz durum akı yoğunluğu seviyeleri, (b) akı çizgileri

Klasik ÇTGM motorda ön tasarım sonucu incelenen yapıdan elde edilen vuruntu momenti değişimi Şekil 4.3'de verilmiştir. Vuruntu momenti maksimum değeri 0,015 Nm'dir. Bu değer ortalama çıkış momenti değerinin yaklaşık %0,0375'ine denk

gelmektedir. Zıt-EMK gerilimi değişimleri de Şekil 4.4'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere hat gerilimi zıt-EMK değişimi saf sinüse yakındır.



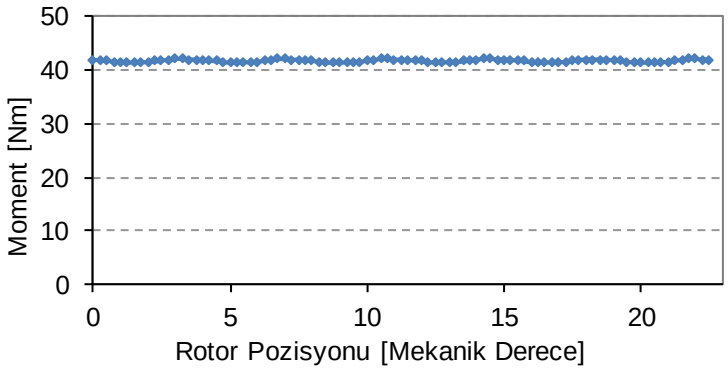
Şekil 4.3. Ön tasarım sonucu elde edilen yapının vuruntu momenti değişimi.



Şekil 4.4. Ön tasarım sonucu elde edilen yapının faz ve hat Zıt-EMK değişimi.

4.1.2. Yüklü durum sonuçları

26 A maksimum akım uygulanan motorda elde edilen çıkış momenti değişimi Şekil 4.5'de verilmiştir. Ortalama moment değeri 42,57 Nm ve ortalama çıkış momenti dalgalanması %2,12 seviyelerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.5. Ön tasarım sonucu elde edilen yapının ortalama moment değişimi.

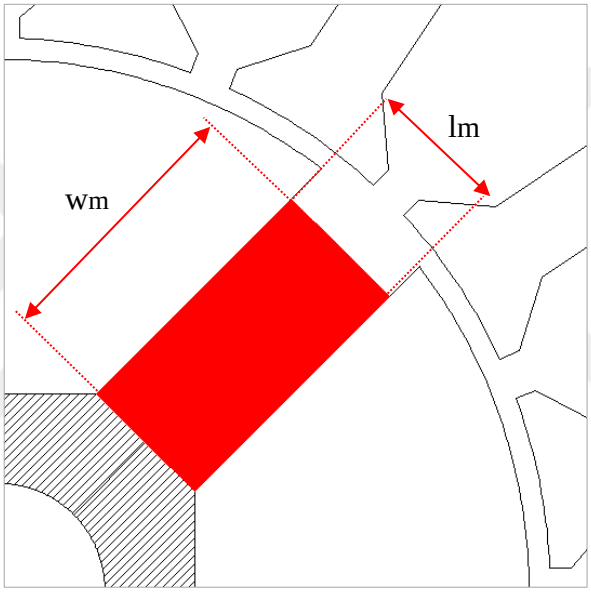
4.2. Klasik ÇTGM Motor Performansının Yüzeyden Mıknatıslı Referans Motor ile Karşılaştırılması

Ön tasarım sonucu ortaya çıkan klasik ÇTGM motor yapısının SEA yöntemiyle elde edilen performans sonuçları önceki bölümde verilmişti. Ön tasarım sonucu motora ait performans değerleri belirlenmiş ve iyileştirilmesi gereken değerlen saptanmıştır. Bu bölümde ise ÇTGM motorun performans değerleri yüzeyden mıknatıslı referans motorla karşılaştırılmıştır. Ancak bunu yaparken adil bir karşılaştırma olması adına toplam mıknatıs ağırlığı referans motorla aynı tutulmuştur. Bu nedenle Şekil 4.6'da verilen mıknatıs boyutları değiştirilerek ÇTGM motorda ortalama moment ve moment dalgalanması sonuçları farklı mıknatıs genişliği olan l_m için elde edilmiştir. Mıknatıs ağırlığının sabit kalması adına mıknatıs uzunluğu olan w_m büyüklüğü de mıknatıs genişliğine (l_m) bağlı olarak değişmiştir. Elde edilen ortalama moment ve moment dalgalanması sonuçları sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere mıknatıs genişliğinin (l_m) 5,5 mm olduğu durumda ortalama moment maksimum olarak elde edilmiştir. Aynı şekilde 5,5 mm mıknatıs genişliğinde moment dalgalanması değeri de minimum değerdedir. Bu mıknatıs genişliğinde elde edilen moment 40,21 Nm, moment dalgalanması ise %0,89'dur.

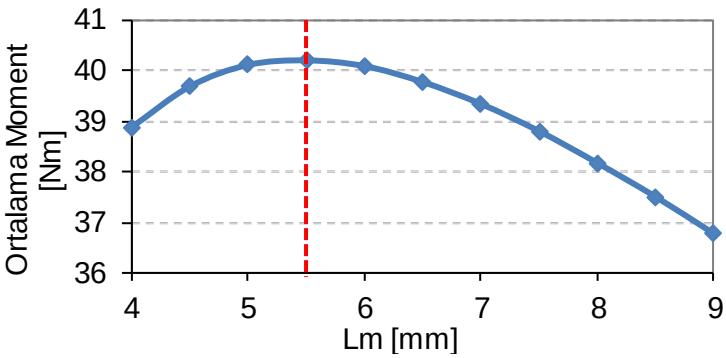
Tüm bu değerler klasik çubuk tip GM motorda mıknatıs ağırlığının 0,691 kg, mıknatıs boyutlarının ise 5,5x13,1 mm olduğu durumda elde edilmiştir. Referans motorda da toplam mıknatıs ağırlığı 0,691 kg'dır. Referans motorda elde edilen moment 40,46 Nm'dir. Bu durumda moment/mıknatıs ağırlığı oranı 58,48 Nm/kg olmaktadır. Çubuk tip GM motorda ise elde edilen moment/mıknatıs ağırlığı 58,12 Nm/kg'dır. Her ne kadar moment dalgalanması seviyesi düşük değere sahip olsa da moment/mıknatıs

kütlesi oranı referans motordan %0,6 düşüktür. Her iki motora ait moment-hız performansları da incelenmiş olup Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere çubuk tip GM motorun sabit güç bölgesinde daha geniş bir çalışma aralığı vardır.

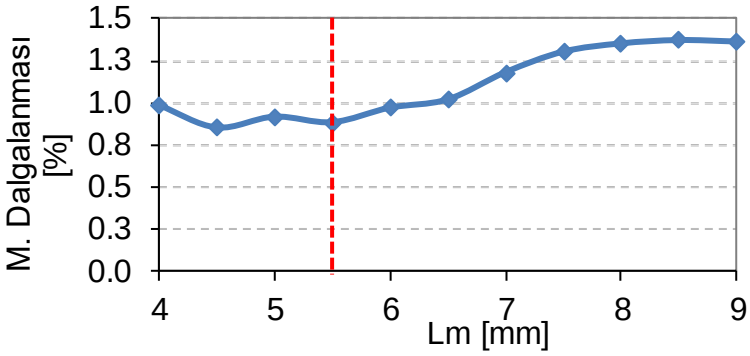
Tüm bu elde edilen performans değerlerine bakacak olursak her ne kadar analizi gerçekleştirilen klasik çubuk tip GM motorun bazı performans avantajları bulunsa da bu değerleri daha da geliştirecek yeni bir gömülü mıknatıslı motor tasarımı gerçekleştirmek mümkündür. Bu nedenle bu noktadan sonra performans değerlerini daha da yukarılara çekecek olan yeni bir SKGM motor tasarımına karar verilmiştir.



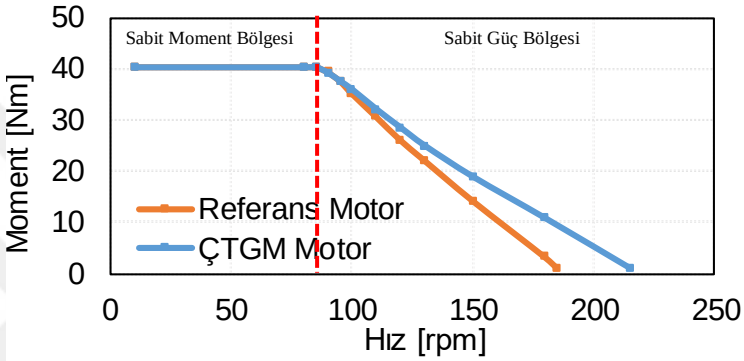
Şekil 4.6. Büyük mıknatıs yapısında lm ve wm büyüklüklerinin anlamı



Şekil 4.7. Farklı mıknatıs genişliklerinde ortalama moment değerinin değişimi



Şekil 4.8. Farklı mıknatıs genişliklerinde moment dalgalanması değerinin değişimi



Şekil 4.9. Yüzeyden mıknatıslı referans motora ve klasik ÇTGM motora ait moment-hız karakteristikleri

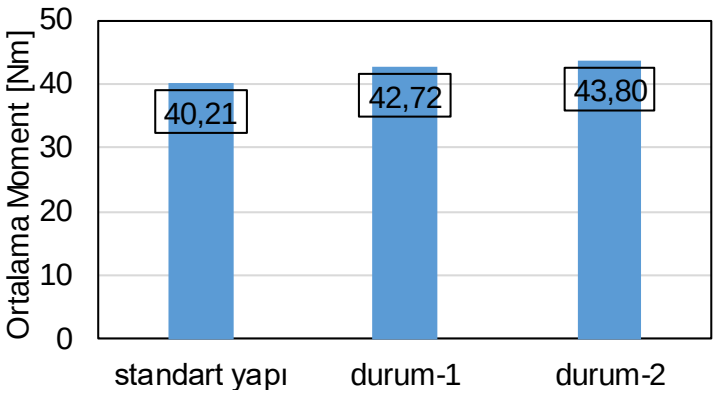
4.3. Nihai Tasarım için Rotor Yapısının Değişmesi-Yeni Bir SKGM Motor

Gerek performans olarak gerekse de mıknatıs maliyetini düşürmek adına ÇTGM motorda yeni bir tasarım tekniği uygulanarak özgün SKGM bir motor tasarımın yapılmasına karar verilmiştir. Bu kısımdaki çalışmada amaç, daha önce 58.19 Nm/kg olarak belirlenen moment/mıknatıs kütlesi oranını ve maksimum güç bölgesinde çalışma aralığını artırmaktır. Bu nedenle iki yöntem uygulanabilir olarak ön görülmüştür. Birinci yöntem mıknatıs kütlesini sabit tutup motor momentini artırmaktır. Ancak bu yöntem de mıknatıs maliyeti düşmemiş olacaktır. İkinci yöntem de ise motorun verebileceği moment yaklaşık sabit tutulup kullanılan mıknatıs kütlesi azaltılmasına yönelik çalışmalar yapılabilir. Mıknatıs kullanım oranını aşağılara çekip performans olarak da istediğimiz değerleri yakalayabileceğimiz ikinci yöntem seçilebilir olarak görülmektedir. Bu nedenle çalışmanın geri kalan kısmında ikinci yöntem üzerinde durulacaktır.

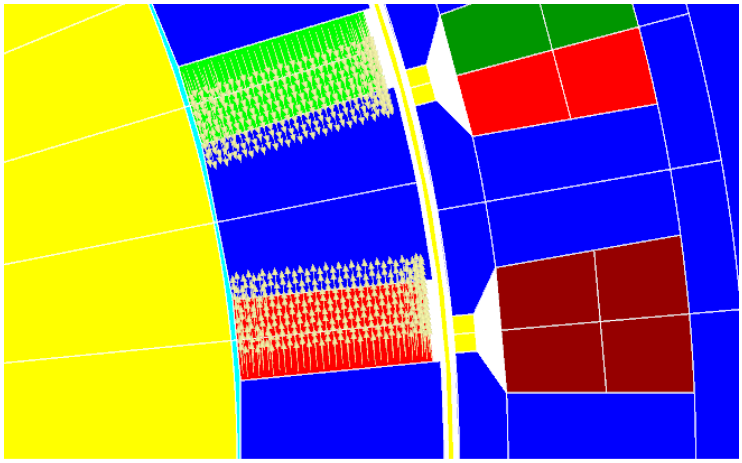
Bu tasarım tekniğinde büyük mıknatıs için belirlenen 5,5x13,1 mm boyutları alınmış ve büyük mıknatısların yarattığı manyetik akıya destekleyici standart dışı daha küçük boyutlu mıknatıslar rotor nüvesine yerleştirilmiştir. Küçük mıknatıslar rotor nüvesinde maksimum yer kaplayacak şekilde 5x3 mm boyutlarında yerleştirilmiştir. Sonrasında eklenen küçük boyutlu mıknatıslar için optimizasyon çalışmaları yapılmış ve nihai tasarım elde edilmiştir.

4.3.1. Manyetik alan destekleyici küçük mıknatıs eklenmesi

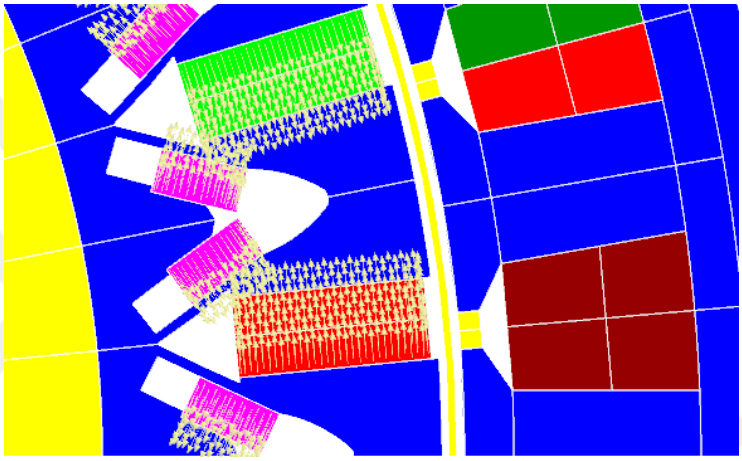
Küçük mıknatıs eklenmesi çalışmasında ilk olarak mıknatısın yerleştirileceği yer üzerine çalışmalar yapılmıştır. Üç farklı durum için ortalama moment değerleri elde edilmiş ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Bu çalışmada Şekil 4.11'da da görüleceği üzere küçük mıknatıslar eklenmemiş standart yapının dışında, iki farklı yerleştirme yapılmıştır. Şekil 4.11'(a) da küçük mıknatıs eklenmemiş standart yapı, (b) de küçük mıknatıs eklenmiş ilk yapı (durum-1) ve (c) ise küçük mıknatıs eklenmiş ikinci durum (durum-2) görülmektedir. Sonuçlardan da görüleceği üzere ikinci durum olan durum-2 yapısında ortalama moment 43,8 Nm elde edilmiştir. Böylece akı destekleyici küçük mıknatısların yerleşim yeri belirlenmiştir.



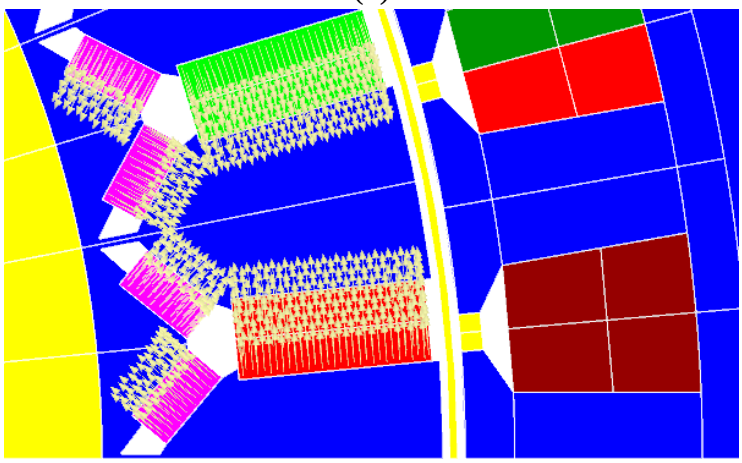
Şekil 4.10. Küçük mıknatıs eklenmesi sonucu ortaya çıkan farklı yapılarda ortalama moment değerleri



(a)



(b)

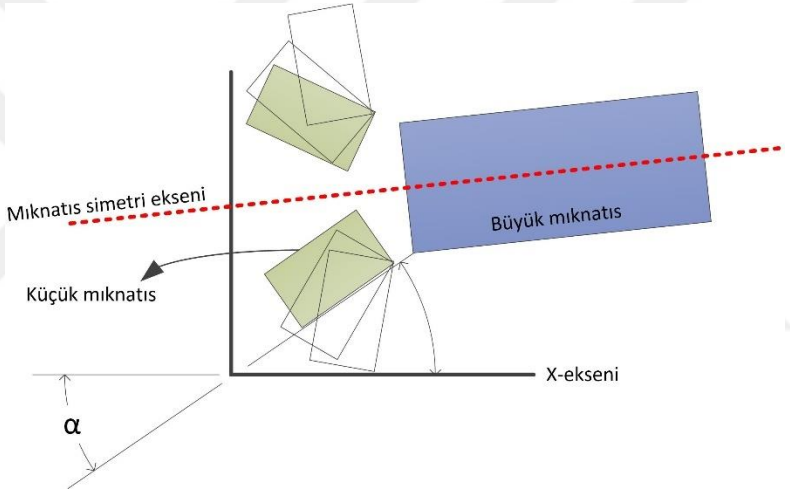


(c)

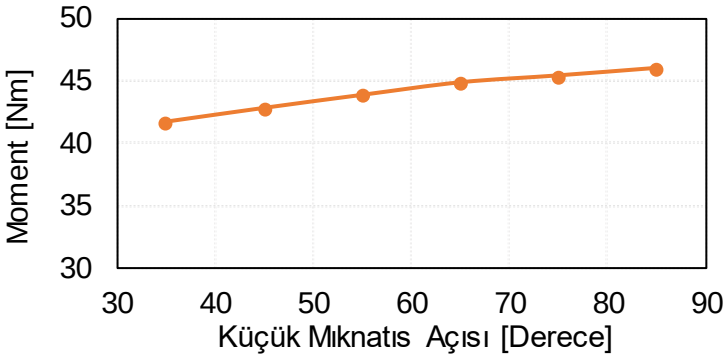
Şekil 4.11. Küçük mıknatıs optimizasyonu, (a) standart küçük mıknatıs eklenmemiş yapı, (b) küçük mıknatıs eklenmiş ilk durum (durum-1), (c) küçük mıknatıs eklenmiş ikinci durum (durum-2)

4.3.2. Küçük mıknatıs açı optimizasyonu

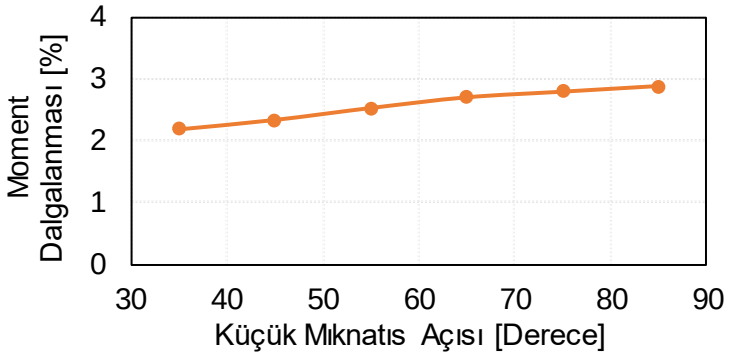
Akı destekleyici küçük mıknatısın rotor nüvesine yerleşim şekli belirlendikten sonra bu mıknatıslar üzerinde yerleşim açısı optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Mıknatıs boyutu değişmeden karar verilen yapı üzerinde Şekil 4.12'de de görüleceği üzere küçük mıknatısların uzun kenarının x-ekseni ile aralarındaki açı değerleri değiştirilerek ortalama momenti yukarılara çekecek olan açı değeri saptanmaya çalışılmıştır. Her bir açı değerinde yerleştirilen küçük mıknatıslara ait ortalama moment sonuçları Şekil 4.13'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere küçük mıknatıs uzun kenarının x-ekseni ile yapacağı açı artıkça ortalama moment değerinin de artığı görülmüştür.



Şekil 4.12. Akı destekliyi küçük mıknatısların x-eksenine göre yerleştirilme açısı

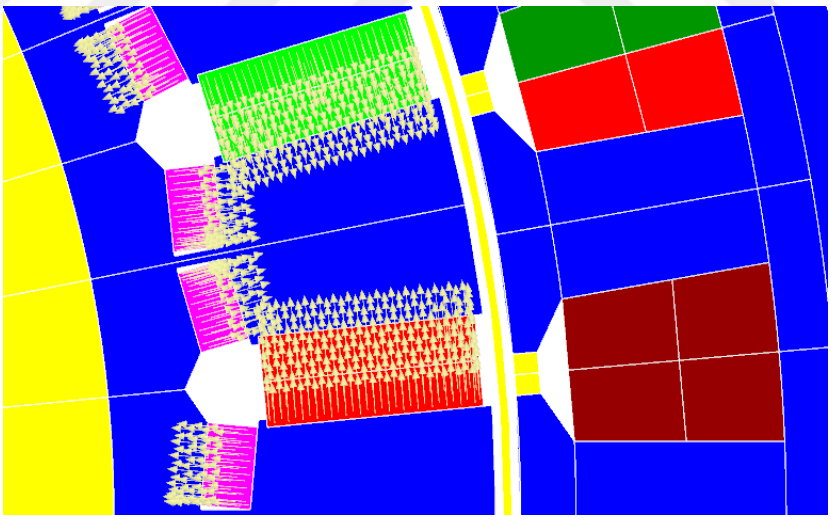


Şekil 4.13. Mıknatıs açısına bağlı ortalama moment değişimi



Şekil 4.14. Mıknatıs açısına bağlı moment dalgalanması değişimi

Mıknatıs açısının 85° olması durumunda ortalama moment 45,97 Nm seviyelerine yükselmiş ancak moment kalitesini negatif etki eden moment dalgalanması büyüklüğü de %2,88 seviyelerine gelmiştir. Sonuç olarak gerçekleştirilen analizler sonucunda küçük mıknatısın boyu ve yerleşim yeri net olarak ortaya çıkmıştır. Şekil 4.15 de küçük mıknatısın x-ekseni ile yapacağı açının karar verilen 85° olması durumunda Flux® SEA modeli verilmiştir. Şekilde tüm mıknatıslara ait mıknatıslanma yönleri de görülmektedir.

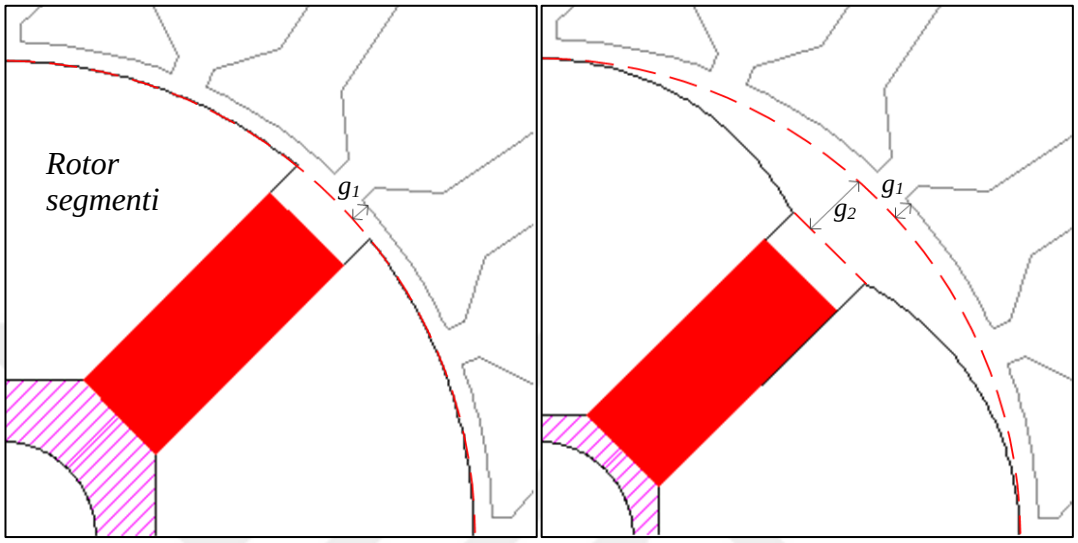


Şekil 4.15. Mıknatıs optimizasyonları sonucu ortaya çıkan mıknatıs yerleşimleri için nihai yapı

4.3.3. Değişken hava aralığı optimizasyonu

Küçük mıknatısların boyutu ve rotor nüvesine yerleşim yeri belirlendikten sonra ortalama moment değerini daha da yukarılara çıkaracak değişken hava aralığı optimizasyonları yapılmıştır. Bu bölüme kadar ki olan çalışmalarda Şekil 4.16 (a)'da

görüleceği üzere sabit hava aralığı boyu kullanılmış ve bu değer 1,5mm olarak alınmıştır. Şekil 4.16 (b)'de ise değişken hava aralığı boyutları verilmiştir. Burada mıknatıs boyutları değişmeden hem mıknatıs üstündeki hava aralığı boyu (g2) artırılmıştır hem de rotor segmenti üzerindeki hava aralığı boyu (g1) azaltılmıştır.

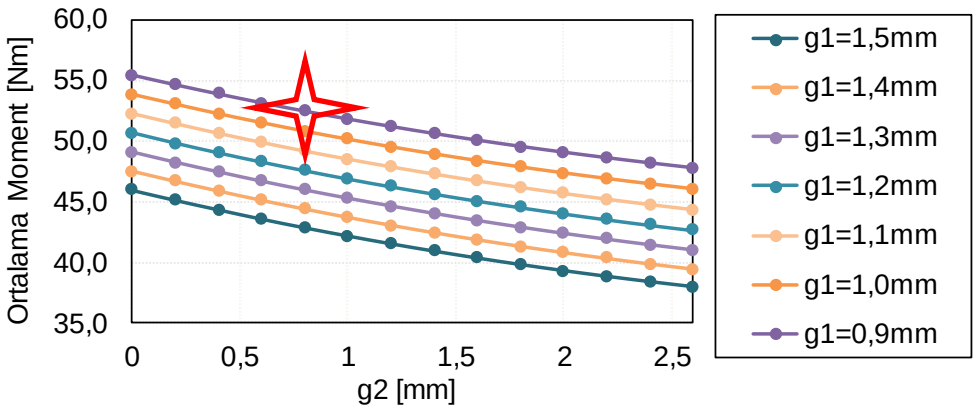


(a) (b)

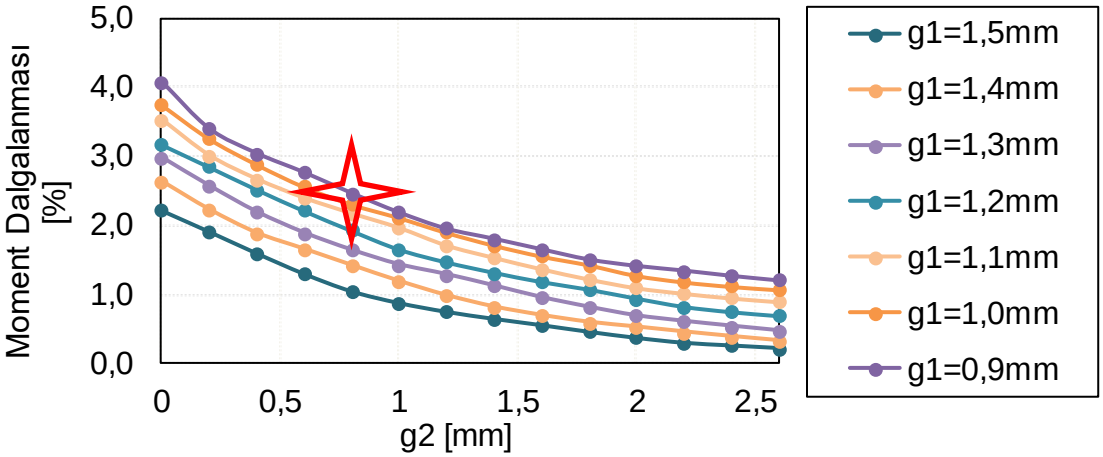
Şekil 4.16. Hava aralığı boyutları, (a) sabit hava aralığı boyu, (b) değişken hava aralığı boyu

4.3.4. Değişken hava aralığı SEA sonuçları ve motor için nihai tasarım ortaya çıkması

Tüm hava aralığı boyutları için elde edilen ortalama moment sonuçları Şekil 4.17'de moment dalgalanması sonuçları da Şekil 4.18'de verilmiştir. Sonuçlara baktığımızda her bir g1 hava aralığı boyu için g2 hava aralığı boyu artıkça ortalama moment değerleri ve moment dalgalanması değerleri düşmektedir.



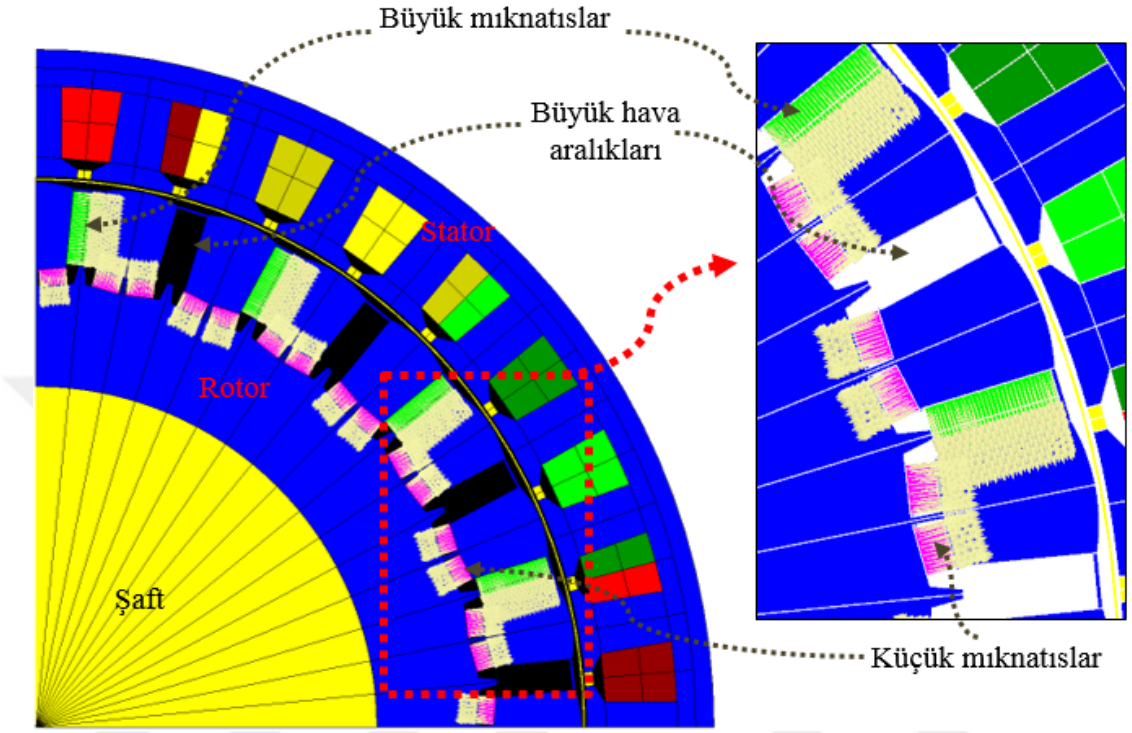
Şekil 4.17. Farklı hava aralıkları için ortalama moment değişimleri



Şekil 4.18. Farklı hava aralıkları için moment dalgalanması değişimleri

Bu kısımda yapılan analizlerde mıknatıs boyutunda herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Bu nedenle; nihai tasarımda gerek küçük mıknatısların eklenmesiyle birlikte düşen moment/mıknatıs kütlesi oranı artırmak gerekse de mıknatıs maliyetini düşürmek adına büyük mıknatısların 32 adet değil de 16 adete düşürülmesine ve yeni bir SKGM tasarımına karar kılınmıştır. Ancak büyük mıknatıs kütlesinin karar verilen yapıda yarıya indirilmesi moment seviyesini çok aşağılara çekeceğinden, değişken hava aralığı optimizasyon sonuçlarından nihai tasarım için g1 hava aralığı boyu 0,9 mm, g2 hava aralığı boyu da 0,8 mm olarak alınmasına karar verilmiştir. Hava aralığının verilen boyutlarında ortalama moment değeri 52,45 Nm, moment dalgalanması değeri de %2,47 olarak elde edilmiştir. Böylece bu tasarım boyutlarında büyük mıknatıs miktarının yarıya indirilmesi durumunda ortalama moment çok azalmayacak ve moment dalgalanması istenilen seviyelere ulaşacaktır. Tüm çalışmalar sonunda motor tasarımı tamamlanmış ve ortaya çıkan rotor yapısı ile mıknatıslar ait akı yönleri Şekil 4.19'da verilmiştir. Büyük mıknatıslar birer aralıklarla rotor nüvesine eklenmiş ve eklenen tüm büyük mıknatıslar aynı yönde akı vermektedir. Her bir büyük mıknatıs arasında yani birer adım aralıklarla çıkarılan mıknatısların yerine mıknatısla aynı boyda büyük bir hava aralığı mevcuttur. Aynı şekilde her bir rotor segmenti arasına ikişer tane aynı yönlü akı verebilen küçük boyutlu mıknatıslar eklenmiştir. Her bir ikişer mıknatısta kendi arasında kuzey (N) ve güney (S) kutuplarını oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. Son olarak büyük mıknatısları yapısal anlamda zorlamalara karşı korumak ve rotor yapısını tek bir bütün halinde tutmak için her bir büyük mıknatıs ve mıknatısların çıkarıldığı büyük hava aralığı üzerine 0,5mm'lik ince bir çentik eklenmiştir. Ayrıca büyük mıknatısları yapısal olarak destekleyecek ve

mıknatısın alt kenarına dayanan başka bir yapı da geometriye eklenmiştir. Yapısal anlamda motorun daha rijit yapıda olmasını sağlayacak yapısal değişiklikler hakkında daha fazla ayrıntılı bilgi yapısal ve termal analizler bölümünde verilmiştir.



Şekil 4.19. Optimizasyonlar sonucu ortaya çıkan SKGM motor rotor yapısı ve mıknatıs akı yönleri

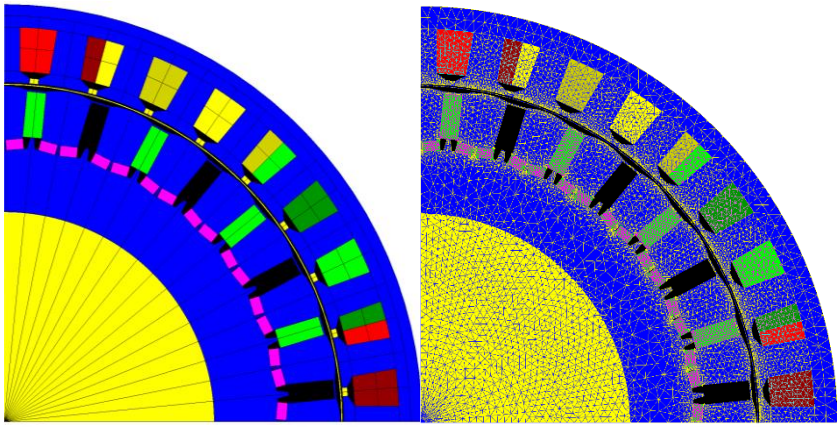
4.4. SKGM Motorun Nihai Tasarım SEA Performans Sonuçları

Nihai tasarım sonucu ortaya çıkan SKGM motora ait geometrinin Flux® SEA paket programı ile oluşturulmuş 2B modeli Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Motorda bütün enerji dönüşümünün gerçekleştiği hava aralığında ağ yapısı yoğunluğu olması gerektiği gibi yüksektir. Motor analizlerin daha hızlı sürmesi için 1/4 simetri incelenmiştir.

4.4.1. 2B Yüksüz durum performans sonuçları

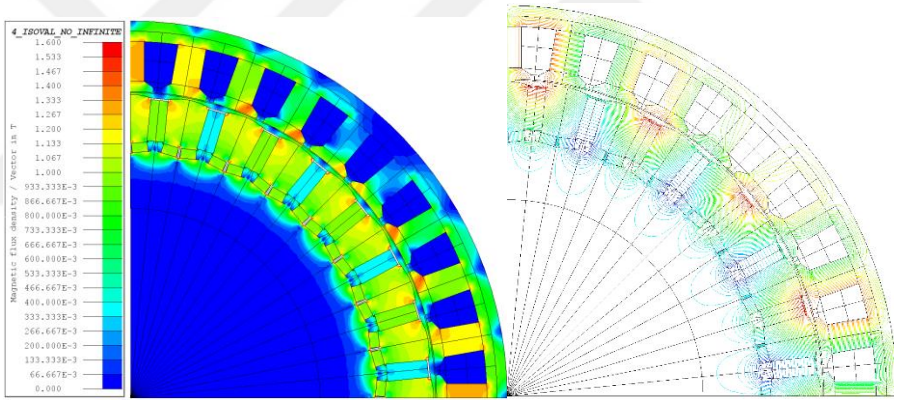
Yapılan analizler sonucu ilk olarak motor sargılarına herhangi bir elektriksel enerjinin uygulanmadığı varsayılmış ve yüksüz durum analizleri gerçekleştirilmiştir. Motorun yüksüz durum analizi sonucu elde edilen akı yoğunlukları ve akı çizgileri sırasıyla Şekil 4.21 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Maksimum akı yoğunluğu dişlerde 1,45 T seviyelerinde gözlenmiştir. Rotor üzerinde ise beklenildiği gibi 0,5 mm'lik ince

çentikler üzerinde akı yoğunluğu 2,8 T seviyelerindedir. Fakat bu akı yoğunluğu seviyesi motor performansı içim kritik bir önem taşımamaktadır.



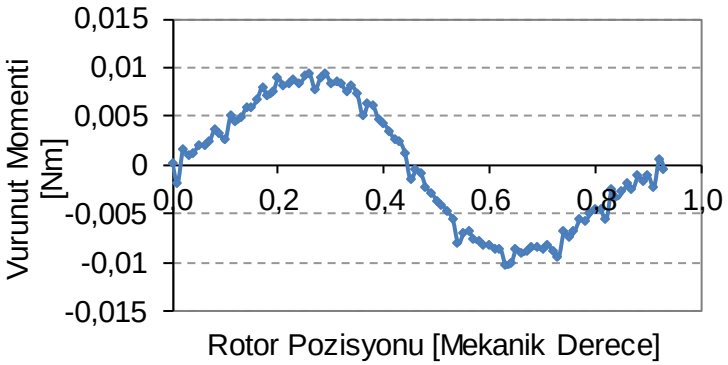
(a) (b)

Şekil 4.20. SKGM motor nihai tasarım için, (a) Flux® SEA modeli, (b) mesh yapısı



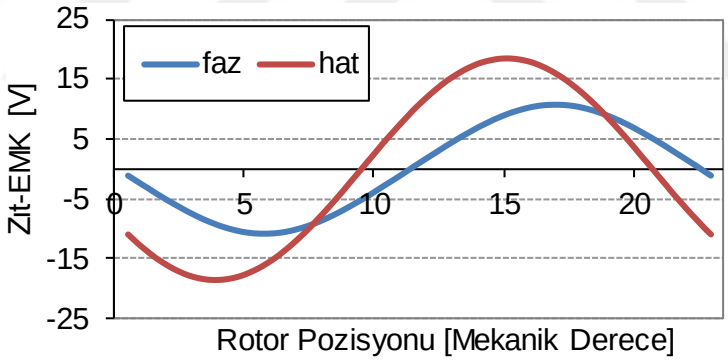
Şekil 4.21. Nihai tasarımda motora ait yüksüz durum akı yoğunluğu seviyeleri ve akı çizgileri

SKGM motorda elde edilen vuruntu momenti değişimi Şekil 4.22'de verilmiştir. Vuruntu momenti maksimum değeri 0,01 Nm'dir. Bu değer ortalama çıkış momenti değerinin yaklaşık %0,025 ine denk gelmektedir. Dolayısıyla düşük hızlı bir uygulamaya yönelik tasarlanan motorda vuruntu momentini bu derece az olması hedeflenen tasarım kriterlerinden birinin daha elde edildiğini göstermektedir.

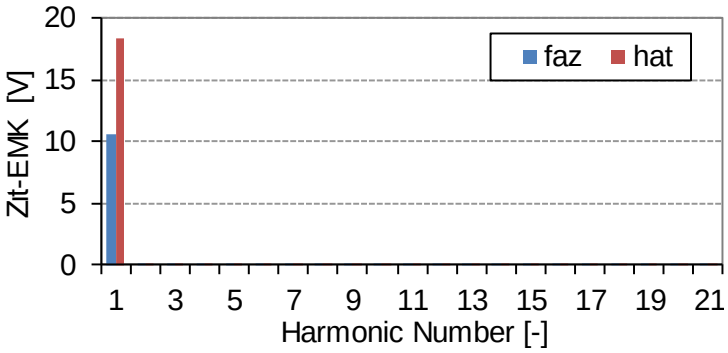


Şekil 4.22. Nihai tasarım sonucu elde edilen SKGM motorun vuruntu momenti değişimi

100 rpm hızda Zıt-EMK gerilimi değişimleri Şekil 4.23'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere hat gerilimi zıt-EMK değişimi saf sinüse yakındır. Hat gerilimi maksimum değeri 18,42 V, faz gerilimi maksimum değeri ise 10,8 V olarak elde edilmiştir. Faz ve hat gerilimlerine ait harmonik değerleri de Şekil 4.23 de görülebilir. Hat gerilimi %THB değeri %0,06, faz gerilimi %THB değeri ise %1,64 olarak elde edilmiştir.



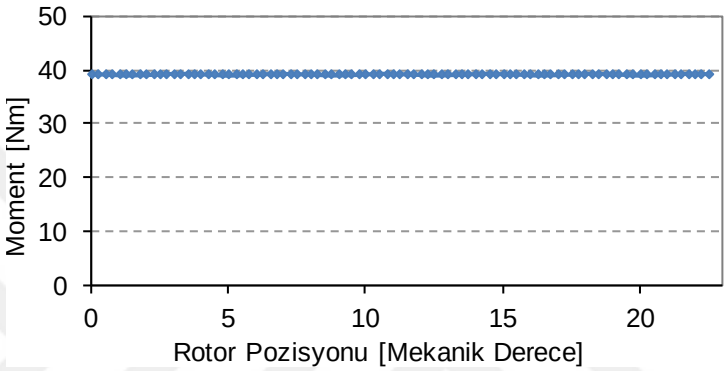
Şekil 4.23. Nihai tasarım sonucu elde edilen SKGM motorun faz ve hat Zıt-EMK gerilimleri değişimi



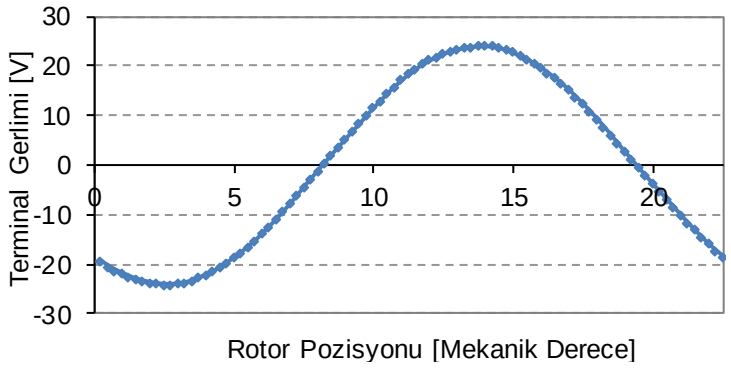
Şekil 4.24. Nihai tasarım sonucu elde edilen SKGM motorun faz ve hat gerilim harmonikleri değişimi

4.4.2. 2B Yüklü durum performans sonuçları

26 A maksimum akım uygulanan motorda elde edilen çıkış momenti değişimi Şekil 4.25'de verilmiştir. Ortalama moment değeri 39,11 Nm ve ortalama çıkış momenti dalgalanması %0,57 seviyelerinde elde edilmiştir. Motora ait yüklü durumda terminal (hat) gerilimi değişimi de Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Maksimum terminal gerilimi 85 rpm hızda 23,95 V olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak anma noktasında motorun 39,11 Nm yükte ve 85 rpm hızda çalıştığı yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.25. Nihai tasarım sonucu elde edilen SKGM motorun ortalama moment değişimi

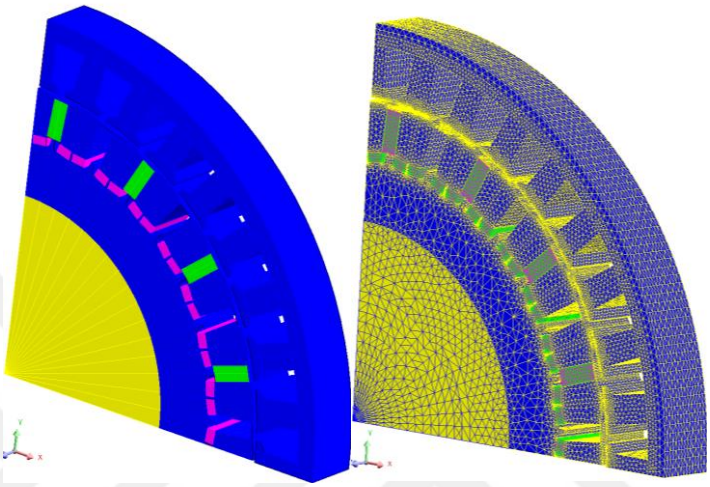


Şekil 4.26. Nihai tasarım sonucu elde edilen SKGM motorun yüklü durumda terminal (hat) gerilimi değişimi

4.5. SKGM Motorun 3B SEA ile Doğrulanması ve 2B Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması

Nihai tasarım sonucu ortaya çıkan motora ait geometrinin Flux® SEA paket programı ile oluşturulmuş 3B modeli ve modele ait mesh yapısı Şekil 4.27'de gösterilmiştir. 2B ile yapılan yüklü ve yüksüz durum analizlerinin hepsi 3B model ile tekrarlanmış ve 2B sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. 3B model ile SEA gerçekleştirilmesinin en büyük

avantajı mesh yapısının da üç boyutlu olmasından dolayı ikinci dereceden eleman (second order element) dediğimiz kaçak akı etkilerini de göz önüne alıp analizleri gerçekleştirmesidir. Yalnız mesh yoğunluğunun bu durumda yüksek olması gerekmektedir. Aksi takdirde 2B analizler ile elde edilen sonuçlardan farklı değerler elde edilebilmektedir.



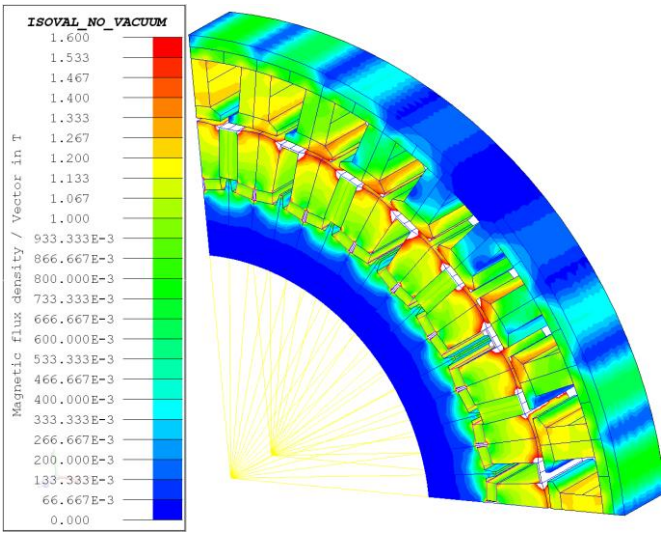
(a) (b)

Şekil 4.27. Nihai motor, (a) 3B SEA modeli, (b) 3B SEA model mesh yapısı

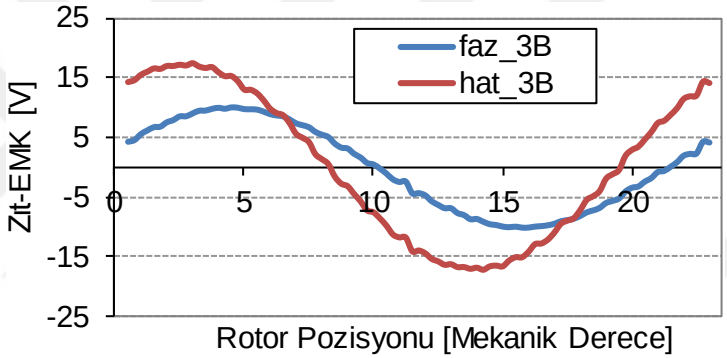
4.5.1. 3B Yüksüz durum performans sonuçları

Motorun 3B yüksüz durum analizi sonucu elde edilen akı yoğunluğu seviyesi Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Maksimum akı yoğunluğu dişlerde 1,44 T seviyelerinde gözlenmiştir. 2B analizlerde olduğu gibi rotor üzerinde bulunan 0,5 mm'lik ince çentikler üzerinde akı yoğunluğu 2,8 T seviyelerindedir ve önemsizdir.

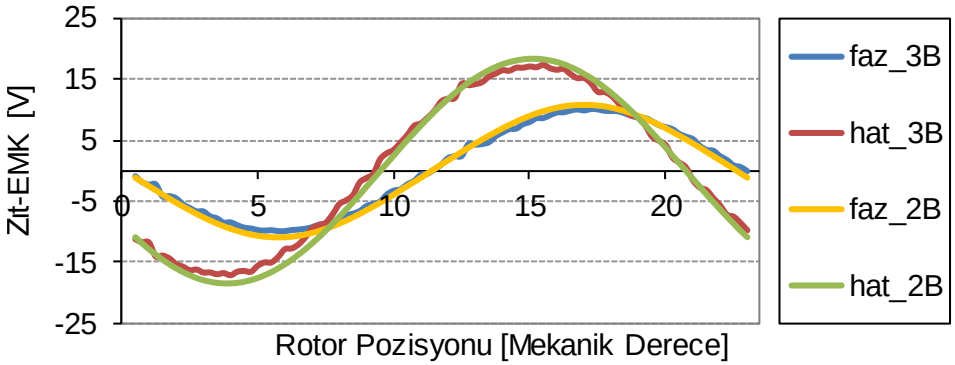
3B analizler sonucu 100 rpm hızda Zıt-EMK gerilimi değişimleri Şekil 4.29'da verilmiştir. Burada hat gerilimi maksimum değeri 17,26 V, faz gerilimi maksimum değeri ise 10,1 V olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değerlerin 2B analizler ile karşılaştırılmış hali Şekil 4.30'de görülebilir. Burada 3B analizlerde mesh kaynaklı olduğu düşünülen, elde edilen değerlerin bölgesel ani değişimleri dikkat çekmektedir.



Şekil 4.28. Nihai tasarımda motora ait 3B yüksüz durum akı yoğunluğu seviyeleri



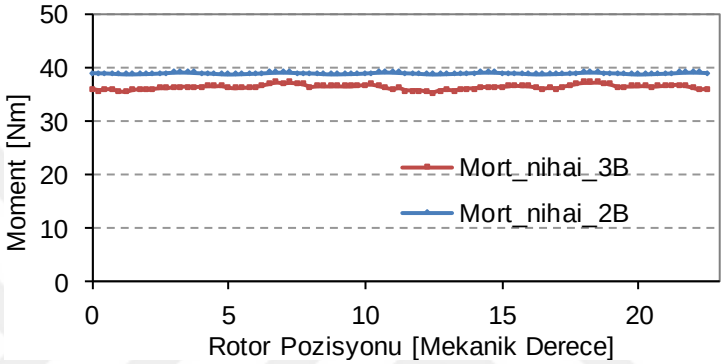
Şekil 4.29. Nihai tasarımda elde edilen yapının 3B analizler sonucu faz ve hat Zıt-EMK gerilimleri değişimi



Şekil 4.30. 3B ve 2B analizler sonucu elde edilen faz ve hat Zıt-EMK gerilimleri değişimi

4.5.2. 3B Yüklü durum performans sonuçları

3B analizler sonucu elde edilen çıkış momenti değişimi ve 2B sonuçlar ile karşılaştırılmış hali Şekil 4.31'de verilmiştir. 3B analizler sonucunda ortalama moment değeri 36,48 Nm ve ortalama çıkış momenti dalgalanması %4,81 seviyelerinde elde edilmiştir. Burada karşılaştığımız iki analiz arasındaki farkın mesh kaynaklı olduğunu söyleyebiliriz. Motor prototip üretimi sonrası yapılacak performans testlerinde doğrulanması gerçekleştirilecektir.



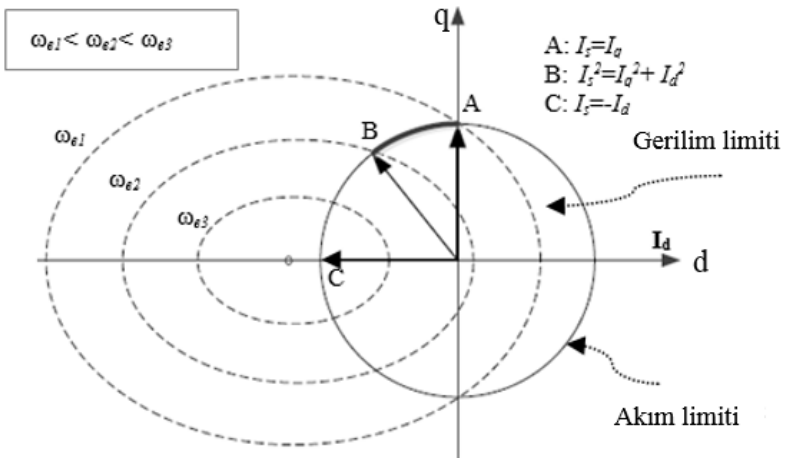
Şekil 4.31. 3B analizler sonucu elde edilen ortalama moment değişimi ve 2B sonuçlar ile karşılaştırılması

4.6. SKGM Motor Moment-Hız Karakteristiği ve Referans Motor ile Klasik ÇTGM Motorla Karşılaştırılması

Bu kısımda her üç motora ait moment-hız değişimleri elde edilmiştir. Motor moment-hız karakteristiği motorun kullanılacağı uygulama için çok önemlidir. Motorun çalışma aralığının moment ve hız anlamında geniş olması sürekli mıknatıslı motorların tercih sebeplerinden biridir. Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi moment-hız karakteristiği SM motorlarda rotor yapısına göre değişiklik göstermektedir. Yüzeyden mıknatıslı motorların, GM motorlara göre daha dar bir çalışma aralığı vardır. GM motorlar özellikle sabit güç bölgesi olarak adlandırılan anma noktasından sonraki çalışma bölümünde doğru bir kontrol ile daha yüksek hızlara çıkabilmektedir.

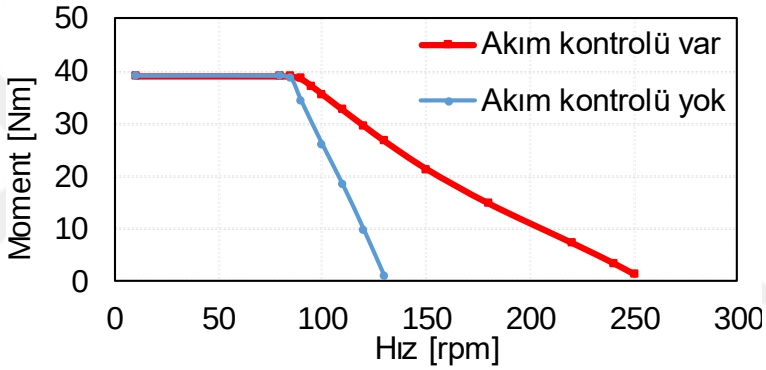
SM motorların yüksek hızlarda çalışmasında uygulanan kontrol yöntemine literatürde "flux weaking" yani akı zayıflatma adı verilmiştir. Şekil 4.32'da SM motorlara ait gerilim ve akım büyüklüklerinin vektörel diyagramı görülebilir. Uygulanan bu kontrol yöntemini şekil üzerinden anlatacak olursak eğer; düşey eksen q-ekseni ifade ederken, yatay eksen d-ekseni ifade eder. Burada anma hızına kadar olan bölgede yani 'OA'

arasında motor sargılarına sadece q-eksen akımı verilir ve motor milinden sabit bir moment elde edilir. ‘A’ noktası motorun anma noktasıdır. Burada motor akımı ve gerilimi sınıra dayanmıştır ve motor ω_{e1} anma hızına sahiptir. I_s sargı akımı I_q akımına eşittir ($I_s = I_q$). Ama en önemlisi DC bara gerilimini gören motor sargıları gerilimi artık DC bara gerilimi ile eşit büyüklüğe sahiptir. Dolayısıyla bu noktadan sonra yüksek hızlarda da motor sargılarındaki gerilim en az DC bara değerine eşit olacak ve motor sargıları akım çekemeyeceğinden moment oluşmayacaktır. Bu noktadan sonra yüksek hızlara çıkılmak isteniyorsa akı zayıflatma yöntemi kullanılmaya başlanır. Örneğini motorun ω_{e1} hızından daha yüksek hız olan ω_{e2} hızına yani ‘A’ çalışma noktasından ‘B’ çalışma noktasına gitmesi akı zayıflatma yöntemi ile mümkündür. Burada artık sargılardan sadece q-eksen akımı akmayacak ters yönde negatif d-eksen akımı da sargılardan geçecektir. Böylece ters yönden verilen d-eksen akımı motor sargılarındaki gerilimi düşürecek ve DC bara gerilimi ile sargılar arasında gerilim farkı oluşacağından motor akım çekmeye devam edecektir. Ancak bu durumda toplam sargı akımı olan I_s değeri sabit kalacaktır ve aynı q-eksen ve d-eksen akımlarının bir fonksiyonu olacaktır ($I_s^2 = I_q^2 + I_d^2$). Bu durumda motor momentini oluşturan akım olan q-eksen akımı azalacaktır. Dolayısıyla da ‘B’ noktasında motordan elde edilen moment, anma noktası ve öncesinde elde edilen momentten düşük olacaktır. Son olarak motorun en yüksek hıza ulaştığı ‘C’ bölgesinde de motor sargılarında artık sadece d-eksek akımı akmaya başlayacak ve $I_s = -I_d$ olacaktır ve böylece artık motor moment üretmeyecektir [22].

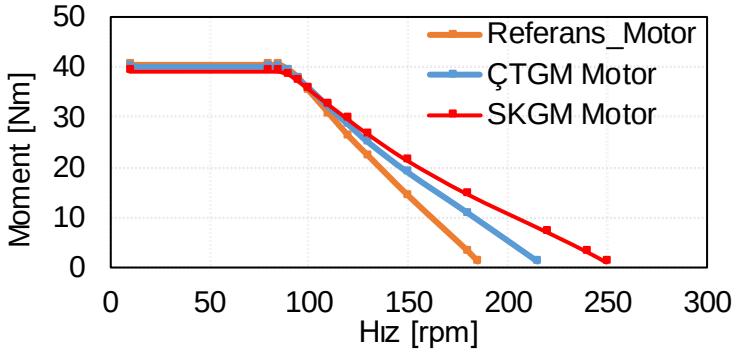


Şekil 4.32. SM motorlarda gerilim akım vektörleri diyagramı [22]

SKGM motora ait akım kontrolü uygulanmadığı ve uygulandığı durumda moment-hız değişimi Şekil 4.33'da verilmiştir. Şekilde de görüleceği üzere doğru kontrol uygulaması ile motorun çıkabileceği hız değeri 250 rpm olarak elde edilmiştir. Şekil 4.34' de ise SKGM motorun yüzeyden mıknatıslı ve klasik ÇTGM motorlarıyla akım kontrolü uygulanmış durumda moment-hız karakteristiklerinin karşılaştırılmış şekli verilmektedir. Optimizasyonlar sonucu elde edilen SKGM motorda sabit üç bölgesinde diğer iki motora göre çalışma aralığının geniş olduğu görülmüştür. Analizler sonucu motorların maksimum çıkabileceği hız SKGM motorda 250 rpm, referans motorda 185 rpm ve klasik ÇTGM motorda ise 215 rpm olarak elde edilmiştir. Bu da SKGM motorun tasarımında göz önünde tutulan performans kriterinin birinin daha elde edildiğini gösterir.



Şekil 4.33. SKGM motorun SEA sonucu elde edilen moment-hız karakteristiği



Şekil 4.34. SKGM motorun SEA sonucu elde edilen moment-hız karakteristiğinin yüzeyden mıknatıslı referans motor ve klasik ÇTGM motorların moment-hız değişimleri ile karşılaştırılması

4.7. SKGM Motorun Referans Motor ve Klasik ÇTGM Motor ile Performans Değerlerinin Karşılaştırılması ve Sonuçlar

Yapılan tüm çalışmaların tamamlanmasıyla ortaya yeni bir SKGM motor yapısı ortaya çıkarılmıştır. SKGM motorun yüzeyden mıknatıslı ve klasik ÇTGM motora karşı bir takım avantajı ve dezavantajı mevcuttur. Her üç farklı motora ait performans değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Her üç motorda oluk sayısı 36, kutup sayısı 32, paket boyu 40 mm, sargılar yıldız bağlı, anma akımları 18,4 Arms ve anma hızları 85 rpm'dir. SKGM motorun özellikle moment katsayısı olan Kt ile gerilim katsayısı olan Kv değerleri gerek referans motora gerekse de klasik ÇTGM motora göre düşük olsa da moment/mıknatıs ağırlığı olarak üstünlüğü göze çarpmaktadır. Ayrıca bu yapının en belirgin özelliği sabit güç bölgesinde maksimum hız değerinin her iki motora göre daha yüksek olmasıdır. Böylece daha az mıknatıs kullanılarak motorun anma momentini çok düşürmeden yüksek hızlara çıkabilen yeni bir gömülü mıknatıslı motor tasarımının tamamlandığı söylenebilmektedir.

Tablo 4.1. Motor performanslarının karşılaştırılması

	Yüzeyden Mıknatıslı Referans Motor	Klasik ÇTGM Motor	SKGM Motor
Oluk/kutup		36/32	
Paket boyu		40 mm	
Sargı bağlantısı		Yıldız	
Anma akımı		18,4 Arms	
Anma hızı		85 rpm	
Vuruntu momenti tepe değeri	0,003 Nm	0,03 Nm	0,01 Nm
Zıt-EMK tepe değeri (Hat@100rpm)	18,91 V	18,84 V	18,42 V
%THD (Hat)	%0,17	%0,31	%0,05
Anma momenti	40,46 Nm	40,21 Nm	39,11 Nm
Moment dalgalanması	0,54%	%0,88	%0,57
Kv	0,189 Vmax/rpm	0,188 Vmax/rpm	0.184 Vmax/rpm
Kt	2,2 Nm/Arms	2,18 Nm/Arms	2,13 Nm/Arms
Maksimum hız	185 rpm	215 rpm	250 rpm
Toplam mıknatıs ağırlığı	0,691 kg	0,691 kg	0,633 kg
Moment/Mıknatıs Ağırlığı	58,48 Nm/kg	58,12 Nm/kg	61,78 Nm/kg

5. SM MOTOR KAYIP BİLEŞENLERİ VE ÖZGÜN SKGM MOTOR KAYIP DEĞERLERİNİN ELDE EDİLMESİ

SM senkron motorlarda kayıplar incelenmesi gereken önemli bir konudur. Verimi düşüren ve motorun ısınmasını sağlayan kayıp bileşenleri düzgün tasarlanmayan bir SM senkron motorda ciddi performans düşümüne neden olur. Bu nedenle kayıp bileşenleri motorun tasarımı sırasında belirlenmeli ve kayıp seviyeleri yüksekse önlem alınmalıdır. Özellikle de motorun sargılarında kayıp nedenli sıcaklık artışı dikkate alınmalıdır. Aksi takdir de sargılarda oluşan yüksek sıcaklıklar sargı izolasyonunun delinmesine ve sargının yanmasına neden olur. SM senkron motorlarda temel de 5 adet kayıp bileşeni bulunmaktadır. Bunlar; demir, bakır, yakınlık, mıknatıs ve mekanik kayıplardır.

5.1. SM Motorlarda Demir Kaybı

Demir kayıpları ve hesaplanma yöntemleri uzun yıllardır SM senkron motor tasarımında önemli bir noktada bulunmaktadır. Özellikle de son yıllarda artan yüksek verimli elektrik motor istekleri doğrultusunda konunun önemi artmaktadır. Ancak elektrik motorlarının icadından bu yana, demir kaybı hesaplamaları henüz birer teori olmaktan öteye gidememiştir. Ölçülen demir kaybı değerleri ile hesaplanan ya da simülasyon sonuçlarının örtüşmemesi çoğu demir kaybı hesaplama yöntemlerinde birtakım katsayıların kullanılmasına neden olmuştur. Böylece torik hesaplamalar ile pratik değerler arasındaki fark giderilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalara rağmen, demir kaybı hesaplama yönteminin %100 doğrulukla bulunduğu söylenemez.

Temel olarak iki adet demir kaybı hesaplama yöntemi bulunmaktadır. Demir kaybı hesaplamalarını ilk defa C. P. Steinmetz 1800'lü yılların son zamanlarında yapmıştır. Uzun yıllar Steinmetz modeli kullanılarak gerçekleştirilen demir kaybı hesaplamalarına son yıllarda G. Bertotti yeni bir hesaplama modeli yaratarak katkıda bulunmuştur. Her iki modelde de karşılaşılan en önemli sorun, malzeme özelliklerinin ortamdan ortama farklılık göstermesidir. Her iki modelden de sonuç almamıza rağmen

farklı durumlarda malzemede meydana gelebilecek yapısal ve kimyasal değişimler elde edeceğimiz sonuçların doğruluğuna şüphe uyandıracaktır.

5.1.1. Bertotti demir kaybı hesabı

Berttoti demir kaybı yaklaşımına göre, demir kayıpları frekans ve akı yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak 3 parçaya bölünüp incelenebilir. Bunlar Denklem (5.1)'de de görüleceği üzere; histerezis kayıpları, eddy girdap akım kayıpları ve diğer kayıplardır. Toplam demir kaybı bu üç farklı kaybın toplamı olarak elde edilmektedir [42],

$$P_{fe} = P_h + P_{he} + P_{ex} \tag{5.1}$$

Denklemde P_{fe} toplam demir kaybı, P_h histerezis kayıplar, P_{he} eddy girdap akımı kayıpları son olarak da P_{ex} oluşması muhtemel diğer ekstra kayıpları göstermektedir.

SM senkron motorlarda ve geri kalan tüm elektrik motorlarında malzeme dönen ve değişen manyetik alan etkisi altında bulunmaktadır. Bu alan beraberinde histerezis, eddy ve ekstra kayıpları oluşturmaktadır. Motorun manyetik alan değişiminin sinüs olduğu varsayılırsa, Berttoti demir kaybı iki şekilde hesaplanır;

$$P_{al} = K_h f B_m{}^2 + K_e (f B_m)^2 + K_{ex} (f B_m)^{3/2} \tag{5.2}$$

$$P_r = P_{hr} + K_e (f B_m)^2 + K_{ex} (f B_m)^{3/2} \tag{5.3}$$

Denklem (5.2) de P_{al} değişen manyetik alan etkisindeki malzemede oluşan toplam demir kaybı anlamına gelmektedir. K_h, K_e, K_{ex} katsayıları sırasıyla, histerezis kayıp katsayısını, eddy girdap akımı kayıp katsayısını ve ekstra kayıp katsayısını, f manyetik alan değişim frekansını son olarak da B_m manyetik malzeme akı yoğunluğunu ifade etmektedir. Denklem (5.3) de ise P_r dönen manyetik alan etkisindeki malzemede oluşan toplam demir kaybı anlamına gelmektedir. Yine bu denklemde de K_e ve K_{ex} eddy girdap akımı kayıp katsayısını ve ekstra kayıp katsayısını ifade etmektedir. Bu katsayılar ya non-lineer eğri uydurma ya da malzeme üreticisi tarafından belirlenmektedir. P_{hr} ifadesi de aynı alan içinde bulunan malzemedeki histerezis kaybıdır. Bertotti demir kaybı hesaplama yöntemine bakacak olursak, demir kaybının frekans ve akı yoğunluğu artıkça artığını söyleyebiliriz. Yine bu yöntemle döner makinaların demir kayıplarının %100 doğrulukla elde edildiğini söylemek zordur.

Makinaların döner manyetik alan kaynaklı demir kaybının hesaplanması bu yöntemle zor olsa da değişen manyetik alandan kaynaklı demir kaybı hesabı akı yoğunluğunun ve frekansın bir fonksiyonu olarak hesaplanması daha kolaydır [42].

Bertotti demir kaybı hesaplama modeline baktığımızda üç temel demir kaybı bileşeni olduğu görülür. Bunlarda ilki histerezis kayıplarıdır. Rotor ya da stator üzerinden geçen manyetik alanın değişmesi sonucu oluşur. Değişken manyetik alan aynı zamanda değişken bir elektrik alan oluşturmaktadır. Elektrik alanda gelişen bu ani değişiklikle beraber akı yoğunluğunun manyetik malzemede ani değişimi histerezis kayıplarını oluşturur. Berttotti demir kaybı modelinde histerezis kayıplarına Denklem (5.4)'de görüldüğü gibi modellenir. Bu denklemde de görüldüğü üzere histerezis demir kaybı, manyetik alanın frekansına ve akı yoğunluğuna bağlıdır,

$$P_{hr} = K_h f B_m^{\ 2} \tag{5.4}$$

Bertotti demir kaybı hesapla modelinde diğer bir bileşen de eddy girdap akımı kayıplarıdır. Zamanla değişen akı yoğunluğu kaynaklıdır. Akı yoğunluğunun değişimi manyetik malzemede gerilim endüklenmesine dolayısıyla da malzemede akım oluşmasına neden olmaktadır. Malzemenin kapalı devre oluşturması nedeniyle oluşan bu akımlar girdap şeklinde malzeme içinde akar. Eddy girdap akımı adı verilen bu akımların karesi ile manyetik malzemede izlediği yol boyunca maruz kaldığı direncin çarpımı eddy girdap akım kayıplarını oluşturur. Elektrik makinalarında bu kaybın etkisini azaltmak için rotor ve stator sac nüvesi yekpare bir şekilde değil de ince dilimlenmiş sacların bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Böylece, malzeme içinde oluşan girdap akımları büyüklüğü azaltılmış olur. SM senkron motorları düşündüğümüz zaman rotor ve stator yapısı için aynı önlem alınabilir. Ancak tek parça halinde üretilen mıknatıs malzemeler eddy girdap akımlarının ciddi derecede oluştuğu önemli bölgelerden biridir. Özellikle yüksek frekans ve akı yoğunluğunun olduğu çalışmalarda, mıknatıs içinde oluşan ve ciddi sıcaklık artışıyla mıknatısın manyetik etkisini azaltabilen eddy girdap akım kayıpları dikkate alınmalıdır.

5.1.2. Steinmetz demir kaybı hesabı

Bertotti demir kaybı modeli dışında ve öncesinde daha çok kullanılan yöntem Steinmetz demir kaybı hesaplama yöntemidir. Demir kaybı hesaplamalarında ilk

çalışmaları yapan Steinmetz'in hesaplama yöntemleri, uzun yıllar elektrik makinalarının tasarımında kullanılmış ve hala geçerliliğini korumaktadır. Steinmetz 'in oluşturduğu ilk hesaplama yöntemi temel olarak Denklem (5.5)'da verilmiştir [43],

$$P_{fe} = C_{se} f^{\alpha} B^{\beta} \tag{5.5}$$

Burada B akı yoğunluğunun maksimum değeri, C_{se}, α ve β ise ölçülen kayıp değerlerinin eğri uydurma metodu ile bulunan katsayılarıdır. Klasik steinmetz modeli olarak adlandırılan bu yöntem sadece sinüs formuna sahip akı değişimlerinde uygundur. Diğer dalga formaları için klasik model dışında farklı modeller geliştirilmiştir. Gerek klasik model de gerekse geliştirilirmiş modellerde Steinmetz denklem katsayıları frekansa ve akı yoğunluğuna bağlı olarak farklılıklar göstermektedir [43].

Sinüs dalga formuna sahip akı yoğunluğu değişimleri dışındaki akı yoğunluğu değişimleri için ise ilk denklem geliştirilerek ''Geliştirilmiş Steinmetz Modeli'' adı verilen hesaplama yöntemi oluşturuldu. Bu modele ait hesaplama şekli Denklem (5.6)'de görülebilir [44],

$$P_{fe} = C_{se} f_{eq}^{\alpha-1} B_{max}^{\beta} f_r \tag{5.6}$$

Verilen denklemde f_r tekrar mıknatıslanma frekansı, B_{max} maksimum akı yoğunluğu ve f_{eq} eşdeğer frekans değeridir. Bu yöntemi klasik yöntemden ayıran ve yöntemin arkasındaki fikir olarak eşdeğer frekans adında bir parametre tanımlanmıştır. Eşdeğer frekans öncesinde ufak mıknatısiyet değişimlerine, sonrasında ise akı yoğunluğunun zamana bağlı değişiminin bir fonksiyonu olarak belirlenir. Böylece sadece tek frekans değerine sahip akı yoğunluğu değişimleri değil. Farklı frekanslara sahip, yani harmonik içerikli değişimlerde demir kaybı hesaplama yöntemlerine dahil edilmiş olur. Oluşturulan eşdeğer frekans denklemi Denklem (5.7)'de görülmektedir [44],

$$f_{eq} = \frac{2}{\Delta B^2 \pi^2} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt}\right)^2 dt \tag{5.7}$$

Burada eşdeğer frekans değeri, malzemede oluşan maksimum ile minimum akı yoğunluğu farkının karesine (ΔB^2) ve akı yoğunluğunun zamanla değişimine (dB/dt) bağlı olduğu görülebilir.

Bir başka Steinmetz demir kaybı modeli ise "Genel Steinmetz Modeli" olarak adlandırılan modeldir. Bu modelde temel amaç, manyetik akı yoğunluğunda ve bunun zamana göre değişiminde oluşan ani ve tek değerli değişimleri de hesaplamaktır. Bu yöntemde kullanılan hesaplama yöntemi Denklem (5.8)'da verilmiştir [44],

$$\mathrm{Pfe} = \frac{1}{\mathrm{T}} \int_0^{\mathrm{T}} \mathrm{C_{se}} \left| \frac{\mathrm{dB}}{\mathrm{dt}} \right|^{\alpha} \left| \mathrm{B(t)} \right|^{\beta - \alpha} \mathrm{dt} \tag{5.8}$$

Burada T değişimin periyodunu ifade etmektedir. "Genel Steinmetz" demir kaybı hesaplama yönteminin önceki yöntemlere göre en önemli avantajı bir DC ön gerilim duyarlılığına sahip olmasıdır. Bu yöntemle DC bileşenlerinin de kullanılıp demir kaybının doğrulanma oranının artığını söyleyebiliriz. Yöntemin en önemli dezavantajı olarak da üçüncü ya da nispeten daha düşük değerliğe sahip harmonik bileşenlerin akı yoğunluğu değişimine olan etkisi gösterilmektedir. Bu bileşenler, ani değişimlerin hesaba katılması ile elde edilen değerlerin gerçek ortalama değerlerden uzaklaşmasına neden olmaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek adına daha da ileri gidilip "Geliştirilmiş Steinmetz Modeli" oluşturuldu. Bu modelde akı yoğunluğu dalga şekilleri ufak alt parçalara ayrılıp küçük histerezis eğriler şeklinde incelenmektedir. Böylece dalga şeklinin anı değişiminden kaynaklı hatalar aza indirilip daha doğru değerde demir kaybı hesaplanabilmektedir. Modele ait uygulanan eşitlik Denklem (5.9)'da verilmiştir. Denklemde bulunan ΔB, ufak parçalar halinde incelenen her bir dalga formuna ait tepeden tepeye akı yoğunluğu değeridir [44],

$$\mathrm{Pfe} = \frac{1}{\mathrm{T}} \int_0^{\mathrm{T}} \mathrm{C_{se}} \left| \frac{\mathrm{dB}}{\mathrm{dt}} \right|^{\alpha} \left| \Delta \mathrm{B} \right|^{\beta - \alpha} \mathrm{dt} \tag{5.9}$$

Steinmetz'e ait bütün geliştirilmiş modellere bakacak olursak; önemli nokta olarak frekansa bağlı olarak değişen eşitlikler ve katsayılar gösterilebilir. Ayrıca steinmetz modellerinde bulunan katsayılar, malzeme üreticilerinin elinde bulunan demir kaybı değişimlerinden yola çıkarak eğri uydurma yöntemi ile kolaylıkla bulunabilir. Ancak yüksek harmonik değerlere sahip olan akı yoğunluğu değişimlerinde, doğru katsayıları

ve demir kaybı değerini elde etmek zor olabilir. Steinmetz modelini baz alıp gerçek demir kaybı değeri bulunmak isteniyorsa geniş bir frekans aralığında incelemek daha yararlı olacaktır.

5.2. SM Motorlarda Bakır Kaybı

SM senkron motorlarda etkisi en çok görülen kayıplar bileşenlerinden bir tanesi de bakır kayıplarıdır. Bakır kayıpları etkileyen iki etken vardır. Bunlar sargı akımı ve sargı direncidir. Bakır kayıpları,

$$P_{cu} = I^2R \tag{5.10}$$

formülü ile hesaplanır. Burada P_{cu} bakır kaybını, I sargılardan geçen faz akımını ve R ise faz direncini ifade etmektedir. Elektrik motorlarında tek faza ait bakır kaybı değeri için kullanılan Denklem (5.10), çok fazlı motorlar da her bir faz için ayrı ayrı bulunup toplanmalı ve toplam bakır kaybı değeri bulunmalıdır.

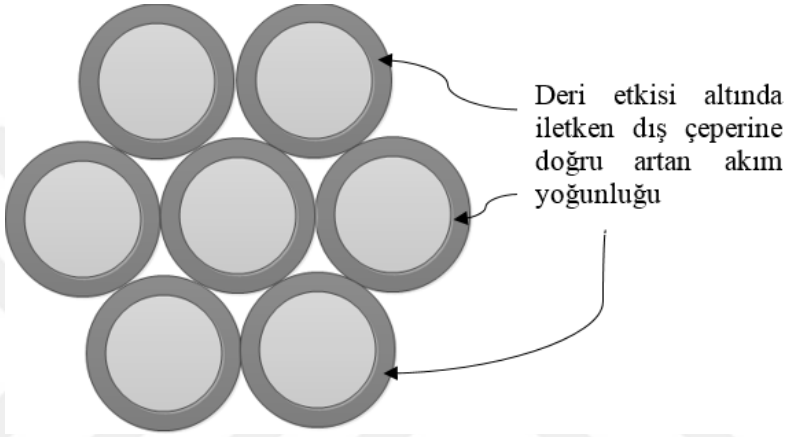
Bakır kayıpları hesaplamaları gerçekleştirilirken akımın ve direncin değerleri sabit kabul edilir. Oysaki normal çalışma koşullarında sıcaklık vb. etki altında kalan iletkenlerde direnç dolayısıyla taşıdığı akım değerleri de değişecektir. Bu da aslında bakır kayıplarının sabit olmadığını ortamdan ortama farklı değerler alabileceğini göstermektedir. SM senkron motorları baz alacak olursak, oluşan kayıpların en fazla bakır kaybı kaynaklı olduğu ve stator sargılarında önemli derecede ısıya neden olduğu görülür. Bu nedenle özellikle yüksek moment istenen uygulamalarda sargı akımının da yüksek olması nedeniyle sıvı ya da zorlanmış soğutma yöntemleri görülür. Sargı sıcaklıklarının sargıların sahip olduğu izolasyonları delmesi istenmeyen bir olaydır. Bu nedenle SM senkron motor tasarımında diğer kayıp bileşenleri gibi bakır kaybı değeri de hesaplanmalı ve toplam kaybın motorda oluşturacağı sıcaklıklar kontrol edilmelidir.

5.3. SM Motorlarda Deri Etkisi Ve Yakınlık Kayıpları

Sürekli mıknatıslı bir senkron motorda iletken sargılar her zaman değişken manyetik alan içerisinde bulunur. İletken içerisinde geçen akım akı endükleyecek ve bu akılar da eddy girdap akımı adı verilen akımlar meydana getireceklerdir. Yani önceki

bölümlerde bahsedilen ve manyetik malzemede oluşan eddy girdap akımları etkisi sargılarda da görülmektedir.

Bu akımlar her ne kadar manyetik malzemede oluğu gibi iletken içerisinde fazladan gerilim üretmeseler de iletken içerisinde akmakta olan akımı etkileyeceklerdir. Şekil 5.1'de de görüleceği üzere iletken içinde akmakta olan akım bu etki altında iletken içinde düzgün bir yayılım sergileyemeyecek ve iletkenin dış çeperine yakın yerlerden akmaya başlayacaktır. Bu olaya deri etkisi adı verilmektedir.



Şekil 5.1. Motor sargılarında görülen deri etkisi ve akımın sargı içinde yayılımı

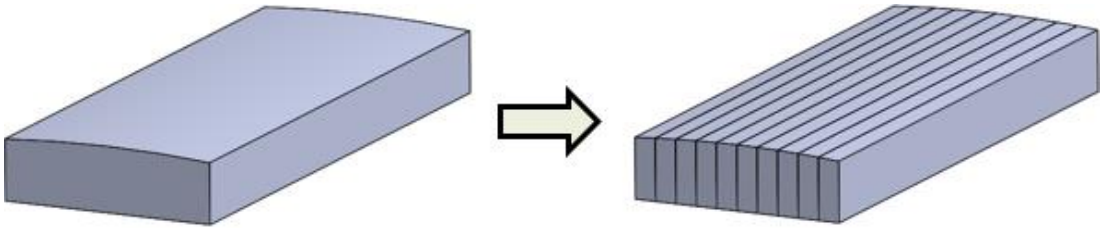
Tasarım aşamasında özellikle iletken içerisinde akacak olan akım yoğunluğu ve eddy girdap akımları dikkate alınıp iletken kesiti belirlenmelidir. İletken içinde akmakta olan akımın sahip olduğu frekans değeri arttıkça deri etkisi daha fazla görülmeye başlanır. Deri etkisinin en önemli etkilerinden biri de iletkenin endüktans değerini etkilemesidir. Deri etkisine maruz kalan bir iletkende endüktans değeri normal şartlardakine göre azalacaktır. Deri etkisi olayı aynı zamanda iletkenin direncini de arttırıp bakır kayıplarının da artmasına neden olmaktadır.

Yakınlık etkisi ise iletkenden akan akımının komşu iletkenlerden akan akımı etkilemesi olayına denir. Yakınlık kayıpları her zaman deri etkisi kayıplarından çok daha fazladır. Yüksek frekanslarda çalışan malzemelerin sıcaklıklarının artmasına neden olmaktadır. Bu aynı zamanda tasarımın da etkilenmesi anlamına gelmektedir. SM senkron motorlarda oluk içerisinde tek bir iletken kullanılsa dahi iletkenin stator dişi etrafında tek sarılmasından dolayı farklı yönlere doğru akım akacak ve yakınlık etkisi görülecektir.

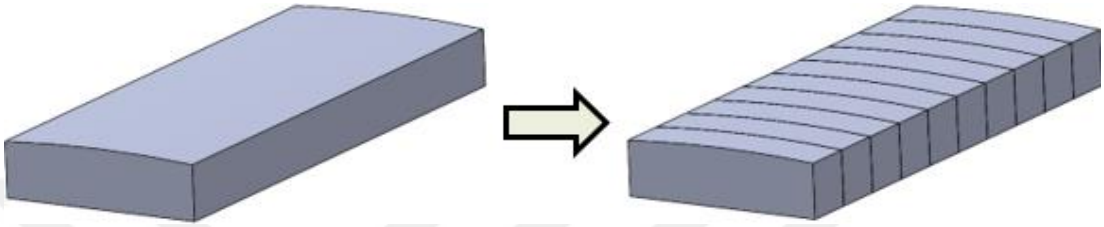
Gerek deri etkisi gerekse yakınlık etkisinin analitik yöntemlerle hesaplanması zordur. Sadece Sulvian'ın yaptığı çalışmada [45] sabit şekilli trafo sargıları için analitik hesaplamalar yapılmış fakat daha kompleks sargı şekilleri içim bu hesaplamaların uygulanabilirliği uygun görülmemiştir. Deri ve yakınlık etkilerini görüntüleyecek en iyi yöntem olarak sonlu elemanlar analizi uygun görülmektedir. Özellikle yüksek kutup sayılarına sahip ve yüksek hızlarda çalışma kabiliyeti olan makinalarda frekans değeri de yüksek olacağından bu tip makinalarda her iki etkiden kaynaklı kayıplara dikkat edilmesinde fayda vardır.

5.4. SM Motorlarda Mıknatıs Kayıpları

SM senkron motorlarda genelde verimi en çok etkileyen kayıp bileşenleri olarak bakır ve demir kaybı görülmektedir. Ancak özellikle yüksek hızlı uygulamalarda mıknatıs kayıpları verimi etkileyen önemli bir büyüklük olmaktadır. Son yıllarda sürekli mıknatıs teknolojisinin gelişmesiyle beraber mıknatıs malzemeler sürekli akı yoğunluğu ve yüksek zorlayıcı kuvvete sahip olmalarından kaynaklı çok iyi manyetik özelliklere sahiptirler. Ancak yüksek sıcaklıklar sürekli mıknatıslı malzemelerin manyetik özelliklerini çok fazla etkilemektedir. Sıcaklık etkisi dışında değişken manyetik alan, özellikle mıknatısların içerisinde eddy girdap akımı akmasına neden olmaktadır. Sıcaklık etkisi ile değişen manyetik alanlar mıknatısın manyetik etkisini kaybetmesine neden olabilir. Dolayısıyla mıknatıs kayıpları da SM senkron motorlarda göz önüne alınması gereken başka bir kayıp bileşenidir. Çoğu zaman demir ve bakır kaybına oranla daha az olan mıknatıs kayıpları özellikle yüksek sıcaklık ve hız uygulamalarında kontrol altına alınmalıdır. Son yıllarda mıknatıs malzemelerde oluşan kayıpların azaltılması yönünde birtakım çalışmalar yapılmaktadır. Özelikle eddy girdap akımlarını azaltmak adına rotor ve stator saclarının dilimlenmesi yöntemi, mıknatıs malzemelerinde de kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 5.2'de de görüleceği üzere ilk durumda tek parça halinde bulunan mıknatıs sonrasında eddy girdap akımlarını azaltacak şekilde radyal yönde ya da Şekil 5.3'de görüldüğü gibi eksenel yönde ince dilimler halinde kesilip sonradan birleştirilebilir.



Şekil 5.2. Mıknatısta oluşan eddy girdap akımları etkisini azaltmak için radyal yönde ince dilimler halinde kesilip birleştirilen mıknatıs yapısı



Şekil 5.3. Mıknatısta oluşan eddy girdap akımları etkisini azaltmak için eksenel yönde ince dilimler halinde kesilip birleştirilen mıknatıs yapısı

Mıknatıs kayıplarının teorik hesaplamaları demir kaybı eddy girdap akımı hesaplamaları ile yapılabilir. Analitik hesaplamalar dışında mıknatıs kayıpları sonlu elemanlar analizi yapılarak da bulunur. Bu yöntemle yapılan hesaplamalar kısa sürmekte ve zamandan yüksek kazanç elde edilmektedir.

5.5. SM Motorlarda Mekanik Kayıplar

SM senkron motorlarda mekanik kayıplar rulmanların yatak sürtünmelerinden, ortam havasının viskozitesisin sebep olduğu kayıplar ve akışkanın bölgesel basınç farklarından kaynaklanan kayıp bileşenlerinden meydana gelir. SM senkron motorlarda çoğu zaman mekanik kayıplar, düşük değerlere sahip olduğu varsayılıp göz önüne alınmaz. Ama yine de bu değerlerin belirlenmesi makinanın verimini doğru hesaplamada yararlı olacaktır. Mekanik kayıplar uygun bir hızda ve boşta çalışan bir motorun giriş gücü belirlenerek ölçülebilir.

5.5.1. Sürtünme kayıpları

SM motorlarda sürtünme kayıpları sadece yatakların sürtünmesinden kaynaklanır. Bir yatakta sürtünme iki şekilde oluşur. Birincisi contaların sürtünmesi, ikincisi ise yatağın kendi sürtünmesidir. Ayrıca yatak sürtünmeleri yatak tipi, yatak büyüklüğü ve yağlayıcı maddeye bağlıdır. Yuvalanmalı yatakların sürtünme hesabı; μ sürtünme

katsayısı, M_s sürtünme momenti, F yatak yükü ve d yatak delik çapı olmak üzere Denklem (5.11)'de verildiği gibi hesaplanır [46],

$$\mu = \frac{M_s}{F\frac{d}{2}} \tag{5.11}$$

Kaymalı yani lineer yataklarda ise sürtünme katsayısı Denklem (5.12) de görüldüğü şekilde hesaplanır. Burada da μ ve F yuvarlanmalı yataklarda olduğu gibi sırasıyla sürtünme katsayısını ve yatak yükünü ifade ederken, F_s ise sürtünme kuvvetini ifade etmektedir [46],

$$\mu = \frac{F_s}{F} \tag{5.12}$$

Tablo 5.1'de de elektrik motorlarında kullanılan bazı yatak tiplerinin sürtünme katsayıları verilmiştir.

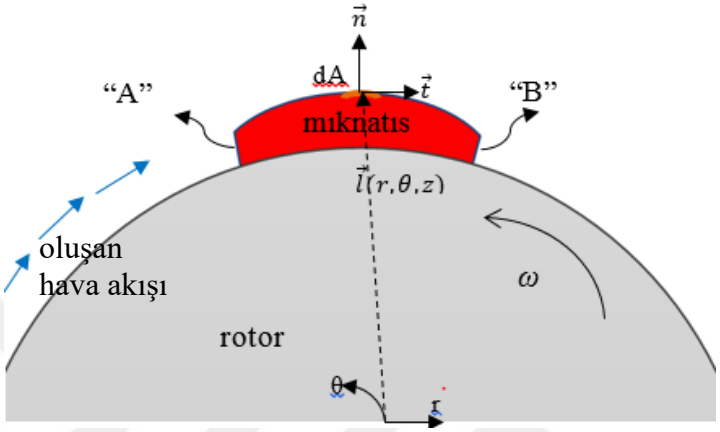
Tablo 5.1. Bazı yatak tiplerinin sahip olduğu sürtünme katsayıları [46]

Yatak Tipi	Yatak Adı	Sürtünme Katsayısı
Yuvarlanmalı Yataklar	Sabit bilyalı yataklar	0,0022 – 0,0042
	Silindirik makaralı yataklar	0,0012 – 0,0060
	Oynak bilyalı yataklar	0,0016 – 0,0066
	Eğik bilyalı yataklar	0,0018 – 0,0069
	Oynak makaralı yataklar	0,0029 – 0,0071
	Konik makaralı yataklar	0,0025 – 0,0083
Kaymalı Yataklar	Pirinç malzemeden oluşmuş	0,18
	PTFE malzemeden oluşmuş	0,04 – 0,22
	Dökme demir malzemeden oluşmuş	0,18 – 0,24

5.5.2. Ortam akışkanı kaynaklı kayıplar

SM senkron motorlarda özellikle yüksek hızlarda dikkat edilmesi gereken başka bir mekanik kayıp bileşeni de hava akışı kaynaklı kayıplardır. Özellikle rotor yapısı üzerinde dairesel olmayan yapılar veya rotor içinde bulunan şaft yapısında rotorun dönüş yönünde oluşan hava akışına dik kesitler de hava akışı kaynaklı kayıplar oluşur.

Örneğin Şekil 5.4'e bakacak olursak; ω hızında saat yönünün tersine dönen rotor yüzeyinde bulunan mıknatısın "A" tarafında, dönüş yönüne hava ile ilk teması yapacağından basınç yüksek olacaktır. Aynı şekilde "B" tarafında ise en düşük basınç oluşacaktır. Mıknatısı iki yüzü arasında ki bu basınç farkı mıknatısa bir F kuvveti etki etmesine neden olacaktır.



Şekil 5.4. Rotor hızından kaynaklı oluşan hava akışının mıknatıs üzerinde oluşturduğu basınç alanları

Ayrıca hava ile temas eden hareketli yüzeylerde, örneğin mıknatıs yüzeyinde viskozite ve çizgisel hız ile doğru orantılı bir kayma gerilmesi oluşur. Bu kayma gerilmesi motorun dönme yönüne ters yönde bir momente sebep olur. Matematiksel olarak ifade edersek,

$$d\vec{M} = \vec{l} \times (\tau_w \vec{t})dA \tag{5.13}$$

$$\tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial n}\bigg|_{n=0} \tag{5.14}$$

eşitlikleri ortaya çıkar. Denklem (5.13)'de akışkanın viskozitesinden kaynaklanan moment ifadesi verilmiştir. Denklem (5.14)'de ise viskozitenin ve hareketin yüzeyde yarattığı kayma gerilmesi ifade edilmiştir. Denklem (5.14)'de bulunan ifadeyi Denklem (5.13)'de yerine yazarsak son olarak şu ifade ortaya çıkar;

$$d\vec{M} = \vec{l} \times (\mu \frac{\partial u}{\partial n}\bigg|_{n=0} \vec{t})dA \tag{5.15}$$

Burada $\vec{l}(r,\theta,z)$ hava ile temas halinde olan eğrisel yüzeyi, μ havanın dinamik viskozitesini, dA hava ile temastaki yüzey üzerinde bir diferansiyel alanı, $\vec{n}$ dA diferansiyel alanın normalini, $\vec{t}$ dA alanının teğet vektörünü, u havanın $\vec{t}$ yönündeki hız bileşenini, $\overrightarrow{M}$ havanın rotor dönme merkezine göre uyguladığı momenti gösterir.

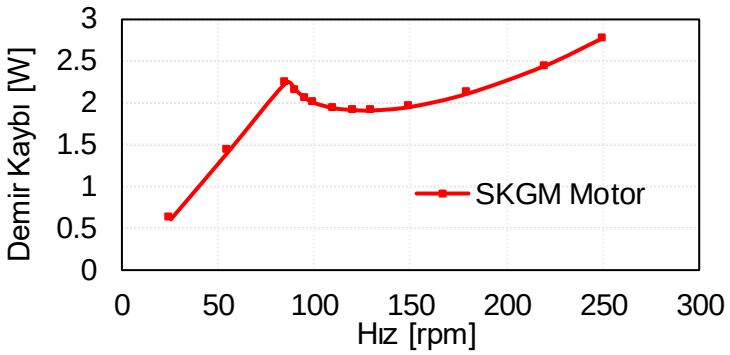
5.6. SKGM Motor Kayıp Büyüklükleri ve Referans Motor ile Klasik Çubuk Tip GM Motorla Karşılaştırılması

Motor kayıp büyüklüklerinin saptanması ve bu büyüklüklerin motor çalışma sıcaklıklarına olan etkisi SM senkron motor tasarımında önemli bir adımdır. Sıcaklığın belirlenmesi ve kontrol altında tutulması, motorun kullanılacağı uygulama için de önem arz etmektedir. Bu nedenle tasarımı tamamlanan SKGM motorda demir, mıknatıs ve bakır kaybı bileşenleri SEA ile elde edilmiş ve bu bileşenler yapısal ve termal analizler bölümünde, motorun çıkabileceği sıcaklık değerlerini belirlemede kullanılmıştır.

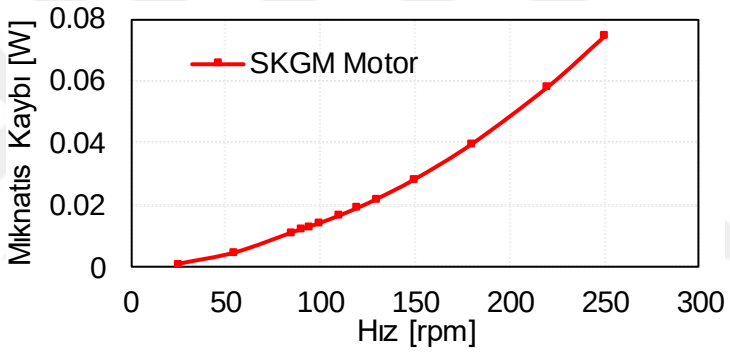
SKGM motora ait demir kaybının hıza bağlı değişimi Şekil 5.5'de verilmiştir. Şekilde de görüleceği üzere motor sargı akımının sabit olduğu dolayısıyla da akı yoğunluğunun da sabit olduğu nominal hıza kadar eddy, histerezis kaynaklı demir kayıpları rotor hızının bir fonksiyonu olan frekansa bağlı olarak artmıştır. Nominal hızdan sonra ise daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi motor hat geriliminin gördüğü gerilim değeri büyüklüğü DC bara gerilim seviyesine gelmesinden dolayı akım kontrolü yapılmış ve d-eksen akımı verilmeye başlanmıştır. Bu noktadan sonra d-eksen akımının sac nüve üzerindeki akı değerini azaltması nedeniyle bir süre rotor hızı artmasına rağmen kayıplar azalmıştır. 145 rpm hız değerinden sonra ise hız büyüklüğünün iyice artması demir kaybında daha etkin rol almaya başlamış ve demir kayıpları, akı yoğunluğunun nüve üzerinde azalmasına rağmen artış göstermiştir. Maksimum hız olan 250 rpm değerinde rotor ve sac nüvesi üzerinde ki toplam demir kaybı miktarı 2,88 W olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.5' de ise SKGM motora ait mıknatıs kaybının hıza bağlı değişimi verilmiştir. Demir kaybı sonuçlarında olduğu gibi mıknatıs kaybı belirleme analizi yapılırken, akımın düşürüldüğü nominal noktadan sonra basılan d-eksen akımı akı yoğunluğunu azaltmıştır. Buna rağmen rotor hızının artması dolayısıyla da dönme frekansının

artmasıyla yükselen eddy girdap akımı kaynaklı mıknatıs kayıpları beklenildiği gibi hıza bağlı olarak artış göstermiştir. Maksimum hız olan 250 rpm değerinde mıknatıs üzerinde ki kayıplar 0,08 W olarak elde edilmiştir.

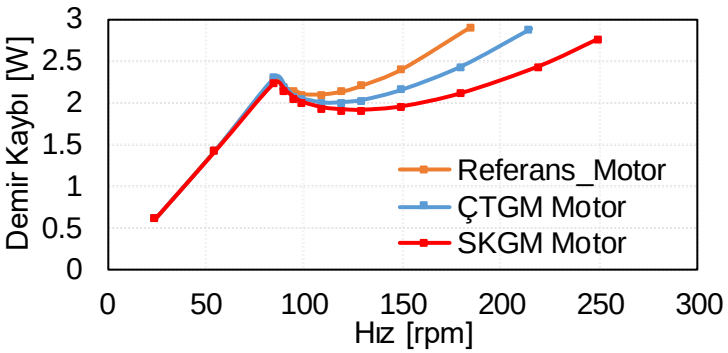


Şekil 5.5. SKGM motorun SEA sonucu elde edilen demir kaybının hıza bağlı değişimi

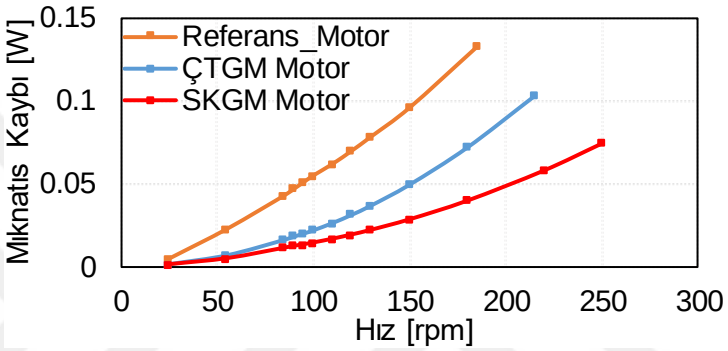


Şekil 5.6. SKGM motorun SEA sonucu elde edilen mıknatıs kaybının hıza bağlı değişimi

SKGM motor için yapılan kayıp belirleme analizleri, referans motor ve klasik ÇTGM motor içinde yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her üç motora ait demir kayıplarının hıza bağlı değişimleri Şekil 5.7'de verilmiştir. Burada SKGM motorun demir kaybın diğer iki motora göre sabit güç bölgesinde daha az olduğu görülebilir. Bu karşılaştırma sonucu SKGM motorun diğer iki motora karşı performans avantajlarından biri olarak kabul edilebilir. Yine aynı şekilde Şekil 5.8'de verilen mıknatıs kaybı değişimlerine bakacak olursak, bu kayıp bileşeninde de SKGM motorun avantajı göze çarpacaktır. Diğer bir taraftan her üç motorda gerek yapısal boyutlar gerekse de elektriksel özellikler bakımından statorlar aynı tutulmuştur. Bu bakımdan bakır kayıpları 18,4 Arms faz akımında ve 0,164 Ohm faz direncinde 166,57 W olarak elde edilmektedir.



Şekil 5.7. Her üç motora ait SEA sonucu elde edilen demir kaybının hıza bağlı değişimleri



Şekil 5.8. Her üç motora ait SEA sonucu elde edilen mıknatıs kaybının hıza bağlı değişimleri

6. ÖZGÜN SKGM MOTOR YAPISAL VE TERMAL ANALİZLERİ

Bu bölümde, manyetik tasarımı tamamlanan motora ait yapısal ve termal analiz sonuçları verilmiştir. Tasarlanan motorun rotor yapısının özel olmasından kaynaklı detaylı yapısal analizler yapılıp elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Aynı zamanda motora ait belirlenen kayıp bileşenleri doğrultusunda termal analizler gerçekleştirmiş ve motorun çıkabileceği maksimum sıcaklık değerleri belirlenmiştir.

6.1. Nihai Motorun Yapısal Analizleri ve Sonuçları

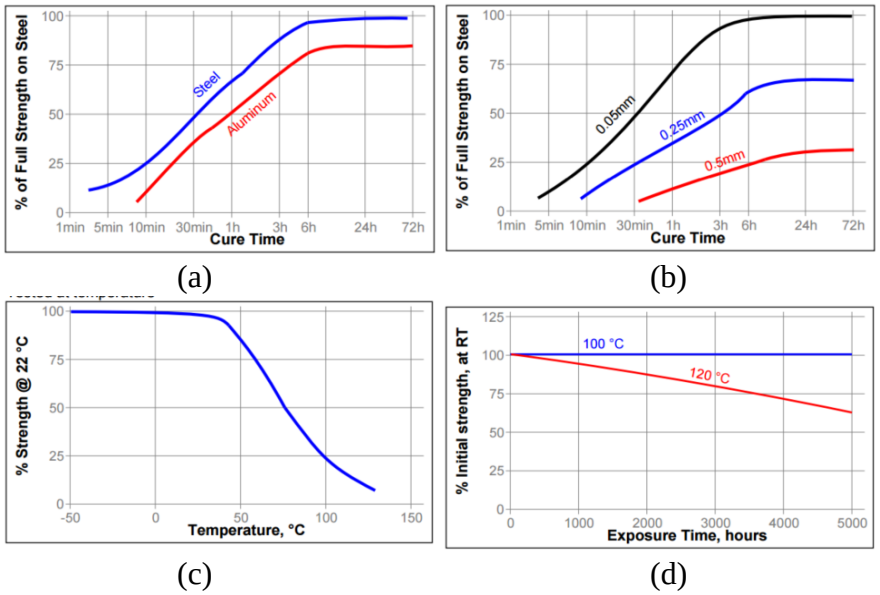
SKGM motorun elektromanyetik tasarım aşamaları tamamlanmıştır. Bu aşamadan sonra motorun yapısal analizleri gerçekleştirilerek yapısal anlamda motorun, ihtiyaçları karşılayıp karşılamadığının saptaması yapılmıştır. Motor mekanik analizi için gerekli sınır koşulları belirlenmiş ve bu sınır koşulları altında motora etki eden moment ve merkezkaç kuvveti büyüklüklerini incelenmiştir.

Motorda kullanılan mıknatıs, stator ve rotor sacları ile diğer bileşenlerin malzemelerine ait fiziksel özellikler Tablo 6.1'de verilmiştir. Gerçekleştirilen tüm manyetik, yapısal ve termal analizlerde tabloda özellikleri verilen malzemeler kullanılmıştır. Burada rotor ve stator sac malzemesi olarak M270-35A silisli sac kullanılmıştır Mıknatıs olarak N40UH'ın kullanılmasına karar verilmiştir. Aynı zamanda rotor nüvesinden birer atlanılarak çıkarılan büyük mıknatısların oluşturduğu geniş hava boşluğuna da yapısal anlamda dayanımı artırması adına kestamit eklenmiştir. Mekanik özelliklere baktığımızda M270-35A için akma dayanımı 400 MPa, N40UH için ise 80 MPa'dır. Bu değerler her bir malzeme için üst sınır olup yapısal analizler sonucu malzemelerde çıkacak olan gerilme büyüklüklerinin bu değerleri geçmemesi gerekmektedir. Aksi takdirde motorun yapısal anlamda gerilmeleri taşımadığı ve tasarımım tekrar gözden geçirilmesi gerektiği söylenebilir.

Tablo 6.1. Motorda kullanılan malzemeler ve mekanik özellikleri

Motora Ait Malzemeler					
Stator Malzemesi	M270-35A				
Rotor Malzemesi	M270-35A				
Mıknatıs Malzemesi	N40UH				
Nomex Kalınlığı	0,2 mm				
Mıknatıs Yapıştırıcısı	Loctite 330				
Malzeme Özellikleri					
	Özkütle (kg/m^3)	**Özgül Isı (J/kgK)**	**Termal İletkenlik (W/mK)**	**Akma Dayanımı (MPa)**	**Elastisite Modülü (GPa)**
M270-35A	7650	500	30	400	190
N40UH	7500	460	7.6	80	160
Nomex	700	1000	0,21	-	-

Yapısal analiz sırasında mıknatısların rotor ile yapıştırıldığı varsayılmış ve yapıştıracak malzeme olarak Loctite 330 kullanılmıştır. Mıknatıs yapıştırıcı dokümanları incelendiğinde yapıştırıcının dayanım değerlerinde sıcaklık ve yapışkan film kalınlığı faktörlerinden gelen etkiler verilmiştir. Ayrıca 5000 saatlik yaşlanma test verisi bulunmaktadır. Loctite 330 için verilen bu veriler Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Ayrıca kullanılan bu yapıştırıcının mekanik özellikleri Tablo 6.2'de verilmiştir.



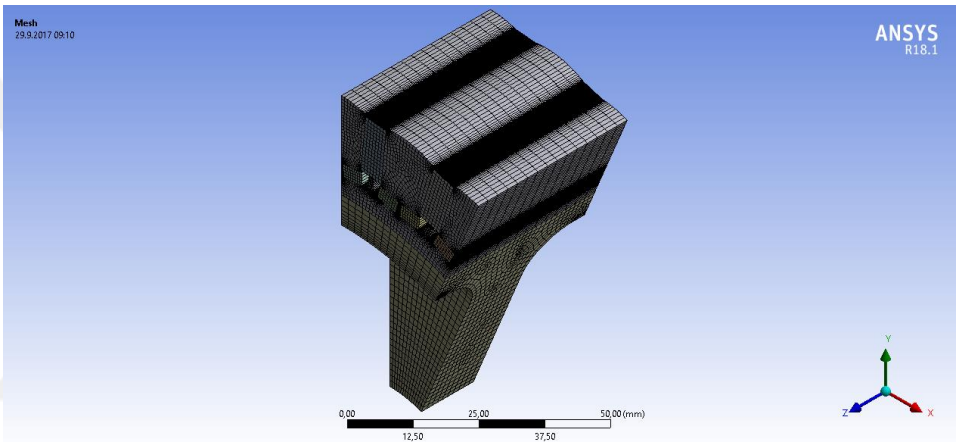
Şekil 6.1. Loctite 330 yapıştırıcı özellikleri, (a) yapıştırıcının kuruma süresince dayanımının zamanla değişimi, (b) farklı yapıştırıcı miktarları için kuruma süresince dayanımının zamanla değişimi, (c) dayanımın sıcaklığa bağlı olarak değişimi, (d) yapıştırıcı maddenin 100°C ve 120°C sıcaklıklarda dayanımın zamanla değişimi

Tablo 6.2. Yapıştırıcının yapıştığı malzeme türüne göre mekanik özellikleri

Kayma dayanımı	15 - 30 N/mm^2 arası
Çekme dayanımı	12 - 22 N/mm^2 arası

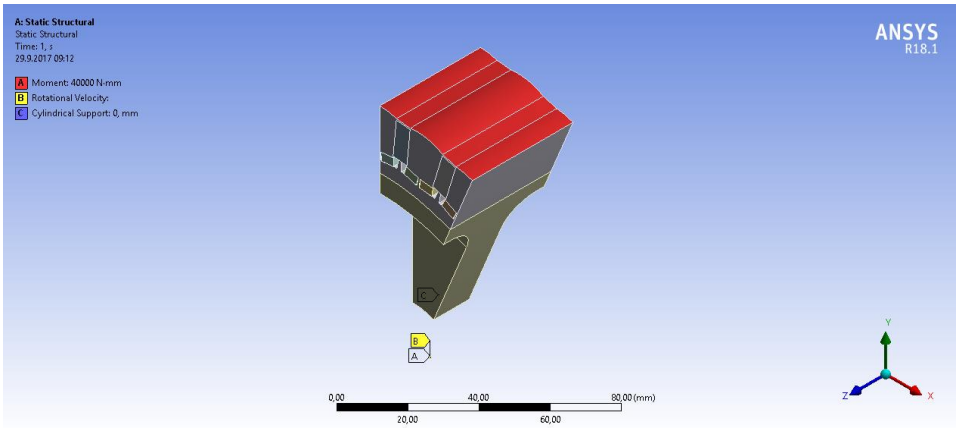
6.1.1. Statik yapısal analizler

Motor rotoru analiz edilirken, rotor 1/16 simetrik olarak ele alınmış; motor momentinin ve açısal hızın etkisinde oluşan gerilmelere bakılmıştır. Analizde radyal yönde oluşan manyetik kuvvetler dikkate alınmamıştır. Şekil 6.3'de motor rotoruna ait sayısal model geometrisi verilmiştir.

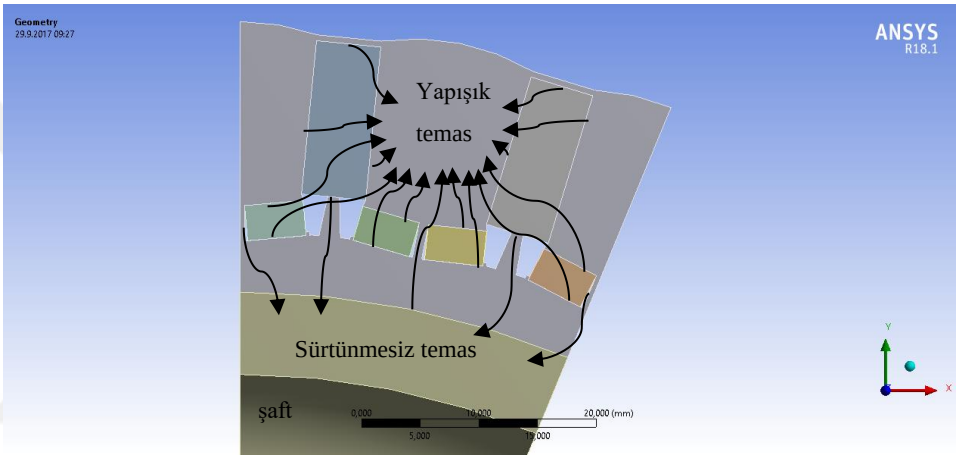


Şekil 6.2. Nihai motor yapısal SEA ağ yapısı

Rotor, şaft bölgesinden, 3-eksen üzerinde tanımlı silindirik destek ile eksenel ve teğetsel doğrultuda sabitlenmiş; radyal doğrultuda ise serbest bırakılmıştır. Uygulanan sınır koşulları Şekil 6.3'de, temas koşulları ise Şekil 6.4'da verilmiştir. Rotor – şaft bağlantısı yüzeyinde sıkı geçme şartı olmamakla beraber bağlantı yapışık olarak ele alınmıştır.

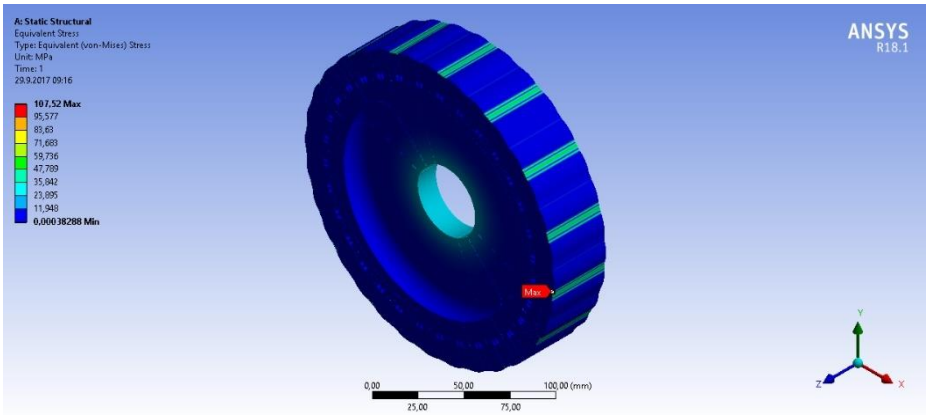


Şekil 6.3. Rotora uygulanan sınır koşulları

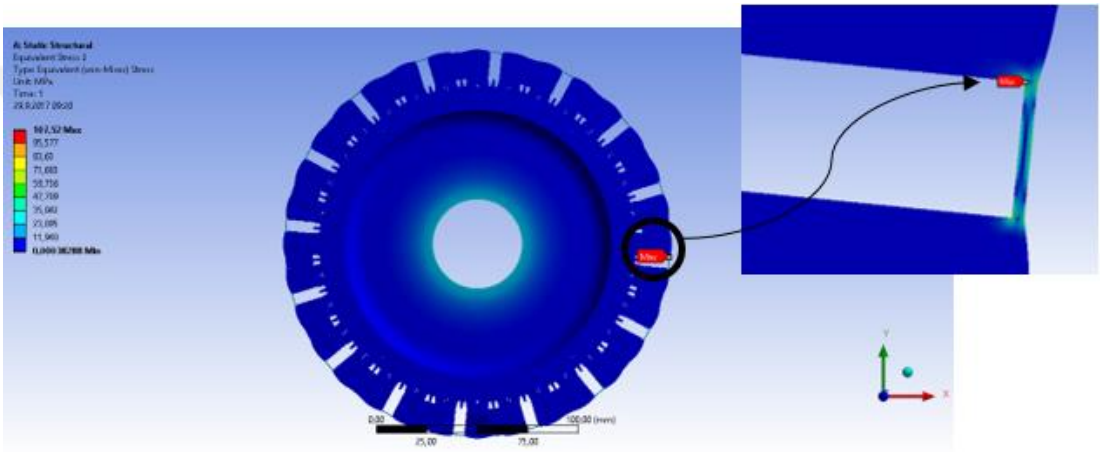


Şekil 6.4. Rotora uygulanan temas koşulları

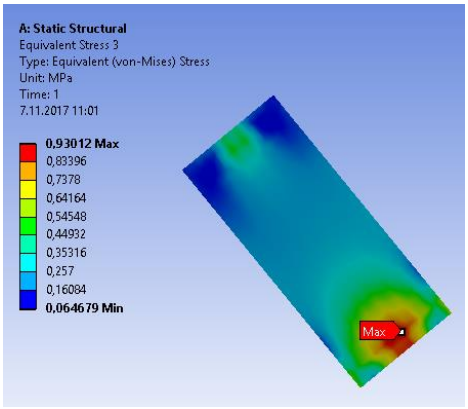
Verilen koşullar altında gerçekleştirilen analiz sonuçları aşağıda verilen görsellerle özetlenmiştir. Şekil 6.5'da görüldüğü üzere rotorda oluşan maksimum Von-Mises eşdeğer gerilmesi 107,52 MPa'dır. Bu maksimum gerilme, Şekil 6.6'da da görüldüğü gibi kestamit üzerinde bulunan rotor köprüsünde oluşmuştur ve akma dayanımı seviyesine çok çok uzak olduğundan rotorun yapısal anlamda zorlanmalarla karşılaşmayacağı söylenebilir. Belirtilen bu bölgede çentik etkisinden kaynaklı gerilme yığılmaları olduğu görselden anlaşılabilmektedir. Bu bölgedeki geometri geçişlerine yuvarlatma verilmesi gerilmeleri daha da azaltacaktır. Rotor nüvesi yanı sıra kestamit üzerinde oluşan eşdeğer gerilmeler Şekil 6.7'de, mıknatıslar üzerinde oluşan gerilmeler de Şekil 6.8'de verilmiştir. Kestamit üzerinde 0,93 MPa, mıknatıs üzerinde ise 5,05 MPa'lık gerilmeler oluşmaktadır. Aynı şekilde bu değerler motorda yapısal anlamda sorun olmadığı göstermektedir.



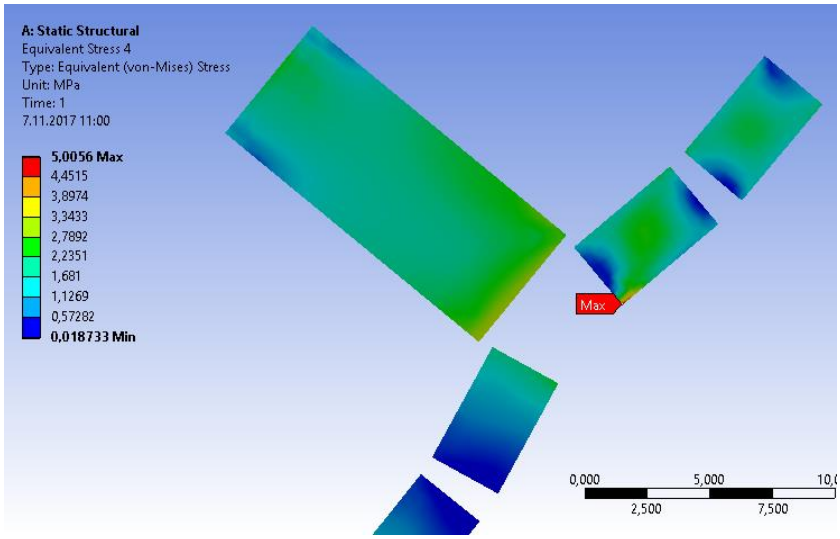
Şekil 6.5. Tüm rotor üstündeki Von-Mises eşdeğer gerilme kontürleri



Şekil 6.6. Rotor nüvesi üstündeki Von-Mises eşdeğer gerilme kontürleri

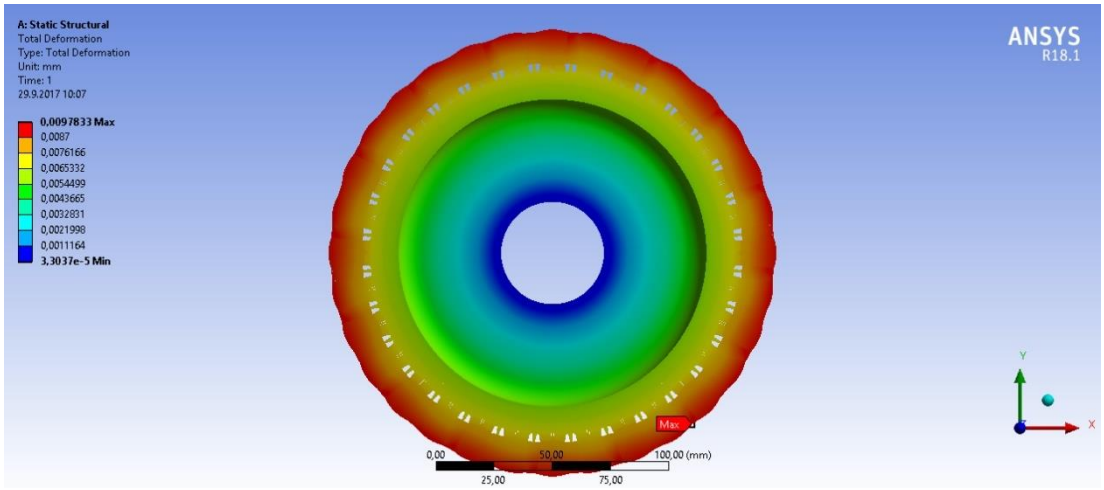


Şekil 6.7. Kestamit üstündeki Von-Mises eşdeğer gerilme kontürleri

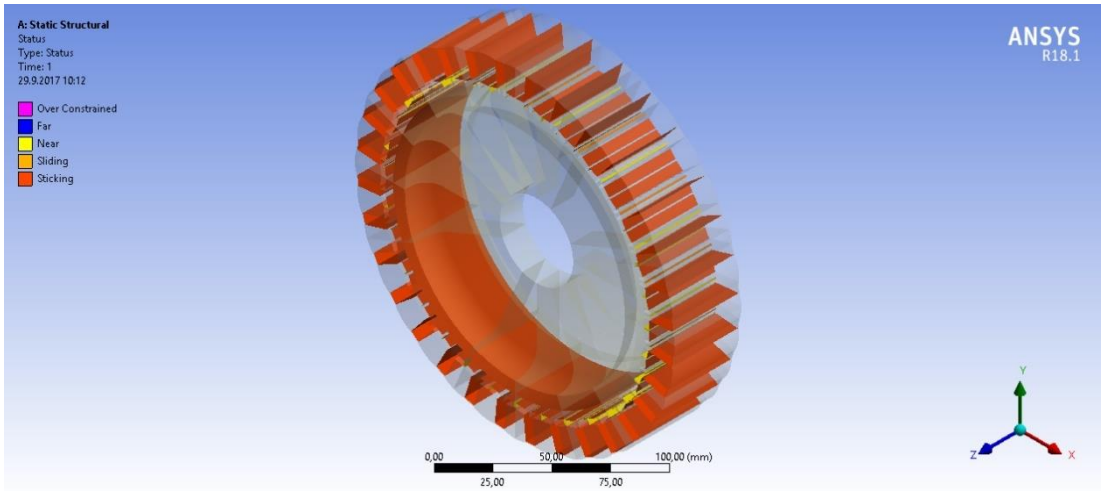


Şekil 6.8. Mıknatıslar üstündeki Von-Mises eşdeğer gerilme kontürleri

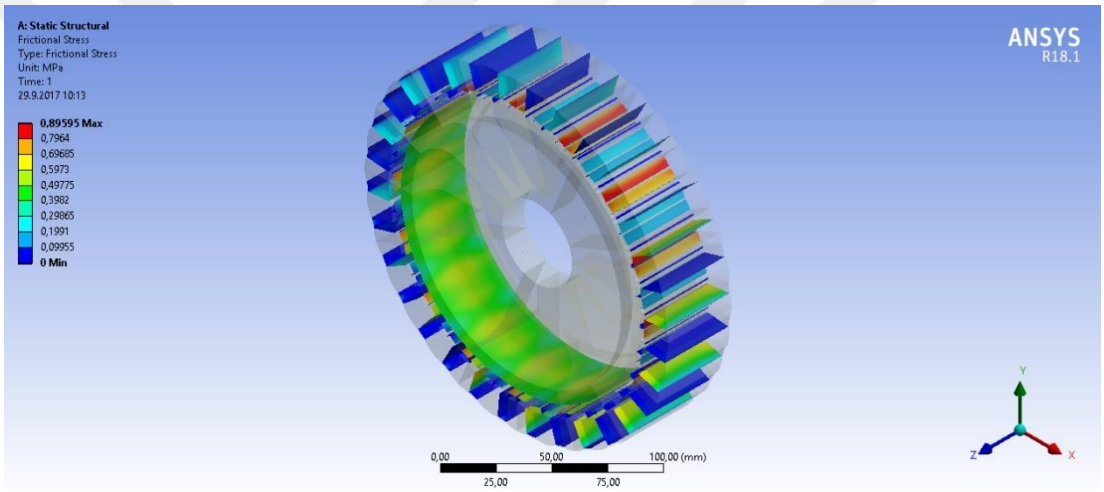
Motor rotorunun belirtilen şartlar altında toplam yer değiştirmesi Şekil 6.9'da, temas durumları Şekil 6.10'da, yüzeyler arası kayma stresleri Şekil 6.11'de ve son olarak yüzeyler arası basınçlar da Şekil 6.12'de verilmiştir. Şekil 6.9'da da görüldüğü üzere, temas etmesi gereken yüzeyler arasında boşluklar oluşmamıştır ve hepsi temas durumundadır. Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de görünen yüzey temas gerilmeleri de yapıştırıcı bakımından kabul edilebilir seviyelerdedir.



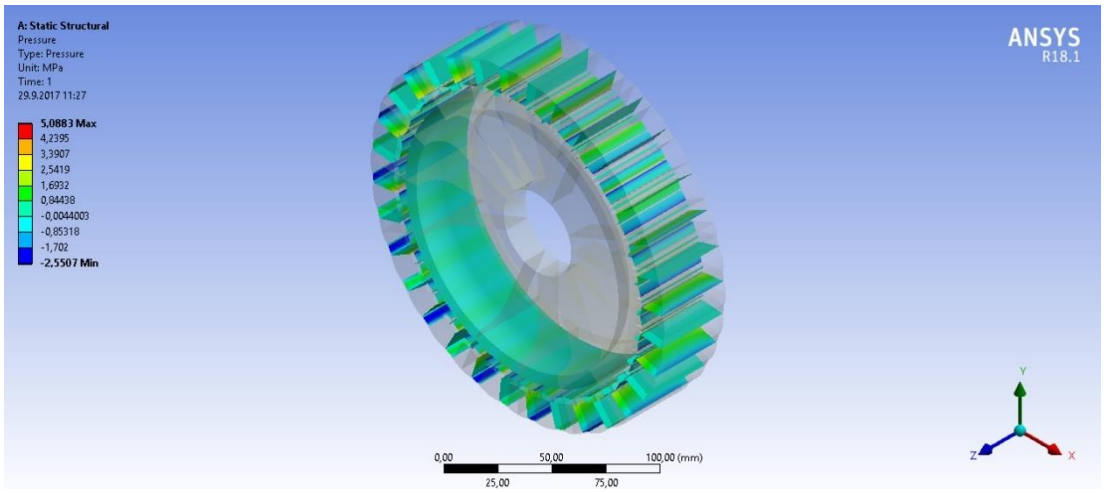
Şekil 6.9. Toplam yer değiştirme kontürleri



Şekil 6.10. Temas durumları



Şekil 6.11. Yüzeyler arası kayma stresi kontürleri



Şekil 6.12. Yüzeyler arası basınç kontürleri

6.1.2. Statik yapısal analiz sonuçları

Sonuç olarak yapısal analizler yapılırken özellikle hareket eden parçalar olan rotor ve mıknatıs bileşenlerine etki eden dönme momenti ve merkez-kaç kuvveti etkisi incelemiştir. Bu parçalarda oluşan stres seviyeleri, toplam yer değiştirme ve basınç değerlerinin, parçaları oluşturan malzemelerin dayanım değerlerinin çok altında olduğunu göstermektedir. Bu da motorun mekanik anlamda kritik zorlanmalara maruz kalmayacağı anlamına gelir. Elde edilen tüm sonuçlar Tablo 6.3'de özetlenmiştir.

Tablo 6.3. Analizler sonucu elde edilen maksimum ve minimum gerilmeler

Maksimum eşdeğer gerilme (Rotor nüvesi)	107,52 MPa
Maksimum eşdeğer gerilme (Mıknatıs)	5,05 MPa
Maksimum eşdeğer gerilme (Kestamit)	0,93 MPa
Rotor – mıknatıs arası sürtünme stresi (Maks/Min)	0,9 / 0 MPa
Rotor – mıknatıs arası temas basıncı (Maks/Min)	5,09 / -2,55 MPa

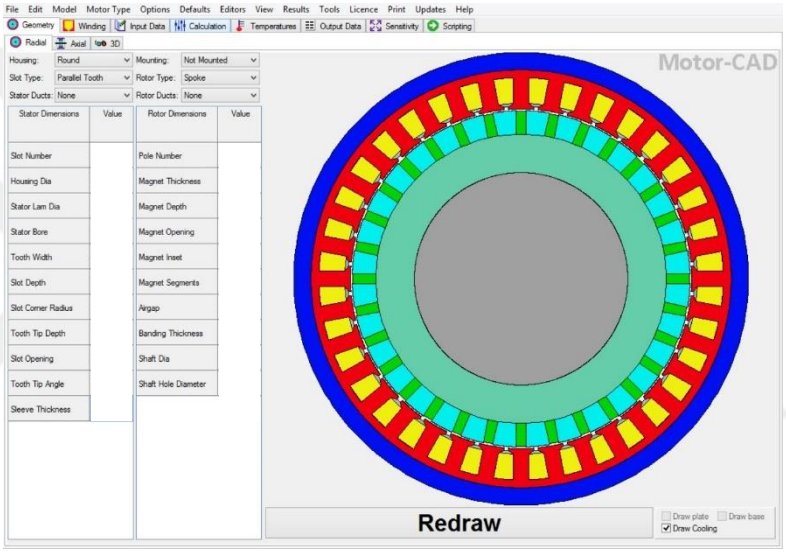
6.2. Termal Analizler ve Sonuçlar

Önceki bölümlerde elde edilenen SKGM motora ait demir, bakır ve mıknatıs kayıp değerleri Tablo 6.4'de verilmiştir. Görüldüğü gibi motorda demir ve mıknatıs kayıp değerleri bakır kaybı değerine göre oldukça düşüktür. Toplam kayba baktığımızda ise motorun nominal çalışma anında yani 39,11 Nm moment ve 85 rpm hız değerlerinde 168,82 W güç kaybı meydana gelecektir. Bu kayıp büyüklüklerinin motorda ısınmaya neden olması olasıdır. Bu nedenle motor sıcaklıkları kontrol edilmelidir. Bu amaç doğrultusunda termal eşdeğer tabanlı bir program olan MotorCAD® kullanılmış ve anma anındaki motorun çıkabileceği maksimum sıcaklıklar elde edilmiştir.

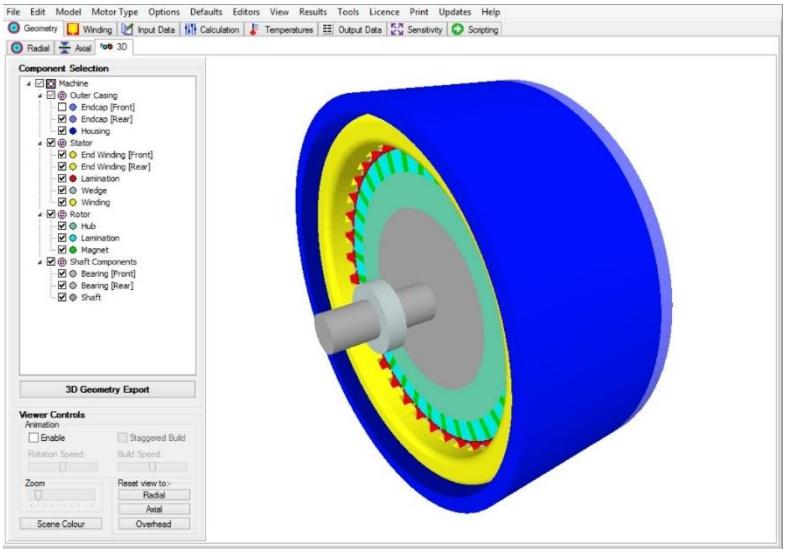
Tablo 6.4. SKGM motorda tüm kayıp bileşenleri

	-Anma noktası- 39.11 Nm / 85 rpm
Toplam bakır kaybı	166,57 W
Demir kayıpları	2,24 W 2,02 (stator) + 0,22 W (rotor)
Toplam mıknatıs kayıpları	0,011 W
Tüm kayıpların toplamı	168,82 W

Nihai motorun ısıl performansı MotorCAD yazılımı ile kontrol edilerek ön analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'de örnek motorun MotorCAD® ile oluşturulan ısıl modeli ve 3B görünümü verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere ısıl analiz modeli kullanılırken rotor yapısını programa yansıtmak zor olduğundan toplam mıknatıs ağırlığı SKGM motorla aynı olacak farklı rotor boyutlarında başka bir GM model analizi yapılmıştır. Ancak stator elektriksel büyüklükleri, yapısal boyutlar ve motora ait dış boyutlar (çap, paket boyu) nihai SKGM motorla bire bir aynıdır. Dolayısıyla sıcaklık artışından en önemli etkiyi göstermesi düşünülen bakır kayıpları modele olduğu gibi aktarılmıştır.

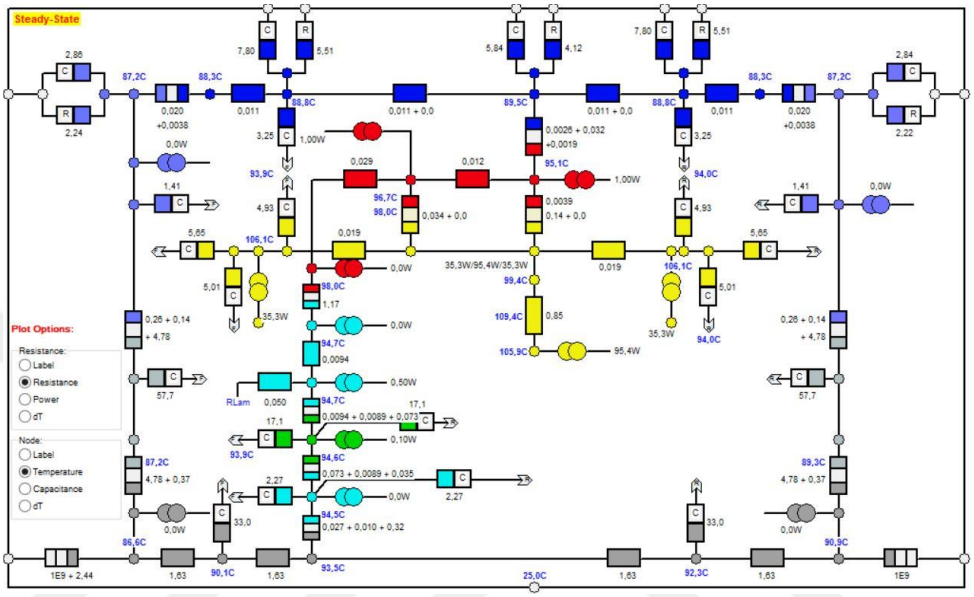


Şekil 6.13. SKGM motorun MotorCAD® ısıl modeli

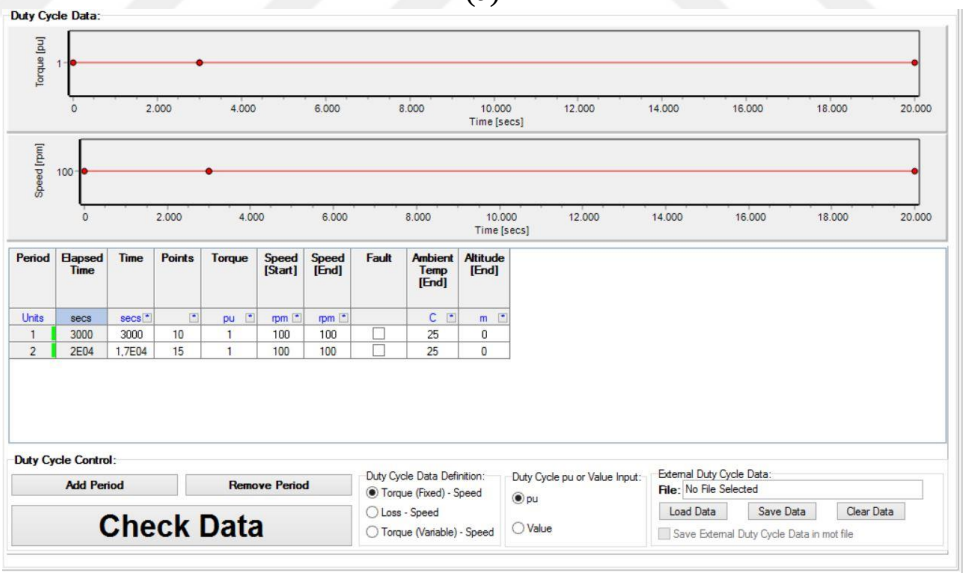


Şekil 6.14. SKGM motorun MotorCAD® 3B modelinin görünümü

Oluşturulan modele ait ısıl eşdeğer devre Şekil 6.15 (a)'da motorun sürekli çalışmada moment-zaman eğrisi de Şekil 6.15 (b)'de gösterilmiştir. Tüm simülasyon çalışmaları anma noktası olan 85 rpm hızda ve 25°C ortam sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sıcaklıkların belirlenmesinde kullanılan tüm kayıp verileri de yine 85 rpm hızda alınmıştır.



(a)

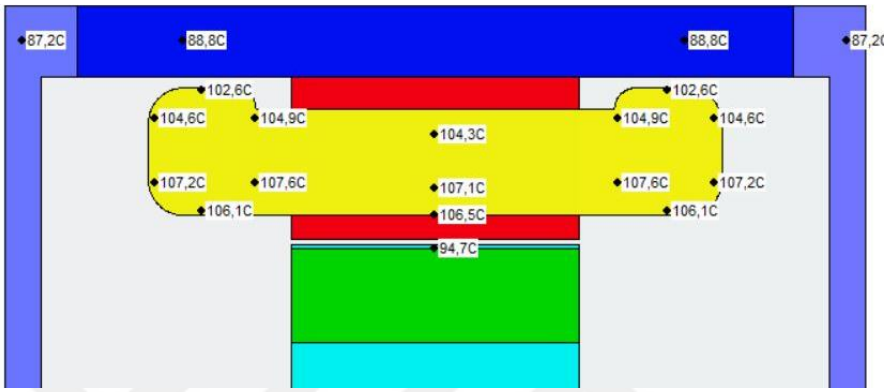


(b)

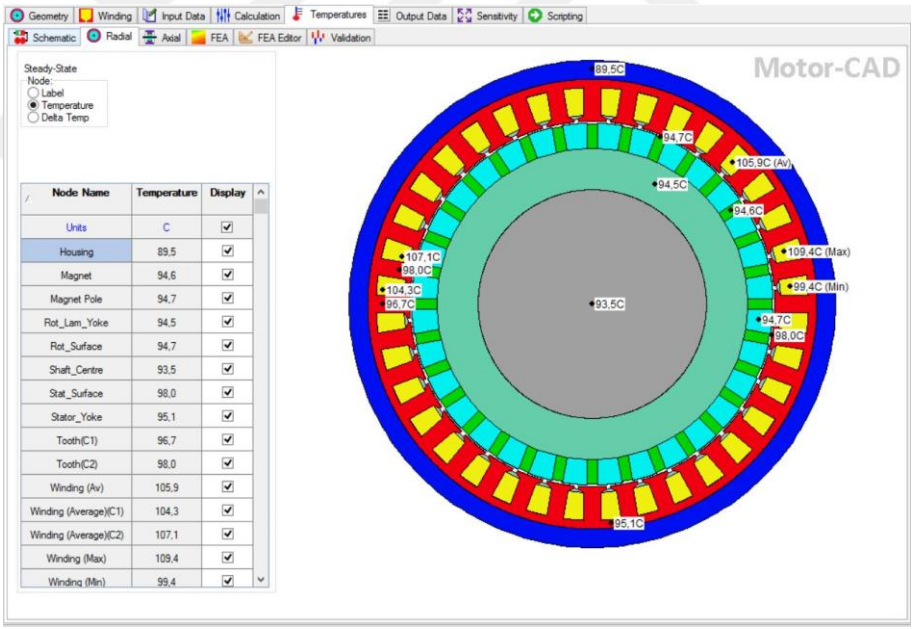
Şekil 6.15. Motora ait, (a) motor ısıl eşdeğer devresi (kayıplar 85 rpm'de alınmıştır) ve (b) kararlı durum çalışma aralığı verisi (20000 saniyeye kadar)

Isıl analizler yapılırken motorun bir gövdeye sahip olduğu varsayılmıştır ve gövde herhangi bir flanşa bağlı değildir. Bu durumda kararlı durum motor sıcaklıkları incelenmiş ve sonuçlar Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Yapılan çalışmada motor

gövdesinden dış ortama hem taşınım hem de radyasyon yoluyla ısı atımı olduğu kabul edilmiştir. Anma noktasında yani 39,11 Nm çalışma momentinde, 85 rpm hızda ve 25°C ortam sıcaklığında maksimum motor sıcaklığının 109,4°C ile sargı sonlarında olduğu bulunmuştur. H sınıfı sargıların kullanılması düşünülen prototip üretiminde maksimum sargı sıcaklıkları 150°C olarak bilinmektedir. Bu durumda motorun soğutma sistemi olmadan anma noktasında çalışmasında herhangi bir sakınca yoktur.



(a)

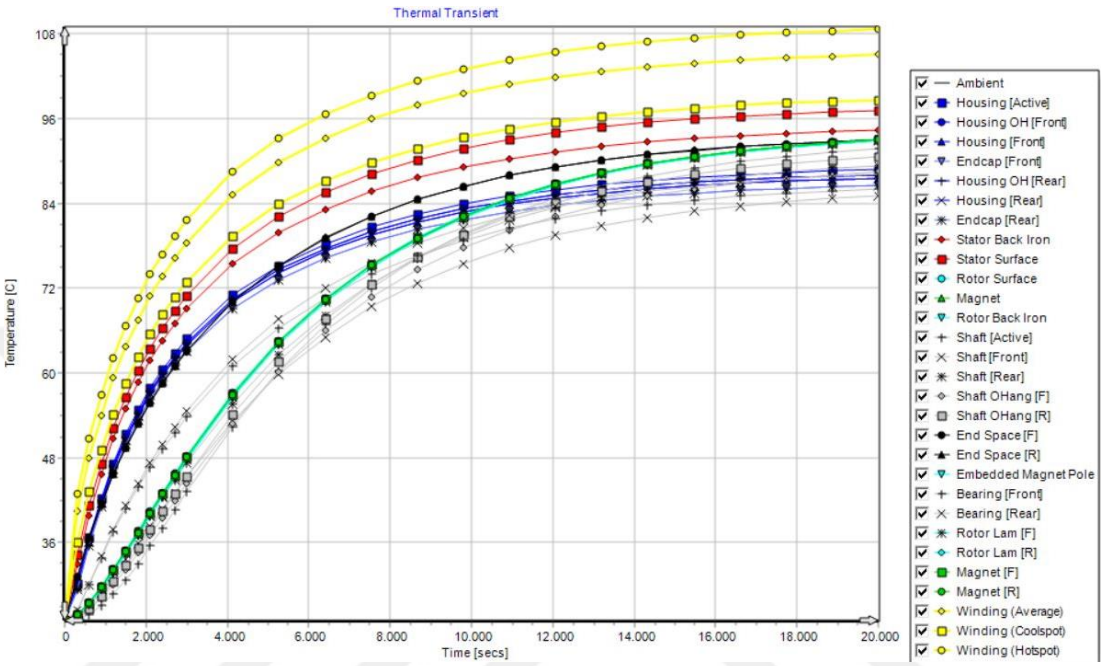


(b)

Şekil 6.16. 39,11 Nm yük altında ve 85 rpm'de kararlı durumda aktif malzemelerdeki sıcaklıkların, (a) eksenel, (b) radyal değişimi (25°C ortamda sıcaklığında)

Motor farklı bileşenlerinde oluşan sıcaklıklarının zamana bağlı değişimleri, ortam sıcaklığı 25°C'de elde edilmiş ve Şekil 6.17'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi maksimum sıcaklık stator sargılarında oluşmaktadır ve tüm malzemelerdeki sıcaklıklar belirli bir süre sonunda belirli bir sıcaklık değerine oturmaktadır. 25°C

ortam sıcaklığında ortalama sargı sıcaklığı 108,1°C, mıknatıs sıcaklığı 87,6°C ve gövde sıcaklığı 87,4°C seviyelerinde bulunmuştur. Analizler sonucu elde edilen mıknatıs sıcaklığı yüksek ısı dayanımına (maksimum çalışma sıcaklığı 180°C) sahip mıknatıslar kullanıldığından motor performansını etkilemeyecektir.



Şekil 6.17. Geçici durumda motor flanşa bağlı değilken 39,11 Nm ve 85 rpm'de aktif malzemelerde sıcaklığın zamana bağlı değişimi

7. ÖZGÜN SKGM MOTOR PROTOTİP ÜRETİMİ VE DENEYSEL DOĞRULAMASI

Yapılan analizler sonucu ortaya çıkan nihai tasarıma ait protip üretimi gerçekleştirilmiş, ardından motor özel bir gövde içine yerleştirilip test edilmiştir. Bu bölümde prototip üretimi hakkında görseller ve motora ait performans testi sonuçları verilecektir.

7.1. Motor Prototip Üretimi

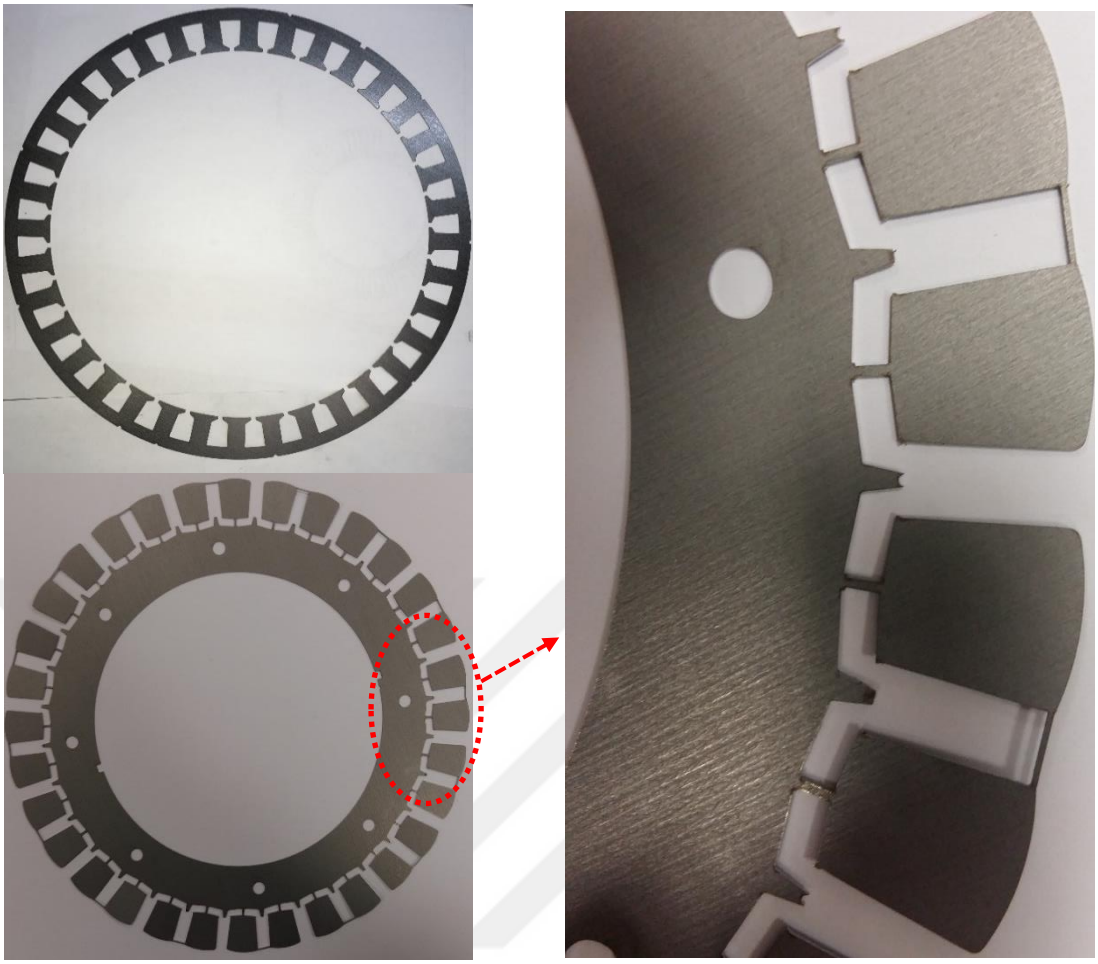
Motor prototip üretiminde klasik AC servomotorlardan farklı olarak rulman kullanılmayarak motorda yataklama işlemi yapılmamıştır. Stator ve rotor birbirinden ayrı bağımsız olarak durmaktadır. Bunun nedeni, doğrudan sürüşlü SMST motorların tahrik edecekleri sisteme doğrudan kama aracılığıyla ya da vidalanarak montelenmesidir. Bu bölümde ilk olarak motorda kullanılan malzemelerden kısaca bahsedilmiş sonrasında üretim aşamaları anlatılmıştır.

7.1.1. Üretimde kullanılan malzemeler

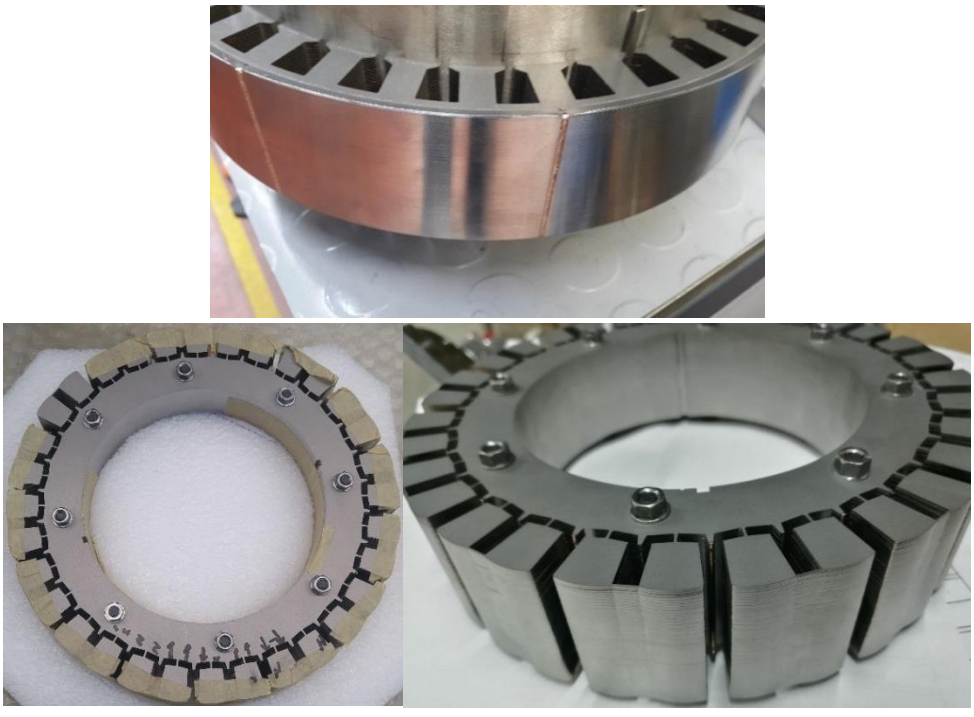
Üretilen SKGM tork motor çok kutuplu sürekli mıknatıslı radyel akılı fırçasız AC bir elektrik motordur. Rotorda çok sayıda (80) adet mıknatıs bulunmaktadır. Mıknatıs malzemesi olarak N40UH sınıfı NdFeB tür mıknatıs kullanılmıştır. Rotor ve stator ise manyetik sac malzeme olan M270-35A kullanılmıştır. Mıknatıslar da rotora Loctite 334 veya benzeri bir yapıştırıcıyla yapıştırılmıştır.

7.1.2. Üretim aşamaları

Motorda ilk olarak motor boyutlarını içeren teknik resimler oluşturulup rotor ve stator sacları lazer ile kesilmiştir. Kesilen sac parçalar Şekil 7.1’de görülebilir. Tüm sacların kesiminden sonra paket boyuna ulaşacak kadar saclar hem rotorda hem de stator da üst üste konulup bir parça aracılığıyla paketlenir ve kaynaklanır. Sacların paketlenmiş hali Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.1. Kesilmiş stator ve rotor sacı

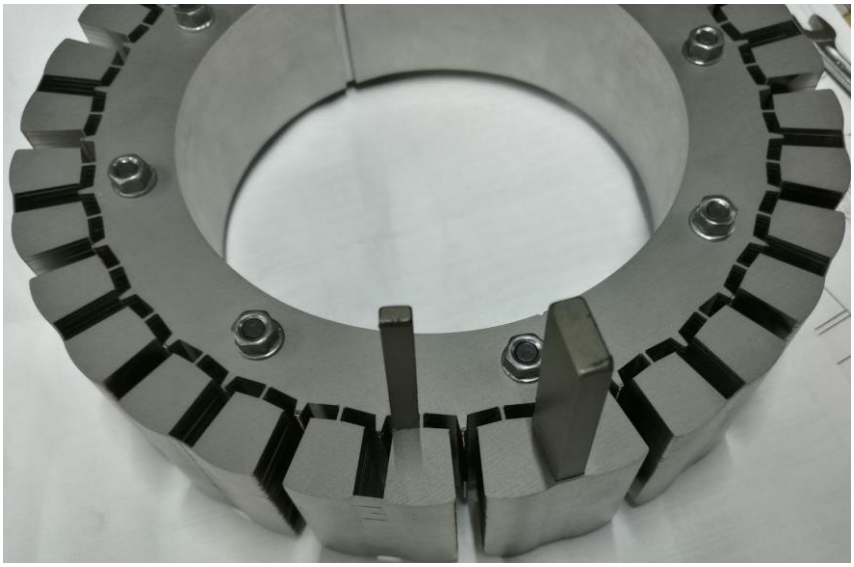


Şekil 7.2. Kesilen stator ve rotor saclarının paketlenmiş durumu

Stator ve rotor nüveleri hazır olduktan sonra, her bir faza ait bobinler dışarıdan oluşturulup teker teker stator oluklarına yerleştirilir. Motora ait faz sargıları ve bu sargıların stator yapısına yerleştirilme şekilleri Şekil 7.4'de görülmektedir. Şekil 7.4'de ise mıknatısların rotora yerleştirilmesiyle elde edilen rotor yapısı verilmiştir. Mıknatıslar, rotora Loctite 334 veya benzeri bir yapıştırıcıyla yapıştırılmıştır.

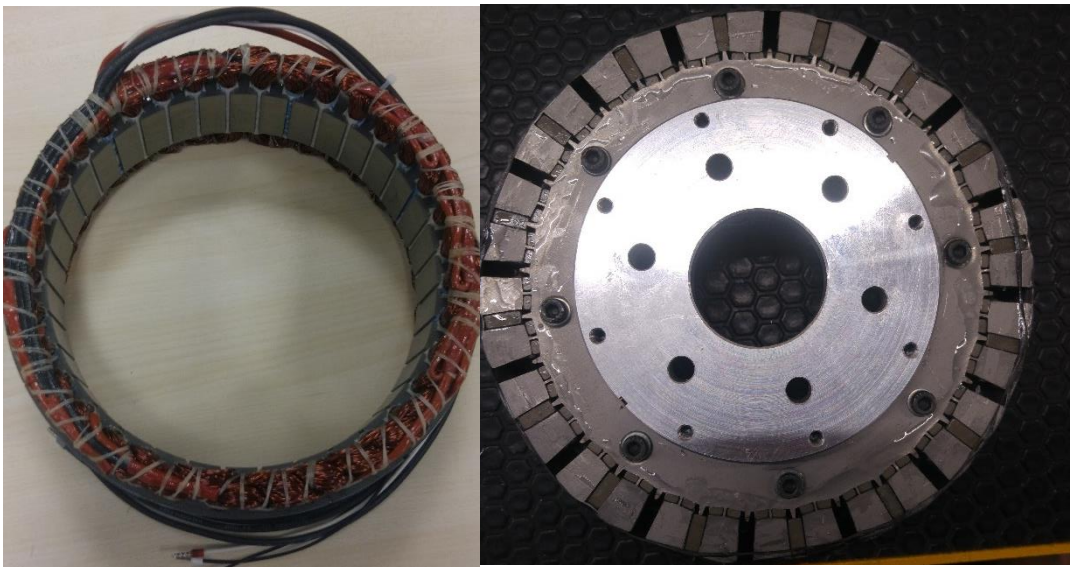


Şekil 7.3. Stator sargıları ve stator nüvesine yerleşim işlemi

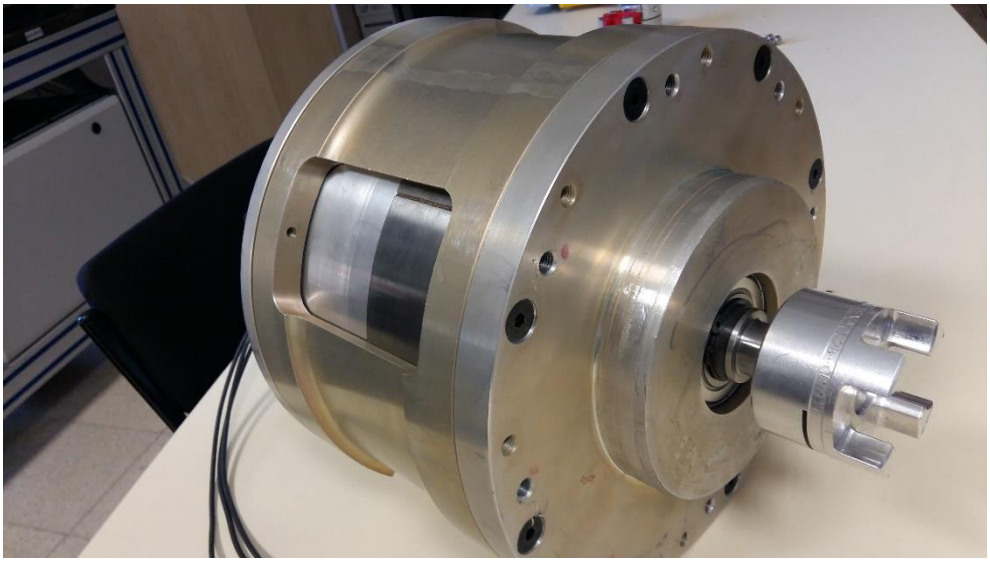


Şekil 7.4. Mıknatısların rotor nüvesine yerleşimi

Son olarak statorda sargılar sonlandırılıp 3 faz dışarda olacak şekilde faz uçları çıkartılır. Rotor nüvesinde ise mıknatısların tamamının yapıştırılmasıyla rotor üretimi tamamlanmış olur. Tamamlanan stator ve rotor yapıları Şekil 7.5'de gösterilmiştir. Bu şekilde motor testlerinin test düzeneğinde test edilmesi zor olacağından motorun içine yerleştirildiği özel bir gövde üretilmiştir. Şekil 7.6'da motorun gövde içine yerleştirilmiş durumu gösterilmiştir.



Şekil 7.5. Prototip üretim sonucu ortaya çıkan stator ve rotor yapısı



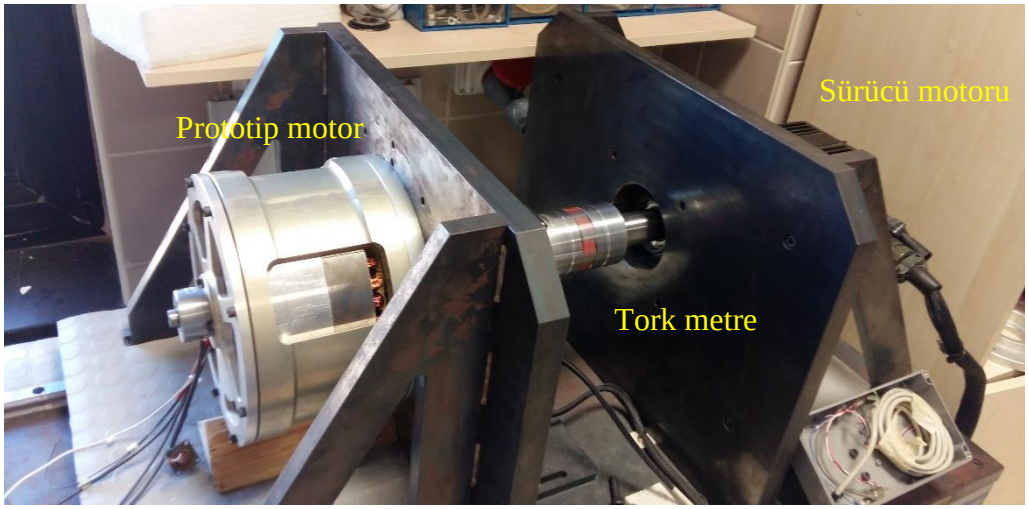
Şekil 7.6. Motorun test düzeneğine yerleştirilmesi kolaylaştıracak gövde içine yerleştirilmiş hali

7.2. Deneysel Doğrulama Testleri

Prototip üretiminin tamamlamasından sonra motor test düzeneğine bağlanarak motora ait performans sonuçları elde edilmiştir. Yapılan doğrulama testlerinde ilk olarak motor test düzeneğine bağlanmadan direnç ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğine bağlandıktan sonra ise öncelikle yüksüz durumda farklı hızlarda zıt-EMK gerilimi ve çok düşük bir hızda vuruntu momenti sonuçları alınmıştır. Ardından motor farklı akımlarda yüklenmiş ve yükleme durumundaki performans değerleri kaydedilmiştir. Bu bölümde gerçekleştirilen doğrulama testleri sonucu elde edilen veriler SEA sonuçları ile karşılaştırılıp sunulmuştur.

7.2.1. Motor test düzeneği

Motor, doğrulama testlerinin gerçekleştirilmesi için Şekil 7.7'de görülen test düzeneğine, içinde bulunduğu gövde yardımıyla yerleştirilmiştir. Yük motoru olarak Delta marka AC servo motor kullanılmıştır. Yük motoru 7,5 kW - 1500 rpm - 47,75 Nm anma değerlerine sahiptir.



Şekil 7.7. Motorun test düzeneğine yerleştirilmiş görüntüsü

7.2.2. Yüksüz durum performans verilerinin deneysel doğrulanması

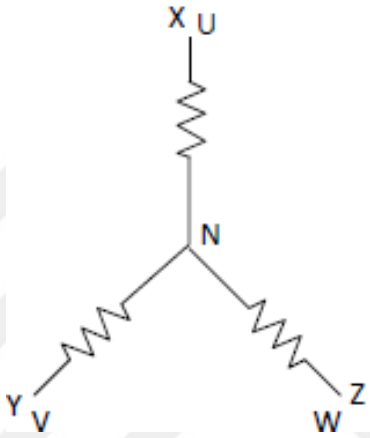
Prototipi tamamlanmış motorun sargı bağlantı şekli yıldız bağlantı şekline sahip olduğu için sadece faz ve hat direnç değerleri ayrı ayrı ölçülebilir. Motorun sargı direncini ölçmek için miliohmmetre metre kullanıldı. Motor 3 fazlı yapıya sahiptir. Yıldız bağlantı şekli Şekil 7.8'de verilmiştir. Motora ait direnç ölçümü değerleri Tablo 7.1'de verilmiştir.

Tablo 7.1. Motor sargı dirençleri ölçümü

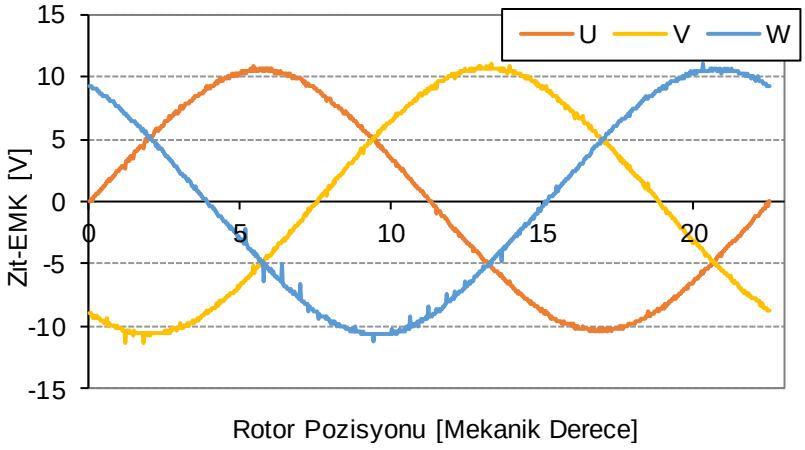
Ölçüm Cihazı Modeli: GW INSTEK GOM-802				
Ölçüm No	**Faz/Hat**	**Bobin-1**	**Bobin-2**	**Direnç (ohm)**
1	Faz	U	Nötr	0,164
2		V	Nötr	0,163
3		W	Nötr	0,164
4	Hat	U	V	0,327
5		U	W	0,329
6		V	W	0,328

Test düzeneğindeki prototip motorun, yine sargıları enerjilendirilmeden (yüksüz durumda) yük motoru sayesinde farklı hızlarda çevrilerek faz ve hat zıt-EMK gerilimi değerleri ölçülmüştür. Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da motorun 100 rpm hızda çalışması durumunda osiloskop yardımıyla elde edilmiş sırasıyla, her üç faza ait faz gerilimleri değişimi ve yine 100 rpm hızda SEA sonucu elde edilen veriler ile karşılaştırılması

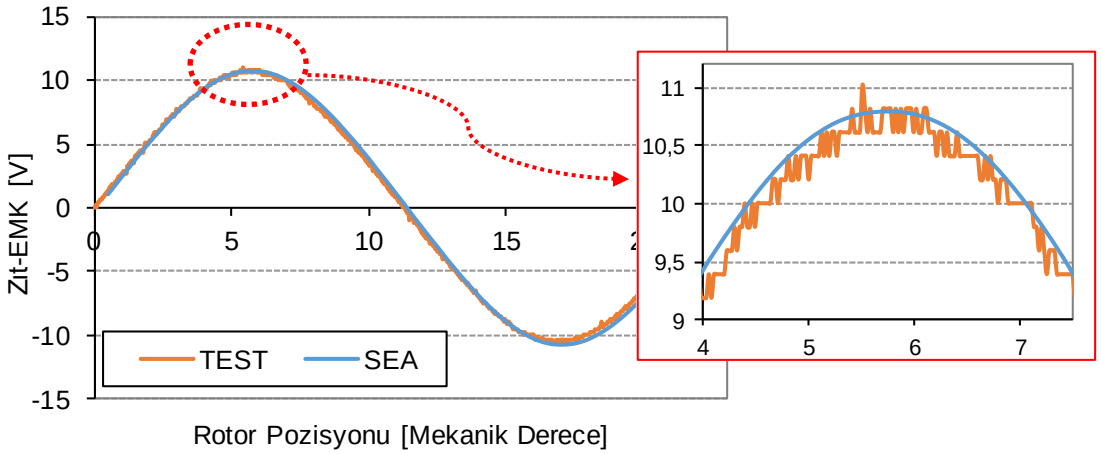
verilmiştir. SEA sonucu 10,8 V elde edilen faz gerilimi tepe değeri gerçekleştirilen doğrulama testleri sonucu 10,7 V olarak elde edilmiştir. Bu durumda yapılan analizlere göre sadece %0,925 oranında hata mevcuttur. Şekil 7.11 ve Şekil 7.12'de ise her üç faza ait hat gerilimi değişimleri ve test sonucu elde edilen hat geriliminin SEA sonucu ile karşılaştırılmış hali verilmiştir. Hat gerilimi maksimum değeri SEA sonucu 100 rpm hızda 18,42 V elde edilmişti. Test sonuçlarında ise bu değer 17,75 V olarak elde edildi. Buradaki hata oran ise %3,63'dür. Yüksüz durum testleri sonucu son olarak farklı hızlarda elde edilen zıt-EMK gerilim büyüklükleri de Tablo 7.2'de görülebilir.



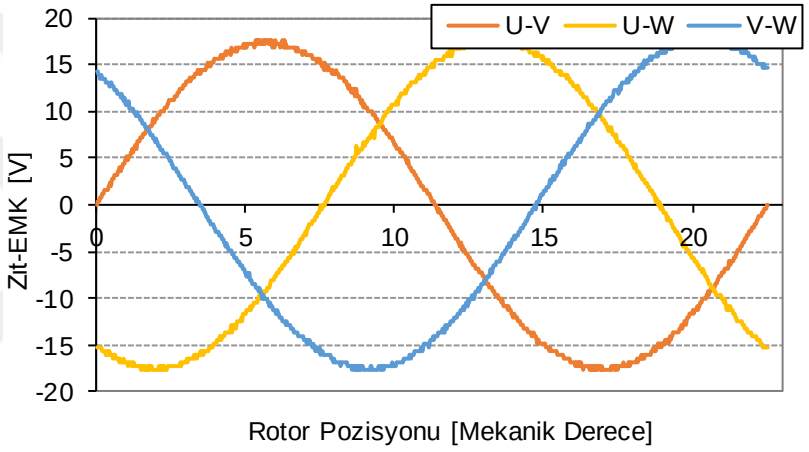
Şekil 7.8. Motor yıldız bağlantı şekli



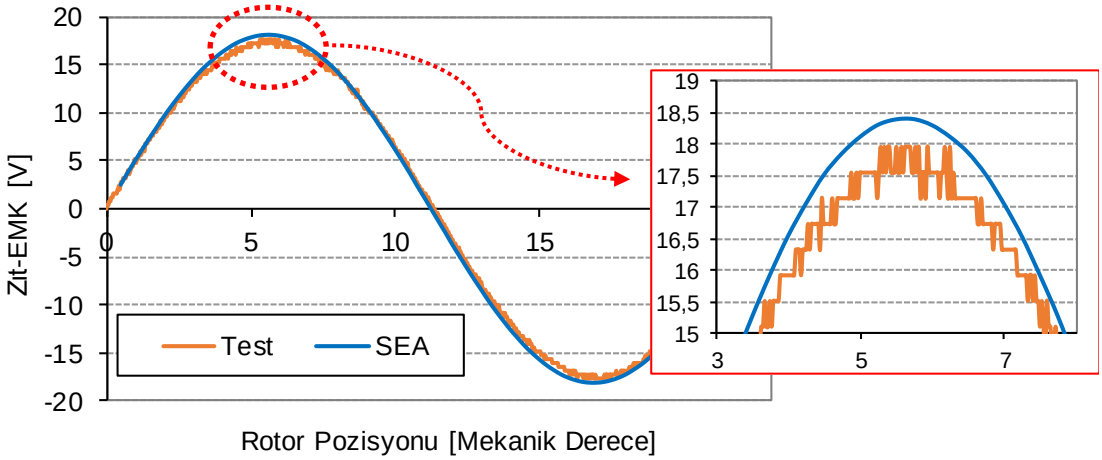
Şekil 7.9. 100 rpm hızda üç faza ait Zıt-EMK faz gerilimlerinin değişimi



Şekil 7.10. 100 rpm hızda Zıt-EMK faz gerilimlerinin karşılaştırılması



Şekil 7.11. 100 rpm hızda üç faza ait Zıt-EMK hat gerilimlerinin değişimi



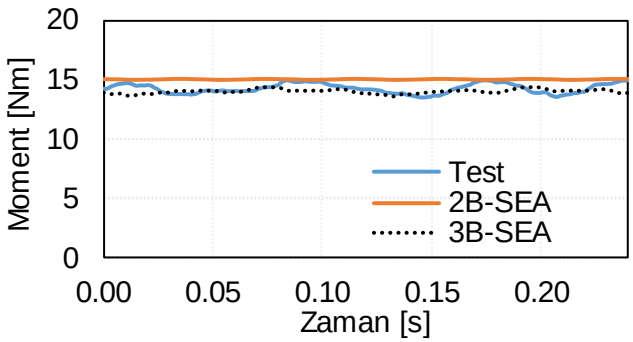
Şekil 7.12. 100 rpm hızda Zıt-EMK hat gerilimlerinin karşılaştırılması

Tablo 7.2. Farklı hızlarda maksimum faz ve hat zıt-EMK gerilimleri

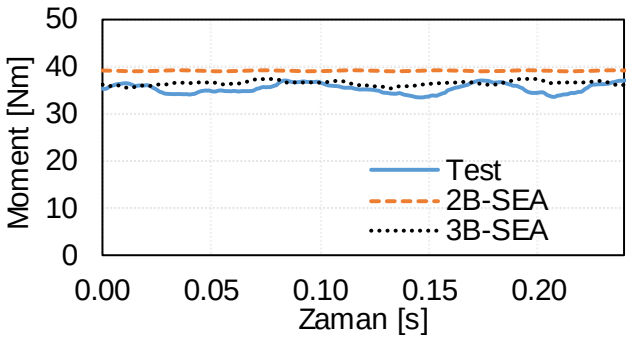
Ölçüm Cihazı Modeli: GW INSTEK GOM-802					
Ölçüm No	**Faz/Hat**	**Hız [rpm]**	**Test Sonuçları [V]**	**SEA Sonuçları [V]**	**%Hata**
1	Faz	25	2,55	2,675	%4,6
2		50	5,25	5,35	%1,87
3		75	7,9	8,025	%1,55
4		100	10,7	10,8	%0.925
5	Hat	25	4,4	4,6	%4.34
6		50	8,8	9,2	%4,33
7		75	13,2	13,81	%4,4
8		100	17,75	18,42	%3,63

7.2.3. Yüklü durum performans verilerinin deneysel doğrulanması

Prototip motor, test düzeneğine bağlanarak tüm sargılar enerjilendirilmiş, 7,07 Arms, ve 18,4 Arms hat akımlarında 50 rpm için yüklenerek çıkış momenti değerleri elde edilmiştir. 7,07 Arms ve 18,4 Arms hat akımlarında tork metreden elde edilen çıkış momenti değişimleri SEA ile karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'de gösterilmiştir. Nominal akım değeri olan 18,4 Arms de ortalama moment testler sonucunda 35,51 Nm olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.13. 7,07 Arms faz akımında moment çıkışı ve SEA ile karşılaştırılması

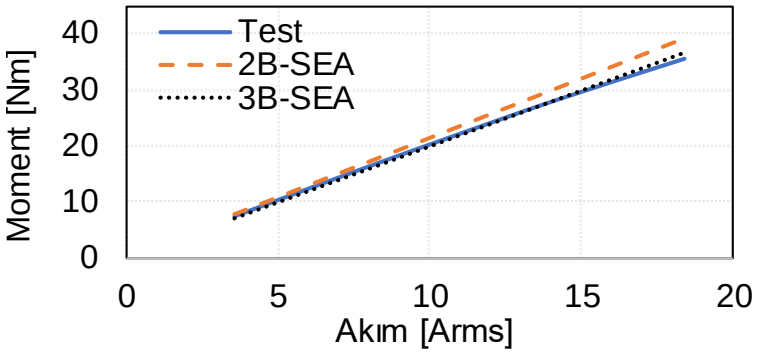


Şekil 7.14. 18,4 Arms faz akımında moment çıkışı ve SEA ile karşılaştırılması

Motor moment sabitinin elde edilmesi için, sabit bir hız değerinde farklı akım değerlerinde çıkış momenti incelenmiştir. Tablo 7.3'de 50 rpm dönme hızında motorun fazlarına farklı akımlar uygulanması sonucunda elde edilen ortalama moment değerleri verilmiştir. Elde edilen değerlerden yola çıkarak moment-akım değişimi grafikleri oluşturulmuş ve SEA ile karşılaştırmalı olarak Şekil 7.15'da verilmiştir.

Tablo 7.3. Test sonucunda 50 rpm hızda farklı faz akımlarında motor momentleri

Hat Akımı [Arms]	**Ortalama Moment [Nm]**	**Kt [Nm/Arms]**
3,53	7,35	2,08
7,07	14,48	2,05
10,6	21,4	2,02
14,14	28,1	1,99
18,4	35,55	1,94



Şekil 7.15. 50 rpm hızda moment-akım ilişkisi

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ilk olarak sürekli mıknatıslı motorların temelleri özetlenmiş, diğer motor türleri ile farklılıkları açıklanmış, SM motorların çeşitleri, kullanılan malzemeler ve tork motorlar hakkında bilgiler verilmiştir. Sonrasında yeni bir gömülü mıknatıslı senkron tork motor önerilmiş, tasarımına geçilmiş ve sonlu elemanlar analizi kullanılarak motor tasarımı tamamlanmıştır. Tasarımı tamamlanan motorun prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilen testler sonucunda motor doğrulanmıştır. Son olarak gömülü mıknatıslı motor dış çapı, sarım sayısı ve akım değeri aynı olan başka bir geleneksel yüzeyden mıknatıslı motor ile karşılaştırılmış ve avantajları sunulmuştur. Özetle yeni bir rotor yapısına sahip gömülü mıknatıslı tork motor tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiş ve aynı zamanda bu yeni yapının geleneksel yüzeyden mıknatıslı tork motoruna göre daha yüksek hızlarda çalışma kabiliyeti ve düşük kayıp değerlerine sahip olduğu vurgulanmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Yücel D., 1,5 kW'lık Dengesiz Sargı Yapılı Sürekli Mıknatıslı Bir AC Servomotor Tasarımı, Üretimi ve Gerçeklenmesi, Yüksek Lisans, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 342537

[2] Shi J., Chai F., Li X., Cheng S., Study of the Number of Slots/Pole Combinations of Low Speed High Torque Permanent Magnet Synchronous Motors, *International Conference in Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Beijing, China, 20-23 August 2011.

[3] Kano Y., Matsui N., A Design Approach for Direct-Drive Permanent-Magnet Motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2008, **44**(2), 543-554.

[4] Kano Y., Matsui N., A Design Approach for Direct-Drive Permanent Magnet Motors, *Fortieth IAS Annual Meeting in Industry Applications Conference*, Hong Kong, 2-6 October 2005.

[5] Xia J., Dong T., Wang C., Zhao L., Low Speed High Torque PMSM Design Based on Unequal Teeth Structure, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, China, 17-20 October 2008.

[6] Mouty S., Mirzaian A, Gustin F., Berthon A., Depernet D., Espanet C., High Torque Density Low Speed Permanent Magnet Machine, *IEEE International on Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Niagara Falls, Canada, 15-18 May 2011.

[7] Atallah K., Calverley S., Clark R., Rens J., Howe D., A New PM Machine Topology for Low-Speed, High-Torque Drives, *18th International Conference on Electrical Machines (ICEM 2008)*, Poitiers, France, 6-9 September 2008.

[8] Kaddouri A., Le-Huy H., Analysis and Design of a Slotless Ndfeb Permanent-Magnet Synchronous Motor for Direct Drive, *IEEE in Industry Applications*, 1992, 1, 271-278.

[9] Kai Y., Yaojing F., Design of Novel Spiral Magnetic Poles and Axial-Cooling Structure of Outer-Rotor PM Torque Motor, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2010, **20**(3), 838-841.

[10] Sen W., Bingyi Z., Guihong F., Research of Low-Speed and Direct-Drive PMSM for New Oil Drilling Mud Pump, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Beijing, China, 20-23 August 2011.

[11] Mese E., Yasa T., Ertugrul B. T., Sincar E., Design of A High-Performance Servo Motor for Low Speed High Torque Application, *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Eger, Hungary, 2-5 September 2014.

[12] Semken R. S., Polikarpova M., Röyttä P., Alexandrova J., Pyrhönen J., Nerg J., Mikkola A., Backman J., Direct-Drive Permanent Magnet Generators for High-Power Wind Turbines: Benefits and Limiting Factors, *IET in Renewable Power Generation*, 2012, **6**(1), 1-8.

[13] Reis K., Binder A., Development of A Permanent Magnet Outer Rotor Direct Drive for Use in Wheel-Hub Drives, *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Eger, Hungary, 2-5 September 2014.

[14] Niu S., Ho S. L., Fu W. N., A Novel Direct-Drive Dual-Structure Permanent Magnet Machine, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, **46**(6), 2036-2039.

[15] Castellini L., Carmignano M., D'Andrea M., Villani M., Brushless PM Actuator for Metal Bending Machine, *39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (IECON 2013), Vienna, Austria, 10-13 November 2013.

[16] Cote O., Chebak A., Methot J.F., Design and Optimization of a High Torque In-Wheel Surface-Mounted PM Synchronous Motor Using Concentrated Winding, *2013 IEEE International in Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Illinois, United States, 12-15 May 2013

[17] Liu G., Jiang Y., Ji J., Chen Q., Yang J., Design and Analysis of a New Fault-Tolerant Magnetic-Geared Permanent-Magnet Motor, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2014, **24**(3), 1-5.

[18] Jussila H., Salminen P., Parviainen A., Nerg J., Pyrhonen J., Concentrated Winding Axial Flux Permanent Magnet Motor with Plastic Bonded Magnets and Sintered Segmented Magnets, *18th International Conference on Electrical Machines (ICEM 2008)*, Poitiers, France, 6-9 September 2008.

[19] Yetis H., Boztepeli H., Yasa Y., Mese E., Comparative Design of Direct Drive PM Synchronous Motors in Gearless Elevator Systems, *3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*, Istanbul, Turkey, 2-4 October 2013.

[20] Jiani L., Chau K.T., Jiang J.Z., An Integrated Magnetic-Geared Permanent-Magnet In-Wheel Motor Drive for Electric Vehicles, *IEEE in Vehicle Power and Propulsion Conference*, Harbin, China, 3-5 September 2008.

[21] Wrobel R., Mellor P.H., Design Considerations of a Direct Drive Brushless Machine with Concentrated Windings, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, **23**(1), 1-8.

[22] Onsal M., Demir Y., Aydin M., A New Nine-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor with Consequent Pole Rotor for High-Power Traction Applications, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, **53**(11), 1-6.

[23] Chung S.U., Kim J.W., Chun Y.D., Woo B.C., Hong D.K., Fractional Slot Concentrated Winding PMSM with Consequent Pole Rotor for a Low-Speed Direct Drive: Reduction of Rare Earth Permanent Magnet, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2015, **30**(1), 103-109.

[24] Chung S.U., Kim J.M., Koo D.H., Woo B.C., Hong D.K., Lee J.Y., Fractional Slot Concentrated Winding Permanent Magnet Synchronous Machine with Consequent Pole Rotor for Low Speed Direct Drive, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, **48**(11), 2965-2968.

[25] Jin C.S., Jun D.S., Kim K.C., Chun Y.D., Lee H.W., Lee J., A Study on Improvement Magnetic Torque Characteristics of IPMSM for Direct Drive Washing Machine, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, **45**(6), 2811-2814.

[26] Jonel D. M., Jackson D.C., Starr G., Turner A.P., Permanent Magnet Brushless Motors for Industrial Variable Speed Drives, *International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, Bath, UK, 4-7 June 2002.

[27] Nerg J., Rilla M., Ruuskanen V., Pyrhonen J., Ruotsalainen S., Direct-Driven Interior Magnet Permanent-Magnet Synchronous Motors for a Full Electric Sports Car, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, **61**(8), 4286-4294.

[28] Ge X., Zhu Z. Q., Li J., Chen J., Analysis of Spoke-Type IPM Machine by Step-Staggered Rotor with Alternate Airspace-Barriers, *IEEE Magnetics Conference (INTERMAG)*, Beijing, China, 11-15 May 2015.

[29] Brewster J.T., Brown G.W., Highly Efficient Permanent Magnet Brushless Motor, 2006, U.S. Patent No. 7,105,973., *U.S. Patent and Trademark Office*.

[30] Brown G., Bishop R., Design of the Magnet and Webs in Interior Permanent Magnets Rotors, 2009, U.S. Patent No. 7,498,708., *U.S. Patent and Trademark Office*.

[31] Schultz R.D., England T.R., Altizer A.C., Servo Motor with High Energy Product Magnets, 1990, U.S. Patent No. 4,954,739., *U.S. Patent and Trademark Office*.

[32] Reiss L.G., Schultz R.D., Permanent Magnet Motor Stator for D.C Motors, 1985, U.S. Patent No. 4,508,988., *U.S. Patent and Trademark Office.*

[33] Vogt S., Corsi N., Dachaud F., Frameless Torque Motor with a Transport Securing Device, 2008, U.S. Patent No. 7,394,177., *U.S. Patent and Trademark Office.*

[34] Wavre N., Permanent Magnet Synchronous Motor, 1997, U.S. Patent No. 5,642,013., *U.S. Patent and Trademark Office.*

[35] Morel J.P., Synchronous Motor, 2010, U.S. Patent No. 7,701,100., *U.S. Patent and Trademark Office.*

[36] Barani M.K., Flanary R., Snider L., Direct Drive Inside-Out Brushless Roller Motor, 2004, U.S. Patent No. 6,710,505., *U.S. Patent and Trademark Office.*

[37] Zhao Z. P. Z., Permanent Magnet Motor Having Teeth with Fingers, 2015, U.S. Patent No. 9,006,941., *U.S. Patent and Trademark Office.*

[38] URL-1: http://www.kollmorgen.com/en-us/products/motors/direct-drive/tbm-series, (Ziyaret Tarihi: 5 Aralık 2017).

[39] URL-2: https://www.etel.ch/torque-motors/tmb/, (Ziyaret Tarihi: 5 Aralık 2017).

[40] URL-3: http://fischer-elektromotoren.eu/torque-motors-inner-rotor, (Ziyaret Tarihi: 8 Aralık 2017).

[41] URL-4: https://www.alliedmotion.com/brushless-motors/brushless-direct-drive-torque-motors/ht-frameless-direct-drive-torque-motors/, (Ziyaret Tarihi: 5 Aralık 2017).

[42] Yan-ping L., Jin-peng L., Jing C., Calculation of Iron Loss and Stray Losses for High-Voltage Induction Motor Using Time-Stepping Finite Element Method, *International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, Wuhan, 26-28 June 2010.

[43] Krings A., Nategh S., Stening A., Grop H., Wallmark O., Soulard J., Measurement and Modeling of Iron Losses in Electrical Machines, *5th International Conference Magnetism and Metallurgy*, Cardiff, UK, 24-27 June 2012.

[44] Krings A., Soulard J., Overview and Comparison of Iron Loss Models for Electrical Machines, *International Conference on Ecologic Vehicles and Renewable Energies*, Monaco, 25-28 March 2010.

[45] Sullivan C. R., Computationally Efficient Winding Loss Calculation with Multiple Windings, Arbitrary Waveforms, And Two-Dimensional or Three-Dimensional Field Geometry, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2001, **16**(1), 142-150.

[46] Cürgül İ., Makina Elemanları ve Çözümlü Problemleri 2. Cilt, 2. Baskı, Birsen Yayınevi, Kocaeli, 2015.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Onsal M**., Demir Y., Aydin M., A New Nine-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor with Consequent Pole Rotor for High-Power Traction Applications, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, **53**(11), 1-6.

[2] **Onsal M**., Cumhur B., Demir Y., Yolacan E., Aydin M., Rotor Design Optimization of A New Flux Assisted Consequent Pole Spoke Type Permanent Magnet Torque Motor for Low Speed Applications, *IEEE Transactions on Magnetics*, DOI: 10.1109/TMAG.2018.2832076.

[3] **Onsal M**., Demir Y., Aydin M., Guven M. K., Impact of Airgap on the Performance of 3-Phase Permanent Magnet Hybrid Stepper Motors, *10th Annual IEEE Energy Conversion Congress & Exposition*, Portland, Oregon, USA, 23-28 September 2010.

[4] Ocak O., **Onsal M**., Aydin M., Development of A 7.5kW High Speed Interior Permanent Magnet Synchronous Spindle Motor for CNC Milling Machine, *International Conference on Electrical Machines*, Alexandroupoli, Greece, 3-6 September 2018.

ÖZGEÇMİŞ

1992 Bingöl doğumlu. İlköğretimi Pendik Milli Eğitim Vakfı İlköğretim Okulu'nda, Lise öğrenimini Gebze Anibal Anadolu Lisesi'nde tamamladıktan sonra 2010 yılında Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği bölümünde üniversite eğitimine başladı. Üniversite eğitimi devam ederken 2012 yılında çift anadal programı ile aynı üniversitenin Elektrik Mühendisliği bölümüne kaydoldu. 2015 yılında da Mekatronik ve Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl yüksek lisans eğitimine Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatonik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladı. Aynı zamanda 2015 yılından beri MDS Motor Ltd. bünyesinde ARGE Mühendisi olarak çalışmaktadır.