

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLARDA MOMENT
KALİTESİNİ ARTIRMAYA YÖNELİK MELEZ MIKNATIS
YERLEŞİMLİ YENİ BİR ROTOR YAPISI TASARIMI VE
DENEYSEL DOĞRULAMASI**

OĞUZHAN OCAK

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLARDA
MOMENT KALİTESİNİ ARTIRMAYA YÖNELİK MELEZ
MIKNATIS YERLEŞİMLİ YENİ BİR ROTOR YAPISI
TASARIMI VE DENEYSEL DOĞRULAMASI

OĞUZHAN OCAK

Doç. Dr. Metin AYDIN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Zafer BİNGÜL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Hasan KARABAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Timur AYDEMİR
Jüri Üyesi, Kadir Has Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Derya Ahmet KOCABAŞ
Jüri Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 23.06.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca desteklerini her zaman yakından hissettiğim, hem akademik hem de mesleki açıdan gelişmemi sağlayarak zihnimde yeni ufuklar açan, danışmanım ve hocam Sn. Doç. Dr. Metin AYDIN' a teşekkür ederim. Ayrıca, kıymetli bilgi ve fikirlerini paylaşarak çalışmalarına destek veren tez izleme komitesinin değerli üyeleri Sn. Prof. Dr. Zafer BİNGÜL ve Sn. Prof. Dr. Hasan KARABAY' a teşekkürlerimi sunarım. Algoritmaların oluşturulması ve Matlab süreçlerinde desteğini esirgemeyen kıymetli hocam Sn. Prof. Dr. Hasan OCAK' a ve tez süresince yardımını esirgemeyen dostum Dr. Ersin YOLAÇAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamında prototip üretim süreçlerinde 2017/076 nolu proje ile destek sağladığı için Kocaeli Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi ve Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne, üniversite-sanayi işbirliği kapsamında kabul edilen 1006.STZ.2015 no' lu Santez Projesi ile tezin yapılmasına büyük katkı sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)' a ve projenin sanayi ayağını oluşturarak çalışmaya destek olan Akım Metal San. ve Tic. AŞ' ye teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, eğitim-öğretim hayatımın ilk aşamasından bugüne kadar her anlamda benden desteklerini hiç esirgemeyen, her zaman yanımda olan ve bu zorlu süreçte benden sabırlarını eksik etmeyen sevgili annem Sevgiye, babam Mubin, biricik kardeşim Elif, değerli eşim Duygu, can oğlum Kaan Tolga ile can kızım Defne Naz ve adını yazamadığım bütün yakınlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Büyükbabam 'a...

Haziran – 2021

Oğuzhan OCAK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
ÖZET.....	xv
ABSTRACT	xvii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	4
1.1. Çalışmanın Amacı	6
1.2. Çalışmanın Yöntemi.....	8
1.3. Önceki Çalışmalar	8
1.4. Çalışmanın Literatüre Katkısı	22
1.5. Özet	24
2. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR	25
2.1. Sürekli Mıknatıslı Motorlar.....	25
2.2. Yüzeyden Mıknatıslı Motorlar	27
2.3. Dahili Mıknatıslı Motorlar	27
2.4. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Denklemleri.....	31
2.5. Sürekli Mıknatıslı Motor Tasarım Süreçleri	33
2.6. Sürekli Mıknatıslı Motorlarda Kullanılan Malzemeler	35
3. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLARIN MANYETİK MODELLEMESİ	41
3.1. Manyetik Modelleme Temelleri.....	41
3.2. YMM Relüktans Tabanlı Manyetik Eşdeğer Devre Modellemesi.....	43
3.3. Manyetik Modelden Zıt EMK ve Moment Çıkışı Elde Edilmesi	55
3.4. Termal Eşdeğer Devrenin Oluşturulması	59
3.5. Özet	63
4. TAKIM TEZGAHI MOTORU TASARIMI.....	65
4.1. Takım Tezgahı Motoru Tasarım Kriterleri.....	65
4.2. Yüzeyden Mıknatıslı Referans Motor İncelemesi.....	67
4.3. Takım Tezgahı Motoru Kutup Sayısı Optimizasyonu	70
4.4. Dahili Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı	72
4.4.1. Dahili mıknatıslı motor ihtiyacı ve farklı dahili mıknatıslı yapıların incelenmesi	72
4.4.2. Çubuk tip yapı detaylı manyetik analizleri	74
4.4.3. V Tip yapı detaylı manyetik analizleri.....	85
4.4.4. Referans YM motor ile çubuk tip ve V Tip DM motorların SEA karşılaştırmaları	95
4.5. V Tip DM Motor Mekanik Tasarım ve Termal Analizi.....	102
4.5.1. V Tip DM yapı mekanik sonlu elemanlar analizleri.....	103
4.5.2. V Tip DM yapı termal analizleri	108
4.6. V Tip DM Motor Prototip Üretimi ve Test sisteminin Kurulması.....	113

4.6.1. V Tip DMSM prototip üretiminin yapılması	113
4.6.2. Motor test sisteminin kurulması.....	115
4.7. V Tip DMSM Prototip Testleri ve Doğrulama Çalışmaları.....	116
4.8. Özet	121
5. YENİ BİR SÜREKLİ MIKNATISLI HİBRİT SENKRON MOTOR TOPOLOJİSİ ÖNERİLMESİ.....	122
5.1. SMHSM' un Önerilmesi	122
5.2. SMHSM Analizleri	124
5.3. SMHSM Prototip Üretimi ve Deneysel Doğrulaması.....	128
5.4. Özet	132
6. YARI SEA TABANLI OPTİMİZASYON ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ.....	133
6.1. Segmentli SMSM Denklemleri	133
6.2. SMSM' larda Yüksek Moment Kalitesi İçin Önerilen Yeni Tasarımlar	136
6.3. Yarı SEA Tabanlı Optimizasyon Algoritması	137
6.4. Yarı SEA Tabanlı Algoritma ile Vuruntu Momenti ve Çıkış Momenti Minimizasyonu.....	139
6.5. DMBDKA Yapısı Prototip Üretimi ve Deneysel Doğrulaması.....	143
6.6. Özet	146
7. TAKIM TEZGAHI MOTORUNA HİBRİT YAPININ UYGULANMASI.....	148
7.1. YM Takım Tezgahı Motoru Relüktans Modellemesi	148
7.2. DM Takım Tezgahı Motoru Relüktans Modellemesi	155
7.3. SMHSM Yapının Yarı SEA Tabanlı Algoritma ile Optimizasyonu.....	162
7.4. SMHSM' un Relüktans Tabanlı Modellemesi	164
7.5. SMHSM 3B SEA Modellemesi	167
7.6. SMHSM Mekanik Modelleme ve Prototip Üretimi.....	169
7.7. SMHSM Deneysel Doğrulaması	171
7.8. Sonuçlar.....	175
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	176
KAYNAKLAR	179
EKLER.....	185
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	192
ÖZGEÇMİŞ	194

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. SMSM örnekleri (a) yüzeyden mıknatıslı ve (b) dahili mıknatıslı motor temel yapıları	5
Şekil 1.2. Elektrik motorlarının besleme yöntemine göre sınıflandırılması	6
Şekil 1.3. Tek fazlı, hibrit anahtarlamalı relüktans motoru ve bileşenleri	13
Şekil 1.4. Tek fazlı, hibrit anahtarlamalı relüktans motoru ve bileşenleri	14
Şekil 1.5. İki farklı tip mıknatısa sahip hibrit rotor yapısı topolojileri	15
Şekil 1.6. Aynı rotor laminasyonu üzerinde dahili mıknatıslı ve yüzeye gömülü kutupların yer aldığı hibrit yapı örneği	15
Şekil 1.7. İki farklı mıknatıs türünün aynı kutupta yer aldığı mıknatıs destekli anahtarlamalı relüktans motoru örneği.....	16
Şekil 1.8. Yüksek hızlı hibrit iş mili motoru prototipi	17
Şekil 1.9. Demir kutup ve kutbun kontrol edildiği DA sargıya sahip hibrit eksenel akılı motorun prototip görüntüsü ve bileşenleri	17
Şekil 1.10. Farklı çalışma modlarına sahip hibrit anahtarlamalı relüktans motor prototip görüntüsü ve test sistemi	18
Şekil 1.11. Aynı rotor laminasyonu üzerinde iki farklı tür kutbun bulunduğu yapıya ait prototip motor ve test sistemi görüntüsü	19
Şekil 1.12. Aynı rotor üzerinde iki farklı mıknatıs türünün yer aldığı farklı tasarım alternatifleri	20
Şekil 1.13. Rulmansız sürekli mıknatıslı hibrit motor tasarımı	20
Şekil 1.14. Hibrit eksenel akılı motor tasarımı ve prototipi	21
Şekil 1.15. Hibrit rotor yapısına sahip motor tasarım, prototip ve test sistemi görüntüleri	22
Şekil 2.1. Farklı sürekli mıknatıslı motor yapıları	26
Şekil 2.2. Yüzeyden mıknatıslı AC motor yapısı	27
Şekil 2.3. Dahili mıknatıslı motor ve rotor yapısı	28
Şekil 2.4. Dahili mıknatıslı motor yapıları	29
Şekil 2.5. Dahili mıknatıslı motor ve rotor yapısı	30
Şekil 2.6. Sürekli mıknatıslı senkron motorun d-q eksen eşdeğer devresi	31
Şekil 2.7. SM motor tasarım süreçleri.....	34
Şekil 2.8. DM motor tasarımında mekanik analizin gerekliliği	34
Şekil 2.9. Motor sac malzemesi örnekleri	36
Şekil 2.10. SMC kullanılarak üretilen motor yapısı	38
Şekil 3.1. Tek uyarımlı manyetik yapı örneği ve relüktans tabanlı manyetik eşdeğer devresi	42
Şekil 3.2. Yüzeyden mıknatıslı 30 oluk 10 kutuplu yapıya ait 2B görüntü	43
Şekil 3.3. Yüzeyden mıknatıslı 3 oluk 1 kutuptan (2 adet yarım kutup) oluşan simetrik yapıya ait (a) 2B arakesit ve (b) basitleştirilmiş görüntüsü	45
Şekil 3.4. 3 oluk 1 kutuptan oluşan, temel manyetik eşdeğer devre tabanlı modelleme	46
Şekil 3.5. Temel manyetik eşdeğer devre tabanlı modellemeden elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı	46

Şekil 3.6. Yüzeiden mıknatıslı 30 oluk 10 kutuplu yapıya ait 1 kutup, 3 oluk manyetik eşdeğer devre modellemesi	47
Şekil 3.7. Detaylı manyetik modellemeden elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişimi grafiği (doğrusal elemanlar)	53
Şekil 3.8. Detaylı manyetik modellemeden elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişimi grafiği (doğrusal olmayan elemanlar)	54
Şekil 3.9. Örnek yapı 2B SEA ile elde farklı relüktans tabanlı manyetik modelleme sonuçlarının karşılaştırması	54
Şekil 3.10. Hava aralığı akı yoğunluğu değişimi için eğri uydurma işlemi	55
Şekil 3.11. Manyetik eşdeğer devreden elde edilen motor 3 faz Zıt EMK gerilimi değişimleri	57
Şekil 3.12. Motor terminallerine uygulanan 3 faz dengeli akım dalga değişimleri (22Amax)	57
Şekil 3.13. Manyetik eşdeğer devreden elde edilen, segmentsiz rotora sahip, motor çıkış momenti değişimi	58
Şekil 3.14. Manyetik eşdeğer devreden elde edilen, 4 segmentli rotora sahip, motor çıkış momenti değişimi	58
Şekil 3.15. SMSM' a ait 1 boyutlu zamandan bağımsız termal eşdeğer devre örneği	59
Şekil 3.16. SMSM' un termal direnç hesabında kullanılan ana boyutlar	60
Şekil 3.17. SMSM termal eşdeğer devreden elde edilen mıknatıs sıcaklığı	62
Şekil 3.18. SMSM MotorCad modeli ve analiz sonucu	63
Şekil 4.1. Torna takım tezgahı örneği	66
Şekil 4.2. Torna takım tezgahı kullanılarak seri üretimde işlenen parça örnekleri	66
Şekil 4.3. Referans YMSM' a ait (a) SEA modeli, (b) ağ yapısı, (c) kaykık açısının gösterilmesi ve d) 3B katı modeli	68
Şekil 4.4. Referans YMSM' a ait (a) yüksüz durum akı yoğunluğu seviyeleri ve (b) akı çizgileri yönleri (2B SEA)	69
Şekil 4.5. Referans YMSM' a ait (a) vurutu momenti değişimi, (b) 1.000rpm rotor hızı için zıt EMK faz ve hat dalga değişimleri ve (c) zıt EMK FFT analizi (2B SEA)	69
Şekil 4.6. Referans YMSM' a ait (a) çıkış momenti değişimi ve (b) moment hız eğrisi (@19Amax) (2B SEA)	70
Şekil 4.7. Takım tezgahı motoru kutup sayısı optimizasyonu, kutup sayısının (a) moment/ağırlık oranına göre değişimi, (b) verimin değişimi (c) malzeme maliyetinin değişimi, (d) ısı dağılım oranının değişimi ve (e) mıknatıs ağırlığının değişimi	71
Şekil 4.8. Referans YMSM' a ait (a) moment-hız ve (b) güç-hız eğrileri	72
Şekil 4.9. Alternatif DMSM yapıları a) klasik DM v1, b) klasik DM v2, c) tek katmanlı DM, d) çubuk tip DM, e) v tipi DM ve f) v tipi DM v2	73
Şekil 4.10. Çubuk tip DM yapı (a) 2B SEA modeli ve (b) optimizasyonu yapılan parametreler	74
Şekil 4.11. Farklı mıknatıs kalınlıkları için çubuk tip DM segmentsiz yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (2B SEA)	75
Şekil 4.12. Farklı mıknatıs kalınlıkları ve girintileri için çubuk tip DM 3 segmentli yapı analizleri (a) ortalama çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (2B SEA)	76

Şekil 4.13. Farklı kayk1 aç1ları için çubuk tip DM 3 segmentli yapı analizleri (a) ıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (mıknatıs genişliği=10mm) (2B SEA)	76
Şekil 4.14. Farklı mıknatıs girintileri için çubuk tip DM 3 segmentli yapı analizleri (a) ıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (kayk1 açısı=24,5 derece ve mıknatıs genişliği=10mm) (2B SEA).....	77
Şekil 4.15. ubuk tip DM 3 segmentli yapının sabit akım için (@19Amax) ıkış momenti, relüktans momenti ve mıknatıs kaynaklı momentin değişimi (2B SEA)	77
Şekil 4.16. ubuk tip DM 3 segmentli yapının vurutu momenti değişimi (2B SEA).....	77
Şekil 4.17. ubuk tip DM 3 segmentli yapı 1.000rpm rotor hızındaki (a) zıt EMK dalga değişimi ve (b) FFT analizi (2B SEA).....	78
Şekil 4.18. Farklı mıknatıs kalınlıkları ve girintileri için çubuk tip DM 4 segmentli yapı analizleri (a) ortalama çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (2B SEA).....	78
Şekil 4.19. Farklı kayk1 aç1ları için çubuk tip DM 4 segmentli yapı analizleri (a) ıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (mıknatıs genişliği=10mm) (2B SEA)	79
Şekil 4.20. Farklı mıknatıs girintileri için çubuk tip DM 4 segmentli yapı analizleri (a) ıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (kayk1 açısı=21,5 ve mıknatıs genişliği=10mm) (2B SEA)	79
Şekil 4.21. ubuk tip DM 4 segmentli yapının sabit akım için (@19Amax) ıkış momenti, relüktans momenti ve mıknatıs kaynaklı momentin değişimi (2B SEA)	80
Şekil 4.22. ubuk tip DM 4 segmentli yapının vurutu momenti değişimi (2B SEA).....	80
Şekil 4.23. ubuk tip DM 4 segmentli yapının 1.000rpm rotor hızındaki (a) zıt EMK dalga değişimi ve (b) FFT analizi (2B SEA).....	80
Şekil 4.24. Farklı mıknatıs kalınlıkları ve girintileri için çubuk tip DM 6 segmentli yapı analizleri (a) ortalama çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (2B SEA).....	81
Şekil 4.25. Farklı kayk1 aç1ları için çubuk tip DM 6 segmentli yapı analizleri (a) ıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (mıknatıs genişliği=10mm) (2B SEA)	81
Şekil 4.26. Farklı mıknatıs girintileri için çubuk tip DM 6 segmentli yapı analizleri (a) ıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (kayk1 açısı=23 ve mıknatıs genişliği=10mm) (2B SEA)	82
Şekil 4.27. ubuk tip DM 6 segmentli yapının sabit akım için (@19Amax) ıkış momenti, relüktans momenti ve mıknatıs kaynaklı momentin değişimi (2B SEA)	82
Şekil 4.28. ubuk tip DM 6 segmentli yapının vurutu momenti değişimi (2B SEA).....	83
Şekil 4.29. ubuk tip DM 6 segmentli yapı 1.000rpm rotor hızı için (a) zıt EMK dalga değişimi ve (b) FFT analizi (2B SEA)	83
Şekil 4.30. Farklı segmentlerdeki çubuk tip yapıların vurutu momentlerinin karşılaştırılması (2B SEA)	84
Şekil 4.31. Farklı segmentlerdeki çubuk tip yapıların zıt EMK (a) faz ve (b) hat dalga değişimlerinin karşılaştırılması (@1.000rpm) (2B SEA).....	84

Şekil 4.32. Farklı segmentlerdeki çubuk tip yapıların 1.000rpm rotor hızındaki zıt EMK hat gerilimi (a) tepe değerlerinin ve (b) THD' lerinin karşılaştırılması (2B SEA)	84
Şekil 4.33. Farklı segmentlerdeki çubuk tip yapıların (a) çıkış momenti, (b) ortalama moment ve (c) moment dalgalanmalarının karşılaştırılması (2B SEA).....	85
Şekil 4.34. V tip DM yapı (a) 2B SEA modeli ve (b) optimizasyonu yapılan parametreler.....	86
Şekil 4.35. Farklı mıknatıs kalınlıkları ve v açısı için v tip DM segmentsiz yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması değişimleri (2B SEA).....	86
Şekil 4.36. Farklı mıknatıs kalınlıkları ve v açısı için v tip DM 3 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması değişimleri (2B SEA).....	87
Şekil 4.37. Farklı kaykık açıları için v tip DM 3 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması değişimleri (2B SEA).....	88
Şekil 4.38. V tip DM 3 segmentli yapının sabit akım için (@19Amax) çıkış momenti, relüktans momenti ve mıknatıs kaynaklı momentin değişimi (2B SEA)	88
Şekil 4.39. V tip DM 3 segmentli yapının vuruntu momenti değişimi (2B SEA).....	89
Şekil 4.40. V tip DM 3 segmentli yapının 1.000rpm rotor hızında (a) zıt EMK dalga değişimi ve (b) FFT analizi (2B SEA)	89
Şekil 4.41. Farklı mıknatıs kalınlıkları ve v açısı için v tip DM 4 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması değişimleri (2B SEA).....	89
Şekil 4.42. Farklı kaykık açıları için v tip DM 4 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması değişimleri (2B SEA).....	90
Şekil 4.43. V tip DM 4 segmentli yapının sabit akım için (@19Amax) çıkış momenti, relüktans momenti ve mıknatıs kaynaklı momentin değişimi (2B SEA)	90
Şekil 4.44. V tip DM 4 segmentli yapının vuruntu momenti değişimi (2B SEA).....	91
Şekil 4.45. V tip DM 4 segmentli yapının 1.000rpm rotor hızında (a) zıt EMK dalga değişimi ve (b) FFT analizi (2B SEA)	91
Şekil 4.46. Farklı mıknatıs kalınlıkları ve v açısı için v tip DM 6 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması değişimleri (2B SEA).....	91
Şekil 4.47. Farklı kaykık açıları için v tip DM 6 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması değişimleri (2B SEA).....	92
Şekil 4.48. V tip DM 6 segmentli yapının sabit akım için (@19Amax) çıkış momenti, relüktans momenti ve mıknatıs kaynaklı momentin değişimi (2B SEA)	92
Şekil 4.49. V tip DM 6 segmentli yapının vuruntu momenti değişimi (2B SEA).....	93
Şekil 4.50. V tip DM 6 segmentli yapının 1.000rpm rotor hızı için (a) zıt EMK dalga değişimi ve (b) FFT analizi (2B SEA)	93
Şekil 4.51. Farklı segmentlerdeki v tip yapıların vuruntu momentlerinin karşılaştırılması (2B SEA)	94
Şekil 4.52. Farklı segmentlerdeki v tip yapıların 1.000rpm rotor hızı için zıt EMK (a) faz ve (b) hat dalga değişimlerinin karşılaştırılması (2B SEA).....	94

Şekil 4.53. Farklı segmentlerdeki v tip yapıların 1.000rpm rotor hızı için zıt EMK hat gerilimi (a) tepe değerlerinin ve (b) THD' lerinin karşılaştırılması (2B SEA)	94
Şekil 4.54. Farklı segmentlerdeki v tip yapıların (a) çıkış momenti, (b) ortalama moment ve (c) moment dalgalanmalarının karşılaştırılması (2B SEA) ...	95
Şekil 4.55. Karşılaştırmaları yapılan (a) referans YM motor, (b) çubuk tip ve (c) v tip DM motorların 2B SEA modelleri.....	96
Şekil 4.56. Yüksüz durum akı yoğunlukları değişimleri (a) referans YM motor, (b) çubuk tip ve (c) v tip DM motorlar (2B SEA).....	97
Şekil 4.57. Farklı motor tiplerinin (a) vuru momentleri, (b) vuru momentleri teğ değerleri ve (c) vuru momentinin ortalama momente oranının karşılaştırılması (2B SEA)	98
Şekil 4.58. Farklı motor tiplerinin 1.000rpm rotor hızı için zıt EMK (a) faz ve (b) hat dalga değişimlerinin karşılaştırılması (2B SEA)	98
Şekil 4.59. Farklı motor tiplerinin 1.000rpm rotor hızı için zıt EMK hat gerilimi (a) tepe değeri ve (b) THD' lerinin karşılaştırılması (2B SEA).....	99
Şekil 4.60. Farklı motor tiplerinin (a) çıkış moment değişimleri, (b) ortalama momentleri ve (c) moment dalgalanmalarının karşılaştırılması (@19Amax) (2B SEA).....	99
Şekil 4.61. Farklı motor tiplerinin (a) çıkış momenti değişimleri, (b) tepe değerleri, (c) relüktans moment bileşenleri, (d) tepe değerleri, (e) mıknatıs kaynaklı moment bileşenleri ve (f) tepe değerlerinin karşılaştırmaları (@19Amax) (2B SEA).....	100
Şekil 4.62. Farklı motor tiplerinin, SEA ile elde edilen anma ve maksimum yükleme durumları için moment hız eğrilerinin karşılaştırmaları (@19Amax, @38Amax) (2B SEA)	102
Şekil 4.63. V tip DM yapı (a) 3B mekanik katı modeli ve (b) ara kesit görüntüsü .	103
Şekil 4.64. V tip DM yapı gövde mekanik 3B SEA modeli ve sınır koşulları	104
Şekil 4.65. V tip DM yapı gövde mekanik 3B SEA modeli ağ yapısı.....	104
Şekil 4.66. V tip DM yapı gövde burulma analizi (a) yer değiştirmeler ve (b) eşdeğer gerilme seviyeleri (3B SEA).....	105
Şekil 4.67. V tip DM rotor (a) mekanik 3B SEA modeli ve sınır koşulları ile (b) ağ yapısı	105
Şekil 4.68. V tip DM rotor (a) yer değiştirmeler (b) eş değer gerilmeler (3B SEA).....	106
Şekil 4.69. V tip DM yapı rotor nüvesi segmenti üzerindeki eşdeğer gerilmeler (3B SEA).....	106
Şekil 4.70. V tip DM yapı motor modal analiz modellemesi (3B SEA).....	107
Şekil 4.71. V tip DM yapı motor modal analizi farklı modlar için motor görüntüleri (a) 1. Mod, (b) 2. Mod, (c) 3. Mod, (d) 4. Mod, (e) 5. Mod ve (f) 6. Mod (3B SEA).....	108
Şekil 4.72. V tip DM yapıya ait termal analiz modeli	109
Şekil 4.73. V tip DM yapı anma yüklemesinde sürekli çalışması durumunda elde edilen sıcaklık dağılımı	110
Şekil 4.74. V tip DM yapı maksimum yüklemeye sürekli çalışması durumunda elde edilen sıcaklık dağılımı.....	111
Şekil 4.75. V tip DM yapıya uygulanan motor çalışma periyodu.....	112
Şekil 4.76. V tip DM motorun uygulanan çalışma senaryosu için zamana göre sıcaklık değişimleri	113

Şekil 4.77. V tip DM yapı motor bağlantı arayüzü ve temel ölçüler	114
Şekil 4.78. V tip DM motor prototip üretim görüntüleri (a) rotor nüvesi, (b) mıknaşların yapıştırılması, (c) nüvelerin mile montajı, (d) nihai rotor, (e) sarımları yapılmış stator, (f) statorun gövdeye sıkı geçmesi, (g) gövde, kapaklar, motor mili ve (h) nihai prototip	114
Şekil 4.79. Magtrol marka motor test sistemi	115
Şekil 4.80. V tip DM yapıya ait (a) vuruş momenti test sonucu ve (b) SEA sonuçları ile karşılaştırması.....	117
Şekil 4.81. V tip DM yapıya ait 1.000rpm rotor hızı için (a) zıt EMK hat gerilimi test sonucu ve (b) SEA sonuçları ile karşılaştırması	117
Şekil 4.82. Sabit akım için V tip DM yapıya ait (a) çıkış momenti test sonucu ve (b) SEA sonuçları ile karşılaştırması (@19Amax)	118
Şekil 4.83. V tip DM yapıya ait (a) çıkış momenti test sonucu ve (b) SEA sonuçları ile karşılaştırması (@19Amax).....	118
Şekil 4.84. V tip DM yapı prototipinin 0,25pu, 0,5pu, 0,75pu ve 1pu yükleme durumları için moment-hız eğrileri değişimi	119
Şekil 4.85. V tip DM yapı prototipinin 0,25pu, 0,5pu, 0,75pu ve 1pu yükleme durumları için güç-hız eğrileri değişimi.....	120
Şekil 4.86. V tip DM yapı prototipinin 0,25pu, 0,5pu, 0,75pu ve 1pu yükleme durumları için verim-hız eğrileri değişimi	120
Şekil 5.1. Önerilen SMHSM'a ait ara kesit görüntü	122
Şekil 5.2. Alternatif SMHSM önerileri	123
Şekil 5.3. Geleneksel kaykık ve SMHSM' a uygulanan kaykık açılarının gösterimi.....	124
Şekil 5.4. Referans YM ve DM yapılara ait yüksüz durum akı yoğunlukları (2B SEA).....	125
Şekil 5.5. 2B SEA yöntemi ile referans YM ve DM yapılara ait (a) vuruş momenti, (b) 1.000rpm hız için zıt EMK hat dalga değişimi ve (c) çıkış momenti değişimleri	126
Şekil 5.6. 2B SEA yöntemi ile elde edilen referans YM ve DM yapılara ait moment-hız grafikleri.....	126
Şekil 5.7. 2B SEA yöntemi ile elde edilen hibrit yapıya ait (a) vuruş momenti, (b) zıt EMK hat dalga değişimi (@1.000rpm) ve (c) çıkış momenti değişimleri.....	127
Şekil 5.8. 2B SEA yöntemi ile elde edilen referans YM yapı, DM yapı ve hibrit yapıya ait moment-hız grafiklerinin karşılaştırılması	128
Şekil 5.9. SMHSM prototip üretim görüntüleri (a) YM segment, (b) DM segment, (c) SMHSM rotoru, (d) stator ve (e) SMHSM prototipi.....	129
Şekil 5.10. Çalışmada kullanılan motor test sistemi	130
Şekil 5.11. SMHSM vuruş momenti test sonucu (@1rpm).....	130
Şekil 5.12. SMHSM zıt EMK hat dalga değişimi test sonucu ve SEA simülasyonları ile karşılaştırması (@1.000rpm)	130
Şekil 5.13. SMHSM'a sabit akım uygulandığı durum için çıkış momenti değişimi test sonucu ve 2B SEA ile karşılaştırılması (@12Amax)	131
Şekil 5.14. Referans YM motor ile hibrit motor karşılaştırması (a) moment Dalgalanması, (b) zıt EMK THD' si, (c) maksimum hız/anma hızı oranı, (d) çıkış momenti/mıknaş hacmi oranı	132
Şekil 6.1. SMSM görüntüleri, (a) rotoru ideal kaykıklı ve (b) rotoru geleneksel 4 segmentli yapı	134

Şekil 6.2.	Rotor üzerinde yer alan mıknatıs boyları ve mıknatıslar arasındaki açı	136
Şekil 6.3.	Önerilen yeni rotor tasarımları, (a) sabit segment boyu ve değişken kaykık açısından oluşan SMBDKA tasarımı ve (b) değişken segment boyu ve değişken kaykık açısından oluşan DMBDKA tasarımı.....	137
Şekil 6.4.	Geliştirilen optimizasyon algoritması akış diyagramı	138
Şekil 6.5.	Geliştirilen kod ile vuru momentini hesaplama yöntemi şematik gösterimi.....	139
Şekil 6.6.	Farklı segment sayılarında vuru momentini değişimleri ve tepeden tepeye değerlerinin karşılaştırılması (a) geleneksel kaykık, (b) SMBDKA ve (c) DMBDKA.....	140
Şekil 6.7.	Farklı segment sayılarında çıkış momentini değişimleri, ortalama moment ve moment dalgalanması karşılaştırmaları (a) geleneksel kaykık, (b) SMBDKA ve (c) DMBDKA	141
Şekil 6.8.	DMBDKA 4 segmentli yapı 3B SEA modeli ve yüksüz durum akı yoğunluğu.....	142
Şekil 6.9.	DMBDKA, 4 segmentli yapıya ait 3B analiz sonuçları ile önerilen yarı SEA tabanlı yöntemin karşılaştırılması (a) vuru momentini, (b) back EMF ve (c) çıkış momentini	142
Şekil 6.10.	DMBDKA, 4 segmentli yapıya ait prototip üretim görüntüleri (a) laminasyon yapısı, (b) mıknatısları yapılandırılmış rotor nüveleri ve (c) nihai prototip	143
Şekil 6.11.	DMBDKA yapıya ait prototip motor testlerinin yapıldığı motor test sistemi	144
Şekil 6.12.	Vuru momentini için önerilen yarı SEA tabanlı yöntem, 3B SEA ve test sonuçlarının karşılaştırılması (@1rpm)	144
Şekil 6.13.	Önerilen yarı SEA tabanlı yöntem, 3B SEA ve test sonuçlarının karşılaştırılması (a) zıt EMK hat dalga değişimi (b) FFT analizi (@1.000rpm)	145
Şekil 6.14.	Motor çıkış momentini test sonuçları ile önerilen yarı SEA tabanlı yöntem ve 3B SEA sonuçlarının karşılaştırılması (@19Amax)	145
Şekil 6.15.	Referans YM motor ve önerilen DMBDKA yapının karşılaştırılması (a) vuru momentini tepe değeri, (b) zıt EMK temel harmoniğin tepe değeri, (c) ortalama moment ve (d) moment dalgalanması.....	146
Şekil 7.1.	YM yapı relüktans tabanlı manyetik eşdeğer devresi	149
Şekil 7.2.	YM yapı manyetik eşdeğer devresinden elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişimi ve 2B SEA ile karşılaştırılması.....	153
Şekil 7.3.	YM yapı hava aralığı akı yoğunluğu için eğri uydurma işlemi	153
Şekil 7.4.	YM yapının manyetik eşdeğer devreden zıt EMK elde edilmesi ve 2B SEA sonuçları ile karşılaştırılması (@1.000rpm).....	154
Şekil 7.5.	YM yapıya uygulanan 3 faz dengeli akım dalga değişimleri (19Amax)	155
Şekil 7.6.	YM yapı çıkış momentini değişimi ve 2B SEA sonucu ile karşılaştırılması	155
Şekil 7.7.	DM yapı relüktans tabanlı manyetik eşdeğer devresi	156
Şekil 7.8.	DM yapı manyetik eşdeğer devresinden elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişimi ve 2B SEA ile karşılaştırılması.....	159
Şekil 7.9.	DM yapı hava aralığı akı yoğunluğu için eğri uydurma işlemi	160

Şekil 7.10. DM yapının manyetik eşdeğer devreden zıt EMK elde edilmesi ve 2B SEA sonuçları ile karşılaştırması (@1.000rpm).....	161
Şekil 7.11. DM yapıya uygulanan 3 faz dengeli akım dalga değişimleri (19Amax)	161
Şekil 7.12. DM yapı çıkış momenti değişimi ve SEA sonucu ile karşılaştırması....	161
Şekil 7.13. SMHSM' dan minimum moment dalgalanmasının elde edilmesi için kullanılan yarı SEA tabanlı algoritmanın akış diyagramı	162
Şekil 7.14. YM ve DM segmentsiz yapıların 2B SEA çıkış momenti değişimleri..	162
Şekil 7.15. YM, DM, DM SMHSM' a ait minimum moment dalgalanmasını veren mıknatıs boyları ve kaykçı açılarının 2B ve 3B görüntüleri	163
Şekil 7.16. Yarı SEA tabanlı algoritmadan elde edilen SMHSM' a ait çıkış momenti değişimi.....	164
Şekil 7.17. Hibrit yapıya ait relüktans tabanlı manyetik modelleme	165
Şekil 7.18. Geliştirilen algoritma ile çıkış momenti elde edilmesi örneği.....	165
Şekil 7.19. SMHSM için manyetik eşdeğer devreden elde edilen çıkış momenti ve YM ile DM 2B SEA moment çıkışları ile karşılaştırmaları	166
Şekil 7.20. Hibrit yapı için 3B SEA, yarı SEA ve manyetik eşdeğer devre sonuçlarının karşılaştırmaları	166
Şekil 7.21. Hibrit yapı 3B SEA yüksüz durum akı yoğunluğu değişimleri	167
Şekil 7.22. Hibrit yapı vuru moment ve 1.000rpm rotor hızında zıt EMK hat dalga değişimleri ve yarı SEA sonuçları ile karşılaştırmaları	168
Şekil 7.23. Hibrit yapı çıkış momenti değişimi ve yarı SEA sonuçları ile karşılaştırması	168
Şekil 7.24. Hibrit yapı moment hız eğrisi ve YM ile DM moment hız eğrileri ile karşılaştırması	169
Şekil 7.25. SMHSM 3B mekanik modeli	169
Şekil 7.26. SMHSM teknik resim örnekleri.....	170
Şekil 7.27. SMHSM prototip üretim görüntüleri ve nihai prototip.....	171
Şekil 7.28. Motor test sistemi ve SMHSM prototipi.....	172
Şekil 7.29. SMHSM test sonuçları ve karşılaştırmaları (a) vuru moment, (b) 1.000rpm hızda zıt EMK hat gerilimleri ve (c) zıt EMK temel harmonik tepe değerleri.....	172
Şekil 7.30. Hibrit yapı çıkış momenti test sonuçları ve farklı yöntemlerin karşılaştırması	173
Şekil 7.31. Hibrit yapı çıkış momenti test sonuçları ve farklı yöntemlerin karşılaştırmaları.....	174

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. YM ve DM motor yapılarının karşılaştırması.....	26
Tablo 2.2. Farklı standartlarda silisli çelik malzemeleri ve eşdeğerleri	36
Tablo 2.3. Avrupa normlarında sık kullanılan motor sac malzemeleri	37
Tablo 2.4. En sık kullanılan sacların demir kayıpları karşılaştırması	37
Tablo 2.5. Farklı sürekli mıknatıs malzemelerinin karşılaştırılması.....	39
Tablo 2.6. NdFeB türü mıknatısların manyetik özellikleri	39
Tablo 3.1. YM örnek motor kriterleri	44
Tablo 3.2. Örnek SMSM için farklı yöntemlerle elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu tepe değerlerinin karşılaştırması	54
Tablo 3.3. Hava aralığı akı yoğunluğu denklem katsayıları	56
Tablo 3.4. Örnek SMSM termal analizlerde kullanılan demir, bakır ve mıknatıs kayıpları.....	60
Tablo 4.1. Takım tezgahı motoru tasarım kriterleri	67
Tablo 4.2. Alternatif DMSM yapılarının karşılaştırılması.....	73
Tablo 4.3. Referans motor ile farklı tip DM yapıların performans karşılaştırması..	101
Tablo 4.4. Motorda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.....	103
Tablo 4.5. V tip DM yapı ilk 6 modu.....	107
Tablo 4.6. V tip DM yapı anma çalışması için kayıplar	109
Tablo 4.7. Motor test sistemi bileşenleri ve özellikleri.....	116
Tablo 4.8. V tip DM yapı test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırması	120
Tablo 5.1. Önerilen SMHSM çalışması için referans alınan motor kriterleri.....	123
Tablo 6.1. Farklı kaykılı yöntemlerinin karşılaştırılması.....	137
Tablo 6.2. Referans YM motor tasarım kriterleri	139
Tablo 6.3. Geleneksel kaykılı yöntem ile önerilen yöntemin karşılaştırılması.....	146
Tablo 7.1. YM yapı hava aralığı akı yoğunluğu fonksiyon katsayıları.....	154
Tablo 7.2. DM yapı hava aralığı akı yoğunluğu fonksiyon katsayıları.....	160
Tablo 7.3. SMHSM için yarı SEA tabanlı algoritma ve manyetik eşdeğer devre sonuçlarının karşılaştırmaları	167
Tablo 7.4. SMHSM çıkış momenti testi ve farklı yöntemler ile karşılaştırması.....	173

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

B_v	: Viskos sürtünme katsayısı
F	: Kuvvet vektörü, (N)
I	: Akım vektörü, (A)
B	: Manyetik alan, (T)
A	: Kesit alanı, (m^2)
l	: İletken uzunluğu, (m)
\emptyset	: Manyetik akı, (Wb)
R	: Manyetik direnç, (1/H)
μ_0	: Havanın geçirgenlik sabiti
μ_r	: Malzemenin bağlı akı geçirgenlik sabiti
N	: Sarım sayısı
N_m	: Faz başına seri bobin sayısı
B_g	: Hava aralığı akı yoğunluğu, (T)
i_a	: A fazı stator akımı, (A)
i_b	: B fazı stator akımı, (A)
i_c	: C fazı stator akımı, (A)
i_d	: d eksen akımı, (A)
i_q	: q eksen akımı, (A)
J	: Atalet momenti, (Kgm^2)
L	: Endüktans, (H)
L_{st}	: Stator paket boyu, (m)
L_d	: d eksen endüktans, (H)
L_q	: q eksen endüktans, (H)
Q	: Oluk sayısı
T_{cog}	: Vuruntu momenti, (Nm)
v_m	: mekanik açısal konum, (Rad)
p	: Kutup çifti sayısı
R_{ro}	: Rotor yarıçapı, (mm)
R	: Direnç, (Ω)
T_e	: Elektriksel moment, (Nm)
T_L	: Yük momenti, (Nm)
P	: Güç, (W)
E_a	: A fazı zıt EMK gerilimi, (V)
E_b	: B fazı zıt EMK gerilimi, (V)
E_c	: C fazı zıt EMK gerilimi, (V)
V_d	: d eksen gerilimi, (V)
V_q	: q eksen gerilimi, (V)
θ_r	: Mekanik konum, (rad)
Ψ_d	: d eksen manyetik akı, (Wb)
Ψ_q	: q eksen manyetik akı, (Wb)
Ψ_m	: Mıknatıs manyetik akısı, (Wb)
ω_e	: Elektriksel hız, (rad/s)
ω_m	: Mekanik hız, (rad/s)

β	: Akım faz açısı, (Rad)
δ_d	: Mıknatıs akısı d eksen bileşeni, (Wb)
δ	: Moment açısı
x_d	: d-eksen reaktansı
x_q	: q-eksen reaktansı

Kısaltmalar

2B	: İki Boyutlu
3B	: Üç Boyutlu
2.5B	: İki Buçuk Boylu
AA	: Alternatif Akım
AC	: Alternating Current (Alternatif Akım)
BLAC	: Brushless Alternating Current (Fırçasız Alternatif Akım)
BLDC	: Brushless Direct Current (Fırçasız Doğru Akım)
DA	: Doğru Akım
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DM	: Dahili Mıknatıslı
DMM	: Dahili Mıknatıslı Motor
DMSM	: Dahili Mıknatıslı Senkron Motor
EMK	: Elektro Motor Kuvvet
FFT	: Fast Fourier Transformation (Hızlı Fourier Dönüşümü)
MMK	: Magneto Motor Kuvvet
NdFeB	: Neodymium Iron Boron
OKEK	: Ortak Katlarının En Küçüğü
RPM	: Revolute Per Minute (Dakikadaki Dönüş Sayısı)
RTAM	: Relüktans Tabanlı Analitik Model
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SGHO	: Sabit Güç Hız Oranı
SHSM	: Segmentli Hibrit Sürekli Mıknatıslı
SM	: Sürekli Mıknatıslı
SMC	: Soft Magnetic Material (Yumuşak Manyetik Malzeme)
SMHSM	: Sürekli Mıknatıslı Hibrit Senkron Motor
SMSM	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
THD	: Total Harmonic Distortion (Toplam Harmonik Bozunum)
YM	: Yüzey Mıknatıslı
YMM	: Yüzey Mıknatıslı Motor
YMSM	: Yüzey Mıknatıslı Senkron Motor

SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLARDA MOMENT KALİTESİNİ ARTIRMAYA YÖNELİK MELEZ MIKNATIS YERLEŞİMLİ YENİ BİR ROTOR YAPISI TASARIMI VE DENEYSEL DOĞRULANMASI

ÖZET

Birim hacimden daha yüksek güç elde edilebilmesi, yüksek verim, sessiz çalışma ve bakım gerektirmemeleri gibi nedenlerden dolayı sürekli mıknatıslı senkron motorların (SMSM) kullanımı günümüzde diğer tip motorlara göre oldukça fazladır. Sürekli mıknatıslı (SM) senkron motorlar, yapısında bulunan özel mıknatıslar sayesinde, benzer boyutlardaki asenkron ve fırçalı dc motorlara göre daha yüksek güç yoğunluğuna sahiptirler. Bu nedenle kritik uygulamalarda akla gelen ilk motor türü sürekli mıknatıslı senkron motorlar olmaktadır. Diğer taraftan sürekli mıknatıslı senkron motorların sağladığı avantajlardan maksimum seviyede faydalanabilmek için tasarım aşamasında uygulanması gereken farklı birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında doğru oluk/kutup sayısı kombinasyonu seçimi, oluk açıklığı optimizasyonu, kaykılı veya segmentli rotor yapısı, mıknatıs gruplama ve mıknatıs genişliği optimizasyonu en sık kullanılan yöntemler arasındadır. Ayrıca uygulanan yöntemler arasında farklı motor topolojilerinin avantajlarını bir araya getirerek, tek bir motorda bu avantajları sağlamaya yönelik yapılmış birçok özel hibrit motor tasarım yöntemi de bulunmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında sürekli mıknatıslı senkron motorların manyetik modellenmesi, CNC (computer numerical control) takım tezgahlarında kullanılması amacıyla özel bir DM (dahili mıknatıslı) takım tezgahı motoru tasarlanması, rotoru değişken mıknatıs boyu ve kaykılı açısından oluşan yeni bir segmentli YM (yüzeyden mıknatıslı) motor yapısının önerilmesi ve rotorunda YM ve DM rotor segmentleri bulunan yeni bir hibrit yapının önerilmesi ve doğrulaması çalışmaları yapılmıştır. Sürekli mıknatıslı senkron motorların özellikleri ve motor denklemleri verilerek örnek bir YM motor için manyetik modelleme çalışmaları yapılmıştır. Modelleme çalışmaları basit manyetik model, doğrusal elemanlardan oluşan detaylı manyetik model ve doğrusal olmayan elemanlardan oluşan detaylı manyetik model olarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar analizi (SEA) sonuçları ile karşılaştırılarak uyumları irdelenmiştir. Ayrıca örnek motora ait 1 boyutlu (1B) basit bir termal eşdeğer devre oluşturularak mıknatıs sıcaklık seviyeleri elde edilmiştir.

Yapılan diğer bir çalışma CNC (computer numerical control) takım tezgahlarında kullanılması amacıyla özel bir DM takım tezgahı motoru tasarlanmasıdır. Tasarım kriterleri doğrultusunda önce kutup sayısı optimizasyonu yapılmış ardından birçok farklı DM yapı detaylı olarak incelenmiştir. En iyi sonucu veren DM yapı için mekanik modelleme ve analiz çalışmaları gerçekleştirilerek prototip üretimi yapılmıştır. Oluşturulan test sistemi sayesinde testler gerçekleştirilerek doğrulama çalışmaları yapılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

Tez kapsamında geliştirilen yeni bir algoritma sayesinde, 2 boyutlu (2B) SEA sonuçları kullanılarak, segmentli sürekli mıknatıslı senkron motorlarda daha düşük

vuruntu momenti veya moment dalgalanması elde edilmesi sağlanmıştır. Literatürde ilk defa önerilen bu yöntem ile YM takım tezgahı motoru referans alınarak mıknatıs boyu ve segmentler arasındaki açının optimizasyonu sağlanmış ve daha düşük vuruntu momenti ve moment dalgalanması veren rotor yapısı elde edilmiştir. Elde edilen yapı için prototip üretim ve doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar geleneksel yapılarla karşılaştırılarak avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir. Aynı algoritma kullanılarak rotoru YM ve DM segmentlerden oluşan, minimum moment dalgalanması verecek optimum boyutlarda bir hibrit takım tezgahı motoru da literatürde ilk defa bu tez çalışması kapsamında önerilmiştir. Hibrit motora ait prototip üretim ve doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Geleneksel motor yapıları ile önerilen hibrit motor yapısının detaylı performans karşılaştırmaları yapılarak avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Değişken Boy ve Farklı Kaykı Açılı Segmentli Motor, Melez Yerleşimli Rotor, Relüktans Tabanlı Manyetik Modelleme, Segmentli Hibrit Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor, Sonlu Elemanlar Analizi.

A NEW PERMANENT MAGNET HYBRID SYNCHRONOUS MOTOR DESIGN, PROTOTYPE MANUFACTURING AND EXPERIMENTAL VERIFICATION TO IMPROVE TORQUE QUALITY

ABSTRACT

Nowadays, the use of permanent magnet synchronous motors is much more than other types of motors, due to reasons such as higher power density, high efficiency, silent operation and not requiring maintenance. Thanks to the special permanent magnets in its structure, it is the first motor type that comes to mind in critical applications due to its higher power density than other three phase motor types with similar dimensions. On the other hand, there are many different methods that should be applied at the design stage in order to benefit from the advantages of permanent magnet synchronous motors at the maximum level. Choosing the right slot / pole number combination, slot opening optimization, skew or segmented rotor structure, magnet grouping and magnet width optimization are the most frequently used methods in the literature. In addition, there are many special hybrid motor design methods in order to provide better motor design by combining the advantages of different motor topologies.

Within the scope of this thesis study, magnetic modeling of permanent magnet synchronous motors were performed, a special IPM (interior permanent magnet) motor for CNC (computer numerical control) milling applications was designed, a new segmented SPM (surface permanent magnet) motor rotor structure which has variable magnet length and skew angle was proposed, and a new hybrid motor rotor structure which includes SPM and IPM rotor parts was proposed and verified. Magnetic modeling studies were performed for a reference SPM motor. Modeling studies were made as a simple magnetic model, a detailed magnetic model consisting of linear elements and a detailed magnetic model consisting of nonlinear elements. The obtained results were compared with finite element analysis (FEA). In addition, 1 dimensional (1D) thermal modeling studies were performed and magnet temperature levels were obtained.

Another study is design a special IPM motor for CNC (computer numerical control) milling machines. Pole number optimization were performed depending on the design criteria. Different IPM motor structures were examined in detail. IPM motor prototype manufactured for the one which gave the best torque quality. Prototype motor tests were carried out and results were examined.

A new semi FEA based algorithm were developed to obtain better cogging torque and torque quality from segmented motors. This method, which was proposed first time in the literature, was applied the reference SPM spindle motor. SPM motor magnet lengths and skew angles were optimized to obtain lower cogging torque and torque ripple. Prototype motor was manufactured and experimental verification studies were carried out. The results were compared with traditional structures and advantages and disadvantages of the proposed motor were mentioned. Same optimization algorithm

was used to propose a new hybrid motor which rotor consist of SPM and IPM rotor segments. The aim of this study is to obtain optimum rotor segment lengths and skew angles to obtain minimum torque ripple. This method was proposed first time in the literature within the scope of this thesis study. Hybrid motor prototype was manufactured and verified. The advantages and disadvantages of the proposed hybrid motor were mentioned at the end of the study.

Keywords: Segmented Motor With Variable Length and Different Skew Angle, Hybrid Motor, Reluctance Based Magnetic Modeling, Segmented Hybrid Permanent Magnet Synchronous Motor, Finite Element Analysis.



GİRİŞ

İnsanoğlu, zekâsı sayesinde çok eski yıllardan beri ihtiyaçlarını karşılayabilmek için çeşitli alet ve gereçler icat etmiştir. Kullanılan alet ve gereçler zaman içerisinde sağlanan bilgi birikimi ve teknolojik gelişmeler sayesinde şekil değiştirerek daha pratik hale gelmiştir. Özellikle 19. yüzyıl başlarında gerçekleşen endüstri devrimi sayesinde teknoloji çok hızlı ilerlemiş ve buna bağlı olarak da farklı birçok alanda makineleşme sürecine gidilmiştir. Hatta ilerleyen yıllarda yavaş yavaş insanoğlunun yaptığı birçok iş, makineler tarafında yapılmaya başlanmıştır. Yakın tarihte yarı iletken maddelerin keşfi ve elektronik bileşenlerde kullanılması ile teknoloji çok daha ileri seviyeye gelmiş ve neredeyse üretimde insanoğluna hiç ihtiyaç kalmadan üretim yapılabilir hale gelinmiştir [1-3].

Gelişen teknoloji ile birlikte kullanılmaya başlanan makine ve robotların hareket aksamalarının çoğunda elektrik motorları kullanılmaktadır. Teknolojinin gelişmeye başladığı yıllarda doğru akım motorları tercih edilirken, ilerleyen yıllarda alternatif akım motorlarının geliştirilmesi ile asenkron motorlar da uygulamalarda tercih edilmeye başlanmıştır. Son 40 yılda malzeme teknolojisinde yaşanan gelişmeler sayesinde elektrik makinelerinin özel bir türü olan sürekli mıknatıslı senkron motorlar da sağladığı avantajlar nedeniyle kendine yer bulmaya başlamıştır ve günümüzde birçok farklı sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Birim hacimden daha fazla güç alınabilmesi, verimlerinin yüksek olması, sessiz çalışmaları ve bakım gerektiren aksamalarının az olması, sağladıkları önemli avantajlar arasında gösterilebilir. Çalışması için elektronik bir sürücüye ihtiyaç duyuyor olması her ne kadar dezavantaj olarak görünse de son yıllarda yarı iletken teknolojisi ve güç elektroniğinde yaşanan gelişmeler sayesinde bu konu da problem olmaktan çıkmıştır. Bu nedenle de günümüzde otomotivden beyaz eşyaya, savunma sanayinden medikale birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar [4-5].

SMSM' lerin getirdiği avantajlar nedeniyle kullanım alanlarının artması tasarım tarafındaki gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. Daha kaliteli motor tasarımları elde

edilebilmesi için farklı birçok tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemler vuru mu momenti, zıt EMK, çıkış momenti,... büyüklüklerin daha iyi hale getirilmesini ve böylece çok daha hassas uygulamalar için kullanılabilir olmalarını sağlamaktadır [3]. Her geçen gün daha hassas uygulamalarda kullanmak veya maliyet avantajı sağlamak için yeni tasarımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı motor türlerinin avantajlarını bir araya getirerek, ortaya daha iyi tasarımlar çıkarmak için hibrit motor tasarımlarına sıkça başvurulmaktadır. Farklı avantajlar sağlayacak yeni birçok hibrit yapının önerilebilecek olması ve ülkemizde hibrit yapılarla ilgili çok fazla tasarım çalışmasının bulunmaması, bu çalışma için gerekli motivasyonu sağlayan en önemli etken olarak gösterilebilir.

Tez kapsamında, SM senkron motorların relüktans tabanlı manyetik ve termal modelleme çalışmaları, DM türünden bir takım tezgahı motoru tasarımı, prototip üretimi ve deneysel doğrulaması, yeni bir hibrit motorun önerilmesi ve önerilen konseptin doğrulama çalışmaları, SM motorlar için yeni bir segmentli yapının önerilmesi, YM ve DM yapıların birleşiminden oluşan hibrit bir motor önerilmesi, detaylı tasarım çalışmaları, prototip üretimi ve deneysel doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Her bir çalışma kendi içerisinde prototip üretimi, performans testleri ve doğrulama çalışmalarını kapsamaktadır.

Yapılan çalışmaların literatüre iki temel katkısı bulunmaktadır. Bunlardan ilki rotorunda yer alan segmentlerin farklı uzunluklarda ve kaykık açılarında olduğu YM yapının önerilmesi ve doğrulama çalışmalarıdır. Diğer i ise rotorunun bir kısmı YM ve diğer kısmı DM rotor segmentlerinden oluşan, segmentlerde yer alan mıknatıs boyları ve kaykık açılarının birbirinden farklı olduğu hibrit yapının önerilmesi ve doğrulama çalışmalarıdır.

Genel hatları ile bahsedilen tez çalışmaları için oluşturulan bölüm içerikleri aşağıda özet halinde verilmiştir;

Bölüm 1' de elektrik makineleri ve tez kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılan SMSM türüne ait genel bilgiler verilmiştir. Ardından tez çalışmasının amacı, kullanılan yöntem ve daha önce yapılmış çalışmalar anlatılarak literatüre tezin sunduğu katkılardan bahsedilmiştir.

Bölüm 2' de SM motorların sınıflandırılması, SM motor denklemleri, motor tasarım süreçleri ve motorlarda kullanılan malzemeler hakkında bilgilere yer verilmiştir.

Bölüm 3' te relüktans tabanlı manyetik modelleme temelleri verilerek, örnek YM bir motor için manyetik modelleme çalışmaları yapılmış ve çıkış momentinin elde edilmesine kadar bütün süreçler anlatılmıştır. Ayrıca aynı motora ait termal eşdeğer devre oluşturularak farklı bölgelerdeki sıcaklık bilgisinin elde edilmesi süreci anlatılmıştır.

Bölüm 4' te takım tezgahı motoru olarak kullanılmak üzere DM bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Nihai manyetik tasarım için 3B mekanik modelleme, mekanik ve termal analiz çalışmaları gerçekleştirilerek, prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Takım tezgahı motoru testi için profesyonel bir motor test sistemi kurulmuştur. Prototipe ait performans testleri gerçekleştirilerek sonuçların simülasyonlarla uyumu irdelenmiştir.

Bölüm 5' te yeni bir hibrit motor önerilerek kavram doğrulaması amacıyla motor tasarımı yapılmış ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Prototip performans testleri yapılarak, simülasyon sonuçları ile uyumu kontrol edilmiştir.

Bölüm 6' da segmentli SMSM denklemleri verilerek iki farklı tipte, yeni segmentli yapılar önerilmiş ve detaylı sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. En iyi moment kalitesini veren yapı için prototip üretilerek, performans testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve uyumu irdelenmiştir. Ayrıca önerilen yeni yapının geleneksel segmentli yapıya göre avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir.

Bölüm 7' de, daha önceki bölümlerde kavramsal tasarım olarak önerilen hibrit yapı, takım tezgahı motoruna uygulanmış ve rotoru DM ve YM yapılardan oluşan yeni bir hibrit motor tasarımı elde edilmiştir. Tasarıma ait prototip üretimi gerçekleştirilerek performans testleri yapılmıştır. Test ve simülasyon sonuçları karşılaştırılarak önerilen motorun avantaj ve dezavantajları anlatılmıştır.

Bölüm 8' de ise tez kapsamında yapılan bütün çalışmalar özetlenmiş, değerlendirilmiş ve gelecekte yapılabilecek potansiyel çalışmalara yer verilmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

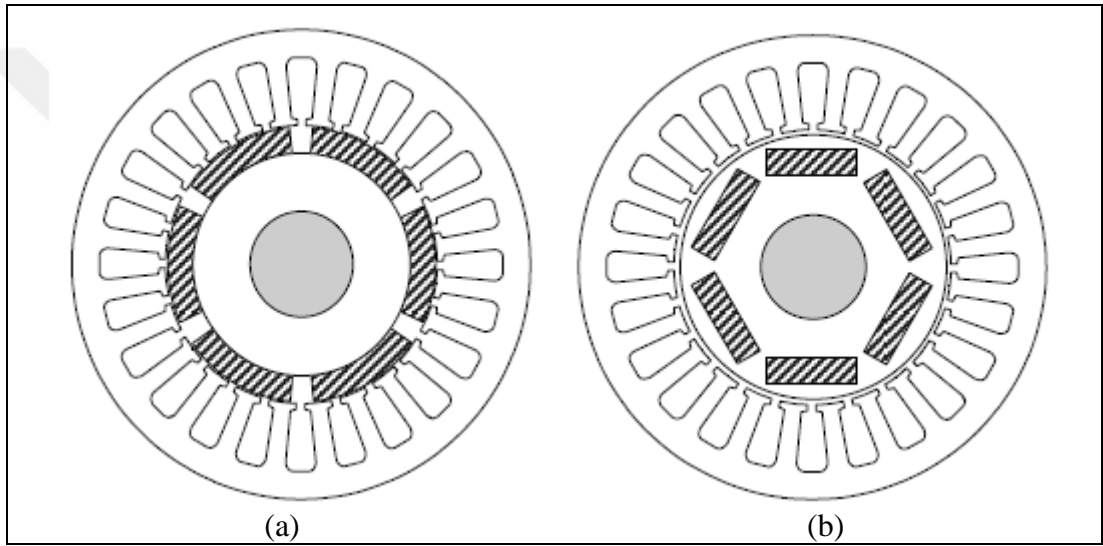
Elektrik motorlarının en eski tipi olan alan etkili DA motorları, basit hız kontrolü yapılabilmeleri sayesinde yıllar boyunca yaygın olarak kullanılmıştır. Her ne kadar bu motorların uygulama alanlarının çoğunu sürücü ile hızı ayarlanabilir AA motorları almış olsa da, bazı küçük boyut ve yüksek verim gerektiren uygulamalarda hala kullanılmaktadırlar. Yüksek güçlü uygulamalarda ise DA motorlarının kullanımının azalmasına neden olan en önemli faktörler arasında evirici gerektirmesi ve bakım maliyetlerinin olması gösterilebilir. Diğer önemli bir faktör ise AA motorlara göre güç/hacim oranlarının daha az olması ve bu nedenle de aynı güç için daha fazla hacim kaplaması olduğu söylenebilir.

Asenkron motorlar AA motorlar arasında en çok kullanılan motor türüdür. Güvenilir olmaları ve fırça ile yüzük bakım maliyetleri olmaması en belirgin avantajları arasında gösterilebilir. Ayrıca bazı türlerinin tek fazlı olarak da çalışabilmesi diğer bir avantaj olarak gösterilebilir. Diğer taraftan rotorlarında sargıların bulunması nedeniyle verimlerinin düşük olması ve bu nedenle de termal problemlerin baş göstermesi dezavantajları arasında gösterilebilir. Bu dezavantajının sonucu olarak motor sıcaklık değerlerinin artması ve sıcaklığa bağlı parametrelerin değişmesi, modellemelerde göz önünde bulundurulması gereken önemli bir husustur. [1-5].

Endüstride kullanılan diğer bir motor türü de relüktans motordur. Basit yapısı nedeniyle maliyetlerinin çok düşük olması ve kararlı olan stator ve rotor yapıları önemli avantajları olarak gösterilebilir. Ayrıca evirici gereksinimleri de AA motorlarda olduğu gibi çok ciddi seviyede değildir. Diyotlarla elde edilebilecek basit bir yarım dalga doğrultucu, bu tür motorları sürmek için yeterlidir. Diğer taraftan bu motorların en büyük dezavantajı, büyük relüktans farkının neden olduğu çok ciddi moment dalgalanması problemidir. Moment dalgalanması da beraberinde yüksek titreşim ve gürültüyü getirmektedir [5].

Senkron motorların DA ve asenkron motorlara göre farklı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Alan sargılı senkron motorlar, DA ve asenkron motorlara göre çok

yüksek verimli olabilirler. Ayrıca çok büyük yüklerin olduğu elektrik üretimi gibi uygulamalarda tercih edilirler. Senkron motorların rotorlarında yer alan alan sargısı mıknatıslar ile değiştirilirse sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM) olarak isimlendirilen özel bir tür elde edilmiş olur. SMSM' ler hem sinüzoidal akım (BLAC) hem de trepezoidal akım (BLDC) ile sürülebilirler. Bu motorlar rotor yapılarına göre yüzeyden mıknatıslı (YM) ve dahili mıknatıslı (DM) olmak üzere 2 temel şekilde sınıflandırılırlar (Şekil 1.1). Görselde en temel YM ve DM yapılar gösterilmiştir. Bununla beraber birçok YM ve DM yapı alternatifleri farklı akademik çalışmalar ve patentlerde mevcuttur.

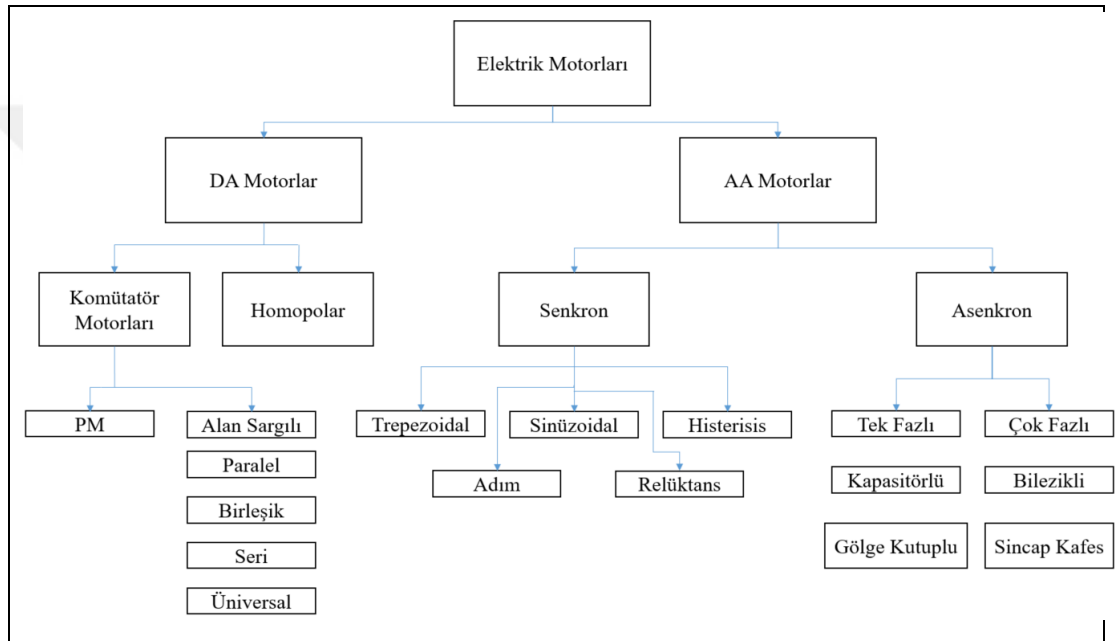


Şekil 1.1. SMSM örnekleri (a) yüzeyden mıknatıslı ve (b) dahili mıknatıslı motor temel yapıları [3]

SMSM' ler, yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim ve küçük boyut gibi özelliklere sahip olması nedeniyle endüstride farklı uygulamalar için farklı avantajlar sağlamaktadırlar. Bunlara ek olarak SMSM' ler diğer motorlara göre daha iyi moment-hız eğrisine sahiptirler ve daha iyi dinamik cevap verebilirler. Uzun çalışma ömrüne sahip olmaları, sessiz çalışmalarını ve yüksek çalışma hız aralıkları diğer avantajları arasında gösterilebilir [1-5].

Literatürde elektrik motorlarının sınıflandırılması için farklı yöntemler kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntemlere örnek olarak besleme türüne göre, rotor yapısına göre ve stator yapısına göre sınıflandırma yöntemleri verilebilir. En yaygın kullanılan yöntemlerden birisi, elektrik motorlarını besleme şekillerine göre AA ve DA olarak ikiye ayırmak şeklindedir (Şekil 1.2). AA motorların beslemesi alternatif akım veya

gerilim kaynağından yapılırken, DA motorların beslemesi doğru akım veya gerilim kaynağından yapılmaktadır. DA motorları alan bağlantılarına göre seri, paralel ve bileşik uyartım gibi türlere ayrılırlar. AA motorların 2 temel alt türü bulunmaktadır. Bunlar elektrik alanı dönüş hızı ile mekanik dönüş hızının aynı olduğu senkron motorlar ve elektrik alanı dönüşü ile mekanik dönüş hızları arasında fark bulunan asenkron motorlardır. Asenkron motorlar tek veya çok fazlı olabilirler. Kapasitörlü ve gölge kutuplu motorlar tek fazlı asenkron motorlar arasında yer alırken, bilezikli ve sincap kafes motorlar çok fazlı asenkron motorlar arasında yer almaktadır [4].



Şekil 1.2. Elektrik motorlarının besleme yöntemine göre sınıflandırılması

1.1. Çalışmanın Amacı

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar sağladıkları avantajlar nedeniyle günümüzde birçok kritik uygulamada tercih edilen ilk motor türleri arasındadır. Teknolojinin son yıllarda çok hızlı gelişmesi ile birlikte uygulamalar, moment kalitesi daha yüksek ve güç yoğunluğu daha fazla olan motorlara ihtiyaç duymaktadır. Bu da SMSM'lerin tasarım süreçlerini daha da zor hale getirmektedir. Diğer motorlardan farklı olarak bu tür mıknatıslı motorlar yüksek moment kalitesi elde edebilmek için tasarım süreçlerinde çok daha fazla dikkat edilmesi gereken motorlardır.

Moment kalitesinin artırılması veya uygulamanın isterlerine bağlı olarak farklı avantajlar sağlanması amacıyla tasarım süreçlerinde hibrit yapı alternatiflerine de

başvurulmaktadır. Hibrit yapılar farklı motor türlerine ait avantajları bir araya getirip, daha kaliteli motorlar ortaya çıkarılmasına yardımcı olmaktadır. Farklı motorların avantajlarını bir araya getirmek ve daha kaliteli motor yapıları elde etmek özellikle tasarım aşamasında birçok zorluğu da beraberinde getirmektedir.

Rotoru YM ve DM yapıların birleşiminden oluşan hibrit bir yapının tasarlanabilmesi için gerekli optimizasyon algoritmalarının geliştirilmesi, hibrit motorun tasarlanması ve test edilerek doğrulanması bu tezin en önemli amaç ve hedefidir. Bu amacın gerçekleştirilebilmesi için öncesinde gerçekleştirilmesi gereken küçük hedefler bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla SM motorlar için relüktans tabanlı modellemenin yapılması, DM bir takım tezgahı motoru tasarlanması ve doğrulanması, hibrit yapı konseptinin önerilmesi ve detay çalışmaları, yarı SEA tabanlı optimizasyon algoritması geliştirilmesi ve YM motorda uygulanarak prototipinin üretilmesi ve test sonuçlarının doğrulanmasıdır. Bu adımların her birinin eksiksiz tamamlanmasından sonra tez çalışmasının asıl amacı olan yeni hibrit yapının optimum boyutlarda tasarlanması, prototipinin üretilmesi ve deneysel doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Yapılan literatür araştırmalarına göre literatürde farklı tip hibrit yapı çalışmaları olmasına rağmen, aynı mil üzerinde YM ve DM motor rotor segmentlerinin bir araya getirilmesi ile oluşturulan hibrit yapı bulunmamaktadır. Tez kapsamında önerilen yeni hibrit yapı sayesinde hem yerli hem de uluslararası çalışmalarda bulunmayan bu yeni yapının literatüre kazandırılması hedeflenmektedir. Bu tez çalışmasının amaçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- SM motorlara ait relüktans tabanlı manyetik modelleme çalışmalarının yapılması ve örnek bir motor üzerinde uygulanması,
- DM bir takım tezgahı motoru tasarlanması, prototip üretilmesi ve doğrulanması,
- Yeni bir hibrit motor tasarımının önerilmesi ve üretilen prototip ile kavramsal doğrulama çalışmalarının yapılması,
- Segmentli yapıların tasarımında kullanılması amacıyla yarı SEA tabanlı bir optimizasyon algoritmasının geliştirilmesi,
- Yarı SEA tabanlı algoritmanın, YM referans takım tezgahı motoruna uygulanması, prototipinin üretilmesi ve deneysel doğrulama çalışmaları,

- DM ve YM rotor segmentlerinden oluşan, yarı SEA tabanlı algoritma ile optimizasyonu yapılarak segment boy ve açıları elde edilen hibrit yapının tasarımı, prototipinin üretilmesi ve deneysel doğrulama çalışmalarıdır.

1.2. Çalışmanın Yöntemi

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar beş fazda gerçekleştirilmiştir. Bu fazlar ve alt aşamaları aşağıda verilmiştir:

Faz-1: SM motorlara ait relüktans tabanlı manyetik modelleme çalışmaları ve YM örnek bir motor üzerinde uygulama çalışmalarının yapılması.

Faz-2: DM takım tezgahı motor tasarımı ve doğrulama çalışmalarının yapılması.

- a. Örnek YM takım tezgahı motoruna ait manyetik SEA' ların yapılması.
- b. Takım tezgahı motoru kutup sayısı optimizasyonunun yapılması.
- c. Alternatif DM motor yapı alternatiflerinin ön tasarım çalışmalarının yapılması.
- d. DM motor detaylı SEA' larının yapılması.
- e. Magtrol marka motor test sisteminin kurulması.
- f. DM yapıya ait prototip üretimi ve performans testlerinin yapılması.

Faz-3: Yeni bir hibrit yapı önerilmesi ve kavramsal doğrulama çalışmalarının yapılması.

Faz-4: Yarı SEA tabanlı optimizasyon algoritmasının geliştirilmesi ve farklı segment boy ve kaykçı açılarına sahip YM motora uygulanarak yeni bir tasarımın yapılması. Yeni tasarıma ait prototip üretimi ve deneysel doğrulama çalışmalarının yapılması.

Faz-5: Yarı SEA tabanlı algoritma kullanılarak hibrit takım tezgahı motoru tasarımının yapılması. Hibrit motor prototip üretimi ve deneysel doğrulama çalışmalarının yapılması.

1.3. Önceki Çalışmalar

1980'li yıllar itibari ile mıknatıs ve güç elektroniğinde kaydedilen önemli gelişmeler sayesinde sürekli mıknatıslı senkron motorların kullanım oranları hızlı bir şekilde artmıştır. Bu tür motorların yüksek güç yoğunluğu sağlamaları, yüksek verimleri, sessiz çalışmaları, bakım gerektirmemeleri gibi çeşitli avantajları bulunmaktadır [5].

Bu avantajları nedeniyle SM motorlar fırçalı DA, asenkron ve relüktans motor türlerine göre daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır.

Sürekli mıknatıslı senkron motorların yaygınlaşmaya başlaması ile birlikte bu tür motorlar özellikle hassas konumlama ve sabit hız ihtiyacı olan özel makinelerde de yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle üretimin 7 gün 24 saat yapıldığı seri üretim uygulamalarında hem sağladığı yüksek performans hem de yüksek verim avantajları nedeniyle ilk sırada tercih edilmeye başlanmıştır. SM motorların kullanım alanlarının hızla artması nedeniyle bu konuda yapılan akademik çalışmalar da çok hızlı şekilde artmaya başlamıştır [3].

Kim ve diğ. tarafından gerçekleştirilen çalışmada yüksek hızlarda YM rotorların dezavantajlarına değinilerek, bu dezavantajları ortadan kaldıracak bir DM motor tasarımı yapılmış ve sonuçlar örnek motor değerleri ile karşılaştırılmıştır [6]. Ma ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, rotor paketi başına ve sonuna yerleştirilerek hareket ettirilen demir diskler sayesinde, DM motorun rotorunda yer alan mıknatısların belirli oranlarda kısa devre olmaları sağlanmıştır [7]. Böylece motorun daha yüksek hızlara çıkması ve verimin artırılması hedeflenmiştir.

Bianchi ve diğ. 1kw gücünde, 20-40 bin rpm hız aralığında çalışan DM motor tasarımı ile uğraşmışlardır [8]. Farklı mıknatıs malzemeleri ve stator alternatifleri kullanarak en iyi sonucu hem Maxwell Denklemleri ile çalışarak hem de SEA yaparak oluşturmaya çalışmışlardır. EL-Refaie ve Jahns tarafından gerçekleştirilen çalışmada 4 farklı DM motor yapısı geniş sabit güç bölgesi elde etmek için tasarlanmıştır [9]. Tasarıma ait prototip üretilmiş ve testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar örnek motor değerleri ile karşılaştırılmış ve zıt EMK, maksimum hız, motor ağırlığı, motor fiyatı ve mıknatıslardaki Eddy kayıpları açısından avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Geest ve diğ. SM motor sargılarının 1 tel veya paralel tellerle sarılması durumları için kısa devre veya açık devre oluşması durumları için oluşabilecek hataların şiddetleri incelenmiş ve karşılaştırmalı olarak verilmiştir [10]. Oskar ve diğ. el aletler için geliştirilmiş, yüksek hızlı, oluksuz SM motor için eksenel yöndeki kaçak akıların analizi üzerine çalışmışlardır [11]. Messenger ve Binder yüksek hızlı rulmansız SM

motorlar için geleneksel ve modifiye edilmiş sargı yapılarını analitik olarak karşılaştırmışlardır [12].

Schneider ve diğ. beş farklı YM motor tasarımını, alan zayıflatması uygulanması durumunda ulaşabilecekleri maksimum hız açısından karşılaştırmışlardır [13]. Huang ve diğ. 20 bin rpm hızındaki YM motor için manyetik malzemelerin laminasyonlu ve SMC türünden olmaları durumları için karşılaştırmışlardır [14]. Karşılaştırmalar hem SEA sonuçlarına göre hem de prototip motorların test sonuçlarına göre yapılmıştır.

Dwari ve diğ. yüksek ivmeli motor için halbach dizilimli mıknatıslar kullanarak farklı kombinasyonların performanslarını incelemiş ve nihai bir tasarım elde etmişlerdir [15]. Jang ve diğ. çok yüksek hızlara çıkabilmek için nüvesiz stator kullanmışlar ve iki farklı rotor alternatifini oluşturarak bu yapıların karşılaştırmalarını yapmışlardır [16]. Rotor alternatiflerinden birinde mıknatıslar radyal yönde mıknatıslanmış, diğerinde ise halbach dizi şeklinde yerleştirilmiş mıknatıslar kullanılmıştır. Bianchi ve diğ. farklı çıkıntılı rotor topolojilerinin sürücü tarafındaki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir [17].

Fengxiang ve diğ. yüksek hızlı mikro türbin uygulamaları için yüksek hızlarda problem çıkarmayacak tasarım geliştirmişlerdir [18]. Rotor yapısı, stator nüvesinin dizaynı, sargılar ve rulmanlar göz önünde bulundurularak optimum bir tasarım elde edilmeye çalışılmıştır. Gerlando ve diğ. yüksek hızlı SM mikro motor tasarımı için hedeflenen boyutlarda tasarım geliştirmişlerdir [19]. Geliştirme aşamasında farklı motor ölçülerinde optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir.

Wang ve diğ. yüksek hızlı SM makinelerin tasarımı ile ilgili çalışma gerçekleştirmişlerdir [20]. Yüksek hızlardan kaynaklı rotorda oluşabilecek problemler ve yüksek hız kayıpları göz önünde bulundurularak tasarım çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Rilla ve diğ. 60kw gücünde, 9000rpm hızında, YM motor tasarımı gerçekleştirmişlerdir [21]. Gıares yüksek hızlı uygulamalar için hacim, kütle, demir kayıpları, farklı manyetik malzemeler, oluklu ve oluksuz stator yapıları, paralel sargı veya tekli sargı,... gibi parametreleri göz önüne alarak tasarım geliştirme çalışması yapmıştır [22].

Hwang ve diğ. yüksek hızlı SM motor için vuru mu momenti minimizasyonu yaparak, elde ettikleri en iyi sonuç için rotor yapısının yüksek hızlarda maruz kalacağı kuvvetleri modellemişlerdir [23]. Maksimum hızda rotorun bütünlüğünü koruyup koruyamayacağını incelemişlerdir. Üretilen prototipin testleri ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak sonuçların uyumluluğu irdelenmiştir. Schatzer ve Binder Vekopt Algoritması ile yüksek hızlı SM motor tasarım optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir [24].

Phyu ve Chao mıknatıslamanın yüksek hızlı SM motor tasarımına etkisinin incelenmesi ile ilgili çalışma gerçekleştirmişlerdir [25]. Mıknatıs malzemesine farklı mıknatıslama yöntemleri uygulanarak bunların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları irdelenmiştir. Reddy ve diğ. DM motorlarda çok katmanlı sargıların etkilerini farklı oluk/kutup kombinasyonları için incelemişlerdir [26]. İnceleme sonucunda rotor kayıpları, moment çıkışı ve verim açısından avantaj ve dezavantajlarını özetlemişlerdir. Ayrıca prototiplerle simülasyon sonuçlarını karşılaştırmışlar ve sonuçları irdelenmişlerdir. EL-Refaie ve diğ. yüksek hızlı motorlarda faz sayısının kayıplara etkilerini incelemişlerdir [27]. Farklı faz sayıları ve oluk/kutup kombinasyonları için sargı faktörlerini incelemişlerdir.

Jang ve diğ. yüksek hızlı fırçasız DA motor için elips şekilli mıknatıs kullanılması ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [28]. Deak ve diğ. 45kw gücündeki bir SM motorun mıknatıslarını segmentli yaparak ve soğutma ceketini ekleyerek sabit güç bölgesini genişletmişlerdir [29]. Böylece aynı motordan 55.2kW güç alınmasını sağlamışlardır. Sonuçlar hem analiz hem de prototip test sonuçları olarak elde edilmiş ve sonuçların uyumu irdelenmiştir. Ren ve diğ. SM bir motorun daha geniş sabit güç bölgesinde çalışabilmesi için düşük hız ve yüksek hızda farklı sargı yapılarının kullanıldığı yeni bir motor tasarımı yapmışlardır [30]. Tasarlanan motorun prototipi üretilmiş ve sonuçların uyumu irdelenmiştir.

Moghaddam 200' den fazla sayıda SM makinenin verilerini raporlamışlardır. Raporda farklı tip motorların maksimum güç-hız kapasiteleri, farklı makine türlerinin potansiyel uygulamaları, termal, elektromanyetik, mekanik, kontrol, inverter ve güç elektroniği limitleri gibi konuları detaylı olarak incelemişlerdir [31]. Schneider ve diğ. kutup çifti sayısı kombinasyonunun yüksek hızlı rulmansız motor performansına

etkisini incelemişlerdir [32]. Yüksek hızlarda rotorun maruz kaldığı kuvvetler ve kayıp mekanizmaları hem analitik olarak hem de SEA yöntemi ile incelenmiştir. Üretimi yapılan 40kW, 40 bin rpm rulmansız motor test sonuçları ile simülasyon sonuçlarını kıyaslamışlardır.

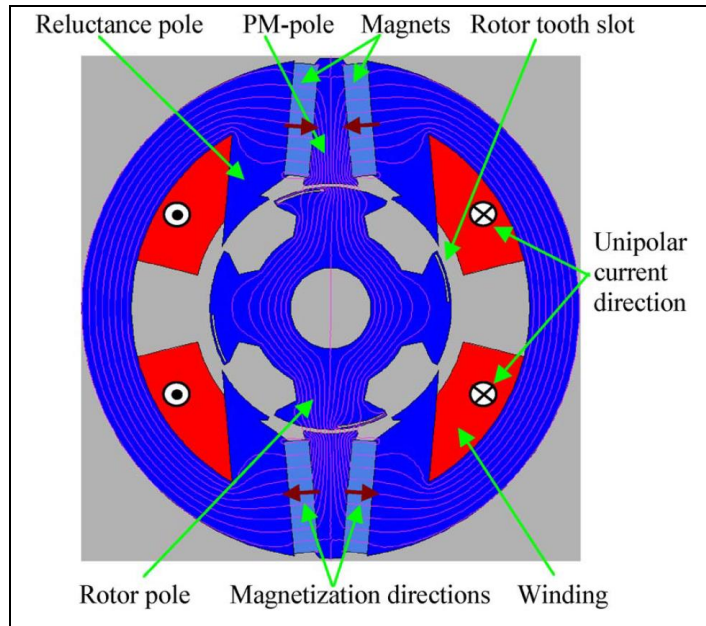
Bianchi ve Bolognani DM motorların tasarımında kritik öneme sahip olan konulara değinmiş ve farklı deneysel sonuçlara yer vererek çalışmalarını detaylandırmışlardır [33]. Tessarolo ve diğ. çubuk tip rotora sahip özel bir DM motor tasarımı yapmışlardır [34]. Rotor nüvesinin başına ve sonuna yerleştirdikleri yaylı bir mekanizma sayesinde motor hızı arttıkça merkezkaç kuvveti etkisiyle dışa doğru giden demir nüve mıknatısları kısa devre ederek hava aralığındaki manyetik alanı düşürmeyi sağlamıştır. Böylelikle I_d akımı sürücü tarafında sürekli verilmek zorunda kalınmayıp, olası mıknatıs bozulmalarının önüne geçilmiştir. Yapılan tasarım için prototip üretilerek testleri yapılmıştır. Simülasyon sonuçları ile yapılan testlerin uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir.

Munteanu ve diğ 40kW gücündeki yüksek hızlı rulmansız bir motor prototipini test etmişler ve simülasyon sonuçları ile kıyaslayarak ne derecede örtüştüğünü irdelemişlerdir [35]. Borisavljevic ve Ferreira yüksek hızlı SM motorlarda hız limitlemesinin nedenleri üzerinde durmuşlardır [36]. Bu limitlemelere neden olan termal, elastik ve rotor dinamiklerini açıklamış, sınıflandırmış ve basit mekanik parametrelerle ilişkilendirmişlerdir. Wang ve diğ. yüksek hızlı SM motor rotor yapısının maksimum hızda bütünlüğünü koruyabilmesi için rotor dış yüzeyine yerleştirilen kılıfın matematiksel modellemesi ve mekanik analiz çalışmalarını SEA yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir [37].

Cheng ve diğ. çok yüksek hızlı bir motorun optimum tasarımını yapmışlardır [38]. Tasarımda rotor dış yüzeyine yerleştirilen, manyetik olmayan malzemenin hangi sıklık derecesinde monte edilmesi gerektiği ile ilgili hem analitik hem de SEA analiz çalışmaları yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda nihai kılıf tasarımı elde edilmiştir. Bu çalışma ile çok yüksek hızlarda, mıknatıslarla rotor kılıfı arasında merkezkaç kuvvetinden dolayı oluşacak stres birikimi minimize edilmeye çalışılmıştır. Mirzaei ve Binder yüksek hızlı SM motorlarda mıknatıs miktarını azaltma ile ilgili yaptıkları çalışmada manyetik olarak 3 farklı rotor topolojisi oluşturmuşlar ve bu topolojilerin

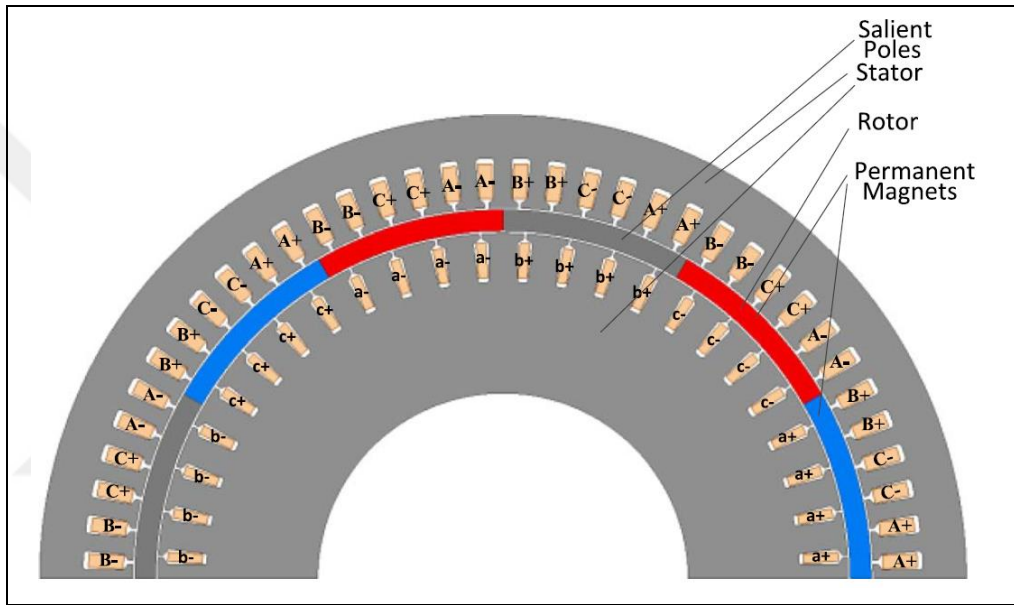
bir birlerine göre avantaj ve dezavantajlarını analiz etmişlerdir [39]. Yüzeğe gömülü mıknatıslı yapının birçok avantajına değinmişler fakat küçük hava aralığı nedeniyle oluşan gürültü artımını da dezavantaj olarak belirtmişlerdir. Xue ve diğ. stator oluklarının ve hava aralığının yüksek hızlı, fırçasız SM motorlara etkisini incelemişlerdir [40]. Çalışma kapsamında 2 kutup, 3 fazlı anma gücü 7.5kW, hızı ise 30 bin rpm olan bir motor tasarlanmış ve farklı hava aralıkları ile oluk sayısı değerlerinin motor performansına etkileri incelenmiştir.

Liao ve diğ. alan uyarımının statorda yer alan ve dönmeyen mıknatıslarla sağlandığı, çift çıkıntılı elektrik makine türü önermişlerdir [41]. Önerilen makinenin özelliklerini araştırmak için doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Önerilen çift çıkıntılı motor ile asenkron motor arasında verim, moment yoğunluğu, moment-akım oranı, moment-atalet gibi büyüklükler için karşılaştırmalar yapılmış ve önerilen motor ile mevcut motorlara göre performans avantajı sağlanabileceği gösterilmiştir. Lu ve diğ. pompa uygulaması için yeni tip, düşük maliyetli hibrit anahtarlamalı relüktans motoru (Şekil 1.3) önermiştir [42]. Motor tek fazlıdır ve hem relüktans hem de mıknatıs kaynaklı moment bileşenlerinden faydalanmasını sağlayan tek fazlı bir sürücü üzerinden sürülmektedir. Motor detaylı SEA' ları, prototip üretimi ve deneysel doğrulaması yapılmıştır. Önerilen hibrit motor sayesinde geleneksel anahtarlamalı relüktans motorlara göre daha yüksek moment yoğunluğu sağlanmıştır.



Şekil 1.3. Tek fazlı, hibrit anahtarlamalı relüktans motoru ve bileşenleri [42]

Wang ve diğ. hem standart senkron motor hem de mıknatıslı motorların avantajlarını birleştiren yeni bir motor önermişlerdir [43]. Motor içerisinde bulunan iki farklı sargı seti sayesinde farklı senaryolarda çalıştırılıp, daha geniş çalışma aralığına sahip bir motor tasarımı elde edilmiştir. Motor tasarımı Şekil 1.4' de gösterilmiştir. Mellor ve diğ. havacılık uygulamalarında kullanılmak üzere, geniş hız aralığına sahip, değişken relüktanslı ve mıknatıslı yapıların bir araya gelerek oluşturduğu hibrit bir generatör tasarlamışlardır [44]. Tasarıma ait prototip üretilerek deneysel doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

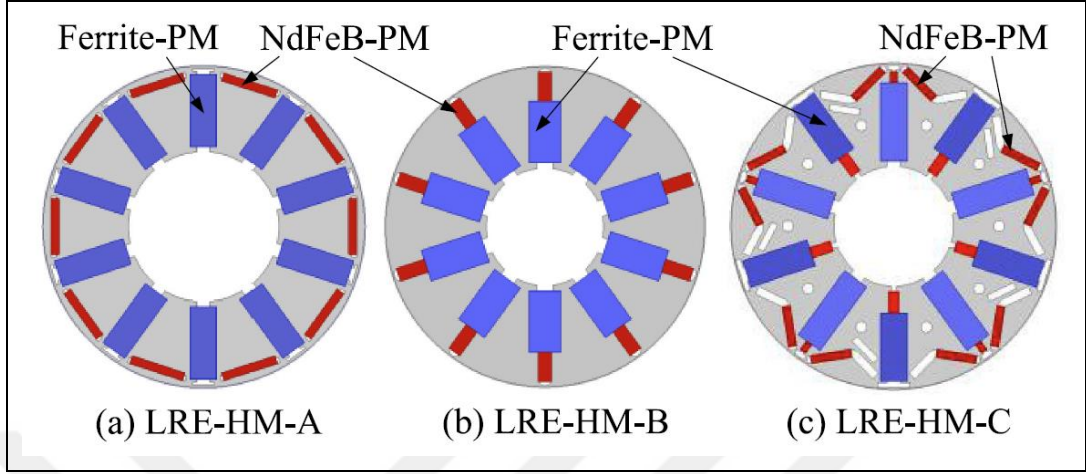


Şekil 1.4. Tek fazlı, hibrit anahtarlama relüktans motoru ve bileşenleri [43]

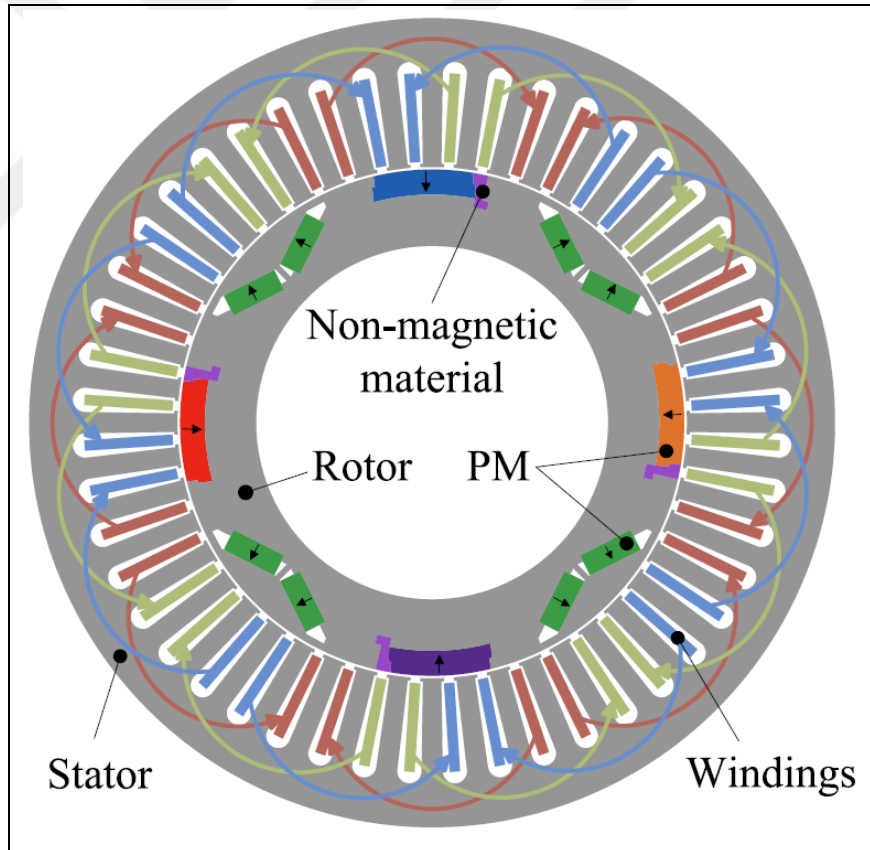
Chen ve diğ. rotor yapısında ferrite ve NdFeB türü mıknatısların bir arada kullanılarak daha az NdFeB türü mıknatıs kullanımı sağlayan, farklı hibrit yapı önerilerinde bulunmuşlardır [45]. Önerilen yapıların birbirlerine göre avantajları irdelenmiş ve sonuçlar detaylı olarak referans aldıkları standart motor ile karşılaştırılmıştır. Önerilen farklı hibrit yapı topolojileri Şekil 1.5' de verilmiştir. Zhou ve diğ. hafızalı bir hibrit motor tasarımı geliştirmiştir [46]. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, AlNiCo ve Ferrit türü malzemelerin zorlayıcı kuvvetleri açısından motor performansına etkileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Xu ve diğ. aynı rotor laminasyonu üzerinde dahili mıknatıslı ve yüzeye gömülü kutupların yer aldığı hibrit yapıya ait relüktans tabanlı manyetik eşdeğer devre analizlerini gerçekleştirmişlerdir [47]. Yapılan analitik çalışma sonuçları, SEA

sonuçları ile karşılaştırılmış ve modellemenin doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Analizleri yapılan yapıya ait görüntü Şekil 1.6' da verilmiştir.



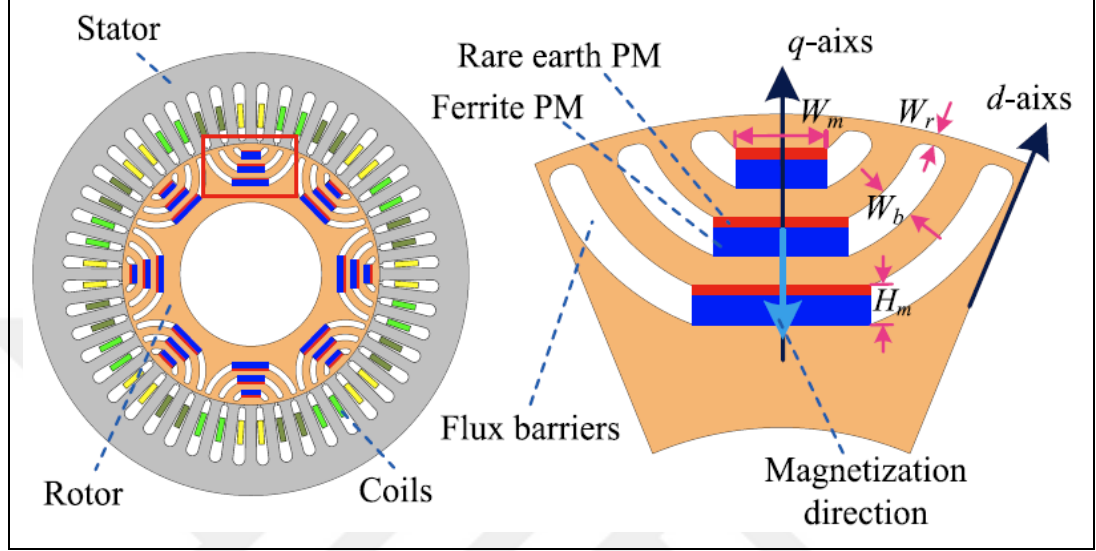
Şekil 1.5. İki farklı tip mıknatısa sahip hibrit rotor yapısı topolojileri [45]



Şekil 1.6. Aynı rotor laminasyonu üzerinde dahili mıknatıslı ve yüzeye gömülü kutupların yer aldığı hibrit yapı örneği [47]

Wu ve diğ. hibrit, mıknatıs destekli, senkron bir relüktans motor tasarımı gerçekleştirmişlerdir [48]. Rotor yapısında Ferrite ve NdFeb türünden iki farklı

mıknatıs bulunmaktadır. Mıknatıslara ve akı bariyerlerine ait boyut optimizasyonları yapılarak daha düşük vuru mu momenti ve daha yüksek moment kalitesi elde edilebilmesi için optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Önerilen hibrit motor yapısı ve optimizasyonları yapılan parametreler Şekil 1.7’ de verilmiştir.

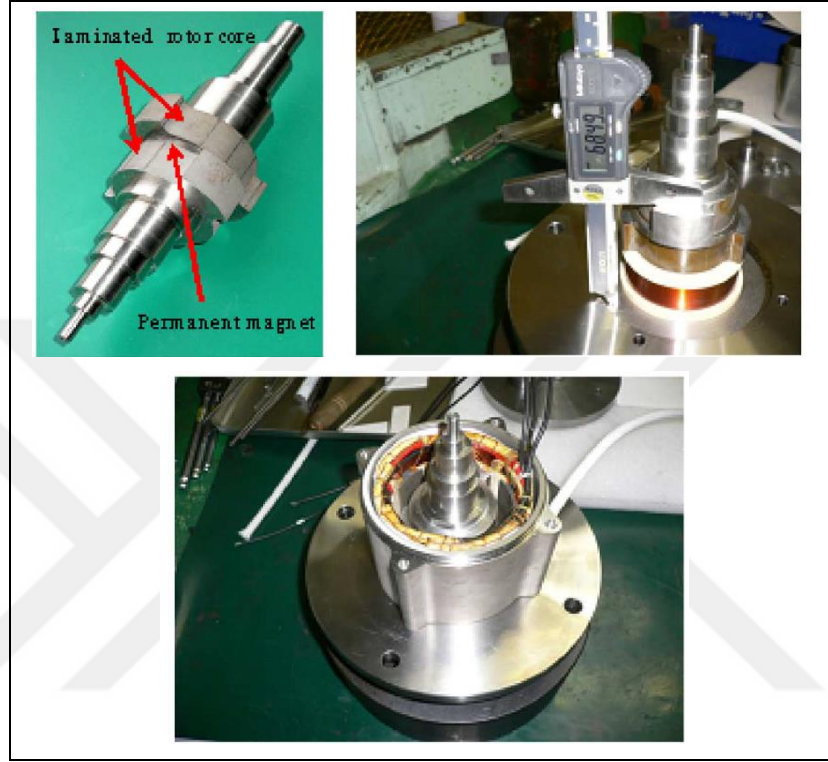


Şekil 1.7. İki farklı mıknatıs türünün aynı kutupta yer aldığı mıknatıs destekli anahtarlamalı relüktans motoru örneği[48]

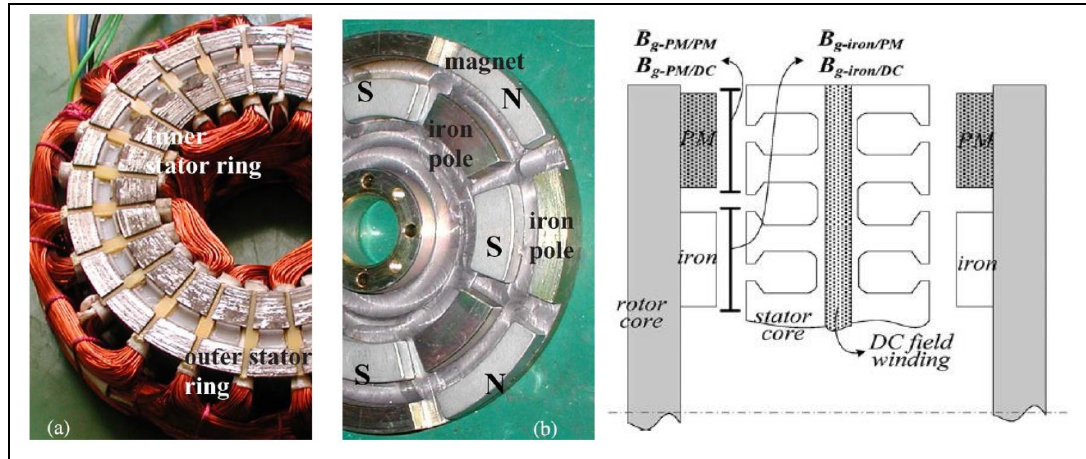
Gu ve diğ. rotoru, YM ve relüktans motor rotorlarından oluşan yeni bir hibrit yapı önermişlerdir [49]. Relüktans rotor kısmı laminasyonların aksel yönde dizilmesi ile elde edilmiştir. Önerilen yeni yöntem ile daha ekonomik çözümler sunulması amaçlanmıştır. Jagiela ve diğ. yüksek hızlı, hibrit, histerisis bir motor tasarımı gerçekleştirmişlerdir [50]. Motor hızı 50.000rpm seviyelerinde, en az 500w çıkış gücü sağlayan, rotorunda histerisis yüzük bulunan bir motor üzerinde çalışmışlardır. Motora ait SEA modellemeleri, optimizasyonları, prototip üretimi ve doğrulama çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Sridharbabu ve diğ. yüksek hızlı hibrit bir iş mili motoru tasarımına ait optimizasyonlar yaparak daha iyi performans sonuçları elde etmeye çalışmışlardır [51]. Çift beslemeli bir yapıyı bünyesinde barındıran hibrit motor için çeşitli SEA’ lar yapılmış ve tasarımda problemleri görülen yerlerde iyileştirmeler yapılmıştır. Üretilen hibrit motor prototipi Şekil 1.8’ de verilmiştir.

Aydın ve diğ. hibrit uyartımlı, aksel akılı, sürekli mıknatıslı bir senkron motor tasarımı, prototip üretimi ve deneysel doğrulama çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir [52]. Rotor üzerinde mıknatısların yanı sıra demir kutuplar kullanılmış ve bu

kutupların Br değerlerini statora yerleştirdikleri bir DA sargısı ile kontrol etmişlerdir. Böylelikle hava aralığı akı yoğunluğunu değiştirmeyi başarmışlar ve motor karakteristiğinde değişiklik yapabilmışlerdir. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen motor Şekil 1.9' da gösterilmiştir.



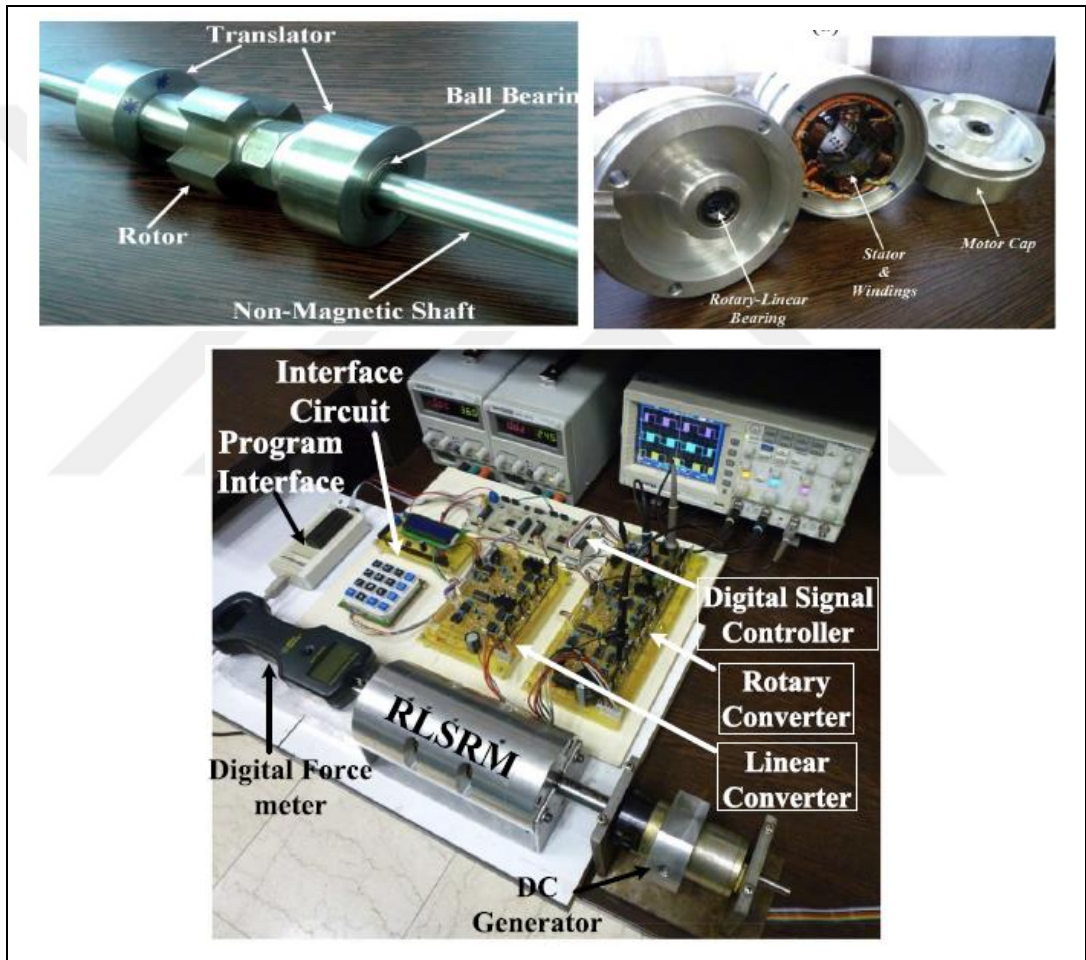
Şekil 1.8. Yüksek hızlı hibrit iş mili motoru prototipi [51]



Şekil 1.9. Demir kutup ve kutbun kontrol edildiği DA sargıya sahip hibrit eksenel akılı motorun prototip görüntüsü ve bileşenleri [52]

Nezamabadi ve diğ. hibrit hareket kabiliyetine sahip yeni bir anahtarlamalı relüktans motoru tasarımı, prototip üretimi ve deneysel doğrulama çalışmaları

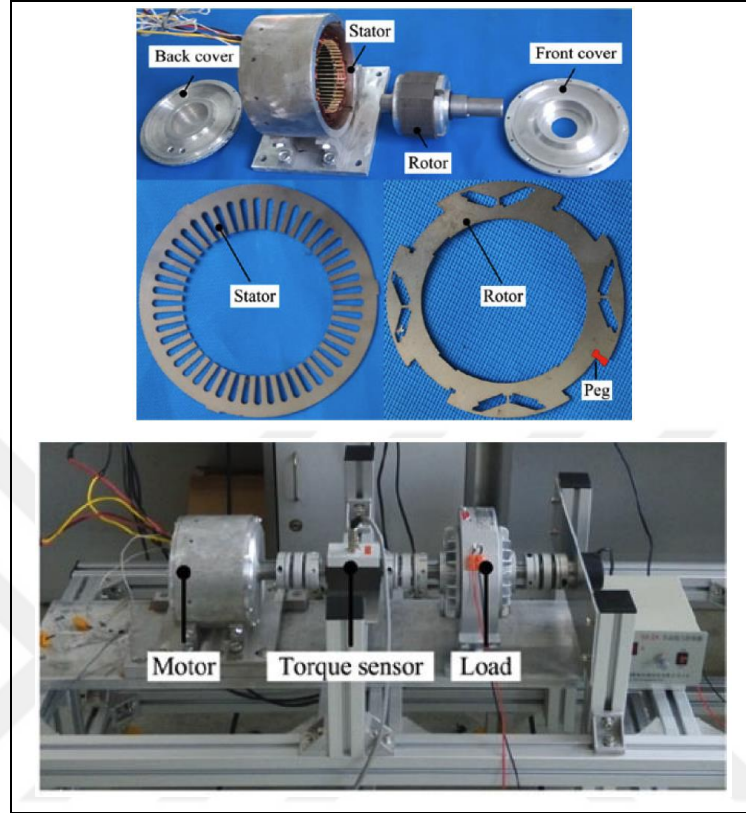
gerçekleştirmişlerdir [53]. Geliştirilen motor 3 farklı tarzda hareket edebilme kabiliyetine sahiptir. Bunlar eksen dairesel hareket, doğrusal hareket ve aynı anda hem dairesel hem de doğrusal olarak hareket etme kabiliyetleridir. Yapılan detaylı analizler sonrası prototip üretimi yapılmış ve test edilerek sonuçlar doğrulanmıştır. Geliştirilen yapı örneği ve test sistemi Şekil 1.10’ da gösterilmiştir. Hloui ve diğ. hibrit uyarımlı bir motorun sargılarının kısa devre hatası olması durumunda nasıl davranacağı ile ilgili modelleme çalışmaları gerçekleştirmişlerdir [54]. Elde edilen sonuçlar hatasız durum ile karşılaştırılmış ve performans seviyesindeki düşüş miktarı irdelenmiştir.



Şekil 1.10. Farklı çalışma modlarına sahip hibrit anahtarlamalı relüktans motor prototip görüntüsü ve test sistemi [53]

Liu ve diğ. rotor yapısında yaptıkları değişiklikle elde ettikleri hibrit motor sayesinde, moment kabiliyetinin artırılması ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [55]. Aynı rotor laminasyonu üzerinde dahili mıknatıslı ve yüzeye gömülü mıknatıslar kullanılarak hibrit bir yapı elde etmişlerdir. Elde edilen yapı için prototip üretimi ve

deneysel doğrulama çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Prototip motor ve test sistemi Şekil 1.11’ de gösterilmiştir.

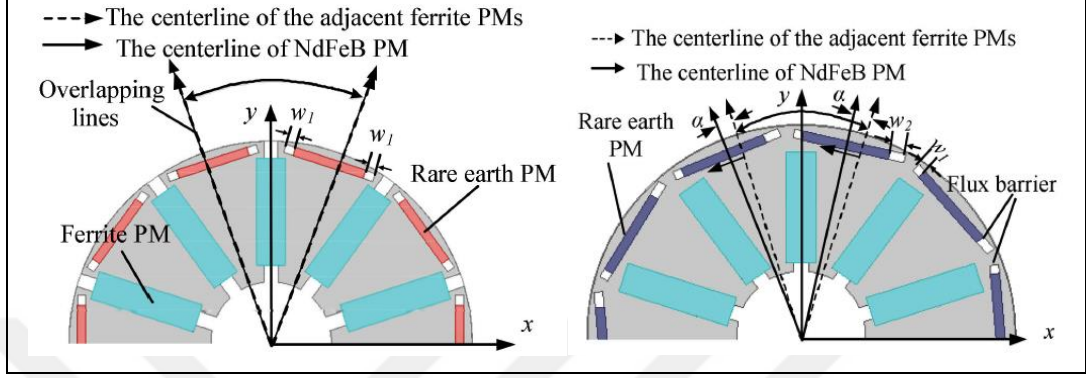


Şekil 1.11. Aynı rotor laminasyonu üzerinde iki farklı tür kutbun bulunduğu yapıya ait prototip motor ve test sistemi görüntüsü [55]

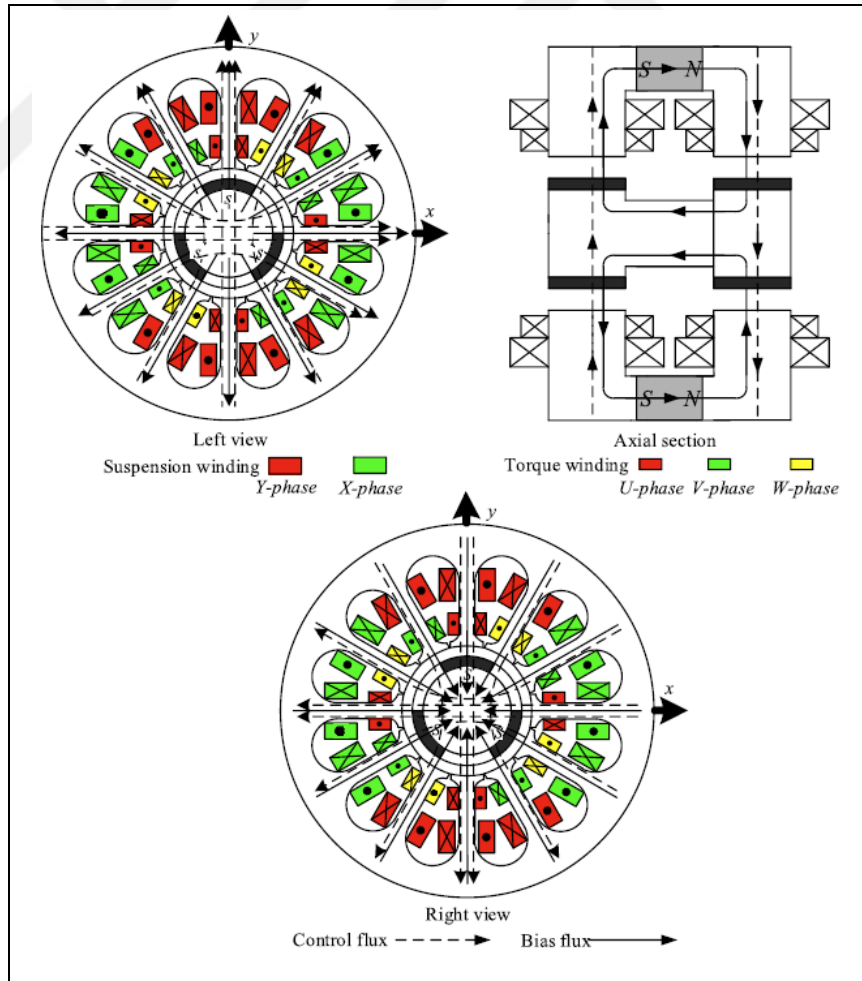
Zeng ve diğ. daha fazla çıkış momenti elde edebilmek için asimetrik rotor yapısına sahip hibrit bir motor önermişlerdir [56]. Rotor üzerinde yer alan ferrite ve NdFeB mıknatıslar sayesinde daha fazla moment elde edilmesi hedeflenmiştir. Mıknatıs boyutları ve yerleşimi ile ilgili detaylı SEA’ lar gerçekleştirilmiş ve farklı tasarım alternatiflerinin karşılaştırmaları yapılmıştır. Önerilen yönteme ait farklı görüntüler Şekil 1.12’ de verilmiştir. Zhang ve diğ. rulmansız sürekli mıknatıslı hibrit bir motor modellemesi ve analizi üzerine çalışmışlardır [57]. Yapıya ait denklemler verilerek detaylı SEA’ lar gerçekleştirilmiştir. Önerilen hibrit motora ait prototip üretilerek, doğrulama testleri yapılmış ve sonuçların uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir. Önerilen yapıya ait görüntü Şekil 1.13’ de verilmiştir.

Seo ve diğ. daha yüksek güç yoğunluğu elde edebilmek için, fazladan DA sargısına sahip, eksenel akılı, sürekli mıknatıslı yeni bir hibrit motor tasarımı geliştirmişlerdir

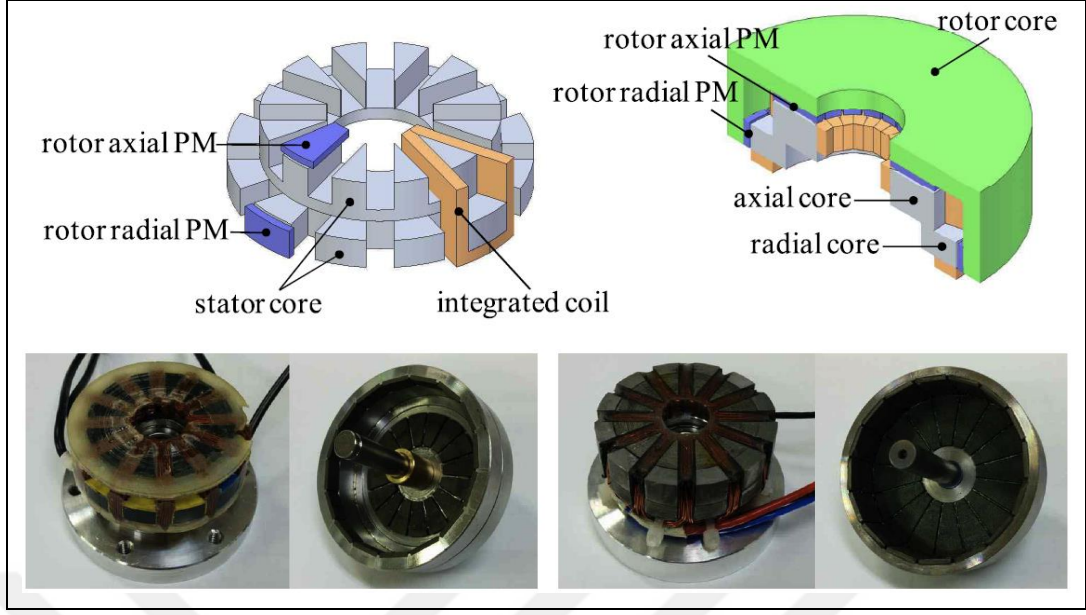
[58]. Farklı parametreler için optimizasyonlar yaparak, en iyi sonucu veren boyutlar için prototip üretimleri gerçekleştirmişlerdir. Test ve simülasyon sonuçları karşılaştırılarak uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir. Yapıya ait 3B mekanik model ve prototip görüntüleri Şekil 1.14' de verilmiştir.



Şekil 1.12. Aynı rotor üzerinde iki farklı mıknatıs türünün yer aldığı farklı tasarım alternatifleri [56]



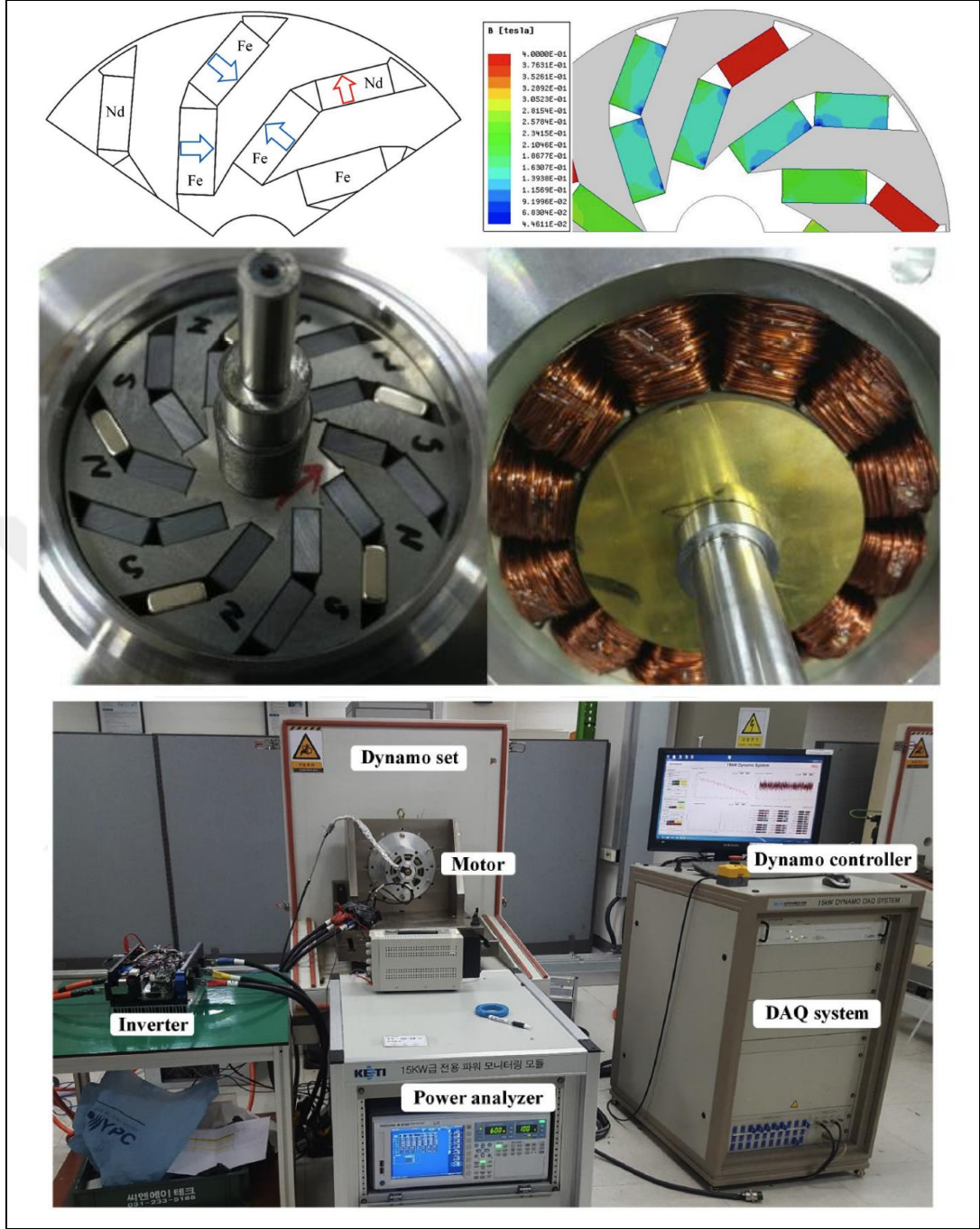
Şekil 1.13. Rulmansız sürekli mıknatıslı hibrit motor tasarımı [57]



Şekil 1.14. Hibrit eksenel akılı motor tasarımı ve prototipi [58]

Yu ve diğ. hibrit mıknatis yapısına sahip dış rotorlu senkron bir motorun optimum tasarımı için çalışma gerçekleştirmişlerdir [59]. Rotorda yer alan iki sıra mıknatis ve akı bariyerleri için boyut optimizasyon çalışmaları yapılarak en iyi sonucu veren boyutlar elde edilmeye çalışılmıştır. Jeong ve diğ. hibrit rotor yapısına sahip SMSM türünden bir motorun performans ve güvenilirliğinin artırılması için optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir [60]. Yapıya ait relüktans tabanlı modelleme ve SEA çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmaları sonucu elde edilen yapı için prototip üretimi ve test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonuçların uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir. Yapıya ait görüntü, üretilen prototip ve test sistemi Şekil 1.15’ de gösterilmiştir.

Xu ve diğ. hibrit rotor yapısına sahip bir motorda maksimum moment elde edilebilmesi için kontrol açısının doğru belirlenmesi amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [61]. Ugale ve diğ. doğrudan şebekeden beslemeli SM motorların hızlanma ve senkron performansının artırılması için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [62]. Önerilen yöntemle ait prototip üretimi ve deneysel doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.15. Hibrit rotor yapısına sahip motor tasarım, prototip ve test sistemi görüntüleri [60]

1.4. Çalışmanın Literatüre Katkısı

Bu tez kapsamında, SM motorlarda geleneksel segmentli kaykya göre farklı avantajlar sağlayan, farklı segment boyu ve segmentler arası açılardan oluşan, yeni rotor yapıları önerilmiştir. Literatürde segmentli yapılarla ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Fakat segment boyları ve segmentler arasındaki açı miktarı hemen hemen bütün çalışmalarda

eşit alınmıştır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen yöntem sayesinde farklı segment boyları ve segment açıları kullanılarak daha düşük vuru mu momenti ve moment dalgalanması elde edilmesinin mümkün olabileceği gösterilmiştir. Bu yönüyle yapılan çalışma literatürde ilk olma özelliğine sahiptir.

Literatürde farklı amaçlar için kullanılan birçok hibrit motor bulunmaktadır. Tez kapsamında rotoru DM ve YM segmentlerden oluşan yeni bir hibrit motor önerilmiştir. Geliştirilen optimizasyon algoritması sayesinde farklı sayıda DM ve YM rotor segmentleri aynı mil üzerinde uygun boy ve açılarda bir araya getirilerek, vuru mu momenti ve moment dalgalanması düşük hibrit yapıların elde edilebileceği gösterilmiştir. Bu hibrit yapıların, YM ve DM motorlara ait avantajları bünyesinde barındırdığı unutulmamalıdır. Bu yönüyle önerilen yeni hibrit yapı ve yapının elde edilme yöntemi literatürde ilk olma özelliğine sahiptir.

Bu tez kapsamında uluslararası bilime sağlanacak özgün katkılar aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır:

- Bu çalışma ile ilk defa farklı rotor segment boyları ve açılarından oluşan SM motor önerilmiştir. Önerilen yapı literatürde ilk olma özelliğine sahiptir.
- Farklı segment boyları ve segment açılarının doğru şekilde belirlenebilmesi için yarı SEA tabanlı bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir.
- Rotoru farklı boy ve açılardaki YM ve DM segmentlerden oluşan yeni bir hibrit yapı önerilmiştir. Önerilen bu yapı literatürde ilk olma özelliğine sahiptir.
- Hibrit yapı rotorundaki YM ve DM segmentlerin doğru şekilde bir araya getirilebilmeleri için yarı SEA tabanlı bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir.
- YM ve DM yapıların birleşiminden oluşan hibrit motor için relüktans tabanlı manyetik modelleme çalışması yapılmıştır.

Ulusal literatüre sağlanacak özgün katkılar ise aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- YM ve DM motorların relüktans tabanlı modellemeleri ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir.
- Ülkemizde farklı birçok uygulama için SM motor tasarımları hem üniversitelerde hem de endüstride yapılmaktadır. Fakat takım tezgahı uygulamalarında kullanılmak

üzere yeni bir DM motor geliştirilmesi ilk defa bu tez kapsamında yapılan çalışma ile gerçekleştirilmiştir.

1.5. Özet

Bu bölümde, endüstride sıkça kullanılan elektrik motorları ile ilgili genel bilgiler verilmiş, literatürde yüksek hızlı motorlar ve hibrit yapılarla ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Ayrıca bu tez çalışmasının amacı, uygulanacak yöntem, daha önce yapılan çalışmalar ve bu tezin literatüre sağladığı katkılar yine bu bölümde verilmiştir.



2. SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON MOTORLAR

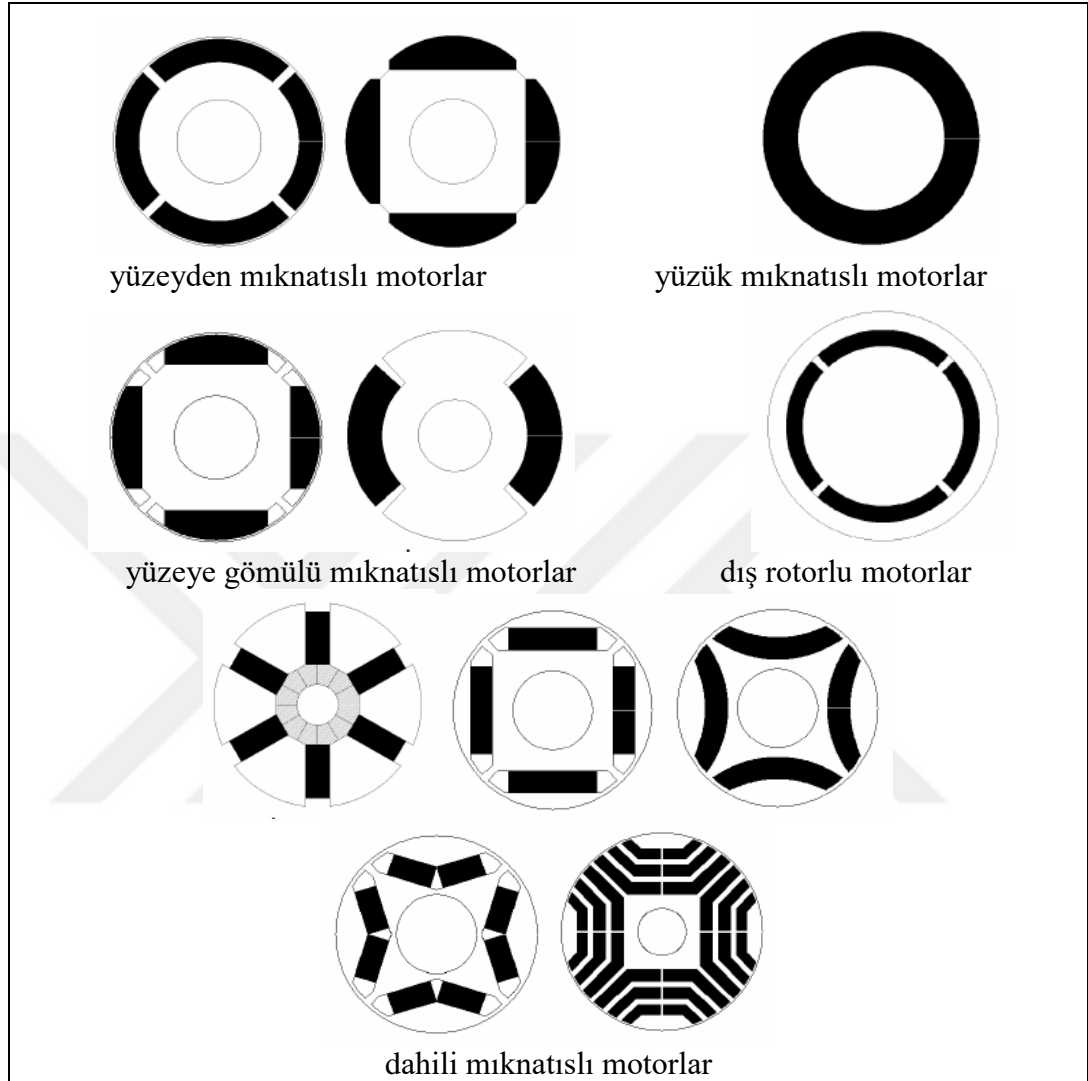
Bu bölümde, sürekli mıknatıslı motor türleri olan yüzeyden mıknatıslı ve dahili mıknatıslı motorlar hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Farklı tür yüzeyden mıknatıslı ve dahili mıknatıslı yapılara ait örnekler gösterilmiş ve bu yapılara ait motor denklemleri verilmiştir. Sürekli mıknatıslı motorların tasarım süreci anlatılmış ve bu tür motorlarda kullanılan malzemeler hakkında bilgi verilmiştir.

2.1. Sürekli Mıknatıslı Motorlar

Senkron motorların rotorlarında ihtiyaç duyulan DA uyarımın mıknatıslar sayesinde yapıldığı motor türleri, sürekli mıknatıslı senkron motor olarak adlandırılmaktadır. Sürekli mıknatıslı senkron motor kavramı tam 1 yüzyıl öncesine, 1920 yılına dayanmaktadır. O yıllarda her ne kadar bu tür motor üzerine uğraşan birçok mühendis ve üniversite bulunsa da malzeme problemleri, güç elektroniği teknolojisinin henüz yeterince gelişmemiş olması ve motor kontrol tekniklerinin yetersizliği nedenleriyle kritik bir ilerleme kaydedilememiştir. 1970'li yıllarda birim hacimdeki güçleri oldukça fazla olan nadir toprak (rareearth) türünden mıknatısların bulunması ile mıknatıslı teknoloji hızla gelişmiş ve bu tür motorların ve generatörlerin kullanımı hızlı bir şekilde artmaya başlamıştır. Özellikle 1980'li yılların başında Genel Elektrik (GE) Laboratuvarlarında yüksek enerjili NdFeB tür mıknatısların keşfedilmesi ve yarı iletken malzemelerin geliştirilmesi ile güç elektroniği alanındaki hızlı ilerleme, SMSM'lerin yeni birçok uygulamada tercih edilmeye başlamalarını sağlamıştır. Böylece SMSM'ler yavaş yavaş asenkron motor ve klasik DC motorların yerlerini almaya başlamışlardır [1-3].

Günümüzde birçok farklı tipte SMSM bulunmaktadır (Şekil 2.1). Bu motorlar yüzeyden mıknatıslı ve dahili mıknatıslı olmak üzere temel temel iki farklı türe ayrılırlar. SMSM'nin karakteristiğini belirleyen temel unsur rotor yapısıdır. Yüksek moment gerektiren uygulamalarda yüzük ya da yüzeye yapıştırılmış mıknatıslı tipler tercih edilirken, geniş sürekli güç bölgesine ihtiyaç duyulan uygulamalarda ise mıknatısları rotorun içerisine gömülü olan dahili mıknatıslı motorlar tercih

edilmektedir. YM motor ile DM motor yapılarına ait temel karşılaştırma Tablo 2.1’ de yapılmıştır [1-3].



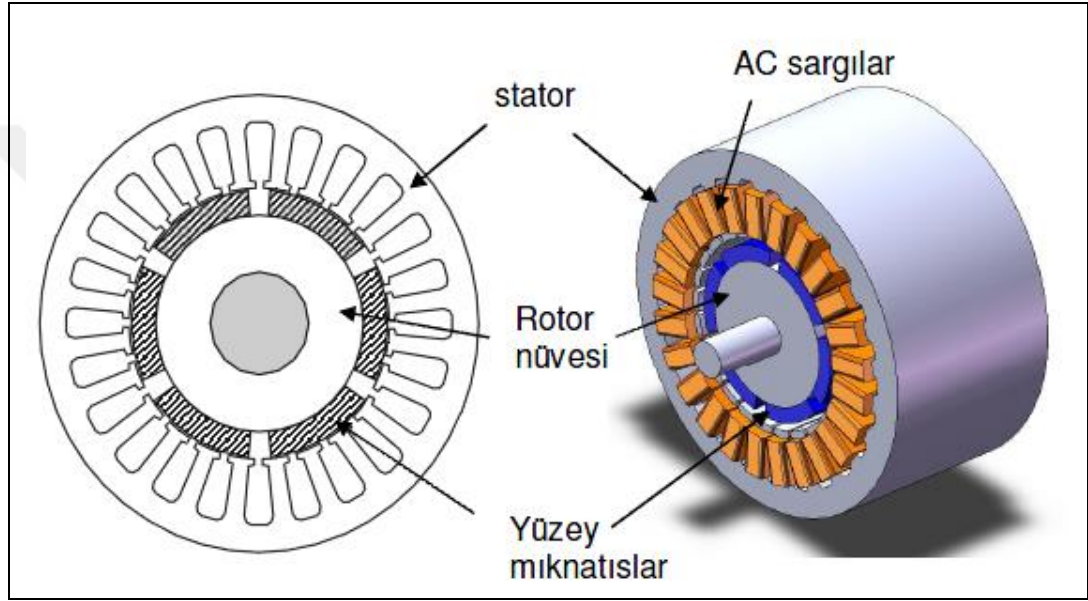
Şekil 2.1. Farklı sürekli mıknatıslı motor yapıları [64]

Tablo 2.1. YM ve DM motor yapılarının karşılaştırması

	Yüzeyden Mıknatıslı Motor	Dahili Mıknatıslı Motor
Tip	Fırçasız DC Motor	SM Servo Motor
Akı dağılımı	Kare veya Sinüzoidal	Genelde Sinüzoidal
Rotor karmaşıklığı	Basit	Karmaşık
Hız limiti	$\sim 1,2 \times w_R$	$\sim 3 \times w_R$ veya daha fazlası
Yüksek hız	Zor	Mümkün
Kontrol edilebilirlik	Nispeten kolay	Karmaşık

2.2. Yüzeyden Mıknatıslı Motorlar

Günümüzde endüstride en çok kullanılan mıknatıslı senkron motorlar mıknatısların rotor yüzeyine gömülü olduğu yüzeyden mıknatıslı senkron motorlardır (YMSM). Özellikle yüksek güç yoğunluğuna sahip NdFeB mıknatısların bu tip motorlarda kullanılmasıyla birçok farklı endüstriyel uygulamada sıkça kullanılmaya başlanmıştır [4-9]. Yüzeyden mıknatıslı senkron motorlara ait genel görünüm Şekil 2.2’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere mıknatıslar rotor yüzeyine yapıştırılmıştır.



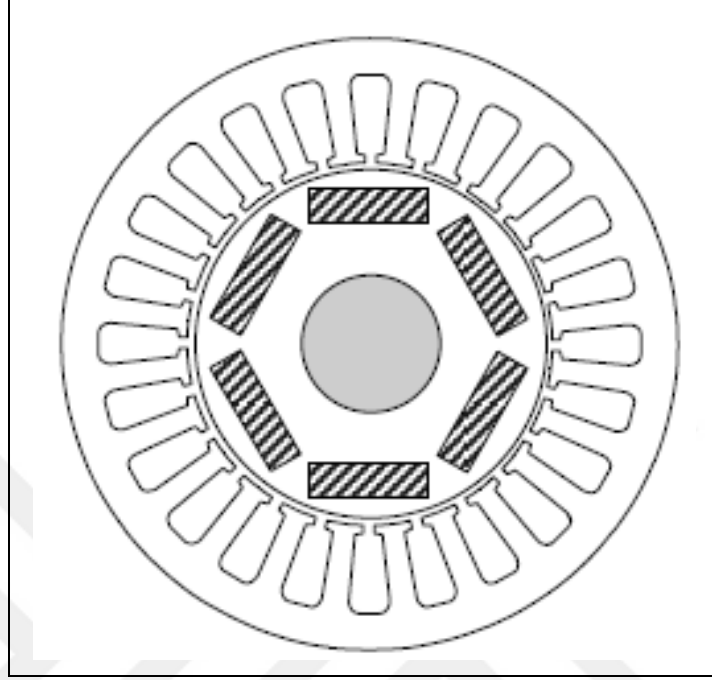
Şekil 2.2. Yüzeyden mıknatıslı AC motor yapısı [65]

Yüzeyden mıknatıslı senkron motorların DC ve asenkron motorlara oranla daha küçük boyutlara ve yüksek moment yoğunluğuna sahip olmaları en belirgin avantajları arasında gösterilebilir. YMSM’ler kullanım alanı itibari ile yüksek moment yoğunluğu gerektiren nispeten düşük hızlı uygulamalarda tercih edilmektedirler [2, 3, 6, 10].

2.3. Dahili Mıknatıslı Motorlar

Dahili mıknatıslı motorlarda kullanılan mıknatıslar rotor nüvesinin içerisine gömülmüştür. Örnek bir dahili mıknatıslı motor Şekil 2.3’ de gösterilmiştir. Dahili mıknatıslı motorlar getirdiği farklı avantajlar nedeniyle farklı uygulamalarda kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Bu tip motorların kullanımının yaygınlaşmasında özellikle güç elektroniği ve kontrol alanındaki gelişmeler etkili olmuştur. Bu gelişmeler

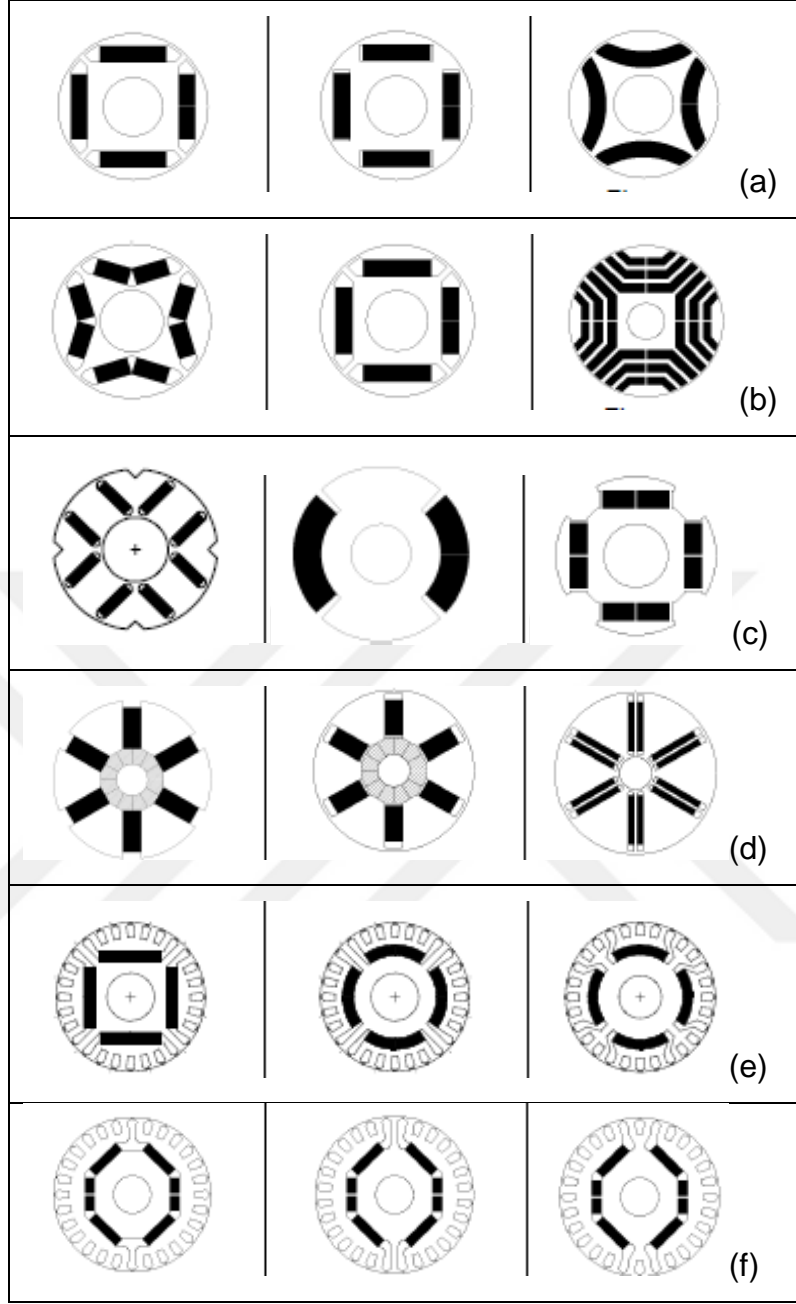
sayesinde özellikle kontrolün daha zor olduğu bu tip motorların kullanılabilirliği artmıştır [1-3].



Şekil 2.3. Dahili mıknatıslı motor ve rotor yapısı [3]

Dahili mıknatıslı motorların bir çok karakteristik avantajları mevcuttur. Boyut olarak fırçalı DA motorlara ve AA asenkron motorlara göre çok daha küçük olmaları, mıknatısların rotor yapısının içine gömülü olmalarının sağladığı mekanik avantaj, paslanmaya karşı dayanım, düşük vuruş momenti, düşük ses ve titreşim seviyesi ve yüksek hızlara çıkabilme özelliği bu motorların en temel avantajları arasındadır. Bu avantajların yanı sıra dahili mıknatıslı motorların dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajlar arasında rotor üretiminin daha karmaşık olması ve beraberinde getirdiği üretim maliyeti, kontrol sisteminin daha karmaşık yapıda oluşu ve sürekli olarak d-eksen akım bileşeninin mevcut olması sayılabilir [3-5].

DM motorların statorları standart yüzeyden mıknatıslı motor statorları ile aynı olduğu için rotor yapılarına göre sınıflandırma daha çok tercih edilir. Farklı DM motor yapıları Şekil 2.4' de gösterilmiştir. En sık rastlanan DMM yapıları klasik tek ve çok katmanlı DMM (a, b, c), demir kutuplu DMM (c), çıkık kutuplu DMM (c), çubuk tip DMM (d) ve hat beslemeli DMM (sincap kafesli DMM olarak da adlandırılır) (e, f) yapılarıdır.

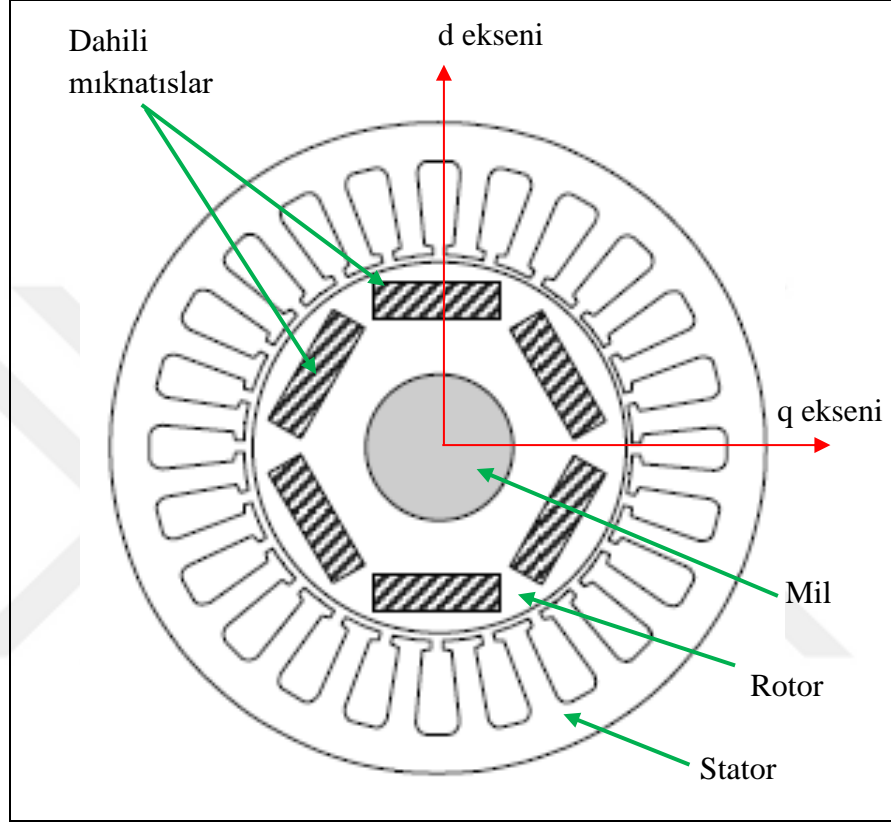


Şekil 2.4. Dahili mıknatıslı motor yapıları [64]

Bu yapılar incelendiğinde her birinin farklı avantaj ve dezavantajları olduğu görülmektedir. Örneğin tek ve çok katmanlı DMM yapıları üretim avantajı ve sahip oldukları geniş sürekli güç bölgesi sebebiyle literatürde ve endüstriyel uygulamalarda sıkça görülmektedir. Diğer taraftan çubuk tip DMM yapılar ise servomotor ve generatör uygulamalarında üretim kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedirler. Hat beslemeli DMM yapıları ise şebeke kaynağından rahatça beslenebilmesi ve klasik sincap kafesli asenkron motorlara göre daha yüksek verime sahip olmaları nedeniyle özellikle asenkron motorun kullanıldığı yerlerde tercih edilmektedir. Ancak üretiminin

karmaşık yapısından dolayı zor oluşu ve maliyetinin de asenkron motorlara göre fazla olması problemleri hala tam olarak çözülemediği [1-3].

Temel DMM yapısı ve bileşenleri Şekil 2.5' de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere DMM statoru manyetik nüve ve AC sargılardan oluşmaktadır.



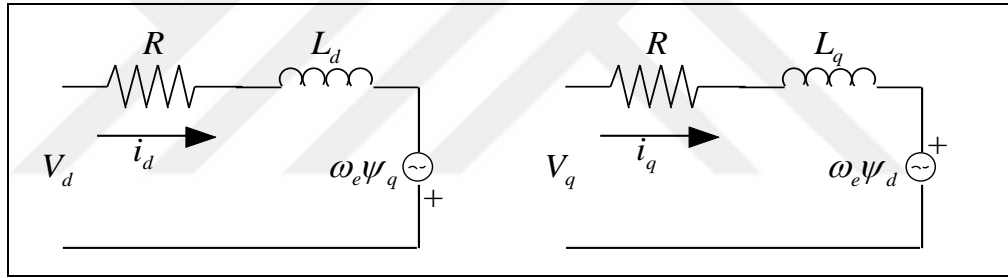
Şekil 2.5. Dahili mıknatıslı motor ve rotor yapısı [3]

Stator yapısal olarak standart AC asenkron motorlardan çok farklı değildir. DMM rotoru ise rotor nüvesi, rotor içine gömülen mıknatıslar ve milden oluşmaktadır. DM yapılarda mıknatıs ve hava aralığı arasındaki bağlantıyı sağlayan küçük köprüler bu tür motorların tasarımında göz önünde bulundurulması gereken en kritik mekanik parametredir. Bu nedenle özellikle mekanik tasarım aşamasında köprülerin olduğu kısımların mekanik analizleri dikkatle yapılmalıdır. DMM' lerde d ve q eksenlerin belirlenmesi diğer motorlara göre bazı farklılıklar içermektedir. N veya S kutbunun oluşturduğu akı motorun d eksenini oluştururken, bu eksenin elektriksel olarak 90 derece ilerisi ise q-eksenini oluşturmaktadır. Farklı bir ifadeyle, dahili mıknatıslı motorlarda relüktansın maksimum olduğu eksen d ekseni, minimum olduğu eksen ise q ekseni olarak tanımlanır [5].

2.4. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Denklemleri

SMSM' ye ait d-q eksen matematiksel modeli Şekil 2.6' da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere SMSM d-q eksen modeli, geleneksel serbest uyartımlı bir DA motora çok benzemektedir. Bu modelin çıkarılabilmesi için yapılan kabuller aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Doyum ve dış etkilerinin ihmal edilmesi,
- Histerisiz ve fuko kayıplarının ihmal edilmesi,
- Deri kayıplarının ihmal edilmesi.
- Direnç ve endüktansın sıcaklık ve frekanstan bağımsız olduğu,
- Rotorun silindirik olduğu ve mıknatısların rotor yüzeyine yapıştırıldığı,
- Mıknatısların oluşturduğu toplam manyetik akı değerinin sürekli sağlandığı ve sıcaklıktan bağımsız olduğudur.



Şekil 2.6. Sürekli mıknatıslı senkron motorun d-q eksen eşdeğer devresi [64]

SMSM motorun d-q modeli Denklem (2.1)-(2.4)' de verilmiştir.

$$v_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e \Psi_q \quad (2.1)$$

$$v_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_e \Psi_d \quad (2.2)$$

$$\Psi_q = L_q i_q \quad (2.3)$$

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_m \quad (2.4)$$

Burada d-q eksenler için v_d , v_q gerilimleri, R stator sargı direncini, i_d , i_q akımları, L_d , L_q endüktansları, Ψ_d , Ψ_q manyetik akıları, Ψ_m mıknatıs akısını ve ω_e elektriksel açısal hızı ifade etmektedir. Denklem (2.3) ve (2.4) sırasıyla Denklem (2.1) ve (2.2)

de yerlerine yazıldığında d-q eksenler için gerilim ifadeleri Denklem (2.5) ve (2.6) şeklini alır. Ayrıca d-q eksen gerilimleri matris formda Denklem (2.7) deki gibi yazılabilir [5].

$$v_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (2.5)$$

$$v_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_e L_d i_d + \omega_e \Psi_m \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \Psi_m \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar için T_e elektriksel moment ifadesi Denklem (2.8) de verilmiştir.

$$T_e = \frac{3}{2} p (\Psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (2.8)$$

Burada dikkat edilmesi gereken nokta, DM motorlar ve YM motorların d-q eksen endüktansları arasındaki farklılıktır. Yüzeysel mıknatıslı senkron motorlarda d ve q endüktansları birbirine eşitken, DM motorlarda endüktans değerleri bir birinden farklı olmaktadır[5].

SMSM'lerde ve genel olarak elektrik motorlarında mekanik hız ile konum arasındaki ilişki Denklem (2.9) da verilmiştir. Motorun hız ve konum bilgileri de Denklem (2.10) ve (2.11)' de verilmiştir.

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2.9)$$

$$\omega_e = \omega_r p \quad (2.10)$$

$$\theta_e = \theta_r p \quad (2.11)$$

Burada ω_r mekanik açısal hızı, θ_e ve θ_r sırasıyla elektriksel ve mekanik olarak rotor konumunu, p ise kutup çifti sayısını ifade etmektedir. Denklem (2.8) e yük momenti T_L eklendiğinde, SMSM için hareket denklemi Denklem (2.12) de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} + B_v \omega_r \quad (2.12)$$

Burada J atalet momenti, B_v viskos sürtünme katsayısını ifade etmektedir.

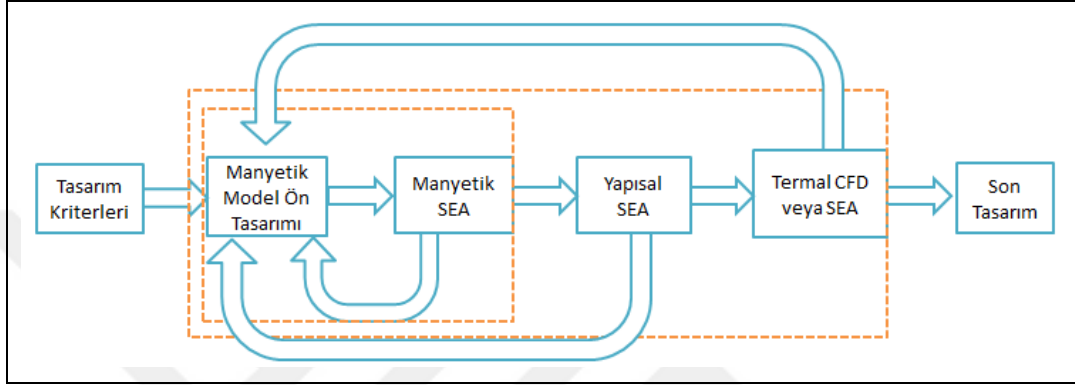
2.5. Sürekli Mıknatıslı Motor Tasarım Süreçleri

SM motor tasarım süreci relüktans tabanlı manyetik modelleme ile başlar. Tasarım kriterleri doğrultusunda relüktans tabanlı manyetik model oluşturulur. Model kullanılarak oluk sayısı, kutup sayısı, temel boyutlar gibi parametrelerin optimizasyonları gerçekleştirilir ve nihai ölçüler elde edilir. Böylelikle motora ait ön tasarım gerçekleştirilmiş olur. Ön tasarım aşamasında uygulamanın ihtiyacına göre motor gücü, moment, moment yoğunluğu, verim, maliyet gibi farklı herhangi bir parametre veya parametreler için optimizasyon çalışmaları yapılabilir. Optimizasyon çalışmalarının yapılmasında gelişmiş mühendislik yazılımları kullanılabileceği gibi basit analitik yöntemlerle de kullanılabilir. Optimizasyon sonucunda elde edilen nihai tasarım ile çok boyutlu uzaydaki tasarımlardan, amaçlanan tasarım elde edilmeye çalışılır [1-3].

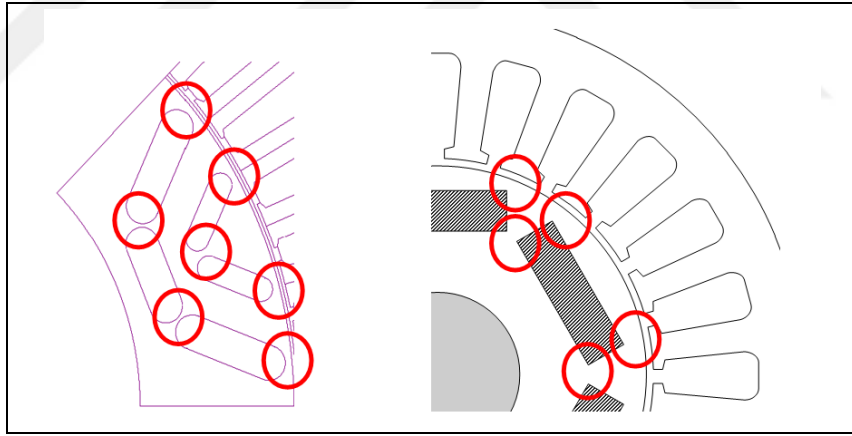
Asenkron ve DA motor tasarım süreçlerinde kritik uygulamalar haricinde detaylı bir tasarım çalışmasına ihtiyaç duyulmaz. Hatta standart SMSM'lerde de bu aşama mevcut tasarım yazılımları ile rahatça aşılabılır. Bununla birlikte DM motorlarının manyetik devrelerinde aşırı doyum bölgeleri içermesi, tasarım kodlarının oluşturma zorluğu, piyasada mevcut yazılımların DM motor tasarım modüllerinin yeterince olgunlaşmamış olması bu tip motorların tasarımını güçleştirmektedir [3].

DM motor tasarımları genelde standart SM motor tasarımlarından bir miktar daha zordur. Bunun temel sebebi ise DM motorlarda mıknatıs ve relüktans momenti olarak adlandırılan iki farklı moment bileşeninin yer alıyor olmasıdır. Bu moment kaynaklarının yüksek performansa sahip, yüksek moment yoğunluklu bir DM motor elde etmek için uygun bir şekilde düzenlenmesi gerekmektedir. Buna ek olarak manyetik devredeki doyum DM motorlarda önemli bir tasarım parametresidir. Özellikle maksimum çalışma şartlarında manyetik devredeki doyum, tasarım ve analiz çalışmalarını zorlaştıran başka bir etkidir. Ayrıca rotor yapısında bulunan köprüler hem mekanik hem de manyetik açıdan dikkatle incelenmeli ve problem oluşturmayacaklarından emin olunmalıdır.

DM motor temel tasarım süreçleri Şekil 2.7' de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere tasarım kriterleri doğrultusunda manyetik modellemeler ve optimizasyonlar yapılarak ön tasarım sonuçları elde edilir. Ön tasarım boyutları kullanılarak yapıya ait manyetik SEA gerçekleştirilir ve performans kontrolü yapılır. Böylece yapıya ait elektromanyetik tasarım elde edilir. SEA aşamasını geçemeyen bir tasarım, eksik olduğu noktaların giderilmesi için tekrar ön tasarım aşamasına geri döner.



Şekil 2.7. SM motor tasarım süreçleri



Şekil 2.8. DM motor tasarımında mekanik analizin gerekliliği [65]

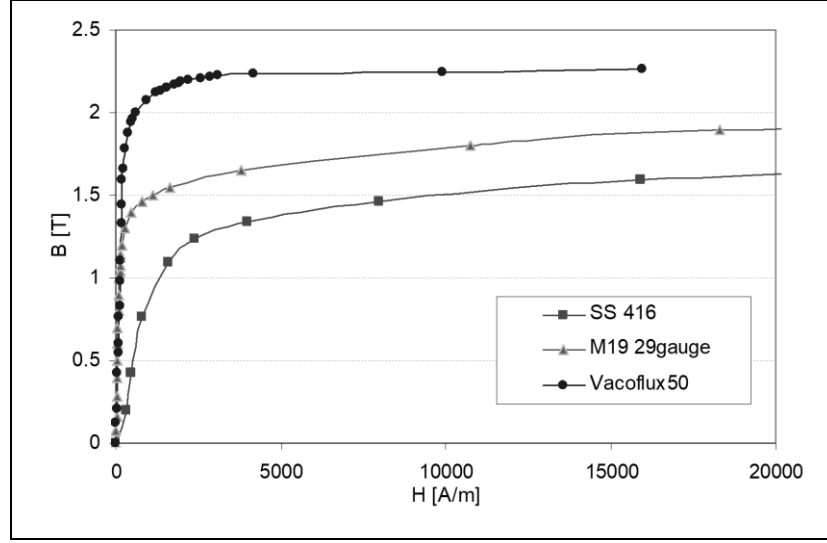
Elektromanyetik tasarım aşamasını tamamlayan motor tasarımı, mekanik tasarım ve analiz aşamasına geçer. DM motorların yapısal bütünlüğünü koruyup korumadığının kontrol edilmesi, mıknatısların rotor içine gömülü olması nedeniyle önemli bir çalışmadır. Şekil 2.8' de DM motorlarda yapısal analizin ne kadar kritik olduğu gerçeği görülmektedir. Mıknatısları ve mıknatısların hava aralığına bakan kısımlarındaki nüveyi tutan ve köprü olarak isimlendirilen kısımların ince olması tasarımın mekanik olarak zorluğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle elektromanyetik tasarım ve mekanik tasarım aşamalarının birlikte yürütülmesi kaçınılmazdır [3].

Mekanik analiz aşamasını geçen bir tasarımın uygulama zorluğuna bağlı olarak termal analizlerinin de yapılması gerekmektedir. Bu aşamayı geçemeyen tasarımların elektromanyetik tasarımları tekrarlanarak iyileştirmeler yapılmalıdır. Birbirini takip eden tasarım süreçleri tüm aşamaları ile eksiksiz tamamlandıktan sonra SMSM tasarımını elde edilir.

2.6. Sürekli Mıknatıslı Motorlarda Kullanılan Malzemeler

SM motor yapılarında uygulamaya göre farklı türden laminasyon malzemeleri tercih edilmektedir. Manyetik malzeme seçimi yapılırken üretim adetleri, hedef maliyet ve uygulama türü göz önünde bulundurulmaktadır. Bu unsurlar göz önünde bulundurularak ilgili uygulama için en uygun malzemeler seçilmelidir. Seri üretimin fazla olduğu ve dolayısıyla maliyet faktörünün çok önemli olduğu beyaz eşya, otomotiv gibi sektörler ile performansın kritik olduğu, maliyetlerin ise çoğunlukla göz ardı edildiği savunma sanayi uygulamaları gibi kritik uygulamalar için tasarlanan SM motorlardaki sac malzeme türleri birbirine göre oldukça farklıdır.

Laminasyon malzeme seçiminde göz önünde bulundurulması gereken diğer bir husus da SMSM' nin çalışacağı frekans seviyeleridir. Motor nüve kayıpları frekansın karesi ile orantılı şekilde arttığı için bu tür uygulamalarda kullanılacak malzemeler dikkatlice seçilmelidir. Frekansın yüksek olduğu bu tür uygulamalarda kullanılan sac kalınlığı 0.1mm ye kadar inmektedir. Frekansı düşük olan uygulamalarda kayıpların çok fazla etkili olmayacağı düşünülerek fiyatı daha ucuz olan kalın saclar seçmek daha doğru bir tercihtir. Avrupa standartlarındaki muadili "M270-35A" olan "M19" türü sac malzeme, endüstriyel uygulamalarda oldukça fazla tercih edilmektedir. Bu türden bir malzeme ile "standart 416" çelik malzemesi gibi sıradan motorlarda kullanılan sac malzemesinelerine ait malzeme doyum eğrileri Şekil 2.9' da verilmiştir. Ayrıca aynı grafiğe kalınlığı 0.1mm olan ve yüksek frekanslı uygulamalarda sıkça tercih edilen Vacoflux 50 türü bir malzeme de fikir vermesi açısından eklenmiştir. Şekilden görüldüğü üzere malzeme kalitesi arttıkça doyuma başladığı nokta da daha yüksek seviyelere çıkmaktadır. Ayrıca farklı standartlarda birbirinin muadili olan silisli çelik malzemeler ile Avrupa Standartları' nda en çok kullanılan motor sac malzemelerinin kalınlıkları ve kayıp değerleri sırasıyla Tablo 2.2 ve Tablo 2.3' de gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Motor sac malzemesi örnekleri [65]

Tablo 2.2. Farklı standartlarda silisli çelik malzemeleri ve eşdeğerleri [66]

Avrupa IEC 404-8-4 (1986)	Amerika AISI	Japonya JIS 2552 (1986)	Rusya GOST 21427 0-75
250-35-A5	M15	35A250	2413
270-35-A5	M19	35A270	2412
300-35-A5	M22	35A300	2411
330-35-A5	M36	---	---
270-50-A5	---	50A270	---
290-50-A5	M15	50A290	2413
310-50-A5	M19	50A310	2412
330-50-A5	M27	---	---
350-50-A5	M36	50A350	2411
400-50-A5	M43	50A400	2312
470-50-A5	---	50A470	2311
530-50-A5	M45	---	2212
600-50-A5	---	50A600	2112
700-50-A5	M47	50A700	---
800-50-A5	---	50A800	2111
350-65-A5	M19	---	---
400-65-A5	M27	---	---
470-65-A5	M43	---	---
530-65-A5	---	---	2312
600-65-A5	M45	---	2212
700-65-A5	---	---	2211
800-65-A5	---	65A800	2112
1000-65-A5	---	65A1000	---

Tablo 2.4' de ise elektrik motorlarında sıklıkla kullanılan M-27, M-36 ve M-43 silisli çelik sac malzemeler için demir kayıplarının 60Hz de karşılaştırması verilmiştir. Bu malzemelerden kayıp oranları düşük olanlar DM motorlarda sıkça kullanılmaktadır.

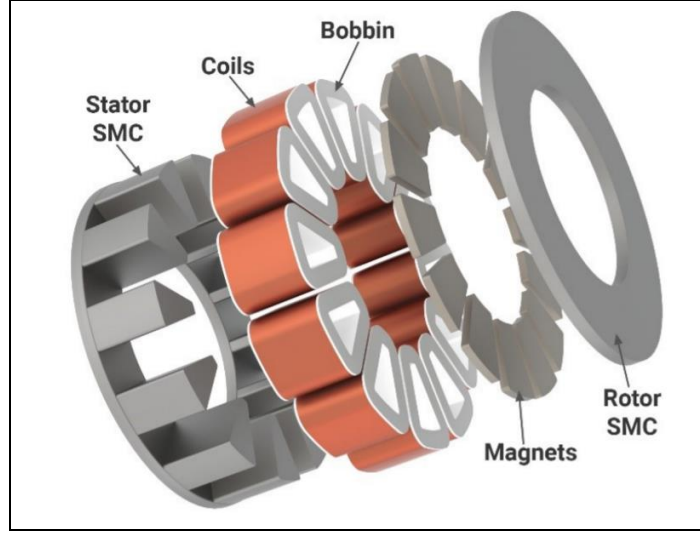
Tablo 2.3. Avrupa normlarında sık kullanılan motor sac malzemeleri [66]

Sınıf EN 10106	Kalınlık	50 Hz de maksimum toplam kayıp		50 Hz de minimum manyetik kutuplaşma		
		$\hat{j} = 1,5T$	$1,0 T^{**}$	$\hat{H}=2500$	5000	1000 A/m
	mm	W/kg	W/kg	T	T	T
M235-35A	0,35	2,35	0,95	1,49	1,60	1,70
M250-35A	0,35	2,50	1,00	1,49	1,60	1,70
M270-35A	0,35	2,70	1,10	1,49	1,60	1,70
M300-35A	0,35	3,00	1,20	1,49	1,60	1,70
M330-35A	0,35	3,30	1,30	1,49	1,60	1,70
M700-35A	0,35	7,00	7,00	1,60	1,69	1,77
M250-50A	50	2,50	1,05	1,49	1,60	1,70
M270-50A	50	2,70	1,10	1,49	1,60	1,70
M290-50A	50	2,90	1,15	1,49	1,60	1,70
M310-50A	50	3,10	1,25	1,49	1,60	1,70
M330-50A	50	3,30	1,35	1,49	1,60	1,70
M350-50A	50	3,50	1,50	1,50	1,60	1,70
M400-50A	50	4,00	1,70	1,53	1,63	1,73
M470-50A	50	4,70	2,00	1,54	1,64	1,74
M530-50A	50	5,30	2,30	1,56	1,65	1,75
M600-50A	50	6,00	2,60	1,57	1,66	1,76
M700-50A	50	7,00	3,00	1,60	1,69	1,77
M800-50A	50	8,00	3,60	1,60	1,70	1,78
M940-50A	50	9,40	4,20	1,62	1,72	1,81

Tablo 2.4. En sık kullanılan sacların demir kayıpları karşılaştırması [66]

Manyetik Akı Yoğunluğu [T]	Bakır Kayıpları, W/kg							
	0,36 mm		0,47 mm			0,64 mm		
	M-27	M-36	M-27	M-36	M-43	M-27	M-36	M-43
0,20	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13
0,50	0,47	0,52	0,53	0,56	0,59	0,62	0,64	0,66
0,70	0,81	0,89	0,92	0,97	1,03	1,11	1,14	1,17
1,00	1,46	1,61	1,67	1,75	1,87	2,06	2,12	2,19
1,30	2,39	2,58	2,67	2,80	2,99	3,34	3,46	3,56
1,50	3,37	3,57	3,68	3,86	4,09	4,56	4,70	4,83
1,60	4,00	4,19	4,30	4,52	4,72	5,34	5,48	5,60
1,70	4,55	4,74	4,85	5,08	5,33	5,99	6,15	6,28
1,80	4,95	5,14	5,23	5,48	5,79	6,52	6,68	6,84

Özellikle karmaşık yapıya sahip nüvelerin üretiminde getirdiği avantajlar nedeniyle SMC (Soft Magnetic Composites) olarak adlandırılan ‘toz-demir kompozit nüveli’ malzemeler de SM motor uygulamalarında sıkça kullanılmaktadırlar. SMC türü malzemenin motorlarda tercih edilmesinin iki temel amacı bulunmaktadır. Bunlardan ilki üretim yöntemleri nedeniyle karmaşık geometriye sahip yapıların elde edilebilmesi, ikincisi ise akının üç boyutlu akmasına imkan tanımasıdır. SMC türü malzeme kullanılarak oluşturulan motor yapısı Şekil 2.10’ da gösterilmiştir. Üretim süreçlerinin bir miktar daha zor olması ve ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle bu tür malzemeler standart motorlarda pek de tercih edilmezler.



Şekil 2.10. SMC kullanılarak üretilen motor yapısı [63]

1930' lu yıllarda keşfedilen Alnico türü mıknatıslar alüminyum, nikel, demir ve kobalt alaşımli bir mıknatıs türüdür. Bu mıknatısların keşfi SMSM yapılarında devrim niteliğindedir. Ayrıca günümüzde hala sıkça tercih edilmektedirler. Br değerlerinin yüksek olması bu türden mıknatısların en belirgin özellikleridir. Diğer taraftan bu tür mıknatısların pahalı olması ve mıknatıslanma özelliklerini kolayca kaybetmeleri dezavantajları arasında yer almaktadır. Diğer bir mıknatıs türü olan Ferrite mıknatıslar ise Alnico mıknatıslara göre daha ucuz mıknatıslardır. Bu nedenle daha yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca Hc değerlerinin daha yüksek olması demagnetizasyona karşı daha dirençli olmalarını sağlamaktadır. Her iki mıknatıs türünün de mıknatıs enerjileri düşüktür. Bu dezavantajın kaldırılması için yapılan çalışmalar sonucunda 1960'lı yıllarda Somaryum ve Kobaltın (SmCo) kullanıldığı nadir toprak (rare-earth) mıknatısları bulunmuştur. Bu buluş mıknatıs teknolojisinde büyük bir adım olarak kabul edilmiştir. SmCo tür mıknatısların enerjisi Alnico ve Ferrite mıknatıslara göre çok daha yüksek ve demagnetizasyon direnci de oldukça fazladır. En büyük dezavantajları ise kırılğan olmalarıdır. 1983 yılında Neodimiyum Demir Boron (Neodymium-Iron-Boron, NdFeB) türü mıknatısların bulunması, SMSM' lerde bir dönüm noktası olarak kabul edilmiştir. Bu buluşla birlikte SMSM' lerin kullanım alanları hızlıca genişlemiştir. Mıknatıs enerjileri 400kJ/m^3 ' leri aşmış, Br ve Hc değerleri ise mevcut duruma göre çok daha yüksek seviyelere çıkmıştır. Bu tür mıknatısların en büyük dezavantajları ise kırılğan olmaları ve korozyona karşı korunmalarının gerekliliğidir. Tablo 2.5'de sürekli mıknatıslı malzemelerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 2.5. Farklı süreklilikli mıknatıs malzemelerinin karşılaştırılması [3]

	Ferrite	Alnico	SmCo	NdFeB	
Üretim Yöntemi	Ceramic 8	Alloy	Sm2Co17	Bonded	Sintered
Br, T	0,4	1,25	1,0 - 1,1	0,55 - 0,70	1,25 - 1,35
Hc, kA/m	270	55	600 - 800	180 - 450	950 - 1040
iHc, kA/m	260	55	720 - 2000	210 - 1100	1200 - 1400
(BH)max, kJ/m ³	25 - 32	<44	190 - 240	32 - 88	290 - 400
α_B , %/°C	-0,20	-0,02	-0,03	-0,105	-0,11
α_H , %/°C	-0,27	-0,015	-0,15	-0,4	-0,65
T _c , °C	460	890	800	360	330

Tablo 2.6. NdFeB türü mıknatısların manyetik özellikleri [67]

Grade	Remanence(Br)				Coercivity(Hcb)				Intrinsic Coercivity Force(Hcj)		Çalışma sıcaklığı
	kGs		T		KOe		KA/m		KOe	KA/m	
	Nom.	Min.	Nom.	Min.	Nom.	Min.	Nom.	Min.			°C
N35	12,1	11,7	1,21	1,17	11,5	10,8	915	860	≥12≤	≥955	≤80
N38	12,6	12,2	1,26	1,22	11,5	10,8	915	860	≥12	≥955	≤80
N40	12,9	12,6	1,29	1,26	11	10,5	876	836	≥12	≥955	≤80
N42	13,2	12,6	1,32	1,26	11	10,5	876	836	≥12	≥955	≤80
N45	13,7	13,3	1,37	1,33	11	10,5	876	836	≥12	≥955	≤80
N35M	12,1	11,7	1,21	1,17	11,6	11	924	876	≥14	≥1114	≤100
N38M	12,6	12,2	1,26	1,22	11,8	11,4	939	907	≥14	≥1114	≤100
N40M	12,9	12,6	1,29	1,26	12,2	11,8	971	939	≥14	≥1114	≤100
N42M	13,2	12,9	1,32	1,29	12,6	12,2	1003	971	≥14	≥1114	≤100
N45M	13,7	13,3	1,37	1,33	12,8	12,4	1019	987	≥14	≥1114	≤100
N33H	11,7	11,4	1,17	1,14	11	10,3	876	820	≥17	≥1353	≤120
N35H	12,1	11,7	1,21	1,17	11,5	10,8	915	860	≥17	≥1353	≤120
N38H	12,6	12,2	1,26	1,22	12	11,5	955	915	≥17	≥1353	≤120
N40H	12,9	12,6	1,29	1,26	12	11,5	955	915	≥17	≥1353	≤120
N42H	13,2	12,9	1,32	1,29	12,6	12,2	1003	971	≥17	≥1353	≤120
N45H	13,6	13,2	1,36	1,32	12,8	12,4	1019	987	≥17	≥1353	≤120
N30SH	11,2	10,8	1,12	1,08	10,5	9,8	836	780	≥20	≥1595	≤150
N33SH	11,7	11,4	1,17	1,14	11	10,3	876	820	≥20	≥1595	≤150
N35SH	12,1	11,7	1,21	1,17	11,5	10,8	915	860	≥20	≥1595	≤150
N38SH	12,6	12,2	1,26	1,22	12,3	11,8	979	939	≥20	≥1595	≤150
N40SH	12,9	12,6	1,29	1,26	12,6	12	1003	955	≥20	≥1595	≤150
N42SH	13,2	12,8	1,32	1,28	12,6	12,2	1003	971	≥20	≥1595	≤150
N45SH	13,5	13,3	1,35	1,33	12,8	12,2	1019	981	≥20	≥1595	≤150
N30UH	11,2	10,8	1,12	1,08	10,6	10,1	844	804	≥25	≥1990	≤180
N33UH	11,7	11,4	1,17	1,14	11	10,3	875	820	≥25	≥1990	≤180
N35UH	12,1	11,7	1,21	1,17	11,5	10,8	915	860	≥25	≥1990	≤180
N38UH	12,4	12,1	1,24	1,21	12	11,4	955	908	≥25	≥1990	≤180
N40UH	12,7	12,4	1,27	1,24	12,2	11	971	924	≥25	≥1990	≤180
N42UH	13	12,8	1,3	1,28	12,4	12	987	955	≥25	≥1990	≤180

Ferrit ve NdFeB tür mıknaıslar hemen hemen her tür SMSM' lerde sıkça kullanılmaktadır. Ferrit mıknaıslar 0,4T Br değerine kadar üretilebilmektedir. Sinterlenmiş NdFeB türü mıknaıslar ise 1,0T Br ve üzerinde üretilebilmektedir. İki mıknaıslar türü arasında kalan 0,5-1,0T Br değer aralığında ise "Bonded-NdFeB" adı verilen "plastik mıknaıslar"lar tercih edilmektedir. Bu tip mıknaıslarda, mıknaıslar malzemesi ile plastik yapıştıracı uygun oranlarda karıştırlıp, preslenerek üretimleri gerçekleştirilmektedir. Böylelikle ihtiyaç duyulan Br seviyesinde NdFeB mıknaıslar üretilebilmektedir. Bu mıknaıslar esnek Br seviyesi nedeniyle özellikle DM motorlarda sıkça kullanılmaktadırlar.

Tablo 2.6' da farklı gradelerde sinterlenmiş NdFeB türü mıknaıslar ve özellikleri verilmiştir. Sinterlenmiş bu mıknaıslar 80-200 derece sıcaklık aralığında, 1,0T' Br değerlerinden 1,48T Br değerlerine kadar geniş bir aralıkta üreticiye sunulmaktadır. 200 derecelerin üzerinde çalışma sıcaklığına sahip motorlar için ise daha pahalı ve sıcaklık değişimlerinden az etkilenen SmCo türü mıknaıslar kullanılmaktadır [3].

3. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLARIN MANYETİK MODELLEMESİ

Bu bölümde, manyetik modelleme temel prensipleri ve denklemleri verilmiştir. Daha sonra SM motor relüktans tabanlı manyetik modellemesi (RTMM) yapılmıştır. Manyetik model çözümü yapılarak hava aralığı akı yoğunluğu değişimi elde edilmiştir. Hava aralığı akı yoğunluğundan zıt EMK dalga değişiminin elde edilmesi gösterilmiştir. Son olarak zıt EMK dalga değişimi kullanılarak motora ait çıkış momenti değişimi elde edilmiştir.

3.1. Manyetik Modelleme Temelleri

Manyetik alan içerisine yer alan iletken bir telden akım geçirilmesi durumunda, iletken tele dik yönde bir kuvvet etki eder. Etki eden bu kuvvet, iletken teli manyetik alan içerisinde hareket ettirmeye zorlar. İletken tele etkiyen vektör kuvvetin (F) değeri, iletkenin uzunluğu (l) boyunca, manyetik alanın (B) homojen olduğu varsayılarak ve iletken sayısı 1 alınarak Denklem (3.1)' deki gibi ifade edilir.

$$F=(B \times l)I = \frac{\phi}{A} Il \quad (3.1)$$

Elektrik makinelerinde rotorun dönme veya doğrusal olarak hareket etmesini sağlayan bu F kuvvetidir. İletken telin bir nüve üzerine sarılarak elde edildiği bobinin, bu F kuvvetini üretebilmesi için mevcudiyetini sürekli koruyan bir manyetik alana ihtiyaç vardır.

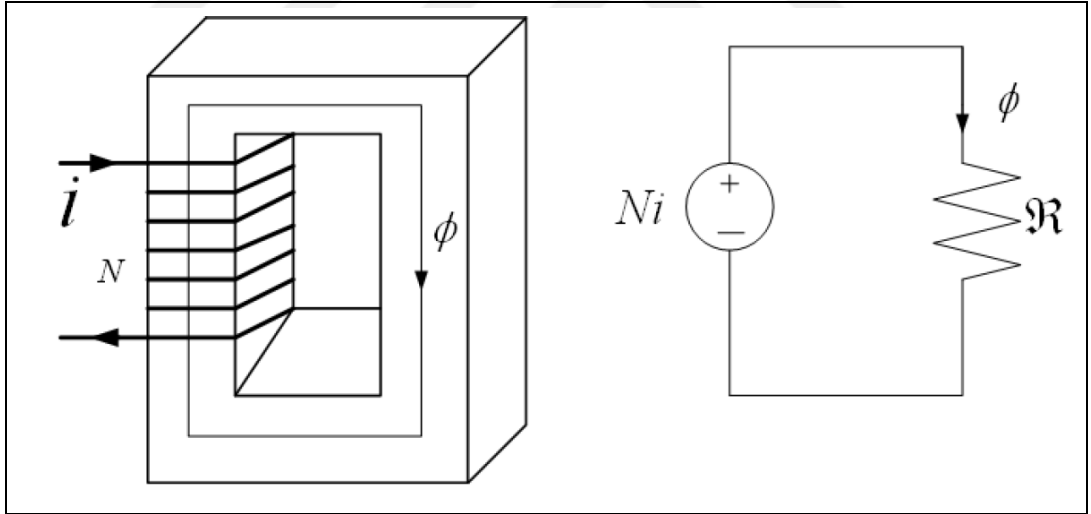
Şekil 3.1' de tek uyarımlı örnek bir manyetik yapı verilmiştir. Yapıda kullanılan nüve malzemenin manyetik direnci R_m , manyetik devreden akan ϕ akısına karşı direnç göstermektedir. Manyetik malzemenin R_m manyetik direnci Denklem (3.2)' deki gibi ifade edilir.

$$R_m = \frac{1}{\mu_0 \mu_r A} \quad (3.2)$$

Burada μ_0 boşluğun akı geçirgenlik katsayısıdır ve değeri $4\pi 10^{-7} \text{H/m}$ dir. l ise ϕ akısının manyetik devre üzerinde kat ettiği yoldur ve birimi metredir. μ_r bağıl akı geçirgenlik katsayısıdır ve birimsizdir. Manyetik devreden akan akı olan ϕ ifadesi Denklem (3.3)' de verildiği gibi elde edilebilir.

$$\phi = B \cdot A \quad (3.3)$$

Örnek manyetik yapıya ait relüktans tabanlı manyetik eşdeğer devre yine Şekil 3.1' de gösterilmiştir. Örnek manyetik yapıda demir çekirdek etrafına sarılmış N sarım sayısı olan bir bobin görülmektedir. Bu bobinin iki ucu arasında gerilim uygulandığında bobinden akım akar ve $N \cdot I$ amper-sarım değerinde bir magneto motor kuvveti (MMK) üretir. Manyetik akı ise ortamın akı çizgilerine karşı göstereceği dirence bağlıdır ve bu dirençle ters orantılıdır. Manyetik direnç (relüktans - R_m) Denklem (3.2)' den görüldüğü gibi akımın geçtiği yolun uzunluğu (l) ile doğru, içinden geçtiği ortamın kesiti (A) ile ve malzemenin geçirgenliği (μ_r) ile ters orantılıdır.



Şekil 3.1. Tek uyarımlı manyetik yapı örneği ve relüktans tabanlı manyetik eşdeğer devresi [1]

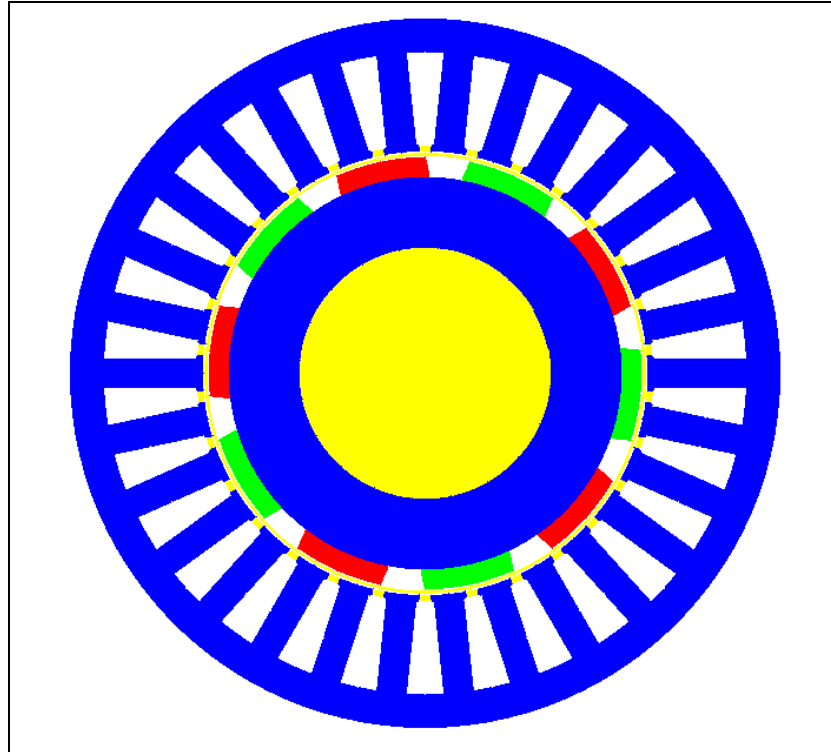
Basit bir manyetik devre için verilen bu denklemlerin elde edilebilmesi için kabul edilen varsayımlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Bütün manyetik malzemeler sıcaklıktan bağımsız ve doğrusal özelliğe sahiptir.
- Manyetik nüve üzerindeki doyum etkileri ihmal edilmiştir.
- Akı nüve içerisinde homojen olarak dağılmıştır.

- Kesit alanı her yerde sabittir.
- Nüvedeki bütün kayıplar ihmal edilmiştir.
- Bakırdaki bütün kayıplar ihmal edilmiştir.
- Direnç ve endüktans değerleri sıcaklık ve frekanstan bağımsızdır.

3.2. YMM Relüktans Tabanlı Manyetik Eşdeğer Devre Modellemesi

Elektrik motorlarında elektromekanik enerji dönüşümünün gerçekleştiği hava aralığındaki akı yoğunluğu ve bu akı yoğunluğunun çap boyunca değişimi oldukça önemlidir. Hava aralığı akı yoğunluğu zıt EMK değerini doğrudan etkiler. Bu nedenle de çıkış momentini belirleyen önemli bir faktördür. Standart motorlara benzer şekilde yüzeyden mıknatıslı senkron motorlarda da çıkış momentini bulmak için hava aralığı akı yoğunluğunu bulmak gerekir. Mekanik hava aralığı her ne kadar küçük olsa da mıknatıstan dolayı elektriksel hava aralığının büyük olmasından dolayı SM motorlarda yüksüz durum akı yoğunluğu zıt EMK ve çıkış momentini belirlemede oldukça önemlidir. Bu amaçla motor, relüktanslar ve akı kaynağı cinsinden relüktans tabanlı modellenerek, hava aralığı akı yoğunluğunun bulunması yaygın olarak tercih edilmektedir.



Şekil 3.2. Yüzeyden mıknatıslı 30 oluk 10 kutuplu yapıya ait 2B görüntü

YMM relüktans tabanlı manyetik eşdeğer devre modellemesi yapmak için 30 oluk, 10 kutuplu örnek bir yapı tercih edilmiştir. Bunun nedeni stator oluk sayısının, kutup sayısının tam 3 katı miktarda olması ve böylelikle sargı faktörünün 1' e eşit olmasıdır. Bu da modellemede simetri özelliğinden dolayı kolaylık sağlayacaktır. Tercih edilen motorun stator, rotor ve mıknatıslarının ara kesit görüntüsü Şekil 3.2' de verilmiştir. Ayrıca motora ait temel kriterler Tablo 3.1' de verilmiştir.

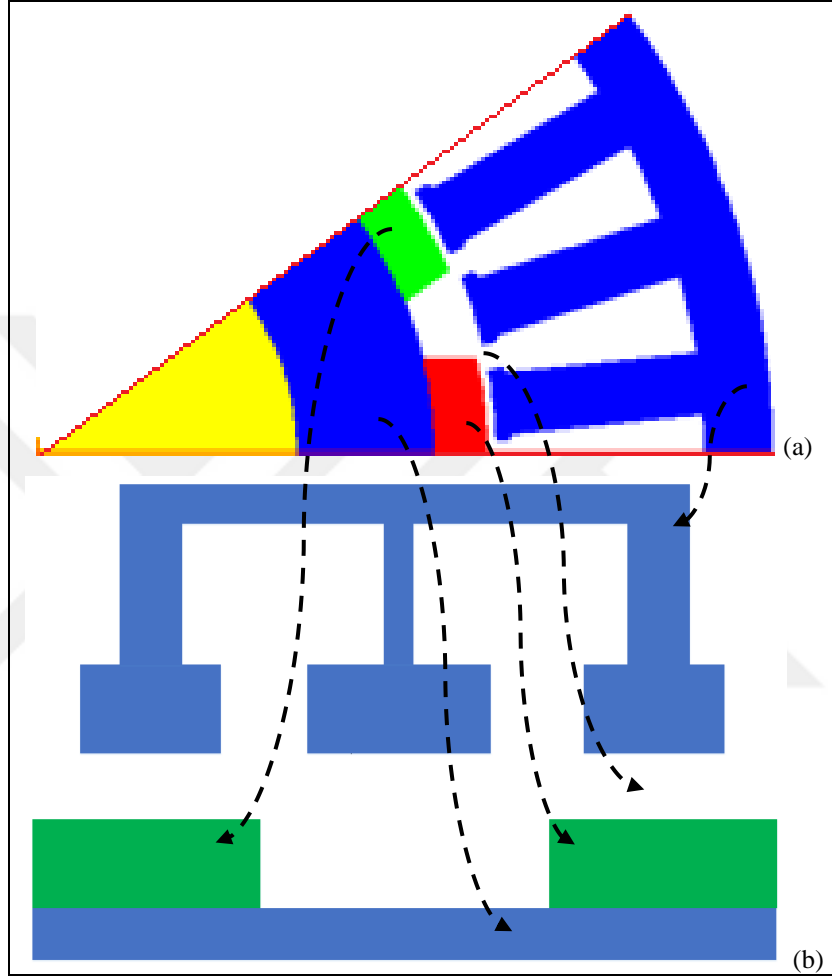
Tablo 3.1. YM örnek motor kriterleri

Kare Gövde Boyutu	180 mm
Güç	8 kW
Anma Hızı	≥ 2.000 rpm
Anma Momenti	≥ 38 Nm
Maksimum Hız	≥ 2.500 rpm
Anma Akımı	22 Apeak
DC Bara Gerilimi	537 V
Oluk sayısı	30
Kutup sayısı	10
Faz sayısı	3

Modelleme ve analiz çalışmalarında işlemleri basitleştirmek ve çözüm sürelerini kısaltmak adına simetri özelliği sıkça kullanılmaktadır. Burada örnek alınan yapıda da 1/10 simetri özelliği kullanılarak 3 adet stator oluğu ve 1 adet de rotor kutbundan oluşan kısmın modelleme çalışmaları yapılmıştır. Modellemesi yapılan 1 kutuplu simetrik yapı ve bu yapıya ait basitleştirilmiş görüntü şekil Şekil 3.3' de gösterilmiştir. Manyetik modelleme çalışmaları yapılırken bazı kabullerde bulunulmuştur. Bu kabuller aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Bütün manyetik malzemeler sıcaklıktan bağımsız ve doğrusal özelliğe sahiptir.
- Akı nüve içerisinde geçtiği kesit alanı boyunca homojen olarak dağılmıştır.
- Nüvelerdeki bütün kayıplar ihmal edilmiştir.
- Bakırdaki bütün kayıplar ihmal edilmiştir.
- Direnç ve endüktans değerleri sıcaklık ve frekanstan bağımsızdır.
- Doyum ve stator dış etkileri ihmal edilmiştir.
- Histerisiz ve fuko kayıplarının ihmal edilmiştir.

- Rotorun silindirik olduğu ve mıknatısların rotor yüzeyine yapıştırıldığı varsayılmıştır.
- Mıknatısların oluşturduğu toplam manyetik akı değerinin sürekli sağlanmaktadır ve sıcaklıktan bağımsızdır.

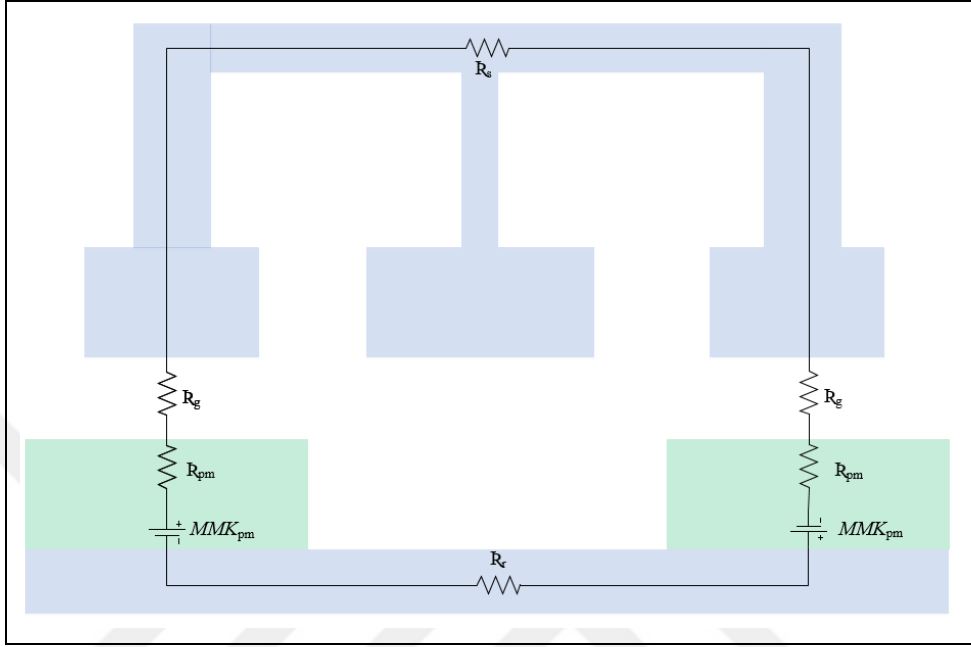


Şekil 3.3. Yüzeinden mıknatıslı 3 oluk 1 kutuptan (2 adet yarım kutup) oluşan simetrik yapıya ait (a) 2B arakesit ve (b) basitleştirilmiş görüntüsü

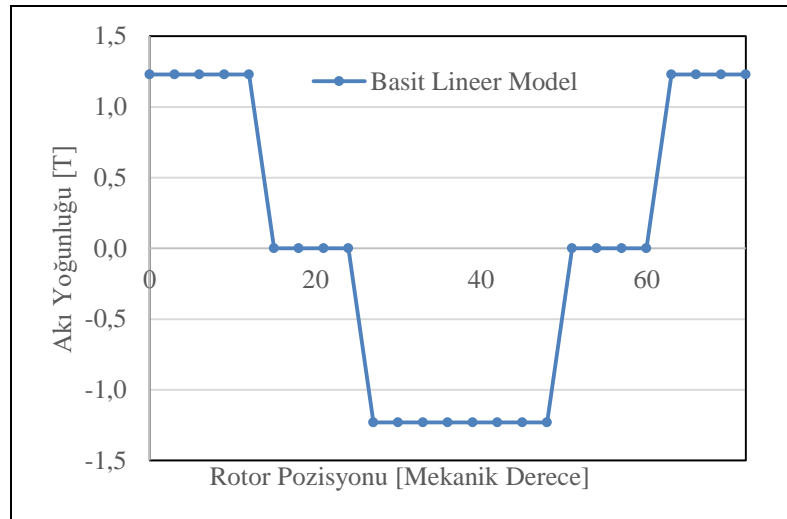
Yapılan kabuller sonrasında simetrik motor yapısı için oluşturulan temel manyetik eşdeğer devre tabanlı modelleme Şekil 3.4' de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, temel modellemede motor modellemesi için kritik öneme sahip hava aralığında sadece 1 adet relüktans bulunmaktadır. Bu da temel modelleme doğruluğunun oldukça düşük olacağı anlamına gelmektedir. Model için oluşturulan manyetik eşdeğer devre Denklemi (3.4)' de verilmiştir.

$$\emptyset(2R_{pm}+2R_g+R_s+R_r)=2MMK_{pm} \quad (3.4)$$

Burada R_s ve R_r akının sırasıyla stator ve rotor tarafında kat edeceği hat üzerindeki relüktansları, R_g hava aralığı relüktansını, R_{pm} ' de mıknatıs relüktansını ifade etmektedir. Ayrıca MMK_{pm} mıknatıstan kaynaklanan MMF değerini ifade etmektedir.



Şekil 3.4. 3 oluk 1 kutuptan oluşan, temel manyetik eşdeğer devre tabanlı modelleme



Şekil 3.5. Temel manyetik eşdeğer devre tabanlı modellemeden elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişimi

Temel manyetik eşdeğer devre modelindeki relüktans değerlerinin oluşturulabilmesi için gerekli boy ve genişlik bilgileri 3B mekanik modelleme programı yardımı ile alınmıştır. Boyutlar yardımıyla yapılan matematiksel hesaplamalar sonucu elde edilen

arttırılmıştır. R_{ty} ile başlayan relüktanslar stator dişlerindeki relüktansları, R_{tx} ile başlayan relüktanslar da dişler arasındaki kaçak akıların modellenmesi için oluşturulan relüktansları ifade etmektedir. R_{b1} ise stator boyunduruk kısmındaki relüktans değerlerini ifade etmektedir.

Manyetik modeldeki relüktans değerlerinin hesaplanabilmesi için gerekli boy ve genişlik bilgileri yine 3B mekanik modelleme programı yardımı ile alınmıştır. Oldukça karmaşık hale gelen detaylı manyetik eşdeğer devrenin çözülebilmesi için yapıya ait denklemler çevre akımları yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Toplamda 16 tane çevre akısı denklemi yazılmıştır. Oluşturulan Denklemler (3.5) ile (3.20) eşitlikleri arasında verilmiştir.

$$\emptyset_1 A_{1,1} - \emptyset_2 A_{1,2} = 0 \quad (3.5)$$

$$\emptyset_2 A_{2,2} - \emptyset_1 A_{2,1} - \emptyset_3 A_{2,3} = 0 \quad (3.6)$$

$$\emptyset_3 A_{3,3} - \emptyset_2 A_{3,2} - \emptyset_4 A_{3,4} - \emptyset_5 A_{3,5} - \emptyset_{11} A_{3,5} = 0 \quad (3.7)$$

$$\emptyset_4 A_{4,4} - \emptyset_3 A_{4,3} - \emptyset_{11} A_{4,11} - \emptyset_5 A_{4,5} = 0 \quad (3.8)$$

$$\emptyset_5 A_{5,5} - \emptyset_3 A_{5,3} - \emptyset_4 A_{5,4} - \emptyset_{10} A_{5,10} - \emptyset_6 A_{5,6} + \emptyset_7 A_{5,7} = U_{5,1} \quad (3.9)$$

$$\emptyset_6 A_{6,6} - \emptyset_{12} A_{6,12} - \emptyset_7 A_{6,7} - \emptyset_5 A_{6,5} = 0 \quad (3.10)$$

$$\emptyset_7 A_{7,7} - \emptyset_8 A_{7,8} - \emptyset_6 A_{7,6} - \emptyset_5 A_{7,5} - \emptyset_{12} A_{7,12} = 0 \quad (3.11)$$

$$\emptyset_8 A_{8,8} - \emptyset_9 A_{8,9} - \emptyset_7 A_{8,7} - \emptyset_{12} A_{8,12} = 0 \quad (3.12)$$

$$\emptyset_9 A_{9,9} - \emptyset_8 A_{9,8} = 0 \quad (3.13)$$

$$\emptyset_{10} A_{10,10} - \emptyset_{11} A_{10,11} - \emptyset_5 A_{10,5} - \emptyset_{12} A_{10,12} = 0 \quad (3.14)$$

$$\emptyset_{11} A_{11,11} - \emptyset_2 A_{11,2} - \emptyset_3 A_{11,3} - \emptyset_4 A_{11,4} - \emptyset_{10} A_{11,10} - \emptyset_{12} A_{11,12} - \emptyset_{13} A_{11,13} = 0 \quad (3.15)$$

$$\emptyset_{12} A_{12,12} - \emptyset_8 A_{12,8} - \emptyset_7 A_{12,7} - \emptyset_6 A_{12,6} - \emptyset_{10} A_{12,10} - \emptyset_{11} A_{12,11} - \emptyset_{14} A_{12,14} = 0 \quad (3.16)$$

$$\emptyset_{13} A_{13,13} - \emptyset_4 A_{13,4} - \emptyset_{14} A_{13,14} - \emptyset_{15} A_{13,15} = 0 \quad (3.17)$$

$$\emptyset_{14}A_{14,14}-\emptyset_{12}A_{14,12}-\emptyset_{13}A_{14,13}-\emptyset_{16}A_{14,16}=0 \quad (3.18)$$

$$\emptyset_{15}A_{15,15}-\emptyset_{13}A_{15,13}-\emptyset_{16}A_{15,16}=0 \quad (3.19)$$

$$\emptyset_{16}A_{16,16}-\emptyset_{14}A_{16,14}-\emptyset_{15}A_{16,15}=0 \quad (3.20)$$

Denklemden yer alan matris katsayılarının relüktanslar cinsinden ifadeleri Denklem (3.21) ile (3.88) arasında verilmiştir.

$$A_{1,1}=Rg_1+Rg_{1y}+Rg_{1x}+Rs_{y1}+Rg \quad (3.21)$$

$$A_{1,2}=Rs_{y1}+Rg \quad (3.22)$$

$$A_{2,1}=Rs_{y1}+Rg \quad (3.23)$$

$$A_{2,2}=Rg+Rs_{y1}+Rs_{y2}+Rs_{y4}+Rs_{y3}+Rg \quad (3.24)$$

$$A_{2,3}=Rs_{y3}+Rg \quad (3.25)$$

$$A_{3,3}=Rg+Rs_{y3}+Rs_{x2}+Rg_{2x}+Rg_{2y}+Rg_2+Rg_2 \quad (3.26)$$

$$A_{3,2}=Rs_{y3}+Rg \quad (3.27)$$

$$A_{3,4}=Rg_2+Rg_{2y} \quad (3.28)$$

$$A_{3,5}=Rg_2 \quad (3.29)$$

$$A_{3,11}=Rs_{x2}+Rg_{2x} \quad (3.30)$$

$$A_{4,4}=Rg_2+Rg_{2y}+Rg_{01}+Rs_{x3}+Rs_{y5}+Rg_{3y}+Rg_{3x}+Rg_3 \quad (3.31)$$

$$A_{4,3}=Rg_2+Rg_{2y} \quad (3.32)$$

$$A_{4,11}=Rg_{01}+Rs_{x3} \quad (3.33)$$

$$A_{4,5}=Rs_{y5}+Rg_{3y}+Rg_{3x}+Rg_3 \quad (3.34)$$

$$A_{5,5}=Rr+Rr_m+Rg_2+Rg_3+Rg_{3x}+Rg_{3y}+Rs_{y5}+Rs_{x5}+Rs_{x5}+Rs_{y5}+Rg_{3y}+\dots$$

$$\dots Rg_{3x} + Rg_3 + Rg_2 + Rp_m \quad (3.35)$$

$$A_{5,3} = Rg_2 \quad (3.36)$$

$$A_{5,4} = Rg_3 + Rg_{3x} + Rg_{3y} + Rr_{y5} \quad (3.37)$$

$$A_{5,10} = Rs_{x5} + Rs_{x5} \quad (3.38)$$

$$A_{5,6} = Rg_2 + Rg_{3x} + Rg_{3y} + Rs_{y5} \quad (3.39)$$

$$A_{5,7} = Rg_2 \quad (3.40)$$

$$U_{5,1} = -\emptyset_m Rp_m - \emptyset_m Rp_m \quad (3.41)$$

$$A_{6,6} = Rg_2 + Rg_{2y} + Rg_{01} + Rs_{x3} + Rs_{y5} + Rg_{3y} + Rg_{3x} + Rg_3 \quad (3.42)$$

$$A_{6,12} = Rg_{01} - Rs_{x3} \quad (3.43)$$

$$A_{6,7} = Rg_{2y} + Rg_2 \quad (3.44)$$

$$A_{6,5} = Rg_3 + Rg_{3x} + Rg_{3y} + Rs_{y5} \quad (3.45)$$

$$A_{7,7} = Rg + Rs_{y3} + Rs_{x2} + Rg_{2x} + Rg_{2y} + Rg_2 + Rg_2 \quad (3.46)$$

$$A_{7,8} = Rs_{y3} + Rg \quad (3.47)$$

$$A_{7,6} = Rg_{2y} + Rg_2 \quad (3.48)$$

$$A_{7,5} = Rg_2 \quad (3.49)$$

$$A_{7,12} = Rg_{2x} + Rs_{x2} \quad (3.50)$$

$$A_{8,8} = Rg + Rs_{y1} + Rs_{y2} + Rs_{y3} + Rs_{y4} + Rg \quad (3.51)$$

$$A_{8,9} = Rs_{y1} + Rg \quad (3.52)$$

$$A_{8,7} = Rs_{y3} + Rg \quad (3.53)$$

$$A_{8,12}=Rs_{y4} \quad (3.54)$$

$$A_{9,9}=Rg_1+Rg_{1y}+Rg_{1x}+Rs_{x1}+Rs_{y1}+Rg \quad (3.55)$$

$$A_{9,8}=Rs_{y1}+Rg \quad (3.56)$$

$$A_{10,10}=Rs_{y6}+Rs_{y6}+Rs_{x5}+Rs_{x5} \quad (3.57)$$

$$A_{10,11}=Rs_{y6} \quad (3.58)$$

$$A_{10,5}=Rs_{x5}+Rs_{x5} \quad (3.59)$$

$$A_{10,12}=Rs_{y6} \quad (3.60)$$

$$A_{11,11}=Rt_{y1}+Rt_{x1}+R0_{x1}+Rt_{x1}+Rt_{y1}+Rs_{y6}+Rs_{x3}+Rg_{01}+Rg_{2x}+Rs_{x2}+Rs_{y4} \quad (3.61)$$

$$A_{11,2}=Rs_{y4} \quad (3.62)$$

$$A_{11,3}=Rs_{x2}+Rg_{2x} \quad (3.63)$$

$$A_{11,4}=Rg_{01}+Rs_{x3} \quad (3.64)$$

$$A_{11,10}=Rs_{y6} \quad (3.65)$$

$$A_{11,12}=Rt_{y1} \quad (3.66)$$

$$A_{11,13}=Rt_{x1}+R0_{x1}+Rt_{x1} \quad (3.67)$$

$$A_{12,12}=Rt_{y1}+Rt_{x1}+R0_{x1}+Rt_{x1}+Rt_{y1}+Rs_{y6}+Rs_{x3}+Rg_{01}+Rg_{2x}+Rs_{x2}+Rs_{y4} \quad (3.68)$$

$$A_{12,8}=Rs_{y4} \quad (3.69)$$

$$A_{12,7}=Rs_{x2}+Rg_{2x} \quad (3.70)$$

$$A_{12,6}=Rg_{01}+Rs_{x3} \quad (3.71)$$

$$A_{12,10}=Rs_{y6} \quad (3.72)$$

$$A_{12,11}=Rt_{y1} \quad (3.73)$$

$$\emptyset_{12,14} = R_{t_{x1}} + R_{0_{x1}} + R_{t_{x1}} \quad (3.74)$$

$$A_{13,13} = R_{t_{x2}} + R_{0_{x2}} + R_{t_{x2}} + R_{t_{y3}} + R_{t_{y2}} + R_{t_{x1}} + R_{0_{x1}} + R_{t_{x1}} + R_{t_{y2}} + R_{t_{y3}} \quad (3.75)$$

$$A_{13,4} = R_{t_{x1}} + R_{0_{x1}} + R_{t_{x1}} \quad (3.76)$$

$$A_{13,14} = R_{t_{y2}} + R_{t_{y3}} \quad (3.77)$$

$$A_{13,15} = R_{t_{x2}} + R_{0_{x2}} + R_{t_{x2}} \quad (3.78)$$

$$A_{14,14} = R_{t_{x2}} + R_{0_{x2}} + R_{t_{x2}} + R_{t_{y3}} + R_{t_{y2}} + R_{t_{x1}} + R_{0_{x1}} + R_{t_{x1}} + R_{t_{y2}} + R_{t_{y3}} \quad (3.79)$$

$$A_{14,12} = R_{t_{x1}} + R_{0_{x1}} + R_{t_{x1}} \quad (3.80)$$

$$A_{14,13} = R_{t_{y2}} + R_{t_{y3}} \quad (3.81)$$

$$A_{14,16} = R_{t_{x2}} + R_{0_{x2}} + R_{t_{x2}} \quad (3.82)$$

$$A_{15,15} = R_{t_{x2}} + R_{0_{x2}} + R_{t_{x2}} + R_{t_{y4}} + R_{b_1} + R_{t_{y4}} \quad (3.83)$$

$$A_{15,13} = R_{t_{x2}} + R_{0_{x2}} + R_{t_{x2}} \quad (3.84)$$

$$A_{15,16} = R_{t_{y4}} \quad (3.85)$$

$$A_{16,16} = R_{t_{x2}} + R_{0_{x2}} + R_{t_{x2}} + R_{t_{y4}} + R_{b_1} + R_{t_{y4}} \quad (3.86)$$

$$A_{16,14} = R_{t_{x2}} + R_{0_{x2}} + R_{t_{x2}} \quad (3.87)$$

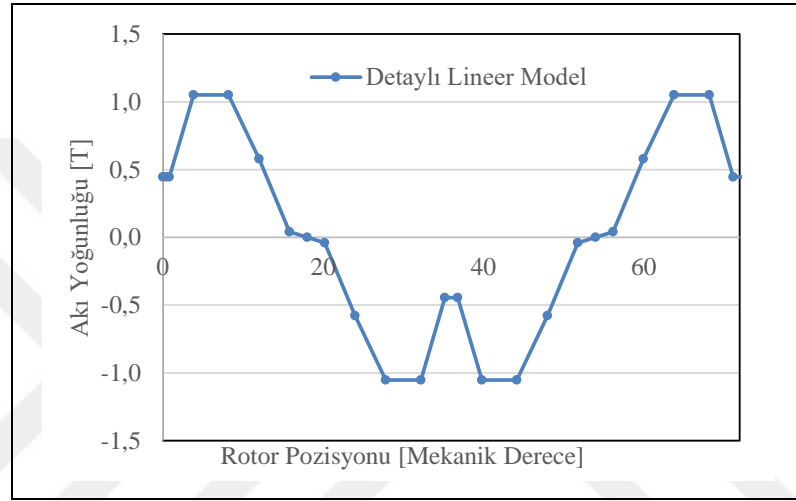
$$A_{16,15} = R_{t_{y4}} \quad (3.88)$$

Denklem takımının çözülebilmesi için Denklemler (3.89) ve (3.90) eşitliklerindeki formatlara getirilmiş ve çözümü yapılmıştır. Çözüm işlemi sonrası hava aralığındaki relüktanslardan geçen akı miktarları hesaplanmış ve her bir relüktanstaki akı yoğunlukları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar excele aktarılmış ve grafiği çizdirilmiştir. 1 kutup çifti boyunca elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişim grafiği Şekil 3.7'de verilmiştir. Akı yoğunluğu tepe değeri olarak 1,052T elde edilmiştir. Ayrıca akı yoğunluğu değişiminde oluk açıklığı etkisinin neden olduğu ani akı yoğunluğu düşüşleri de görülmektedir. Bu ani düşüşlerin, stator oluk açıklıkları

nedeniyle oluşan hava aralığındaki relüktans değişiminden kaynaklandığı unutulmamalıdır.

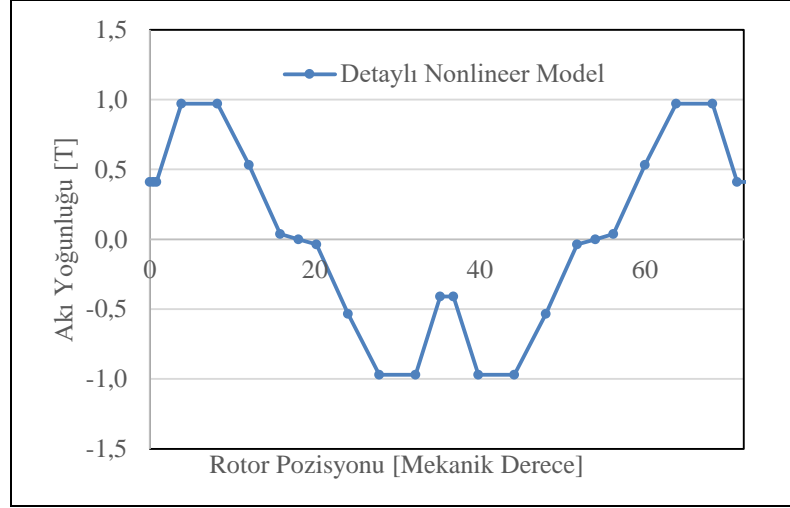
$$A \times \Phi = U \quad (3.89)$$

$$\begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & \dots & A_{1,16} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & \dots & A_{2,16} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ A_{16,1} & A_{16,2} & \dots & A_{16,16} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \vdots \\ \Phi_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_{16} \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

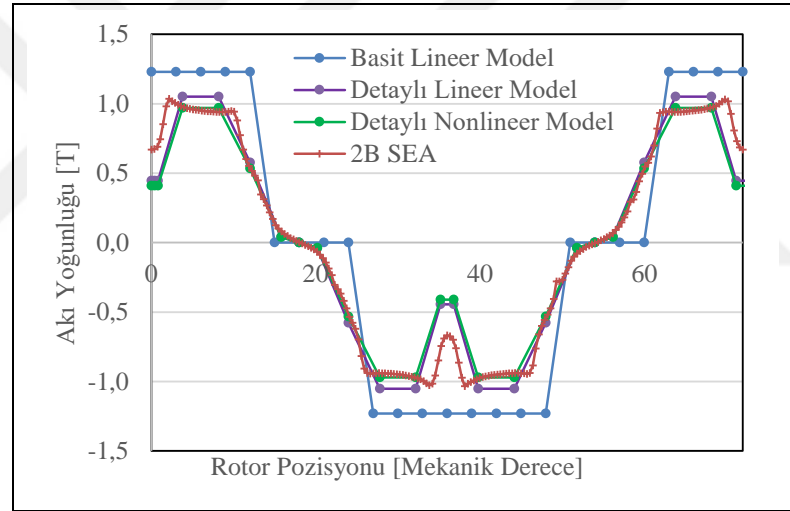


Şekil 3.7. Detaylı manyetik modellemeden elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişimi grafiği (doğrusal elemanlar)

Detaylı manyetik modellemede kullanılan sac ve mıknatıs malzemesinin doğrusal kabul edilmediği durum için de analizler yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Sac malzemeler için geçirgenlik değerinin akı yoğunluğuna bağlı olduğu, mıknatıs B_r değerinin ise sıcaklıkla değiştiği durum için denklem takımları tekrar çözülmüş ve 1 kutup çifti için elde edilen akı yoğunluğu değişimi Şekil 3.8’ de verilmiştir. Akı yoğunluğu tepe değeri 0,97T olarak elde edilmiştir. Farklı durum için yapılan manyetik modelleme sonuçlarının doğruluğunun kontrol edilmesi amacıyla SEA sonuçları ile karşılaştırmaları yapılmış ve Şekil 3.10 ve Tablo 3.2’ de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere akı yoğunluğu tepe değeri en yüksek basit doğrusal modelden elde edilmiştir. En düşük akı yoğunluğu tepe değeri ise 0,94T ile 2B SEA’ dan elde edilmiştir. SEA sonucuna en yakın değer 0,97T değeri ile detaylı nonlinear manyetik modellemeden elde edilmiştir. Aralarındaki fark %3,2 mertebelerindedir. Bu değer de özellikle doğrusal olmayan modelleme ile gerçek değere oldukça yakın sonuçların elde edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 3.8. Detaylı manyetik modellemeden elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişimi grafiği (doğrusal olmayan elemanlar)



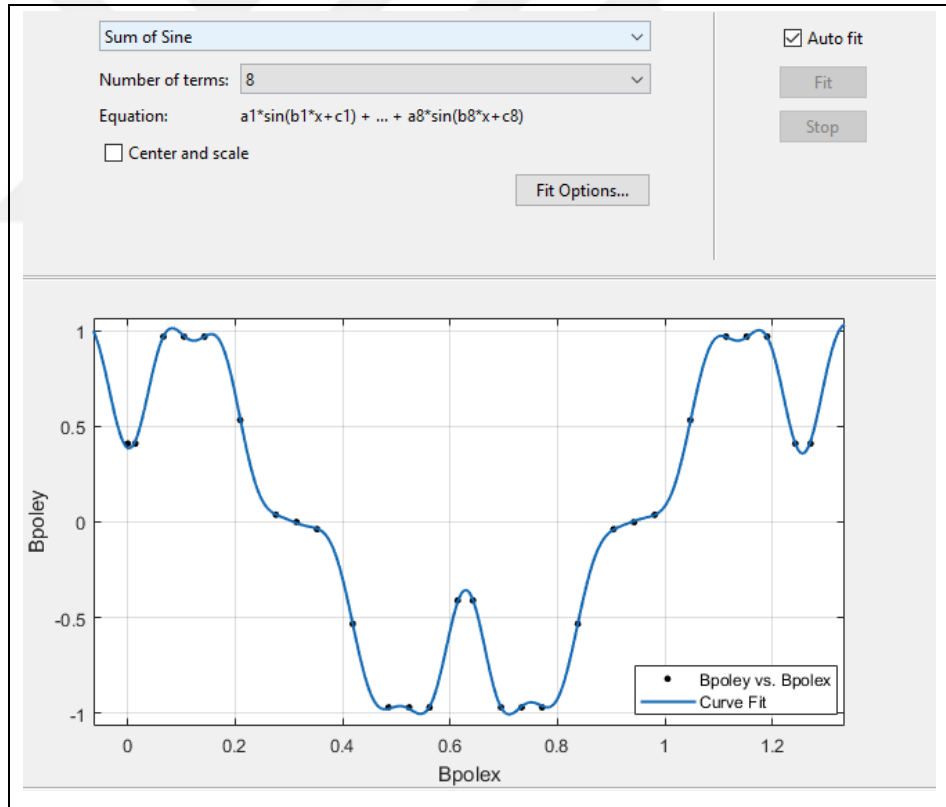
Şekil 3.9. Örnek yapı 2B SEA ile elde farklı relüktans tabanlı manyetik modelleme sonuçlarının karşılaştırması

Tablo 3.2. Örnek SMSM için farklı yöntemlerle elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu tepe değerlerinin karşılaştırması

Hesaplama Yöntemi	Akı yoğunluğu tepe değeri [T]	Hata [%]
Basit Doğrusal Model	1,23	30,87
Detaylı Doğrusal Model	1,052	11,93
Detaylı Doğrusal Olmayan Model	0,97	3,2
2B SEA	0,93	0

3.3. Manyetik Modelden Zıt EMK ve Moment Çıkışı Elde Edilmesi

Relüktans tabanlı manyetik eşdeğer devre kullanılarak motora ait zıt EMK dalga değişiminin elde edilebilmesi için yapılması gereken ilk işlem hava aralığı akı yoğunluğuna bir eğri uydurma işlemidir. Hava aralığı akı yoğunluğu değişiminin fourier açılımı yapılarak sinüs ve cosinüslü bileşenlerin toplamı şeklinde yazmak sıkça kullanılan yöntemler arasındadır. Dalga şekli karmaşık olan yapılar için eğri uydurma işlemini yapacak gelişmiş özel araçlar bulunmaktadır. Matlab eğri uydurma aracı da bunlardan birisidir. Bu araç kullanılarak hava aralığı akı yoğunluğu değişimi 8. dereceden sinüs şeklindeki fonksiyonların toplamı şeklinde elde edilmiştir (Şekil 3.10). Eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen fonksiyon Denklem (3.91)' de verilmiştir. Ayrıca denklem katsayıları da Tablo 3.3' de verilmiştir. Elde edilen bu fonksiyon kullanılarak bir sonraki adıma geçilmiştir.



Şekil 3.10. Hava aralığı akı yoğunluğu değişimi için eğri uydurma işlemi

$$f(x) = a_1 \sin(b_1 x + c_1) + a_2 \sin(b_2 x + c_2) + a_3 \sin(b_3 x + c_3) + a_4 \sin(b_4 x + c_4) + \dots$$

$$\dots a_5 \sin(b_5 x + c_5) + a_6 \sin(b_6 x + c_6) + a_7 \sin(b_7 x + c_7) + a_8 \sin(b_8 x + c_8) \quad (3.91)$$

Tablo 3.3. Hava aralığı akı yoğunluğu denklem katsayıları

a1 = 3,564	b1 = 5,265	c1 = 1,366
a2 = 0,1601	b2 = 15,09	c2 = -1,64
a3 = 0,2663	b3 = 25,06	c3 = -1,617
a4 = 0,0784	b4 = 55,07	c4 = -1,635
a5 = -0,004504	b5 = 31,37	c5 = -0,1411
a6 = 0,07537	b6 = 44,97	c6 = -1,566
a7 = -0,006412	b7 = 66,51	c7 = -0,04973
a8 = -2,628	b8 = 5,363	c8 = 1,291

Hava aralığı akı yoğunluğu değişiminden zıt EMK dalga değişimi elde edilebilmesi için Denklem (3.92)' den faydalanılmaktadır. Ayrıca zıt EMK geriliminden momente geçmek için de Denklem (3.93) ve (3.94) kullanılmaktadır.

$$E_a = 2N_m N B_g L_{st} R_{r0} w_m \quad (3.92)$$

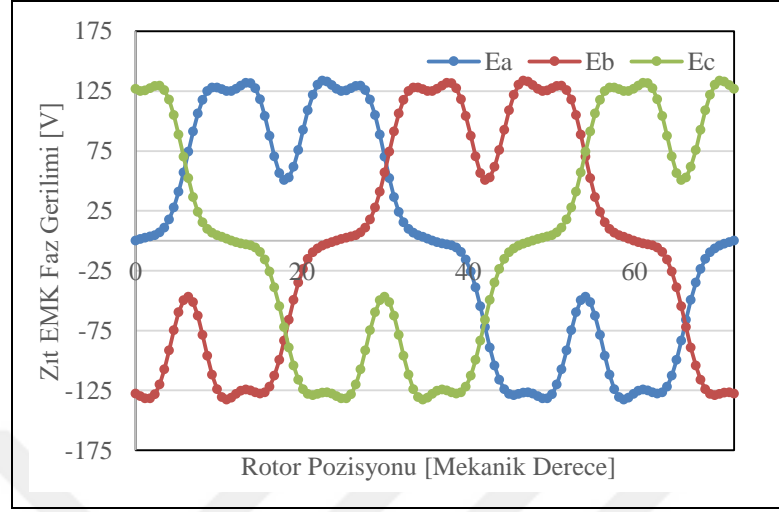
$$T = \frac{E_a I_a + E_b I_b + E_c I_c}{w_m} \quad (3.93)$$

$$T = \frac{P}{w_m} \quad (3.94)$$

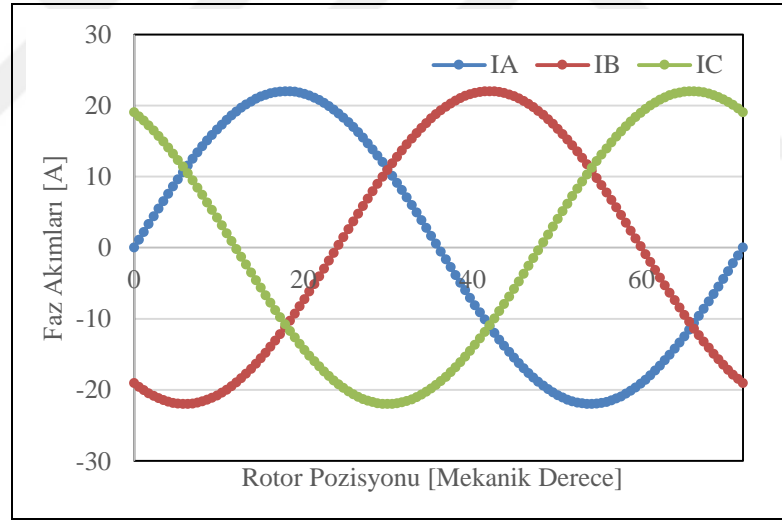
Burada E_a , E_b , E_c ve I_a , I_b , I_c sırasıyla A,B,C fazlarına ait zıt EMK dalga değişimlerini ve fazlara uygulanan akımları, N sarım sayısını, N_m faz başına seri bobin sayısını, B_g hava aralığı akı yoğunluğu değişimini, L_{st} nüve paket boyunu, R_{r0} hava aralığı yarıçapını ve w_m rotor mekanik hızını, T çıkış momentini ve P de çıkış gücünü ifade etmektedir. Zıt EMK eşitliği sayesinde motorun 1 fazına ait zıt EMK dalga değişimi elde edilmektedir. Elde edilen zıt EMK değeri aralarında 120' şer derece açı farkı olacak şekilde 3 faz olarak modellenmiş ve Şekil 3.11' de gösterilmiştir. Motor 5 kutup çiftinden oluştuğu için elektriksel 360 derece 72 mekanik dereceye karşılık gelmektedir. Bu nedenle de grafikler 72 dereceye kadar çizdirilmiştir.

Motora uygulanan akımların maksimum değerleri aynı, aralarındaki açı farkları da 120' şer derece olacak şekilde 3 faz akımları oluşturulmuştur (Şekil 3.12). 3 faz dengeli akımlar sırası ile ilgili Zıt EMK değerleri ile çarpılmıştır. Böylelikle her bir

faz için güç grafikleri elde edilmiştir. Gücün mekanik hıza bölünmesi ile de moment ifadesine geçilmiştir (Şekil 3.13).



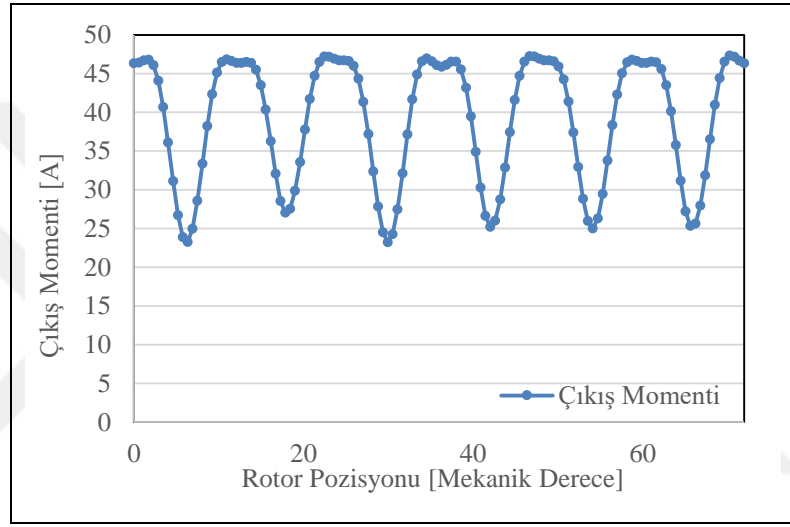
Şekil 3.11. Manyetik eşdeğer devreden elde edilen motor 3 faz Zıt EMK gerilimi değişimleri



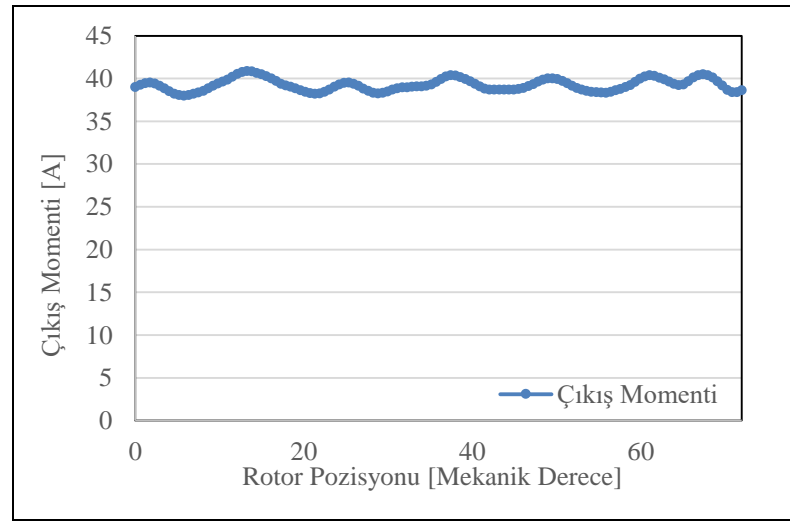
Şekil 3.12. Motor terminallerine uygulanan 3 faz dengeli akım dalga değişimleri (22Amax)

Şekilden görüldüğü üzere çıkış momenti dalgalanması oldukça fazladır. Motorun oluk/faz/kutup oranının tamsayı olduğu göz önünde bulundurulursa bu beklenen bir sonuçtur. Bu problemin ortadan kaldırılması için motorun rotoru 4 segment kullanılarak üretilmiştir. Bu nedenle manyetik modellemede tek bir segment için elde edilen çıkış momenti kullanılarak 4 segmentli yapı için modelleme yapılmıştır. Moment değeri segment paket boyları ile oranlanmış ve kaykı miktarları kadar da ötelenerek süperpozisyon teoremine göre toplanmış ve 4 segmentli yapı için toplam

çıkış momenti elde edilmiştir. Elde edilen çıkış momentinin değişimi Şekil 3.14' de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere 4 segmentli yapının moment dalgalanması segmentsiz yapıya göre oldukça düşük seviyelerdedir. 4 segmentli durum için çıkış momenti ortalama değeri 39,24Nm olarak hesaplanmıştır. Motor katalog değerinde çıkış momentinin 38Nm olduğu göz önünde bulundurulursa, manyetik modelleme ile aralarında %3,3 gibi düşük bir hata payı bulunmaktadır. Bu da yapılan çalışmanın gerçeğe oldukça yakın sonuçlar verdiğini ve modellemenin doğruluğunu göstermektedir.



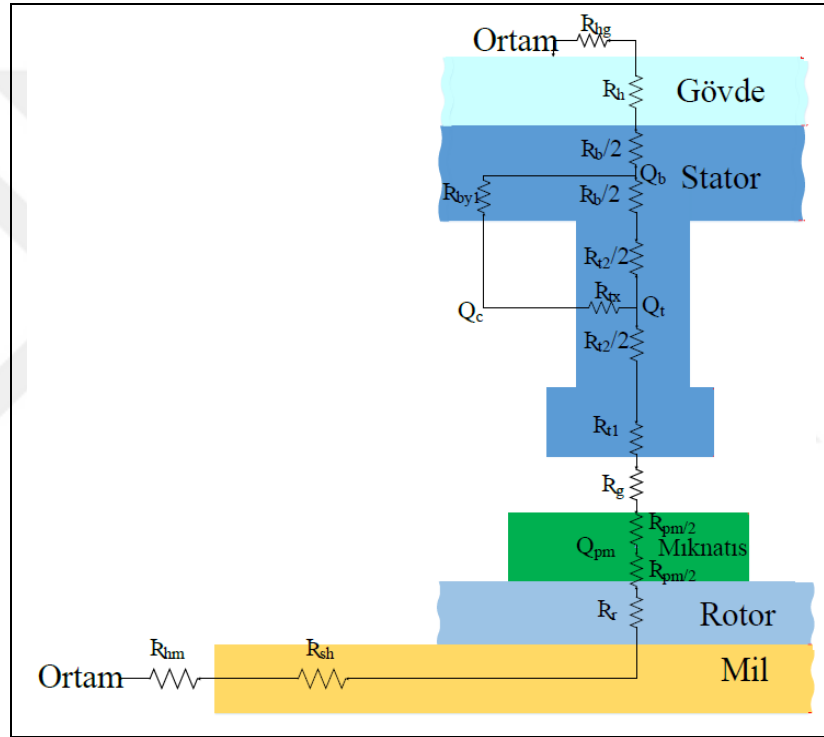
Şekil 3.13. Manyetik eşdeğer devreden elde edilen, segmentsiz rotora sahip, motor çıkış momenti değişimi



Şekil 3.14. Manyetik eşdeğer devreden elde edilen, 4 segmentli rotora sahip, motor çıkış momenti değişimi

3.4. Termal Eşdeğer Devrenin Oluşturulması

Genel olarak elektrik motorların performansına sıcaklığın etkisi büyüktür. Diğer elektrik motorlarında olduğu gibi SMSM' larda da motorun doğru modellenmesi ve performans sonucunun elde edilebilmesi için termal olarak modellenmesi büyük önem taşımaktadır. Motor direnci, manyetik malzemelerin doyum eğrisi ve mıknatıs B_r değeri gibi birçok parametre sıcaklıktan etkilenmektedir. Motorun doğru modellenmesi için sıcaklığın bu parametreler üzerindeki etkisi mutlaka göz önünde bulundurulması gerekmektedir.



Şekil 3.15. SMSM' a ait 1 boyutlu zamandan bağımsız termal eşdeğer devre örneği

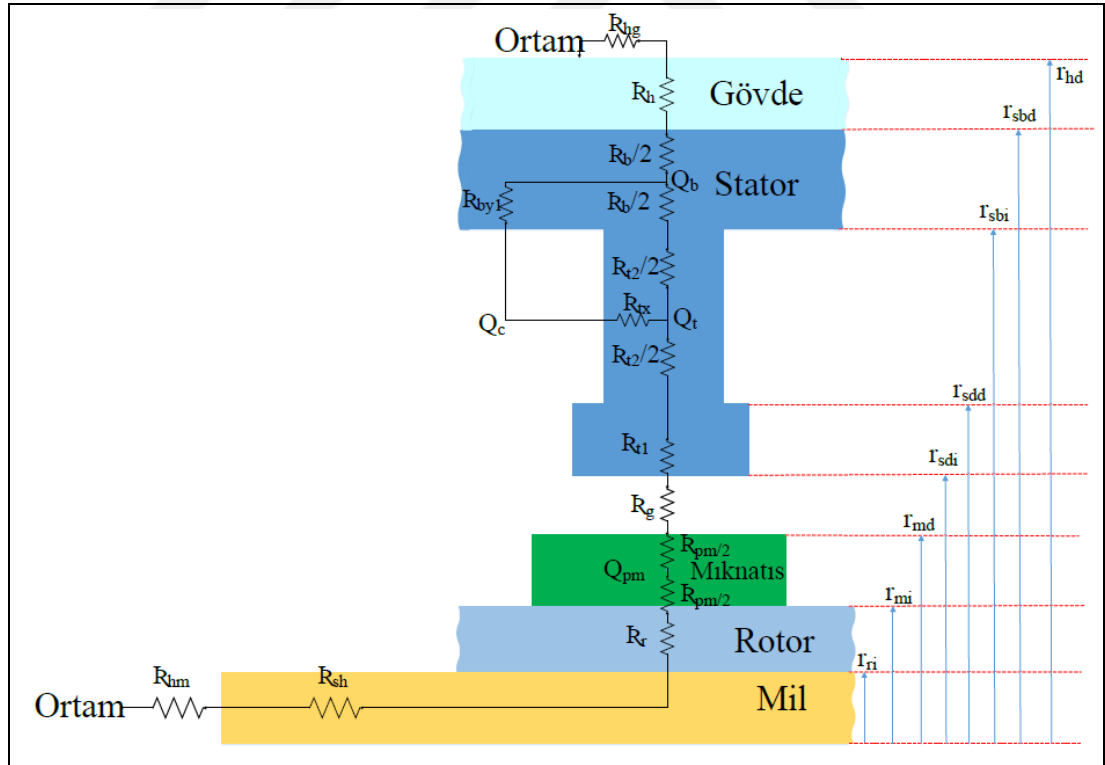
SMSM' lara ait 1 boyutlu, zamandan bağımsız, basit termal eşdeğer devre örneği Şekil 3.15' de verilmiştir [68]. Şekilden görüldüğü bakır kayıpları, stator ve rotor nüvesi ile mıknatıstaki demir kayıpları devrenin kaynakları konumundadır. Örnek motor için anma çalışması durumunda bu kayıp değerleri Tablo 3.4' de verilmiştir. Ayrıca termal eşdeğer devrede belirtilen R_h , R_{sb} , R_{st2} , R_{st1} , R_g , R_m ve R_r termal dirençlerdir. Termal direnç indislerinde yer alan harfler sırasıyla gövde, stator boyunduruğu, stator dişi üst kısım, stator dişi alt kısım, hava aralığı, mıknatıs ve rotordaki dirençler anlamına

gelmektedir. Bu değerler kullanılarak motora ait termal eşdeğer devre çözülmektedir. Modelleme yapılırken aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Bütün malzemelerin ısı geçirgenlik katsayısı sıcaklıktan bağımsız ve doğrusaldır.
- Motorun bakır kayıpları sıcaklığın artmasından etkilenmemektedir.
- Isı dağılımı radyal yönde ve homojen olarak gerçekleşmektedir.
- Sadece taşınım ile ısı geçişi olmaktadır.
- Ortam sıcaklığının 30 derece olduğu ve zamanla değişmediği kabul edilmiştir.

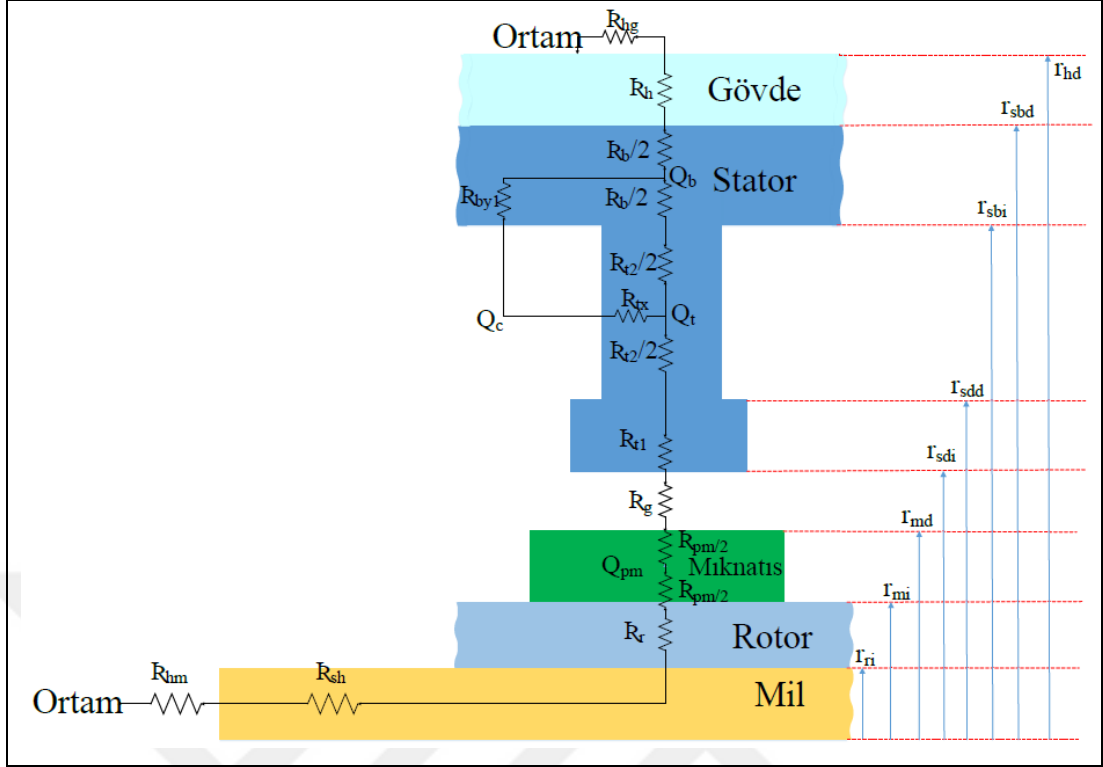
Tablo 3.4. Örnek SMSM termal analizlerde kullanılan demir, bakır ve mıknatıs kayıpları

Kayıp türü	Kayıp Miktarı [Watt]
Bakır kayıpları	151,56
Stator Demir Kayıpları	141,28
Mıknatıs Kayıpları	21,62



Şekil 3.16. SMSM' un termal direnç hesabında kullanılan ana boyutlar

Motora ait termal dirençler oluşturulurken motor ana boyutları kullanılmaktadır. Termal dirençlerin hesaplanmasında kullanılan motor ana boyutları



Şekil 3.16' da verilmiştir. Ayrıca termal direnç denklemleri de Denklem (3.95) - (3.102) arasında verilmiştir. Motorun sürekli anma noktasında çalışması durumu için, kalıcı durumda, termal eşdeğer devrenin çözülmesi ile farklı noktadaki sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Manyetik analizlerde kritik öneme sahip miknatis sıcaklık değeri 85 derece olarak elde edilmiştir (Şekil 3.17). Sıcaklığın miknatis B_r değerinde neden olduğu azalma miktarı hesaplanarak, manyetik modellemeye geri besleme olarak verilmektedir. Böylece manyetik modellemenin daha doğru sonuç vermesi sağlanmaktadır.

$$R_h = \frac{2\pi \ln\left(\frac{r_{hd}}{r_{sb}}\right)}{\phi_h 2\pi l_h \lambda_h} \quad (3.95)$$

$$R_{sb} = \frac{2\pi \ln\left(\frac{r_{sbd}}{r_{sbi}}\right)}{\phi_{sb} 2\pi l_{sb} \lambda_s} \quad (3.96)$$

$$R_{st2} = \frac{2\pi \ln\left(\frac{r_{sbi}}{r_{sdd}}\right)}{\phi_{st2} 2\pi l_{st2} \lambda_s} \quad (3.97)$$

$$R_{st1} = \frac{2\pi \ln\left(\frac{r_{sdd}}{r_{sdi}}\right)}{\phi_{st1} 2\pi l_{st1} \lambda_s} \quad (3.98)$$

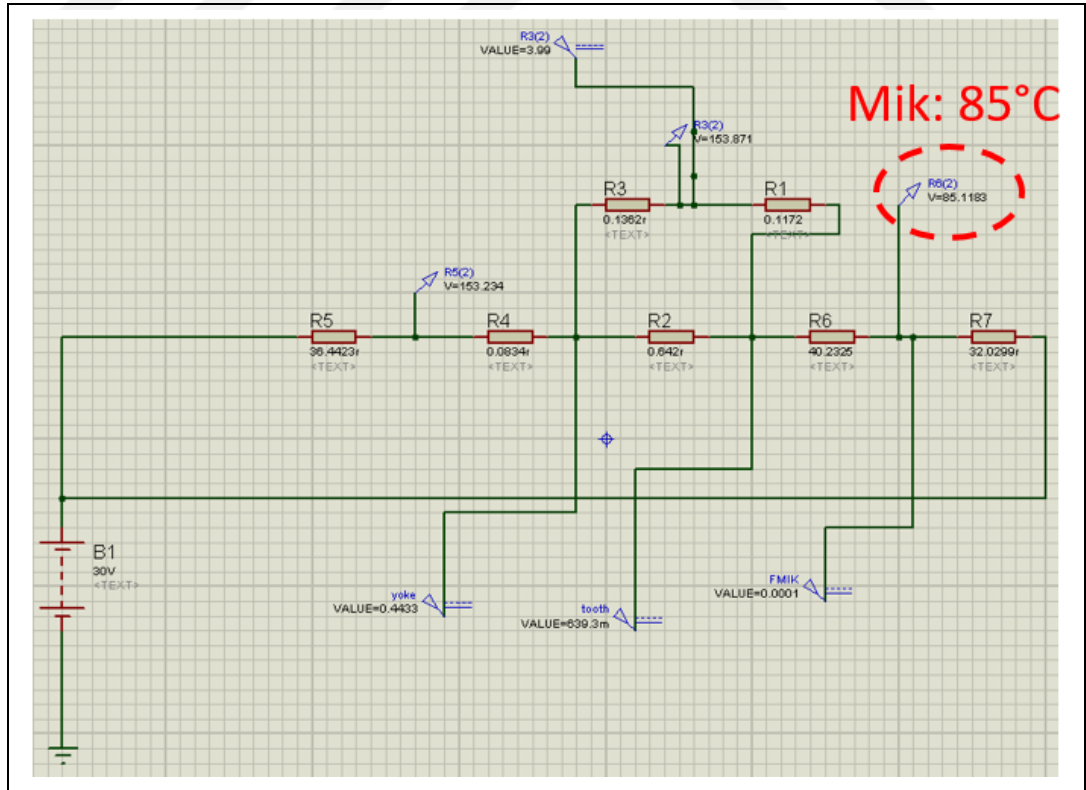
$$R_g = \frac{2\pi \ln\left(\frac{r_{sdi}}{r_{md}}\right)}{\phi_g 2\pi l_g \lambda_g} \quad (3.99)$$

$$R_{pm} = \frac{2\pi \ln\left(\frac{r_{md}}{r_{mi}}\right)}{\phi_{pm} 2\pi l_{pm} \lambda_{pm}} \quad (3.100)$$

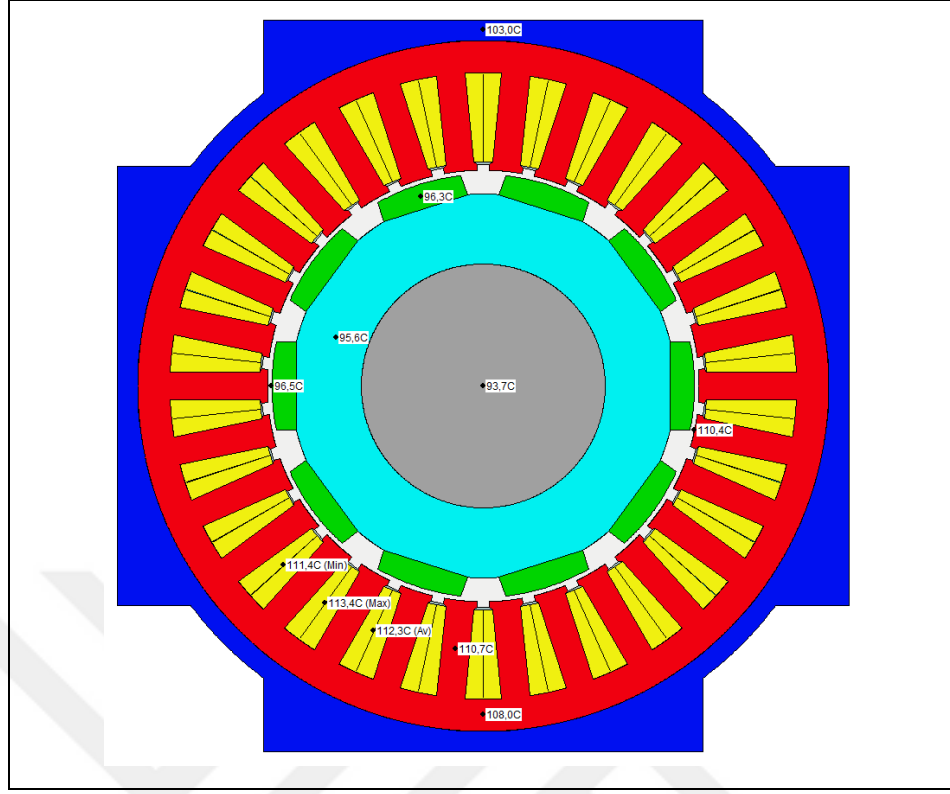
$$R_r = \frac{2\pi \ln\left(\frac{r_{mi}}{r_{ri}}\right)}{\phi_r 2\pi l_r \lambda_r} \quad (3.101)$$

$$R_{sh} = \frac{l_{sh}}{A_{sh} \lambda_{sh}} \quad (3.102)$$

Yapılan çalışmanın doğruluğunun görülmesi amacıyla örnek motor için profesyonel bir termal analiz yazılımı olan MotorCad kullanılarak modelleme yapılmıştır. Oluşturulan model Şekil 3.18’ de gösterilmiştir. Motorun yine anma noktasında sürekli çalışması durumu için MotorCad yazılımı ile termal analiz yapılmış ve elde edilen sonuçlar aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere mıknatis sıcaklıkları 96,3 derece olarak elde edilmiştir. Termal eşdeğer devreden elde edilen değer ile aralarında %12 fark bulunmaktadır.



Şekil 3.17. SMSM termal eşdeğer devreden elde edilen mıknatis sıcaklığı



Şekil 3.18. SMSM MotorCad modeli ve analiz sonucu

Yapılan termal modellemenin çok basit bir modelleme ve kontak dirençlerinin de ihmal edildiği göz önünde bulundurulursa elde edilen bu hata değerinin kabul edilebilir limitler dahilinde olduğu söylenebilir.

3.5. Özet

Bu bölümde, relüktans tabanlı manyetik modelleme temelleri verilerek, SM motor için farklı detayda relüktans tabanlı manyetik modelleme çalışmaları yapılmıştır. Modeller için relüktans denklemleri yazılmış ve çözümleri yapılmıştır. Farklı yöntemler ile elde edilen hava aralığı akı yoğunlukları, SEA sonuçları ile karşılaştırılmış ve detaylı doğrusal olmayan model ile sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Hava aralığı akı yoğunluğu kullanılarak zıt EMK' ya geçilmiştir. 3 faz dengeli zıt EMK dalga değişimleri kullanılarak, 3 faz dengeli akım uygulanması durumu için çıkış momenti değişimi elde edilmiştir.

Ayrıca motor ait 1 boyutlu basit bir termal eşdeğer devre verilmiştir. Devrenin çözümü yapılarak motor üzerindeki farklı noktadaki sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Sonuçların doğruluğunun kontrol edilmesi amacıyla analizler MotorCad yazılımı ile

tekrarlanmıştır. Karşılaştırma sonucunda aradaki farkın kabul edilebilir seviyede olduğu görülmüştür.



4. TAKIM TEZGAHI MOTORU TASARIMI

Bu bölümde, önce tasarlanması planlanan takım tezgahı motoruna ait kriterler verilmiş, ardından tasarlanması planlanan motora yakın kriterlerde referans bir YMSM' a ait manyetik analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmalar da göz önünde bulundurularak tasarım kriterleri doğrultusunda takım tezgahı motoru için kutup sayısı optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve uygulama için optimum kutup sayısı elde edilmiştir. Elde edilen optimum kutup sayısı için referans motora ait stator yapısı sabit tutularak farklı DMM yapılarına ait ön tasarımlar yapılmış ve iki farklı DM yapıya ait detaylı SEA' lar yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda en iyi sonucu veren DM yapı için mekanik tasarım ve analizler ile termal analizler gerçekleştirilmiştir. Mekanik çalışmalardan sonra prototip üretimi yapılarak, oluşturulan test sisteminde detaylı testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları simülasyon sonuçları ile karşılaştırılarak sonuçların uyumu irdelenmiştir.

4.1. Takım Tezgahı Motoru Tasarım Kriterleri

Bilgisayar kontrollü torna takım tezgahları seri üretimde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle üretim miktarının fazla olduğu otomotiv ve beyaz eşya gibi uygulamalarda, bilgisayar kontrollü olmaları nedeniyle bu tür takım tezgahlarının önemi daha da artmaktadır. Torna takım tezgahı ve bu tezgahta işlenen parça örnekleri sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2' de verilmiştir. Teknolojinin ilerlemesi ile otomatik olarak imalat yapan bu tür tezgahlara daha fazla özellikler kazandırılarak, işlem sürelerinin kısaltılması ile ilgili farklı çalışmalar yapılmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi işlenecek parçanın dönüş hızını arttırarak, hem işlem süresini kısaltmak hem de işlenen parçanın yüzey kalitesini arttırmaktır.

Takım tezgahı motoruna ait tasarım kriterleri talaşlı imalat yapan firmanın torna uygulamalarından biri referans alınarak oluşturulmuştur. Seri üretim olarak tornalama işlemi yapılan bu uygulama, sistemin yüksek ataletinden dolayı özellikle yüksek kalkış momentine ihtiyaç duyarken, hızlanma sağlandıktan sonra talaş kaldırma aşamasında ise sistem ataleti sayesinde düşük momente ihtiyaç duymaktadır.



Şekil 4.1. Torna takım tezgahı örneği [69]



Şekil 4.2. Torna takım tezgahı kullanılarak seri üretimde işlenen parça örnekleri [70]

Yine talaş kaldırma aşamasında sistemin hızının fazla olması hem operasyon süresini kısaltmakta hem de işlenen parça yüzey kalitesini arttırmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için özellikle alan zayıflatma kabiliyeti sayesinde anma hızına göre çok yüksek hızlara çıkabilen DM motor türünden bir motorun uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bu bilgiler ışığında örnek uygulama için firmanın talep ettiği temel tasarım kriterleri Tablo 4.1’ de verilmiştir. 7.5kW gücünde anma hızı 4.000rpm, maksimum hızı 10.000rpm seviyelerinde olan bir motorun tasarlanması hedeflenmiştir.

Tablo 4.1. Takım tezgahı motoru tasarım kriterleri

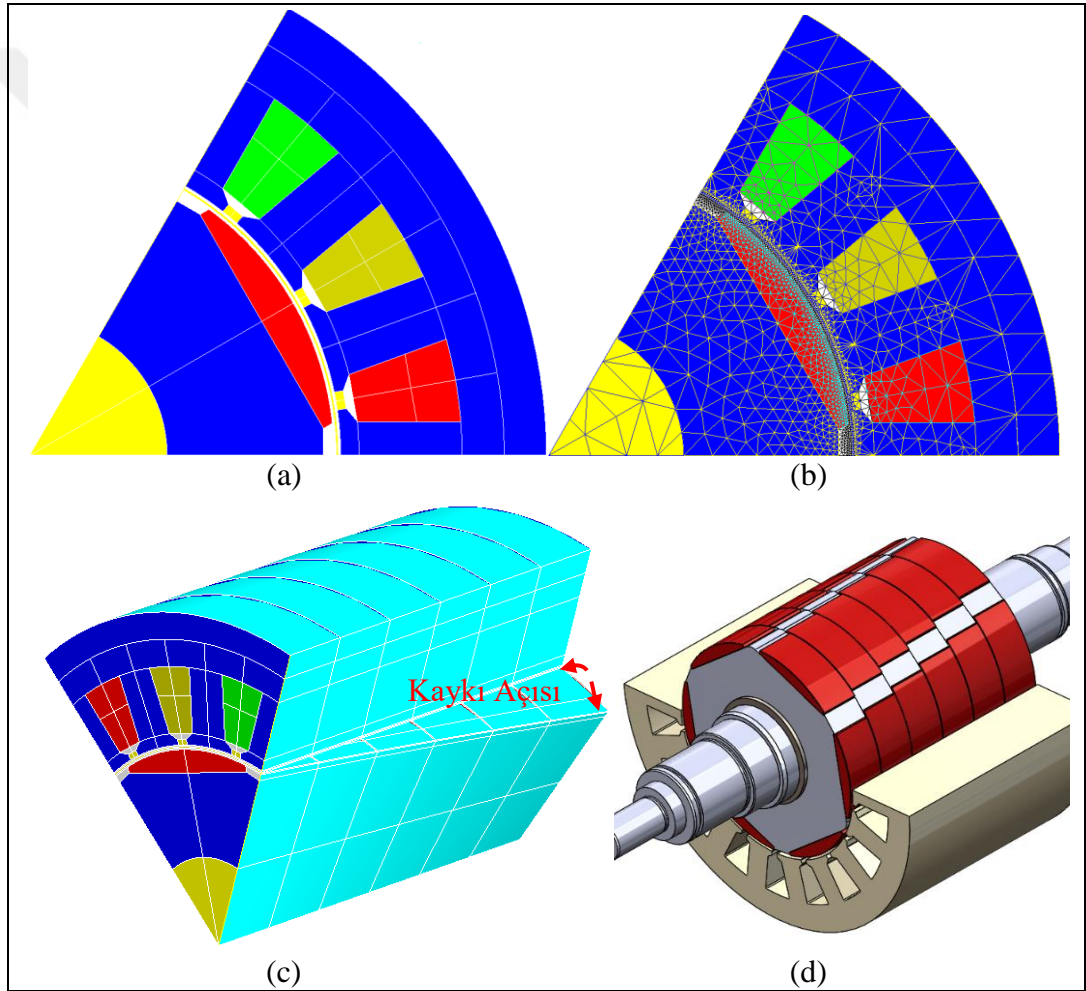
Kare Gövde Boyutu	180 mm
Güç	7,5 kW
Anma Hızı	≥ 4.000 rpm
Anma Momenti	≥ 14 Nm
Maksimum Hız	≥ 10.000 rpm
Maksimum hızdaki moment değeri	≥ 2 Nm
Anma Akımı	19 Apeak
DC Bara Gerilimi	510 V
Oluk sayısı	18
Kutup sayısı	6
Faz sayısı	3

4.2. YüzeYden Miknatıslı Referans Motor İncelemesi

Referans YMSM boyutları ölçülerek Flux 2B SEA programı yardımı ile modellenmiştir. Motor 18 oluk/6 kutup kombinasyonundan oluşmuş, rotoruna toplam 1 oluk adımı kadar kaykıl verilmiş, 6 segmentli bir yapıdır. Referans motora ait oluşturulan SEA modeli, modele ait ağ yapısı ve modelin 3B katı modeli Şekil 4.3' de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere SEA yazılımı özelliği sayesinde kaykılı model 2.5B olarak kolaylıkla modellenmiştir. Oluşturulan modelde 6.025 düğüm, 897 çizgisel eleman, 2.974 adet yüzey elemanı bulunmaktadır. Ayrıca yüzey elemanlarından %96'sı mükemmel kaliteye, %3,8' i iyi kaliteye sahipken, %0,2' si düşük kaliteye sahiptir.

Önce motora ait yüksüz durum analizleri gerçekleştirilmiş, ardından yüklü durum analizlerine geçilmiştir. Yüksüz durum analizlerinde ilk olarak motor akı yoğunluğu seviyeleri ve akı çizgileri yönlerine bakılmıştır (Şekil 4.4). Stator dışlarındaki maksimum akı yoğunluğu 1,4T seviyelerinde, boyunduruktaki akı yoğunlukları ise 1,22T seviyelerindedir. Motor malzemesinin M270-35a olduğu ve bu malzeme için doyum başlangıç noktasının 1,5T seviyelerinde olduğu göz önünde bulundurulursa referans motor akı yoğunluğu seviyelerinin makul seviyelerde olduğu söylenebilir.

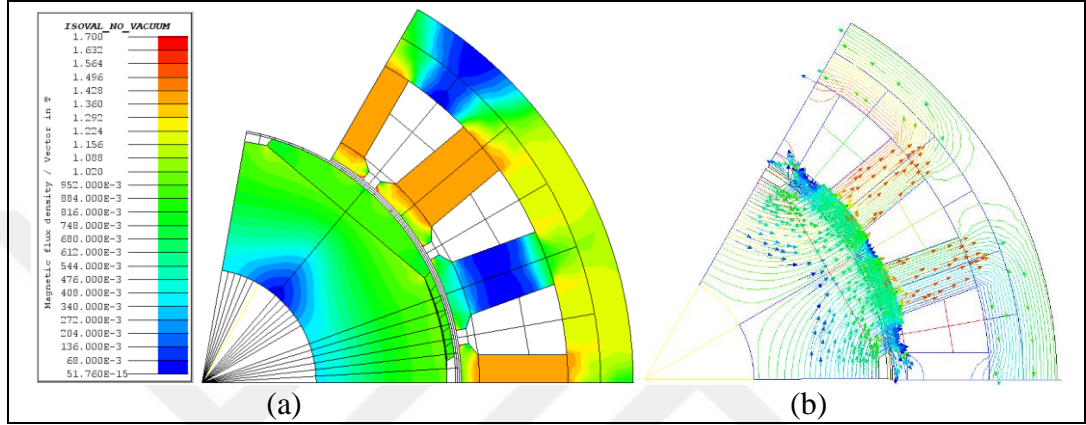
Vuruntu momenti ve zıt EMK dalga şeklinin incelenmesi yapılan diğer yüksüz durum analizleri arasındadır (Şekil 4.5). Referans motora ait vuruntu momenti 0,013Nm seviyelerinde elde edilmiştir. Katalogda motor anma momentinin 18Nm seviyelerinde olduğu göz önünde bulundurulursa bu değer %0,07' e karşılık gelmektedir. Elde edilen bu değer oldukça düşük bir değerdir. Böylelikle motorun vuruntu moment kalitesinin oldukça iyi olduğu söylenebilir. 1.000rpm rotor hızında motorun zıt EMK hat gerilim tepe değeri 116,15V ve bu gerilime ait THD değeri ise %1,03' dür. Bu tür özel motorlarda %1 seviyelerinde THD değeri elde etmek motorun zıt EMK karakteristiğinin oldukça iyi olduğunu göstermektedir.



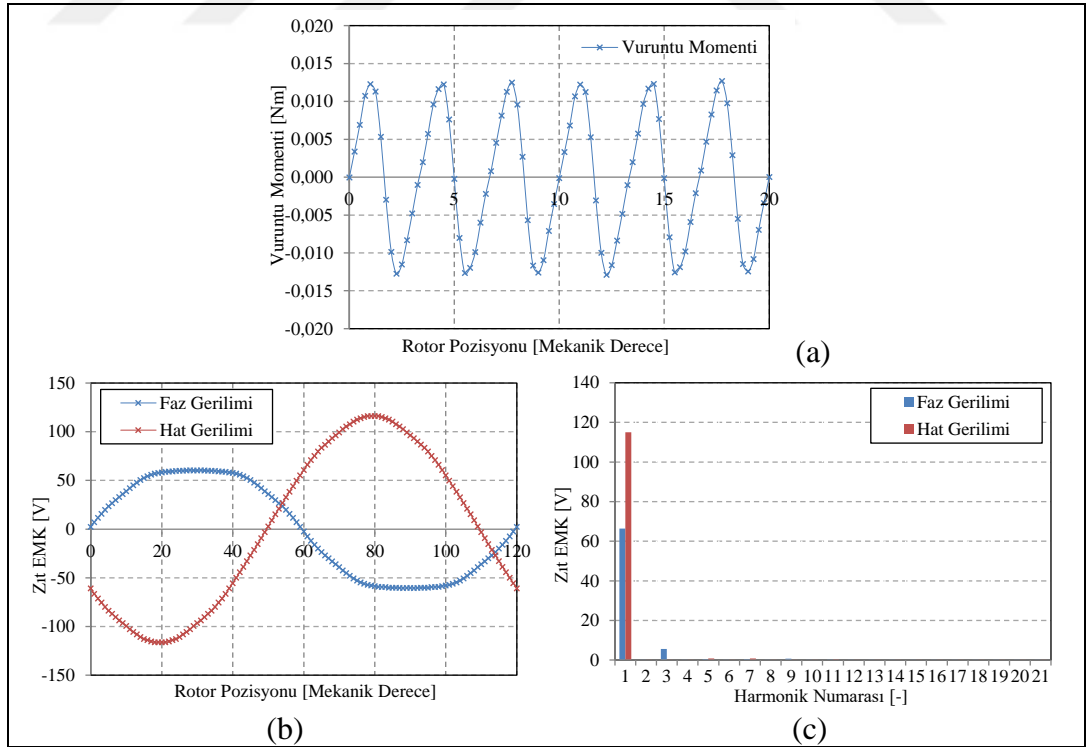
Şekil 4.3. Referans YMSM' a ait (a) SEA modeli, (b) ağ yapısı, (c) kaykık açısının gösterilmesi ve d) 3B katı modeli

Motor ait yüklü durum analizleri de gerçekleştirilmiş ve motorun moment çıkışı ile moment hız eğrisi SEA yöntemi ile incelenmiştir (Şekil 4.6). 19Amax akım değeri için motordan elde edilen ortalama çıkış momenti değeri 18,1Nm' dir ve bu değer katalog

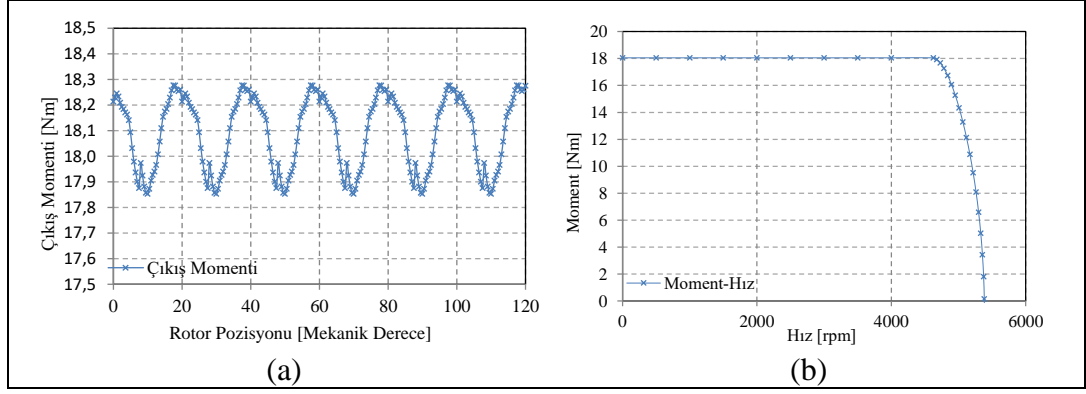
verileri ile %0,5 hata ile örtüşmektedir. Ayrıca moment dalgalanması da ortalama momentin %2,34' ü seviyelerindedir ve bu tür motorlar için %5' in altında bir moment dalgalanmasının iyi bir değer olduğu söylenebilir. Yine aynı grafikte motor anma noktasının 4.400rpm olduğu ve maksimum hızının da 5.100rpm seviyelerinde olduğu görülmektedir. Elde edilen bu değerler motora ait katalog verileri ile %0,5 hata ile örtüştüğü için yapılan manyetik modelleme çalışmasının doğru olduğu söylenebilir.



Şekil 4.4. Referans YMSM' a ait (a) yüksüz durum akı yoğunluğu seviyeleri ve (b) akı çizgileri yönleri (2B SEA)



Şekil 4.5. Referans YMSM' a ait (a) vuruñtu momentı değişimi, (b) 1.000rpm rotor hızı için zıt EMK faz ve hat dalga değişimleri ve (c) zıt EMK FFT analizi (2B SEA)



Şekil 4.6. Referans YMSM' a ait (a) çıkış momenti değişimi ve (b) moment hız eğrisi (@19Amax) (2B SEA)

4.3. Takım Tezgahı Motoru Kutup Sayısı Optimizasyonu

Takım tezgahı motoru tasarım kriterleri doğrultusunda kutup sayısı optimizasyonu yapılmış ve uygulama için optimum kutup sayısı elde edilmeye çalışılmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmaları bazı parametrelerin sabit, bazılarının değişken seçilmesi ile oluşturulan alternatif modellerin çıktılarının excel ortamına not edilerek yapılan hesaplama işlemleri şeklinde gerçekleştirilmiştir. Sabit tutulan parametreler aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

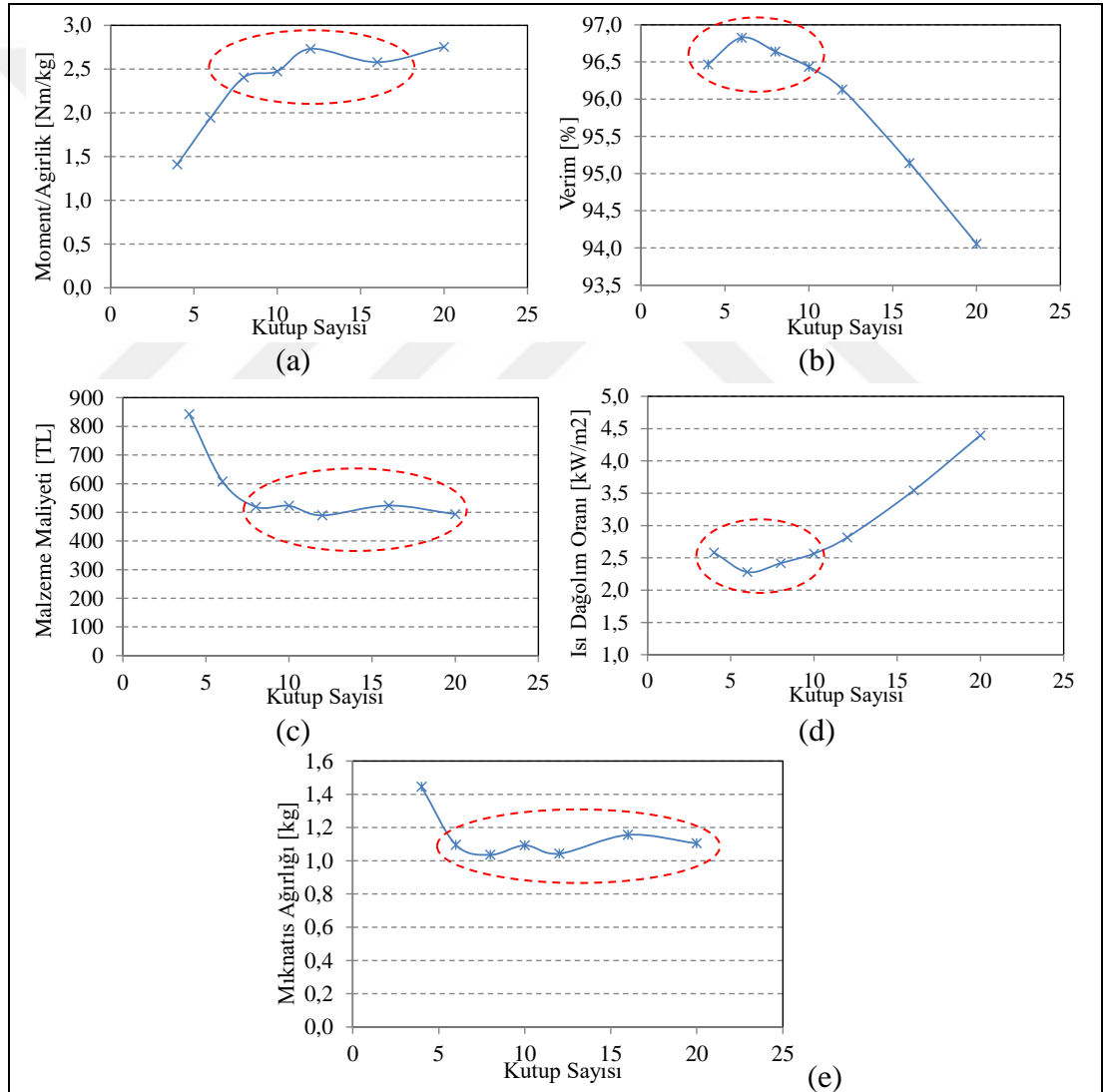
- Toplam amper sarım miktarı,
- Stator dişi ve boyunduruğundaki akı yoğunluğu seviyeleri,
- Oluk bakır dolgu faktörü,
- Hava aralığı yarıçapı,
- Mıknatıs açısıdır.

Optimizasyon sürecinde kullanılan değişken parametreler ise:

- Motor paket boyu,
- Sarım sayısı,
- Stator diş genişliği,
- Oluk derinliğidir.

Yapılan ön tasarımlarla farklı kutup sayıları için değişken parametreler yardımıyla tasarım kriterlerinde belirtilen anma hızı ve anma momenti değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen modeller için aktif malzeme ağırlıkları, kayıplar, motor giriş

ve çıkış büyüklükleri gibi parametreler excel ortamına kayıt edilmiştir. Bütün kutup sayıları için aynı işlemler tamamlandıktan sonra moment/ağırlık oranı, verim, malzeme maliyeti, ısı dağılım oranı ve mıknatıs ağırlığı gibi büyüklüklerin kutup sayılarına göre değişimlerinin grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 4.7). Elde edilen grafiklerde motor performansının maksimize edilebilmesi için grafiklerdeki minimum ve maksimum noktalar belirlenmiştir. Bütün büyüklükler için ortak en iyi ve en az kutup sayısına sahip nokta motor tasarım çalışmasının yapılacağı optimum nokta olarak belirlenmiştir. Bu uygulamada 6 kutup çalışmanın başlatılacağı optimum kutup sayısı olarak seçilmiştir.



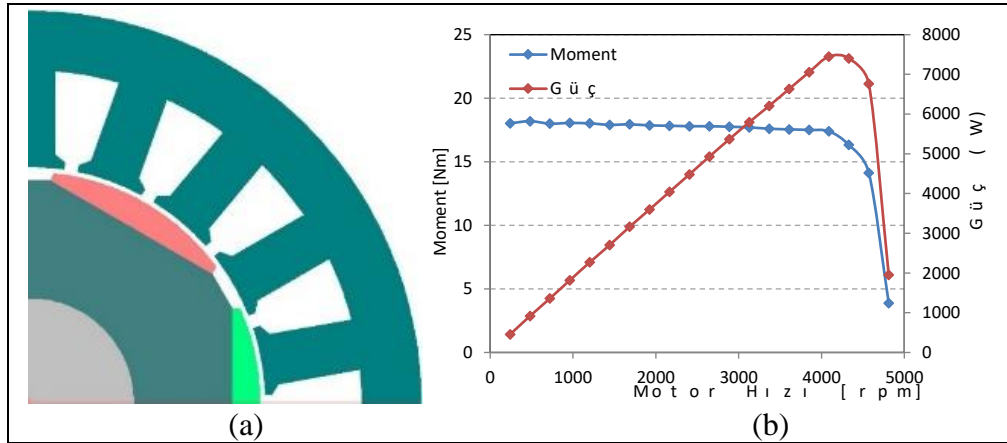
Şekil 4.7. Takım tezgahı motoru kutup sayısı optimizasyonu, kutup sayısının (a) moment/ağırlık oranına göre değişimi, (b) verimin değişimi (c) malzeme maliyetinin değişimi, (d) ısı dağılım oranının değişimi ve (e) mıknatıs ağırlığının değişimi

4.4. Dahili Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı

Takım tezgahı motoru tasarım kriterleri göz önünde bulundurularak farklı DM motor rotor yapıları incelenmiş ve kriterler doğrultusunda en uygun olduğu düşünülen iki farklı DMSM yapısının detaylı incelenmesine karar verilmiştir. Stator laminasyon ve sargı yapısı olarak daha önce incelenen YMSM referans alınmış, stator da herhangi bir değişiklik yapılmadan aynen kullanılmıştır. Böylelikle farklı DMSM yapılarının karşılaştırmalarının daha adil olması hedeflenmiştir.

4.4.1. Dahili mıknatıslı motor ihtiyacı ve farklı dahili mıknatıslı yapıların incelenmesi

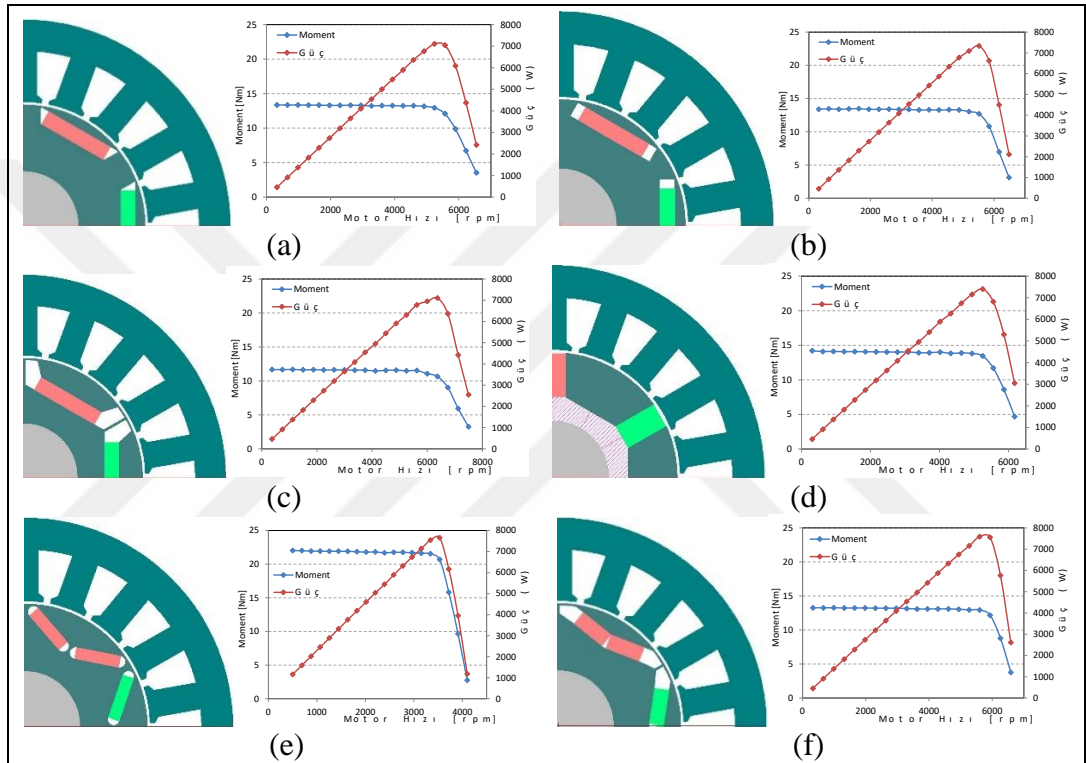
Takım tezgahı motor tasarım çalışmasında optimum kutup sayısı için farklı tip DMSM rotor yapıları incelenmiş ve tasarım kriterlerine en yakın performansı sağlayan yapılar belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar sırasında referans YMSM stator ölçülerinde, sargı yapısında, uygulanan akım miktarında ve nüve paket boyunda herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Böylelikle daha adil bir karşılaştırma yapılması hedeflenmiştir. Referans YMSM' a ait moment-hız ve güç-hız eğrileri Şekil 4.8' de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere 4.000rpm seviyelerindeki anma hızından sonra motor moment değeri aniden düşerek, motor maksimum hıza ulaşmaktadır. Bu maksimum hız değeri de hedeflenen 10.000rpm hız seviyelerinden oldukça düşüktür.



Şekil 4.8. Referans YMSM' a ait (a) moment-hız ve (b) güç-hız eğrileri








Referans motorun stator yapısının aynı tutularak ön tasarımları yapılan DMSM yapıları sırasıyla klasik DM yapı v1, klasik DM yapı v2, tek katmanlı DM yapı, çubuk tip DM yapı, v tipi DM yapı ve v tipi DM yapı v2' dir. Modellenen bütün DM yapılarda

kullanılan mıknatıs hacimleri aynıdır ve referans YM motordaki mıknatıs hacminden %6 daha azdır. Yapılara ait ön tasarım modelleri, moment-hız ve güç-hız grafikleri Şekil 4.9’ de verilmiştir. Ayrıca elde edilen ön tasarımların moment hız ve güçlerinin karşılaştırıldığı özet tablo da Tablo 4.2’ de verilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda güç yoğunluğu ve alan zayıflatma kabiliyeti en iyi olan aynı zamanda birçok firmanın da ürününde kullandığı v tipi DM yapı ile moment yoğunluğu yüksek olan çubuk tip DM yapının detaylı SEA’ ları ve optimizasyonlarının yapılmasına karar verilmiştir.



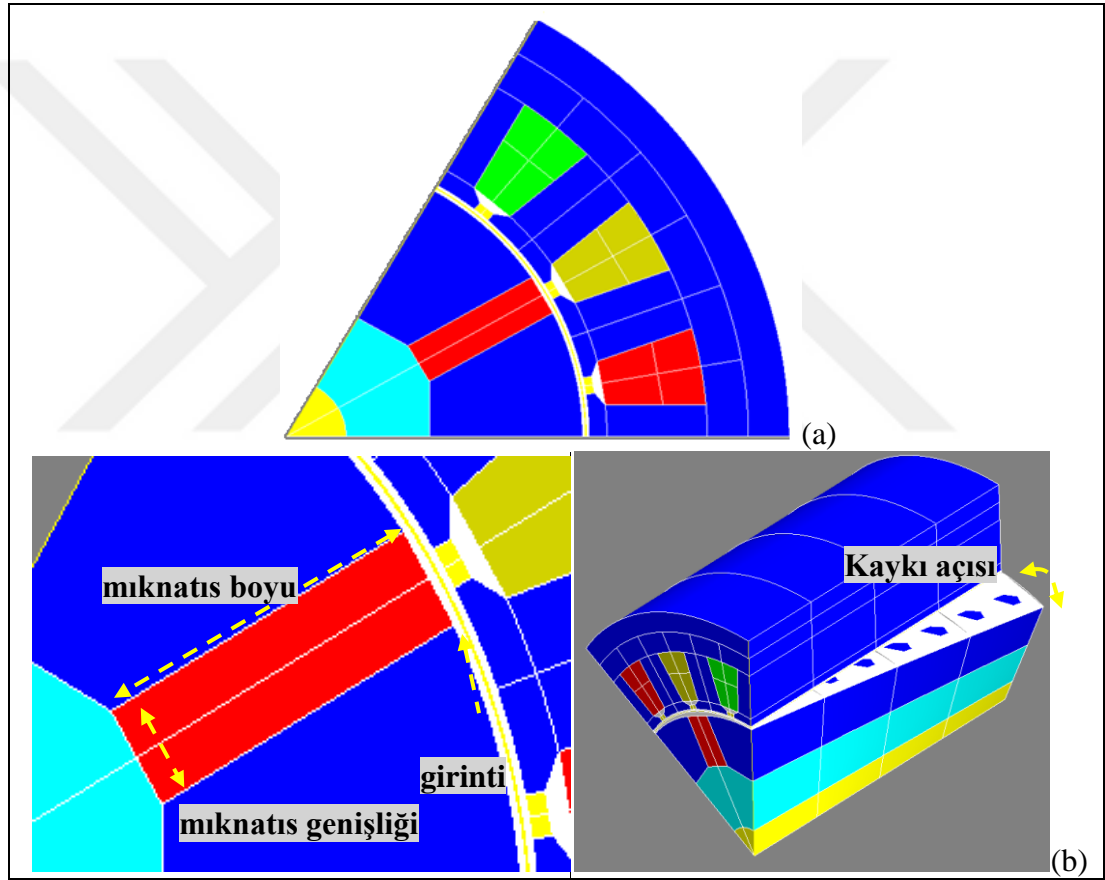
Şekil 4.9. Alternatif DMSM yapıları a) klasik DM v1, b) klasik DM v2, c) tek katmanlı DM, d) çubuk tip DM, e) v tipi DM ve f) v tipi DM v2

Tablo 4.2. Alternatif DMSM yapılarının karşılaştırılması

	YM	Klasik 1	Klasik 2	Tek Katman	Çubuk	V tip 1	V tip 2
Görsel							
Moment [Nm]	17,4	12,95	12,7	10,65	13,45	20,7	12,94
Hız [rpm]	4090	5240	5516	6370	5251	3532	5600
Güç [W]	7,45	7,11	7,34	7,1	7,4	7,66	7,59

4.4.2. Çubuk tip yapı detaylı manyetik analizleri

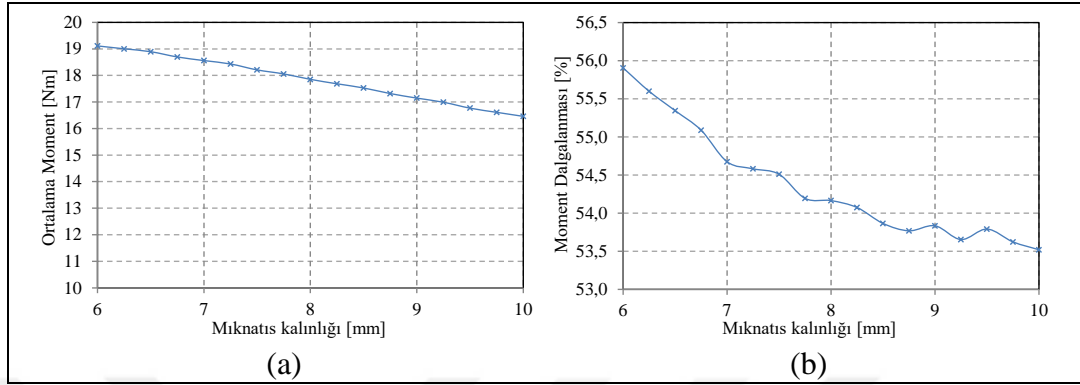
Çubuk tip DM motora ait ön tasarım boyutları kullanılarak detaylı SEA' ları ve optimizasyonları yapılmıştır. Motorun stator yapısı ön çalışmalarda olduğu gibi referans motor birebir aynı alınmış ve herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Optimizasyonlar sadece motorun rotor kısmında gerçekleştirilmiştir. Segmentsiz durum ve farklı segment sayıları için (3, 4 ve 6 segment) çalışmalar yapılmış ve en iyi sonuçları veren boyutlar için nihai tasarım elde edilmiştir. Çubuk tip motora ait oluşturulan SEA modeli ve optimizasyonu yapılan parametreler Şekil 4.10' de verilmiştir.



Şekil 4.10. Çubuk tip DM yapı (a) 2B SEA modeli ve (b) optimizasyonu yapılan parametreler

Çubuk tip segmentsiz yapı için mıknaş genişliği ve boyu değişken parametre olarak alınmış ve belirli aralıkta küçük adımlarla değiştirilerek çıkış momenti ortalama değerleri ve moment dalgalanmaları kontrol edilmiştir. Mıknaş hacmi sabit alındığı için tek parametre optimizasyonu anlamına gelmektedir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve en iyi sonucu veren versiyon bulunmaya çalışılmıştır. Sonuçlar

Şekil 4.11’ de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere en düşük moment dalgalanması 16,46Nm ortalama moment ve % 53,5 moment dalgalanmasının ile mıknatıs genişliğinin 10mm olduğu durum için elde edilmiştir.



Şekil 4.11. Farklı mıknatıs kalınlıkları için çubuk tip DM segmentsiz yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (2B SEA)

3 segmentli yapı için mıknatıs genişliği, girinti ve kaykık açısı değişken parametreler alınmış ve belirli aralıkta küçük adımlarla değiştirilerek çıkış momenti ortalama değeri ve moment dalgalanmaları kontrol edilmiştir. Kaykık açısının 20 derece alındığı durumda girinti miktarının optimizasyonu için elde edilen sonuçlar Şekil 4.12’ de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere moment dalgalanması adına en iyi sonuçlar 12,08Nm ortalama moment ve % 5,03 moment dalgalanması ile mıknatıs genişliğinin 10mm ve girintinin 1,2mm olduğu durumdur.

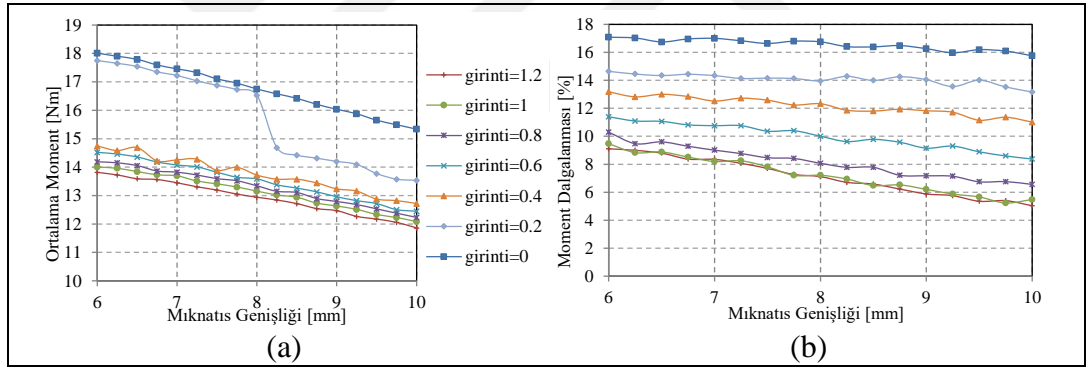
Yapılan diğer bir optimizasyon da mıknatıs genişliğinin 10mm, girintinin de 0mm olarak alındığı durumda kaykık açısı için yapılmıştır. Şekil 4.13’ den görüleceği üzere moment dalgalanması açısından en iyi sonuçlar ortalama momentin 14.63Nm, moment dalgalanmasının ise %9,67 değerleri ile kaykık açısının 24,5 derece olduğu durumda elde edilmiştir. En iyi sonucun alındığı 24,5 derece kaykık açısı ve 10mm mıknatıs genişliği için girintinin optimizasyonu tekrar çalıştırılmış ve sonuçlar Şekil 4.14’ de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere en iyi sonuçlar 10,87Nm ortalama moment ve %3,08 moment dalgalanması ile girintinin 1mm olduğu durumda elde edilmiştir.

Elde edilen optimum boyutlar için motor sargılarına sabit akım verilerek çıkış momenti, relüktans momenti ve mıknatıs kaynaklı momentler elde edilmiş ve Şekil 4.15’ de verilmiştir. Moment tepe değerleri sırasıyla 11,02Nm, 1,03Nm ve 10,74Nm’ dir. Relüktans moment bileşeni ortalama çıkış momentinin %9,3’ ü seviyelerindedir.

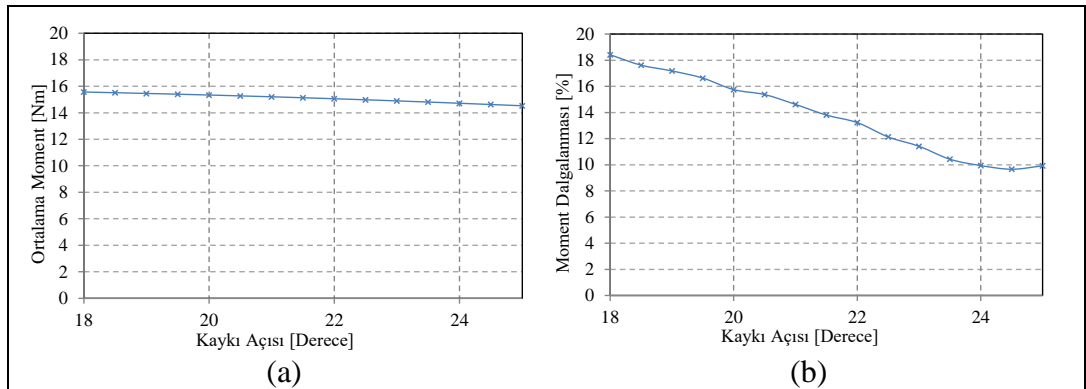
Ayrıca relüktans momenti frekansı mıknatıs kaynaklı momente ait frekansın iki katı büyüklüktedir. Bu beklenen bir durumdur ve Denklem 4.1’ de verilen çıkık kutuplu senkron motorların güç denkleminde kolaylıkla görülebilir.

$$P=3 \frac{VE}{x_d} \sin\delta - \frac{3}{2} V^2 \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \sin 2\delta \quad (4.1)$$

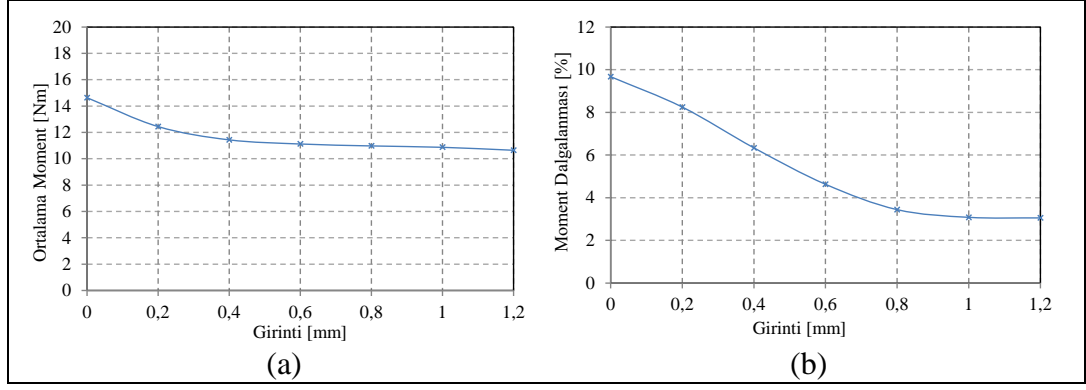
Burada δ moment açısını, x_d ve x_q da sırasıyla d-eksen ve q-eksen reaktanslarını ifade etmektedir. Yine denklemden kolaylıkla görüleceği üzere d ve q eksen reaktansları arasındaki farkın artması çıkış gücünün artmasını sağlayacaktır. Bu durum için vurutu momenti ile zıt EMK analizleri de yapılmış ve sonuçlar sırasıyla Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’ de verilmiştir. Vurutu momenti tepe değeri 0,28Nm seviyelerinde, ortalama momente göre yüzdesi de %2,58 seviyelerindedir. 1000rpm rotor hızı için elde edilen zıt EMK hat gerilimi tepe değeri 88,01V seviyelerindedir. Gerilim seviyesine ait THD değeri ise %0,93’ dür.



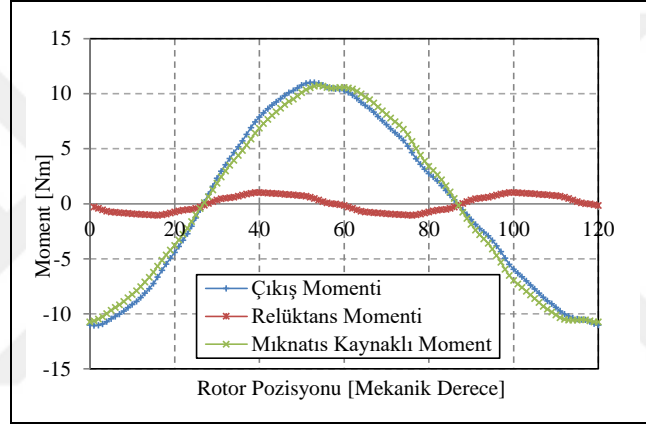
Şekil 4.12. Farklı mıknatıs kalınlıkları ve girintileri için çubuk tip DM 3 segmentli yapı analizleri (a) ortalama çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (2B SEA)



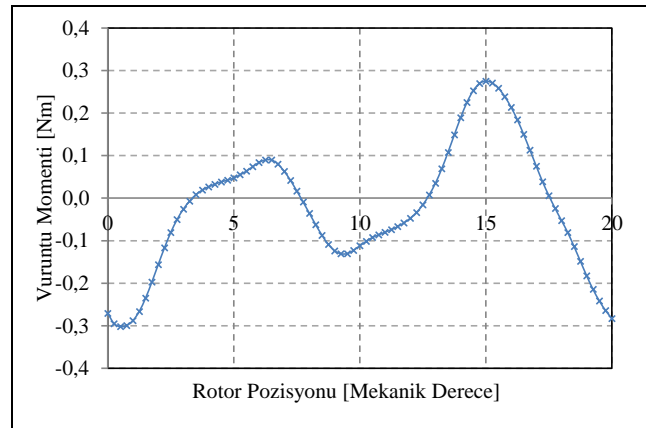
Şekil 4.13. Farklı kaykık açıları için çubuk tip DM 3 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (mıknatıs genişliği=10mm) (2B SEA)



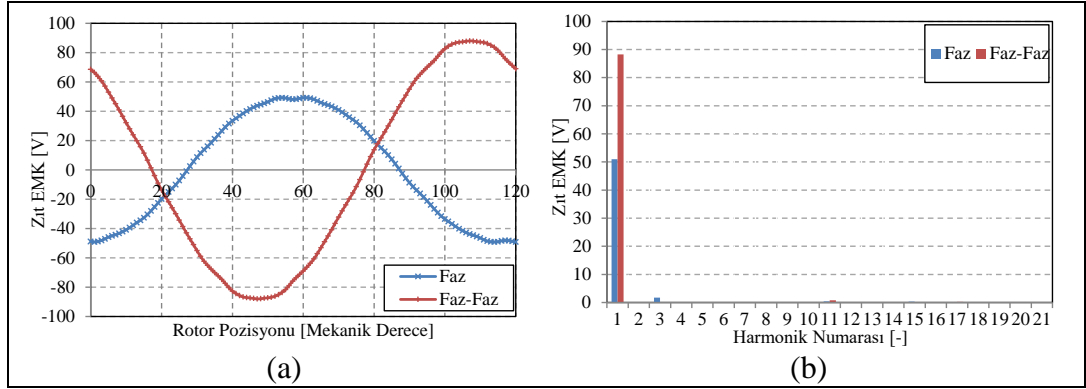
Şekil 4.14. Farklı mıknatıs girintileri için çubuk tip DM 3 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (kaykık açısı=24,5 derece ve mıknatıs genişliği=10mm) (2B SEA)



Şekil 4.15. Çubuk tip DM 3 segmentli yapının sabit akım için (@19A_{max}) çıkış momenti, relüktans momenti ve mıknatıs kaynaklı momentin değişimi (2B SEA)

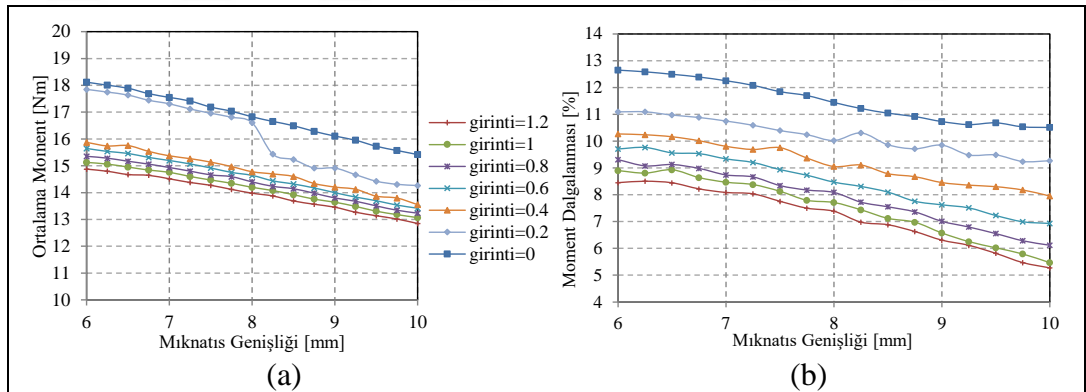


Şekil 4.16. Çubuk tip DM 3 segmentli yapının vuruntu momenti değişimi (2B SEA)



Şekil 4.17. Çubuk tip DM 3 segmentli yapı 1.000rpm rotor hızındaki (a) zıt EMK dalga değişimi ve (b) FFT analizi (2B SEA)

Çubuk tip 4 segmentli yapı için mıknatıs genişliği, girinti ve kaykı açısı değişken parametreler alınmış ve belirli aralıkta küçük adımlarla değiştirilerek çıkış momentleri ortalama değeri ve moment dalgalanmaları kontrol edilmiştir. Kaykı açısının 20 derece alındığı durumda girinti miktarının optimizasyonu için elde edilen sonuçlar Şekil 4.18’ de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere moment dalgalanması adına en iyi sonuçlar 12,85Nm ortalama moment ve % 5,27 moment dalgalanması ile mıknatıs genişliğinin 10mm ve girintinin 1,2mm olduğu durumdur.

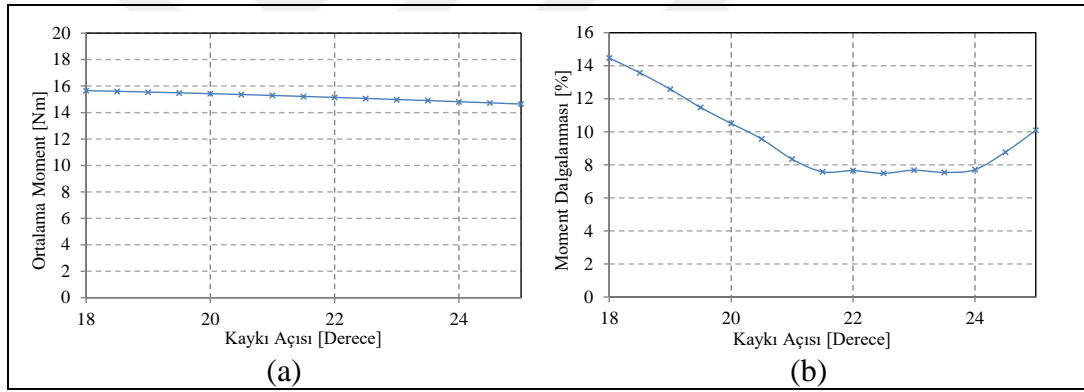


Şekil 4.18. Farklı mıknatıs kalınlıkları ve girintileri için çubuk tip DM 4 segmentli yapı analizleri (a) ortalama çıkış momentini ve (b) moment dalgalanması (2B SEA)

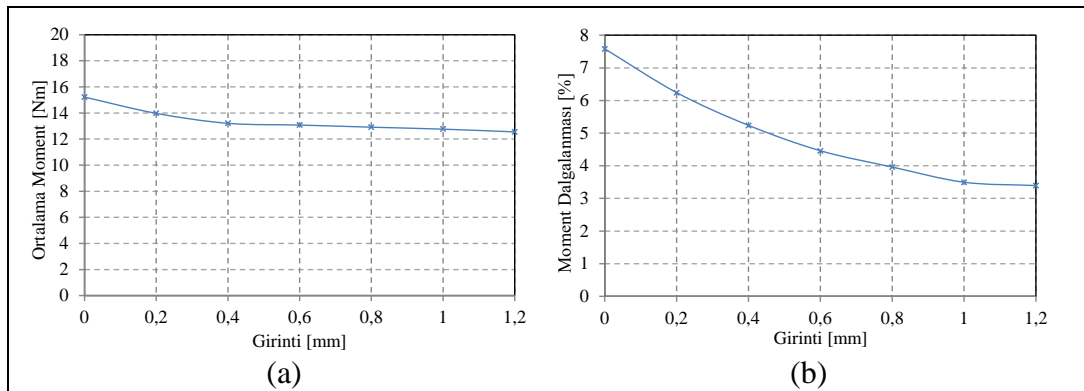
Yapılan diğer bir optimizasyon da mıknatıs genişliğinin 10mm, girintinin de 0mm olarak alındığı durumda kaykı açısı için yapılmıştır. Şekil 4.19’ den görüleceği üzere moment dalgalanması açısından en iyi sonuçlar ortalama momentin 15,21Nm, moment dalgalanmasının ise %7,58 değerleri ile kaykı açısının 21,5 derece olduğu durumda elde edilmiştir. En iyi sonucun alındığı 21,5 derece kaykı açısı ve 10mm mıknatıs genişliği için girinti optimizasyonu tekrar çalıştırılmış ve Şekil 4.20’ de verilmiştir.

Şekilden görüleceği üzere en iyi sonuçlar 12,76Nm ortalama moment ve %3,49 moment dalgalanması ile girintinin 1mm olduğu durumda elde edilmiştir.

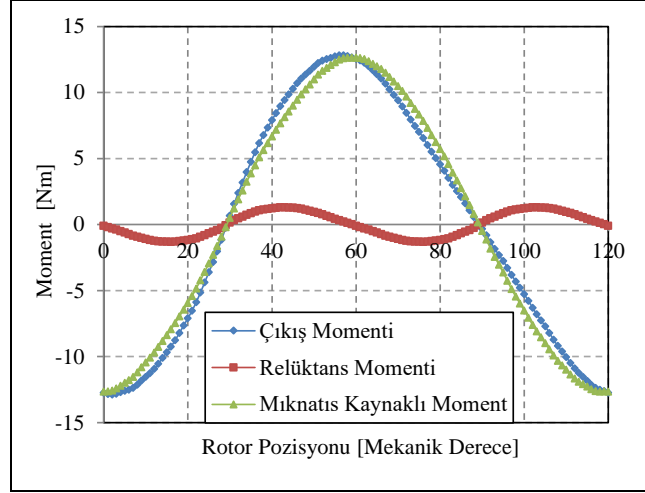
Elde edilen optimum boyutlar için motor sargılarına sabit akım verilerek çıkış momenti, relüktans momenti ve mıknatıs kaynaklı momentler elde edilmiş ve sonuçlar Şekil 4.21’ de verilmiştir. Moment tepe değerleri sırasıyla 12,83Nm, 1,3Nm ve 12,64Nm’ olarak elde edilmiştir. Relüktans moment bileşeni ortalama çıkış momentinin %10,14’ ü seviyelerindedir. Ayrıca yine bu durum için vurutu momenti ile zıt EMK analizleri yapılmış ve sonuçlar sırasıyla Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’ de verilmiştir. Vurutu momenti tepe değeri 0,1Nm seviyelerindedir ve ortalama momente göre yüzdesi de %0,78 seviyelerindedir. 1.000rpm rotor hızı için elde edilen zıt EMK hat gerilimi tepe değeri 89,74V seviyelerindedir. Gerilim seviyesine ait THD değeri ise %0,92’ dir.



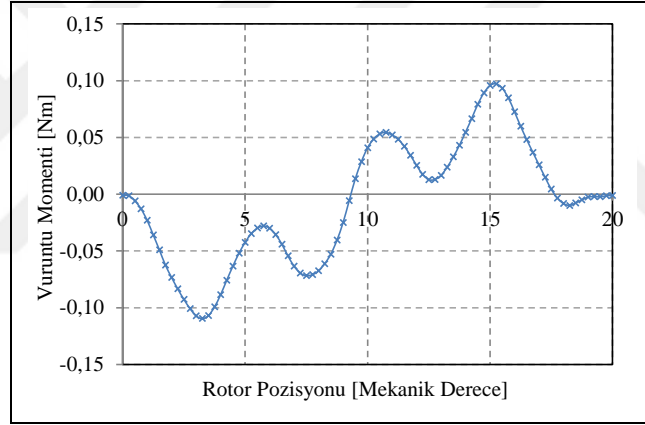
Şekil 4.19. Farklı kaykık açıları için çubuk tip DM 4 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (mıknatıs genişliği=10mm) (2B SEA)



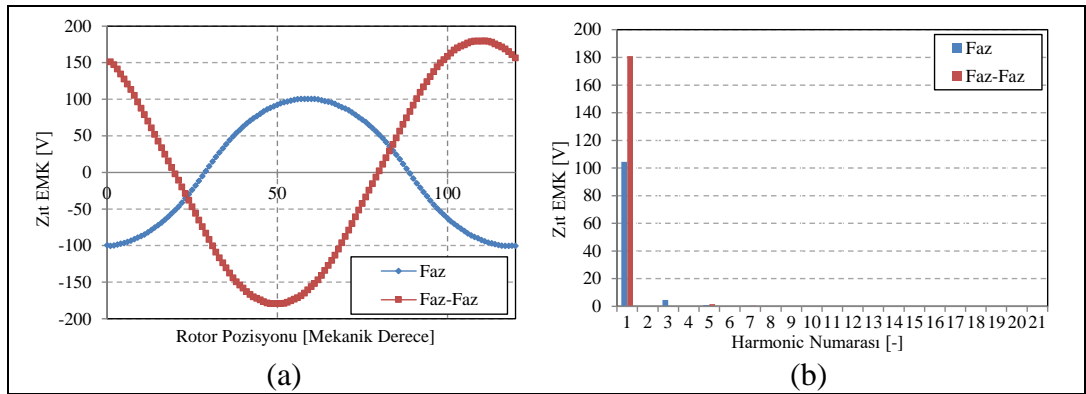
Şekil 4.20. Farklı mıknatıs girintileri için çubuk tip DM 4 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (kaykık açısı=21,5 ve mıknatıs genişliği=10mm) (2B SEA)



Şekil 4.21. Çubuk tip DM 4 segmentli yapının sabit akım için (@19Amax) çıkış momenti, relüktans momentini ve mıknatıs kaynaklı momentin değişimi (2B SEA)

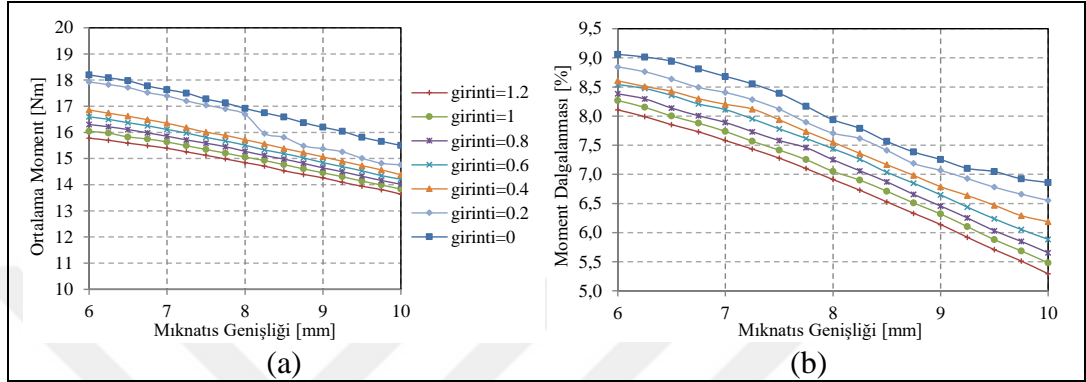


Şekil 4.22. Çubuk tip DM 4 segmentli yapının vurutu momentini değişimi (2B SEA)



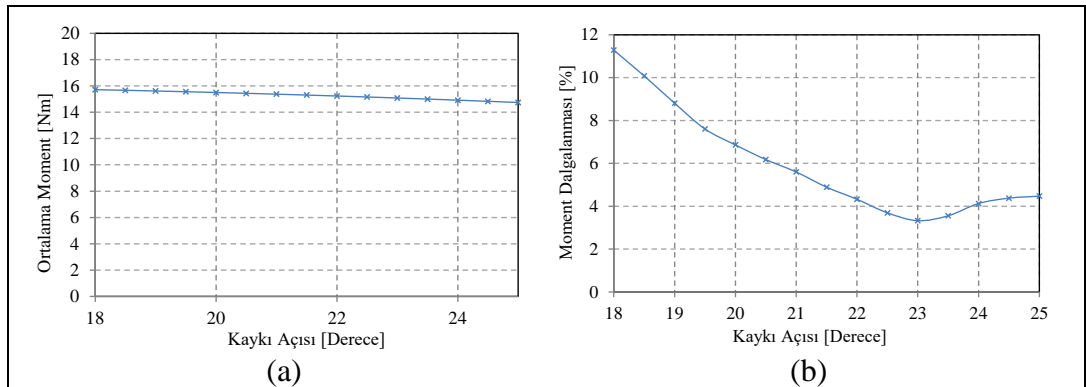
Şekil 4.23. Çubuk tip DM 4 segmentli yapının 1.000rpm rotor hızındaki (a) zıt EMK dalga değişimi ve (b) FFT analizi (2B SEA)

Çubuk tip 6 segmentli yapı için mıknatıs genişliği, girinti ve kaykık açısı değişken parametreler alınmış ve belirli aralıklarda küçük adımlarla değiştirilerek çıkış momentleri ortalama değeri ve moment dalgalanmaları kontrol edilmiştir. Kaykık açısının 20 derece alındığı durumda girinti miktarının optimizasyonu için elde edilen sonuçlar Şekil 4.24’ de verilmiştir.



Şekil 4.24. Farklı mıknatıs kalınlıkları ve girintileri için çubuk tip DM 6 segmentli yapı analizleri (a) ortalama çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (2B SEA)

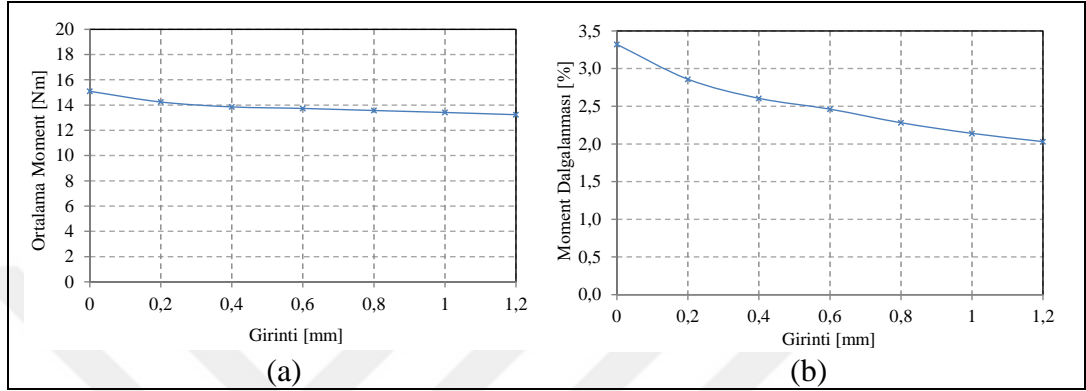
Şekilden görüleceği üzere moment dalgalanması adına en iyi sonuçlar 13,63Nm ortalama moment ve % 5,29 moment dalgalanmasının ile mıknatıs genişliğinin 10mm ve insetin 1,2mm olduğu durumdur.



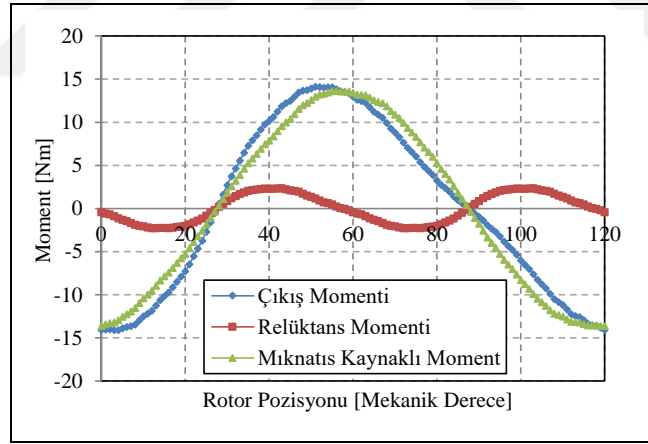
Şekil 4.25. Farklı kaykık açıları için çubuk tip DM 6 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (mıknatıs genişliği=10mm) (2B SEA)

Yapılan diğer bir optimizasyon da mıknatıs genişliğinin 10mm, insetin de 0mm olarak alındığı durumda kaykık açısı için yapılmıştır. Şekil 4.25’ den görüleceği üzere moment dalgalanması açısından en iyi sonuçlar ortalama momentin 15,08Nm, moment dalgalanmasının ise %3,32 değerleri ile kaykık açısının 23 derece olduğu durumda elde edilmiştir. En iyi sonucun alındığı 23 derece kaykık açısı ve 10mm mıknatıs genişliği

için girinti optimizasyonu tekrar çalıştırılmış ve Şekil 4.26' da verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere en iyi sonuçlar 14,24Nm ortalama moment ve %2,86 moment dalgalanması ile girintinin 0,2mm olduğu durumda elde edilmiştir. Burada kıstas moment dalgalanmasının %3' den az olması ve ortalama momentin de mümkün olduğunca fazla olanının seçilmesidir.



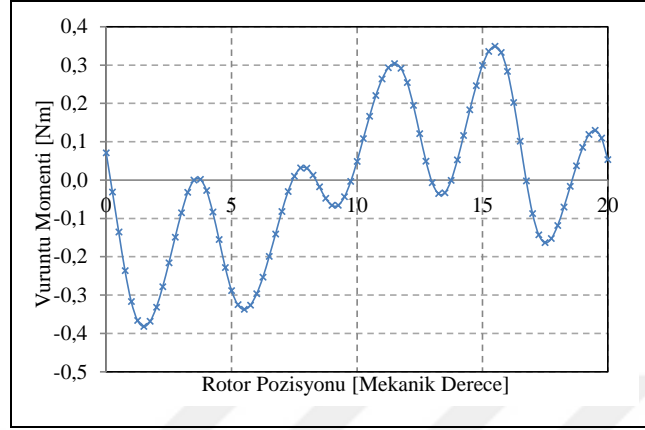
Şekil 4.26. Farklı mıknatıs girintileri için çubuk tip DM 6 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması (kaykılı açısı=23 ve mıknatıs genişliği=10mm) (2B SEA)



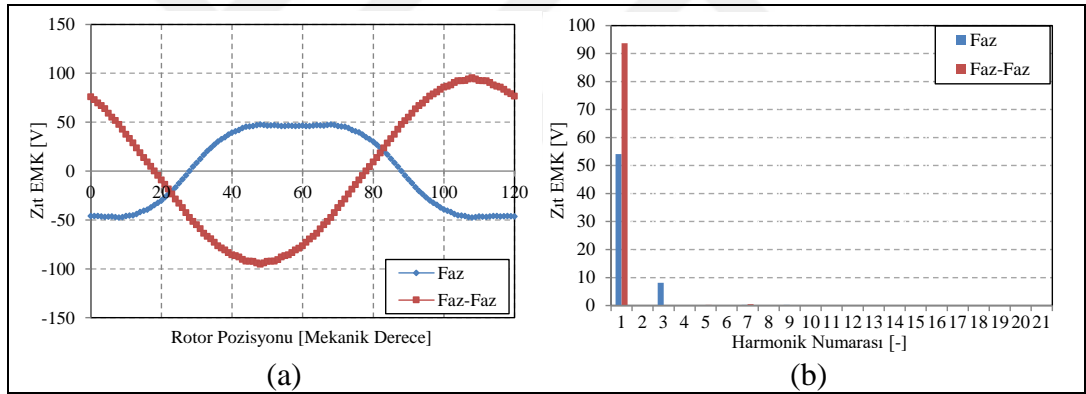
Şekil 4.27. Çubuk tip DM 6 segmentli yapının sabit akım için (@19Amax) çıkış momenti, relüktans momenti ve mıknatıs kaynaklı momentin değişimi (2B SEA)

Elde edilen optimum boyutlar için motor sargılarına sabit akım verilerek çıkış momenti, relüktans momenti ve mıknatıs kaynaklı momentler elde edilmiş ve Şekil 4.27' de verilmiştir. Moment tepe değerleri sırasıyla 14,09Nm, 2,31Nm ve 13,63Nm' dir. Relüktans moment bileşeni ortalama çıkış momentinin %16,4' ü seviyelerindedir. Ayrıca yine bu durum için vuru momentini ile zıt EMK analizleri yapılmış ve sonuçlar sırasıyla Şekil 4.28 ve Şekil 4.29' de verilmiştir. Vuru momentini tepe

değeri 0,35Nm seviyelerinde, ortalama momente göre yüzdesi de %2,45 seviyelerindedir. 1.000rpm hız için elde edilen zıt EMK hat gerilimi tepe değeri 95,28V seviyelerindedir. Gerilim seviyesine ait THD değeri ise %0,62' dir.



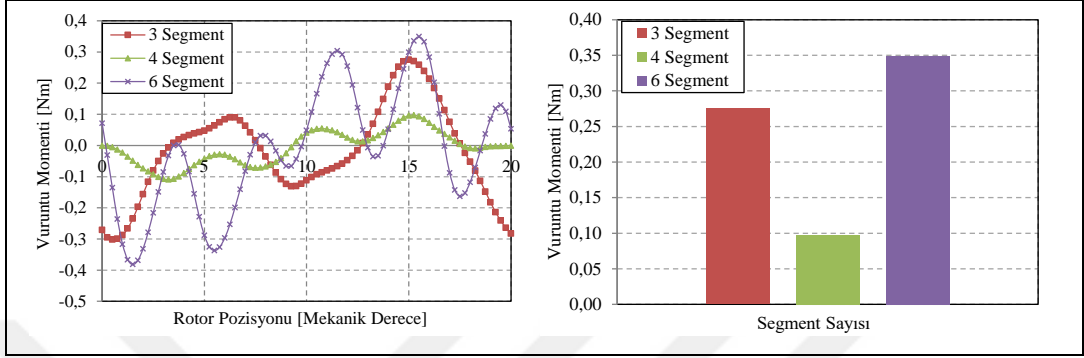
Şekil 4.28. Çubuk tip DM 6 segmentli yapının vuruğu momenti değışimi (2B SEA)



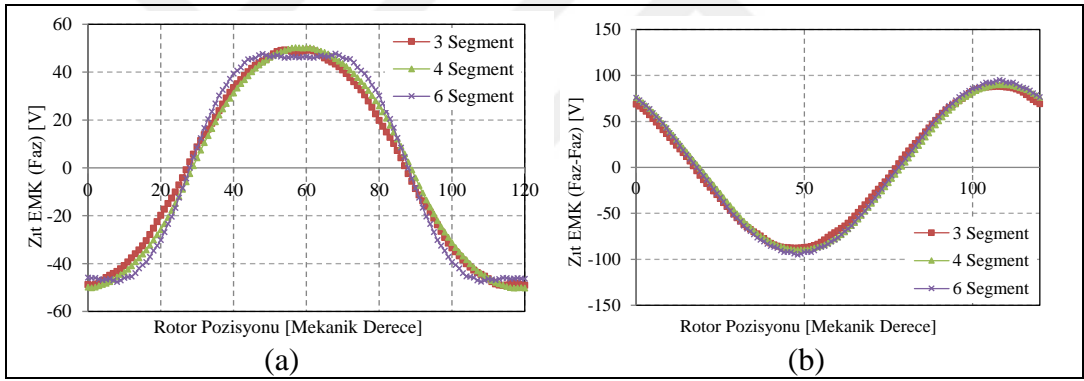
Şekil 4.29. Çubuk tip DM 6 segmentli yapı 1.000rpm rotor hızı için (a) zıt EMK dalga değışimi ve (b) FFT analizi (2B SEA)

Farklı segment sayısında çubuk tip DMSM yapıları için elde edilen optimum sonuçlar kendi aralarında karşılaştırmış ve en iyi sonucu veren versiyon belirlenmeye çalışılmıştır. Vuruğu momentlerinin karşılaştırmaları Şekil 4.30' de verilmiştir. Kullanılan motor kombinasyonunda oluk/kutup/faz oranının 1 olması nedeniyle vuruğu momentinin fazla, zıt EMK' sı harmonikli, moment dalgalanmasının da fazla olması beklenen durumdur. Bu nedenle segmentsiz yapı için moment dalgalanmasının fazla olduğu görüldükten sonra vuruğu momentini ve zıt EMK analizlerinin yapılmasına gerek görülmemiştir. En düşük vuruğu momentini değeri 0.1Nm tepe değeri ile 4 segmentli versiyonda elde edilmiştir. 1.000rpm rotor hızı için zıt EMK faz

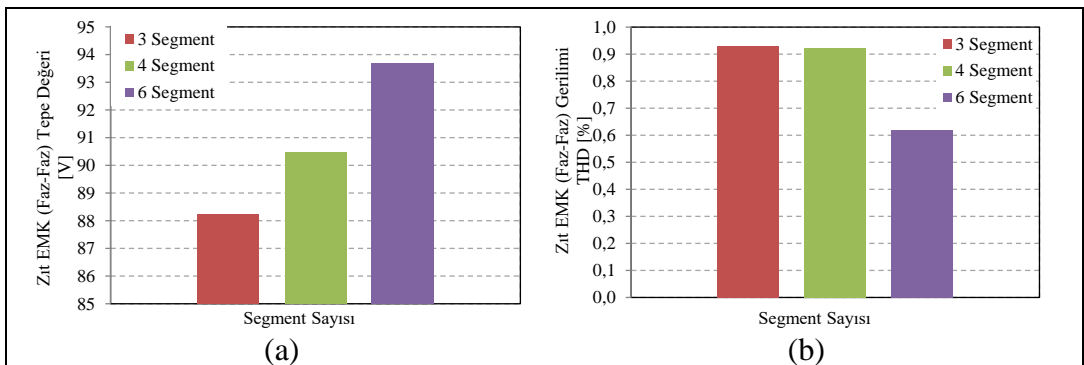
ve hat dalga değişimleri Şekil 4.31’ de, hat dalga değişimine ait tepe değerleri ve THD değerleri ise Şekil 4.32’ de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere en yüksek zıt EMK değeri 93,69V ile 6 segmentte elde edilmiştir. Ayrıca 6 segmentli yapının THD’ si de %0,6 seviyelerindedir.



Şekil 4.30. Farklı segmentlerdeki çubuk tip yapıların vurutu momentlerinin karşılaştırılması (2B SEA)

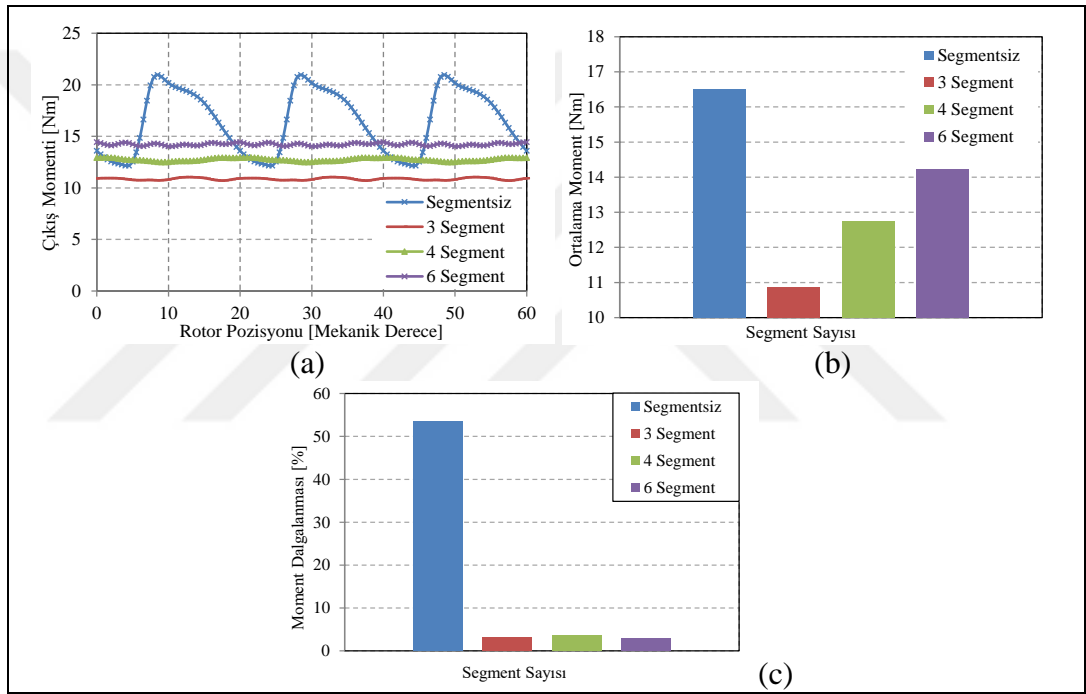


Şekil 4.31. Farklı segmentlerdeki çubuk tip yapıların zıt EMK (a) faz ve (b) hat dalga değişimlerinin karşılaştırılması (@1.000rpm) (2B SEA)



Şekil 4.32. Farklı segmentlerdeki çubuk tip yapıların 1.000rpm rotor hızındaki zıt EMK hat gerilimi (a) tepe değerlerinin ve (b) THD’ lerinin karşılaştırılması (2B SEA)

Çubuk tip yapılara ait ortalama çıkış momenti ve çıkış momenti dalgalanması karşılaştırması Şekil 4.33' de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere segmentsiz yapının moment dalgalanması oldukça fazladır. Segmentli yapılarda ise 6 segmentli yapı 14,24Nm moment ve %2,86 moment dalgalanması ile en iyi sonucu veren yapı olmuştur. Bu değer %3 moment dalgalanmasının altında değere sahip en yüksek moment çıkışı şeklinde belirlenmiştir. Sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda tasarım kriterleri için en iyi sonucu veren çubuk tip yapının 6 segmentli yapı olduğu görülmüştür. 6 segmentli yapının nihai optimum boyutları ise mıknatıs genişliğinin 10mm, girintinin 0,2mm ve kaykır açısının 23 derece olduğu durumdur.

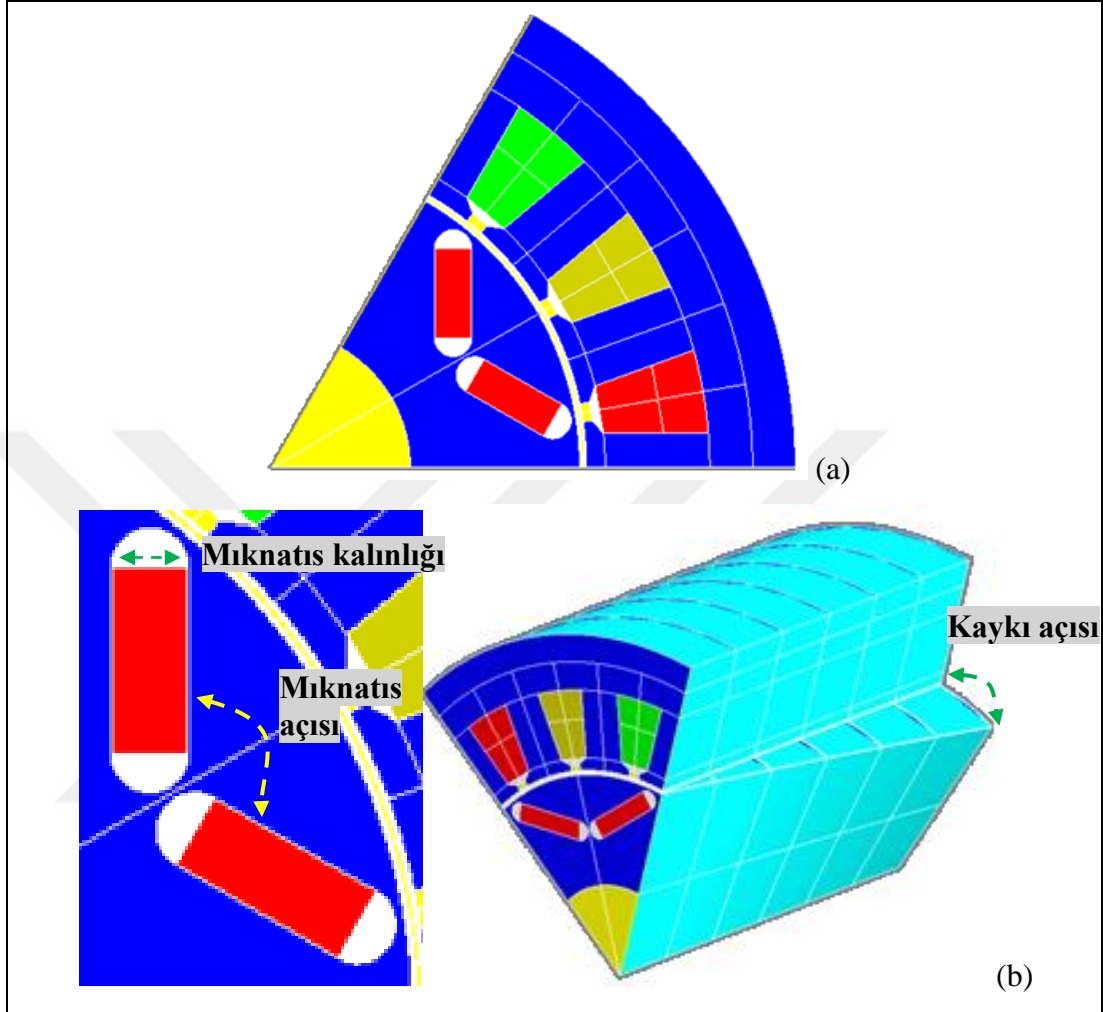


Şekil 4.33. Farklı segmentlerdeki çubuk tip yapıların (a) çıkış momenti, (b) ortalama moment ve (c) moment dalgalanmalarının karşılaştırılması (2B SEA)

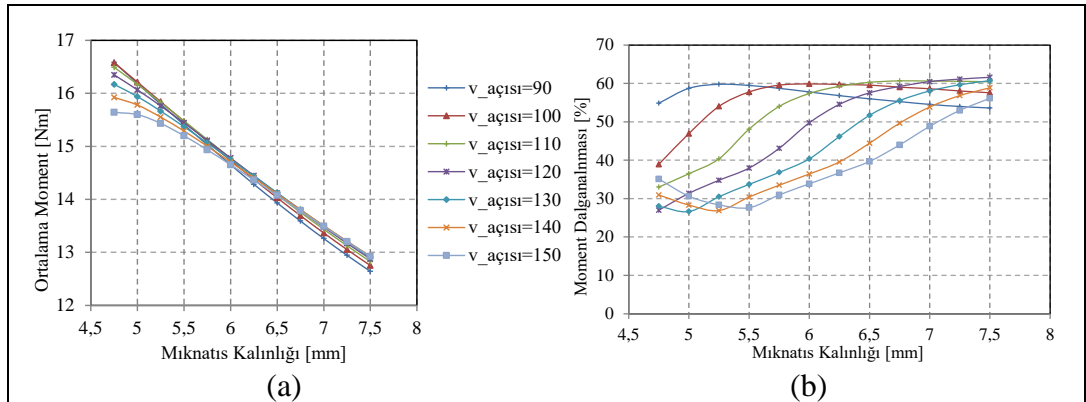
4.4.3. V Tip yapı detaylı manyetik analizleri

V tip DM motora ait ön tasarım boyutları kullanılarak detaylı SEA' ları ve optimizasyonlar yapılmıştır. Motorun statoru ön çalışmalarda olduğu gibi referans motor ile birebir aynı alınmış ve herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Optimizasyonlar sadece motorun rotor kısmında gerçekleştirilmiştir. Segmentsiz durum ve farklı segment sayıları için (3,4 ve 6 segment) çalışmalar yapılmış ve en iyi sonuçları veren mıknatıs boyutları ve diğer parametreler için nihai tasarım elde

edilmiştir. Çubuk tip motora ait oluşturulan SEA modeli ve optimizasyonu yapılan parametreler Şekil 4.34’ de verilmiştir.



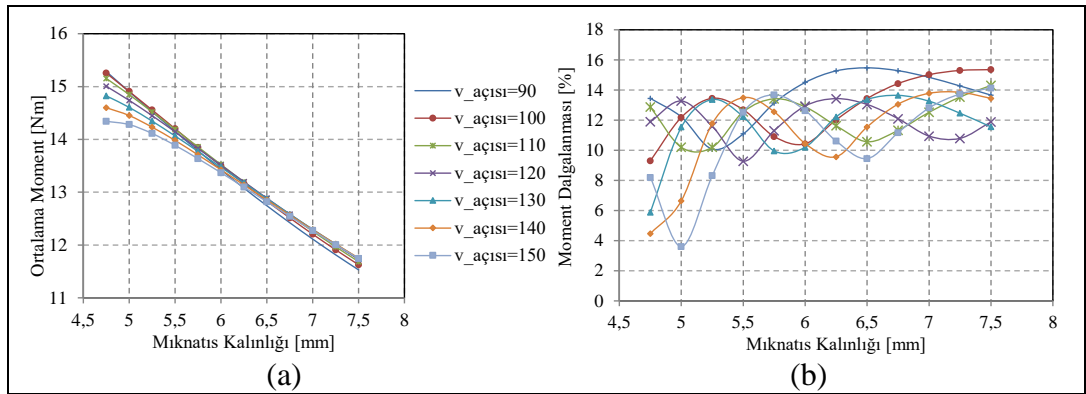
Şekil 4.34. V tip DM yapı (a) 2B SEA modeli ve (b) optimizasyonu yapılan parametreler



Şekil 4.35. Farklı miknatıs kalınlıkları ve v açısı için v tip DM segmentsiz yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması değişimleri (2B SEA)

V tip segmentsiz yapı için mıknatıslar arasındaki açı ve mıknatıs kalınlığı değişken parametreler alınmış ve belirli aralıkta küçük adımlarla değiştirilerek çıkış momentleri ortalama değeri ve moment dalgalanmaları kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve en iyi sonucu veren parametreler bulunmaya çalışılmıştır. Sonuçlar Şekil 4.35’ de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere en iyi sonuçlar 16,34Nm ortalama moment ve % 26,96 moment dalgalanmasının ile v açısının 120 derece, mıknatıs kalınlığının da 4.75mm olduğu durumdur.

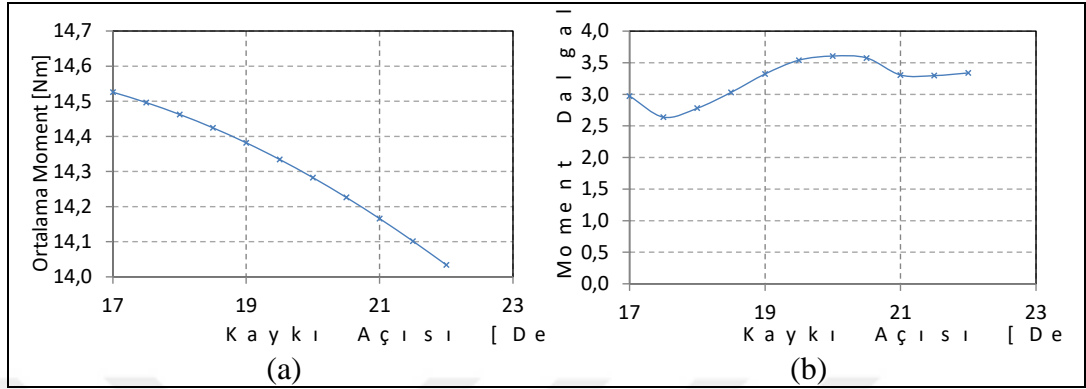
V tip 3 segmentli yapı için mıknatıslar arasındaki açı, mıknatıs kalınlığı ve kaykık açısı değişken parametreler alınmış ve belirli aralıkta küçük adımlarla değiştirilerek çıkış momentleri ortalama değeri ve moment dalgalanmaları kontrol edilmiştir. Kaykık açısının 20 derece alındığı durumda mıknatıs açısı ve mıknatıs kalınlığının optimizasyonu için elde edilen sonuçlar Şekil 4.36’ da verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere en iyi sonuçlar 14,28Nm ortalama moment ve % 3,6 moment dalgalanmasının ile v açısının 150 derece, mıknatıs kalınlığının da 5mm olduğu durumdur. Bu durum için ayrıca kaykık açısı optimizasyonu yapılmış ve Şekil 4.37’ de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere en iyi sonuç 14,5Nm moment, %2,64Nm moment dalgalanması değeri ile kaykığın 17,5 derece olduğu durumda elde edilmiştir.



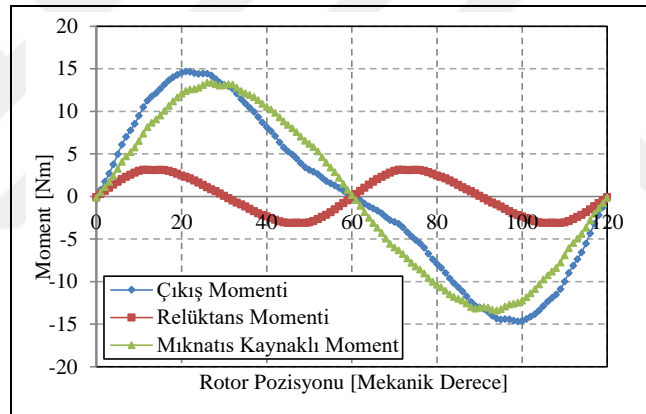
Şekil 4.36. Farklı mıknatıs kalınlıkları ve v açısı için v tip DM 3 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momentleri ve (b) moment dalgalanması değişimleri (2B SEA)

Elde edilen optimum boyutlar için motor sargılarına sabit akım verilerek çıkış momentleri, relüktans momentleri ve mıknatıs kaynaklı momentler elde edilmiş ve Şekil 4.38’ de verilmiştir. Moment tepe değerleri sırasıyla 14,67Nm, 3,12Nm ve 13,37Nm’ olarak elde edilmiştir. Relüktans moment bileşeni ortalama çıkış momentinin %21,3’ ü seviyelerindedir. Ayrıca yine bu durum için vuruş momentleri ile zıt EMK analizleri yapılmış ve sonuçlar sırasıyla Şekil 4.39 ve Şekil 4.40’ de verilmiştir. Vuruş

momenti tepe değeri 0,5Nm seviyelerinde, ortalama momente göre yüzdesi de %3,4 seviyelerindedir. 1.000rpm rotor hızı için elde edilen zıt EMK hat gerilimi tepe değeri 84,2V seviyelerindedir. Gerilim seviyesine ait THD değeri ise %0,75' dir.



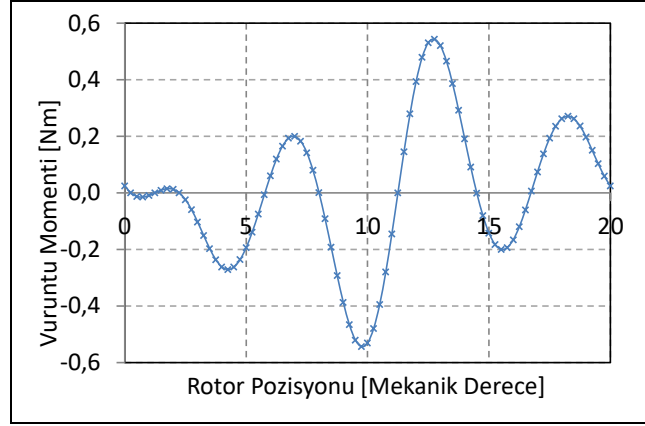
Şekil 4.37. Farklı kayık açıları için v tip DM 3 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması değişimleri (2B SEA)



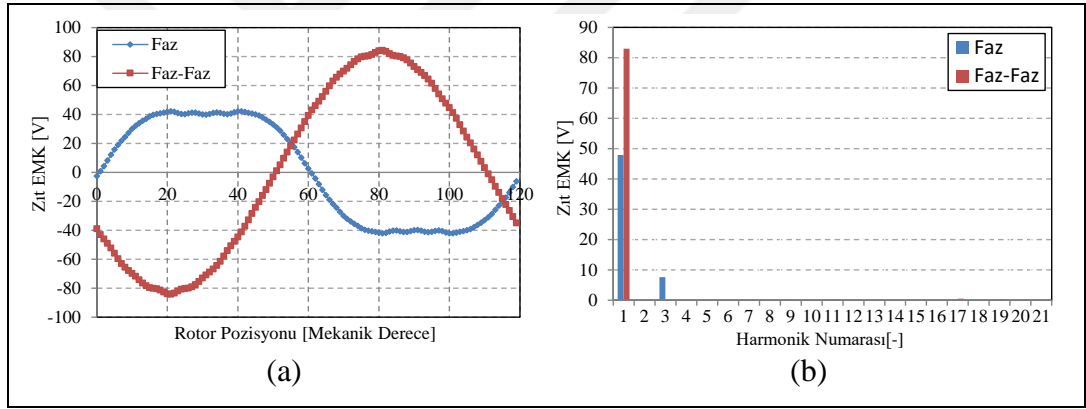
Şekil 4.38. V tip DM 3 segmentli yapının sabit akım için (@19Amax) çıkış momenti, relüktans momenti ve mıknatıs kaynaklı momentin değişimi (2B SEA)

V tip 4 segmentli yapı için mıknatıslar arasındaki açı, mıknatıs kalınlığı ve kayık açısı değişken parametreler alınmış ve belirli aralıkta küçük adımlarla değiştirilerek çıkış momentleri ortalama değeri ve moment dalgalanmaları kontrol edilmiştir. Kayık açısının 20 derece alındığı durumda mıknatıs açısı ve mıknatıs kalınlığının optimizasyonu için elde edilen sonuçlar Şekil 4.41' de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere en iyi sonuçlar 14,44Nm ortalama moment ve % 2,94 moment dalgalanması ile v açısının 150 derece, mıknatıs kalınlığının da 4,75mm olduğu durumdur. Bu durum için ayrıca kayık açısı optimizasyonu yapılmış ve Şekil 4.42' de verilmiştir. Şekilden

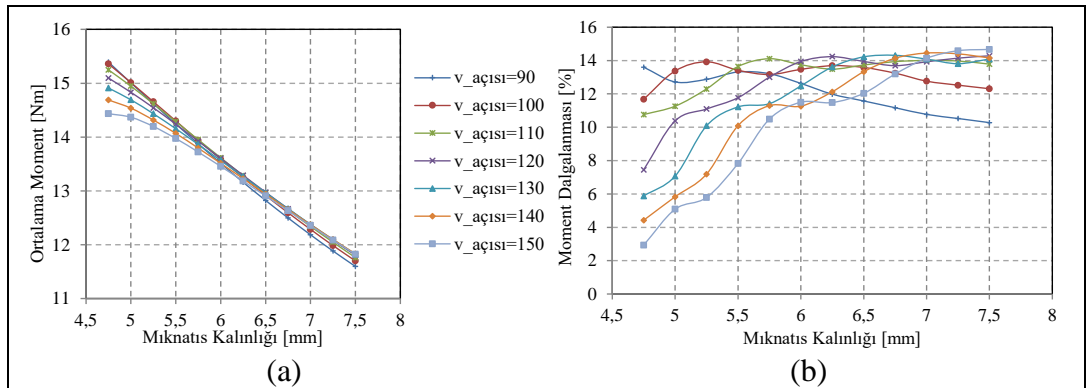
görüldüğü üzere en iyi sonuç kaykı açısının 20 derece olduğu durumdur ve bu nedenle sonuçlar değişmemiştir.



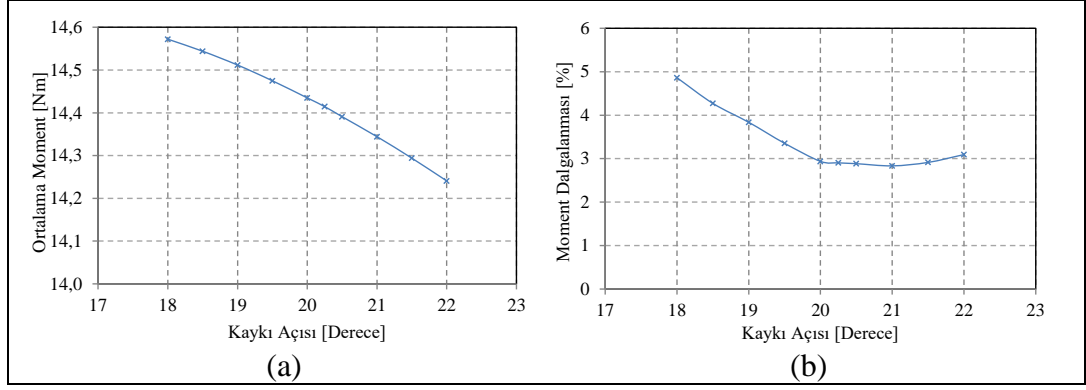
Şekil 4.39. V tip DM 3 segmentli yapının vuruntu momenti değişimi (2B SEA)



Şekil 4.40. V tip DM 3 segmentli yapının 1.000rpm rotor hızında (a) zıt EMK dalga değişimi ve (b) FFT analizi (2B SEA)

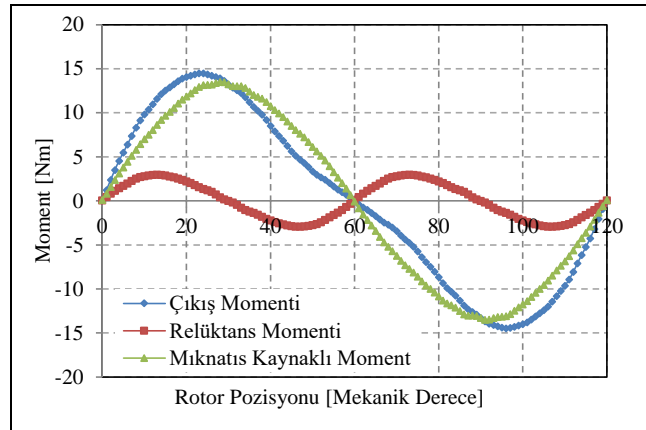


Şekil 4.41. Farklı mıknatıs kalınlıkları ve v açısı için v tip DM 4 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması değişimleri (2B SEA)

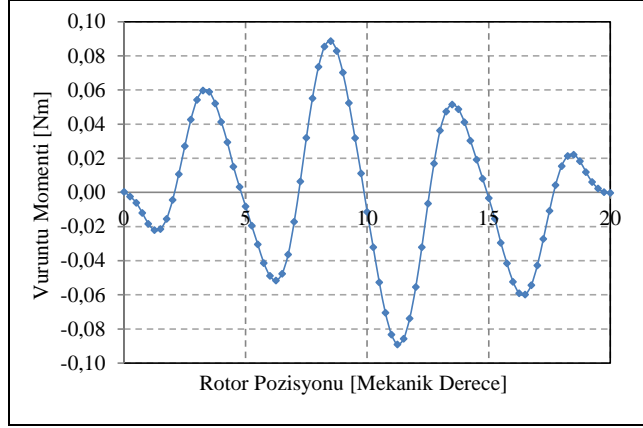


Şekil 4.42. Farklı kaykık açıları için v tip DM 4 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momentini ve (b) moment dalgalanması değışimleri (2B SEA)

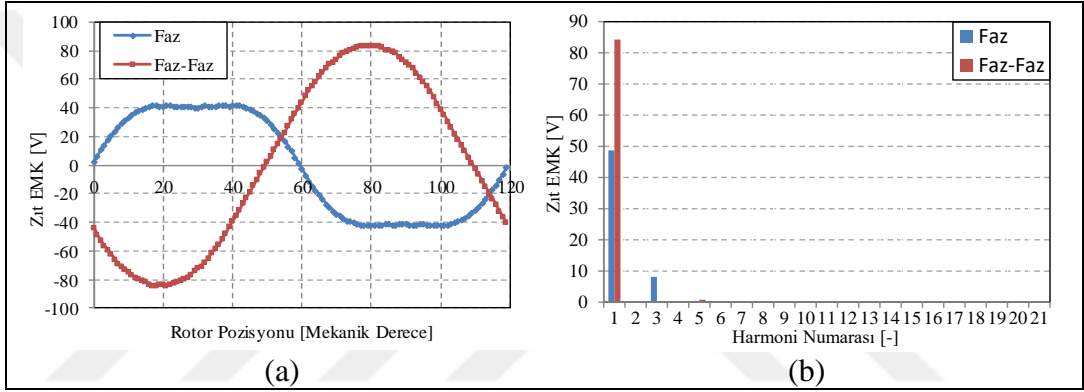
Elde edilen optimum boyutlar için motor sargılarına sabit akım verilerek çıkış momentini, relüktans momentini ve mıknatıs kaynaklı moment elde edilmiş ve Şekil 4.43’ de verilmiştir. Moment tepe değeri sırasıyla 14,48Nm, 2,95Nm ve 13,51Nm’ dir. Relüktans moment bileşeni ortalama çıkış momentinin %20,4’ ü seviyelerindedir. Ayrıca yine bu durum için vurutu momentini ile zıt EMK analizleri yapılmış ve sonuçlar sırasıyla Şekil 4.44 ve Şekil 4.45’ de verilmiştir. Vuruntu momentini tepe değeri 0,09Nm seviyelerinde ve ortalama momente göre yüzdesi de %0,6 seviyelerindedir. 1.000rpm rotor hızı için elde edilen zıt EMK hat gerilimi tepe değeri 83,77V seviyelerindedir. Gerilim seviyesine ait THD değeri ise %1,04’ dür.



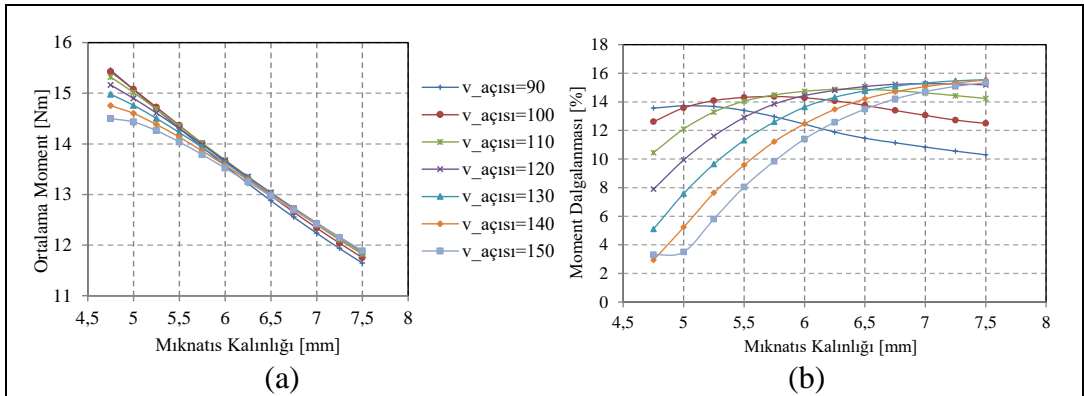
Şekil 4.43. V tip DM 4 segmentli yapının sabit akım için (@19Amax) çıkış momentini, relüktans momentini ve mıknatıs kaynaklı momentini değışimi (2B SEA)



Şekil 4.44. V tip DM 4 segmentli yapının vuruntu momenti değişimi (2B SEA)



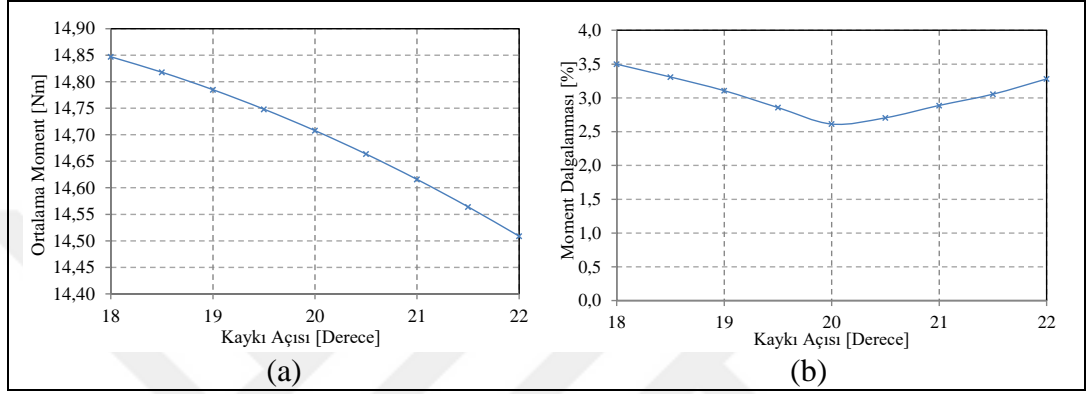
Şekil 4.45. V tip DM 4 segmentli yapının 1.000rpm rotor hızında (a) zıt EMK dalga değişimi ve (b) FFT analizi (2B SEA)



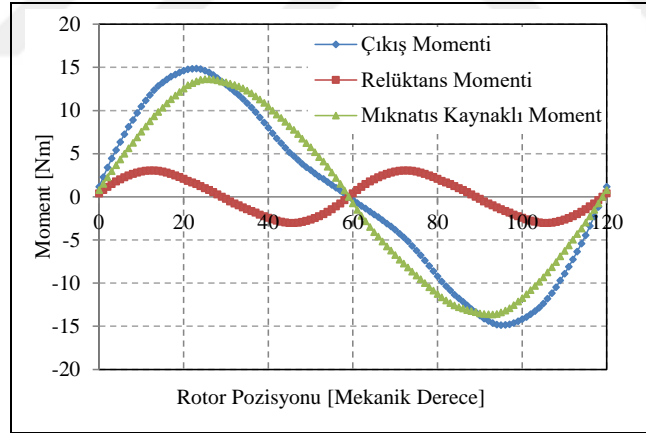
Şekil 4.46. Farklı mıknatıs kalınlıkları ve v açısı için v tip DM 6 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momenti ve (b) moment dalgalanması değişimleri (2B SEA)

V tip 6 segmentli yapı için mıknatıslar arasındaki açı, mıknatıs kalınlığı ve kaykçı açısı değişken parametreler alınmış ve belirli aralıkta küçük adımlarla değiştirilerek çıkış momentleri ortalama değeri ve moment dalgalanmaları kontrol edilmiştir. Kaykçı açısının 20 derece alındığı durumda mıknatıs açısı ve mıknatıs kalınlığının

optimizasyonu için elde edilen sonuçlar Şekil 4.46’ da verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere en iyi sonuçlar 14,75Nm ortalama moment ve % 2,94 moment dalgalanmasının ile ν açısının 140 derece, mıknatıs kalınlığının da 4,75mm olduğu durumdur. Bu durum için ayrıca kaykı açısı optimizasyonu yapılmış ve Şekil 4.47’ de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere en iyi sonuç kaykı açısının 20 derece olduğu durumdadır ve dolayısıyla sonuçlar değişmemiştir.



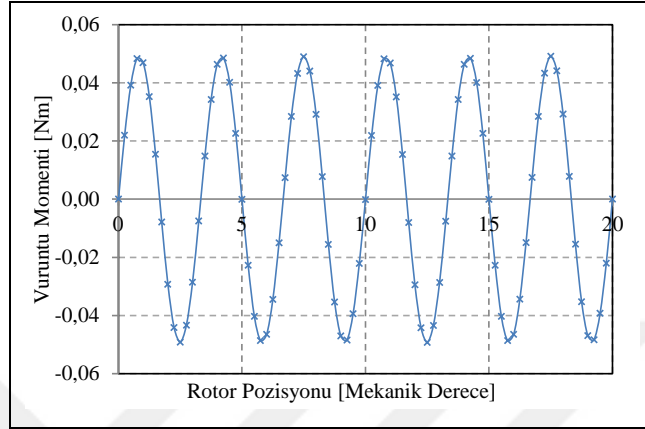
Şekil 4.47. Farklı kaykı açıları için ν tip DM 6 segmentli yapı analizleri (a) çıkış momentini ve (b) moment dalgalanması değişimleri (2B SEA)



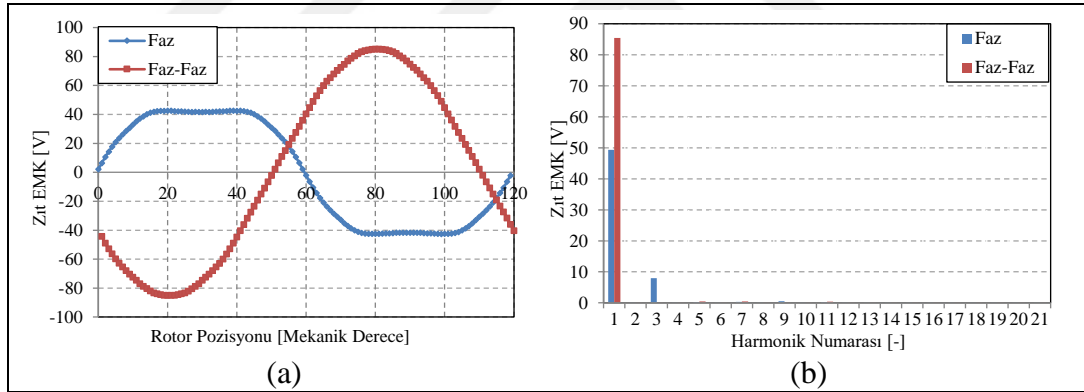
Şekil 4.48. ν tip DM 6 segmentli yapının sabit akım için (@19Amax) çıkış momentini, relüktans momentini ve mıknatıs kaynaklı momentinin değişimi (2B SEA)

Ayrıca yine bu durum için vurutu momentini ile zıt EMK analizleri yapılmış ve sonuçlar sırasıyla Şekil 4.49 ve Şekil 4.50’ de verilmiştir. Vurutu momentini tepe değeri 0,05Nm seviyelerinde, ortalama momente göre yüzdesi de %0,33 seviyelerindedir. 1.000rpm rotor hızı için elde edilen zıt EMK hat gerilimi tepe değeri 85,07V seviyelerindedir. Gerilim seviyesine ait THD değeri ise %0,9’ dur.

Elde edilen optimum boyutlar için motor sargılarına sabit akım verilerek çıkış momenti, relüktans momenti ve mıknatıs kaynaklı momentler elde edilmiş ve Şekil 4.48’ de verilmiştir. Moment tepe değerleri sırasıyla 14,86Nm, 3,04Nm ve 13,62Nm’ dir. Relüktans moment bileşeni ortalama çıkış momentinin %20,4’ ü seviyelerindedir.

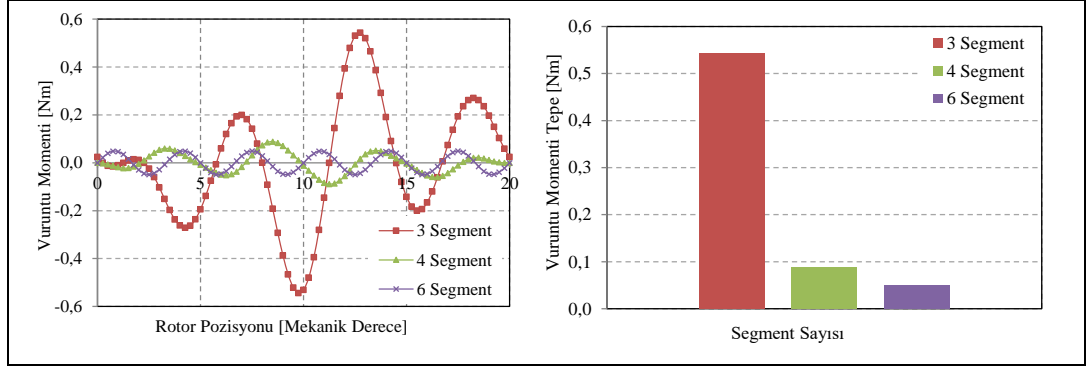


Şekil 4.49. V tip DM 6 segmentli yapının vuruğu momenti değışimi (2B SEA)

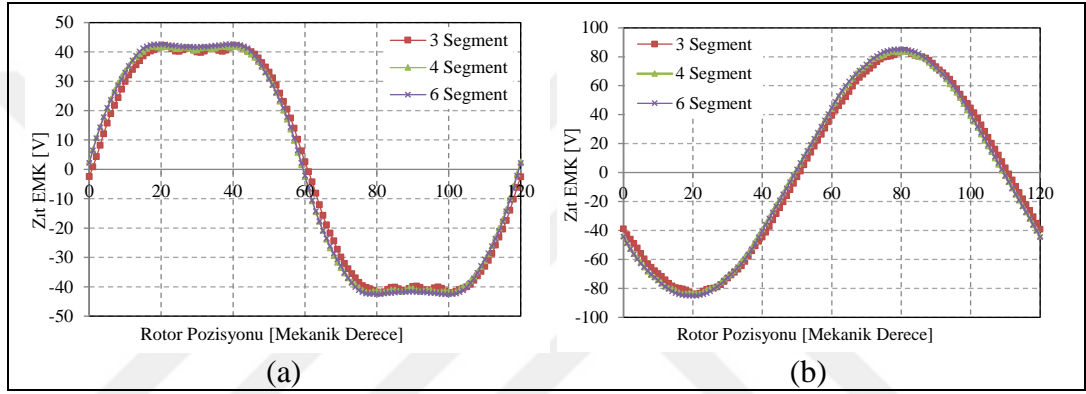


Şekil 4.50. V tip DM 6 segmentli yapının 1.000rpm rotor hızı için (a) zıt EMK dalga değışimi ve (b) FFT analizi (2B SEA)

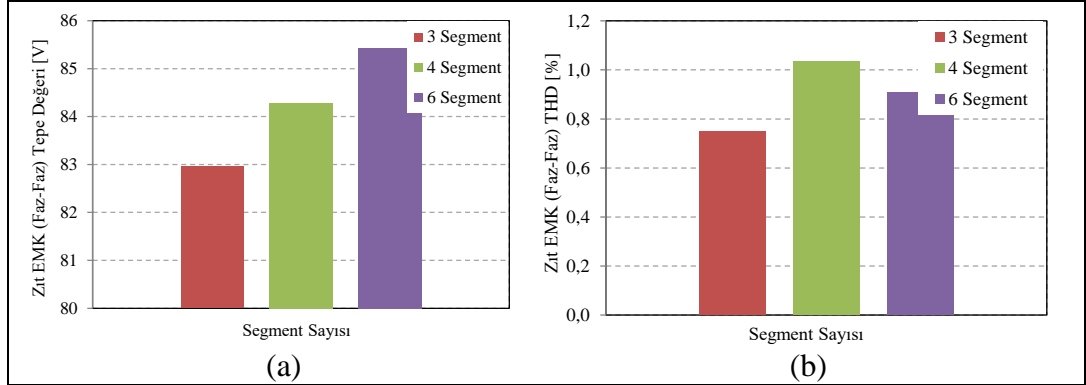
V tip DM segmentsiz ve farklı segment sayıları için elde edilen optimum sonuçlar kendi aralarında karşılaştırmış ve en iyi sonucu veren versiyon belirlenmeye çalışılmıştır. Vuruğu momentlerinin karşılaştırmaları Şekil 4.51’ de verilmiştir. Kullanılan motor kombinasyonunda oluk/kutup/faz oranının 1 olması nedeniyle vuruğu momentinin fazla, zıt EMK’ sı harmonikli, moment dalgalanmasının da fazla olması beklenen durumdur. Bu nedenle segmentsiz yapı için moment dalgalanmasının fazla olduğu görüldükten sonra vuruğu momenti ve zıt EMK analizlerinin yapılmasına gerek görülmemiştir. En düşük vuruğu momenti değeri 0,05Nm tepe değeri ile 6 segmentli versiyonda elde edilmiştir.



Şekil 4.51. Farklı segmentlerdeki v tip yapıların vuruğu momentlerinin karşılaştırılması (2B SEA)

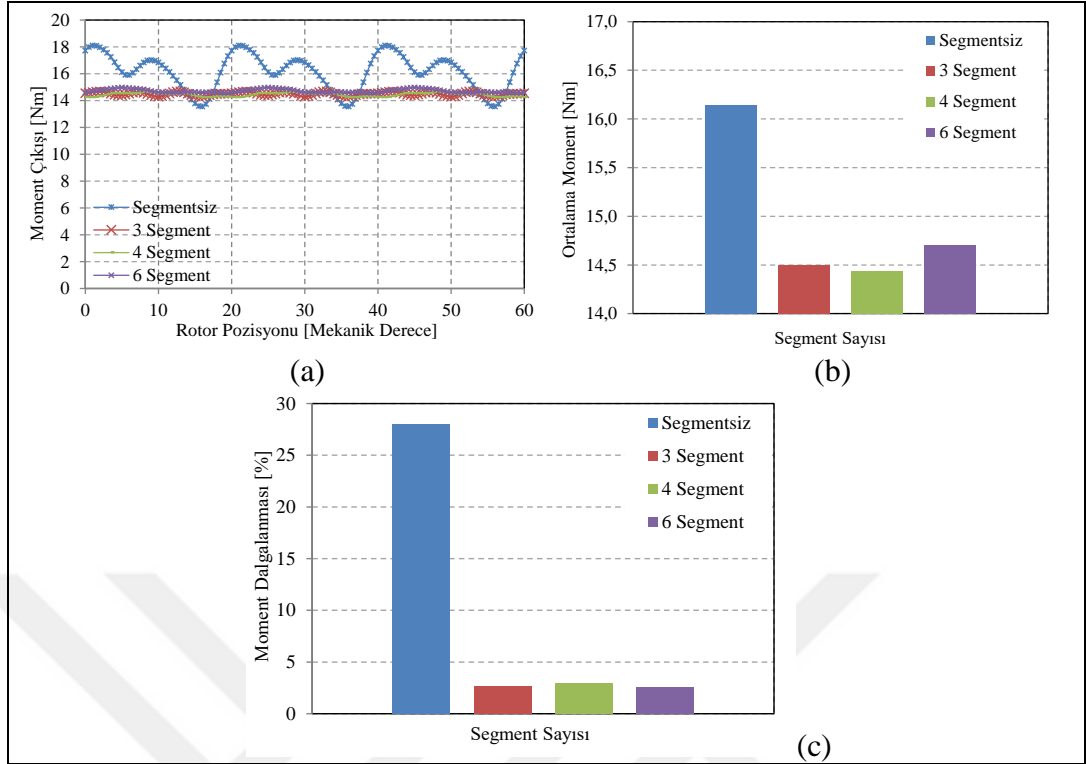


Şekil 4.52. Farklı segmentlerdeki v tip yapıların 1.000rpm rotor hızı için zıt EMK (a) faz ve (b) hat dalga değışimlerinin karşılaştırılması (2B SEA)



Şekil 4.53. Farklı segmentlerdeki v tip yapıların 1.000rpm rotor hızı için zıt EMK hat gerilimi (a) tepe değeri ve (b) THD'lerinin karşılaştırılması (2B SEA)

1.000rpm hız için zıt EMK faz ve hat dalga değışimleri Şekil 4.52' de hat dalga değışimine ait tepe değeri ve THD değeri ise Şekil 4.53' de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere en yüksek zıt EMK değeri 85,43V ile 6 segmentte elde edilmiştir. Ayrıca THD seviyeleri de %0,91' lik değeri ile %1' in altındadır.



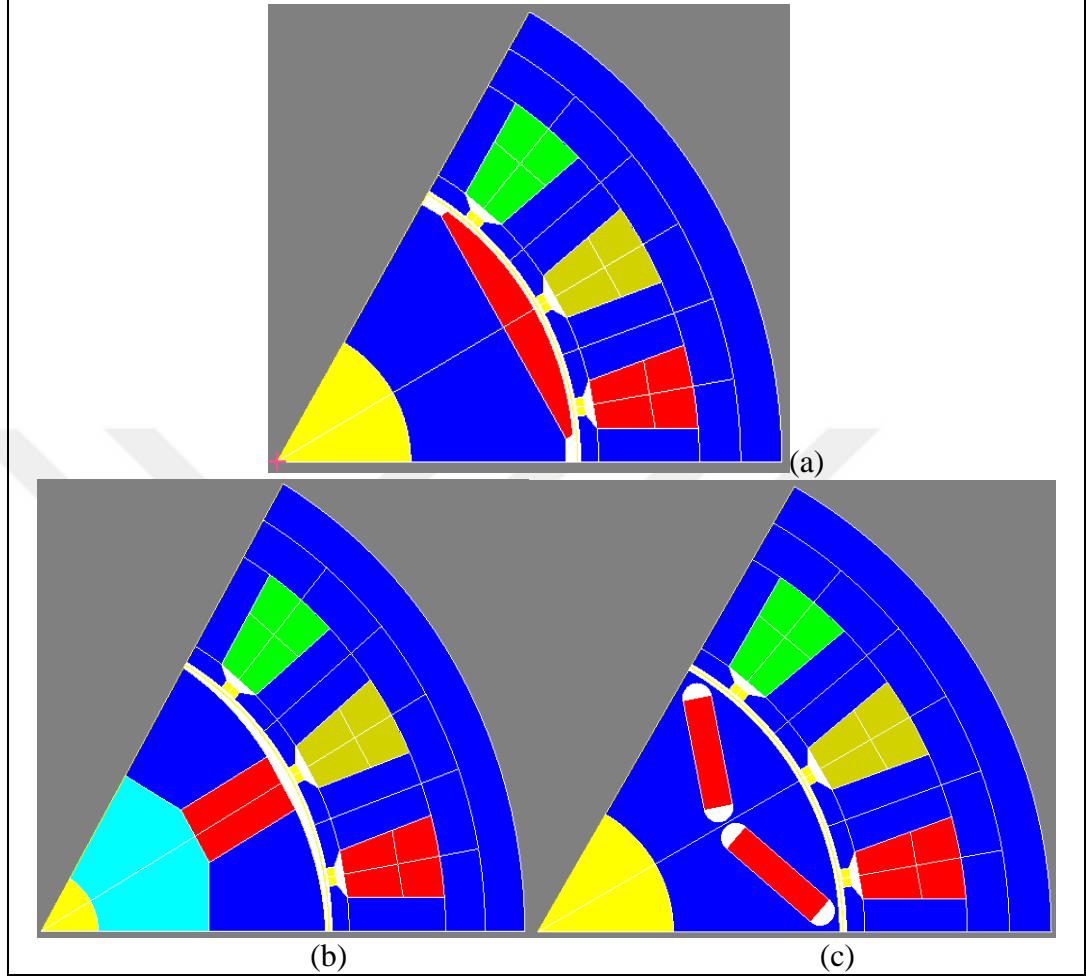
Şekil 4.54. Farklı segmentlerdeki v tip yapıların (a) çıkış momenti, (b) ortalama moment ve (c) moment dalgalanmalarının karşılaştırılması (2B SEA)

Ortalama çıkış momenti ve çıkış momenti dalgalanması karşılaştırması Şekil 4.54' de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere segmentsiz yapının moment dalgalanması oldukça fazladır. Segmentli yapılarda ise 6 segmentli versiyon 14,71Nm moment ve %2,61 moment dalgalanması ile en iyi sonucu veren versiyon olmuştur. Tüm bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda tasarım kriterleri için en iyi sonucu veren v tip yapının 6 segmentli yapı olduğu görülmüştür. 6 segmentli yapının nihai optimum boyutları ise v açısı 140 derece, mıknatıs kalınlığı 4,75mm ve kaykçı açısının 20 derece olduğu durumdur.

4.4.4. Referans YM motor ile çubuk tip ve V Tip DM motorların SEA karşılaştırmaları

Referans YM motorun SEA ile incelenmesi ve çubuk tip ile v tip DM motorların detaylı tasarım ve optimizasyon sonuçlarında elde edilen en iyi sonuçların karşılaştırmaları yapılmıştır. Karşılaştırmalar hem yüksüz durum hem de yüklü durum analizleri için gerçekleştirilmiş ve en sonda da çalışmalar bir tabloda özetlenmiştir. Çalışmanın sonucuna göre prototip üretimi yapılacak yapıya karar verilmiştir.

Karşılaştırmaları yapılan referans YM motor, çubuk tip ve v tip DM motorlara ait SEA modelleri Şekil 4.55' de verilmiştir.

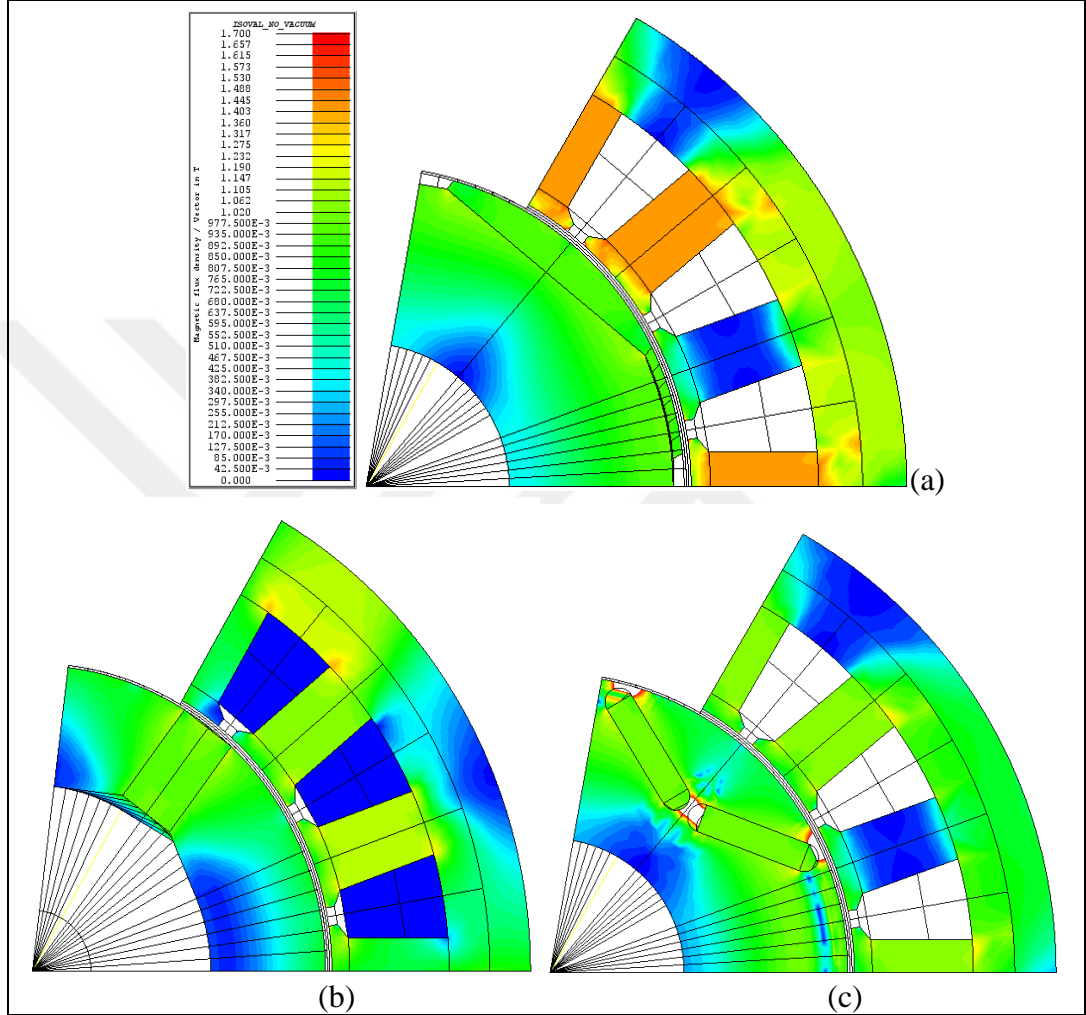


Şekil 4.55. Karşılaştırmaları yapılan (a) referans YM motor, (b) çubuk tip ve (c) v tip DM motorların 2B SEA modelleri

Modellere ait yüksüz durum akı yoğunlukları ise Şekil 4.56' da verilmiştir. Akı yoğunluğu karşılaştırmalarında ölçek tepe değeri 1,7T alınmış ve karşılaştırmalar buna göre yapılmıştır. Referans YM model ile çubuk tip ve v tip DM modeller için sırasıyla dışlardaki akı yoğunlukları 1,4T, 1,15T ve 1,2T seviyelerindedir. Motorda kullanılacak malzemenin türü M270-35a için doyum noktası 1,5T seviyelerinde başladığı için elde edilen akı yoğunluğu değerlerinin kritik seviyelerde olmadığı söylenebilir.

Vuruntu momenti değişimleri, vuruntu momenti tepe değerleri ve vuruntu momentlerinin ortalama momentlere oran karşılaştırmaları Şekil 4.57' de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere en düşük vuruntu momenti 0,01Nm değeri ile YM motorda

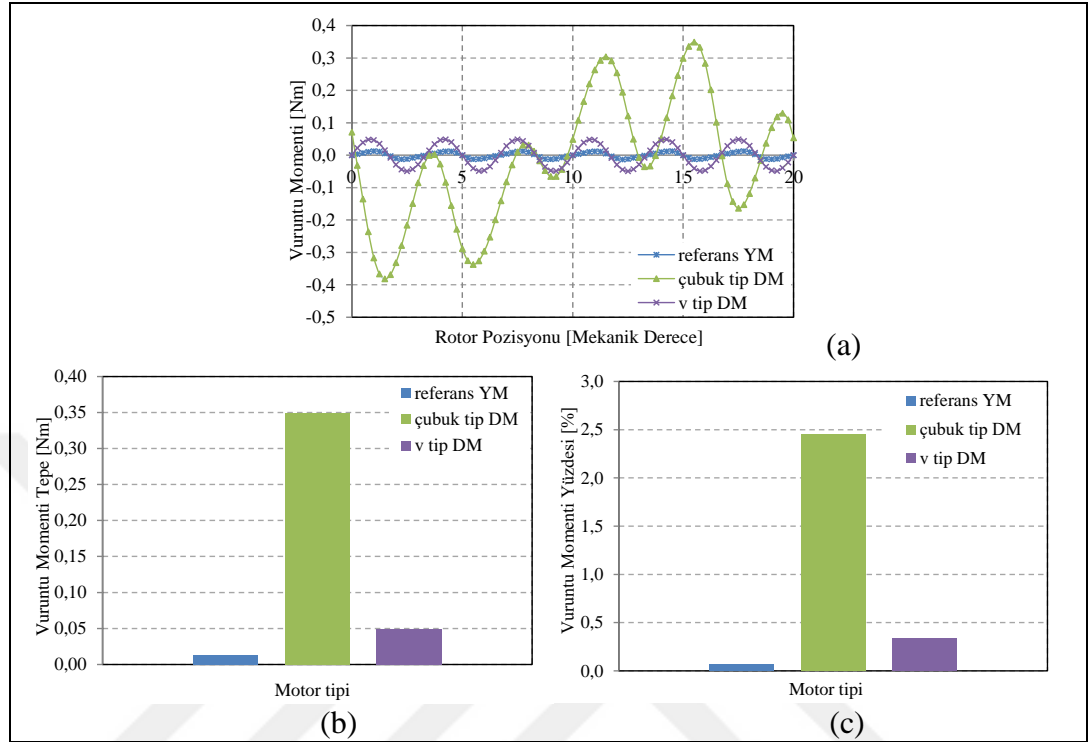
elde edilmiştir. Ardından v tip ve çubuk tip sırasıyla gelmektedir. En yüksek vurunu momenti 0,35Nm değeri ile çubuk tip modelden elde edilmiştir. Fakat bu modelde bile vurunu momenti ortalama momentin %1'i seviyelerindedir. Bu değerin de oldukça düşük seviyelerde olduğu söylenebilir.



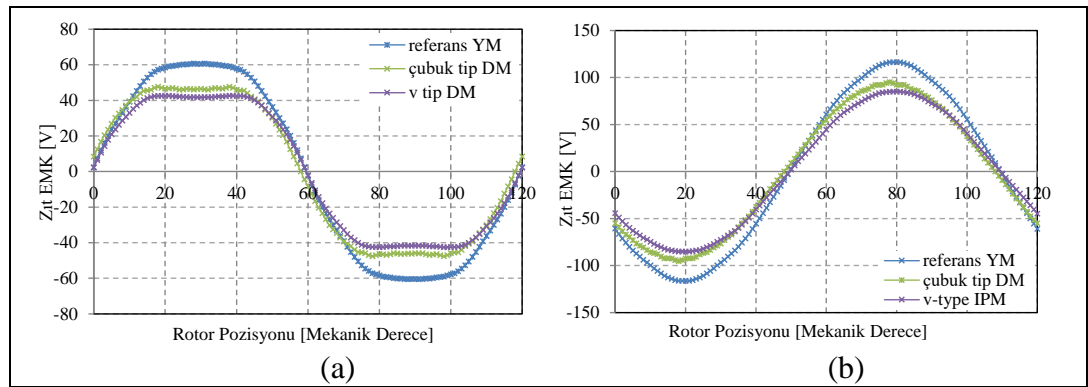
Şekil 4.56. Yüksüz durum akı yoğunlukları değişimleri (a) referans YM motor, (b) çubuk tip ve (c) v tip DM motorlar (2B SEA)

Zıt EMK faz ve hat dalga değişimlerinin karşılaştırması 1.000rpm rotor hızı için Şekil 4.58' de verilmiştir. Faz gerilimlerinden görüleceği üzere gerilim dalga şekli tam sinüs şeklinde değildir ve harmonik içermektedir. En yüksek tepe değeri 60,61V ile yüzeyden mıknatıslı yapıdadır. En düşük gerilim ise 42,57V ile v tip DM yapıdan elde edilmiştir. Hat gerilimlerinde yine benzer şekilde en yüksek tepe değeri 115,32V ile yüzeyden mıknatıslı yapıdan, en düşük gerilim değeri ise 85,43V ile v tip DM yapıdan elde edilmiştir. Ayrıca zıt EMK hat dalga değişimlerinin tepe ve THD değerleri de karşılaştırmalı olarak Şekil 4.59' da verilmiştir. THD karşılaştırmalarında bütün

yapıların THD' leri %1' in altında elde edilmiş, en düşük değer de çubuk tip DM yapıdan elde edilen %0,62 değeri olduğu görülmüştür.



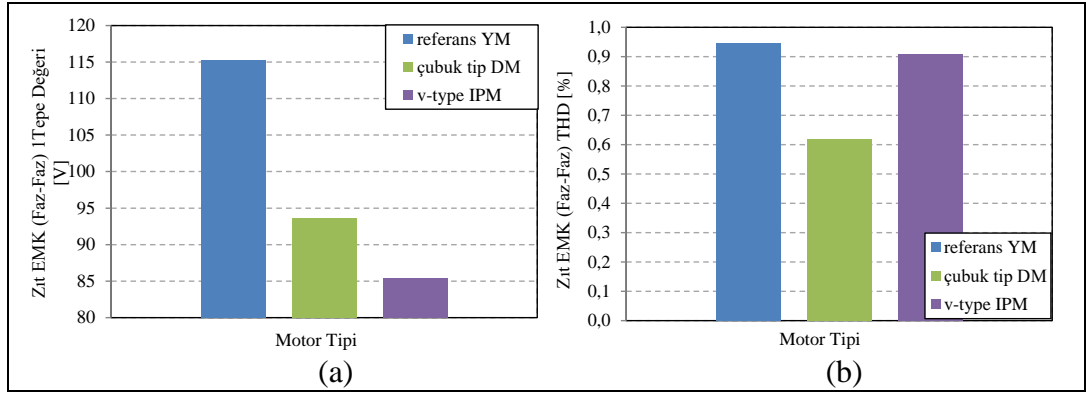
Şekil 4.57. Farklı motor tiplerinin (a) vuru mu momenti değ işimleri, (b) vuru mu momenti te ğe değ erleri ve (c) vuru mu momentinin ortalama momente oranının kar şıla ştırması (2B SEA)



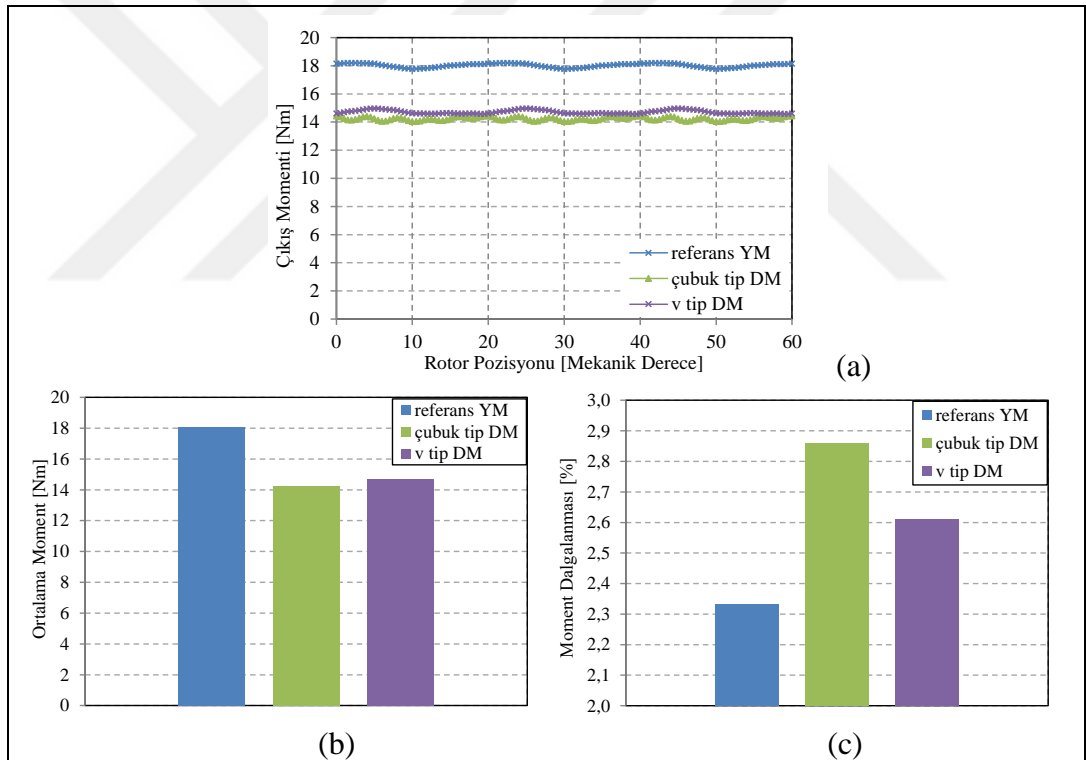
Şekil 4.58. Farklı motor tiplerinin 1.000rpm rotor hız ı için zıt EMK (a) faz ve (b) hat dalga değ işimlerinin kar şıla ştırılması (2B SEA)

Çıkış momenti dalga değ işimleri, ortalama momentleri ve moment dalgalanmalarının kar şıla ştırmaları 19Amax akım değ eri için Şekil 4.60' da verilmiştir. Ortalama moment en yüksek 18,1Nm değ eri ile YM yapıdan, en düşük de 14,24Nm değ eri ile çubuk tip DM yapıdan elde edilmiştir. Moment dalgalanmalarında da en iyi sonuç

YM' de elde edilirken bütün motorların moment dalgalanmalarının %3' ün altında olduğu görülmektedir.



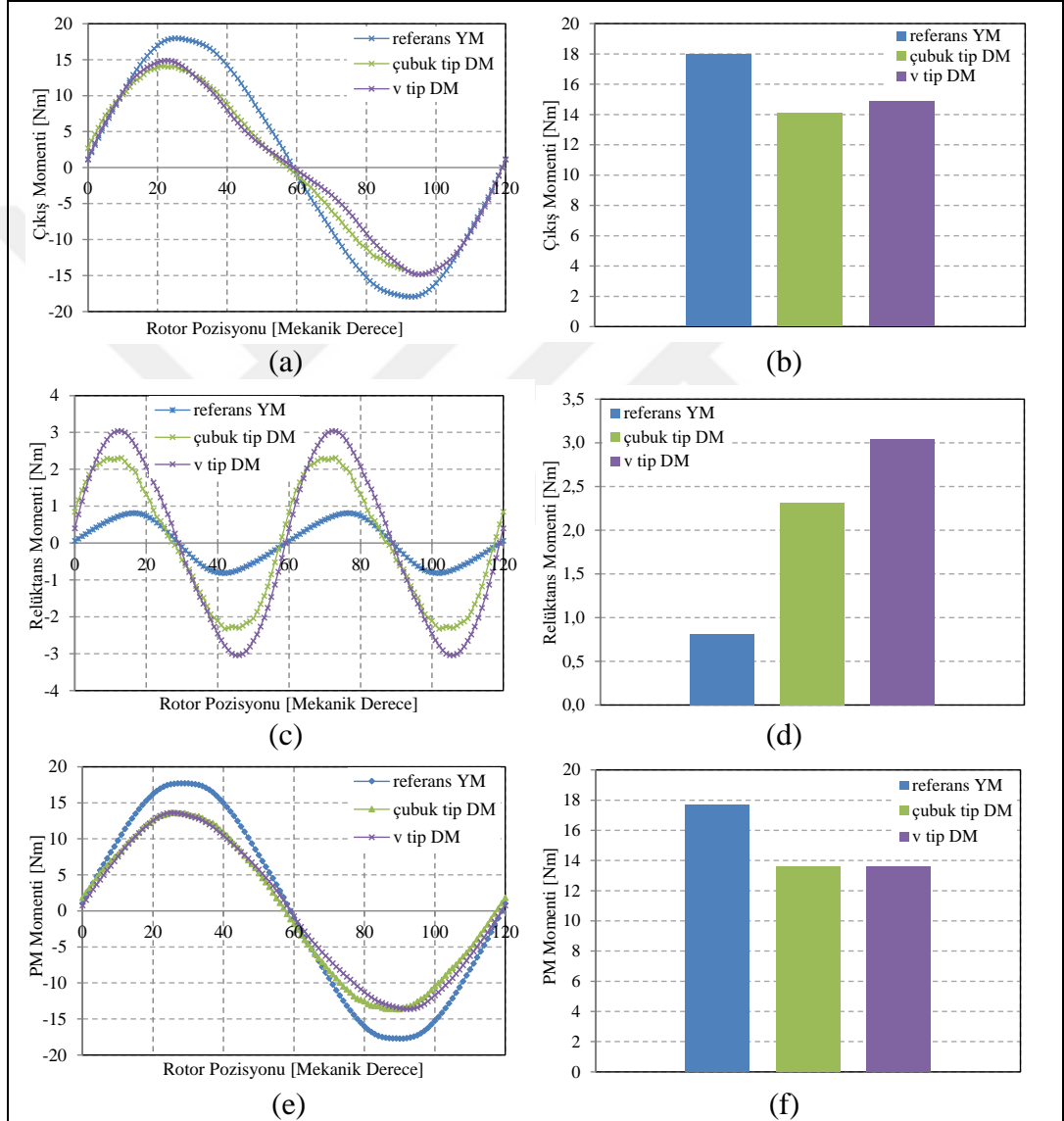
Şekil 4.59. Farklı motor tiplerinin 1.000rpm rotor hızı için zıt EMK hat gerilimi (a) tepe değeri ve (b) THD' lerinin karşılaştırılması (2B SEA)



Şekil 4.60. Farklı motor tiplerinin (a) çıkış moment değişimleri, (b) ortalama momentleri ve (c) moment dalgalanmalarının karşılaştırılması (@19Amax) (2B SEA)

Sabit akım uygulanması durumunda çıkış momentleri değişimleri ve tepe değerleri, relüktans moment bileşenleri ve tepe değerleri, mıknatıs kaynaklı moment bileşenleri ve tepe değerleri karşılaştırmaları Şekil 4.61' de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere sabit akım için en yüksek moment tepe değeri 17,96Nm ile referans YM motordan elde edilmiştir. Relüktans momentleri karşılaştırmalarında ise referans YM motorun

relüktans momenti tepe değeri 0,81Nm moment ile en düşük değer olarak karşımıza çıkmaktadır. En yüksek relüktans moment bileşeni ise 3,4Nm tepe değeri ile v tip DM yapıdan elde edilmiştir. Mıknatıs kaynaklı moment ise en yüksek 17,71Nm değeri ile referans YM yapıdan elde edilmiştir. Motorların 19Amax anma akımı ve 38Amax maksimum akım ile yüklünmesi durumları için 2B SEA ile elde edilen moment hız eğrileri karşılaştırmaları Şekil 4.62' de verilmiştir.



Şekil 4.61. Farklı motor tiplerinin (a) çıkış momenti değişimleri, (b) tepe değerleri, (c) relüktans momenti bileşenleri, (d) tepe değerleri, (e) mıknatıs kaynaklı moment bileşenleri ve (f) tepe değerlerinin karşılaştırmaları (@19Amax) (2B SEA)

Her iki grafikten de görüldüğü üzere sabit moment bölgesinde en yüksek değer referans YM yapıya aitken sabit güç bölgesi oldukça dardır ve anma yüklemesinde

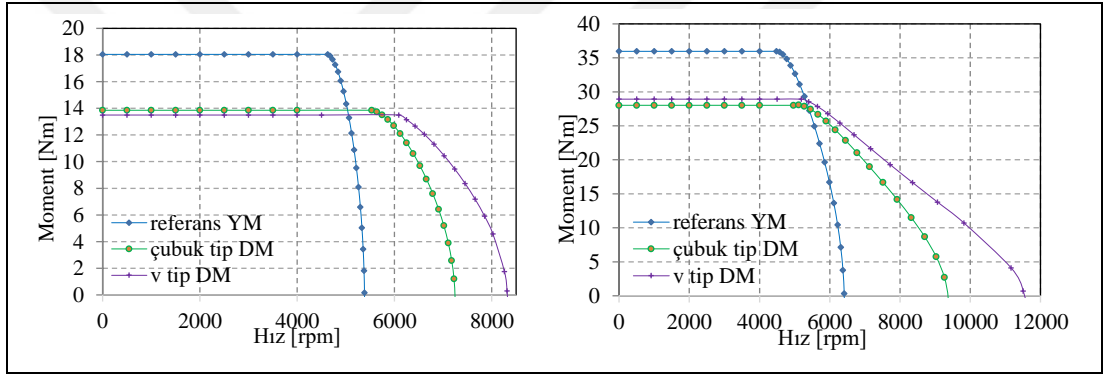
5.400rpm, maksimum yüklemde ise 6.400rpm hız ile maksimum hızı en düşük yapıdır. Diğer taraftan sabit güç bölgesi en geniş olan ve anma yüklemesinde 8.300rpm ve maksimum yüklemde 11.500rpm hız ile maksimum hızı en fazla olan yapı v tip DM yapıdır. Moment hız eğrileri oluşturulurken alan zayıflatmasının uygulanadığı ve DM motorların yapısı gereği alan zayıflatma özellikleri daha iyi olduğu için elde edilen değerler beklendiği gibi çıkmıştır.

Farklı tip motorların çeşitli parametrelerinin karşılaştırması Tablo 4.3' de verilmiştir.

Tablo 4.3. Referans motor ile farklı tip DM yapıların performans karşılaştırması

Parametre	Birim	Referans YM	Çubuk tip DM	V tip DM
Moment	Nm	18,10	14,24	14,71
Hız	rpm	4195,00	4565,98	4300,00
Güç	kW	7,95	6,81	6,62
Mıknatis ağırlığı	kg	0,91	0,86	0,86
Mıknatis hacmi	mm ³	123083,40	115632,00	115618,80
Nüve ağırlığı	kg	13,19	12,05	13,15
Bakır ağırlığı	kg	3,40	3,40	3,40
Rotor ağırlığı	kg	6,21	6,21	6,21
Rotor hacmi	mm ³	863937,98	863937,98	863937,98
Rotor ataleti	kg m ²	0,008	0,0072	0,0078
Motor ağırlığı	kg	17,50	16,31	17,40
Motor hacmi	mm ³	2496780,76	2496780,76	2496780,76
Maksimum hız	rpm	6405,00	9633,66	11912,50
Zıt EMK temel harmonik	V	115,32	93,69	85,43
Zıt EMK THD	%	0,95	0,62	0,91
Moment Dalgalanması	%	2,33	2,86	2,61
Moment / Motor ağırlığı	Nm/kg	1,03	0,87	0,85
Moment / Motor hacmi	Nm/dm ³	20,95	16,48	17,03
Moment / Mıknatis ağırlığı	Nm/kg	19,87	16,64	17,19
Moment / Mıknatis hacmi	Nm/dm ³	147,05	123,15	127,23
Moment / Rotor ağırlığı	Nm/kg	1,03	0,87	0,85
Güç / Motor ağırlığı	kW/kg	0,45	0,42	0,38
Güç / Motor hacmi	kW/dm ³	3,18	2,73	2,65
SGHO	-	1,53	2,11	2,77

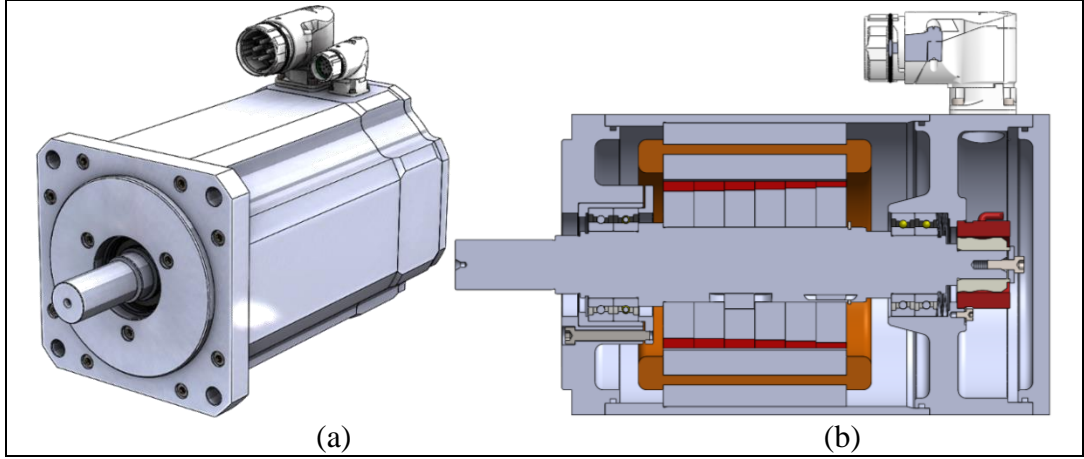
Motorların hacimleri, rotor dış çapları ve stator yapıları sabit tutulduğu için birçok parametre birbirine yakındır. Fakat motor yapılarının özellikleri gereği bazı parametreler birbirinden ayrılmaktadır. Birçok karşılaştırılan parametre yönünden referans YM yapı avantajlı gibi görünse de sabit güç hız oranı (SGHO) değeri en düşük olan yapıdır. Bu da motorun yüksek hızlara çıkamadığı anlamına gelmektedir. SGHO değeri en yüksek olan model ise v tip DM yapıdır. Bu nedenle çıkış momenti yanı sıra maksimum hızın da kriterlerin bir parçası olduğu durumda, kritik nokta maksimum hız değeri ise tercih edilmesi gereken yapının v tip DM yapı olması gerektiği görülmektedir. Tasarım kriterleri ihtiyaçlarına bakıldığı zaman uygulama ihtiyacının yüksek hızlara çıkmak olduğu göz önünde bulundurularak prototip çalışmasının v tip yapı ile yapılmasının doğru olacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.62. Farklı motor tiplerinin, SEA ile elde edilen anma ve maksimum yükleme durumları için moment hız eğrilerinin karşılaştırmaları (@19Amax, @38Amax) (2B SEA)

4.5. V Tip DM Motor Mekanik Tasarım ve Termal Analizi

Prototipi üretilmesine karar verilen v tip DM yapı için mekanik tasarım çalışmaları yapılmıştır. Yapıya ait 3B mekanik modelleme, mekanik SEA çalışmaları ve termal analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. V tip DM yapı için oluşturulan 3B katı model ve modele ait ara kesit görüntüsü Şekil 4.63' de verilmiştir. Motor bileşenlerinden gövde ve kapaklarda 7075 alüminyum, milde 4140 çelik, geri besleme elemanı olarak resolver, yüksek hıza uygun iki parçalı rulmanlar ve metal tip konnektörler tercih edilmiştir. Rotor tarafındaki kaykırıyı verebilmek için mil üzerine kama yuvaları açılmış ve bir biri ile aynı olan segmentlere bu kama kanalları sayesinde kaykırı açısı verilmiştir.



Şekil 4.63. V tip DM yapı (a) 3B mekanik katı modeli ve (b) ara kesit görüntüsü

4.5.1. V Tip DM yapı mekanik sonlu elemanlar analizleri

V tip DM yapıya ait farklı mekanik SEA' lar gerçekleştirilmiş ve sonuçların değerlendirmesi yapılmıştır. Amaç motorun maksimum yüklemeler altında bütünlüğünü koruyup korumadığını kontrol etmek ve aynı zamanda boyutsal optimizasyonu gerçekleştirmektir. Motorda kullanılan malzemelere ait mekanik özellikler Tablo 4.4' de verilmiştir.

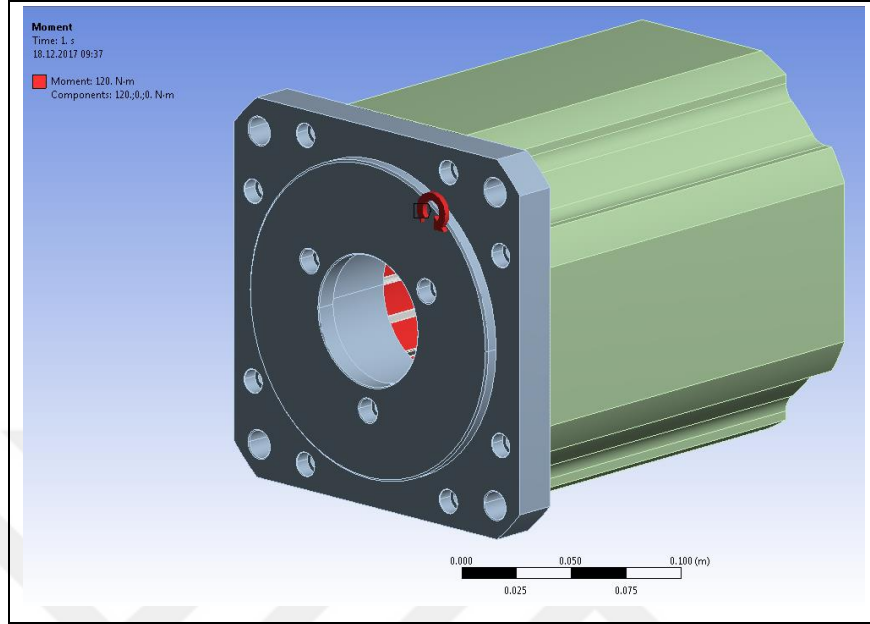
Yapılan ilk analiz gövde yükleme ve burulma analizidir. V tip DM yapıya ait ön kapak, gövde ve statordan oluşan mekanik SEA modeli ve bu modele ait ağ yapısı sırasıyla Şekil 4.64 ve Şekil 4.65' de verilmiştir.

Tablo 4.4. Motorda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

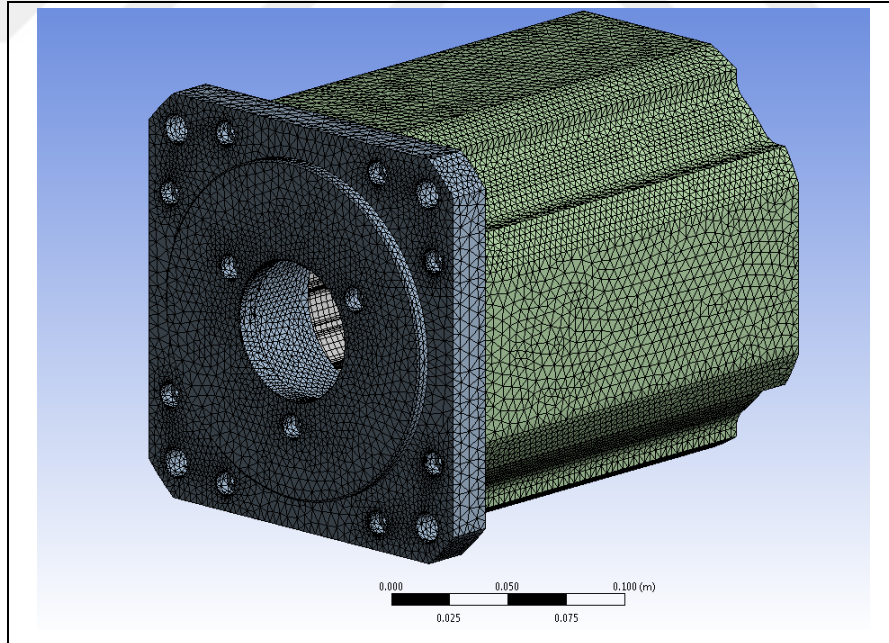
Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Young Modülü (Pa)	Poisson Oranı (-)	Akma Gerilmesi (Pa)
AISI 4140 Çelik	7850	2,1E+11	0,3	4,15E+8
7075 Alüminyum	2800	7,2E10	0,33	1,2E+8
M270-35A	7800	2,1E+11	0,3	4,5E+8
N33-UH	7500	1,6E+11	0,24	8E+7

Motor maksimum momentinin 3 katı yükleme durumu gövde burulma analizi yapılmış ve maksimum yer değiştirme ile eş değer gerilme seviyeleri kontrol edilmiştir (Şekil 4.66). Şekillerden görüldüğü üzere maksimum yer değiştirme miktarı 26 µm, maksimum eşdeğer gerilme seviyesi ise 145,94 Mpa' dır. Maksimum gerilme değeri noktasal olduğu için ihmal edilebileceği değerlendirilmiştir. Bu noktasal bölgelerin

dışında eş değer gerilmeler akma gerilmesinin oldukça altındadır. Bu da modelin emniyetli kısımda olduğunu göstermektedir.



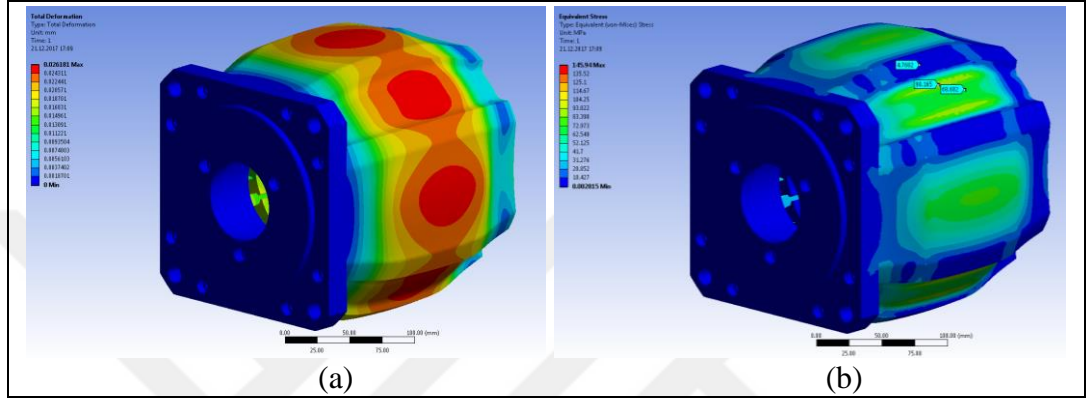
Şekil 4.64. V tip DM yapı gövde mekanik 3B SEA modeli ve sınır koşulları



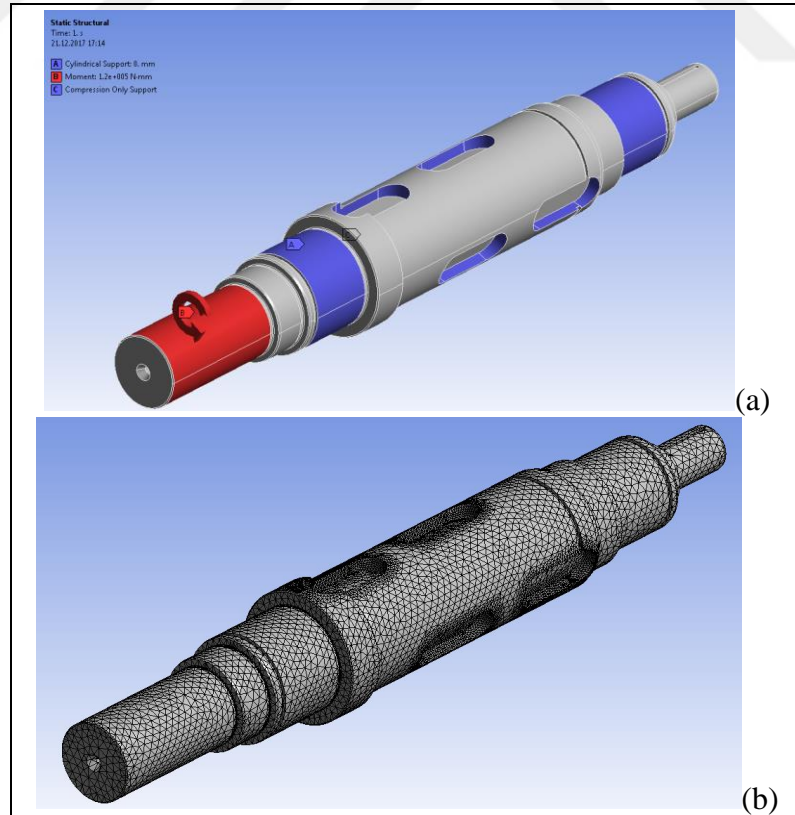
Şekil 4.65. V tip DM yapı gövde mekanik 3B SEA modeli ağ yapısı

V tip DM yapı için ikinci mekanik analiz olarak rotor burulma analizi gerçekleştirilmiştir. Rotora ait SEA modeli ve ağ yapısı Şekil 4.67' de verilmiştir. Yapılan ilk analiz motor mili sabit tutularak, motor maksimum momentinin 3 katı

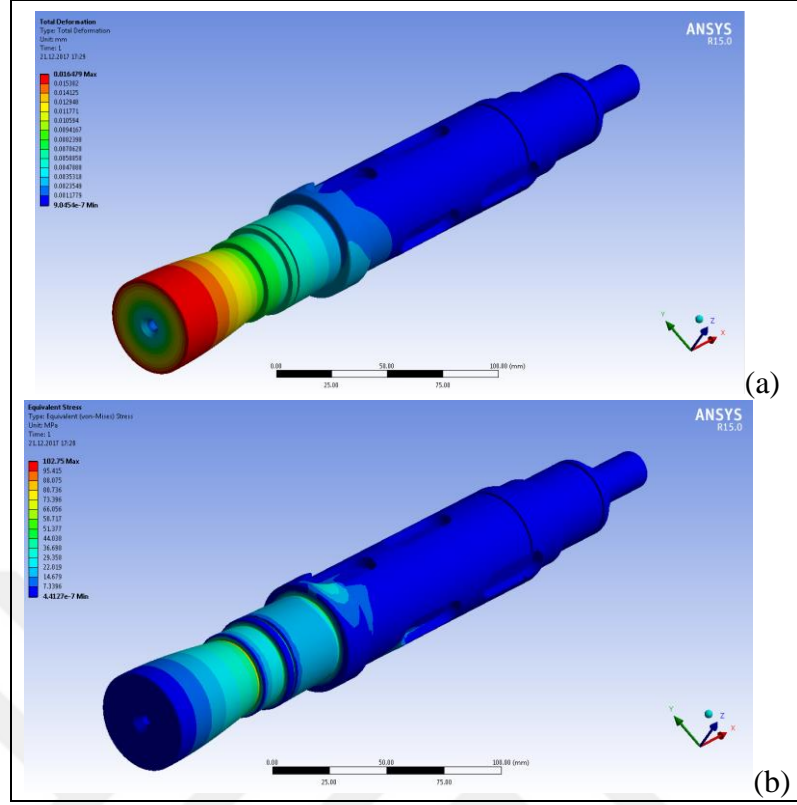
yükleme durumu için mil üzerinde oluşan eş değer gerilmeler ve yer değıştirme seviyelerinin belirlenmesidir. 120 Nm moment altında yapılan analiz sonucu elde edilen eş değeri gerilme ve yer değıştirmeler Şekil 4.68’ de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere maksimum eşdeğer gerilme seviyeleri 102,75 MPa iken, maksimum yer değıştirme miktarı 16µm seviyelerindedir. Bu değeri malzeme akma gerilme seviyesinin altında olduğı için modelin emniyetli tarafta olduğı söylenebilir.



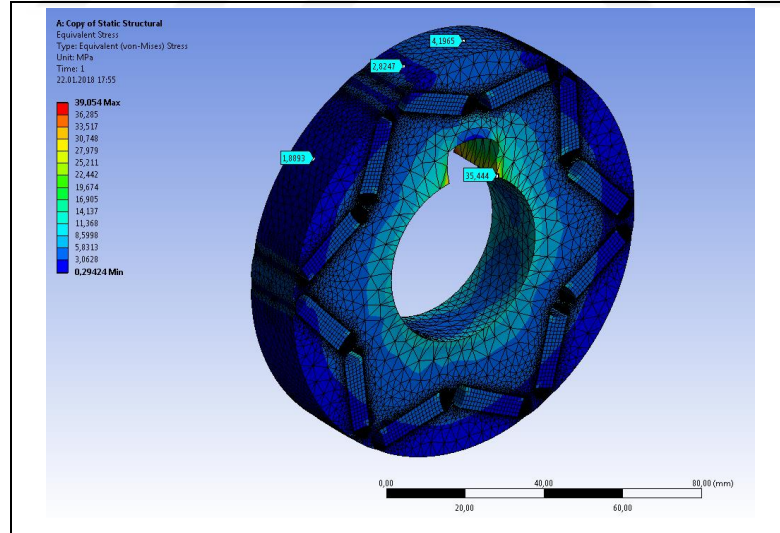
Şekil 4.66. V tip DM yapı gövde burulma analizi (a) yer değıştirmeler ve (b) eşdeğer gerilme seviyeleri (3B SEA)



Şekil 4.67. V tip DM rotor (a) mekanik 3B SEA modeli ve sınır koşulları ile (b) ağ yapısı



Şekil 4.68. V tip DM rotor (a) yer değiştirmeler (b) eş değer gerilmeler (3B SEA)



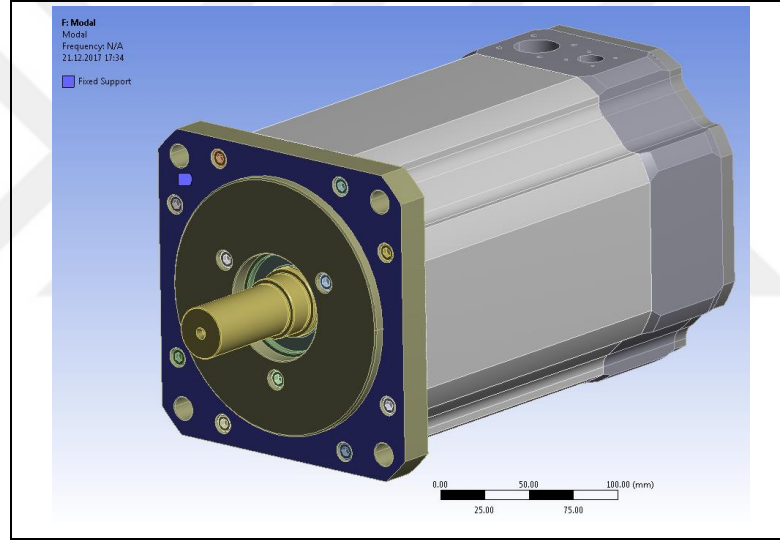
Şekil 4.69. V tip DM yapı rotor nüvesi segmenti üzerindeki eşdeğer gerilmeler (3B SEA)

Rotor için yapılan diğer bir analiz de rotor segmentlerinin hem yük hem de dairesel hız karşısındaki davranışının incelenmesidir. Özellikle rotor demir kayıplarının minimumda tutulması amacıyla olabildiğince ince yapılan bağlantı noktalarında

yüklemeye ve dairesel hız karşısında oluşan yer değiştirmeler ve gerilme seviyeleri rotor bütünlüğünün sağlanıp sağlanmadığını kontrol etme açısından oldukça kritiktir.

Rotor nüvesine motor maksimum momentinin 3 katı moment (120Nm) uygulanmış ve 10.000rpm hızda çevrilerek analiz yapılmıştır. Analizler sonucunda rotor segmenti üzerindeki maksimum gerilme değeri 39MPa (Şekil 4.69) olarak bulunmuştur. Bu değeri de malzemenin akma gerilmesi olan 450Mpa değeri oldukça altındadır. Bu nedenle bu çalışma durumu için rotor nüvesinin emniyetli tarafta olduğu söylenebilir.

Yapılan son mekanik analiz motor modal analizidir. V tip DM yapı motor modal analizi için oluşturulan SEA modeli Şekil 4.70’ de verilmiştir. Bu analiz ile motora ait modlar belirlenerek çalışma frekansları ile örtüşüp örtüşmediği kontrol edilmiştir.



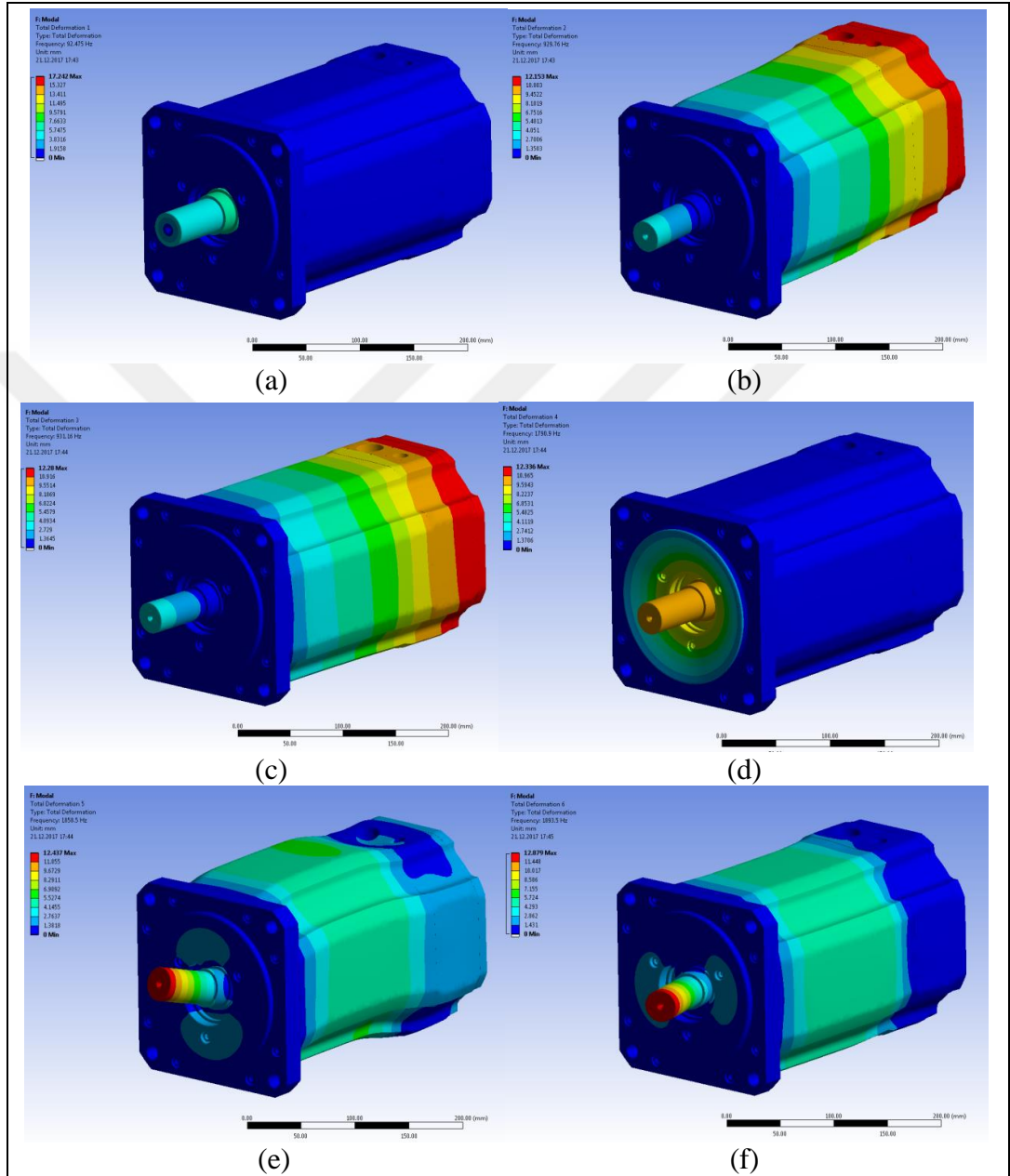
Şekil 4.70. V tip DM yapı motor modal analiz modellemesi (3B SEA)

Tablo 4.5. V tip DM yapı ilk 6 modu

1. Mod	92,475 Hz
2. Mod	929,76 Hz
3. Mod	931,16 Hz
4. Mod	1790,9 Hz
5. Mod	1858,5 Hz
6. Mod	1893,5 Hz

Yapılan analizde elde edilen ilk 6 mod Tablo 4.5’ de verilmiştir. Ayrıca bu modlara ait analiz sonuçları Şekil 4.71’ de gösterilmiştir. Yaklaşık 92Hz’ te (5520 rpm) çıkan ilk Mod rotorun kendi eksenini etrafında her iki yöne dönmekten kaynaklanmaktadır. Bu

yüzden önemi yoktur. Diğer modlar için ise frekans değerlerinin motor maksimum hızının çok üzerinde olduğu görülmüştür. Bu nedenle herhangi bir doğal frekans çakışması beklenmemektedir.

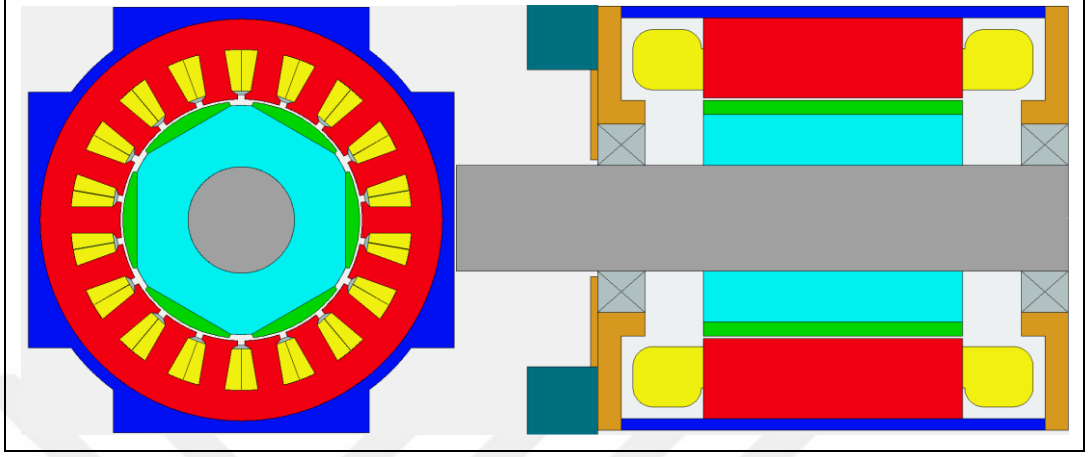


Şekil 4.71. V tip DM yapı motor modal analizi farklı modlar için motor görüntüleri (a) 1. Mod, (b) 2. Mod, (c) 3. Mod, (d) 4. Mod, (e) 5. Mod ve (f) 6. Mod (3B SEA)

4.5.2. V Tip DM yapı termal analizleri

V tip DM yapıya ait termal analizler nümerik hesaplamalar yöntemini kullanan MotorCAD yazılımı ile yapılmıştır. Motorun gerçek sistemde bağlandığı yeri simule etmek adına 300mmx300mmx30mm ölçülerinde alüminyum bir flanşa bağlandığı

varsayılmıştır. Ortam sıcaklığı 25°C olarak kabul edilmiş ve analizler bu sıcaklık göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Motor için oluşturulan termal analiz modeli Şekil 4.72’ de verilmiştir.



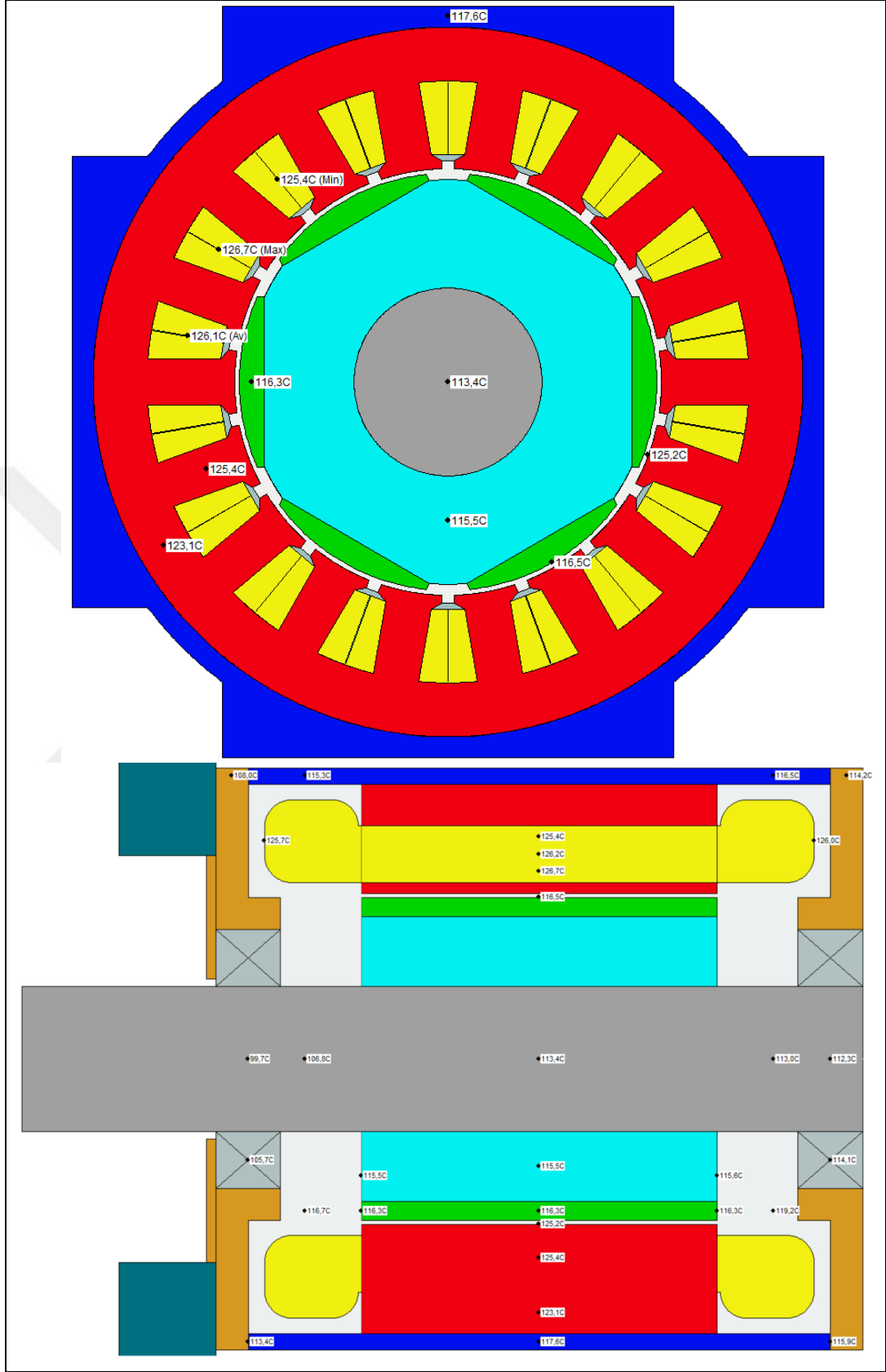
Şekil 4.72. V tip DM yapıya ait termal analiz modeli

Motor termal analizlerinin yapılabilmesi için öncelikle motordaki kayıplar incelenmiştir. V tip DM yapı için anma çalışması durumunda motor kayıpları Tablo 4.6’ da verilmiştir. Bu kayıp değerleri termal analizlere girdi olması nedeniyle, doğru sonuçların alınabilmesi için kritiktir.

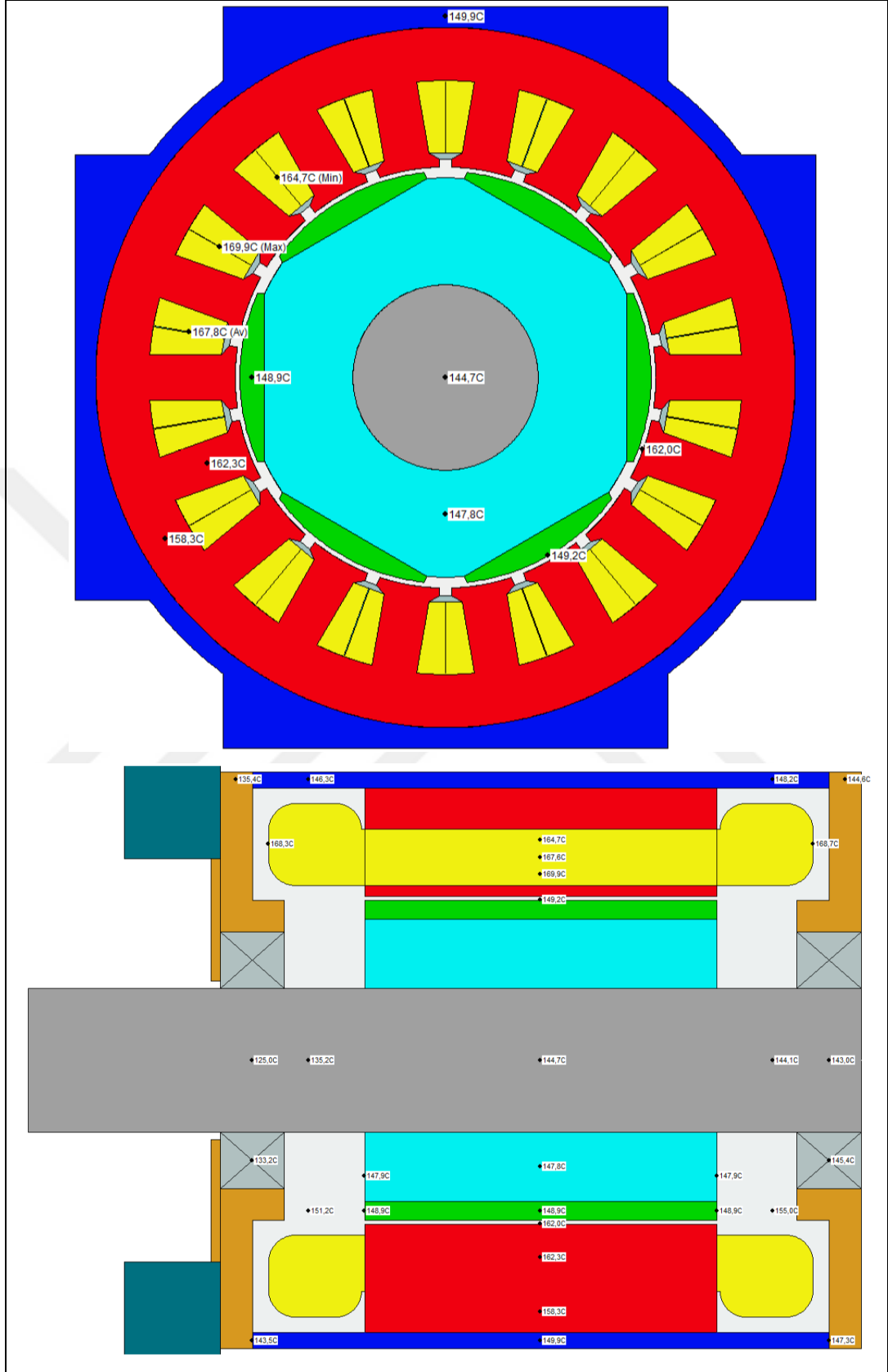
Tablo 4.6. V tip DM yapı anma çalışması için kayıplar

Demir kayıpları	237,46	Watt
Mıknatıs kayıpları	0,32	Watt
Bakır kayıpları	56,67	Watt
Toplam kayıplar	294,45	Watt
Mekanik güç	75039,8	Watt

Yapılan ilk termal analiz motor anma yüklemesinde sürekli çalıştığı durumdur (18 Nm moment ve 4.000rpm rotor hızı). Bu durum için elde edilen analiz sonuçları Şekil 4.73’de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere motorun sargı sonlarındaki maksimum sıcaklık değeri kalıcı durumda 126,7 °C seviyelerine ulaşmaktadır. Bu sıcaklık değeri de motorun sağlıklı çalışması için uygun seviyelerdedir. Aynı çalışma yüklemenin 2 katın çıkartıldığı maksimum yükleme durumu (36Nm moment ve 4.000rpm rotor hızı) için tekrarlanmıştır. Motorun farklı noktaları için elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 4.74’ de verilmiştir.



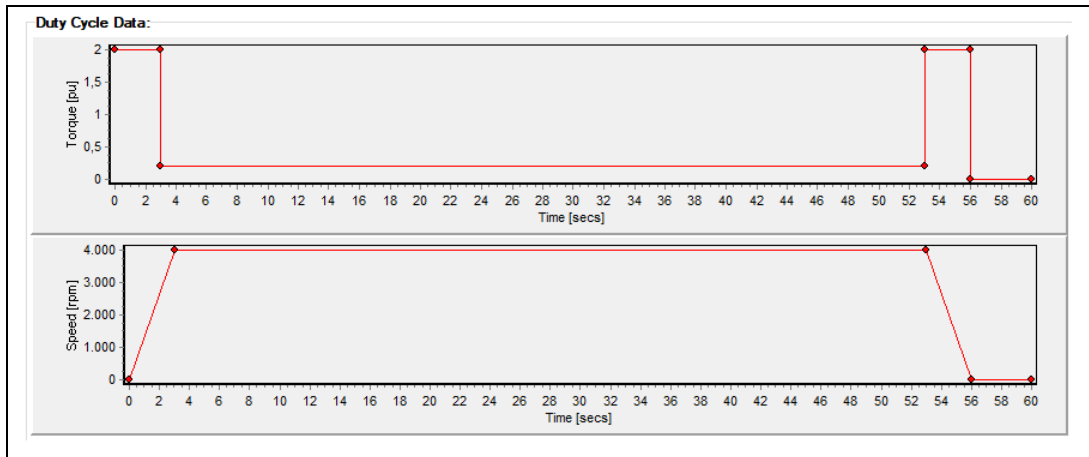
Şekil 4.73. V tip DM yapı anma yüklemesinde sürekli çalışması durumunda elde edilen sıcaklık dağılımı



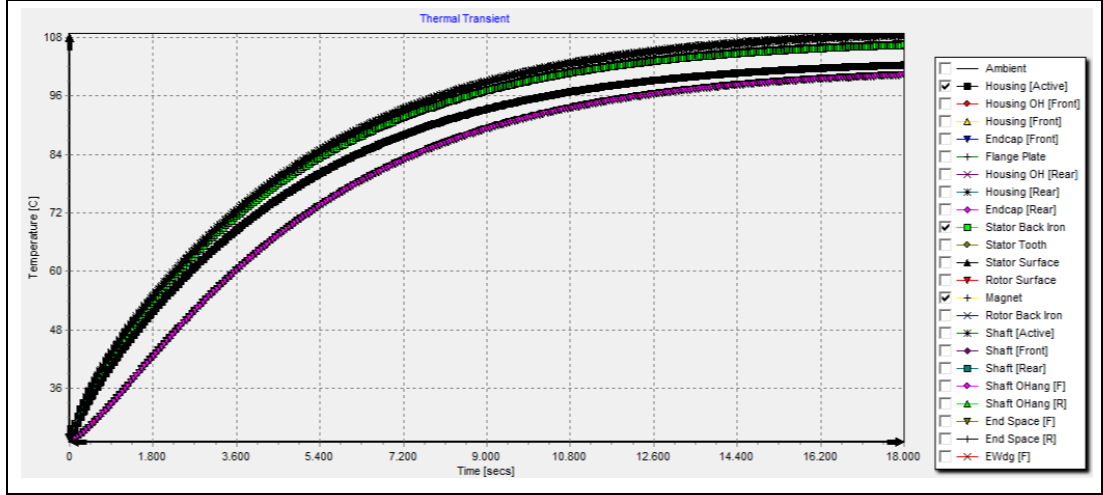
Şekil 4.74. V tip DM yapı maksimum yüklemde sürekli çalışması durumunda elde edilen sıcaklık dağılımı

Şekilden görüldüğü üzere kalıcı durumunda motorun en sıcak noktası olan sargı sonlarında sıcaklık 169,9°C seviyelerine çıkmaktadır. Ortam sıcaklığının 25°C olduğu ve bu değerin özellikle yaz aylarında 40°C seviyelerine kadar çıktığı göz önünde bulundurulursa motorun maksimum yükleme durumunda sürekli çalışamayacağı söylenebilir.

Yapılan diğer termal analiz motorun zamana bağlı termal analizidir. Analiz gerçekleştirilirken iş mili motorunun uygulamada çalışacağı senaryo göz önünde bulundurulmuştur. Motorun kalkış esnasında durağan halden 4.000rpm rotor hızında kadar 3 saniyede maksimum moment seviyesinde çıktığı, 50 saniye boyunca anma momentinin 0,2 katı seviyesinde tornalama işlemi gerçekleştirdiği, işlem bitiminde 3 saniyede maksimum moment seviyesinde durağan hale geldiği ve parça değişimi için de 4 saniye zamanın geçtiği varsayımında bulunulmuştur. Bu çalışma senaryosu Şekil 4.75' de verilmiştir. Ayrıca bu çalışma durumunda ortam sıcaklığının 40°C' de olduğu varsayımında bulunulmuştur. Motorun bu çevrimde sürekli çalışarak kalıcı durumda hangi sıcaklıklara ulaşacağını görebilmek için çevrim 300 kere tekrarlanmış ve böylelikle senaryonun toplamda 5 saat süresince devam ettiği durum analiz edilmiştir. Bu çalışma çevrimi için motor üzerindeki zamana bağımlı sıcaklık değişimleri Şekil 4.76' de verilmiştir. Motor üzerindeki en sıcak nokta olan sargı sonlarının yaklaşık 108,6°C seviyelerinde olduğu görülmüştür. Bu değer de motorda tercih edilen H sınıfı telin maksimum çalışma sıcaklığı olan 180 derece göz önünde bulundurulursa kabul edilebilir seviyede olduğu söylenebilir. Ayrıca mıknatıs sıcaklıklarının da kabul edilebilir seviyelerde olduğu söylenebilir.



Şekil 4.75. V tip DM yapıya uygulanan motor çalışma periyodu



Şekil 4.76. V tip DM motorun uygulanan çalışma senaryosu için zamana göre sıcaklık değişimleri

4.6. V Tip DM Motor Prototip Üretimi ve Test sisteminin Kurulması

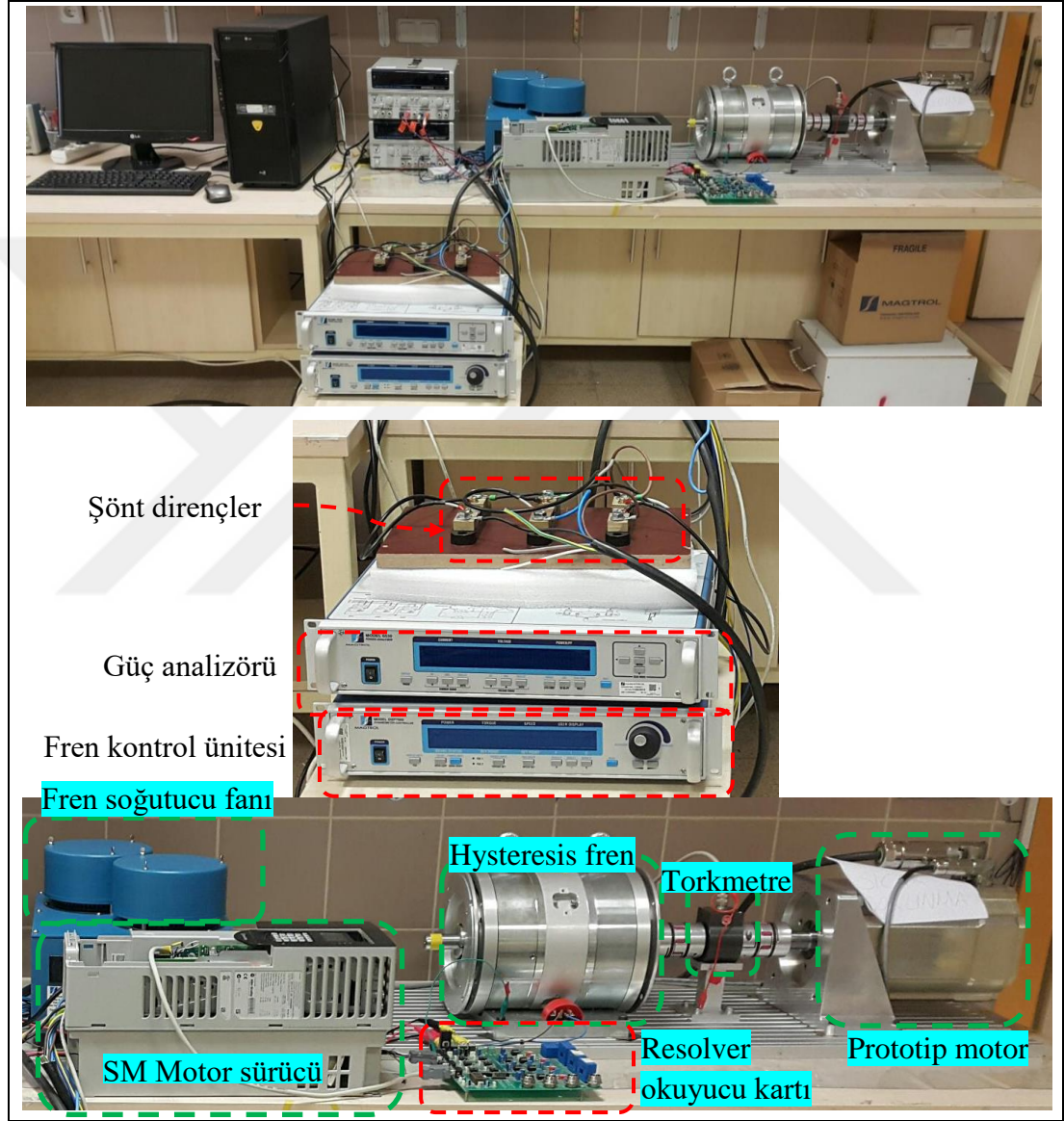
Manyetik, mekanik ve termal analizleri yapılan V tip DM yapı için prototip üretim çalışması yapılmıştır. Üretilen prototipin testlerinin yapılması için profesyonel bir motor test sistemi oluşturulmuştur. Prototip üretimi ve test sistemi kurulumu ile ilgili yapılan çalışmalar detaylı olarak alt başlıklar helinde verilmiştir.

4.6.1. V Tip DMSM prototip üretiminin yapılması

Mekanik ve termal analizleri tamamlanan nihai v tip DM yapı için prototip üretim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Motor bağlantı arayüzünü ve temel ölçülerini gösteren teknik resim Şekil 4.77' de verilmiştir. Bu temel ölçüler kapsamında motorun gövde ve kapakları alüminyum malzemeden belirlenen toleranslarda bilgisayar kontrollü torna ve bilgisayar kontrollü işleme merkezi kullanılarak üretilmiştir. Manyetik malzemeler ise hızlı lazer kesim makinesi kullanılarak hassas şekilde kesilmiş ve lazer kaynakla kaynatılmıştır. Stator sarımları tasarımda belirlenen şekilde, uygun tel çapı ve izolasyon sınıfı ile sarılmıştır. Mıknatısların yapıştırılması işlemi sonrası motor montajına geçilmiş ve montaj talimatları doğrultusunda motor montajı tamamlanmıştır. Üretim aşamasından bazı görüntüler ve tamamlanmış prototip görüntüsü Şekil 4.78' da verilmiştir.

4.6.2. Motor test sisteminin kurulması

Motor yüksüz ve yüklü durum testlerini yapmak üzere 12.000rpm hız seviyelerine çıkabilecek, maksimum 25Nm yüklenebilecek, 7.5kW gücünde bir sistem konfigürasyonu oluşturulmuştur. Kurulumu yapılan test sistemine ait görüntü Şekil 4.79' da verilmiştir.



Şekil 4.79. Magtrol marka motor test sistemi

Yük oluşturması için hysteresis dinamometre seçilmiştir. Dinamometreyi kontrol eden bir DSP kontrolör bulunmaktadır. Bu kontrolör yardımıyla istenen farklı senaryolarda sistem çalıştırılabilecek ve gerekli testler yapılabilecektir. Motor performansını ölçmek ve gerilim akım, moment, hız gibi bilgilerini bilgisayar ortamına almak üzere

güç analizörü kullanılmıştır. Toplanan bu bilgiler sayesinde farklı yükleme durumları için motora ait moment-hız, verim-hız, moment-akım gibi grafikler kolaylıkla elde edilebilmektedir. Son olarak momenti ölçmek için 50Nm' lik kapasite ve hız ölçmek amacıyla kullanılan 60 darbelik dahili encodera sahip bir torkmetre kullanılmıştır. Test sisteminde kullanılan bileşenlerin temel özellikleri Tablo 4.7' de verilmiştir.

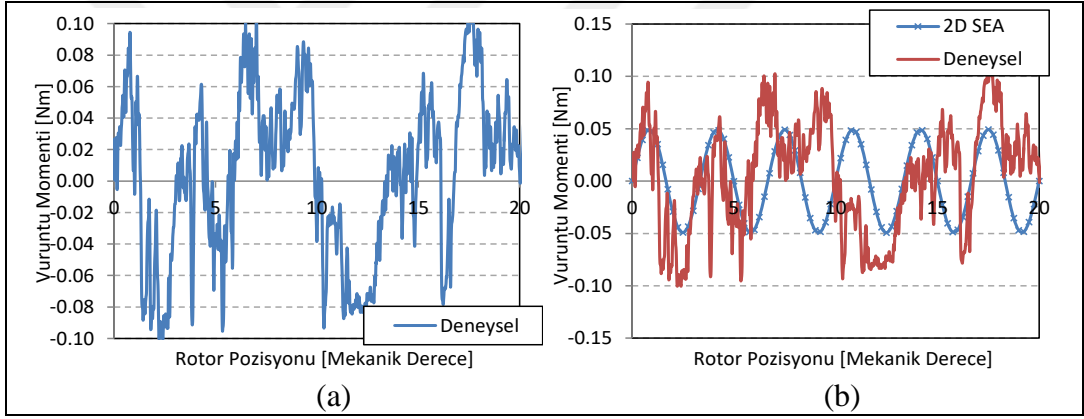
Tablo 4.7. Motor test sistemi bileşenleri ve özellikleri

No	Bileşen	Açıklama
1	BHB-24 Hysteresis Fren	<ul style="list-style-type: none"> • 6kw güç (hava soğutmasız) • 7kW güç (hava soğutmalı) • Düşük moment, yüksek hızlar için ideal • Anma akımında minimum moment 24Nm • Maksimum hız 12.000rpm
2	DSP 7000 fren kontrolörü	<ul style="list-style-type: none"> • Tork ve hız modunda çalışma özelliği • Düşük hızlarda çalışma kabiliyeti • PID fren kontrol kabiliyeti • Maksimum 500Hz örnekleme frekansı • Dijital filtre özelliği
3	Güç analizörü 6530	<ul style="list-style-type: none"> • Giriş gerilim aralıkları 30-150-300-600 V • Akım Giriş Aralıkları: 1-5-10-20 A • Frekans Aralığı: DC-100kHz • 5-500Hz Doğruluk: $\pm 0.1\%$ Okuma • Maksimum Veri Aktarım Hızı: Saniyede 100
4	Sönt Direnç 4640-SA-50A	<ul style="list-style-type: none"> • 50A
5	SW-MTEST-7-1 yazılımı	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemi kontrol eden yazılım
6	TAB-2X-AHB24/BHB24	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemin monte edildiği plaka
7	DRBK-50n Torkmetre	<ul style="list-style-type: none"> • 50Nm kapasiteli torkmetre
8	Motor bağlantı fikstirü	<ul style="list-style-type: none"> • Alüminyum 7075 serisi

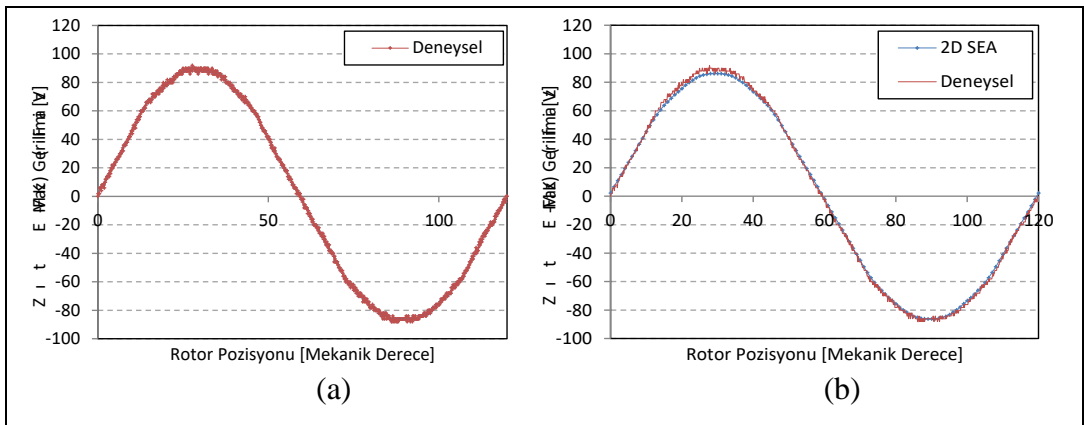
4.7. V Tip DMSM Prototip Testleri ve Doğrulama Çalışmaları

Prototip üretimi tamamlanan v tip DM motorun testleri, oluşturulan test sistemi kullanılarak yapılmıştır. Önce yüksüz durum testleri yapılmış, ardından farklı

senaryolar için yüklü durum testlerine geçilmiştir. Yapılan ilk yüksüz durum testi vuruğu momenti testidir. Motor düşük hızda çevrilerek torkmetreden elde edilen moment verisine bakılmıştır. Şekil 4.80' den görüldüğü üzere vuruğu momenti tepe değeri 0,1Nm olarak elde edilmiştir. Bu değer de oldukça küçük bir değerdir. Ayrıca aynı şekil üzerinde test sonuçlarının SEA sonuçları ile karşılaştırması da verilmiştir. Sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Oluşan küçük farkın nedeni torkmetrenin hassasiyet limiti, mekanik bazı problemler olarak değerlendirilebilir. Diğer bir yüksüz durum testi zıt EMK testidir. 1.000rpm rotor hızı için elde edilen zıt EMK hat dalga değişimi Şekil 4.81' de gösterilmiştir. Hat dalga değişimi tepe değeri 87,8V olarak elde edilmiştir. Ayrıca aynı şekilde test sonuçlarının SEA sonuçları ile karşılaştırması da verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere sonuçlar birbirine oldukça yakındır ve %2,3' lük hata payı ile örtüşme sağlanmıştır.

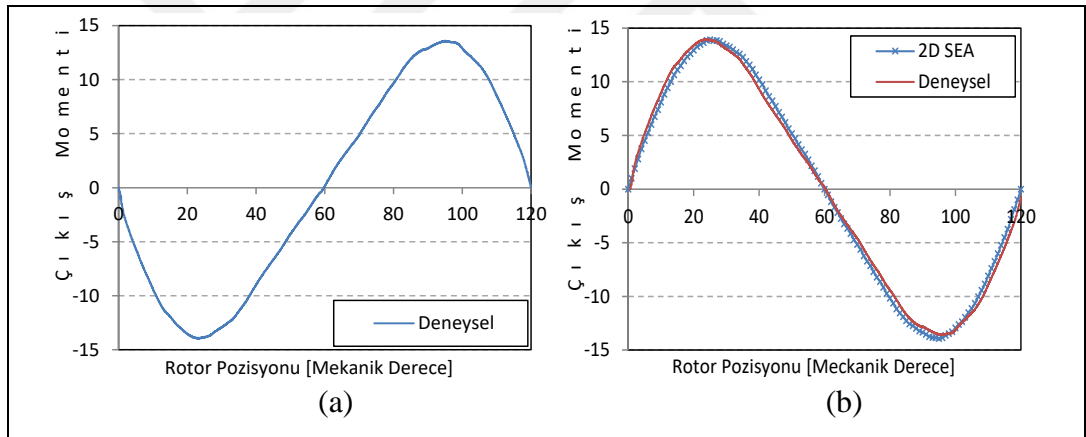


Şekil 4.80. V tip DM yapıya ait (a) vuruğu momenti test sonucu ve (b) SEA sonuçları ile karşılaştırması

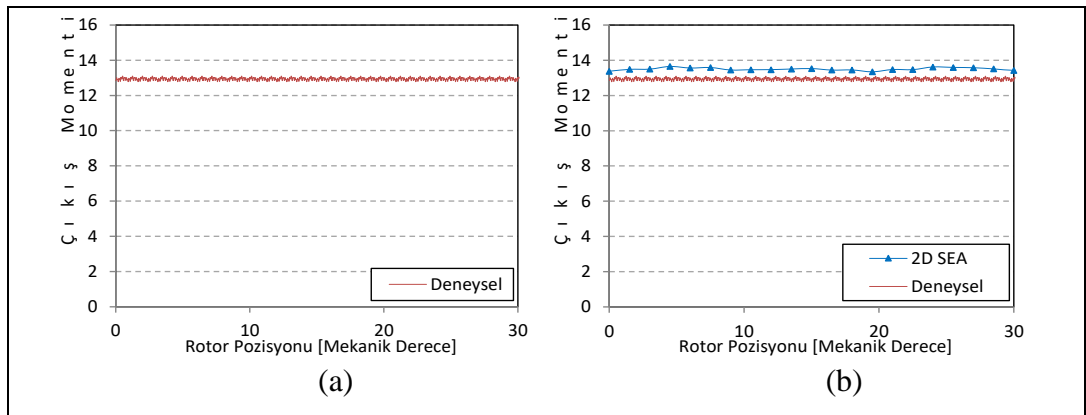


Şekil 4.81. V tip DM yapıya ait 1.000rpm rotor hızı için (a) zıt EMK hat gerilimi test sonucu ve (b) SEA sonuçları ile karşılaştırması

Yüksüz durum testleri yanı sıra detaylı yüklü durum testleri de yapılmıştır. Öncelikle motor fazlarına 19Amax sabit akım uygulanması durumu için rotor pozisyonuna göre moment değerleri elde edilmiş (Şekil 4.82). Elde edilen moment test verisinin tepe değeri 13,8Nm’ dir ve simülasyon sonuçları ile yüksek oranda örtüşmektedir. Aralarındaki hata payı %0,85 mertebelerindedir. Diğer bir yüklü durum testi ise anma akımında çıkış momenti testidir. Prototip motora ait çıkış momenti test sonucu ve bu sonucun SEA ile karşılaştırma grafiği Şekil 4.83’ de verilmiştir. Çıkış momenti test sonucu ortalama değeri 12,94Nm seviyelerindedir. Prototipin üretildiği mıknatıs test sonuçlarına göre güncellenen SEA sonuçlarında ortalama momentin 13,5Nm seviyelerinde olduğu göz önünde bulundurulduğunda test ve simülasyon sonuçları arasında %4,1’ lik bir hatanın olduğu görülmektedir. Aradaki bu farkın sebebinin ise kullanılan sürücü ve test sistemi mekaniğinden kaynaklanan küçük problemler nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir.

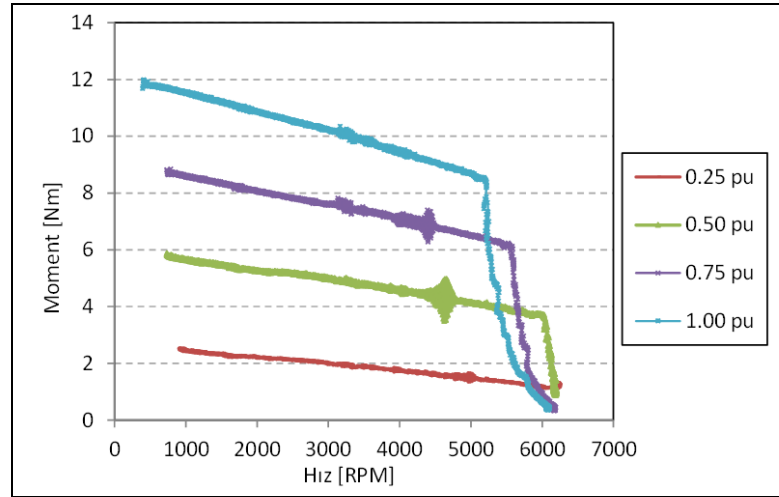


Şekil 4.82. Sabit akım için V tip DM yapıya ait (a) çıkış momenti test sonucu ve (b) SEA sonuçları ile karşılaştırması (@19Amax)



Şekil 4.83. V tip DM yapıya ait (a) çıkış momenti test sonucu ve (b) SEA sonuçları ile karşılaştırması (@19Amax)

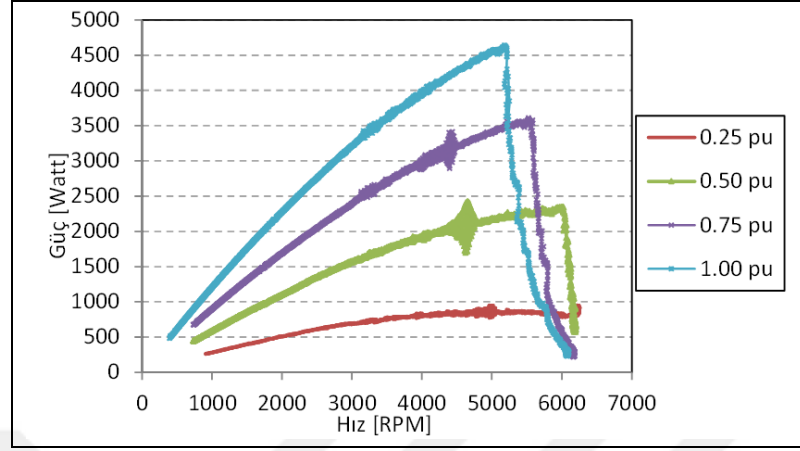
Yapılan son yüklü durum testi, motorun farklı yükleme durumları için moment-hız eğrisinin çıkarılmasıdır. Bunun için motor sırasıyla 0,25, 0,5, 0,75 ve 1pu yüklerinde yüklenmiş ve motora ait moment-hız, güç-hız, verim-hız eğrileri çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 4.84 - Şekil 4.86' de verilmiştir. Moment hız eğrilerinde düşük hızlarda SEA testlerine yakın sonuçlar alınmış fakat hızın artması ile moment miktarında kritik şekilde düşüş olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin kullanılan sürücünün DM motor sürmeye uygun olmayaşından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sürücü düşük hızlarda YM motorlarda olduğu gibi maksimum momenti verecek kontrol açısını belirlemektedir ve bu nedenle moment seviyesi analiz sonuçları ile uyumlu çıkmaktadır. Fakat DM motorlarda motorun yüklendiği nokta için kontrol açısının değişmesi nedeniyle kullanılan sürücü bunu sağlayamamış ve sonuç olarak uygulanan akım için motoru maksimum moment noktasında sürememiştir. Motor yüksüz durum hızı 6.400rpm seviyelerinde kalmıştır. Daha yüksek hız seviyelerine çıkamamasının sebebi prototip motoru sürmek için kullanılan sürücünün alan zayıflatma kabiliyetinin olmaması ve bu nedenle de anma noktasından sonra ani hız düşüşü yaşanmasıdır. Ayrıca sürücünün DM motora uygun olmaması nedeniyle motor verimi de olması gerekenden düşük çıkmıştır.



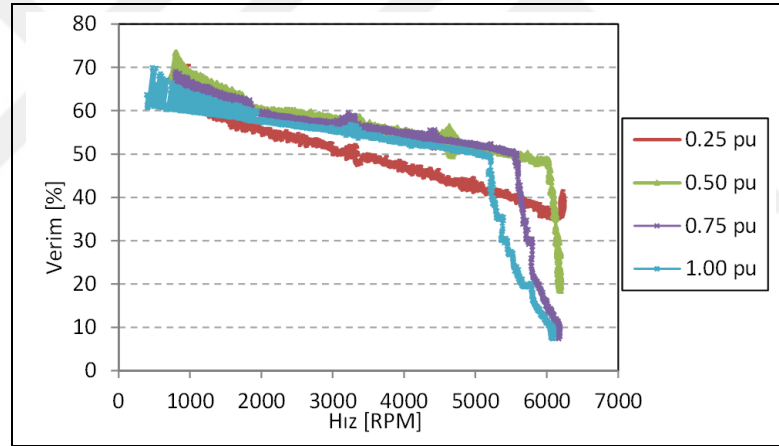
Şekil 4.84. V tip DM yapı prototipinin 0,25pu, 0,5pu, 0,75pu ve 1pu yükleme durumları için moment-hız eğrileri değişimi

Yapılan testler ve karşılaştırmalara ait özet Tablo 4.8' de verilmiştir. Vuruntu momenti, zıt EMK ve çıkış momenti değişimleri %5' in altında bir hata payı ile örtüşürken verimler arasında ciddi fark görülmektedir. Bunun da kullanılan sürücünün

DM motor sürmeye uygun olmayışı, motoru standart YM motor gibi sürmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.85. V tip DM yapı prototipinin 0,25pu, 0,5pu, 0,75pu ve 1pu yükleme durumları için güç-hız eğrileri değişimi



Şekil 4.86. V tip DM yapı prototipinin 0,25pu, 0,5pu, 0,75pu ve 1pu yükleme durumları için verim-hız eğrileri değişimi

Tablo 4.8. V tip DM yapı test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırması

	2D SEA	DENEYSSEL
Ortalama Moment Nm	13,5	12,95
Vuruntu Momenti %	0,34	0,54
Zıt EMK (Faz-Faz) V	85,9	87,8
Verim % (@5175rpm)	97,7	65

4.8. Özet

Bu bölümde tasarlanacak takım tezgahı motoru için tasarım kriterleri verilerek referans YM motor için manyetik SEA' leri gerçekleştirilmiştir. Farklı DM yapılar için ön tasarımlar yapılarak en iyi sonuç alınan 2 tanesinin detaylı analizleri yapılmıştır. Daha iyi sonuç alınan v tip yapı için 3B katı model oluşturulmuş, mekanik ve termal analizler gerçekleştirilmiştir. Nihai tasarım için üretim resimleri oluşturularak prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Motor testlerinin yapılabilmesi için profesyonel bir test sistemi kurulmuş ve prototip performans testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarının SEA sonuçları ile karşılaştırmaları yapılmış ve sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

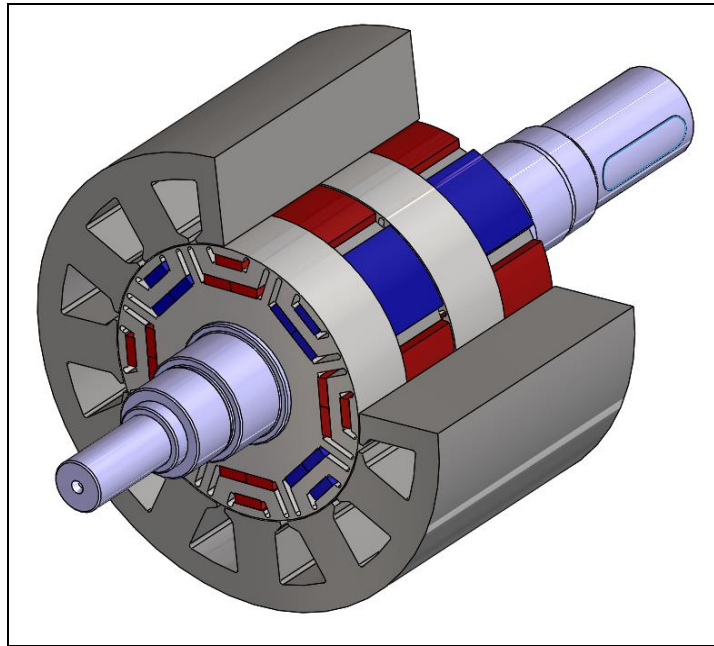


5. YENİ BİR SÜREKLİ MİKNATISLI HİBRİT SENKRON MOTOR TOPOLOJİSİ ÖNERİLMESİ

Bu bölümde, yeni bir sürekli mıknatıslı hibrit senkron motor (SMHSM) önerisinde bulunulmuştur. Önerilen yöntem temel olarak YM ve DM motor rotorlarını aynı mil üzerinde birlikte bulundurmaktadır. Burada amaç düşük hızlarda YM motorun yüksek moment kabiliyetinden, yüksek hızlarda ise DM motorun alan zayıflatma kabiliyetinden faydalanarak optimum bir tasarım elde etmektir. Önerilen yöntemin doğruluğunun test edilmesi için önce bir konsept doğrulama çalışması yapılmış ve detaylı şekilde anlatılmıştır.

5.1. SMHSM' un Önerilmesi

Bu çalışmada literatürde ilk kez SMHSM yapısı önerilmiştir. Çalışmada aynı mil üzerinde kaykılı verilmiş YM ve DM rotor segmentleri bulunmaktadır. Önerilen SMHSM yapısına ait görüntü Şekil 5.1' de verilmiştir. Genel amaçlı kullanımlara özel 5kW güce sahip YM bir motor referans olarak alınmış ve SMHSM ile karşılaştırması yapılmıştır. Çalışmada kullanılan motora ait kriterler Tablo 5.1' de verilmiştir.

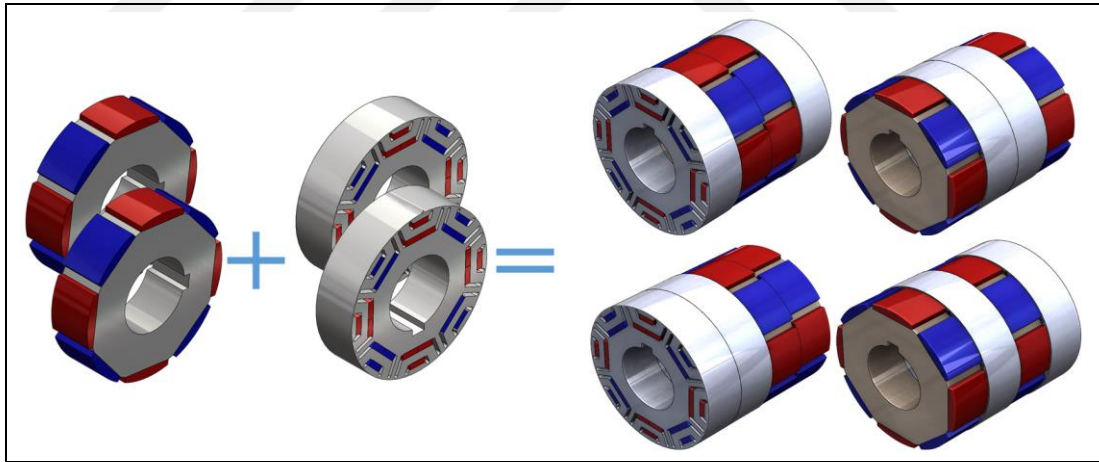


Şekil 5.1. Önerilen SMHSM'a ait ara kesit görüntü

Tablo 5.1. Önerilen SMHSM çalışması için referans alınan motor kriterleri

Anma Hızı	2500 rpm
Anma Momenti	24 Nm
Anma Akımı	16 Apeak
DC Bara Gerilimi	510 V
Oluk Sayısı	12
Kutup Sayısı	8
Faz Sayısı	3

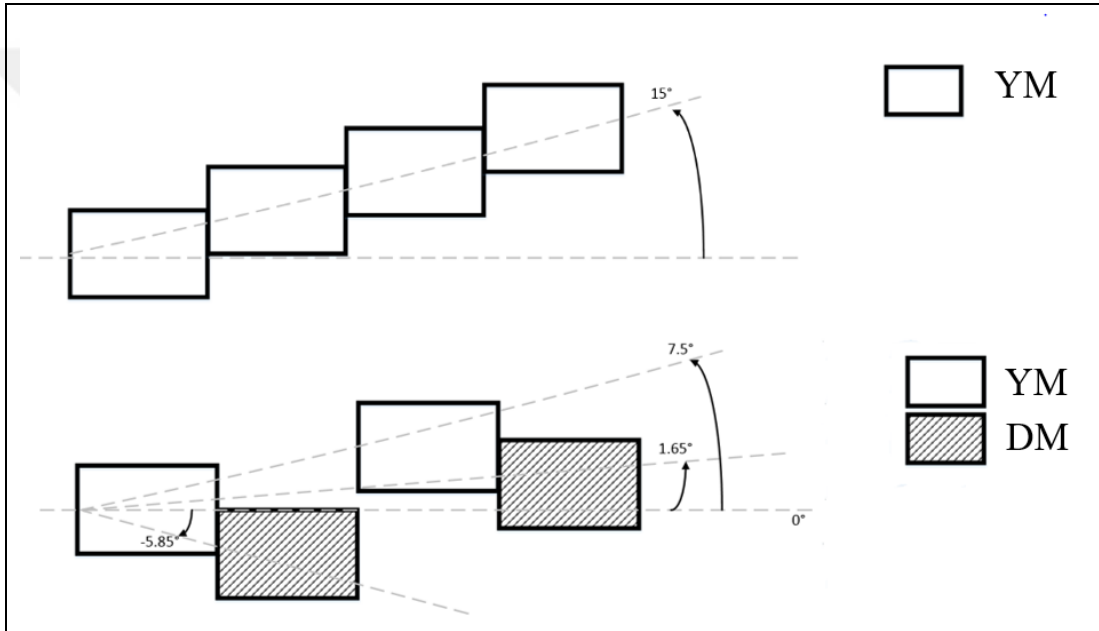
Ara kesitte gösterilen yapı rotorların DM, YM, DM, YM sıralamasına göre bir araya getirildiği yapıya aittir. Fakat önerilen SMHSM yapı, segmentlerin farklı dizilimleri için farklı alternatiflerden oluşabilmektedir. Bu uygulama için toplamda 4 segment olmak üzere 2 YM, 2 DM rotor segmentinden oluşan toplamda 4 farklı alternatif Şekil 5.2’ de verilmiştir. Burada önemli olan bu alternatiflerden hangisinin tasarım kriterleri için en iyi sonucu verdiğinin bulunmasıdır. Bu da yapılacak olan SEA’ larla mümkündür. Stator tarafında ise herhangi bir değişiklik yapılmamış ve YM standart motora ait stator ve sargı yapısı bire bir aynı olacak şekilde kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Alternatif SMHSM önerileri

YM yapı ve DM yapı için ayrı ayrı yüksüz ve yüklü durum SEA’ lar motorların tek segment oldukları varsayılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar segmentlerin paket boylarına göre oranlanmıştır. YM yapı ile DM yapının kontrol açılarının farklı olması, geleneksel kaykı uygulamasında aç kaynaklı bir miktar moment kaybını beraberinde getireceği bilinmektedir. Bu problemin çözümü için de DM yapıya elektronik olarak uygulanan kontrol açısı, mekanik olarak motor mili tarafına kama yuvası açılarak kaykı oluşturma işlemi sırasında uygulanmış ve moment kaybı ortadan kaldırılmıştır.

Geleneksel kaykđ ile 6nerilen y6ntemde uygulanan kaykđ Şekil 5.3' de g6rselleŐtirilmiŐtir. Standart kaykıda referans motor oluk sayısı/kutup sayısı kombinasyonuna g6re uygulanması gereken kaykđ aÇısı toplamda 15 derecedir. Fakat yapılan çalışmalarda hibrit rotorda YM yapılarak standart kaykđ uygulanırken DM yapıya kontrol aÇısı kaynaklı farklı aÇıların verilmesi gerekmiŐtir. Segmentlerin soldan sağa doğru sıralandığını kabul edersek, moment kaybına neden olmayacak DM yapıların aÇıları 2. segmentte -5,85 derece, 4. segmentte de 1,65 derecedir. Bu aÇılar da 6retim esnasında mil tarafına aÇılan kama yuvaları sayesinde kolaylıkla verilebilmektedir.



Şekil 5.3. Geleneksel kaykđ ve SMHSM' a uygulanan kaykđ aÇılarının g6sterimi

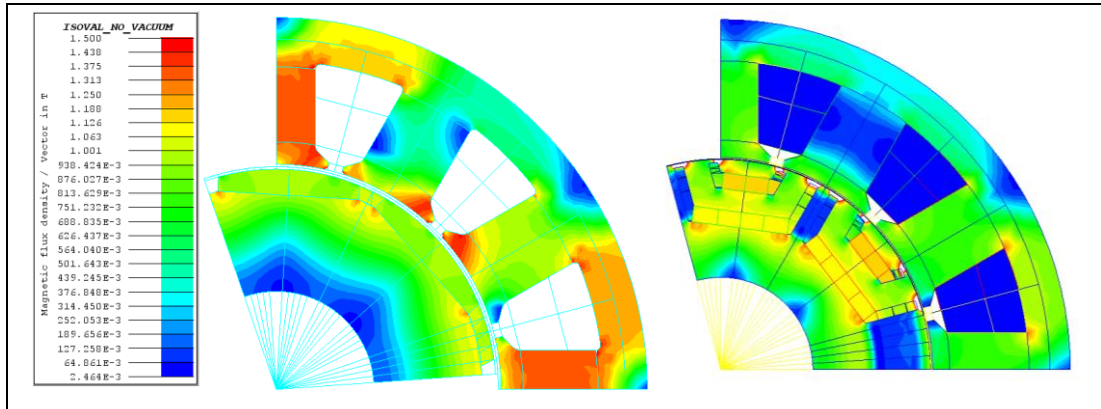
5.2. SMHSM Analizleri

SMHSM performansının elde edilmesi ve YM ile DM yapılar g6re karşılaştırmalarının yapılabilmesi için farklı y6ks6z ve y6kl6 durum SEA' lar yapılmıştır. 6nce standart 4 segmentli YM ve DM yapılar a ait analizler yapılmış ve kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Ardından SMHSM'a geçilmiş ve SMHSM için de analiz sonuçları verilmiştir. Son olarak her 6 yapının moment hız eğrileri karşılaştırılarak avantaj ve dezavantajları belirlenmeye çalışılmıştır.

YM ve DM yapılar a ait y6ks6z durum akı yoğunlukları Şekil 5.4' de verilmiştir. Şekilden g6r6ld6Đ6 6zere YM yapı stator diŐilerindeki akı yoğunluğu 1,4T

seviyelerindeyken, DM yapıda bu değer 1T seviyelerindedir. Her iki akı yoğunluğu değeri de 1,5T seviyesinin altında olduğundan dolayı kullanılan M270-35a türü malzeme için kritik seviyelerde değildir. Motorlara uygulanan yarım oluk adımı kaykısı, Şekil 5.5’ den görüleceği üzere vurunu momenti ve moment dalgalanmasının az, zıt EMK THD’ sinin ise düşük seviyelerde olmasını sağlamıştır. Yapılan çalışmalarda vurunu momenti tepe değerlerinin ortalama momente göre yüzdelerinin YM ve DM yapılar için sırasıyla 0,4% and 0,25% seviyelerinde görülmüştür. Rotor kaykısı uygulanması ve vurunu momenti seviyelerinin düşük olmasının sonuçlarından biri olarak Zıt EMK hat dalga şekli oldukça sinüzoidal çıkmıştır. 1.000rpm hız için zıt EMK analizleri her iki motora da yapılmış ve dalgalara ait THD seviyeleri kontrol edilmiştir. Her iki motorda da THD seviyelerinin %1,5’ in altında olduğu görülmüştür.

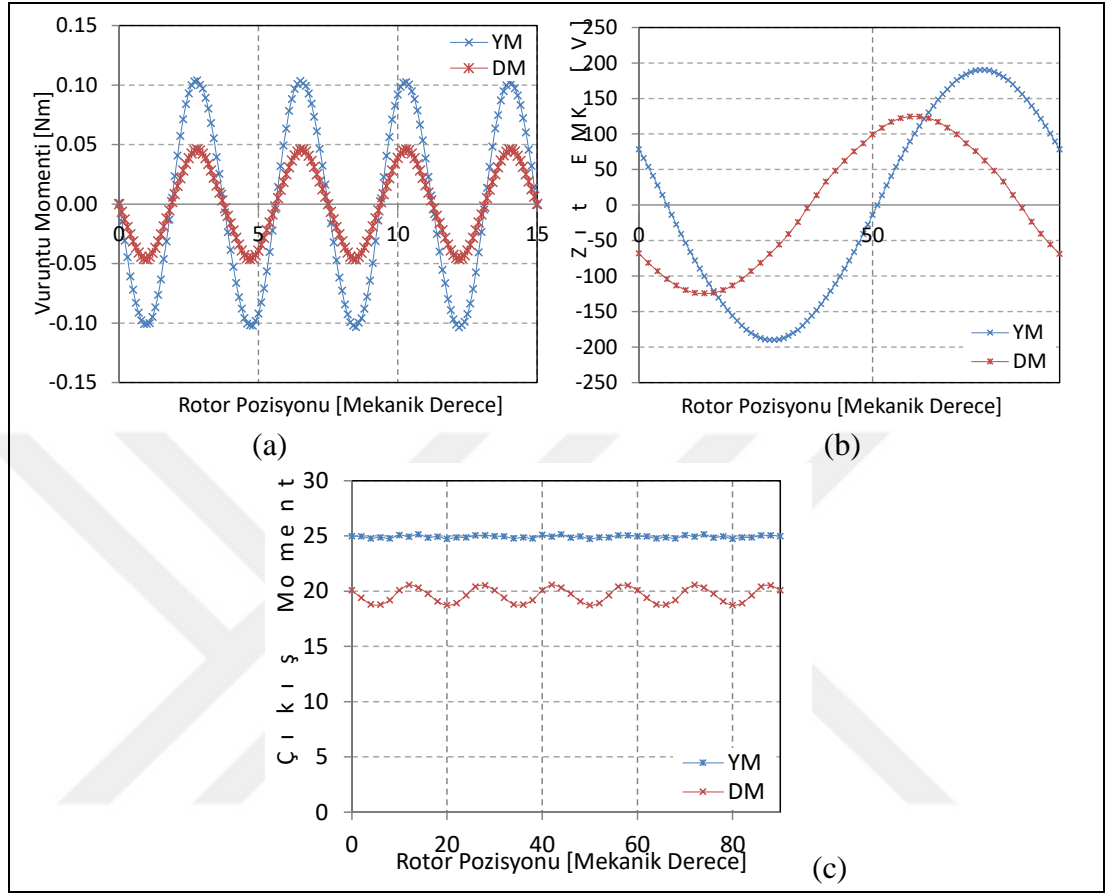
Motorlara ait yüklü durum analizleri de yapılmıştır. YM ve DM yapılar için çıkış momenti değişimleri incelenmiştir. Anma noktasında referans YM yapıya ait ortalama çıkış momenti %1,74, moment dalgalanması ile 24,9Nm iken, DM yapının çıkış momenti %9,5 moment dalgalanması ile 20,03Nm seviyelerinde olduğu görülmüştür. Elde edilen tüm bu sonuçların yanı sıra DM yapıda referans motora göre %28 daha az mıknatıs kullanıldığı unutulmamalıdır.



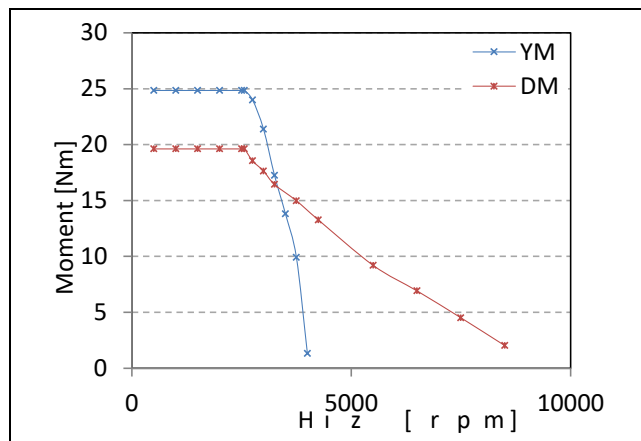
Şekil 5.4. Referans YM ve DM yapılar için yüklenmiş durumda akı yoğunlukları (2B SEA)

YM ve DM yapılar için alan zayıflatma bölgesini de kapsayan moment-hız eğrilerinin SEA ile elde edilebilmesi için birçok analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.6’ da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere her iki motorun da anma hız noktaları 2.500rpm hız ile benzer seviyelerdedir. Maksimum hızları ise sırasıyla 4.000rpm ve 9.250rpm seviyelerindedir. Beklenildiği gibi motorların maksimum hızlarının anma hızlarına oranı bir birinden oldukça farklıdır. YM yapıda bu oran 1,6

iken DM yapının oranı 3,7 seviyelerindedir. Bu sonuç da çalışmada kullanılan DM yapının alan zayıflatma kabiliyetinin oldukça iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.5. 2B SEA yöntemi ile referans YM ve DM yapılarına ait (a) vuruş momenti, (b) 1.000rpm hız için zıt EMK hat dalga değişimi ve (c) çıkış momenti değişimleri

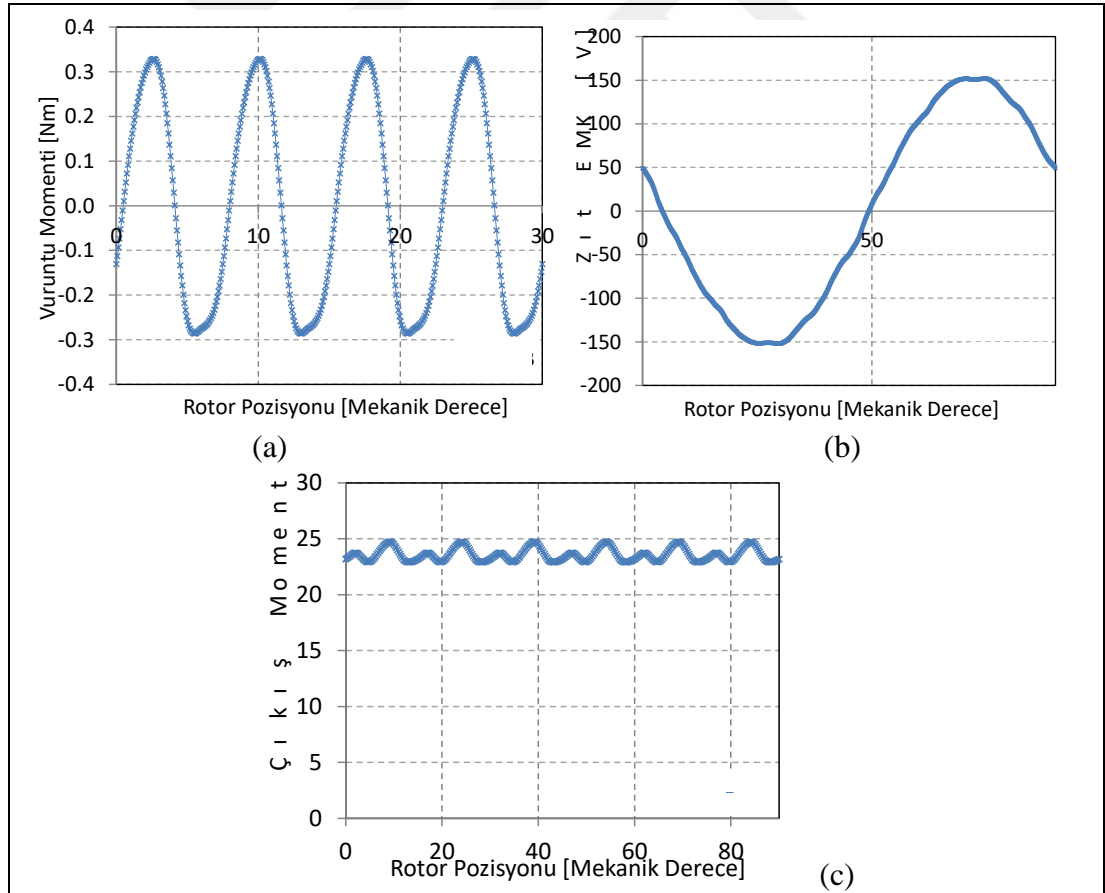


Şekil 5.6. 2B SEA yöntemi ile elde edilen referans YM ve DM yapılarına ait moment-hız grafikleri

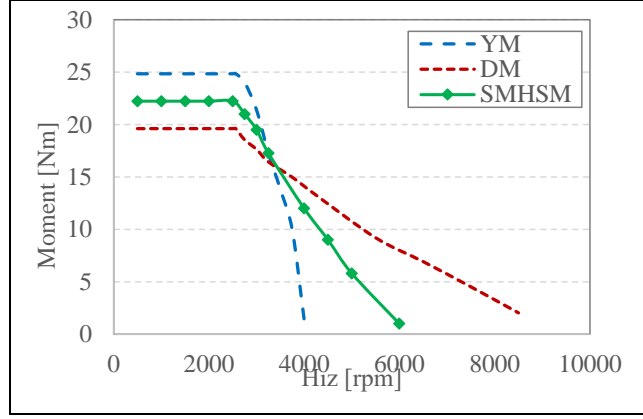
YM ve DM yapılarına ait analizlerden sonra SMHSM yapı ile ilgili çalışmalar

gerçekleştirilmiştir. Her iki yapının da segmentsiz olduğu düşünülerek yüksüz ve yüklü durum 2B SEA sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar segment boylarına göre oranlanmış, kaykçı açısı ve kontrol açıları göz önünde bulundurularak verilere faz kayması eklenmiştir. Bu işlemler her bir segment için uygulanmış ve elde edilen değerler süperpozisyon teoremine göre toplanarak hibrit yapı için sonuçlar elde edilmiştir.

SMHSM' a ait vuruntu momenti, zıt EMK ve çıkış momenti değişimleri Şekil 5.7' de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere vuruntu momenti tepe değeri 0,34Nm seviyelerindedir ve bu değer ortalama momentin %1,4' ü seviyelerindedir. Ayrıca hibrit yapıya ait vuruntu momenti değeri hem YM hem de DM yapıların vuruntu momenti seviyelerinden yüksektir. Fakat yine de vutuntu momenti seviyeleri kabul edilebilir limitler dahilindedir. 1.000rpm rotor hızı için zıt EMK hat gerilimine de bakılmış ve tepe değeri 152,2V, THD değeri ise %1,95 olduğu görülmüştür.



Şekil 5.7. 2B SEA yöntemi ile elde edilen hibrit yapıya ait (a) vuruntu momenti, (b) zıt EMK hat dalga değişimi (@1.000rpm) ve (c) çıkış momenti değişimleri



Şekil 5.8. 2B SEA yöntemi ile elde edilen referans YM yapı, DM yapı ve hibrit yapıya ait moment-hız grafiklerinin karşılaştırılması

Ortalama momenti maksimum olan SMHSM alternatifi için çıkış momenti analizi de yapılmıştır. SMHSM' a ait ortalama çıkış momentinin 23,6Nm seviyelerinde olduğu görülmüştür. Ayrıca moment dalgalanması seviyelerinin ise %7,7' lere olduğu görülmüştür. Son olarak SMHSM'a ait moment hız eğrisine bakılmış ve maksimum hızının 6.000rpm seviyelerinde olduğu görülmüştür (Şekil 5.8). Hibrit motor maksimum hızının anma hızına oranı 2,4 seviyelerinde elde edilmiştir.

5.3. SMHSM Prototip Üretimi ve Deneysel Doğrulaması

Tasarımı tamamlanan SMHSM' a ait prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Prototip motorda kullanılan YM rotor segmenti, DM rotor segmenti, SMHSM rotor yapısı, sarımı yapılmış stator ve nihai prototipi kapsayan üretim görüntüleri Şekil 5.9' da verilmiştir. Ayrıca prototipe ait testler Şekil 5.10' da görülen test sistemi kullanılarak yapılmıştır. Test sistemi dinamometre, torkmetre, motor sürücü, prototip motor ve ölçüm cihazlarından oluşmaktadır.

Test sistemi kullanılarak prototip motora ait önce yüksüz durum testleri yapılmıştır. Yapılan ilk yüksüz durum testi vuru moment testi. Motorun rotoru 1rpm hızda çevrilerek torkmetreden elde edilen moment kaydedilmiştir. Vuru moment değeri Şekil 5.11' de gösterilmiştir. Elde edilen vuru momentinin tepe değeri 0,4Nm' dir. Yapılan simülasyonlarda vuru moment tepe değeri 0,34Nm olarak elde edilmiştir. Simülasyonlar 2B yapılmıştır ve segmetler arası kaçak akı ihmal edilmiştir. Bu nedenle vuru momentinde oluşan bu farkın rotor segmentleri arasındaki 3B etkilerden kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca test verisi üzerinde düşük

frekanslı bir gürültü de görülmüştür. Bunun nedeninin de sistem mekaniğinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

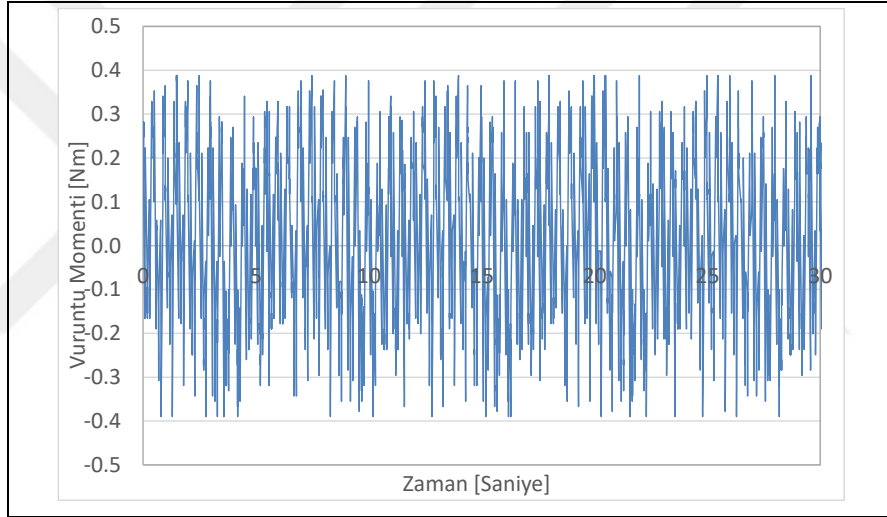


Şekil 5.9. SMHSM prototip üretim görüntüleri (a) YM segment, (b) DM segment, (c) SMHSM rotoru, (d) stator ve (e) SMHSM prototipi

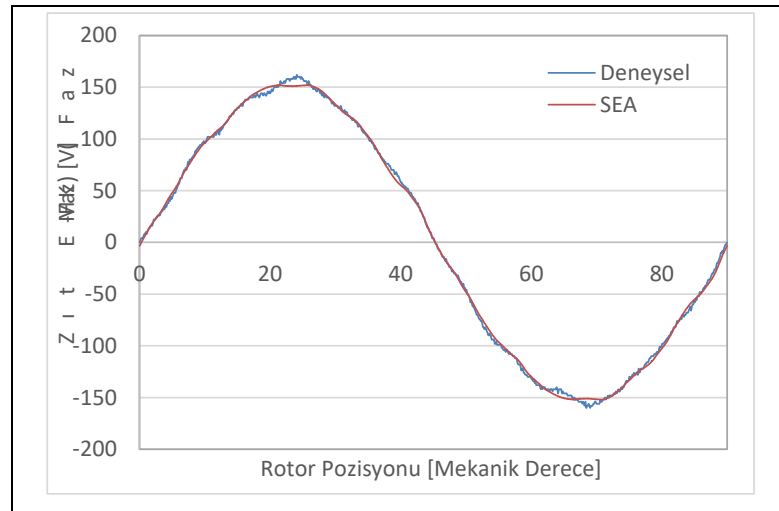
1.000rpm hız için zıt EMK testleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.12). Şekilden görüleceği üzere test ve simülasyon verilerinin temel harmonikleri %0,2' lik bir farkla yüksek doğrulukta örtüşmüştür. Bu da SEA tabanlı yaklaşımının doğru sonuç verdiğini göstermektedir.



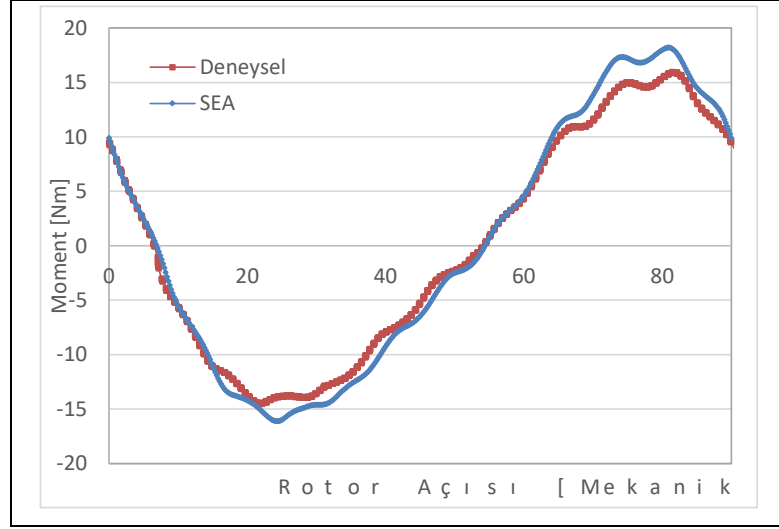
Şekil 5.10. Çalışmada kullanılan motor test sistemi



Şekil 5.11. SMHSM vuruntu momenti test sonucu (@1rpm)



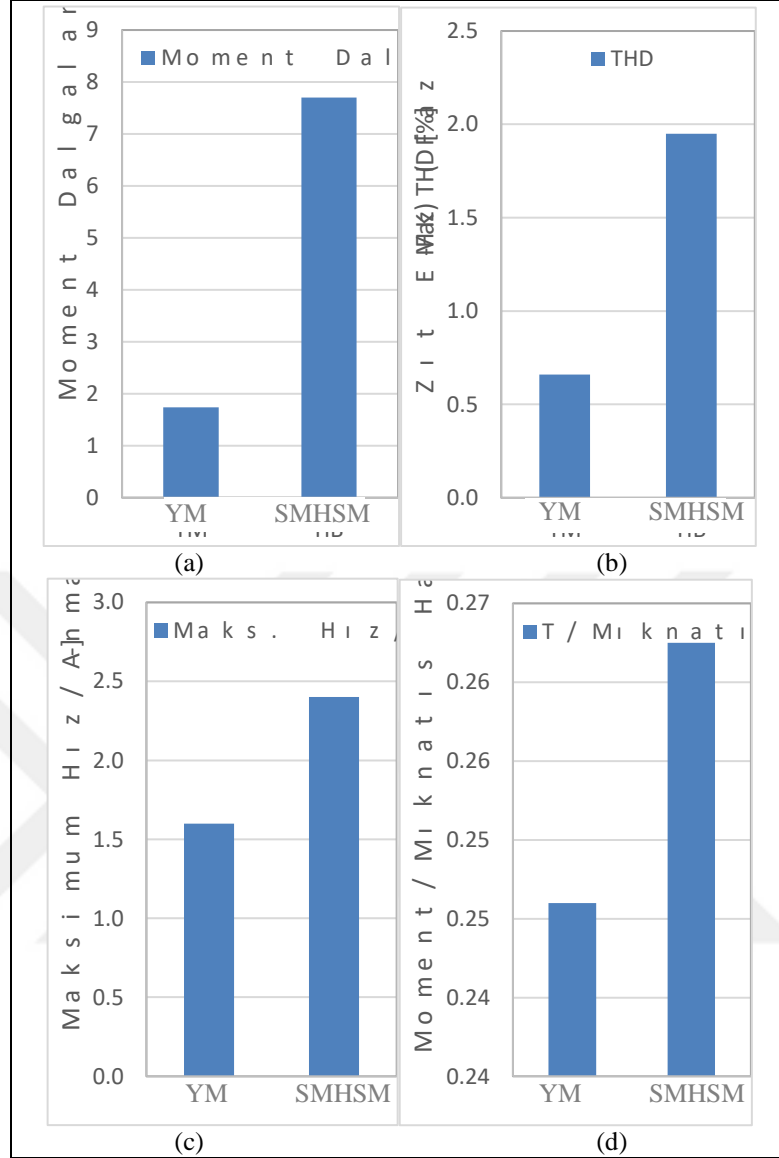
Şekil 5.12. SMHSM zıt EMK hat dalga değişimi test sonucu ve SEA simülasyonları ile karşılaştırması (@1.000rpm)



Şekil 5.13. SMHSM'a sabit akım uygulandığı durum için çıkış momenti değişimi test sonucu ve 2B SEA ile karşılaştırılması (@12Amax)

Test sisteminde yapılan son testler yüklü durum testleridir. Prototip motora 12Amax değerine sahip sabit bir akım uygulanmış ve rotoru yavaşça çevrilerek her bir pozisyon için moment değeri torkmetreden alınmıştır. Elde edilen moment değeri ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçların örtüşüp örtüşmediği kontrol edilmiştir (Şekil 5.13). Şekilden görüldüğü üzere test ve simülasyon sonuçlarının dalga şekilleri bir biri ile uyuşurken tepe değerleri arasında %9,9' luk bir fark görülmüştür. Oluşan bu farkın muhtemel nedeni olarak 3B etkilerin veya test sistemi mekaniğinden kaynaklı problemlerin olabileceği değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak Şekil 5.14' de moment dalgalanması, zıt EMK hat gerilimi THD değerleri, maksimum hız / anma hızı oranı ve moment / mıknatıs hacmi oranı gibi bazı kritik parametreler için referans YM yapı ile SMHSM' un karşılaştırmaları gösterilmiştir. Karşılaştırmadan görüleceği üzere SMHSM'un sağladığı kritik avantajlar daha yüksek maksimum hız / anma hızı oranı, daha az mıknatıs kullanımı ve birim mıknatıs hacmi için daha yüksek moment değerleridir. Diğer taraftan SMHSM' un dezavantajı olarak THD değerinin YM motora göre daha yüksek olması gösterilebilir. Uygulamanın kriterleri göz önünde bulundurulduğunda eğer zıt EMK dalga şekli kritik öneme sahip değilse SMHSM türünden bir motor seçilerek avantajlarından faydalanılabilir.



Şekil 5.14. Referans YM motor ile hibrit motor karşılaştırması (a) moment Dalgalanması, (b) zıt EMK THD'si, (c) maksimum hız/anma hızı oranı, (d) çıkış momenti/mıknatıs hacmi oranı

5.4. Özet

Bu bölümde, yeni bir SMHSM önerisinde bulunulmuş ve konsept doğrulama çalışması yapılmıştır. YM ve DM motor rotorlarını aynı mil üzerinde bulunduran yapı sayesinde düşük hızlarda YM motorun yüksek moment kabiliyetinden, yüksek hızlarda ise DM motorun alan zayıflatma kabiliyetinden faydalanılması hedeflenmiştir. Yapılan SEA çalışmaları, prototip üretimi ve deneysel doğrulama sonucu önerilen yöntemin doğruluğu gösterilmiştir.

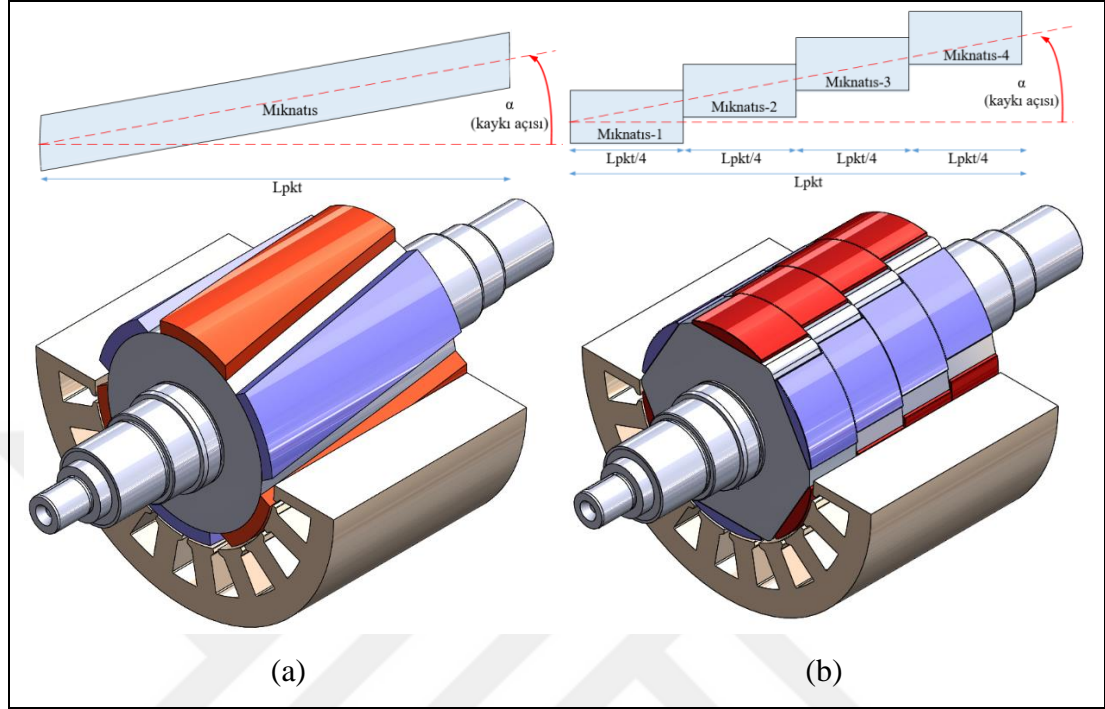
6. YARI SEA TABANLI OPTİMİZASYON ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ

Bu bölümde, SM motorlarda geleneksel segmentli rotor yapısına alternatif olarak 2 farklı yeni tasarım önerilmiştir. Önerilen tasarımların optimizasyonları için yarı SEA tabanlı bir yaklaşım ile optimizasyon algoritmasının geliştirilmesi süreci anlatılmıştır. Önce segmentli SM motorlarda vuru ve çıkış momenti denklemleri verilmiştir. Ardından önerilen tasarımlar anlatılarak verilerle, yapılan çalışmalar detaylı olarak anlatılmıştır. Son olarak üretilen prototip test edilerek, test sonuçları ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırmaları yapılmış ve uyumu irdelenmiştir.

6.1. Segmentli SMSM Denklemleri

Rotorunda ideal kaykık olan ve geleneksel 4 segmentli yapıya ait görüntüler Şekil 6.1’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere rotoru ideal kaykıklı motorlarda mıknatıs boyu rotor ve stator paket boyları ile aynıdır. Diğer taraftan mıknatıslar stator ve rotor nüvelerinde olduğu gibi mil eksenine boyunca düz değildir. Genelde 1 stator oluk adımı kadar kaykık verilerle mil boyunca burulması sağlanır. Böylelikle vuru momentinin ve moment dalgalanmasının azaltılması sağlanmaktadır. Bu işlem motor performansını artırma bakımından çok iyi olmakla beraber mıknatısların bu şekilde üretilmesi ve rotor üzerine yapıştırılması maliyeti fazladır. Bu problemin ortadan kaldırılması için segmentli yapılar sıkça tercih edilmektedir. Segmentli yapılarda motor paket boyu segment sayısına bölünerek, elde edilen uzunluk için kısa mıknatıslar üretilir ve her birisi ayrı ayrı kendi boylarındaki rotor nüvelerine yapıştırılır. Oluşturulan her bir rotor segmenti birbirine göre kaydırılarak ideal olmayan, basamak şeklinde bir rotor yapısı elde edilir. Segmentler arasında genelde 1 stator oluk adımı açısının segment sayısına bölünmesi ile elde edilen açı kadar kaykık verilir. Böylelikle ideal kaykık kadar yüksek performans elde edilemese de motor performansında ciddi seviyede iyileşme sağlanabilmektedir. Diğer taraftan mıknatısların ve rotor nüvelerinin düz olması mıknatıs ve üretim maliyetlerini oldukça düşürmektedir. Rotor segmentleri arasındaki açıyı vermek için de mil üzerine açılan ve birbirine göre farklı açılarda bulunan kama yuvaları sıkça tercih edilmektedir. İdeal

kaykının segmentli yapının özel bir durumu olduğu, segment sayısının sonsuza giderken ideal kaykının olduğu unutulmamalıdır.



Şekil 6.1. SMSM görüntüleri, (a) rotoru ideal kaykılı ve (b) rotoru geleneksel 4 segmentli yapı

SMSM' larda vuru mu momenti mıknatıslarla stator oluklarının etkileşiminden kaynaklanan moment bileşenidir ve Denklem (6.1) ile ifade edilmektedir.

$$T_{\text{cog}} = -\frac{1}{2} \Phi_g^2 \frac{dR}{d\theta} \quad (6.1)$$

Burada Φ_g hava aralığındaki akıyı, R hava aralığı relüktansını, θ da rotor pozisyonunu ifade etmektedir. SMSM' larda hava aralığı relüktansı periyodik olarak değiştiği için vuru mu momenti Fourier Serisi açılımı ile Denklem (6.2)'deki gibi ifade edilebilir.

$$T_{\text{cog}}(v_m) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k \sin(kQv_m + \phi_k) \quad (6.2)$$

Burada v_m mekanik açısal konum, Q oluk sayısı ve T_k analitik veya nümerik yöntemlerle hesaplanabilen k_{th} inci harmoniğin tepe değeri ve ϕ_k da k_{th} inci harmoniğin faz açısıdır. Kaykılı SM motorlarda vuru mu momenti Denklem (6.2) kullanılarak Denklem (6.3) eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$T_{\text{cog_sk}} = \frac{1}{v_{\text{sk}}} \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^{2\pi/(N_p Q)} T_{kN_p} \sin(kN_p Q v_m + \phi_{kN_p}) dv_m \quad (6.3)$$

Burada v_{sk} kayk1 açısı, N_p oluk numarası ile kutup numarasının ortak katlarının en küçüğü (OKEK) sayesinde bulunan T_{cog} ifadesinin periyodudur. Geleneksel SM motorlar için için çıkış momenti ifadesi Denklem (6.4) eşitliğinde verilmiştir.

$$T = \frac{m}{2} p (\delta_{d,PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (6.4)$$

Burada m faz sayısı, p kutup sayısı, $\delta_{d,PM}$ d-eksen mıknatıs akı bağı, i_d ve i_q sırasıyla d-eksen ve q-eksen akımlarıdır. Geleneksel motorlar için kullanılan bu çıkış momenti denklemi küçük değişikliklerle kaykılı SM motorlar için de kullanılabilir. Her bir segment için moment denklemleri ayrı ayrı yazılarak, süperpozisyon teoremine göre toplam mümkündür. Böylece bütün motora ait çıkış momenti değişimi elde edilebilir. Burada iki önemli noktaya dikkat edilmelidir. Birincisi, her bir segment için elde edilen çıkış momenti, kayk1 açıları nedeniyle birbirlerine göre faz kayması olacak şekilde oluşacaktır. İkincisi de bütün segmentler ortak stator yapısı ve faz akımları kullandıkları için segmentler arasındaki kayk1 açısına bağlı olarak değişen kontrol açısının göz önünde bulundurulması gerekliliğidir. Bu iki hususun da göz önünde bulundurulduğu, kaykılı SM motorlar için çıkış momenti Denklem (6.5)' deki gibi ifade edilebilir.

$$T_{\text{sk}} = \frac{1}{v_{\text{sk}}} \int_{-v_{\text{sk}}/2}^{v_{\text{sk}}/2} T(\beta=B_0+\theta, \theta_0=-\theta) d\theta \quad (6.5)$$

Burada T_{sk} ve β_0 sırasıyla nihai moment ve bütün yapı için ortak akım faz açısıdır. $T(\beta=B_0)$ ise akım faz açısı β ve moment çıkışı faz kayması θ_0 olan tek bir segmentin çıkış momentini ifade etmektedir.

Kaykılı motor denklemlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için 6 kutuplu, toplam 20 mekanik (60 elektriksel) derece kayk1ya sahip, 2 segmentli bir yapı için denklemler oluşturulmuştur. Segment sayısı 2 ve toplam kayk1 açısı 60 derece olduğu için segmentler arasındaki açı değerinin 30 derece olması gerekmektedir. Bu açı farkı her iki segmentten de maksimum moment alınabilmesi için ikiye ayrılmış ve segmentsiz yapı açısına göre 15' er derece artı ve eksi yönde paylaştırılmıştır. T_1 ve T_2 iki farklı segmentten elde edilen çıkış momentlerini göstermektedir ve sırasıyla Denklem (6.6)

ve (6.7) eşitliklerinde gösterilmiştir. Bu durumda kaykılı motora ait çıkış momentini Denklem (6.8)' deki eşitlikle ifade edilmektedir.

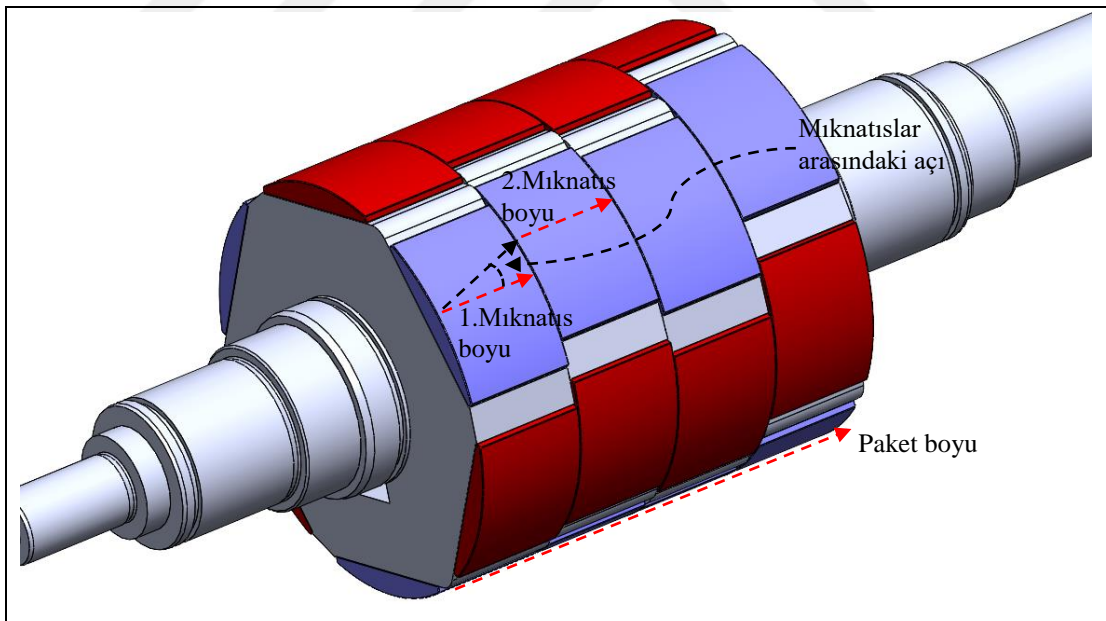
$$T_1=T(\beta=B_0-15^\circ,\theta_0=-15^\circ) \quad (6.6)$$

$$T_2=T(\beta=B_0+15^\circ,\theta_0=+15^\circ) \quad (6.7)$$

$$T_{sk}=(T_1+T_2)/2 \quad (6.8)$$

6.2. SMSM' larda Yüksek Moment Kalitesi İçin Önerilen Yeni Tasarımlar

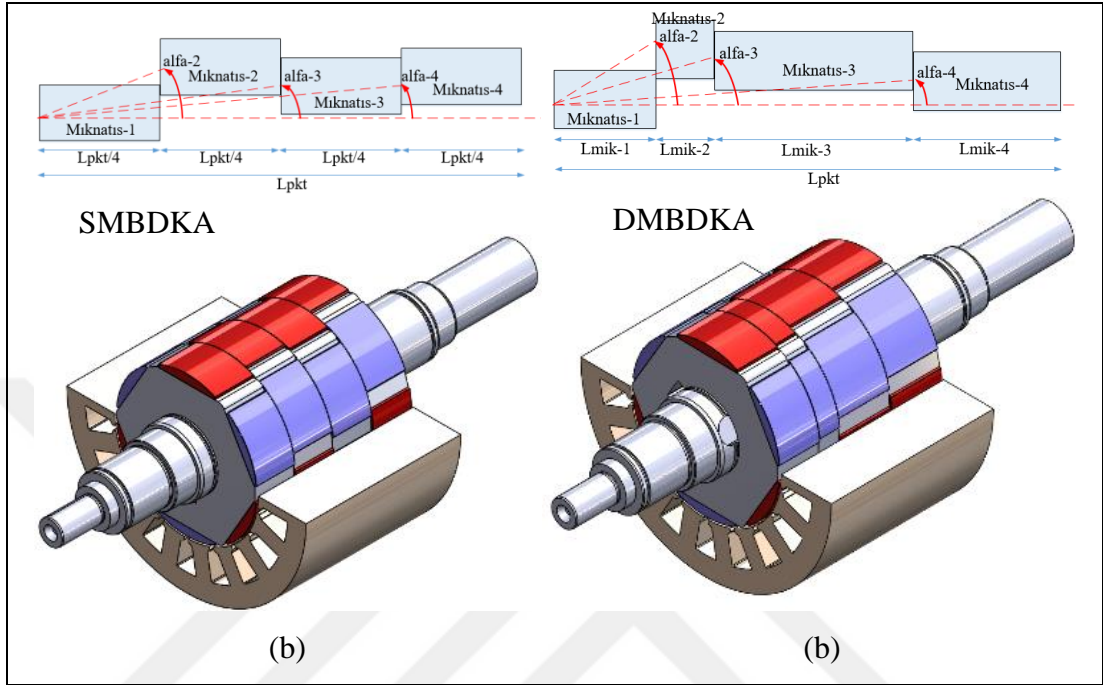
Geleneksel segmentli yapıda uygulanan eşit mıknatıs boyları ve mıknatıslar arasındaki eşit açıdan farklı olarak önerilen yöntemde segmentler arasındaki açı ve/veya segment boyları farklı olabilmektedir. Böylelikle daha düşük vurutu momenti ve daha iyi moment kalitesi elde etmek mümkün olabilmektedir. Yöntemin daha doğru anlaşılabilmesi için rotor yapısında yer alan mıknatıs boyları ve mıknatıslar arasındaki açıların tanımlanması Şekil 6.2' de verilmiştir.



Şekil 6.2. Rotor üzerinde yer alan mıknatıs boyları ve mıknatıslar arasındaki açı

Önerilen yeni yöntem temel olarak 2B SEA sonuçlarını girdi olarak kullanıp, segment boyu ve segmentler arasındaki açıyı optimize ederek daha düşük seviyede vurutu momenti veya daha az çıkış momenti dalgalanması elde etmeyi sağlamaktadır. Yöntem iki farklı şekilde uygulanabilmektedir. Bunlardan ilki mıknatıs boylarının

sabit alınarak, segmentler arasındaki kaykđ açısının değiştirildiği yöntem (SMBDKA), ikincisi ise hem segment boylarının hem de kaykđ açısının değiştirildiği (DMBDKA) yöntemdir (şekil 6.3).



şekil 6.3. Önerilen yeni rotor tasarımları, (a) sabit segment boyu ve değişken kaykđ açısından oluşan SMBDKA tasarımı ve (b) değişken segment boyu ve değişken kaykđ açısından oluşan DMBDKA tasarımı

Tablo 6.1. Farklı kaykđ yöntemlerinin karşılaştırılması

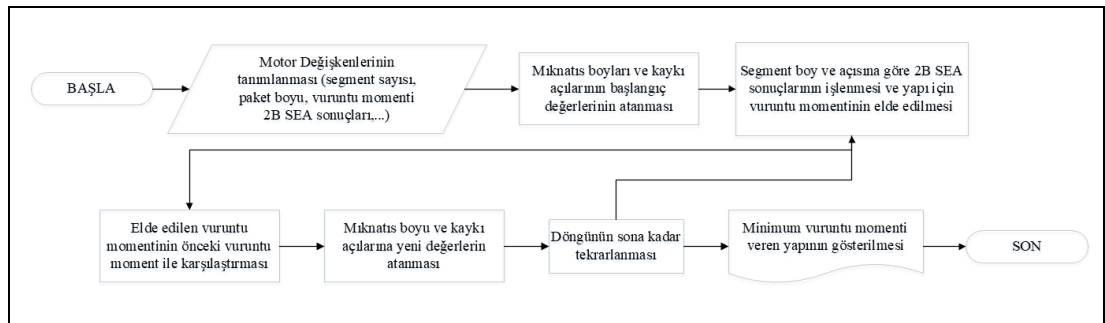
	Tasarım zorluğu	Mıknatis Maliyeti	Üretim maliyeti ve üretim zorluğu	Moment Kalitesi
Geleneksel kaykđ	Yüksek	Çok Yüksek	Yüksek	Çok Yüksek
Geleneksel segmentli kaykđ	Düşük	Düşük	Düşük	Orta
Önerilen SMBDKA	Orta	Düşük	Düşük	Orta
Önerilen DMBDKA	Yüksek	Orta	Orta	Yüksek

Önerilen yöntemlerle ideal kaykđ ve geleneksel segmentli kaykđın karşılaştırması Tablo 6.1' de verilmiştir. Geleneksel kaykđdan çok yüksek moment kalitesi elde edilebilmesine karşın, tasarımı ve üretimi zor, maliyeti ise çok fazladır. Geleneksel segmentli kaykıda ise moment kalitesi ortalama seviyelerdedir. Bununla birlikte tasarımı ve üretimi kolay, maliyeti ise düşüktür. Önerilen yöntemlerden SMBDKA' da moment kalitesi orta seviyelerde, tasarımı geleneksel segmentli yapıya göre biraz

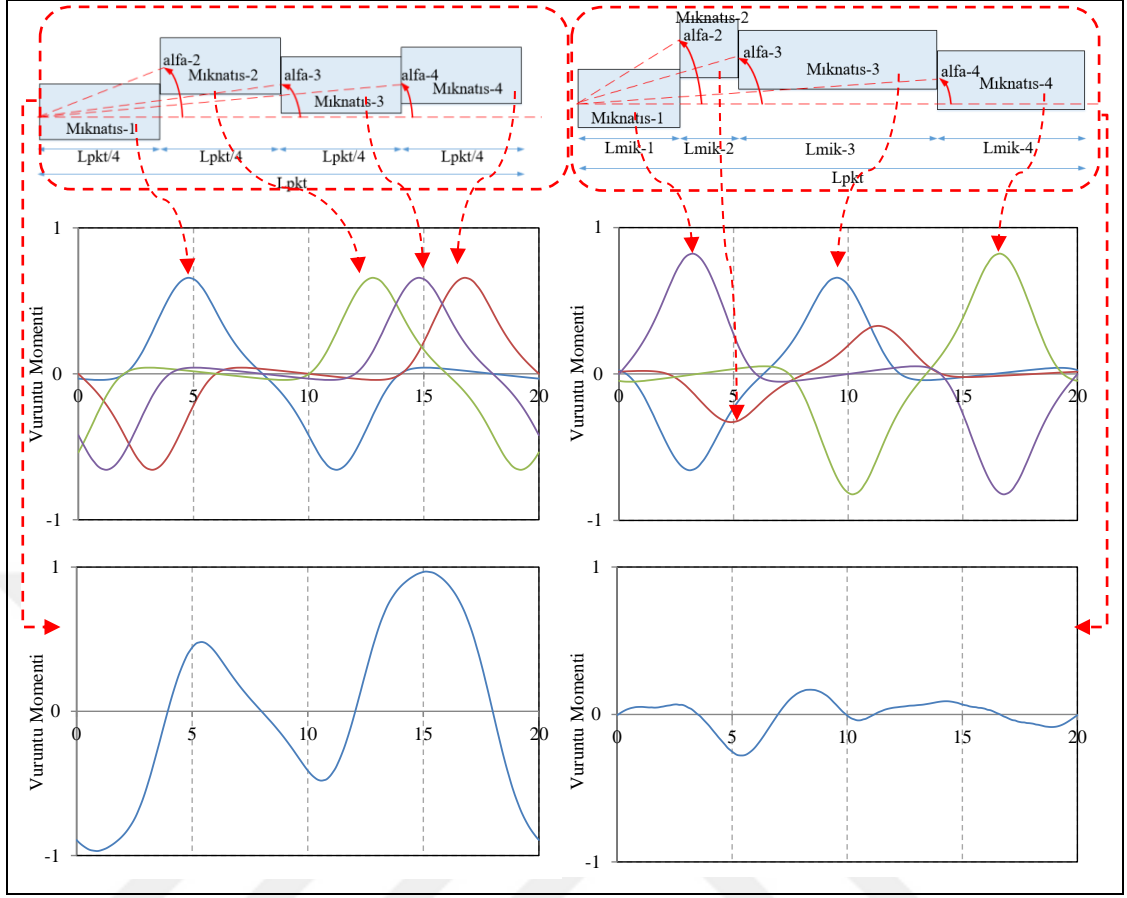
daha zor ve maliyeti de düşüktür. Önerilen DMBDKA' da ise moment kalitesi yüksektir. Tasarımı zor olan bu yöntemin üretim maliyeti ise orta seviyelerdedir. Önerilen her iki yöntemde de ideal kaykığa göre daha az üretim maliyeti ile geleneksel segmentli kaykık yöntemine göre daha iyi sonuçlar elde etmek mümkündür.

6.3. Yarı SEA Tabanlı Optimizasyon Algoritması

Optimum segment boyu ve kaykık açılarının bulunabilmesi için optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 6.4' de verilmiştir. Algoritmada rotor segment boyu ve kaykık açısı değişken olarak tanımlanmış ve en düşük vuruş momenti ve/veya moment dalgalanması elde edilmeye çalışılmıştır. Böylelikle moment kalitesinin artırılması hedeflenmiştir. Önerilen yöntem Brute Force Algoritma' sını tabanlıdır. Temel olarak 2B SEA sonuçları algoritmanın girdisini oluşturmaktadır. Toplam paket boyu ve segment sayısı kullanılarak segment boylarının maksimum ve minimum değerleri, oluk/kutup kombinasyonuna kullanılarak da kaykık açısı tanımlanmaktadır. Girdi olarak kullanılan 2B SEA verisi her bir segment için segment boyuna göre oranlanıp, kaykık miktarına göre zaman ekseninde ötelenerek yeni durum için ilgili segment kaynaklı moment verisi elde edilmektedir. Daha sonra segmentler için elde edilen veriler süperpozisyon teoremine göre toplanmakta ve nihai rotor tasarımı için yeni vuruş momenti verisi elde edilmektedir. Geliştirilen yöntemin şematik gösterimi Şekil 6.5' de verilmiştir. Segmentsiz ve kaykısız standart rotor yapısı için 2B SEA vuruş momenti sonuçları kullanılarak her bir segment için vuruş momenti bileşeni ayrı ayrı hesaplanmış ve çizdirilmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar toplanmış ve ilgili tasarım için toplam vuruş momenti değeri ve değişimi elde edilmiştir.



Şekil 6.4. Geliştirilen optimizasyon algoritması akış diyagramı



Şekil 6.5. Geliştirilen kod ile vuruğu momenti hesaplama yöntemi şematik gösterimi

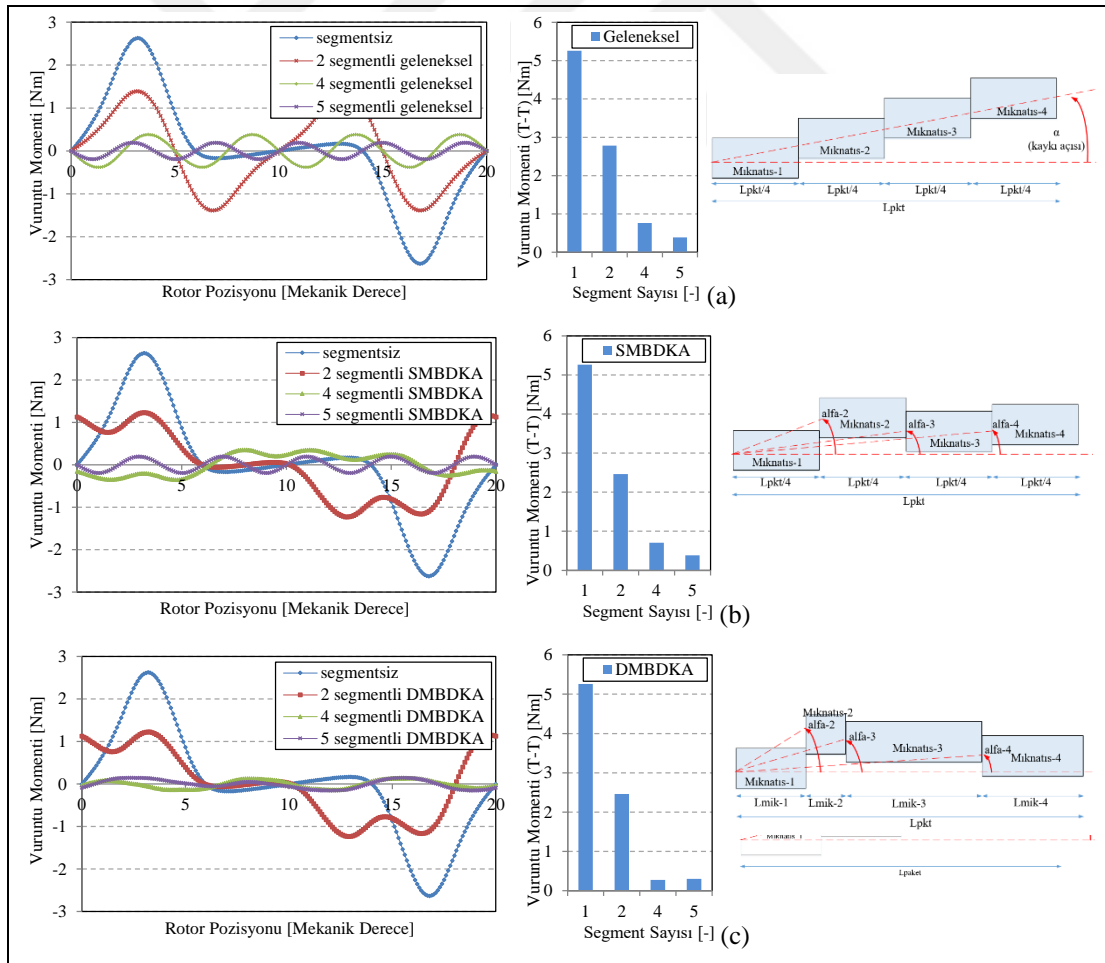
6.4. Yarı SEA Tabanlı Algoritma ile Vuruğu Momenti ve Çıkış Momenti Minimasyonu

Yarı SEA tabanlı algoritmanın uygulaması için yüzeyden mıknatıslı takım tezgahı motoru referans alınmıştır. Referans motora ait kriterler Tablo 6.2' de paylaşılmıştır.

Tablo 6.2. Referans YM motor tasarım kriterleri

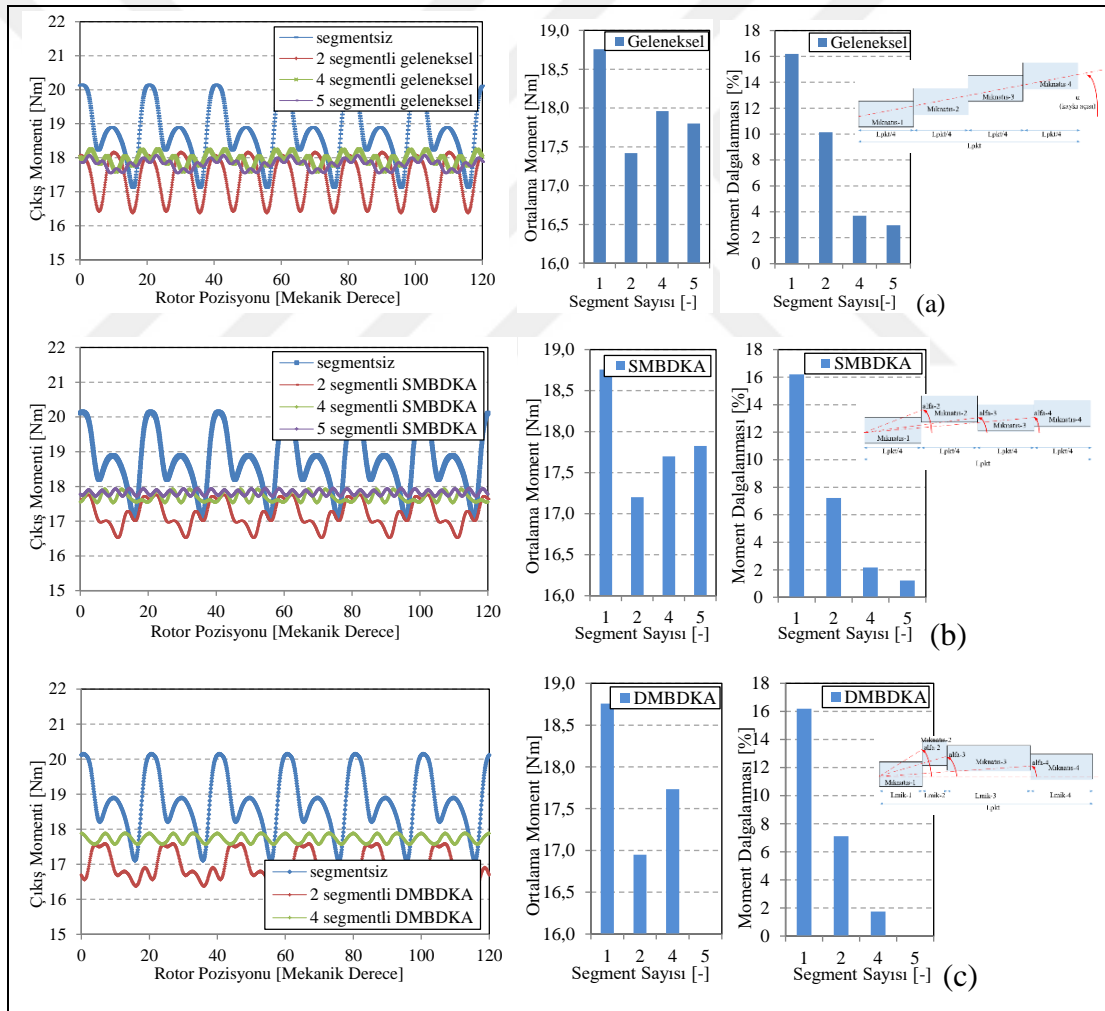
Güç	7,5 kW
Anma Hızı	4.000 rpm
Anma Momenti	18 Nm
Anma Akımı	19 Amax
DC Bara Gerilimi	530 V
Oluk Sayısı	18
Kutup Sayısı	6
Faz Sayısı	3

Referans motorun segmentsiz olması durumu için 2B SEA' lar yapılarak vuru­ntu momentini ve çıkış momentini elde edilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak farklı segment sayıları için optimizasyon algoritması çalıştırılmıştır. Önce SMBDKA için çalışma yapılmış, ardından DMBDKA için tekrarlanmıştır. Farklı segment sayıları için geleneksel standart kaykık, SMBDKA ve DMBDKA durumlarında elde edilen vuru­ntu momentini değişimleri Şekil 6.6' de özetlenmiştir. Sadece kaykık açısının değiştirildiği, segment boylarının sabit alındığı SMBDKA durumunda ve referans motorda, 0,39Nm tepeden tepeye vuru­ntu momentini değeri ile 5 segmentli yapının minimum vuru­ntu momentini verdiği görülmüştür. Hem kaykık açısının hem de segment boylarının değiştirildiği DMBDKA durumunda ise minimum vuru­ntu momentini değeri ile 4 segmentten elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuç optimizasyonun doğru yapılması durumunda geleneksel segmentli yapıya göre daha düşük vuru­ntu momentini elde edilebileceğini göstermektedir.



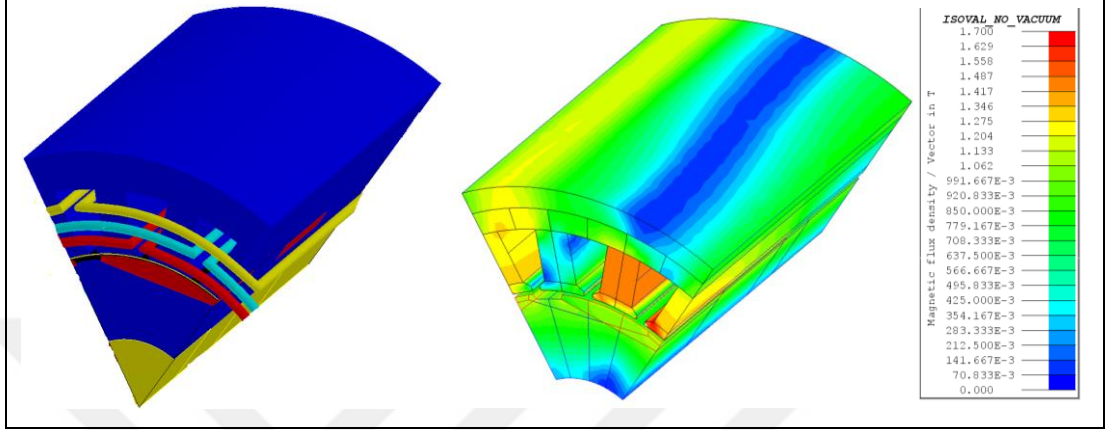
Şekil 6.6. Farklı segment sayılarında vuru­ntu momentini değışimleri ve tepeden tepeye değeri­lerinin karşılaştırılması (a) geleneksel kaykık, (b) SMBDKA ve (c) DMBDKA

Vuruntu momenti için yapılan çalışma çıkış momenti için tekrarlanmış ve daha iyi bir moment kalitesi elde edilmeye çalışılmıştır. Sonuçlar Şekil 6.7’ de özetlenmiştir. Şekilden görüldüğü üzere SMBDKA için minimum moment dalgalanması 4 ve 5 segmentli yapılardan elde edilmiştir. SMBDKA’ da 4 segmentli yapı için moment dalgalanması değeri %2,17 olarak elde edilmiştir ve bu değer de %3,69 moment dalgalanmasına sahip geleneksel segmentli yapıdan elde edilen sonuçtan daha iyidir. Diğer bir optimizasyon DMBDKA için tekrarlanmış ve en iyi sonuç 4 segmentli yapıdan %1,74 moment dalgalanması şeklinde elde edilmiştir. Sonuçlar optimizasyonun doğru yapılması durumunda geleneksel kaykılı yöntemle göre daha iyi moment dalgalanması elde edilebileceğini göstermektedir.

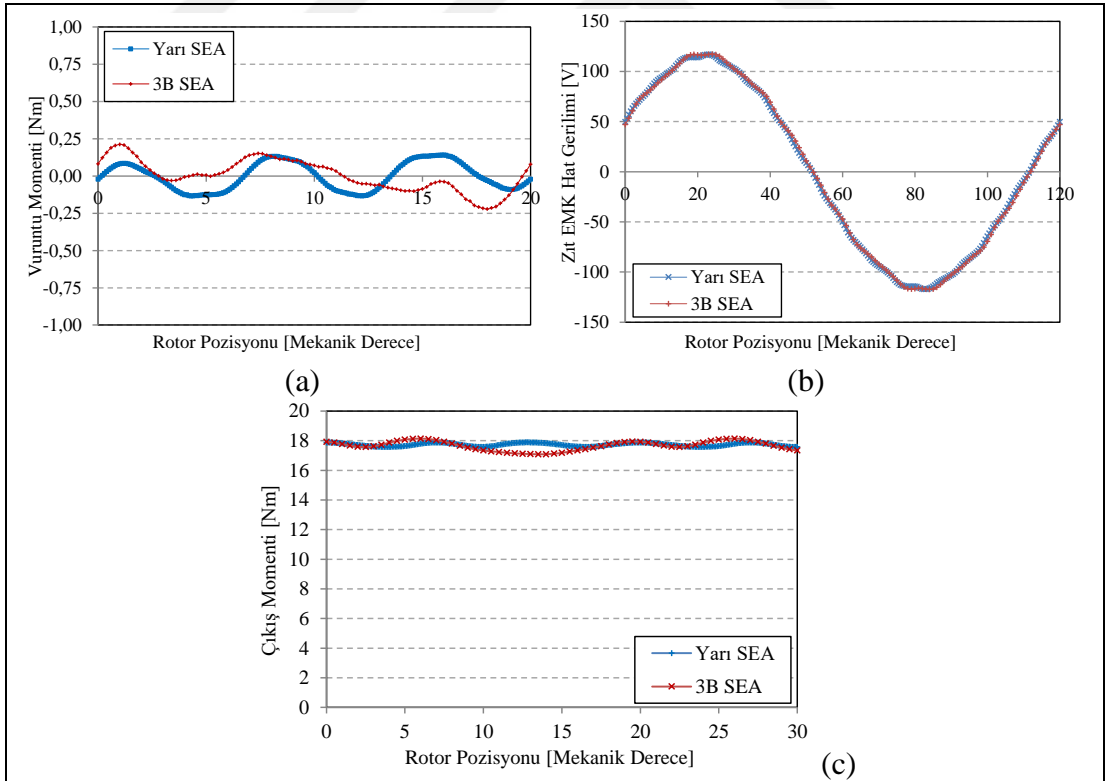


Şekil 6.7. Farklı segment sayılarında çıkış momenti değişimleri, ortalama moment ve moment dalgalanması karşılaştırmaları (a) geleneksel kaykılı, (b) SMBDKA ve (c) DMBDKA

Önerilen yöntemin doğruluğunun görülmesi amacıyla alternatif tasarımlardan 4 segmentli, DMBDKA yapısının önce 3B SEA' ları yapıp daha sonra prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Önerilen yapının 3B SEA modeli ve yüksüz durum akı yoğunluğu Şekil 6.8' da gösterilmiştir.



Şekil 6.8. DMBDKA 4 segmentli yapı 3B SEA modeli ve yüksüz durum akı yoğunluğu



Şekil 6.9. DMBDKA, 4 segmentli yapıya ait 3B analiz sonuçları ile önerilen yarı SEA tabanlı yöntemin karşılaştırılması (a) vuru mu momenti, (b) back EMF ve (c) çıkış momenti

Modele ait vuruuntu momenti, zıt EMK ve çıkış momenti analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar önerilen yöntemde elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 6.9). Şekilden görüldüğü üzere sonuçlar uyum içerisindedir. Sonuçlar arasındaki hata miktarı %3' ün altındadır.

6.5. DMBDKA Yapısı Prototip Üretimi ve Deneysel Doğrulaması

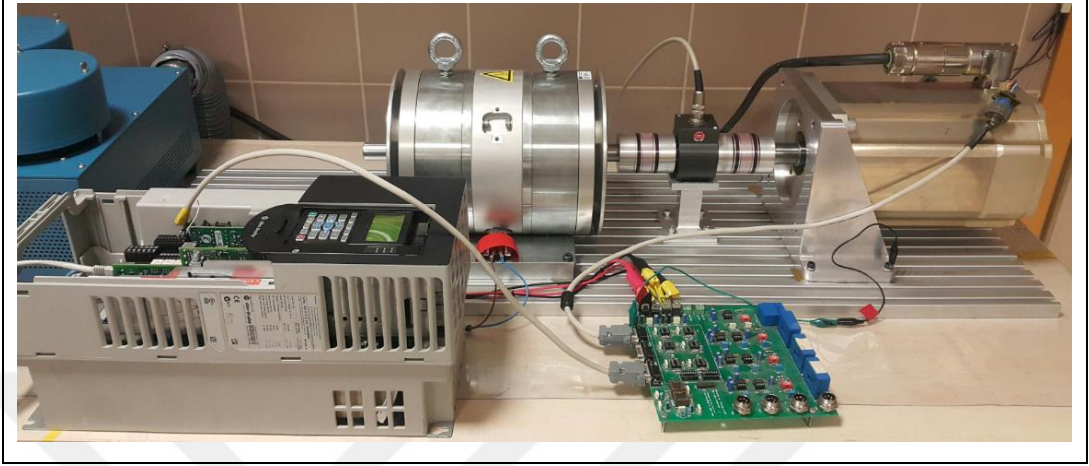
Optimum performansın alındığı değerlendirilen 4 segmentli DMBDKA yapısı için prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Laminasyon örneği, önerilen rotor yapısı ve nihai prototip görüntüleri Şekil 6.10' da verilmiştir. Prototip motora ait yüksüz ve yüklü durum testleri Şekil 6.11' de gösterilen test sistemi ile yapılmıştır.



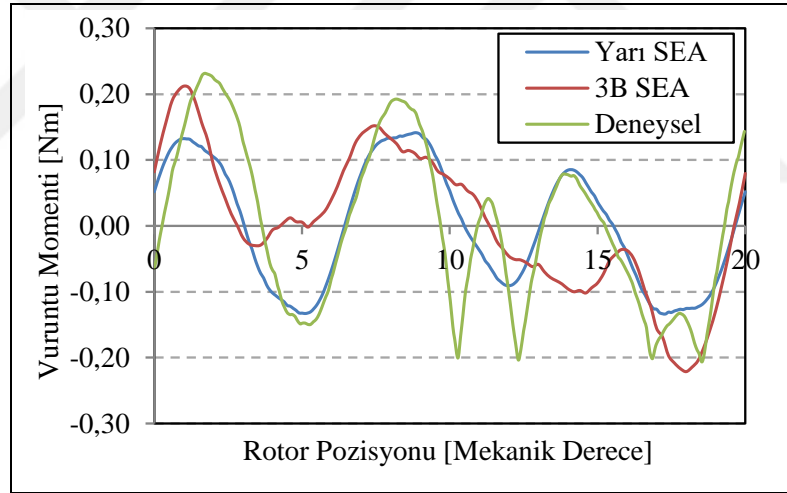
Şekil 6.10. DMBDKA, 4 segmentli yapıya ait prototip üretim görüntüleri (a) laminasyon yapısı, (b) mıknatısları yapıştırılmış rotor nüveleri ve (c) nihai prototip

Vuruuntu momentinin elde edilebilmesi için sistem 1rpm hız ile çevrilmiş ve moment verisi kayıt edilmiştir. Vuruuntu momenti tepeden tepeye değeri 0,42Nm olarak ölçülmüştür. Vuruuntu momenti test sonucu ile önerilen yöntemde elde edilen sonucun

karşılaştırmaları Şekil 6.12’ de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere sonuçlar uyum içerisindedir. Oluşan küçük farklılıkların mekanik hatalardan ve torkmetrenin çözünürlüğünden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.11. DMBDKA yapıya ait prototip motor testlerinin yapıldığı motor test sistemi

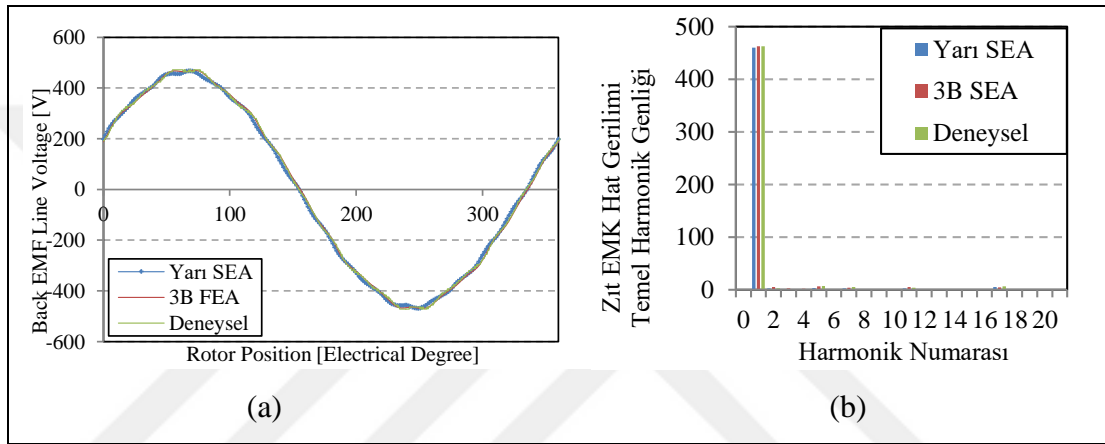


Şekil 6.12. Vuruntu momenti için önerilen yarı SEA tabanlı yöntem, 3B SEA ve test sonuçlarının karşılaştırılması (@1rpm)

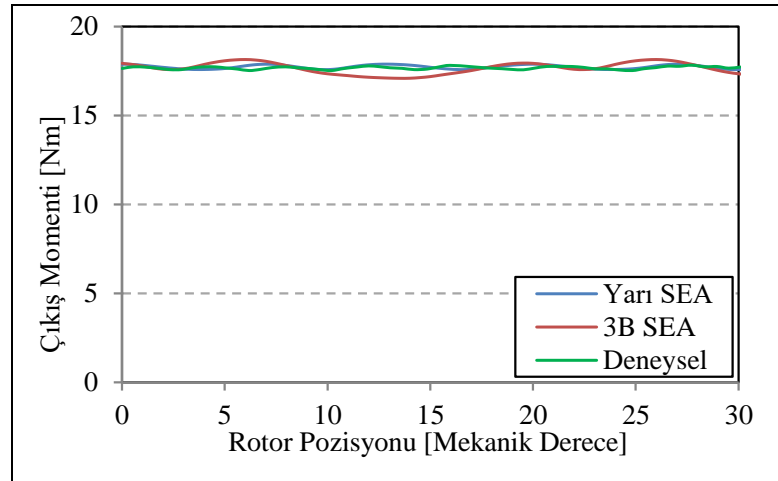
Prototip motor için yapılan diğer bir test de zıt EMK testidir. 1.000rpm rotor hızı için zıt EMK hat dalga değişimine bakılmış ve sonuçlar hem önerilen yöntem sonucu ile hem de 3B SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.13). Sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür ve %1,8’ lik bir hata ile örtüşme sağlanmıştır.

Son olarak prototip motora 19Amax akım değeri uygulanarak yüklü durum testi yapılmıştır. Test ve önerilen yöntemden elde edilen sonuçların karşılaştırmaları Şekil

6.14’ de verilmiştir. Sonuçlar arasında %0.4 hata ile örtüşme olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmanın özeti Tablo 6.3 ve Şekil 6.15’ de verilmiştir. Tablo ve şekilden görüleceği üzere önerilen yarı SEA tabanlı yöntem sayesinde geleneksel segmentli kaykuya göre %40 daha düşük vuruğu momenti elde etmek mümkündür. Ayrıca vuruğu momentinin düşmesi sayesinde moment dalgalanmasında da %47’ lik bir düşüş meydana gelmiştir. Bu sonuçlar da önerilen yarı SEA tabanlı yöntem sayesinde geleneksel segmentli yapılara göre daha düşük seviyede vuruğu momenti ve moment dalgalanması elde edilebileceğini göstermektedir.



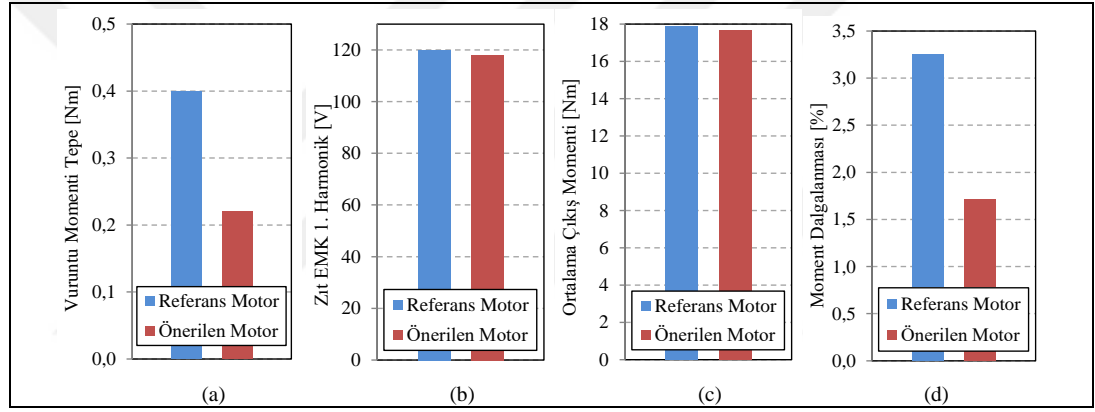
Şekil 6.13. Önerilen yarı SEA tabanlı yöntem, 3B SEA ve test sonuçlarının karşılaştırılması (a) zıt EMK hat dalga değışimi (b) FFT analizi (@1.000rpm)



Şekil 6.14. Motor çıkış momentini test sonuçları ile önerilen yarı SEA tabanlı yöntem ve 3B SEA sonuçlarının karşılaştırılması (@19Amax)

Tablo 6.3. Geleneksel kaykılı yöntem ile önerilen yöntemin karşılaştırılması

	Geleneksel Kaykılı			Önerilen DMBDKA Yöntemi		
	2B SEA	3B SEA	Test	Yarı SEA	3B SEA	Test
Back EMF Temel harmonik	115,8	115,9	120	115,1	115,6	115,7
Ortalama Moment [Nm]	17,96	17,5	17,86	17,73	17,6	17,67
Vuruntu Momenti [%]	2,1	2,5	2,2	0,8	1,2	1,3
Moment Dalgalanması [%]	3,68	6,4	3,25	1,74	6,0	1,71
Moment Yoğunluğu [Nm/Arms]	0,67	0,65	0,67	0,66	0,66	0,66



Şekil 6.15. Referans YM motor ve önerilen DMBDKA yapının karşılaştırması (a) vuruntu momentini tepe değeri, (b) zıt EMK temel harmoniğin tepe değeri, (c) ortalama moment ve (d) moment dalgalanması

6.6. Özet

Bu bölümde SM motorlar için moment denklemleri verilerek, SMSM' ler için iki yeni rotor tasarımı önerilmiştir. Geliştirilen yeni bir optimizasyon algoritması hakkında bilgi verilmiştir. Geleneksel segmentli kaykılı yapıya göre daha iyi moment kalitesinin elde edilmesini sağlayacak yöntemin çalışma prensibi verilerek, YM takım tezgahı motoru üzerinde uygulaması yapılmıştır. Önerilen yöntemle elde edilen sonuçlar için önce 3B SEA analizleri yapılarak sonuçlardan emin olunmuş, ardından ilgili yapı için prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Test sistemi kullanılarak prototip motora ait testler yapılmış ve önerilen yöntemin test sonuçları analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Ayrıca önerilen

tasarımların geleneksel yaklaşımlara göre karşılaştırmaları verilerek avantaj ve dezavantajları irdelenmiştir.



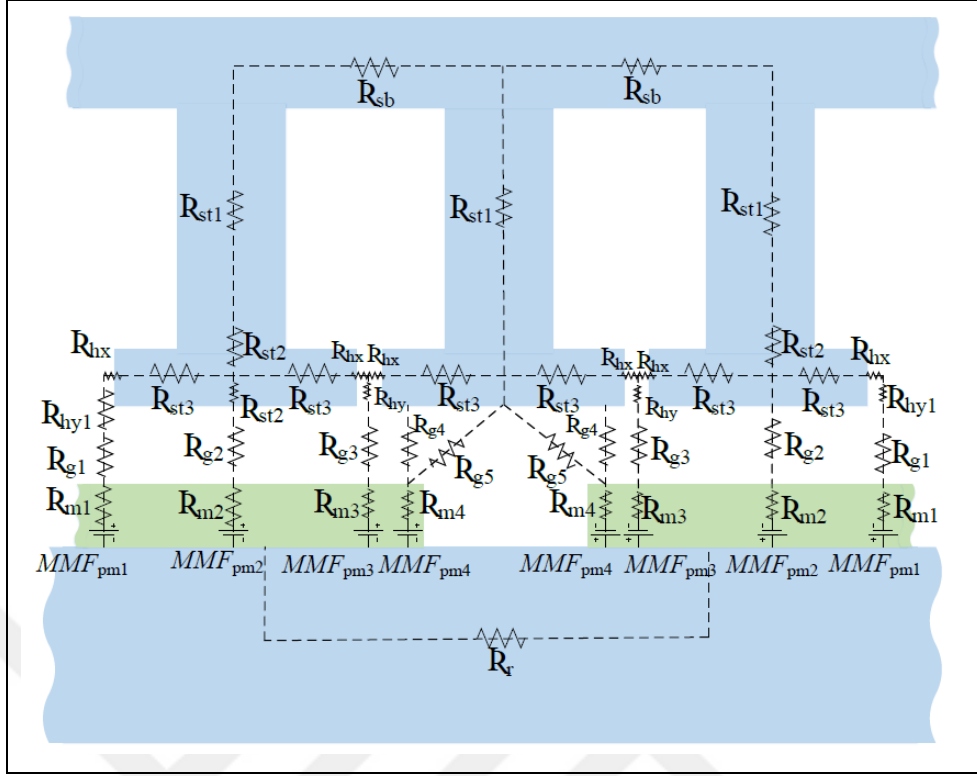
7. TAKIM TEZGAHI MOTORUNA HİBRİT YAPININ UYGULANMASI

Bu bölümde, daha önce detaylı SEA sonuçları verilen referans YM ve DM motorların manyetik modelleri oluşturulmuş, zıt EMK ve çıkış momentleri elde edilmiştir. Elde edilen çıkış momentleri verileri, SEA sonuçları ile karşılaştırılmış ve doğruluğu irdelenmiştir. YM ve DM motorlar için elde edilen çıkış momentleri verileri kullanılarak, minimum çıkış momentleri dalgalanmasını veren SMHSM için yarı SEA tabanlı optimizasyon algoritması çalıştırılmıştır. 2 adet YM ve 2 adet de DM rotor segmentinden oluşan rotor yapısı için minimum çıkış momentleri dalgalanması veren optimum segment boyu ve kaykısı açısı bilgileri elde edilmiştir. Elde edilen boyutlar için SMHSM' a ait manyetik modelleme yapılmış ve yapıya ait zıt EMK ve çıkış momentleri dalga değişimleri elde edilmiştir. SMHSM için manyetik modelleme dışında 3B SEA modellemesi de yapılmış ve detaylı SEA gerçekleştirilmiştir. Manyetik modelleme ve 3B SEA sonuçları karşılaştırılmış ve doğruluğu irdelenmiştir.

Analizleri tamamlanan SMHSM için 3B mekanik modelleme gerçekleştirilerek üretim dokümanları oluşturulmuştur. SMHSM prototipi üretilmiş ve daha önce oluşturulan motor test sistemine montajı yapılmıştır. Prototipe ait testler gerçekleştirilerek simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçların doğruluğu irdelenmiştir.

7.1. YM Takım TezgaHI Motoru Relüktans Modellemesi

Referans YM motor için oluşturulan relüktans tabanlı manyetik eşdeğer devre Şekil 7.1' de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere hava aralığındaki relüktans sayısı diğer kısımlara göre fazla tutulmuştur. Oluşturulan devre için çevre akımları yöntemi kullanılarak Denklem (7.1)-(7.11)' deki relüktans denklemleri elde edilmiştir.



Şekil 7.1. YM yapı relüktans tabanlı manyetik eşdeğer devresi

$$\emptyset_1 A_{1,1} - \emptyset_2 A_{1,2} = U_{1,1} \quad (7.1)$$

$$\emptyset_2 A_{2,2} - \emptyset_3 A_{2,3} - \emptyset_5 A_{2,5} - \emptyset_1 A_{2,1} = U_{2,1} \quad (7.2)$$

$$\emptyset_3 A_{3,3} - \emptyset_2 A_{3,2} - \emptyset_5 A_{3,5} - \emptyset_4 A_{3,4} - \emptyset_6 A_{3,6} - \emptyset_8 A_{3,8} = U_{3,1} \quad (7.3)$$

$$\emptyset_4 A_{4,4} - \emptyset_3 A_{4,3} - \emptyset_6 A_{4,6} = 0 \quad (7.4)$$

$$\emptyset_5 A_{5,5} - \emptyset_2 A_{5,2} - \emptyset_3 A_{5,3} - \emptyset_{11} A_{5,11} = 0 \quad (7.5)$$

$$\emptyset_6 A_{6,6} - \emptyset_4 A_{6,4} - \emptyset_7 A_{6,7} - \emptyset_8 A_{6,8} - \emptyset_3 A_{6,3} = U_{6,1} \quad (7.6)$$

$$\emptyset_7 A_{7,7} - \emptyset_6 A_{7,6} - \emptyset_8 A_{7,8} = 0 \quad (7.7)$$

$$\emptyset_8 A_{8,8} - \emptyset_6 A_{8,6} - \emptyset_7 A_{8,7} - \emptyset_3 A_{8,3} - \emptyset_{11} A_{8,11} - \emptyset_9 A_{8,9} = U_{8,1} \quad (7.8)$$

$$\emptyset_9 A_{9,9} - \emptyset_8 A_{9,8} - \emptyset_{11} A_{9,11} - \emptyset_{10} A_{9,10} = U_{9,1} \quad (7.9)$$

$$\emptyset_{10} A_{10,10} - \emptyset_9 A_{10,9} = U_{10,1} \quad (7.10)$$

$$\emptyset_{11}A_{11,11}-\emptyset_8A_{11,8}-\emptyset_9A_{11,9}-\emptyset_5A_{11,5}=0 \quad (7.11)$$

Denklemden yer alan matris katsayılarının relüktanslar cinsinden ifadeleri Denklem (7.12) ile (7.61) arasında verilmiştir.

$$A_{1,1}=R_{m1}+R_{g1}+R_{h_{y1}}+R_{h_x}+R_{s_{t3}}+R_{s_{t2}}+R_{g_2}+R_{m_2} \quad (7.12)$$

$$A_{1,2}=R_{m_2}+R_{g_2}+R_{s_{t2}} \quad (7.13)$$

$$U_{1,1}=-\emptyset_{m1}R_{m1}+\emptyset_{m2}R_{m_2} \quad (7.14)$$

$$A_{2,2}=R_{m_2}+R_{g_2}+R_{s_{t2}}+R_{s_{t3}}+R_{h_x}+R_{h_y}+R_{g_3}+R_{m_3} \quad (7.15)$$

$$A_{2,3}=R_{m_3}+R_{g_3}+R_{h_y} \quad (7.16)$$

$$A_{2,5}=R_{h_x}+R_{s_{t3}} \quad (7.17)$$

$$A_{2,1}=R_{m_2}+R_{g_2}+R_{s_{t2}} \quad (7.18)$$

$$U_{2,1}=-\emptyset_{m2}R_{m_2}+\emptyset_{m3}R_{m_3} \quad (7.19)$$

$$A_{3,3}=R_{m_3}+R_{g_3}+R_{h_y}+R_{h_x}+R_{s_{t3}}+R_{s_{t2}}+R_{g_4}+R_{m_4} \quad (7.20)$$

$$A_{3,2}=R_{m_3}+R_{g_3}+R_{h_y} \quad (7.21)$$

$$A_{3,5}=R_{h_x}+R_{s_{t3}} \quad (7.22)$$

$$A_{3,4}=R_{g_4} \quad (7.23)$$

$$A_{3,6}=R_{m_4} \quad (7.24)$$

$$A_{3,8}=R_{s_{t2}} \quad (7.25)$$

$$U_{3,1}=-\emptyset_{m3}R_{m_3}+\emptyset_4R_{m_4} \quad (7.26)$$

$$A_{4,4}=R_{g_4}+R_{g_5} \quad (7.27)$$

$$A_{4,3}=R_{g_4} \quad (7.28)$$

$$A_{4,6}=Rg_5 \quad (7.29)$$

$$A_{5,5}=Rs_{t2}+Rs_{t1}+Rs_b+Rs_{t1}+Rs_{t3}+Rh_x+Rh_x+Rs_{t3} \quad (7.30)$$

$$A_{5,2}=Rs_{t3}+Rh_x \quad (7.31)$$

$$A_{5,3}=Rh_x+Rs_{t3} \quad (7.32)$$

$$A_{5,11}=Rs_{t1} \quad (7.33)$$

$$A_{6,6}=Rm_4+Rg_5+Rg_5+Rm_4+Rr \quad (7.34)$$

$$A_{6,4}=Rg_5 \quad (7.35)$$

$$A_{6,7}=Rg_5 \quad (7.36)$$

$$A_{6,8}=Rm_4 \quad (7.37)$$

$$A_{6,3}=Rm_4 \quad (7.38)$$

$$U_{6,3}=-\emptyset_4Rm_4-\emptyset_4Rm_4 \quad (7.39)$$

$$A_{7,7}=Rg_4+Rg_5 \quad (7.40)$$

$$A_{7,6}=Rg_5 \quad (7.41)$$

$$A_{7,8}=Rg_4 \quad (7.42)$$

$$A_{8,8}=Rm_4+Rg_4+Rs_{t2}+Rs_{t3}+Rh_x+Rh_y+Rg_3+Rm_3 \quad (7.43)$$

$$A_{8,6}=Rm_4 \quad (7.44)$$

$$A_{8,7}=Rg_4 \quad (7.45)$$

$$A_{8,3}=Rs_{t2} \quad (7.46)$$

$$A_{8,11}=Rs_{t3}+Rh_x \quad (7.47)$$

$$A_{8,9}=Rh_y+Rg_3+Rm_3 \quad (7.48)$$

$$U_{8,1} = -\phi_{m3} R_{m3} + \phi_4 R_{m4} \quad (7.49)$$

$$A_{9,9} = R_{m3} + R_{g3} + R_{h_y} + R_{h_x} + R_{s_{t3}} + R_{s_{t2}} + R_{g_2} + R_{m_2} \quad (7.50)$$

$$A_{9,8} = R_{m3} + R_{g_3} + R_{h_y} \quad (7.51)$$

$$A_{9,11} = R_{h_x} + R_{s_{t3}} \quad (7.52)$$

$$A_{9,10} = R_{m_2} + R_{g_2} + R_{s_{t2}} \quad (7.53)$$

$$U_{9,1} = -\phi_{m2} R_{m_2} + \phi_{m3} R_{m_3} \quad (7.54)$$

$$A_{10,10} = R_{m_2} + R_{g_2} + R_{s_{t2}} + R_{s_{t3}} + R_{h_x} + R_{h_{y1}} + R_{g_1} + R_{m_1} \quad (7.55)$$

$$A_{10,9} = R_{m_2} + R_{g_2} + R_{s_{t2}} \quad (7.56)$$

$$U_{10,1} = -\phi_{m1} R_{m_1} + \phi_{m2} R_{m_2} \quad (7.57)$$

$$A_{11,11} = R_{s_{t1}} + R_{s_b} + R_{s_{t1}} + R_{s_{t2}} + R_{s_{t3}} + R_{h_x} + R_{h_x} + R_{s_{t3}} \quad (7.58)$$

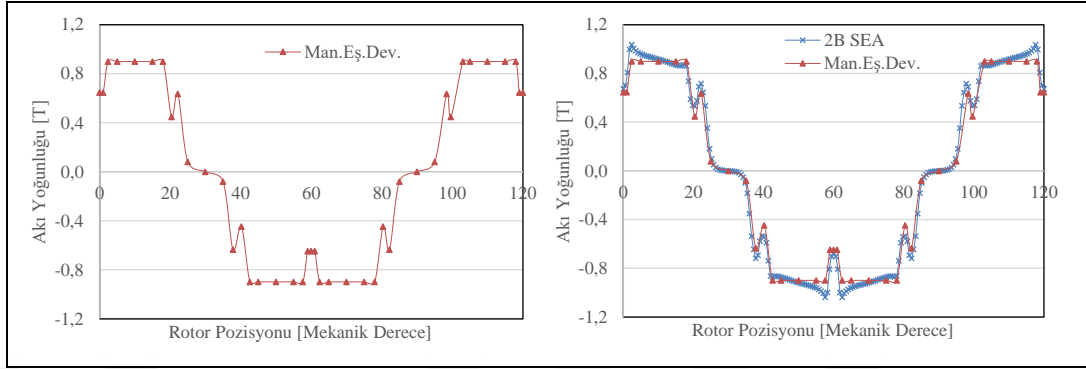
$$A_{11,8} = R_{s_{t3}} + R_{h_x} \quad (7.59)$$

$$A_{11,9} = R_{h_x} + R_{s_{t3}} \quad (7.60)$$

$$A_{11,5} = R_{s_{t1}} \quad (7.61)$$

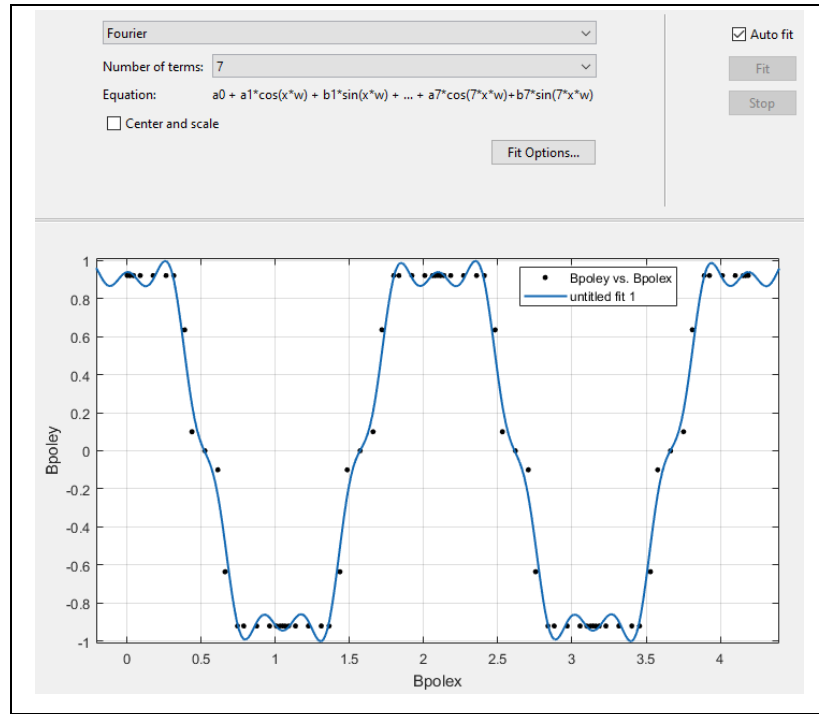
Relüktans denklemleri Denklem (7.62)' deki gibi matrisel forma getirilmiştir. Matris formdaki denklemlerin çözülmesi ile hava aralığındaki akı yoğunluğu değişimi elde edilmiş ve Şekil 7.2' de gösterilmiştir. Elde edilen akı yoğunluğu yine aynı şekilde 2B SEA sonuçları ile karşılaştırılmış ve hem dalga şeklinin hem de tepe değerlerinin uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Tepe değerlerinde oluşan küçük farklılığın, hava aralığında kullanılan relüktans sayısının yeterli sayıda olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tepe noktasındaki akı yoğunluğu seviyelerinin ortalaması 0.9T değeri ile birbirlerine çok yakın olduğu için buradaki farkın ihmal edilebilir seviyelerde olduğu değerlendirilmiştir.

$$\begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & \dots & A_{1,16} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & \dots & A_{2,11} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ A_{11,1} & A_{11,2} & \dots & A_{11,11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \emptyset_1 \\ \emptyset_2 \\ \vdots \\ \emptyset_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_{11} \end{bmatrix} \quad (7.62)$$



Şekil 7.2. YM yapı manyetik eşdeğer devresinden elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişimi ve 2B SEA ile karşılaştırması

Hava aralığı akı yoğunluğu için Matlab eğri uydurma aracı kullanılarak eğri uydurulmuş ve akı yoğunluğu fonksiyonu çıkarılmıştır (Şekil 7.3). Yüzeyden mıknatıslı motorun akı yoğunluğu eğri uydurma işleminde 7. dereceden fourier denklemini kullanılmıştır.



Şekil 7.3. YM yapı hava aralığı akı yoğunluğu için eğri uydurma işlemi

Oluşturulan fonksiyon Denklem (7.63)' de verilmiştir. Ayrıca fonksiyon katsayıları da Tablo 7.1' de verilmiştir. Fonksiyon sayesinde akı yoğunluğundan zıt EMK dalga değişimi elde edilmiştir. Elde edilen zıt EMK değişimi ve SEA sonuçları ile karşılaştırması Şekil 7.4' de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere sonuçlar uyum içerisindedir.

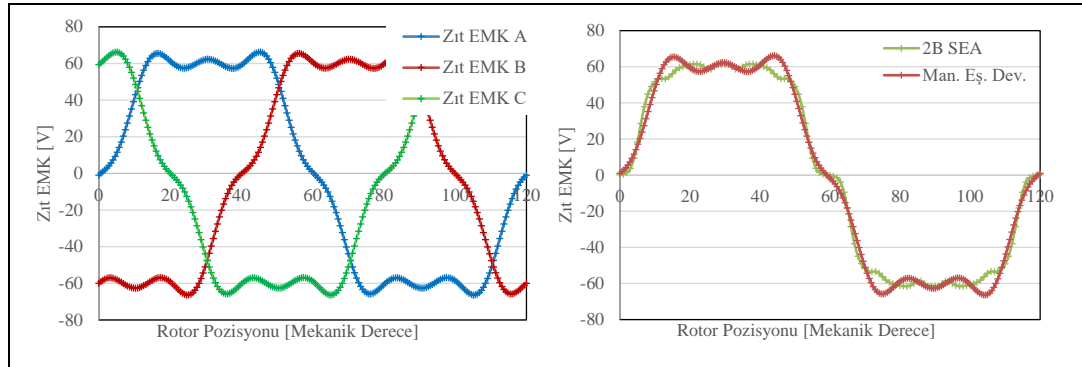
$$f(x)=a_0+a_1 \cos(xw)+b_1 \sin(xw)+a_2 \cos(2xw)+b_2 \sin(2xw)+a_3 \cos(3xw)+\dots$$

$$\dots b_3 \sin(3xw)+a_4 \cos(4xw)+b_4 \sin(4xw)+a_5 \cos(5xw)+b_5 \sin(5xw)+\dots$$

$$\dots a_6 \cos(6xw)+b_6 \sin(6xw)+a_7 \cos(7xw)+b_7 \sin(7xw) \quad (7.63)$$

Tablo 7.1. YM yapı hava aralığı akı yoğunluğu fonksiyon katsayıları

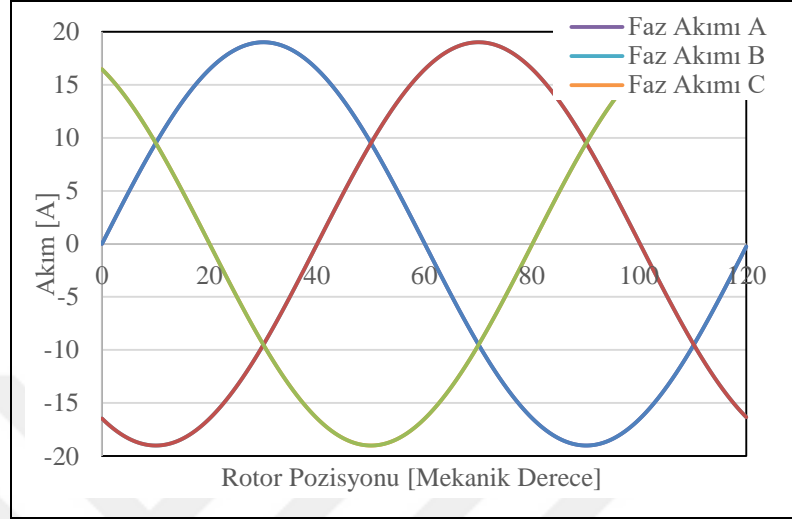
a0 = -0,003157	a1 = 1,072	b1 = 0,01224
a2 = 0,004416	b2 = 0,003839	a3 = -0,1618
b3 = -0,001994	a4 = 0,0001876	b4 = -0,004557
a5 = -0,06842	b5 = -0,008534	a6 = -0,004231
b6 = 0,002517	a7 = 0,09971	b7 = 0,008744
w = 3,002		



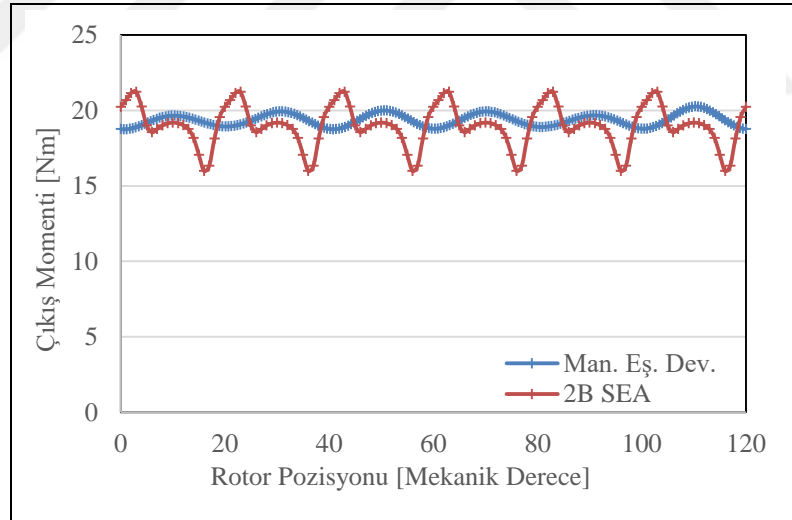
Şekil 7.4. YM yapının manyetik eşdeğer devreden zıt EMK elde edilmesi ve 2B SEA sonuçları ile karşılaştırması (@1.000rpm)

Elde edilen 3 faz zıt EMK ile 3 faz 19Amax akımlarla (Şekil 7.5) çarpılıp sonuçlar toplanmış ve elde edilen sonuç hıza bölünerek çıkış momenti (Şekil 7.6) elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar yine aynı şekilde SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Manyetik eşdeğer devreden 19,35Nm ortalama moment elde edilirken, SEA sonuçlarından 18,9Nm ortalama moment elde edilmiştir. Ortalama momentler

arasında %2,3' lük bir fark bulunmaktadır ve bu da kabul edilebilir hata limitleri dâhilindedir. Dalga şekillerinde oluşan farklılığın, eğri uydurmada oluşan veri kaybından ve modellemedeki kabullerden kaynaklandığı düşünülmektedir.



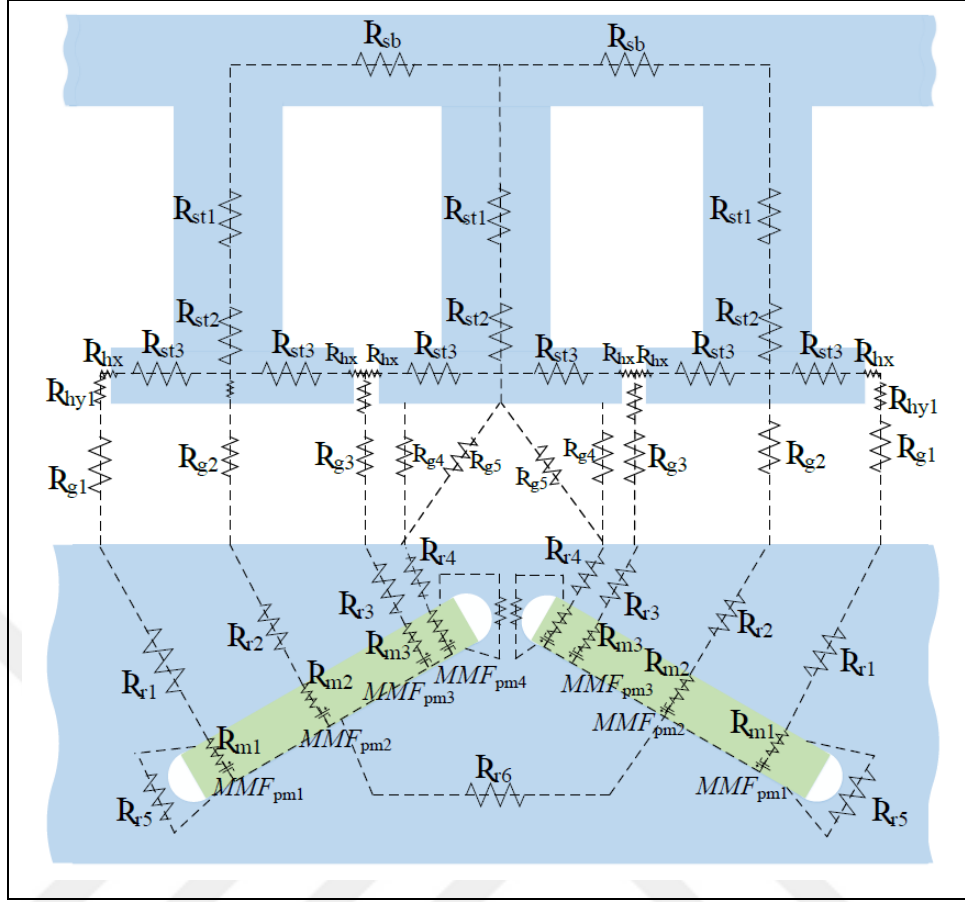
Şekil 7.5. YM yapıya uygulanan 3 faz dengeli akım dalga değişimleri (19Amax)



Şekil 7.6. YM yapı çıkış momenti değişimi ve 2B SEA sonucu ile karşılaştırması

7.2. DM Takım Tezgahı Motoru Relüktans Modellemesi

DM motorun manyetik eşdeğer devresi Şekil 7.7' de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere hava aralığındaki ve rotor tarafındaki relüktans sayısı fazla tutulmuştur. Oluşturulan devre için çevre akımları yöntemi kullanılarak Denklem (7.64)-(7.74)' deki relüktans denklemleri elde edilmiştir.



Şekil 7.7. DM yapı relüktans tabanlı manyetik eşdeğer devresi

$$\Phi_1 A_{1,1} - \Phi_2 A_{1,2} = 0 \quad (7.64)$$

$$\Phi_2 A_{2,2} - \Phi_1 A_{2,1} - \Phi_3 A_{2,3} - \Phi_5 A_{2,5} = 0 \quad (7.65)$$

$$\Phi_3 A_{3,3} - \Phi_2 A_{3,2} - \Phi_4 A_{3,4} - \Phi_8 A_{3,8} - \Phi_5 A_{3,5} = 0 \quad (7.66)$$

$$\Phi_4 A_{4,4} - \Phi_3 A_{4,3} - \Phi_6 A_{4,6} = U_{4,1} \quad (7.67)$$

$$\Phi_5 A_{5,5} - \Phi_2 A_{5,2} - \Phi_3 A_{5,3} - \Phi_{11} A_{5,11} = 0 \quad (7.68)$$

$$\Phi_6 A_{6,6} - \Phi_4 A_{6,4} - \Phi_7 A_{6,7} = U_{6,1} \quad (7.69)$$

$$\Phi_7 A_{7,7} - \Phi_6 A_{7,6} - \Phi_8 A_{7,8} = U_{7,1} \quad (7.70)$$

$$\Phi_8 A_{8,8} - \Phi_3 A_{8,3} - \Phi_7 A_{8,7} - \Phi_9 A_{8,9} - \Phi_{11} A_{9,11} = 0 \quad (7.71)$$

$$\Phi_9 A_{9,9} - \Phi_8 A_{9,8} - \Phi_{10} A_{9,10} - \Phi_{11} A_{9,11} = 0 \quad (7.72)$$

$$\emptyset_{10}A_{10,10}-\emptyset_9A_{10,9}=0 \quad (7.73)$$

$$\emptyset_{11}A_{11,11}-\emptyset_5A_{11,5}-\emptyset_8A_{11,8}-\emptyset_9A_{11,9}=0 \quad (7.74)$$

Denklemdede yer alan matris katsayılarının relüktanslar cinsinden ifadeleri Denklem (7.75) ile (7.116) arasında verilmiştir.

$$A_{1,1}=Rr_2+Rg_1+Rh_{y1}+Rh_x+Rs_{t3}+Rs_{t2}+Rg_2+Rr_2 \quad (7.75)$$

$$A_{1,2}=Rr_2+Rg_2+Rr_{t2} \quad (7.76)$$

$$A_{2,2}=Rr_2+Rg_2+Rs_{t2}+Rs_{t3}+Rh_x+Rh_{y2}+Rg_3+Rr_3 \quad (7.77)$$

$$A_{2,1}=Rs_{t2}+Rg_2+Rr_2 \quad (7.78)$$

$$A_{2,3}=Rr_3+Rg_3+Rh_{y2} \quad (7.79)$$

$$A_{2,5}=Rh_x+Rs_{t3} \quad (7.80)$$

$$A_{3,3}=Rr_3+Rg_3+Rh_{y2}+Rh_x+Rs_{t3}+Rs_{t2}+Rg_4+Rr_4 \quad (7.81)$$

$$A_{3,2}=Rh_{y2}+Rg_3+Rr_3 \quad (7.82)$$

$$A_{3,4}=Rr_4+Rg_4 \quad (7.83)$$

$$A_{3,8}=Rs_{t2} \quad (7.84)$$

$$A_{3,5}=Rh_x+Rs_{t3} \quad (7.85)$$

$$A_{4,4}=Rm_1+Rr_4+Rg_4+Rg_5+Rm_5 \quad (7.86)$$

$$A_{4,3}=Rr_4+Rg_4 \quad (7.87)$$

$$A_{4,6}=Rm_5+Rg_{51} \quad (7.88)$$

$$U_{4,1}=-\emptyset_{m1}Rm_1\emptyset_{m5}Rm_5 \quad (7.89)$$

$$A_{5,5}=Rs_{t2}+Rs_{t1}+Rs_b+Rs_{t1}+Rs_{t2}+Rs_{t3}+Rh_x+Rh_x+Rs_{t3} \quad (7.90)$$

$$A_{5,2}=Rh_x+Rs_{t3} \quad (7.91)$$

$$A_{5,3}=Rh_x+Rs_{t3} \quad (7.92)$$

$$A_{5,11}=Rs_{t2}+Rs_{t1} \quad (7.93)$$

$$A_{6,6}=Rm_5+Rg_5+Rg_5+Rm_5+Rr_6 \quad (7.94)$$

$$A_{6,4}=Rg_5+Rm_5 \quad (7.95)$$

$$A_{6,7}=Rm_5+Rg_5 \quad (7.96)$$

$$U_{6,1}=-\phi_{m5}Rm_5-\phi_{m5}Rm_5 \quad (7.97)$$

$$A_{7,7}=Rm_5+Rg_5+Rg_4+Rr_4+Rm_1 \quad (7.98)$$

$$A_{7,6}=Rg_5+Rm_5 \quad (7.99)$$

$$A_{7,8}=Rr_4+Rg_4 \quad (7.100)$$

$$U_{7,1}=Rr_4+Rg_4 \quad (7.101)$$

$$A_{8,8}=Rs_{t3}+Rh_x+Rh_{y2}+Rg_3+Rr_3+Rr_4+Rg_4+Rs_{t2} \quad (7.102)$$

$$A_{8,3}=Rs_{t2} \quad (7.103)$$

$$A_{8,7}=Rg_4+Rr_4 \quad (7.104)$$

$$A_{8,9}=Rr_3+Rg_3+Rh_{y2} \quad (7.105)$$

$$A_{8,11}=Rh_x+Rs_{t3} \quad (7.106)$$

$$A_{9,9}=Rr_3+Rg_3+Rh_{y2}+Rh_x+Rs_{t3}+Rs_{t2}+Rg_2+Rr_2 \quad (7.107)$$

$$A_{9,8}=Rr_3+Rg_3+Rh_{y2} \quad (7.108)$$

$$A_{9,10}=Rr_2+Rg_2+Rs_{t2} \quad (7.109)$$

$$A_{9,11}=Rs_{t3}+Rh_x \quad (7.110)$$

$$A_{10,10}=Rr_2+Rg_2+Rs_{t2}+Rs_{t3}+Rh_x+Rh_{y1}+Rg_1+Rr_1 \quad (7.111)$$

$$A_{10,9}=Rr_2+Rg_2+Rs_{t2} \quad (7.112)$$

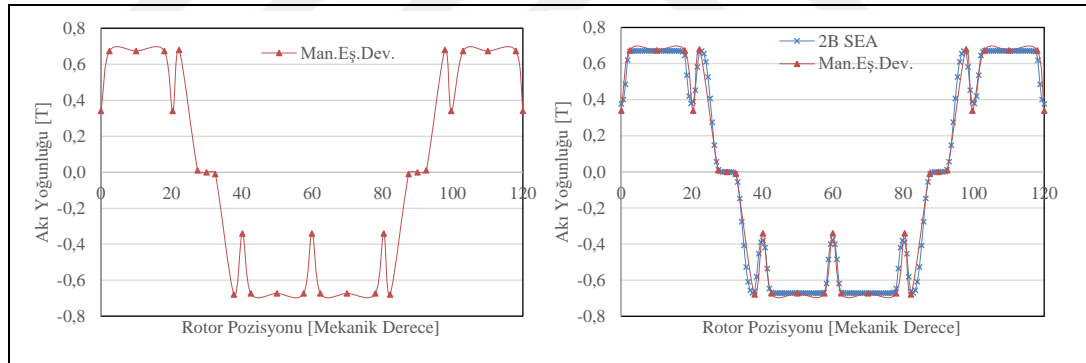
$$A_{11,11}=Rs_{t2}+Rs_{t1}+Rs_b+Rs_{t1}+Rs_{t2}+Rs_{t3}+Rh_x+Rh_x+Rs_{t3} \quad (7.113)$$

$$A_{11,5}=Rs_{t2}+Rs_{t1} \quad (7.114)$$

$$A_{11,8}=Rs_{t3}+Rh_x \quad (7.115)$$

$$A_{11,9}=Rh_x+Rs_{t3} \quad (7.116)$$

Relüktans denklemleri Denklem (7.62)' deki gibi matrisel forma getirilmiştir. Matris formdaki denklemlerin çözülmesi ile hava aralığındaki akı yoğunluğu değişimi elde edilmiş ve Şekil 7.8' de gösterilmiştir. Manyetik eşdeğer devreden elde edilen akı yoğunluğu değişimi SEA sonuçları ile karşılaştırılmış ve hem dalga şeklinin hem de 0,67T olan tepe değerlerinin uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

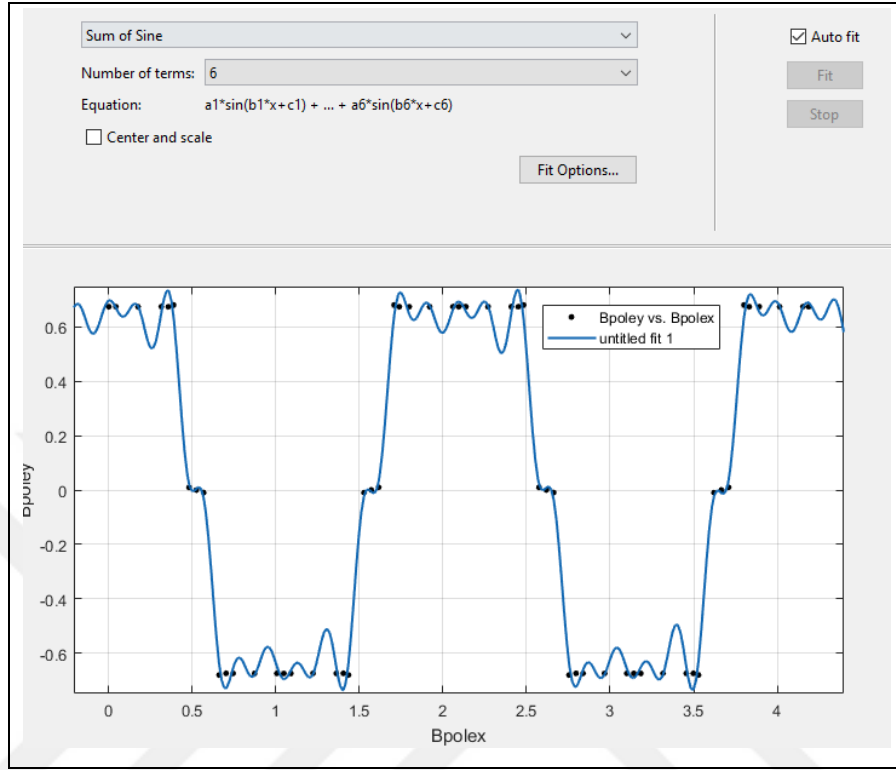


Şekil 7.8. DM yapı manyetik eşdeğer devresinden elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu değişimi ve 2B SEA ile karşılaştırması

Hava aralığı akı yoğunluğu için Matlab eğri uydurma aracı kullanılarak eğri uydurulmuş ve akı yoğunluğu fonksiyonu çıkarılmıştır (Şekil 7.9). V tipi DM motorun akı yoğunluğu eğri uydurma işleminde 6. dereceden sinüslerin toplamı şeklinde bir fonksiyon kullanılmıştır. Kullanılan fonksiyon Denklem (7.117)' de verilmiştir. Ayrıca fonksiyon katsayıları da Tablo 7.2' de verilmiştir.

Fonksiyon kullanılarak akı yoğunluğundan zıt EMK dalga değişimi elde edilmiştir. Elde edilen zıt EMK değişimi ve SEA sonuçları ile karşılaştırması Şekil 7.10' da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere manyetik eşdeğer devre ve SEA ile elde edilen

zıt EMK tepe değerleri 41,8V seviyelerindedir. Zıt EMK gerilimlerinin hem tepe değerleri hem de dalga şekillerinin uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 7.9. DM yapı hava aralığı akı yoğunluğu için eğri uydurma işlemi

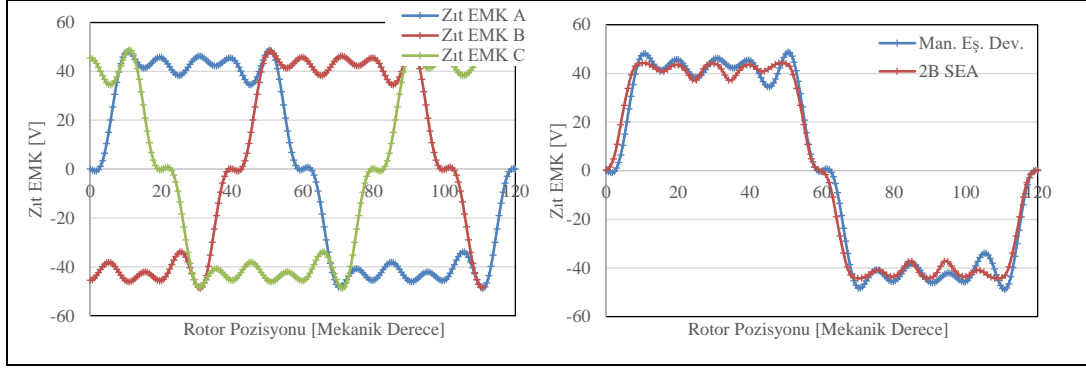
$$f(x)=a_1 \sin(b_1 x+c_1)+a_2 \sin(b_2 x+c_2)+a_3 \sin(b_3 x+c_3)+a_4 \sin(b_4 x+c_4)+\dots$$

$$\dots a_5 \sin(b_5 x+c_5)+a_6 \sin(b_6 x+c_6) \quad (7.117)$$

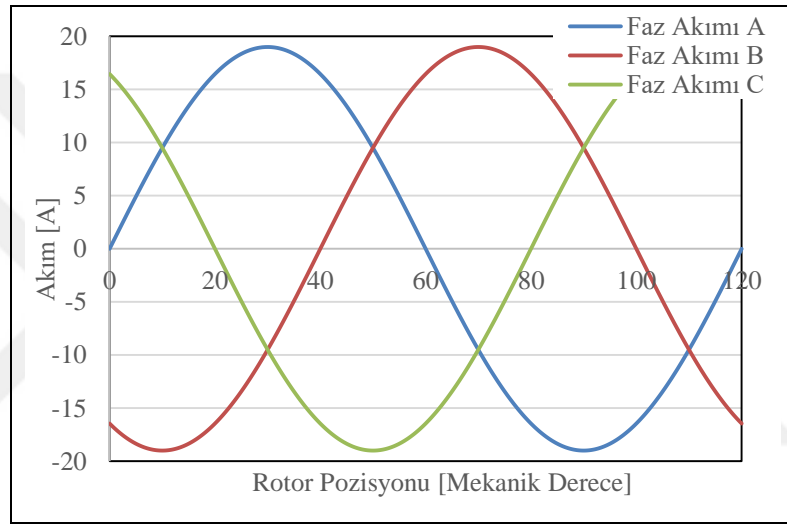
Tablo 7.2. DM yapı hava aralığı akı yoğunluğu fonksiyon katsayıları

a1 = 0,7851	b1 = 3,003	c1 = 1,583
a2 = 0,1828	b2 = 8,991	c2 = -1,583
a3 = 0,04065	b3 = 20,97	c3 = 1,069
a4 = 0,07329	b4 = 26,98	c4 = -1,565
a5 = 0,05302	b5 = 14,98	c5 = 1,201
a6 = 0,08298	b6 = 33,05	c6 = 1,706

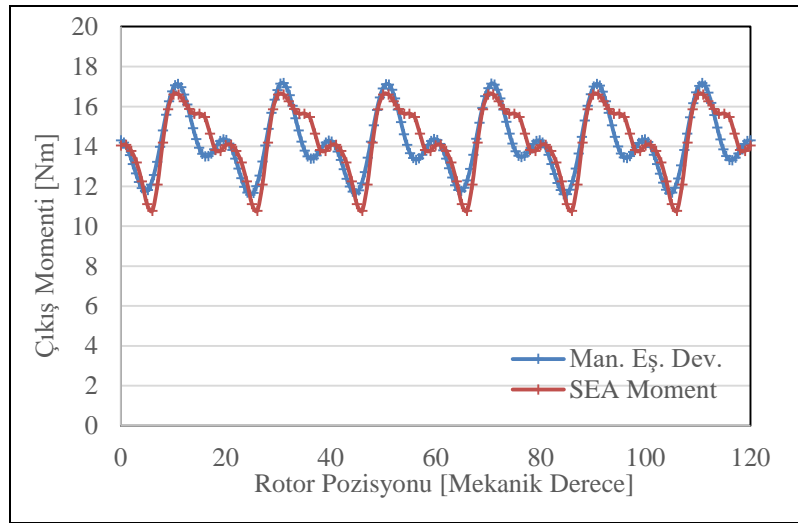
Elde edilen 3 faz zıt EMK ile 3 faz 19Amax akımlarla akımlarla (Şekil 7.11) çarpılıp sonuçlar toplanmış ve elde edilen sonuç hıza bölünerek çıkış momenti (Şekil 7.12) elde edilmiştir.



Şekil 7.10. DM yapının manyetik eşdeğer devreden zıt EMK elde edilmesi ve 2B SEA sonuçları ile karşılaştırması (@1.000rpm)



Şekil 7.11. DM yapıya uygulanan 3 faz dengeli akım dalga değişimleri (19Amax)

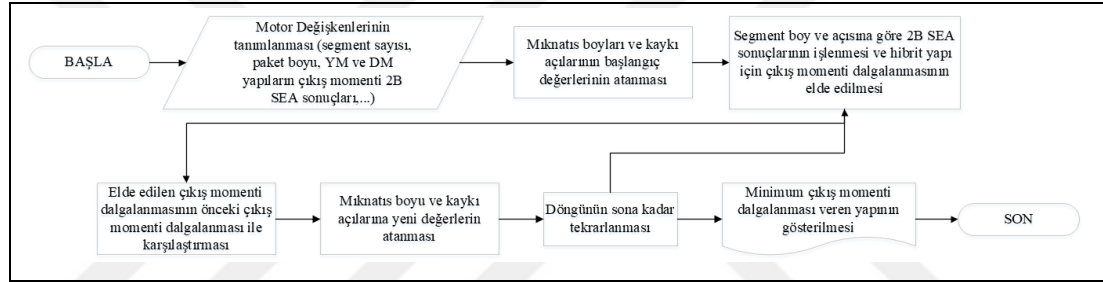


Şekil 7.12. DM yapı çıkış momenti değişimi ve SEA sonucu ile karşılaştırması

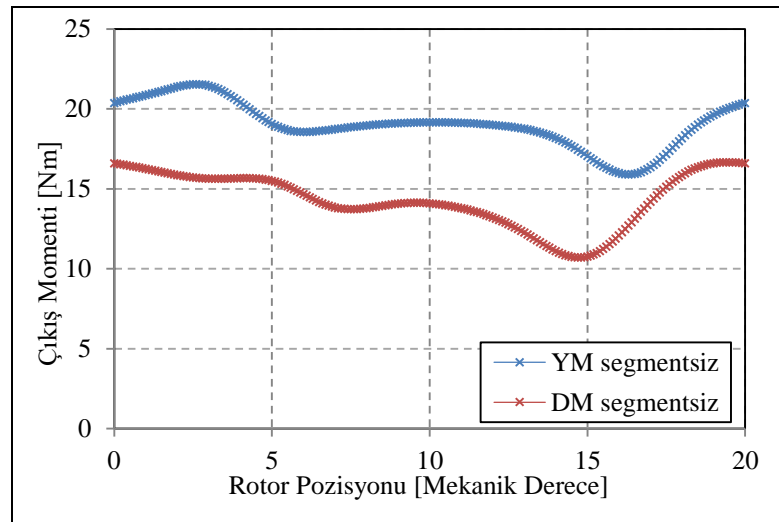
Elde edilen sonuç SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Manyetik eşdeğer devreden 14,19Nm ortalama moment elde edilirken, SEA sonuçlarından 14,28Nm ortalama moment elde edilmiştir. Ortalama momentler arasında %0,63' lük bir fark bulunmaktadır ve bu da oldukça küçük hata değeridir. Dalga şekilleri ise eğri uydurma işleminin başarılı olması nedeniyle yüksek doğrulukla örtüşmektedir.

7.3. SMHSM Yapının Yarı SEA Tabanlı Algoritma ile Optimizasyonu

YM ve DM rotor segmentlerinden oluşan, minimum çıkış momenti dalgalanmasına sahip, SMHSM' un elde edilmesi için akış diyagramı Şekil 7.13' de verilen yarı SEA tabanlı algoritma kullanılmıştır. Algoritma ile minimum moment dalgalanmasını veren mıknatıs boyları ve mıknatıslar arasındaki açılar bulunmaya çalışılmıştır.



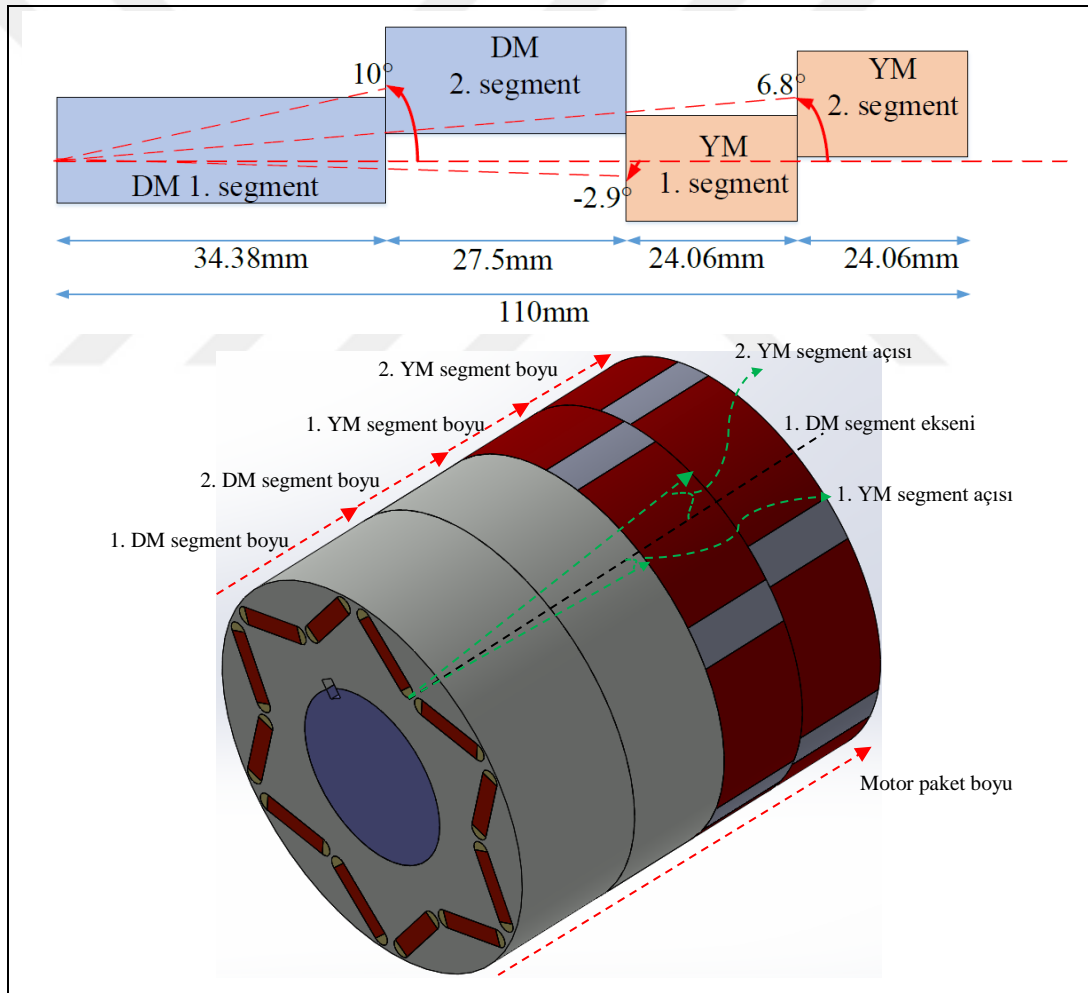
Şekil 7.13. SMHSM' dan minimum moment dalgalanmasının elde edilmesi için kullanılan yarı SEA tabanlı algoritmanın akış diyagramı



Şekil 7.14. YM ve DM segmentsiz yapıların 2B SEA çıkış momenti değişimleri

Yapı olarak DM, DM, YM, YM sıralamasına sahip SMHSM rotor yapısı tercih edilmiştir. Yarı SEA tabanlı algoritmaya girdi olarak kullanılan segmentsiz YM ve

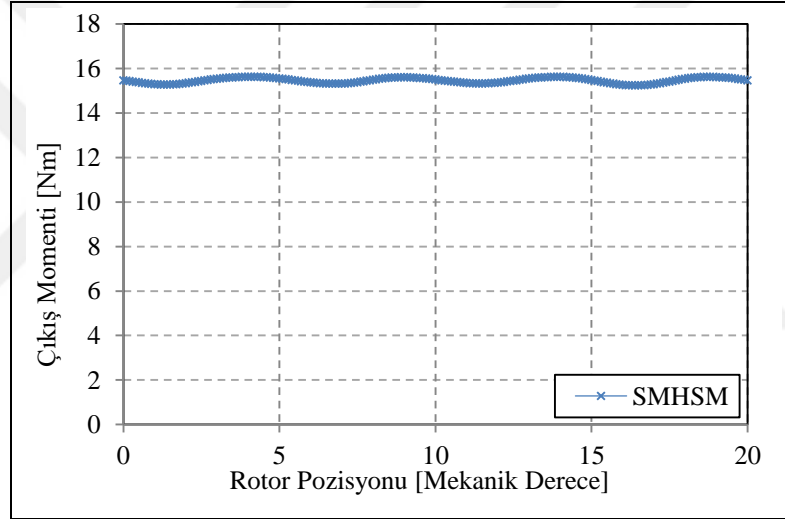
DM motorlara ait 2B SEA çıkış momenti değişimleri Şekil 7.14’ de verilmiştir. YM ve DM yapılarına ait çıkış momenti ortalama değerleri sırasıyla 19,02Nm, 14,3Nm ve moment dalgalanmaları ise %29,7 ve %41,7’ dir. 2B SEA’ dan elde edilen çıkış momenti değerleri kullanılarak yarı SEA tabanlı algoritma çalıştırılmış ve minimum moment dalgalanmasını veren segment boyları ve bu segmentler arasındaki açılar bulunmaya çalışılmıştır. Segment boyları 13,75mm’ den 41,25mm’ ye kadar 3,4375mm adımlarla arttırılmış, segmentler arasındaki açı ise 0’ dan 20 dereceye kadar 0.1’ er derece arttırılarak her bir durum için çıkış momenti değerleri hesaplanmıştır. Her bir durum için moment dalgalanması hesaplanmış ve en düşük moment dalgalanmasını veren boyutlar bulunmaya çalışılmıştır.



Şekil 7.15. YM, YM, DM, DM SMHSM’ a ait minimum moment dalgalanmasını veren mıknatis boyları ve kaykısı açılarının 2B ve 3B görüntüleri

Yapılan çalışmada DM,DM,YM,YM rotora sahip SMHSM' un en düşük moment dalgalanmasını veren mıknatıs boylarının sırasıyla 34,375mm, 27,5mm, 24,0625mm, 24,0625mm, açıların ise sırasıyla 0, 10, 3,6, 13,3 derece olduğu görülmüştür.

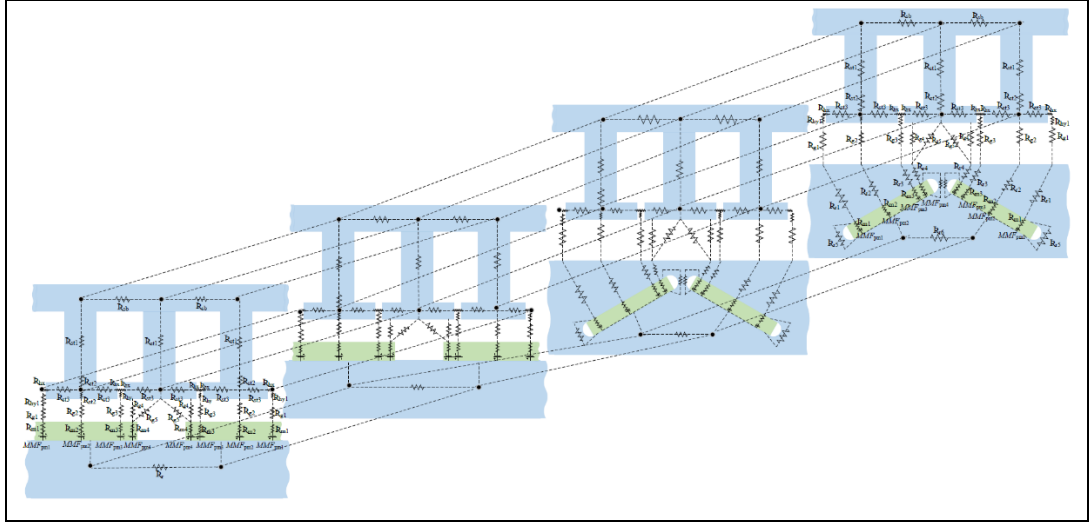
YM ve DM rotor yapıları aynı mil üzerinde yer alacağı için birim akım başına maksimum momenti veren kontrol açısı farkı da mekanik olarak milde uygulanmıştır. Böylelikle kontrol açılarındaki 6,5 farkın hesaba katılması ile segmentler arasındaki yeni açı dizilimi 0, 10, -2,9, 6,8 derece olmuştur. Bu yapıya ait 2B ve 3B görüntü Şekil 7.15' de gösterilmiştir. SMHSM yapı için, önerilen yarı SEA tabanlı yöntemle elde edilen çıkış momenti değişimi Şekil 7.16' de gösterilmiştir. Çıkış momenti ortalama değeri 15,47Nm ve moment dalgalanması ise %2,5 olarak elde edilmiştir.



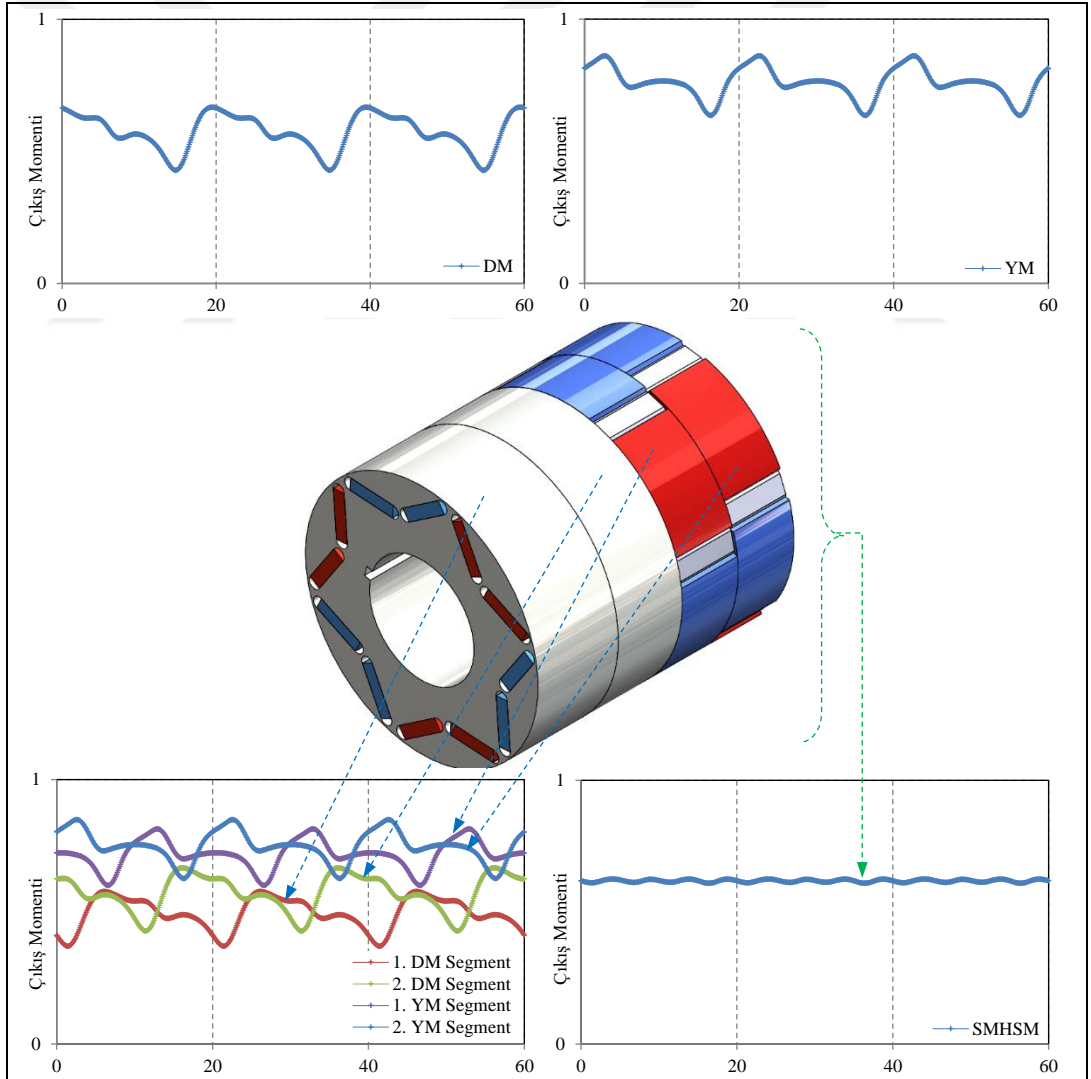
Şekil 7.16. Yarı SEA tabanlı algorithmandan elde edilen SMHSM' a ait çıkış momenti değişimi

7.4. SMHSM' un Relüktans Tabanlı Modellemesi

Minimum moment dalgalanmasını veren optimum boyutlardaki SMHSM' un relüktans tabanlı manyetik modeli oluşturulmuştur (Şekil 7.17). Bu model 3 boyutlu karmaşık bir yapı olduğu için YM ve DM rotor yapıları ayrı ayrı çözülmüş ve süperpozisyon teoremi sayesinde sonuçlar toplanarak hibrit yapıya ait çözüm elde edilmiştir. Yapılan işlemlerin örnek şematik gösterimi Şekil 7.18' de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere 2B SEA' nden elde edilen çıkış momenti değişimleri ilgili segment boyuna göre oranlanmış ve aradaki açı kadar da zaman ekseninde ötelenmiştir.



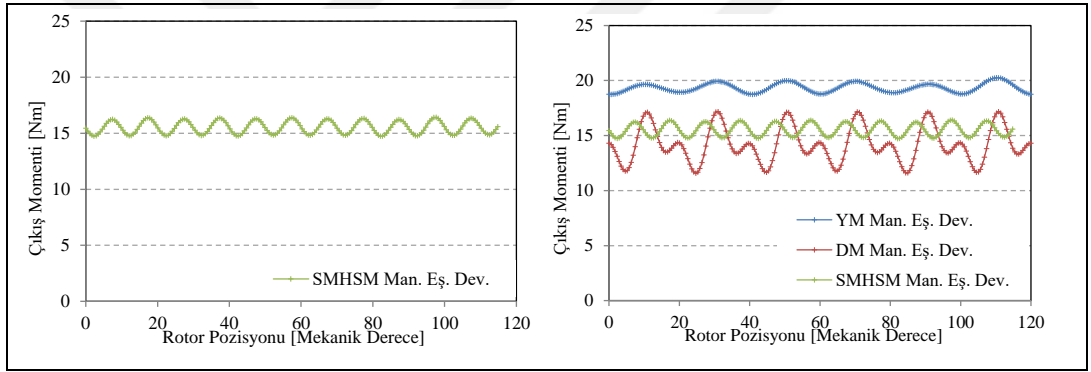
Şekil 7.17. Hibrit yapıya ait relüktans tabanlı manyetik modelleme



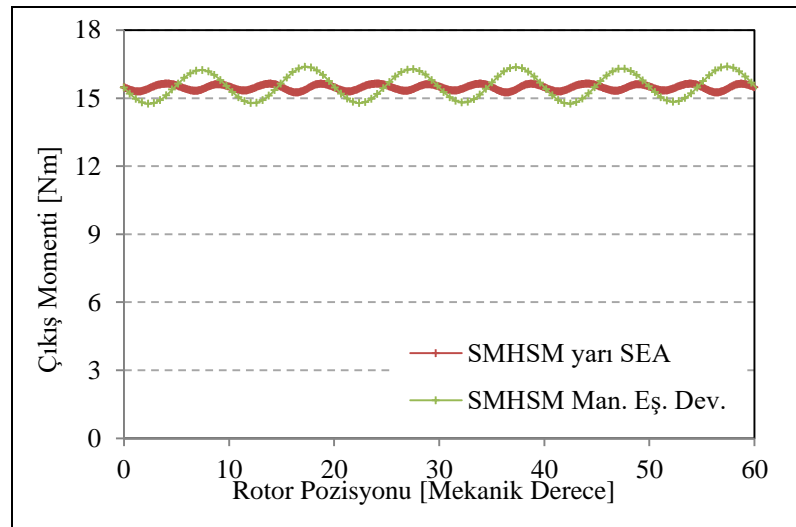
Şekil 7.18. Geliştirilen algoritma ile çıkış momenti elde edilmesi örneği

Her bir segment için elde edilen moment bileşenleri toplanarak bütün yapıya ait çıkış momenti değişimi elde edilmiştir. Şematik gösterimi yapılan motora benzer olarak SMHSM' a ait çıkış momenti çalışması da yapılmış ve sonuç Şekil 7.19' da gösterilmiştir. Elde edilen sonuç YM ve DM yapıların 2B SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekilden görüldüğü üzere tahmin edildiği gibi SMHSM' un çıkış momenti YM ve DM yapıların arasında yer almaktadır.

SMHSM için manyetik eşdeğer devre ve yarı SEA tabanlı aloritmadan elde edilen çıkış momenti değişimleri Şekil 7.20' de, karşılaştırmaları da Tablo 7.3' de verilmiştir. Yarı SEA tabanlı algoritma ve manyetik eşdeğer devre sonuçlarının 15,47Nm ve 15,56Nm ortalama çıkış momenti değerleri ile birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 7.19. SMHSM için manyetik eşdeğer devreden elde edilen çıkış momenti ve YM ile DM 2B SEA moment çıkışları ile karşılaştırmaları



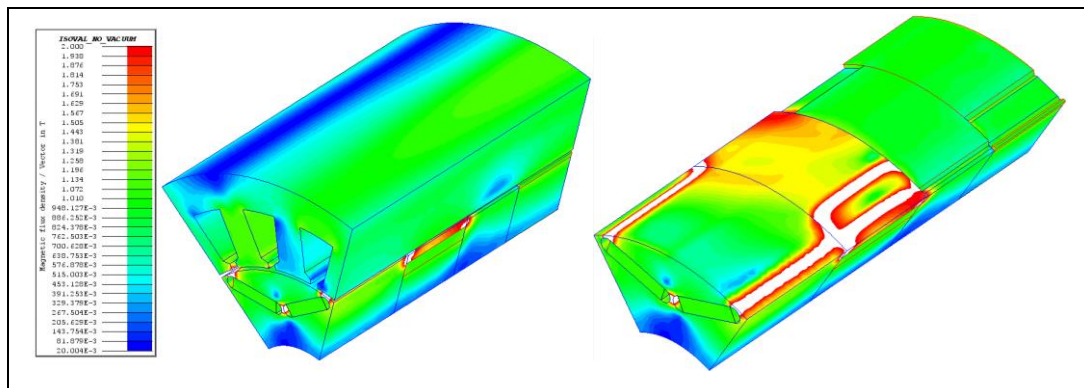
Şekil 7.20. Hibrit yapı için 3B SEA, yarı SEA ve manyetik eşdeğer devre sonuçlarının karşılaştırmaları

Tablo 7.3. SMHSM için yarı SEA tabanlı algoritma ve manyetik eşdeğer devre sonuçlarının karşılaştırmaları

	Ortalama Moment [Nm]	Hata [%]	Moment Dalgalanması [%]
SMHSM Yarı SEA	15,47	5,24	2,5
SMHSM Man. Eş. Dev.	15,56	5,85	10,8

7.5. SMHSM 3B SEA Modellemesi

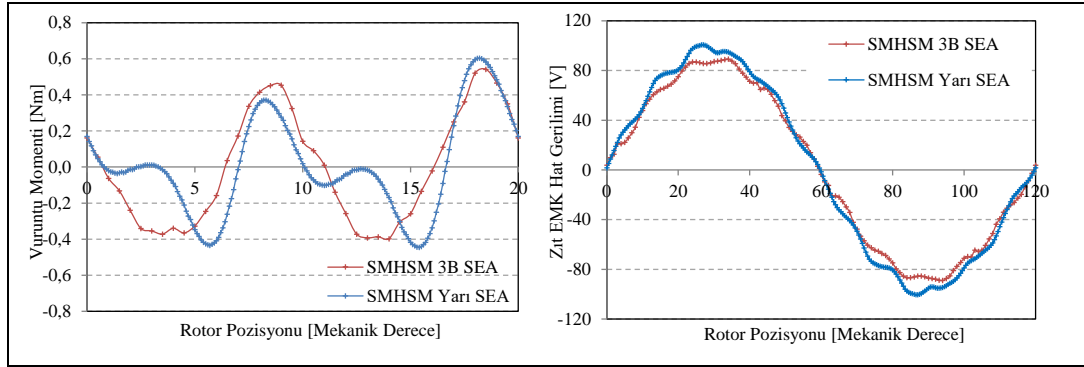
Yapılan optimizasyon çalışmasının doğruluğundan emin olmak ve 3B etkilerin seviyesini görmek amacıyla SMHSM' a ait 3B SEA modeli oluşturulmuştur. Modele ait hem yüksüz hem de yüklü durum analizleri gerçekleştirilmiştir. Yüksüz durum akı yoğunluğu değişimleri Şekil 7.21' de verilmiştir. Tahmin edildiği gibi DM rotor segmentlerinin köprü kısımlarında ciddi doyum bulunmaktadır. Diğer kısımların akı yoğunlukları ise kullanılan malzeme göz önünde bulundurulduğunda makul seviyelerdedir. Yapılan diğer yüksüz durum analizleri vurutu momenti ve zıt EMK' nın elde edilmesidir (Şekil 7.22). 3B SEA sonucunda elde edilen vurutu momenti tepe değeri 0,23Nm ve 1.000rpm rotor hızındaki zıt EMK tepe değeri 88V' dur. Her iki sonuç da yarı SEA tabanlı algoritma sonuçları ile karşılaştırılmış ve vurutu momentleri arasında %10,47 ve zıt EMK temel harmonikleri arasında %9,6' lık fark olduğu görülmüştür.



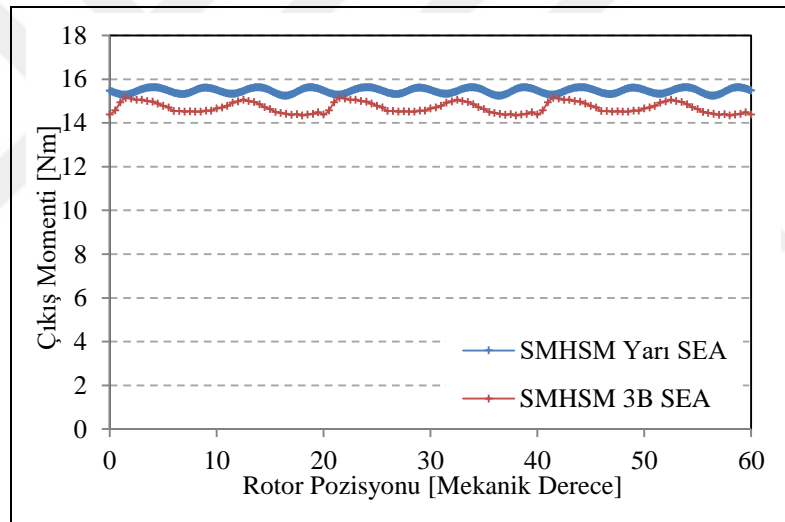
Şekil 7.21. Hibrit yapı 3B SEA yüksüz durum akı yoğunluğu değişimleri

SMHSM' a ait 3B çıkış momenti analizleri de gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.23). Moment dalgalanması %5,47, ortalama değeri 14,54Nm olan çıkış momenti elde edilmiştir. 3B

SEA çıkış momenti analizleri yarı SEA tabanlı sonuçlar ile karşılaştırılmış ve 3B etkilerden kaynaklı olduğu düşünülen bir miktar farklılığın olduğu görülmüştür. Oluşan bu farkın kabul edilebilir seviyelerde olduğu değerlendirilmiştir.

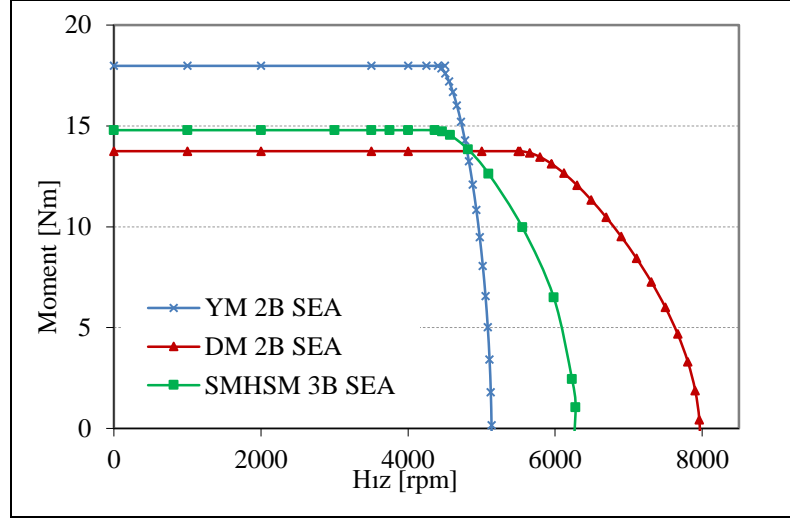


Şekil 7.22. Hibrit yapı vuruğu momenti ve 1.000rpm rotor hızında zıt EMK hat dalga değişimleri ve yarı SEA sonuçları ile karşıştırmaları



Şekil 7.23. Hibrit yapı çıkış momenti değişimi ve yarı SEA sonuçları ile karşıştırmaları

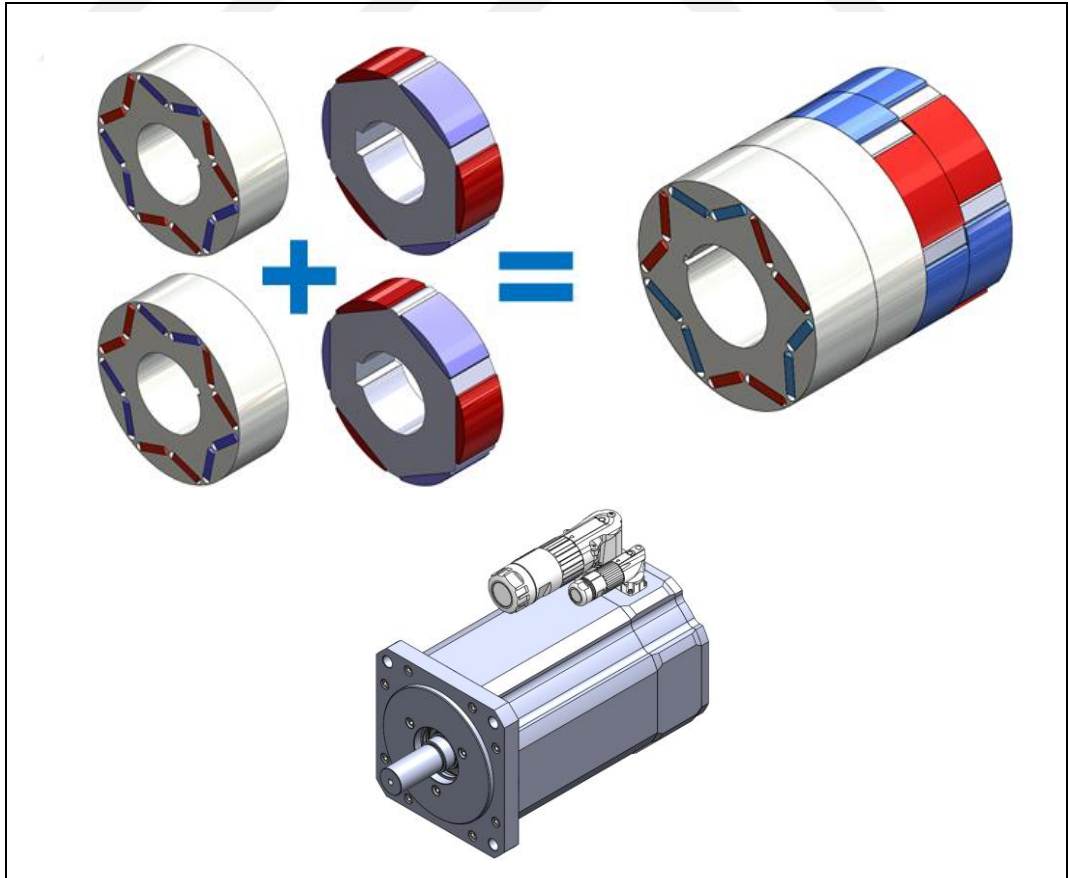
SMSHM' a ait moment-hız eğrisi analizleri de gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.24). Yapılan analizler sonucunda anma hızı 4.362rpm olarak elde edilmiş ve SGHO değeri de 1,44 olarak hesaplanmıştır. 3B SEA' nden elde edilen moment hız eğrisi ile 4 segmentli, geleneksel kaynaklı YM ve DM yapıların moment-hız eğrileri karşılaştırılmıştır. SMSHM' a ait moment hız eğrisinin, YM ve DM moment-hız eğrilerinin arasında yer aldığı görülmüştür. Ayrıca şekilden görüldüğü üzere SMSHM, DM yapıdan %7 daha fazla ve YM yapıdan %17,7 daha az ortalama momente sahiptir.



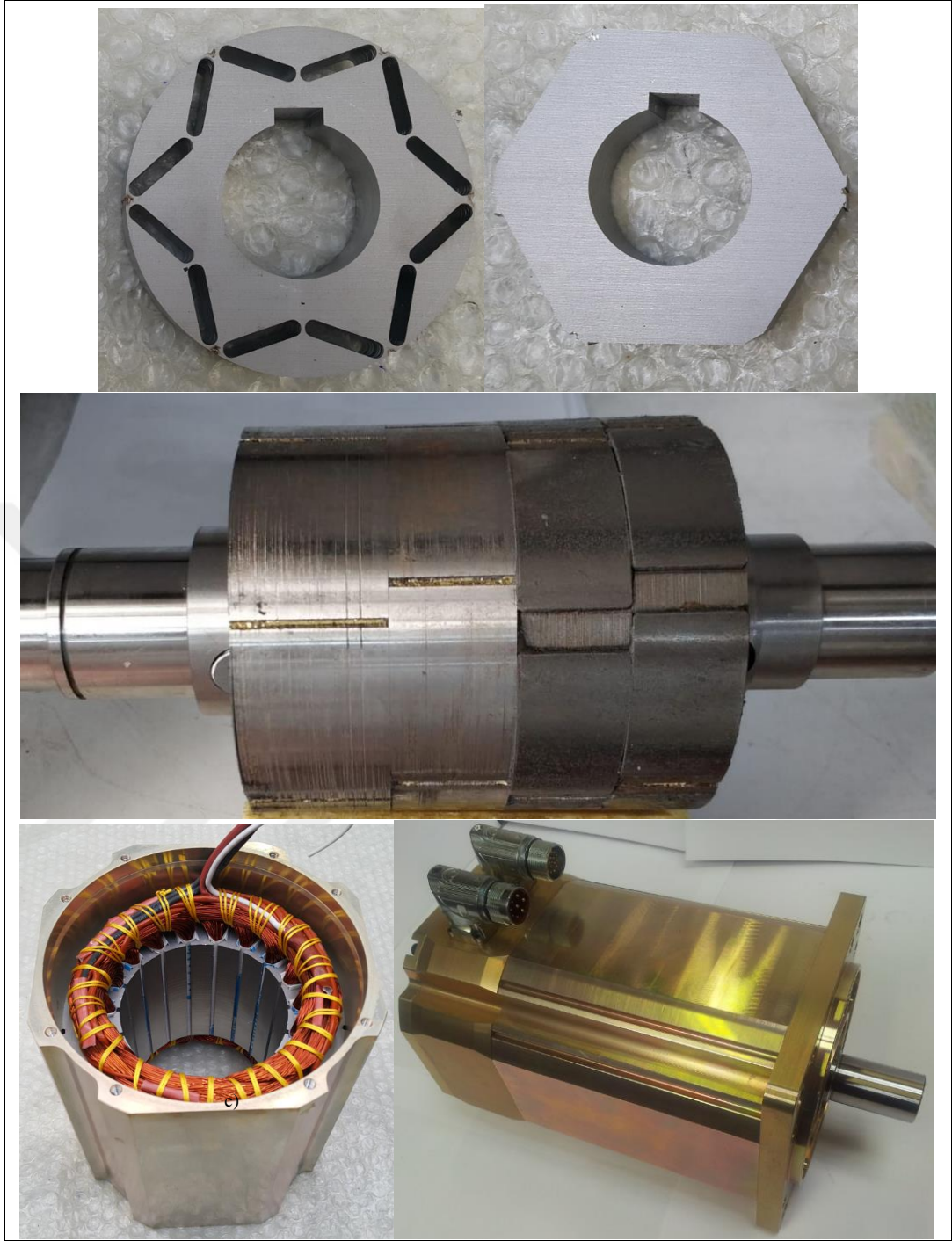
Şekil 7.24. Hibrit yapı moment hız eğrisi ve YM ile DM moment hız eğrileri ile karşılaştırması

7.6. SMHSM Mekanik Modelleme ve Prototip Üretimi

2 adet YM ve 2 adet de DM rotor segmentine sahip SMHSM' a ait 3B mekanik modelleme Şekil 7.25' de gösterilmiştir.



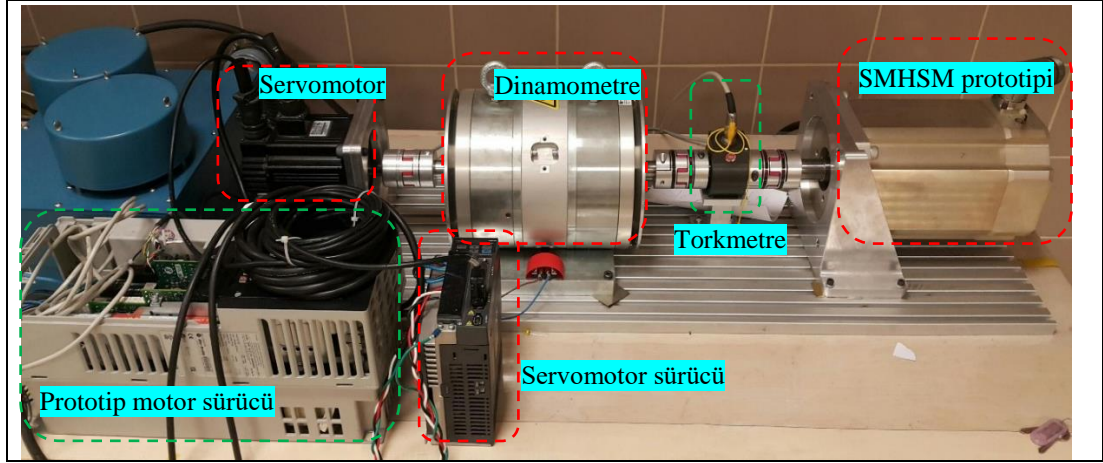
Şekil 7.25. SMHSM 3B mekanik modeli



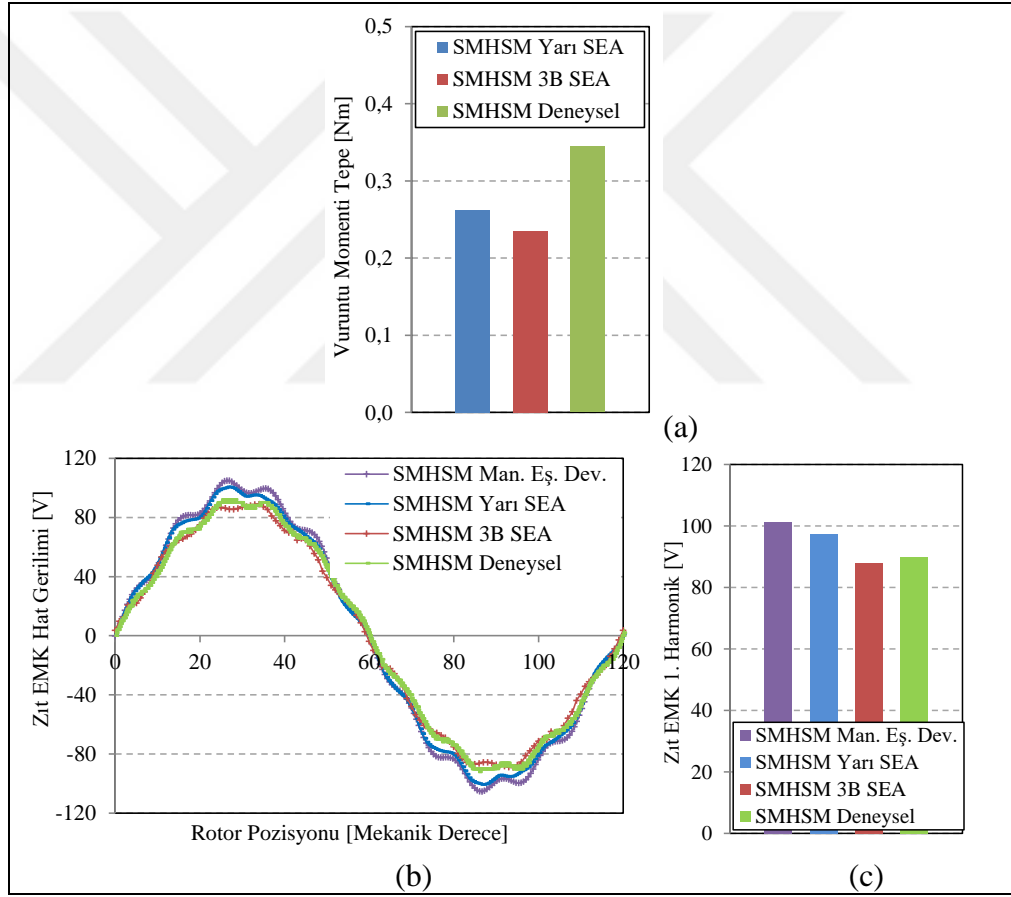
Şekil 7.27. SMHSM prototip üretim görüntüleri ve nihai prototip

7.7. SMHSM Deneysel Doğrulaması

Daha önce oluşturulan Magtrol marka motor test sistemi SMHSM' un testlerinde de kullanılmıştır. Zıt EMK ve vuruntu momenti testlerinin daha kolay yapılabilmesi için eklenen 1,5kW' lık servomotorun da yer aldığı nihai motor test sistemi Şekil 7.28' de gösterilmiştir.



Şekil 7.28. Motor test sistemi ve SMHSM prototipi

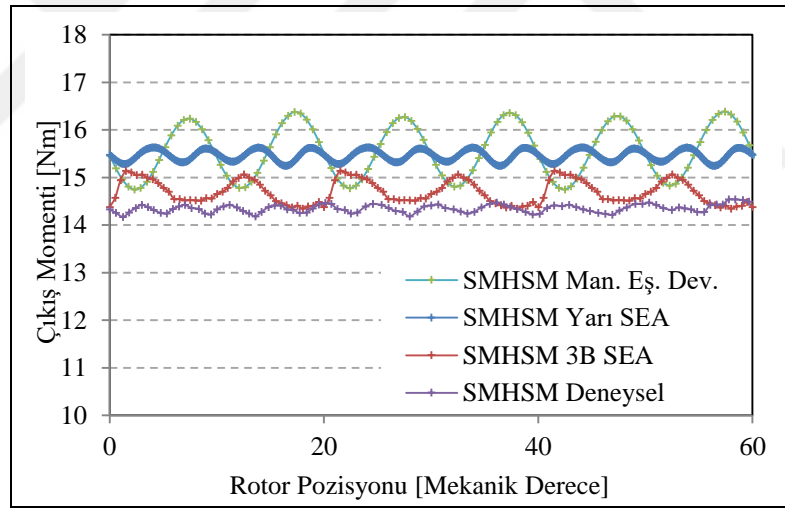


Şekil 7.29. SMHSM test sonuçları ve karşılaştırmaları (a) vuruntu momenti, (b) 1.000rpm hızda zıt EMK hat gerilimleri ve (c) zıt EMK temel harmonik tepe değerleri

Vuruntu momenti testleri sistem 1rpm hızda çevrilirken ölçülmüş ve vuruntu momenti tepe değeri 0,35Nm olarak elde edilmiştir. Vuruntu momenti testi, yarı SEA tabanlı algoritma ve 3B SEA analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların büyük

doğrulukla örtüştüğü görülmüştür. Yapılan diğer bir yüksüz durum testi zıt EMK hat geriliminin kontrol edilmesidir. 1.000rpm rotor hızında zıt EMK testleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar yarı SEA tabanlı algoritma ve 3B SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Temel harmonikler için yapılan karşılaştırmada test sonuçları ve 3B SEA sonuçları arasında, %2.21' lik bir hata payı ile örtüşme sağlandığı görülmüştür. Diğer taraftan manyetik eşdeğer devre tabanlı yaklaşım ile yarı SEA tabanlı yaklaşım arasında bir miktar fark olduğu görülmüştür. Bunun nedeni de ihtimal edilen 3B' lu etkilerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan vuruğu momenti ve zıt EMK testleri ve karşılaştırmaları detaylı olarak Şekil 7.29' da verilmiştir.

SMHSM prototipi için yüklü durum testleri de gerçekleştirilmiş ve karşılaştırmalı olarak çıkış momenti değişimleri Şekil 7.30' da verilmiştir. Yapılan test ile yarı SEA tabanlı yaklaşım sonuçları arasında %7.7' lik bir fark olduğu görülmüştür. Test sonuçları ile farklı yaklaşımlar Tablo 7.4' de detaylı olarak karşılaştırılmıştır.

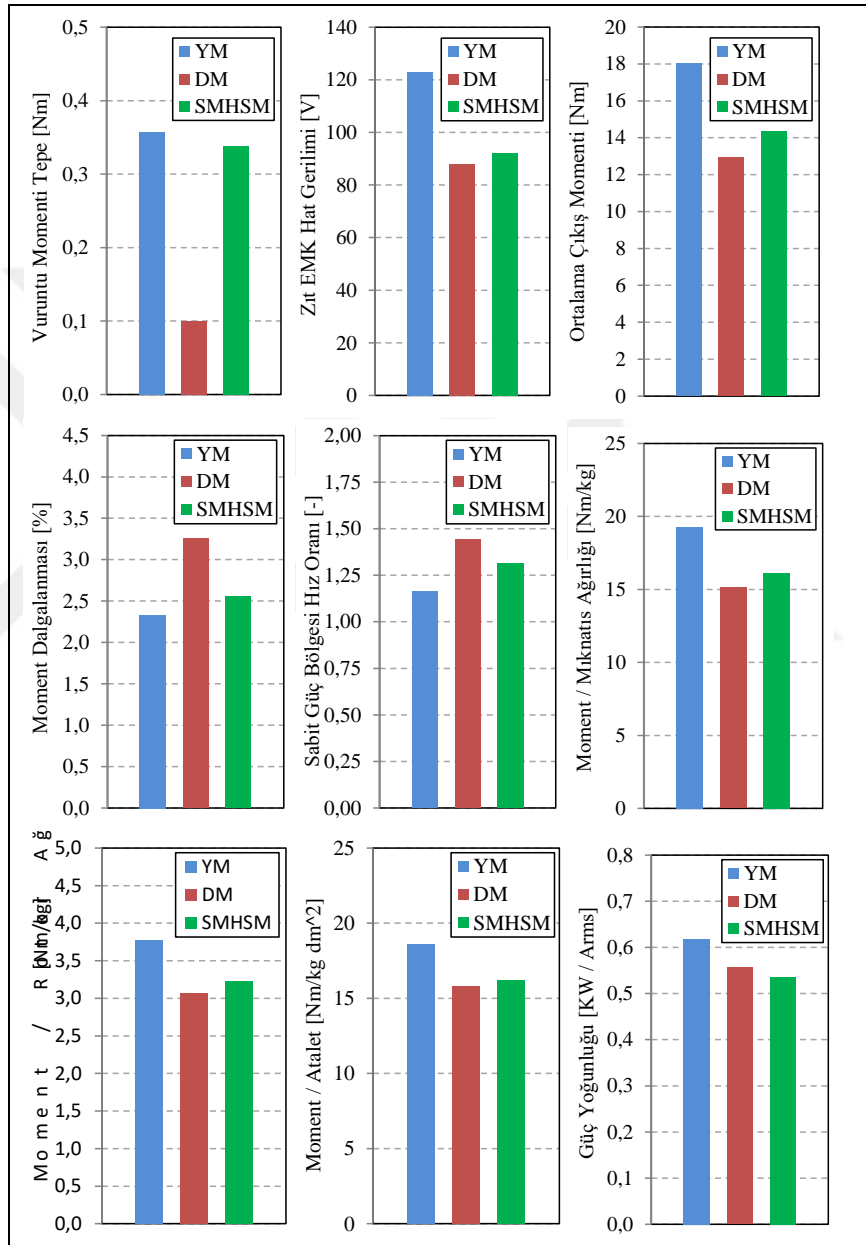


Şekil 7.30. Hibrit yapı çıkış momenti test sonuçları ve farklı yöntemlerin karşılaştırması

Tablo 7.4. SMHSM çıkış momenti testi ve farklı yöntemler ile karşılaştırması

	Man. Eş. Dev.	Yarı SEA	3B SEA	Deneysel
Zıt EMK [V]	104,98	100,5	88	90
Vuruğu / Anma [%]	-	3,39	3,19	2,36
Ortalama Moment [Nm]	15,56	15,47	14,54	14,4
Moment Dalgalanması [%]	10,8	2,5	5,47	2,55

Ayrıca SMHSM test sonuçları ile YM ve DM yapıların detaylı karşılaştırmaları Şekil 7.31’ de verilmiştir. Genel itibari ile SMHSM değerlerinin YM ve DM motorların arasında yer aldığı görülmektedir. En belirgin avantajı olarak YM motora göre daha yüksek hızlara ulaşabiliyor olması ve DM motora göre daha fazla moment sağlıyor olması gösterilebilir.



Şekil 7.31. Hibrit yapı çıkış momenti test sonuçları ve farklı yöntemlerin karşılaştırmaları

7.8. Sonuçlar

Bu b6l6mde, rotoru 2 adet YM ve 2 adet de DM segmentten oluşan yeni bir SMHSM yapısı 6nerilmiŐtir. SMHSM' un minimum moment dalgalanması verecek Şekilde oluşturulabilmesi için gerekli segment boyları ve segmentler arasındaki açıyı belirlemek amacıyla yarı SEA tabanlı optimizasyon algoritması kullanılmıştır. 2B SEA sonuçlarını girdi olarak kullanan optimizasyon algoritması sayesinde optimum segment boyutları ve aralarındaki aı miktarı elde edilmiştir. Bu boyutlar için 3B SEA' leri yapılarak sonuçları karşılaştırılmış ve b6y6k oranda uyum içerisinde olduğu g6r6lm6Őt6r. Ayrıca rotorda kullanılacak olan YM ve DM yapılara ait manyetik eşdeğer devreler oluşturularak 6z6mleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar 2B SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların b6y6k 6l6de 6rt6Őt6Đ6 g6r6lm6Ő ve bu sonuçlar kullanılarak SMHSM' a ait manyetik eşdeğer devre tabanlı modelleme gerçekleştirilmiştir.

Optimum boyutları elde edilen SMHSM' a ait prototip 6retilerek daha 6nce oluşturulan test sistemi ile y6ks6z ve y6kl6 durum testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen test sonuçları manyetik eşdeğer devre, yarı SEA tabanlı algoritma ve 3B SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların uyum içerisinde olduğu g6r6lm6Őt6r. Ayrıca bir karşılaştırma da SMHSM ile YM ve DM motorlar arasında yapılmıştır. Farklı parametreler için yapılan karşılaştırmada SMHSM' un en belirgin avantajlarının DM motora g6re daha y6ksek moment sağlaması ve YM motora g6re daha y6ksek hızlara çıkabilmesi olduğu g6r6lm6Őt6r.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının ilk iki bölümünde SM motorlara ait genel bilgiler verilmiş ve literatürde yer alan çalışmalardan bazıları anlatılmıştır. SM motor denklemleri, motorda kullanılan malzemeler ve tasarımda izlenen yöntemlerle ilgili genel bilgiler yine bu bölümlerde anlatılmıştır. Tez kapsamında önerilen yeniliklerle ilgili bilgiler verilerek izlenecek yöntem anlatılmıştır. Önerilen yöntemin yerli ve uluslararası literatüre katkılarından bahsedilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde SM motorlara ait manyetik eşdeğer devre tabanlı manyetik modelleme çalışmaları yapılmıştır. Manyetik eşdeğer devre modellemesi sırasıyla basit modelleme, detaylı doğrusal elemanların kullanıldığı modelleme ve detaylı doğrusal olmayan elemanların kullanıldığı modelleme olarak farklı alternatifler için yapılmıştır. Üç yöntem ile de hava aralığı akı yoğunluğu değişimleri elde edilerek, 2B SEA sonuçları ile karşılaştırmaları yapılmıştır. En iyi sonucu doğrusal olmayan elemanlardan oluşan manyetik modellemenin verdiği görülmüştür. Elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu kullanılarak zıt EMK geriliminin ve çıkış momentinin elde edilmesi uygulamalı olarak anlatılmıştır. SM motora ait termal eşdeğer devre modelleme çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Termal analiz sonucunda elde edilen sıcaklık değerinin manyetik modele etkisi uygulanmış ve daha doğru bir manyetik model elde edilmesi sağlanmıştır.

Tezin dördüncü bölümünde takım tezgahı uygulamaları için DM bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Referans motor için 2B SEA' ları yapılmış ve ardından takım tezgahı motoru için kutup sayısı optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Farklı DM yapı alternatifleri için ön tasarımlar yapılarak avantaj ve dezavantajları irdelenmiştir. Avantajlı görünen v tipi ve çubuk tip DM yapılara ait detaylı SEA' lar gerçekleştirilerek çeşitli optimizasyonlar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar referans YM motorun sonuçları ile de karşılaştırılarak v tip yapı ile ilerlemeye karar verilmiştir. Yapıya ait mekanik ve termal analizler gerçekleştirilerek prototip üretimine geçilmiştir. Takım tezgahı motorların testi için oluşturulan test sistemi kullanılarak v

tip DM motor performans testleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve test sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Tezin beşinci bölümünde rotoru DM ve YM segmentlerden oluşan, yeni bir sürekli mıknatıslı hibrit senkron motor yapısı önerilmiştir. Önerilen yapı için konsept doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Detaylı analizler yapıldıktan sonra nihai ölçüler için prototip üretilmiş ve test edilerek sonuçlar doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde önerilen hibrit motorun takım tezgahı motoru için uygulanmasına karar verilmiştir.

Tezin altıncı bölümünde, literatürde birçok örneği bulunan standart segmentli yapılara alternatif olarak segment boylarının ve aralarındaki kaykçı açılarının değiştiği yeni bir segmentli YM motor önerilmiştir. Bu yapı sayesinde daha düşük vuruuntu momenti ve moment dalgalanmasının elde edilebileceği belirtilmiştir. Geliştirilen yarı sonlu elemanlar tabanlı optimizasyon algoritması sayesinde segment boyları ve aralarındaki açı miktarının optimizasyonu yapılarak en iyi sonucu veren boyutlar elde edilmiştir. Optimum YM motor tasarımı için prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve test edilmiştir. Test sonuçlarının simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu, önerilen yöntem sayesinde geleneksel segmentli yapıya göre daha düşük vuruuntu momentinin elde edilebileceği gösterilmiştir.

Tezin yedinci bölümünde yapılan diğer bir çalışma da farklı segment boyları ve kaykçı açılardan oluşan, rotorunda DM ve YM rotor segmentleri bulunan, yeni bir sürekli mıknatıslı hibrit senkron motorun önerilmesidir. Hibrit motorun YM kısmı sayesinde yüksek moment ve DM kısmı sayesinde de daha yüksek hız sağlaması beklenmektedir. DM ve YM rotor segmentlerinin doğru şekilde bir araya getirilebilmesi için daha önce geliştirilen optimizasyon kodları bu yapı için revize edilmiş ve minimum moment dalgalanmasının elde edilmesi sağlanmıştır. Elde edilen tasarıma ait 3B manyetik SEA gerçekleştirilerek uyumu irdelenmiştir. Yapıya ait prototip üretilerek performans testleri gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları ile uyum içerisinde oldukları görülmüştür. Önerilen hibrit motor ile standart kaykçıya sahip DM ve YM motorlar karşılaştırılmış, avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Sonuç olarak önerilen hibrit motorun DM motora göre daha yüksek moment sağladığı, YM motora göre de daha yüksek hızlara çıkabildiği görülmüştür.

Çalışma kapsamında önerilen YM ve hibrit motorların optimizasyonları yapılırken yarı SEA sonuçları ile işlemler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları kullanılan motorlara ait vuruş momenti ve çıkış momenti verileri için FFT analizi yapılarak, optimizasyon çalışması sonucunda harmonik dağılımlarının nasıl değiştiği ve segment boyu ve açılarında yapılan işlemlerin sonuca nasıl etki ettiği ile ilgili çalışma sonraki çalışma olarak gösterilebilir. Hibrit motor yapısında kullanılan segment sayısının ve YM ile DM rotor segment yerleşim sıralamasının değiştirilerek yeni tasarımların yapılması da yapılabilecek sonraki çalışmalar arasındadır.



KAYNAKLAR

- [1] Hanselman D., *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, Magna Physics Publishing, 2006.
- [2] Sarioğlu M. K., Gökasha M., Boğosyan S., *Asenkron Makinalar ve Kontrolü*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2003.
- [3] Aydın M., Brushless Permanent Magnet Servomotors, Editör: Küçük S., *Serial and Parallel Robot Manipulators: Kinematic Dynamics Control and Optimization*, First Edition, InTech, Rijeka, 275-294, 2012.
- [4] Colby R. S., Classification of Inverter Driven Permanent Magnet Synchronous Motors, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Pittsburgh, ABD, 2-7 Ekim 1988.
- [5] Hendershot J. R., Miller T. J., *Design of Brushless Permanent Magnet Motors*, Magna Physics Publications and Clarendon Press Oxford, 1994.
- [6] Sung-II K., Young-Kyoun K., Geun-Ho L., Jung-Pyo H., A Novel Rotor Configuration and Experimental Verification of Interior PM Synchronous Motor for High-Speed Applications, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, **48**(2), 843-846.
- [7] Lei M., Masayuki S., Shigeo M., Yoji T., Advantages of IPMSM with Adjustable PM Armature Flux Linkage in Efficiency Improvement and Operating Range Extension, *IEEE Power Conversion Conference*, Osaka, Japonya, 2 - 5 Eylül 2002.
- [8] Bianchi N., Bolognani S., Sung F.L., Analysis and Design of a PM Brushless Motor for High-Speed Operations, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, **20**(3), 629-637.
- [9] EL-Refaie A.M., Jahns T. M., Comparison of Synchronous PM Machine Types for Wide Constant-Power Speed Range Operation, *IEEE Industry Applications Conference*, Hong Kong, Çin, 2 - 6 Ekim 2005.
- [10] Geest M., Ferreira J.A., Wolmarans J., Analysis and Neutral Voltage-Based detection of Interturn Faults in High-Speed Permanent-Magnet Machines With Parallel Strands, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **62**(6), 843-846.
- [11] Wallmark O., Kjellqvist P., Meier F., Analysis of Axial Leakage in High-Speed Slotless PM Motors for Industrial Hand Tools, *IEEE Industry Applications Conference*, Edmonton, Kanada, 5 - 9 Ekim 2008.

- [12] Messenger G., Binder A., Analytical Comparison of Conventional and Modified Winding for High Speed Bearingless Permanent Magnet Synchronous Motor Applications, *IEEE Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Bran, Romanya, 22-24 Mayıs 2014.
- [13] Schneider T., Koch T., Binder A., Comparative analysis of limited field weakening capability of surface mounted permanent magnet machines, *IEEE Electric Power Applications*, 2004, **151**(1), 76-82.
- [14] Huang Y., Hu Q., Zhao J., Zhu J., Guo Y., Comparative Study of High-Speed PM Motors with Laminated Steel and Soft Magnetic Composite Cores, *IEEE Industry Applications Conference*, New Orleans, ABD, 23 - 27 Eylül 2007.
- [15] Dwari S., Parsa L., Karimi K. J., Design and Analysis of Halbach Array Permanent Magnet Motor for High Acceleration Applications, *IEEE Electric Machines and Drives Conference*, Miami, ABD, 3 - 6 Mayıs 2009.
- [16] Jang S. M., Jeong S. S., Ryu D., Choi S., Design and Analysis of High Speed Slotless PM Machine with Halbach Array, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, **37**(4), 2827-2830.
- [17] Bianchi N., Bolognani S., Chaltner B. J., Design Considerations for a PM Synchronous Motor with Rotor Saliency for High Speed Drives, *IEEE Industry Applications Conference*, Phoenix, ABD, 3 - 7 Ekim 1999.
- [18] Fengxiang W., Wenpeng Z., Ming Z., Baoguo W., Design Considerations of High-speed PM Generators for Micro Turbines, *IEEE Power System Technology*, Kunming, Çin, 13-17 Ekim 2002.
- [19] Gerlando A., Foglia G., Iacchetti M., Perini R., Design Criteria and Operation Analysis of a High Speed Brushless PM Micro-Motor, *IEEE International Conference on Electrical Machines*, Rome, İtalya, 6 - 8 Eylül 2010.
- [20] Wang F., Zong M., Zheng W., Guan E., Design Features of High Speed PM Machines, *IEEE Electrical Machines and Systems*, Beijing, Çin, 9 - 11 Kasım 2003.
- [21] Rilla M., Pyrhönen J., Niemelä M., Pekola J., Jäppinen J., Design of a 60 kW, 9000 rpm Non-Salient Pole PM Machine, *IEEE International Conference on Electrical Machines*, Vilamoura, Portekiz, 6 - 9 Eylül 2008.
- [22] Gieras J. F., Design of Permanent Magnet Brushless Motors for High Speed Applications, *IEEE Electric Machines and Drives Conference*, Hangzhou, Çin, 22 - 25 Ekim 2014.
- [23] Hwang C., Chang C. M., Li P., Design Optimization for Cogging Torque Minimization and Efficiency Maximization of a High-speed PM Motor, Taipei, Taiwan, 2 - 5 Kasım 2009.
- [24] Schatzer C., Binder A., Design Optimization of a High-speed Permanent Magnet Machine with the Vekopt Algorithm, Rome, İtalya, 8 - 12 Ekim 2000.

- [25] Phyu H. N., Chao B., Effect of Magnetization on High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor Design, *IEEE Electrical Machines and Systems*, Sapporo, Japonya, 21-24 Ekim 2012.
- [26] Reddy P. B., EL-Refaie A. M., Huh K. K., Effect of Number of Layers on Performance of Fractional-Slot Concentrated-Windings Interior Permanent Magnet Machines, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, **30**(4), 2205-2218.
- [27] EL-Refaie A. M., Shah M. R., Qu R., Kern J. M., Effect of Number of Phases on Losses in Conducting Sleeves of High Speed Surface PM Machine Rotors, *IEEE Industry Applications Conference*, New Orleans, ABD, 23 - 27 Eylül 2007.
- [28] Jang S. M., Jeong J. H., Park H., Choi J., Sung Y., Electromagnetic Analysis of High Speed Brushless DC Motor According to PM Structure, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Seoul, Kore, 9 - 12 Ekim 2012.
- [29] Deak C., Binder A., Funieru B., Mirzaei M., Extended Field Weakening and Overloading of High-Torque Density Permanent Magnet Motors, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose, ABD, 20 - 24 Eylül 2009.
- [30] Ren W., Xu Q., Li Q., Chen L., High Performance Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor of Changing PM Flux for EV/HEV Applications, *IEEE Transportation Electrification Asia-Pasific*, Beijing, Çin, 1 - 3 Eylül 2014.
- [31] Moghaddam R., High Speed Operation of Electrical Machines, a Review on Technology, Benefits and Challenges, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Pittsburgh, ABD, 14 - 18 Eylül 2014.
- [32] Schneider T., Petersen J., Binder A., Influence of Pole Pair Combinations on High-Speed Bearingless Permanent Magnet Motor Performance, *IEEE Power Electronics, Machines and Drives*, York, İngiltere, 2 - 4 Nisan 2008.
- [33] Bianchi N., Bolognani S., Interior PM Synchronous Motor for High Performance Applications, *IEEE Power Conversion Conference*, Osaka, Japonya, 2 - 5 Nisan 2002.
- [34] Tessarolo A., Mezzarobba M., Menis R., Modeling, Analysis, and Testing of a Novel Spoke-Type Interior Permanent Magnet Motor With Improved Flux Weakening Capability, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, **51**(4), 148-153.
- [35] Munteanu G., Binder A., Schneider T., Funieru B., No-Load Tests of a 40 kW High-Speed Bearingless Permanent Magnet Synchronous Motor, *IEEE International Symposium on Power Electronics*, Pisa, İtalya, 14 - 16 Haziran 2010.

- [36] Borisavljevic A., Ferreira J. A., On the Speed Limits of Permanent-Magnet Machines, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**(1), 220-227.
- [37] Wang T., Wang F., Bai H., Xing J., Optimization Design of Rotor Structure for High Speed Permanent Magnet Machines, *IEEE Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems*, Seoul, Kore, 8 - 11 Ekim 2007.
- [38] Cheng W., Xu G., Sun Y., Geng H., Yu L., Optimum Design of Ultra High Speed Hybrid Rotor of PM Machines, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Tianjin, Çin, 3 - 6 Ağustos 2014.
- [39] Mirzaei M., Binder A., Permanent Magnet Savings in High Speed Electrical Motors, *IEEE International Symposium on Power Electronics*, Ischia, İtalya, 11 - 13 Haziran 2008.
- [40] Xue S., Xu H., Fang C., The Effect of Stator Slot and Air Gap Length on High Speed Brushless PM Motor, *IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference*, Harbin, Çin, 2-5 Haziran 2012.
- [41] Liao Y., Liang F., Lipo T.A., A Novel Permanent Magnet Motor With Doubly Salient Structure, *IEEE Transactions Industry Applications*, 1995, **31**(5), 1069-1078.
- [42] Lu K., Rasmussen P. O., Watkins S. J., Blaabjerg F., A New Low-Cost Hybrid Switched Reluctance Motor for Adjustable-Speed Pump Applications, *IEEE Transactions Industry Applications*, 2011, **47**(1), 314-321.
- [43] Wang Y., Fu W.N. and Niu S., A Novel Structure of Dual-Stator Hybrid Excitation Synchronous Motor, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, 2016, **26**(4), 1-5.
- [44] Mellor P. H., Burrow S. G., Sawata T., Holme M., A Wide-Speed-Range Hybrid Variable-Reluctance/Permanent-Magnet Generator for Future Embedded Aircraft Generation Systems, *IEEE Transactions Industry Applications*, 2005, **41**(2), 551-556.
- [45] Chen Y., Cai T., Zhu X., Fan D., Wang Q., Analysis and Design of a New Type of Less-Rare-Earth Hybrid-Magnet Motor With Different Rotor Topologies, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, 2020, **30**(4),1-6.
- [46] Zhou Y., Chen Y., Shen J.X., Analysis and Improvement of a Hybrid Permanent-Magnet Memory Motor, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 2016, **31**(3), 915-923.
- [47] Xu G., Liu G., Jiang S., Chen Q., Analysis of a Hybrid Rotor Permanent Magnet Motor Based on Equivalent Magnetic Network, *IEEE Transactions On Magnetics*, 2018, **54**(4),1-9.
- [48] Wu W., Zhu X., Quan L., Du Y., Xiang Z., Zhu X., Design and Analysis of a Hybrid Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor

- Considering Magnetic Saliency and PM Usage, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, 2018, **28**(3),1-6.
- [49] Gu C.L., Chalmers B. J., New Approach to Longitudinal Magnetic Field in Drum Type Machine, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1997, **33**(2), 2041-2042.
- [50] Jagiela M., Garbiec T., Kowol M., Design of High-Speed Hybrid Hysteresis Motor Rotor Using Finite Element Model and Decision Process, *IEEE Trans. On Magnetics*, 2014, **50**(2), 861-864.
- [51] Sridharbabu M., Kosaka T., Matsui N., Design Reconsiderations of High Speed Permanent Magnet Hybrid Excitation Motor for Main Spindle Drive in Machine Tools Based on Experimental Results of Prototype Machine, *IEEE Transactions On Magnetics*, 2011, **47**(10), 4469-4472.
- [52] Aydin M., Huang S., Lipo T. A., Design, Analysis, and Control of a Hybrid Field-Controlled Axial-Flux Permanent-Magnet Motor, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**(1), 78-87.
- [53] Nezamabadi M. M., Afjei E., Torkaman H., Design, Dynamic Electromagnetic Analysis, FEM, and Fabrication of a New Switched-Reluctance Motor With Hybrid Motion, *IEEE Transactions On Magnetics*, 2016, **52**(4), 1-8.
- [54] Li G. J., Hloui S., Ojeda J., Hoang E., Lecrivain M., Gabsi M., Zhu Z. Q., Excitation Winding Short-Circuits in Hybrid Excitation Permanent Magnet Motor, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 2014, **29**(3), 567-575.
- [55] Liu G., Xu G., Zhao W., Du X., Chen Q., Improvement of Torque Capability of Permanent-Magnet Motor by Using Hybrid Rotor Configuration, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 2017, **32**(3), 953-962.
- [56] Zeng X., Quan L., Zhu X., Xu L., Liu F., Investigation of an Asymmetrical Rotor Hybrid Permanent Magnet Motor for Approaching Maximum Output Torque, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, 2019, **29**(2), 1-4.
- [57] Zhang T., Liu X., Mo L., Ye X., Ni W., Ding W., Huang J., Wang X., Modeling and Analysis of Hybrid Permanent Magnet Type Bearingless Motor, *IEEE Transactions On Magnetics*, 2018, **54**(3), 1-4.
- [58] Seo J. M., Ro J-S, Rhyu S. H., Jung I. S., Jung H. K., Novel Hybrid Radial and Axial Flux Permanent-Magnet Machine Using Integrated Windings for High-Power Density, *IEEE Transactions On Magnetics*, 2015, **51**(3),1-4.
- [59] Yu D., Huang X., Zhang X., Zhang J., Lu Q., Fang Y., Optimal Design of Outer Rotor Interior Permanent Magnet Synchronous Machine With Hybrid Permanent Magnet, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, 2019, **29**(2), 1-5.

- [60] Jeong C.-L., Kim Y. K., Hur J., Optimized Design of PMSM With Hybrid-Type Permanent Magnet for Improving Performance and Reliability, *IEEE Transactions Industry Applications*, 2019, **55**(5), 4692-4701.
- [61] Xu G., Zhao W., Chen Q., Du X., Principle of Torque-Angle Approaching in a Hybrid Rotor Permanent-Magnet Motor, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, **66**(4), 2580-2591.
- [62] Ugale R.T., Chaudhari B.N., Rotor Configurations for Improved Starting and Synchronous Performance of Line Start Permanent-Magnet Synchronous Motor, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, **64**(1), 138-148.
- [63] Pompermaier C., Washigton J., Sjöberg L., Axial Flux PM Machines for Compressor Application, *International Conference on Powder Metallurgy in Asia*, Hsinchu, Tayvan, 9 - 11 Nisan 2017.
- [64] Miller T. J. E., *SPEED's Electric Motors*, University of Glasgow, 2002.
- [65] Aydın M., Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Disc Motors For Smooth Torque Traction Drive Applications, Doktora Tezi, University of Wisconsin-Madison, Madison, ABD, 2004.
- [66] [https:// www. tatasteleurope. Com /ts /engineering /products /electrical -steel](https://www.tatasteleurope.com/ts/engineering/products/electrical-steel) (Ziyaret Tarihi: 25 Şubat 2021).
- [67] [https:// www. arnoldmagnetics. Com /products /neodymium-iron-boron-magnets](https://www.arnoldmagnetics.com/products/neodymium-iron-boron-magnets) (Ziyaret Tarihi: 25 Şubat 2021).
- [68] B. Anderson, Lumped Parameter Thermal Modelling of Electric Machines, Yüksek Lisans Tezi, Chalmers University of Technology, Göteborg, İsviçre, 2013.
- [69] [https:// www. tezmaksan. com.tr /goodway-gs-2600ys-cnc-torna-tezgahi urundetay-1091](https://www.tezmaksan.com.tr/goodway-gs-2600ys-cnc-torna-tezgahi-urundetay-1091), (Ziyaret tarihi: 16 Mart 2021).
- [70] [https:// www. otosoner.com /alternator-kapak-cesitlerimiz- pmk276?syf=4](https://www.otosoner.com/alternator-kapak-cesitlerimiz-pmk276?syf=4), (Ziyaret tarihi: 16 Mart 2021).



Ek-A

Bu bölümde, YM motorlar için geliştirilen relüktans tabanlı modelleme çalışmaları için oluşturulan kodlar verilmiştir. Bu kodlar sayesinde motora ait hava aralığı akı yoğunlu elde edilip, nümerik hesaplamalarla önce zıt EMK ardından da çıkış momentinin elde edilmesinde kullanılan kodlar verilmiştir.

```
clc; clear all; close all;
```

```
%Sabitler;
```

```
nu0=4*pi*10^(-7); nur=8000; npm=1.09; nh=1;
```

```
%Br=1.2; %N35 Br değeri
```

```
Br=1.2*(1-(180-20)*0.12/100); %sıcaklık etkisi ile Br değerindeki düşüş miktarı
```

```
Lstk=110/1000;
```

```
error=0.00001; %nonlinear model etkisi hesaplanırken kullanılıyor
```

```
counter=0; %nonlinear modelin kaç kere göngüye girdiği
```

```
Btemp=0; %nonlinear etki hesabında kullanılıyor
```

```
Rro=52/1000; N=11; coil_number=10; pole_pairs=10/2; wm=1000*2*pi()/60;
```

```
%m270-35a nur değerleri
```

```
R=[4116.1 4822.9 5376.9 5822.7 6330.0 6631.5 7021.5 7234.3 7546.1 7827.3 8082.1 8314.1 8526.2 8720.8 8900.1 8952.5 8801.1 8649.7 8440.0 8030.8 7626.2 6870.0 5851.3 4856.8 3704.5 2246.1 1239.4 730.1 468.3 322.3 234.9 181.5];
```

```
plot(R, '*-r'); figure;
```

```
nursx1=R(1); nursy1=R(1); nursy2=R(1); nurty1=R(1); nurty2=R(1); nurty3=R(1); nurty4=R(1);
```

```
nurtx1=R(1); nurtx2=R(1); nurb1=R(1); nursx3=R(1); nursx5=R(1); nurr1=R(1);
```

```
nursx1p=R(1); nursy1p=R(1); nursy2p=R(1); nurty1p=R(1); nurty2p=R(1); nurty3p=R(1); nurty4p=R(1);
```

```
nurtx1p=R(1); nurtx2p=R(1); nurb1p=R(1); nursx3p=R(1); nursx5p=R(1); nurr1p=R(1);
```

```
nursx1e=1; nursy1e=1; nursy2e=1; nurty1e=1; nurty2e=1; nurty3e=1; nurty4e=1; nurtx1e=1;
```

```
nurtx2e=1; nurb1e=1; nursx3e=1; nursx5e=1; nurr1e=1;
```

```
% relüktans parametreleri
```

```
lRpm1=4.75/1000; wRpm1=10.81/1000; fim1=Br*wRpm1*Lstk;
```

```
lrg=1.1/1000; wrg=4.06/1000; lrg1=1.1/1000; wrg1=1.5/1000; lrg1x=(1.5/2)/1000; wrg1x=1.5/1000;
```

```
lrg1y=(1.5/2)/1000; wrg1y=1.5/1000; lrsx1=0.71/1000; wrsx1=1.5/1000; lrsy1=0.925/1000; wrsy1=4.22/1000;
```

```
lrsy2=0.925/1000; wrsy2=4.22/1000; lrty1=5.5/1000; wrty1=7/1000; lrty2=5.5/1000; wrty2=7/1000;
```

```
lrty3=5.5/1000; wrty3=7/1000; lrty4=9.5/1000; wrty4=7/1000; lrtx1=3.5/1000; wrtx1=11/1000;
```

```
lrtx2=3.5/1000; wrtx2=3.5/1000; lrb1=17/1000; wrb1=8/1000; lrg2x=(1.5/2)/1000; wrg2x=1.5/1000;
```

```
lrg2=0.55/1000; wrg2=1.5/1000; lrgo1=1.5/1000; wrgo1=1.5/1000; lrg3=1.5/1000; wrg3=1.1/1000;
```

```
lrg3x=4.06/1000; wrg3x=1.1/1000; lrg3y=(0.55*2/3)/1000; wrg3y=4.06/1000;
```

```
lrsx3=(4.06/2)/1000; wrsx3=2/1000; lrsx5=(4.06/2)/1000; wrsx5=2/1000; lrox1=5.7/1000; wrox1=11/1000;
```

```
lrox2=8/1000; wrox2=11/1000; lrr1=9.75/1000; wrr1=10.26/1000;
```

```
%Relüktansların tanımlanması: hava ve mıknatıs relüktansları
```

```
Rpm1=lRpm1/(nu0*npm*wRpm1*Lstk); Rg=lrg/(nu0*nh*wrg*Lstk); Rg1=lrg1/(nu0*nh*wrg1*Lstk);
```

```
Rg1x=lrg1x/(nu0*nh*wrg1x*Lstk); Rg1y=lrg1y/(nu0*nh*wrg1y*Lstk); Rg2x=lrg2x/(nu0*nh*wrg2x*Lstk);
```

```
Rg2=lrg2/(nu0*nh*wrg2*Lstk); Rgo1=lrgo1/(nu0*nh*wrgo1*Lstk); Rg3=lrg3/(nu0*nh*wrg3*Lstk);
```

```
Rg3x=lrg3x/(nu0*nh*wrg3x*Lstk); Rg3y=lrg3y/(nu0*nh*wrg3y*Lstk); Rox1=lrox1/(nu0*nh*wrox1*Lstk);
```

```
Rox2=lrox2/(nu0*nh*wrox2*Lstk);
```

```
while(1)
```

```
counter = counter + 1;
```

```
nursx1p=nursx1; nursy1p=nursy1; nursy2p=nursy2; nurty1p=nurty1; nurty2p=nurty2;
```

```
nurty3p=nurty3; nurty4p=nurty4; nurtx1p=nurtx1; nurtx2p=nurtx2; nurb1p=nurb1;
```

```
nursx3p=nursx3; nursx5p=nursx5; nurr1p=nurr1;
```

```
%Nüve relüktansları
```

```
Rsx1=lrsx1/(nu0*nursx1*wrsx1*Lstk); Rsy1=lrsy1/(nu0*nursy1*wrsy1*Lstk); Rsy2=lrsy2/(nu0*nursy2*wrsy2*Lstk);
```

```
Rty1=lrty1/(nu0*nurty1*wrty1*Lstk); Rty2=lrty2/(nu0*nurty2*wrty2*Lstk); Rty3=lrty3/(nu0*nurty3*wrty3*Lstk);
```

```
Rty4=lrty4/(nu0*nurty4*wrty4*Lstk); Rtx1=lrtx1/(nu0*nurtx1*wrtx1*Lstk); Rtx2=lrty2/(nu0*nurtx2*wrtx2*Lstk);
```

```
Rb1=lrb1/(nu0*nurb1*wrb1*Lstk); Rxs3=lrsx3/(nu0*nursx3*wrsx3*Lstk); Rxs5=lrsx5/(nu0*nursx5*wrsx5*Lstk);
```

```
Rr1=lrr1/(nu0*nurr1*wrr1*Lstk);
```

```

% kısaltma işlemleri
a=Rg1+Rg1y+Rg1x+Rsx1+Rsy1+Rg; b=Rg+Rsy1+Rsy2+Rsy2+Rsy1+Rg; c=Rg+Rsy1+Rsx1+Rg2x+Rg1y+Rg2+Rg2;
d=Rg2+Rg1y+Rgo1+Rsx3+Rsy1+Rg3y+Rg3x+Rg3; e=Rsy1+Rg3y+Rg3x+Rg3;
f=Rr1+Rpm1+Rg2+Rg3+Rg3x+Rg3y+Rsy1+Rsx5+Rsx5+Rsy1+Rg3y+Rg3x+Rg3+Rg2+Rpm1;
g=Rg3+Rg3x+Rg3y+Rsy1; h=Rg3+Rg3x+Rg3y+Rsy1;
k=Rsy2+Rsy2+Rsx5+Rsx5; m=Rty1+Rtx1+Rox1+Rtx1+Rty1+Rsy2+Rsx3+Rgo1+Rg2x+Rsx1+Rsy2;
n=Rtx2+Rox2+Rtx2+Rty3+Rty2+Rtx1+Rox1+Rtx1+Rty2+Rty3; p=Rtx2+Rox2+Rtx2+Rty4+Rb1+Rty4;

```

```

A = [a -(Rsy1+Rg) 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
-(Rsy1+Rg) b -(Rsy1+Rg) 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 -(Rsy1+Rg) c -(Rg2+Rg1y) -(Rg2) 0 0 0 0 0 -(Rsx1+Rg2x) 0 0 0 0 0;
0 0 -(Rg2+Rg1y) d -e 0 0 0 0 0 -(Rgo1+Rsx3) 0 0 0 0 0;
0 0 -(Rg2) -g f -h -(Rg2) 0 0 -(Rsx5+Rsx5) 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 -e d -(Rg2+Rg1y) 0 0 0 0 -(Rgo1+Rsx3) 0 0 0 0;
0 0 0 0 -(Rg2) -(Rg2+Rg1y) c -(Rsy1+Rg) 0 0 0 -(Rsx1+Rg2x) 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 -(Rsy1+Rg) b -(Rsy1+Rg) 0 0 -(Rsy2) 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 -(Rsy1+Rg) a 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 -(Rsx5+Rsx5) 0 0 0 0 k -(Rsy2) -(Rsy2) 0 0 0 0;
0 -(Rsy2) -(Rsx1+Rg2x) -(Rgo1+Rsx3) 0 0 0 0 0 -(Rsy2) m -(Rty1) -(Rtx1+Rox1+Rtx1) 0 0 0;
0 0 0 0 0 -(Rgo1+Rsx3) -(Rsx1+Rg2x) -(Rsy2) 0 -(Rsy2) -(Rty1) m 0 -(Rtx1+Rox1+Rtx1) 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 -(Rtx1+Rox1+Rtx1) 0 n -(Rty2+Rty3) -(Rtx2+Rox2+Rtx2) 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -(Rtx1+Rox1+Rtx1) -(Rty2+Rty3) n 0 -(Rtx2+Rox2+Rtx2);
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -(Rtx2+Rox2+Rtx2) 0 p -(Rty4);
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -(Rtx2+Rox2+Rtx2) -(Rty4) p;]; %denklem matrisi

```

```

U = [0;0;0;0;(-fim1*Rpm1-fim1*Rpm1);0;0;0;0;0;0;0;0;0;]; %kaynaklar

```

```

Fi= inv(A)*U; %Akı yoğunluğu vektörü

```

```

%nüve akı yoğunlukları
Bsx1=abs(Fi(1)/(wrsx1*Lstk)); Bsy1=abs((Fi(1)-Fi(2))/(wrsy1*Lstk)); Bsy2=abs((Fi(2))/(wrsy2*Lstk));
Bty1=abs((Fi(11))/(wrty1*Lstk)); Bty2=abs((Fi(13))/(wrty2*Lstk)); Bty3=abs((Fi(13))/(wrty3*Lstk));
Bty4=abs((Fi(13))/(wrty4*Lstk)); Btx1=abs((Fi(13)-Fi(11))/(wrty1*Lstk)); Btx2=abs((Fi(15)-Fi(13))/(wrty2*Lstk));
Bb1=abs((Fi(13))/(wrbl*Lstk)); Bsx3=abs((Fi(11)-Fi(14))/(wrsx3*Lstk)); Bsx5=abs((Fi(10)-Fi(5))/(wrsx5*Lstk));
Br1=abs(Fi(5)/(wrr1*Lstk));

```

```

%yeni nür lerin tanımlanması

```

```

if (Bsx1<=0.15)
nursx1=4116;
elseif (Bsx1>=1.7)
nursx1=181;
else
Btemp=(Bsx1-0.15)/0.05;
nursx1=R(floor(Btemp)+1) + (R(floor(Btemp)+1+1)-R(floor(Btemp)+1))*(Btemp-floor(Btemp));
end

```

```

if (Bsy1<=0.15)
nursy1=4116;
elseif (Bsy1>=1.7)
nursy1=181;
else
Btemp=(Bsy1-0.15)/0.05;
nursy1=R(floor(Btemp)+1) + (R(floor(Btemp)+1+1)-R(floor(Btemp)+1))*(Btemp-floor(Btemp));
end

```

```

if (Bsy2<=0.15)
nursy2=4116;
elseif (Bsy2>=1.7)
nursy2=181;
else
Btemp=(Bsy2-0.15)/0.05;
nursy2=R(floor(Btemp)+1) + (R(floor(Btemp)+1+1)-R(floor(Btemp)+1))*(Btemp-floor(Btemp));
end

```

```

if (Bty1<=0.15)
nurty1=4116;
elseif (Bty1>=1.7)
nurty1=181;
else
Btemp=(Bty1-0.15)/0.05;
nurty1=R(floor(Btemp)+1) + (R(floor(Btemp)+1+1)-R(floor(Btemp)+1))*(Btemp-floor(Btemp));
end

```

```

if (Bty2<=0.15)
  nurty2=4116;
elseif (Bty2>=1.7)
  nurty2=181;
else
  Btemp=(Bty2-0.15)/0.05;
  nurty2=R(floor(Btemp)+1) + (R(floor(Btemp)+1+1)-R(floor(Btemp)+1))*(Btemp-floor(Btemp)) ;
end

if (Bty3<=0.15)
  nurty3=4116;
elseif (Bty3>=1.7)
  nurty3=181;
else
  Btemp=(Bty3-0.15)/0.05;
  nurty3=R(floor(Btemp)+1) + (R(floor(Btemp)+1+1)-R(floor(Btemp)+1))*(Btemp-floor(Btemp)) ;
end

if (Bty4<=0.15)
  nurty4=4116;
elseif (Bty4>=1.7)
  nurty4=181;
else
  Btemp=(Bty4-0.15)/0.05;
  nurty4=R(floor(Btemp)+1) + (R(floor(Btemp)+1+1)-R(floor(Btemp)+1))*(Btemp-floor(Btemp));
end

if (Btx1<=0.15)
  nurtx1=4116;
elseif (Btx1>=1.7)
  nurtx1=181;
else
  Btemp=(Btx1-0.15)/0.05;
  nurtx1=R(floor(Btemp)+1) + (R(floor(Btemp)+1+1)-R(floor(Btemp)+1))*(Btemp-floor(Btemp));
end

if (Btx2<=0.15)
  nurtx2=4116;
elseif (Btx2>=1.7)
  nurtx2=181;
else
  Btemp=(Btx2-0.15)/0.05;
  nurtx2=R(floor(Btemp)+1) + (R(floor(Btemp)+1+1)-R(floor(Btemp)+1))*(Btemp-floor(Btemp)) ;
end

if (Bb1<=0.15)
  nurb1=4116;
elseif (Bb1>=1.7)
  nurb1=181;
else
  Btemp=(Bb1-0.15)/0.05;
  nurb1=R(floor(Btemp)+1) + (R(floor(Btemp)+1+1)-R(floor(Btemp)+1))*(Btemp-floor(Btemp));
end

if (Bsx3<=0.15)
  nursx3=4116;
elseif (Bsx3>=1.7)
  nursx3=181;
else
  Btemp=(Bsx3-0.15)/0.05;
  nursx3=R(floor(Btemp)+1) + (R(floor(Btemp)+1+1)-R(floor(Btemp)+1))*(Btemp-floor(Btemp));
end

if (Bsx5<=0.15)
  nursx5=4116;
elseif (Bsx5>=1.7)
  nursx5=181;
else
  Btemp=(Bsx5-0.15)/0.05;
  nursx5=R(floor(Btemp)+1) + (R(floor(Btemp)+1+1)-R(floor(Btemp)+1))*(Btemp-floor(Btemp)) ;
end

if (Br1<=0.15)
  nurr1=4116;

```



```

elseif (Br1>=1.7)
    nurr1=181;
else
    Btemp=(Br1-0.15)/0.05;
    nurr1=R(floor(Btemp)+1) + (R(floor(Btemp)+1+1)-R(floor(Btemp)+1))*(Btemp-floor(Btemp)) ;
end

nursx1e=100*(nursx1p-nursx1)/nursx1; nursyle=100*(nursy1p-nursy1)/nursy1; nursy2e=100*(nursy2p-nursy2)/nursy2;
nurty1e=100*(nurty1p-nurty1)/nurty1; nurty2e=100*(nurty2p-nurty2)/nurty2; nurty3e=100*(nurty3p-nurty3)/nurty3;
nurty4e=100*(nurty4p-nurty4)/nurty4; nurtx1e=100*(nurtx1p-nurtx1)/nurtx1; nurtx2e=100*(nurtx2p-nurtx2)/nurtx2;
nurb1e=100*(nurb1p-nurb1)/nurb1; nursx3e=100*(nursx3p-nursx3)/nursx3; nursx5e=100*(nursx5p-nursx5)/nursx5;
nurr1e=100*(nurr1p-nurr1)/nurr1;

    if ((abs(nursx1e) <=error) & (abs(nursy1e) <=error) & (abs(nursy2e) <=error) & (abs(nurty1e) <=error) & (abs(nurty2e)
<=error) & (abs(nurty3e) <=error) & (abs(nurty4e) <=error) & (abs(nurtx1e) <=error) & (abs(nurtx2e) <=error) & (abs(nurb1e)
<=error) & (abs(nursx3e) <=error) & (abs(nursx5e) <=error) & (abs(nurr1e) <=error))
        break
    end
end

B1=Fi(1)/(wrg1*Lstk); %hava araligi 1 akı yoğunluğu
B2=(Fi(2)-Fi(1))/(wrg*Lstk) %hava araligi 2 akı yoğunluğu
B3=(Fi(3)-Fi(2))/(wrg*Lstk) %hava araligi 3 akı yoğunluğu
B4=(Fi(5)-Fi(3))/(wrg2*Lstk); %hava araligi 4 akı yoğunluğu
B5=(Fi(5)-Fi(4))/(wrg3y*Lstk); %hava araligi 5 akı yoğunluğu

Bpoley = [-B1 -B1 -B2 -B2 -B3 -B4 -B5 0 B5 B4 B3 B2 B2 B1 B1 B2 B2 B3 B4 B5 0 -B5 -B4 -B3 -B2 -B2 -B1 -B1 -B2 -B2 -
B3 -B4 -B5];
Bpoley = [0.00 0.81 3.81 6 8.19 12.00 15.81 18.00 20.19 24.00 27.81 30 32.19 35.19 36.81 39.81 42 44.19 48.00 51.81 54.00
56.19 60.00 63.81 66 68.19 71.19 72.81 75.81 78 80.19 84.00 87.81];
Bpoley = Bpoley*pi()/180;
plot(Bpoley,Bpoley,'*-')
xx=0:0.001:87.81*pi()/180;
yy=spline(Bpoley,Bpoley,xx);

figure
plot(xx,yy)

bemfA=2*coil_number*N*yy*Lstk*Rro*wm;
x=0:0.01:(72*pi()/180);
figure
plot(bemfA);

```

Ek-B

Bu bölümde, YM ve DM rotor yapılarının birleşiminden oluşan hibrit yapının optimum şekilde bir araya getirilebilmesi için geliştirilen optimizasyon kodları verilmiştir.

```
clc
clear all
close all

%değişken tanımlarının yapılması
%zaman ve çıkış momenti verisi
time = [0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00
1.10 1.20 1.30 1.40 1.50 1.60 1.70 1.80 1.90 2.00 2.10
2.20 2.30 2.40 2.50 2.60 2.70 2.80 2.90 3.00 3.10 3.20
3.30 3.40 3.50 3.60 3.70 3.80 3.90 4.00 4.10 4.20 4.30
4.40 4.50 4.60 4.70 4.80 4.90 5.00 5.10 5.20 5.30 5.40
5.50 5.60 5.70 5.80 5.90 6.00 6.10 6.20 6.30 6.40 6.50
6.60 6.70 6.80 6.90 7.00 7.10 7.20 7.30 7.40 7.50 7.60
7.70 7.80 7.90 8.00 8.10 8.20 8.30 8.40 8.50 8.60 8.70
8.80 8.90 9.00 9.10 9.20 9.30 9.40 9.50 9.60 9.70 9.80
11.00 11.10 11.20 11.30 11.40 11.50 11.60 11.70 11.80 11.90 12.00
13.20 13.30 13.40 13.50 13.60 13.70 13.80 13.90 14.00 14.10 14.20
14.30 14.40 14.50 14.60 14.70 14.80 14.90 15.00 15.10 15.20 15.30
15.40 15.50 15.60 15.70 15.80 15.90 16.00 16.10 16.20 16.30 16.40
16.50 16.60 16.70 16.80 16.90 17.00 17.10 17.20 17.30 17.40 17.50
17.60 17.70 17.80 17.90 18.00 18.10 18.20 18.30 18.40 18.50 18.60
19.80 19.90];

tout_SPM = [20.3695 20.4226 20.4778 20.5245 20.5737 20.6217 20.6710 20.7174 20.7649 20.8122
20.8606 20.9092 20.9588 21.0093 21.0611 21.1135 21.1664 21.2199 21.2728 21.3235
21.3745 21.4214 21.4624 21.4905 21.5245 21.5425 21.5484 21.5345 21.5273 21.4969
21.4513 21.3903 21.3257 21.2429 21.1484 21.0442 20.9320 20.8091 20.6799 20.5460
20.4057 20.2637 20.1198 19.9757 19.8291 19.6907 19.5533 19.4206 19.2892 19.1758
19.0661 18.9660 18.8728 18.7973 18.7300 18.6744 18.6291 18.5963 18.5731 18.5593
18.7356 18.7612 18.7864 18.8092 18.8357 18.8593 18.8820 18.9023 18.9253 18.9454
18.9642 18.9819 18.9998 19.0159 19.0310 19.0455 19.0592 19.0718 19.0834 19.0945
19.1579 19.1583 19.1590 19.1576 19.1559 19.1533 19.1505 19.1463 19.1415 19.1355
19.1291 19.1216 19.1130 19.1024 19.0907 19.0783 19.0646 19.0498 19.0342 19.0185
19.0004 18.9820 18.9624 18.9439 18.9202 18.8971 18.8723 18.8486 18.8188 18.7883
18.7523 18.7135 18.6695 18.6227 18.5723 18.5187 18.4609 18.3989 18.3315 18.2587
18.1802 18.0951 18.0030 17.9041 17.8001 17.6868 17.5688 17.4465 17.3259 17.1906
17.0583 16.9247 16.7996 16.6606 16.5351 16.4182 16.3129 16.2086 16.1219 16.0483
15.9883 15.9418 15.9145 15.9031 15.9086 15.9364 15.9811 16.0439 16.1267 16.2349
16.3527 16.4897 16.6443 16.8204 16.9949 17.1835 17.3789 17.5812 17.7787 17.9757
19.6288 19.7271 19.8191 19.9048 19.9840 20.0575 20.1276 20.1929 20.2569 20.3128 ];

tout_IPM = [16.5962 16.5666 16.5368 16.5068 16.4737 16.4385 16.4021 16.3652 16.3267 16.2874
16.2478 16.2076 16.1668 16.1260 16.0856 16.0454 16.0059 15.9673 15.9296 15.8932
15.8585 15.8255 15.7945 15.7659 15.7395 15.7160 15.6953 15.6782 15.6626 15.6508
15.6421 15.6367 15.6331 15.6326 15.6343 15.6381 15.6430 15.6489 15.6550 15.6609
15.6660 15.6691 15.6700 15.6676 15.6613 15.6500 15.6337 15.6108 15.5812 15.5445
15.5002 15.4473 15.3867 15.3191 15.2434 15.1600 15.0709 14.9768 14.8777 14.7754
13.8386 13.7973 13.7653 13.7445 13.7280 13.7215 13.7225 13.7324 13.7444 13.7633
13.7863 13.8137 13.8428 13.8738 13.9053 13.9374 13.9686 13.9980 14.0255 14.0508
13.7915 13.7474 13.7007 13.6514 13.5995 13.5446 13.4862 13.4239 13.3579 13.2881
13.2144 13.1371 13.0559 12.9710 12.8813 12.7881 12.6906 12.5900 12.4837 12.3747
12.2624 12.1475 12.0286 11.9092 11.7888 11.6683 11.5481 11.4314 11.3178 11.2089
11.1072 11.0133 10.9279 10.8542 10.7959 10.7475 10.7146 10.7001 10.7073 10.7247
10.7630 10.8224 10.9020 10.9945 11.1067 11.2367 11.3815 11.5394 11.7104 11.8927
12.0838 12.2840 12.4893 12.6995 12.9132 13.1291 13.3454 13.5609 13.7746 13.9825
14.1911 14.3929 14.5881 14.7700 14.9579 15.1317 15.2960 15.4458 15.5999 15.7373
15.8633 15.9781 16.0889 16.1858 16.2725 16.3502 16.4191 16.4777 16.5280 16.5704
16.6029 16.6286 16.6479 16.6601 16.6637 16.6645 16.6599 16.6498 16.6329 16.6154 ];

elapsed_time=0;

%motor parametreleri
segment_number=4; slot_number=18; pole_number=6; Lstk=110;
optimum_stk=Lstk/segment_number; optimum_skew=360/slot_number; magnet_step=8; %10 olarak değiştirilecek
```

```

%tout data analizi periyot, örnekleme frekansı, boyut, örnek sayısı
[M,xx]= size(tout_SPM); period=(time(end)+(time(end)-time(end-1))); deltat=period/xx*1; sample_freq=1/deltat;

%imknatis paket boyları
L1=Lstk/segment_number; L2=Lstk/segment_number; L3=Lstk/segment_number; L4=Lstk/segment_number;
%imknatis kaykçı açıları
alpha1=0;alpha2=0;alpha3=0;alpha4=0;
%segmentlerin vuruntu momenti etkisi
tout1=0;tout2=0;tout3=0;tout4=0;

%maksimum ortalama momenti veren konfigürasyon [max_mean_tout L1 L2 L3 L4 alpha1 alpha2 alpha3 alpha4]
min_variations=[0 0 0 0 0 0 0 0]; new_tout=[zeros(1,max(size(tout_SPM)))]);
max_mean_tout=mean(tout_SPM); new_mean_tout=mean(tout_SPM);

min_trip=max(tout_SPM)-min(tout_SPM); new_trip=min_trip;

%döngü kısaltmaları
Lalt=optimum_stk*0.5; Lstep=optimum_stk/magnet_step; Lust=optimum_stk*1.5;

figure; plot(time,tout_SPM,'r*'); hold on; plot(time,tout_IPM,'g*')

C1=cosd((pole_number/2)*(optimum_skew/segment_number*0-optimum_skew/2));
C2=cosd((pole_number/2)*(optimum_skew/segment_number*1-optimum_skew/2));
C3=cosd((pole_number/2)*(optimum_skew/segment_number*2-optimum_skew/2));
C4=cosd((pole_number/2)*(optimum_skew/segment_number*3-optimum_skew/2));

for L1=41.25:Lstep:41.25
for L2=Lalt:Lstep: Lust %Lust yerine Lstk-L1
for L3=Lalt:Lstep: Lust % Lust yerine Lstk-L1-L2
for L4=Lstk-L1-L2-L3:Lstep: Lstk-L1-L2-L3 % Lust yerine Lstk-L1-L2-L3
if ((L1+L2+L3+L4>Lstk-Lstep) &(L1+L2+L3+L4<Lstk+Lstep) )
for alpha2=0:deltat:optimum_skew %optimum_skew*1.2 olarak değiştirilecek
for alpha3=0:deltat:optimum_skew
for alpha4=0:deltat:optimum_skew
C2=cosd((pole_number/2)*(alpha2-optimum_skew/2));
C3=cosd((pole_number/2)*(alpha3-optimum_skew/2));
C4=cosd((pole_number/2)*(alpha4-optimum_skew/2));
%SPM SPM IPM IPM
tout1 = C1*(L1*tout_SPM/Lstk);
tout2 = C2*(L2*ofset_array(tout_SPM,alpha2*sample_freq,xx)/Lstk);
tout3 = C3*(L3*ofset_array(tout_IPM,alpha3*sample_freq,xx)/Lstk);
tout4 = C4*(L4*ofset_array(tout_IPM,alpha4*sample_freq,xx)/Lstk);
new_trip=max(tout1+tout2+tout3+tout4)-min(tout1+tout2+tout3+tout4);
if new_trip < min_trip
min_trip=new_trip;
new_mean_tout=mean(tout1+tout2+tout3+tout4);
new_tout=tout1+tout2+tout3+tout4;
min_variations = [min_trip new_mean_tout L1 L2 L3 L4 alpha1 alpha2 alpha3 alpha4];
end %new_mean_tout
end % alpha4
end %alpha3
end %alpha2
end %Lstk
end %L4
end %L3
end %L2
end %L1

figure; plot(time,new_tout,'LineWidth',2); hold on; plot(time,tout_SPM,'r*'); plot(time,tout_IPM,'g*');
min_variations

```

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Ocak O.**, Aydın M., An Innovative Semi-FEA Based, Variable Magnet-Step-Skew to Minimize Cogging Torque and Torque Pulsations in Permanent Magnet Synchronous Motors, *IEEE Access*, 2020, **8**(1),210775-210783.
- [2] Aydın M., **Ocak O.**, Demir Y., Influence of Varying Magnet Pole-arcs and Step-skew on Performance of Permanent Magnet Synchronous Motors, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2020, **28**(1), 3304-3318.
- [3] **Ocak O.**, Aydın M., Development of a 7.5kW High Speed Interior Permanent Magnet Synchronous Spindle Motor for CNC Milling Machine, 20th International Conference on Electrical Machines, Alexandroupoli, Yunanistan, 3 - 6 Eylül 2018.
- [4] **Ocak O.**, Aydın M., A New Variable Step Skew Approach for Minimizing Torque Pulsations in Permanent Magnet Synchronous Motors, *International Magnetics Conference*, Singapur, 23 - 27 Nisan 2018.
- [5] **Ocak O.**, Aydın M., A New Hybrid Permanent Magnet Synchronous Motor With Two Different Rotor Sections, *IEEE Transaction on Magnetics*, 2017, **53**(11), 1-5.
- [6] **Ocak O.**, Aydın M., A New Hybrid Permanent Magnet Synchronous Motor With Two Different Rotor Sections, *International Magnetics Conference*, Dublin, İrlanda, 24 - 28 Nisan 2017.
- [7] **Ocak O.**, Payza Z., Kocabalkan E. M., Özdiñer B., Aydın M., Sürekli Miknatıslı Senkron Motorlarda Epoksi Malzemesinin Motor Termal Performansına Etkisi, *Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı*, Bursa, Türkiye, 1 - 3 Aralık 2016.
- [8] Demir Y., **Ocak O.**, Ulu Y., M. Aydın, Impact of Lamination Processing Methods on Performance of Permanent Magnet Synchronous Motors, *International Conference on Electrical Machines*, Berlin, Almanya, 2-5 Eylül 2014.
- [9] **Ocak O.**, Yılmaz D., Aydın M., Fırçasız, Dış Rotorlu Elektrikli Bisiklet Motoru Tasarımı, Üretimi Ve Deneysel Doğrulaması, *Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı*, Bursa, Türkiye, 27 - 29 Kasım 2014.

- [10] Güleç M., Yolaçan E., Demir Y., **Ocak O.**, Aydın M., Modeling Based On 3D Finite Element Analysis and Experimental Study Of a 24-Slot 8-Pole Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Motor For No Cogging Torque and Sinusoidal Back EMF, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2013, **24**(1), 262-275.
- [11] Demir Y., **Ocak O.**, Aydın M., Design, Optimization and Manufacturing of A Spoke Type Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Low Voltage-High Current Servo Applications, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Chicago, ABD, 12-15 Mayıs 2013.
- [12] Demir Y., **Ocak O.**, Aydın M., Sürekli Mıknatıslı AC Servomotor Tasarımında Radyel ve Paralel Mıknatıslamanın Motor Performansına Etkisi, *Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı*, Bursa, Türkiye, 29 Kasım - 1 Aralık 2012.
- [13] Güleç M., Aydın M., **Ocak O.**, Yolaçan E., Sürekli Mıknatıslı Disk Motorların Tasarımı ve Üretimi, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Niğde, Türkiye, 11-13 Ekim 2012.
- [14] Demir Y., **Ocak O.**, Ertuğrul B.T., Sincar E., Aydın M., Mobil Robot Uygulamaları için Sürekli Mıknatıslı AC Servomotor Tasarımı, Analizi ve Deneysel Doğrulaması, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Niğde, Türkiye, 11-13 Ekim 2012.
- [15] Aydın M., **Ocak O.**, Ertugrul B. T., Sincar E., Oysu C., Design, Analysis and Experimental Verification of a Permanent Magnet AC Servomotor for Mobile Robot Applications, *International Conference on Electrical Machines*, Marseille, Fransa, 2 - 5 Eylül 2012.
- [16] Aydın M., **Ocak O.**, Albaş G. Ç., Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Doğrudan Sürürlü Beyaz Eşya Uygulamalarında Kullanımı, *EMO Bilimsel Dergi*, 2012, **2**(3),7-11.
- [17] **Ocak O.**, Aydın M., Rotor Segmentation For Spoke Type Interior Permanent Magnet Servomotors, *International Workshop on Research and Education in Mechatronics*, Kocaeli, Türkiye, 15 - 16 Eylül 2011.
- [18] Demir Y., **Ocak O.**, Aydın M., No-Load Analysis Of Permanent Magnet AC Servomotors: A Comparative Study, *International Workshop on Research and Education in Mechatronics*, Kocaeli, Türkiye, 15 - 16 Eylül 2011.
- [19] Yolaçan E., Ozyurt E., **Ocak O.**, Aydın M., Cogging Torque Minimization and Torque Quality of Radial and Axial Flux Permanent Magnet Servomotors, *International Workshop on Research and Education in Mechatronics*, Çek Cumhuriyeti, 18 Ağustos 2010.
- [20] **Ocak O.**, Oysu C., Bingül Z., Delta Robot Tasarımı ve Simülasyonu, *Ulusal Otomatik Kontrol Toplantısı*, Kocaeli, Türkiye, 21 - 23 Eylül 2010.

ÖZGEÇMİŞ

Oğuzhan OCAK, Şavşat / Artvin'lidir. Evli ve 2 çocuk babasıdır. İlk ve orta öğrenimini Arhavi/Artvin' de, lise öğrenimini ise Derince/Kocaeli' de tamamladı. 2004 yılında kazandığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nden 2009 yılında Mekatronik Mühendisi olarak mezun oldu. 2009-2018 yılları arasında sırasıyla B/S/H/ Ev Aletleri, MDS Motor ve Akım Metal firmalarında çalıştı. 2018 yılından beri kurucu ortağı olduğu Yektamot Motor Teknolojileri San. Ve Tic. A.Ş. şirketinde elektrik motorları ile ilgili çalışmalarına devam etmektedir.

