

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**ÖZGÜN BİR SARGI YAPISI YAKLAŞIMI İLE DOKUZ FAZLI  
DENGESİZ VE ASİMETRİK SARGILI YÜZEY VE GÖMÜLÜ  
MIKNATISLI SENKRON MOTORLARIN ELEKTRİKLİ TAŞIT  
UYGULAMASI İÇİN TASARIMI, MODELLENMESİ VE  
DENEYSEL DOĞRULANMASI**

**YÜCEL DEMİR**

**KOCAELİ 2021**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**ÖZGÜN BİR SARGI YAPISI YAKLAŞIMI İLE DOKUZ FAZLI**  
**DENGESİZ VE ASİMETRİK SARGILI YÜZEY VE GÖMÜLÜ**  
**MIKNATISLI SENKRON MOTORLARIN ELEKTRİKLİ TAŞIT**  
**UYGULAMASI İÇİN TASARIMI, MODELLENMESİ VE**  
**DENEYSEL DOĞRULANMASI**

**YÜCEL DEMİR**

**Doç. Dr. Metin AYDIN**

**Danışman, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Prof. Dr. Zafer BİNGÜL**

**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Prof. Dr. Ali Bekir YILDIZ**

**Jüri Üyesi, Üniversitesi**

.....

**Prof. Dr. Lale TÜKENMEZ ERGENE**

**Jüri Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi**

.....

**Prof. Dr. Ahmet M. HAVA**

**Jüri Üyesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi**

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 01.02.2021**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Kocaeli Üniversitesinde 2007 yılında başlayan lisans serüvenimin son yılında gerçekleştirilen dönem ve bitirme projeleri sonucunda ortaya çıkan ilk bildiri ile birlikte akademik kariyer benim için anlam kazanmaya başlamıştı. Yüksek lisans programı süresince gerçekleştirdiğimiz her yayında aynı heyecanı yaşayıp bu heyecanı şu ana kadar taşımak benim en büyük motivasyon kaynağım oldu. Doktora tez çalışma süresi zorlu ve yorucu olarak görünse de aslında biriktirilen ve öğrenilen tecrübeler sayesinde birçok açıdan kendimi geliştirmeme oldukça katkı sağladı.

Yaklaşık 10 yıl önce lisans bitirme tezi ile başlayan, akademik hayatım boyunca beni yaratıcı fikirleri ve deneyimleri ile yönlendirip rehberlik eden, birlikte gerçekleştirdiğimiz araştırma-geliştirme projelerinde ve akademik çalışmalarda yer almaktan keyif aldığım, doktora çalışmalarım boyunca destek, katkı ve cesaretlendirmelerinden dolayı danışman hocam Doç. Dr. Metin Aydın'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışmam boyunca bana zaman ayırıp birçok faydalı tartışma yaptığımız ve değerli fikirlerini paylaşarak tez çalışmamı sundukları desteklerden dolayı tez izleme komitesinin değerli üyeleri Prof. Dr. Zafer BİNGÜL ve Prof. Dr. Ali Bekir Yıldız'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmaları kapsamında, 2019/032 numaralı proje ile Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi Koordinasyon Birimi'ne verdikleri desteklerden dolayı, doktora çalışmalarım süresince gerçekleştirilen tüm akademik çalışmalarında sağladıkları desteklerden dolayı MDS Motor Tasarım Ltd.'ye ve birlikte çalıştığım ekip arkadaşlarıma teşekkür ederim. Ayrıca doktora süresi boyunca tez konusu ile alakalı gerçekleştirilen yayınlarda ortak yazar olarak yer alan ve değerli bilgilerini paylaşan Dr. Ayman El-Refaie'ye teşekkür ederim.

Son olarak, sadece akademik kariyerim boyunca değil tüm hayatım boyunca yanımda olarak desteklerini ve sabırlarını esirgemeyen sevgili anneme, babama ve kardeşime sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım. Ve sevgili eşim Gamze'ye; bu zorlu süreçteki sevgisi, sabrı, anlayışı ve desteği ile hep yanımda olduğu için sonsuz şükranlarımı sunarım. Sizlerin desteği olmadan bu çalışma asla gerçekleştirilemezdi. Bu çalışmayı sizlere adıyorum.

Şubat – 2021

Yücel DEMİR

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	v
TABLolar DİZİNİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiii
ÖZET .....	xvii
ABSTRACT .....	xviii
GİRİŞ .....	1
1. GENEL BİLGİLER .....	6
1.1. Radyal ve Eksenel Akıllı Motorlar .....	7
1.2. Çok fazlı Sistemler .....	8
1.3. Literatür Araştırması .....	10
1.3.1. 4-Faz SMSM çalışmaları .....	11
1.3.2. 5-Faz SMSM çalışmaları .....	13
1.3.3. 6-Faz SMSM çalışmaları .....	16
1.3.3.1. Elektrikli araç uygulamaları için 6-faz SMSM çalışmaları .....	16
1.3.3.2. 6-Faz diğer SMSM çalışmaları .....	24
1.3.3.3. 6-Faz SMSM sürücü ve güç elektriği çalışmaları .....	34
1.3.3.4. 6-Faz asenkron motor ve sürücü çalışmaları .....	35
1.3.4. 7-Faz SMSM çalışmaları .....	35
1.3.5. 8-Faz SMSM çalışmaları .....	36
1.3.6. 9-Faz SMSM çalışmaları .....	36
1.3.7. 10-Faz SMSM çalışmaları .....	41
1.3.8. 12-Faz SMSM çalışmaları .....	42
1.3.9. 15-Faz SMSM çalışmaları .....	42
1.3.10. Patent taraması .....	42
1.3.10.1. 6-Faz patent taraması .....	42
1.3.10.2. 9-Faz patent taraması .....	45
1.4. Elektrikli Araçlar İçin Çok fazlı SMSM Ürünleri .....	49
1.5. Tezin Amacı .....	50
1.6. Özet .....	50
2. ÇOK-FAZ SM SENKRON MOTORLARDA SARGI ALTERNATİFLERİNİN İNCELENMESİ .....	51
2.1. 3-Faz Dengeli ve Dengesiz SMSM'ler .....	52
2.1.1. Dengesiz SMSM seçenekleri .....	56
2.1.2. Farklı oluk-kutup kombinasyonları için çift-katmanlı DSY incelenmesi .....	57
2.1.2.1. İncelenen oluk-kutup kombinasyonları .....	57
2.1.2.2. Seçilen tasarımların sargı şemalarının oluşturulması .....	58
2.1.2.3. Sargı faktörü hesabı .....	63
2.1.2.4. DSY'ne sahip seçeneklerin MMK dağılımları .....	64

2.1.3. 36-Oluk dengeli ve 39-oluk dengesiz sargılı yüzey mıknatıslı motorların performans karşılaştırması .....	66
2.1.3.1. Zıt-EMK gerilim harmoniklerinin ve moment çıkışlarının incelenmesi .....	67
2.1.4. 12-Kutuplu DSY'ne sahip motorun test sonuçları .....	67
2.2. 6-Faz DSY'ne Sahip SM Motorların Performans Karşılaştırılması.....	71
2.2.1. 12-Kutuplu 6-faz motorların performans karşılaştırması .....	71
2.2.2. 12- ve 24-kutuplu DSY'ne sahip 6-faz motorların performans karşılaştırması.....	77
2.2.3. 72-Oluk dengeli ve 78-oluk dengesiz sargı yapısına sahip 6-faz motorların performans karşılaştırması.....	85
2.3. 9-Faz Motorlar için Sargı Alternatiflerinin İncelenmesi .....	86
2.3.1. Çalışma kapsamında incelenen sargı yapıları.....	88
2.3.2. 9-Faz SM motorlar için sargı konfigürasyonları .....	90
2.3.3. Oluk vektörü yaklaşımı .....	91
2.3.4. Sargı yerleşimlerinin 3-faz ve 9-faz SM motorların MMK dağılımı üzerindeki etkisi .....	92
2.3.5. 3-Faz dengeli ve 9-faz dengesiz sargılı SM motorların DMÇK karşılaştırması.....	95
2.3.6. 117-Oluk 36-kutuplu DSY'ne sahip motorların SEA .....	98
2.3.7. 3-Faz dengeli ve 9-faz DSY SM motorların performans karşılaştırması.....	101
2.3.8. 9-Faz DSY'ne sahip motorların test sonuçları ile SEA sonuçlarının karşılaştırılması.....	103
2.4. Özet .....	107
3. YENİ BİR 9-FAZ DAHİLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR TOPOLOJİSİ.....	108
3.1. Önerilen Motor ve GSM Rotor Yapısı .....	109
3.2. 9-Faz Senkron Motor Tasarım Süreci .....	111
3.3. Önerilen 9-Faz Senkron Motor Teknik Özellikleri .....	113
3.4. Özet .....	117
4. 9-FAZ DENGESİZ SARGI YAPILI SMSM 2D SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU.....	118
4.1. 9-Faz DSY'ne Sahip ÇTGSM Motor Ön Tasarımı.....	119
4.2. Çubuk Tip Mıknatısların Etkisi.....	120
4.3. Önerilen AD-ÇTGSM Rotor için Parametrik Analizler .....	123
4.4. Nihai Rotor Geometrisi için Yüksüz ve Yüklü Durum SEA .....	123
4.4.1. Motor performans sonuçları .....	124
4.4.2. Moment-hız eğrisinin elde edilmesi .....	129
4.4.3. Kayıpların incelenmesi.....	133
4.5. 9-Faz DSY'ne Sahip YSM ve GSM Motorların Performans Karşılaştırması.....	140
4.6. AD-ÇTGSM Motor Yapısal Analizleri .....	141
4.7. Motor Isıl Analizleri .....	144
4.8. Motor Boyutlarını Ölçekleme Yöntemi .....	147
4.9. Özet .....	149
5. SONUÇLAR, KATKILAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR .....	150
5.1. Sonuçlar.....	150
5.2. Tezin Katkıları.....	153

5.3. Gelecek Çalışmalar .....	154
KAYNAKLAR .....	155
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	173
ÖZGEÇMİŞ .....	177



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması .....	6
Şekil 1.2. Faz sayılarına göre elektrik motorlarının sınıflandırılması.....	7
Şekil 1.3. SM motor yapıları: (a) RASM motor ve (b) çift-stator-çift-rotorlu EASM motor .....	8
Şekil 1.4. Radyal akıli motorlarda kullanılan farklı tipteki SM motor yapıları: (a) yüzey mıknatıslı, (b) yüzük tip, (c) ardışık-kutuplu, (d) gömülü mıknatıslı rotor yapıları.....	8
Şekil 1.5. Çok fazlı sistemler .....	9
Şekil 1.6. (a) Çift 2-faz motorun sargı yapısı ve (b) yüksüz durum akı çizgileri.....	12
Şekil 1.7. (a) 5-faz motor yapısı ve sargı dağılımı, (b) motorun akı çizgileri dağılımı .....	15
Şekil 1.8. Motor sargı şeması ve prototip motorun test düzeneği.....	17
Şekil 1.9. 12-oluk 10-kutuplu motorun sargı yapıları. (a) 3-faz iki-katmanlı, (b) çift 3-faz iki-katmanlı, (c) 3-faz dört-katmanlı, (d) çift 3-faz dört-katmanlı (önerilen) ve (e) birleştirilmiş yıldız/üçgen bağlantı yapısı.....	17
Şekil 1.10. Çift 3-faza sahip 12-oluk 10-kutuplu motorun stator sargılarının iki oluk kaydırılması .....	18
Şekil 1.11. Entegre taşıt motoru sistemi ve verileri .....	18
Şekil 1.12. A segmente sahip elektrikli araç için: (a) hedeflenen moment-hız karakteristiği ve 6-faz 18- ve 48-oluk 8-kutuplu (c) motor konfigürasyonları .....	19
Şekil 1.13. 3- ve 6-faz evirici yapıları.....	20
Şekil 1.14. (a) 12-oluk ve (b) 18-oluk 10-kutuplu motor modelleri .....	21
Şekil 1.15. 12-oluk ve 18-oluk 10-kutuplu motorların moment-hız ve güç-hız eğrilerinin karşılaştırılması.....	21
Şekil 1.16. 12 ve 18-oluk 10-kutuplu motorların ısı ve mekanik analiz sonuçları .....	21
Şekil 1.17. 24-oluk 22-kutuplu motorun oluk vektörleri ve sargılarının dağılımı .....	22
Şekil 1.18. 24-oluk 28-kutuplu motor prototipi ve deney düzeneği .....	22
Şekil 1.19. (a) Çift 3-faz motor yapısı, (b) önerilen motor sürücü sistemi ve (c) motor test düzeneği.....	23
Şekil 1.20. Oluk-kutup kombinasyonları. Notlar: ★ tek katmanlı, ■ çift katmanlı sargı yapısına uygun olduğunu göstermektedir.....	25
Şekil 1.21. 24-oluk 22-kutuplu motorun tek bir fazının oluk vektörleri yöntemi ile belirlenmesi (a) çift katmanlı (b) tek katmanlı.....	26
Şekil 1.22. Üç farklı 6-faz sargı yapısı oluşturulmuştur .....	26
Şekil 1.23. Çift 3-faz setin (a) aynı fazda ve (b) faz kayması olması durumları .....	27
Şekil 1.24. (a) Önerilen devre ve (b) statorun bir segmenti ve sargı yapısı.....	28

Şekil 1.25. $\theta_s$ faz açısına sahip k tane n-faz sargı dağılımı (a) $n \geq 3$ ve (b) $n=2$ .....	28
Şekil 1.26. (a) 12-oluk 10-kutuplu yapının çift 3-faz sargı yapısı ve (b) sargı bağlantı şekli.....	29
Şekil 1.27. 6-faz mıknatıs destekli senkron relüktans motor prototipi .....	30
Şekil 1.28. 12-oluk 8-kutuplu çift 3-faz motor sargı seçenekleri.....	30
Şekil 1.29. 12-oluk 10-kutuplu çift 3-faz motor sargı seçenekleri.....	30
Şekil 1.30. (a) Sinüzoidal ve (b) sinüzoidal+3.harmonik akımlar .....	31
Şekil 1.31. Motorların çıkış momentlerinin karşılaştırılması.....	31
Şekil 1.32. 12-oluk 10-kutuplu motorun farklı mıknatıs şekilleri.....	32
Şekil 1.33. Motor kontrol yapısı .....	33
Şekil 1.34. 12-oluk 11-kutuplu motorun fazör diyagramları: (a) 3-faz (b) çift 3-faz .....	33
Şekil 1.35. Isıl testlerin yapıldığı test sistemi .....	33
Şekil 1.36. Motor test sistemi.....	34
Şekil 1.37. (a) 6-faz sürekli mıknatıslı doğrusal motor (SMDM) yapısı ve (b) çift üç fazlı 4-bacaklı evirici motor sürücü konfigürasyonu .....	35
Şekil 1.38. 18 oluk 14 kutuplu motor için 3-, 6- ve 9-faz sargı konfigürasyonları .....	37
Şekil 1.39. Önerilen basitleştirilmiş model ve hata toleransı yüksek 9-faz sürücü yapısı.....	38
Şekil 1.40. (a) Moment- ve güç-hız eğrisi ve (b) 9-faz motor modeli .....	38
Şekil 1.41. Geliştirilen sürücü sisteminin gösterimi .....	39
Şekil 1.42. 9-faz SMSM ve asansörün test edildiği gökdelen .....	39
Şekil 1.43. Dış rotor ve iç statora sahip motor yapısı .....	43
Şekil 1.44. 24-oluk 4-kutuplu motor için önerilen 6-faz sargı yapısı .....	43
Şekil 1.45. 24-oluk 4-kutuplu motorun zıt-EMK gerilimleri.....	43
Şekil 1.46. 24-oluk 4-kutuplu yüzey mıknatıslı motor yapısı.....	44
Şekil 1.47. 24-oluk 4-kutuplu yüzey mıknatıslı motor yapısı.....	44
Şekil 1.48. İki 3-faz sargı setinde kullanılan bağlantı şeması .....	45
Şekil 1.49. Önerilen motor sargı bağlantıları .....	45
Şekil 1.50. Çok fazlı elektrik motoru ve sürücü yapısı.....	46
Şekil 1.51. 9-faz sürekli mıknatıslı motor ve sargı setlerinin yapısı.....	47
Şekil 1.52. 9-faz 8-kutuplu motor sargı yapısı.....	47
Şekil 1.53. 9-faz akı anahtarlamalı sürekli mıknatıslı motor kontrol şeması.....	48
Şekil 1.54. 9-faz motor faz bağlantı şeması .....	48
Şekil 1.55. 6-faz motor ve sürücüsü.....	49
Şekil 1.56. 6-faz motor ve sürücüsü .....	49
Şekil 1.57. 9-faz TM4 motor ve sürücüsü.....	50
Şekil 2.1. 3-faz SMSM'ler için stator sargı kategorilerini gösteren oluk-kutup kombinasyonları.....	53
Şekil 2.2. Farklı oluk-kutup kombinasyonları için simetrik sargı gösterimi.....	54
Şekil 2.3. Farklı oluk-kutup kombinasyonları için asimetrik sargı gösterimi.....	55
Şekil 2.4. Dengeli sargıya bir örnek (9-oluk 10-kutup) .....	55
Şekil 2.5. Dengesiz sargıya bir örnek (21-oluk 6-kutup).....	55
Şekil 2.6. Oluk vektörlerinin genel gösterimi .....	59
Şekil 2.7. 39-oluk 12-kutuplu motorun oluk vektörlerinin gösterimi .....	60
Şekil 2.8. İncelenen oluk-kutup kombinasyonlarının sargı yapıları (sadece A-fazı gösterilmiştir).....	61



Şekil 2.9. 39-oluklu motorun her bir fazı için statorundaki her bir bobine ait EMK vektörlerinin gösterimi .....	62
Şekil 2.10. İncelenen oluk-kutup kombinasyonlarının (a) oluk/kutup/faz oranına ve (b) oluk sayısına göre dengesizlik miktarlarının değişimi .....	63
Şekil 2.11. DSY oluk-kutup kombinasyonlarının hava aralığındaki toplam MMK dağılımlarının değişimi .....	65
Şekil 2.12. DSY oluk-kutup kombinasyonlarının toplam MMK dağılımlarının harmonikleri .....	66
Şekil 2.13. Motorların yüksüz durum akı çizgilerinin dağılımları.....	66
Şekil 2.14. 39-oluk ve 36-oluk motorların farklı mıknatis kutup açısı değerleri için hat zıt-EMK gerilimi THB değerlerinin karşılaştırılması .....	68
Şekil 2.15. 39-oluk ve 36-oluk motorların farklı mıknatis kutup açısı değerleri için ortalama moment ve moment dalgalanması değişimlerinin karşılaştırması .....	68
Şekil 2.16. 39-oluk 12-kutuplu DSY motor prototipi .....	69
Şekil 2.17. (a) 1000 rpm rotor hızında SEA ve test zıt-EMK gerilimlerinin karşılaştırılması ve (b) 1000 rpm rotor hızında ölçülen hat gerilimlerinin değişimleri.....	69
Şekil 2.18. Test ve SEA sonucu elde edilen: (a) Moment çıkışı ve (b) moment-akım eğrilerinin karşılaştırılması .....	70
Şekil 2.19. Test sonucu elde edilen akımların değişimleri.....	70
Şekil 2.20. (a) 1 oluk/kutup/faz oranına sahip geleneksel 6-faz (veya çift 3-faz) motor, (b) 1,083 oluk/kutup/faz oranına sahip önerilen 6-faz motor (motorların gösteriminde 1/6 periyodiklik kullanıldı).....	72
Şekil 2.21. (a) Dengeli geleneksel çift 3-faz motor ve (b) dengesiz geleneksel olmayan çift 3-faz motorun fazör diyagramı (A1-B1-C1 birinci 3-faz seti ve A2-B2-C2 ikinci 3-faz seti göstermektedir) .....	73
Şekil 2.22. 72- ve 78-oluk çift 3-faz motorların toplam MMK'lerinin değişimleri.....	73
Şekil 2.23. Çift 3-faz motorların MMK'lerinin harmonik içerikleri.....	74
Şekil 2.24. Motor mıknatis kutup açısının gösterimi .....	74
Şekil 2.25. 72-oluk ve 78-oluklu kaykısız rotorlu motorların mıknatis kutup açısına bağlı olarak maksimum vuruuntu momenti değişimlerinin karşılaştırılması .....	75
Şekil 2.26. 6-faz 78-oluklu motorun mıknatis kutup açısına bağlı olarak hat gerilimi % THB ve % moment dalgalanması değişimleri .....	75
Şekil 2.27. 78-oluk 12-kutuplu motorun yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi .....	76
Şekil 2.28. Simetrik ve asimetrik sargı yapısına sahip motorların yüksüz durum d-eksen akı yoğunluğu değişimlerinin karşılaştırılması .....	76
Şekil 2.29. Çift 3-faz 78-oluklu motorun zıt-EMK gerilimi değişimleri .....	76
Şekil 2.30. 78-oluk 12-kutuplu motorun moment çıkışı .....	77
Şekil 2.31. Çift 3-faz sargı yerleşimi için fazör diyagramı gösterimi .....	78
Şekil 2.32. Sargı setlerinin (a) statorun yarısına yerleştirildiği durum (çalışma kapsamında önerilen sargı setleri arasındaki açı, $\alpha=0^\circ$ )	

	ve (b) stator çevresi boyunca dağıtıldığı durum (bir önceki bölümde incelenen durum, $\alpha=27,5^\circ$ ).....	79
Şekil 2.33.	0,542 oluk/kutup/faz oranına sahip 24-kutuplu 6-faz motor (motorun gösteriminde 1/6 periyodiklik kullanıldı).....	80
Şekil 2.34.	$\alpha=0^\circ$ iken 2 tane eş 3-faz sargı setine sahip 78-oluk 24-kutuplu motorun fazör diyagramları ve faz açıları.....	80
Şekil 2.35.	6-faz 78-oluk 12- ve 24-kutuplu motorların hava aralığı MMK değişimlerinin karşılaştırılması.....	81
Şekil 2.36.	78-oluk 12- ve 24-kutuplu motorların MMK harmoniklerinin karşılaştırılması.....	81
Şekil 2.37.	78-oluk 24-kutuplu motorun yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi.....	83
Şekil 2.38.	78-oluk 12- ve 24-kutuplu motorların vuru mu momentlerinin karşılaştırılması.....	83
Şekil 2.39.	78-oluk 24-kutuplu motorun hat zıt-EMK gerilimi değişimi.....	83
Şekil 2.40.	78-oluk 12- ve 24-kutuplu motorların moment çıkışlarının karşılaştırılması.....	84
Şekil 2.41.	78-oluk 12- ve 24-kutuplu motorların moment-hız eğrilerinin karşılaştırılması.....	84
Şekil 2.42.	78-oluk 12- ve 24-kutuplu motorların moment-akım ilişkileri.....	85
Şekil 2.43.	9-faz sargı yapısına sahip motorların fazör diyagramı için genel gösterim.....	91
Şekil 2.44.	117-oluk (a) 12-kutup ve (b) 36-kutup motorların oluk vektörlerinin gösterimi.....	92
Şekil 2.45.	Dengeli sargı yapısına sahip 117-oluk 12-kutuplu motorun (a) 3-faz seçeneğine ve (b) üç tane 3-faz seçeneğine ait sargı dağılımları (sadece ilk 3-faz gösterilmiştir).....	93
Şekil 2.46.	12-kutuplu dengeli (a) 3-faz sargı ve (b) 3 tane 3-faz sargı seçeneğine sahip SM motorların toplam MMK dağılımları.....	93
Şekil 2.47.	12-kutuplu dengeli 3-faz sargı ve 3 tane 3-faz sargı seçenekli SM motorların toplam MMK harmoniklerinin karşılaştırılması.....	93
Şekil 2.48.	9-faz dengesiz sargı yapısına sahip 117-oluk 36-kutuplu motorun sargı dağılımları için farklı seçenekler: (a) Seçenek1, (b) Seçenek2 ve (c) Seçenek3 (tüm seçenekler için sadece ilk 3-faz sargı seti gösterilmiştir).....	94
Şekil 2.49.	(a) Seçenek1, (b) Seçenek2 ve (c) Seçenek3 sargı konfigürasyonuna sahip 36-kutuplu SM motorun toplam MMK dağılımları.....	95
Şekil 2.50.	36-kutuplu SM motorun üç farklı sargı konfigürasyonu için MMK harmoniklerinin karşılaştırılması.....	95
Şekil 2.51.	DMÇK hesaplamasında referans alınan yönler.....	96
Şekil 2.52.	3-faz dengeli ve 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip motorların dengesiz çekme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	98
Şekil 2.53.	(a) 117-oluk 36-kutuplu motor SEA modeli ve (b) motorun yüksüz durum akı yoğunluklarının değişimi (göstergede max. değer olarak 1.5T alındı).....	99
Şekil 2.54.	(a) Mıknatıs kutup açısının bir fonksiyonu olarak tepeden tepeye vuru mu momenti değişimi ve (b) seçilen mıknatıs kutup açısı için elde edilen vuru mu momenti değişimi.....	99

Şekil 2.55. 117-oluk 36-kutuplu motorun farklı sargı konfigürasyonları için faz gerilimi değişimleri (1000 rpm rotor hızında elde edilmiştir) .....	100
Şekil 2.56. Üç farklı sargı seçeneğine sahip 9-faz 117-oluk 36-kutuplu motorun çıkış momenti değişimlerinin karşılaştırılması (32 $A_{max}$ faz akımında elde edilmiştir) .....	101
Şekil 2.57. 9-faz yüzey mıknatıslı motor prototip üretim görselleri .....	103
Şekil 2.58. Motor test düzeneği .....	104
Şekil 2.59. 117-oluk 36-kutuplu 9-faz motorun vuruş momenti değişimi .....	104
Şekil 2.60. (a) Seçenek1, (b) Seçenek2 ve (c) Seçenek3 için test sonucu elde edilen hat gerilimi değişimleri (200 rpm rotor hızında elde edilmiştir) .....	105
Şekil 2.61. (a) Seçenek1, (b) Seçenek2 ve (c) Seçenek3 için test ve SEA sonucu elde edilen hat gerilimi değişimlerinin karşılaştırması (200 rpm rotor hızında elde edilmiştir) .....	106
Şekil 2.62. (a) Seçenek1 ve (b) Seçenek2 için test ve SEA sonucu elde edilen moment-akım eğrilerinin karşılaştırması (200 rpm rotor hızında elde edilmiştir).....	107
Şekil 2.63. 9-faz DSY motorların test ve SEA sonucu elde edilen moment-hız eğrilerinin karşılaştırması (300 Vdc bara gerilimi için elde edilmiştir) .....	107
Şekil 3.1. Önerilen SMSM’de (a) 9-faz sargıların temsili yerleşiminin ve (b) fazlar ve 3-faz sargı setleri arasındaki açılarının gösterimi .....	109
Şekil 3.2. Önerilen akı destekli gömülü mıknatıslı rotor yapısı.....	111
Şekil 3.3. Tez kapsamında önerilen gömülü mıknatıslı senkron motorun rotor yapısında mıknatıs akı yönlerinin gösterimi .....	111
Şekil 3.4. 9-faz SMSM tasarım aşamaları.....	114
Şekil 3.5. SMSM’lerde moment ve güç bölgelerinin gösterimi ve moment-hız, güç-hız eğrilerinin gösterimi .....	115
Şekil 3.6. Referans olarak alınan 9-faz DSY’ne sahip YSM motor prototipi.....	115
Şekil 3.7. Bazı elektrikli, paralel ya da hibrit elektrikli araçlar için anma batarya gerilimi ve motor maksimum güç seviyeleri.....	116
Şekil 4.1. SEA modelleri: (a) Referans YSM motor, (b) geleneksel çubuk tip GSM (GÇTGSM) rotor ve (c) önerilen akı destekli çubuk tip GSM (AD-ÇTGSM) rotor.....	118
Şekil 4.2. Ön tasarımı gerçekleştirilen 9-faz ÇTGSM motor modeli ve sargı şeması (sadece ilk 3-faz gösterilmiştir).....	119
Şekil 4.3. 9-faz ÇTGSM motorun ön tasarımı sonucunda elde edilen moment-hız eğrisi (300 Vdc bara geriliminde elde edilmiştir).....	119
Şekil 4.4. Çubuk tip motor için mıknatıs uzunluğu ve mıknatıs kutup açısının gösterimi .....	120
Şekil 4.5. Geleneksel ÇTGSM motor için mıknatıs uzunluğu ve mıknatıs kutup açısına göre ortalama moment ve yüzde moment dalgalanması değişimlerinin gösterimi .....	122
Şekil 4.6. Elektromanyetik analizler sırasında değiştirilen parametreler.....	124
Şekil 4.7. İki farklı durum için elde edilen parametrik analiz sonuçları .....	124
Şekil 4.8. Nihai motor geometrisi ve yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi .....	125

Şekil 4.9. Nihai motor geometrisi için yüksüz durumda elde edilen vuru momenti değişimi.....	125
Şekil 4.10. Karar verilen tasarım noktası için A1-fazından elde edilen toplam akı değişimi.....	126
Şekil 4.11. Karar verilen tasarım noktası için elde edilen (a) hat zıt-EMK gerilimi ve (b) hat gerilim harmonikleri değişimleri.....	126
Şekil 4.12. Karar verilen tasarım noktası için elde edilen çıkış momenti değişimi.....	128
Şekil 4.13. Nihai motor geometrisi için elde edilen moment-akım ilişkisi.....	128
Şekil 4.14. d- ve q-eksen endüktanslarının farklı akım değerlerine bağlı olarak değişimleri.....	128
Şekil 4.15. Önerilen AD-ÇTGSM rotorun d- ve q-eksen çizgilerinin gösterimleri.....	129
Şekil 4.16. Bir sürekli mıknatıslı motorda çalışma limitlerinin ve bölgelerinin gösterimi.....	131
Şekil 4.17. Nihai motor geometrisi için ortalama momentin akım kontrol açısına bağlı değişimi.....	132
Şekil 4.18. 1000 rpm hızda farklı d-eksen akımları için terminal geriliminin değişimi.....	132
Şekil 4.19. (a) Alan zayıflatma bölgesi öncesi ve sonrasında izlenen akım yörüngesi ve (b) alan zayıflatma uygulanarak elde edilen moment-hız ve güç-hız eğrilerinin değişimleri.....	133
Şekil 4.20. SMSM'lerde kayıp bileşenlerinin genel gösterimi.....	134
Şekil 4.21. İki katmanlı bir sargıda farklı bobin yerleşimlerinin, strand sayılarının, radyal ve kaçak akıların gösterimi.....	135
Şekil 4.22. Önerilen 9-faz motorda farklı tel çapı, strand sayısı ve bobin yerleşim durumları için AC bakır kayıplarının hıza bağlı değişimleri.....	137
Şekil 4.23. Çubuk tip rotorlu motorun mıknatıslarında oluşan girdap akım yolu.....	138
Şekil 4.24. Farklı hızlarda elde edilen: (a) Rotor demir ve mıknatıs kayıplarının ve (b) AC ve DC bakır kayıplarının ve stator demir kayıplarının değişimleri.....	139
Şekil 4.25. Önerilen 9-faz DSY'ne sahip AD-ÇTGSM motorun verim-hız eğrisi.....	139
Şekil 4.26. 9-faz DSY'ne sahip referans YSM, GÇTGSM ve önerilen AD- ÇTGSM motorların moment-hız eğrilerinin karşılaştırılması (300Vdc bara geriliminde elde edilmiştir).....	141
Şekil 4.27. Mekanik analizi gerçekleştirilen rotor geometrisi ve oluşturulan ağ yapısı.....	142
Şekil 4.28. Mekanik analizde uygulanan sınır koşulları.....	143
Şekil 4.29. Toplam deformasyon değişiminin gösterimi.....	143
Şekil 4.30. Eşdeğer gerilme değişiminin gösterimi.....	144
Şekil 4.31. Isıl analizleri gerçekleştirilen 9-faz ÇTGSM motor modeli.....	145
Şekil 4.32. 9-faz ÇTGSM motor için kalıcı durumda elde edilen radyal ve eksenel sıcaklık değerleri.....	145
Şekil 4.33. Motorun moment çalışma döngüsünün zamana bağlı değişimi.....	146

Şekil 4.34. Motorun çalışma döngüsüne bağlı olarak geçici durumdaki sıcaklık değişimi.....	146
Şekil 4.35. Radyal ve aksenal ölçeklendirme .....	149



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. SM motorlarda kullanılan sargı terminolojisi.....	54
Tablo 2.2. 3-faz motorlar için oluk/kutup/faz oranlarının gösterimi .....	56
Tablo 2.3. 39-oluk 12-kutuplu kombinasyon için bobin gruplarının gösterimi.....	60
Tablo 2.4. 39-oluk 12-kutuplu kombinasyona ait 3 serinin gösterimi .....	60
Tablo 2.5. 39-oluk 12-kutuplu kombinasyon için 3 serinin yeniden düzenlenmesi.....	61
Tablo 2.6. Tablo 2.2’de gösterilen oluk-kutup kombinasyonlarının her bir fazı için hesaplanan sargı faktörü değerleri .....	64
Tablo 2.7. 39-oluklu prototip motorun teknik özellikleri .....	68
Tablo 2.8. 39-oluk ve 36-oluk 12-kutuplu motorların performans ve maliyet karşılaştırması .....	71
Tablo 2.9. 6-faz DSY’ne yapısına sahip motorun temel özellikleri.....	72
Tablo 2.10. 78-oluk 12- ve 24-kutuplu çok fazlı motorların temel elektriksel parametrelerinin karşılaştırılması .....	80
Tablo 2.11. 72-oluk 12-kutup dengeli ve 78-oluk 12- ve 24-kutuplu DSY’ne sahip çok fazlı motorların performans karşılaştırması.....	86
Tablo 2.12. 9-faz motorlar için oluk/kutup/faz oranlarının gösterimi .....	89
Tablo 2.13. 117-oluk 36-kutuplu motorun teknik özellikleri.....	98
Tablo 2.14. 3-faz dengeli ve 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip motorların performans karşılaştırması .....	102
Tablo 3.1. Referans 9-faz DSY’ne sahip YSM teknik özellikleri.....	116
Tablo 4.1. GÇTGSM motorun farklı mıknatıs kutup açısı ve mıknatıs genişliği değerleri için moment dalgalanması yüzdelerinin değişimi .....	121
Tablo 4.2. GÇTGSM motorun farklı mıknatıs kutup açısı ve mıknatıs genişliği değerleri için ortalama moment değişimleri.....	121
Tablo 4.3. GÇTGSM motorun farklı mıknatıs kutup açısı ve mıknatıs genişliği değerleri için ortalama moment mıknatıs ağırlık oranları .....	121
Tablo 4.4. Çubuk tip mıknatıslı rotor için farklı mıknatıs uzunluğu ve kutup açısı değerleri için mıknatıs ağırlıklarının değişimi.....	123
Tablo 4.5. Önerilen 9-faz motorun AC kayıp analizinde incelenen farklı durumlar .....	136
Tablo 4.6. 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip YSM, GÇTGSM ve AD-ÇTGSM motorların performans karşılaştırması.....	141
Tablo 4.7. Yapısal analizde kullanılan malzemeler ve özellikleri .....	142
Tablo 4.8. Isıl analizde 1700 rpm anma hızı için kullanılan kayıp bileşenleri .....	145

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$a_n$	: MMK harmonik açılımındaki katsayı
$a_p$	: Stator sargılarındaki paralel kol sayısı
$a_{p,ref}$	: Referans motorun stator sargılarındaki paralel kol sayısı
$b_n$	: MMK harmonik açılımındaki katsayı
$B_{max}$	: Laminasyondaki maksimum akı yoğunluğu, (T)
$B_n$	: n'inci MMK harmoniğinin genliği
$B_r$	: Radyal manyetik akı yoğunluğu, (T)
$B_t$	: Stator dışındaki manyetik akı yoğunluğu, (T)
$B_\alpha$	: Teğetsel manyetik akı yoğunluğu, (T)
$c_n$	: n'inci harmoniğe ait MMK sabitinin genliği
$d$	: Laminasyon sac kalınlığı, (m)
$D_{dış}$	: Stator dış çapı, mm
$D_{dış,ref}$	: Referans motorun stator dış çapı, mm
$f$	: Frekans, (H)
$F_{r(x,y)}$	: Radyal gerilmelerden kaynaklanan kuvvetin x/y bileşeni, (N/m <sup>2</sup> )
$F_{\alpha(x,y)}$	: Teğetsel gerilmelerden kaynaklanan kuvvetin x/y bileşeni, (N/m <sup>2</sup> )
$F_x$	: x yönündeki gerilme bileşeni, (N/m <sup>2</sup> )
$F_y$	: y yönünde gerilme bileşeni, (N/m <sup>2</sup> )
$i$	: Akım, (A)
$i_d$	: d-eksen akımı, (A)
$i_q$	: q-eksen akımı, (A)
$I_{Cd}$	: Gerilim çemberi konumunun d-eksen akımını kestiği nokta, (A)
$I_{Cq}$	: Gerilim çemberi konumunun q-eksen akımını kestiği nokta, (A)
$I_{faz}$	: Faz akımı, (A)
$I_{faz,ref}$	: Referans motorun faz akımı, (A)
$I_N$	: Nominal akım, (A)
$J_e$	: Akım yoğunluğu, (A/mm <sup>2</sup> )
$J_{e,ref}$	: Referans motorun akım yoğunluğu, (A/mm <sup>2</sup> )
$K$	: Laminasyon tabakasının enine kesiti, (m <sup>2</sup> )
$k_E$	: Eksenel ölçeklendirme katsayısı
$K_g$	: Girdap kayıp katsayısı
$k_h$	: Histerezis kayıp katsayısı
$k_R$	: Radyal ölçeklendirme katsayısı
$k_y$	: Yardımcı kayıp katsayısı
$k_w$	: Sargı ölçeklendirme katsayısı
$k_{w-A}$	: A-fazının temel sargı faktörü
$k_{w-B}$	: B-fazının temel sargı faktörü
$k_{w-C}$	: C-fazının temel sargı faktörü
$k_{sn}$	: Kaykık faktörü
$k_{wn}$	: n'inci sargı faktörü
$k_{wn-skewed}$	: Kaykığın dahil edildiği n'inci sargı faktörü
$l_a$	: Aktif malzemenin aksenal uzunluğu, (m)
$l_e$	: Mıknatıs aksenal uzunluğunu, (m)

L	: Senktron endüktans, (H)
L <sub>d</sub>	: d-eksen endüktansı, (H)
L <sub>faz</sub>	: Faz endüktansı, (H)
L <sub>q</sub>	: q-eksen endüktansı, (H)
m	: Faz sayısı
M <sub>PM</sub>	: Mıknatıs maliyeti, (\$)
N <sub>t</sub>	: Sarım sayısı
p	: Kutup sayısı
P <sub>cu</sub>	: Bakır kaybı, (W)
P <sub>demir</sub>	: Demir kaybı, (W)
P <sub>g</sub>	: Girdap kaybı, (W)
P <sub>girdap</sub>	: Mıknatıs girdap kaybı, (W)
P <sub>h</sub>	: Histerezis kaybı, (W)
P <sub>y</sub>	: Yardımcı kayıp bileşeni, (W)
q	: Oluk/kutup/faz
Q <sub>s</sub>	: Oluk sayısı
r	: B <sub>r</sub> ve B <sub>α</sub> akı yoğunluklarının hesaplandığı radyal pozisyon (mm)
R	: Direnç, (Ohm)
R <sub>faz</sub>	: Faz direnci, (Ohm)
R <sub>faz,ref</sub>	: Referans motorun faz direnci, (Ohm)
S <sub>n</sub>	: Tensör kutupsal koordinat eşdeğeri
S <sub>y</sub>	: y yönündeki dik koordinat tensörü
S <sub>x</sub>	: x yönündeki dik koordinat tensörü
S <sub>α</sub>	: Tensör kutupsal koordinat eşdeğeri
t	: Motor periyodu
T	: Uygun bobin adımı
T <sub>em</sub>	: Elektromanyetik moment, (N.m)
T <sub>em,ref</sub>	: Referans motorun elektromanyetik moment, (N.m)
T <sub>nom</sub>	: Nominal moment, (N.m)
U	: Fazlar arasındaki dengesizlik miktarı
v	: Ardışık iki oluk vektörü arasındaki fark
V	: Gerilim, (V)
v <sub>di</sub>	: d-eksen gerilimi, (V)
V <sub>N</sub>	: Nominal gerilim, (V)
V <sub>0</sub>	: İki manyetik obje arasındaki alan şiddeti farkına bağlı bir sabit
v <sub>qi</sub>	: q-eksen gerilimi, (V)
W <sub>Cu</sub>	: Toplam bakır ağırlığı, (kg)
W <sub>max</sub>	: Maksimum hız, (rpm)
W <sub>nom</sub>	: Nominal hız, (rpm)
W <sub>toplamlam</sub>	: Toplam aktif malzeme ağırlığı, (kg)
W <sub>SM</sub>	: Toplam mıknatıs ağırlığı, (kg)
α	: rotor pozisyonu, (mekanik derece)
α <sub>ac</sub>	: A ve C-fazları arasındaki elektriksel açı, (derece)
α <sub>m</sub>	: Mıknatıs kutup açısı, (elektriksel derece)
α <sub>ph</sub>	: İki vektör kolu arasındaki mekanik açı, (radyan)
α <sub>s</sub>	: İki ardışık oluk vektörü arasındaki elektriksel açı, (derece)
α <sub>sm</sub>	: İki vektör kolu arasındaki mekanik açı, (radyan)
β	: Kaykık açısı (elektriksel radyan)
γ	: Akım kontrol açısı, (elektriksel derece)



$\lambda_m$	: Toplam mıknatıs akısı, (Wb)
$\mu_0$	: Havanın manyetik geçirgenliği, (H/m)
$\sigma$	: Radyal gerilme, (N/m <sup>2</sup> )
$\sigma_m$	: Manyetik malzemenin elektriksel iletkenliğini, (S.m <sup>-1</sup> )
$\tau$	: Teğetsel gerilme, (N/m <sup>2</sup> )
$\theta$	: Fazlar arasındaki açı, (rad)
$\theta_s$	: Fazlar arasındaki elektriksel açı, (derece)
$\omega_{max}$	: Maksimum hız, (rpm)
$\omega_{me}$	: Elektriksel hız, (rpm)
$\omega_N$	: Nominal hız, (rpm)
$\omega_R$	: Anma hızı, (rpm)
$\Psi_{di}$	: d-eksen akısı, (Wb)
$\Psi_{qi}$	: q-eksen akısı, (Wb)
$\Omega_e$	: Manyetik skaler potansiyeli

### Kısaltmalar

AASM	: Akı Anahtarlama Sürekli Mıknatıslı
AC	: Alternating Current (Alternatif Akım)
AD-ÇTGSM	: Akı Destekli Çubuk Tip Gömülü Sürekli Mıknatıslı
CFD	: Computational Fluid Dynamics (Hesaplama Akışkanlar Dinamiği)
ÇTDSM	: Çubuk Tip Gömülü Sürekli Mıknatıslı
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
DliÇK	: Dengeli Çekme Kuvveti
DMÇK	: Dengesiz Manyetik Çekme Kuvveti
DSY	: Dengesiz Sargı Yapısı
EASM	: Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı
EMK	: Elektro Motor Kuvveti
FFT	: Fast Fourier Dönüşümü
GÇTGSM	: Geleneksel Çubuk Tip Gömülü Sürekli Mıknatıslı
GSM	: Gömülü Sürekli Mıknatıslı
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (Yalıtılmış Kapılı İki Kutuplu Transistör)
KOKS	: Kesir-Oluklu Konsantr Sargı
KOS	: Kesir-Oluklu Sargı
MED	: Manyetik Eşdeğer Devre
MMK	: Manyeto Motor Kuvveti
OBEB	: Ortak Bölenlerin En Büyüğü
PI	: Proportional-Integral (Oransal-İntegral)
RASM	: Radyal Akılı Sürekli Mıknatıslı
RMS	: Root Mean Square (Ortalama Karakök)
RPM	: Revolute Per Minute (Dakikadaki Dönüş Sayısı)
SE	: Sonlu Elemanlar
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SM	: Sürekli Mıknatıs
SMDM	: Sürekli Mıknatıslı Doğrusal Motor
SMSM	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

SUV : Sports Utility Vehicle (Sportif Çok Amaçlı Araç)  
THB : Toplam Harmonik Bozulması  
TOS : Tam Sayı-Oluk Sargı  
YM : Yüzey Mıknatıslı  
YSM : Yüzey Sürekli Mıknatıslı



# ÖZGÜN BİR SARGI YAPISI YAKLAŞIMI İLE DOKUZ FAZLI DENGESİZ VE ASİMETRİK SARGILI YÜZEY VE GÖMÜLÜ MİKNATISLI SENKRON MOTORLARIN ELEKTRİKLİ TAŞIT UYGULAMASI İÇİN TASARIMI, MODELLENMESİ VE DENEYSEL DOĞRULANMASI

## ÖZET

Son dönemlerde, havacılıktan elektrikli araçlara kadar değişen birçok uygulamada yedekleme, güvenilirlik ve hata tolerans kabiliyeti gibi avantajları sayesinde çok-faz sürekli mıknatıslı motorlara artan bir ilgi mevcuttur. 3-faz sistemlerin yapılarının bilinir olması sayesinde bu tür uygulamalarda çoğunlukla üçün katı olan 6-, 9- veya 12-faz elektrik motorları tercih edilmektedir.

Elektrikli ve hibrit güç aktarma sistemleri düşük üretim maliyeti ile düzgün bir moment çıkışına ihtiyaç duyar. Vuruntu ve dalgalanma olmayan moment çıkışını sağlamak için tasarım süreci sırasında kayk ve mıknatıs köşelerini tıraşlama gibi iyi bilinen yöntemlerin uygulanması gerekebilir. Fakat bu karmaşık çözümler hem tasarım hem de üretim maliyetinin artmasına neden olur. Bu nedenle, dengesiz ve asimetrik stator sargılı bazı oluk-kutup kombinasyonları yüksek performans gerektiren durumlarda uygun bir alternatif olabilir.

Bu çalışmada, çok-faz motorlar için kapsamlı bir literatür araştırması gerçekleştirilmiş ve bu konuda yapılan yayınlar faz sayılarına göre sınıflandırılarak özetlenmiştir. Daha sonra, 3-faz dengesiz sargı yapısına sahip farklı oluk-kutup kombinasyonlarının sargı yapıları minimum dengesizlik miktarı ve maksimum sargı faktörü için elde edilmiştir. Ayrıca dengeli ve dengesiz sargılı 3-faz iki motorun performansları karşılaştırılmıştır. Dengesiz sargı yapısına sahip oluk-kutup seçeneklerinin ek bir önlem almaya gerek kalmadan motor performansını artırabileceği görülmüştür. Bunun yanında, dengeli ve dengesiz sargı yapıları 6- ve 9-faz sürekli mıknatıslı motorların farklı sargı konfigürasyonları ve yerleşimleri incelenmiştir. 3-faz sargı setleri arasındaki açının motor performansına etkileri gösterilmiştir. Tez kapsamında, yeni bir sargı yapısına sahip 9-faz dengesiz sargılı motor için yeni bir akı-destekleyici çubuk tip gömülü mıknatıslı rotor yapısı da önerilmiştir. Önerilen 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip geleneksel olmayan gömülü ve geleneksel yüzey ve çubuk tip mıknatıslı motorların avantaj ve dezavantajları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Altı Faz SM Motor, Asimetrik Sargı, Dengesiz Sargı Yapısı, Dokuz Faz Dengesiz Sargılı Motor, Dokuz Faz SM Motor.

# **DESIGN, MODELING AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF NINE-PHASE UNBALANCED AND ASYMMETRIC WINDING SURFACE AND INTERIOR MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS FOR ELECTRIC VEHICLE APPLICATIONS WITH A NOVEL WINDING DESIGN APPROACH**

## **ABSTRACT**

Recently, a growing interest in multi-phase permanent magnet machines exists in many applications ranging from aerospace to electric vehicle due to their benefits such as redundancy, reliability and fault-tolerance capability. Thanks to the well-known structures of 3-phase systems, 6-, 9- or 12-phase permanent magnet electric motors which are multiple of three are commonly preferred in these applications.

Electric and hybrid powertrain systems require a smooth torque output with low production cost. To provide cogging-free and ripple-free output torque, it may be required to apply well-known methods such as skewing, magnet tapering etc. during the design stage. However, this kind of complex solutions cause to increase both the design and the manufacturing cost. Therefore, various slot-pole combinations with asymmetric and unbalanced stator windings could be a viable alternative when a high-performance is required.

In this thesis, a comprehensive literature review for multi-phase motors is performed and the articles published on this area are summarized under different categories. Winding structures of different slot-pole combinations with unbalanced winding structure are obtained considering minimum amount of unbalance and maximum winding factor. Also, the performance of two motors with balanced and unbalanced winding is design and compared. It is seen that the slot-pole options with unbalanced winding can improve the motor performance without the need for getting an extra precaution. In addition, different winding configurations and displacements of 6- and 9-phase permanent magnet motors with both balanced and unbalanced structures have been investigated. The effects on the motor performance of the angles between 3-phase winding sets are illustrated. Within the scope of the thesis, a novel flux-assisted spoke type interior magnet rotor structure is proposed with a 9-phase unbalanced winding structure. The benefits and drawbacks of the unconventional interior and conventional surface and spoke type magnet motors with 9-phase unbalanced winding are presented and compared in detail.

**Keywords:** Six-Phase PM Motor, Asymmetric Winding, Unbalanced Winding Structure, Nine-Phase Unbalanced Winding Motor, Nine-Phase PM Motor.

## GİRİŞ

İklim değişikliği, ekosistemi ve insan sağlığını doğrudan etkilemesi, hatta nesillerin devam ettirilmesini tehdit etmesi sebebiyle içinde bulunduğumuz yüzyılda insanoğlunun yüzleştii ve karşı karşıya kaldığı en önemli sorunlardan biridir. İklim değişikliğine neden olan en önemli etmenlerden biri de ulaşım araçlarının ortaya çıkardığı atmosferdeki zararlı emisyonlardır. Bu durum, araştırmacıların yenilebilir enerji kaynaklarına olan ilgisini artırmaktadır. Özellikle daha çevreci ulaşım araçlarına olan eğilim sayesinde elektrikli ve hibrit araçlardan, elektrikli gemilere, lokomotiflere ve hatta uçaklara kadar bazı önemli yeni gelişmelerin ortaya çıkması sağlanmaktadır. Genellikle, taşımacılık ile ilgili uygulamalarda (havacılık sektörü için henüz çok yaygın olmadığı için elektrikli motorların başka taşıt uygulamaları için kullanıldığı durumlarda) tahrik için bir elektrikli motor gereklidir. İçten yanmalı motorların çevreyi olumsuz yönde etkileyen zararlı gaz salımları elektrik motorlarının kullanımı sayesinde büyük ölçüde azaltılmış olur. Ayrıca isterlerin doğru bir şekilde tanımlandığı uygulamalar için ihtiyaca uygun bir tasarım gerçekleştirilirse elektrik motoru uzun yıllar hiçbir bakım gerektirmeden çalışmasını kesintisiz bir şekilde sürdürebilir. Bununla birlikte, elektrikli taşıt uygulamalarında günümüzdeki en büyük sorun batarya sistemlerinin değişim ihtiyacı duyması olarak gösterilebilir. Ayrıca şarj istasyonlarının kısıtlı olması veya seyahat esnasında şarjın azalması durumunda istenilen noktada şarj istasyonu bulunmama ihtimallerine karşı araçtaki batarya şarjının tam döngüde yapılamaması nedeniyle batarya ömrü de zamanla azalmaktadır. Bu nedenle, batarya sistemlerinin gelişmesiyle ve bahsedilen sorunların minimize edilmesiyle beraber elektrikli araçlara olan ilgi daha da artacaktır.

Taşıt uygulamaları (bu çalışma boyunca sadece kara araçları dikkate alınarak açıklamalar yapılmıştır) için kullanılan elektrik motorlarını seviyelerine göre sınıflandırmak gerekirse; düşük, orta ve yüksek güç olarak ayırmak mümkündür. Elektrik motorlarının kullanıldığı taşıtları sınıflandırmada kullanılan bir başka ayırım ise binek, ticari ve arazi araçlar şeklinde yapılabilir. Düşük güçlü taşıt uygulamaları, farklı segmentleri barındıran binek elektrikli araçları içermektedir. Orta güçlü taşıtlar

ise SUV veya mini otobüsler (8 m), çöp kamyonları gibi hafif ticari araçları kapsamaktadır. Son olarak, yüksek güçlü taşıtlar ise kamyon, büyük otobüsler (12 ve 18 m) ve arazi araçları (iş makinesi gibi) vb. uygulamaları içermektedir. Binek elektrikli araçlarda genellikle 3-faz elektrik motorları tercih edilirken, orta ve yüksek güçlü elektrikli taşıt uygulamalarında üçün katı ve 3-fazdan büyük olan çok-faz motorlar (6- ve 9-faz gibi) tercih edilmektedir. Bununla birlikte, kara taşıtları dışındaki deniz araçlarında, havacılık ve uzay sektörlerinde tercih edilen elektrik motorları da çoğunlukla çok fazlıdır.

Üçün katı ve 3-fazdan büyük olan çok fazlı motorların birçok uygulamada tercih edilmesinin en önemli iki nedeni güvenilirlik ve yedekleme özellikleridir. Bunun yanında, sargı setlerinin bağımsız olarak sürülmesi sayesinde stator sargılarında herhangi bir hata durumunda (açık veya kısa devre) sağlıklı sargı seti ile çalışmayı sürdürmesi ve faz başına akım seviyesini azaltarak elektronik devredeki eleman boyutlarını küçültmesi gibi avantajları da mevcuttur. Bununla birlikte, çok fazlı motorların dezavantajları kontrol algoritmalarının karmaşıklığı ve sargı setlerinin bağımsız beslenmesi durumunda dengesiz manyetik çekme kuvveti oluşması olarak gösterilebilir.

Bilindiği üzere bazı oluk-kutup kombinasyonları aralarında 120 elektriksel derece faz farkı bulunan, dengeli bir sargı yapısı oluşturmaya izin vermez. Bu yapılara sahip elektrik motorlarına tez boyunca dengesiz sargı yapısına sahip elektrik motorları olarak isimlendirme yapılmıştır. Bu tip elektrik motorlarının en önemli avantajları yapısal herhangi bir önlem almaya gerek kalmadan vuru momentini ortadan kaldırması ve moment çıkışı kalitesini artırması olarak gösterilebilir. Dolayısıyla, seri üretimi kolaylaştırmaya yönelik geliştirilen elektrik motorlarında üretimi karmaşık hale getirecek kayk v. yöntemleri uygulamaya gerek kalmaz. Dengesiz sargı yapılı 3-faz ve 3-fazın üzerindeki elektrik motorları için ayrıntılı bir literatür araştırması yapıldığında, bu tür elektrik motorları için literatürün çok kısıtlı olduğu, hatta 3-fazın üzerinde herhangi bir çalışma gerçekleştirilmediği görülmüştür.

Tez kapsamında, çok fazlı motorlar ile ilgili ayrıntılı bir literatür araştırması gerçekleştirilerek bu konuda yapılan yayınlar faz sayılarına göre sınıflandırılarak özetlenmiştir. Özellikle üçün katı faz sayısına sahip 6- ve 9-faz elektrik motor ve

sürücü çalışmaları daha kapsamlı incelenmiştir. Bunun yanında, elektrikli taşıt uygulamaları özelinde geliştirilen ürünlere ait detaylar verilmiştir. Ayrıca çok fazlı motorlar için alınan bazı patent çalışmalarına da literatür araştırması bölümünde yer verilmiştir. Bu çalışma sonucunda, ulusal literatürde ilk defa farklı motor türlerini de içeren çok fazlı motorlar ve sürücüler için ayrıntılı bir literatür araştırması gerçekleştirilmiştir.

Buna ek olarak, sürekli mıknatıslı motorlar için literatürde ilk defa 3-faz dengesiz sargı yapısına sahip farklı oluk-kutup kombinasyonları ayrıntılı bir şekilde incelenmiş, minimum dengesizlik miktarı ve maksimum sargı faktörü elde edecek şekilde sargı yapılarının elde edilme yöntemleri sunulmuştur. Ayrıca bu motorların sargı faktörleri, manyeto motor kuvveti değişimleri ve harmonikleri incelenmiştir.

3-Faz dengesiz sargı yapıları için elde edilen yöntemler geliştirilerek farklı oluk-kutup sayılarına sahip 6- ve 9-faz dengesiz sargı yapıları motorlara uygulanmıştır. 6-faz çalışmalarında; çift 3-faz dengesiz sargı yapısına sahip yüzey mıknatıslı motor tasarımları gerçekleştirilmiş ve 3 fazlı sargı setleri arasındaki açının motor performansına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar daha önce üretilip doğrulanan dengeli sargı yapısına sahip motor performans verileri ile karşılaştırılmıştır. Bunun yanında, üç tane 3-faza sahip dengeli ve dengesiz sargı yapısına sahip yüzey mıknatıslı motor tasarımları gerçekleştirilmiştir. 3-faz sargı setleri arasındaki açı değiştirilerek sargı yerleşimleri ve dağılımları kaynaklı performans değişimleri incelenmiştir.

Tez kapsamında elde edilen en önemli katkılardan birisi de yeni bir sargı yapısına sahip 9 fazlı ve yeni bir rotor topolojisine sahip gömülü mıknatıslı motor tasarımının gerçekleştirilmesi ve alan zayıflatma uygulanarak motor performans verilerinin elde edilmesidir. Önerilen bu 9-faz motorun DC ve AC bakır, rotor ve stator demir kayıpları ve mıknatıs kayıpları gibi manyetik kayıp bileşenleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Bu tezin amacı, elektrikli taşıt uygulamaları için 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip bir gömülü mıknatıslı senkron motor tasarımının gerçekleştirilmesidir. Ayrıca üç ve üçün üzerindeki çok fazlı dengesiz sargı yapısına sahip motorların sargı yapılarının nasıl elde edildiği, özellikle 6- ve 9-faz dengesiz sargı yapıları için farklı sargı yerleşimleri altında motor performansının nasıl etkilendiğinin incelenmesidir. Tez

kapsamında hedeflenen bir diğerk amaç ise, 9-faza sahip yeni bir çubuk tip gömülü sürekli mıknatıslı rotor yapısının önerilmesi ve bu motorun performans sonuçları ile geleneksel çubuk tip gömülü sürekli mıknatıslı bir rotora ve yüzey sürekli mıknatıslı rotora sahip 9-faz motorların performans sonuçlarının ayrıntılı bir şekilde karşılaştırılmasıdır.

Bölüm 1’de, radyal ve aksenal akılı motor yapıları ve radyal akılı motorlarda kullanılan farklı tipteki rotor geometrileri özetlenmiş, çok fazlı sistemler ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Ayrıca kapsamlı bir literatür araştırması yapılarak; 3-fazın üstündeki çok fazlı senkron, asenkron, sürekli mıknatıslı senkron gibi tüm motor yapıları için daha önce yapılan yayınlar, tezler ve bu alanda alınmış patent çalışmaları faz sayılarına göre sınıflandırılarak sunulmuştur. Literatür araştırması çalışması kapsamında motor tasarımları ayrıntılı bir şekilde incelenirken, motor sürücüleri için gerçekleştirilen çalışmalar için yine faz sınıflandırmaları altında kısa bir özet sunulmuştur.

Bölüm 2’de, 3-faz dengeli ve dengesiz sargı yapısına sahip sürekli mıknatıslı senkron motorlar ayrıntılı bir şekilde incelenmiş, tez boyunca kullanılan sargı terminolojisi bu bölümde özetlenmiştir. 3-faz dengesiz sargı yapısına sahip farklı oluk-kutup seçenekleri bu bölümde incelenmiş ve sargı şemasının nasıl çıkarıldığı bir örnek üzerinden kapsamlı bir şekilde açıklanmıştır. Ayrıca 3-faz dengeli ve dengesiz sargı yapısına sahip iki farklı motor tasarımı gerçekleştirilmiş, dengesiz sargı yapıları motorun prototipi üretilmiş ve motorların performansları karşılaştırılmıştır. Bu bölümde incelenen diğerk konular ise 6- ve 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip motorların sargı alternatiflerinin ve yerleşimlerinin incelenmesi ve motor performansı üzerine etkilerinin elde edilmesidir.

Bölüm 3’de ise yeni bir 9-faz gömülü mıknatıslı rotor yapısı önerilmiş ve önerilen bu motorun yapısı, çalışma prensibi ve teknik özellikleri verilmiştir. Ayrıca 9-faz motor tasarım süreci ayrıntılı bir şekilde açıklanmış, tasarım sürecinde izlenen adımlar ve dikkat edilmesi gereken hususlar verilmiştir.

Bölüm 4’de, önerilen 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip akı-destekleyici çubuk tip gömülü mıknatıslı motorun elektromanyetik, yapısal ve ısıl analizleri gerçekleştirilmiştir. Motorun yüksüz ve yüklü durumlar altında elektromanyetik



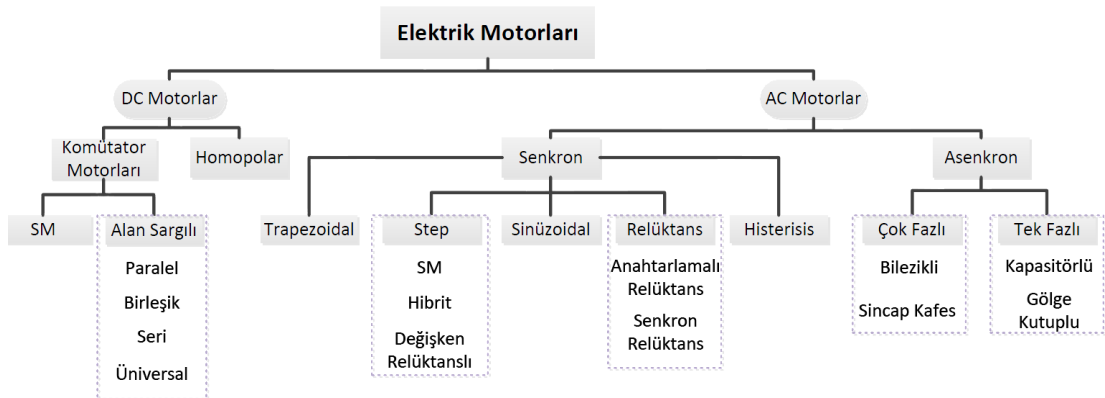
performans verileri kapsamlı bir şekilde elde edilmiştir. Önerilen 9-faz motora alan zayıflatma uygulanarak moment-hız ve güç-hız eğrisi elde edilmiştir. Ayrıca motorda oluşan kayıp bileşenleri açıklanmış, önerilen motor için farklı hızlardaki manyetik kayıplar elde edilmiş ve motor verim-hız eğrisi sunulmuştur. Bunun yanında, önerilen rotor geometrisinin sürekli çalışma koşulları altında yapısal bütünlüğü kontrol edilmiştir. Son olarak, 9-faz motorun sürekli ve geçici çalışma koşulları altındaki sıcaklık verileri elde edilerek motorun ısıl davranışı sunulmuştur.

Bölüm 5’de ise yapılan çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar özetlenmiş, tezin literatüre sunduğu katkılar verilmiş ve başka araştırmacılar için gelecekte yapılabilecek çalışmalara değinilmiştir.

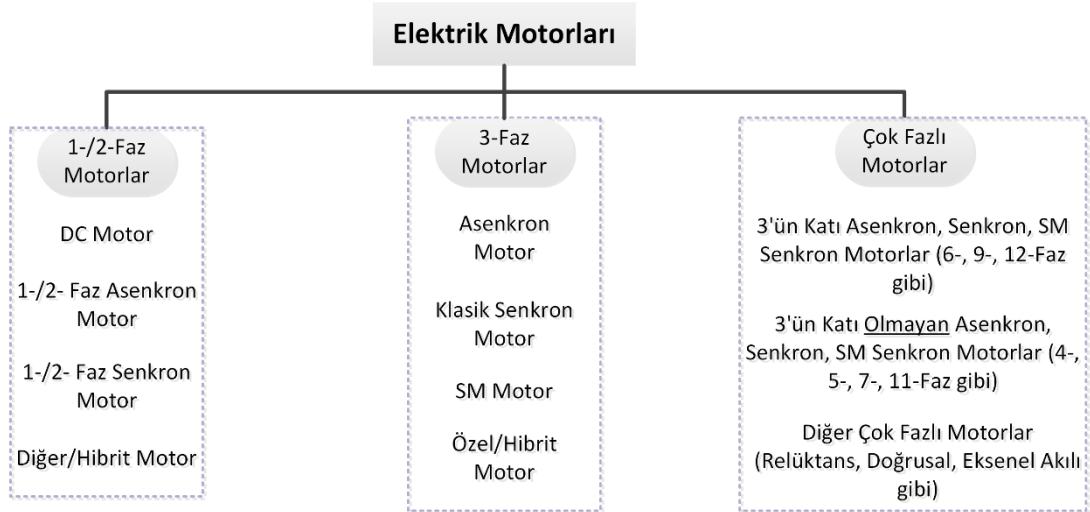
## 1. GENEL BİLGİLER

Elektrik motorlarını sınıflandırmada farklı yöntemler kullanılabilir: Rotor yapısına, besleme şekline, sargı yapısına veya temel akı yönüne göre sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmada en sık kullanılan yöntem Şekil 1.1’de gösterildiği gibi DC ve AC motorlar şeklinde iki temel gruba ayırmaktır. DC motorlar, yapılarının ve kontrollerinin basit oluşu itibarı ile günümüzde birçok uygulamada sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Fakat bu motorların fırçaya sahip olmaları nedeniyle bakıma ihtiyaç duymaları en önemli dezavantajlardan birisidir. Bununla birlikte, AC motorlar temelde senkron ve asenkron motorlar olmak üzere ikiye ayrılabilir. Senkron motorlarda, rotorda oluşan sabit manyetik alan ile statordaki değişken manyetik alanın eş zamanlı iken asenkron motorlarda tam tersi söz konusudur. Asenkron motorlar endüstriyel uygulamalarda karşımıza sıklıkla çıkmalarına karşın aynı hacimdeki bir sürekli mıknatıslı (SM) senkron motora (SMSM) göre güç yoğunluklarının düşük olması en önemli dezavantajlarıdır.

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



Şekil 1.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması

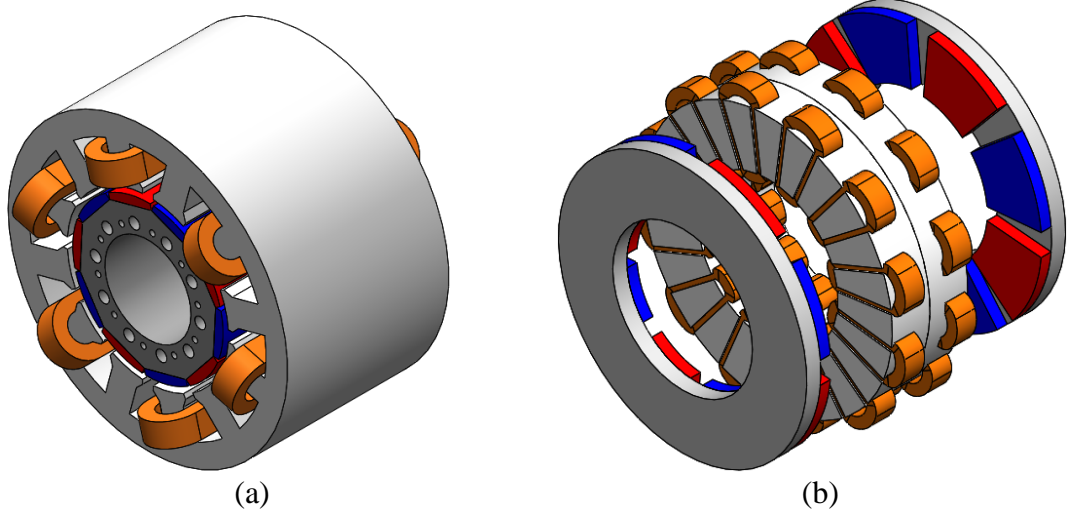


Şekil 1.2. Faz sayılarına göre elektrik motorlarının sınıflandırılması

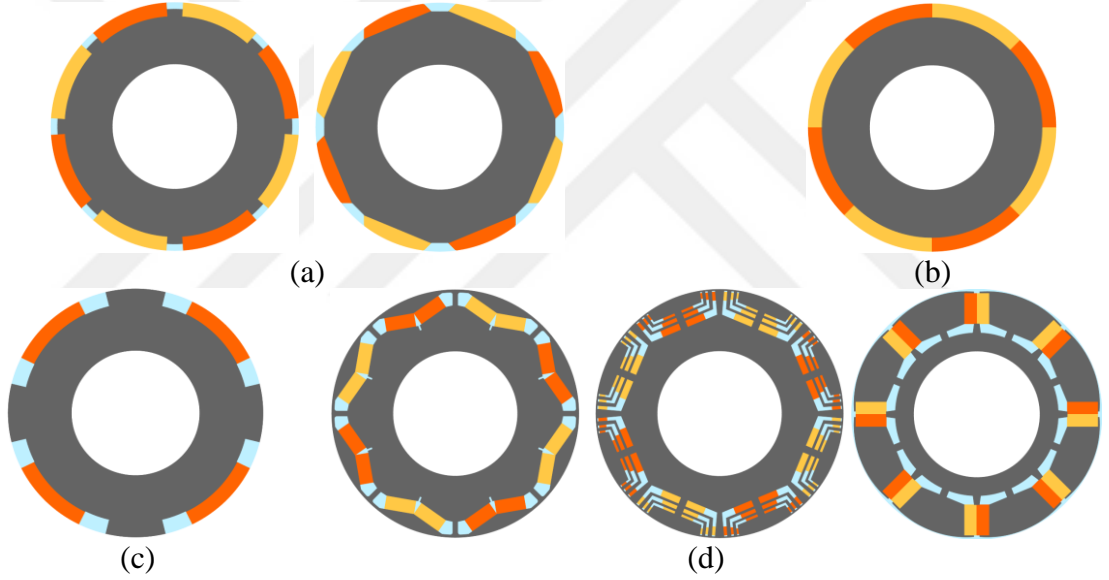
luğunun artmasını, daha kompakt bir motor tasarımının ortaya çıkmasını sağlarken, maliyet olarak da artışı beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, uygulama ihtiyacı için en optimum tasarım girdilerinin belirlenebilmesi bu noktada önem arz etmektedir. Şekil 1.2'den görüldüğü gibi motorları 1- ve 2-faz, 3-faz ve 3'den büyük fazlı şeklinde sınıflandırmak da mümkündür.

### 1.1. Radyal ve Eksenel Akılı Motorlar

SM motorların yapıları incelendiğinde bu motorları hava aralığındaki akı yönüne bağlı olarak iki farklı sınıflandırma altında incelemek mümkündür: Radyal akılı sürekli mıknatıslı (RASM) motorlar ve eksenel akılı sürekli mıknatıslı (EASM) motorlar (Şekil 1.3). Bir başka deyişle, hava aralığındaki akı yönü rotor miline dik olan motorlar RASM ve eksenel olan motorlar da EASM motorlardır. Bunun yanında, RASM motorların rotor yapıları incelendiğinde yüzey mıknatıslı (YM), yüzeye gömülü, gömülü mıknatıslı gibi farklı yapılarla olabildiği görülmektedir (Şekil 1.4). Bu motorlar farklı endüstriyel ve servo uygulamalarda yer bulmaktadır. Uygulama, sürekli mıknatıslı motorun rotor yapısını belirleyici unsurdur. Örnek vermek gerekirse, çok yüksek hızlı uygulamalarda gömülü mıknatıslı motorlar tercih edilir. Benzer şekilde d-eksen akımının fazla olduğu uygulamalarda mıknatısların demanyetize edilme riski fazla olacağından yüzey mıknatıslı motorlar genellikle tercih edilmez. Motor boyutlarını büyütmeden sabit güç bölgesini artırmak için yine gömülü mıknatıslı motorlar tercih edilebilir. Üretim maliyeti ve kontrolün basit olması önemli bir unsur ise yüzey mıknatıslı motorlar iyi bir seçimdir. Motorun sabit moment bölge-



Şekil 1.3. SM motor yapıları: (a) RASM motor ve (b) çift-stator-çift-rotorlu EASM motor



Şekil 1.4. Radyal akıllı motorlarda kullanılan farklı tipteki SM motor yapıları: (a) yüzey mıknatıslı, (b) yüzük tip, (c) ardışık-kutuplu, (d) gömülü mıknatıslı rotor yapıları

sini artırmak için yine yüzey mıknatıslı motorlar tercih edilebilir. Verilen örneklerden de anlaşılacağı üzere motorun yapısını belirleyici olan en temel unsurlardan biri uygulama kriterleri ve özellikleridir.

## 1.2. Çok fazlı Sistemler

Yukarıda belirtildiği gibi elektrik motorlarını sınıflandırmada kullanılacak bir diğer yöntem de faz sayısına göre yapılabilmektedir. Faz sayısının üçten büyük olduğu sistemler için genellikle çok fazlı sistemler ifadesi kullanılmaktadır. Şekil 1.5’de bu

sistemler için fazlar ve fazlar arasında oluşan açı değerleri gösterilmiştir. Faz sayısı için katı olan sistemler (6, 9, 12 gibi) aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

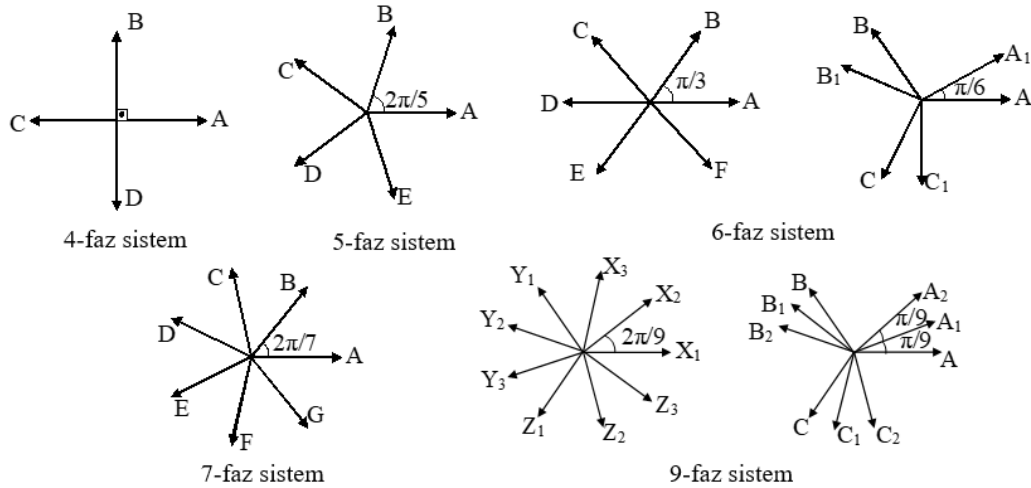
$$m = 3n \quad (1.1)$$

Burada  $n \geq 2$  ve bir tam sayıdır. Fazlar arasındaki elektriksel açı değeri ise:

$$\theta = \frac{60}{n} \quad (1.2)$$

ile hesaplanabilir. Fazların bu şekilde bir faz farkı ile yerleştirilmesi ile birbirinden bağımsız  $n$  tane sargı seti elde edilmiş olur. Böylece, sargılarda ya da sürücüde meydana gelebilecek problemlerde diğer 3-faz sargı seti ya da setleri ile motor çalışmaya devam edebilecektir. Böylece sistem, güç azalsa bile çalışmayı sürdürebilecektir. 3-faz sargı setleri arasındaki açı, Denklem (1.2) ile verilen ifade ile belirlenebildiği gibi bu ifadeden bağımsız olarak 0 ile 360 elektriksel derece arasındaki herhangi bir sayı da tercih edilebilir. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken husus; sargıların oluşturacağı uzay harmoniklerini minimize etmek ve temel sargı faktörü değerini maksimize etmek için optimum sargı seti açısını belirlemektir.

Bu çalışmada, farklı faz sayıları için sınıflandırma gerçekleştirilerek yapılan literatür araştırması özetlenmiştir. Özellikle, 6- ve 9-faz sürekli mıknatıslı senkron motor literatürü ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. 6- ve 9-faz SMSM'ler için ilk olarak ayrıntılı bir yayın araştırması gerçekleştirilmiştir. 6- ve 9-faz SM motor ve sürücü sistemlerine odaklanılmış ve ayrıntılı literatür listesi sunulmuştur. Ayrıca 6 ve 9 faz



Şekil 1.5. Çok fazlı sistemler

farklı motor türleri ve bu motorlara ait sürücü sistemlerine ait yayınlar da incelenerek bu çalışmada verilmiştir. Ayrıca 6- ve 9-faz SMSM'ler ile ilgili patent araştırması gerçekleştirilmiş, önemli görülen patentler özetlenmiştir. Son olarak, 6- ve 9-faz SM motorlar için piyasada yer alan mevcut ürünler kısaca açıklanmıştır.

### **1.3. Literatür Araştırması**

SMSM'lere olan ilgi yıllardır artarak devam etmektedir. Bu ilgi, SMSM'lerin yüksek güç ve moment yoğunluğuna, yüksek verime ve yüksek güvenilirliğe sahip olmaları gibi avantajları sayesinde ortaya çıkmaktadır. Özellikle 3 fazlı motorlar hem motor hem de sürücülerinin kolay bir şekilde elde edilebilmeleri, yapılarının çok fazla karmaşık olmayışı gibi nedenlerden dolayı sıklıkla tercih edilmektedir [1, 2]. 3-faz motorlar endüstride oldukça dominant olmasına rağmen çok fazlı motorların belirli avantajlarının olması 3-faz motorlara göre üstünlük sağlamaktadır. Ulaşım ve havacılık gibi güvenlik açısından kritik uygulamalarda geleneksel 3-faz elektrik motor ve sürücü sistemleri yerine hata toleransı yüksek olan çok fazlı motor ve sürücü sistemleri tercih edilmektedir. Ayrıca faz sayısı üçten büyük olan çok fazlı motorların 3-faz motorlara göre bazı avantajları da söz konusudur: 1) Sistem gücü 3-fazdan daha yüksek sayıya bölüneceği için motor sürücülerindeki yarı-iletken anahtarlara düşen güç ihtiyacı azalır, 2) Sargılarda ortaya çıkacak herhangi bir hata durumunda (kısa veya açık devre olması durumunda) sistem gücü azalmasına rağmen, motor çalışmasına devam edebilir. Bu iki avantaj çok fazlı motor ve sürücü sistemlerinin 3-faz sistemlere göre en önemli avantajlarıdır. Bununla birlikte, çok fazlı motorların yapılarının ve tasarımlarının 3-faz motorlara göre biraz daha karmaşık olması ve sürücü sistemlerinin daha maliyetli olması en önemli dezavantajlarıdır.

Stator sargılarının iki setini paylaşan ortak bir manyetik yapının kullanımı ilk olarak 1920'li yılların sonunda Alger ve diğ. tarafından önerilmiştir [3]. Bu çalışmada, büyük senkron generatörlerin toplam güç kapasitesini artırmak için böyle bir sistem kullanılmıştır. Sonraki yıllarda, araştırmacılar sargıdaki hatalara karşı çözüm arayışı içerisine girmişlerdir. 1970'li yıllarda ise hata toleransını artırmak için çift 3 fazlı sargı seti kullanılmıştır [4]. O zamandan bu yana, çok fazlı motorlar birçok uygulamada kullanılmaktadır. Günümüzde gerçekleştirilen çalışmalarda da 4-fazdan 15-faz sistemlere kadar farklı faz sayıları incelenmiş ve kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar

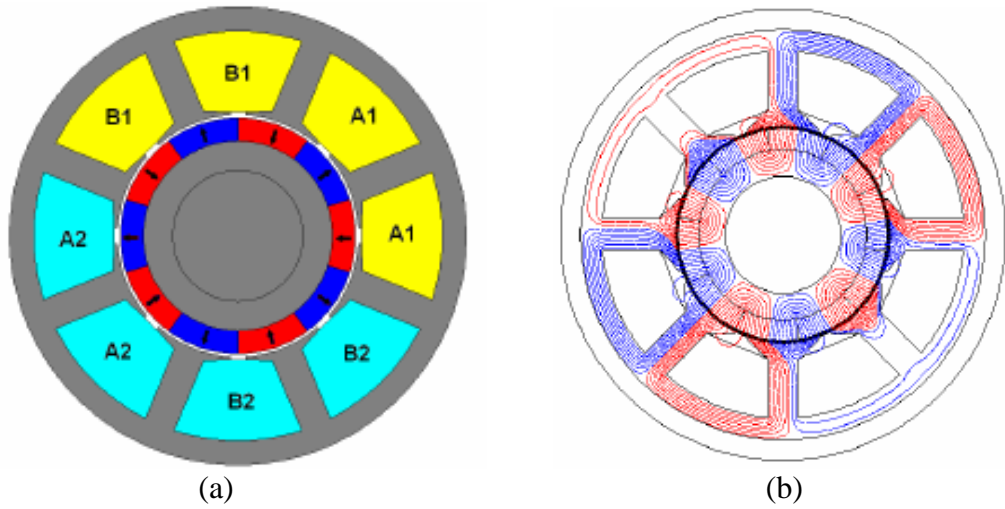
incelendiğinde, araştırmacıların genellikle 5-, 6-, 7- ve 9-faz sistemlere yoğunlaştığı grlmştr.

Bu bölümde, yapılan literatür araştırması çalışmaları üç kısımda incelenmiştir. Birinci kısımda, ayrıntılı bir şekilde incelenen makale ve bildiriler faz sayılarına göre sınıflandırılmış ve özetlenmiştir. Bununla birlikte, 6 ve 9 fazlı elektrik motorları için gerçekleştirilen çalışmalar daha ayrıntılı incelenmiştir. İkinci kısımda, 6- ve 9-faz elektrik motorları için ayrıntılı patent taraması gerçekleştirilmiş ve raporlanmıştır. Son olarak, elektrikli taşıt uygulamalarında kullanılan 6- ve 9-faz elektrik motor ürünlerine ait detaylara kısaca değinilmiştir.

### **1.3.1. 4-Faz SMSM alışmaları**

4-faz SMSM'ler çok sık karşılaşılan senkron motor türü değildir. Bu konu ile ilgili çok sınırlı sayıda yayın mevcuttur. Mecrow ve diğ. [5] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, bir uçak elektrikli yakıt pompası için 4 fazlı bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Motor tasarımı, fazlardan herhangi birinde bir hata olduğunda uygulama ihtiyacını sürdürmeye devam edecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Rotorda Halbach mıknatıslar kullanılmıştır. Motor prototipi üretilmiş ve motor performans verileri deneysel olarak elde edilmiştir. Motorun zıt-elektro motor kuvvet (EMK) gerilimi, sargılardaki hata durumlarında moment ve sıcaklık değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Ede ve diğ. [6] tarafından gerçekleştirilen diğer bir çalışmada, 4 ve 5 fazlı iki farklı SM motorda, mıknatısların aksenal olarak parçalara bölünmesinin girdap akımlarına etkisi incelenmiştir. Her iki motor da 21,8 N.m anma momentine ve 10000 rpm hıza sahiptir. Motorlarda, paralel olarak mıknatıslanmış samaryum kobalt türü mıknatıslar kullanılmıştır. Ede ve diğ. [7] tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise, 4-, 5- ve 6-faz üç farklı motor için sargılarda meydana gelen açık devre veya kısa devre problemlerinde ortaya çıkan moment dalgalanmasını azaltmaya yönelik optimum moment kontrolü yapılmıştır. Böylece, motor fazlarının hem sağlıklı hem de problemlili olması durumunda moment dalgalanmasını azaltacak ve stator bakır kayıplarını minimum düzeyde tutacak bir moment kontrolü sağlamışlardır. Fakat bu çalışmada, motor tasarım aşamaları açıklanmamış ve detay verilmemiştir. Ming Cheng ve diğ. [8] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ayrıık sargılı çıkık kutuplu sürekli mıknatıslı bir motorun sürücüsü üzerinde durulmuştur. Yapılan tüm çalışmalar önce

teorik olarak incelenmiş sonrasında deneysel veriler yardımıyla doğrulanmış ve makalenin sonuna eklenmiştir. Bu sürücünün yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim ve geniş hız aralığında bir kontrol sağladığı belirtilmiştir. Yapılan karşılaştırmalı analizler ve deneysel doğrulamalar sonucunda; sürücünün yüksek verimli bir çıkış gücü, iyi bir dinamik performans ve geniş sabit bir güç bölgesi sergilediği belirtilmiştir. Ming Cheng ve diğ. [9] tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada, 8-oluk 6-çıkık kutuplu SM motor tasarımı ve bu motorun kontrolü üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda, 2- ve 4-faz olmak üzere iki motor incelenmiş olup kontrol çalışmalarında PI kontrol kullanılmıştır. Chai Jie ve diğ. [10] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 3- ve 6-faz hata toleransı yüksek sürekli mıknatıslı motorun oluk-kutup kombinasyonu alternatifleri incelenmiştir. Yapılan çalışmada, sonlu eleman analizi sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Shakouhi ve diğ. [11] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ideal olmayan bir zıt-EMK'ye sahip fırçasız DC motor incelenmiştir. Bu motorun çıkış momentinde ortaya çıkan moment dalgalanması ideal olmayan zıt-EMK gerilimi nedeniyle oluşmuş ve önerilen kontrol yöntemiyle bu moment bileşeni azaltılmaya çalışılmıştır. Wenxiang Zhao ve diğ. [12] tarafından yapılan çalışmada ise hata toleransı yüksek, çıkık kutuplu sürekli mıknatıslı bir motor incelenmiş olup bu motorun yüksek verim ve güç yoğunluğu nedeniyle birçok uygulamada tercih edilmesinden bahsedilmiştir. Bunun yanında, motor sürücüsünde ortaya çıkabilecek hata durumları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle doğrulanmış ve sürücü kaynaklı oluşan hatalar belirlenmiştir.



Şekil 1.6. (a) Çift 2-faz motorun sargı yapısı ve (b) yüksüz durum akı çizgileri [10]

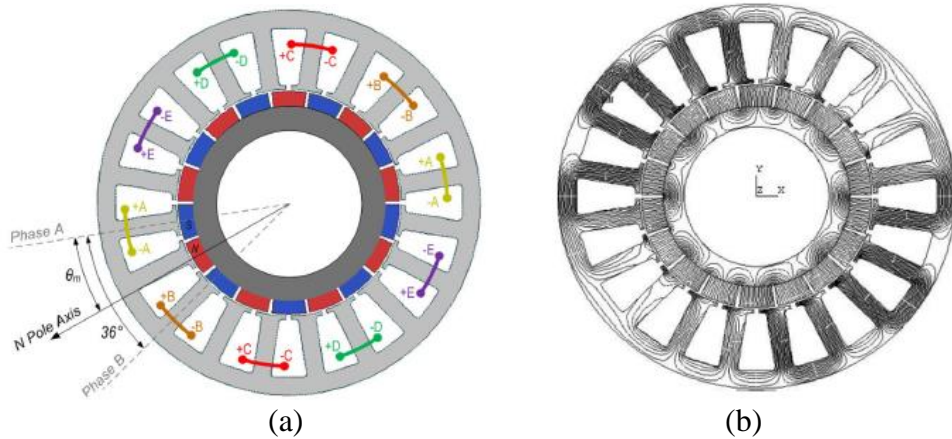


### 1.3.2. 5-Faz SMSM çalışmaları

5-faz SMSM'ler literatürde sıkça incelenmiş motorlardır. Parsa ve Toliyat [13] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, elektrikli taşıt uygulamaları için 5-faz gömülü mıknatıslı bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. 5-faz motor matematiksel modeli verilmiştir. Tasarlanan çok fazlı motor, 1- veya 2-fazın herhangi bir sebeple zarar görmesi halinde de çalışmaya devam edebilmektedir. Önerilen kontrol yöntemi, 3-faz motorların hata toleransı ile çalışması için gerekli olan nötr bağlantı ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Çalışmada, gerilim ve akım değerleri deneysel olarak ölçülmüş ve sonlu elemanlar analizi (SEA) sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hyung-Min Ryu ve diğ. [14] tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada, 5-faz bir sürekli mıknatıslı senkron motorun bir fazının açık devre olma durumundaki kontrol yöntemi incelenmiştir. Motor matematiksel modellemeleri yapılarak, yöntem ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Akım ve çıkış momenti verileri deneysel olarak elde edilmiştir. Bianchini ve diğ. [15] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, hata dayanımını artırmak için 5-faz bir SM motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Motor tasarımında karşılıklı endüktansa sıfır olan ve kısa devre akımını sınırlandırmak için yüksek bir öz endüktansa sahip olan bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Bianchi ve Fornasiero [16] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 5-faz bir motorun uzay vektör harmonikleri hem simetrik hem de asimetrik durumlar için incelenmiştir. Sargılardan birinde bir hata olduğunda ortaya çıkan asimetrik durumda uzay vektörlerinin harmonik içeriği incelenmiş, sonuçlar simetrik durum ile karşılaştırılmıştır. Jinyun Gan ve diğ. [17] tarafından yapılan diğer bir çalışmada, 5-faz gömülü mıknatıslı bir motorun kontrol çalışmalarına yer verilmiştir. Taşıt uygulamalarına uygun olacak şekilde tasarlanan motorun SEA sonuçları da kontrol verilerinin yanında sunulmuştur. Parsa ve diğ. [18] tarafından yapılan başka bir çalışmada ise kesir-oluklu 5-faz gömülü mıknatıslı ve düşük moment dalgalanmasına sahip olan bir motorun tasarımı yapılmış, prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, motor tasarım adımlarına ait detaylar verilmiş, sonlu eleman analizi sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Parsa ve Toliyat [19] tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada, motor tasarımının yanında sürücü üzerine de çalışmalar yapılmıştır. 5-faz gömülü mıknatıslı motorun sırasıyla matematiksel denklemleri verilmiş, kontrol yönteminden bahsedilmiş ve deneysel çalışmalar karşılaştırmalı bir şekilde

sunulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda, motorun çok hızlı bir moment cevabı olduğu ve kapsamlı bir kontrol algoritması uygulandığı belirtilmiştir. Villani ve diğ. [20] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yüksek güvenilirliğe sahip ve hava taşıtı uygulamalarında kullanılmak üzere, yüksek verim ve yüksek güç yoğunluğu sağlayan sürekli mıknatıslı bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tasarım, sonlu elemanlar tabanlı bir yazılım yardımıyla incelenmiş ve sonuçlar deneysel olarak da doğrulanmıştır. Bianchi ve diğ. [21] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, sürekli mıknatıslı bir motorun sargılarında meydana gelebilecek hataların oluşması anında sürücü kontrolü uygulaması yapılmıştır. Motorun kontrolünde 5-faz H-köprü devresi kullanılmıştır. Buna ek olarak, çalışmada sargılardan geçmekte olan akımın harmonik seviyesi üzerine durulmuş ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Pinheiro ve Suemitsu [22] tarafından yapılan çalışmada, İngiltere deniz kuvvetleri adına gemilerde kullanılmak üzere 5-faz gömülü mıknatıslı bir motorun tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen motorun hali hazırda birçok gemide kullanıldığı belirtilmiştir. 3 kW güce sahip olan bu motorun matematiksel denklemleri ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Ayrıca motor sürücü sistemine ve yapısına ait detaylar verilerek özel bir program sayesinde motor kontrolünün sağlandığı belirtilmiştir. Xiaoyan Huang ve diğ. [23] tarafından yapılan çalışmada, uzay uygulamaları için 5-faz fırçasız sürekli mıknatıslı bir motorun sonlu eleman analizi yardımıyla tasarımı yapıp prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada, sürekli mıknatıslı bir motorun tasarım aşamasında gerekli olan önemli noktalar belirtilmiş olup bu gereklilikleri baz alarak tasarımın nasıl gerçekleştiği açıklanmıştır. Tasarım aşamasında, gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarına ait sonuçlar sunulmuş ve elde edilen tüm sonlu eleman analizi sonuçları deneysel veriler yardımıyla karşılaştırılmıştır. Qian Chen ve diğ. [24] tarafından yapılan çalışmada, iki farklı, hata toleransı yüksek, sürekli mıknatıslı motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu motorlardan biri çubuk tip mıknatıs, diğeri ise v-şekilli gömülü mıknatıs içermektedir. Her iki motorun optimizasyon sonucu elde edilen performans verileri sunulmuş ve özellikle yüklü durumda elde edilen sonuçlar kapsamlı bir şekilde açıklanmıştır. SEA sonucu elde edilen performans verileri ile üretimi gerçekleştirilen prototip motorlara ait deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Ping Zheng de diğ. [25] tarafından yapılan çalışmada, taşıt uygulamaları için 5-faz bir motorun tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında oluk-kutup optimizasyonu için çalışmalar yapılmış, 40-oluklu 42-

kutuplu kombinasyon tercih edilmiştir. Karar verilen yapı için hata toleransı konularını da içeren ayrıntılı performans verileri elde edilmiştir. Ali ve diğ. [26] tarafından yapılan çalışmada, yüksek arıza dayanıklılığına sahip bir kontrol yöntemiyle sürülen sürekli mıknatıslı motorun sargılarının yıldız, beşgen ve beş köşeli yıldız bağlantıya sahip olma durumları incelenmiş ve sargılarda meydana gelebilecek kısa ve açık devre durumları için faz akımları deneysel olarak elde edilmiştir. Dwari ve Parsa [27] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, hata toleransı yüksek 5-faz sürekli mıknatıslı bir motorun kontrol tekniği üzerinde durulmuştur. Motorun trapez bir zıt-EMK gerilimine sahip olduğu görülmüş ve stator sargılarının açık devre olması durumunda motor performansları incelenmiştir. Yapılan çalışmada, gerilimdeki üçüncü harmoniği azaltacak şekilde bir kontrol yöntemi önerilmiş olup, elde edilen veriler ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır. C. Yu ve K. T. Chau [28] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yeni bir akı tanımlamalı yüksek hata toleransına sahip çıkık kutuplu sürekli mıknatıslı motor sürücü yapısı incelenmiştir. Kontrolü yapılan motorun rotor ve stator sargı şekli verilmiş olup AC ve DC çalışma durumlarında elde edilen performans verileri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sculler ve diğ. [29] tarafından yapılan çalışmada, darbe genişlik modülasyonu (DGM) ile beslenen eviricilerle sürülen çok fazlı sürekli mıknatıslı senkron motor ele alınmıştır. İlk olarak harmonikler göz önünde bulundurularak motorun moment yoğunluğu arttırılmak istenmiş, bunun için motor geometrisi ve hacmi değiştirilmeden 60-kutup 3-faz motor yapısı 58-kutup 5-faza dönüştürülmüştür. Sargı ve mıknatıs yapılarında değişikliğe gidilmiş böylece aynı bakır kayıplarıyla yaklaşık %15 daha fazla çıkış momenti ve %70'den daha az vuru



Şekil 1.7. (a) 5-faz motor yapısı ve sargı dağılımı, (b) motorun akı çizgileri dağılımı [20]

momenti elde edilmiştir. Salahi ve diğ. [30] tarafından yapılan çalışmada, farklı hata durumlarında sürekli mıknatıslı bir DC motorun çıkış gücünü geliştirmeye yönelik bir yöntem önerilmiştir. Stator sargılarının optimizasyonu ve farklı hata durumlarında üçüncü harmoniğin etkisi incelenmiştir. Farklı hata durumları için motorun çıkış parametreleri deneysel olarak elde edilmiştir. Bu çalışmalar dışında farklı hata durumlarında sürücü davranışına bağlı olarak motorun çıkış verilerinin incelendiği üç yayın daha bulunmaktadır [31-33]. Bu üç çalışmanın içeriğinde genel olarak motor performansını etkileyen parametrelerin sürücü performansına etkisi incelenmiştir.

### **1.3.3. 6-Faz SMSM çalışmaları**

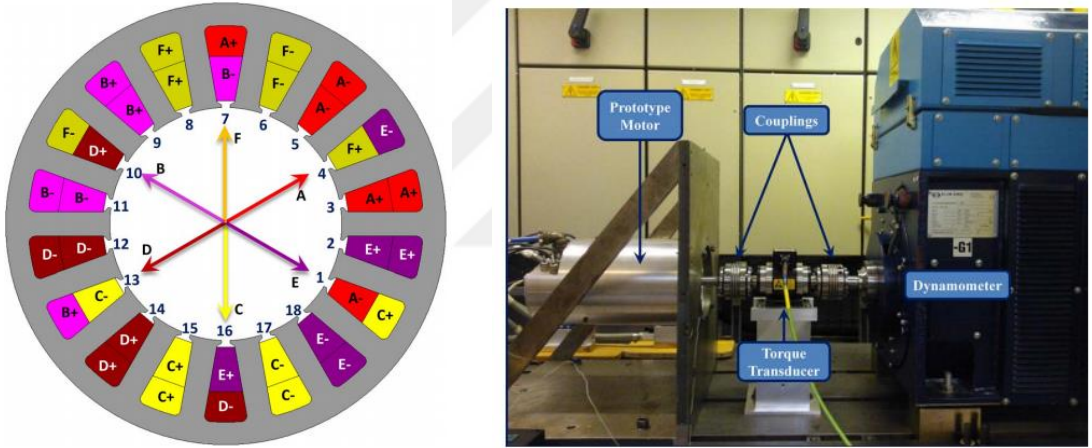
6-faz motorlar literatürde kendine sıkça yer bulmuş motorlardır. 6-faz motorların en önemli özelliği, faz başına düşen akım miktarı 3-faz motorlara göre azaldığı için motor sürücülerindeki anahtarlara binen stres seviyesi azaltılmış olur. Dolayısıyla daha küçük boyutlarda kompakt bir sürücü birimi elde edilebilir. Bu motorların en önemli avantajı ise çok fazlı motorların en dikkat çekici özelliği olan güvenirliktir. Bu özellikleri sayesinde 6-faz motorlar kesintisiz çalışmayı gerektiren uzay ve elektrikli araç gibi hata toleransı yüksek uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Fazlarda bir hata olması durumunda dahi güç seviyesi azalmasına rağmen motor çalışmayı sürdürebilir. Hatta kontrol parametreleri doğru bir şekilde ayarlandığı takdirde, ısı artışları dikkate alınarak, kısa süreliğine de olsa ihtiyaç duyulan güç değerlerini sürdürmek mümkündür.

Bu motorlar, 6-faz motorlar olarak adlandırılmalarının yanında “çift 3-faz” (dual three phase), “çift yıldız noktalı” (double star), “bölünmüş sargılı” (split wound) ya da “bölünmüş fazlı” (split phase) motorlar olarak da bilinirler. Literatürde bu konu ile ilgili senkron ve asenkron motorlar özelinde çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu bölümde, 6-faz motorlar için yapılan çalışmalar ayrıntılı bir şekilde özetlenmiştir.

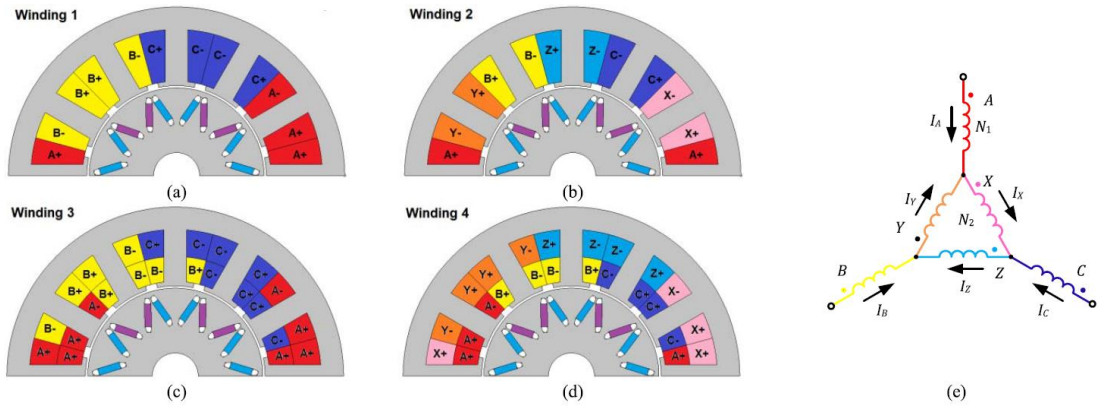
#### **1.3.3.1. Elektrikli araç uygulamaları için 6-faz SMSM çalışmaları**

Bu bölümde, taşıt ile havacılık ve uzay gibi uygulamalarda yer alan, elektrikli araç uygulamalarında kullanılan 6-faz SMSM tasarımı ve sürücü çalışmalarına ait detaylara yer verilmiştir. Patel ve diğ. [34] tarafından yapılan çalışmada, elektrikli taşıt uygulamalarında kullanılmak üzere 6-faz 18-oluk 8-kutuplu bir SMSM’de stator

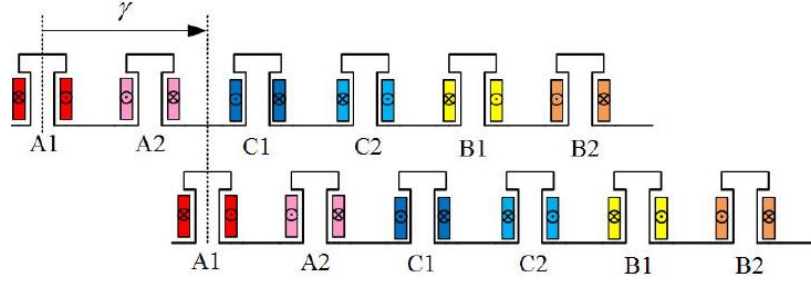
manyeto motor kuvvetindeki (MMK) istenmeyen harmonikleri ortadan kaldıran yeni bir sargı konfigürasyonu önerilmiştir. Önerilen yöntem sayesinde motorun moment ve güç yoğunluğu ile verimi; rotordaki SM'lerde oluşan girdap akımı kayıplarının ve stator sargı sonlarındaki bakır kayıplarının azalması sayesinde artmaktadır. Önerilen motorda, 6-faz sargı yapısı birbirinden bağımsız olan iki farklı 3-faz sargı setinden oluşmaktadır. Böylece, motorun 3-faz sargı setlerinden birinde kısa devre veya açık devre kaynaklı bir hata oluşması durumunda motor, moment ve güç sağlamaya devam etmektedir. Sargı setleri arasındaki açı, MMK'deki harmonikleri azaltmak için değiştirilerek optimize edilmiştir. Motor prototipi üretilmiş ve motorun moment-hız eğrisi, gerilim değişimleri, verim gibi verileri deneysel olarak elde edilmiştir. Motorun sargı şeması ve prototip motoru test etmek için hazırlanan test düzeneği Şekil 1.8'de gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Motor sargı şeması ve prototip motorun test düzeneği [34]



Şekil 1.9. 12-oluk 10-kutuplu motorun sargı yapıları. (a) 3-faz iki-katmanlı, (b) çift 3-faz iki-katmanlı, (c) 3-faz dört-katmanlı, (d) çift 3-faz dört-katmanlı (önerilen) ve (e) birleştirilmiş yıldız/üçgen bağlantı yapısı [35]

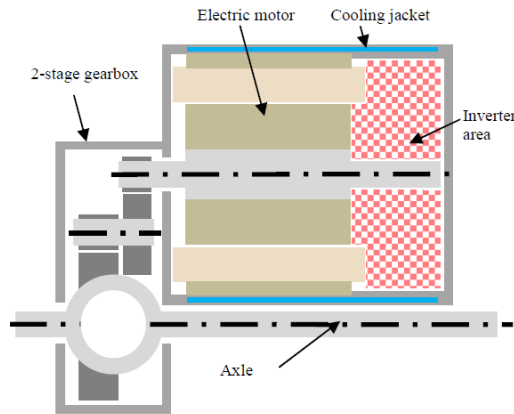


Şekil 1.10. Çift 3-faza sahip 12-oluk 10-kutuplu motorun stator sargılarının iki oluk kaydırılması [36]

Abdel-Khalik ve diğ. [35], elektrikli araç uygulamaları için çift 3-faza sahip dört-katmanlı gömülü mıknatıslı bir motor tasarımı önermiştir. Çalışmada, hem 3-faz hem de 6-faz motorların sargıları iki- ve dört-katmanlı olarak incelenmiştir (Şekil 1.9). Ayrıca birleştirilmiş yıldız/üçgen bağlantı yapısı kullanılmıştır (Şekil 1.9(e)). Tüm motorların ayrıntılı SEA gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

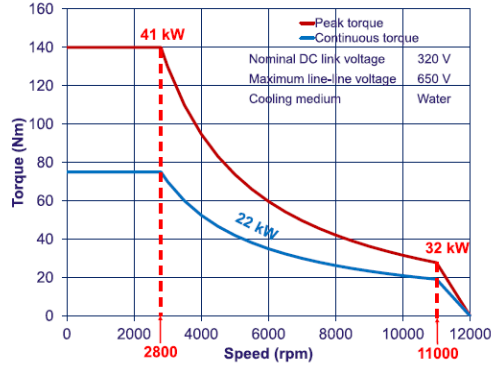
Abdel-Khalik ve diğ. [36] tarafından yapılan bir başka çalışmada ise elektrikli araç uygulamaları için 3-faz ve çift 3-faz sargı yapılarından oluşan 24-oluk 10-kutuplu SM motorların performansları karşılaştırılmıştır. 24-oluklu motorun 6-faz sargı yapısı iki adet 12-oluk 10-kutuplu statorun sargılarının birbirlerine göre iki oluk adımı kaydırılması ile elde edilmiştir (Şekil 1.10). Çalışma kapsamında, önerilen sargı yapısının avantaj ve dezavantajları ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

Brockerhoff ve diğ. [37] tarafından yapılan çalışmada, elektrikli araçlar için sürücü, motor, dişli kutusu gibi sistemlerin entegre edildiği bir çözüm incelenmiştir. Motor teknik isterleri bir binek araç için belirlenmiştir. Tasarımı yapılan elektrik motoru 12-

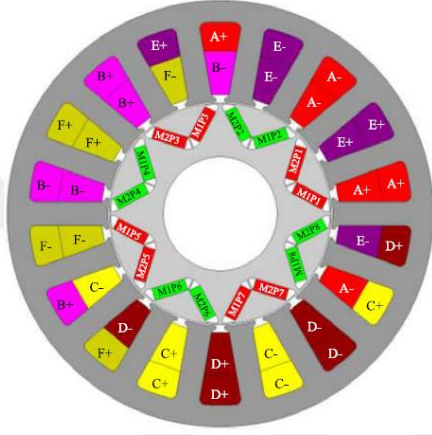


Parametre	Değer	Birim
Oluk sayısı	12	
Kutup sayısı	10	
Maksimum moment	238	N.m
Maksimum hız	14000	rpm
Maksimum güç	80	kW
Dış çap	215	mm
Eksenel uzunluk	140	mm

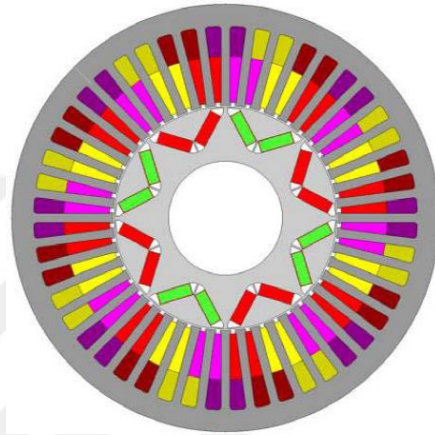
Şekil 1.11. Entegre taşıt motoru sistemi ve verileri [37]



(a)



(b)

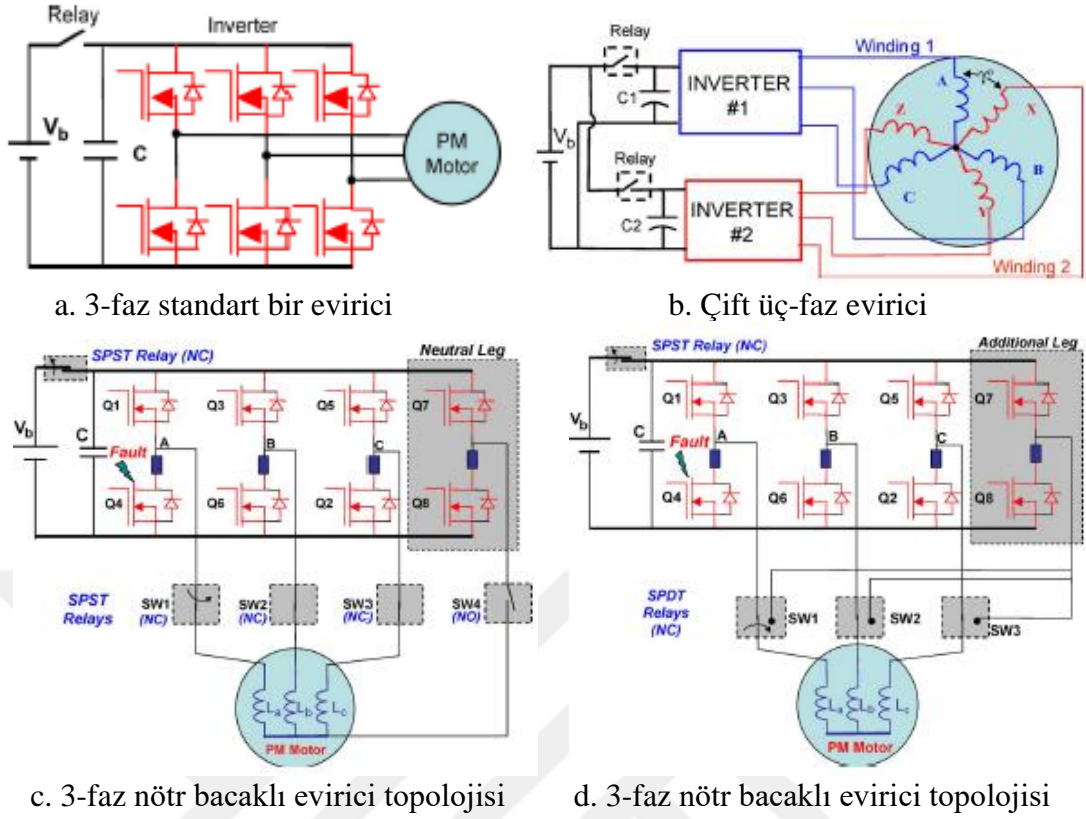


(c)

Şekil 1.12. A segmente sahip elektrikli araç için: (a) hedeflenen moment-hız karakteristiği ve 6-faz 18- ve 48-oluk 8-kutuplu (c) motor konfigürasyonları [38]

oluk 10-kutup kombinasyona ve altı fazlı bir stator sargı yapısına sahiptir. Motor sistemi ve motorun teknik verileri Şekil 1.11’de gösterilmiştir.

Patel ve diğ. [38] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, A segment bir elektrikli araç için 6-faz kesir- ve tam sayı-oluklu gömülü mıknatıslı motor tasarımları yapılmıştır. 18-oluk 8-kutup ve 48-oluk 8-kutup olmak üzere iki farklı oluk-kutup kombinasyonu için tasarımlar gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.12). Farklı hata durumlarının mıknatıs demanyetizasyonu üzerindeki etkisi 2D SEA ile ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Kesir-oluklu (oluk/kutup/faz,  $q \neq 1$ ) motorun demanyetizasyon analizi sonucunda MMK’deki düşük dereceli harmoniklerden dolayı akı yoğunluğunun her kutupta düzenli bir şekilde dağılmadığı belirtilmiştir. Ayrıca demanyetizasyon riski tam sayı-oluklu motor ile karşılaştırıldığında kesir-oluklu motorun daha düşük riske sahip olduğu belirtilmiştir. Naidu ve diğ. [39] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, elektrikli otomobil uygulamaları için hata toleransı yüksek üç farklı evirici topolojisinin analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.13). Bu sürücüler önerilirken hem



Şekil 1.13. 3- ve 6-faz evirici yapıları [39]

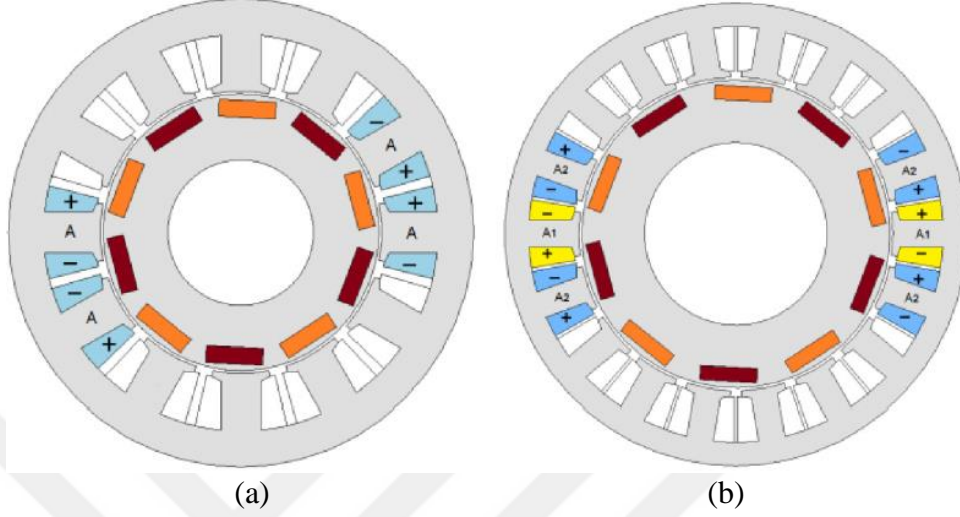
maliyetlerinin hem de hata karşısındaki performanslarının dikkate alınarak geliştirildiği belirtilmiştir.

Matyas ve diğ. [40] tarafından yapılan çalışmada, elektrikli araçlar için 6-faz bir SMSM'nin sargılarında meydana gelen hata durumları analiz edilmiştir. Dajaku ve diğ. [41, 42] tarafından yapılan çalışmalarda ise, elektrikli araçlar için 6-faz motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Her iki çalışmada da kesir-oluklu motorlarda zararlı harmonikleri azaltmak için oluk sayısını artırma yoluna gidilmiştir. Motor performans verileri SEA ile elde edilmiştir. Motor prototipi üzerinde çeşitli testler gerçekleştirilmiştir.

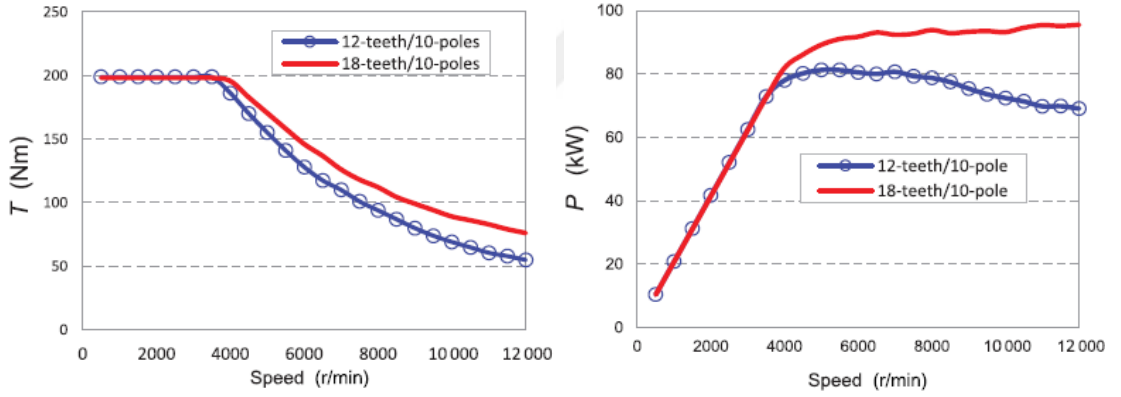
Dajaku ve diğ. [43] tarafından yapılan bir başka çalışmada ise yine elektrikli araçlar için 6-faz gömülü mıknatıslı bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, 3-faz 12-oluk ve 6-faz 18-oluk 10-kutuplu gömülü mıknatıslı motorlar ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir (Şekil 1.14). Motorların performans analizleri gerçekleştirilmiş, moment-hız ve güç-hız eğrileri gibi önemli performans verileri elde edilmiştir (Şekil 1.15). Bunun yanında, her iki motorun ısı (Şekil 1.16(a)) ve mekanik analizleri (Şekil



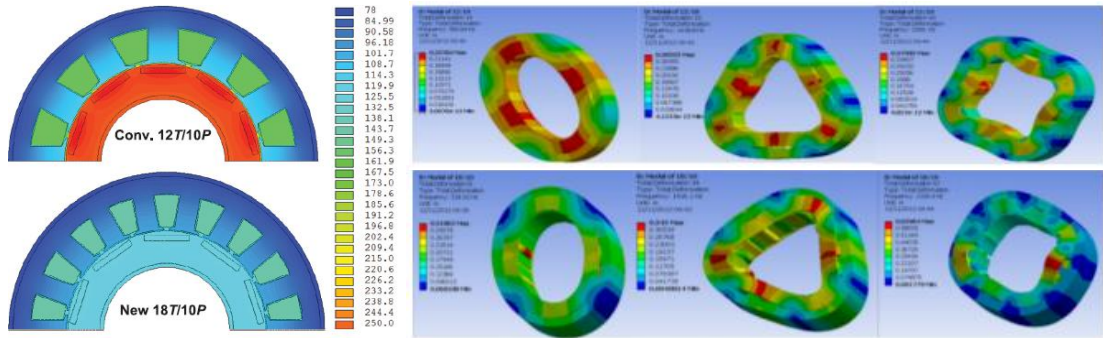
1.16(b)) gerçekleştirilmiştir. 18-oluk 10-kutuplu motorun prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve moment, zıt-EMK gerilimi ve verim eğrileri deneysel olarak elde edilmiştir.



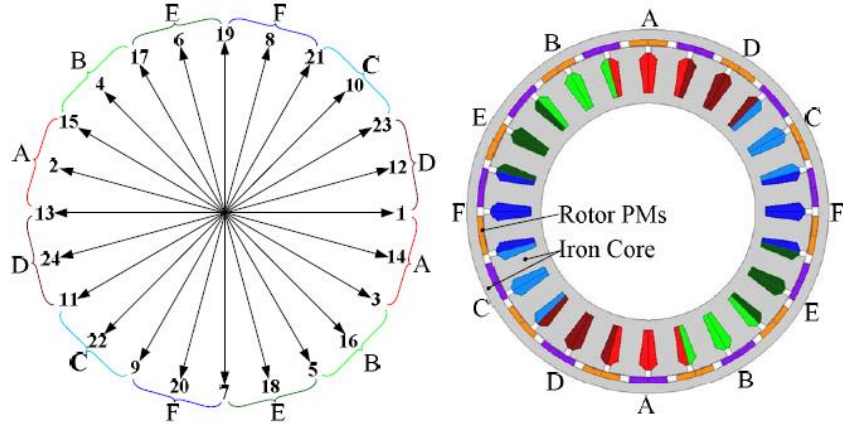
Şekil 1.14. (a) 12-oluk ve (b) 18-oluk 10-kutuplu motor modelleri [43]



Şekil 1.15. 12-oluk ve 18-oluk 10-kutuplu motorların moment-hız ve güç-hız eğrilerinin karşılaştırılması [43]



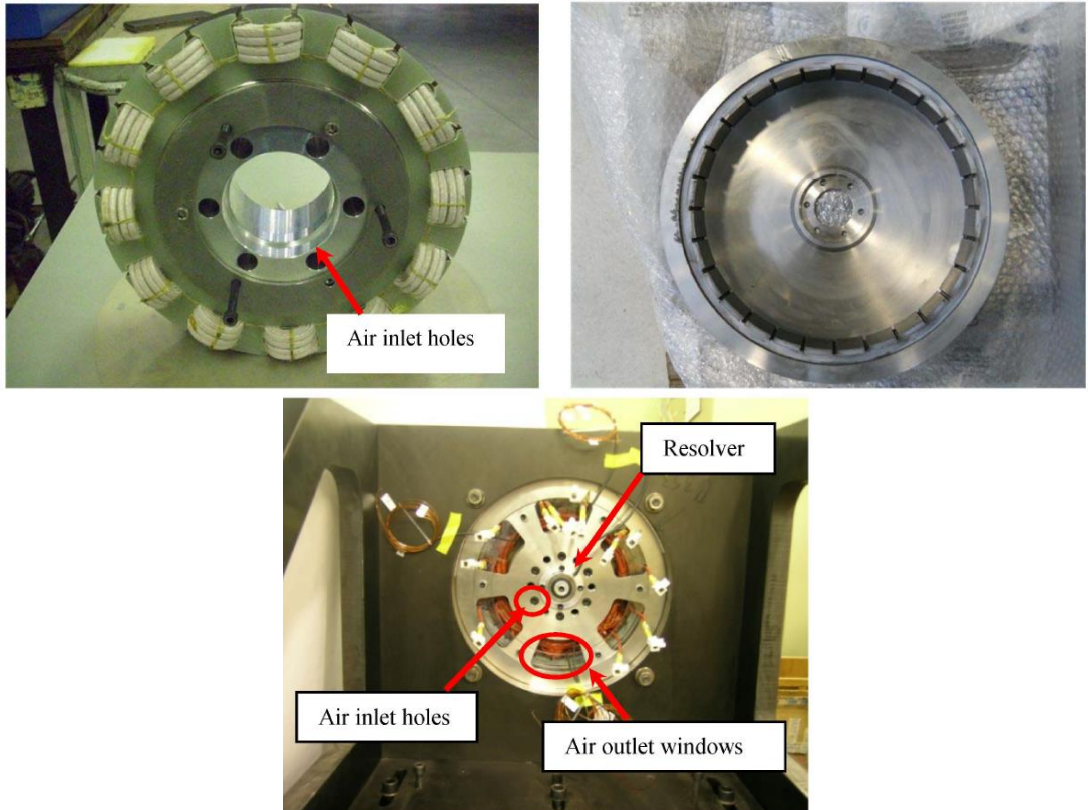
Şekil 1.16. 12 ve 18-oluk 10-kutuplu motorların ısıl ve mekanik analiz sonuçları [43]



Şekil 1.17. 24-oluk 22-kutuplu motorun oluk vektörleri ve sargılarının dağılımı [45]

Balamurali ve diğ. [44], elektrikli araç uygulamaları için 3-faz ve 6-faz 48-oluk 8-kutuplu iki motorun kayıp bileşenlerini ayrıntılı bir şekilde karşılaştırmıştır. Motorların sargı MMK'leri elde edilmiş ve uzay harmonikleri incelenmiştir.

Tong ve diğ. [45], elektrikli araçlar için farklı oluk-kutup kombinasyonuna sahip 6-faz seçenekleri incelemiştir. 24-oluk 22-kutuplu çift 3-faz SMSM tasarımı gerçekleştiril-

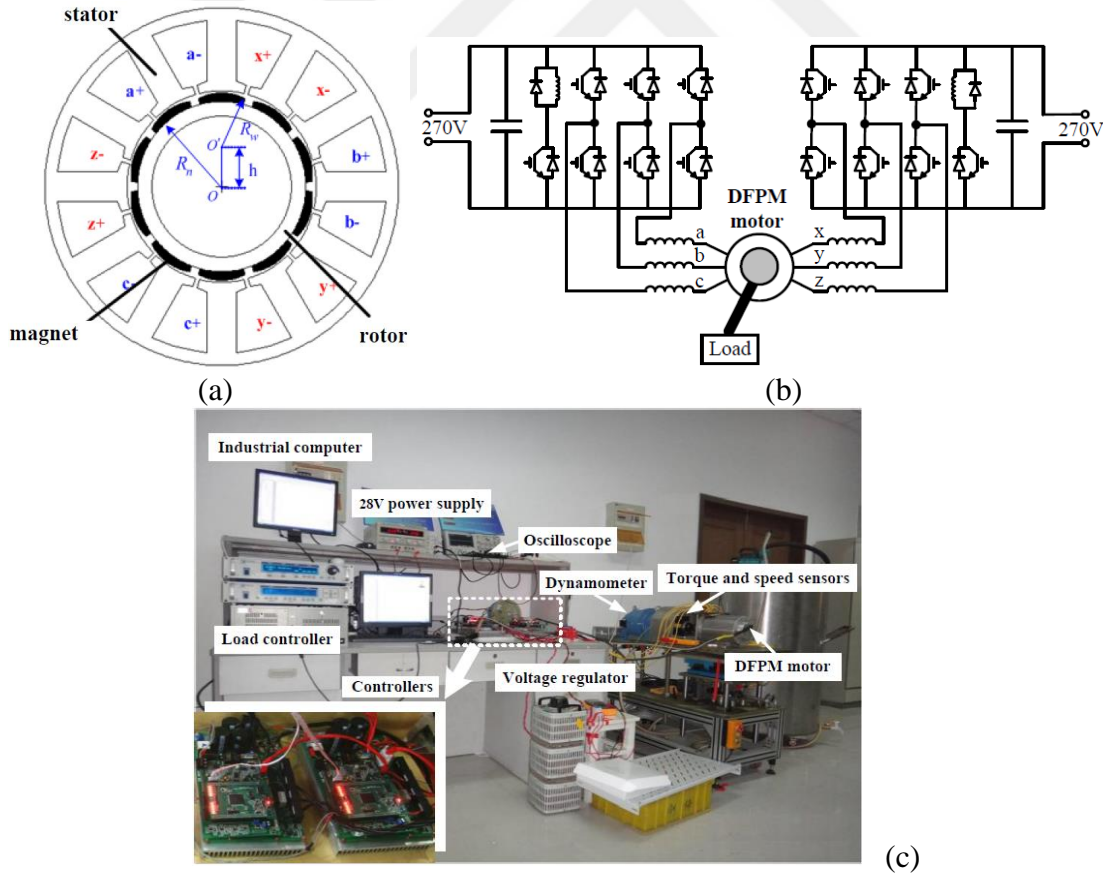


Şekil 1.18. 24-oluk 28-kutuplu motor prototipi ve deney düzeneği [46]

miştir (Şekil 1.17). Bu motorun stator sargı faktörü hesabı verilmiştir. Ayrıca motorun fazlarından bir ya da ikisinin açık devre olması durumları ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Hataların hava aralığı MMK harmoniklerine olan etkisi incelenmiştir. Mıknatıslardaki girdap kayıpları segmentasyon ile azaltılmıştır.

Bojoi ve diğ. [46] tarafından yapılan çalışmada, hava aracı uygulamaları için gaz türbini motorunun içerisinde yer alan ve sadece generatör olarak kullanılan dış rotorlu 6-faz SM bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Motor prototip üretimi gerçekleştirilmiş (Şekil 1.18) ve moment-akım gibi performans verileri elde edilmiştir. Ancak, motorun sargılarında hata olması durumu ve motorun hata dayanımı incelenmemiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık değerlerinin motorun çalışma koşullarına etkisi değerlendirilmemiştir.

Jiang ve diğ. [47] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, uzay uygulamaları için çift 3-faza sahip 12-oluk 10-kutuplu yüzey mıknatıslı bir motorun sürücü sistemi incelenmiş-



Şekil 1.19. (a) Çift 3-faz motor yapısı, (b) önerilen motor sürücü sistemi ve (c) motor test düzeneği [47]

tir (Şekil 1.19). Vuruntu bileşenini minimize etmek ve gerilim dalga şeklini sinüs dalga formuna getirmek için rotor sacında kutup genişliği değiştirilmiş ve mıknatıs köşelerine tıraşlama yapılmıştır. Motorun d-q eksen matematiksel modeli oluşturulmuştur. Ayrıca motor sürücüsünün hata toleransı yüksek kontrol yöntemi sargıların kısa devre ve açık devre koşulları göz önünde bulundurularak açıklanmıştır. Alnajjar ve diğ. [48] tarafından yapılan çalışmada, hava aracı uygulamaları için 6-faz çıkık kutuplu bir senkron generatör tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Hava araçlarının yakıt pompaları gibi güvenlik tehlikesi taşıyan uygulamalar için hataya dayanıklı 6-faz motor ve sürücü yapıları ile ilgili farklı çalışmalar ise [49-53] arasında gerçekleştirilmiştir.

### **1.3.3.2. 6-Faz diğer SMSM çalışmaları**

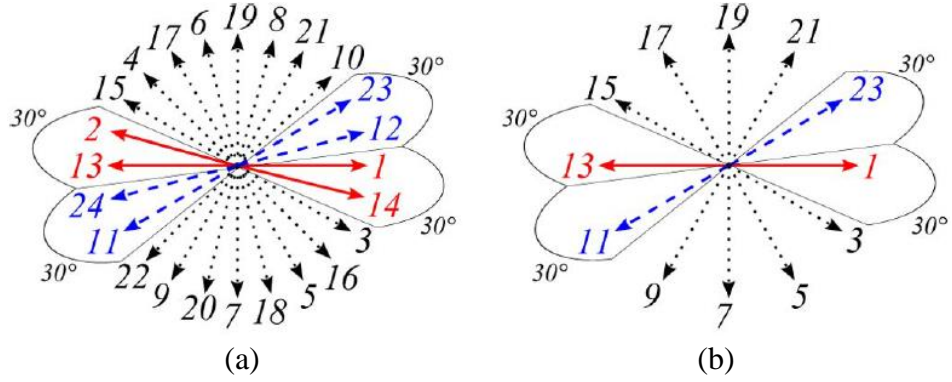
Bu bölümde 6-faz SMSM tasarımlarının yer aldığı diğer çalışmalar ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Barcaro ve diğ. [54, 55] tarafından yapılan çalışmalarda, çift 3-faz sargı yapısına sahip kesir-oluklu motorlar için farklı oluk-kutup kombinasyonları incelenmiştir. Oluk vektörleri yöntemi kullanılarak farklı oluk-kutup kombinasyonları kesir-oluklu motorlar için hem tek katmanlı hem de çift-katmanlı sargılar için incelenmiş, uygun oluk-kutup kombinasyonları Şekil 1.20’de gösterilmiştir. Yapılan analizlerde, motorun oluk sayısının 12’nin katı olduğu seçeneklerin çift 3-faz motorlar için daha uygun olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, gömülü mıknatıslı rotor yapısına sahip motorlar için oluk/kutup oranı 24/20 ve 24/22 olan seçenekler ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Şekil 1.21’de 24-oluklu motorun tek bir fazının oluk vektörleri yöntemi ile belirlenmesi gösterilmiştir. Motorların sargılarında hata olma ve sağlıklı olma durumları analiz edilmiştir.

EL-Refai ve diğ. [56], Cros ve diğ. [157] tarafından 3-faz kesir-oluklu motorların sargı yapılarının belirlenmesi için yapılan çalışmayı 4-, 5- ve 6-faz motorlar için geliştirmiştir. Yapılan çalışmada, 4-, 5- ve 6-faz için farklı oluk-kutup kombinasyonlarını içeren ve sargı faktörlerini, vuruntu momenti frekansını ve net radyal kuvveti veren tablolar oluşturulmuştur. Ayrıca yüksek hızlı uygulamalar için rotor yüzeyinde manyetik olmayan metalik bir malzeme kullanılması durumundaki kayıp bileşenleri analitik olarak incelenmiştir. Bu analizlerde, 2 mm’lik bakır kaplamanın kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar incelenmiştir. Yazarlar, çift-

katmanlı sargı yapısı kullanmanın, daha düşük uzay harmoniklere sahip olduğu için, rotor yüzeyindeki metalik malzemede oluşan kayıpları azalttığını belirtmiştir. Bununla birlikte, kutup sayısının oluk sayısından daha yüksek olduğu durumlarda zararlı har-

$2p$	$Q$	$k_w$	$t$	$Q/t$	$SL$	$ Q - 2p $	SPP	Notes
2	3	0.866	1	3	-	+1	1/2	
4	3	0.866	1	3	-	+1	1/4	
	6	0.866	1	3	yes	+2	1/2	
6	9	0.866	3	3	-	-	1/2	
8	6	0.866	2	3	yes	+2	1/4	
	9	0.945	1	9	-	+1	3/8	
	12	0.866	4	3	yes	-	1/2	
	15	0.711	1	15	-	-	5/8	
10	9	0.945	1	9	-	+1	3/10	
	12	0.933	1	12	yes	+2	2/5	★
	15	0.866	5	3	-	-	1/2	
	18	0.735	1	18	yes	-	3/5	
12	9	0.866	3	3	-	-	1/4	
	18	0.866	6	3	yes	-	1/2	
14	12	0.933	1	12	yes	+2	2/7	★
	15	0.951	1	15	-	+1	5/14	
	18	0.902	1	18	yes	-	3/7	
	21	0.866	7	3	-	-	1/2	
16	15	0.951	1	15	-	+1	5/16	
	18	0.945	2	9	yes	+2	3/8	
	21	0.890	1	21	-	-	7/16	
	24	0.866	8	3	-	-	1/2	
18	27	0.866	9	3	-	-	1/2	
20	18	0.945	2	9	yes	+2	3/10	
	21	0.953	1	21	-	+1	7/20	
	24	0.933	2	12	yes	-	2/5	★
	27	0.877	1	27	-	-	9/20	
	30	0.866	10	3	yes	-	1/2	
22	21	0.953	1	21	-	+1	7/22	
	24	0.949	1	24	yes	+2	4/11	★ ■
	27	0.915	1	27	-	-	9/22	
	30	0.874	1	30	yes	-	10/22	
	33	0.866	11	3	-	-	1/2	
24	18	0.866	6	3	yes	-	1/4	
	27	0.945	3	9	-	-	3/8	
	36	0.866	12	3	yes	-	1/5	
26	24	0.949	1	24	yes	+2	4/13	★ ■
	27	0.954	1	27	-	+1	9/26	
	30	0.936	1	30	yes	-	5/13	
	33	0.903	1	33	-	-	11/26	
	36	0.867	1	36	yes	-	6/13	★
	39	0.866	13	3	-	-	1/2	
28	24	0.933	2	12	yes	+2	2/7	★
	27	0.954	1	27	-	+1	9/28	
	30	0.951	2	15	yes	+2	5/14	
	33	0.928	1	33	-	-	11/28	
	36	0.902	2	18	yes	-	3/7	
	39	0.863	1	39	-	-	13/28	
30	27	0.945	3	9	-	-	3/10	
	36	0.933	3	12	yes	-	3/5	★
	45	0.866	15	3	-	-	1/2	

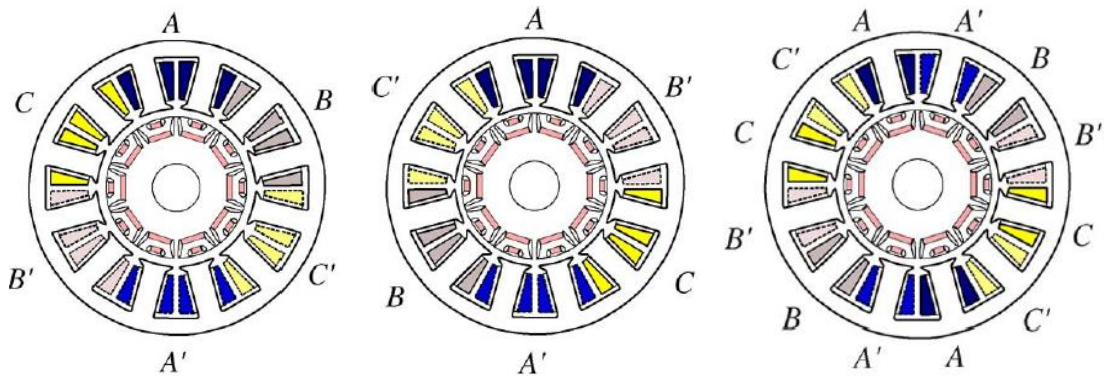
Şekil 1.20. Oluk-kutup kombinasyonları. Notlar: ★ tek katmanlı, ■ çift katmanlı sargı yapısına uygun olduğunu göstermektedir [54]



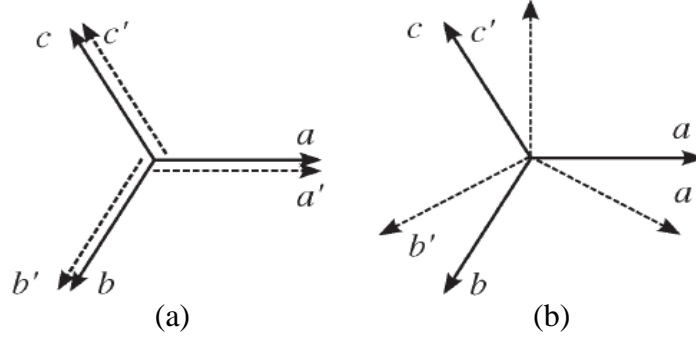
Şekil 1.21. 24-oluk 22-kutuplu motorun tek bir fazının oluk vektörleri yöntemi ile belirlenmesi (a) çift katmanlı (b) tek katmanlı [54]

moniklerin ortaya çıktığı ve bunun da ek kayıplara neden olduğu belirtilmiştir. 6-faz tasarımların referans 3-faz tasarıma göre daha düşük kayıplara sahip olduğu belirtilmiştir. Son olarak, bakıp kaplamının rotor kayıplarını azaltmada daha etkili bir yöntem olduğu fakat güç yoğunluğunda bir miktar düşüşe neden olduğu belirtilmiştir.

Barcaro ve diğ. [57] tarafından yapılan çalışmada, çift 3-faz sargı setinden oluşan 12-oluk 10-kutuplu gömülü mıknatıslı motorun farklı sargı yapılarına sahip olması durumları ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir (Şekil 1.22 ve Şekil 1.23). Sargı setlerinde oluşabilecek hata durumlarının motor performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar sargıların sağlıklı olma durumu ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca prototip üretimi esnasında sargı sonlarına sıcaklık sensörleri yerleştirilmiş ve motorun farklı çalışma ve hata koşulları altında sıcaklık verileri ölçülerek Şekil 1.22’de gösterilen sargı yapıları için SEA sonuçları ile test sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu üç motorun sargılarının yerleşiminden kaynaklanan dengesiz manyetik çekme kuvvetleri sonlu elemanlar analizi ile incelenerek karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.22. Üç farklı 6-faz sargı yapısı oluşturulmuştur [57]



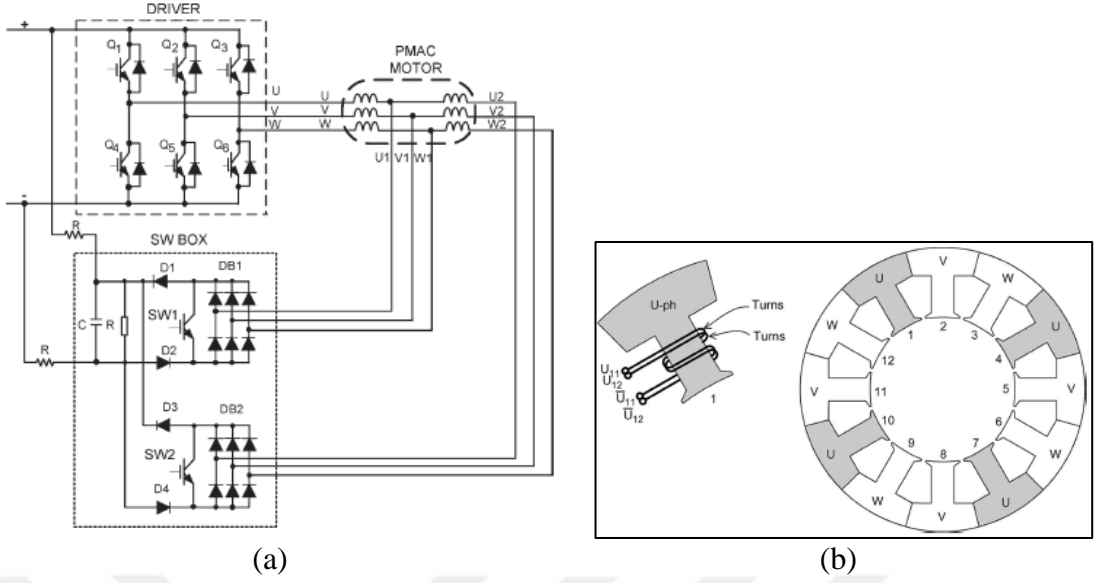
Şekil 1.23. Çift 3-faz setin (a) aynı fazda ve (b) faz kayması olması durumları [57]

Demir ve diğ. [58, 59] tarafından yapılan çalışmalarda, çift 3-faz sargı setine sahip asimetrik sargı yapılı SMSM tasarımları gerçekleştirilmiştir. Seçilen oluk-kutup kombinasyonundan dolayı 3-faz sargı setinde fazlar arasında 120 elektriksel derece faz farkı oluşturmak mümkün değildir. Dolayısıyla, her iki çalışmada da yeni bir sargı yapısı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yapının en önemli avantajı, motorun çıkış momentindeki dalgalanmaları azaltması ve daha sinüzoidal bir zıt-EMK gerilimi sağlamasıdır.

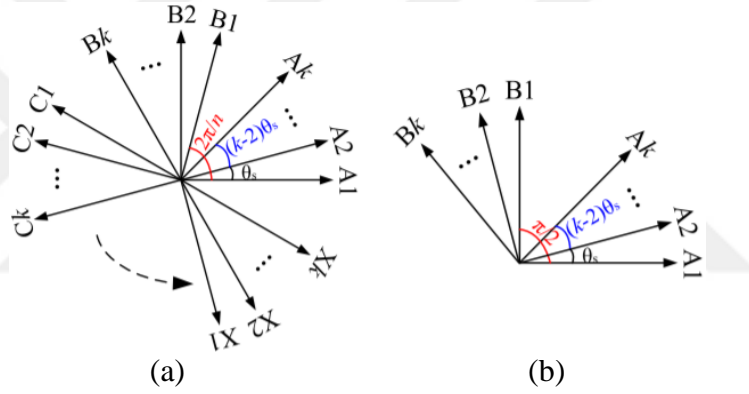
Stumberger ve diğ. [60] tarafından yapılan çalışmada, 6-faz alan-zayıflatmalı SMSM'nin sonlu elemanlar (SE) tabanlı analizleri gerçekleştirilmiştir. Motora üçüncü harmonik içeren akım dalga şekli verilmiş ve klasik sinüzoidal akım beslemeli duruma göre daha fazla moment çıkışı elde edilmiştir. Motor testleri gerçekleştirilerek SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Swamy ve diğ. [61] tarafından yapılan çalışmada, asenkron ve SM AC senkron motorların hız aralığını artırmak için yapılan çift 3-faz diyot köprüsü ve iki tane IGBT içeren anahtarlama tekniği ve stator sargı şekli açıklanmıştır (Şekil 1.24). Prototip üretilerek deneysel çalışmalara yer verilmiştir.

Shao ve diğ. [62] tarafından yapılan çalışmada, akı anahtarlama sürekli mıknatıslı (AASM) motorlarda çok fazlı sargı konfigürasyonlarının tasarım detayları ve sargı setleri arasındaki faz kayması değerleri incelenmiştir (Şekil 1.25). Çok fazlı bir motor için moment, gerilim gibi ifadeler çıkarılmış, faz kaymasının etkisi matematiksel olarak incelenmiştir. En düşük moment dalgalanması ve gerilim dalgalanmasını veren optimum faz kaymasının sargı tipine bağlı olduğu belirtilmiştir. İki tane, üç tane ve dört tane 3-faz, iki tane 6-faz ve üç tane 4-faz AASM motorlar için farklı oluk-kutup



Şekil 1.24. (a) Önerilen devre ve (b) statorun bir segmenti ve sargı yapısı [61]

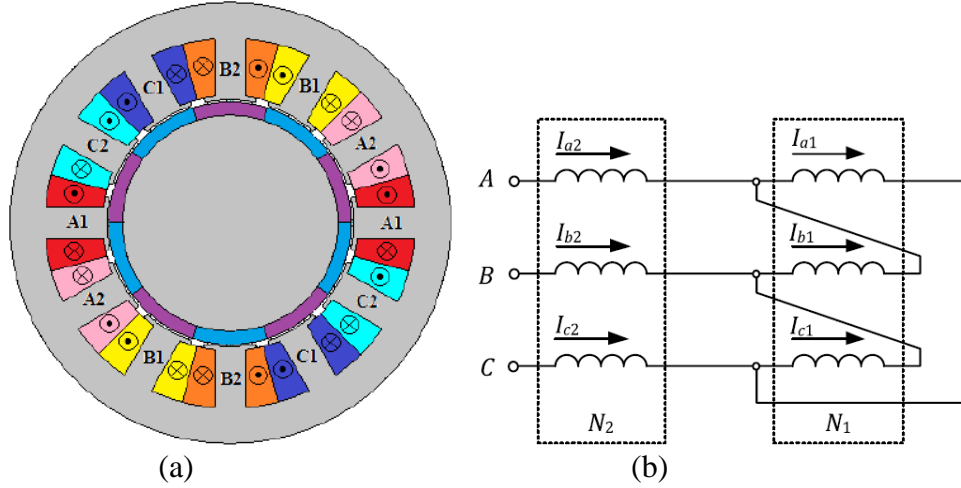


Şekil 1.25.  $\theta_s$  faz açısına sahip k tane n-faz sargı dağılımı (a)  $n \geq 3$  ve (b)  $n = 2$  [62]

kombinasyonlarında SE tabanlı analizleri gerçekleştirilmiştir. Analitik sonuçlar ile SEA sonuçlarının uyum içerisinde olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bazı motorların prototip üretimi gerçekleştirilmiş, SEA sonuçları ile test verileri karşılaştırılmıştır.

Yiguang ve diğ. [63] tarafından yapılan çalışmada, 12-oluk 10-kutuplu çift 3-faz motorun sargı setlerinden birinin kısa devre olması durumu için moment, gerilim gibi denklemler çıkarılmıştır. Ayrıca demanyetizasyon akımını ve frenleme momentini veren ifadeler verilmiştir. Zhao ve diğ. [64] ise doğrudan sürürlü uygulamalar için iki statorlu çubuk tip rotorlu bir motor yapısı önermiştir. Sargı setleri arasında 90 elektriksel derece faz farkı bulunmaktadır. Önerilen motor LG'nin çamaşır makinelerinde kullanılan üç fazlı bir motoru ile karşılaştırılmıştır. Motor prototipi üretilerek SEA sonuçları ile test sonuçları karşılaştırılmıştır.





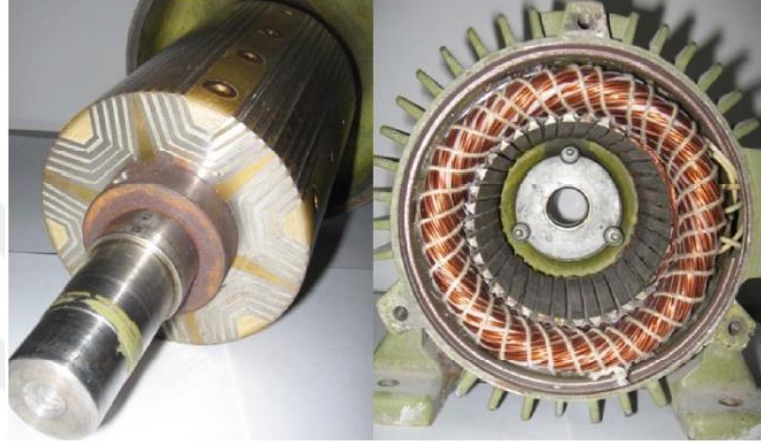
Şekil 1.26. (a) 12-oluk 10-kutuplu yapının çift 3-faz sargı yapısı ve (b) sargı bağlantı şekli [67]

Tessarolo ve diğ. [65] tarafından yapılan çalışmada, 12-oluk 10-kutuplu bir motor için çok-katmanlı 3-faz ve 6-faz sargı yapılarının motor performansına etkileri incelenmiştir. Qi ve diğ. [66] tarafından yapılan çalışmada ise 12-oluk 10-kutuplu motorun çift 3-faz sargı setlerinin arasındaki faz açısı değiştirilerek sargı setleri arasındaki kuplaj etkisi azaltılmıştır. Ayrıca motorların d-q eksen modelleri çıkarılmıştır. Motor performansları alan zayıflatma metodu da kullanılarak SEA ile elde edilmiştir.

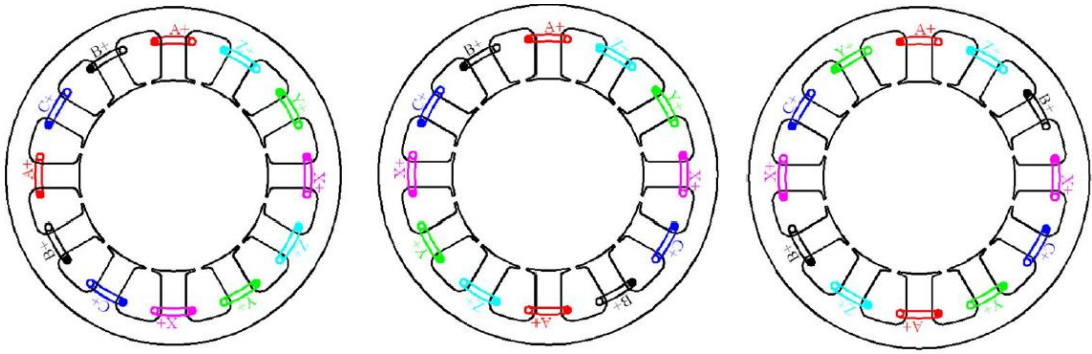
Abdel-Khalik ve diğ. [67] tarafından yapılan çalışmada, 12-oluk 10-kutuplu 3-faz bir motorun MMK'deki harmoniklerini azaltmak için çift 3-faz bir sargı yapısı önerilmiştir. Bu çalışmada, klasik çift 3-faz setlerden daha farklı bir yapı önerilmiştir: Şekil 1.26(a)'da verilen 6-faz sargı yapısında sargı setleri üçgen ve yıldız bağlı olarak Şekil 1.26(b)'de gösterildiği gibi birleştirilmiştir. Yıldız ve üçgen bağlantılı sargı setlerinde Amper x sarım değerlerini aynı tutacak şekilde MMK hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmalar çift 5-faz motorlar için de genişletilerek analizler gerçekleştirilmiştir.

Ursu ve diğ. [68] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 36-oluk 6-kutuplu 6-faz bir senkron relüktans motorun tasarımı ve SEA ile performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca rotordaki katmanlara ferrit ve NdFeB gibi farklı mıknatis malzemeleri eklenerek moment dalgalanmasına etkisi incelenmiştir. Bunun yanında, motor prototipi (Şekil 1.27) üretilerek ayrıntılı performans verileri ölçülmüştür.

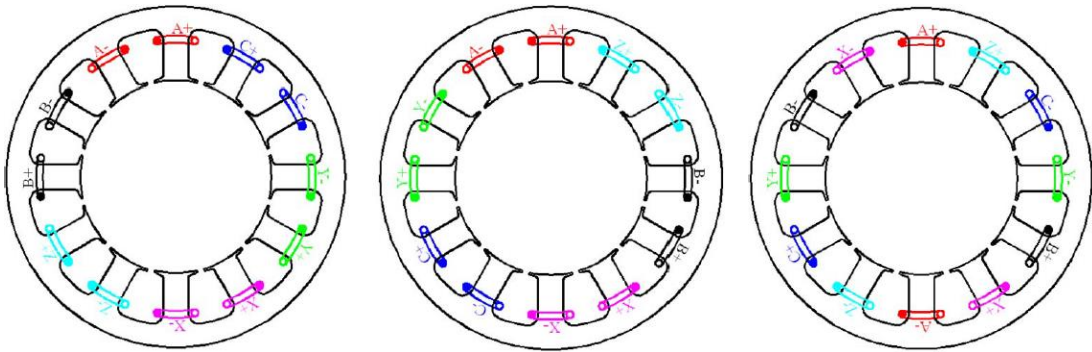
Wu ve diğ. [69] tarafından yapılan çalışmada, kesir-oluklu konsantre sargılı SM bir motor yapısının sargılarının kısa devre olması durumu matematiksel analizlere de yer verilerek incelenmiştir. Ayrıca mıknatısların demanyetizasyon riskine karşı SE analizleri gerçekleştirilmiştir. 24 kW'lık 24-oluk 22-kutuplu motorun prototipi üretilmiş ve gerilim, çıkış momenti ve kısa devre durumları test edilmiştir. Luo ve diğ. [70], hava-uzay uygulamalarında kullanılan elektromekanik eyleyiciler için çift 3-faz



Şekil 1.27. 6-faz mıknatıs destekli senkron relüktans motor prototipi [68]



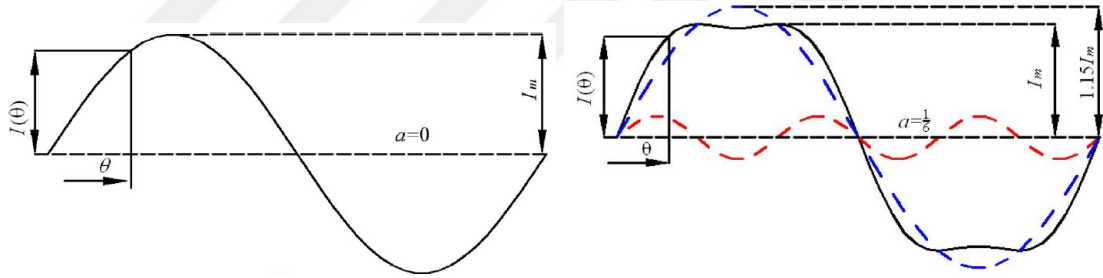
Şekil 1.28. 12-oluk 8-kutuplu çift 3-faz motor sargı seçenekleri [71]



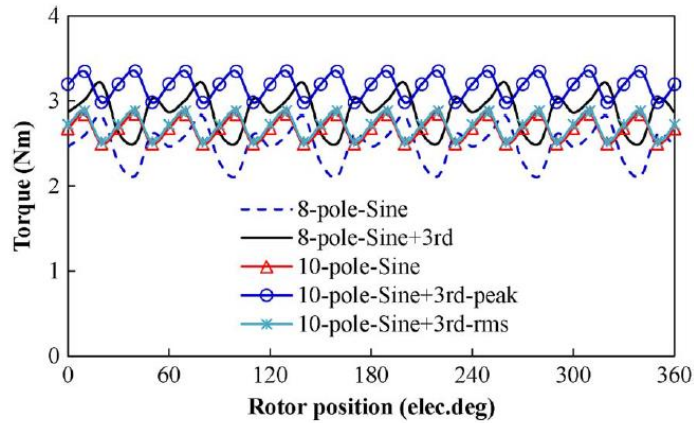
Şekil 1.29. 12-oluk 10-kutuplu çift 3-faz motor sargı seçenekleri [71]

SM motor tasarımı gerçekleştirmişdir. Doğrusal ve doğrusal olmayan manyetik eşdeğer devre modelleri çıkarılmıştır. Motor prototipi üretilerek performans testleri gerçekleştirilmiştir.

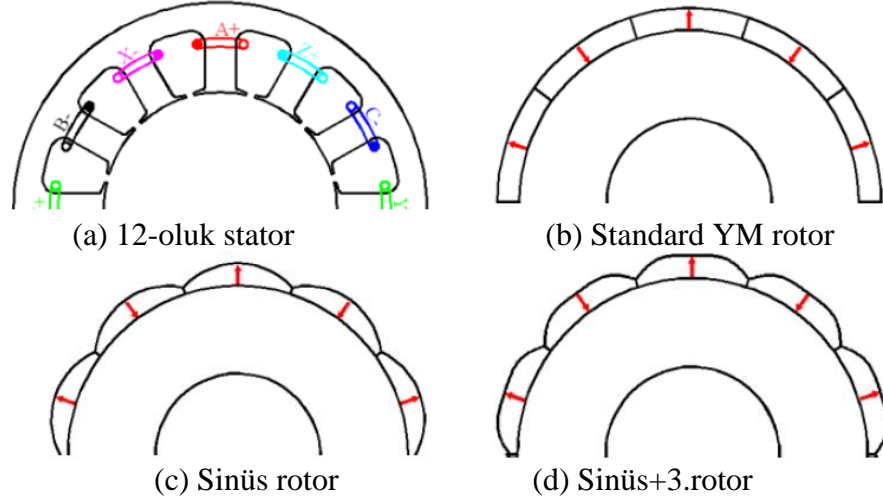
Wang ve diğ. [71] tarafından yapılan çalışmada, 12-oluk 8- ve 10-kutuplu iki farklı motor için çift 3-faz tasarımların performans üzerine etkisi incelenmiştir. 12-oluk 8- (Şekil 1.28) ve 10-kutuplu (Şekil 1.29) motorlar için farklı sargı yapıları oluşturularak 3-faz sargı setlerinin aynı fazda veya bir faz farkı ile yerleşimleri incelenmiştir. Bununla birlikte, moment ve gerilim ifadeleri analitik olarak elde edilmiştir. Stator sargılarına verilen akıma eklenen 3. harmoniğin çıkış momenti üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada, Şekil 1.30'de gösterilen harmonik içeren akımlar motor sargılarına verildiğinde ortalama momenti bir miktar artırdığı fakat moment dalgalanmasının hemen hemen aynı kaldığı belirtilmiştir (Şekil 1.31). Ayrıca 12-oluk 10-kutuplu motorun prototip üretimi gerçekleştirilerek, moment, akım ve gerilim gibi performans verileri elde edilmiştir.



Şekil 1.30. (a) Sinüzoidal ve (b) sinüzoidal+3.harmonik akımlar [71]



Şekil 1.31. Motorların çıkış momentlerinin karşılaştırılması [71]

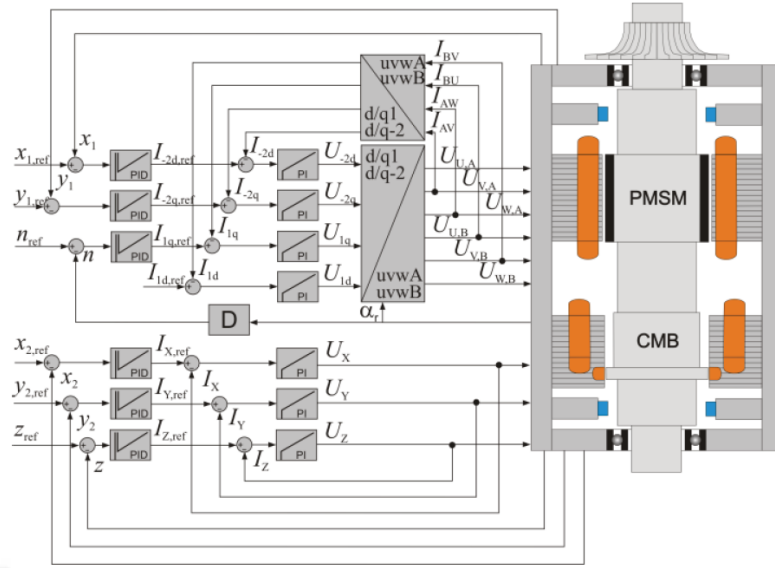


Şekil 1.32. 12-oluk 10-kutuplu motorun farklı mıknatıs şekilleri [72]

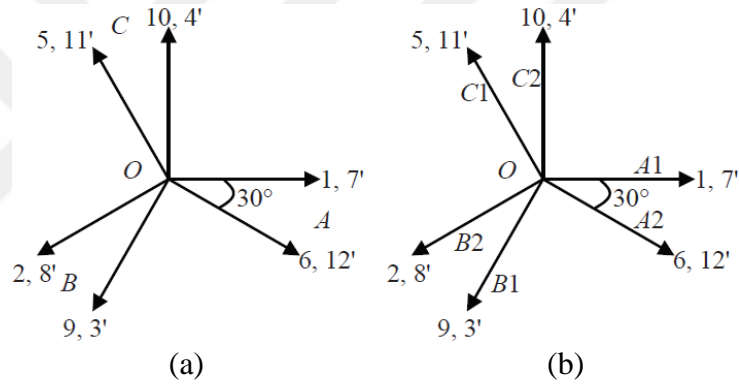
Wang ve diğ. [72] tarafından yapılan bir başka çalışmada, çift 3-faz yüzey mıknatıslı senkron motorun moment yoğunluğunu artırmak ve moment dalgalanmasını azaltmak için akıma 3. harmonik enjekte edilmiş, mıknatıs şekli de 3. harmonik oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Analizleri yapılan farklı mıknatıs şekilleri Şekil 1.32'de gösterilmiştir. Analizler hem analitik hem de 2D SEA ile gerçekleştirilmiş, üretilen prototip motorun test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Mitcham ve diğ. [73] tarafından yapılan çalışmada, hata toleransı yüksek SMSM uygulamaları için fazlar arasındaki kuplaj etkisi düşük oluk-kutup kombinasyonları incelenmiştir. Önerilen oluk-kutup kombinasyonlarının, bir fazdaki bir arızanın diğer fazları istenmeyen bir şekilde etkilemediğinden emin olmaya yardımcı olacağı belirtilmiştir. Ayrıca titreşim ve demir kayıplarının azalmasını sağlayan farklı oluk-kutup kombinasyonları gösterilmiştir. Messenger ve diğ. [74] tarafından yapılan çalışmada, 660 W, 60000 rpm rulmansız çift 3-faz motor ve sürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.33). SM rotor 2 veya 4 mıknatıstan oluşmaktadır. Üretilen 2-kutuplu motor prototipi ile %50 yüklemde 60000 rpm rotor hızına çıkılabilmektedir.

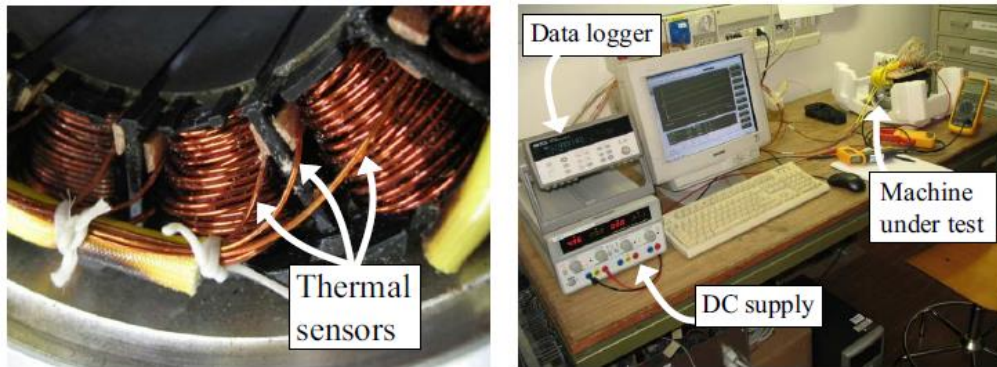
Shao ve diğ. [75], 12-oluk 11-kutuplu çift 3-faz akı anahtarlamalı SMSM tasarımı gerçekleştirmiştir. Motor hem 3-faz hem de çift 3-faz olacak biçimde Şekil 1.34'de gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Çift 3-faz AASM motor ile 3-faza sahip motorun performansı karşılaştırıldığında; fazlar arasındaki 30 elektriksel derecelik kaymadan dolayı sargı faktörünün daha yüksek olduğu ve daha yüksek moment çıkışı sağladığı belirtilmiştir.



Şekil 1.33. Motor kontrol yapısı [74]



Şekil 1.34. 12-oluk 11-kutuplu motorun fazör diyagramları: (a) 3-faz (b) çift 3-faz [75]



Şekil 1.35. Isıl testlerin yapıldığı test sistemi [76]

Bu çalışmaların yanında, Barcaro ve diğ. [76], çift 3-faza sahip 12-oluk 10-kutuplu gömülü mıknatıslı bir motorun ısıl analizlerini sargılarda hata olması durumunda incelemişlerdir. Sargılardaki hata durumunda motorun sıcaklık karakteristiği hem

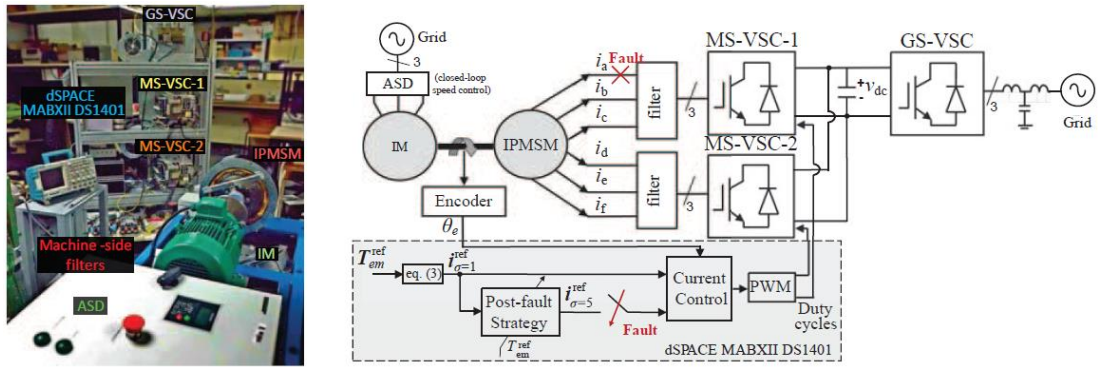
analitik hem de SEA ile elde edilmiş, sonuçlar prototip motorun sargı sonlarına yerleştirilen sıcaklık sensörlerinden (Şekil 1.35) alınan veriler ile karşılaştırılmıştır. Barcaro ve diğ. [77] tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, çift 3-faz gömülü mıknatıslı Ld/Lq (d- ve q-ksen endüktansları oranı) yüksek bir motorun sensörsüz rotor pozisyonu kontrolü gerçekleştirilmiştir.

### 1.3.3.3. 6-Faz SMSM sürücü ve güç elektrigi çalışmaları

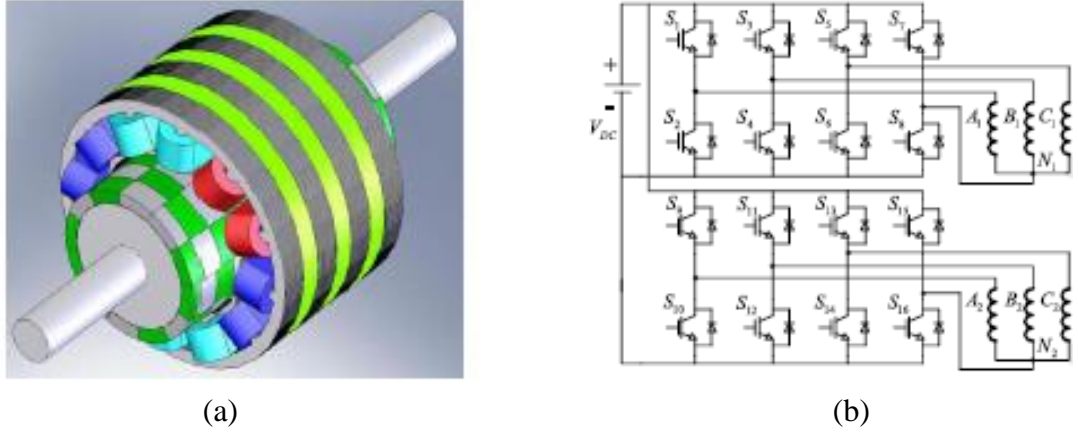
Baneira ve diğ. [78] tarafından yapılan çalışmada, çift 3-faz SMSM'nin sargılarında hata olması durumundaki kontrol stratejisi incelenmiştir (Şekil 1.36). Bu çalışmada, stator sargı kayıplarını minimize etme ya da çıkış momentini maksimize etme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Yongxiang ve diğ. [79] tarafından yapılan çalışmada, 6-faz SM bir doğrusal motor için hata dayanımı yüksek bir kontrol yöntemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.37). İncelenen doğrusal motorun çalışma prensibi temel matematiksel modeller ile verilmiştir. Vektör kontrol yöntemi kullanılarak doğrusal manyetik alan dalga şeklini oluşturmak için motor sargı akımının genliğinin ve fazının kontrol edilmesi ile bu yöntem uygulanır. Bu yöntem esas alınarak tek fazın açık devre olduğu durumda kontrol stratejisi uygulanmıştır. Hem SEA hem de MATLAB®/simulinkte motorun benzetimleri gerçekleştirilmiştir.

SMSM'lerin 6-faz sürücüleri ilgili yapılan diğer motor kontrol çalışmaları da [80-88] arasında verilmiştir. Sürücü ile ilgili yapılan çalışmalar tez konusunun dışında yer aldığı için bu çalışmaların ayrıntılarına tez kapsamında yer verilmemiştir.



Şekil 1.36. Motor test sistemi [78]



Şekil 1.37. (a) 6-faz sürekli mıknatıslı doğrusal motor (SMDM) yapısı ve (b) çift üç fazlı 4-bacaklı evirici motor sürücü konfigürasyonu [79]

#### 1.3.3.4. 6-Faz asenkron motor ve sürücü çalışmaları

6-faz motorlar için yukarıda verilen çalışmaların hepsi sürekli mıknatıslı motorları içermektedir. Bunun yanında, literatürde 6-faz asenkron motorlar için yapılmış birçok çalışma mevcuttur [89-103]. Lipo ve diğ. [89-92] tarafından yapılan çalışmalarda çift 3-faza sahip asenkron motorların tasarımı ve kontrolü ile ilgili önemli çalışmalar yapılmıştır. Bunun yanında, Levi ve diğ. [101-103] tarafından yapılan çalışmalarda 6-faz asenkron motorların kontrolü ile alakalı ciddi çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Önemli görülen çalışmalar kaynaklar bölümünde referans olarak gösterilmiş ancak bu çalışmaların ayrıntıları bu tezde verilmemiştir. Bu çalışmalarda göze çarpan detay 6-faz asenkron motorların yüksek kutuplara çıkamamasıdır.

#### 1.3.4. 7-Faz SMSM çalışmaları

7-faz SMSM çalışmaları da literatürde az da olsa görülmektedir. Bu yayınlar içerisinde Scuiller ve diğ. [104] tarafından yapılan çalışmada, çok fazlı motorlar hakkında genel bir tasarım yöntemi sunulmuş ve bir elektrikli araç için var olan 3 fazlı bir motor tasarımının sargı yapısı yedi fazlı kesir oluklu bir sargı yapısına dönüştürülmüştür. Yeni tasarım sonucunda, motorun moment dalgalanması ve moment yoğunluğu kayda değer bir şekilde artmıştır. Fornasiero ve diğ. [105] tarafından yapılan çalışmada, aynı stator laminasyonuna sahip fakat farklı faz sayılı; 3-, 5- ve 7-faz, birkaç motor tasarımı karşılaştırılmıştır. Oluk sayısı aynı tutularak kutup sayısı değiştirilmiş ve farklı sargı konfigürasyonları incelenmiştir. Her bir durumda hava aralığındaki MMK değişiminin harmonikleri ve rotor kayıp bileşenleri incelenerek, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aslan ve

diğ. [106] tarafından yapılan çalışmada, konsantre sargı yapılı SM motorlardaki mıknatıs girdap akımları incelenmiştir. MMK uzay harmonikleri ve bu harmoniklerin mıknatıs kayıplarına etkisi irdelenmiştir. MMK harmoniklerinin genlikleri ile mıknatıs kutup boyutları arasındaki etkileşimi inceleyen mıknatıs kayıplarını hesaplayabilen analitik bir model geliştirilmiştir. Bu analitik hesaplama yöntemi farklı oluk-kutup kombinasyonlarına sahip 3-, 5- ve 7-faz konsantre sargı yapılı motorlar için uygulanmış mıknatıs kayıp seviyeleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca analitik olarak elde edilen sonuçlar SEA sonucu elde edilen hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır. J.R. Figueroa ve diğ. [107] tarafında yapılan çalışmada ise, sürekli mıknatıslı motorun farklı hata durumlarında ve farklı faz sayılarında moment hız karakteristikleri incelenmiştir. Motorlar kendi aralarında hem faz sayılarına göre hem de farklı kontrol yöntemlerine göre incelenmiş ve bu durumlarda oluşan hata seviyeleri karşılaştırılmıştır.

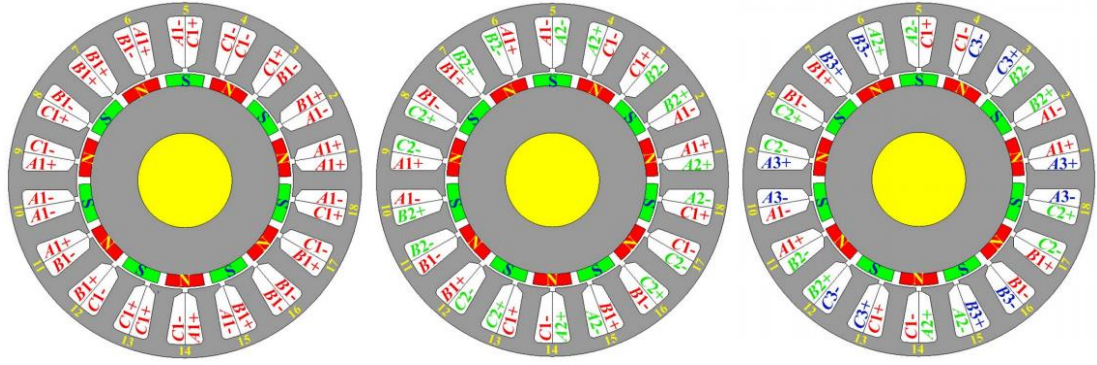
### **1.3.5. 8-Faz SMSM çalışmaları**

8-faz SMSM çalışmaları araştırıldığında literatürde bu alanda çalışma yapılmadığı gözlenmiştir. Daha çok asenkron motor özelinde yapılan çalışmalar ile karşılaşılmıştır. Çok fazlı SMSM'ler için bir çalışma yapılmamış olmasının nedeni olarak bu motorların sargılarının tasarlanma zorluğu ve karmaşıklığı ile mevcut bir sürücü ürününün olmaması gösterilebilir. Cerini tarafından yapılan çalışmada [108], basınçlı bir kimyasal dönüşüm mekanizmasında dönüştürücünün bir parçası olarak 8-faz bir doğrusal asenkron generatör kullanılmış ve hedeflenen güç seviyelerinin elde edilmesi sağlanmıştır. Bugenis ve diğ. [109] tarafından yapılan çalışmada, yine bir asenkron motor üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Motorun sinüzoidal bir değişime sahip olmayan gerilim ile beslendiğinde optimum faz sayısının ne olması gerektiğine dair çalışmalar yürütülmüştür. 2- ile 8-faz arasındaki tüm fazların oluşturacağı etkiden bahsedilmiştir. Fakat çalışmanın çok kapsamlı olmadığı görülmektedir. Kando [110] tarafından yapılan çalışmada ise, bir asenkron motorun kutup sayısı ve buna bağlı faz sayısı değiştirilerek hız ayarı gerçekleştirilmiştir.

### **1.3.6. 9-Faz SMSM çalışmaları**

Bu tez çalışmasına başlanıldığında, literatürde 9-faz SMSM'ler ile ilgili çok az sayıda çalışmanın yapıldığı görülmekteydi. Fakat ilerleyen yıllarda, bu çok fazlı motorlara





Şekil 1.38. 18 oluk 14 kutuplu motor için 3-, 6- ve 9-faz sargı konfigürasyonları [111]

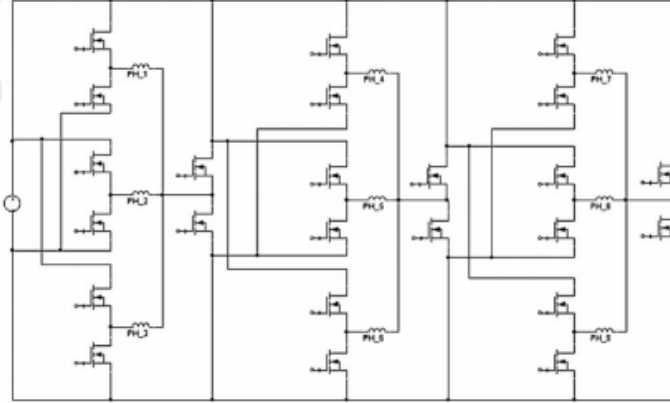
olan ilgilinin gittikçe artmaya başlandığı söylenebilir. Bununla birlikte, yapılan çalışmaların birçoğu hala ya asenkron motorlar ile ilgili ya da SM'li ya da asenkron motor sürücü çalışmalarını kapsamaktadır. Bu bölümde, 9-faz SMSM'ler ile ilgili yapılan çalışmalar ayrıntılı bir şekilde incelenmiş, motor tasarımı ve motor sürücüsü ile ilgili önemli görülen çalışmalar özetlenmiştir.

Xiao Chen ve diğ. [111] tarafından yapılan çalışmada, 3-faz konsantre sargı setlerine sahip SM motorlarda MMK harmoniklerini azaltmaya yönelik genel bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen motorda MMK dağılımlarının elde edilmesi için analitik denklemler elde edilmiştir. Temel harmonik dışındaki tüm alt harmonikleri ortadan kaldıran 9-faz sargı yapısına sahip, 18 oluk 14 kutuplu yeni bir motor, önerilen genel yaklaşıma dayanarak tasarlanmıştır. Ayrıca rotor mıknatıs girdap kayıplarına ve demir kayıplarına neden olan yüksek dereceli MMK harmoniklerini azaltan, hata dayanımı ve sargı faktörü yüksek, titreşim ve duyulabilir gürültüsü daha az olan bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem konsantre sargı yapılı diğer oluk-kutup kombinasyonlarına sahip motorlara da uygulanabileceği, fakat oluk sayısının kutup sayısının 1,5 katına eşit olan yapıların bu durumun dışında tutulması gerektiği belirtilmiştir. Motorun 3-, 6- ve 9-faz sayısına sahip olması durumundaki sargı seçenekleri Şekil 1.38'de gösterilmiştir.

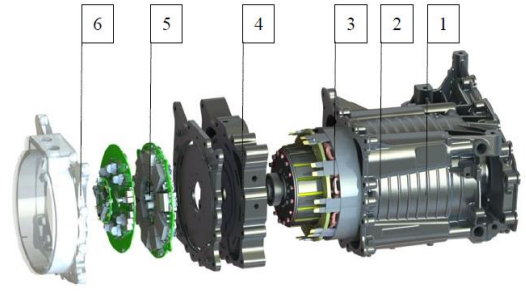
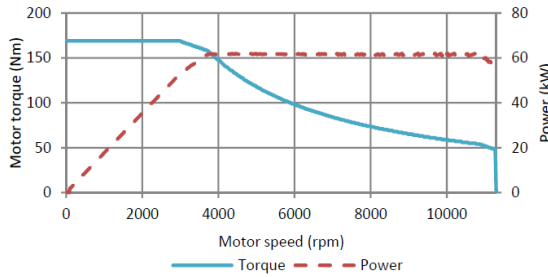
Gautam ve diğ. [112] tarafından yapılan çalışmada, 9-faz gömülü mıknatıslı 36-oluk 4-kutuplu bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Statordaki endüktans değişimleri elde edilmiştir. Ancak, bu çalışmada hem motorun tasarımı hem de sargı setlerinin avantajları ayrıntılı bir şekilde sunulmamıştır.

Ruba ve Fodorean [113] tarafından yapılan çalışmada, 9-faz bir SMSM'yi beslemek için 9-faz bir sürücü sistemi geliştirilmiştir (Şekil 1.39). Kullanılan 9-faz motorda birbirinden bağımsız üç fazlı üç farklı sargı seti sayesinde motorda ortaya çıkabilecek hata riskine karşı önlem alınmıştır. Ayrıca kesir-oluklu bir motor kullanıldığı için moment dalgalanması düşük olan bir moment dalga şekline sahip motor kullanmaları motoru sürmede kolaylık sağlayan bir başka avantaj olarak düşünülebilir. Sürücü sistemi incelendiğinde, birbirinden bağımsız üç farklı 3-faz evirici kullanıldığı görülmektedir. Bu sayede, ortaya çıkabilecek hatalara karşı dayanımı oldukça yüksek bir sistem elde edilebilmektedir. Ayrıca her bir eviriciye ek olarak bir yardımcı bacak ekleyerek her bir eviricideki hata toleransı da artırılmıştır.

Burkhardt ve diğ. [114] tarafından yapılan çalışmada, elektrikli araç uygulamaları için 9-faz çubuk tip rotora sahip sürekli mıknatıslı bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.40). Ayrıca bu motorun eviricisi için yapılan çalışmaların ayrıntıları [115]'de verilmiştir.

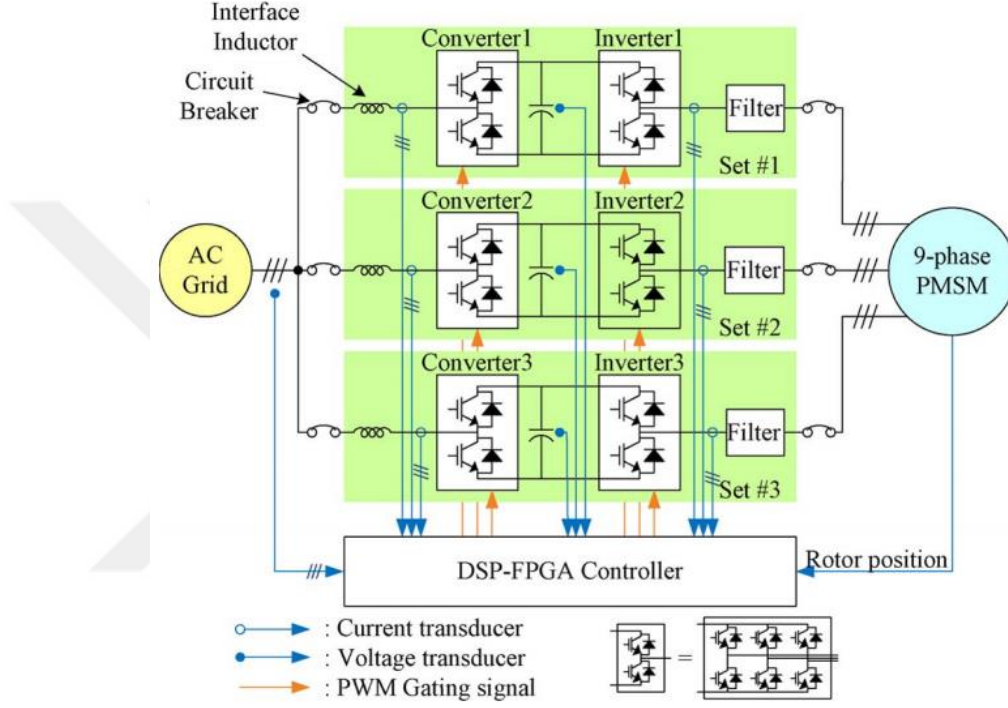


Şekil 1.39. Önerilen basitleştirilmiş model ve hata toleransı yüksek 9-faz sürücü yapısı [113]

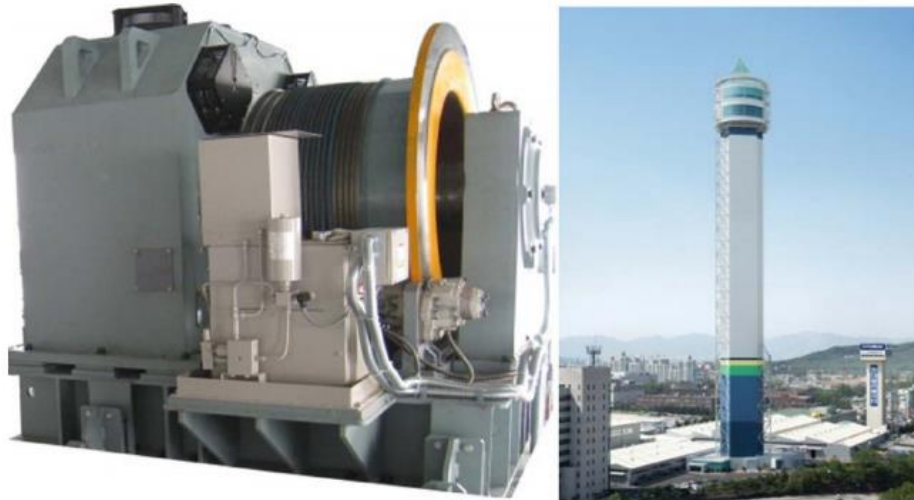


Şekil 1.40. (a) Moment- ve güç-hız eğrisi ve (b) 9-faz motor modeli [114]

Jung ve diğ. [116] tarafından yapılan çalışmada, çok yüksek hızlı bir asansör için geliştirilen çok fazlı bir tahrik motoru için sürücü sistemi tasarımı yapılmıştır. Sargı setlerinin simetrisi alınarak motorun basitleştirilmiş matematiksel modeli verilmiştir. Basitleştirilmiş matematiksel model ile 9-faz SMSM geleneksel üç fazlı akım kontrol algoritması ile kontrol edilmiştir. Şekil 1.41’de geliştirilen sürücü sisteminin gösterimi verilmiştir. Şekil 1.42’da ise kullanılan motor ve test edilen gökdelen gösterilmiştir.



Şekil 1.41. Geliştirilen sürücü sisteminin gösterimi [116]



Şekil 1.42. 9-faz SMSM ve asansörün test edildiği gökdelen [116]

Bir başka çalışmada, bir rüzgar türbini için 6 MW gücünde doğrudan sürürlü 9-faz sürekli mıknatıslı bir senkron generatörün vektör kontrol çalışması gerçekleştirilmiştir [117]. 9-faz sürekli mıknatıslı motorların sürücüleri için yapılan farklı çalışmalar [118-123] arasında verilmiştir.

Bunun yanında, 9-faz asenkron motorların tasarımı ve sürücüleri için de farklı çalışmalar mevcuttur. Kelly ve diğ. [124] tarafından yapılan çalışmada, 12-kutup 3-faz ve 4-kutup 9-faz olarak sargı yapıları değiştirilebilir bir asenkron motor tasarlanmıştır. Çalışmada kullanılan kutup-faz modülasyonu yöntemi kutup-faz oranını ayarlayan bir yöntemdir.

Singh ve diğ. [125] tarafından yapılan çalışmada ise vektör kontrollü bir asenkron motor sürücü devresi için 9-faz AC-DC çevirici devresi tasarlanmıştır. Tasarlanan bu devre ile 17. harmoniğe kadar olan tüm harmonikleri ortadan kaldırmak ve güç faktörünü artırmanın mümkün olduğu belirtilmiştir.

Karugaba ve diğ. [126] tarafından yapılan çalışmada, 5-, 7- ve 9-faz asenkron motorların aktif ve reaktif güçlerinin hesaplanması için matematiksel ifadeler verilmiş ve hesaplama yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Ge ve diğ. [127] tarafından yapılan çalışmada, 36-oluklu stator ve kutup değişimli sargı yapıları kullanılmıştır. Klasik sarımlı, halka şekilli sarıma sahip ve çift rotor halka şekilli sarıma sahip makineler verimleri ve sargı yapılarının karmaşıklıkları bakımından karşılaştırılmıştır. Bu yapıların analizleri ve kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler ve kontrol çalışmaları sonucunda 3-faz 12-kutup ve 9-faz 4-kutuplu yapıların prototipleri üretilmiştir.

Gautam ve diğ. [128] tarafından yapılan çalışmada, yine 36-oluklu bir yapı kutup faz modülasyonu yöntemi kullanılarak 3-faz 12-kutuplu yapıdan 9-faz 4-kutuplu bir yapıya dönüştürülmüştür. Çalışmada yapılan dönüşümün eşdeğer devre yapısı incelenmiştir.

Gautam ve diğ. [129] tarafından yapılan bir başka çalışmada ise kutup faz modülasyonu prensibiyle çalışan çok fazlı asenkron motorların farklı hızlarda çalıştırılmasıyla moment-hız verilerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Pan ve diğ. [130] tarafından yapılan çalışmada, 9-faz değişken hızlı sürücü sisteminin DGM frekansının düşürülmesi için oluşturulan kontrol şemasından bahsedilmiştir. Ayrıca yapılan çalışma ile rotor kayıpları ve moment dalgalanması azaltılmıştır. 9-faz ve 160 kW'lık bir motor prototipi de üretilmiştir.

Liu ve diğ. [131] tarafından yapılan çalışmada, çok fazlı asenkron motorlar için stator kaçak endüktansı, rotor dirençleri ve rotor kaçak endüktansı gibi bileşenleri hesaplamak için bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem 9-faz 2 kW gücünde bir asenkron motor ile test edilmiştir.

Umesh ve diğ. [132] tarafından yapılan çalışmada, 9-faz bir asenkron motorun sargı şemasının detayları verilmiştir. Ayrıca çalışmada iki seviyeli 9-faz evirici kullanılmıştır.

Momoh [133] tarafından yapılan bir diğeri çalışmada, üçgen bağlantılı 9-faz kafes rotor yapılı bir asenkron motora ait dört farklı üçgen bağlantı yöntemi ve yıldız bağlantı yöntemi ile performans karşılaştırması yapılmıştır.

Bastos ve diğ. [134] tarafından yapılan çalışmada ise akımda meydana gelen 3. harmonik yok edilerek moment yoğunluğunun arttırılması için çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Subotic ve diğ. [135] tarafından yapılan çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan çok fazlı motorlar ve evirici devrelerini besleyen bütünleşik bataryalardan bahsedilmiştir. Ayrıca bu sistemlerin kontrol yapılarına da çalışmada yer verilmiştir.

### **1.3.7. 10-Faz SMSM çalışmaları**

10-faz motorlar ile ilgili literatürde çok sınırlı sayıda çalışma yapıldığı görülmüştür. Bostancı ve diğ. [136] tarafından yapılan çalışmada, 10-faz bir SMSM'nin tasarımı ve kontrolü yapılmıştır. Fazlar arasındaki manyetik kuplaj etkisi incelenmiştir. Motor prototipi üretilmiş ve deneysel sonuçlar ile 2D SEA tarafından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

### **1.3.8. 12-Faz SMSM alışmaları**

12-faz SMSM alışmaları da literatürde az sayıda da olsa karşımıza çıkmaktadır. 12-faz SM senkron motor ve generatör tasarımları ile ilgili çalışmalar [137-141] arasında verilmiştir. Ayrıca 12-faz motorların sürücöleri ile ilgili de farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir [142, 147]. Bununla birlikte, 12-faz asenkron motor kontrolü [148] ve akı anahtarlamalı generatör [149] ile ilgili de çalışmalar yapılmıştır.

### **1.3.9. 15-Faz SMSM alışmaları**

15-faz SMSM alışmaları da literatürde az sayıda da olsa görölmektedir. Daha önce motor 15-faz motorların kontrolü ile alakalı çalışmaların yapıldığı görölmüştür [150-152]. Ayrıca asenkron motor tasarımı ve sürücöleri üzerindeki çalışmalar da [153-156] arasında verilmiştir.

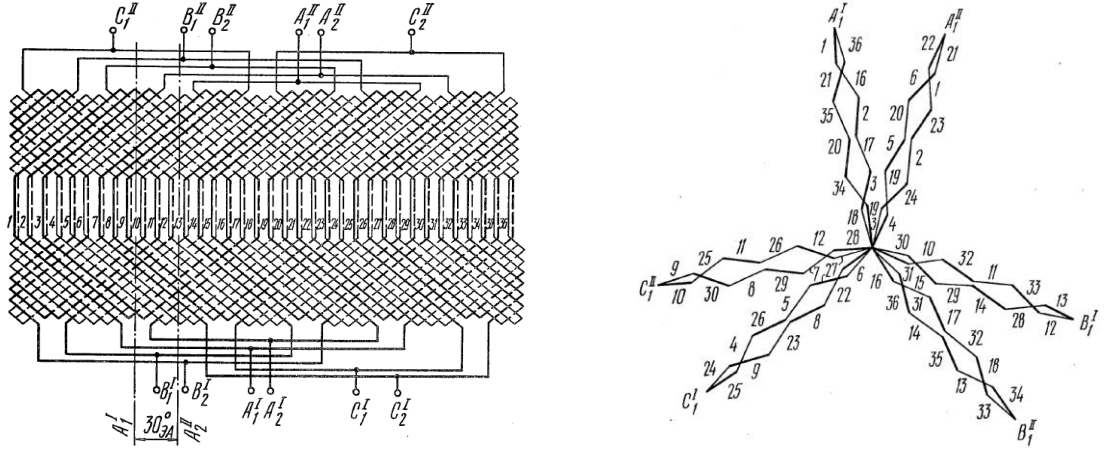
### **1.3.10. Patent taraması**

Bu bölümde, 6- ve 9-faz motorlar için alınan patentlerden önemli görölenler özetlenmiş ve firmaların ve araştırmacıların hangi alanlarda yoğunlaştığı incelenmiştir.

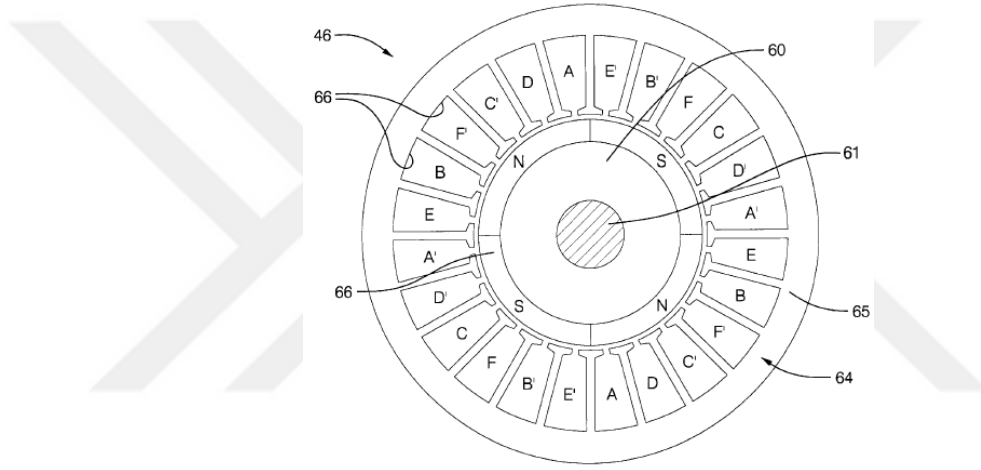
#### **1.3.10.1. 6-Faz patent taraması**

6-faz motorlar ile ilgili patent araştırması yapıldığında hem senkron hem de asenkron motorlar için çok sayıda patent çalışması yapıldığı görölmüştür. Bu çalışmada, sadece SMSM'ler için yapılan patent içeriklerinden bazılarına yer verilmiştir.

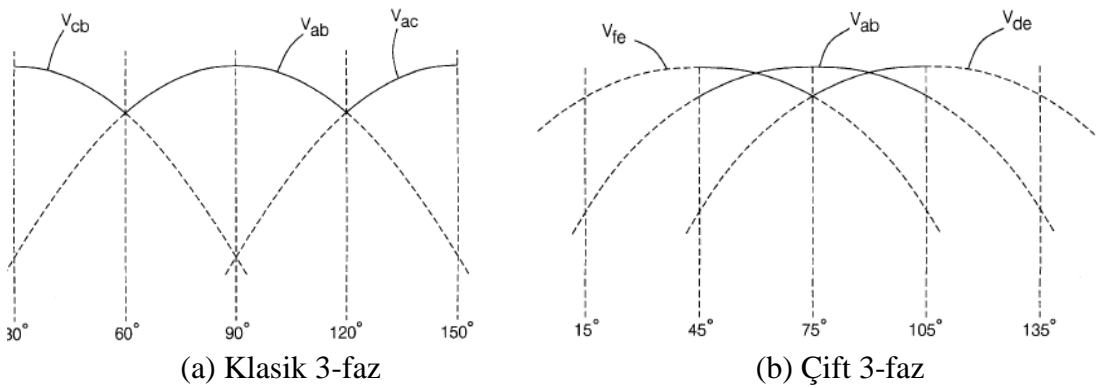
U.S. 4,132,914 (şekil 1.43) numaralı patentte Khutoretsky ve diğ. [158], sargı sonu bağlantılarındaki terminallerde maksimum gerilimi azaltmak için 6-faz bir motorda yeni bir sargı tasarımı önermiştir. Bunun için, aralarında 30 elektriksel derece faz farkı bulunan çift 3-faz sargı setinde, üç fazlı sargı setlerinden biri örneğin saat yönünde sarılırken diğeri setin tersi yönde sarılması önerilmiştir.



Şekil 1.43. Dış rotor ve iç statora sahip motor yapısı [158]



Şekil 1.44. 24-oluk 4-kutuplu motor için önerilen 6-faz sargı yapısı [159]



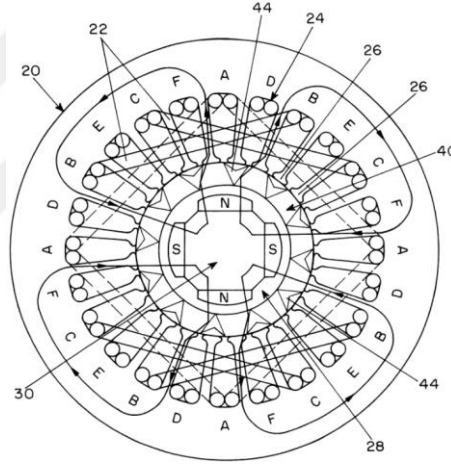
Şekil 1.45. 24-oluk 4-kutuplu motorun zıt-EMK gerilimleri [159]

U.S. 5,982,067 (Şekil 1.44) numaralı patentte Sebastian ve diğ. [159], elektrikli araçlarda kullanılan, 30 elektriksel derece faz farkı ile oluşturulan çift 3-faza sahip bir fırçasız DC motorun performansını iyileştirmeye yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir.

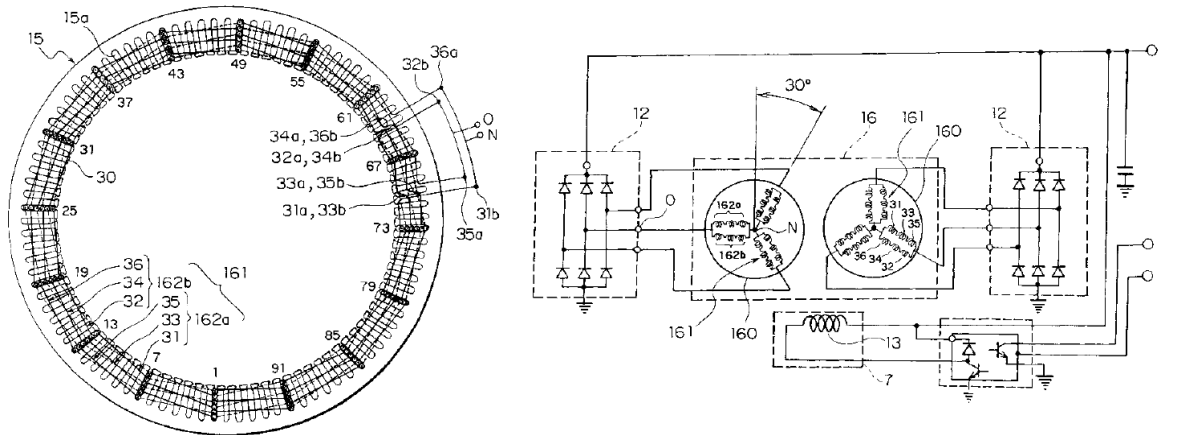
Kullanılan sargı yapısı sayesinde, gerilimin tepe noktasında klasik üç fazlı yapıya göre daha az bir düşüş yaşanmıştır (Şekil 1.45). Bu sayede çıkış momentinde daha yüksek değerler elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında moment dalgalanmasını azaltmaya yönelik çalışmalar da gerçekleştirilmiştir.

U.S. 6,504,281 numaralı patentte (Şekil 1.46) Smith ve diğ. [160] tarafından yapılan çalışmada, 24-oluk 4-kutuplu yüzey mıknatıslı bir yapı için hata toleransı yüksek 6-faz bir motor yapısı önerilmiştir.

U.S. 6,552,463 B2 numaralı patentte (Şekil 1.47) Oohashi ve diğ. [161] tarafından yapılan çalışmada, çok-katmanlı çift 3-faza sahip 96-oluklu bir motor ve sürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir.

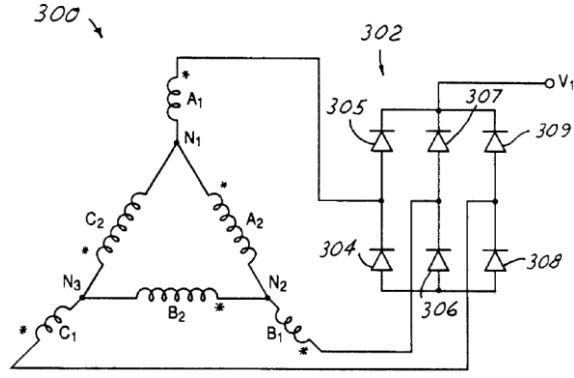


Şekil 1.46. 24-oluk 4-kutuplu yüzey mıknatıslı motor yapısı [160]

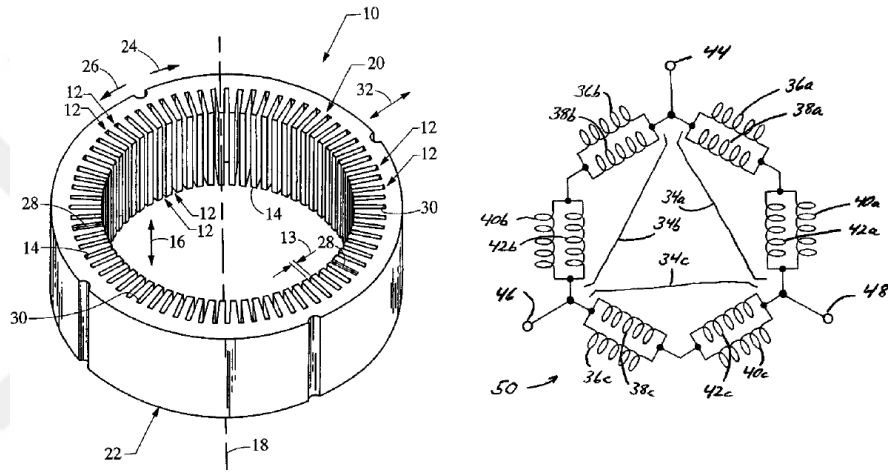


Şekil 1.47. 24-oluk 4-kutuplu yüzey mıknatıslı motor yapısı [161]





Şekil 1.48. İki 3-faz sargı setinde kullanılan bağlantı şeması [162]



Şekil 1.49. Önerilen motor sargı bağlantıları [163]

U.S. 6,570,289 B1 (Şekil 1.48) ve U.S. 7,075,206 B1 (Şekil 1.49) numaralı patentlerde Liang ve diğ. [162] ile Chen ve diğ. [163] otomotivdeki alternatörlerde kullanılan çift 3-faz sargı setinin bağlantı şekli için yeni bir yapı önermiştir.

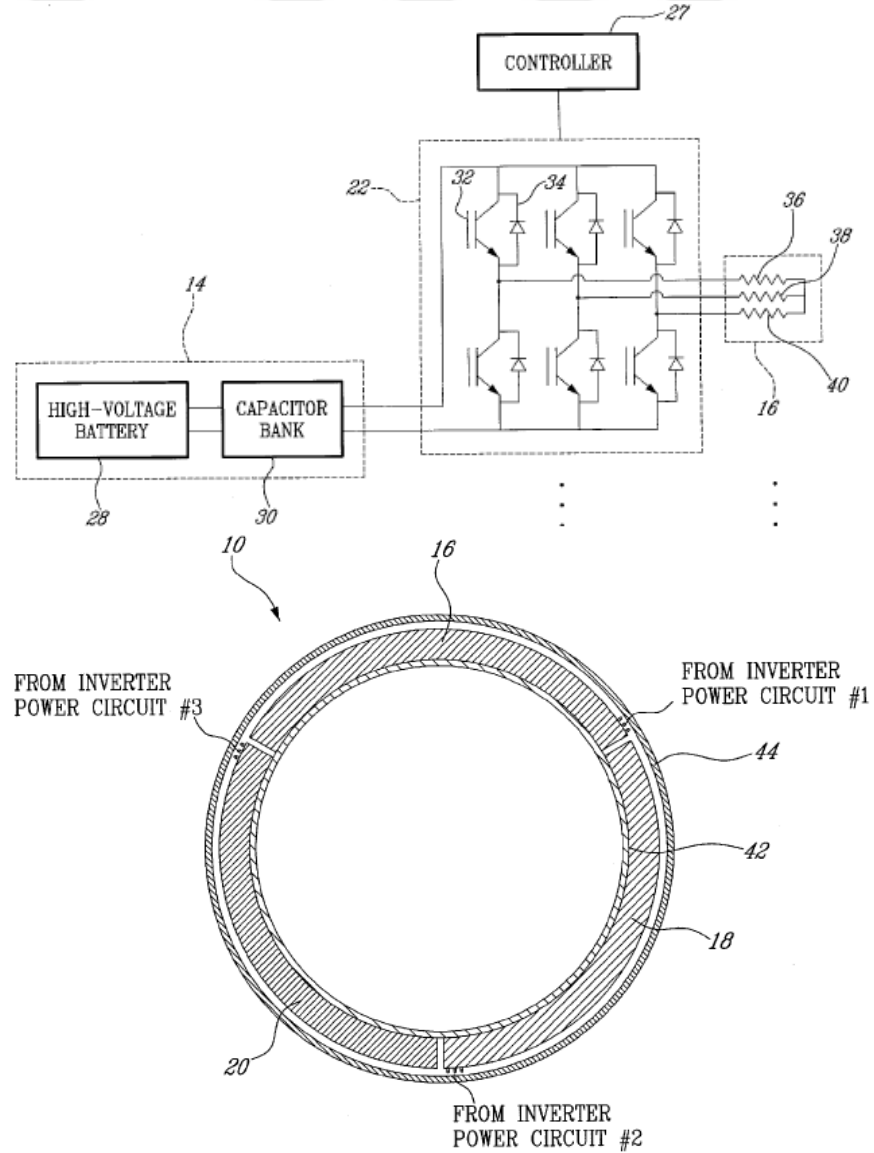
6-faz motor patentleri ile ilgili SMSM çalışmalarının yanında, senkron, asenkron, relüktans ve adım motorlar ve sürücüler ile alakalı çalışmalar da mevcuttur [164-167]. Fakat bu çalışmada, bahsedilen motorların patentleri ile alakalı detaylara yer verilmemiştir.

### 1.3.10.2. 9-Faz patent taraması

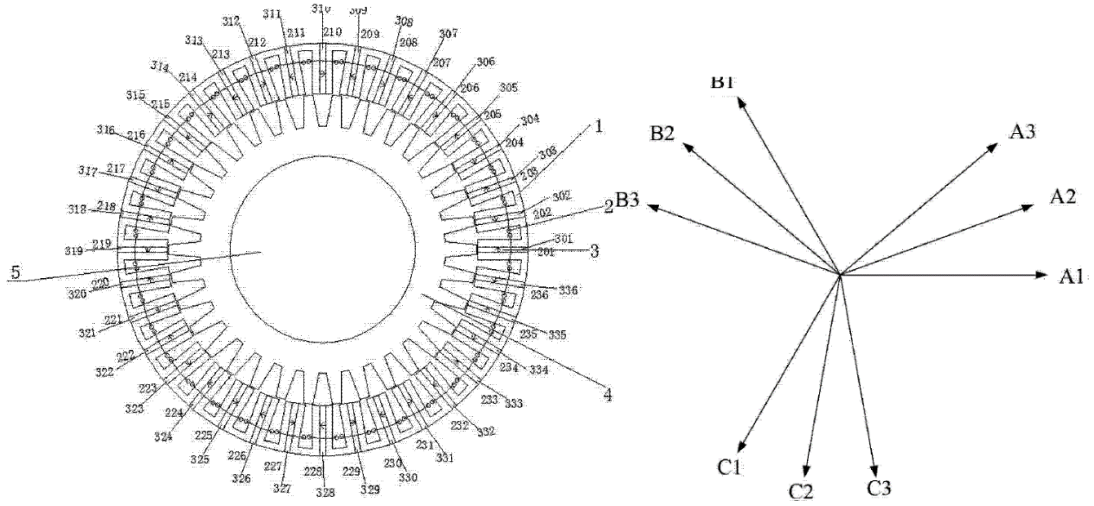
U.S. 2008/0309262 A1 (Şekil 1.50) numaralı patentte Jean-Marc Cyr ve diğ. [168] tarafından yapılan çalışma 9-faz bir motor ile ilgilidir. Bu patent çalışmasında, üç tane 3-faz sargı setinin kullanılması ve sargı setlerinin ayrı ayrı beslenmesi durumlarında akım değişimleri incelenmiştir. Ayrıca patentte evirici güç devresinden de

bahsedilmiştir. Verilen yapıda yüksek gerilim, kondansatör sayesinde düşürülerek evirici güç devresine geçmiş ve düşürülen gerilim eviricide dönüştürülerek motor sargılarına verilmiştir.

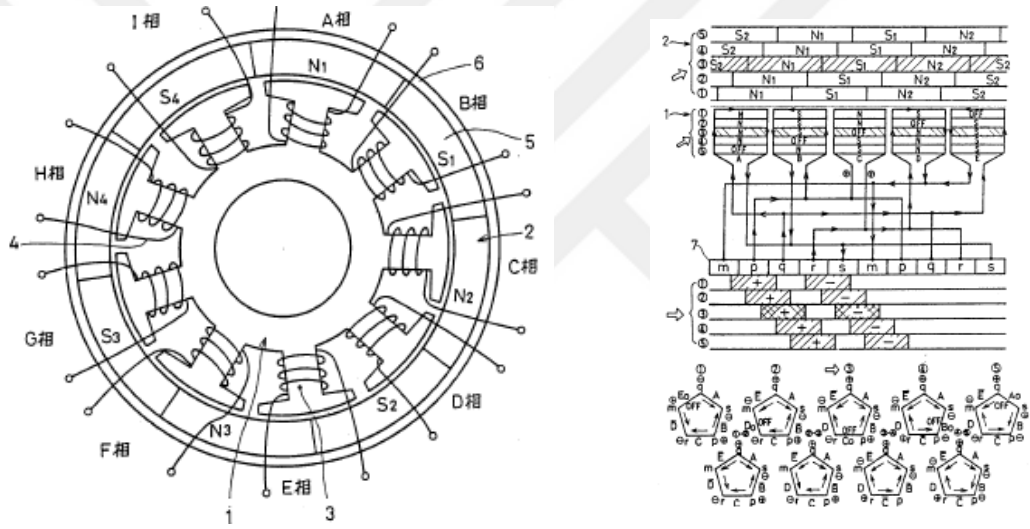
CN203312936U (Şekil 1.51) numaralı patente [169], akı anahtarlama sürekli mıknatıslı simetrik 9-faz bir motor üzerinde çalışılmıştır. Bu motorda stator yapısı demir nüve ve 9-faz sargı setinden oluşmaktadır. Sargı setleri stator üzerine açılan U şekilli oluklara yerleştirilmiştir. Sürekli mıknatıslar için ise rotora oyuklar açılmış ve mıknatıslar bu bölgelere konumlandırılmıştır. Bu tasarım ile yüksek moment yoğunluğu ile güvenilirlik ve kontrol edilebilirlik sağlanmıştır. Ayrıca titreşim ve gürültü gibi mekanik problemlerin azaltılabildiğinden bahsedilmiştir.



Şekil 1.50. Çok fazlı elektrik motoru ve sürücü yapısı [168]



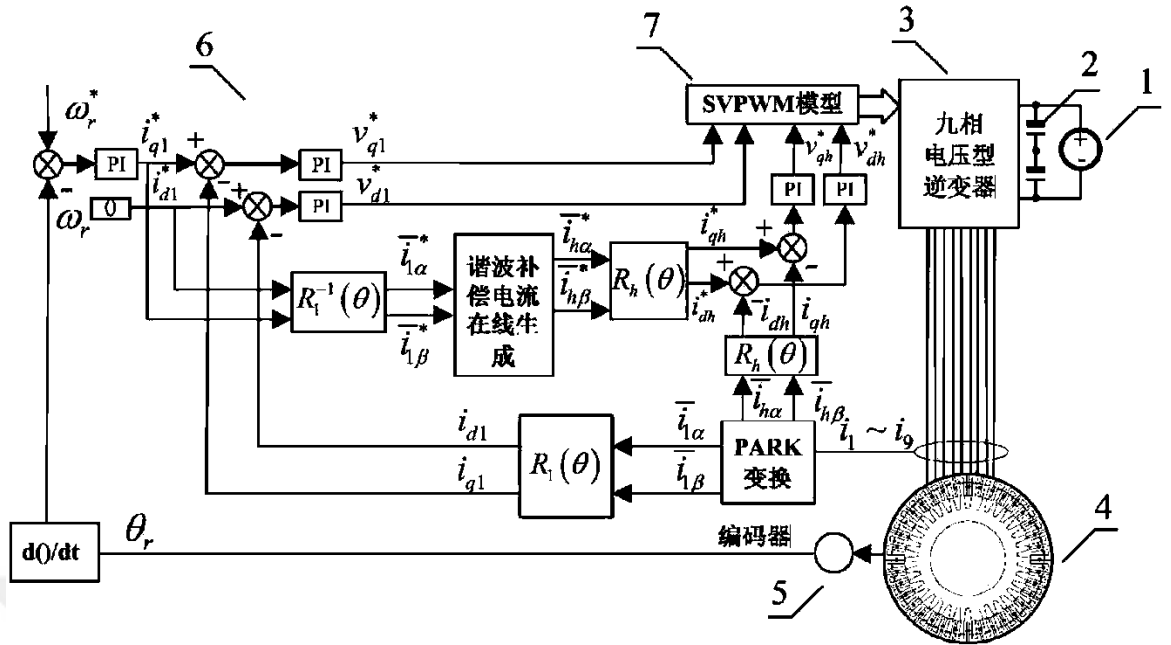
Şekil 1.51. 9-faz sürekli mıknatıslı motor ve sargı setlerinin yapısı [169]



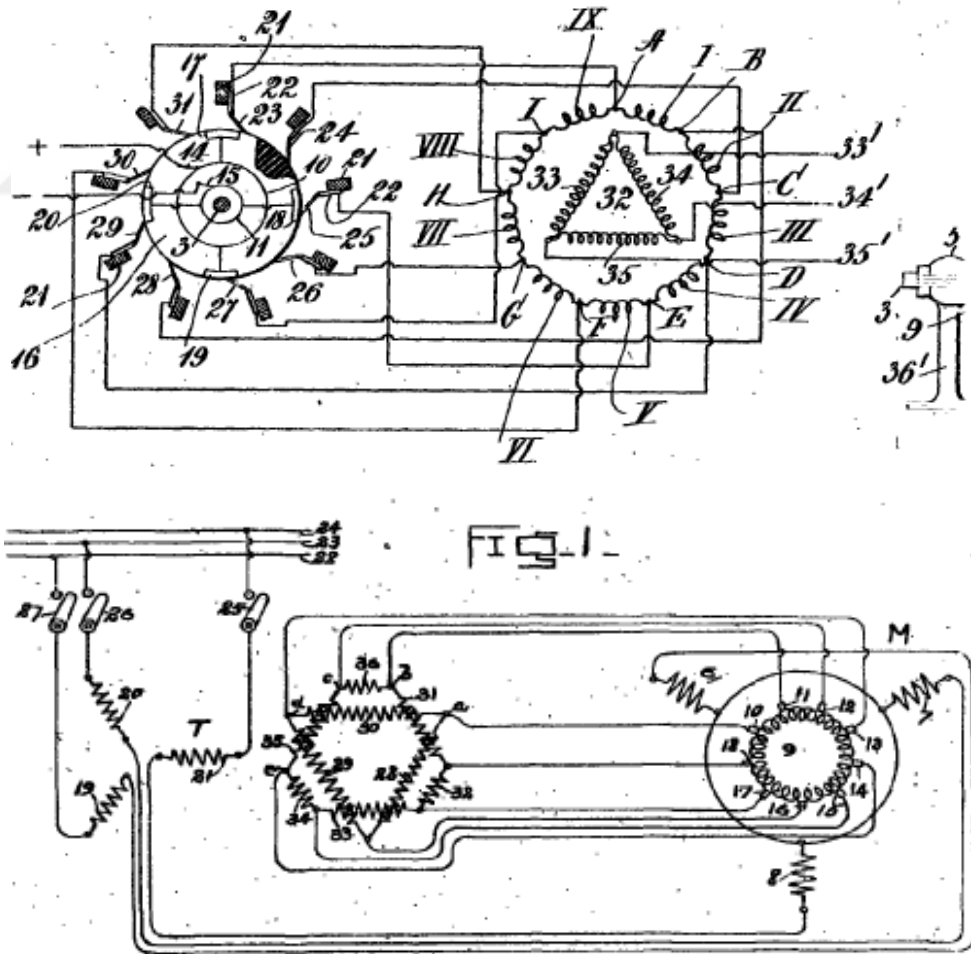
Şekil 1.52. 9-faz 8-kutuplu motor sargı yapısı [170]

JPH01198264A (Şekil 1.52) numaralı patentte [170], 9-faz 8-kutuplu bir motora yapılan fiziksel tasarım ve sargı düzeni sayesinde düşük hızlarda düzgün bir dönme hareketi sağlanmıştır.

Ayrıca yapılan patent araştırmalarında 9-faz motorların stator sargı faz bağlantı şemaları, kontrol çalışmaları ve sürücü sistemleri konusunda da bilgilere ulaşılmıştır. CN103973191A (Şekil 1.53) [171], GB106008A (Şekil 1.54(a)) [172], GB132876A (Şekil 1.54 (b)) [173] bu patentlerden bazılarıdır.



Şekil 1.53. 9-faz akı anahtarlamalı sürekli mıknatıslı motor kontrol şeması [171]



Şekil 1.54. 9-faz motor faz bağlantı şeması [172, 173]

#### 1.4. Elektrikli Araçlar İçin Çok fazlı SMSM Ürünleri

Piyasada elektrik motorlarının en çok endüstriyel uygulamalarda kullanıldığı düşünüldüğünde uygulamaların ihtiyaçlarının çoğu üç fazlı motorlar ile giderilebilmektedir. Uygulama ihtiyacının mevcut ürünler ile giderilemediği, özel uygulamalarda ise çok fazlı motorlar kendilerine yer bulmaktadır. Özellikle havacılık, uzay ve askeri uygulamalarda ürün güvenilirlik ve hata dayanım toleransı en üst seviyede istenildiği için bu tür yapılar ile gidilerek çözümler üretilebilmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda bu alanda çok fazlı SMSM ürünlerine sahip iki firma olduğu görülmüştür. Siemens ve TM4 firmaları 6- ve 9-faz ürünlerini piyasaya sürmüşlerdir. Şekil 1.55 ve Şekil 1.56 iki farklı firmaya ait 6-faz motor ve sürücü seçeneğini göstermektedir. Şekil 1.57’de ise TM4 firmasına ait 9-faz bir motor ve sürücü seçeneği verilmiştir. Bu motorlar incelendiğinde DC bara gerilimlerinin yüksek ve moment/güç seviyelerinin ise çok yüksek oldukları görülmektedir. Bu da motorların yüksek moment ve güç yoğunluğu gerektiren özel uygulamalar için tasarlanmış



Şekil 1.55. 6-faz motor ve sürücüsü [174]



Şekil 1.56. 6-faz motor ve sürücüsü [175]



Şekil 1.57. 9-faz TM4 motor ve sürücüsü [175]

olduğunu net bir şekilde göstermektedir.

### 1.5. Tezin Amacı

Bu tezin amacı, elektrikli taşıt uygulamaları için yeni bir çubuk tip gömülü sürekli mıknatıslı rotor yapısı önerilmesi ve bu motorun performans sonuçlarının yüzey sürekli mıknatıslı ve geleneksel çubuk tipli gömülü sürekli mıknatıslı motor verileri ile karşılaştırılmasıdır. Bunun yanında, 3-, 6- ve 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip motorların sargı seçeneklerinin ve sargı yerleşimlerinin motor performansına etkilerinin incelenmesi araştırılması hedeflenen diğer konulardır. Buna ek olarak, özellikle çift 3-faza sahip 6- ve üç tane 3-faz sahip 9-faz dengesiz sargı yapıları motorlar için farklı sargı yerleşimlerinin ve sargı setleri arasındaki açıların sürekli mıknatıslı senkron motorların davranışına etkilerinin incelenmesi de tezin bir başka amacıdır.

### 1.6. Özet

Bu bölümde, çok-faz motorlara kısa bir giriş yapılarak tezin katkıları sunulmuştur. Buna ek olarak radyal ve aksel akıllı motorların temel prensipleri ve radyal akıllı sürekli mıknatıslı motorların farklı rotor alternatifleri açıklanmıştır. Bunun yanında, çok fazlı sistemlerin detayları verilmiş ve 3-fazın üstündeki faz seçenekleri için gerçekleştirilen yayınlar, tezler ve alınan patentlerden önemli görülenler faz sayılarına göre ayrıştırılarak temelde motor tasarımları açısından özetlenmiştir. Bununla birlikte, çok fazlı motorlar için gerçekleştirilen kontrol çalışmalarına da kısaca değinilmiştir. Son olarak, elektrikli araçlarda kullanılan çok fazlı motor ürünlerinden bazıları gösterilmiş ve tezin amacı sunulmuştur.

## 2. ÇOK-FAZ SM SENKRON MOTORLARDA SARGI ALTERNATİFLERİNİN İNCELENMESİ

Sürekli mıknatıslı (SM) motorlar günümüzde birçok uygulamada karşımıza çıkmaktadır. Hem tam sayı-oluklu hem de kesir-oluklu SM motorlar geleneksel asenkron motorlar, fırçalı DC ve alan uyartım sargılı senkron motorlara göre daha yüksek verim, daha yüksek moment ve güç yoğunlukları gibi çok sayıda avantaja sahiptir [176, 177]. Tam sayı-oluklu sargı yapılı SM motorların temel sorunlarından biri vuru ve dalgalanma moment bileşenleridir [178, 179]. Bu istenmeyen moment bileşenleri motorda titreşim ve akustik ses [180] problemi gibi ciddi sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle, istenmeyen bu harmonik ya da moment bileşenlerini ortadan kaldırmak için rotor veya statora kayk, mıknatıs yüzeyinde değişken hava aralığı oluşturma gibi birtakım özel önlemlerin alınması gerekmektedir.

Dağıtılmış veya konsantre sargılı, oluk/kutup/faz oranının ( $q$ ) kesir bir sayıya eşit olduğu, kesir-oluklu sargılı SM motorlara olan ilgi son yıllarda giderek artmaktadır. Bu motorların tam sayı-oluklu motorlara göre bazı avantajları söz konusudur. Kesir-oluklu sargı yapısına sahip motorlar düşük vuru momentine sahip olmaları, bakır kayıplarının düşük olması gibi avantajları sayesinde düşük hızlarda yüksek moment gerektiren düşük ve yüksek güçlü uygulamalardan endüstriyel servo motor uygulamalarına kadar birçok uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır [178-184].

Kesir oluklu motorları üç kategori altında toplamak mümkündür: 1) Dengeli konsantre sargılı kesir-oluklu motorlar ( $q < 1$ ), 2) Dengeli dağıtılmış sargılı kesir-oluklu motorlar ( $q > 1$ ) ve 3) Dengesiz konsantre veya dağıtılmış sargılı kesir-oluklu motorlar ( $0 < q < 1$  veya  $1 < q$ , burada  $q$  daima bir kesir sayıyı ifade etmektedir). Literatürde konsantre sargılı kesir-oluklu SM motorlar konusunda çok sayıda çalışma mevcuttur [184, 185]. Bu motorların sargı yapıları ve sargı şemaları da oldukça iyi bilinmektedir ve birçok makalede sargı yapılarının nasıl çıkarıldığına dair açıklamalar ve yöntemler verilmiştir [186-189]. Kesir oluklu sargılı motorlara gelince, araştırmacılar tarafından bu motorlara olan ilginin konsantre sargılı kesir-oluklu motorlara göre daha düşük kaldığı

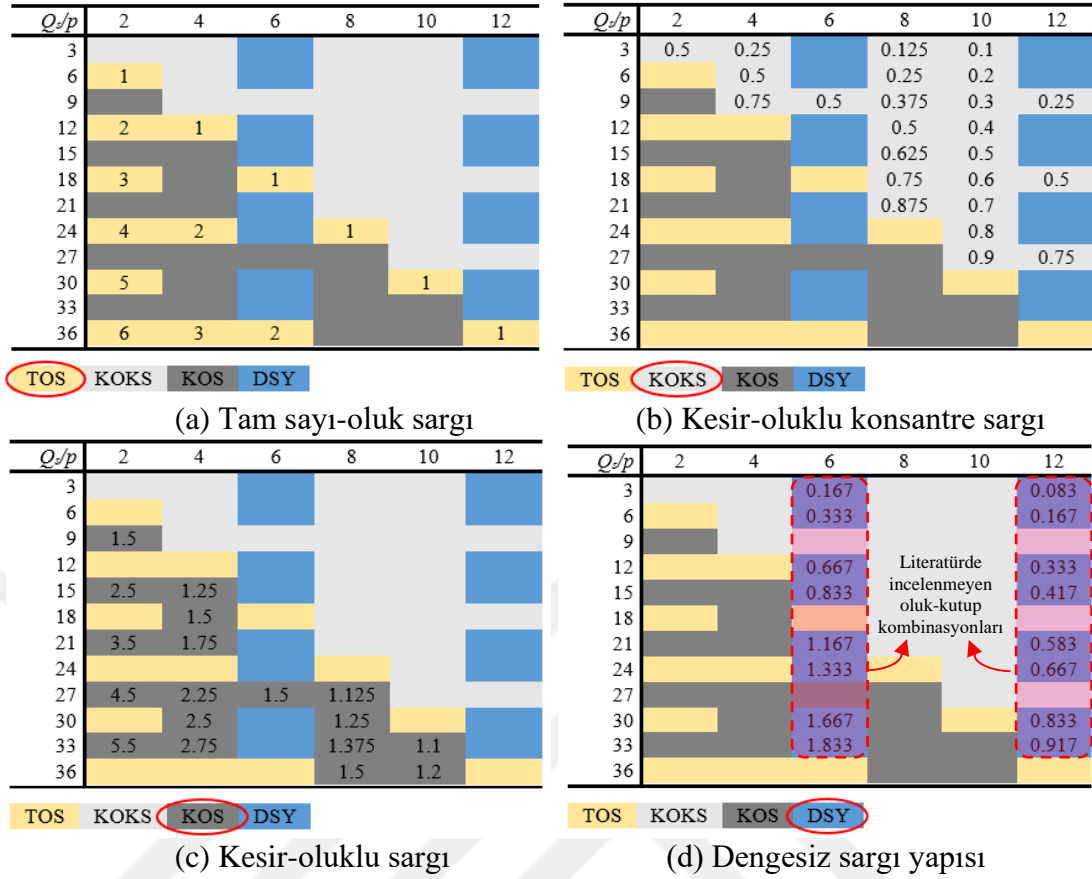
görülmektedir. Yine de literatürde bu motorlar ile ilgili bazı çalışmalar olduğu ve sargı yapılarının ve motor performanslarının incelendiği görülmektedir [177, 181, 189]. Bununla birlikte, dağıtılmış veya konsantre dengesiz kesir-oluk sargı yapıları motorlar konusunda literatürde çok az sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Daha önce yapılan bir çalışmada 6-faz bir SM motor için dağıtılmış dengesiz ve asimetrik sargı yapısının motor performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir [59].

Bu bölümde, 3-faz dengesiz ve asimetrik sargı yapıları SM motorlar için sargı yapılarının çıkarılması incelenmiştir. Yapılan araştırmaya göre daha önce literatürde bu sargı yapılarının incelenmesine yönelik ayrıntılı bir çalışmanın yapılmadığı görülmüştür. Bu nedenle, dengesiz sargı yapısına sahip motorların teorisi kısaca açıklanmış ve bazı oluk-kutup kombinasyonları için dengesiz sargı yapılarının motor MMK üzerindeki etkileri incelenmiştir. Seçilen bir oluk-kutup kombinasyonu için dengesiz sargı yapısının nasıl çıkarıldığı açıklanmıştır. Tüm motorlar için dengesiz sargı yapısı (DSY) elde edilirken minimum dengesizlik miktarı ve maksimum sargı faktörü hedefi göz önünde bulundurulmuştur. Farklı oluk-kutup kombinasyonları için dengesizlik miktarı değişimleri elde edilmiştir. Son olarak kaykısız olarak üretilen 12-kutuplu bir motor ile standart tam-sayı oluk sargı yapısına sahip bir motorun SEA sonuçları karşılaştırılmıştır. DSY'ne sahip 12-kutuplu motor için ise SEA sonuçları ve deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Bu bölümde ele alınan diğer bir konu ise 9-faz motorlar için sargı alternatiflerinin motor performansına etkilerinin incelenmesidir.

### **2.1. 3-Faz Dengeli ve Dengesiz SMSM'ler**

3-faz SM motorların stator sargı konfigürasyonları dört ana başlık altında sınıflandırılabilir (Şekil 2.1): 1) Tam sayı-oluk sargı (TOS), 2) kesir-oluklu konsantre sargı (KOKS), 3) kesir-oluklu sargı (KOS) ve 4) dengesiz sargı yapısıdır. İlk üç sargı alternatifi hem endüstri hem de literatürde karşımıza çıkmakta ve bu sargı yapılarının nasıl oluşturulması gerektiği ve sargı şemalarının elde edilmesi oldukça iyi bilinmektedir. Ayrıca bu sargı yapılarında fazlar arasında 120 elektriksel derece faz farkı bulunduğu için dengeli bir dağılıma sahiptirler. Bunun yanında, dengeli tam sayı-ve kesir-oluk sargılı motorlar birbirlerine göre bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptirler. Diğer taraftan, DSY'ne sahip motorlar, ki bu motorlarda aslında bir kesir-oluklu motordur, dengeli ve simetrik bir sargı yapısı oluşturmaya izin vermezler. Bu





Şekil 2.1. 3-faz SMSM’ler için stator sargı kategorilerini gösteren oluk-kutup kombinasyonları

nedenle, fazları artık 120 elektriksel derece faz farkı ile yerleştirmek mümkün değildir. Diğer bir deyişle, her bir fazın elektro motor kuvveti farklı genliklere sahiptir ve fazlar arasındaki açılar da 120 elektriksel dereceden farklı bir değere sahiptir. DSY’ne sahip motorlar ile ilgili literatürde çok az sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir.

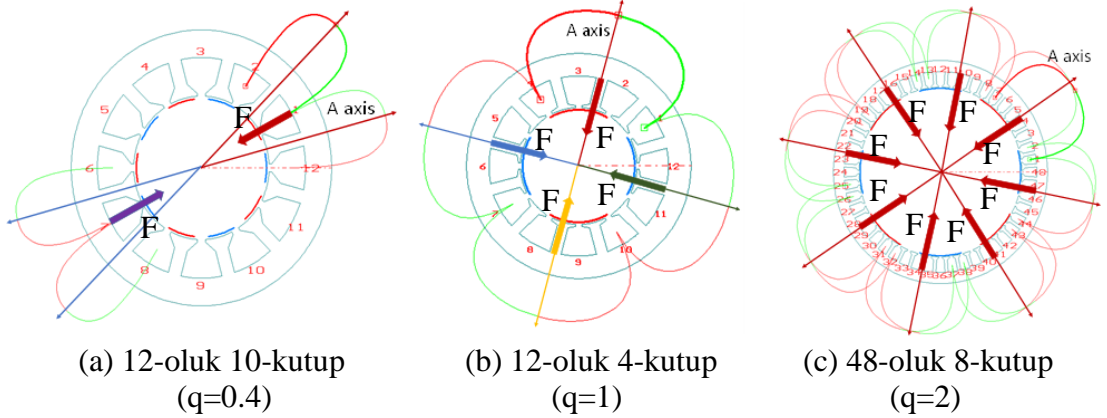
Yukarıda SMSM’lerin farklı oluk/kutup/faz oranlarına göre sargı yapılarının isimlendirilmesi verilmişti. Bu motorlarda kullanılan sargı terminolojisi ise Tablo 2.1’de özetlenmiştir. Bu tabloda geçen ifadelerle ait tanımlar da aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Simetrik sargı: Simetrik özel sargı dağılımına sahiptir (Şekil 2.2).
- Asimetrik sargı: Asimetrik özel sargı dağılımına sahiptir (Şekil 2.3).
- Dengeli sargı: Faz genlikleri birbirine eşit olan ve fazlar arasında 120 elektriksel derece faz farkı olan sargılardır (Şekil 2.4).

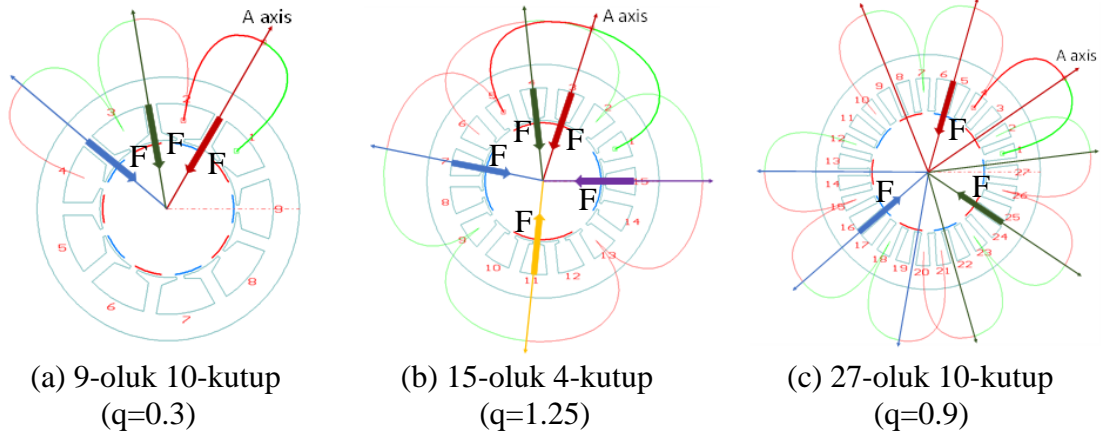
- Dengesiz sargı: Faz genlikleri farklı olan ve fazlar arasında 120 elektriksel derece faz farkı olmayan sargılardır (Şekil 2.5).
- Dengeli çekme kuvveti: Şekil 2.2’de gösterildiği gibi rotora etkiyen net kuvvet sifira eşittir.
- Dengesiz çekme kuvveti: Şekil 2.3’de gösterildiği gibi rotora etkiyen net kuvvet sifirdan farklı bir değere sahiptir.

Tablo 2.1. SM motorlarda kullanılan sargı terminolojisi

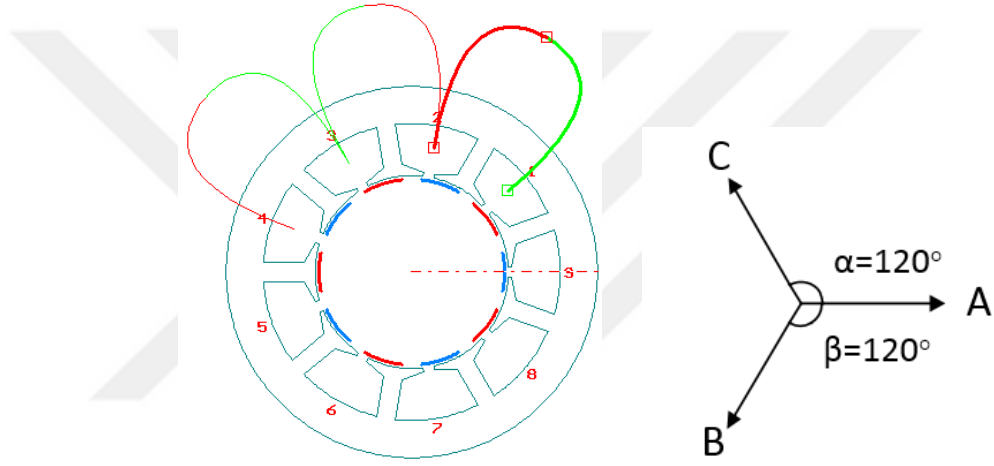
	Tam Sayı-Oluk Sargı (TOS)	Kesir-Oluk Konsantre Sargı (KOKS)	Kesir-Oluk Sargı (KOS)	Dengesiz Sargı Yapısı (DSY)
Simetrik Sargı	✓	✓	✓	
Asimetrik Sargı		✓	✓	✓
Dengeli Sargı	✓	✓	✓	
Dengesiz Sargı				✓
Dengeli Man. Çekme Kuvveti (DiÇK)	✓	✓	✓	
Dengesiz Man. Çekme Kuvveti (DMÇK)		✓	✓	✓



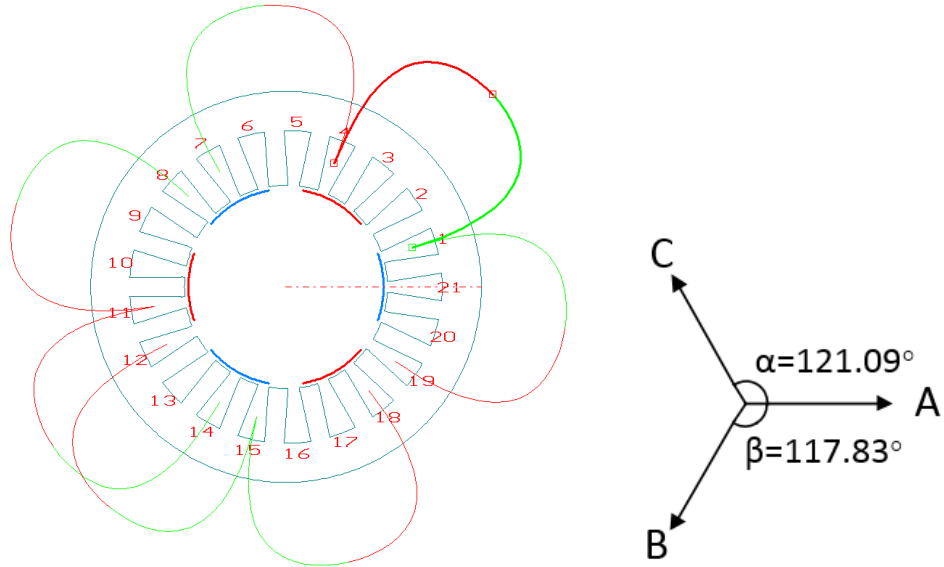
Şekil 2.2. Farklı oluk-kutup kombinasyonları için simetrik sargı gösterimi



Şekil 2.3. Farklı oluk-kutup kombinasyonları için asimetrik sargı gösterimi



Şekil 2.4. Dengeli sargıya bir örnek (9-oluk 10-kutup)



Şekil 2.5. Dengesiz sargıya bir örnek (21-oluk 6-kutup)

Tablo 2.2. 3-faz motorlar için oluk/kutup/faz oranlarının gösterimi

$Q_s/p$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
3	0,5	0,25	0,167	0,125	0,1	0,083	0,071	0,063	0,056	0,05	0,045	0,042	0,038	0,036	0,033
6	1	0,5	0,333	0,25	0,2	0,167	0,143	0,125	0,111	0,1	0,091	0,083	0,077	0,071	0,067
9	1,5	0,75	0,5	0,375	0,3	0,25	0,214	0,188	0,167	0,15	0,136	0,125	0,115	0,107	0,1
12	2	1	0,667	0,5	0,4	0,333	0,286	0,25	0,222	0,2	0,182	0,167	0,154	0,143	0,133
15	2,5	1,25	0,833	0,625	0,5	0,417	0,357	0,313	0,278	0,25	0,227	0,208	0,192	0,179	0,167
18	3	1,5	1	0,75	0,6	0,5	0,429	0,375	0,333	0,3	0,273	0,25	0,231	0,214	0,2
21	3,5	1,75	1,167	0,875	0,7	0,583	0,5	0,438	0,389	0,35	0,318	0,292	0,269	0,25	0,233
24	4	2	1,333	1	0,8	0,667	0,571	0,5	0,444	0,4	0,364	0,333	0,308	0,286	0,267
27	4,5	2,25	1,5	1,125	0,9	0,75	0,643	0,563	0,5	0,45	0,409	0,375	0,346	0,321	0,3
30	5	2,5	1,667	1,25	1	0,833	0,714	0,625	0,556	0,5	0,455	0,417	0,385	0,357	0,333
33	5,5	2,75	1,833	1,375	1,1	0,917	0,786	0,688	0,611	0,55	0,5	0,458	0,423	0,393	0,367
36	6	3	2	1,5	1,2	1	0,857	0,750	0,667	0,6	0,545	0,5	0,462	0,429	0,4
39	6,5	3,25	2,167	1,625	1,3	1,083	0,92857	0,813	0,722	0,65	0,591	0,542	0,5	0,464	0,433
42	7	3,5	2,333	1,75	1,4	1,167	1	0,875	0,778	0,7	0,636	0,583	0,538	0,5	0,467
45	7,5	3,75	2,5	1,875	1,5	1,25	1,071	0,938	0,833	0,75	0,682	0,625	0,577	0,536	0,5
48	8	4	2,667	2	1,6	1,333	1,143	1	0,889	0,8	0,727	0,667	0,615	0,571	0,533
51	8,5	4,25	2,833	2,125	1,7	1,417	1,214	1,063	0,944	0,85	0,773	0,708	0,654	0,607	0,567
54	9	4,5	3	2,25	1,8	1,5	1,286	1,125	1	0,9	0,818	0,75	0,692	0,643	0,6
57	9,5	4,75	3,167	2,375	1,9	1,583	1,357	1,188	1,056	0,95	0,864	0,792	0,731	0,679	0,633
60	10	5	3,333	2,5	2	1,667	1,429	1,25	1,111	1	0,909	0,833	0,769	0,714	0,667
63	10,5	5,25	3,5	2,625	2,1	1,75	1,5	1,313	1,167	1,05	0,955	0,875	0,808	0,750	0,7
66	11	5,5	3,667	2,75	2,2	1,833	1,571	1,375	1,222	1,1	1	0,917	0,846	0,786	0,733
69	11,5	5,75	3,833	2,875	2,3	1,917	1,643	1,438	1,278	1,15	1,045	0,958	0,885	0,821	0,767
72	12	6	4	3	2,4	2	1,714	1,5	1,333	1,2	1,091	1	0,923	0,857	0,8
75	12,5	6,25	4,167	3,125	2,5	2,083	1,786	1,563	1,389	1,25	1,136	1,042	0,962	0,893	0,833
78	13	6,5	4,333	3,25	2,6	2,167	1,857	1,625	1,444	1,3	1,182	1,083	1	0,929	0,867
81	13,5	6,75	4,5	3,375	2,7	2,25	1,929	1,688	1,5	1,35	1,227	1,125	1,03846	0,964	0,9
84	14	7	4,667	3,5	2,8	2,333	2	1,75	1,556	1,4	1,273	1,167	1,07692	1	0,933
87	14,5	7,25	4,833	3,625	2,9	2,417	2,071	1,813	1,611	1,45	1,318	1,208	1,11538	1,03571	0,967
90	15	7,5	5	3,75	3	2,5	2,143	1,875	1,667	1,5	1,364	1,25	1,15385	1,07143	1
93	15,5	7,75	5,167	3,875	3,1	2,583	2,214	1,9375	1,722	1,55	1,409	1,292	1,19231	1,10714	1,033

TOS KOKS KOS DSY

### 2.1.1. Dengesiz SMSM seçenekleri

3-faz DSY'ne sahip motorlar için 2 farklı durum söz konusudur: 1) Stator oluk sayısı 3'e bölünebilir bir sayıdır. Bu durumda sargı adımları aynıdır ve tüm oluklarda eşit sayıda iletken mevcuttur, 2) Stator oluk sayısı 3'e bölünemeyen bir sayıdır. Bu durumda sargı adımları farklı olabilir ve tüm oluklarda eşit sayıda iletken olmayabilir veya bazı oluklarda daha fazla sayıda iletken bulunup bazı oluklarda da hiç iletken bulunmayabilir. Bu çalışmada, sadece ilk durum incelenmiştir.

Bilindiği gibi motorun oluk-kutup kombinasyonu stator sargı yapısını ve sargı şemasını belirlemektedir. Motorun periyodikliği oluk sayısı ( $Q_s$ ) ve kutup çifti ( $p/2$ ) arasındaki ortak bölenlerin en büyüğü (OBEB) hesaplaması ile elde edilebilir. Denklem (2.1)'i kullanarak 3-faz bir motor sargısının dengeli olup olmadığı anlaşılabilir:

$$\frac{Q_s}{3.OBEB (Q_s, \frac{P}{2})} \quad (2.1)$$

Burada Denklem (2.1)'de verilen ifade bir tam sayıya eşit değil ise stator sargısı dengesiz bir sargı yapısına sahip olacaktır. Örneğin, 3-faz 21-oluk 6-kutuplu bir motor OBEB (21,6) = 3 olduğu için 3 sargı simetriğine sahiptir ve bu oluk-kutup kombinasyonu Denklem (2.1)'de verilen ifade bir kesir sayıya sahip olduğu için dengesiz bir sargı yapısı üretecektir. Dengesiz sargı yapısına neden olan oluk-kutup kombinasyonları incelendiğinde (Tablo 2.2'de mavi renk ile gösterilen alanlar) tüm DSY'ne sahip seçeneklerin kutup sayısı 6'nın bir katına (p = 6, 12, 18...) sahip olduğunda ortaya çıktığı görülmektedir.

### **2.1.2. Farklı oluk-kutup kombinasyonları için çift-katmanlı DSY incelenmesi**

Tablo 2.2'den de görüldüğü gibi bazı oluk-kutup kombinasyonları tercih edildiğinde DSY dışında başka bir seçenek kullanılamaz. Bu bölümde, DSY kullanmanın zorunda olduğu farklı oluk-kutup kombinasyonları incelenmiştir. Seçilen oluk-kutup kombinasyonları için sargı şemaları, hava aralığındaki MMK dağılımları, bu dağılımların harmonikleri ve her bir fazın sargı faktörleri elde edilmiştir. Burada seçilen dokuz farklı oluk-kutup kombinasyonu sayesinde hem kutup sayısının hem de oluk sayısının sargı dengesizlik miktarına etkisi incelenmiştir.

#### **2.1.2.1. İncelenen oluk-kutup kombinasyonları**

Tablo 2.2'de 3-faz SM motorlar için 2-kutuptan 30-kutba ve 3-oluktan 93-oluğa kadar değişen farklı oluk-kutup kombinasyonları için oluk/kutup/faz oranları verilmiştir. q değerinin bir tam sayı olduğu TOS seçenekleri sarı renk ile gösterilmiştir. q değerinin bir kesir sayıya eşit olduğu ve 1'den küçük olduğu KOKS seçenekleri ise açık gri renk ile gösterilmiştir. q değerinin yine bir kesir sayıya eşit olduğu ve 1'den büyük olduğu KOS seçenekleri ise tabloda koyu gri renk ile gösterilmiştir. Son olarak, q değerinin KOKS ve KOS'da olduğu gibi yine bir kesir sayıya eşit olduğu DSY'ne sahip seçenekler de mavi renk ile gösterilmiştir. Bu çalışmada, DSY için seçilen oluk-kutup kombinasyonları üç farklı durum göz önünde bulundurularak tercih edilmiştir:

- 1)  $q=1$  olması durumunun hemen altındaki seçenekler incelenmiştir. Tablo 2.2’de çapraz dikdörtgen ile gösterilmiştir,
- 2) Endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan 12-kutuplu seçenekler. Bunlar da Tablo 2.2’de dikey dikdörtgen ile gösterilmiştir,
- 3) Hem çapraz hem de dikey dikdörtgenlerin kesiştiği noktada yer alan 39-oluklu seçenekler. Bu seçenekler de Tablo 2.2’de yatay dikdörtgen ile gösterilmiştir.

### 2.1.2.2. Seçilen tasarımların sargı şemalarının oluşturulması

Kesir-oluklu tüm sargılarda  $q$  şu şekilde ifade edilebilir:

$$q = \frac{Q_s}{m \cdot p} = \frac{N}{d} = I + \frac{n}{d} \quad (2.2)$$

Burada  $m$ -faz sayısını,  $N$  ve  $d$  ise sırasıyla  $q$  ifadesinin pay ve paydasını,  $n$  ise  $n/d$  kesrinin payını ve son olarak  $I$  bir tam sayıyı belirtmektedir. Bu ifadede hem  $N$  ve  $d$  hem de  $n$  ve  $d$  arasında ortak bir bölen sayı bulunmamaktadır.  $d$ -kutuptaki  $N$  oluk içeren her bir faz  $p/d$  tekrarlayan sargı parçasından oluşur. Ayrıca  $d$ -kutupta, her bir faz  $(d-n)$  kutup-faz grubunu  $I$  tane tekli bobin ile ve  $n$  kutup-faz grubunu  $(I+1)$  tane tekli bobin ile oluşturmaktadır. Burada tekli bobin, seri bağlı 1 veya çok sayıda sarımdan oluşan bir giriş ve bir çıkışı ifade etmektedir. Uygun bobin adımı,  $T$ , aşağıdaki eşitlik yardımı ile elde edilebilir:

$$T = \begin{cases} \text{yukarıyuvarla} \left( \frac{Q_s}{p} \right), & \text{eğer kesir kısmı} \left( \frac{Q_s}{p} \right) > 0.5 \\ \text{aşağıyuvarla} \left( \frac{Q_s}{p} \right), & \text{eğer kesir kısmı} \left( \frac{Q_s}{p} \right) \leq 0.5 \end{cases} \quad (2.3)$$

Daha sonra, iki ardışık oluk vektörü arasındaki fark aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir:

$$v = \frac{m \cdot N \cdot k + m}{d} \quad (2.4)$$

Burada  $k, v$  eşitliğinin bir tam sayıya eşit olduğu en küçük tam sayıyı (sıfır da olabilir) ifade etmektedir. Daha sonra,  $N$  sayıda  $m$  serisine sahip oluk vektörlerinin ilk serisi şu şekilde elde edilebilir:

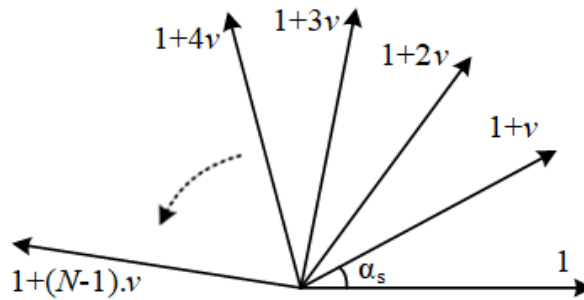
$$1, 1+(v), 1+(2v), \dots, 1+(N-1).v \quad (2.5)$$

Burada iki ardışık oluk vektörü arasındaki elektriksel açı aşağıdaki eşitlik ile elde edilebilir:

$$\alpha_s = \text{mod} \left( \frac{360}{Q_s} \cdot \frac{p}{2} \cdot v, 180 \right) \quad (2.6)$$

Bir SM motor için oluk vektörlerinin genel gösterimi Şekil 2.6’da verilmiştir. Denklem (2.5)’deki birinci seride sayılardan biri  $N$ ’den büyükse bu sayıdan  $N$  çıkarılır. Üç fazlı motorlar için, ikinci ve üçüncü seriler ise ilk serideki tüm sayılara  $N$  eklenerek elde edilir. Yukarıda açıklanan şekilde tüm oluk serileri elde edildikten sonra her biri  $N$  oluk içeren her bir faz mümkün olduğu kadar birbirlerine yakın olacak şekilde gruplanır. Bu durumda, sargı faktörünü maksimize edebilmek için Denklem (2.3)’de verilen bobin adımı ifadesi kullanılabilir. Bu gruplama işlemi motorun  $d$  kutbunun tamamına uygulanır.

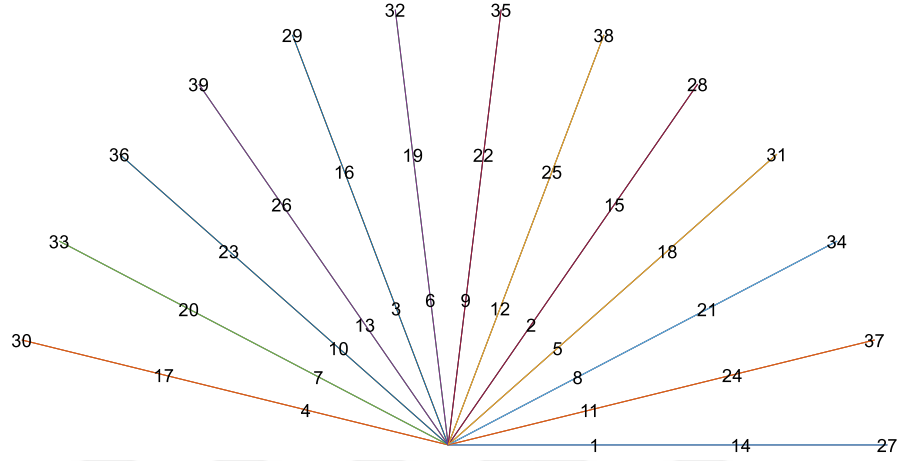
Bu çalışmada, örnek olarak 3-faz ve 39-oluk 12-kutuplu bir motor incelenmiştir. Bu oluk-kutup kombinasyonu için Denklem (2.1)’de verilen eşitlik kullanılarak  $q=13/12=1+1/12$  ve  $N=13, d=12, I=1, n=1$  elde edilir. 12-kutupta, her bir faz  $n=1$  kutup-faz grubunu  $(I+1)=2$  tekli bobin ile ve  $(d-n)=12-1=11$  kutup-faz grubunu  $I=1$  tekli bobin ile oluşturmaktadır. Dolayısıyla,  $N=13$  oluk için  $d=12$  kutuptaki gruplama Tablo 2.3’de gösterildiği gibi oluşmaktadır.



Şekil 2.6. Oluk vektörlerinin genel gösterimi

Tablo 2.3. 39-oluk 12-kutuplu kombinasyon için bobin gruplarının gösterimi

2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A	C	B	A	C	B	A	C	B	A	C	B	A
1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A	C	B	A	C	B	A	C	B	A	C	B	A
1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A	C	B	A	C	B	A	C	B	A	C	B	A



Şekil 2.7. 39-oluk 12-kutuplu motorun oluk vektörlerinin gösterimi

Tablo 2.4. 39-oluk 12-kutuplu kombinasyona ait 3 serinin gösterimi

1	11	8	5	2	12	9	6	3	13	10	7	4
14	24	21	18	15	25	22	19	16	26	23	20	17
27	37	34	31	28	38	35	32	29	39	36	33	30

m.N=39 oluk için, bu sayılar 3 kez daha yeniden yazılmalıdır. Oluk vektörleri arasındaki fark,  $k=3$  iken iki ardışık oluk vektörü arasındaki fark olan  $v$  ifadesi 10 olarak elde edilir. Denklem (2.5) kullanılarak oluk vektörlerinin ilk serisi elde edilebilir.  $\alpha_s$  değeri Denklem (2.6) kullanılarak 13,85 elektriksel derece olarak elde edilir. Böylece Şekil 2.6'da gösterilen yöntem ile 12-kutuplu motorun oluk vektörleri çizilebilir (Şekil 2.7). Daha sonra, ilk serideki sayılara  $N=13$  eklenerek ikinci, ikinci serideki sayılara da yine  $N=13$  eklenerek üçüncü seriler kolaylıkla elde edilebilir. Yapılan işlemler ve hesaplamalar sonucunda elde edilen bu üç seri Tablo 2.4'de gösterilmiştir.

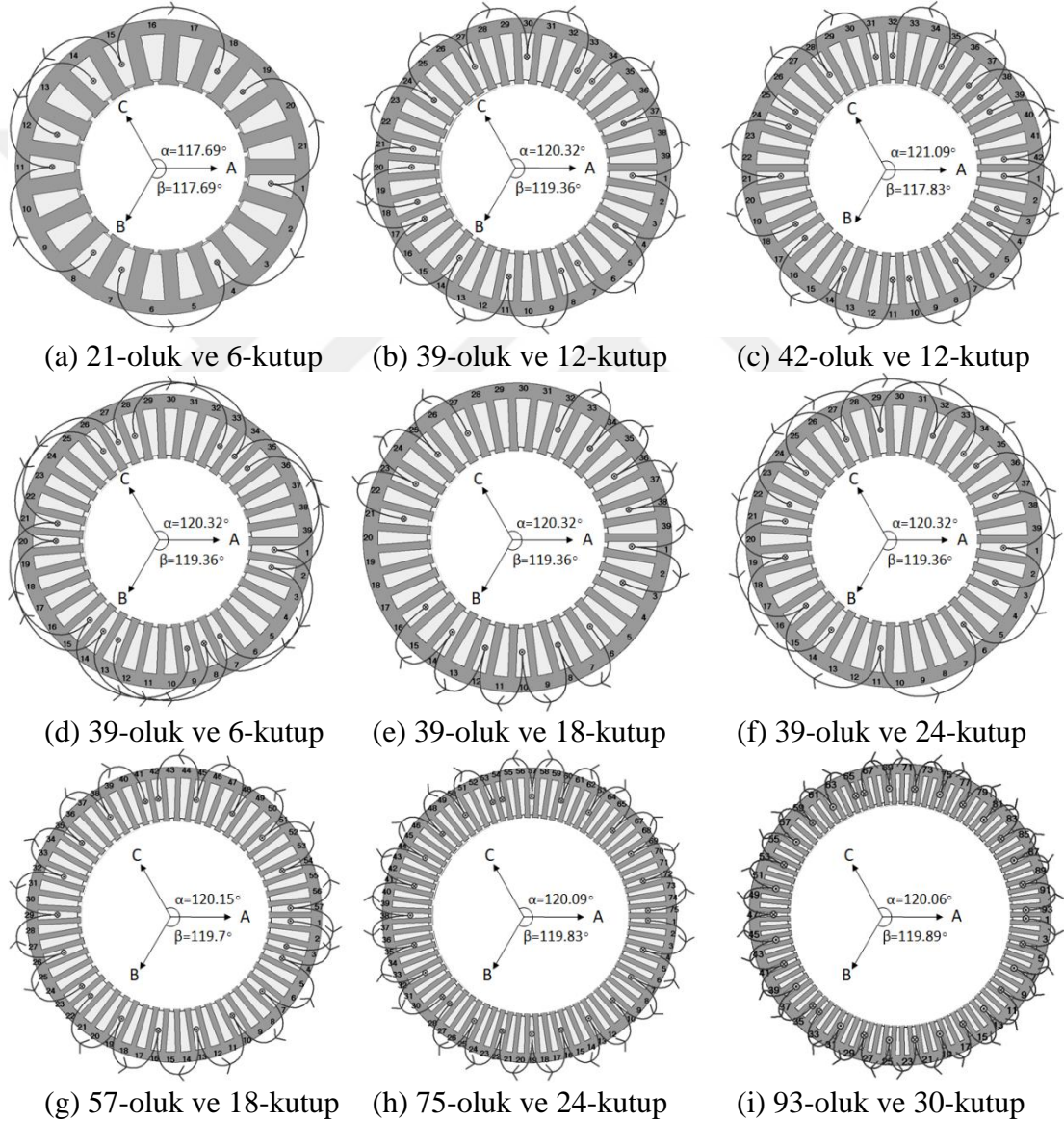
Denklem (2.3)'de verilen eşitlik kullanılarak sargı yerleşim faktörünü maksimize edecek sargı adımı değeri  $T=3$  olarak elde edilir. Bu sargı adımı değeri kullanılarak,



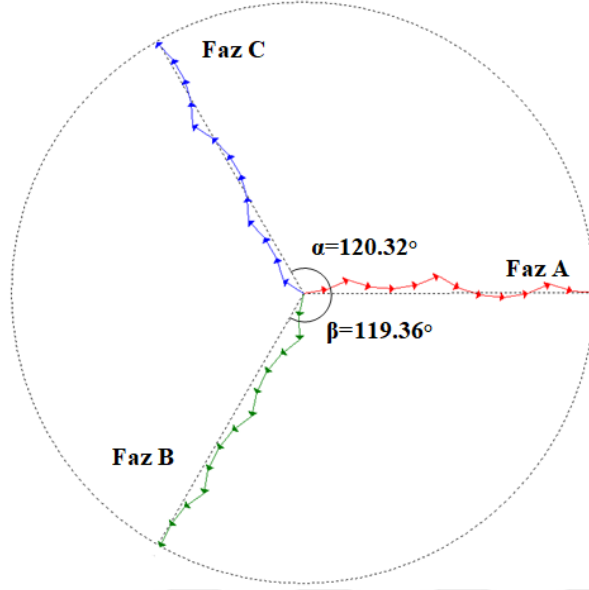
Tablo 2.4’de verilen üç seri yeniden düzenlenirse Tablo 2.5’deki seriler elde edilir. Bu serileri kullanarak her bir faz kolaylıkla belirlenebilir.

Tablo 2.5. 39-oluk 12-kutuplu kombinasyon için 3 serinin yeniden düzenlenmesi

7	4	1	11	8	5	2	12	9	6	3	13	10
20	17	14	24	21	18	15	25	22	19	16	26	23
33	30	27	37	34	31	28	38	35	32	29	39	36
Faz A				Faz C				Faz B				



Şekil 2.8. İncelenen oluk-kutup kombinasyonlarının sargı yapıları (sadece A-fazı gösterilmiştir)



Şekil 2.9. 39-oluklu motorun her bir fazı için statorundaki her bir bobine ait EMK vektörlerinin gösterimi

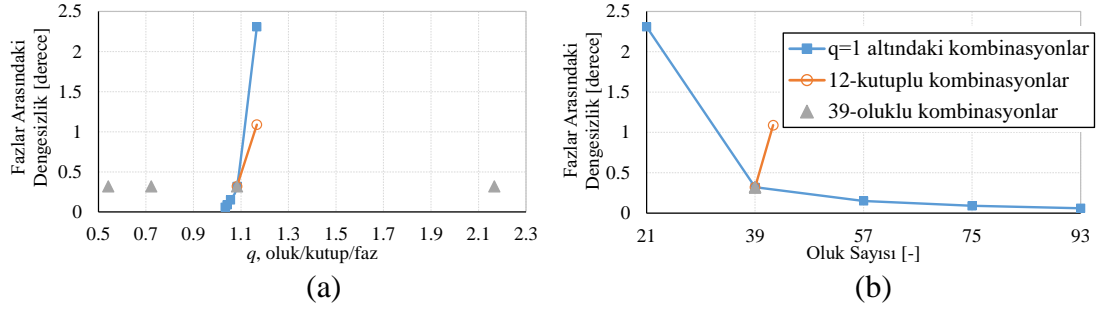
Her bir fazın stator sargı bobinlerinin giriş ve çıkışları Tablo 2.5’de gösterildiği gibi elde edilir. 39-oluk 12-kutuplu motorun A-fazının sargı şeması Şekil 2.8(b)’de gösterilmiştir.  $q=1\frac{1}{p}$  eşitliğinin aynı olduğu dengesiz sargı yapılı kesir-oluklu tüm

motorların sargı yapısı yukarıda verilen yöntem kullanılarak elde edilebilir. Farklı oluk-kutup kombinasyonları için incelenen tüm motorların sargı yapıları (sadece A fazları gösterilmiştir) ve fazlar arasındaki açılar Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Faz açıları, statordaki her bir faza ait her bir bobinin elektro motor kuvveti vektörlerinin toplanması ile elde edilir. Her bir fazın EMK vektörü sargılardaki giriş ve çıkış yönleri dikkate alınarak elde edilir. Daha sonra, bileşke vektör bulunarak fazlar arasındaki açılar hesaplanır. Bu yöntem, stator sargılarının faz açılarının, faz sıralamasının ve dengesizlik miktarının belirlenmesinde kullanılan etkili bir yöntemdir. Bu çalışmada örnek olarak incelenen 39-oluk 12-kutuplu motorun her bir fazına ait EMK vektörleri Şekil 2.9’da gösterilmiştir.

Fazlar arasındaki dengesizlik miktarı ise aşağıdaki eşitlik ile elde edilebilir:

$$U = |120 - \alpha_{ac}| \quad (2.7)$$

Bu eşitlikte  $\alpha_{ac}$  A- ve C-fazları arasındaki elektriksel açıyı ifade etmektedir. Örneğin,



Şekil 2.10. İncelenen oluk-kutup kombinasyonlarının (a) oluk/kutup/faz oranına ve (b) oluk sayısına göre dengesizlik miktarlarının değişimi

39-oluk 12-kutuplu motorun A- ve C-fazları arasında 120,32 elektriksel derece faz farkı bulunmakta, A- ve B-fazları arasında ise 119,36 elektriksel derece faz farkı bulunmaktadır. Dolayısıyla, A ve C-fazları arasındaki dengesizlik miktarı 0,32 elektriksel derece olarak elde edilebilir. Şekil 2.10'da farklı oluk-kutup kombinasyonları için oluk/kutup/faz (q) oranına ve oluk sayısına göre dengesizlik miktarlarının değişimleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi dengesizlik miktarı, q, 1'e ne kadar yakınsa veya oluk sayısı ne kadar yüksek ise o kadar azalmaktadır.

### 2.1.2.3. Sargı faktörü hesabı

SMSM'lerin sargı faktörü stator sargısının MMK dağılımlarının Fourier analizi ile elde edilebilir. Stator sargılarının giriş ve çıkışlarını ifade eden her bir bobin dikkate alınarak her bir fazın MMK dağılımında harmonik açılım yapılarak  $a_n$  ve  $b_n$  harmonik katsayıları elde edilir. n'inci harmoniğe ait MMK sabitinin genliği  $c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$  ile elde edilir. Herhangi bir sargının n'inci sargı faktörü aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$k_{wn} = \frac{c_n}{B_n} \quad (2.8)$$

Burada  $B_n$  n'inci MMK harmoniğinin genliğini göstermektedir. Seri bağlı sargılardan  $i=1$  A akım geçtiği kabul edilirse  $B_n$  aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$B_n = \frac{2N_t}{n\pi} \cdot i \quad (2.9)$$

Burada  $n = (p/2) \times k$  ( $k=1, 3, 5, \dots$ ), p kutup sayısı ve  $N_t$  her bir fazdaki toplam bobin sayısını belirtmektedir. Stator sargısında kaykılı olması durumunda ise n'inci sargı

faktörü aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$k_{wn-skewed} = k_{wn} \cdot k_{sn} \quad (2.10)$$

Burada kayk faktörü,  $k_{sn}$ , şu şekilde hesaplanabilir:

$$k_{sn} = \frac{\sin\left(\frac{n\beta}{2}\right)}{\frac{n\beta}{2}} \quad (2.11)$$

verilen ifadede  $\beta$  elektriksel radyan cinsinden kayk açısını ifade etmektedir.

Yukarıda verilen ifadeler kullanılarak DSY'ne sahip Tablo 2.2'de verilen dokuz farklı oluk-kutup kombinasyonu için sargı faktörleri elde edilmiştir. Hesaplanan sargı faktörlerinin temel bileşenleri her bir faz için Tablo 2.6'da verilmiştir. Bu tabloda  $k_{w\_A}$ ,  $k_{w\_B}$ , ve  $k_{w\_C}$  her bir fazın temel sargı faktörü değerini ifade etmektedir. Tablodan da görüldüğü gibi oluk sayısının artması durumunda ve  $q$  değeri 1'e yakın bir değerde kalması durumunda sargı faktörü de artmaktadır. Diğer taraftan aynı kutup sayısı için adım ve yerleşim faktörleri azaldığı için sargı faktörü de azalmaktadır.

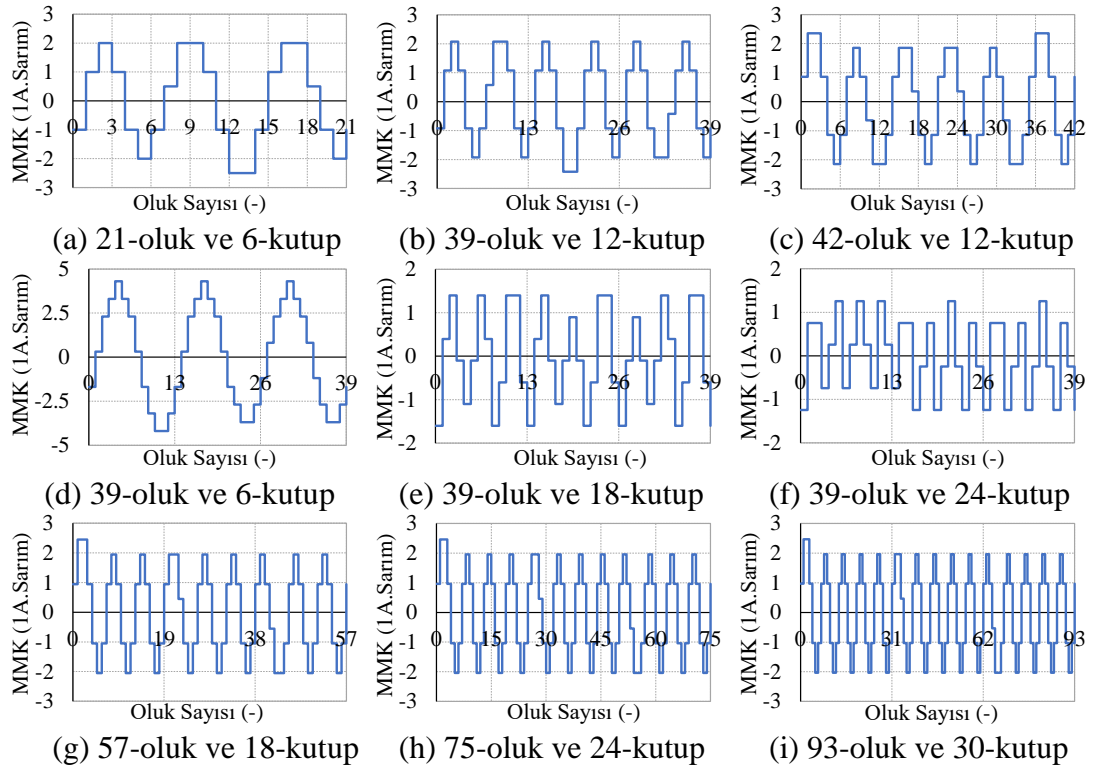
Tablo 2.6. Tablo 2.2'de gösterilen oluk-kutup kombinasyonlarının her bir fazı için hesaplanan sargı faktörü değerleri

Oluk-Kutup Komb.	Sargı Faktörü		
	$k_{w\_A}$	$k_{w\_B}$	$k_{w\_C}$
21-oluk 6-kutup	0.9198	0.8972	0.8972
39-oluk 12-kutup	0.9471	0.9471	0.9444
42-oluk 12-kutup	0.9277	0.9277	0.9198
39-oluk 6-kutup	0.9444	0.9471	0.9471
39-oluk 18-kutup	0.9444	0.9471	0.9471
39-oluk 24-kutup	0.9444	0.9471	0.9471
57-oluk 18-kutup	0.9513	0.9513	0.9500
75-oluk 24-kutup	0.9528	0.9528	0.9520
93-oluk 30-kutup	0.9536	0.9536	0.953

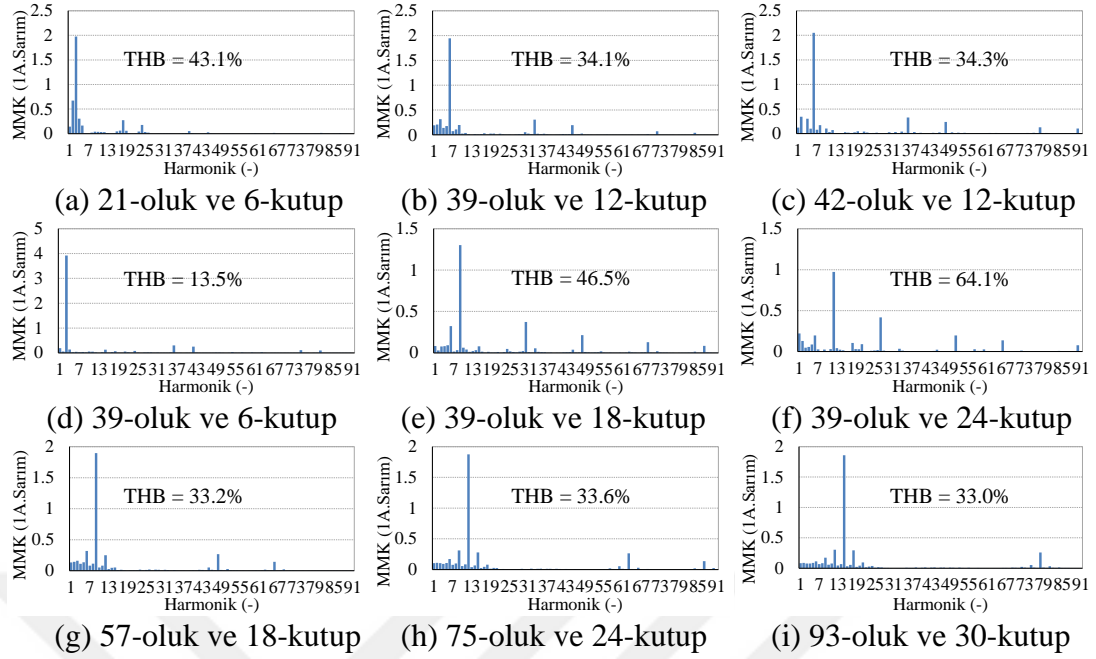
#### 2.1.2.4. DSY'ne sahip seçeneklerin MMK dağılımları

İncelenen DSY'ne motor tasarımlarının MMK dağılımları ve bu dağılımların harmonik içerikleri elde edilmiştir. Seçilen oluk-kutup kombinasyonlarının hava

aralığındaki MMK dağılımlarının değişimi her bir fazın sargı girişi ve çıkışları dikkate alınarak elde edilmiştir (Şekil 2.11). Hava aralığındaki MMK değişimi motorun sargı fonksiyonu yardımı ile hesaplanabilir. Bu nedenle MMK dağılımı motorun sadece sarım sayısına ve akımına bağlıdır. Motorların MMK değişimleri elde edilirken yapılan hesaplamalarda hava aralığı dağılımının her yerde aynı olduğu kabul edilmiştir. Stator sargılarının sarımının saat yönünün tersinde yapıldığı ve sargıların sayfanın dışına dik doğrultuda olan yönünün pozitif yön olarak kabul edildiği varsayılmıştır. Ayrıca stator nüvesinde do Şekil 2.8’de verilen tüm oluk-kutup kombinasyonları için Amper x sarım değerleri aynı tutulmuştur. Ayrıca bu dalga şekillerinin Fast Fourier dönüşümü (FFT) gerçekleştirilerek harmonik içerikleri ve toplam harmonik bozulmaları (THB) elde edilmiştir (Şekil 2.12). Şekil 2.12’den görüldüğü gibi seçilen tüm kombinasyonlarda bu motorların kesir-oluklu olmalarından dolayı istenmeyen zararlı harmonikler bulunmaktadır. Ayrıca 39-oluk 6-kutuplu motor en düşük kutup sayılarından birine sahip olması sebebiyle sinüzoidal temel harmoniğe sahiptir ve dolayısıyla bu kombinasyonun en düşük MMK THB’sine sahip olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, 39-oluk 24-kutuplu motorun en yüksek MMK THB’sine sahip olduğu görülmektedir.



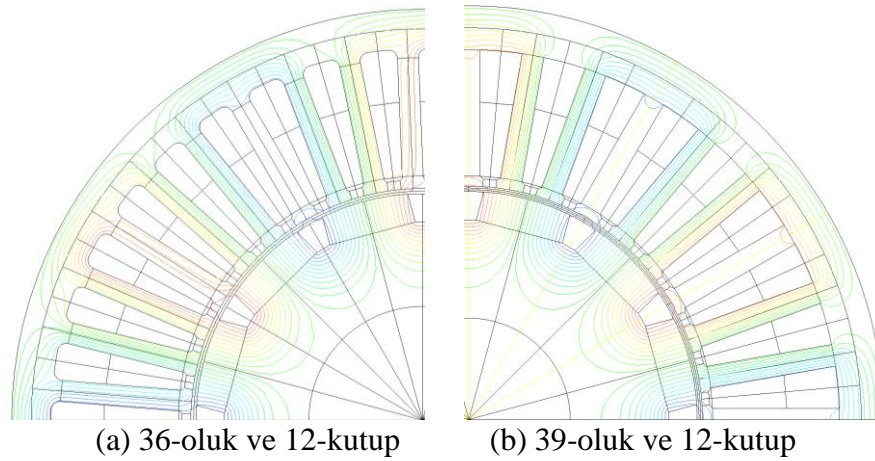
Şekil 2.11. DSY oluk-kutup kombinasyonlarının hava aralığındaki toplam MMK dağılımlarının değişimi



Şekil 2.12. DSY oluk-kutup kombinasyonlarının toplam MMK dağılımlarının harmonikleri

### 2.1.3. 36-Oluk dengeli ve 39-oluk dengesiz sargılı yüzey mıknatıslı motorların performans karşılaştırması

Bu bölümde, 36-oluk 12-kutuplu dengeli TOS yapısına sahip bir motor ile 39-oluk 12-kutuplu dengesiz DSY'ne sahip motorun SEA tabanlı performans karşılaştırması yapılmıştır. Adil bir karşılaştırma yapabilmek adına her iki motorun stator dış çapı, eksenel uzunluğu ve hava aralığı çapı gibi boyutları aynı tutulmuştur. Motorlarda aynı rotorlar kullanılmış ve kaykısız olarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında, dengeli tam-sayı oluklu ve dengesiz kesir-oluklu motorların Amper x sarımı aynı tutu-



Şekil 2.13. Motorların yüksüz durum akı çizgilerinin dağılımları

olarak eşit miktarda elektriksel yüklemeye yapılmıştır. Motorların yüksüz durum akı çizgilerinin karşılaştırması Şekil 2.13'de verilmiştir. Her iki motorda da rotor döner alanına bağlı olarak kutup dağılımları gözlenmiş ve bir problem ile karşılaşılmemiştir.

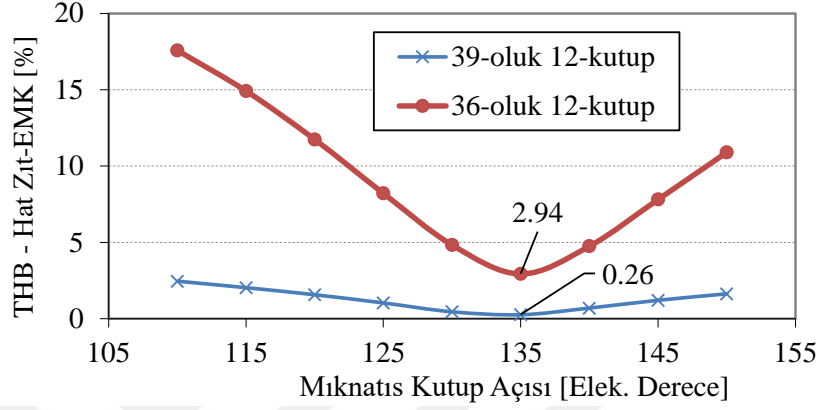
#### **2.1.3.1. Zıt-EMK gerilim harmoniklerinin ve moment çıkışlarının incelenmesi**

39-oluk DSY'ne sahip motor ve 36-oluk dengeli sargı yapısına sahip motorların yüksüz durumda ve aynı rotor hızında farklı mıknatıs kutup açısı değerleri için hat gerilimleri elde edilmiştir. Hat gerilimi harmonikleri elde edilerek THB içerikleri karşılaştırılmıştır (Şekil 2.14). 39-oluklu DSY'ne sahip motorun gerilim THB değerleri 36-oluklu motorunkinden her zaman daha düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Aynı mıknatıs açısında minimum THB değeri elde edilmiştir. 36-oluklu motor için bu değer %2,94 iken dengesiz sargı yapılı 39-oluklu motorda %0,24 olarak elde edilmiştir. Bu da önerilen sargı yapısının önemli avantajlarından biridir. Her iki SM motorun yüklü durumdaki sonlu elemanlar analizleri de gerçekleştirilmiş ve motorların moment kalitesi incelenmiştir. Şekil 2.15'de motorların 60  $A_{max}$  akım altında farklı mıknatıs açıları için ortalama moment ve moment dalgalanması değişimleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi TOS yapısına sahip motorun moment dalgalanması DSY'ne sahip motordan çok daha yüksek değerlere sahiptir. Dengeli sargı yapısına sahip motorda minimum moment dalgalanması ortalama momente göre %17,7 iken DSY'ne sahip motorda bu değer sadece %1,9'dur. Ayrıca aynı mıknatıs açısı değerinde (135 elektriksel derece) 39-oluk 12-kutuplu motorun ortalama momenti 36-oluklu motora göre %5,8 daha fazladır. Burada her iki motorun rotor ya da statoruna kaykısı uygulanmadığı vurgulanmalıdır. TOS yapısına sahip 36-oluklu motorda moment dalgalanmasını ortadan kaldırmak için kaykısı gibi bir önlem alınması gerektiği görülmektedir. Bununla birlikte, optimize edilen sargı yapısı sayesinde DSY'ne sahip 39-oluklu motorda böyle bir durum söz konusu değildir.

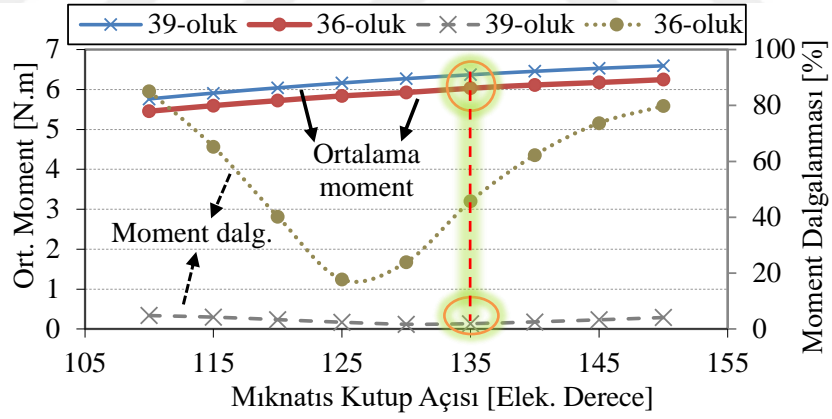
#### **2.1.4. 12-Kutuplu DSY'ne sahip motorun test sonuçları**

39-oluk 12-kutuplu DSY'ne sahip motorun motor performans verilerini elde etmek için prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Motor teknik özellikleri ve temel boyutları Tablo 2.7'de verilmiştir. Stator ve rotor laminasyonları ve kaykısız rotor yapısı Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Ayrıca yüksüz ve yüklü durum test sonuçları ile SEA sonuçları karşılaştırılmıştır. Test ve SEA ile elde edilen 1000 rpm rotor hızındaki hat gerilimi

dalga şekilleri Şekil 2.17(a)'da karşılaştırılmıştır. Sonuçların uyum içerisinde olduğu, test ve SEA sonuçları arasında sadece %0,9'luk bir hatanın olduğu görülmektedir. Bunun yanında tüm fazlar için test sonucu elde edilen zıt-EMK gerilimleri ölçülmüş ve hat gerilimleri elde edilmiştir (Şekil 2.17(b)). Önerilen DSY'ne sahip motorun sinüzoidal bir gerilim şekline sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2.14. 39-oluk ve 36-oluk motorların farklı mıknatıs kutup açısı değerleri için hat zıt-EMK gerilimi THB değerlerinin karşılaştırılması

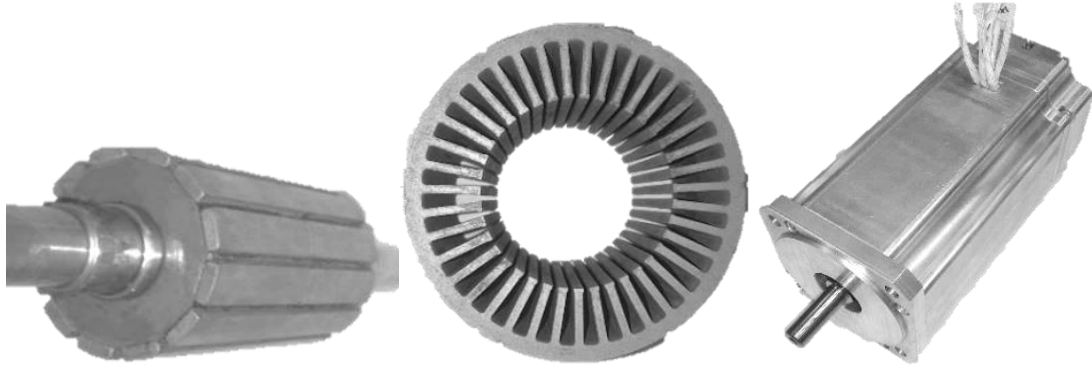


Şekil 2.15. 39-oluk ve 36-oluk motorların farklı mıknatıs kutup açısı değerleri için ortalama moment ve moment dalgalanması değişimlerinin karşılaştırılması

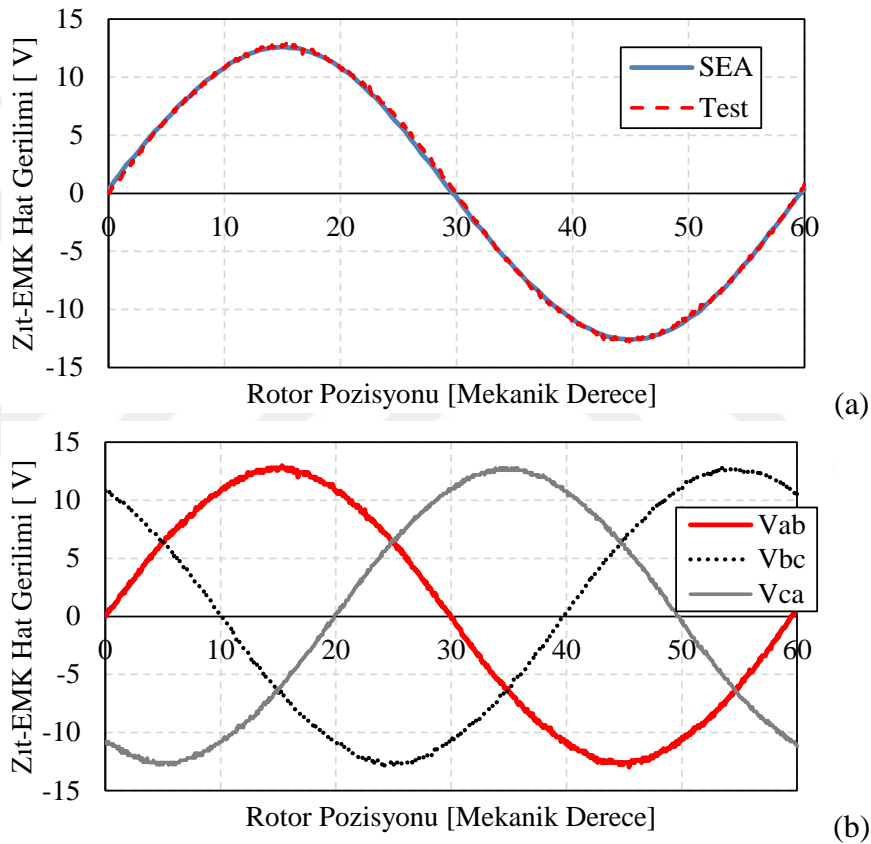
Tablo 2.7. 39-oluklu prototip motorun teknik özellikleri

Stator dış çapı	100 mm	Anma hızı	2500 rpm
Eksenel uzunluk	100 mm	Çıkış gücü	1,7 kW
Kutup çifti	6	Moment	6,3 N.m
Oluk sayısı	39	Anma akımı	60 A <sub>max</sub>
DC bara gerilimi	36 V	Mıknatıs malzemesi	NdFeB



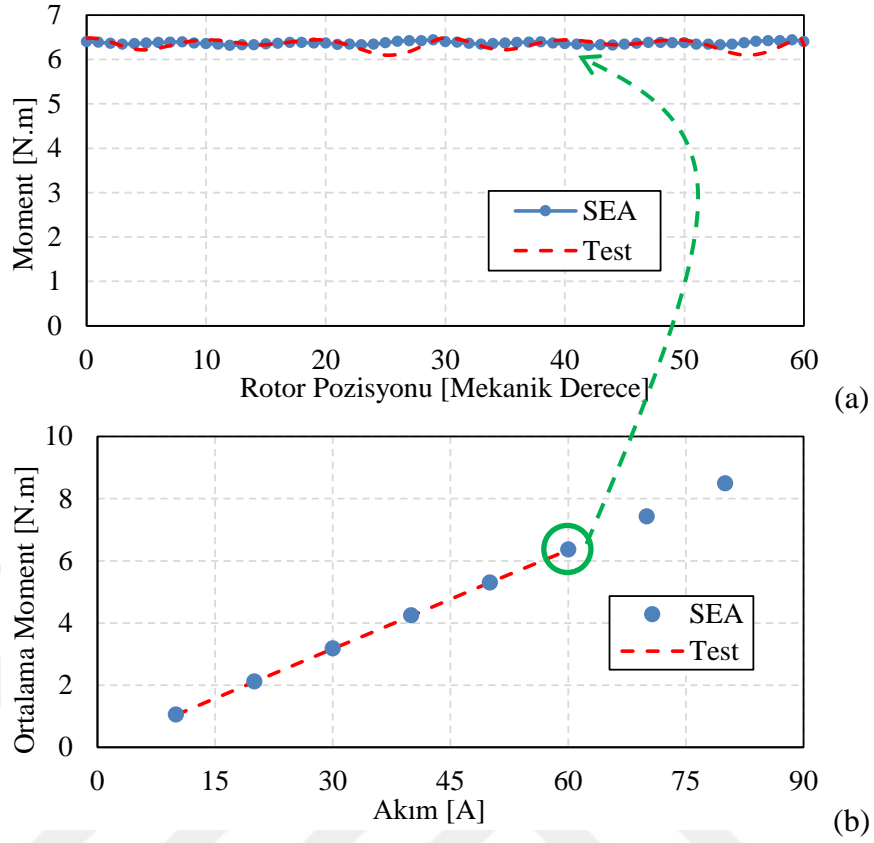


Şekil 2.16. 39-oluk 12-kutuplu DSY motor prototipi

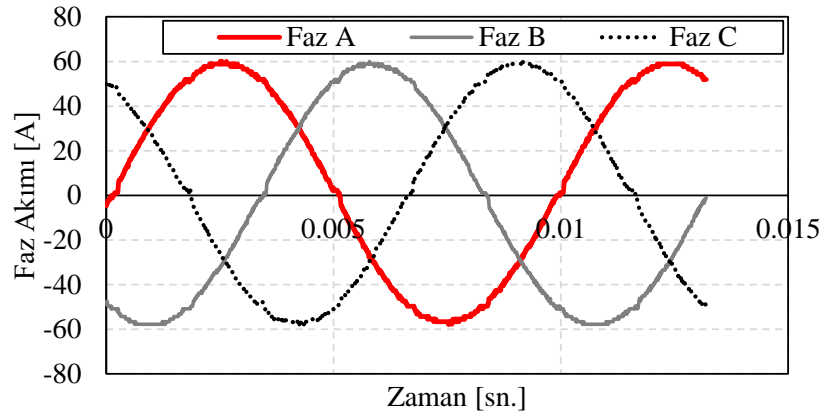


Şekil 2.17. (a) 1000 rpm rotor hızında SEA ve test zıt-EMK gerilimlerinin karşılaştırılması ve (b) 1000 rpm rotor hızında ölçülen hat gerilimlerinin değişimleri

Bunun yanında, motorun yüklü durum testleri gerçekleştirilerek 60 A akımda moment çıkışı ölçülmüş ve farklı yük koşulları altındaki moment-akım eğrisi elde edilmiştir (Şekil 2.18). Şekilden de görüldüğü gibi test ve SEA sonuçları birbirleri ile örtüşmektedir ve %0,6'lık bir hata söz konusudur. Buna ek olarak, tüm fazların akım değişimleri Şekil 2.19'da gösterilen şekilde deneysel olarak elde edilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi motora dengeli akımlar uygulanmıştır. Bunun yanında, 12-kutuplu



Şekil 2.18. Test ve SEA sonucu elde edilen: (a) Moment çıkışı ve (b) moment-akım eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 2.19. Test sonucu elde edilen akımların değişimleri

motorun oldukça sinüzoidal bir zıt-EMK gerilimine sahip olduğu ve seçilen oluk-kutup kombinasyonu sayesinde moment dalgalanmasının azaltılabildiği söylenebilir. SEA ve test sonucu elde edilen moment dalgalanmaları ise sırasıyla %1,9 ve %6,2'dir.

Son olarak, önerilen 39-oluk dengesiz ve standart 36-oluk dengeli sargı yapısına sahip motorların önemli performans verileri ve maliyet karşılaştırması Tablo 2.8'de veril-

Tablo 2.8. 39-oluk ve 36-oluk 12-kutuplu motorların performans ve maliyet karşılaştırması

	Moment/ $W_{\text{topl}}_{\text{am}}$ [N.m/kg]	Moment/ $W_{\text{SM}}$ [N.m/kg]	Moment/ $W_{\text{Cu}}$ [N.m/kg]	Moment/ $M_{\text{PM}}$ [N.m/\$]
DSY (39-oluk)	1.49	18.90	6.52	0.136
TOS (36-oluk)	1.45	17.95	6.62	0.126

miştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi DSY'ne sahip SM motorun standart TOS yapısına sahip motora göre nispeten daha yüksek moment/ağırlık oranına sahip olduğu görülmektedir. 36-oluk 12-kutuplu dengeli sargı yapısına sahip motorun moment kalitesini artırmak ve daha sinüzoidal bir zıt-EMK gerilimi elde edebilmek için rotora kaykılı uygulanması gerekmektedir. Bu da mıknatısların segmentli üretilmesini gerektirmekte ve mıknatıs maliyetini kaykısız duruma göre bir miktar artırmaktadır. Bu nedenle, Tablo 2.8'de verilen momentin mıknatıs maliyetine ( $M_{\text{PM}}$ ) oranı 36-oluk için daha yüksektir. Tabloda  $W_{\text{topl}}_{\text{am}}$  toplam aktif malzeme ağırlığını,  $W_{\text{SM}}$  toplam mıknatıs ağırlığını,  $W_{\text{Cu}}$  ise toplam bakır ağırlığını ifade etmektedir.

## 2.2. 6-Faz DSY'ne Sahip SM Motorların Performans Karşılaştırılması

Bu bölümde, farklı oluk-kutup kombinasyonları dikkate alınarak çift 3-faza sahip sürekli mıknatıslı dengeli ve dengesiz sargı yapıları motorların performans karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, 12-kutuplu seçenekler dikkate alınmış ve tam-sayı oluklu çift 3-faza sahip bir SM motor ile dengesiz sargı yapısına sahip kesir-oluklu bir SM motorun performans karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 3-faz sargı setleri arasındaki açının etkisini incelemek için 12- ve 24-kutuplu DSY'ne sahip motorlar incelenmiştir. Çalışma kapsamında, 6-faz DSY'ne sahip motorlar için yeni sargı şemaları önerilmiş ve seçilen oluk-kutup kombinasyonlarının avantajlarını incelemek için SEA tabanlı parametrik analizler ile motorların vuruğu momenti, zıt-EMK gerilim harmonikleri, moment dalgalanması gibi temel performans çıktıları ayrıntılı bir şekilde karşılaştırılmıştır.

### 2.2.1. 12-Kutuplu 6-faz motorların performans karşılaştırması

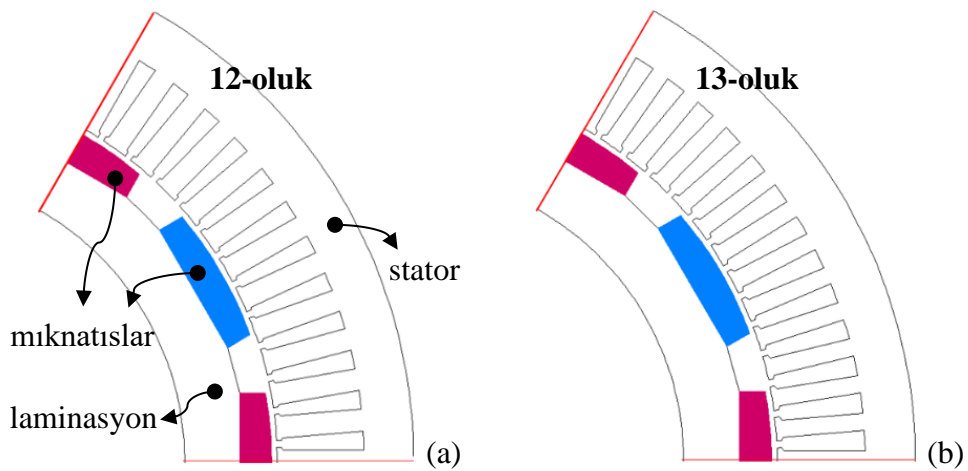
DSY'ne sahip çok fazlı motorun tasarımı için daha önce tasarlanıp prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve deneysel olarak doğrulanmış dengeli TOS yapısına sahip 12-kutuplu kaykılı rotora sahip bir SM motor referans alınmıştır [192]. 6-faz DSY'ne

sahip motorun temel özellikleri 12-kutuplu bu referans motora göre belirlenmiştir (Tablo 2.9). Motor performansını kaykısız bir rotor kullanarak iyileştirmek adına çift 3-faza sahip asimetrik ve dengesiz sargı yapılı bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.20’de geleneksel tam-sayı oluğa sahip motor ile çalışma kapsamında önerilen DSY’ne sahip geleneksel olmayan bir oluk sayısına sahip motor gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi motorlar maksimum periyodiklik ile incelendiğinde önerilen motorda oluk sayısı 3’ün (çalışma kapsamında çift 3-faz sistemler göz önüne alınmaktadır) bir katı olmamaktadır. Bu da seçilen oluk-kutup kombinasyonunun geleneksel olmayan bir kombinasyon olduğunu açıkça göstermektedir. Seçilen oluk-kutup kombinasyonunun en önemli avantajı vuru momentinin çok düşük olması ve moment kalitesini herhangi bir önlem almaya gerek kalmadan iyileştirmesidir. Bu yapının dezavantajı ise sargı yapısının bilinen yöntemler ile oluşturulamamasıdır.

DSY’ne sahip motorun sargı şeması bir önceki bölümde açıklanan yöntemler kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 2.21’de 72-oluk ve 78-oluk 12-kutuplu seçenekler

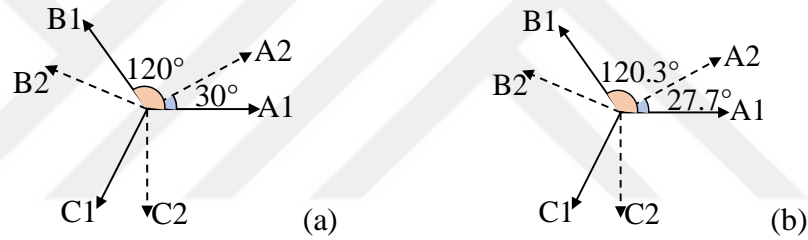
Tablo 2.9. 6-faz DSY’ne yapısına sahip motorun temel özellikleri

Anma momenti	113 N.m	Oluk sayısı	78
Anma hızı	2000 rpm	Oluk/kutup/faz	1.083
Anma gerilimi	48 V	Stator dış çapı	240 mm
Anma akımı	50 A <sub>rms</sub>	Mıknatıs türü	NdFeB
Kutup sayısı	12	Laminasyon türü	M19 çeliği
Faz sayısı	6	Soğutma	45°C su

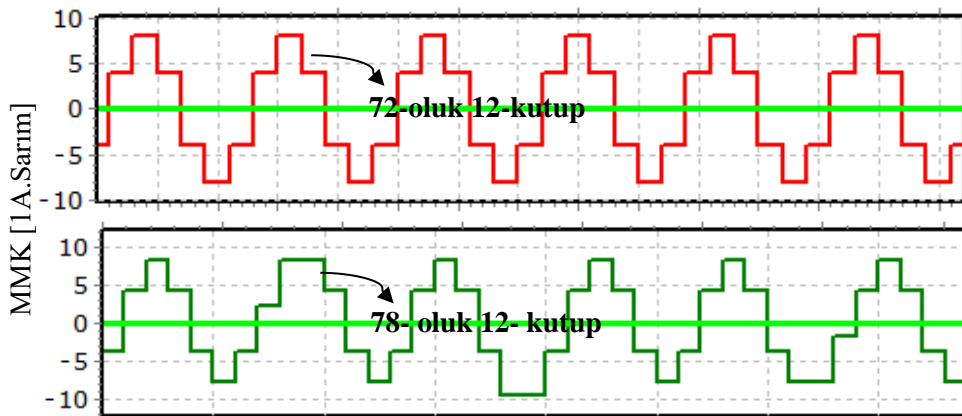


Şekil 2.20. (a) 1 oluk/kutup/faz oranına sahip geleneksel 6-faz (veya çift 3-faz) motor, (b) 1,083 oluk/kutup/faz oranına sahip önerilen 6-faz motor (motorların gösteriminde 1/6 periyodiklik kullanıldı)

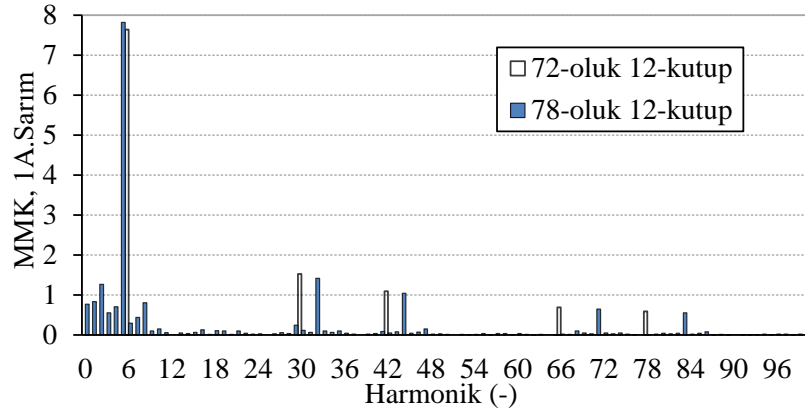
için fazör diyagramları gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi geleneksel sargı yapısına sahip 72-oluklu motorda fazlar arasında 120 elektrisel derece faz farkı mevcuttur. Ayrıca 3-faz sargı setleri arasında 30 elektrisel derece faz farkı yaratılmıştır. Bununla birlikte, önerilen 78-oluklu seçenek için, seçilen oluk-kutup kombinasyonu nedeniyle, fazlar arasında dengesizlik mevcuttur. Aynı zamanda, tüm oluklara eşit miktarda iletken ile yerleştirildiğinden, 3-faz setleri arasındaki faz farkı 27.7 elektrisel derece olarak elde edilmektedir. Her iki motorun sargı yapıları dikkate alınarak hava aralığında oluşan toplam MMK'leri 1 Amper x sarım için elde edilmiştir (Şekil 2.22). MMK değişimlerinin harmonikleri incelendiğinde (Şekil 2.23); 72-oluklu motor için MMK'nin THB değeri %27,3 iken 78-oluklu motor için bu değer %37,3'tür. MMK harmonik içeriğinin yüksek olması kesir-oluklu motorların en tipik özelliğidir. Bununla birlikte, önerilen motorda temel harmonik değeri geleneksel 72-oluklu motora göre %2,32 daha yüksektir.



Şekil 2.21. (a) Dengeli geleneksel çift 3-faz motor ve (b) dengesiz geleneksel olmayan çift 3-faz motorun fazör diyagramı (A1-B1-C1 birinci 3-faz seti ve A2-B2-C2 ikinci 3-faz seti göstermektedir)

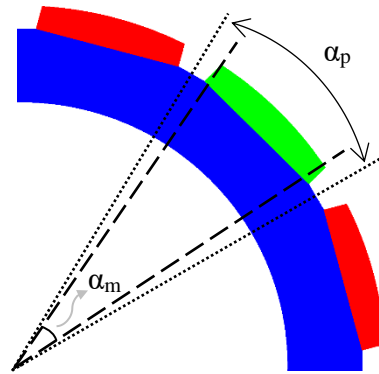


Şekil 2.22. 72- ve 78-oluk çift 3-faz motorların toplam MMK'lerinin değişimleri

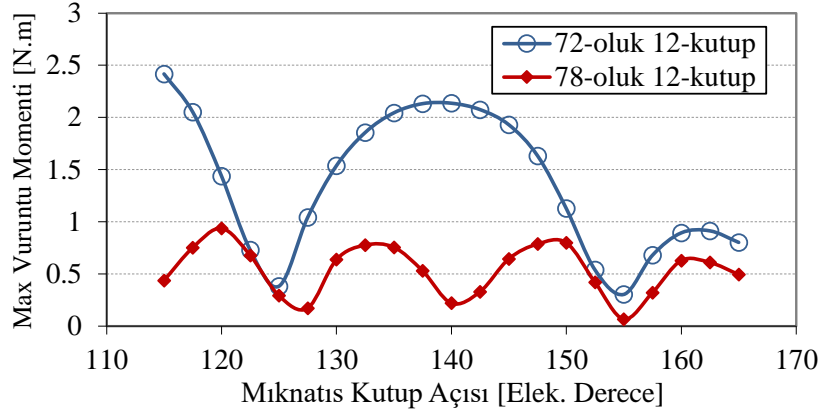


Şekil 2.23. Çift 3-faz motorların MMK'lerinin harmonik içerikleri

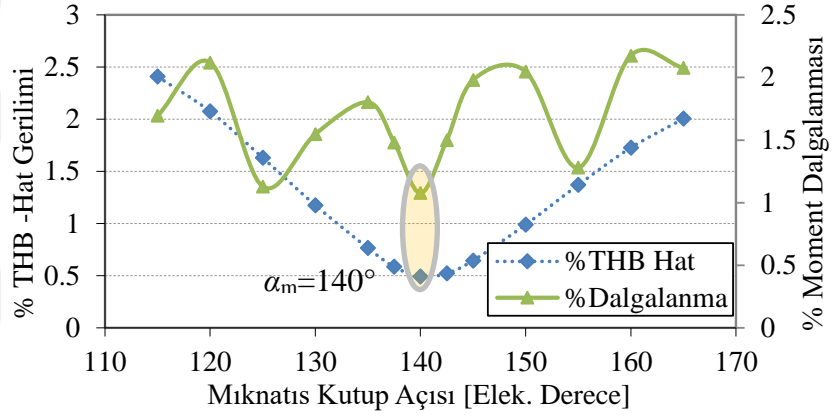
Yüzey mıknatıslı bir motor için Şekil 2.24'de gösterilen mıknatıs kutup açısı,  $\alpha_m$  değerinin değiştirilmesi hem yüksüz hem de yüklü durumdaki motor performansını ciddi miktarda etkiler [193-195]. Çalışma kapsamında incelenen çok fazlı motorların performansını artırmak ve optimum açı değerini belirlemek için farklı mıknatıs kutup açısı değerleri incelenmiştir. Şekil 2.25'de her iki motorun rotorunun bir segment olması durumları için vuru mu momentinin mıknatıs kutup açısına bağlı değişimleri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi 78-oluklu motorda düşük değerlere sahip çok sayıda nokta mevcuttur. Bunun yanında, 78-oluklu DSY'ne sahip motor için hat gerilimi % THB'si ve % moment dalgalanması değişimleri elde edilmiştir (Şekil 2.26). Her iki şekilden de görüldüğü gibi dengesiz ve asimetrik sargı yapısına sahip bu motor için mıknatıs kutup açısı 140 elektriksel derece iken en düşük moment dalgalanması ve gerilim harmonikleri elde edildiği görülmektedir.



Şekil 2.24. Motor mıknatıs kutup açısının gösterimi

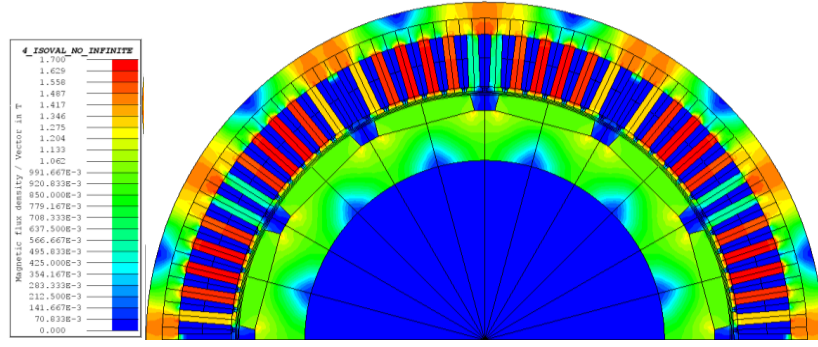


Şekil 2.25. 72-oluk ve 78-oluklu kaykısız rotorlu motorların mıknatıs kutup açısına bağlı olarak maksimum vuruğu momenti değışimlerinin karşılaştırılması

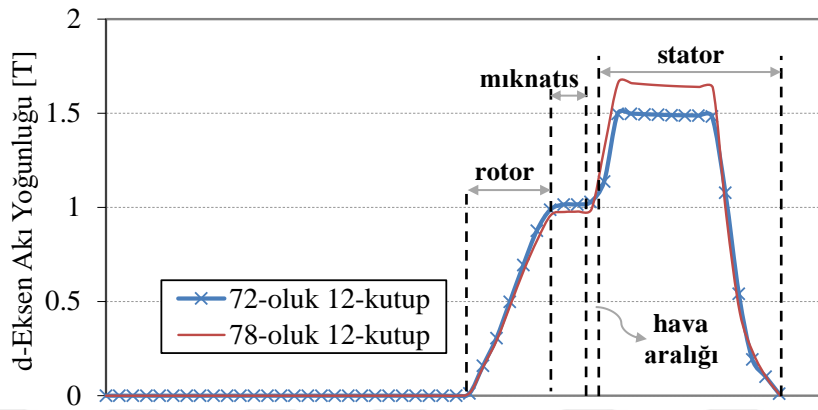


Şekil 2.26. 6-faz 78-oluklu motorun mıknatıs kutup açısına bağlı olarak hat gerilimi % THB ve % moment dalgalanması değışimleri

78-oluklu motor için belirlenen mıknatıs kutup açısında ayrıntılı sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek motorun performans karakteristiği elde edilmiştir. DSY'ne sahip motorun yüksüz durum akı yoğunluğu değışimi Şekil 2.27'de gösterilmiştir. Maksimum akı yoğunluğu stator dişlerinde 1,7 T olarak elde edilmiştir. Şekil 2.28'de ise hem 72-oluk dengeli ve simetrik sargı dağılımına sahip hem de 78-oluk dengesiz ve asimetric sargı dağılımına sahip motorların yüksüz durumda d-eksen boyunca elde edilen akı yoğunluğu değışimleri karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi 72-oluklu motorun stator dişlerindeki akı yoğunluğu 78-oluklu motora göre daha düşük seviyelerdedir. Bu durum, 72-oluklu motorun stator diş kalınlığının 78-oluklu motora göre daha fazla olmasından ve dişlere geçen akı miktarının daha geniş bir alandan geçmesini sağlamasından kaynaklanmaktadır.

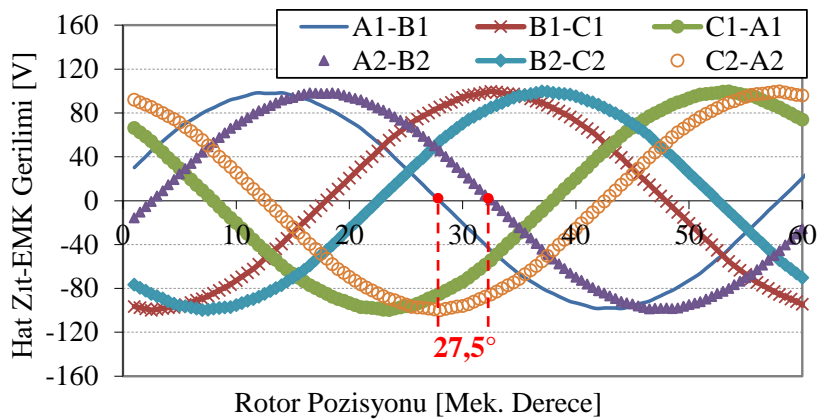


Şekil 2.27. 78-oluk 12-kutuplu motorun yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi



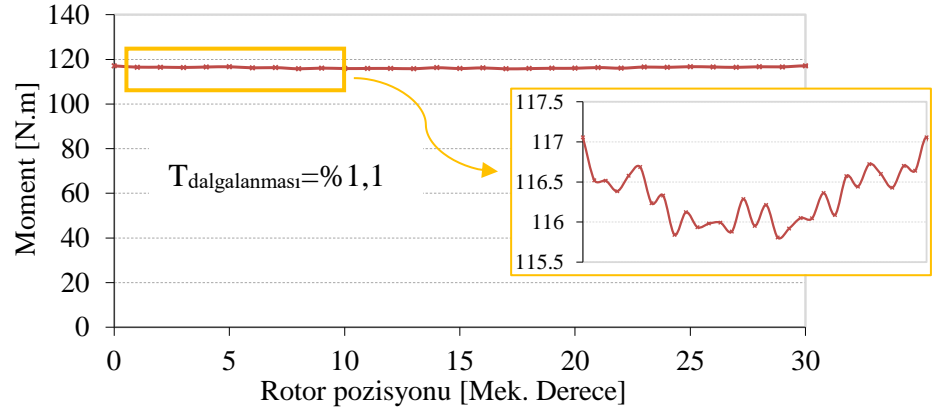
Şekil 2.28. Simetrik ve asimetrik sargı yapısına sahip motorların yüksüz durum d-eksen akı yoğunluğu değişimlerinin karşılaştırılması

DSY'ne sahip 12-kutuplu senkron motorun 1000 rpm rotor hızında dönerken hat zıt-EMK gerilimleri elde edilmiştir (Şekil 2.29). Şekilden de görüldüğü gibi birinci ve ikinci 3-faz sargı setleri arasında 27,5 elektriksel derecelik faz farkı söz konusudur. Bu



Şekil 2.29. Çift 3-faz 78-oluklu motorun zıt-EMK gerilimi değişimleri





Şekil 2.30. 78-oluk 12-kutuplu motorun moment çıkışı

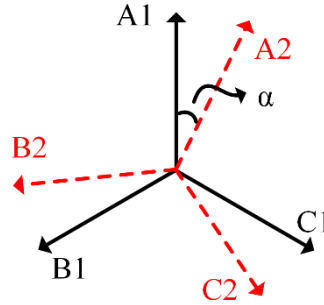
değerin Şekil 2.21(b)'deki fazör diyagramında verilen değer ile aynı olduğu görülmektedir. Bunun yanında, gerilim dalga şekillerinin oldukça sinüzoidal bir değişime sahip olduğu ve gerilim harmonikleri incelendiğinde THB değerinin %1,3 gibi düşük bir değere sahip olduğu görülmektedir. Son olarak motorun 1000 rpm rotor hızında ve 50  $A_{rms}$  hat akımında moment çıkışı elde edilmiştir (Şekil 2.30). Motorun moment değişiminden görüldüğü gibi moment dalgalanması oldukça düşüktür ve ortalama momente göre %1,1'dir. Motorun ortalama moment değeri ise 116,3 N.m'dir.

### 2.2.2. 12- ve 24-kutuplu DSY'ne sahip 6-faz motorların performans karşılaştırması

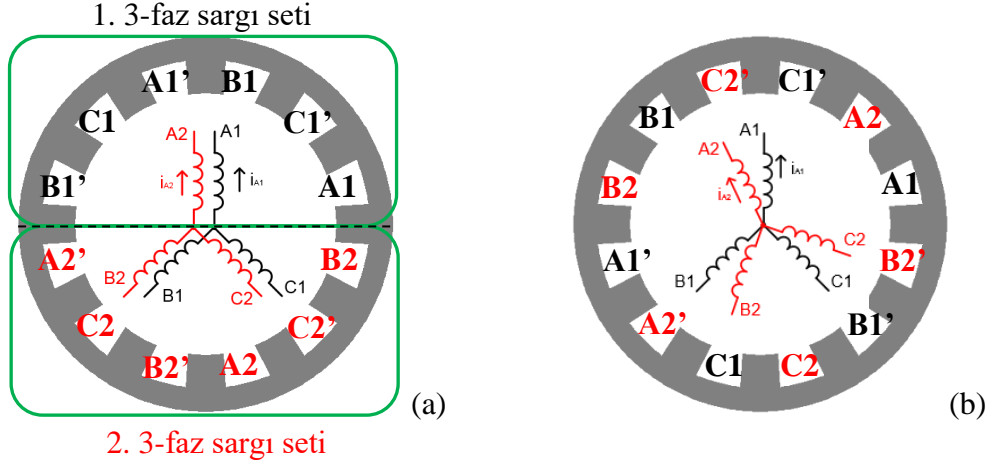
Bu bölümde, geleneksel 6-faz SM motorların performansına göre belirli avantajlar sunan asimetrik ve geleneksel olmayan stator sargısına sahip yeni bir 6-faz SM motor tasarım konsepti incelenmiştir. Önerilen motor standart olmayan bir oluk-kutup kombinasyonuna ve yeni bir sargı yerleşim yaklaşımına sahiptir. Bu motorun bir önceki bölümde önerilen 12-kutuplu motora göre en büyük avantajı, stator sargı sonlarının kayda değer bir biçimde azaltılabilmesi sayesinde çok daha düşük stator faz direnci elde edilebilmesidir. Bunun yanında, önerilen sargı yerleşimi sayesinde 3-faz sargı setleri arasındaki karşılıklı endüktanslar ihmal edilebilecek kadar düşük değerlere sahip olmaktadır. DSY'ne sahip motor için ayrıntılı SEA çalışmaları gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar 78-oluk 12-kutuplu motorun SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Son olarak, hem DSY'ne sahip 78-oluk 12- ve 24-kutuplu hem de 72-oluk 12-kutuplu motorların temel performans verileri bu bölümde karşılaştırılmıştır.

Geleneksel dengeli ve simetrik ya da asimetrik 3-faz motorların stator sargıları 120 elektriksel derece faz farkına sahiptir. Bu motorlar, çift 3-faza sahip olacak şekilde ya da 3-faz sargı setleri arasında bir faz farkı olacak şekilde 6-faz olarak tasarlanabilir. Çift 3-faza sahip olan sargı setleri Şekil 2.31’de gösterildiği gibi bir  $\alpha$  açısı ile yerleştirilebilir. Burada faz farkı yaratmak için kullanılan  $\alpha$  açısı 0 ile 360 elektriksel derece arasında değişen herhangi bir kesir sayı ya da tam sayı olabilir. Ayrıca A1-B1-C1 ilk 3-faz sargı setini, A2-B2-C2 ise ikinci 3-faz sargı setini temsil etmektedir.

Dengesiz sargı yapısına sahip asimetrik 3-faz motorlarda ise fazlar arasında artık 120 elektriksel derece faz farkı söz konusu değildir. Bunun yanında, DSY’ne sahip SM motorları da tıpkı dengeli 3-faz motorlarda olduğu gibi çift 3-faza sahip, 6-faz motorlara dönüştürmek mümkündür. Bir önceki bölümde incelenen 78-oluk 12-kutuplu DSY ve asimetrik dağılıma sahip SMSM, sargıların stator çevresi boyunca dağıtıldığı ve 3-faz sargı setleri arasında  $\alpha$  açısı kadar bir faz farkı bulunan sisteme örnek olarak verilmişti. Şekil 2.32(b)’de 12-kutuplu bu motorda stator fazlarının stator çevresi boyunca dağılımı ve fazlar arasındaki faz farkı temsili olarak gösterilmiştir. Bu durumda 3-faz sargı setleri arasında 27,5 elektriksel derece faz farkı mevcuttur. Bu bölümde önerilen 78-oluk 24-kutuplu kombinasyonda ise 3-faz sargı setlerinden birisi Şekil 2.32(a)’da gösterildiği gibi statorun yarısına diğer 3-faz sargı seti de statorun diğer yarısına yerleşecek şekilde sargılar tasarlanmıştır. Bu durumda, 3-faz sargı setleri arasındaki açı 0 elektriksel derece olmaktadır. Bir başka deyişle, sargı setleri aynı fazda olmaktadır. Şekil 2.32’de A1, A1 bobinin pozitif kısmını, A1’ ise A1 bobininin negatif kısmını temsil etmektedir. Bu gösterimde bir bobin adımı A1 bobininden A1’



Şekil 2.31. Çift 3-faz sargı yerleşimi için fazör diyagramı gösterimi



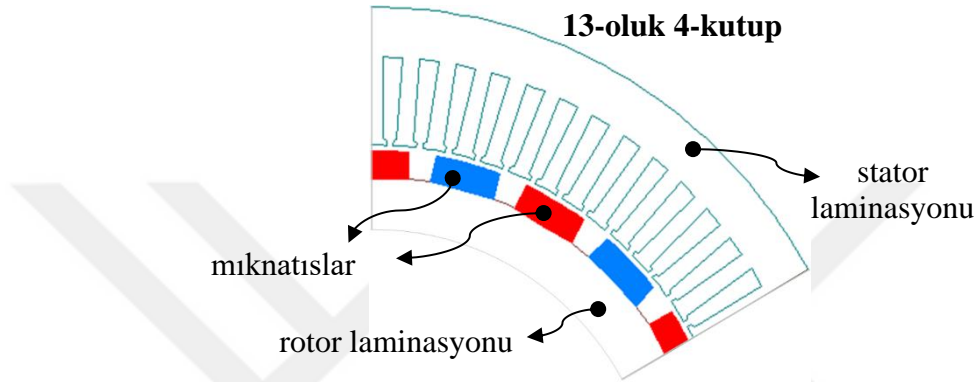
Şekil 2.32. Sargı setlerinin (a) statorun yarısına yerleştirildiği durum (çalışma kapsamında önerilen sargı setleri arasındaki açı,  $\alpha=0^\circ$ ) ve (b) stator çevresi boyunca dağıtıldığı durum (bir önceki bölümde incelenen durum,  $\alpha=27,5^\circ$ )

bobinine doğru ilerlemektedir. Diğer stator fazları da bu durum göz önüne alınarak gösterilmiştir.

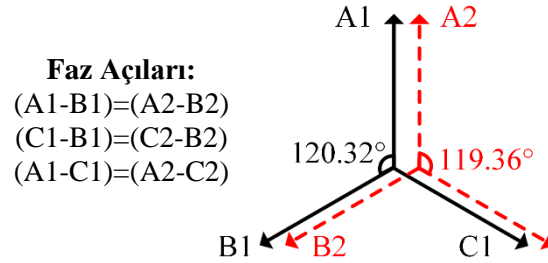
0,542 oluk/kutup/faz oranına sahip 24-kutuplu 6-faz motor modeli 1/6 periyodiklik kullanılarak Şekil 2.33’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi 72- ve 78-oluklu 6-faz motorlarda olduğu gibi tasarımda yüzey mıknatıslı ve kaykısız bir rotor kullanılmıştır. Çift 3-faz sargı setine sahip stator sargıları ise Şekil 2.32(a)’da gösterilen yerleşime sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Buna bağlı olarak, Şekil 2.34’de 78-oluk 24-kutuplu motorun sargı setleri arasındaki ve fazlar arasındaki açı değerleri ve fazör diyagramları gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi birinci 3-faz sargı setinin ilk fazı, A1 ile ikinci 3-faz sargı setinin ilk fazı, A2 aynı fazdadır ve fazlar arasındaki faz farkı 120 elektriksel dereceden farklıdır (örneğin; A1-fazı ile B1-fazı arasında 120,32 elektriksel derece faz farkı söz konusudur). Faz açıları Bölüm 2.1.2.2’de verilen, statordaki her bir faza ait her bir bobinin EMK vektörlerinin toplanması yöntemi ile hesaplanmıştır. 3-faz sargı setlerinin statorun yarısına konumlandırılması sayesinde ilk sargı seti ikinci sargı seti ile hiçbir oluğu paylaşmaz. Böylece, iki sargı seti arasındaki karşılıklı endüktans yok edilmiş olur. Ayrıca önerilen sargı setinde sargı adımı azaltılabildiği için motorun stator sargı sonları da azalmış olur. Bu sayede, stator sargı direnci düşürülebilir. 78-oluk 12-kutup ve 24-kutup SM motorların elektriksel parametrelerinin karşılaştırması Tablo 2.10’da verilmiştir. Önerilen 24-kutuplu motorda sargı direncinin ciddi miktarda azaltılabildiği görülmektedir. Böylece, aynı akımda, 24-kutuplu motorun bakır kayıpları 12-kutuplu

motora göre %28,3 azaltılabilmektedir. Bu veri, 24-kutuplu motor için önerilen sargı yapısının en önemli avantajlarından birisidir.

Aynı Amper x sarım değerlerine sahip her iki motor için hava aralığındaki MMK değişimlerinin karşılaştırılması Şekil 2.35’de gösterilmiştir. Ayrıca DSY’ne sahip 12- ve 24-kutuplu motorların MMK harmonik içeriği elde edilmiştir (Şekil 2.36). 78-oluk 12-kutuplu motor için MMK harmoniklerinin THB seviyesi %30,8 iken 78-oluk 24-



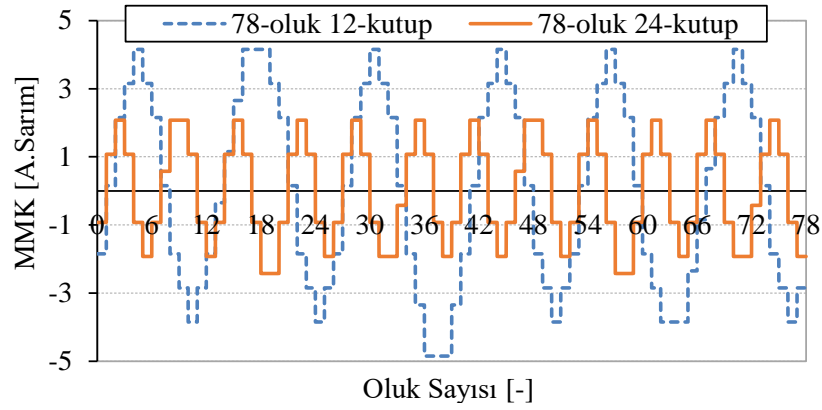
Şekil 2.33. 0,542 oluk/kutup/faz oranına sahip 24-kutuplu 6-faz motor (motorun gösteriminde 1/6 periyodiklik kullanıldı)



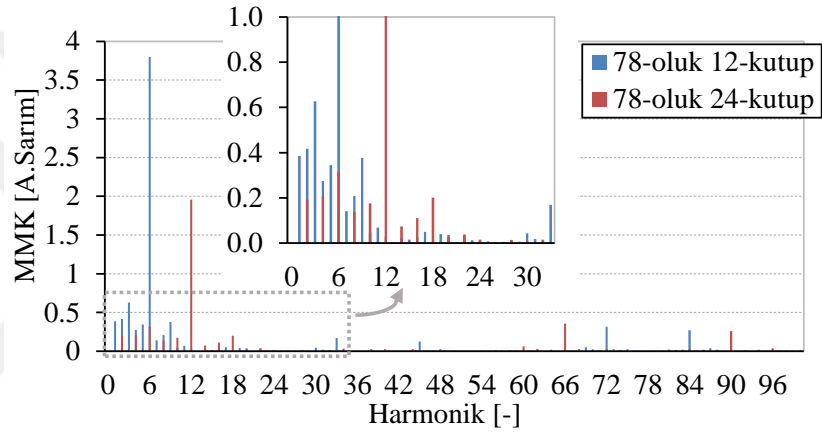
Şekil 2.34.  $\alpha=0^\circ$  iken 2 tane eş 3-faz sargı setine sahip 78-oluk 24-kutuplu motorun fazör diyagramları ve faz açıları

Tablo 2.10. 78-oluk 12- ve 24-kutuplu çok fazlı motorların temel elektriksel parametrelerinin karşılaştırılması

	78-oluk 12-kutup	78-oluk 24-kutup
$R_{faz}$ (mOhm)	76,2	54,6
$L_{faz}$ (mH)	0,291	0,228
İki sargı seti arasındaki karşılıklı endüktans	İhmal edilebilir	



Şekil 2.35. 6-faz 78-oluk 12- ve 24-kutuplu motorların hava aralığı MMK değişimlerinin karşılaştırılması



Şekil 2.36. 78-oluk 12- ve 24-kutuplu motorların MMK harmoniklerinin karşılaştırılması

kutuplu motor için bu değer %36,2'dir. Bununla birlikte, 6-faz 12-kutuplu motorun temel harmoniği 24-kutuplu motordan %48,5 daha fazladır.

Bu çalışmada, geleneksel olmayan stator sargı şekline ve yerleşimine sahip çift 3-faz yüzey SMSM topolojisi kullanılmıştır. Her bir 3-faz sargı seti birbirinden bağımsız eviriciler ile beslenebilir. Önerilen çok fazlı SM motorun tasarımı için Tablo 2.9'da verilen performans kriterleri ve tasarım parametreleri kullanılmıştır.

Çift 3-faza sahip SMSM'nin d-q eksen modeli geleneksel 3-faz SM motorlar göz önüne alınarak elde edilebilir. Bu çalışma kapsamında önerilen DSY'ne sahip SMSM'lerde ise fazlar arasında 120 elektriksel derece faz farkı bulunmadığı için abc ile d-q eksenleri arasındaki dönüşümde geleneksel denklemlerin değiştirilmesi gerekmektedir. Fakat bu çalışma kapsamında önerilen motorlarda dengesizlik miktarı minimize edildiği ve fazlar arasındaki faz farkı çok küçük olduğu için dengesizlikten

gelecek olan bileşenler ihmal edilebilir düzeydedir.  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$ -fazlarına d-q eksen dönüşümü uygulandığında, gerilim ve akı denklemleri şu şekilde elde edilebilir:

$$\begin{bmatrix} v_{di} \\ v_{qi} \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} i_{di} \\ i_{qi} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{di} \\ \psi_{qi} \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} -\psi_{qi} \\ \psi_{di} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{di} \\ \psi_{qi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{di} \\ i_{qi} \end{bmatrix} + \psi_a \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

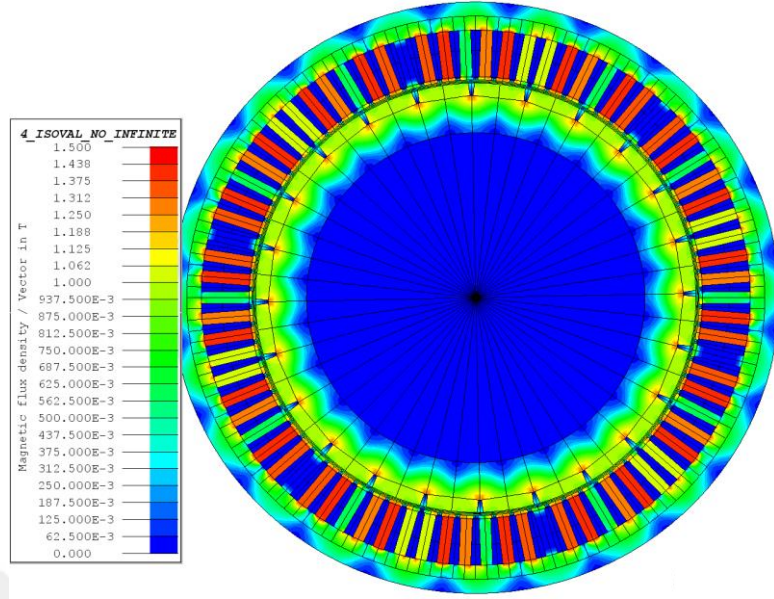
Burada  $i=1, 2$  ve  $v_{di}$ ,  $v_{qi}$  ve  $i_{di}$ ,  $i_{qi}$  d-q eksen gerilimleri ve akımlarıdır.  $\psi_{di}$  ve  $\psi_{qi}$  d-q eksen akısıdır.  $R$ ,  $L$ ,  $\omega$  ve  $\psi_a$  ise sırasıyla; sargı direnci, sargı endüktansı, elektriksel hız ve toplam akı parametrelerini simgelemektedir.

Denklem (2.12)'de verilen gerilim ile akım arasında oluşan etkileşim sonucunda motorun elektromanyetik momenti üretilir. Çift 3-faz SMSM için ortaya çıkan elektromanyetik moment şu şekilde edilebilir.

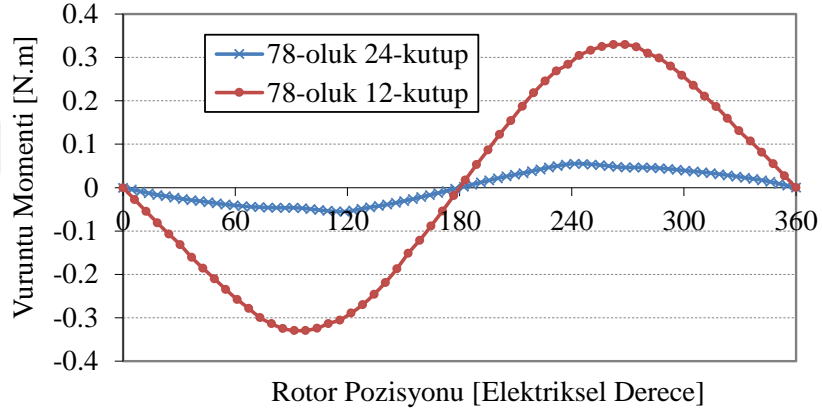
$$T_{em} = m \frac{p}{2} \sum_{i=1}^{m/3} (\psi_{di} i_{qi} - \psi_{qi} i_{di}) \quad (2.14)$$

Burada  $m$  faz sayısını ve  $p$  ise motorun kutup sayısını temsil etmektedir.

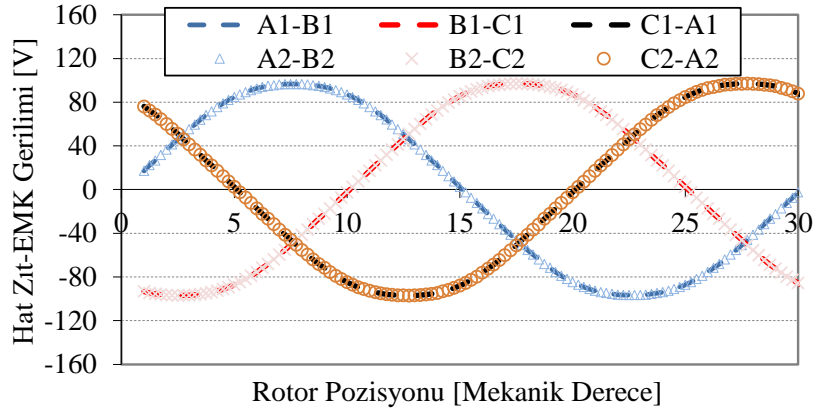
Verilen tasarım teknik özellikleri kullanılarak 78-oluk 24-kutuplu 6-faz motor için bir ön tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu motorun stator dış çapı, hava aralığı çapı gibi temel fiziksel boyutları ile Amper x sarım elektriksel yükleme parametreleri bir önceki bölümde incelenen 12-kutuplu DSY'ne sahip motor ile aynı tutulmuştur. 24-kutuplu DSY'ne sahip motor için yüksüz durumda elde edilen manyetik akı yoğunluğu değişimleri Şekil 2.37'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi maksimum akı yoğunluğu 1.44 T olarak stator dişlerinde elde edilmiştir. Bunun yanında, her iki motor için hem yüksüz hem de yüklü durumda elde edilen performans sonuçları karşılaştırılmıştır. DSY'ne sahip 12- ve 24-kutuplu motorlar için elde edilen vuruğu momenti karşılaştırması Şekil 2.38'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi her iki motorda da vuruğu momentinin ortalama momente oranı %0,5'in altındadır. Ayrıca 24-kutuplu motorun vuruğu momenti 12-kutuplu motora göre çok daha düşük seviyelerdedir. Bunun yanında, 24-kutuplu DSY'ne sahip SM motorun 1000 rpm rotor



Şekil 2.37. 78-oluk 24-kutuplu motorun yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi



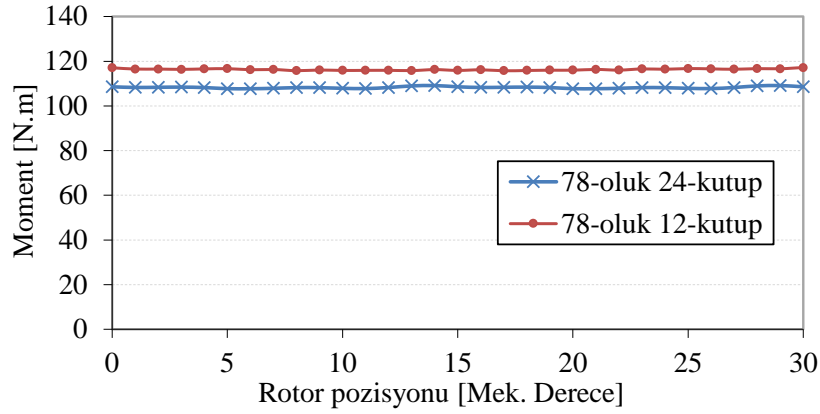
Şekil 2.38. 78-oluk 12- ve 24-kutuplu motorların vuruuntu momentlerinin karşılaştırılması



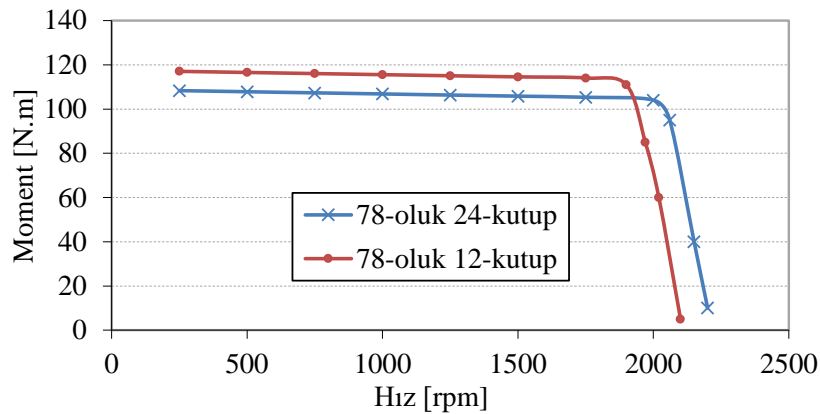
Şekil 2.39. 78-oluk 24-kutuplu motorun hat zıt-EMK gerilimi değişimi

hızındaki hat zıt-EMK gerilim değişimleri tüm fazlar için elde edilmiştir. Beklenildiği üzere A1 ve A2 fazları gibi ardışık sargı setleri aynı fazdadır. Bunun yanında, gerilim harmonikleri incelenerek hat gerilimi THB değeri %1,2 olarak elde edilmiştir.

78-oluklu her iki motor için sargı setleri ideal ve aralarında 120 elektriksel derece faz farkı bulunan sinüzoidal akım kaynakları ile beslenmiş ve motorların moment çıkışları elde edilmiştir (Şekil 2.40). 24-kutuplu motorun ortalama momentini 108,3 N.m ve moment dalgalanması %1,3 seviyelerindedir. 12-kutuplu motorun ortalama momentini ise 24-kutuplu motora göre %7,4 daha fazladır. Moment dalgalanması ise %1,1 seviyelerindedir. Bunun yanında, motorların moment-hız profilleri elde edilerek Şekil 2.41’de karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi 24-kutuplu motorun anma hızı 12-kutuplu motorunkinden %5 daha fazladır. Şekil 2.42’de ise 78-oluk 12- ve 24-kutuplu motorların moment sabitlerini karşılaştırabilmek için moment-akım ilişkileri incelenerek gösterilmiştir. Her iki motorun da geniş bir aralıkta moment çıkışı

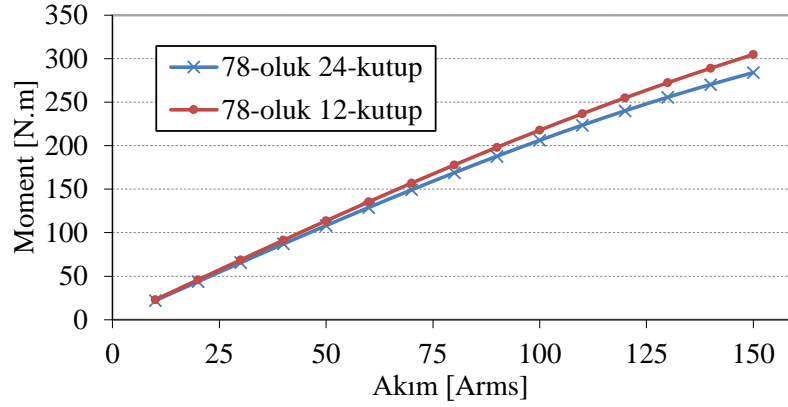


Şekil 2.40. 78-oluk 12- ve 24-kutuplu motorların moment çıkışlarının karşılaştırılması



Şekil 2.41. 78-oluk 12- ve 24-kutuplu motorların moment-hız eğrilerinin karşılaştırılması









Şekil 2.42. 78-oluk 12- ve 24-kutuplu motorların moment-akım ilişkileri

kabiliyetine sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, yüksek akımlara çıktıkça 24-kutuplu motorun doyum seviyesinin 12-kutuplu motora göre bir miktar arttığı söylenebilir.

### 2.2.3. 72-Oluk dengeli ve 78-oluk dengesiz sargı yapısına sahip 6-faz motorların performans karşılaştırması

Bu bölümde, geleneksel dengeli ve simetrik sargı yapısına sahip bir tam sayı-oluklu (72-oluk 12-kutup) motor, asimetrik ve dengesiz sargı yapısına sahip sargı setlerinin statorun çevresi boyunca dağıtıldığı bir kesir-oluklu (78-oluk 12-kutup) motor ve yine asimetrik ve dengesiz sargı yapısına sahip, bu kez 3-faz sargı setlerinin statorun yarısına yerleştirildiği bir kesir-oluklu (78-oluk 24-kutup) motorun performans karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. İncelenen tam sayı-oluklu motor, kaykısız (1-segment) ve kayıklı (4-segment) olmak üzere iki farklı rotora sahiptir. Adil bir karşılaştırma yapabilmek adına tüm motorlarda; kullanılan mıknatıs miktarı, sarım sayısı ve anma akımı, stator dış çapı ve hava aralığı çapı aynı tutulmuştur. Tablo 2.11’de 72-oluk 12-kutup dengeli ve 78-oluk 12- ve 24-kutuplu DSY’ne sahip çift 3-faz motorların performans karşılaştırması özetlenmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi en düşük vuruğu momenti 24-kutuplu motorda elde edilmesine rağmen, tüm motorlarda vuruğu momentinin ortalama momente oranı %0,5’in altındadır. Bu değer birçok uygulama için kabul edilebilir seviyededir. Ayrıca en yüksek moment sabiti 12-kutuplu DSY’ne sahip motor için elde edilmiştir ve bu motordan en yakın rakibine göre %6,9 daha fazla moment elde edilebildiği söylenebilir. Toplam kayıp değeri en düşük olan seçenek ise 78-oluk 24-kutuplu DSY’ne sahip motordur. Aynı zamanda,

Tablo 2.11. 72-oluk 12-kutup dengeli ve 78-oluk 12- ve 24-kutuplu DSY'ne sahip çok fazlı motorların performans karşılaştırması

	<b>72-oluk 12-kutup<sup>†</sup></b>		<b>78-oluk 12-kutup</b>	<b>78-oluk 24- kutup</b>
<b>Stator</b>	Geleneksel stator, q=1		Geleneksel olmayan stator q=1,083	Geleneksel olmayan stator q=0,542
<b>Rotor</b>	1-segment <sup>†</sup> 	4-segment <sup>†</sup> 	1-segment 	1-segment 
T <sub>vuruntu</sub>	%0,4	%0,29	%0,28	%0,05
Zıt-EMK max.	97,4 V	93,1 V	101,1 V	96,6 V
Ort. Moment	109 N.m	104 N.m	116,3 N.m	108,3 N.m
T <sub>dalgalanması</sub>	%2,8	%0,9	%1,1	%1,3
Moment sabiti	2,18 N.m/A <sub>rms</sub>	2,07 N.m/A <sub>rms</sub>	2,33 N.m/A <sub>rms</sub>	2,17 N.m/A <sub>rms</sub>
Bakır kaybı	969 W	969 W	1143 W	819 W
Demir kaybı	137,5 W	130,4 W	145,8 W	226,1 W
Mıknatıs kaybı	4 W	1,5 W	8 W	10 W
Toplam kayıp	1110,5 W	1100,9 W	1296,8 W	1055,1 W

<sup>†</sup> Motorlar deneysel olarak doğrulanmıştır.

bu motorun 3-faz sargı setleri statorun yarısına yerleştirildiği için, bakır kaybı en düşük değere sahip seçenek olduğu görülmektedir. 24-kutuplu bu motorda, bakır kaybı düşük bir diğer seçenek olan tam sayı-oluklu dengeli sargı yapısına sahip 12-kutuplu motora göre %15,5 daha az bakır kaybı elde etmek mümkündür. Bununla birlikte, 24-kutuplu DSY'ne sahip bu motorun en yüksek demir kaybına sahip olduğu görülmektedir.

### 2.3. 9-Faz Motorlar için Sargı Alternatiflerinin İncelenmesi

9-faz sürekli mıknatıslı senkron motorlar, yedekleme, güvenilirlik ve hata toleransı gibi avantajları sayesinde ulaşımdan havacılık alanına kadar pek çok uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır [111-114, 197-200]. Güvenilirlik ve yedekleme özellikleri diğerlerine kıyasla taşıt ve uzay uygulamalarının en kritik gereksinimlerindedir [115, 116]. 6-, 9- veya 12-faz kullanılan bu tür uygulamalarda stator sargılarında veya eviricilerde herhangi bir hata ya da arıza olması durumunda ilgili sargı ya da evirici kontrolör tarafından saf dışı bırakılıp sağlıklı sargı seti ya da evirici ile çalışmayı sürdürebilir. Diğer taraftan, 5- ve 7-faz SM motorların da bu hata tolerans özelliği mevcuttur [104, 200]. Ancak, 3-fazın bir katına sahip olan çok fazlı motorlar bağımsız

olarak 3-faz eviriciler üzerinden beslenebilirler. Bu özellik, çoklu 3-faza sahip motorların 5- ve 7-faz motorlara göre en önemli avantajlarından biridir [77]. Ayrıca çok fazlı sürekli mıknatıslı motorlar, geleneksel üç fazlı motorlara kıyasla daha yüksek moment-ağırlık oranları ve güç yoğunluklarına sahiptir [201].

Elektrikli ve hibrit taşıt uygulamaları yüksek moment kalitesine sahip (moment dalgalanması olmayan) elektrik motorlarına ihtiyaç duyarlar. Fakat moment dalgalanmasını ortadan kaldırmak için genellikle kullanılan kaykısı gibi yöntemler ekstra maliyet getirmektedir ve taşıt uygulamalarında bu gereksinimi minimum maliyette elde etmek istenmektedir. Dolayısıyla, maliyeti artırmadan düşük moment dalgalanması elde etmek önemli bir gereksinimdir. Stator veya rotora kaykısı uygulanması gibi bir ihtiyaca gerek duymayan, dengesiz sargı yapılı ve asimetrik dağılımı sahip geleneksel olmayan oluk-kutup kombinasyonları, taşıt uygulamaları için önemli bir alternatif olabilir. Ancak çok fazlı motorların modellenmesinde ortaya çıkan en önemli zorluklardan biri bazı oluk-kutup kombinasyonları için stator sargı yapısının tasarımıdır.

Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi üç fazlı dengeli sargı yapısına sahip motorlar için sargı konfigürasyonları (hem tam sayı hem de kesir oluk sargılar) araştırmacılar tarafından yaygın kullanılan yapılardır. Bilindiği üzere, bazı oluk-kutup kombinasyonları ise dengeli bir sargı yapısının yaratılmasına izin vermez. Bu nedenle, yeni bir sargı konfigürasyon seçeneği sunulması gerektiğinden, bu oluk-kutup kombinasyonları motor tasarımcıları tarafından tercih edilmezler. Ayrıca bu tür sargı konfigürasyonları genellikle rulmanlar üzerinde ekstra radyal yüke neden olan dengesiz manyetik çekme kuvveti ortaya çıkarmaktadır [115].

Literatürde, üç- [113, 116] ve altı fazlı [1, 77] DSY'ne sahip motorlara yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bununla birlikte, motor tasarımı ve kontrolü üzerine 9-faz dengeli (tam sayı- veya kesir-oluklu) SM motorlar ile ilgili literatürde bazı çalışmalar bulunmaktadır. Ancak 9-faz DSY'ne sahip motorlar için kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, sargı konfigürasyonlarının 9-faz DSY'ne sahip bir SM motorun performansına olan etkisini göstermek amaçlanmıştır. Bu motorlar geleneksel dengeli 9-faz motorlara göre düşük vuruş momenti ve zıt-EMK gerilim harmoniklerinin düşük olması sayesinde düşük hızlarda hassas konum

kontrolü yeteneği sağlama gibi bazı önemli avantajlara sahiptir. Ayrıca bu çok fazlı motorların hata tolerans kapasiteleri de gelişmiştir. Başka bir deyişle, stator sargı setlerinde kısa veya açık devre gibi herhangi bir arıza meydana gelirse, motor sağlıklı olan sargı setleri ile çalışmasını sürdürebilmektedir.

Bu çalışmada, dengeli kesir oluklu ve dengesiz sargı yapısına sahip 9-faz motorların farklı sargı konfigürasyonları ve sargı setlerinin farklı yerleşimleri incelenmiştir. Dengesiz sargı yapılı konfigürasyonlar için üç farklı sargı seçeneğine sahip 117-oluk 36-kutuplu motorlar incelenmiş, MMK ve harmonikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca bu konfigürasyonların SEA gerçekleştirilmiştir. DSY'ne sahip yüzey mıknatıslı topoloji için bir motor prototipi üretilmiştir. Yüksüz ve yüklü durum motor testleri gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

### **2.3.1. Çalışma kapsamında incelenen sargı yapıları**

Stator sargı yapıları için literatürde 4-farklı kategori tanımlanmıştır:

- 1) Oluk/kutup/faz,  $q$ , oranı tam sayı olan tam sayı oluklu sargı yapısı (TOS)
- 2)  $q$  oranı kesir bir sayı olan ve 1'den küçük olan kesir-oluklu konsantre sargı yapısı (KOKS),
- 3)  $q$  oranı kesirli ve 1'den büyük olan kesir-oluklu sargı yapısı (KOS)
- 4) KOKS ve KOS'da olduğu gibi  $q$  oranının kesir bir sayı olduğu fakat bu motorlarda yapılabilen dengeli sargı yapısı oluşturulmasının mümkün olmadığı dengesiz sargı yapılı motorlardır.

Geleneksel 3-faz dengeli veya geleneksel olmayan dengesiz sargı yapılı motorlar üç ve üçün katı olan 6, 9 veya daha fazla faza sahip aralarında faz farkı olan veya faz farkı olmayan sargı setleri kullanılarak oluşturulabilir. Bu sargılar hem TOS hem de KOS yapıları için dengeli çoklu üç fazlı motorlar için literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, 9-faz DSY'ne sahip bir SM motorun farklı sargı konfigürasyonları ve farklı sargı dağılımları ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Tablo 2.12'de 9-faz motorlarda farklı oluk-kutup kombinasyonları için  $q$  oranı gösterilmiştir. DSY'ne sahip motorlar için oluk-kutup seçenekleri incelendiğinde,

kutup sayısı 18'in (stator oluğu 9'un katı olduğunda) katı olduğu bazı oluk seçenekleri için dengesiz sargı seçeneğinin ortaya çıktığı görülmektedir. 9-faz tam sayı-oluklu motorlar, taşıt tahrik sistemi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [197]. Bu motorların performansında ve moment kalitesinde önlem alınmadığı takdirde sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, bu motorların performansını ve verimini arttırmak için çoğunlukla stator veya rotor tarafına kaykırı verilmesi, mıknatıs gruplaması, yardımcı oluklar gibi önlemler alınması gerekir. Diğer yandan, 9-faz kesir-oluklu motorlara olan talep fazladır [111, 114, 202-204]. Bu motorların üretimi diğer motor türlerine göre daha kolay olduğu için hem endüstride hem de akademik çalışmalarda sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Ancak, MMK dağılımlarındaki alt harmoniklerin yüksek olması kesirli-oluk motorlar için önemli bir sorundur, çünkü bu istenmeyen harmonikler, yüksek hızlı uygulamalarda demir kayıplarını artırdığı için büyük bir sorun haline gelmektedir. Bu sebeple, dengesiz sargı yapıları motorlar birçok uygulama için iyi bir seçenek olabilir. Bu motorlar, geleneksel üç fazlı tam sayı veya kesir-oluk sargılı SM motorlara kıyasla çok düşük vuruş momenti bileşenine sahip olmaları sayesinde düzgün ve kaliteli bir moment çıkışı sağlayabilirler. Ayrıca DSY'ne sahip SMSM'ler çok düşük THB seviyelerine sahip sinüzoidal bir zıt-EMK gerilime sahiptir.

Tablo 2.12. 9-faz motorlar için oluk/kutup/faz oranlarının gösterimi

Q/p	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
9	0.13	0.10	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
18	0.25	0.20	0.17	0.14	0.13	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06
27	0.38	0.30	0.25	0.21	0.19	0.17	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08
36	0.50	0.40	0.33	0.29	0.25	0.22	0.20	0.18	0.17	0.15	0.14	0.13	0.13	0.12	0.11
45	0.63	0.50	0.42	0.36	0.31	0.28	0.25	0.23	0.21	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14
54	0.75	0.60	0.50	0.43	0.38	0.33	0.30	0.27	0.25	0.23	0.21	0.20	0.19	0.18	0.17
63	0.88	0.70	0.58	0.50	0.44	0.39	0.35	0.32	0.29	0.27	0.25	0.23	0.22	0.21	0.19
72	1	0.80	0.67	0.57	0.50	0.44	0.40	0.36	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25	0.24	0.22
81	1.13	0.90	0.75	0.64	0.56	0.50	0.45	0.41	0.38	0.35	0.32	0.30	0.28	0.26	0.25
90	1.25	1	0.83	0.71	0.63	0.56	0.50	0.45	0.42	0.38	0.36	0.33	0.31	0.29	0.28
99	1.38	1.10	0.92	0.79	0.69	0.61	0.55	0.50	0.46	0.42	0.39	0.37	0.34	0.32	0.31
108	1.50	1.20	1	0.86	0.75	0.67	0.60	0.55	0.50	0.46	0.43	0.40	0.38	0.35	0.33
117	1.63	1.30	1.08	0.93	0.81	0.72	0.65	0.59	0.54	0.50	0.46	0.43	0.41	0.38	0.36
126	1.75	1.40	1.17	1	0.88	0.78	0.70	0.64	0.58	0.54	0.50	0.47	0.44	0.41	0.39
135	1.88	1.50	1.25	1.07	0.94	0.83	0.75	0.68	0.63	0.58	0.54	0.50	0.47	0.44	0.42

TOS KOKS KOS DSY

### 2.3.2. 9-Faz SM motorlar için sargı konfigürasyonları

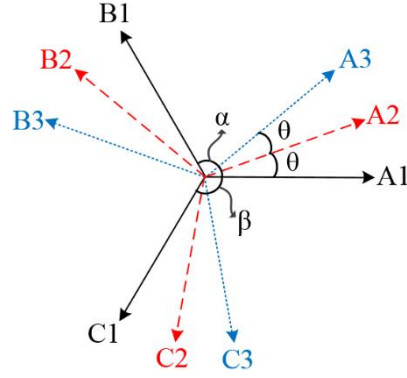
Üç veya daha fazla faza sahip motorların oluk-kutup kombinasyonu sargı yapısını belirler. Ayrıca çok fazlı sargı yapısına sahip (9-faz sargılar dahil) SMSM'lerin sargı konfigürasyonları, ticari yazılım paketleri ile optimize edilebilir. Bununla birlikte, oluk-kutup kombinasyonlarının bir kısmı, önceki bölümlerde belirtildiği gibi dengeli bir sargı yapısı oluşturmaya izin vermemektedir. 9-faz dengesiz sargı yapılı SM motorlar için ise ticari bir yazılım ya da kapsamlı bir çalışma olmadığından oluk-kutup kombinasyonları için yeni bir sargı yapısının tasarlanması gerekmektedir.

Motor faz sayısı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$m = 3n \quad (2.15)$$

Burada  $n \geq 2$  ve bir tam sayıdır. Bu ifade, 3 fazın katı olan sistemler için geçerlidir. Diğer bir deyişle, bu sistemler için eşdeğer ya da aynı olan üç fazlı gruplardan oluşan  $n$  ayrı sargı seti kullanılabilir.

Şekil 2.43'de 9-faz sargı yapısına sahip motorların fazör diyagramı için genel gösterim verilmiştir. Burada A1-B1-C1, birinci 3-faz setin fazlarını,  $\alpha$ , A1 ile B1 arasındaki elektriksel açıyı ve  $\beta$  ise C1 ve A1 fazları arasındaki elektriksel açıyı ifade etmektedir. A2-B2-C2, A1-B1-C1'e göre  $\theta$  elektriksel derece ile kaydırılan 3-faz sargı setini temsil etmektedir. Burada  $\theta$ , 0-360 arasında değişen herhangi bir tam sayı veya kesirli bir sayı olabilir. A3-B3-C3 ise 3-faz sargı setinin A1-B1-C1'e göre  $2\theta$  elektrik derece ile kaydırılması ile elde edilen üçüncü 3-faz sargı setini temsil etmektedir. Şekil 2.43'de verilen faz diyagramından görüldüğü gibi fazlar veya sargı setleri arasındaki açı değiştirilerek birçok sargı şekli elde edilebilir. Motorun dengeli bir sarım yapısı varsa,  $\alpha$  ve  $\beta$  120 elektriksel derecelik bir açıya sahip olacaktır. Diğer taraftan, faz kaymasının değiştirilmesi farklı sargı seçeneklerinin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Eğer  $\theta = 0$  ise ve sarım yapısı dengeliyse, üç fazlı tüm setlerin birbiri ile üst üste olduğu ve birbirine eş üç tane 3-faz sistem elde edilebilir. Dengesiz sargı yapılı motorlar için ise 120 elektriksel derecelik faz farkı geçerli değildir, bu nedenle DSY'ne sahip motorlar için  $\alpha$  ve  $\beta$  açıları birbirinden farklı değerler almaktadır.



Şekil 2.43. 9-faz sargı yapısına sahip motorların fazör diyagramı için genel gösterim

### 2.3.3. Oluk vektörü yaklaşımı

Oluk vektörü,  $Q_s/t$  vektör kolundan oluşur ve her bir vektör kolu  $t$  tane fazörden oluşur. Burada motor periyodu  $t$  ile ifade edilebilir:

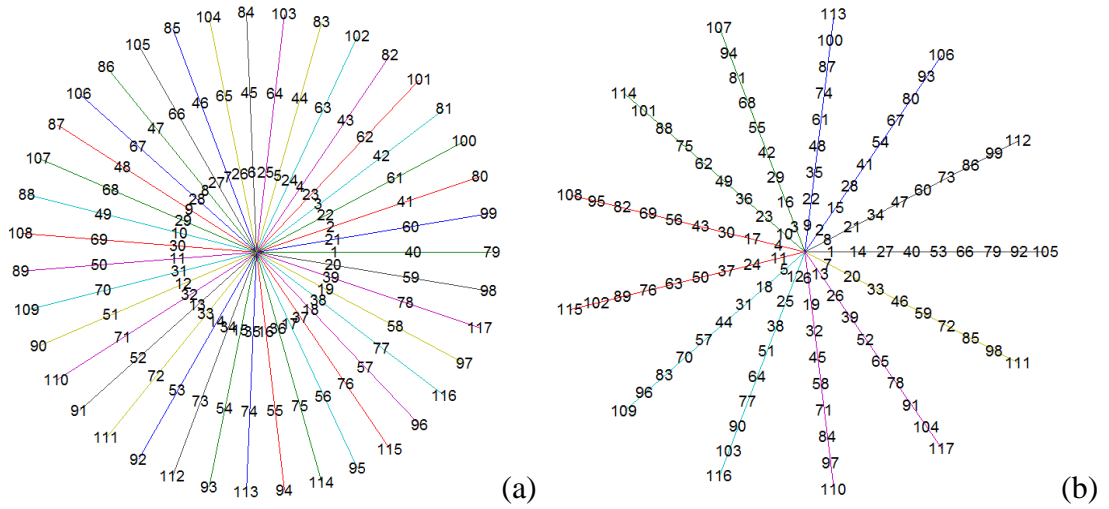
$$t = \text{OBEB}(Q_s, p/2) \quad (2.16)$$

Burada  $Q_s$  ve  $p$  motorun oluk ve kutup sayısını belirtmektedir. İki vektör kolu arasındaki mekanik açı ise,

$$\alpha_{ph} = \alpha_{sm} \cdot t \quad (2.17)$$

eşitliği ile elde edilebilir. Burada  $\alpha_{sm}$  mekanik radyan olarak oluk adımını ifade etmektedir.

Bu çalışmada incelenen 117-oluk 12- ve 36-kutuplu motorların oluk vektörleri yukarıda verilen ifadeler ile elde edilmiştir. Her iki motorun oluk vektörleri Şekil 2.44'de gösterilmiştir. Şekil 2.44(a)'den görüldüğü gibi 117-oluk 12-kutuplu seçenekte oluk vektörü sayısı 39'a eşittir. Bu sayı 3'e tam bölünebildiği için motor sargılarının dengeli bir dağılıma sahip olduğu söylenebilir. Ancak, Şekil 2.44(b)'den görüldüğü gibi 36-kutuplu seçenekte toplam vektör kolu sayısı 3'ün katı değildir. Dolayısıyla, bu oluk-kutup kombinasyonu için dengeli bir sargı yapısı oluşturmak mümkün değildir.

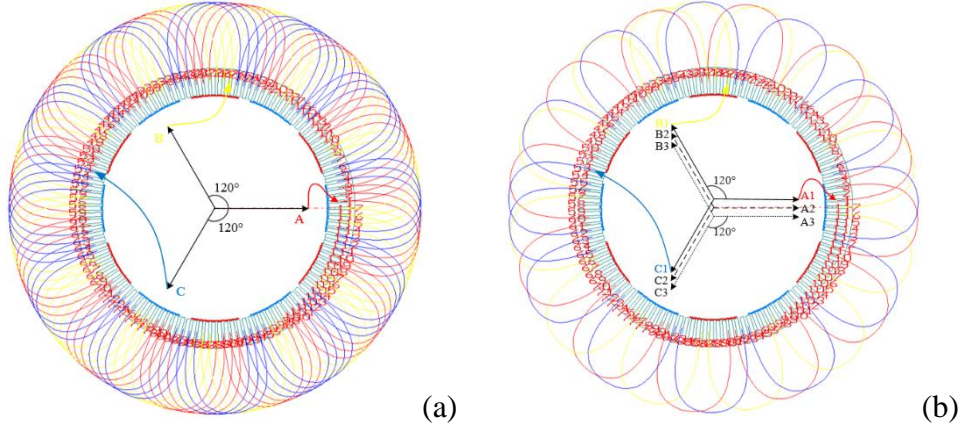


Şekil 2.44. 117-oluk (a) 12-kutup ve (b) 36-kutup motorların oluk vektörlerinin gösterimi

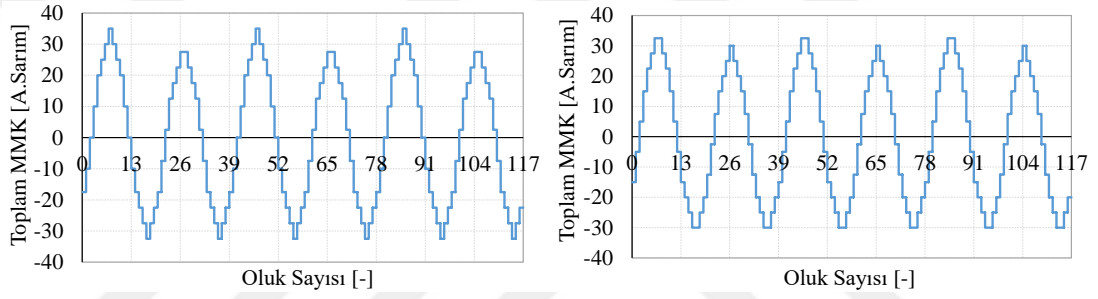
### 2.3.4. Sargı yerleşimlerinin 3-faz ve 9-faz SM motorların MMK dağılımı üzerindeki etkisi

Bu bölümde, 12- ve 36-kutuplu motorların sargı yerleşimlerinin MMK dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk olarak 117-oluk 12-kutuplu motorun 3-faz olma durumu için sargı yapısı oluşturulmuştur (Şekil 2.45(a)). Daha sonra, 3 tane 3-faz sargı setine sahip sargılar stator çevresi boyunca dağıtılmıştır (Şekil 2.45(b)). Dengeli sargı yapısına sahip bu iki motorun MMK dağılımları Şekil 2.46’de gösterilmiştir. Şekil 2.47’de ise dengeli 3- ve 9-faza sahip 12-kutuplu motorların MMK harmonikleri karşılaştırılmıştır. Motor 12-kutuplu olduğu için toplam MMK’nin temel harmonik bileşeni kutup çifti olan 6. harmonikte oluşmaktadır. 12-kutuplu motorun yüksek dereceden diğer harmonikleri de  $6k$  (burada  $k=3, 5, 7, \dots$ ) derecelerinde oluşur. Ayrıca MMK dağılımının THB seviyesi 9-faz sargı yapısı kullanıldığında 3-faz seçeneğe göre %2 azaltılmıştır. Bu azalış çok kayda değer olmasa da 9-faz sargı seçeneğini kullanmanın getirdiği en önemli avantaj faz başına düşen akım miktarının azaltılmasıdır. Bunun sonucunda da eviricideki yarı iletken anahtarlama elemanlarındaki akım streslerinin düşürülmesini sağlamış olur. Ayrıca 9-faza sahip motor kullanıldığında hata toleransı artırılarak güvenlik açısından kritik önem taşıyan uygulamalar için sistem çalışmasının sürdürülebilirliği açısından önemli bir çözüm üretilmiş olur. Bu tür çok fazlı motorların getirdiği en önemli dezavantajlar ise kontrolcünün oluşturduğu ekstra karmaşıklık ve sistem maliyetinin artması olarak gösterilebilir. Tablo 2.12’de gösterildiği gibi incelenen bir sonraki oluk-kutup kombi-

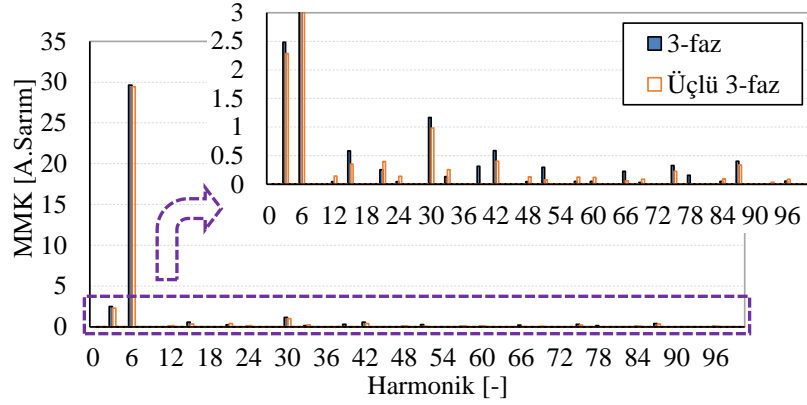




Şekil 2.45. Dengeyi sargı yapısına sahip 117-oluk 12-kutuplu motorun (a) 3-faz seçeneğine ve (b) üç tane 3-faz seçeneğine ait sargı dağılımları (sadece ilk 3-faz gösterilmiştir)



Şekil 2.46. 12-kutuplu dengeli (a) 3-faz sargı ve (b) 3 tane 3-faz sargı seçeneğine sahip SM motorların toplam MMK dağılımları

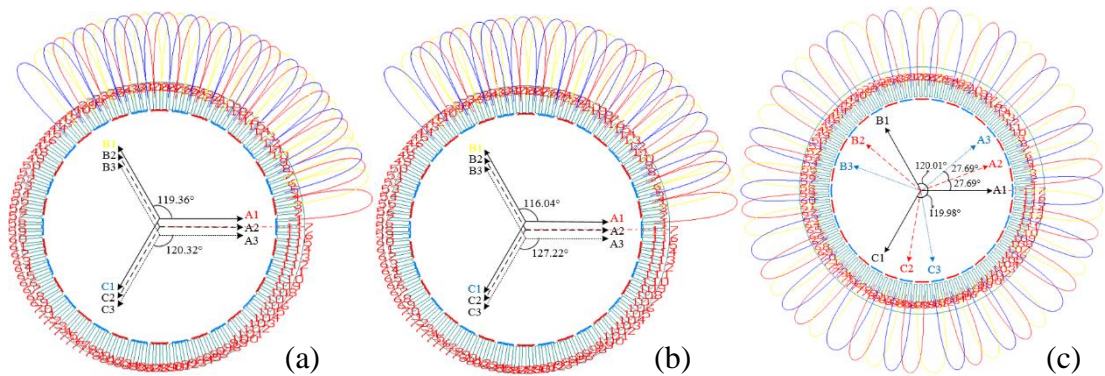


Şekil 2.47. 12-kutuplu dengeli 3-faz sargı ve 3 tane 3-faz sargı seçenekli SM motorların toplam MMK harmoniklerinin karşılaştırılması

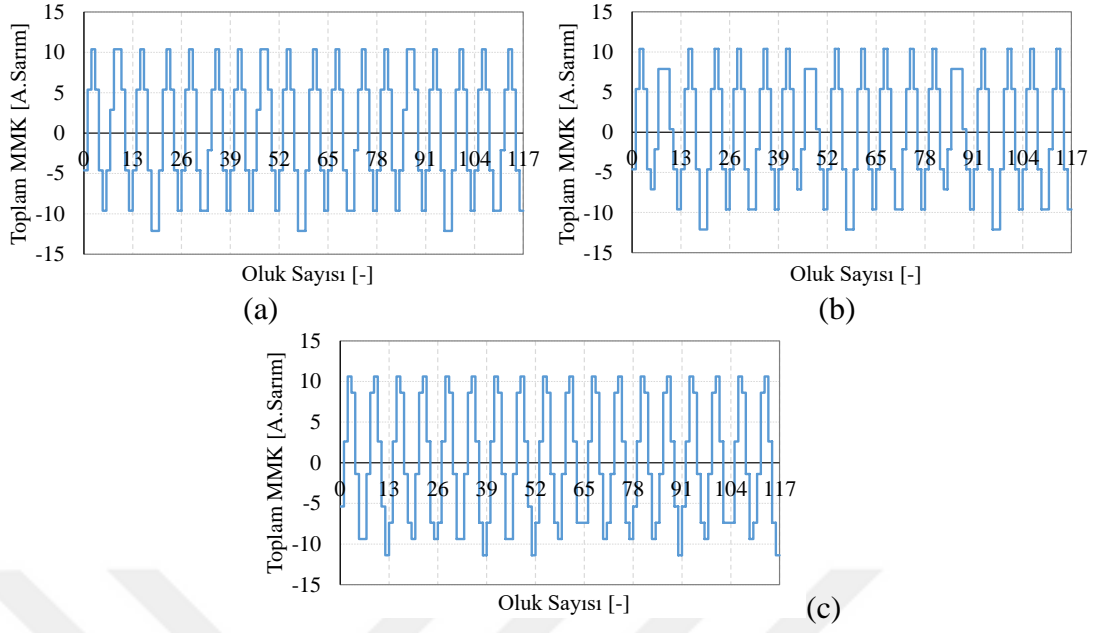
nasyonu DSY üreten 117-oluk 36-kutuplu seçenektir. Şekil 2.48'de gösterilen (sadece ilk 3-faza ait sargı dağılımı gösterilmiştir), dengesiz sargı yapısına sahip sargı seçenekleri üç farklı durum için incelenmiştir. Bu durumlardan ilki (Seçenek1), 3-faz sargı setlerinin statorun üçte birlik bölümüne yerleştirildiği ve fazlar arasındaki

dengelesizlik miktarını minimize edecek optimum sargı yapısının oluşturulduğu seçenektir. İkinci durum için isimlendirilen Seçenek2’de ise 3-faz sargı setleri yine statorun üçte birlik bölümüne yerleştirilmiş fakat bu kez, fazlar arasındaki dengelesizlik miktarı bilerek artırılmıştır. Son olarak incelenen durum ise (Seçenek3) 3-faz sargı setlerinin statorun çevresi boyunca dağıtıldığı ve fazlar arasındaki dengelesizlik miktarını minimize edecek sargı yapısının tasarlandığı seçenektir. Seçenek1 ve Seçenek3’de sargı faktörünü maksimize edecek aynı zamanda dengelesizlik miktarını minimize edecek şekilde sargılar tasarlanarak konumlandırılmıştır. Seçenek2’de ise bu iki duruma nazaran daha kötü bir durum tercih edilerek sargıdaki asimetrisinin ve dengelesizliğin motor performansı üzerinde yarattığı etkiler incelenmiştir.

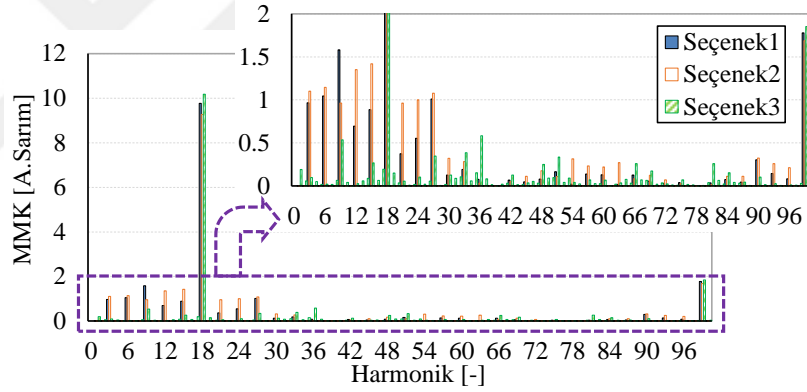
Şekil 2.48’den görüldüğü gibi Seçenek1 ve Seçenek2’de 3-faz sargı setleri aynı fazdadır. Ayrıca Seçenek1 için fazlar arasındaki açı  $\alpha=119,36^\circ$  ve  $\beta=120,32^\circ$  iken, Seçenek2 için  $\alpha=116,04^\circ$  ve  $\beta=127,22^\circ$  değerlerine sahiptir. Seçenek3 için ise 3-faz sargı setleri birbirlerine göre  $\theta=27,69^\circ$  faz farkı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bunun yanında, fazlar arasındaki açılar  $\alpha=120,01^\circ$  ve  $\beta=119,98^\circ$  değerlerine sahiptir. Bu üç farklı seçenekte sarım sayısı ve akım aynı alınarak sargıların hava aralığında oluşturduğu MMK dağılımları incelenmiştir (Şekil 2.49). Şekil 2.50’de ise MMK dağılımların harmonik içerikleri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi 36-kutuplu 9-faz DSY’ne sahip motorlardan en yüksek MMK temel harmoniğine (10,18 Amper x sarım) ve en düşük THB yüzdesine (%22,2) sahip olan Seçenek3’tür. Üç sargı seçeneği için de temel harmonik, kutup sayısının yarısı olan 18. harmonikte meydana gelmektedir. 36-kutuplu motor için yüksek dereceden diğer harmonikler  $18k$  (burada  $k=3, 5, 7, \dots$ ) derecelerinde oluşur. 18. harmonikten daha düşük olan alt-harmonikler



Şekil 2.48. 9-faz dengelesiz sargı yapısına sahip 117-oluk 36-kutuplu motorun sargı dağılımları için farklı seçenekler: (a) Seçenek1, (b) Seçenek2 ve (c) Seçenek3 (tüm seçenekler için sadece ilk 3-faz sargı seti gösterilmiştir)



Şekil 2.49. (a) Seçenek1, (b) Seçenek2 ve (c) Seçenek3 sargı konfigürasyonuna sahip 36-kutuplu SM motorun toplam MMK dağılımları

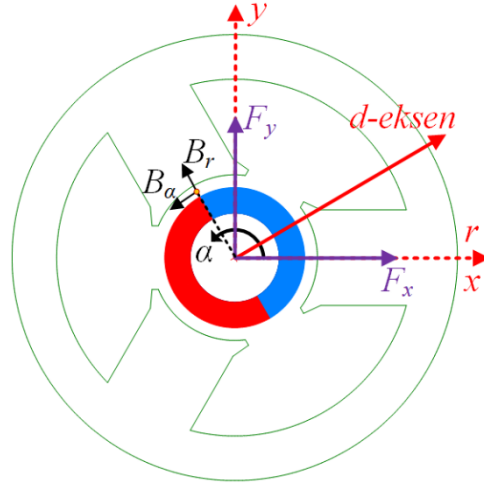


Şekil 2.50. 36-kutuplu SM motorun üç farklı sargı konfigürasyonu için MMK harmoniklerinin karşılaştırılması

motorda kayba yol açan istenmeyen harmoniklerdir. 18'in üzerindeki harmoniklerden bazıları ise moment üretimine katkı yaparken bazıları da ekstra demir kayıplarına yol açar.

### 2.3.5. 3-Faz dengeli ve 9-faz dengesiz sargılı SM motorların DMÇK karşılaştırması

SMSM'lerde stator ve rotor arasındaki etkileşimden dolayı radyal ve teğetsel kuvvetler oluşur. Rotora etkiyen bu kuvvetler rotor eksen kaçıklığı gibi mekanik kaynaklı problemler veya stator sargılarında herhangi bir hata durumunda (açık veya kısa devre



Şekil 2.51. DMÇK hesaplamasında referans alınan yönler

gibi) ortaya çıkabilmektedir [205-207]. Herhangi bir mekanik problem ya da hata problemi bulunmuyorsa ve sargılar simetrik bir şekilde yerleşiyorsa rotora etkileyen net kuvvet sıfır olacaktır. Bununla birlikte bazı kesir-oluklu kombinasyonlarda sargıların dağılımı simetrik bir yapıya sahip değildir. Bu da DMÇK kaynağı olan, akı yoğunluğu dağılımında asimetriye yol açar. DMÇK, sargıların asimetrik bir dağılıma sahip olduğu oluk-kutup kombinasyonlarında meydana gelir ve bu kuvvet sürekli olarak rotora etkir. SMSM'lerde DMÇK'nin oluştuğu durumlarda rotorda oluşan bu kuvvet doğrudan rulmanlara iletileceği ve zarar vereceği için rulmanların ömrünü azaltır. Bunun yanında, bu kuvvetin varlığı duyulabilir gürültüye ve titreşime de neden olabilir [208, 209].

DMÇK hem analitik olarak hem de sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilir. Radyal ve teğetsel akı yoğunlukları,  $B_r$  ve  $B_\alpha$ , bir sonlu elemanlar analizi yazılımı ile elde edilebilir. Maxwell gerilme tensörüne göre, radyal ve teğetsel gerilmeler ise bu akı yoğunluğu bileşenleri kullanılarak şu şekilde hesaplanabilir [206, 210]:

$$\sigma = \frac{B_r^2 - B_\alpha^2}{2\mu_0} \quad (2.18)$$

$$\tau = \frac{B_r B_\alpha}{\mu_0} \quad (2.19)$$

Burada  $\mu_0$  havanın geçirgenliğini simgelemektedir. Ayrıca referans olarak alınan  $B_r$  ve  $B_\alpha$  yönleri Şekil 2.51’de gösterilmiştir. Burada radyal gerilme,  $\sigma$ ,  $B_r$  ile, teğetsel gerilme,  $\tau$  ise  $B_\alpha$  ile aynı yöndedir. DMÇK’nin x ve y bileşenleri bu hareket gerilmeleri ile hesaplanabilir:  $F_x = F_{rx} + F_{\alpha x}$  ve  $F_y = F_{ry} + F_{\alpha y}$ . Burada  $F_{rx}$  ve  $F_{ry}$  radyal hareket gerilmelerinden ( $F_r$ ) kaynaklanan DMÇK’nin x/y bileşenlerini,  $F_{\alpha x}$  ve  $F_{\alpha y}$  ise teğetsel hareket gerilmelerinden ( $F_\alpha$ ) kaynaklanan DMÇK’nin x/y bileşenlerini ifade etmektedir. Böylece, DMÇK’ne ait tüm kuvvet bileşenleri aşağıdaki eşitlikler yardımı ile hesaplanabilir:

$$F_{rx} = \frac{rl_a}{2\mu_0} \int_0^{2\pi} (B_r^2 - B_\alpha^2) \cos(\alpha) d\alpha \quad (2.20)$$

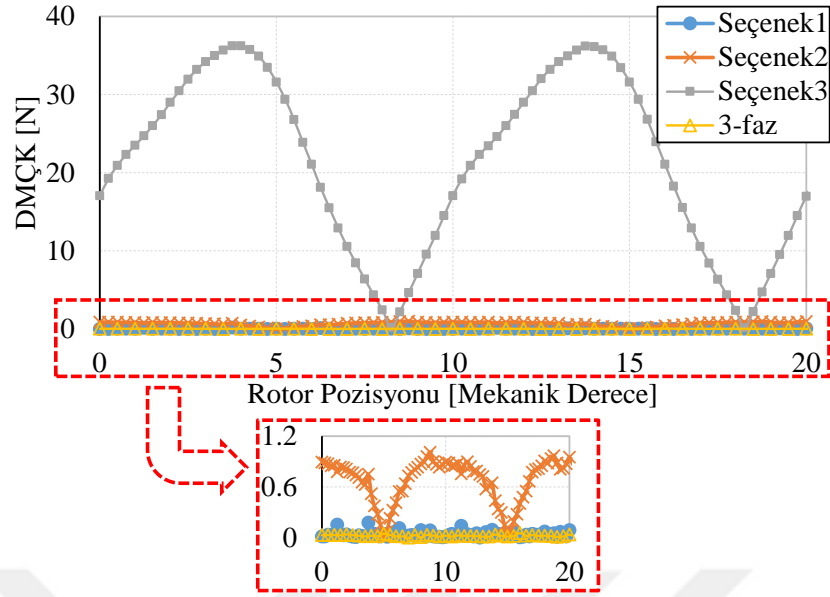
$$F_{ry} = \frac{rl_a}{2\mu_0} \int_0^{2\pi} (B_r^2 - B_\alpha^2) \sin(\alpha) d\alpha \quad (2.21)$$

$$F_{\alpha y} = -\frac{rl_a}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_r B_\alpha \sin(\alpha) d\alpha \quad (2.22)$$

$$F_{\alpha x} = \frac{rl_a}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_r B_\alpha \cos(\alpha) d\alpha \quad (2.23)$$

Burada  $r$ ,  $B_r$  ve  $B_\alpha$  akı yoğunluklarının hesaplandığı radyal pozisyonu,  $\alpha$  rotor pozisyonunu ve  $l_a$  ise aktif malzemenin aksel uzunluğunu simgelemektedir. DMÇK hesaplamasında referans alınan tüm yönler Şekil 2.51’de gösterilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan SM motorlarda, sargıların neden olduğu DMÇK’leri SEA ile hesaplanmış ve dengesizlik miktarının ve stator sargılarının yerleşiminin bu kuvvet değişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 2.52’de 3-faz dengeli ve 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip motorların dengesiz çekme kuvvetlerinin karşılaştırması gösterilmiştir. Görüldüğü gibi hem 3-faz hem de 9-faz Seçenek1 ve Seçenek2 sargı yapılarının oluşturduğu dengesiz manyetik çekme kuvveti oldukça düşük seviyelerdedir. Seçenek2 sargı yapısında, fazlar arasındaki dengesizlik miktarının Seçenek1’e göre daha yüksek olduğu da elde edilen bu değişimden görülmektedir.



Şekil 2.52. 3-faz dengeli ve 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip motorların dengesiz çekme kuvvetlerinin karşılaştırması

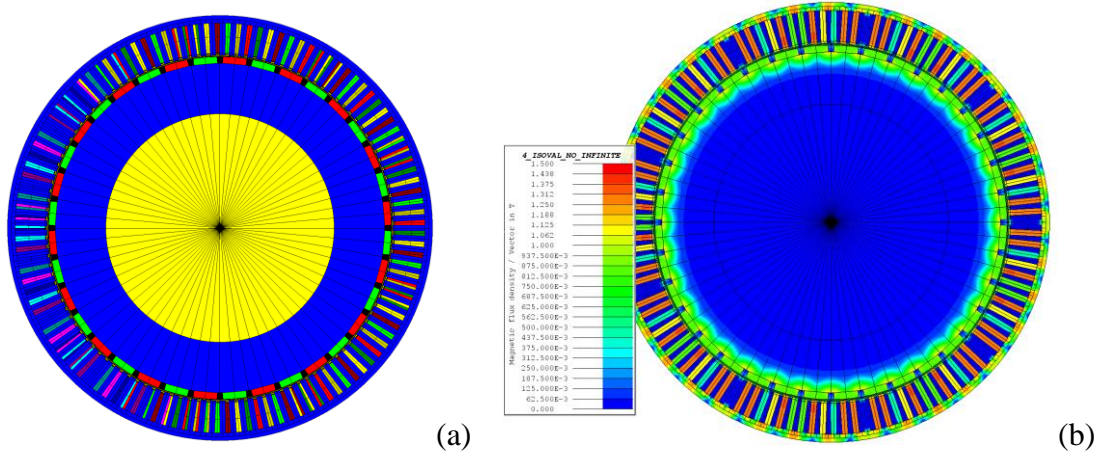
Seenek3’de ise stator sargıları simetrik bir şekilde yerleştirilemediği için bir asimetri söz konusudur ve en yüksek kuvvet değerleri bu sargı seçeneğinde ortaya çıkmaktadır. Seenek3’de elde edilen DMÇK’nin ortalama değeri 21,1 N seviyelerindedir.

### 2.3.6. 117-Oluk 36-kutuplu DSY’ne sahip motorların SEA

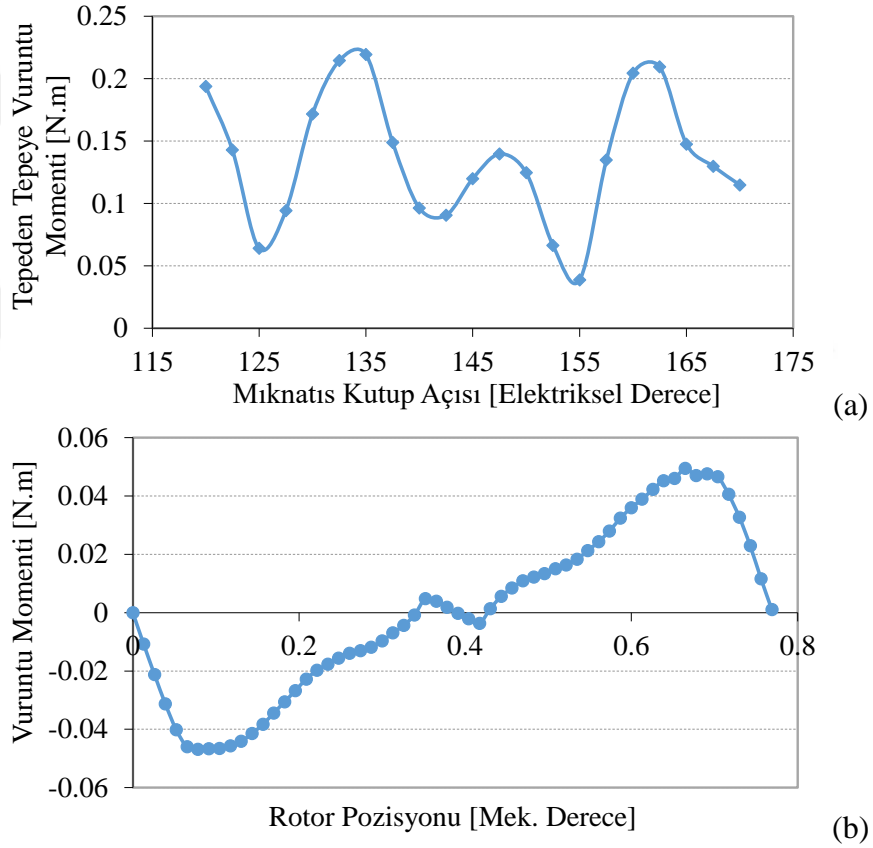
Bu bölümde, 117-oluk 36-kutuplu DSY motorların (Şekil 2.48) ayrıntılı elektromanyetik sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek motor performans verileri yüksüz ve yüklü durumlar için elde edilmiştir. 36-kutuplu motor tasarımı Tablo 2.13’de verilen teknik özellikler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Motor SEA modeli Şekil 2.53(a)’da, yüksüz durumdaki akı yoğunluklarının değişimleri ise Şekil 2.53(b)’de gösterilmiştir. Maksimum akı yoğunluğu stator dişlerinde 1,32 T olarak elde edilmiştir. Bunun yanında, 36-kutuplu motorun yüksüz durumda vuru mu moment

Tablo 2.13. 117-oluk 36-kutuplu motorun teknik özellikleri

Faz sayısı	9
DC bara gerilimi (V)	300
Anma akımı ( $A_{max}$ )	32
Anma momenti (N.m)	100
İzin verilen max. stator dış çapı (mm)	370
İzin verilen max. motor uzunluğu (mm)	45



Şekil 2.53. (a) 117-oluk 36-kutuplu motor SEA modeli ve (b) motorun yüksüz durum akı yoğunluklarının değişimi (göstergede max. değer olarak 1.5T alındı)

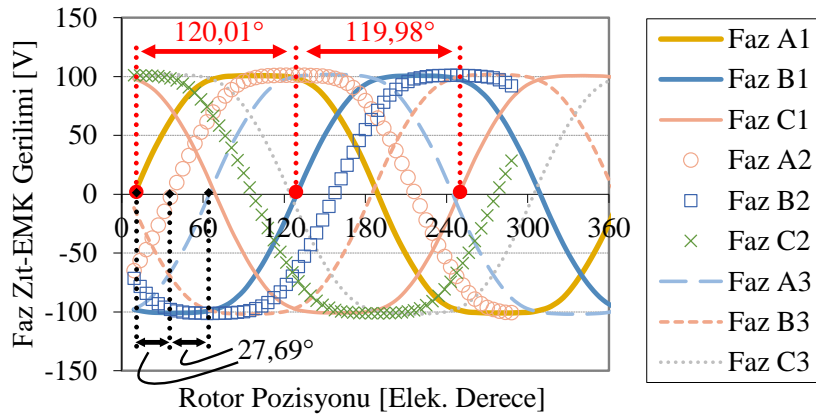
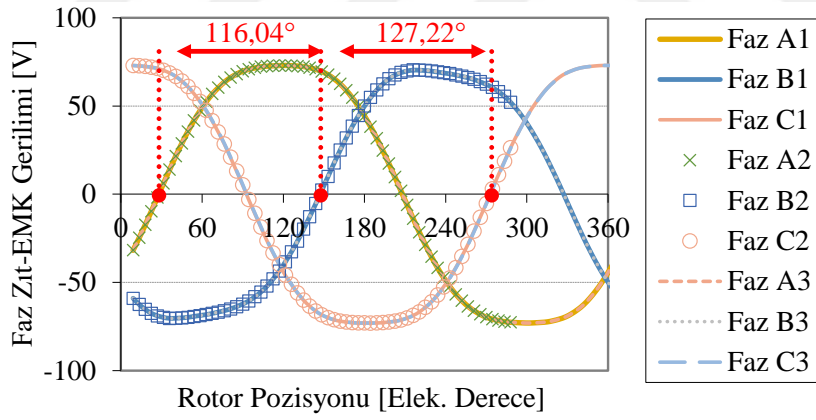
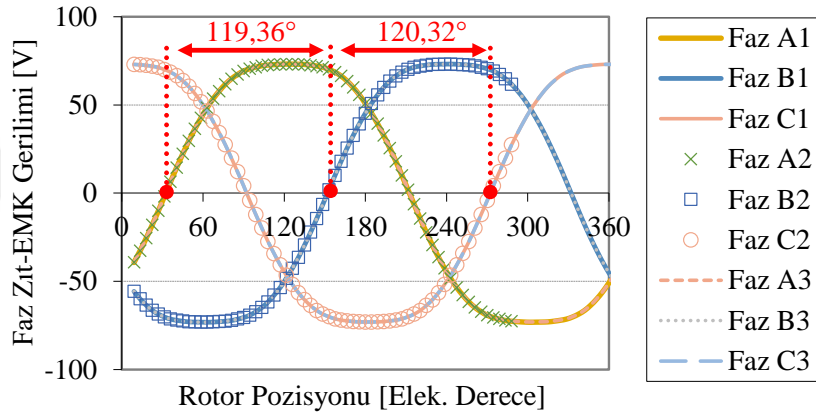


Şekil 2.54. (a) Mıknatıs kutup açısının bir fonksiyonu olarak tepeden tepeye vuruntu momenti değişimi ve (b) seçilen mıknatıs kutup açısı için elde edilen vuruntu momenti değişimi

değişimi elde edilmiştir (Şekil 2.54). Şekil 2.54(a)'dan da görüldüğü gibi seçilen oluk-kutup kombinasyonu sayesinde motorun vuruntu momenti değişimi çok düşük seviyededir, hatta farklı mıknatıs kutup açıları için bile elde edilen vuruntu momenti

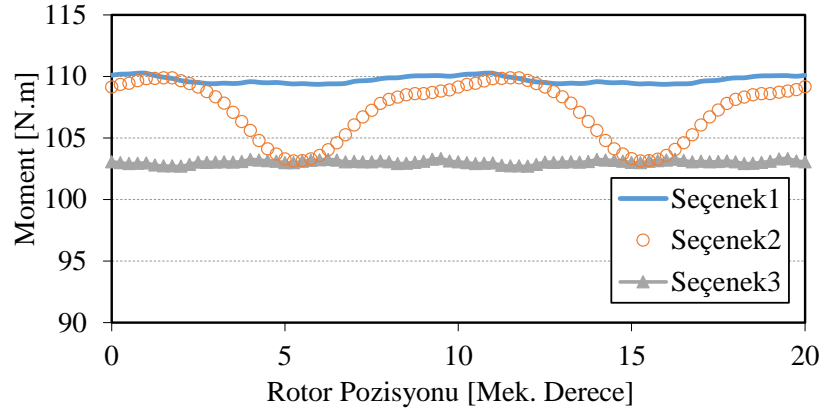
değerleri ortalama momente göre %1'in altında kalmaktadır. Bu da seçilen oluk-kutup kombinasyonunun sahip olduğu en önemli avantajlardandır.

Bununla birlikte, 9-faza sahip tüm sargı seçenekleri için zıt-EMK faz gerilimleri 1000 rpm rotor hızında elde edilmiştir (Şekil 2.55). Şekilden de görüldüğü gibi Seçenek1 ve Seçenek2'de stator sargıları aynı fazdadır. Bununla birlikte, Seçenek3'de ise fazlar arasında Şekil 2.48(c)'de belirtildiği gibi 27,69 elektriksel derecelik faz farkı mevcuttur. Bu veriler ışığında, tasarlanan sargı yapıları için elde edilen gerilim dalga



Şekil 2.55. 117-oluk 36-kutuplu motorun farklı sargı konfigürasyonları için faz gerilimi değişimleri (1000 rpm rotor hızında elde edilmiştir)





Şekil 2.56. Üç farklı sargı seçeneğine sahip 9-faz 117-oluk 36-kutuplu motorun çıkış momenti değişimlerinin karşılaştırılması (32  $A_{max}$  faz akımında elde edilmiştir)

şekilleri arası farkı değerleri ile tasarımda belirlenen değerlerin uyumlu olduğu görülmektedir.

Son olarak, her üç sargı seçeneğine sahip 9-faz DSY'ne sahip motorların moment çıkışları, Seçenek1 ve Seçenek2 için aynı akım değerinde (32  $A_{max}$ ), Seçenek3 için ise farklı akım değerinde (28,9  $A_{max}$ ) elde edilmiştir (Şekil 2.56). Seçenek3'de motora uygulanan akımın farklı olmasının sebebi faz başına düşen bobin sayısının Seçenek3'de daha yüksek olmasıdır. Bir başka deyişle, Seçenek3'de faz başına 18 bobin, Seçenek1 ve Seçenek2'de ise faz başına 13 bobin olduğu için motorların toplam Amper x sarım değerleri aynı tutulacak şekilde tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, Seçenek1'de elde edilen ortalama moment değerleri karşılaştırıldığında Seçenek2 ve Seçenek3'e göre sırasıyla %2,3 ve %6,5 seviyelerinde daha fazla ortalama moment elde edilebildiği görülmektedir. Ayrıca 9-faz sargı seçenekleri incelediğinde moment dalgalanması oldukça düşük olan dalga değişimleri elde edilmiştir. Seneçek1 ve Seçenek3 için elde edilen moment dalgalanması ortalama momente göre %1'in altında iken, dengesizlik miktarının yüksek olduğu Seçenek2'de ise bu değer %6,3 seviyelerindedir.

### 2.3.7. 3-Faz dengeli ve 9-faz DSY SM motorların performans karşılaştırması

Bu bölümde, 9-faz dengesiz sargı yapısına ve farklı sargı konfigürasyonlarına sahip sürekli mıknatıslı motorların performans sonuçları ile Şekil 2.45(a)'da gösterilen 3-faz dengeli sargı yapısına sahip motorun performans sonuçları karşılaştırılmıştır. Adil bir karşılaştırma yapabilmek adına motorların stator dış çapları aynı tutulmuş, sadece

sargı şemaları değiştirilmiştir. Bunun yanında, 9-faz DSY'ne sahip motorların akım x sarım sayısı x faz başına bobin sayısı çarpımı yaklaşık olarak aynı alınmıştır. 3-faz dengeli sargı yapısına sahip motorun sarım sayısı ise Seçenek1 ve Seçenek2 ile aynı tutulmuştur. Bununla beraber, 9-faz sargı seçeneklerinde elde edilen ortalama moment çıkışına yakın değerleri elde etmek için 3-faz motorun faz akımı %25 artırılmıştır. Bu karşılaştırmada dikkate alınan tüm motorların mıknatıs miktarı yaklaşık olarak aynı tutulmuştur. Tablo 2.14'de 3-faz dengeli ve 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip motorların anma momenti, moment kalitesi, motorda oluşan kayıp bileşenleri, ağırlık bilgileri gibi performans karşılaştırması özetlenmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi 9-faz sargı yapısına sahip Seçenek2'de stator sargılarında dengesizlik miktarının yüksek olması sebebiyle motor performansı diğer motorlara göre düşmektedir. Bununla birlikte, Seçenek1'de ortalama moment Seçenek3'e göre %6,5 daha yüksek olmasına rağmen bakır kaybı %19,4 daha fazladır. Moment dalgalanması en düşük olan motor ise %0,6'lık değer ile Seçenek3'tür. Bunun yanında, DSY'ne sahip 9-faz motorlar arasında en düşük DMÇK'ne sahip olan motorun Seçenek1 olduğu görülmektedir. Motorların performans verileri incelenerek ortalama moment, DMÇK, toplam kayıp

Tablo 2.14. 3-faz dengeli ve 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip motorların performans karşılaştırması

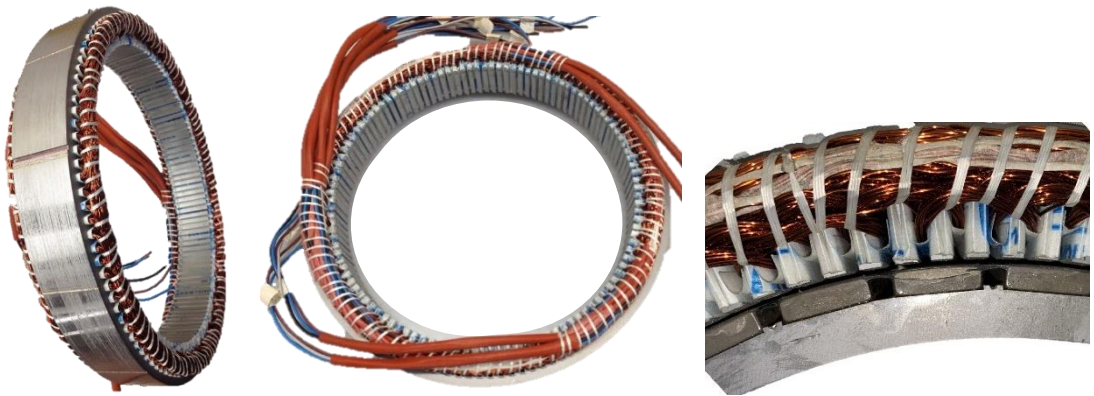
	3-Faz (12-kutup)	Seçenek1 (36-kutup)	Seçenek2 (36-kutup)	Seçenek3 (36-kutup)
DC bara gerilimi (V)	300			
Faz başına akım (A)	40	32		28,9
Sarım sayısı	5			4
Doluluk faktörü (%)	41,8	40,4		43,7
Maksimum vuru momenti (N.m)	0,05	0,09		
Anma momenti (N.m)	105	109,7	107,2	103
Anma hızı (rpm)	880	1250	1310	810
Moment dalgalanması (%)	2,7	0,82	6,3	0,6
Hat zıt-EMK gerilimi için THB (%)	0,99	0,15	1,34	0,47
DMÇK (N)	0,03	0,04	0,68	21,2
Bakır kayıpları (W)	684,8	250	250	209,3
Faz direnci (mOhm)	285,3	54,2		55,7
Demir kayıpları (W)	74,4	325	356,8	339,9
Mıknatıs ağırlığı (kg)	1,43			
Moment ağırlık oranı (N.m/kg)	3,6	5,0	4,9	4,7

gibi veriler karşılaştırıldığında performans kalitesi en yüksek olan yapının 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip olan ve sargıların gruplandırıldığı Seçenek1 olduğu söylenebilir.

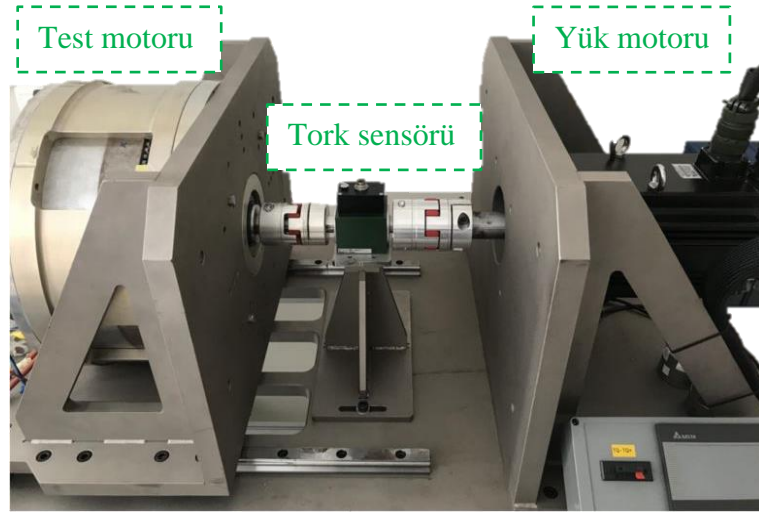
### 2.3.8. 9-Faz DSY'ne sahip motorların test sonuçları ile SEA sonuçlarının karşılaştırılması

9-faz DSY'ne sahip yüzey sürekli mıknatıslı senkron motorun prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Motorun stator, stator sargıları ve rotor yapılarına ait üretim görselleri Şekil 2.57'de verilmiştir. Prototip motorun, Şekil 2.58'de verilen test düzeneği ile yüksüz ve yüklü durum testleri gerçekleştirilerek performans sonuçları elde edilmiştir. Motor test sistemi; yük motoru ve sürücüsü, test edilen motor ve üç tane eş 3-faz eviriciden oluşan sürücüsü ve yüklü durumda motor momentini ölçebilmek için kullanılan bir moment sensöründen oluşmaktadır. 9-faz motorların vuruğu momenti ve zıt-EMK gerilimleri gibi yüksüz durum testleri gerçekleştirilmiştir. Yüklü durum testlerinde ise motorların farklı akım değerleri için moment çıkışları elde edilerek moment sabiti hesaplanmıştır. Ayrıca moment-hız karakteristikleri elde edilmiştir.

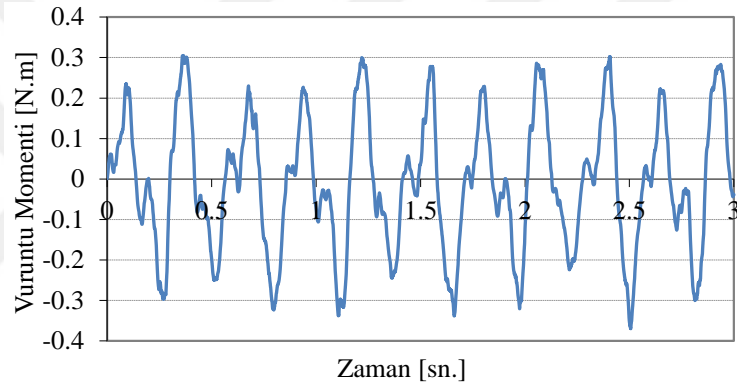
DSY'ne sahip 9- faz motorun sargıları enerjilendirilmeden yük motoru tarafından 1 rpm rotor hızında tahrik edilmiş ve motorun vuruğu momenti değişimi elde edilmiştir (Şekil 2.59). Motor vuruğu momenti değişimi, sargıların dağılımı ya da yerleşiminden bağımsız olduğu için tüm sargı alternatifleri için bu değişim ve moment seviyesi elde edilecektir. Tüm sargı seçenekleri için vuruğu momenti tepe değerinin ortalama momente oranı kullanılan dengesiz ve asimetrik sargı yapısı-kutup sayısı seçeneği



Şekil 2.57. 9-faz yüzey mıknatıslı motor prototip üretim görselleri



Şekil 2.58. Motor test düzeneği

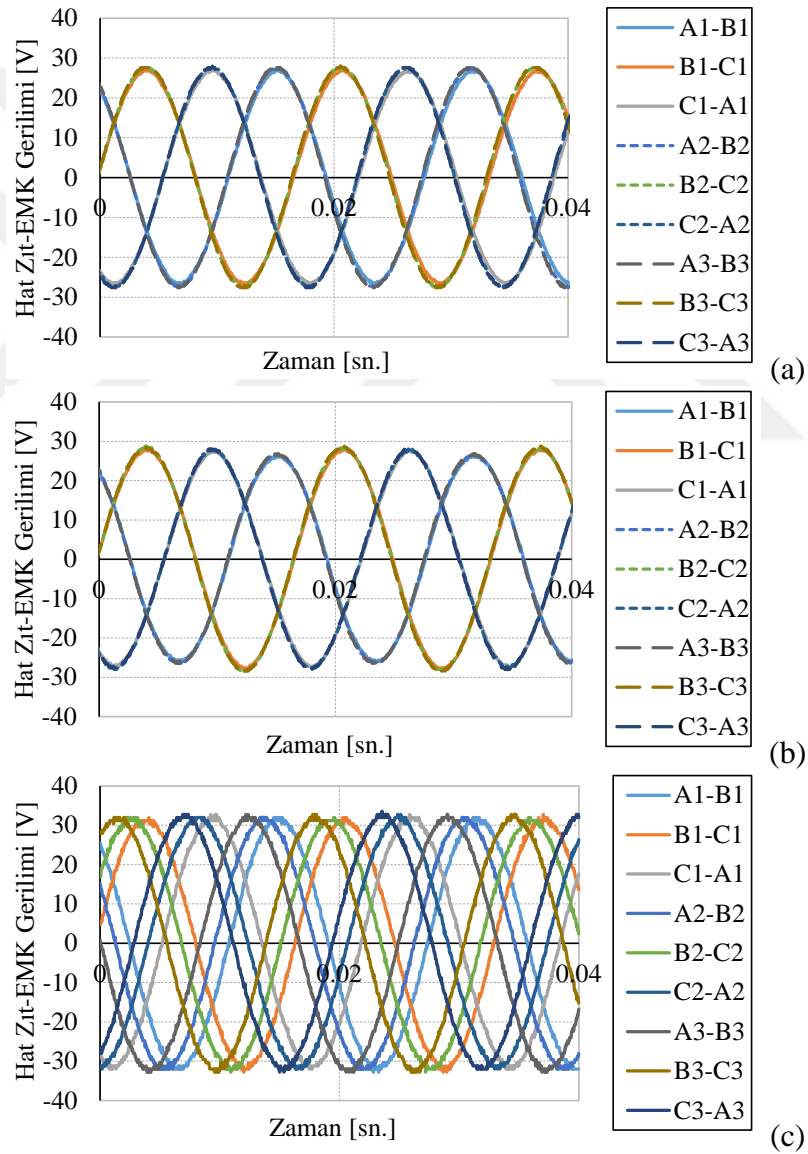


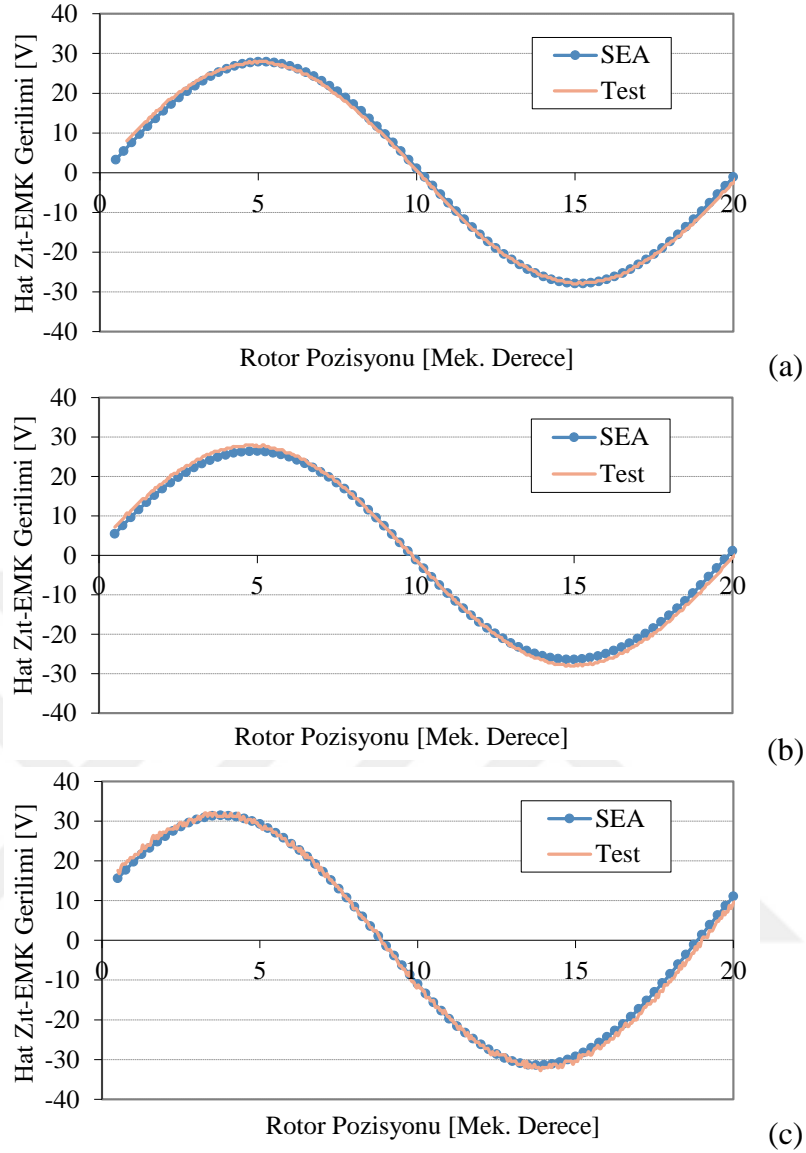
Şekil 2.59. 117-oluk 36-kutuplu 9-faz motorun vuruğu momenti değışimi

nedeniyle %1'in çok altındadır. Bu değeri, özellikle elektrikli araç uygulamaları başta olmak üzere birçok uygulama için kabul edilebilir hatta düşük bir seviyedir. Seçenek1, Seçenek2 ve Seçenek3 için test sonucu 200 rpm rotor hızında elde edilen hat gerilimlerinin değışimi 9-faz için Şekil 2.60'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi Seçenek1 ve Seçenek2 için 3-faz sargı setleri aynı fazdadır. Seçenek2'de fazlar arasındaki dengesizlik miktarı diğer seçeneklere nazaran daha yüksek olduğu için gerilim tepe değeri arasında da bir farklılık görülmektedir. Ayrıca Seçenek3 için elde edilen zıt-EMK gerilim dalga şeklinden görüldüğü gibi 3-faz sargı setleri arasındaki faz farkı, beklenildiği gibi, 27,69 elektrikselle derece olarak elde edilmiştir. Şekil 2.61'de ise tüm sargı seçenekleri için elde edilen zıt-EMK hat gerilimi test sonuçları ile SEA sonuçları karşılaştırılmıştır. İncelenen üç sargı seçeneği için de elde edilen SEA sonuçları ile deneysel sonuçların oldukça uyumlu olduğu söylenebilir.

Benzetim ve test sonucu elde edilen gerilimlerin RMS değerleri karşılaştırıldığında Seenek1 için %0,74, Seenek2 için %5,6 ve son olarak Seenek3 için %2,77 hata ile analiz sonuçlarının doğrulandığı grlmştr.

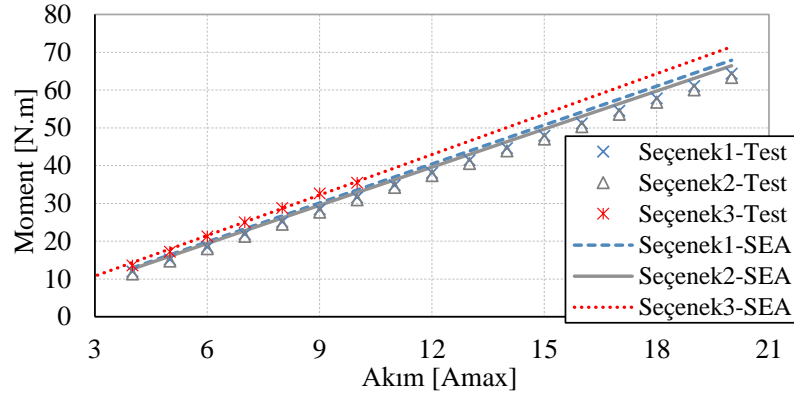
Tüm sargı alternatifleri için motorların yüklü durum testleri gerçekleştirilmiştir. Sabit bir rotor hızında 9-faz DSY'ne sahip motorların moment-akım ilişkileri elde edilmiştir. Şekil 2.62'de 9-faz motorların deneysel ve SEA sonucunda elde edilen moment-akım ilişkileri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi test ve benzetim sonuçları uyum içerisinde dir. Seenek1, Seenek2 ve Seenek3 için deneysel olarak elde edilen



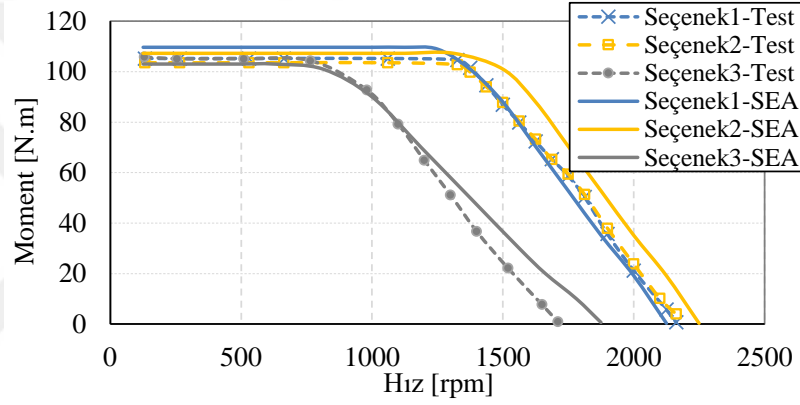


Şekil 2.61. (a) Seçenek1, (b) Seçenek2 ve (c) Seçenek3 için test ve SEA sonucu elde edilen hat gerilimi değişimlerinin karşılaştırması (200 rpm rotor hızında elde edilmiştir)

moment sabiti ile SEA sonucu elde edilen sonuçlar arasında %8'in altında bir hata görülmüştür. Bunun yanında, 9-faz motorun tüm sargı seçenekleri için her bir motorun anma akımında ve farklı hızlarda yüklü durum testleri gerçekleştirilerek, DSY'ne sahip motorların moment-hız karakteristikleri elde edilmiştir (Şekil 2.63). Bu test ve analizler sırasında motorlara alan zayıflatma kontrolü uygulanmamıştır. Şekilden de görüldüğü gibi analiz sonuçları test sonuçları ile oldukça uyumludur.



Şekil 2.62. (a) Seçenek1 ve (b) Seçenek2 için test ve SEA sonucu elde edilen moment-akım eğrilerinin karşılaştırması (200 rpm rotor hızında elde edilmiştir)



Şekil 2.63. 9-faz DSY motorların test ve SEA sonucu elde edilen moment-hız eğrilerinin karşılaştırması (300 Vdc bara gerilimi için elde edilmiştir)

## 2.4. Özet

Bu bölümde, sürekli mıknatıslı senkron motorlar için kullanılan sargı terminolojisi açıklanmış ve 3-faz DSY'ne sahip farklı oluk-kutup seçenekleri incelenerek sargı şemasının nasıl çıkarıldığı 12-kutuplu bir seçenek üzerinden detaylandırılmıştır. Buna ek olarak, 3-faz dengeli ve dengesiz sargı yapısına sahip SM motorların performansları karşılaştırılmıştır. Bunun yanında, dengesiz sargılı çift 3-faza sahip 6- ve üç tane 3-faza sahip 9-faz motorların sargı setleri arasındaki açılar, sargı alternatiflerinin ve yerleşimlerinin motor performansı üzerine etkileri incelenmiştir.

### 3. YENİ BİR 9-FAZ DAHİLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR TOPOLOJİSİ

Günümüzde, elektrikli ve hibrit güç aktarma sistemlerine olan istek gittikçe artmaktadır. Bu tür uygulamaların en büyük isteri ise düşük maliyet ile düzgün bir moment çıkışı elde etmektir. Motor düzgün bir moment çıkışı sağlayamazsa, moment çıkışındaki dalgalanmayı ortadan kaldırmak ve motor performansını artırmak için tasarım sürecinde ekstra önlemler alınması gerekmektedir. Bu önlemlerden en bilineni rotor ya da statora kaykı uygulanmasıdır. Fakat üretim sırasında bu tür bir yöntemin uygulanması üretim maliyetlerini de artırmakta hatta bazı durumlarda üretimi karmaşık bir hale getirmektedir. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, DSY üreten bazı oluk-kutup seçenekleri, motor performansı açısından avantajlara sahip olduğu için yüksek performans gerektiren bu tür uygulamalar için alternatif bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. DSY üreten oluk-kutup kombinasyonları, birçok uygulama için çoğunlukla kaykı ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Bununla beraber, bu motorların en önemli dezavantajı sargı yapılarının tasarlanma güçlüğüdür. Çünkü ticari hiçbir yazılım dengesiz sargılı motorların sargı şemasının otomatik olarak oluşturulmasına izin vermez. Bu nedenle tasarımcı kendi sargı yapısını tasarlayıp oluşturmak zorundadır.

Yüzey sürekli mıknatıslı (YSM) senkron motorlar yapılarının basit ve üretim maliyetlerinin diğer SM motorlara göre düşük olmaları sayesinde, düşük ve yüksek güç gerektiren birçok uygulamada sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak, bu motorların alan zayıflatma kapasitesi oldukça zayıftır. Özellikle, uygulama bir elektrikli taşıt için ise YSM motorlar genellikle tercih edilmezler. Bununla birlikte, gömülü sürekli mıknatıslı (GSM) motorlara gelince, alan zayıflatma kapasiteleri YSM motorlara göre daha gelişmiş olduğu için elektrikli taşıt uygulamalarında daha geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Bu bölümde, tez kapsamında önerilen motor yapısı ve çalışma prensibi açıklanmış, motor tasarım sürecinde izlenen yol ve aşamaların detayları verilmiş, tasarımı yapılan

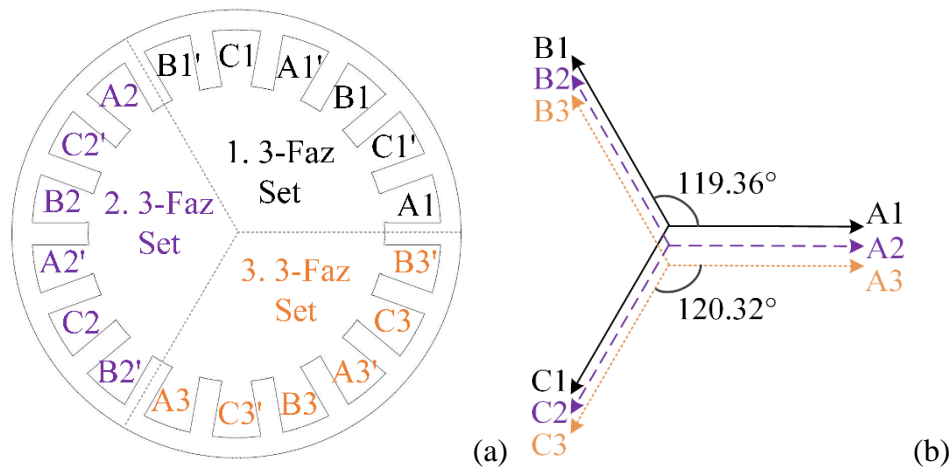


9-faz DSY'ne sahip motorun teknik özellikleri verilerek motor ön tasarımı gerçekleştirilmiştir.

### 3.1. Önerilen Motor ve GSM Rotor Yapısı

Tez çalışması kapsamında önerilen motor topolojisi için literatürde daha önce incelenmemiş ve önerilmemiş standart dışı rotor ve stator yapıları kullanılmıştır. Önerilen bu motor topolojisinde tercih edilen oluk-kutup kombinasyonunun vuruğu momentini ortadan kaldırması, zıt-EMK gerilimlerinin sinüzoidal dalga şekline sahip olması gibi belirli avantajları mevcuttur. Fakat böyle bir kombinasyonun kullanılması motorun stator sargı şemasının bilinen yöntemlerle veya ticari yazılımlarla elde edilmesini olanaksız kılmaktadır. Bu nedenle, çalışma kapsamında seçilen oluk-kutup kombinasyonu için de yeni bir stator sargı yapısı oluşturulmuştur.

Bölüm 2.3'de 9-faz DSY'ne sahip YSM motorlar için sargı yerleşiminin, fazlar arasındaki dengesizliğin ve sargı setleri arasındaki açının motor performansına etkisi incelenmiştir. İncelenen sargı yapıları arasında performans açısından ön plana çıkan alternatif; sargı yerleşiminin getirdiği avantajlar ve minimum dengesizlik miktarı ile Seçenek1'di. Dolayısıyla, bu bölümde önerilen GSM 9-faz motor için de Seçenek1'de verilen sargı yapısı kullanılmıştır. Şekil 3.1'de önerilen SMSM için 9-faz stator sargılarının temsili yerleşimi, fazlar ve 3-faz sargı setleri arasındaki açılar gösterilmiştir. Şekil 3.1(a)'dan görüldüğü gibi 3-faz sargı setleri statorun üçte birlik bölümüne konumlandırılmıştır. 9-faz YSM motorda olduğu gibi statorda 117-oluk,

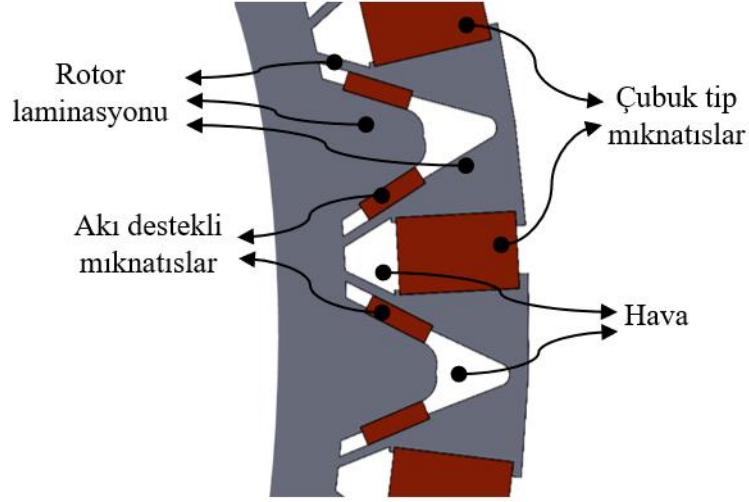


Şekil 3.1. Önerilen SMSM'de (a) 9-faz sargıların temsili yerleşiminin ve (b) fazlar ve 3-faz sargı setleri arasındaki açılar gösterimi

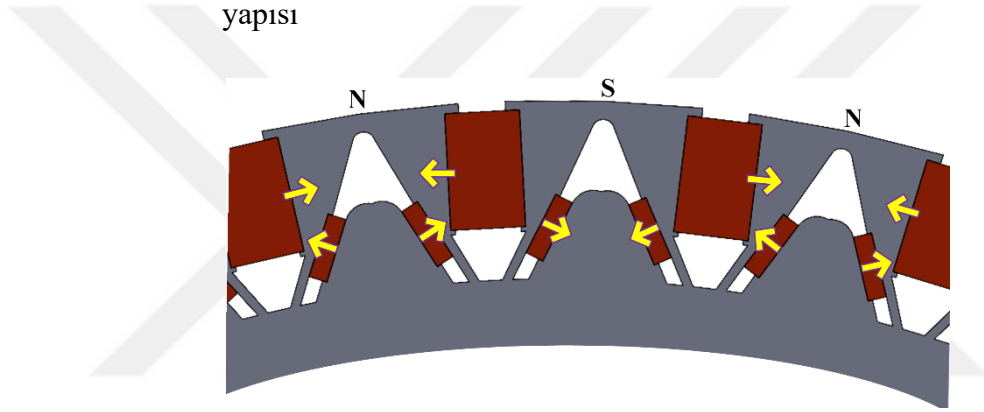
rotorda ise 36-kutup tercih edilerek DSY'ne sahip motorun oluk-kutup kombinasyonu değiştirilmemiştir. Şekil 3.1(b)'de ise stator fazlarında dengesizlik olduğu ve fazlar arasındaki faz farkının 120 elektriksel dereceden farklı olduğu görülmektedir. Bunun yanında, 3-faz sargı setleri birbirleri ile aynı fazdadır. Burada, A1-B1-C1 ilk 3-faz sargı setini, A2-B2-C2 ve A3-B3-C3 ise ikinci ve üçüncü 3-faz sargı setlerini göstermektedir. A1-B1 fazları arasındaki faz farkı 119,36 elektriksel derece iken A1-C1 fazları arasındaki faz farkı 120,32 elektriksel derece olarak elde edilmiştir.

9-faz motorun rotoru için ise gömülü sürekli mıknatıslı çubuk tip bir rotor yapısı kullanılmıştır. Harmonik içeriği yüksek olan zıt-EMK gerilimlerinin elde edilmesi klasik GSM motorların en büyük sorunudur. Çubuk tip GSM (ÇTGSM) rotor yapılarının standart GSM rotora göre en önemli avantajlarından biri hava aralığında değişken relüktans yaratılmasından dolayı sinüzoidal bir zıt-EMK geriliminin elde edilebilmesidir. Ayrıca ÇTGSM motorların bir diğer avantajı da özellikle alan zayıflatma bölgesinde GSM motorlarda ortaya çıkan en büyük problem olan demanyetizasyon riskini büyük oranda azaltabilmesidir. Bununla birlikte, ÇTGSM motorların en önemli dezavantajı ise üretimlerinin zor ve maliyetli olmasıdır. Bu çalışmada, standart bir çubuk tip rotor topolojisi kullanılmamış, çubuk tip mıknatısların altındaki rotor laminasyonu rotor iç çapına doğru genişletilerek hava aralığından geçen akı miktarını artırabilmek için akı destekleyici mıknatıslar kullanılmıştır.

Şekil 3.2'de önerilen akı destekli çubuk tip gömülü sürekli mıknatıslı (AD-ÇTGSM) rotor yapısı gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi çubuk tip mıknatıslar rotor laminasyonları arasına yerleştirilmekte, akı destekleyici mıknatıslar ise çubuk tip mıknatısların arasında yer alan laminasyon arasındaki yuvalara yerleştirilmektedir. Burada akı destekleyici mıknatısların en önemli görevi çubuk tip mıknatısların alt kısımlarındaki kaçak akıların önüne geçilmesi ve bu akının hava aralığına yönlendirilmesinin sağlanmasıdır. Bununla birlikte, akı destekleyici mıknatısların akı yollarının rotor üzerinde devamının sağlanabilmesi için ince laminasyon köprüleri kullanılmıştır. Motorda toplam 36-kutup bulunduğu için 36 adet çubuk tip, 72 adet de akı destekleyici mıknatıs kullanılmıştır. Bu mıknatısların akı yönleri ise Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi mıknatıs kutupları, çubuk tip mıknatısların arasındaki laminasyonlar üzerinde kuzey ve güney kutuplarını oluşturmaktadır.



Şekil 3.2. Önerilen akı destekli gömülü mıknatıslı rotor yapısı



Şekil 3.3. Tez kapsamında önerilen gömülü mıknatıslı senkron motorun rotor yapısında mıknatıs akı yönlerinin gösterimi

### 3.2. 9-Faz Senkron Motor Tasarım Süreci

Elektrik motor tasarım süreci birden fazla disiplini bir arada barındıran, karmaşık adımlardan oluşan ve her adımı ciddi bir bilgi ve tecrübe gerektiren süreçlerden meydana gelmektedir. 9-faz motor tasarım süreci temelde elektromanyetik, yapısal/mekanik ve ısı olmak üzere üç ana aşamadan oluşur. Şekil 3.4’de 9-faz SMSM tasarım sürecinde izlenen temel adımlar bir akış diyagramı olarak gösterilmiştir. Bu bölümde, motor tasarım sürecinin ve bu akış diyagramının detayları açıklanmıştır.

Motor tasarım sürecine uygulamanın isterleri belirlenerek başlanır. Bu aşamada, motorun moment, hız, güç gibi performans kriterlerinin yanında maruz kalacağı yükler, çalışma ortamı ve sıcaklığı, çalışma çevrimi gibi isterler de büyük önem arz etmektedir. Motor tasarımcısı bu teknik kriterler doğrultusunda çalışmaya başlar ve ilk

aşama olan elektromanyetik tasarım aşamasında MED tabanlı tasarım kodları ile motor ön boyutlandırılması gerçekleştirilir. Bu aşamada uygulama isterleri göz önünde bulundurularak motor için uygun faz sayısı ve oluk-kutup kombinasyonu seçimi, stator dış çapı, motor eksenel uzunluğu gibi temel parametreler belirlenir. Elde edilen motor ön tasarımı doğrultusunda motor gücü, maliyeti, akım yoğunluğu gibi kriterler dikkate alınarak motordaki birçok geometrik boyut ve elektriksel parametrenin bir dizi parametrik analiz çalışması gerçekleştirilir. Bu aşamada çoğunlukla SPEED® benzeri bir yazılım ile analizleri gerçekleştirmek süreci hızlandırmaktadır. İstenilen tasarım özelliklerini karşılayan bir tasarım elde edildiğinde ayrıntılı SEA gerçekleştirilerek motor performansının istenilen özellikleri karşılayıp karşılamadığı doğrulanır. Motorun elektromanyetik sonlu eleman analizi sırasında malzeme doyumu, moment kalitesi, maksimum çalışma koşulları gibi tüm performans verileri elde edilir. Birbirine bağlı döngülerden oluşan bu süreçte motor performans kriterleri karşılanmadığı takdirde ön tasarım ve optimizasyonu aşamasında geri dönülür. SEA sonuçları ile ön tasarım optimizasyonu sonucu elde edilen performans verileri birbirleri ile uyumlu ise elektromanyetik tasarım ve analizi aşaması sonlandırılıp bir sonraki adım olan yapısal tasarım ve kontrol aşamasında geçilir.

Yapısal tasarım ve kontrol aşamasında ilk olarak motorun mekanik tasarımı gerçekleştirilir. Bu aşamada motorun maruz kalacağı radyal ve eksenel yüklere göre tasarım gerçekleştirilir. Motorun çalışacağı ortam ve sıcaklıklara uygun malzemeler seçilir. Yapısal analizler aşamasında ise rotorun yapısal bütünlüğü, gövde, kapak ve rulmanların maruz kalacağı yükler altında mekanik dayanımları kontrol edilir. Özellikle yüksek hızlı uygulamalar için rotor bütünlüğünün kontrolü oldukça önem arz eder. Bununla birlikte, uygulama yüksek hızları gerektirmiyorsa, yapısal analize gerek kalmayabilir. Sonuç olarak, yapısal tasarım ve analizlerin yapıldığı bu aşamada bir problem ile karşılaşılması durumunda ilk çevrim olan elektromanyetik tasarım sürecine geri dönülüp rotor yapısı uygulamaya göre yeniden düzenlenmelidir.

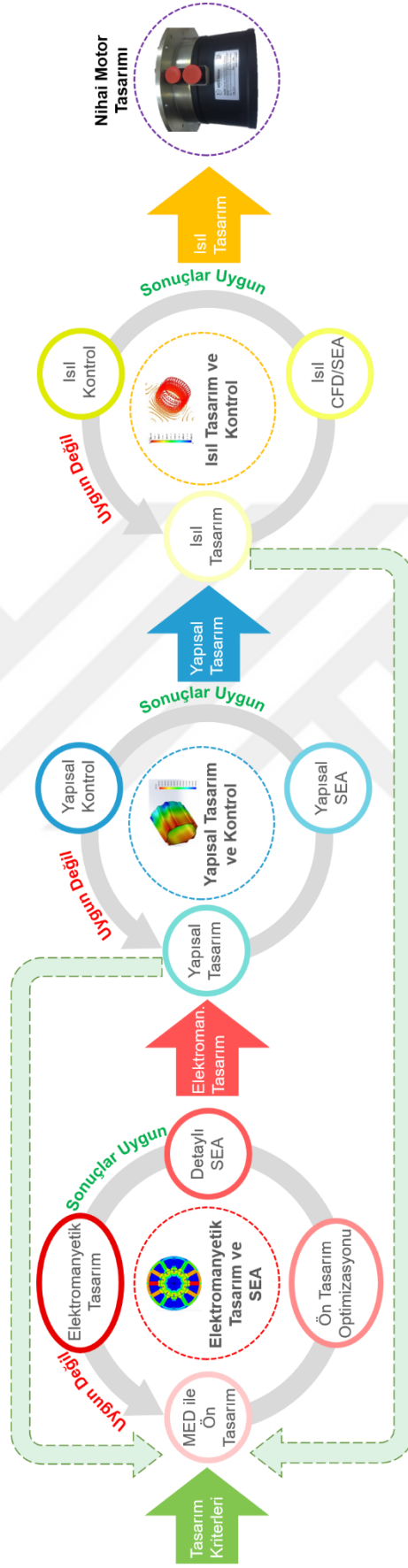
SM motor tasarım sürecindeki son aşama, motor ısı tasarım ve analizlerinin gerçekleştirilmesidir. Bu aşamada, motorun akım yoğunluğu seviyelerine bağlı olarak zorlamalı (sıvı ya da hava gibi) bir soğutma sistemine ihtiyaç olup olmadığı değerlendirilir. Zorlamalı soğutma sistemi ya da doğal taşınım ile soğutma kullanılmasına bağlı olarak motor bileşenleri üzerindeki tüm sıcaklıklar ısı CFD ya

da ısıl SEA ile elde edilebilir. Hesaplanan sıcaklık verilerinin motorda kullanılan malzemelerin çalışma sıcaklıklarına uygun olup olmadığı bu aşamada değerlendirilir. Bu çevrimde de uygulamaya ve ortam sıcaklığına göre ısıl analizlerin gerekliliği belirlenebilir. Sıcaklık değerleri istenilen seviyelerde ise tasarım aşamaları sonlandırılır. Bu aşamada istenilen teknik özelliklerin karşılanamaması durumunda yine ön tasarım aşamasına dönülmesi gerekmektedir. Başarılı bir ısıl tasarım ve kontrolü aşamasından sonra, nihai tasarım için prototip üretimine geçilerek performans test sonuçlarının yukarıda açıklanan çevrimlerde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırması yapılır. İster 3-faz olsun, isterse çok fazlı olsun SM motor tasarım sürecinde bu aşamalar dikkatli bir şekilde yürütülüp motor tasarımı sonlandırılabilir.

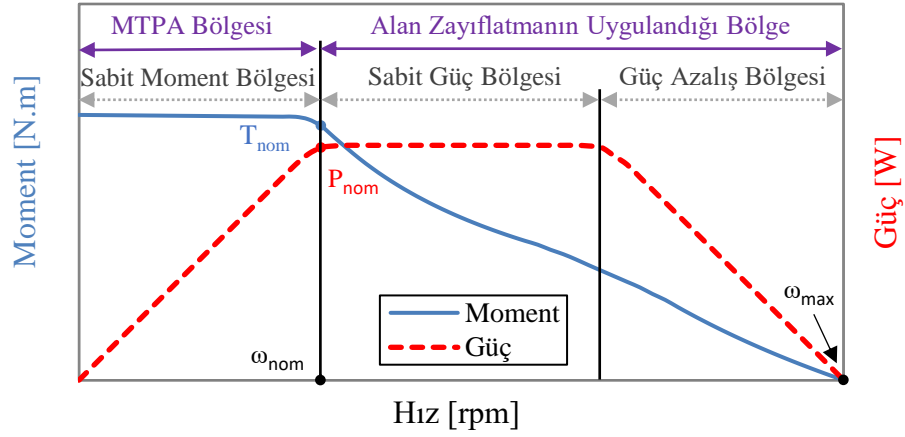
### 3.3. Önerilen 9-Faz Senkron Motor Teknik Özellikleri

SMSM'lerde moment-hız eğrisi motorun sürekli ve maksimum çalışma koşullarındaki performans karakteristiğini elde edebilme açısından önem arz etmektedir. Şekil 3.5'de SM bir motor için sürekli ve maksimum çalışmadaki moment-hız eğrisinin değişimi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi motorun anma momentinin ( $T_{nom}$ ) altındaki nominal hıza ( $\omega_{nom}$ ) kadar olan alan sabit moment bölgesi olarak isimlendirilir. Bu bölgedeki moment ve hızda nominal iki noktanın kesiştiği yerde motorun nominal gücü ( $P_{nom}$ ) elde edilir. Motor anma akımında çalışmaya devam ederken nominal hızın üzerine çıkarıldığında ise kaynak tarafındaki güç sabit olduğu ve motor zıt-EMK gerilimi artmaya devam ettiği için q eksen akımı azalmaya başlar ve motor milinden elde edilen moment de azalır maksimum hızda ( $\omega_{max}$ ) sıfırlanır. Momentin azalır hızın arttığı bu alan sabit güç bölgesi olarak adlandırılır. Motor bu iki bölgede sürekli olarak çalıştırılabilir. Son olarak, nominal moment ile motordan elde edilebilecek maksimum momente kadar olan alan geçici moment bölgesi olarak isimlendirilir. Motorun sağlayabileceği maksimum moment limiti motorun sıcaklık seviyesi, akım yoğunluğu, mıknatıs demanyetizasyonu gibi birçok parametreye bağlı olarak belirlenir ve bu bölgede, sıcaklık problemi nedeniyle, motor kesinlikle sürekli olarak çalıştırılmaz.

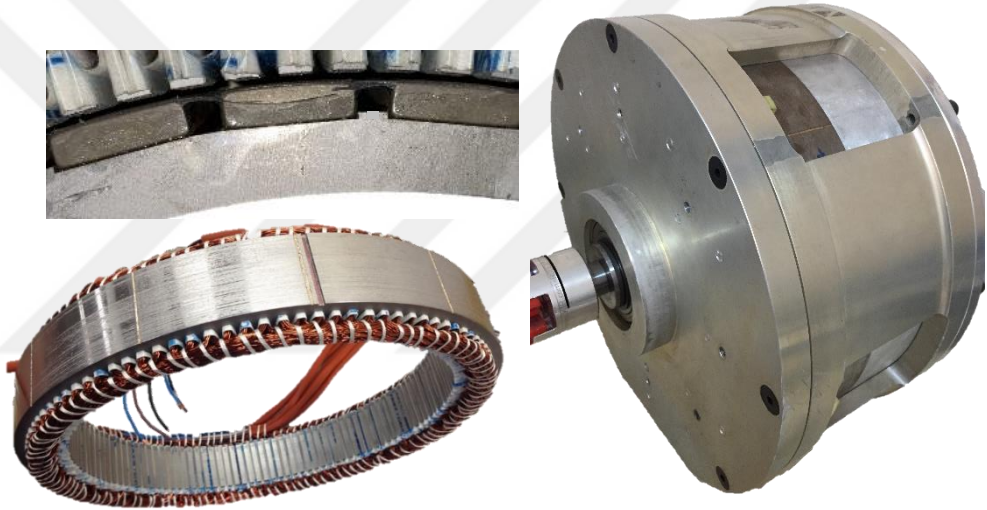
Tez kapsamında önerilen 9-faz DSY'ne sahip AD-ÇTGSM motorun teknik özellikleri için 9-faz bir yüzey sürekli mıknatıslı motor performans verileri referans alınmıştır. Bölüm 2.3'de tasarım detayları verilen ve referans olarak alınan 9-faz DSY'ne sahip YSM motor prototipine görseller Şekil 3.6'de verilmiştir. YSM referans motorun tek-



Şekil 3.4. 9-faz SMSM tasarım aşamaları



Şekil 3.5. SMSM'lerde moment ve güç bölgelerinin gösterimi ve moment-hız, güç-hız eğrilerinin gösterimi



Şekil 3.6. Referans olarak alınan 9-faz DSY'ne sahip YSM motor prototipi















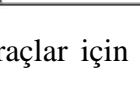
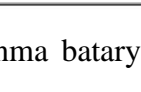






nik özellikleri ve temel performans verilerine ait detaylar Tablo 3.1'de verilmiştir. 117-oluk 36-kutuplu DSY'ne sahip motor 32 A faz akımında 109,7 N.m moment sağlayabilme kapasitesine sahiptir. Bunun yanında, tasarlanacak motorun elektrikli taşıt uygulamalarında kullanılabilmesi için batarya nominal gerilim seviyeleri araştırılmış (Şekil 3.7) ve motor DC bara geriliminin 300 V olması gerektiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, tasarımı yapılacak motorda da bu bara gerilimi kullanılmıştır.

Tasarımı yapılacak 9-faz AD-ÇTGSM motor ile referans 9-faz YSM motorun performans verilerinin adil bir şekilde karşılaştırılabilmesi için her iki motorun rotor dış çapı, aksel uzunluğu, anma akımı, mıknatıs ağırlığı gibi birçok parametre ve geometrik boyut aynı tutulmuştur. Buna ek olarak, her iki motorun statoru aynı

tutularak sadece rotorları değiştirilmiş ve önerilen rotorun avantaj ve dezavantajları incelenmiştir. GSM rotor yapısının en önemli avantajlarından biri, alan zayıflatma kabiliyetlerinin yüksek olması sayesinde geniş bir hız aralığında sabit güç elde edilebilmesi olarak gösterilebilir. Bununla birlikte, standart GSM motorların YSM motorlara göre en önemli dezavantajlarından biri olarak sabit moment bölgesinde daha düşük moment çıkışına sahip olmaları gösterilebilir. Fakat bu çalışmada önerilen AD-ÇTGSM motor ile sabit moment bölgesinde de en az YSM motor ile rekabet edebilecek seviyede bir tasarım gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

Tablo 3.1. Referans 9-faz DSY'ne sahip YSM teknik özellikleri

Faz sayısı	9	Stator dış çapı	370 mm
DC bara gerilimi	300 V	Eksenel uzunluk	45 mm
Anma akımı	32 A	Sarım sayısı	5
Anma momenti	109,7 N.m	Kutup sayısı	36
Anma hızı	1400 rpm	Mıknatıs ağırlığı	1,43 kg

Vehicle	Vehicle Type	Voltage	Peak Power		
Mitsubishi iMiEV	EV	330V	47 kW		
Renault Zoe	EV	400V	65 kW		
Nissan Leaf	EV	365V	80 kW		
Volkswagen e-Up	EV	374V	60 kW		
Volkswagen e-Golf	EV	323V	85 kW		
Pacific I	EV	650V	90 kW		
<b>ARMEVA</b>	EV/ PHEV	300-400V	<i>Tbd (70-90 kW)</i>		
Chevrolet Spark	EV	360V	100kW		
BMW i3	EV (+RE)	360V	125 kW		
Tesla Model S	EV	375V	215 kW		
Toyota RAV4	EV	384V	115 kW		
GM Volt	PHEV	360V	111 kW		
Toyota Prius	HEV PHEV	200V battery (500V boosted) 384V battery (500V boosted)	60 kW 60 kW		
Volvo V60	PHEV	400V	50 kW		
Mitsubishi Outlander	PHEV	300V	60 + 60 kW		
Toucan I	PHEV	300V	40 kW		
Toucan II	PHEV	300-400V	60 kW		

Şekil 3.7. Bazı elektrikli, paralel ya da hibrit elektrikli araçlar için anma batarya gerilimi ve motor maksimum güç seviyeleri [211]



### 3.4. Özet

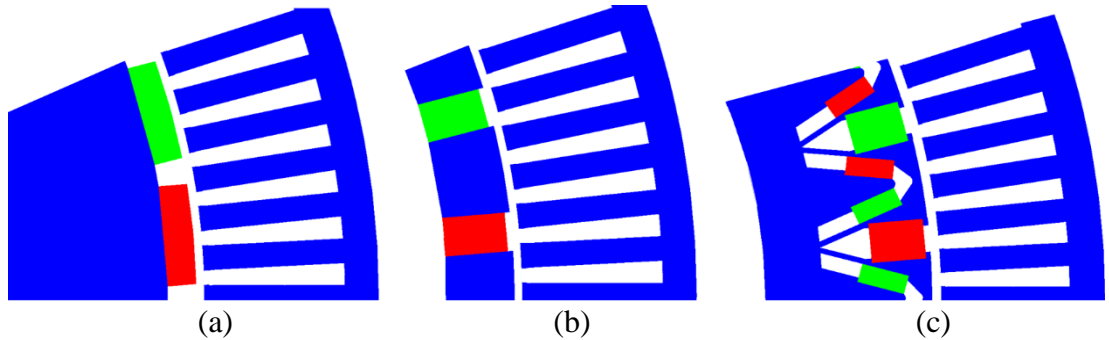
Bu bölümde, önerilen 9-faz gömülü sürekli mıknatıslı rotor yapısının detayları açıklanmış, 9-faz motor tasarım sürecinde izlenen adımların detayları sunulmuş ve önerilen motorun ön tasarımının gerçekleştirilebilmesi için motor teknik özellikleri verilmiştir.



#### 4. 9-FAZ DENGESİZ SARGI YAPILI SMSM 2D SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Bu bölümde, Bölüm 3.3’de verilen motor teknik özellikleri ve referans 9-faz YSM motor performans verileri dikkate alınarak 9-faz DSY’ne ve gömülü sürekli mıknatıslı rotor yapısına sahip motor için ön tasarım analiz sonuçları elde edilmiş ve bu motor için ayrıntılı elektromanyetik SEA ile yapısal ve ısıl analizler gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik analizlerde farklı parametrelerin motor performansına etkisi incelenmiş ve önerilen 9-faz AD-ÇTGSM motor için yüksüz ve yüklü durum analizleri gerçekleştirilmiştir. Prototip üretimi gerçekleştirilip deneysel olarak doğrulan 9-faz YSM motor sonuçları ile önerilen rotor yapısına sahip motorun performans verileri karşılaştırılmıştır.

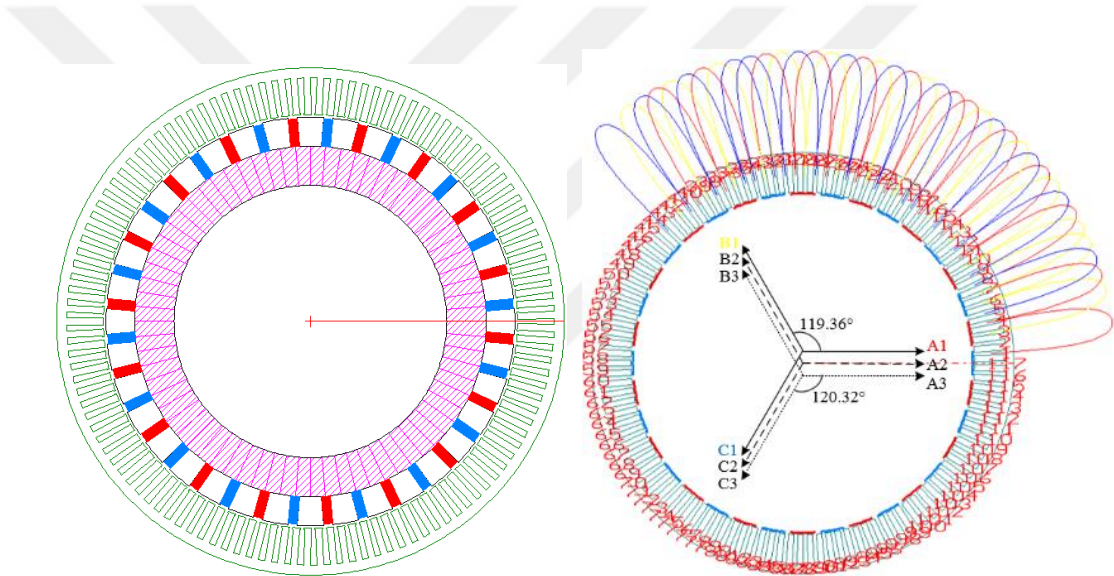
Dengesiz sargı yapısına sahip 9-faz SM motorların SEA modeli Şekil 4.1’de gösterildiği gibi üç farklı rotor yapısı dikkate alınarak oluşturulmuştur. YSM motor (Şekil 4.1(a)), performans verileri referans olarak alınan motordur. Daha sonra, YSM motor ile aynı ortalama momenti sağlayabilecek geleneksel bir çubuk tip rotor (Şekil 4.1(b)) tasarımı gerçekleştirilmiştir. Son olarak, geleneksel ÇTGSM (GÇTGSM) motordan çubuk mıknatısların boyutlarına karar verildikten sonra, önerilen rotora (Şekil 4.1(c)) eklenen akı destekli mıknatısların moment çıkışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, önerilen 9-faz AD-ÇTGSM motorun YSM motora göre sabit güç bölgesinde alan zayıflatma kabiliyetini ve sabit moment bölgesinde de moment yoğunluğu avantajlarını göstermektir.



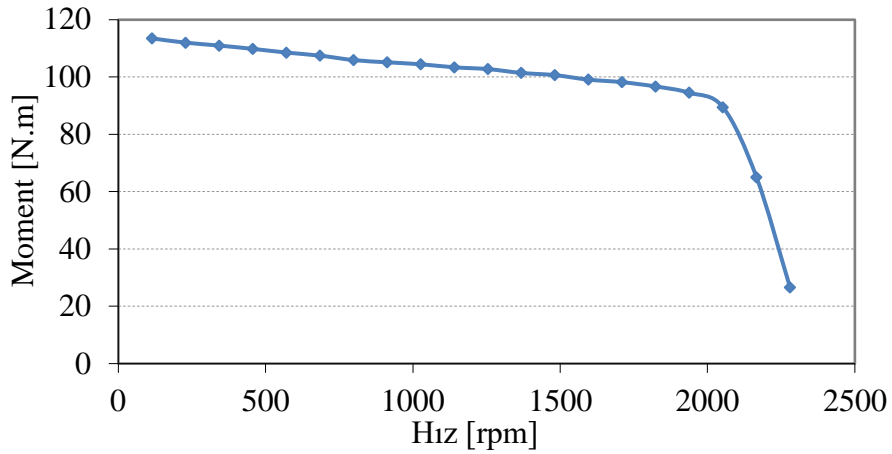
Şekil 4.1. SEA modelleri: (a) Referans YSM motor, (b) geleneksel çubuk tip GSM (GÇTGSM) rotor ve (c) önerilen akı destekli çubuk tip GSM (AD-ÇTGSM) rotor

#### 4.1. 9-Faz DSY'ne Sahip ÇTGSM Motor Ön Tasarımı

Bölüm 2.3'de tasarım detayları verilen 9-faz DSY'ne ve YSM rotor yapısına sahip motor referans alınarak ÇTGSM motor ön tasarımı SPEED yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan gömülü mıknatıslı motorda, referans 9-faz YSM motorun stator geometrisi, akım x sarım sayısı ve kullanılan mıknatıs miktarı aynı tutularak ön tasarım gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2'de ön tasarımı gerçekleştirilen 9-faz ÇTGSM motor modeli ve ilk 3-faza ait sargı şeması gösterilmiştir. Ön tasarım sonucunda elde edilen moment-hız eğrisi ise Şekil 4.3'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi motorun anma hızı 2050 rpm ve anma momenti 90 N.m seviyelerindedir.



Şekil 4.2. Ön tasarımı gerçekleştirilen 9-faz ÇTGSM motor modeli ve sargı şeması (sadece ilk 3-faz gösterilmiştir)

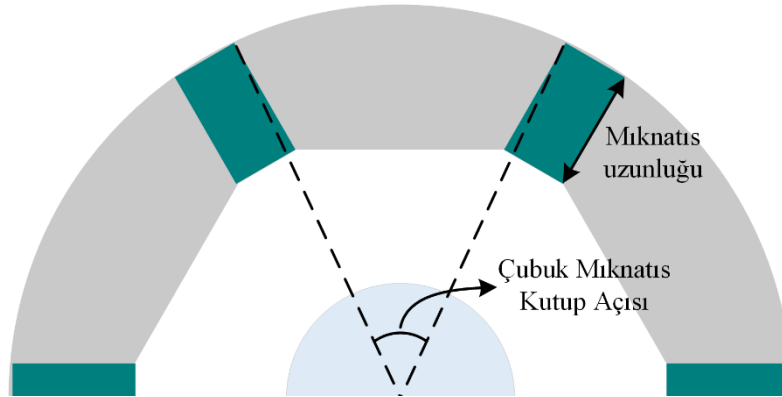


Şekil 4.3. 9-faz ÇTGSM motorun ön tasarımı sonucunda elde edilen moment-hız eğrisi (300 Vdc bara geriliminde elde edilmiştir)

## 4.2. Çubuk Tip Mıknatısların Etkisi

9-faz YSM motorun performans özellikleri dikkate alınarak Şekil 4.1(b)'de gösterilen geleneksel bir çubuk tip gömülü sürekli mıknatıslı motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. ÇTGSM motorun statoru 9-faz YSM referans motorunki ile aynı tutulduğu için rotor parametrelerinin motor performansına etkisi incelenmiştir. Her iki motorun rotor dış çapları da aynı tutulduğu için rotorda etkisi incelenebilecek en önemli iki parametre Şekil 4.4'de gösterilen çubuk kutup açısı ve mıknatıs uzunluğu parametreleridir. Bununla birlikte, Bölüm 3.1'de önerilen rotor topolojisinde çubuk tip mıknatıslara ek olarak akı destekleyici mıknatısların kullanılması hedeflenmiştir. Adil bir karşılaştırma yapabilmek için YSM rotora sahip ve önerilen AD-ÇTGSM rotorlu motorlarda kullanılan mıknatıs miktarının aynı tutulması amaçlanmıştır. Dolayısıyla, GÇTGSM rotorunda YSM rotora göre daha düşük miktarda mıknatıs kullanılarak önerilen rotor yapısına geçildiğinde dahil edilecek akı destekleyici mıknatıslarla birlikte kullanılacak toplam mıknatıs miktarı YSM motor ile aynı tutulmuş olacaktır.

Tasarımı gerçekleştirilen 9-faz DSY'ne sahip GÇTGSM motorun Şekil 4.4'de verilen parametreleri belirli bir aralıkta değiştirilerek motor moment çıkışı elde edilmiştir. Motorun mıknatıs kutup açısı ve mıknatıs uzunluğu parametrelerine bağlı olarak elde edilen moment dalgalanması ve moment çıkışı değerleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de, değişimleri ise Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Motorun moment dalgalanmasının çubuk kutup açısının 125 elektriksel derece ve mıknatıs uzunluğunun 15 mm olduğu durumda elde edildiği görülmektedir. Bu durumda, YSM referans motorun mıknatıs ağırlığı ile karşılaştırıldığında, geleneksel çubuk tip rotorlu motorda hemen hemen aynı miktarda



Şekil 4.4. Çubuk tip motor için mıknatıs uzunluğu ve mıknatıs kutup açısının gösterimi

Tablo 4.1. GÇTGSM motorun farklı mıknatıs kutup açısı ve mıknatıs genişliği değerleri için moment dalgalanması yüzdelerinin değişimi

		Mıknatıs uzunluğu, mm							
		7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25
Çubuk Mıknatıs Kutup Açısı, Elektriksel Derece	100	4.2	4.1	3.6	2.8	2.3	2.0	2.3	2.2
	105	4.0	3.7	3.3	2.5	2.0	2.1	2.3	2.3
	110	3.7	3.3	2.7	2.0	1.7	2.0	2.3	2.3
	115	3.5	3.0	2.4	1.7	1.4	2.1	2.8	2.9
	120	3.2	2.6	1.9	1.3	1.1	2.1	2.9	3.3
	125	2.6	2.0	1.4	1.2	1.3	1.9	2.7	3.1
	130	2.4	2.0	1.9	1.9	2.0	2.2	2.5	2.9
	135	2.6	2.3	2.3	2.3	2.5	2.8	3.0	3.2
	140	2.9	2.6	2.5	2.9	3.2	3.4	3.6	3.7

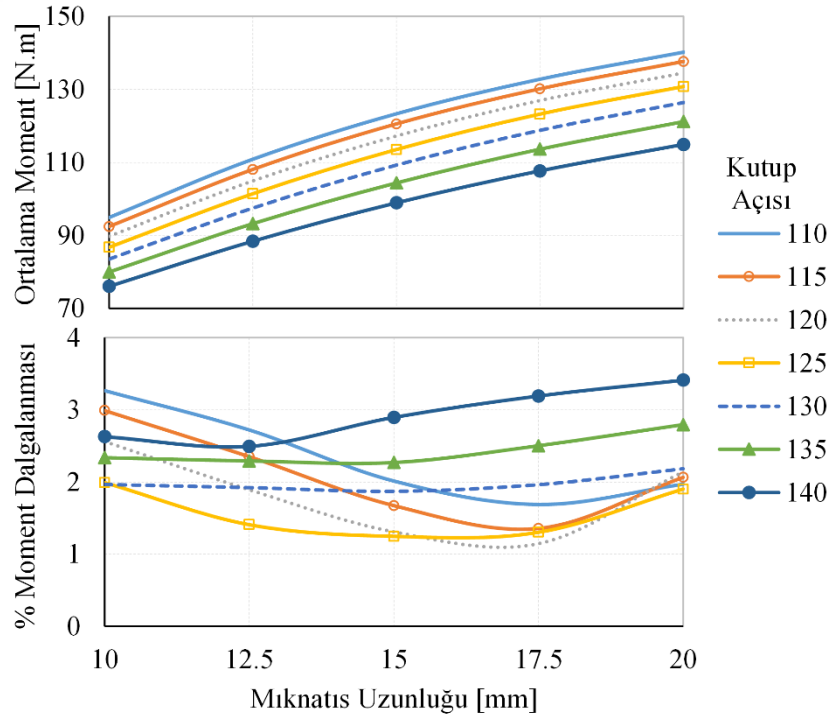
Tablo 4.2. GÇTGSM motorun farklı mıknatıs kutup açısı ve mıknatıs genişliği değerleri için ortalama moment değişimleri

		Mıknatıs uzunluğu, mm							
		7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25
Çubuk Mıknatıs Kutup Açısı, Elektriksel Derece	100	79.3	99.3	115.5	127.7	137.0	144.2	149.6	153.8
	105	77.6	97.3	113.4	125.7	135.1	142.4	148.1	152.5
	110	75.8	94.9	110.9	123.3	132.8	140.2	146.0	150.6
	115	73.8	92.4	108.0	120.5	130.1	137.6	143.5	148.2
	120	71.8	89.7	104.9	117.2	127.0	134.5	140.5	145.2
	125	69.6	86.8	101.4	113.5	123.2	130.8	136.8	141.7
	130	67.1	83.5	97.5	109.3	118.8	126.4	132.5	137.5
	135	64.4	80.0	93.2	104.4	113.6	121.2	127.3	132.3
	140	61.5	76.1	88.4	98.9	107.7	114.9	121.0	126.0

Tablo 4.3. GÇTGSM motorun farklı mıknatıs kutup açısı ve mıknatıs genişliği değerleri için ortalama moment mıknatıs ağırlık oranları

		Mıknatıs uzunluğu, mm							
		7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25
Çubuk Mıknatıs Kutup Açısı, Elektriksel Derece	100	77.6	72.9	67.8	62.4	57.4	52.9	48.8	45.1
	105	81.0	76.1	70.9	65.5	60.4	55.7	51.5	47.7
	110	84.7	79.6	74.3	68.9	63.6	58.7	54.4	50.5
	115	88.8	83.4	78.0	72.5	67.1	62.1	57.6	53.5
	120	93.6	87.7	82.1	76.4	70.9	65.7	61.0	56.8
	125	98.9	92.6	86.5	80.7	75.1	69.7	64.9	60.4
	130	104.9	98.0	91.5	85.5	79.6	74.2	69.1	64.5
	135	112.0	104.3	97.2	90.7	84.6	79.0	73.8	69.0
	140	120.3	111.6	103.7	96.7	90.2	84.2	78.9	73.9

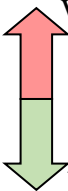
mıknatıs kullanıldığı hesaplanmıştır. Bununla birlikte, GÇTGSM motorun ortalama momenti YSM motora göre %3,5 daha fazladır. ÇTGSM motorun moment dalgalanması ise %1,25 seviyelerindedir. Ancak, yukarıda belirtildiği gibi, eklenecek akı destekleyici mıknatısların getireceği ekstra bir ağırlık artışı söz konusudur. Dolayısıyla, bu çalışmadaki amaç; GÇTGSM motorda referans YSM motora göre daha düşük miktarda mıknatıs kullanılmasıdır. Bu nedenle, belirli bir ortalama moment limiti içerisinde iken kullanılan çubuk tip mıknatıs miktarı mümkün olduğu kadar düşük bir miktarda tutulmuştur. Çubuk tip mıknatıslara ve mıknatıs uzunluğuna bağlı olarak motorun moment/mıknatıs ağırlık oranı değerleri Tablo 4.3’de verilmiştir. GÇTGSM motorun farklı çubuk kutup açısı ve mıknatıs uzunluğu değerleri için mıknatıs ağırlığı miktarları da Tablo 4.4’de verilmiştir. Tabloda kırmızı renk ile gösterilen alan referans YSM motora göre daha fazla mıknatısın kullanıldığı, yeşil renk ile gösterilen alan ise referans motora göre daha düşük miktarda mıknatısın kullanıldığını belirtmektedir. Hem minimum moment dalgalanması seviyelerinden biri olması hem de düşük miktarda mıknatıs kullanımı sağlayan seçenek çubuk kutup açısı 125 elektriksel derece ve mıknatıs uzunluğu 12,5 mm iken elde edilmiştir. Böylece,



Şekil 4.5. Geleneksel ÇTGSM motor için mıknatıs uzunluğu ve mıknatıs kutup açısına göre ortalama moment ve yüzde moment dalgalanması değişimlerinin gösterimi

Tablo 4.4. Çubuk tip mıknatıslı rotor için farklı mıknatıs uzunluğu ve kutup açısı değerleri için mıknatıs ağırlıklarının değişimi

		Mıknatıs uzunluğu, mm				
		10	12,5	15	17,5	20
Çubuk Mıknatıs Kutup Açısı, Elektriksel Derece	110	1,19	1,49	1,79	2,09	2,39
	115	1,11	1,39	1,66	1,94	2,22
	120	1,02	1,28	1,53	1,79	2,05
	125	0,94	1,17	1,41	1,64	1,88
	130	0,85	1,07	1,28	1,49	1,70
	135	0,77	0,96	1,15	1,34	1,53
	140	0,68	0,85	1,02	1,19	1,36



$W_{mık} > W_{mık\_YSM}$

$W_{mık} < W_{mık\_YSM}$

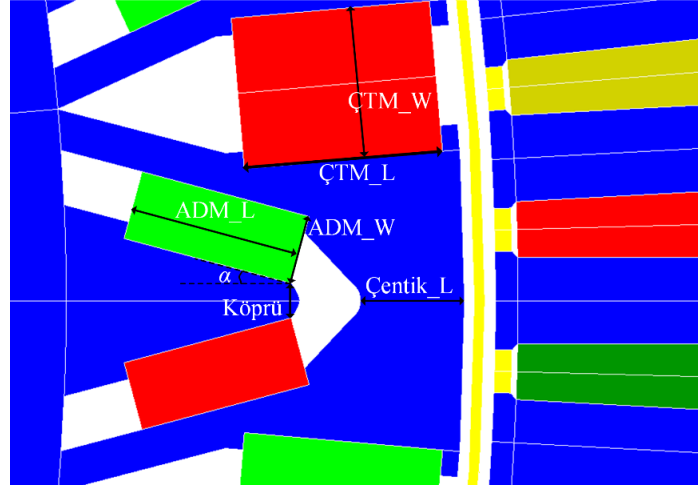
önerilen rotor yapısının parametrik analizleri için kullanılacak olan çubuk tip mıknatısın boyutlarına karar verilmiştir.

#### 4.3. Önerilen AD-ÇTGSM Rotor için Parametrik Analizler

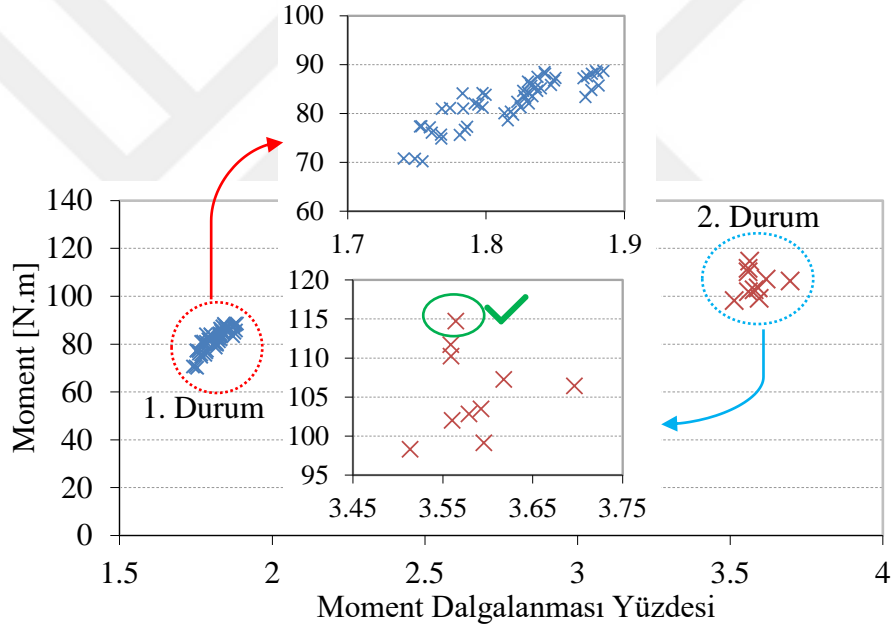
Önceki bölümde belirtildiği gibi, GÇTGSM motordaki çubuk tip mıknatıs boyutları çıkış momentini maksimize edecek minimum mıknatıs ağırlığı dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu bölümde, önerilen 9-faz dengesiz sargı yapısına ve geleneksel olmayan rotor yapısına sahip motorun ortalama momentini artırmak için belirli parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik analizler sırasında rotorda değiştirilen geometrik parametreler Şekil 4.6’de gösterilmiştir. Bu parametrik analizler iki farklı durum için gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.7): İlk durumda rotor laminasyon yüzeyinde değişken bir hava aralığı olması, ikinci durumda ise sabit bir hava aralığı olması durumları incelenmiştir. Şekil 4.7’de bu iki durum için elde edilen ortalama çıkış momentinin moment dalgalanmasına göre değişimleri gösterilmiştir. Her iki durum incelendiğinde birinci durumdaki ortalama moment değerlerinin ikinci durumdakinden daha düşük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, ikinci durumda moment dalgalanması bir miktar artmaktadır.

#### 4.4. Nihai Rotor Geometrisi için Yüksüz ve Yüklü Durum SEA

Bu bölümde, rotor geometrisine karar verilen yapı için yüksüz ve yüklü durum sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve motorun zıt-EMK gerilimi, çıkış momenti, motor kayıpları gibi elektromanyetik performans verileri elde edilmiştir.



Şekil 4.6. Elektromanyetik analizler sırasında değiştirilen parametreler

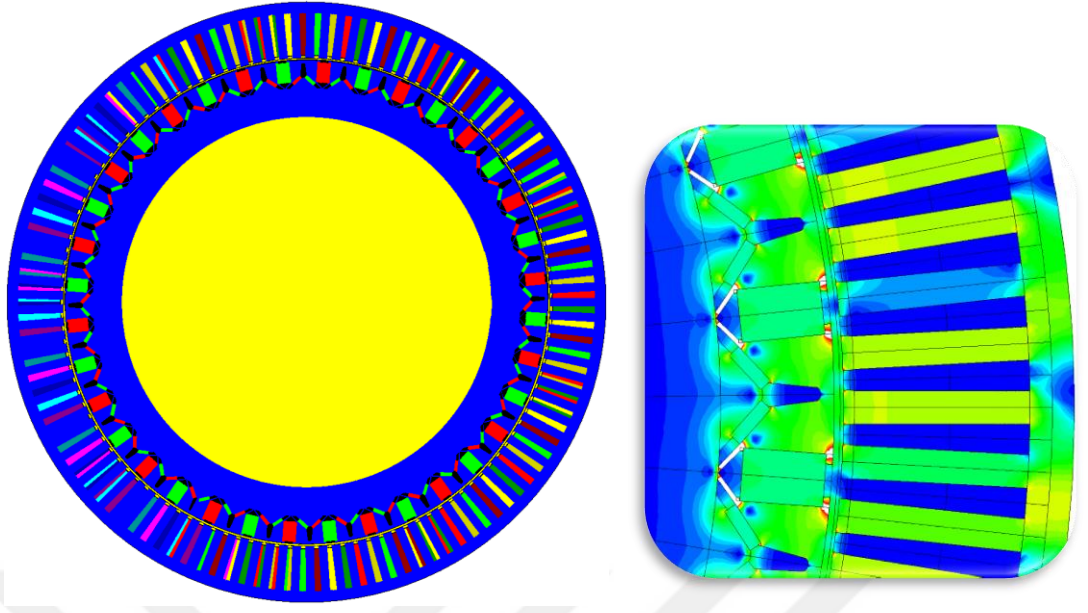


Şekil 4.7. İki farklı durum için elde edilen parametrik analiz sonuçları

#### 4.4.1. Motor performans sonuçları

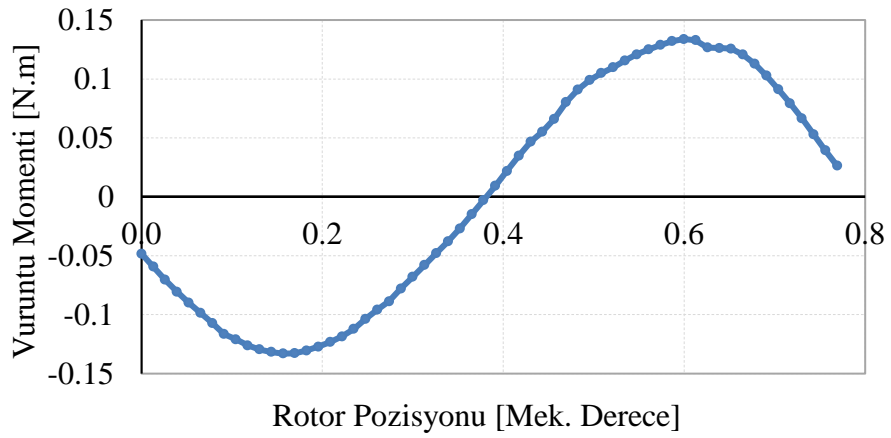
AD-ÇTGSM 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip motorun çıkış momenti için parametrik analizler tamamlandıktan sonra Şekil 4.7'de yeşil renkli tik işareti ile gösterilen ikinci duruma ait tasarım noktası seçilmiştir. Bu tasarım noktasının tercih edilme sebebi YSM motora göre %4,5 daha fazla ortalama moment elde edilebilmesidir. Bununla birlikte, bu noktada elde edilen moment dalgalanması YSM motora göre daha yüksek seviyelerdedir. Nihai motor geometrisi için oluşturulan SEA modeli ve bu modelden elde edilen yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi Şekil 4.8'da



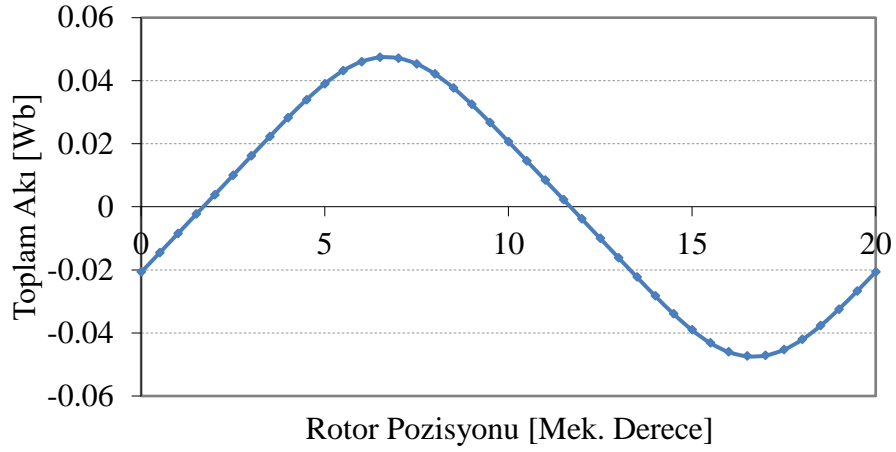


Şekil 4.8. Nihai motor geometrisi ve yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi

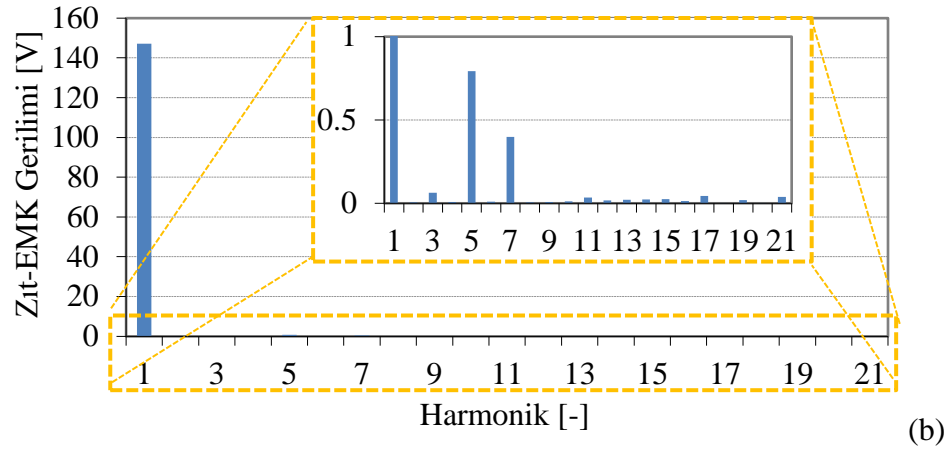
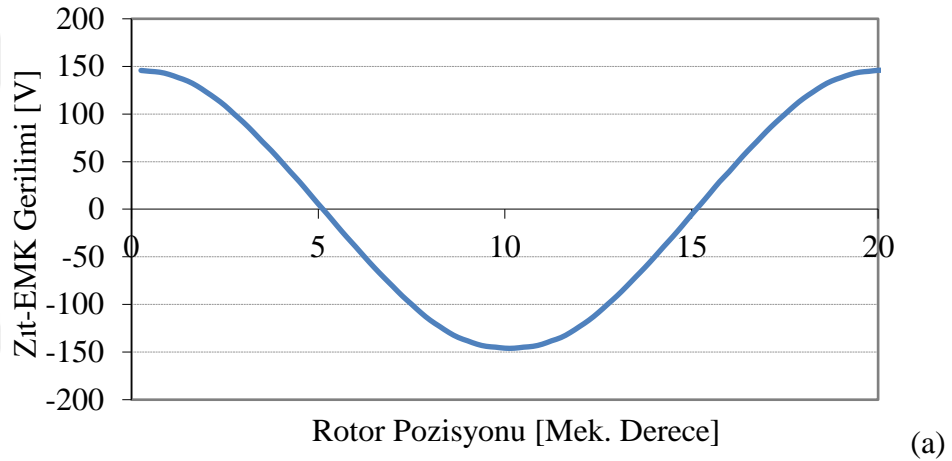
gösterilmiştir. Beklenildiği üzere akı-destekleyici mıknatısların alt köşelerinde yer alan ince rotor laminasyonunda doyum gözlenmektedir. Motor üzerinde yüksüz durum oluşan maksimum akı yoğunluğu ise dişlerde görülmekte ve akı yoğunluğu 1.54 T seviyelerindedir. Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi önerilen motorun en önemli avantajlarından birisi, seçilen oluk-kutup kombinasyonu sayesinde vuruntu momenti bileşenini hiçbir ek önlem almaya gerek kalmadan ortadan kaldırmasıdır. Parametrik analizler sonucunda belirlenen nokta için oluşturulan nihai motor geometrisinden yüksüz durumda ve 1 rpm rotor hızında elde edilen vuruntu momenti değişimi Şekil 4.9’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere vuruntu momenti tepe değeri 133.9



Şekil 4.9. Nihai motor geometrisi için yüksüz durumda elde edilen vuruntu momenti değişimi



Şekil 4.10. Karar verilen tasarım noktası için A1-fazından elde edilen toplam akı değişimi

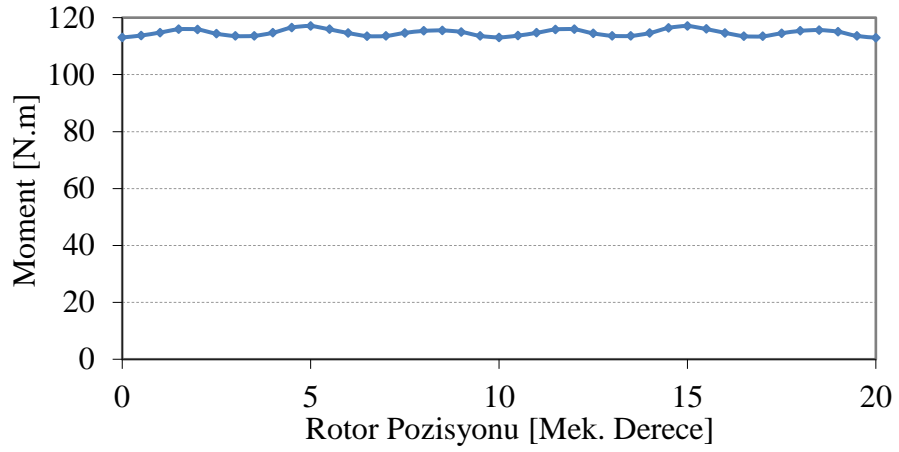


Şekil 4.11. Karar verilen tasarım noktası için elde edilen (a) hat zıt-EMK gerilimi ve (b) hat gerilim harmonikleri değişimleri

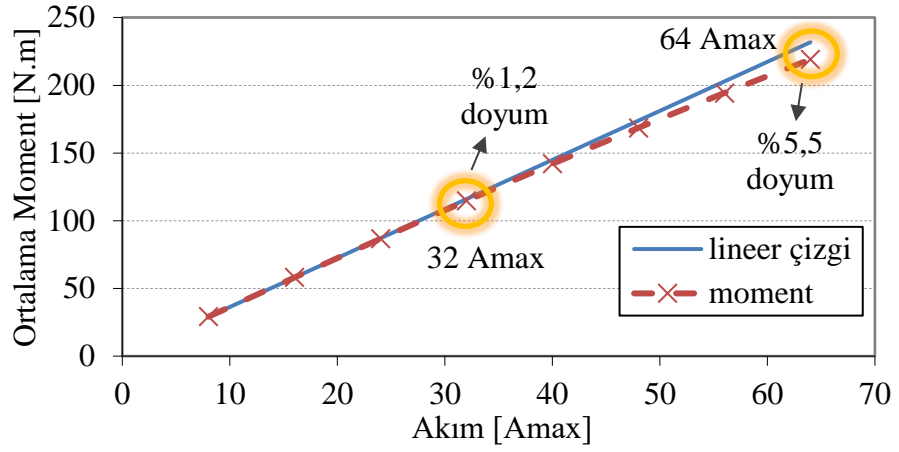
mN.m olarak elde edilmiştir. Vuruntu momenti tepe değerinin anma momentine göre oranı %0.12 seviyelerindedir. Bu değer oldukça küçük olduğu ve motorda bir vuruntu momenti bileşeni bulunmadığı görülmektedir. Sonuç olarak, önerilen 9-faz

gömülü mıknatıslı motor düşük hızlarda hassas pozisyon kontrolü gerektiren uygulamalarda kullanılmak istenildiği takdirde bu ihtiyaca cevap verebilecek niteliktedir. Önerilen AD-ÇTGSM motorun belirlenen tasarım noktasında A1-fazından elde edilen toplam akı değişimi ise Şekil 4.10'da gösterilmiştir. A1-fazındaki toplam akının rotor pozisyonuna göre türevi bu fazdaki zıt-EMK geriliminin değişimini vermektedir. 1000 rpm rotor hızında elde edilen hat zıt-EMK gerilimi değişimi ise Şekil 4.11(a)'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi gerilim dalga şekli geleneksel olmayan stator yapısı sayesinde düşük harmonik içerikli sinüzoidal bir dalga şekline sahiptir. Gerilim harmonikleri incelendiğinde (Şekil 4.11(b)) THB değerinin %0,6 seviyelerinde olduğu belirlenmiştir. Bu değer, geleneksel birçok IPM motora göre oldukça düşük bir seviyede olduğu söylenebilir.

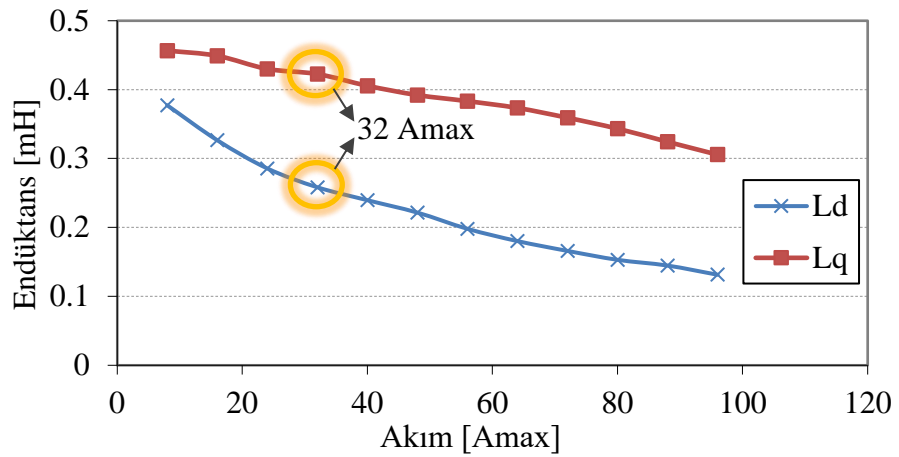
Yüklü durumda ise motorun tüm fazları enerjilendirilerek moment çıkışı elde edilmiştir (Şekil 4.12). Önerilen AD-ÇTGSM 9-faz DSY motorun ortalama momenti 114,7 N.m iken ortalama momente göre moment dalgalanması %3,56 seviyelerindedir. Önerilen rotor yapısının avantajları da dikkate alınırsa, bu moment dalgalanması değerinin geleneksel IPM motorlar ile karşılaştırıldığında birçok uygulama için oldukça makul bir seviyede kaldığı söylenebilir. Bunun yanında, motorun moment sabitinin elde edilebilmesi için moment-akım ilişkisi elde edilmiştir (Şekil 4.13). Şekilden de görüldüğü gibi motorun anma momentinin elde edildiği  $32 A_{max}$  anma akımında doyum %1,2 iken, maksimum moment noktasındaki doyum %5,5 seviyelerindedir. Maksimum akıdaki doyum seviyesinin makul bir seviyede olduğu görülmektedir. Şekil 4.10'de gösterilen toplam akı değişiminin maksimum ve sıfır geçiş noktaları motorun A1 faz eksenini ile rotorun d- ve q-eksenlerinin kesiştiği noktalar hakkında bilgi vermektedir. Bu noktalar belirlenerek yapılan analiz sonucunda motorun d- ve q-eksen endüktanslarının farklı akım değerlerine bağlı olarak değişimleri elde edilmiştir (Şekil 4.14).  $32 A_{max}$  anma akımında elde edilen d- ve q-eksen endüktansları sırasıyla 0,42 ve 0,26 mH seviyelerindedir. Sargılara uygulanan akım seviyesi artırıldığında rotor d- ve q- eksenini boyunca oluşan doyum nedeniyle her iki endüktans bileşeninde de azalmalar görülmektedir. Motor d-ekseninin büyük kısmının rotor laminasyonu üzerinde yer alması nedeniyle (Şekil 4.15) ortaya çıkan doyum miktarının q-eksen endüktansında oluşan doyuma göre daha yüksek olduğu görülmektedir.



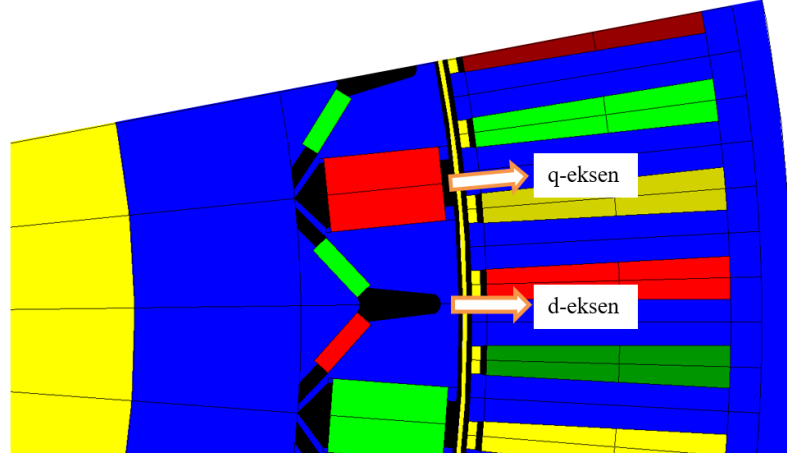
Şekil 4.12. Karar verilen tasarım noktası için elde edilen çıkış momenti değişimi



Şekil 4.13. Nihai motor geometrisi için elde edilen moment-akım ilişkisi



Şekil 4.14. d- ve q-eksen endüktanslarının farklı akım değerlerine bağlı olarak değişimleri



Şekil 4.15. Önerilen AD-ÇTGSM rotorun d- ve q-eksen çizgilerinin gösterimleri

#### 4.4.2. Moment-hız eğrisinin elde edilmesi

Çok fazlı sürekli mıknatıslı senkron motorlarda çalışma limitlerinin belirlenmesi motor performans karakteristiğini ifade etme açısından oldukça önem arz eder. Şekil 4.16’de sürekli mıknatıslı bir motorun çalışma limitleri ve aralıkları ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Şekilde kırmızı ile gösterilen çember akım limitini göstermektedir. Bu çemberin yarı çapı nominal akımı ( $I_N$ ) göstermekte ve kontrol açısına bağlı olarak d- ve q-eksen akım değerleri değişmektedir. Kontrol açısı ( $\gamma$ ) 0 elektriksel derece iken q-eksen akımı nominal akım değerine, 90 elektriksel derece iken ise d-eksen akımı negatif nominal akım değerine eşit olmaktadır. Dolayısıyla nominal akımın ve d-q eksen dönüşümlerinden elde edilen akımlar ile ilişkisi şu şekilde ifade edilebilir:

$$i_d^2 + i_q^2 \leq I_N^2 \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte  $i_d$  ve  $i_q$  sırasıyla d- ve q-eksen akımlarını belirtmektedir. Ayrıca bu iki dönüşüm akımının kararlı durumda kontrol açısına bağlı değişimleri aşağıdaki eşitlik ile gösterilebilir:

$$i_q = I_N \cos(\gamma) \text{ ve } i_d = -I_N \sin(\gamma) \quad (4.2)$$

Benzer şekilde, gerilim limitleri de aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$v_d^2 + v_q^2 \leq V_N^2 \quad (4.3)$$

Bu eşitlikte  $v_d$  ve  $v_q$  sırasıyla d- ve q-eksen gerilimlerini ifade etmektedir. Kararlı durumdaki d- ve q-eksen gerilimleri şu bağıntı ile gösterilebilir:

$$\begin{aligned} v_d &= R i_d - \omega_{me} L i_q \\ v_q &= R i_q + \omega_{me} L i_d + \omega_{me} \lambda_m \end{aligned} \quad (4.4)$$

Bu eşitlikte  $\omega_e$  elektriksel hızı, R faz direncini, L senkron endüktansı,  $\lambda_m$  ise toplam mıknatıs akısını ifade etmektedir. Burada direnç üzerine düşen gerilim nominal gerilim ile karşılaştırıldığında genellikle ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Denklem (4.4)'de verilen ifadeler Denklem (4.3)'de yerine yazılıp düzenlenirse, gerilim limitini akım limitinin bir fonksiyonu olarak ifade mümkün olur.

$$\left( i_d + \frac{\lambda_m}{L} \right)^2 + i_q^2 \leq \frac{V_N^2}{(\omega_e L)^2} \quad (4.5)$$

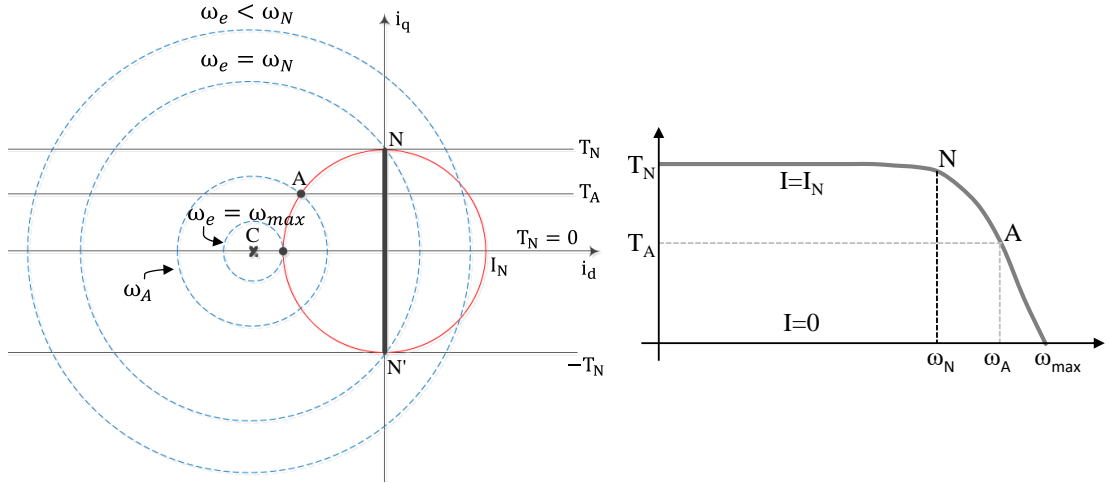
Şekil 4.16'de kesikli ve mavi renkli çizgiler ile gösterilen çemberler ise frekans ile ters orantılı bir şekilde değişen gerilim çemberlerini göstermektedir. Bu çemberlerin merkezi C noktasında konumlandırılmıştır:

$$\begin{aligned} I_{Cd} &= -\frac{\lambda_m}{L} \\ I_{Cq} &= 0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

d- ve q- eksen üzerinde konumlandırılan bu nokta aynı zamanda motorun kısa devre akımı olarak da belirtilebilir. Kısa devre akımı, motor tasarımına bağlı olarak nominal akımdan daha yüksek veya daha düşük olabilir. Dolayısıyla gerilim çemberlerinin merkezi, akım çemberi limitinin içerisinde veya dışında kalabilir. Gerilim çemberinin kırmızı renkli akım çemberini kestiği nokta, N, motorun nominal noktası olarak adlandırılır. Motorun ısı limitleri içerisinde çıkabileceği sürekli akım limiti olarak da isimlendirilebilir. Motor nominal hızı aşağıdaki eşitlik ile elde edilebilir:

$$\omega_N = \frac{V_N}{\sqrt{\lambda_m^2 + (L I_N)^2}} \quad (4.7)$$

Motorun nominal hıza ulaştığı bu noktadan sonra hız artmasına karşın q-eksen akımı azalmaya başladığı için motor momenti de azalır. Motora alan zayıflatma uygulanmaz

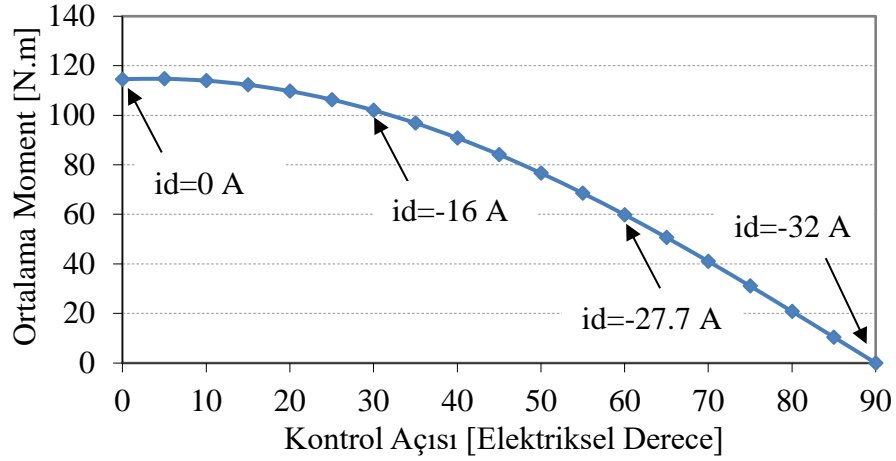


Şekil 4.16. Bir sürekli mıknatıslı motorda çalışma limitlerinin ve bölgelerinin gösterimi

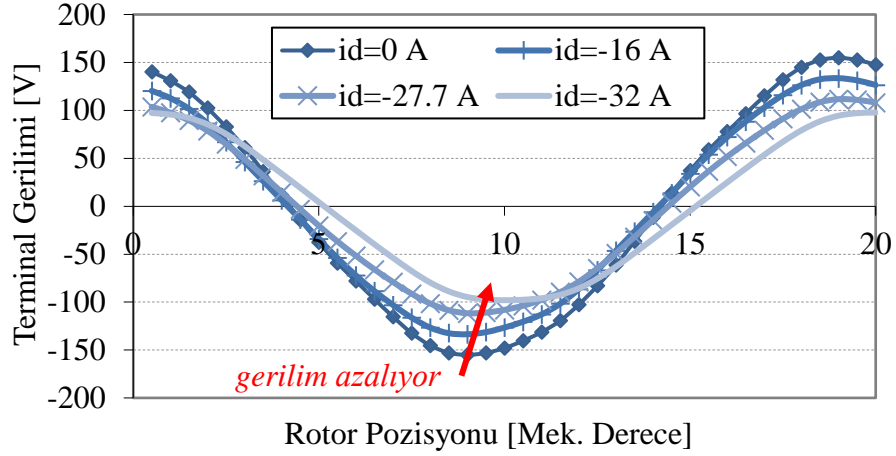
ise motor devri hızlıca düşmeye başlar. Alan zayıflatma uygulanarak motora d-eksen akımı uygulanması durumunda motor terminallerine düşen gerilim azalacağı için daha yüksek hızlara çıkabilmek mümkündür. Motorun, A noktasında gösterilen hıza ve momente ulaşabilmesi için kontrol açısının artırılması ve motora d-eksen akımının uygulanması gerektiği şekilden de görülmektedir. Motorun erişebileceği maksimum elektriksel hız ise şu şekilde hesaplanabilir:

$$\omega_{\max} = \frac{V_N}{\lambda_m - (LI_N)} \quad (4.8)$$

Yukarıda ifade edilen çalışma limitleri ve bölgeleri göz önünde bulundurularak önerilen 9-faz DSY'ne sahip motorun farklı akım kontrol açılarında ortalama moment değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.17). Şekilden de görüldüğü gibi kontrol açısı 0 elektriksel derece iken ( $i_d=0$ ,  $i_q=I_N$ ) motordan elde edilen moment değeri en yüksek değerlerden birine sahiptir. Bununla birlikte kontrol açısı arttıkça q-eksen akımı azalmakta, bu da ortalama momentin azalmasına yol açmaktadır. Son olarak, kontrol açısı maksimum değerine ulaştığında d-eksen akımı maksimum değerine, q-eksen akımı ise minimum değerine ulaştığı için ortalama moment sıfıra düşmektedir. d-akımının motor terminal gerilimleri üzerindeki etkisini göstermek için sabit bir hızda önerilen motordan elde edilen gerilim değişimleri incelenmiştir (Şekil 4.18). Şekilden de görüldüğü gibi motora d-eksen akımı uygulandığı durumda akı zayıfladığı için terminal gerilimi azalmaktadır.



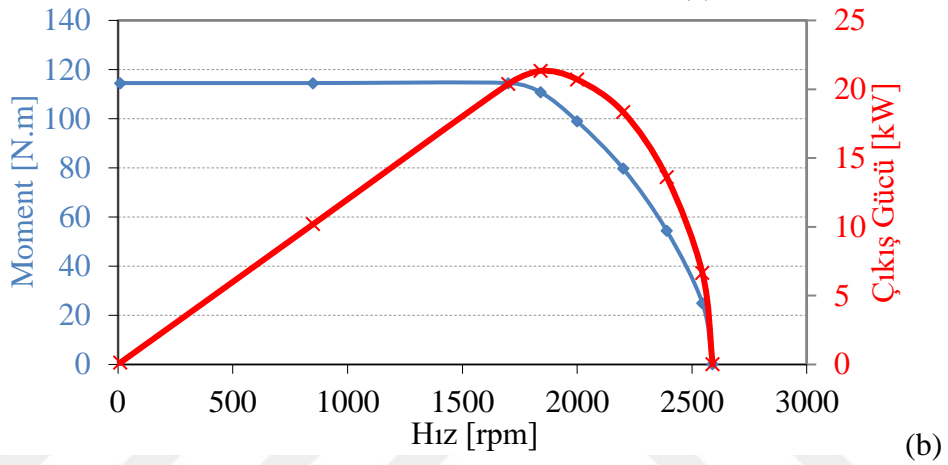
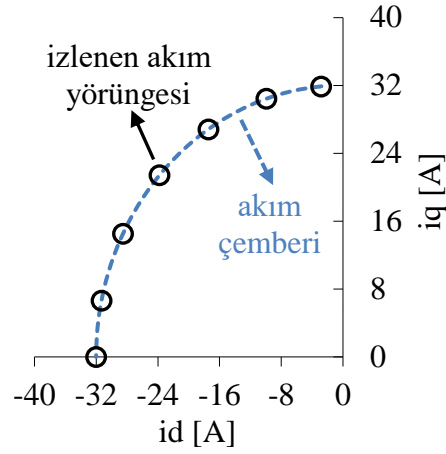
Şekil 4.17. Nihai motor geometrisi için ortalama momentin akım kontrol açısına bağlı değişimi



Şekil 4.18. 1000 rpm hızda farklı d-eksen akımları için terminal geriliminin değişimi

Sürekli mıknatıslı senkron motorların moment-hız eğrisi elde edilirken ısı limitlerin aşılması gerektiği için genellikle akım limiti içerisinde kalınarak farklı hızlardaki moment değerleri elde edilir. Bununla birlikte nadiren akım limitinin dışına çıkılan uygulamalara da rastlanılmaktadır. Fakat bu durumda artan akım kaynaklı kayıplar motorun ısı davranışını etkileyeceği için bu bölgede çalışırken oldukça dikkatli olmak gerekmektedir. Bu çalışmada, moment-hız eğrisi elde edilirken sadece akım limiti içerisinde kalınmış ve motora alan zayıflatma uygulanarak daha yüksek hızlara çıkılabilmektedir. Şekil 4.19'de alan zayıflatma bölgesi öncesi ve sonrasında izlenen akım yörüngesi ve alan zayıflatma uygulanarak elde edilen moment-hız ve güç-hız eğrilerinin değişimleri gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi motordan nominal hızda elde edilebilecek güç 20,4 kW seviyelerindedir. Motorun nominal hızı 1700 rpm iken





Şekil 4.19. (a) Alan zayıflatma bölgesi öncesi ve sonrasında izlenen akım yörüngesi ve (b) alan zayıflatma uygulanarak elde edilen moment-hız ve güç-hız eğrilerinin değişimleri

bu hızda motordan elde edilebilecek moment 114,5 N.m'dir. Motora alan zayıflatma uygulanması durumunda motordan elde edilebilecek maksimum hız ise 2600 rpm seviyelerindedir.

#### 4.4.3. Kayıpların incelenmesi

SMSM'lerde oluşan kayıpların temelde dört farklı bileşenden meydana geldiği söylenebilir: Demir kayıpları, mıknatıs kayıpları, DC ve AC bakır kayıpları ve mekanik kayıplar. Sürekli mıknatıslı motorlarda ortaya çıkan bu kayıp bileşenlerinin genel gösterimi ve açıklamaları Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda DC,  $I^2R$  bakır kayıpları çoğunlukla dominanttır. Bununla birlikte, yüksek hızın veya yüksek kutup sayısının neden olduğu yüksek frekans değerlerinin yanında, stator ve rotor laminasyonlarında ortaya çıkan yüksek akı yoğunluğu seviyeleri ise demir kayıplarının artmasına neden olabilmektedir. Yüksek frekansın neden olduğu en



Şekil 4.20. SMSM'lerde kayıp bileşenlerinin genel gösterimi

önemli kayıp bileşenlerinden biri de AC bakır kayıplarıdır. Stator sargılarının yerleşimine de bağlı olan bu kayıp bileşeninin hesaplanması sürekli ve maksimum çalışma koşullarında motorda en yüksek sıcaklık değerlerinin elde edildiği stator sargılarının ulaşacağı sıcaklık seviyelerinin belirlenmesi açısından oldukça önem arz eder. Mıknatıslarda oluşan kayıp bileşeninin kaynağı ise girdap akımlarının neden olduğu kayıp mekanizmasıdır. Diğer kayıp bileşenlerine göre mıknatıs kaybı bileşenini ortadan kaldırmak için nispeten kolay yöntemler uygulanabilmektedir. Bunlardan en önemlileri; mıknatısı radyal ya da aksel yolda parçalara ayırmaktır. Fakat bu yöntem hem mıknatıs maliyetini artırmakta hem de üretim işçiliğini bir miktar yukarı taşımaktadır. Son olarak, kayıp bileşenlerinden sonuncusu mekanik kayıplardır. Rulmanlar, sızdırmazlık birimleri ve sürtünmeye neden olan tüm mekanizmalar motor mekanik kayıplarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen motorda standart, düşük çaplı bir bilyalı rulman kullanılmıştır.

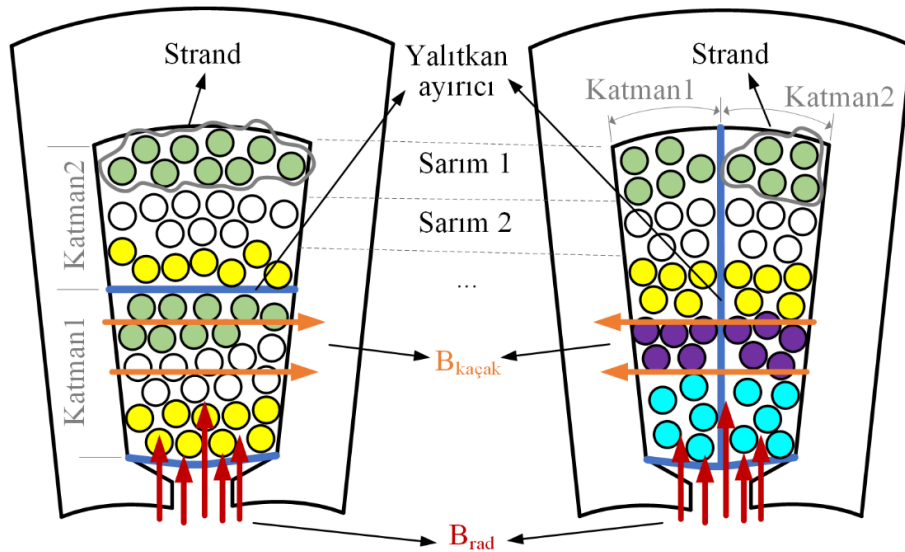
Rulman kayıplarının düşük olması ve bir sızdırmazlık elemanı kullanılmaması nedeniyle mekanik kayıplar ihmal edilecektir. Bu kayıp mekanizması dışındaki diğer tüm bileşenler ise ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve elde edilen sonuçlar bu bölümde özetlenmiştir.

Önceki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde açıklandığı üzere, 9-faz DSY'ne sahip AD-ÇTGSM motorun stator sargıları dengesiz kesir-oluklu dağıtılmış sargı yapısına sahiptir. Konsantre sargılı motorların aksine dağıtılmış sargı yapısına sahip motorların en önemli dezavantajlarından birisi sargı sonu uzunluklarının yüksek olması, bu nedenle de sargı dirençlerinin yüksek olmasıdır. Sürekli mıknatıslı bir senkron motorun stator DC bakır kaybı,

$$P_{cu} = m \times I_{faz}^2 \times R_{faz} \quad (4.9)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Burada  $m$  faz sayısını,  $I_{faz}$  faz akımını,  $R_{faz}$  ise faz direncini ifade etmektedir. Çalışma kapsamında incelenen motorun bakır kaybı Denklem (4.9) kullanılarak 250 W olarak hesaplanmıştır.

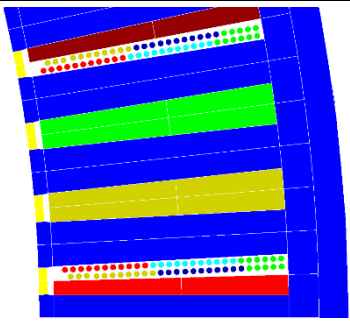
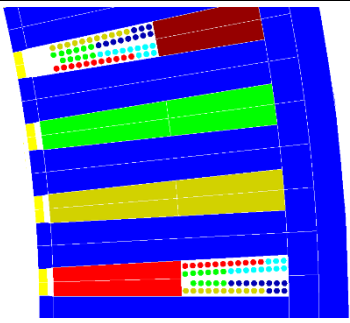
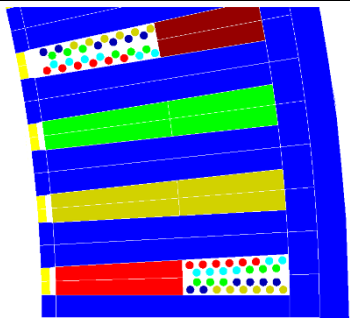
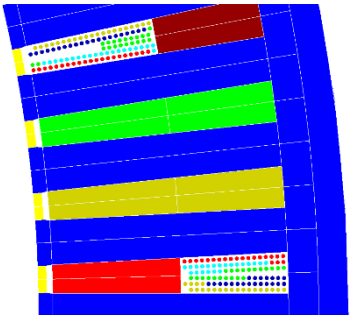
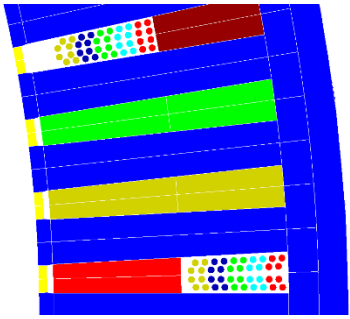
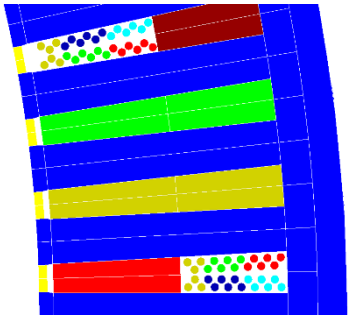
Önerilen 9-faz çubuk tip gömülü mıknatıslı rotora sahip motorun kutup sayısının 36 olması nedeniyle yüksek hızlarda frekans seviyesi artmaktadır. Bu nedenle, anma hızı ve üzerindeki hızlarda motordaki AC bakır kayıplarının incelenmesi önem arz etmektedir. AC kayıplar temelde skin ve proximity kayıpları olmak üzere iki bileşen-

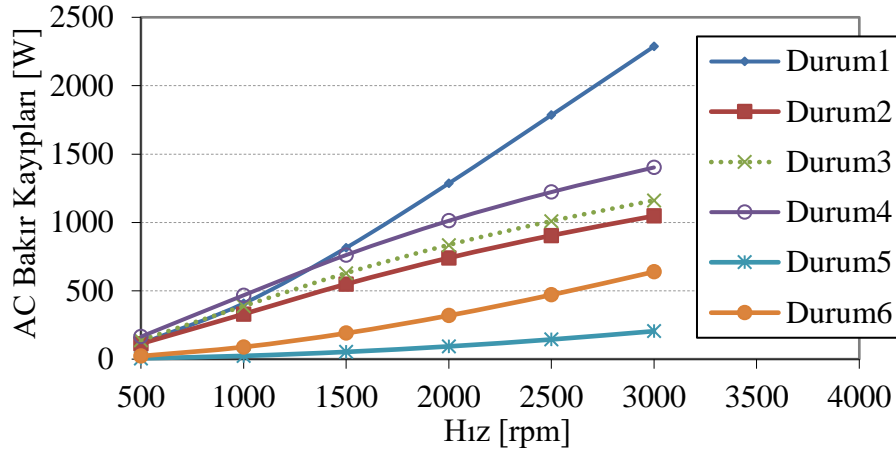


Şekil 4.21. İki katmanlı bir sargıda farklı bobin yerleşimlerinin, strand sayılarının, radyal ve kaçak akıların gösterimi

den meydana gelmektedir. Skin kayıpları özellikle büyük tel çapına ( $\emptyset_{tel}$ ) sahip bobinlerde girdap akımları oluşması sebebiyle akımın bobinin dış kesitine akmasından kaynaklanmaktadır. Bu kayıp bileşenini ortadan kaldırmak için uygulanan en bilinen yöntem strand sayısının artırılmasıdır. Fakat bu durumda mıknatıslardan kaynaklanan radyal akılar ve sargılardan kaynaklanan kaçak akılar sebebiyle birbirlerine paralel olan bobinler arasında akı farkı proximity kayıplarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, bobinler yerleşimleri, tel çapları ve strand sayıları gibi parametreler AC kayıpların azaltılmasında oldukça önemlidir. Şekil 4.21’de iki katmanlı bir sargıda farklı bobin yerleşimlerinin, strand sayılarının, radyal ve kaçak akıların gösterimi verilmiştir. Çalışma kapsamında önerilen 9-faz motorun AC kayıpları farklı tel çapları ve strand sayıları olması durumları için incelenmiştir. Ayrıca bobinler farklı konumlara yerleştirilerek bobin yerleşimlerinin AC kayıplara etkisi de ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Önerilen 9-faz motorun AC kayıp analizinde incelenen tüm durumlar Tablo 4.5’de özetlenmiştir. Şekil 4.22’de ise Tablo 4.5’de verilen farklı durumlar için elde edilen AC kayıplar gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bobinlerin stator iç çapından stator oluk derinliği boyunca yerleştirildiği durumda

Tablo 4.5. Önerilen 9-faz motorun AC kayıp analizinde incelenen farklı durumlar

Durum 1	Durum 2	Durum 3
$\emptyset_{tel}=0,7$ mm ve 11 strand	$\emptyset_{tel}=0,7$ mm ve 11 strand	$\emptyset_{tel}=0,95$ mm ve 6 strand
		
Durum 4	Durum 5	Durum 6
$\emptyset_{tel}=0,5$ mm ve 21 strand	$\emptyset_{tel}=0,8$ mm ve 8 strand	$\emptyset_{tel}=0,95$ mm ve 6 strand
		



Şekil 4.22. Önerilen 9-faz motorda farklı tel çapı, strand sayısı ve bobin yerleşim durumları için AC bakır kayıplarının hıza bağlı değişimleri

(Durum 1) özellikle yüksek hızlardaki AC kayıplar DC kayıpların 9 katına kadar çıkabilmektedir. Bununla birlikte bobinler Durum 2’de gösterilen şekilde altlı üstlü yerleştirildiği durumda 3000 rpm hızdaki kayıplar %54 azaltılabilmektedir. Analizi gerçekleştirilen tüm koşullar incelendiğinde en düşük AC bakır kayıplarının Durum 5’de elde edildiği Şekil 4.22’de görülmektedir.

DC ve AC bakır kayıplarının yanında önerilen 9-faz ÇTGSM motorun demir kayıpları ve mıknatıs kayıpları da bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Demir kayıpları ilk olarak G. Bertotti tarafından [212] ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Hatta literatüre de Bertotti demir kayıpları olarak geçmiştir. Demir kayıpları temelde üç kategoriye ayrıştırılabilir: Histerezis ( $P_h$ ), girdap ( $P_g$ ) ve yardımcı ( $P_y$ ) kayıplar. Bu üç kayıp bileşenin toplamı toplam demir kaybını vermektedir. Daha ayrıntılı bir şekilde ifade etmek gerekirse, elektrikli motorlarda laminasyonlarda oluşan Bertotti demir kayıpları [212];

$$P_{\text{demir}} = \underbrace{k_h B_{\text{max}}^2 f}_{P_h} + \underbrace{k_g (B_{\text{max}} f)^2}_{P_g} + \underbrace{k_y (B_{\text{max}} f)^{3/2}}_{P_y} \quad (4.10)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanabilmektedir. Burada  $k_h$ ,  $k_g$  ve  $k_y$  sırasıyla histerezis, girdap ve yardımcı kayıp katsayılarını ifade etmektedir. Eşitlikte verilen  $B_{\text{max}}$  laminasyondaki maksimum akı yoğunluğunu,  $f$  ise frekansı belirtmektedir.  $k_h$  ve  $k_e$

katsayıları malzeme üreticilerinin kataloglarda maksimum akı yoğunluğu ve frekans değerleri için sağladıkları demir kaybı değerleri ile hesaplanabilmektedir.  $k_e$  katsayısı;

$$k_e = \frac{\pi^2 \sigma_m d^2}{6} \quad (4.11)$$

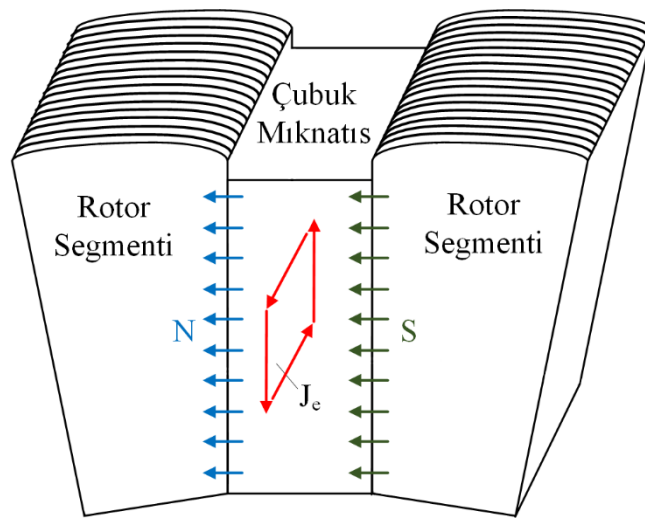
ile hesaplanabilir. Burada  $\sigma_m$  manyetik malzemenin elektriksel iletkenliğini,  $d$  ise tek bir laminasyon tabakasının kalınlığını ifade etmektedir.  $k_y$  katsayısı ise;

$$k_y = \sqrt{\sigma_m V_0 K} \quad (4.12)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanabilir. Burada  $V_0$  Bertotti teoremine göre iki manyetik obje arasındaki zorlayıcı manyetik alan şiddetinin farkına bağlı olan sabit bir alanı ve  $K$  laminasyon tabakasının enine kesitini ifade etmektedir. Yukarıda verilen eşitliklerden de görüldüğü üzere laminasyonlarda oluşan demir kayıpları temelde malzeme özelliklerine, manyetik akı yoğunluğuna ve frekansa bağlı olarak değişmektedir.

Çubuk tip rotora sahip gömülü mıknatıslı motorlarda oluşan mıknatıs kayıplarının kaynağı girdap akımlarıdır. Şekil 4.23’de mıknatıs akısına dik yönde oluşan girdap akım yolu kırmızı renk ile gösterilmiştir. Mıknatıslarda oluşan girdap akımı kaybı aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanabilir [213]:

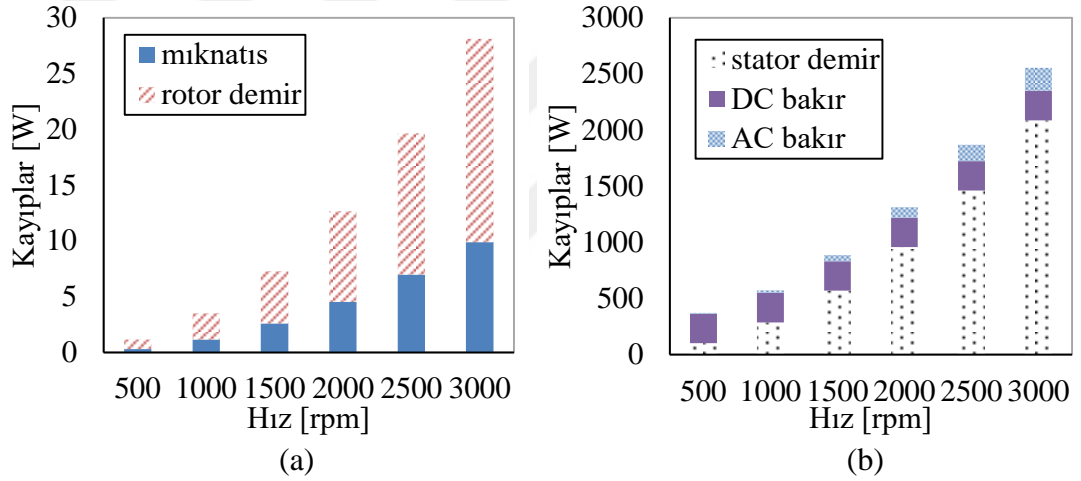
$$P_{\text{girdap}} = l_e \int_{\Omega_e} \frac{J_e^2}{\sigma_m} d\Omega \quad (4.13)$$



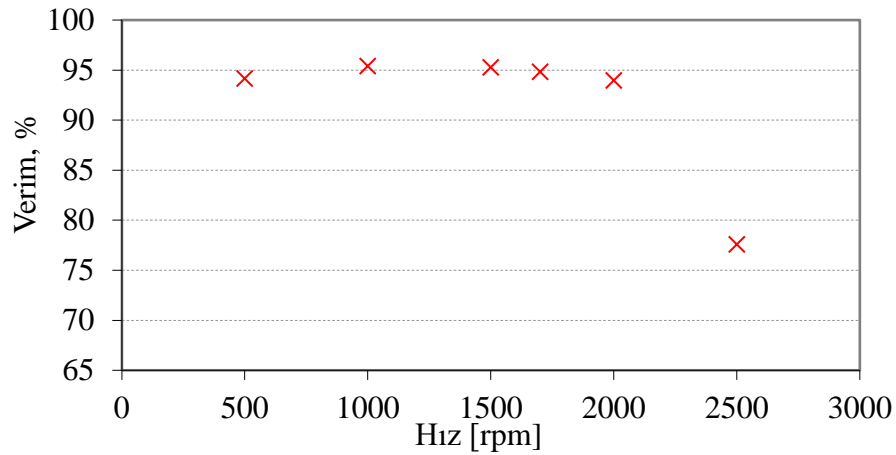
Şekil 4.23. Çubuk tip rotorlu motorun mıknatıslarında oluşan girdap akım yolu

Burada  $l_e$  mıknatıs eksenel uzunluğunu  $\sigma_m$  mıknatıs malzemesinin elektriksel iletkenliğini,  $\Omega_e$  manyetik skaler potansiyeli,  $J_e$  ise akım yoğunluğu ifade etmektedir.

Şekil 4.24(a)'da farklı rotor hızlarında SEA sonucu elde edilen mıknatıs ve rotor demir kayıpları gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi 3000 rpm hızda mıknatıs kayıpları 9,9 W iken rotor demir kayıpları ise 18,2 W olarak elde edilmiştir. Şekil 4.24(b)'de ise yine farklı rotor hızlarında SEA sonucu elde edilen DC ve AC bakır kayıpları ile stator demir kayıplarının değişimleri gösterilmiştir. Stator demir kayıplarının dominant olduğu ve 3000 rpm rotor hızındaki demir kaybının 2,09 kW seviyelerinde olduğu görülmektedir. Yukarıda AC bakır kaybını minimize etmek için yapılan çalışmalar sonucunda en düşük kayıp değerleri Durum 5 için elde edilmişti. Durum 5'de tel kesiti ve strand sayısı değiştirildiği için DC bakır kaybında önceki duruma göre %4,9'luk bir



Şekil 4.24. Farklı hızlarda elde edilen: (a) Rotor demir ve mıknatıs kayıplarının ve (b) AC ve DC bakır kayıplarının ve stator demir kayıplarının değişimleri



Şekil 4.25. Önerilen 9-faz DSY'ne sahip AD-ÇTGSM motorun verim-hız eğrisi

artış olmuş ve Denklem (4.9) kullanılarak hesaplanan yeni kayıp değeri 262,2 W olarak elde edilmiştir. 3000 rpm rotor hızında elde edilen AC bakır kaybı ise 204,9 W seviyelerindedir.

Son olarak, çıkış gücü, giriş gücü ile tüm kaybın toplamına oranlanarak motor verimi elde edilmiştir. Şekil 4.25’de önerilen 9-faz DSY’ne sahip AD-ÇTGSM motorun verim-hız eğrisi gösterilmiştir. Motor verimi anma hızında %94,8 olarak elde edilmiştir.

#### **4.5. 9-Faz DSY’ne Sahip YSM ve GSM Motorların Performans Karşılaştırması**

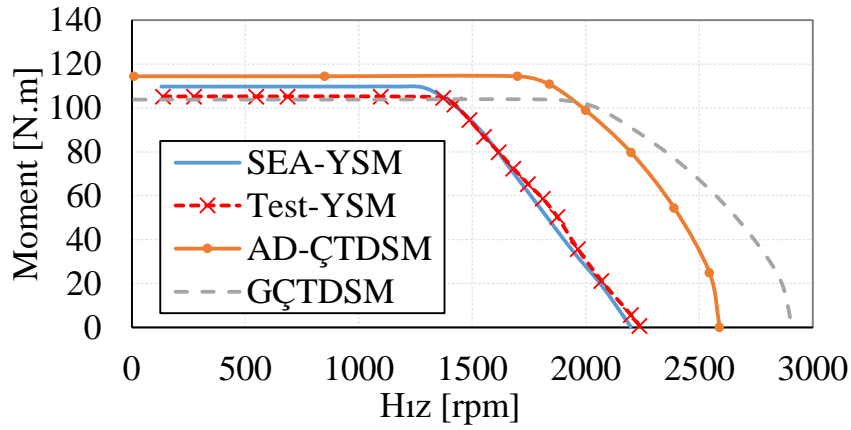
Bu bölümde, iki farklı çubuk tip gömülü mıknatıslı rotor yapılı 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip motorların performans sonuçları ile referans alına 9-faz YSM motorun performans verileri karşılaştırılmıştır. İncelenen motorların stator boyutları ve akım x sarım sayıları tamamen aynı tutulmuştur. Adil bir karşılaştırma yapabilmek adına motorlarda kullanılan mıknatıs miktarları da aynı tutulmuştur. 9-faz SM motorların performans verileri Tablo 4.6’da karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere, önerilen AD-ÇTGSM rotor yapısına motor en yüksek ortalama momente ve moment dalgalanmasına sahiptir. Bununla birlikte, momentin mıknatıs miktarına oranının en yüksek olduğu motor geleneksel çubuk tip rotora sahip olan yapıdır. Tüm motorlar için zıt-EMK gerilimi toplam harmonik bozulmalarının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bunun yanında, gerilim harmonikleri % THB seviyeleri incelendiğinde minimum değer YSM motor için elde edildiği görülmektedir.

Şekil 4.26’de farklı rotor yapılarına sahip tüm motorların alan zayıflatma uygulanarak elde edilmiş moment-hız eğrileri verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi sabit moment bölgesinde, önerilen AD-ÇTGSM rotor yapısına sahip motorun ortalama moment çıkışı en yüksektir. Bununla birlikte, çubuk tip rotor tasarımına sahi gömülü mıknatıslı motorların her ikisi de hemen hemen aynı mil gücü çıkışına sahiptir. Bununla birlikte güç yoğunluğu en düşük olan rotor yapısı YSM motora aittir. Ayrıca sonuçlardan görüleceği ve beklenildiği üzere gömülü mıknatıslı rotor yapısına sahip motorların alan zayıflatma yeteneğinin YSM motora göre oldukça gelişmiş olduğu gözlenmektedir.



Tablo 4.6. 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip YSM, GÇTGSM ve AD-ÇTGSM motorların performans karşılaştırması

	Referans YSM Motor	Geleneksel Çubuk Tip Motor	Önerilen AD-ÇTGSM Motor
DC bara gerilimi (V)		300	
Faz akımı (A)		32	
Sarım sayısı		5	
Faz direnci (mOhm)		54,2	
Anma momenti (N.m)	109,7	103,9	114,7
Anma hızı (rpm)	1400	1840	1700
Moment dalgalanması yüzdesi	0,8	1,5	3,56
Hat gerilimi THB yüzdesi	0,2	0,7	0,6
Moment/mıknatıs ağırlığı oranı (N.m/kg)	76,8	88,6	76,5



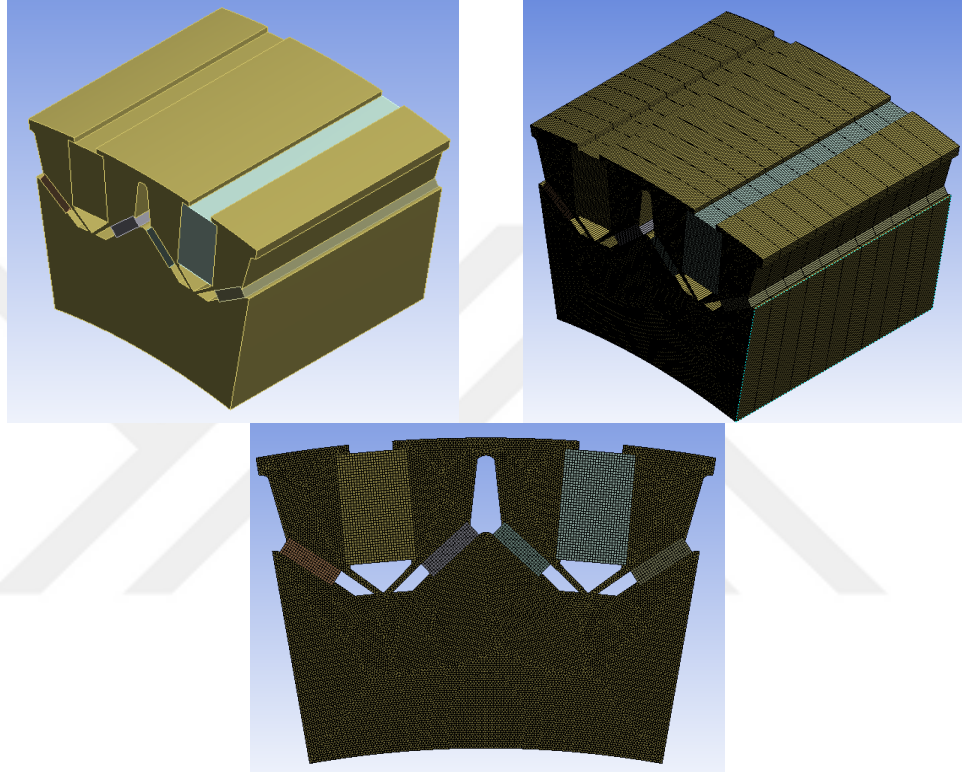
Şekil 4.26. 9-faz DSY'ne sahip referans YSM, GÇTGSM ve önerilen AD-ÇTGSM motorların moment-hız eğrilerinin karşılaştırılması (300Vdc bara geriliminde elde edilmiştir)

#### 4.6. AD-ÇTGSM Motor Yapısal Analizleri

Bölüm 3.2'de motor tasarım sürecinde izlenecek adımların detayları verilmiştir. Elektromanyetik tasarım sürecinden sonraki aşama motorun yapısal bütünlüğünün kontrol edildiği yapısal analiz ve kontrol çevrimidir. Bu bölümde, elektromanyetik analizler sonucunda boyutlarına karar verilen nihai motor geometrisi için belirlenen yük ve hız koşullarında rotor üzerinde oluşan gerilme seviyeleri ve yer değiştirme miktarları yapısal analizler ile belirlenmiştir. Önerilen rotor geometrisindeki rotor laminasyonunda ince köprüler olması nedeniyle özellikle bu bölgelerde oluşabilecek problemlerin önceden belirlenmesi önem arz etmektedir.

Tablo 4.7. Yapısal analizde kullanılan malzemeler ve özellikleri

	Malzeme	Poisson's Oranı	Young's Modülü (GPa)	Akma Dayanımı (MPa)
Rotor Laminasyonu	M270-35A	0,3	200	400
Mıknatıslar	NdFeB	0,24	160	80

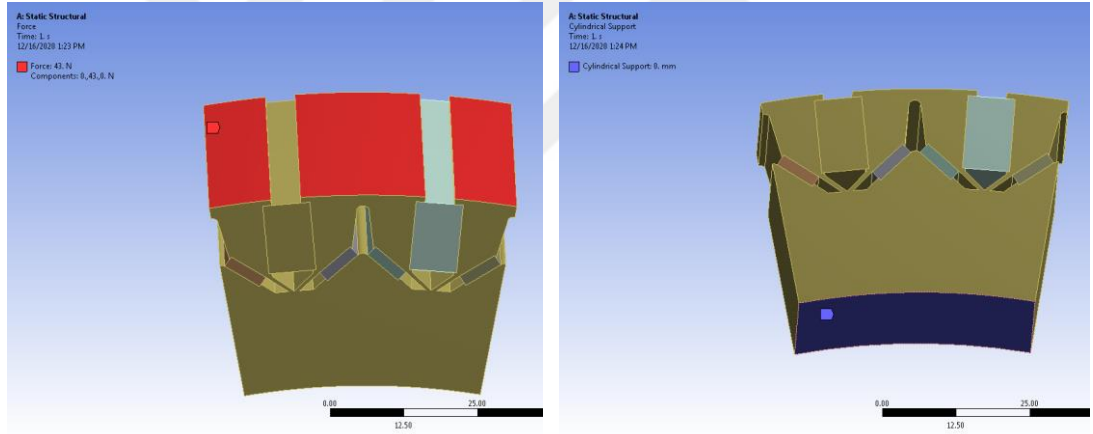


Şekil 4.27. Mekanik analizi gerçekleştirilen rotor geometrisi ve oluşturulan ağ yapısı

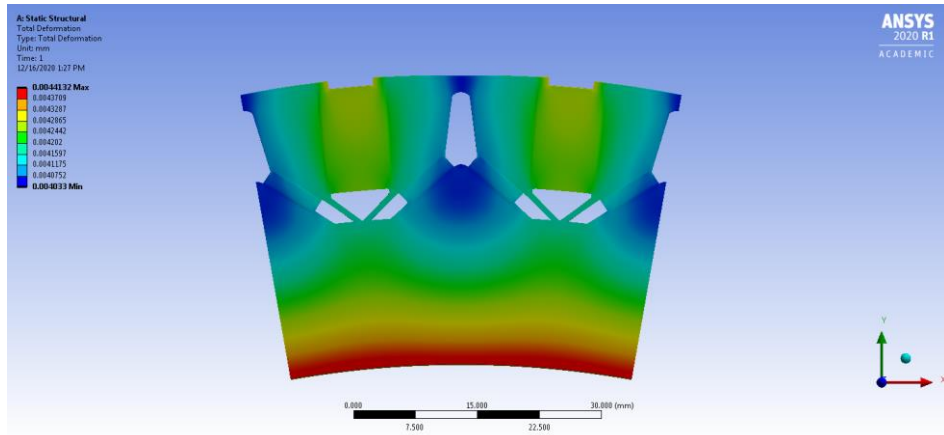
Önerilen 9-faz motorda kullanılan malzemeler ve yapısal analizlerde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 4.7’de verilmiştir. Rotorda M270-35A sınıfı laminasyonlar, mıknatıslar için ise NdFeB türü mıknatıslar kullanılmıştır. Şekil 4.27’de mekanik analizi gerçekleştirilen rotor geometrisinin ve oluşturulan ağ yapısının 1/18’i gösterilmiştir.

Mekanik analizlerde uygulanan sınır koşulları Şekil 4.28’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi motor nominal momenti için rotor yüzeyine 43 N’luk açılal kuvvet ve rotor iç yüzeyinde de radyal yönde serbest silindirik destek tanımlanmıştır. Ayrıca analizler tüm yüzeylerin motorun 1700 rpm nominal hızda döndüğü tanımlanarak gerçekleştirilmiştir. Bu durumda elde edilen çözümde silindirik destekte teğetsel

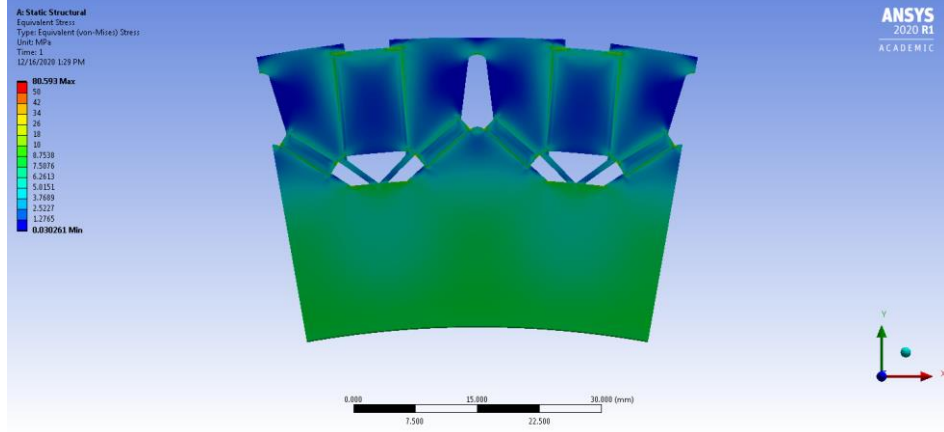
yönde 116,16 N.m tepki kuvveti oluşmaktadır. Tanımlanan yük ve sınır koşulları altında rotorda oluşan toplam yer değiştirme ve eşdeğer gerilme seviyeleri sırasıyla Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'de gösterilmiştir. En yüksek toplam yer değiştirme değeri 4,4  $\mu\text{m}$  olarak rotor iç yüzeyinde elde edilmektedir. Bu değer oldukça düşük olduğu ve ihmal edilebilir bir seviyede kaldığı söylenebilir. Bununla birlikte, Şekil 4.30'de verilen eşdeğer gerilme seviyesi incelendiğinde en yüksek gerilmenin 80,6 MPa olarak akı-destekleyici mıknatısların temas ettiği rotor laminasyonunda oldukça lokal bir bölgede oluştuğu görülmektedir. Rotor laminasyonu akma dayanımının 400 MPa olduğu düşünülürse lokal bir bölgede oluşan bu gerilme seviyesinde bile yaklaşık 5 katlık bir güvenlik faktörü olduğu görülmektedir. Bunun yanında, rotor üzerinde oluşan ortalama eşdeğer gerilmenin 4,41 MPa gibi düşük bir seviyede kaldığı görülmektedir. Sonuç olarak, nihai rotor geometrisinin belirlenen yük ve sınır koşulları altında rotor bütünlüğünü olumsuz yönde etkilemeyeceği belirlenmiştir.



Şekil 4.28. Mekanik analizde uygulanan sınır koşulları



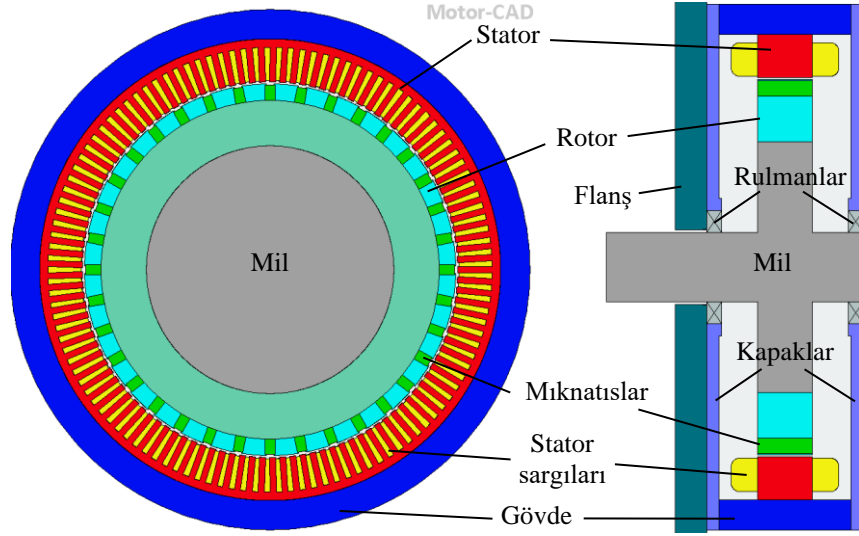
Şekil 4.29. Toplam deformasyon değişiminin gösterimi



Şekil 4.30. Eşdeğer gerilme değişiminin gösterimi

#### 4.7. Motor Isıl Analizleri

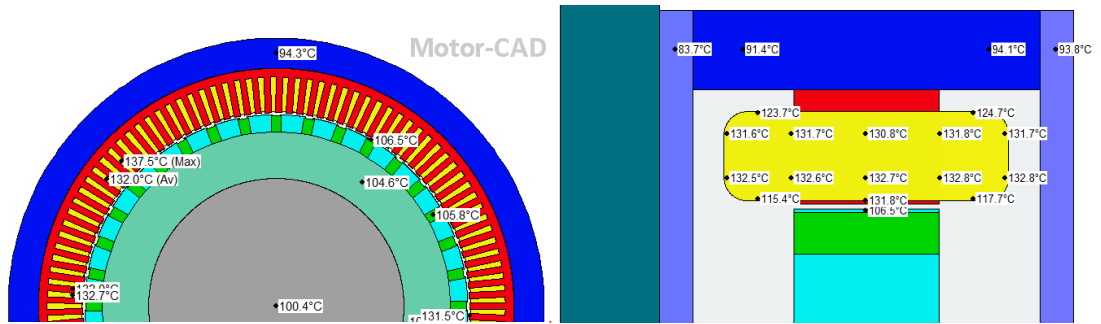
Bölüm 3.2’de detayları verilen motor tasarım döngüsünün son adımı olan ısıl tasarım detayları ve analiz sonuçları bu bölümde verilmiştir. Motorun sıcaklık analizleri ısıl eşdeğer devre tabanlı bir yazılım olan Motor-CAD ile gerçekleştirilmiştir. Bu yazılımda rotor ve stator için hazır bulunan geometrik şablonlar kullanılarak modelleme gerçekleştirilmiş, önerilen AD-ÇTGSM rotor geometrisinde bulunan akı destekleyici mıknatısların ısıl devreye önemli bir etkisi bulunmadığı için rotor geometrisinde geleneksel ÇTGSM rotor yapısı için analizler tamamlanmıştır. Fakat toplam mıknatıs kayıpları tüm mıknatıslara homojen bir şekilde dağıtılmıştır. Şekil 4.31’da ısıl analizleri gerçekleştirilen 9-faz ÇTGSM motor modelinin radyal ve aksel kesitleri gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere motor bir gövde içerisine yerleştirilmiş ve motorun ön ve arka kapakları, rulmanlar ve mili analizlerde modellenmiştir. Ayrıca motor 1 m x 1 m x 0,3 m boyutlarında kare bir flanşa bağlanarak bu yüzey üzerinden ısı atımının sağlanması amaçlanmıştır. Tüm analizlerde ortam sıcaklığı 40°C olarak alınmış, gövde, kapaklar ve mil yüzeyleri üzerinden doğal taşınım ve ışınlam ile ısı atımı gerçekleştiği kabul edilerek modellemeler yapılmıştır. 1700 rpm anma hızı için elde edilen ve ısıl analizin girdisi olan motor kayıpları her bir motor bileşeni için Tablo 4.8’de gösterilmiştir. Şekil 4.32’de 9-faz ÇTGSM motor için kalıcı durumda elde edilen radyal ve aksel sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi motorun maksimum sıcaklığı sargılarda, 137,5°C olarak elde edilmiştir. Stator sargılarında kullanılan bakır yalıtımında H sıcaklık sınıfı yalıtkan malzeme tercih edildiği bu malzemenin sıcaklık



Şekil 4.31. Isıl analizleri gerçekleştirilen 9-faz ÇTGSM motor modeli

Tablo 4.8. Isıl analizde 1700 rpm anma hızı için kullanılan kayıp bileşenleri

	Kayıplar, W
DC ve AC bakır kaybı toplamı	335,6
Toplam mıknatıs kaybı	3,6
Stator demir kaybı	765
Rotor demir kaybı	6,4

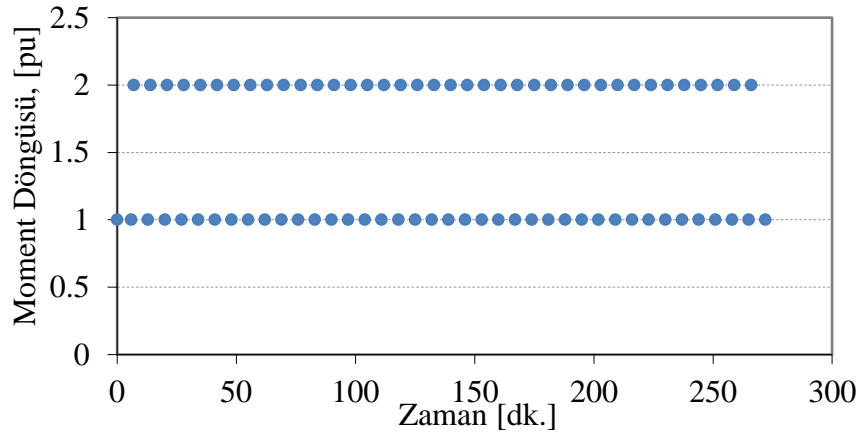


Şekil 4.32. 9-faz ÇTGSM motor için kalıcı durumda elde edilen radyal ve eksenal sıcaklık değerleri

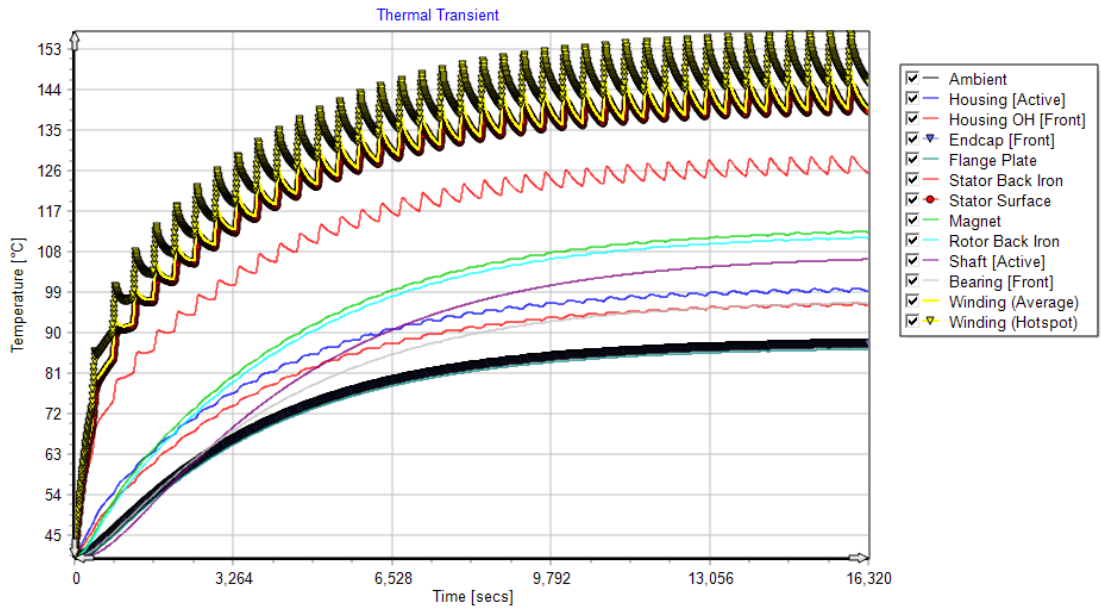
dayanımının 180°C olduğu göz önünde bulundurulursa motor sıcaklık seviyesinin kabul edilebilir bir seviyede olduğu söylenebilir.

Bir sonraki adımda motorun 6 dk. boyunca nominal momenti (1 pu), 1 dk. boyunca da maksimum momenti (2 pu) sağlayacağı bir çalışma döngüsü oluşturulmuş (Şekil 4.33) ve motorun bu geçici durum altındaki ısıl davranışı incelenmiştir. Motorun, Şekil

4.33’de verilen çalışma döngüsüne bağlı olarak geçici durumda farklı motor bileşenleri üzerinde elde edilen sıcaklıkların zaman bağlı değişimleri Şekil 4.34’de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere maksimum sıcaklıklar yine stator sargılarında elde edilmiştir. Stator sargılarının bu çalışma döngüsü altında iken yaklaşık 4,5 saat sonunda kalıcı duruma ulaştığı ortalama sıcaklık 150°C seviyelerindedir. Fakat motor sargılarının anlık olarak 157°C sıcaklık değerlerini de gördüğü ve bobinlerin yalıtım sınıfının her ne kadar bu sıcaklıkların üzerinde olduğu bilinse de elde edilen ısıl stresler altında motorun uzun süre çalışılmasının uygun olmayacağı öngörülmektedir. Bu nedenle, belirlenen çalışma döngüsünde 1 dk. olarak verilen maksimum moment



Şekil 4.33. Motorun moment çalışma döngüsünün zamana bağlı değişimi



Şekil 4.34. Motorun çalışma döngüsüne bağlı olarak geçici durumdaki sıcaklık değişimi

değerinin süresinin azaltılması motorun güvenli çalışma bölgesi içerisinde döngüsünü sürdürmesi açısından önemlidir. Yapılan ısıl analizlerde soğutmanın sadece doğal taşınım ile yapıldığı ve motorda herhangi bir zorlanmış soğutmanın yapılmadığı belirtilmelidir. Ayrıca, elektrikli taşıt uygulamalarında doğrudan tahrik amacı ile kullanılan tüm elektrik motorlarının sıvı soğutma gibi zorlanmış bir soğutma sistemi ile soğutulduğu unutulmamalıdır. Isıl tasarım çalışmaları tez konusunun dışında kaldığı için sıvı soğutma sistemi modellemesi ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır. Fakat önerilen 9-faz motor için bir sıvı soğutma sistemi modellenirse mevcut durumdaki moment seviyesinin üzerine çıkılabileceği söylenebilir.

#### **4.8. Motor Boyutlarını Ölçekleme Yöntemi**

Performansı bilinen bir motor tasarımı farklı bir uygulama için kullanılmak istenirse ve mevcut motor performansı ile yeni uygulamanın ihtiyaçları karşılanamıyorsa mevcut motor boyutları ölçeklendirme yapılarak değiştirilebilir. Ölçeklendirme yöntemi sayesinde boyutları ölçeklendirilen yeni motor tasarımının performans verileri elde edilebilir.

Motor boyutlarında ölçeklendirme yaparak motor performansını tahmin etmek için farklı yöntemler uygulanabilir. Ölçeklendirme ile boyutlarda değişiklik yapmak için temelde iki durum incelenir: radyal ölçeklendirme ve aksel ölçeklendirme (Şekil 4.35). Radyal ölçeklendirmede radyal kesitteki tüm boyutların radyal ölçeklendirme faktörü  $k_R$  ile çarpılması gerekir. Aksel ölçeklendirmede ise aksel uzunluğunun artması veya azalması için aksel ölçeklendirme faktörü  $k_E$  kullanılır. Bu iki ölçeklendirme faktörü dışında, üçüncü boyutta sargılardan kaynaklı ölçeklendirme de hesaba katılmak istenirse yeniden sarma terimi olan  $k_W$ 'nin dikkate alınması gerekir [214, 215]. Bu yöntem, motor boyutlarında ölçeklendirme yapıldıktan sonra manyetik akı yoğunluğunun korunduğu durumlarda doğru sonuç vermektedir. Bu da aksel veya radyal ölçeklendirme yapılması durumunda Denklem (4.17)'de verilen akım yoğunluğunun korunması ile gerçekleştirilebilir.

Yukarıda açıklanan yaklaşım 9-fazlı PM motorlara da uygulanabilmektedir. Aksel ve radyal yönlerdeki motor boyutları ve sarım sayısının ( $N_t$ ) paralel kola ( $a_p$ ) oranı yukarıda belirtilen ölçeklendirme faktörleri yardımı ile şu şekilde elde edilebilir:

$$l_e = k_E l_{e,ref} \quad (4.14)$$

$$D_{dış} = k_R D_{dış,ref} \quad (4.15)$$

$$\frac{N_t}{a_p} = k_W \frac{N_{t,ref}}{a_{p,ref}} \quad (4.16)$$

Burada ref alt indisi ile verilen tüm ifadeler referans motorun parametrelerini göstermektedir. Ayrıca  $l_e$ , motorun aksel uzunluğunu,  $D_{dış}$  stator dış çapını,  $N_t$  ve  $a_p$  ise sırasıyla sarım sayısı ve paralel kol sayısını belirtmektedir.

Oluk içerisindeki akım yoğunluğu ise şu şekilde elde edilebilir:

$$J_e = \frac{1}{k_R} J_{e,ref} \quad (4.17)$$

Yukarıda ifade edilen akım yoğunluğunun elde edilebilmesi için motor sürekli akım ifadesi de aşağıdaki gibi ölçeklendirilmelidir:

$$I_{faz} = \frac{k_R}{k_W} I_{faz,ref} \quad (4.18)$$

Motorun stator sargıları da istenilen anma hızını elde edecek şekilde yeniden uyarlanırsa, stator sargı direnci şu şekilde elde edilir:

$$R_{faz} = \frac{k_W^2}{k_R} (k_E R_{e,ref} + k_R R_{ss,ref}) \quad (4.19)$$

Bu ifade de  $R_e$ , aktif malzeme boyunca aksel uzunluğun oluşturduğu,  $R_{ss}$  ise sargı sonlarındaki sargı dirençlerini ifade etmektedir. 9-Fazlı bir motorda kayıplar hesaplanırken 9 katsayısı atlanmamalıdır.

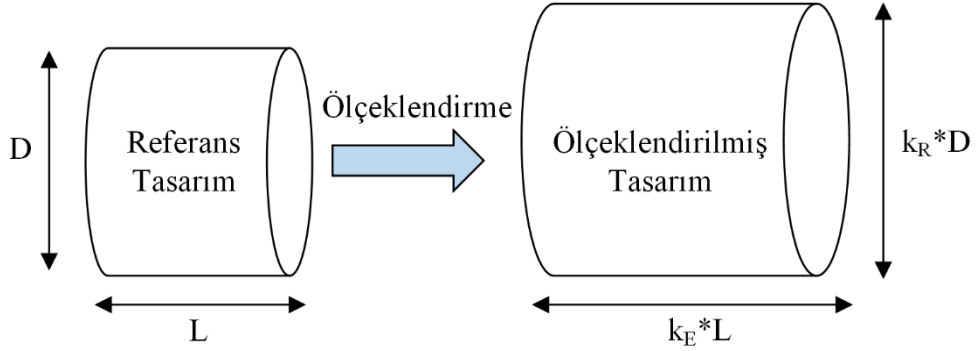
Motorun elektromanyetik moment çıkışı ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$T_{em} = k_R^2 k_E T_{em,ref} \quad (4.20)$$

Bu çalışma kapsamında elektrikli taşıt uygulamaları için tasarlanan motorlar farklı boyutlardaki uygulamalarda kullanılmak istenirse yukarıda verilen eşitlikler yardımı ile yeniden ölçekleme ile fiziksel boyutları belirlenebilir ve istenilen ısı performansı



ve hız değerlerini elde etmek için motor sargı direnci ve motor gerilimi rahatlıkla ayarlanabilir.



Şekil 4.35. Radyal ve aksenal ölçeklendirme

#### 4.9. Özet

Bu bölümde, önerilen 9-faz DSY'ne sahip AD-ÇTGSM motorun elektromanyetik, yapısal ve ısı analiz sonuçları sunulmuştur. Motorun yüksüz ve yüklü durum elektromanyetik performans sonuçları verilmiştir. Ayrıca önerilen 9-faz motora alan zayıflatma uygulanarak moment-hız ve güç-hız eğrisi elde edilmiştir. Buna ek olarak, motorda oluşan DC ve AC bakır kayıpları, stator ve rotor demir kayıpları ve mıknatıs kayıp bileşenleri açıklanmış, önerilen motor için farklı hızlardaki bu manyetik kayıplar elde edilerek motorun verim-hız eğrisi sunulmuştur. Bunun yanında, önerilen gömülü mıknatıslı rotor yapısının nominal çalışma durumu için yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Önerilen 9-faz motorun sürekli ve geçici çalışma koşulları altındaki sıcaklık verileri elde edilmiştir. Son olarak, motor boyutlarını ölçeklendirme yöntemi 9-fazlı motor özelinde kısaca açıklanmıştır.

## 5. SONUÇLAR, KATKILAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Elektrikli taşıt uygulamalarında çoğunlukla 3-faz sürekli mıknatıslı senkron motorlar kullanılmaktadır. Ancak, yüksek güç ihtiyacı olan SUV araçlar, elektrikli iş makinası ve elektrikli otobüs gibi taşıt uygulamalarında çok fazlı motorlara doğru bir yönelim söz konusudur. Bunun iki temel nedeni ise güvenilirlik ve yedekleme faktörleridir. Bu çalışmanın amacı, yüksek güç yoğunluğu gerektiren elektrikli taşıt uygulamaları için 9-faz dengesiz ve asimetrik sargı yapısına sahip gömülü sürekli mıknatıslı bir senkron motor tasarımının gerçekleştirilmesidir.

### 5.1. Sonuçlar

Çalışma kapsamında ilk olarak, faz sayısı 3'ün üzerinde olan elektrik motorları ayrıntılı bir şekilde incelenmiş, bu alanda yapılan akademik yayınlar, tezler ve alınan patentler faz sayılarına göre sınıflandırılarak özetlenmiştir. Yapılan literatür araştırmasında senkron, asenkron, relüktans vb. tüm motorlar incelenmiş ve özellikle motor tasarımı çalışmalarının üzerine yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte, çok fazlı motorların kontrolü üzerine yapılan çalışmalar da literatür araştırması çalışmasında kısaca özetlenmiştir. 3-faz SMSM'ler yapılarının basit, tasarım ve kontrol açısından oturmuş olması nedeniyle hem endüstriyel hem de akademik çalışmalarda günümüzde en sık kullanılan motor türü olduğu söylenebilir. Diğer taraftan, 3'ün katı olmayan çok fazlı motorlar (faz sayısı 3'den büyük olan) için ise aynı ifadeyi kullanmak mümkün değildir. Özellikle motor kontrolü oldukça karmaşık bir hale gelmekte aynı zamanda çok fazlı motorların en önemli özelliklerinden birisi olan yedekleme özelliğini oldukça azaltmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada 3'ün katı olan SM elektrik motorlarına odaklanılmış ve bu motorların avantaj-dezavantajları ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen literatür araştırması kapsamında dengesiz sargı yapısına sahip çok fazlı motorlar için bir çalışma yapılmadığı görülmüştür. Hatta 3-faz DSY'ne sahip SMSM'ler için bile yapılan çalışmaların çok kısıtlı olması bu çalışmanın temel motivasyon kaynaklarından biri olmuştur. DSY kullanmayı gerektiren oluk-kutup kombinasyonlarının en büyük avantajı vuruğu momenti

bileşenini ortadan kaldırmasıdır. Bunun yanında, motordan sinüzoidal bir zıt-EMK gerilim dalga şekli elde edebilme ve motor moment dalgalanmasını azaltması gibi özellikler de bu oluk-kutup kombinasyonlarının tercih edilme nedenleri arasında gösterilebilir.

Tezin ikinci bölümü, dengesiz ve asimetrik sargı teorisinin 3-, 6- ve 9-faz SMSM'ler üzerinde uygulamalı ve ayrıntılı bir şekilde açıklandığı temel bilgileri içeren kısımdır. Bu bölümde, ilk olarak 3-faz dengesiz ve asimetrik sargı yapısına sahip farklı oluk-kutup kombinasyonları incelenmiş, sargı yapılarının elde edilmesi ve dengesiz sargı yapılarının motor MMK değişimleri ve harmonikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. İncelenen motorların sargı şemaları elde edilirken minimum dengesizlik miktarı ve maksimum sargı faktörü hedeflenmiştir. Ayrıca incelenen oluk-kutup kombinasyonları için sargı dengesizlik miktarı değişimleri elde edilmiştir. 39-oluk ve 12-kutuplu bir kombinasyon kullanılarak dengesiz sargı yapısının nasıl çıkarıldığı uygulamalı olarak açıklanmıştır. Kayksız olarak üretilen DSY'ne sahip 12-kutuplu 3-faz motor ile standart tam-sayı oluk dengeli ve simetrik sargı yapısına sahip 36-oluklu 3-faz bir motorun SEA sonuçları karşılaştırılmıştır. DSY'ne sahip 39-oluk ve 12-kutuplu motor için ise SEA sonuçları ile test verilerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

İkinci bölümde incelenen diğer bir konu çift 3-faza sahip 6-faz dengeli ve dengesiz sargı yapıları iki motorun performans karşılaştırmasıdır. Daha sonra, 3-faz sargı setleri arasındaki açının motor performansına etkisini elde etmek için 12- ve 24-kutuplu DSY'ne sahip kombinasyonlar incelenmiştir. Çalışma kapsamında, bu motorlar için önerilen sargı şemalarının ve seçilen oluk-kutup kombinasyonlarının avantajlarını incelemek için SEA tabanlı parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. 6-faz 12-kutuplu tam-sayı oluk dengeli ve kesir-oluk dengesiz motorlar ile 6-faz 24-kutuplu kesir-oluk dengesiz motorun temel performans çıktıları ayrıntılı bir şekilde karşılaştırılmıştır.

İkinci bölümde son olarak, dengeli kesir oluklu ve dengesiz sargı yapısına sahip 9-faz motorların farklı sargı konfigürasyonları ve sargı setlerinin farklı yerleşimleri incelenmiştir. Dengesiz sargı yapıları konfigürasyonları için üç farklı sargı yerleşimine sahip 117-oluk 36-kutuplu motorlar incelenmiş, üçlü 3-faz sargı setleri farklı açılar ile yerleştirilmiştir. Tüm bu seçeneklerin MMK ve harmonikleri karşılaştırmalı olarak

incelenmiştir. Ayrıca bu konfigürasyonların ayrıntılı elektromanyetik SEA gerçekleştirilmiştir. DSY'ne sahip yüzey mıknatıslı topoloji için motor prototipi üretilmiştir. Yüksüz ve yüklü durum motor testleri gerçekleştirilen DSY'ne sahip motorlardan elde edilen sonuçlar SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca 9-faz dengeli kesir-oluklu motor ile önerilen DSY topolojilerine sahip 9-faz motorların performans karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Motorların performans karşılaştırması yapıldığında ortalama moment, DMÇK, toplam kayıp gibi kriterler açısından performans kalitesi en yüksek olan yapının 9-faz dengesiz sargı yapısına sahip olan ve sargıların gruplandırıldığı Seçenek1 olduğu söylenebilir.

9-faz YSM DSY'ne sahip motorun Seçenek1 için verilen performans kriterleri göz önünde bulundurularak tez kapsamında yeni bir gömülü mıknatıslı rotor yapısı önerilmiştir. Önerilen bu motorun rotor yapısı ve çalışma prensibi açıklanmış, motor tasarım sürecinde izlenen yol ve aşamaların detayları verilmiş, tasarımı yapılan 9-faz DSY'ne sahip motorun teknik özellikleri verilerek motor ön tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Ön tasarımı tamamlanan 9-faz DSY'ne ve gömülü sürekli mıknatıslı rotor yapısına sahip motor için ayrıntılı elektromanyetik SEA ile ısıl ve ısıl analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı geometrik parametrelerin motor performansına etkisi incelenmiş ve önerilen 9-faz AD-ÇTGSM motor için yüksüz ve yüklü durum analizleri gerçekleştirilmiştir. Motorun alan zayıflatma uygulanarak moment-hız ve güç-hız eğrileri elde edilmiştir. Ayrıca motorlarda oluşabilecek kayıp mekanizmaları açıklanmış, önerilen 9-faz DSY'ne sahip motorun farklı frekanslardaki DC ve AC bakır, rotor ve stator demir ve mıknatıs kayıpları verilmiştir. Özellikle AC bakır kayıplarında bobinlerin kesitinin ve strand sayısının doğru belirlenmesinin oldukça kritik olduğu görülmüştür. Bunun yanında, bobinlerin yerleşimi de AC bakır kayıplarını önemli ölçüde etkileyen kriterlerden birisidir.

DeneySEL olarak doğrulanmış referans 9-faz YSM motor sonuçları ile önerilen motor performans verileri karşılaştırılmıştır. Önerilen 9-faz AD-ÇTGSM motorun YSM motora göre sabit moment bölgesinde moment sabiti %4,6 ve alan zayıflatma bölgesinde ise çıkabileceği maksimum hız %18,2 daha fazladır. Bu sonuçlar önerilen yapının avantajlarını net bir şekilde göstermektedir.

Bunun yanında, önerilen rotor geometrisi için nominal çalışma hızı ve momentini altında yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. En yüksek gerilmeler 80,6 MPa olarak akı-destekleyici mıknatısların temas ettiği rotor laminasyonunda, lokal bir bölgede elde edilmiştir. Son olarak, motorun yine nominal çalışma koşulları için kalıcı durumdaki ve tanımlanan bir çalışma döngüsü için geçici durumdaki sıcaklık değişimleri elde edilmiştir. Motorun sürekli çalışma bölgesinde herhangi bir zorlayıcı soğutma sistemine gerek kalmadan güvenli çalışma bölgesinde kaldığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, önerilen motor için geçici çalışma koşulları için tanımlanan döngüde maksimum momentin uygulandığı sürenin azaltılması ya da nominal çalışma süresinin artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

## 5.2. Tezin Katkıları

Tez kapsamında yapılan çalışmaların literatüre sunduğu katkılar aşağıda özetlenmiştir:

- Ulusal literatürde ilk defa çok fazlı motorlar için ayrıntılı bir literatür araştırması gerçekleştirilmiştir.
- 3-faz DSY'ne sahip oluk-kutup kombinasyonları gösterilmiş, dengesizlik miktarını minimize ve sargı faktörünü maksimize edecek şekilde sargı şemalarının çıkarılma yöntemleri sunulmuştur. Ayrıca bu motorların sargı faktörleri, MMK değişimleri ve harmonikleri incelenmiştir.
- Çift 3-faza sahip DSY'ne sahip YSM motor tasarımı gerçekleştirilmiş ve 3-faz sargı setleri arasındaki açının motor performansına etkisi incelenmiştir.
- Üç tane 3-faza sahip dengeli ve DSY'ne sahip YSM motor tasarımları gerçekleştirilmiştir. Üç tane 3-faza sahip DSY'ne sahip motorlar için sargı setleri arasındaki açı değiştirilerek sargı yerleşimleri kaynaklı farklı durumlar ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.
- Yeni bir 9-faz AD-ÇTGSM motor tasarımı gerçekleştirilmiş ve alan zayıflatma uygulanarak motor performans verileri elde edilmiştir. Ayrıca bu motorun performans sonuçları ile yine 9-faz DSY'ne sahip YSM ve GÇTGSM motor performans verileri ve moment-hız eğrileri karşılaştırılmıştır.
- 9-faz AD-ÇTGSM motor için DC ve AC bakır, rotor ve stator demir kayıpları ve mıknatıs kayıpları gibi manyetik kayıp bileşenleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

- Önerilen AD-ÇTGSM rotor yapısının mekanik analizleri gerçekleştirilmiştir.
- Önerilen 9-faz gömülü mıknatıslı motorun ısıl analizleri gerçekleştirilmiştir.
- Çok fazlı sürekli mıknatıslı motor özelinde ülkemizde yapılmış ilk ve detaylı bir doküman sunulmuştur.

### 5.3. Gelecek Çalışmalar

Tez kapsamında 3-, 6- ve 9-faz DSY'ne sahip sargı seçenekleri ayrıntılı bir şekilde incelenmesine ve YSM ve ÇTGSM gibi farklı rotor tasarımlarının motor performansına etkileri ayrıntılı bir şekilde sunulmasına rağmen, çok fazlı motorlar alanında yapılacak daha birçok çalışmanın mevcut olduğu rahatlıkla söylenebilir. Gelecek çalışmalarda yapılabilecek çalışmalardan bazıları şunlardır:

- Seri üretimi kolaylaştırmaya yönelik kesir-oluklu dengesiz sargı yapılı konsantre sargılı 6- ve 9-faz oluk-kutup seçeneklerinin motor performansına etkisinin incelenmesi.
- DSY'ne sahip motorlar için hava aralığı MMK harmoniklerinde yer alan zararlı ve temel harmoniğin üstündeki harmoniklerin motor kayıplarına ve motor momentine etkilerinin incelenmesi. Zararlı harmonikleri azaltmak için sargı katmanlarının değiştirilmesi de gelecekte yapılabilecek çalışmalar arasında gösterilebilir.
- 3-, 6- ve 9-faz DSY'ne sahip SMSM'lerin performans verilerinin dengeli kesir-oluklu ve kesir-oluk konsantre sargı yapılı SMSM'lerin performans sonuçları ile karşılaştırılması.
- 6- ve 9-faz DSY'ne sahip motorların kısa devre veya açık devre hatalarına karşı motor kontrol yöntemlerinin incelenmesi.
- Eksenel akılı 6- ve 9-faz DSY'ne sahip motor tasarımlarının ve kontrolünün gerçekleştirilmesi.

## KAYNAKLAR

- [1] Levi E., Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications, *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, 2008, **55**(5), 1893-1909.
- [2] Hendershot J. R., Miller T. J., Design of Brushless Permanent Magnet Motors, *Magna Physics Publications and Clarendon Press Oxford*, 1994.
- [3] Alger P. L., Freiburghouse E. H., Chase, D. D., Double windings for turbine alternators, *AIEE Trans.*, 1930, **49**, 226-244.
- [4] Fuchs E. F., Rosenberg L. T., Analysis of an Alternator with Two Displaced Stator Windings, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1977, **93**(6), 1776-1786.
- [5] Mecrow B. C., Jack A. G., Atkinson D. J., Green S. R., Atkinson, G. J., King A., Green B., Design and testing of a four-phase fault-tolerant permanent-magnet machine for an engine fuel pump, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 2004, **19**(4), 671-678.
- [6] Ede J. D., Atallah K., Jewell G. W., Wang J. B., Howe D., Effect of Axial Segmentation of Permanent Magnets on Rotor Loss in Modular Permanent-Magnet Brushless Machines, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2007, **43**(5), 1207-1213.
- [7] Ede J. D., Atallah K., Wang J. B., Howe D., Effect of optimal torque control on rotor loss of fault-tolerant permanent-magnet brushless machines, *IEEE Trans. on Magnetics*, 2002, **38**(5), 3291-3293.
- [8] Ming C., Chau K. T., Chan C. C., New split-winding doubly salient permanent magnet motor drive, *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, **39**(1), 202-210.
- [9] Ming C., Chau K. T., Chan C. C., Qiang S., Control and operation of a new 8/6 pole doubly salient permanent-magnet motor drive, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2003, **39**(5), 1363-1371.
- [10] Jie C., Jiabin W., Atallah K., D. Howe, Performance Comparison and Winding Fault Detection of Duplex 2-Phase and 3-Phase Fault-Tolerant Permanent Magnet Brushless Machines, *42nd IAS Annual Meeting in Industry Appl. Conference*, 2007.
- [11] Shakouhi S. M., Mohamadian M., Afjei E., Torque ripple minimisation control method for a fourphase brushless DC motor with non-ideal back-electromotive force, *Electric Power Applications, IET*, 2013, **7**(5), 360-368.

- [12] Zhao W., Cheng M., Zhu X., Hua W., Kong X., Analysis of Fault-Tolerant Performance of a Doubly Salient Permanent-Magnet Motor Drive Using Transient Cosimulation Method, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2008, **55**(4), 1739-1748.
- [13] Parsa L., Toliyat H.A., Fault-Tolerant Interior-Permanent-Magnet Machines for Hybrid Electric Vehicle Applications, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2007, **56**(4), 1546-1552.
- [14] Ryu H. M., Kim J. W., Sul S. K., Synchronous-frame current control of multiphase synchronous motor under asymmetric fault condition due to open phases, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2006, **42**(4), 1062-1070.
- [15] Bianchini C., Fornasiero E., Matzen T.N., Bianchi N., Bellini A., Fault detection of a five-phase Permanent-Magnet machine, *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON)*, 2008.
- [16] Bianchi N., Fornasiero E., Space vector harmonic analysis of a five-phase PM motor including asymmetries, *IEEE International Electric Machines and Drives Conf. (IEMDC)*, 2009.
- [17] Gan J., Chau K. T, Chan C. C., Jiang J. Z., A new surface-inset, permanent-magnet, brushless DC motor drive for electric vehicles, *IEEE Trans on, Magnetics*, 2000, **36**(5), 3810-3818.
- [18] Parsa L., Toliyat H. A., Goodarzi A., Five-Phase Interior Permanent-Magnet Motors With Low Torque Pulsation, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2007, **43**(1), 40-46.
- [19] Parsa L., Toliyat H. A., Sensorless Direct Torque Control of Five-Phase Interior Permanent-Magnet Motor Drives, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2007, **43**(4), 952-959.
- [20] Villani M., Tursini M., Fabri G., Castellini L., High Reliability Permanent Magnet Brushless Motor Drive for Aircraft Application, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2012, **59**(5), 2073-2081.
- [21] Bianchi N., Bolognani S., Pré M. D., Impact of Stator Winding of a Five-Phase Permanent-Magnet Motor on Postfault Operations, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2008, **55**(5), 1978-1987.
- [22] Pinheiro M. L., Suemitsu W. I., Permanent magnet synchronous motor drive in vessels with electric propulsion system, *Power Electronics Conference (COBEP)*, Brazilian, 27-31 October 2013.
- [23] Huang X., Goodman A., Gerada C., Fang Y., Lu Q., Design of a Five-Phase Brushless DC Motor for a Safety Critical Aerospace Application, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2012, **59**(9), 3532-3541.



- [24] Chen Q., Liu G., Zhao W., Sun L., Shao M., Liu Z., Design and Comparison of Two Fault-Tolerant Interior-Permanent-Magnet Motors, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2014, **61**(12), 6615-6623.
- [25] Zheng P., Sui Y., Zhao J., Tong C., Lipo T. A., Wang A., Investigation of a Novel Five-Phase Modular Permanent-Magnet In-Wheel Motor, *IEEE Trans. On Magnetics*, 2011, **47**(10), 4084-4087.
- [26] Mohammadpour A., Sadeghi S., Parsa L., A Generalized Fault-Tolerant Control Strategy for Five-Phase PM Motor Drives Considering Star, Pentagon, and Pentacle Connections of Stator Windings, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2014, **61**(1), 63-75.
- [27] Dwari S., Parsa L., Fault-Tolerant Control of Five-Phase Permanent-Magnet Motors With Trapezoidal Back EMF, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2011, **58**(2), 476-485.
- [28] Yu C., Chau K. T., New fault-tolerant flux-mnemonic doubly-salient permanent-magnet motor drive, *Electric Power Applications, IET*, 2011, **5**(5), 393-403.
- [29] Scuiller F., Semail E., Charpentier J. F., Letellier P., Multi-criteria-based design approach of multi-phase permanent magnet low-speed synchronous machines, *Electric Power Applications, IET*, 2009, **3**(2), 102-110.
- [30] Arashloo R. S., Romeral M. J. L., Salehifar M., Moreno E. M., Genetic algorithm-based output power optimisation of fault tolerant five-phase brushless direct current drives applicable for electrical and hybrid electrical vehicles, *Electric Power Applications, IET*, 2014, **8**(7), 267-277.
- [31] Salehifar M., Arashloo M. S., Moreno-Equilaz J. M., Sala V., Romeral L., Fault Detection and Fault Tolerant Operation of a Five Phase PM Motor Drive Using Adaptive Model Identification Approach, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2014, **2**(2), 212-223.
- [32] Immovilli F., Bianchini C., Lorenzani E., Bellini A., Fornasiero E., Evaluation of Combined Reference Frame Transformation for Interturn Fault Detection in Permanent-Magnet Multiphase Machines, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2015, **62**(3), 1912-1920.
- [33] Salehifar M., Arashloo R. S., Moreno-Eguilaz M., Sala V., Romeral L., Observer-based open transistor fault diagnosis and fault-tolerant control of five-phase permanent magnet motor drive for application in electric vehicles, *Power Electronics, IET*, 2015, **8**(1), 76-87.
- [34] Patel V. I., Wang J., Wang W., Chen X., Six-Phase Fractional-Slot-per-Pole-per-Phase Permanent-Magnet Machines With Low Space Harmonics for Electric Vehicle Application, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2014, **50**(4), 2554-2563.

- [35] Abdel-Khalik A. S., Ahmed S., Massoud A. M., Effect of Multilayer Windings With Different Stator Winding Connections on Interior PM Machines for EV Applications, *IEEE Trans. on Magnetics*, 2016, **52**(2), 1-7.
- [36] Abdel-Khalik A. S., Ahmed S., Massoud A. M., A Six-Phase 24-Slot/10-Pole Permanent-Magnet Machine With Low Space Harmonics for Electric Vehicle Applications, *IEEE Trans. on Magnetics*, 2016, **52**(6), 1-10.
- [37] Brockerhoff P., Burkhardt Y., Egger K., Rauh H., Highly integrated drivetrain solution: Integration of motor, inverter and gearing, *4th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, Nuremberg, 2014.
- [38] Patel V. I., Wang J., Nair S. S., Demagnetization Assessment of Fractional-Slot and Distributed Wound 6-Phase Permanent Magnet Machines, *IEEE Trans. on Magnetics*, 2015, **51**(6), 1-11.
- [39] Naidu M., Gopalakrishnan S., Nehl T. W., Fault-Tolerant Permanent Magnet Motor Drive Topologies for Automotive X-By-Wire Systems, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2010, **46**(2), 841-848.
- [40] Matyas A., Aroquiadassou G., Mpanda-Mabwe A., Martis C., Biro K., Torque ripple analysis of a 42V fault tolerant six-phase permanent magnet synchronous machine, *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Glendale, AZ, 2010.
- [41] Dajaku G., Gerling D., A Novel 24-Slots/10-Poles Winding Topology for Electric Machines, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Niagara Falls, 2011.
- [42] Dajaku G., Gerling D., Efficiency Improvements of Electric Machines for Automotive Application, *EVS26 Int. Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, Los Angeles, 6-9 May 2012.
- [43] Dajaku G., Hofmann H., Hetemi F., Dajaku X., Xie W., Gerling D., Comparison of Two Different IPM Traction Machines With Concentrated Winding, *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, 2016, **63**(7), 4137-4149.
- [44] Balamurali A., Iyer K. L. V., Ramkumar K., Kar N. C., Analytical approach towards quantitative electrical loss analysis of dual three-phase permanent magnet synchronous motors, *Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, 2014.
- [45] Tong C., Wu F., Zheng P., Sui Y., Cheng L., Analysis and design of a fault-tolerant six-phase permanent-magnet synchronous machine for electric vehicles, *17th Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Hangzhou, 2014.
- [46] Bojoi R., Cavagnino A., Tenconi A., Vaschetto S., Multiphase PM machine for More Electric Aircraft applications: Prototype for design validation, *38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 25-28 October 2012.

- [47] Jiang X., Huang W., Cao R., Hao Z., Jiang W., Electric Drive System of Dual-Winding Fault-Tolerant Permanent-Magnet Motor for Aerospace Applications, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2015, **62**(12), 7322-7330.
- [48] Alnajjar M., Gerling D., Six-phase electrically excited synchronous generator for More Electric Aircraft, *Int. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Anacapri, 2016.
- [49] Haylock J. A., Fault tolerant drives for safety critical applications, PhD Thesis, University of Newcastle upon Tyne, 1998.
- [50] Mecrow B. C., Jack A. G., Haylock J. A., Coles J., Fault tolerant permanent magnet machine drives, *IEE Proceedings in Electric Power Appl.*, 1996, **143**(6), 437-442.
- [51] Green S., Atkinson D. J., Jack A. G., Mecrow B. C., King A., Sensorless operation of a fault tolerant PM drive, *IEE Proc. in Electric Power Appl.*, 2003, **150**(2), 117-125.
- [52] Haylock J. A., Mecrow B. C., Jack A. G., Atkinson D. J., Operation of fault tolerant machines with winding failures, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 1999, **14**(4), 1490-1495.
- [53] Haylock J. A., Mecrow B. C., Jack A. G., Atkinson D. J., Operation of a fault tolerant PM drive for an aerospace fuel pump application, *IEE Proc. in Electric Power Appl.*, 1998, **145**(5), 441-448.
- [54] Barcaro M., Bianchi N., Magnussen F., Six-Phase Supply Feasibility Using a PM Fractional-Slot Dual Winding Machine, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2011, **47**(5), 2042-2050.
- [55] Barcaro M., Bianchi N., Magnussen F., Analysis and Tests of a Dual Three-Phase 12-Slot 10-Pole Permanent-Magnet Motor, *IEEE Trans. on Industry Appl.*, 2010, **46**(6), 2355-2362.
- [56] EL-Refaie A. M., Shah M. R., Ronghai Q., Kern J. M., Effect of Number of Phases on Losses in Conducting Sleeves of Surface PM Machine Rotors Equipped With Fractional-Slot Concentrated Windings, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2008, **44**(5), 1522-1532.
- [57] Barcaro M., Bianchi N., Magnussen F., Faulty Operations of a PM Fractional-Slot Machine With a Dual Three-Phase Winding, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, **58**(9), 3825-3832.
- [58] Demir Y., Aydin M., A Novel Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor With Asymmetric Stator Winding, *IEEE Trans. on Magnetics*, 2016, **52**(7), 1-5.
- [59] Demir Y., Aydin M., A Novel Asymmetric and Unconventional Stator Winding Configuration and Placement for Dual Three-Phase Surface PM Motor, *IEEE Trans. on Magnetics*, 2017, **53**(11), 1-5.

- [60] Stumberger B., Stumberger, G. Hamler A., Trlep M., Jesenik M., Gorican V., Increasing of output power capability in a six-phase flux-weakened permanent magnet synchronous motor with a third harmonic current injection, *IEEE Trans. on Magnetics*, 2003, **39**(5), 3343-3345.
- [61] Swamy M. M., Kume T., Maemura A., Morimoto S., Extended high-speed operation via electronic winding-change method for AC motors, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2006, **42**(3), 742-752.
- [62] Shao L., Shao, Hua W., Zhu Z. Q., Huang W., Wu Z., Li F., Cheng M., Investigation on Phase Shift Between Multiple Multiphase Windings in Flux-Switching Permanent Magnet Machines, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2017, **53**(3), 1958-1970.
- [63] Yiguang C., Xiaowei L., Yonghuan S., Analysis of three-phase short circuit for dual-redundancy PMSM with low thermal coupling and non-electromagnetic coupling between windings, *18th Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Pattaya, 2015.
- [64] Zhao W., Kwon B. I., Lipo T. A., Development and test of a dual-stator, spoke-type ferrite permanent magnet motor with high torque performance for direct-drive applications, *Int. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Anacapri, 2016.
- [65] Tessarolo A., Mezzarobba M., Barbini N., Improved four-layer winding design for a 12-slot 10-pole permanent magnet machine using unequal tooth coils, *42nd Annual Conf. of the IEEE Ind. Electronics Society (IECON)*, Florence, 2016.
- [66] Qi G., Shi L., Duan S., Zhou L., Ma D., Analysis of Flux-Weakening Performances of Dual Three-Phase PM Brushless AC Motors with Alternate Winding Connections, *Sixth Int. Conf. on Electromagnetic Field Problems and Appl. (ICEF)*, 19-21 June 2012.
- [67] Abdel-Khalik A. S., Ahmed S., Massoud A. M., Low Space Harmonics Cancellation in Double-Layer Fractional Slot Winding Using Dual Multiphase Winding, *IEEE Trans. on Magnetics*, 2015, **51**(5), 1-10.
- [68] Ursu D., Gradinaru V., Fahimi B., Boldea I., Six-Phase BLDC Reluctance Machines: FEM-Based Characterization and Four-Quadrant Control, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2015, **51**(3), 2105-2115.
- [69] Wu F., Zheng P., Sui Y., Yu B., Wang P., Design and Experimental Verification of a Short-Circuit Proof Six-Phase Permanent Magnet Machine for Safety Critical Applications, *IEEE Trans. on Magnetics*, 2014, **50**(11), 1-4.
- [70] Luo Z., Liang D., Liu X., Yang X., A complete model characterization of dual three-phase permanent magnet brushless machine for electromechanical servoactuation, *17th Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Hangzhou, 2014.

- [71] Wang K., Zhu Z. Q., Ren Y., Ombach G., Torque Improvement of Dual Three-Phase Permanent-Magnet Machine With Third-Harmonic Current Injection, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2015, **62**(11), 6833-6844.
- [72] Wang K., Zhang J., Gu Z., Sun H., ZHU Z. Q., Torque Improvement of Dual Three-Phase Permanent Magnet Machine Using Zero Sequence Components, *IEEE Trans. on Magnetics*, DOI: 10.1109/TMAG.2017.2699323.
- [73] Mitcham A. J., Antonopoulos G., Cullen J. J. A., Favourable slot and pole number combinations for fault-tolerant PM machines, *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 2004, **151**(5), 520-525.
- [74] Messenger G., Binder A., Evaluation of a Dual Half-Pitched Three-Phase Bearingless High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor Prototype, *ETG/GMM-Symposium Innovative small Drives and Micro-Motor Systems (IKMT)*, Cologne, Germany, 2015.
- [75] Shao L., Hua W., Cheng M., A new 12/11-pole dual three-phase flux-switching permanent magnet machine, *18th Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Pattaya, 2015.
- [76] Barcaro M., Alberti L., Bianchi N., Thermal analysis of dual three-phase machines under faulty operations, *IEEE Int. Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED)*, 5-8 Sept. 2011.
- [77] Barcaro M., Faggion A., Bianchi N., Bolognani S., Sensorless Rotor Position Detection Capability of a Dual Three-Phase Fractional-Slot IPM Machine, *IEEE Trans. on Industry Appl.*, 2012, **48**(6), 2068-2078.
- [78] Baneira F., Doval-Gandoy J., Yepes A. G., López Ó., Pérez-Estévez D., Control strategy for dual three-phase PMSMs with minimum losses in the full torque operation range under single open-phase fault, *IEEE Energy Conv. Congress and Exposition (ECCE)*, Milwaukee, WI, 2016.
- [79] Yongxiang X., Hao Y., Jibin Z., A Fault-Tolerant Control Strategy for Six-Phase Transverse Flux Tubular PMLM Based on Synthetic Vector Method, *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2015, **43**(5), 1332-1338.
- [80] Hoang K. D., Zhu Z. Q., Foster M., Optimum look-up table for reduction of current harmonics in direct torque controlled dual three-phase permanent magnet brushless AC machine drives, *6th IET Int. Conf. on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD)*, 27-29 March 2012.
- [81] Pulvirenti M., Da Rù D., Bianchi N., Scarcella G., Scelba G., Secondary saliencies decoupling technique for self-sensing integrated multi-drives, *IEEE Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED)*, Nadi, 2016.
- [82] Döbler R., Schuhmann T., Inderka R. B., Malottki S. V., High performance drive for electric vehicles-System comparison between three and six phase permanent magnet synchronous machines, *18th European Conf. on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, Karlsruhe, 2016.

- [83] Almarhoon A. H., Zhu Z. Q., Xu P. L., Improved Pulsating Signal Injection Using Zero-Sequence Carrier Voltage for Sensorless Control of Dual Three-Phase PMSM, *IEEE Trans. on Energy Conv.*, 2017, **32**(2), 436-446.
- [84] Melo V. F. M. B., Jacobina C. B., Rocha N., Sousa R. P. R., Braga-Filho E. R., Hybrid Dual and NPC Six-Phase Drive Systems, *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2017, **32**(11), 8606-8617.
- [85] Zhu Z. Q., Lee B., Integrated Field and Armature Current Control for Dual Three-Phase Variable Flux Reluctance Machine Drives, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, **32**(2), 447-457.
- [86] Harischandruppa N., Bhat A., A Fixed Frequency ZVS Integrated Boost Dual Three-Phase Bridge DC-DC LCL-type Series Resonant Converter, *IEEE Trans. on Power Electronics*, DOI: 10.1109/TPEL.2017.2679041.
- [87] Hu Y., Zhu Z. Q., Liu K., Current Control for Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors Accounting for Current Unbalance and Harmonics, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2014, **2**(2), 272-284.
- [88] Karttunen J., Kallio S., Peltoniemi P., Silventoinen P., Pyrhonen O., Decoupled Vector Control Scheme for Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2014, **61**(5), 2185-2196.
- [89] Zhao Y., Lipo T. A., Modeling and control of a multiphase induction machine with structural unbalance, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 1996, **11**(3), 578-584.
- [90] Zhao Y., Lipo T. A., Space vector PWM control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 1995, **31**(5), 1100-1109.
- [91] Lyra R. O. C., Lipo T. A., Torque density improvement in a six-phase induction motor with third harmonic current injection, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2002, **38**(5), 1351-1360.
- [92] Munoz A. R., Lipo T. A., Dual stator winding induction machine drive, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2000, **36**(5), 1369-1379.
- [93] Nelson R. H., Krause P. C., Induction Machine Analysis for Arbitrary Displacement Between Multiple Winding Sets, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 1974, **93**(3), 841-848.
- [94] Moradian M., Soltani J., An Isolated Three-Phase Induction Generator System With Dual Stator Winding Sets Under Unbalanced Load Condition, *IEEE Trans. on Energy Conv.*, 2016, **31**(2), 531-539.
- [95] Popescu M., Dorrell D. G., Alberti L., Bianchi N., Staton D. A., Hawkins D., Thermal Analysis of Duplex Three-Phase Induction Motor Under Fault

- Operating Conditions, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2013, **49**(4), 1523-1530.
- [96] Alberti L., Bianchi N., Experimental Tests of Dual Three-Phase Induction Motor Under Faulty Operating Condition, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2012, **59**(5), 2041-2048.
- [97] Wu Z., Ojo O., Coupled-circuit-model simulation and airgap-field calculation of a dual-stator-winding induction machine, *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 2006, **153**(3), 387-400.
- [98] Guerrero J. M., Ojo O., Total Airgap Flux Minimization in Dual Stator Winding Induction Machines, *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2009, **24**(3), 787-795.
- [99] Salmon J. C., Williams B. W., A split-wound induction motor design to improve the reliability of PWM inverter drives, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 1990, **26**(1), 143-150.
- [100] Gopakumar K., Ranganthan V. T., Bhat S. R., Split-phase induction motor operation from PWM voltage source inverter, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 1993, **29**(5), 927-932.
- [101] Che H. S., Levi E., Jones M., Duran M. J., Hew W. P., Rahim N. Abd, Operation of a Six-Phase Induction Machine Using Series-Connected Machine-Side Converters, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2014, **61**(1), 164-176.
- [102] Bojoi R., Levi E., Farina F., Tenconi A., Profumo F., Dual three-phase induction motor drive with digital current control in the stationary reference frame, *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 2006, **153**(1), 129-139.
- [103] Che H. S., Duran M. J., Levi E., Jones M., Hew W. P., Abd N., Rahim, Postfault Operation of an Asymmetrical Six-Phase Induction Machine With Single and Two Isolated Neutral Points, *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2014, **29**(10), 5406-5416.
- [104] Scuiller F., Charpentier J. F., Semail E., Clenet S. A global design strategy for multiphase machine applied to the design of a 7-phase fractional slot concentrated winding PM machine, *Proc. Int. Conf. Electrical Machines (ICEM)*, 2006.
- [105] Fornasiero E., Bianchi N., Bolognani S., Slot Harmonic Impact on Rotor Losses in Fractional-Slot Permanent-Magnet Machines, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2012, **59**(6), 2557-2564.
- [106] Aslan B., Semail E., Legranger J., General Analytical Model of Magnet Average Eddy-Current Volume Losses for Comparison of Multiphase PM Machines With Concentrated Winding, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 2014, **29**(1), 72-83.

- [107] Figueroa J. R., Cros J., Viarouge P., Torque speed characteristic of polyphase permanent magnet motors with one phase fault, *2014 Int. Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2-5 September 2014.
- [108] Cerini D. J., NaK-Nitrogen Liquid Metal MHD Converter Tests at 30 kW, *AIAA Journal*, 1974, **12**(1), 78-83.
- [109] Bugenis S. J., Vanagas J., Gečys S., Optimal Phase Number of Induction Motor with the Integrated Frequency Converter, *Electronics and Electrical Engineering*, 2008, **88**(8), 67-70.
- [110] Kando K. V., Method of Speed Regulation for Polyphase Induction Motors, 1928, U. S. Patent No. 1,662,549A, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [111] Chen X., Wang J., Patel V. I., A Generic Approach to Reduction of Magnetomotive Force Harmonics in Permanent-Magnet Machines With Concentrated Multiple Three-Phase Windings, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, **50**(11), 1-4.
- [112] Gautam A., Karugaba S., Ojo J., Modeling of nine-phase interior permanent magnet machines (IPM) including harmonic effects, *IEEE International Electric Machines & Drives Conf. (IEMDC)*, 15-18 May 2011.
- [113] Ruba M., Fodorean D., Analysis of Fault-Tolerant Multiphase Power Converter for a Nine-Phase Permanent Magnet Synchronous Machine, *IEEE Trans. on Industry Appl.*, 2012, **48**(6), 2092-2101.
- [114] Burkhardt Y., Spagnolo A., Lucas P., Zavesky M., Brockerhoff P., Design and analysis of a highly integrated 9-phase drivetrain for EV applications, *Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM)*, 2-5 Sept. 2014.
- [115] Brockerhoff P., Burkhardt Y., Ehlgen T., Lucas P., Electrical drivetrain without rare earth magnets and integrated inverter with inherent redundancy, *3rd Int. Electric Drives Production Conf. (EDPC)*, 29-30 October 2013.
- [116] Eunsoo J., Yoo H., Sul S. K., Choi H. S., Choi Y. Y., A Nine-Phase Permanent-Magnet Motor Drive System for an Ultrahigh-Speed Elevator, *IEEE Trans. on Industry Appl.*, 2012, **48**(3), 987-995.
- [117] Sauter J., Mirzaian A., Encoderless control of a 6MW permanent magnet synchronous generator, *15th European Conf. on Power Electronics and Appl. (EPE)*, 2-6 September 2013.
- [118] Renukadevi G., Rajambal K., Novel PWM technique for  $n^{\text{th}}$  harmonic injection for N-phase VSIs, *Int. Conf. on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, 17-18 April 2013.
- [119] Ahmed S. M., Iqbal A., Abu-Rub H., Rodriguez J., Rojas C. A., Saleh M., Simple Carrier-Based PWM Technique for a Three-to-Nine-Phase Direct AC-AC Converter, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2011, **58**(11), 5014-5023.



- [120] Bennett J. W., Mecrow B. C., Atkinson D. J., Atkinson G. J., Safety-critical design of electromechanical actuation systems in commercial aircraft, *IET Electric Power Appl.*, 2011, **5**(1), 37-47.
- [121] Rockhill A. A., Lipo T. A., A simplified model of a nine phase synchronous machine using vector space decomposition, *IEEE Power Electronics and Machines in Wind Appl. (PEMWA)*, 24-26 June 2009.
- [122] Ramezani M., Ojo O., A new sensor-less position estimation method for a nine-phase Interior Permanent Magnet machine using a high frequency injection in a non-torque generating circuit, *IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition (APEC)*, 15-19 March 2015.
- [123] Danilevicz Y. B., Drozdowski P., Mazgaj W., Sobczyk T. J., Szular Z., The influence of failures of a multiphase p.m. synchronous generator and a static voltage converter system on the generator electromagnetic torque, *IEEE Russia on Power Tech.*, 27-30 June 2005.
- [124] Kelly J. W., Strangas E. G., Miller J. M., Control of a continuously operated pole-changing induction machine, *IEEE International in Electric Machines and Drives Conference*, 1-4 June 2003.
- [125] Singh B., Bhuvaneswari G., Garg V., Nine-Phase AC-DC Converter for Vector Controlled Induction Motor Drives, *Annual IEEE in INDICON*, 11-13 December 2005.
- [126] Karugaba S., Ojo O., Determination of active and reactive powers in multiphase machines, *IEEE in Energy Conversion Congress and Exposition*, 20-24 September 2009.
- [127] Baoming G., Dongsen S., Weiliang W., Fang Zheng P., Winding Design, Modeling and Control for Pole-Phase Modulation Induction Motors, *IEEE Trans. in Magnetics*, 2013, **49**(2), 898-911.
- [128] Gautam A., Ojo O., Ramezani M., Momoh O., Computation of equivalent circuit parameters of nine-phase induction motor in different operating modes, *IEEE in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 15-20 September 2012.
- [129] Gautam A., Ojo J. O., Variable speed multiphase induction machine using pole phase modulation principle, *IEEE Industrial Electronics Society in IECON 2012-38th Annual Conference*, 25-28 October 2012.
- [130] Pan Z., Ikaheimo J., Nine-phase variable speed drive system with reduced switching PWM, *2014 International Conference in Electrical Machines*, 2-5 Sept. 2014.
- [131] Zicheng L., Zedong Z., Yongdong L., Ling P., Parameter identification of nine-phase induction machines with concentrated windings, *17th International Conference in Electrical Machines and Systems*, 22-25 October 2014.

- [132] Umesh B. S., Kumar N. K., Sivakumar K., Performance improvement of a nine phase pole phase modulated induction motor drive, *IEEE International Conference in Industrial Technology*, 17-19 March 2015.
- [133] Momoh O., Performance evaluation of delta connected 9-phase induction machine for electric propulsion application, *IEEE in Electric Ship Technologies Symposium*, 21-24 June 2015.
- [134] Bastos R. R., Valle R. M., Nau S. L., Cardoso F. B. J., Modelling and analysis of a nine-phase induction motor with third harmonic current injection, *9th International Conference in Power Electronics and ECCE Asia*, 1-5 June 2015.
- [135] Subotic I., Bodo N., Levi E., Jones M., Onboard Integrated Battery Charger for EVs Using an Asymmetrical Nine-Phase Machine, *IEEE Trans. in Industrial Electronics*, 2015, **62**(5), 3285-3295.
- [136] Bostanci E., Neuschl Z., Plikat R., Influence of Phase Magnetic Couplings on Phase Current Characteristics of Multiphase BLDC Machines With Overlapping Phase Windings, *IEEE Trans. on Magnetics*, 2015, **51**(9), 1-13.
- [137] Gerrits T., Duarte J. L., Wijnands C. G. E., Lomonova E. A., Paulides J. J. H., Encica L., Twelve-phase open-winding SPMSM development for speed dependent reconfigurable traction drive, *Tenth Int. Conf. on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 31 March-2 April 2015.
- [138] Zhang Z., Yan Y., Yang S., Bo Z., Development of a New Permanent-Magnet BLDC Generator Using 12-Phase Half-Wave Rectifier, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2009, **56**(6), 2023-2029.
- [139] Damiano A., Marongiu I., Monni A., Porru M., Design of a 10 MW multi-phase PM synchronous generator for direct-drive wind turbines, *39th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 10-13 November 2013.
- [140] Wei K., Wang Dong., Yu X., Su Z., Cheng S., Research on AC output characteristic of a multiphase permanent magnet generator with rectified load, *IEEE Conf. and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 31 Aug.- 3 September 2014.
- [141] Monni A., Marongiu I., Serpi A., Damiano A., Design of a fractional slot multi-phase PMSG for a direct-drive wind turbine, *Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM)*, 2-5 September 2014.
- [142] Yi X., Wang D., Guo Y., Zhang X., Transient voltage regulation performance simulation of a twelve-phase synchronous generator-rectifier system, *IEEE Conf. and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 31 August-3 September 2014.
- [143] Tessarolo A., Castellan S., Menis R., Feasibility and performance analysis of a high power drive based on four synchro-converters supplying a twelve-phase synchronous motor, *IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC)*, 15-19 June 2008.

- [144] Huang Z., Sun Y., Wang S., Yu X., Analysis and diagnosis on open-circuit fault of diode rectifier in 12-phase synchronous generator system, *16th European Conf. on Power Electronics and Appl. (EPE'14-ECCE Europe)*, 26-28 August 2014.
- [145] Damiano A., Gatto G., Marongiu I., Serpi A., A multi-phase PM synchronous generator torque control for direct-drive wind turbines, *Int. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 20-22 June 2012.
- [146] Dejia Z., Zhengming Z., Shanming W., Jianyun C., Vector control for a twelve-phase synchronous motor, *Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 8-11 October 2007.
- [147] Pan Z., Bkayrat R. A., Modular Motor/Converter System Topology With Redundancy for High-Speed, High-Power Motor Applications, *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2010, **25**(2), 408-416.
- [148] Singh B., Bhuvanewari G., Garg V., A Twelve-Phase AC-DC Converter for Power Quality Improvement in Direct Torque Controlled Induction Motor Drives, *1ST IEEE Conf. on Industrial Electronics and Appl.*, 24-26 May 2006.
- [149] Shao L., Hua W., Dai N., Tong M., Cheng M., Mathematical Modeling of a Twelve-Phase Flux-Switching Permanent Magnet Machine for Wind Power Generation, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, DOI: 10.1109/TIE.2015.2461514.
- [150] Moinoddin S., Abu-Rub H., Iqbal A., Alammari R., Modelling and implementation of SVPWM technique for a fifteen-phase voltage source inverter for sinusoidal output waveform, *IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT)*, 17-19 March 2015.
- [151] Jianchun L., Qiang W., Yongping L., The mathematical model and field-oriented control for 15-phase brushless direct current motor with an opened phase, *Proc. of the Fifth Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, August 2001.
- [152] Xue S., Xu H., Fang C., Huang Q., Multiphase permanent magnet synchronous motor PWM technology, *Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 26-29 October 2013.
- [153] Wang D., Wu X., Chen J., Guo Y., Cheng S., A Distributed Magnetic Circuit Approach to Analysis of Multiphase Induction Machines With Nonsinusoidal Supply, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 2015, **30**(2), 522-532.
- [154] Liu Z., Peng L., Li Y., Zheng Z., Wang K., Modeling and control of 15-phase induction machine under one phase open circuit fault, *Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 26-29 October 2013.

- [155] Wang Y., Xuhui W., Xue S., Space Vector PWM Control of Multi-Phase Induction Motor Drives Based on Orthogonal Vector Spaces Concept, *IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC)*, 17-21 June 2007.
- [156] Hou L., Su Y., Chen L., DSP-based indirect rotor field oriented control for multiphase induction machines, *IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf. (IEMDC'03)*, 1-4 June 2003.
- [157] Cros J., Viarouge P., Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 2020, **17**(2), 248-253.
- [158] Khutoretsky G. M., Vorontsov A. I., Drozdova L. A., Yanik B. S., Six-phase winding of electric machine stator, 1979, Patent No. U.S. 4,132,914, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [159] Sebastian T., Hallman S. J. C., Brushless DC motor having reduced torque ripple for electric power steering, 1999, Patent No. U.S. 5,982,067, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [160] Smith J. S., Kudrick G. J., Bilal A. R., Synchronous machine fault tolerant arrangement, 2003, Patent No. U.S. 6,504,281, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [161] Oohashi A., Asao Y., Adachi K., Dynamo-electric machine having winding phase groups of series-connected windings connected in parallel, 2003, Patent No. U.S. 6,552,463 B2, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [162] Liang F., Swales S. H., Miller J., Low noise automotive alternator, 2003, Patent No. U.S. 6,570,289 B1, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [163] Hanyang B. C., Vehicle alternator stator winding having dual slot configuration, 2006, Patent No. U.S. 7,075,206 B1, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [164] Lipo T. A., Muñoz-García A. R., Dual stator winding induction machine drive, 2001, Patent No. U.S. 6,242,884 B1, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [165] Sakamoto M., Tozune A., Hybrid type double three-phase electric rotating machine, 2008, Patent No. U.S. 7,342,330 B2, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [166] Davis R. M., Power supply to a stator of a polyphase reluctance machine, 1997, Patent No. U.S. 5,703,457 B2, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [167] Nakai H., Fuma H., Inaguma Y., Nakamura S., Motor driving control device, 2004, Patent No. U.S. 6,956,341 B2, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [168] Cyr J. M., Shi R., Multiple Phase Electric Motor and Drive, 2008, Patent No. U.S. 2008/0309262 A1, *U.S. Patent and Trademark Office*.

- [169] Ming L. W., Nine-phase flux-switching permanent magnet motor, 2013, Patent No. CN 103,269,134 A, *China Patent and Trademark Office*.
- [170] Takehara I., Motor, 1988, Patent No. JPH 011,982,64 A, *Japan Patent Office*.
- [171] Yu C. M., Wei F., Guotang Z., Default phase fault-tolerant control method of nine-phase flux-switching permanent magnetic motor, 2014, Patent No. CN 103,973,191 A, *China Patent and Trademark Office*.
- [172] Cabot S., Improvements in Electric Conversion, 1916, Patent No. GB 106,008 A, *United Kingdom Intellectual Property Office*.
- [173] Gray J., Improvements in and relating to Alternating Electric Current Machines, 1919, Patent No. GB 132,876 A, *United Kingdom Intellectual Property Office*.
- [174] <https://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/electric-drives/hybrid-drives/Documents/elfa-components-data-sheets.pdf/>, (Ziyaret tarihi: 01.07.2017).
- [175] <https://www.tm4.com/wp-content/uploads/2013/12/TM4-SUMO-Product-Brochure-web.pdf/>, (Ziyaret tarihi: 01.07.2017).
- [176] EL-Refaie A. M., Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges, *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, 2010, **57**(1), 107-121.
- [177] Rao J., Gao Y., Li D., Qu R., Performance Analysis of Interior Permanent Magnet Motor Using Overlapping Windings With Fractional Ratio of Slot to Pole Pair, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 2016, **26**(7), 1-5.
- [178] Jahns T. M., Soong W. L., Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives-a review, *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, 1996, **43**(2), 321-330.
- [179] Bianchi N., Bolognani S., Pre M. D., Grezzani G., Design considerations for fractional-slot winding configurations of synchronous machines, *IEEE Trans. on Ind. Applications*, 2006, **42**(4), 997-1006.
- [180] Zhu Z. Q., Xia Z. P., Wu L. J., Jewell G. W., Influence of slot and pole number combination on radial force and vibration modes in fractional slot PM brushless machines having single- and double-layer windings, *IEEE Energy Conv. Cong. and Exposition*, San Jose, CA, 2009.
- [181] Demir Y., Aydin M., Design of several un-skewed radial flux permanent magnet synchronous motors with asymmetric and symmetric AC windings — A comparative study, *IEEE Energy Conv. Cong. and Exposition (ECCE)*, Pittsburgh, PA, 2014.
- [182] Cassat A., Espanet C., Coleman R., Burdet L., Leleu E., Torregrossa D., M'Boua J., Miraoui A., A Practical Solution to Mitigate Vibrations in Industrial PM

- Motors Having Concentric Windings, *IEEE Trans. on Ind. Applications*, 2012, **48**(5), 1526-1538.
- [183] Han S. H., Jahns T. M., Soong W. L., Güven M. K., Illindala M. S., Torque Ripple Reduction in Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Using Stators With Odd Number of Slots Per Pole Pair, *IEEE Trans. on Energy Conv.*, 2010, **25**(1), 118-127.
- [184] Ishak D., Zhu Z. Q., Howe D., Comparison of PM brushless motors, having either all teeth or alternate teeth wound, *IEEE Trans. on Energy Conv.*, 2006, **21**(1), 95-103.
- [185] Huth G., Permanent-magnet-excited AC servo motors in tooth-coil technology, *IEEE Trans. on Energy Conv.*, 2005, **20**(2), 300-307.
- [186] Alberti L., Bianchi N., Theory and Design of Fractional-Slot Multilayer Windings, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2013, **49**(2), 841-849.
- [187] Yokoi Y., Higuchi T., Miyamoto Y., General formulation of winding factor for fractional-slot concentrated winding design, *IET Electric Power Applications*, 2016, **10**(4), 231-239.
- [188] Tommaso A. O. D., Genduso F., Miceli R., A New Software Tool for Design, Optimization and Complete Analysis of Rotating Electrical Machines Windings, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, **51**(4), 1-10.
- [189] Smith A. C., Delgado D., Automated AC winding design, *5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD)*, Brighton, UK, 2010.
- [190] Islam M. S., Mir S., Sebastian T., Underwood S., Design considerations of sinusoidally excited permanent-magnet Machines for low-torque-ripple applications, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, **41**(4), 955-962.
- [191] Demir Y., El-Refaie A., Aydin M., Investigation of Asymmetric and Unbalanced Winding Structures for 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines, *IECON 2019 - 45th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal, 2019.
- [192] Demir Y., Aydin M., Design, analysis and validation of a dual three-phase 72-slot, 12-pole permanent magnet synchronous motor, *XXII Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, 2016.
- [193] Dosiek L., Pillay P., Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machines, *IEEE Trans. on Industry Appl.*, 2007, **43**(6), 1565-1571.
- [194] Ishikawa T., Slemon G. R., A method of reducing ripple torque in permanent magnet motors without skewing, *IEEE Trans. on Magnetics*, 1993, **29**(2), 2028-2031.

- [195] Chen Y. S., Zhu Z. Q., Howe D., Slotless brushless permanent magnet machines: influence of design parameters, *IEEE Trans. on Energy Conv.*, 1999, **14**(3), 686-691.
- [196] Bhattacharya S., Mascarella D., Joós G., Cyr J. M., Xu J., A Dual Three-Level T-NPC Inverter for High-Power Traction Applications, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2016, **4**(2), 668-678.
- [197] Onsal M., Demir Y., Aydin M., A New Nine-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor With Consequent Pole Rotor for High-Power Traction Applications, *IEEE Trans. on Magnetics*, 2017, **53**(11), 1-6.
- [198] Sarigiannidis A. G., Beniakar M. E., Kakosimos P. E., Kladas A. G., Papini L., Gerada C., Fault Tolerant Design of Fractional Slot Winding Permanent Magnet Aerospace Actuator, *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, 2016, **2**(3), 380-390.
- [199] Qiao M., Jiang C., Y Zhu., Li G., Research on Design Method and Electromagnetic Vibration of Six-Phase Fractional-Slot Concentrated-Winding PM Motor Suitable for Ship Propulsion, *IEEE Access*, DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2636341.
- [200] Scuiller F., Semail E., Charpentier J. F., General modeling of the windings for multi-phase ac machines - Application for the analytical estimation of the mutual stator inductances for smooth air gap machines, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2010, **50**(3), 31102.
- [201] Demir Y., Yolacan E., A. EL-Refaie M., Aydin M., Investigation of Different Winding Configurations and Displacements of a Nine-Phase Permanent-Magnet-Synchronous Motor With Unbalanced AC Winding Structure, *IEEE Trans. on Ind. Applications*, 2019, **55**(4), 3660-3670.
- [202] Wang B., Wang J., Griffio A., Sen B., A General Modeling Technique for a Triple Redundant  $3 \times 3$ -Phase PMA SynRM, *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, 2018, **65**(11), 9068-9078.
- [203] Wang B., Wang J., Griffio A., Sen B., Stator Turn Fault Detection by Second Harmonic in Instantaneous Power for a Triple-Redundant Fault-Tolerant PM Drive, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, **65**(9), 7279-7289.
- [204] Wang B., Wang J., Sen B., Griffio A., Sun Z., Chong E., A Fault-Tolerant Machine Drive Based on Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Machine, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, **54**(2), 1349-1359.
- [205] Dorrell D. G., Popescu M., Ionel D. M., Unbalanced magnetic pull due to asymmetry and low-level static rotor eccentricity in fractional-slot brushless permanent-magnet motors with surface-magnet and consequent-pole rotors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, **46**(7), 2675-2685.
- [206] Zhu Z. Q., Mohd Jamil M. L., Wu L. J., Influence of Slot and Pole Number Combinations on Unbalanced Magnetic Force in PM Machines With

Diametrically Asymmetric Windings, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2013, **49**(1), 19-30.

- [207] Zhu Z. Q., Ishak D., Howe D., Chen J., Unbalanced Magnetic Forces in Permanent-Magnet Brushless Machines With Diametrically Asymmetric Phase Windings, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2007, **43**(6), 1544-1553.
- [208] Li Y. B., Ho S. L., Fu W. N., Xue B. F., Analysis and Solution on Squeak Noise of Small Permanent-Magnet DC Brush Motors in Variable Speed Applications, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, **45**(10), 4752-4755.
- [209] Vijayraghavan P., Krishnan R., Noise in electric machines: a review, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1999, **35**(5), 1007-1013.
- [210] Zhu Z. Q., Xia Z. P., Wu L. J., Jewell G. W., Analytical Modeling and Finite-Element Computation of Radial Vibration Force in Fractional-Slot Permanent-Magnet Brushless Machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, **46**(5), 1908-1918.
- [211] Faïd S., Advanced Reluctance Motors for Electric Vehicle Applications (ARMEVA), *Punch Powertrain*, FP7-GC.SST.2013-2, 18-19, 2014.
- [212] Bertotti G., General properties of power losses in soft ferromagnetic materials, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1988, **24**(1), 621-630.
- [213] Steentjes S., Boehmer S., Hameyer K., Permanent Magnet Eddy-Current Losses in 2-D FEM Simulations of Electrical Machines, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, **51**(3), 1-4.
- [214] Stipetic S., Goss J., Zarko D., Popescu M., Calculation of Efficiency Maps Using a Scalable Saturated Model of Synchronous Permanent Magnet Machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, **54**(5), 4257-4267.
- [215] Stipetic S., Zarko D., Popescu M., Ultra-fast axial and radial scaling of synchronous permanent magnet machines, *IET Electric Power Applications*, 2016, **10**(7), 658-666.



## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Demir Y.**, El-Refaie A., Aydın M., Investigation of Asymmetric and Unbalanced Winding Structures for 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, DOI: 10.1109/TEC.2020.3044000.
- [2] Boduroglu A., **Demir Y.**, Cumhuri B., Aydın M., A Novel Track Structure of Double-Sided Linear PM Synchronous Motor for Low Cost and High Force Density Applications, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, **57**(2), 1-5.
- [3] Önsal M., **Demir Y.** ve Aydın M., Endüstriyel Sürekli Mıknatıslı Servomotorlar İçin Bir Çözücü Tasarımı, Üretimi ve Doğrulaması, *Elektrik Elektronik Bilgisayar Müh. Sempozyumu ve Sergisi (ELECO2020)*, Bursa, Türkiye, 26-28 Kasım 2020.
- [4] Boduroglu A., Ulu Y., **Demir Y.**, Aydın M., Design and Control a Linear Motor with Planar V-Shaped Segmented Magnet Arrangement, *XXIV International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Gothenburg, Sweden, 23-26 August 2020.
- [5] Aydın M., Ocak O., **Demir Y.**, Influence of Varying Magnet Pole-Arcs and Step-Skew on Permanent Magnet AC Synchronous Motor Performance, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2020, **28**(1), 3304-3318.
- [6] **Demir Y.**, Yolacan E., El-Refaie A., Aydın M., Investigation of Different Winding Configurations and Displacements of a 9-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor with Unbalanced AC Winding Structure, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, **55**(4), 3660-3670.
- [7] Yolacan E., **Demir Y.**, E., El-Refaie A., Aydın M., Investigation of Flux Weakening Capability of an Unconventional 9-Phase PM Motor with Different Winding Configurations, *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Ind. Electronics Society*, Lisboa, 14-17 October 2019.
- [8] **Demir Y.**, El-Refaie A., Aydın M., Investigation of Asymmetric and Unbalanced Winding Structures for 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines, *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Ind. Electronics Society*, Lisboa, 14-17 October 2019.
- [9] Boduroglu A., Gulec M., **Demir Y.**, Yolacan E., Aydın M., A New Asymmetric Planar V-Shaped Magnet Arrangement for A Linear PM Synchronous Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019, **55**(7), 1-5.

- [10] Payza O., **Demir Y.**, Aydın M., Investigation of Losses for a Concentrated Winding High Speed Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor for Washing Machine Application, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, **54**(11), 1-5.
- [11] **Demir Y.**, Yolacan E., El-Refaie A., Aydın M., Investigation of Different Winding Configurations and Displacements of a 9-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor with Unbalanced AC Winding Structure, *XXIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Alexandroupoli, Greece, 3-6 September 2018.
- [12] Yolacan E., **Demir Y.**, Aydın M., Design, FEA and Dynamic Simulation of a New Unconventional 9-Phase PMSM with Asymmetric Winding, *XXIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Alexandroupoli, Greece, 3-6 September 2018.
- [13] Boduroglu A., **Demir Y.**, Lyra R., Aydın M., Influence of Auxiliary Teeth on Performance of a Permanent Magnet Linear Motor, *XXIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Alexandroupoli, Greece, 3-6 September 2018.
- [14] Onsal M., Cumhuri B., **Demir Y.**, Yolacan E., Aydın M., Rotor Design Optimization of A New Flux Assisted Consequent Pole Spoke Type Permanent Magnet Torque Motor for Low Speed Applications, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, **54**(11), 1-5.
- [15] Boduroğlu A., Güleç M., **Demir Y.** ve Aydın M., Doğrusal Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Doğrusal Olmayan Manyetik Eşdeğer Devre ve Sonlu Elemanlar Tabanlı Tasarımı, *EMO Bilimsel Dergi*, 2018, **8**(15), 97-102.
- [16] **Demir Y.**, Aydın M., A Novel Asymmetric and Unconventional Stator Winding Configuration and Placement for a Dual Three-Phase Surface PM Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, **53**(11), 1-5.
- [17] Onsal M., **Demir Y.**, Aydın M., A New Nine-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor With Consequent Pole Rotor for High-Power Traction Applications, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, **53**(11), 1-6.
- [18] Baris A., Gulec M., **Demir Y.** ve Aydın M., Bir Doğrusal Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Manyetik Eşdeğer Devre ve Sonlu Eleman Analizi Tabanlı Tasarımı, *1. Ulusal Elektrik Enerjisi Dönüşümü Kongresi*, Elazığ, Türkiye, 21-22 Eylül 2017.
- [19] Aydın M., Gulec M., **Demir Y.**, Akyuz B., Yolacan E., Design and validation of a 24-pole coreless axial flux permanent magnet motor for a solar powered vehicle, *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, Switzerland, 4-7 September 2016.
- [20] **Demir Y.**, Aydın M., Design, analysis and validation of a dual three-phase 72-slot, 12-pole permanent magnet synchronous motor, *XXII International*

*Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, Switzerland, 4-7 September 2016.

- [21] **Demir Y.**, Aydın M., A Novel Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor With Asymmetric Stator Winding, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, **52**(7), 1-5.
- [22] Gulec M., Yolacan 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 & Computer Sciences*, 2016, **24**(1), 262-275.
- [23] **Demir Y.**, Aydın M., Design, 2D/3D FE analysis and prototype of a dual three-phase integer slot PM synchronous motor, *IEEE Magnetics Conference (INTERMAG)*, Beijing, China, 11-15 May 2015.
- [24] **Demir Y.**, Yildiz A. B., Large-signal and small-signal analysis of nonlinear three-terminal switching elements, *9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, 26-28 November 2015.
- [25] **Demir Y.**, Ertuğrul B. T., Sincar E., Turhan A., Yılmaz S., Aydın M., Mıknatıs Korozyonunun 36-Oluk/12-Kutuplu Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Performansına Etkisi, *Elektrik Elektronik Bilgisayar Müh. Sempozyumu ve Sergisi (ELECO2014)*, Bursa, Türkiye, 27-29 Kasım 2014.
- [26] **Demir Y.**, Ocak O., Ulu Y., Aydın M., Impact of lamination processing methods on performance of permanent magnet synchronous motors, *Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, Germany, 2-5 Sept. 2014.
- [27] **Demir Y.**, Aydın M., Design of several un-skewed radial flux permanent magnet synchronous motors with asymmetric and symmetric AC windings — A comparative study, *IEEE Energy Conversion Cong. and Exposition (ECCE)*, Pittsburgh, USA, 14-18 Sept. 2014.
- [28] **Demir Y.**, Aydın M., Design of a spoke type IPM synchronous motor with segmented rotor for low DC voltage applications, *IEEE Energy Conversion Cong. and Exposition (ECCE)*, Pittsburgh, USA, 14-18 Sept. 2014.
- [29] **Demir Y.**, Aydın M., Design and comparison of 33 slot permanent magnet synchronous motor with symmetric and asymmetric AC windings, *Int. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Ischia, Italy, 18-20 June 2014.
- [30] **Demir Y.**, Ocak O., Ertuğrul B. T., Sincar E., Aydın, Influence of sintered Nd-Fe-B magnet corrosion on permanent magnet synchronous motor performance, *39th Annual Conference of Industrial Electronics Society (IECON)*, Vienna, Austria, 10-13 Nov. 2013.
- [31] **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 Drive Conf. (IEMDC'13)*, Chicago, USA, 12-15 May 2013.

- [32] **Demir Y.**, Aydın M., Fırçasız DC ve AC sürekli mıknatıslı motor tasarımı ve kullanılan yazılımlar, *7. Elektrik Elektronik Bilgisayar Müh. Sempozyumu ve Sergisi (ELECO2012)*, Bursa, Türkiye, 29 Kasım-1 Aralık 2012.
- [33] **Demir Y.**, Ocak O., Aydın M., Sürekli mıknatıslı AC servomotor tasarımında radyel ve paralel mıknatıslamanın motor performansına etkisi, *7. Elektrik Elektronik Bilgisayar Müh. Sempozyumu ve Sergisi (ELECO2012)*, Bursa, Türkiye, 29 Kasım-1 Aralık 2012.
- [34] **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 Türk Milli Komitesi (TOK2012)*, Niğde, Türkiye, 11-13 Ekim 2012.
- [35] **Demir Y.**, Ocak O., Aydın M., No-load analysis of permanent magnet AC servomotors: A comparative study, *12<sup>th</sup> International Workshop on REM*, Kocaeli, Turkey, 15-16 Sept. 2011.

## ÖZGEÇMİŞ

Yücel DEMİR, lisans ve yüksek lisans derecelerini Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nden 2011 ve 2013 yıllarında almıştır. 2012 yılında MDS Motor Ltd. şirketinde Ar-Ge mühendisi olarak başladığı görevine elektrik motor Ar-Ge takım lideri olarak devam etmektedir. Çeşitli dergi ve konferanslarda yer alan yayınların ortak yazarıdır. IEEE ve Elsevier gibi teknik profesyonel organizasyonların ve yayınevlerinin sahip olduğu dergilerde hakemlik gerçekleştirmektedir. Araştırma ilgi alanları arasında elektrikli motorların ve elektro mekanik sistemlerin tasarımı, analizi ve optimizasyonu yer almaktadır.

