

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**1,5kW'LIK DENGESİZ SARGI YAPILI SÜREKLİ MIKNATISLI  
BİR AC SERVOMOTOR TASARIMI, ÜRETİMİ VE  
GERÇEKLENMESİ**

**YÜCEL DEMİR**

**KOCAELİ 2013**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

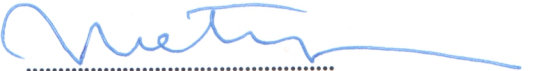
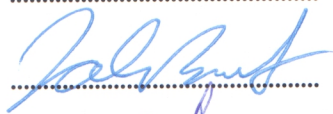
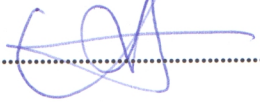
**1,5kW'LIK DENGESİZ SARGI YAPILI SÜREKLİ MIKNATISLI  
BİR AC SERVOMOTOR TASARIMI, ÜRETİMİ VE  
GERÇEKLENMESİ**

**YÜCEL DEMİR**

**Yrd. Doç. Dr. Metin AYDIN  
Danışman, Kocaeli Üniv.**

**Prof. Dr. Zafer BİNGÜL  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

**Doç. Dr. Ahmet M. HAVA  
Jüri Üyesi, ODTÜ**

  
.....  
  
.....  
  
.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 23.05.2013**

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Sürekli mıknatıslı servomotorlar boyutlarının küçük olması, verimlerinin ve moment yoğunluklarının yüksek olması sebebiyle savunma sanayi, robotik ve beyaz eşya uygulamaları gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Dengesiz sargı yapısına sahip SM motorlar sahip oldukları avantajları sayesinde yüksek moment yoğunluğu ve güç gerektiren uygulamaların yanı sıra düşük hızlarda hassas pozisyonlama ihtiyacı duyan uygulamalarda da kullanılabilir. Bu çalışmada, özgün tasarımı gerçekleştirilen dengesiz sargı yapılı SM bir AC servomotorun üretilen prototipi ile deneysel çalışmaları yapılmış ve SEA sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Deneyimlerini ve bilgi birikimlerini bizlerle her zaman paylaşan, lisans tez döneminden bu yana birçok akademik ve endüstriyel çalışmada birlikte çalışmaktan büyük keyif duyduğum, yüksek lisans tez çalışmam sırasında da desteğini ve anlayışını her zaman yakından hissettiğim, bilgileri ve yenilikçi fikirleri ile çalışmama yaptığı katkılardan dolayı değerli danışman hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Metin AYDIN' a teşekkür ederim.

Ayrıca, deneysel çalışmalarda yapmış oldukları yardımlardan dolayı Arş. Gör. Ersin YOLAÇAN'a, Arş. Gör. Mehmet Güleç'e ve Akım Metal A.Ş. mekatronik takım lideri Oğuzhan OCAK'a teşekkür ederim. Tez çalışmamda kullandığım motorun elektromanyetik analizlerini gerçekleştirmek için kullanılan yazılımdan dolayı CEDRAT'a, çalışmalarına destek olmanın yanında prototipin üretilmesi ve geliştirilmesi konularında da katkı sağlayan MDS Motor Tasarım Ltd. ve Akım Metal A.Ş.'ye teşekkürü borç bilirim.

Özel olarak, hayatım boyunca desteklerini bir an olsun esirgemeyen ve hep yanımda olan, beni bugünlere getiren anneme, babama ve kardeşime, her zaman verdiği desteğin yanında hayatıma girerek anlam kazandıran Gamze'ye desteklerinden ve sabırlarından dolayı sonsuz minnet duygularımı sunarım. Sizlerin desteği olmadan bu çalışma asla gerçekleştirilemezdi.

Mayıs - 2013

Yücel DEMİR

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLOLAR DİZİNİ .....	vi
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR .....	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ .....	1
1. GENEL BİLGİLER.....	4
2. DENGELİ VE DENGESİZ SARGI YAPILI SÜREKLİ MIKNATISLI MOTORLAR.....	8
2.1. SM Rotor Yapıları.....	8
2.1.1. Yüzeyden mıknatıslı motorlar.....	9
2.1.2. Yüzeğe gömülü SM motorlar.....	11
2.1.3. Dahili mıknatıslı motorlar .....	11
2.2. Sürekli Mıknatıslı Motorlarda Kullanılan Malzemeler .....	13
2.2.1. Silisli çelik malzemeleri.....	14
2.2.2. Sürekli mıknatıs malzemeleri.....	16
2.3. SM Motor Tasarım Süreci.....	18
2.4. Dengeli Standart SM Motorlar .....	20
2.5. Dengesiz SM Motorlar .....	22
3. 33-OLUKLU DENGESİZ SARGI YAPILI SM MOTOR MANYETİK EŞDEĞER DEVRE MODELİ .....	25
3.1. Manyetik Devre Modelleme Yöntemi.....	25
3.2. Bobinli Manyetik Devrelerin Modellenmesi.....	27
3.3. SM Manyetik Devrelerin Modellenmesi.....	28
3.4. 33-Oluklu Dengesiz Sargı Yapılı Motorun Manyetik Eşdeğer Devresi .....	31
4. 33-OLUKLU DENGESİZ SARGI YAPILI SM MOTOR SONLU ELEMENLAR ANALİZİ.....	34
4.1. Sonlu Eleman Analizi (SEA) .....	34
4.1.1. Yüksüz durum SEA .....	36
4.1.2. Yüklü durum SEA.....	42
4.1.3. Dengesiz manyetik çekme kuvveti.....	45
4.2. 33-Oluklu Dengeli ve Dengesiz Sargı Yapılı Motorların Performans Karşılaştırması.....	49
5. DÜŞÜK HIZLAR İÇİN DENGELİ VE DENGESİZ MOTORLARIN PERFORMANS KARŞILAŞTIRILMASI.....	54
5.1. Analizi Yapılan Motorlar ve Tasarım Kriterleri.....	55
5.2. Servomotorların Yüksüz Durum SEA.....	59
5.3. Servomotorların Yüklü Durum SEA.....	63
6. MOTOR PROTOTİP ÜRETİMİ.....	68
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE DOĞRULAMA .....	72
7.1. Motor Test Düzenegi.....	72

7.2. Yüksüz Durum Çalışmaları .....	73
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	77
KAYNAKLAR .....	79
EKLER.....	83
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	86
ÖZGEÇMİŞ .....	87

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Yüzey mıknatıslı ve dahili mıknatıslı AC servomotor yapısı.....	6
Şekil 1.2.	Elektrik motorlarının sınıflandırılması .....	7
Şekil 2.1.	Farklı tipteki SM motor yapıları a) Yüzeyden mıknatıslı, b) Yüzük tip, c) Yüzeğe gömülü mıknatıslı, d) Dış rotorlu, e) Dahili mıknatıslı motorlar .....	9
Şekil 2.2.	Yüzeyden mıknatıslı motor yapısı .....	10
Şekil 2.3.	Yüzeğe gömülü SM motor yapısı .....	11
Şekil 2.4.	Dahili mıknatıslı motor yapısı .....	12
Şekil 2.5.	Yüzeyden mıknatıslı senkron motor .....	13
Şekil 2.6.	Motor sac datalarına örnek.....	14
Şekil 2.7.	SMC kullanılarak üretilen bir stator segmenti .....	16
Şekil 2.8.	Farklı türdeki sürekli mıknatıslara ait B-H eğrisi .....	18
Şekil 2.9.	SM motor tasarım aşamaları .....	20
Şekil 2.10.	Klasik sargı tipleri a) 24-oluk 4-kutup, kesişen sargı (dağıtılmış), b) 12-oluk 4-kutup, kesişen sargı (dağıtılmış), c) 6-oluk 4-kutup, kesişmeyen sargı, (tüm dişler sarılı) (çift katmanlı) ve d) 6-oluk 4-kutup, kesişmeyen sargı, (belirli dişler sarılı) (tek katmanlı) .....	21
Şekil 3.1.	Elektrik devresinin manyetik eşdeğer devre karşılığı .....	26
Şekil 3.2.	Çelik nüveye sarılmış bir bobinin manyetik eşdeğer devresi .....	27
Şekil 3.3.	Sürekli mıknatıslı bir devrenin manyetik eşdeğer devresi .....	29
Şekil 3.4.	Sürekli mıknatıslı ve kaçak akıların da dahil edildiği eşdeğer devre.....	30
Şekil 3.5.	33-oluk 10-kutuplu tam model manyetik eşdeğer devresi.....	32
Şekil 3.6.	33-oluk 10-kutuplu yapının yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi .....	33
Şekil 4.1.	Servomotor SEA modeli .....	35
Şekil 4.2.	Servomotorun tamamına ait ve iki kutba odaklanmış kısmına ait ağ yapısı .....	36
Şekil 4.3.	Servomotorun yüksüz durum akı çizgileri.....	37
Şekil 4.4.	Servomotor modelinin yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi.....	37
Şekil 4.5.	Vuruntu momentinin farklı mıknatıs açılarındaki değişimleri .....	38
Şekil 4.6.	Vuruntu momenti tepe değerinin farklı mıknatıs açılarındaki değişimleri (betam=120°-160°).....	38
Şekil 4.7.	1000rpm hızdaki faz gerilimi değişimleri.....	39
Şekil 4.8.	1000rpm hızdaki faz gerilimi değişiminin harmonik içeriği .....	40
Şekil 4.9.	1000rpm hızdaki hat gerilimi değişimleri.....	40
Şekil 4.10.	1000rpm hızdaki hat gerilimi değişiminin harmonik içeriği .....	41
Şekil 4.11.	Harmoniklerin temel harmoniğe göre yüzdelerinin mıknatıs açısına göre değişimleri.....	41
Şekil 4.12.	Toplam harmonik bozunumları (%THD) .....	42
Şekil 4.13.	Çıkış momentinin farklı mıknatıs açılarındaki değişimi.....	43
Şekil 4.14.	Ortalama momentin farklı mıknatıs açılarındaki değişimi .....	43
Şekil 4.15.	Moment dalgalanmasının farklı mıknatıs açılarındaki değişimi.....	44
Şekil 4.16.	Çıkış momenti değişimi .....	44
Şekil 4.17.	Moment-akım değişimi.....	45

Şekil 4.18. Sargıların dağılımına göre bazı SM motorlardaki kuvvetlerin dağılımı a) Asimetrik sargı dağılımı ve b) Simetrik sargı dağılımı .....	47
Şekil 4.19. Ratora etkiyen kuvvetlerin değişimi .....	48
Şekil 4.20. Faz ve hat gerilimlerinin değişimi (@1000rpm).....	49
Şekil 4.21. Faz ve hat gerilimi harmoniklerinin değişimi (@1000rpm) .....	50
Şekil 4.22. Hat gerilimlerinin toplam harmonik bozunumları (%THD).....	50
Şekil 4.23. Dengeli ve dengesiz sargılı motorların çıkış momenti değişimleri (@25Arms) .....	51
Şekil 4.24. Dengeli ve dengesiz sargılı motorların ortalama moment değişimleri ....	51
Şekil 4.25. Dengeli ve dengesiz sargılı motorların moment dalgalanmaları .....	52
Şekil 4.26. Dengeli ve dengesiz sargılı motorların moment-akım eğrisi.....	52
Şekil 4.27. Ratora etkiyen manyetik çekme kuvvetleri .....	53
Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan motorların kesitleri a) 42 ve 45-oluk 14-kutup, b) 36 ve 39-oluk 12-kutup, c) 30 ve 33-oluk 10-kutup, d) 24 ve 27-oluk 8-kutup ve e) 18 ve 21-oluk 6-kutup .....	56
Şekil 5.2. Sac malzemesi B-H eğrisi.....	57
Şekil 5.3. Mıknatıs malzemesi B-H eğrisi .....	58
Şekil 5.4. Motorların sargı şeması a) 45-oluk 14-kutup, b) 39-oluk 12-kutup, c) 33-oluk 10-kutup, d) 27-oluk 8-kutup ve e) 21-oluk 6-kutup.....	59
Şekil 5.5. 24-oluk 8-kutuplu yapının 2D SE modeli a) ağ yapısı ve b) akı yoğunluğu dağılımı .....	60
Şekil 5.6. Vuruntu momenti değişimleri a) 42 ve 45-oluk 14-kutup, b) 36 ve 39-oluk 12-kutup, c) 30 ve 33-oluk 10-kutup, d) 24 ve 27-oluk 8-kutup ve e) 18 ve 21-oluk 6-kutup.....	61
Şekil 5.7. 500rpm hızdaki hat gerilimi değişimleri ve harmonik içerikleri a) 42 ve 45-oluk 14-kutup, b) 36 ve 39-oluk 12-kutup, c) 30 ve 33-oluk 10-kutup, d) 24 ve 27-oluk 8-kutup ve e) 18 ve 21-oluk 6-kutup .....	63
Şekil 5.8. Çıkış momenti değişimleri a) 42 ve 45-oluk 14-kutup, b) 36 ve 39-oluk 12-kutup, c) 30 ve 33-oluk 10-kutup, d) 24 ve 27-oluk 8-kutup ve e) 18 ve 21-oluk 6-kutup.....	64
Şekil 5.9. Ortalama moment ve moment dalgalanması değişimleri a) 42 ve 45-oluk 14-kutup, b) 36 ve 39-oluk 12-kutup, c) 30 ve 33-oluk 10-kutup, d) 24 ve 27-oluk 8-kutup ve e) 18 ve 21-oluk 6-kutup.....	67
Şekil 6.1. Stator ve rotor sac yapısı.....	68
Şekil 6.2. Stator ve rotor saclarının paketlenmiş hali.....	69
Şekil 6.3. a) Mıknatıssız ve b) sürekli mıknatıslı rotor yapısı .....	69
Şekil 6.4. Gövdeye yerleştirilmiş stator yapısı.....	70
Şekil 6.5. Statora sargıların yerleştirilmiş hali .....	70
Şekil 6.6. Motor ön ve arka kapağı .....	71
Şekil 6.7. Montajı tamamlanmış servomotor .....	71
Şekil 7.1. Motor deney düzeneği.....	72
Şekil 7.2. SEA sonucu ve deneysel olarak elde edilen vuruntu momenti değişimlerinin karşılaştırılması .....	74
Şekil 7.3. 1000rpm için deneysel olarak elde edilen hat gerilimi şekli.....	74
Şekil 7.4. 1000rpm hızda deneysel ve SEA ile elde edilen hat gerilimi karşılaştırması .....	75
Şekil 7.5. Hız-zıt EMK hat gerilimi karşılaştırması (dengesiz motor için) .....	75
Şekil 7.6. Hız-zıt EMK hat gerilimi karşılaştırması (dengeli motor için).....	76

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. SM motorların karşılaştırılması .....	13
Tablo 2.2. Farklı standartlarda silisli çelik malzemeleri ve eşdeğerleri.....	15
Tablo 2.3. Avrupa normlarında en sık kullanılan motor sac malzemeleri, kalınlıkları ve demir kayıp değerleri .....	16
Tablo 2.4. Farklı türdeki sürekli mıknatıslı malzemelerin karşılaştırılması .....	18
Tablo 2.5. Oluk/kutup/faz oranı .....	24
Tablo 3.1. Elektrik devre elemanlarının manyetik devredeki karşılığı.....	26
Tablo 3.2. Yüksüz durumdaki akı yoğunluklarının manyetik eşdeğer devre ve SEA ile karşılaştırılması.....	33
Tablo 5.1. Analizi yapılan motorların özeti .....	57



## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

$A$	: Kesit alanı, ( $\text{mm}^2$ )
$B$	: Manyetik akı yoğunluğu, (T)
$B_c$	: Sac malzemesindeki akı yoğunluğu, (T)
$B_g$	: Hava aralığındaki akı yoğunluğu, (T)
$B_m$	: Sürekli mıknatıs çalışma akı yoğunluğu, (T)
$B_{pm}$	: Sürekli mıknatıs akı yoğunluğu, (T)
$B_r$	: Kalıcı manyetik akı yoğunluğu, (T)
$B_t$	: Stator dışındaki manyetik akı yoğunluğu, (T)
$B_\alpha$	: Dairesel manyetik akı yoğunluğu, (T)
$E$	: Elektriksel alan, (V/m)
$\mathcal{F}$	: Elektromanyetik kuvvet, (N)
$F_x$	: x yönünde etkiyen kuvvet bileşeni, (N)
$F_y$	: y yönünde etkiyen kuvvet bileşeni, (N)
$g$	: Hava aralığı mesafesi, (m)
$H$	: Manyetik alan şiddeti, (A/m)
$H_c$	: Kalıcı manyetik alan şiddeti, (A/m)
$H_{ci}$	: İç kalıcı manyetik alan şiddeti, (A/m)
$H_g$	: Hava aralığındaki manyetik alan şiddeti, (A/m)
$H_r$	: Kalıcı manyetik alan şiddeti, (A/m)
$i$	: Akım, (A)
$J_i$	: İletkenlik akım yoğunluğu, ( $\text{A}/\text{m}^2$ )
$l$	: Akı yolu uzunluğu, (m)
$l_a$	: Rotor eksenel uzunluğu, (m)
$l_c$	: Nüve akı yolu uzunluğu, (m)
$l_{pm}$	: Sürekli mıknatıs akı yolu uzunluğu, (m)
$l_r$	: Rotor akı yolu uzunluğu, (m)
$l_s$	: Stator akı yolu uzunluğu, (m)
$L_d$	: d-eksen endüktansı, (H)
$L_q$	: q-eksen endüktansı, (H)
$m$	: Faz sayısı
$N$	: Sarım sayısı
$p$	: Kutup sayısı
$r$	: Dairenin yarıçapı, (m)
$R$	: Direnç, ( $\Omega$ )
$q$	: Oluk/kutup/faz
$Q_s$	: Oluk sayısı
$S_n$	: Tensör kutupsal koordinat eşdeğeri
$S_y$	: y yönündeki dik koordinat tensörü
$S_x$	: x yönündeki dik koordinat tensörü
$S_\alpha$	: Tensör kutupsal koordinat eşdeğeri
$V$	: Gerilim, (V)
$w_{pm}$	: Sürekli mıknatıs genişliği, (m)
$w_r$	: Rotor genişliği, (m)

$w_s$	: Stator genişliği, (m)
$w_t$	: Stator dış genişliği, (m)
$W$	: Güç, (Watt)
$\omega_r$	: Anma hızı, (rpm)
$\mu_0$	: Havanın manyetik geçirgenliği, (H/m)
$\mu_{pm}$	: Sürekli mıknatısın manyetik geçirgenliği, (H/m)
$\mu_r$	: Sac malzemesinin manyetik geçirgenliği, (H/m)
$\mathcal{R}$	: Relüktans, (A.t/Wb)
$\mathcal{R}_c$	: Sac malzemesinin relüktansı, (A.t/Wb)
$\mathcal{R}_{es}$	: Eşdeğer relüktans, (A.t/Wb)
$\mathcal{R}_g$	: Hava aralığının relüktansı, (A.t/Wb)
$\mathcal{R}_{lk}$	: Hava aralığı kaçak akı relüktansı, (A.t/Wb)
$\mathcal{R}_{pm}$	: Sürekli mıknatıs relüktansı, (A.t/Wb)
$\mathcal{R}_{pm-lk}$	: Sürekli mıknatıs kaçak akı relüktansı, (A.t/Wb)
$\mathcal{R}_r$	: Rotor relüktansı, (A.t/Wb)
$\mathcal{R}_t$	: Stator dışındaki relüktans, (A.t/Wb)
$\mathcal{R}_s$	: Stator arka nüve relüktansı, (A.t/Wb)
$\sigma$	: İletkenlik, (S/m)
$\phi$	: Akı, (Wb)
$\phi_g$	: Hava aralığı akısı, (Wb)
$\phi_r$	: Sürekli mıknatıs akısı, (Wb)

### Kısaltmalar

AC	: Alternating Current (Alternatif Akım)
CFD	: Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
EMK	: Elektro Motor Kuvveti
MMK	: Manyeto Motor Kuvveti
OBEB	: Ortak Bölenlerin En Büyüğü
RPM	: Revolute Per Minute (Dakikadaki Dönüş Sayısı)
SE	: Sonlu Elemanlar
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SM	: Sürekli Mıknatıs
SMC	: Soft Magnetic Compozit (Yumuşak Manyetik Alaşım)
THD	: Total Harmonic Distortion (Toplam Harmonik Bozunumu)

## 1,5kW'LIK DENGESİZ SARGI YAPILI SÜREKLİ MİKNATISLI BİR AC SERVOMOTOR TASARIMI, ÜRETİMİ VE GERÇEKLENMESİ

### ÖZET

Standart sürekli mıknatıslı (SM) motorlar günümüzde elektrikli taşıt, savunma sanayi, beyaz eşya sektörü gibi birçok özel uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tip motorların verimlerinin yüksek, kayıplarının düşük, küçük hacim ve ağırlıkta yüksek güç ve moment yoğunluğu elde edilebilmesi ve moment-ağırlık oranının yüksek olması gibi avantajları günümüzde sıkça kullanılan bir motor türü haline gelmesini sağlamıştır. Elektrik motorlarında sargı yapısı oluk-kutup kombinasyonuna bağlı olarak belirlenmektedir. Bazı kombinasyonlarda çok iyi bir motor performansı elde etmek mümkün olmasına rağmen sargı yapısını belirlemek zordur ve seçilen oluk-kutup kombinasyonuna bağlı olarak dengesiz bir sargı yapısı kullanmak kaçınılmaz olur. Bu çalışmada özel uygulamalar için bir sürekli mıknatıslı AC servomotor tasarımı ve prototip üretimi yapılmıştır. Motor performans verileri bu tip uygulamalarda kritiktir. Bu yüzden motorun vuru moment ve moment dalgalanması olmayan kaliteli bir moment çıkışına, bunun yanında da sinüzoidal bir zıt elektromotor kuvvetine (EMK) sahip olması gerekmektedir. Üretim sürecinin de kolay olması önemli bir tasarım kriteridir. Özellikle hassas pozisyon kontrolü gerektiren çok düşük hızdaki uygulamalarda istenilen performans çıktılarının elde edilmesi için motorun ne statorunda ne de rotorunda (rotor-stator kayk, segmentleme, diş olukları gibi) yapısal olarak bir önlem alınmasına gerek kalmadan dengesiz sargı yapılı bir motor yapısı ile yüksek kaliteli bir moment çıkışı elde etmek mümkündür. Bu çalışmada, küçük güçlü dengesiz sargı yapılı sürekli mıknatıslı bir AC servomotor tasarımı, optimizasyonu ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Motor tasarımı, geliştirilen deney düzeneğinde test edilmiş ve performansı kontrol edilmiştir. Ayrıca farklı tip fırçasız AC motorların benzer tasarım kriterleri doğrultusunda tasarımı ve karşılaştırması yapılmış, dengeli ve yapısal dengesiz motorlar arasındaki performans farkı ortaya koyulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** AC Senkron Motor Tasarımı, AC Servomotor, Dengesiz Sargı Yapılı Servomotor, Motor Optimizasyonu, Sürekli Mıknatıslı Motor.

# **DESIGN, MANUFACTURING AND VERIFICATION OF A 1,5kW PERMANENT MAGNET AC SERVO MOTOR WITH UNBALANCED WINDING STRUCTURE**

## **ABSTRACT**

Conventional permanent magnet (PM) motors are frequently used in various applications such as electric traction, defense industry, appliance and so on. These motors have attracted an increasing interest because of some advantages like high efficiency, low loss, low volume and weight and high torque/power density and torque to weight ratio. Thus, there exist PM motors in many applications thanks to all the advantages. It is well known that slot-pole combination specifies the winding structure of a PM motor that should be made in order to obtain the most suitable design for the application. However, some combinations produce a quality motor performance and so using an unbalanced winding structure is inevitable because of the slot-pole combination. In this study, performance of the motor is important since the target of the study includes special applications. Therefore, this kind of applications needs both a quality output torque (cogging-free and ripple-free) and also a smooth back-EMF waveform, and so controllability of the servomotor would be easier. If precise position control is required or high torque quality is a must at some low speed applications, these unbalanced winding motors can offer both almost no-cogging and provide easier manufacturability simply because no extra structural steps are taken to lower or eliminate cogging component. Thus, design, optimization, prototype and control of a PM servomotor with unbalanced AC winding is implemented in order to obtain intended motor performance. Then, performance of the designed motor is tested using an experimental set-up and compared with the FEA results. In addition, different brushless permanent magnet AC motors are designed and compared for the same technical specifications, and the performance difference between the balanced and structurally unbalanced motors are laid out in detail.

**Keywords:** AC Synchronous Motor Design, AC Servomotor, Unbalanced Winding Servomotor, Motor Optimization, Permanent Magnet Motor.

## GİRİŞ

Günümüzde enerji gereksiniminin tüm dünyada gittikçe artması ve kullanılan enerji kaynaklarının hem sınırlı olması hem de var olanların gittikçe tükenmesi insanların enerji kaynaklarını daha verimli kullanabilmeleri için arayışlara girmesine neden olmaktadır. Bu yüzden elektrik motorları bu enerji dönüşümünde oldukça önemli bir yere sahiptir. Elektrik motorları günlük yaşamda belki de en çok kullanılan araçlardan biridir. Yeni özelliklere ve yapılara sahip motorlar bilim, teknoloji ve mühendislik alanındaki gelişmelere paralel olarak artmaktadır. Elektrik motorlarının kullanım alanlarına bakıldığında çok geniş bir güç aralığına sahip olduğu görülmektedir. Mikromotorlarda mW'lar güç seviyelerinde motorlara rastlanabilirken hidrojen/su soğutmalı turbo generatörlerde 1,7MW güç seviyelerine çıkabilen motorlara rastlanılmaktadır. Bunun yanında rüzgar türbinlerinde kullanılan motorlara bakıldığında 10WM üstü elektrik makineleri de uygulamalarda görülmektedir.

Günümüzde halen kullanılmasına rağmen bakım maliyeti ve güvenilirlik gibi problemlerden dolayı DC motorların yerini asenkron motorlar almıştır ve endüstriyel uygulamalarda diğer motor türlerine göre yüksek bir kullanım oranına sahiptir. Fakat bu motorların verimlerinin düşük oluşu, sıcaklık problemleri gibi bazı dezavantajları sürekli mıknatıslı senkron motorları bu motorlara alternatif olarak öne çıkarmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, özel uygulamalar için dengesiz sargı yapısına sahip, rotor ve stator üretimi kolay ve üretim sorunlarından uzak olan sürekli mıknatıslı bir AC senkron motor tasarımını, üretimini ve deneysel doğrulanmasını gerçekleştirmektir. Oluk-kutup kombinasyonuna bağlı olarak dengesiz sargı yapılı motor kullanmanın vuruuntu momentini minimize etmesi, sinüzoidal bir zıt elektromotor kuvveti geriliminin olması ve moment dalgalanmalarını azaltması gibi avantajları ile motor performansı yüksek olan bir servomotor üretimi elde edilmesi hedeflenmiştir. Tasarımı yapılan motorun vuruuntu momenti çok düşük olacağı için düşük hızlarda hassas hız ve konum kontrolü yapılabilecektir. Ayrıca, gerilim dalga şeklinin düzgün

bir sinüzoidal işarete sahip olması ve moment kalitesi yüksek bir tasarım olması da motor kontrolünü kolaylaştıracaktır.

Bu tez kapsamında, yapılan çalışmalar ile belirtilen hedefler tasarım sonucu elde edilmiş ve yapılan sonlu eleman analizi sonuçları ile prototip üretimi sonucu gerçekleştirilen motorun test sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bölüm 1’de klasik elektrik motorları ve sürekli mıknatıslı motorlar hakkında genel bilgiler verilerek elektrik motorlarının sınıflandırılması yapılmıştır. Farklı türdeki elektrik motorlarının birbirlerine göre olan avantaj ve dezavantajları belirtilmiş ve kullanım alanları hakkında bilgiler verilmiştir.

Bölüm 2’de sürekli mıknatıslı motorlarda kullanılan rotor yapıları ve bu motorlarda kullanılan sac ve mıknatıs malzemeleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca sürekli mıknatıslı motor tasarım süreci özetlenmiştir. Bunun yanında, dengeli ve dengesiz sargı yapısına sahip sürekli mıknatıslı motorların sargı yapıları hakkında bilgiler verilmiştir.

Bölüm 3’de 33-oluklu dengesiz sargı yapılı motorun manyetik eşdeğer devre modeli oluşturularak hava aralığındaki ve stator dışındaki akı yoğunluğu değerleri sonlu eleman analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bölüm 4’de motorda en iyi performans sonuçlarını elde etmek için sonlu eleman analizi ile detaylı bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Ayrıca, 33-oluklu motorun dengeli sargı yapısına sahip olması durumundaki sonuçları dengesiz sargı yapılı durum ile karşılaştırılmıştır.

Bölüm 5’de farklı oluk-kutup kombinasyonlarına sahip dengeli ve dengesiz sargı yapılı motorlar için performans karşılaştırılması yapılmış ve dengesiz sargı yapısı kullanmanın avantajlarından bahsedilmiştir.

Bölüm 6’da motor prototip üretimi en başından itibaren anlatılarak, kullanılan malzeme ve motor parçaları hakkında bilgiler verilmiştir.

Bölüm 7’de motor test düzeneği detaylı olarak tanıtılmış ve yapılan testlere ait bilgiler verilmiştir. Ayrıca test sonucu elde edilen sonuçlar daha önce yapılan sonlu

eleman analizi sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbiri ile olan uyumluluğu incelenmiştir.

Bölüm 8’de ise yapılan çalışmalar hakkında genel bir değerlendirme yapılmış ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. Ayrıca ileride bu konuda yapılabilecek çalışmalara ait düşünceler de bu kısımda verilmiştir.

## 1. GENEL BİLGİLER

Farklı türdeki elektrik motorları endüstriyel uygulamalarda günümüzde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Motor seçimi ise uygulama türüne bağlı olarak farklı etkenler (sıcaklık, nem gibi çevresel faktörler, maliyet faktörü gibi) ile değişebilir. Çünkü her motorun birbirine göre avantajları olduğu gibi dezavantajları da mevcuttur. Bilinen en eski elektrik motoru olan alan sargılı DC elektrik motoru hız ve moment kontrolünün kolaylıkla yapılabilmesinden dolayı, hız ve moment kontrol uygulamalarında uzun süre kullanılmıştır. DC motor ve sürücü maliyetinin düşük olması günümüzde hala, özellikle de düşük güçlü uygulamalarda sıkça kullanılmasını sağlamaktadır. Bunun yanında DC motorların kırıncılara ihtiyaç duyması, AC motorlara göre bakım maliyetlerinin yüksek oluşu ve aynı güç seviyelerinde AC motorlara göre daha fazla alan kaplaması gibi sebepler DC motorların kullanım alanlarının azalmasına neden olmaktadır.

AC motorlar arasında en sık kullanılan motorlar ise asenkron motorlardır. Bu motorların basit yapısı, fırça, komütatör ve yüzük gibi bakım maliyetleri içermemesi ve güvenilir olması en belirgin avantajlarıdır. Tek fazlı beslemenin yaygın olması bu tip motorların diğer bir artısıdır. Diğer taraftan rotor sargılarından kaynaklanan kayıpların yüksek oluşu ile motor verimi düşüktür. Rotorlarında sargıların bulunması sıcaklık problemlerinin ortaya çıkmasıyla motor parametrelerinin değişmesine de neden olabilir. Ayrıca, yüksek hızlara çıkıldığında sorun oluşturması, hacim olarak fazla yer tutması ve moment dalgalanması, ses ve titreşim problemleri asenkron motorların en temel problemleri arasında gösterilebilir.

Endüstriyel ve robotik uygulamalarda sıkça kullanılan bir diğer motor türü de relüktans motorlarıdır. Bu motorların stator ve rotor yapılarının basit ve sağlam oluşu ile maliyetlerinin düşük oluşu diğer elektrik motorlarına göre avantajlarıdır. Ayrıca, DC motorlardaki gibi anma noktası yüksek dönüştürücülere ihtiyaçları yoktur ve basit bir yarım dalga doğrultucu ile rahatlıkla sürülebilir. Bu avantajların yanında relüktans motorların verimlerinin ve güç yoğunluğunun düşük olması en temel

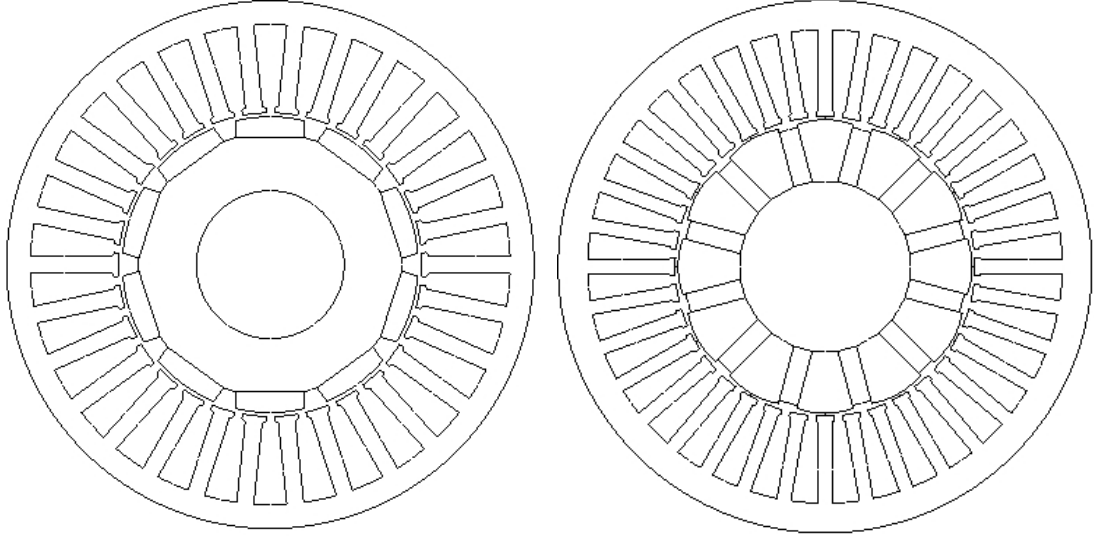


problemleridir. Relüktansın değişiyor olması da en önemli dezavantajlarındanr. Çünkü bu değişim ciddi boyutta moment dalgalanmalarına ve yüksek seviyede duyulabilir gürültüleri neden olur.

Daha önce bahsedildiği gibi bütün elektrik motorlarının birbirine göre farklı üstünlükleri vardır. Senkron motorlarda da DC ve asenkron motorların sahip olduğu avantaj ve dezavantajlarının çoğu mevcuttur. Senkron motorlar incelendiğinde dört temel kategori göze çarpmaktadır: klasik senkron motorlar, relüktans motorlar, sürekli mıknatıslı motorlar ve hibrit motorlar. Literatürde yapılan yayınlara, başvuru ve alınan patentlere bakıldığında senkron motorlar günümüzde en fazla çeşitliliğin görüldüğü gruptur. Rotorunda alan sargılarının bulunduğu klasik senkron motorlar boyutsal olarak büyüktür. Bu da fazla malzeme kullanımına ve dolayısıyla da ağırlık artışına neden olur. Bunun yanında alan sargılarındaki kayıplardan dolayı verimleri de düşüktür [1, 2]. Senkron relüktans motorların ise bazı yapısal avantajları olmasına rağmen kontrol karmaşıklığı, manyetik performansın düşük oluşu ve duyulabilir gürültü problemleri bu motorların seri üretimde yer alamamasının en önemli sebepleridir. Hibrit senkron motorlar ise çoğunlukla bilimsel çalışmalar ile literatürde karşımıza çıksa da, yapıları nedeniyle özel uygulamalar dışında (üretim zorluğu ve maliyetin yüksek oluşu nedeni ile) seri üretime geçme potansiyelleri düşüktür. Klasik senkron motorların rotorlarındaki alan sargıları sürekli mıknatıslarla değiştirilirse sürekli mıknatıslı senkron motorlar elde edilir. Sürekli mıknatıslı (SM) motorlar diğer senkron motor türlerinin avantajlarına sahip olmakla birlikte dezavantajlarını da avantaja çevirebilmektedir. Bu sayede endüstriyel uygulamalarda, savunma sanayinde, elektrikli taşıtlarda, havacılık ve uzay sektörü gibi birçok uygulamada kullanılmakta ve sahip olduğu avantajların yanında üretim kabiliyetinin artmasıyla da günümüzde çok sayıda firma tarafından seri üretimi yapılmaktadır.

Senkron motorlar, endüklenen gerilim şekline göre sürekli mıknatıslı senkron motor veya fırçasız DC motor olmak üzere iki farklı kategoride sınıflandırılabilirler. Bu motorların rotor yapıları ise çok farklı çeşitlerde olabilir. En temel hali ile Şekil 1.1'de yüzeyden mıknatıslı ve dahili mıknatıslı motor yapıları gösterilse de farklı türlerine de sıkça rastlanılmaktadır. Yüksek enerjili NdFeB mıknatıslar sayesinde yüzeyden mıknatıslı senkron motorlar günümüzde birçok uygulamada sıkça kullanılmaktadır. Yapıları oldukça basit olan bu motorların rotor yapısını, saclardan

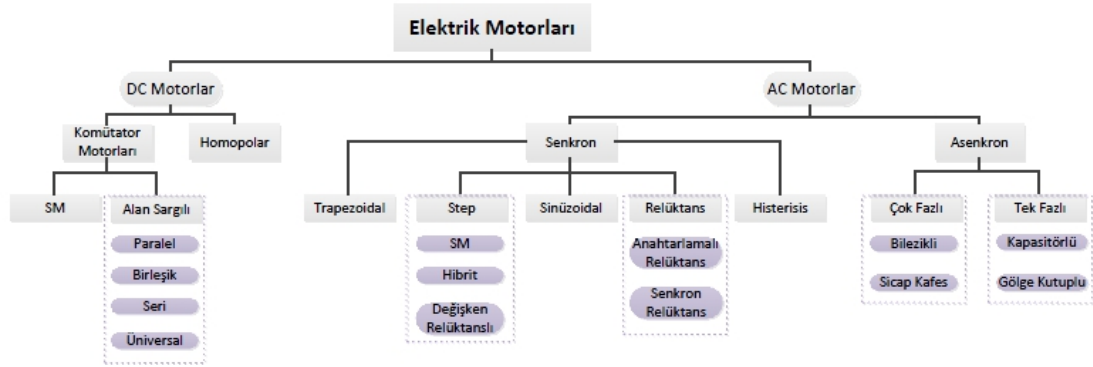
oluşan rotor nüveleri üzerine yapıştırılmış NdFeB mıknatıslar ve mil oluşturur. Stator yapıları ise AC asenkron motorlar ile benzerlik taşımaktadır. Dahili mıknatıslı motorlar da yüzeyden mıknatıslı motorlar ile aynı stator yapısına sahiptir. Dahili mıknatıslı motorlardaki fark ise mıknatısların rotor içerisine gömülmüş olmasıdır. Bu tür motorların rotor yapısının daha karmaşık olması bir dezavantaj olarak belirtilebilir.



Şekil 1.1. Yüzey mıknatıslı ve dahili mıknatıslı AC servomotor yapısı

Elektrik motorlarını sınıflandırmada farklı yöntemler kullanılabilir: rotor yapısına, besleme şekline veya stator tipine göre olan yöntemler gibi. Bu sınıflandırmada en sık kullanılan Şekil 1.2’de gösterildiği gibi DC ve AC motorlar şeklinde kategorize edilen yöntemdir. DC motorlar sargılarını beslemek için DC gerilim kaynağını kullanır. AC motorlar ise kaynak olarak alternatif akım ya da gerilimi kullanırlar. DC motorlar komütatör ve homopolar motorlar şeklinde ayrılabilir ve alan bağlantı şekillerine göre de seri, paralel, birleşik alan uyarımları gibi kategorize edilebilir. AC motorlar ise senkron ve asenkron motorlar olarak iki ana kategoride incelenebilir. Senkron motorlar, rotordaki alan sargılarının veya sürekli mıknatısların oluşturduğu manyetik döner alan ile mekanik döner alanın aynı hızda döndüğü motorlardır. Asenkron motorlarda ise manyetik döner alan ile mekanik dönüş arasında fark vardır. Asenkron motorlar tek ve çok fazlı olabileceği gibi, gölge kutuplu veya sincap kafesli de olabilir.

Elektrik motorları oluklarının olup olmamasına göre oluklu veya oluksuz olarak da sınıflandırılabilirler. Bunun yanında motorlar temel akı yönüne göre sınıflandırıldığında radyal ve eksenel akılı olarak ayrılırlar. Radyal akılı motorlarda akı bileşeni motor miline dik yönde, eksenel akılı motorlarda ise akı bileşeni mile paraleldir. Eksenel akılı motorlar (disk motorlar olarak da adlandırılır), radyal akılı motorların kullanılmayacağı durumlarda, bu motorlara alternatif olarak kullanılır. Eksenel akılı motorların radyal akılı motorlara göre avantajları yüksek moment yoğunluğu, düşük ses ve titreşim seviyeleri olarak sayılabilir. Ayrıca rotor yapıları fan görevi göreceği için bir sıcaklık problemi ortaya çıkmaz. Bu tip motorların en önemli özelliği ise getireceği geometrik avantajının yanında enerji dönüşümünün gerçekleştiği hava aralığı yüzeyinin radyal akılı motorlara göre ayarlanabilir olmasıdır.



Şekil 1.2. Elektrik motorlarının sınıflandırılması

## **2. DENGELİ VE DENGESİZ SARGI YAPILI SÜREKLİ MİKNATISLI MOTORLAR**

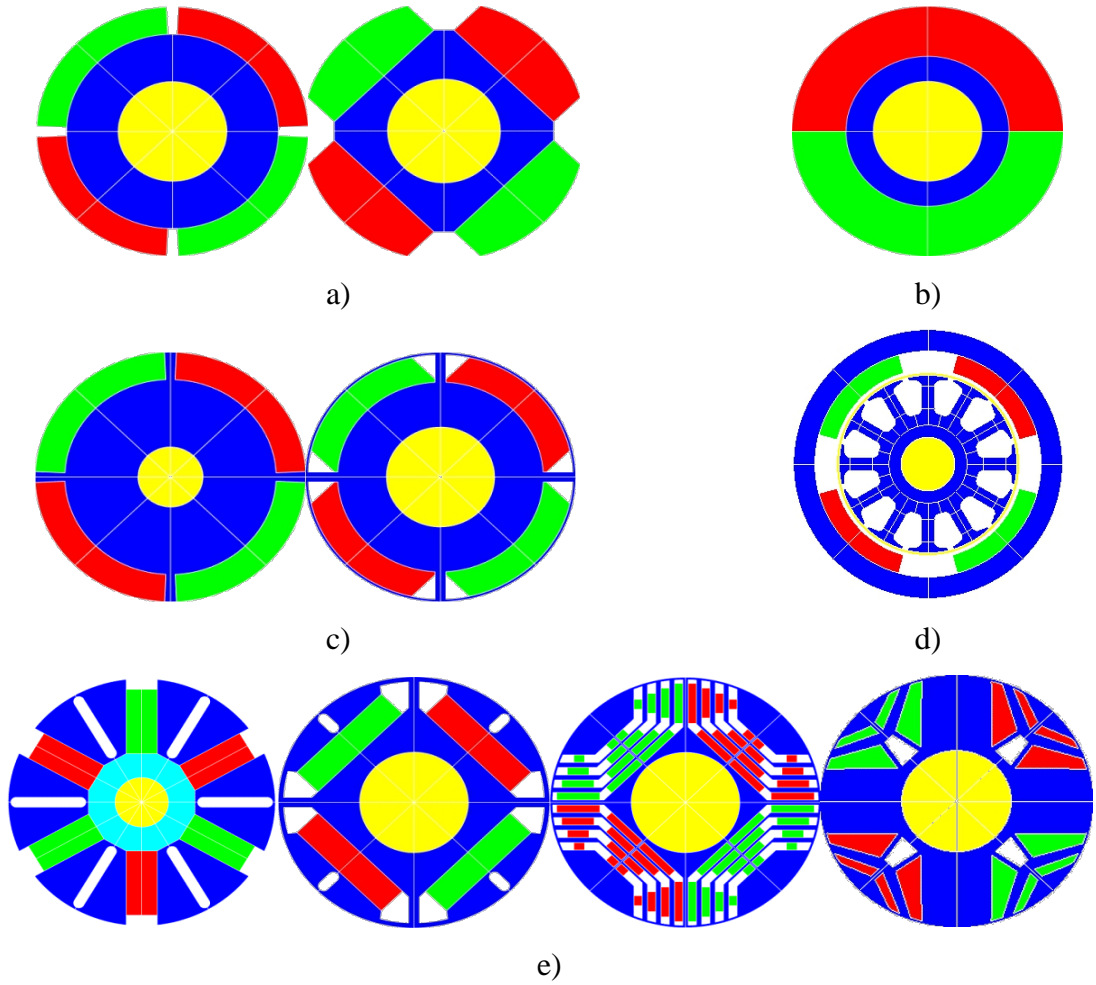
Endüstriyel uygulamalarda diğer motor türlerine göre en sık kullanılan motorlar %70'lik kullanım oranıyla asenkron motorlardır. Asenkron motorların yapılarının basit oluşu, düşük maliyetleri ve güvenilir olma gibi avantajlarının yanında verimlerinin düşük olması, ses, titreşim problemleri ve yüksek hızlarda çalıştırabilmek için gereksiz boyut ve güç artışını beraberinde getirmesi gibi dezavantajları bu motorların kullanım alanlarını kısıtlar. Bu yüzden asenkron motorlara alternatif bir seçenek sürekli mıknatıslı motorlardır.

80'li yıllarda yüksek enerjili NdFeB (Neodymium Iron Boron) ve SmCo (Samarium Cobalt) mıknatıslarının bulunması ile SM motorlar birçok uygulamada asenkron ve DC motorlara alternatif olarak kullanılmıştır. Günümüzde de bu alanda olan artış net bir şekilde görülmektedir. SM motorların asenkron ve DC motorlara tercih edilmesindeki en büyük etkenler için; bu tip motorlara göre verimleri ile moment ve güç yoğunluklarının yüksek olması, hacimlerinin ve ağırlıklarının az olması, boyutlarının da küçük olması gösterilebilir. Diğer düşük enerjili mıknatıslara göre NdFeB mıknatısların akıların fazla olması da motor manyetik devresinin daha iyi tamamlanmasını sağlar. Bu da aynı güç seviyesindeki elektrik motorları için motor boyutunun küçülmesini, moment ve güç yoğunluğu yanında veriminin de artmasını sağlar. Bahsedilen avantajlardan dolayı sürekli mıknatıslı motorlar birçok uygulamada artan bir ilgi ile kullanılmaktadır.

### **2.1. SM Rotor Yapıları**

Sürekli mıknatıslı senkron motor yapıları incelendiğinde farklı tipte birçok yapıya sahip oldukları görülür. Bu yapılardan bazıları Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Sürekli mıknatıslı motorlar endüstride veya servo uygulamalarda çok sık kullanılır ve sürekli mıknatıslı motorun rotor yapısını belirlemede uygulamanın türü önemli rol oynar. Örneğin, uygulamanın üretim maliyeti ve kontrolünün basit olması önemli bir kriter ise yüzeyden mıknatıslı motorlar tercih edilebilir. Buna karşın, d-eksen akımının

fazla olmasından dolayı mıknatısların demagnetize olma riski bulunan uygulamalarda yüzeyden mıknatıslı motorlar tercih edilmez. Uygulama çok yüksek hızları gerektiriyorsa yüzeyden mıknatıslı motorlar rotor kılıfı gibi bir malzeme kullanılarak önlem alınırsa tercih edilebilir, ama bu tip uygulamalarda genellikle mıknatısların rotorun içine gömülü olduğu dahili mıknatıslı motorlar tercih edilir. Motor boyutlarında bir değişiklik yapmadan sabit güç bölgesini arttırmak için de yine dahili mıknatıslı motorlar kullanılır.



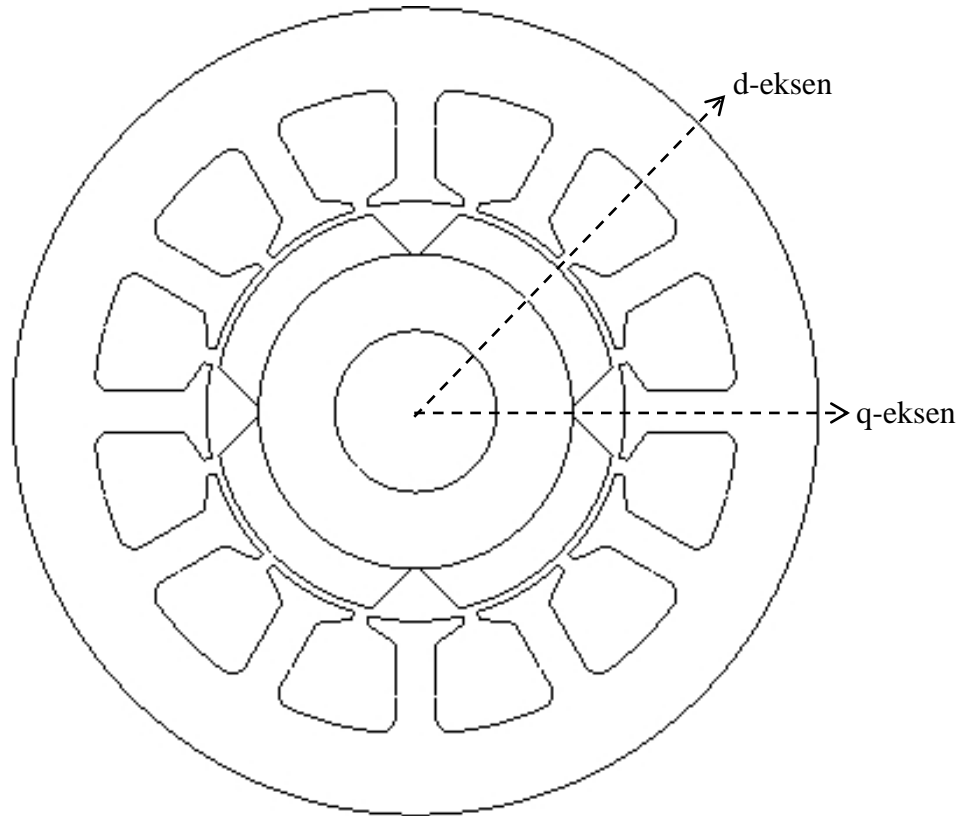
Şekil 2.1. Farklı tipteki SM motor yapıları a) Yüzeyden mıknatıslı, b) Yüzük tip, c) Yüze gömülü mıknatıslı, d) Dış rotorlu, e) Dahili mıknatıslı motorlar [3]

### 2.1.1. Yüzeyden mıknatıslı motorlar

Yüzeyden mıknatıslı motorlar, özellikle yüksek enerjili mıknatısların kullanılmaya başlamasıyla, senkron motorlar arasında en çok kullanılan motor türü haline gelmiştir [4-7]. Yüzeyden mıknatıslı motorda mıknatıslar rotor yüzeyine Şekil 2.2'de

gösterildiği gibi yapıştırılır. Bu düzenlemede mıknatıslardan geçen akı, rotor sacları gibi manyetik bir malzeme ile karşılaşmadan doğrudan hava aralığına geçeceği için hava aralığında en yüksek akı yoğunluğunun var olduğu yapıdır. Yüzeiden mıknatıslı motorların en büyük dezavantajı ise mıknatısların rotor yüzeyine güvenli bir şekilde yerleştirilememesinden dolayı motorların yapısal bütünlüğü düşüktür. Bu dezavantaj nedeniyle de yüzeiden mıknatıslı motorlar genellikle 3000rpm'in üzerindeki uygulamalarda tercih edilmez. Bunun yanında rotor çapının çok küçük olduğu bazı uygulamalarda 50.000rpm hızlara çıktığı da görülebilir [4].

Yüzeiden mıknatıslı motorların yapısından dolayı d-eksen ve q-eksen arasındaki relüktans farkı çok küçüktür. Bu yüzden, yüzeiden mıknatıslı motorların d-eksen ve q-eksen endüktansları arasındaki fark da oldukça azdır. Bu da yüzeiden mıknatıslı motorların kontrolünü kolaylaştıran en önemli etkenlerden biridir.



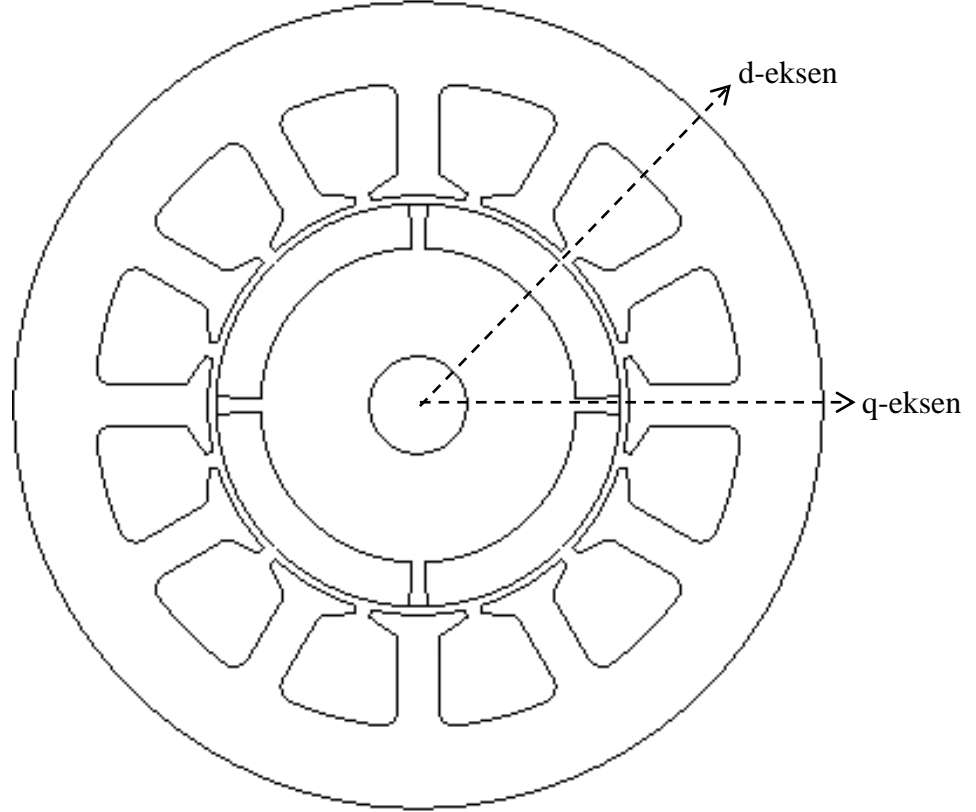
Şekil 2.2. Yüzeiden mıknatıslı motor yapısı

DC ve asenkron motorlara nazaran daha küçük boyutlarda yüksek moment kabiliyetine sahip olmaları ve üretim maliyetlerinin düşük olması da yüzeiden mıknatıslı senkron motorların daha çok tercih edilmesindeki en önemli sebeplerdir.

Yüzeyden mıknatıslı motorlar farklı yapılara sahip sürekli mıknatıslı motorlara göre daha yaygın bir kullanıma sahiptir. Yüksek güç yoğunluğu gerektiren, çok yüksek hızlara çıkmayan uygulamalarda kullanılır.

### 2.1.2. Yüzeye gömülü SM motorlar

Bu yapıda, mıknatıslar rotor üzerinde yer alan kanallara yerleştirilir (Şekil 2.3). Böylece, yüzeyden mıknatıslı motorlara göre daha sağlam bir rotor yapısı elde edilmiş olur ve yüksek hızlara çıkan uygulamalarda kullanılmasını sağlar. Ayrıca, d-eksen relüktansı q-eksen relüktansına göre yüksek olduğundan, q-eksen endüktansı daha büyüktür ( $L_d < L_q$ ). Bunun yanında, mıknatıslar tarafından endüklenen gerilim yüzeyden mıknatıslı motorlara göre genellikle daha azdır [8].



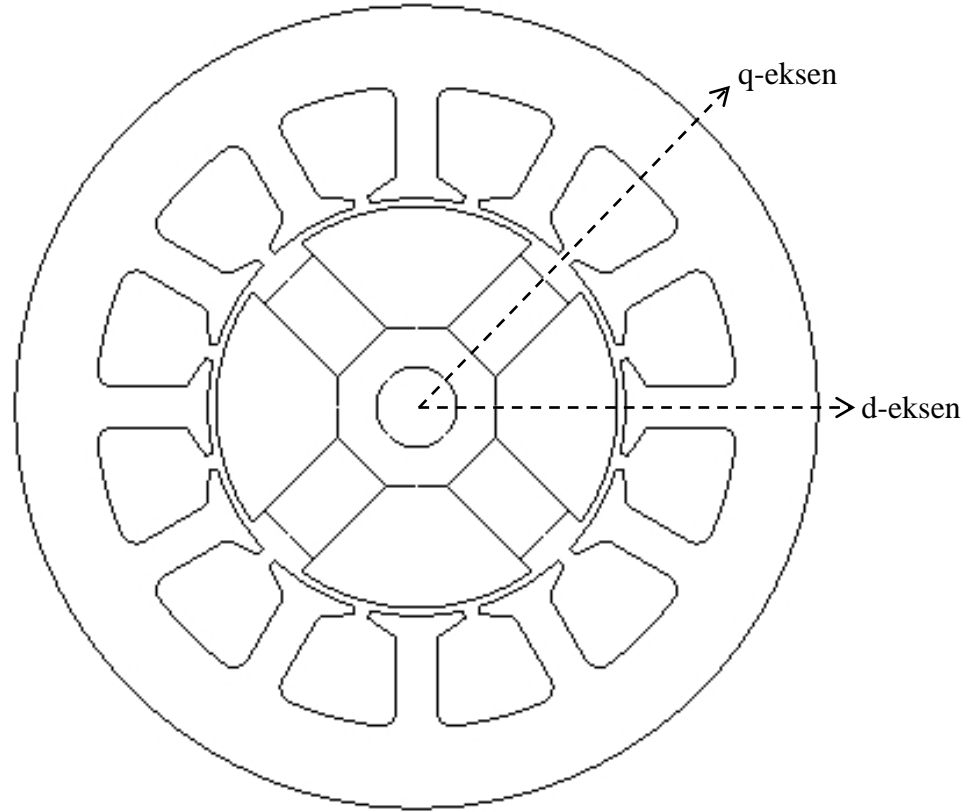
Şekil 2.3. Yüzeye gömülü SM motor yapısı

### 2.1.3. Dahili mıknatıslı motorlar

Dahili mıknatıslı motorlarda mıknatıslar rotor yapısının içine gömülmüştür (Şekil 2.4). Bu motorlar güç elektroniği ve motor kontrolü alanındaki gelişmeler ile birlikte farklı avantajları sayesinde birçok uygulamada kullanılmaya başlanmıştır.

Mıknatısların rotor yapısına gömülmüş olması bazı avantajları da beraberinde getirmektedir. Mekanik olarak daha sağlam yapıda olması, paslanmaya karşı direncinin yüksek olması, düşük ses ve titreşim seviyesi ve yüksek hızlara çıkabilme kabiliyeti bu motorların sağladığı en temel avantajlardır.

Dahili mıknatıslı motorların yüzeyden mıknatıslı motorlara göre en dikkat çekici avantajlarından biri de daha az mıknatıs hacmi kullanılarak aynı güç seviyelerine çıkabilmesidir. Bu avantajların yanında bu motorların dezavantajları olarak, rotor yapılarının karmaşık olması ve bunun sonucunda artan üretim maliyeti, motor kontrolünün daha karmaşık oluşu ve d-eksen akımının sürekli olarak var olması sayılabilir [9-11].



Şekil 2.4. Dahili mıknatıslı motor yapısı

Özet olarak, SM motorlar en genel haliyle yüzeyden mıknatıslı, yüzeye gömülü mıknatıslı ve dahili mıknatıslı motorlar şeklinde incelenebilir. Bu motorların temel özelliklerinin karşılaştırması Tablo 2.1’de verilmiştir [8, 12]. Görüldüğü gibi yüzeyden mıknatıslı motorların rotor yapılarının üretim açısından daha basit olması, ayrıca motor kontrolünün de nispeten kolay olması diğer motor tiplerine göre öne



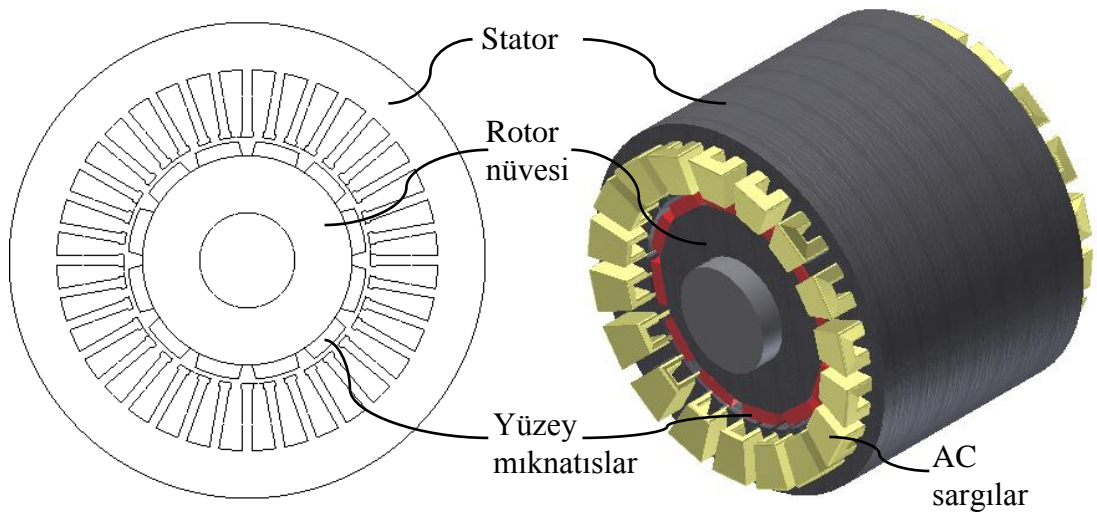
çıkaran avantajları olarak gösterilebilir. Bunun yanında yüzeyden mıknatıslı rotor yapısı ile yüksek hızlara çıkabilmek her ne kadar bir problem olarak görünse de, rotor kılıfı kullanılarak bu sorunun önüne geçilebilir.

Tablo 2.1. SM motorların karşılaştırılması

	<b>Yüzeyden mıknatıslı motorlar</b>	<b>Yüze gömülü SM motorlar</b>	<b>Dahili mıknatıslı motorlar</b>
<b>Tip</b>	Fırçasız DC veya SM senkron motor	Fırçasız DC veya SM senkron motor	SM senkron motor
<b>Akı dağılımı</b>	Kare ya da sinüzoidal	Kare ya da sinüzoidal	Sinüzoidal
<b>Rotor yapısı</b>	Basit	Nispeten basit	Karmaşık
<b>Eddy kayıpları</b>	Yüksek	Düşük	Düşük
<b>Hız limiti</b>	$\sim 1,2 \times \omega_R$	$\sim 1,3 \times \omega_R$	$\sim 3 \times \omega_R$
<b>Relüktans momenti</b>	Yok	Var	Var
<b>Yüksek hızlara uygunluk</b>	(Önlem alınmazsa) Hayır	Mümkün	Mümkün
<b>Motor Kontrolü</b>	Nispeten kolay	Nispeten kolay	Karmaşık

## 2.2. Sürekli Mıknatıslı Motorlarda Kullanılan Malzemeler

Klasik yüzeyden mıknatıslı bir servomotor yapısı Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi motor tek bir stator ve sürekli mıknatısların yerleştirildiği rotordan oluşmuştur. AC sargılar da stator oluklarına yerleştirilmiştir. Stator yapısı buradaki gibi oluklu bir yapıya sahip olabileceği gibi, oluksuz da olabilir ve lamineli manyetik

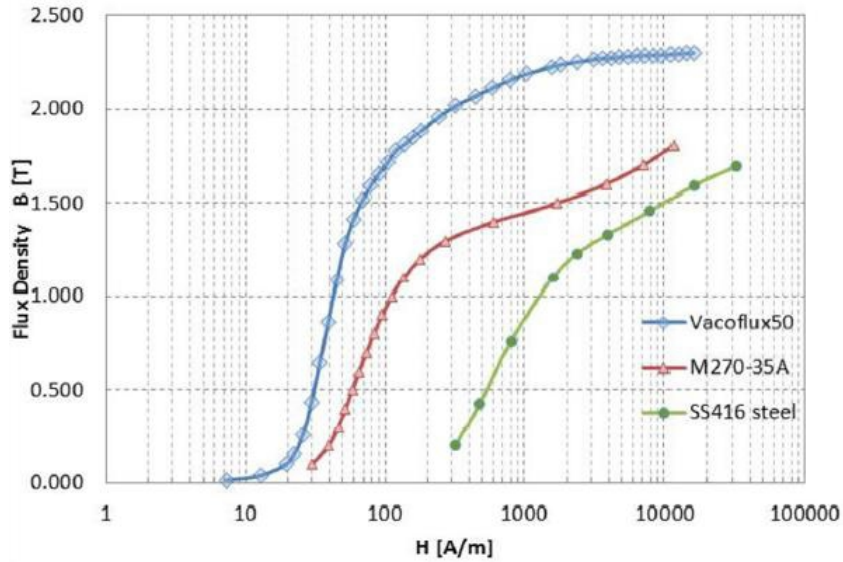


Şekil 2.5. Yüzeyden mıknatıslı senkron motor

saclardan oluşur. Rotor yapısı ise rotor yüzeyine yerleştirilen SM'ler, rotor nüvesi ve milden oluşmaktadır. Bu bölümde sürekli mıknatıslı motorlarda kullanılan sac malzemeleri ve sürekli mıknatıslı malzemeleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

### 2.2.1. Silisli çelik malzemeleri

Günümüzde SM motorların üretiminde farklı türde sac malzemeleri kullanılmaktadır. Uygulamanın türü, motorların üretim adetleri ve maliyetin uygulama açısından önemi bu malzemelerin seçiminde önemli rol oynar. Örnek olarak, maliyet faktörüne göre daha çok performansın ön planda tutulduğu savunma sanayi uygulamalarındaki sac malzeme tercihleri ile seri üretim yapan ve dolayısıyla maliyet faktörünün önemli olduğu uygulamalar arasındaki sac malzeme tercihlerinin farklı olması verilebilir. Bunun yanında motorların kullanılacağı uygulamaların hız seviyeleri de bir başka belirleyici unsurdur. Eğer uygulama yüksek hızları gerektiriyorsa kayıplar fazla olacağından dolayı bu tür uygulamalarda sac kalınlığı ince olan malzemeler tercih edilir. Hızın daha düşük olduğu uygulamalarda ise kayıpların nispeten daha az olacağı düşünülerek, maliyeti daha az olan kalın saclar tercih edilebilir [12].



Şekil 2.6. Motor sac datalarına örnek [12]

Endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılan sac malzemesi M270-35A'dır (diğer bilinen adıyla M19). Bunun yanında uygulama yüksek hızları gerektiriyorsa doyum seviyesi yüksek ve kayıpları düşük olan Vacoflux50 malzemesi iyi bir seçim olabilir. Şekil 2.6'da 3 farklı malzemeye ait B-H eğrileri verilmiştir. Görüldüğü gibi doyum

seviyesi en yüksek olan malzeme Vacoflux50 iken, standart 416 çeliğinin doyum seviyesi oldukça düşüktür.

Farklı standartlardaki silisli çelik malzemelerinin karşılaştırılması Tablo 2.2’de verilmiştir. Ayrıca, Avrupa normlarında en sık kullanılan motor sac malzemeleri, kalınlıkları ve kayıp değerleri Tablo 2.3’de gösterilmiştir.

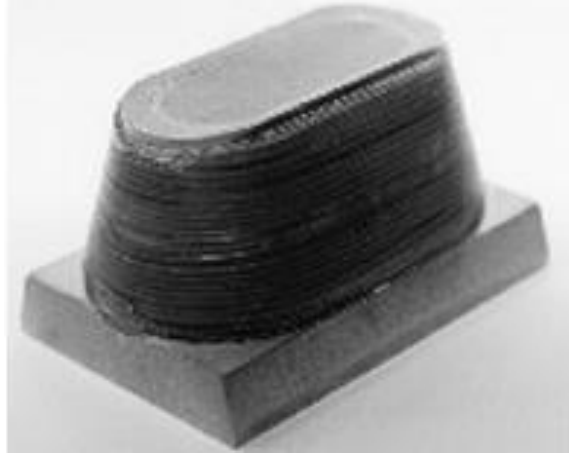
Tablo 2.2. Farklı standartlarda silisli çelik malzemeleri ve eşdeğerleri [13]

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

Elektrik motorlarında, silisli çeliğin yanında SMC (Soft Magnetic Composite) malzemeler de bu alandaki gelişmelere bağlı olarak bazı avantajları nedeniyle kullanılmaktadır. Manyetik akı 3 boyutlu aktığı için 2 boyutlu laminasyonların izin vermediği çalışmalarda rahatlıkla kullanılabilir [15]. Şekil 2.7’de SMC malzemesi kullanılarak oluşturulmuş bir stator segmenti örnek olarak gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Avrupa normlarında en sık kullanılan motor sac malzemeleri, kalınlıkları ve demir kayıp değerleri [14]

Sınıf EN 10106	Kalınlık	50 Hz de maksimum toplam kayıp		50 Hz de minimum manyetik kutuplaşma		
		$\hat{j} = 1,5T$ W/kg	$1,0 T^{**}$ W/kg	$\hat{H}=2500$ T	500 T	1000 A/m T
M235-35A	0,35	2,35	0,95	1,49	1,60	1,70
M250-35A	0,35	2,50	1,00	1,49	1,60	1,70
M270-35A	0,35	2,70	1,10	1,49	1,60	1,70
M300-35A	0,35	3,00	1,20	1,49	1,60	1,70
M330-35A	0,35	3,30	1,30	1,49	1,60	1,70
M700-35A	0,35	7,00	7,00	1,60	1,69	1,77
M250-50A	0,50	2,50	1,05	1,49	1,60	1,70
M270-50A	0,50	2,70	1,10	1,49	1,60	1,70
M290-50A	0,50	2,90	1,15	1,49	1,60	1,70
M310-50A	0,50	3,10	1,25	1,49	1,60	1,70
M330-50A	0,50	3,30	1,35	1,49	1,60	1,70
M350-50A	0,50	3,50	1,50	1,50	1,60	1,70
M400-50A	0,50	4,00	1,70	1,53	1,63	1,73
M470-50A	0,50	4,70	2,00	1,54	1,64	1,74
M530-50A	0,50	5,30	2,30	1,56	1,65	1,75
M600-50A	0,50	6,00	2,60	1,57	1,66	1,76
M700-50A	0,50	7,00	3,00	1,60	1,69	1,77
M800-50A	0,50	8,00	3,60	1,60	1,70	1,78
M940-50A	0,50	9,40	4,20	1,62	1,72	1,81



Şekil 2.7. SMC kullanılarak üretilen bir stator segmenti [16]

### 2.2.2. Sürekli mıknatıs malzemeleri

Mıknatıs malzemeleri alanındaki gelişmelere bağlı olarak SM elektrik motorları günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Sürekli mıknatısların

modellenmesinde en önemli parametreler kalıcı akı yoğunluğu (residual flux density) ( $B_r$ ), mıknatıslamayı zorlayıcı kuvvet (coercive force) ( $H_c$ ) ve geçirgenlik ( $\mu_r$ ). Bu parametrelerden herhangi ikisinin bilinmesiyle diğerini elde etmek mümkündür. Geçirgenlik demagnetizasyon eğrisinin (B-H eğrisi) lineer bölgedeki eğimine eşittir. Küçük geçirgenlik, mıknatısın kalıcı olarak demagnetize olmadan önceki yüksek akı seviyelerini ifade eder.

1930'lu yıllarda bulunan Alnico türü mıknatıslar alüminyum, nikel, demir ve kobalt alaşımlı bir mıknatıs türüdür ve günümüzde hala birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu mıknatıslar istenilen yönde mıknatıslamayı sağlamak için ısıtma ve soğutma yöntemiyle kolay bir biçimde yönlendirilebilir. Bu mıknatıslar  $B_r$  değerlerinin, ısıl kararlılıkların ve korozyon dirençlerinin yüksek oluşu nedenleri ile geçmiş dönemlerde SM motorlarda sıkça kullanılırdı. Diğer taraftan, bu mıknatısların pahalı oluşu ve kolay bir şekilde demagnetize olması dezavantajları olarak gösterilebilir.

Ferrite mıknatıslar (diğer adıyla seramik mıknatıslar) ise AlNiCo mıknatıslara göre hammaddesi çok fazla olduğu için daha ucuzdur ve endüstride sıkça kullanılmaktadır. Bu mıknatısların en önemli avantajı iç zorlayıcı kuvvetin (intrinsic coercive force) ( $H_{ci}$ ) yüksek olması sayesinde mıknatısların demagnetize olmasına karşı dirençli olmasını sağlar. Ferrite mıknatısların korozyona karşı dirençleri de yüksektir. Bu mıknatısların  $B_r$  değerinin düşük olması ise dezavantajı olarak gösterilebilir.

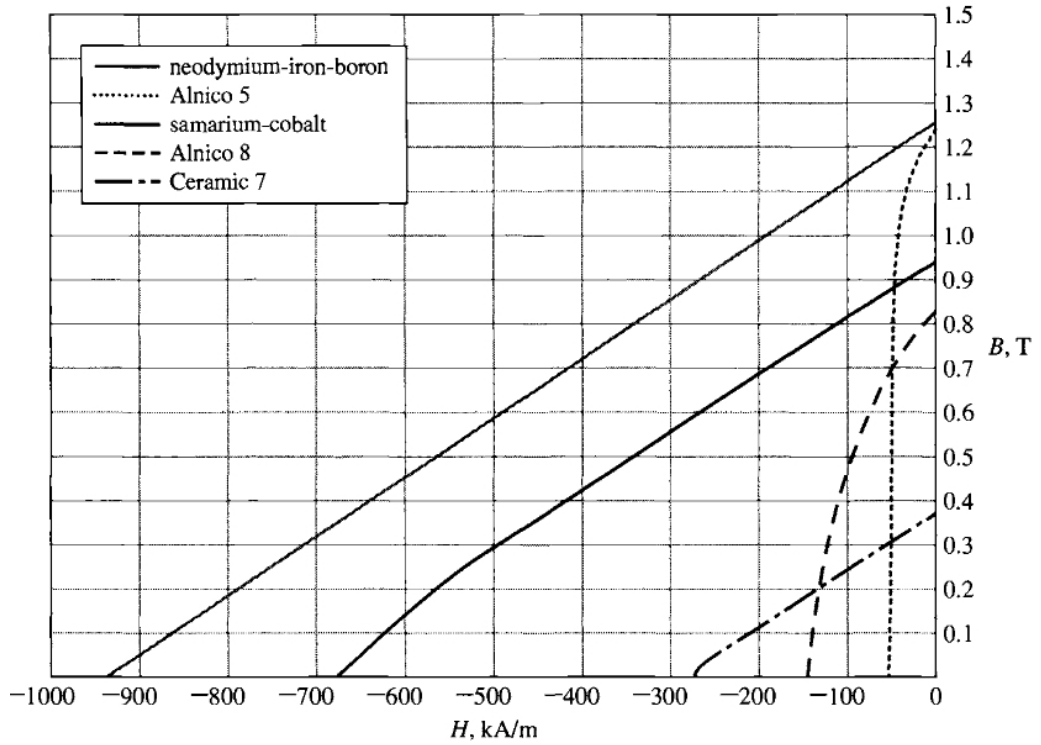
1960'lı yıllarda samaryum ve kobalt (SmCo) alaşımlarının kullanıldığı nadir toprak (rare-earth) mıknatısların bulunması servomotorların geleceğini değiştirmiştir. Mıknatısta depolanan maksimum manyetik enerji miktarı AlNiCo ve Ferrite mıknatıslara göre daha yüksektir. Fakat bu mıknatısların hammaddelerinin çok fazla olmamasından dolayı diğer tip mıknatıslara göre üretim fiyatları daha yüksektir. Bunun yanında en büyük dezavantajları kırılma olmalarıdır. 1983 yılında Neodimiyum-Demir-Bor (NdFeB) alaşımlı mıknatısların bulunması sürekli mıknatıslı motorlarda bir dönüm noktası olmuştur. Bu mıknatıslar toz presleme ile üretilmişlerdir ve mıknatıs enerjileri  $430\text{kJ/m}^3$ 'ü aşmıştır [12]. Bu mıknatıslarda kobalt elementinden daha çok demir kullanıldığı için SmCo alaşımlı mıknatıslara

göre hem daha sağlamdır hem de daha ucuzdur. NdFeB mıknatısların SmCo mıknatıslara göre en önemli dezavantajları ise korozyona karşı dirençlerinin düşük olması ve çalışma sıcaklıklarının SmCo mıknatıslara göre daha düşük olmasıdır.

Tablo 2.4’de farklı türdeki mıknatısların karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 2.8’de ise farklı mıknatıslara ait demagnetizasyon eğrileri gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Farklı türdeki sürekli mıknatıslı malzemelerin karşılaştırılması [12, 17, 18]

Mıknatıs Türü	$B_r$ (T)	$H_c$ (kA/m)	Korozyona Direnci	Üretilebilirlik (Şekillendirme Kolaylığı)	Çalışma Sıcaklığı (Max.) [°C]	Maliyet
AlNiCo	0,5-1,2	40-150	Orta	Zor	540	Orta
Ferrite	0,15-0,43	150-350	Yüksek	Zor	250	Çok Düşük
SmCo	0,9-1,1	700-2400	Yüksek	Yüksek	300	Çok Yüksek
NdFeB	1,0-1,48	900-3200	Zayıf	İyi	220	Yüksek



Şekil 2.8. Farklı türdeki sürekli mıknatıslara ait B-H eğrisi [19]

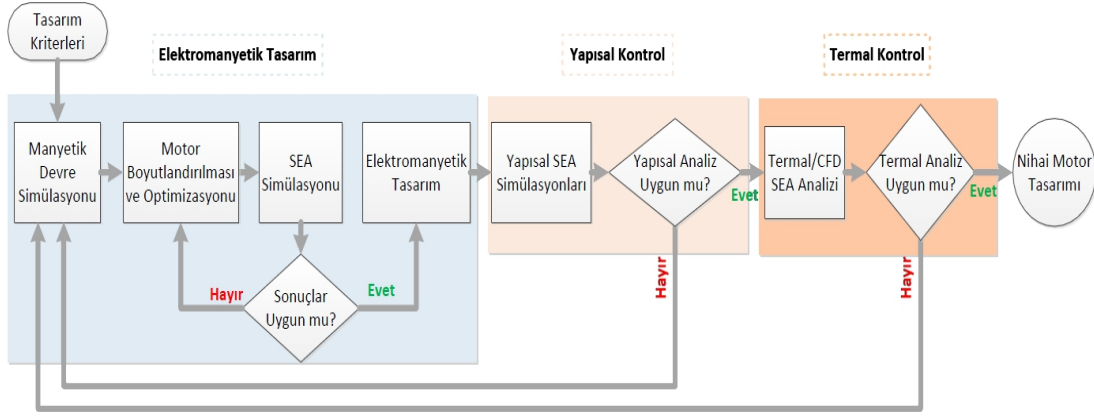
### 2.3. SM Motor Tasarım Süreci

SM motorların tasarım süreci Şekil 2.9’da gösterildiği gibi elektromanyetik, yapısal ve termal analizler olmak üzere 3 temel aşamadan oluşur. İlk olarak, istenilen tasarım kriterleri doğrultusunda motorun manyetik devresi modellenerek oluk ve kutup sayısı

gibi veriler ile stator çapı, diş kalınlığı, rotor çapı gibi temel parametreler için kaba boyutların verildiği bir ön tasarım gerçekleştirilmiş olur. Bu ön tasarım doğrultusunda belirli kriterler göz önünde bulundurularak (motorun gücü, kutup sayısı, maliyeti gibi) bir dizi optimizasyon çalışması gerçekleştirilir ve istenilen özelliklerin optimum doğrultuda elde edilmesi sağlanır. Tasarım kriterlerinde istenen özellikleri karşılayan bir tasarım elde edildiğinde detaylı bir sonlu eleman analizi (SEA) yapılarak motor performansının istenilen özellikleri karşılayıp karşılamadığı doğrulanır. Burada kullanılacak sonlu elemanlar yazılımının türünün 2 boyutlu (2B) ya da 3 boyutlu (3B) olmasını SM motor yapısı belirler. Döngülere bağlı olarak ilerleyen bu süreçte tasarım kriterlerinin detaylarına göre birkaç defa tekrarlanabileceği göz ardı edilmemelidir. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan performans analizi sonucu ile ön tasarımından sonra optimizasyonu yapılmış motorun sonuçları karşılaştırılır. Sonuçlar arasında bir problem yoksa yapısal tasarım aşamasına geçilir, problem varsa optimizasyon aşamasına dönülerek parametreler kontrol edilir.

Elektromanyetik tasarım aşamasını geçmiş bir motorun yapısal tasarımı ve analizleri gerçekleştirilir. Özellikle yüksek hızlı uygulamalar için bu aşama oldukça önemlidir. Çünkü burada oluşabilecek bir problem doğrudan rotor yapısının bütünlüğünün bozulmasına neden olacaktır. Fakat uygulama yüksek hızları gerektirmiyorsa, yapısal analize gerek kalmayabilir. Yapısal kontrollerin yapıldığı bu aşamada bir problem yaşanırsa elektromanyetik tasarım aşamasına geri dönmeli ve rotor yapısı uygulamaya göre yeniden düzenlenmelidir.

Tasarım sürecindeki son aşama, motorun termal bir sorunla karşılaşmaması için yapılan ısıl stres kontrolüdür. Burada bir SEA yazılımı ya da CFD gibi bir çalışma ile analizler yapılabilir. Termal kontrollerin yapıldığı bu aşamada da bir problem ile karşılaşılırsa yeniden elektromanyetik tasarım aşamasına dönmelidir. Burada da uygulamanın türüne ve ortam sıcaklığına göre termal analizlerin gerekliliği belirlenebilir. Sürekli mıknatıslı AC veya DC senkron motor özel bir uygulama için tasarlanacaksa verilen aşamaların tamamını gerçekleştirdikten sonra tasarım sonlandırılmalıdır ve üretimi yapılmalıdır [20].



Şekil 2.9. SM motor tasarım aşamaları

#### 2.4. Dengeli Standart SM Motorlar

SM bir motor tasarımında en önemli nokta oluk-kutup kombinasyonunun uygun bir şekilde seçilmesi ve buna bağlı olarak da sargıların tasarlanmasıdır. Oluk-kutup kombinasyonuna bağlı olarak sargı adımı, sargı sonu, stator manyeto motor kuvveti (MMK) harmonikleri ve sargı faktörü gibi parametreler belirlenir. Düzgün bir sargı seçimi de motor performansını doğrudan etkileyebilir [25-28].

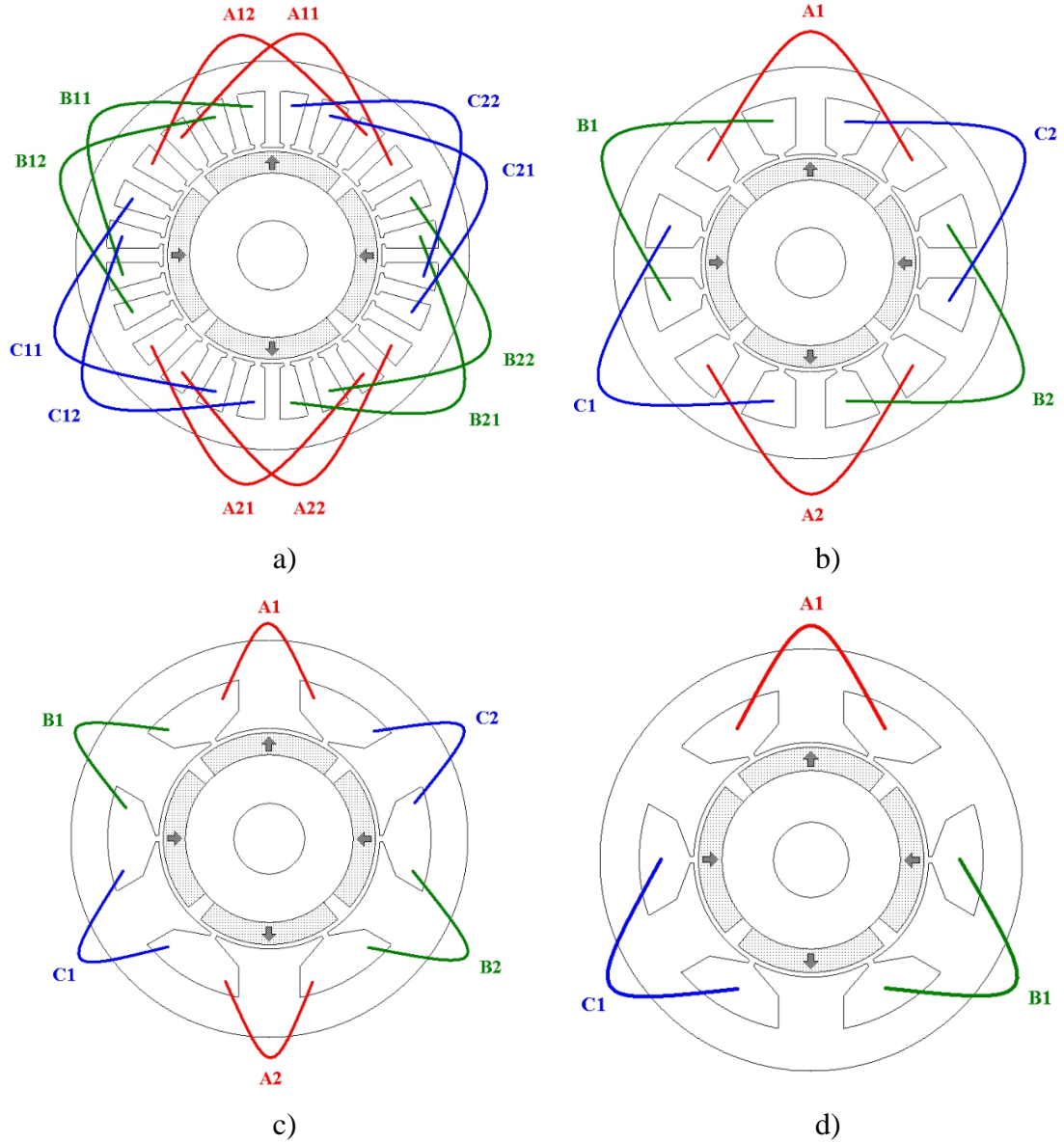
Denklem (2.1)'de verilen ifadenin tamsayı olması durumunda tamsayı-oluklu motor, kesirli olması durumunda da kesir-oluklu motor olarak adlandırılır. Burada  $Q_s$  statordaki oluk sayısını,  $m$  faz sayısını ve  $p$  de rotordaki mıknatıs kutbu sayısını temsil etmektedir.

$$q = \frac{Q_s}{m.p} \quad (2.1)$$

Üç fazlı bir motorda faz gerilimlerinin her biri arasında  $120^\circ$ 'lik faz farkı ile aynı genlikli ve aynı şekle sahip bir gerilim üretilmelidir. Bu üç kriter sağlandığı zaman sargıların dengeli bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. 3-fazlı radyal akılı SM motorlar için en çok kullanılan sargı yapıları iki kısımda incelenebilir [29]: 1) Her ikisi de dağıtılmış olan kesişen sargı yapısı; Şekil 2.10.a'da verilen (2 oluk/kutup/faz) ya da Şekil 2.10.b'de verilen (1 oluk/kutup/faz) yapıda olabilir, 2) Her ikisi de konsantre olan kesişmeyen sargı yapısı ( $q < 1$  olması durumunda); Şekil 2.10.c'de verilen, tüm dişleri sarılmış ya da Şekil 2.10.d'de verilen belirli dişler sarılmış yapıda



olabilir. Kesir-oluklu sargı yapısında  $q > 1$  olması durumunda ise sargıların dağılımı keşişen dağıtılmış yapıda olacaktır.



Şekil 2.10. Klasik sargı tipleri a) 24-oluk 4-kutup, keşişen sargı (dağıtılmış), b) 12-oluk 4-kutup, keşişen sargı (dağıtılmış), c) 6-oluk 4-kutup, keşişmeyen sargı, (tüm dişler sarılı) (çift katmanlı) ve d) 6-oluk 4-kutup, keşişmeyen sargı, (belirli dişler sarılı) (tek katmanlı) [29]

Kesişen dağıtılmış sargı yapısı genellikle daha sinüzoidal bir MMK dağılımı ve zıt elektro motor kuvveti gerilimi şekline sahip olduğu için SM AC servomotorlarda sıklıkla kullanılır [29]. Bu yapı tam-sayı oluklu yapılar için geçerlidir ( $q=1k$   $k=1, 2, 3...$ ). Diğer taraftan, kesir-oluklu yapılarda kullanılan, keşişmeyen sargıda, sargı sonları oldukça kısadır ve dolayısıyla motor toplam uzunluğu daha kısadır. Bu da

bakır kayıplarını azaltacağı için hem motor verimini hem de moment yoğunluğunu arttırır [26, 30]. Ayrıca, kesişmeyen sargılarda motor maliyeti daha düşüktür ve oluk dolgu faktörü daha yüksek olan statorların segmentli olduğu yapılara uygundur [31]. Konsantre sargıların dağıtılmış sargılara göre diğer bir avantajı ise aynı mıknatis toplam akısı için daha yüksek endüktans sağlarlar. Bu da yüzeyden mıknatıslı motorların alan zayıflatma kabiliyetinin fazla olmasındaki en önemli sebeptir [32].

## **2.5. Dengesiz SM Motorlar**

Sürekli mıknatıslı bir motorun sargı yapısını oluk-kutup kombinasyonu belirler. Bu yüzden bir uygulamada en iyi motor tasarımı yapabilmek için sargı yapısının doğru bir şekilde oluşturulması kritik bir öneme sahiptir. Bazı oluk-kutup kombinasyonları dengeli bir sargı yapısı oluşturulmasına izin vermez. Bu yüzden bu tür kombinasyonların olduğu durumlarda dengesiz sargı yapısını kullanmak kaçınılmaz olur. Dengesiz sargı yapısı kullanıldığında ise fazlarda endüklenen EMK gerilimleri arasında artık 120 derecelik faz farkı olmayacaktır. Diğer bir deyişle, dengeli bir sargı yapısı kullanıldığı durumda (EMK'nin genlikleri, frekansları ve dalga şekilleri aynı olan) eşit faz farkı ile simetrik bir yapı oluşturulur, ama dengesiz sargı yapısı öyle bir oluk-kutup kombinasyonuna sahiptir ki bobinlerin simetrik bir yapı oluşturmasına izin vermez.

Elektrik motorlarında dengesiz sargı yapısına sahip bir kombinasyon kullanılarak vuru momentini azaltmak, sinüzoidal bir zıt elektromotor kuvveti gerilimi sağlamak ve moment dalgalanmalarını azaltmak mümkündür. Bu sayede motorda yapısal olarak hiçbir önlem almaya gerek kalmadan sadece dengesiz sargı yapısı kullanarak hem düşük hızlarda hassas hız ve konum kontrolü yapılabilecek, hem de gerilim dalga şeklinin düzgün bir sinüzoidal dalga şekline sahip olması ve moment kalitesi yüksek bir tasarım olması da motor kontrolünü kolaylaştıracaktır. Bu avantajların yanında sargıların asimetrik dağılımından kaynaklanan dengesiz manyetik çekme kuvveti (Bölüm 4'de detaylı olarak anlatılmıştır) problemi ortaya çıkmaktadır. Bu kuvvet de hem gürültüye neden olmakta hem de rulmanların ömrünü azaltmaktadır. Bu da bu tip bir yapı kullanıldığında tasarımcının karşısına çıkan en önemli dezavantajdır.

SM bir motorda sargı yapısının dengeli ya da dengesiz olması sadece oluk sayısına ( $Q_s$ ) ve kutup sayısına ( $p$ ) bağlıdır. Oluk sayısının faz sayısına ve motor periyoduna oranı Denklem (2.2)'de gösterildiği gibi tanımlanabilir [33]. Bu orana bağlı olarak motor sargılarının dengeli ya da dengesiz bir sargı yapısı üreteceği anlaşılır. Eğer Denklem (2.2)'de verilen ifade bir tamsayıya eşitse dengeli, eşit değilse dengesiz bir sargı yapısı kullanılır. Sargı simetriği sayısı ise oluk sayısı ile kutup çifti sayısının en büyük ortak böleninin (OBEB) alınmasıyla elde edilir. Bu ifade aynı zamanda motor periyodunu da ifade etmede kullanılır.

$$x = \frac{Q_s}{m.OBEB\left(Q_s, \frac{p}{2}\right)} \quad (2.2)$$

Burada  $Q_s$  oluk sayısını,  $p$  kutup sayısını ve  $m$  ise faz sayısını göstermektedir. Bununla beraber, dengesiz sargı yapısı, kutup çifti sayısı sadece 3'ün katı olduğu durumlarda ( $p=6, 12, 18\dots$ ) ortaya çıkar. Örneğin, 18-oluk 6-kutuplu motor 3 sargı simetriğine sahiptir ve Denklem (2.2)'deki eşitlik bir tamsayıya eşit olduğundan ( $x=1$ ) dengeli bir sargı yapısına sahiptir. Bunun yanında 21-oluk 6-kutuplu motor da 3 sargı simetriğine sahip olmasına rağmen, Denklem (2.2)'deki eşitlik kesirli bir sayı olduğundan ( $x=2,33$ ) dengesiz bir sargı yapısına sahiptir.

Bu tezde, sargı yapıları dört ana başlık altında incelenmiştir: 1) Tamsayı-oluk sargı yapısı; oluk/kutup/faz oranı bir tamsayıya eşittir, 2) Kesir-oluk sargı yapısı; oluk/kutup/faz oranı tamsayı değildir ve bu oran 1'den büyüktür, 3) Konsantre sargı yapısı; oluk/kutup/faz oranı tamsayı değildir ve 1'den küçüktür, 4) Dengesiz sargı yapısı. Bütün bu kategoriler farklı renklere ayrılarak Tablo 2.5'de gösterilmiştir. Bu tablodan farklı oluk-kutup kombinasyonları için belirtilen sargı yapılarından hangisinin kullanılabileceği kolaylıkla görülebilir.

Tablo 2.5. Oluk/kutup/faz oranı

Q <sub>s</sub> /p	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
3	0,500	0,250	0,167	0,125	0,100	0,083	0,071	0,063	0,056	0,050	0,045	0,042	0,038	0,036	0,033
6	1,000	0,500	0,333	0,250	0,200	0,167	0,143	0,125	0,111	0,100	0,091	0,083	0,077	0,071	0,067
9	1,500	0,750	0,500	0,375	0,300	0,250	0,214	0,188	0,167	0,150	0,136	0,125	0,115	0,107	0,100
12	2,000	1,000	0,667	0,500	0,400	0,333	0,286	0,250	0,222	0,200	0,182	0,167	0,154	0,143	0,133
15	2,500	1,250	0,833	0,625	0,500	0,417	0,357	0,313	0,278	0,250	0,227	0,208	0,192	0,179	0,167
18	3,000	1,500	1,000	0,750	0,600	0,500	0,429	0,375	0,333	0,300	0,273	0,250	0,231	0,214	0,200
21	3,500	1,750	1,167	0,875	0,700	0,583	0,500	0,438	0,389	0,350	0,318	0,292	0,269	0,250	0,233
24	4,000	2,000	1,333	1,000	0,800	0,667	0,571	0,500	0,444	0,400	0,364	0,333	0,308	0,286	0,267
27	4,500	2,250	1,500	1,125	0,900	0,750	0,643	0,563	0,500	0,450	0,409	0,375	0,346	0,321	0,300
30	5,000	2,500	1,667	1,250	1,000	0,833	0,714	0,625	0,556	0,500	0,455	0,417	0,385	0,357	0,333
33	5,500	2,750	1,833	1,375	1,100	0,917	0,786	0,688	0,611	0,550	0,500	0,458	0,423	0,393	0,367
36	6,000	3,000	2,000	1,500	1,200	1,000	0,857	0,750	0,667	0,600	0,545	0,500	0,462	0,429	0,400
39	6,500	3,250	2,167	1,625	1,300	1,083	0,929	0,813	0,722	0,650	0,591	0,542	0,500	0,464	0,433
42	7,000	3,500	2,333	1,750	1,400	1,167	1,000	0,875	0,778	0,700	0,636	0,583	0,538	0,500	0,467
45	7,500	3,750	2,500	1,875	1,500	1,250	1,071	0,938	0,833	0,750	0,682	0,625	0,577	0,536	0,500
48	8,000	4,000	2,667	2,000	1,600	1,333	1,143	1,000	0,889	0,800	0,727	0,667	0,615	0,571	0,533
51	8,500	4,250	2,833	2,125	1,700	1,417	1,214	1,063	0,944	0,850	0,773	0,708	0,654	0,607	0,567
54	9,000	4,500	3,000	2,250	1,800	1,500	1,286	1,125	1,000	0,900	0,818	0,750	0,692	0,643	0,600
57	9,500	4,750	3,167	2,375	1,900	1,583	1,357	1,188	1,056	0,950	0,864	0,792	0,731	0,679	0,633
60	10,000	5,000	3,333	2,500	2,000	1,667	1,429	1,250	1,111	1,000	0,909	0,833	0,769	0,714	0,667

<span style="background-color: #90EE90; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Tam sayı-oluk sargı yapısı	<span style="background-color: #FFD700; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Kesir-oluklu sargı yapısı
<span style="background-color: #FFFF00; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Konsantre sargı yapısı	<span style="background-color: #FF0000; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> Dengesiz sargı yapısı

### **3. 33-OLUKLU DENGESİZ SARGI YAPILI SM MOTOR MANYETİK EŞDEĞER DEVRE MODELİ**

Bu bölümde 33-oluklu dengesiz sargı yapılı motorun manyetik eşdeğer modeli oluşturulmuştur. İlk olarak manyetik modelleme ile ilgili açıklamalarda bulunulmuş ve SM motorların eşdeğer devre ile modellenmesi detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Sürekli mıknatıslı motorların tasarım sürecinde ilk aşama belirlenen özellikler doğrultusunda manyetik eşdeğer devresinin çıkarılmasıdır. SM motor tasarımı farklı geometrik boyutların, malzemelerin ve parametrik hesaplamaların belirlenmesine dayanan tekrarlayan bir dizi hesaplama gerektirir. Tasarımcı belirli boyutları ve malzemeleri kabaca belirledikten sonra tasarlanan motorun performans hesaplamasını gerçekleştirir. Daha sonra performans sonuçlarının istenilen özellikleri karşılayıp karşılamadığı kontrol edilir. İstenilen özellikler karşılanmıyorsa tasarımcı motor performansını arttırmak için tasarım üzerinde değişikliklere gider. Motor parametreleri belirlenirken basitleştirilmiş analitik modeller kullanılır ve ikinci aşamada ise buradan elde edilen sonuçlar bir sonlu elemanlar yazılımı ile kontrol edilir.

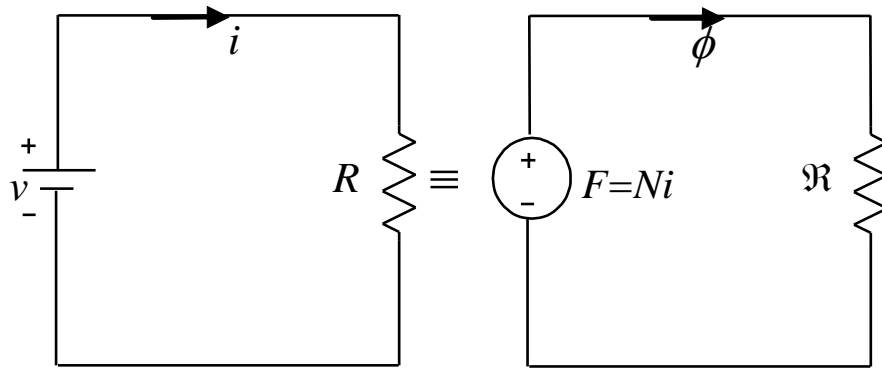
#### **3.1. Manyetik Devre Modelleme Yöntemi**

Elektrik motorlarında enerji dönüşümü hava aralığında gerçekleşir ve bu yüzden hava aralığında elde edilen akı yoğunluğu gibi veriler motor performansı hakkında bilgi edilmesini de sağlar. Vuruntu momenti, zıt elektromotor kuvveti gerilimi ve çıkış momenti gibi performans ifadelerinin hesaplanması genellikle manyetik eşdeğer devre modeli veya sonlu elemanlar analizi yöntemi ile yapılmaktadır. Bu bölümde manyetik eşdeğer devre modellenmesi anlatılmıştır. Elektrik devrelerinde olduğu gibi manyetik devrede de manyetik kaynaktan çıkan akı devresini kapalı bir yol üzerinden tamamlar. Burada manyetik devreden geçen akının kaynağı sürekli mıknatıslar veya bobinlerdir. Tablo 3.1'de elektrik devrelerinde kullanılan ifadelerin manyetik devrelerdeki karşılıkları verilmiştir. Görüldüğü gibi elektrik devrelerindeki

gerilim, akım ve direncin karşılığı manyetik devrelerde sırasıyla manyeto motor kuvveti (MMK), akı ve relüktans olarak verilmiştir (Şekil 3.1).

Tablo 3.1. Elektrik devre elemanlarının manyetik devredeki karşılığı

Elektriksel İfade	Manyetiksel İfade
Gerilim ( $v$ ), [V]	MMK ( $\mathcal{F}$ ), [A.t]
Akım ( $i$ ), [A]	Akı ( $\phi$ ), [Wb]
Direnç ( $R$ ), [ohm]	Relüktans ( $\mathfrak{R}$ ), [A.t/Wb]
Elektrik alan şiddeti ( $E$ ), [V/m]	Manyetik alan şiddeti ( $H$ ), [A.t/m]
Akım yoğunluğu ( $J$ ), [A/m <sup>2</sup> ]	Manyetik akı yoğunluğu ( $B$ ), [T]
İletkenlik ( $\sigma$ ), [S/m]	Geçirgenlik ( $\mu$ ), [H/m]



Şekil 3.1. Elektrik devresinin manyetik eşdeğer devre karşılığı

Denklem (3.1)'de manyeto motor kuvvet eşitliği verilmiştir. Görüldüğü gibi elektrik devrelerinde gerilimi veren ifade gibi ( $V=iR$ ) manyetik devrelerde de MMK ifadesi devreden geçen akımın ( $\phi$ ) relüktans değeri ( $\mathfrak{R}$ ) ile çarpımına eşittir.

$$MMK = \phi \mathfrak{R} \quad (3.1)$$

Bir bobindeki manyeto motor kuvveti bobin sarım sayısı ( $N$ ) ile bobinden geçen akımın ( $i$ ) çarpılmasıyla elde edilir (Denklem (3.2)).

$$MMK = Ni \quad (3.2)$$

Manyetik devrede akan akı geçtiği malzemelerde bir dirence maruz kalır, bu dirence relüktans denir. Relüktans malzemenin geçirgenliğine ( $\mu$ ), akı yolunun uzunluğuna ( $l$ ) ve akımın aktığı malzemenin kesit alanına ( $A$ ) bağlıdır. Denklem (3.3)'de relüktans formülü verilmiştir.

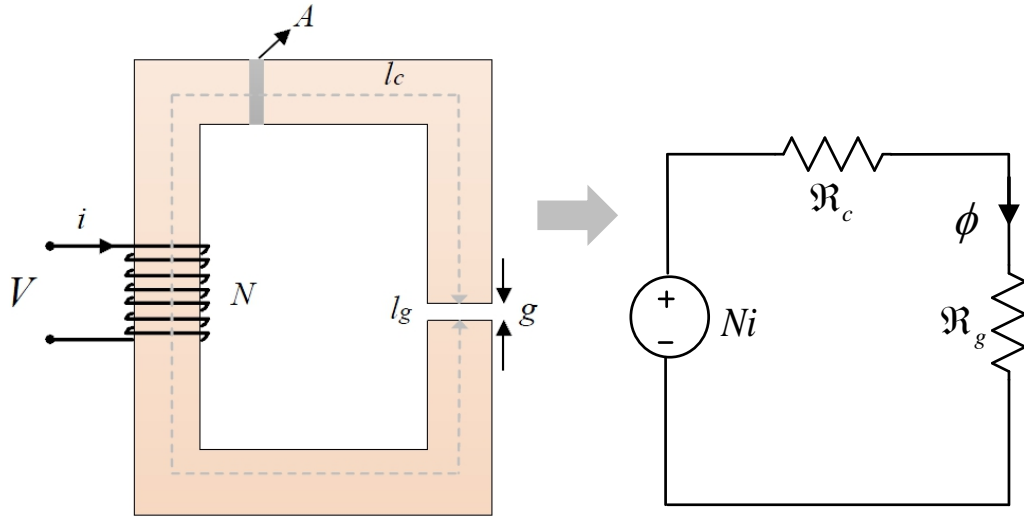
$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (3.3)$$

Manyetik alan,  $B$  ve  $H$  olmak üzere vektörel iki büyüklükten meydana gelmektedir. Akı yoğunluğu ( $B$ ), bir malzemenin belirli bir kesitinden akan manyetik alanın yoğunluğu olarak düşünülebilir. Manyetik alan şiddeti ( $H$ ) ise malzemenin karşılaşması ile  $B$ 'nin etkileşiminden kaynaklanan manyetik alanın yoğunluğunda ortaya çıkan değişimdir. Manyetik akı yoğunluğu, manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) ile manyetik alan şiddetinin çarpılmasıyla bulunur. Denklem (3.4)'de manyetik akı yoğunluğunun denklemi verilmiştir.

$$B = \mu H \quad (3.4)$$

### 3.2. Bobinli Manyetik Devrelerin Modellenmesi

Manyetik modellemenin mantığı Şekil 3.2'deki gibi çelik bir nüveye sarılmış bobinin manyetik eşdeğer devresi ile basit bir şekilde açıklanabilir (kaçak akılar ihmal edilmiştir).



Şekil 3.2. Çelik nüveye sarılmış bir bobinin manyetik eşdeğer devresi

Daha önce de bahsedildiği gibi manyetik eşdeğer devrede bobin tarafından oluşan MMK  $Ni$  olarak ifade edilir. Ayrıca malzeme olarak çelik bir nüve ve hava aralığı olduğu görülmektedir. Bu yüzden nüve ve hava aralığı olmak üzere iki farklı

relüktans ifadesi oluşacaktır ( $\mathfrak{R}_c$  ve  $\mathfrak{R}_g$ ) ve bu ifadeler Denklem (3.5) ve Denklem (3.6)'da verilmiştir.

$$\mathfrak{R}_c = \frac{1}{\mu_0 \mu_c} \frac{l_c - g}{A} \quad (3.5)$$

$$\mathfrak{R}_g = \frac{1}{\mu_0 \mu_g} \frac{g}{A} \quad (3.6)$$

Burada  $l_c$  nüvedeki akı yolunu,  $g$  hava aralığını,  $\mu_0$  havanın geçirgenliğini ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m),  $\mu_c$  ve  $\mu_g$  malzemelerin geçirgenliğini ve son olarak  $A$  ise kesit alanını temsil etmektedir. Şekil 3.2'deki eşdeğer devrede manyetik akı ifadesi Denklem (3.7)'de verilmiştir. Görüldüğü gibi akı ifadesi MMK'nın toplam relüktansa bölünmesiyle elde edilir. Ayrıca, demir nüve ve hava aralığında oluşan akı yoğunlukları geçen akının bu bölgelerdeki kesit alanına bölünmesiyle Denklem (3.8)'deki gibi elde edilir. Burada  $B_c$  ve  $B_g$  sırasıyla demir nüvedeki ve hava aralığındaki akı yoğunluğunu simgelemektedir.

$$\phi = \frac{Ni}{\mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_g} \quad (3.7)$$

$$B_c = B_g = \frac{\phi}{A} \quad (3.8)$$

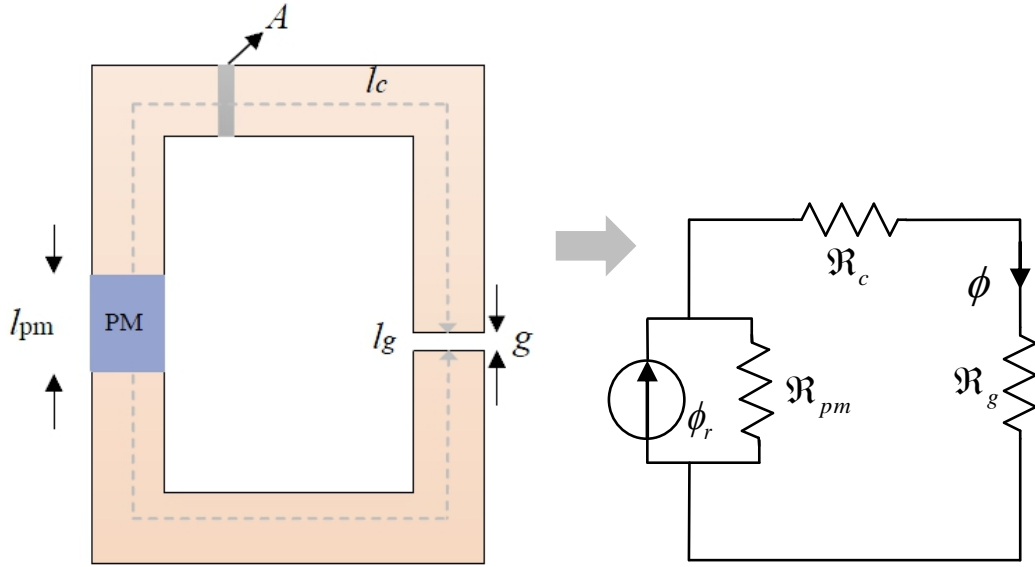
Denklem (3.8)'den de görüldüğü gibi kaçak akıların ihmal edildiği durumda sac malzemesi ve hava aralığındaki akı yoğunlukları eşit olmaktadır. Ancak daha doğru ve gerçekçi bir sonuç alabilmek için kaçak akıların da modellenmesi gerekir. Böylece analitik olarak elde edilen sonuçlar ile sonlu eleman analizi (SEA) ile yapılan sonuçlar arasında daha doğru bir karşılaştırma yapılmış olur.

### 3.3. SM Manyetik Devrelerin Modellenmesi

Bu bölümde ise Şekil 3.3'de görüldüğü gibi sürekli mıknatısa sahip bir nüvenin manyetik eşdeğer devresinin modellenmesi açıklanmıştır. İlk olarak sürekli mıknatısta ve hava aralığında oluşacak kaçak akılar ihmal edilmiş, sürekli



mıknatıslar manyetik bir akı kaynağı ve bu kaynağa paralel bir relüktans ile manyetik eşdeğer devrede modellenmiştir.



Şekil 3.3. Sürekli mıknatıslı bir devrenin manyetik eşdeğer devresi

Sürekli mıknatıs tarafından oluşan akı  $\phi_r$ , manyetik akı yoğunluğu  $B_r$  ve sürekli mıknatıs relüktansı  $\mathfrak{R}_{pm}$  ve  $l_{pm}$  mıknatıs uzunluğu olarak ifade edilmiştir. Sürekli mıknatıs akı ve relüktans formülleri sırasıyla Denklem (3.9) ve Denklem (3.10)'da gösterilmiştir.

$$\phi_r = B_r A \quad (3.9)$$

$$\mathfrak{R}_{pm} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l_{pm}}{A} \quad (3.10)$$

Daha önce yapıldığı gibi manyetik eşdeğer devrede akan akı ifadesi eşdeğer relüktansın bulunmasıyla Denklem (3.11)'deki gibi elde edilir.

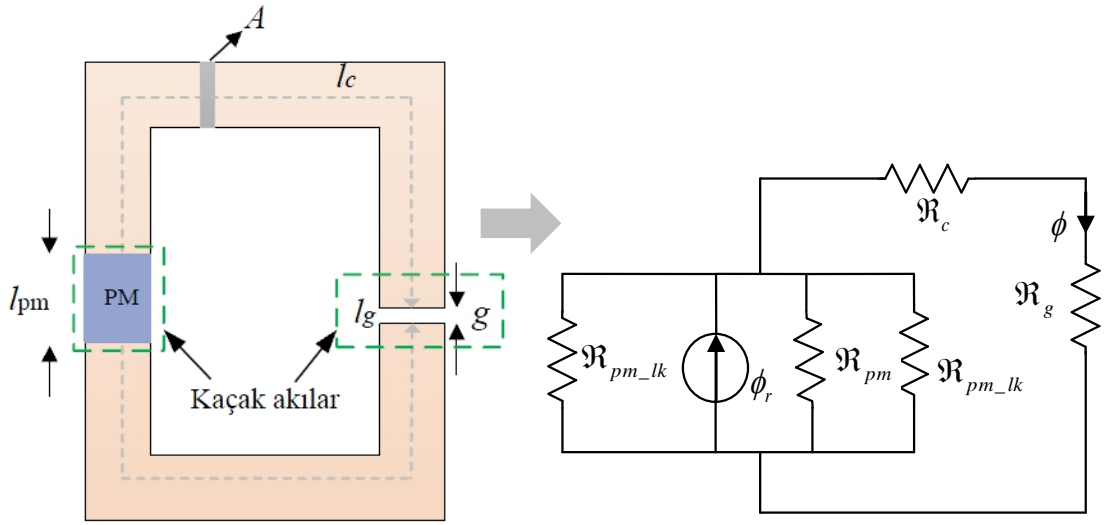
$$\phi = B_r A \frac{\mathfrak{R}_{pm}}{\mathfrak{R}_{pm} + \mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_g} \quad (3.11)$$

Görüldüğü gibi akı ifadesi MMK'nın toplam relüktansa bölünmesiyle elde edilir. Ayrıca, demir nüve ve hava aralığında oluşan akı yoğunlukları geçen akının bu bölgelerdeki kesit alanına bölünmesiyle Denklem (3.12)'deki gibi elde edilir.

$$B_{pm} = B_g = \frac{\phi}{A} \quad (3.12)$$

Burada  $B_{pm}$  sürekli mıknatısındaki manyetik akı yoğunluğunu,  $B_g$  ise hava aralığındaki akı yoğunluğunu ifade etmektedir. Denklem (3.12)'den de görüldüğü gibi kaçak akıların ihmal edilmesi durumunda SM ve hava aralığı akı yoğunlukları yine aynı olmaktadır. Normalde akının bir kısmı sürekli mıknatıs üzerinden devresini tamamlamakta, bu yüzden de kaçak akılar oluşmaktadır. Bu da daha doğru bir sonucun elde edilmesi için kaçak akıların modellenmesi gerektiğini gösteren en önemli durumdur.

Sürekli mıknatıstan kaynaklanan kaçak akıların modellenmesi durumunda ise mıknatıs manyetik devresi Şekil 3.4'de verildiği gibi elde edilmektedir. Sürekli mıknatısta oluşan kaçak akıların relüktansları  $\mathfrak{R}_{pm-lk}$  olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3.4. Sürekli mıknatıslı ve kaçak akıların da dahil edildiği eşdeğer devre

Şekil 3.4'de kaçak akıların da modellenmesiyle oluşturulan manyetik devrede akan akı ifadesi Denklem (3.13)'de ifade edilmiştir. Burada  $\mathfrak{R}_{es}$  eşdeğer relüktansı ifade etmektedir.

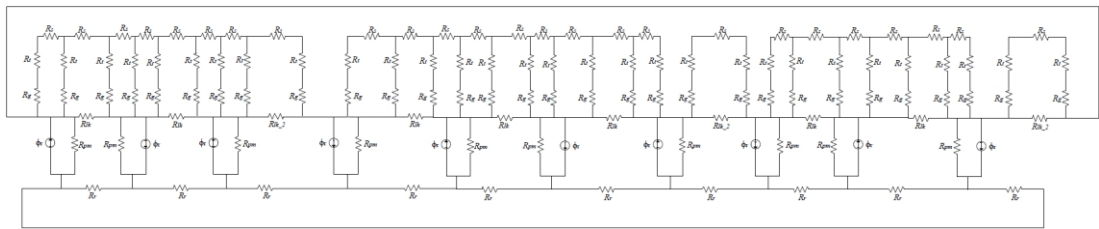
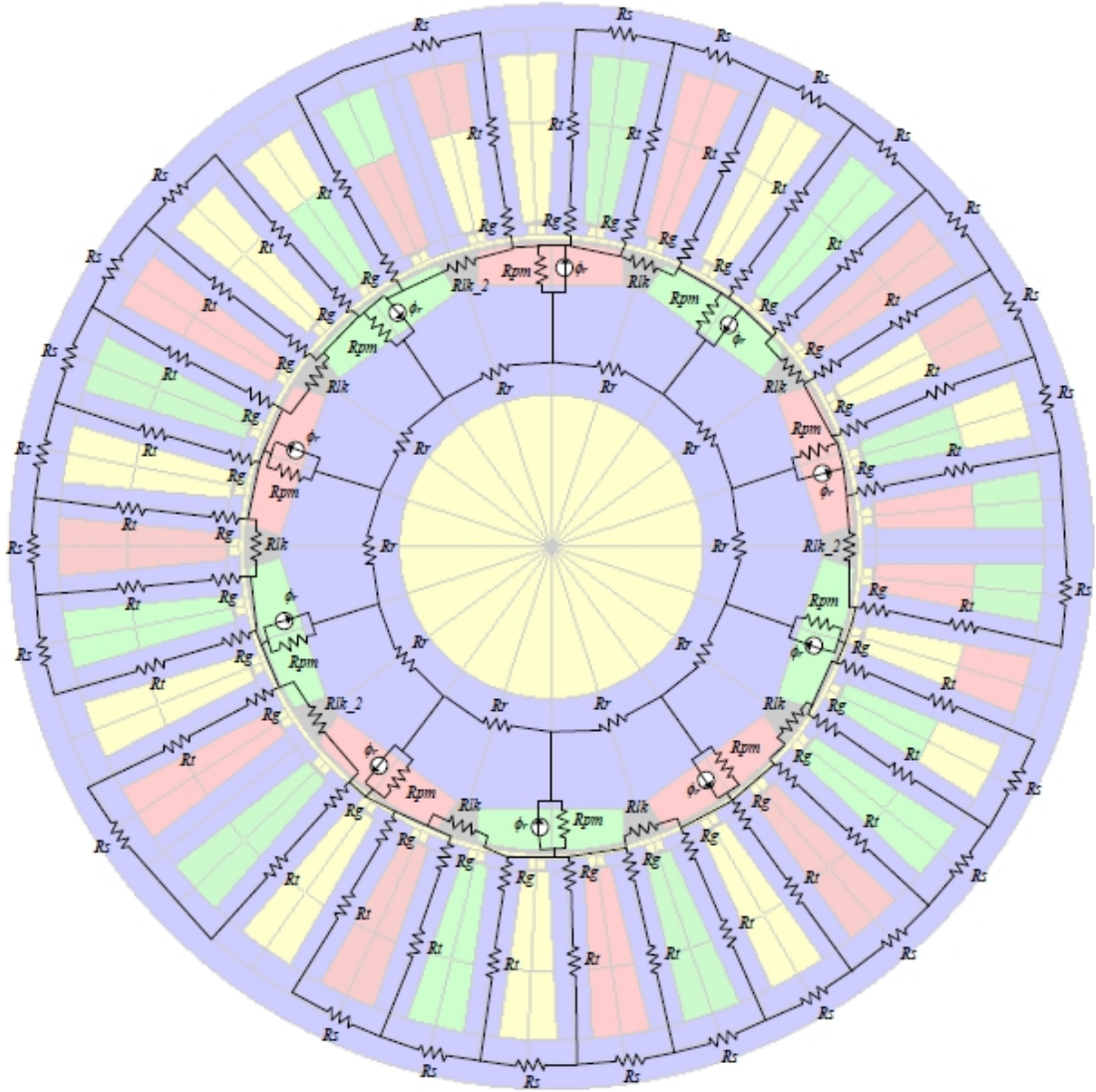
$$\phi = \phi_r \left( \frac{\mathfrak{R}_{pm} \mathfrak{R}_{pm-lk}}{2\mathfrak{R}_{pm} + \mathfrak{R}_{pm-lk}} \right) / \mathfrak{R}_{es} \quad (3.13)$$

### 3.4. 33-Oluklu Dengesiz Sargı Yapılı Motorun Manyetik Eşdeğer Devresi

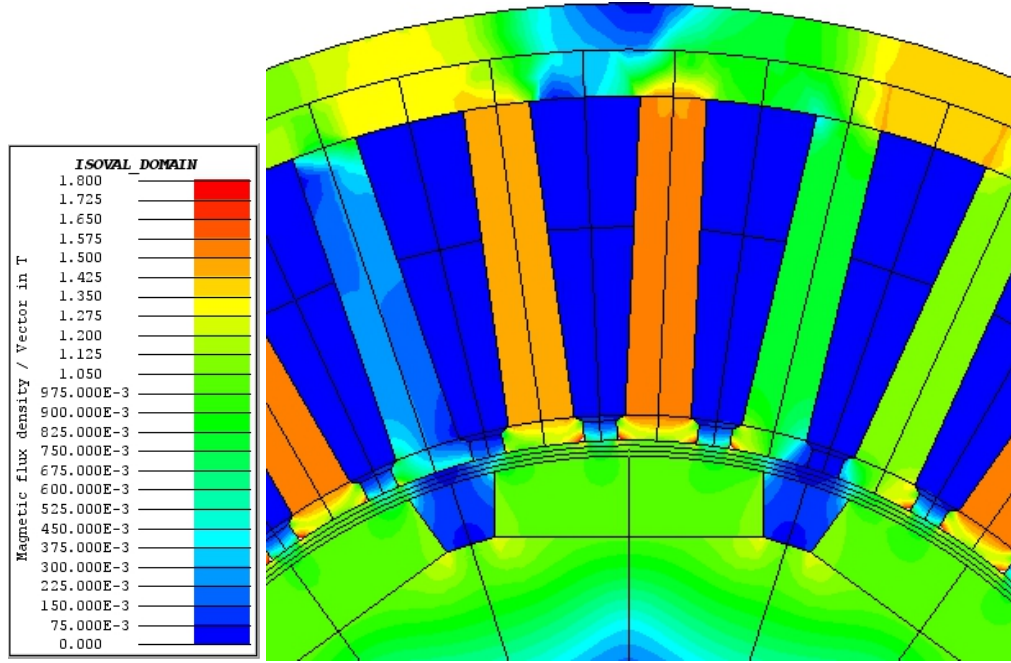
Bu bölümde 33-oluklu dengesiz sargı yapılı motorun manyetik eşdeğer devresinin oluşturulması anlatılmıştır. Bilindiği gibi elektriksel enerjinin mekanik enerjiye dönüştüğü makineler elektrik motorlarıdır. Bu enerji dönüşümünün gerçekleştiği yer ise hava aralığıdır. Bu yüzden manyetik eşdeğer devrede hava aralığındaki akı ve akı yoğunluğu değerleri kritik bir öneme sahiptir.

Bu çalışmada incelenen 33-oluk 10-kutuplu yapıda herhangi bir simetri söz konusu olmadığı için tüm modele ait manyetik eşdeğer modeli Şekil 3.5’de gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Burada unutulmaması gereken en önemli nokta kaçak akıların doğru bir şekilde modellenmesinin gerektiğidir.

Şekil 3.5’de verilen 33-oluk 10-kutuplu motor manyetik eşdeğer devresinin analitik olarak hesaplanmasıyla yüksüz durumda hava aralığındaki ve stator dışındaki akı yoğunlukları elde edilmiştir. Bu sonuçlar Şekil 3.6’da gösterilen 33-oluk 10-kutuplu yapının hava aralığı ve stator dışındaki akı yoğunluğu sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Stator dışındaki akı yoğunluğu sonlu elemanlar yöntemi ile 1,51T olarak bulunurken, manyetik eşdeğer devre ile analitik olarak 1,553T olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar Tablo 3.2’de özetlenmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi kaçak akılar ne kadar doğru modellenirse doğru sonuca o kadar fazla yaklaşılr. Görüldüğü gibi hava aralığındaki akı yoğunluğu değeri için analitik hesaplama ile SEA arasında %5,7’lik bir fark söz konusudur.



Şekil 3.5. 33-oluk 10-kutuplu tam model manyetik eşdeğer devresi



Şekil 3.6. 33-oluk 10-kutuplu yapının yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi

Tablo 3.2. Yüksüz durumdaki akı yoğunluklarının manyetik eşdeğer devre ve SEA ile karşılaştırılması

	Manyetik Eşdeğer Devre	Sonlu Elemanlar Analizi	% Fark
Hava aralığı akı yoğunluğu	1,075T	1,014T	%5,7
Stator dışı akı yoğunluğu	1,553T	1,51T	%2,7

#### **4. 33-OLUKLU DENGESİZ SARGI YAPILI SM MOTOR SONLU ELEMANLAR ANALİZİ**

Bu bölümde tasarımı yapılmış 33-oluk 10-kutuplu servomotorun detaylı sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, dengeli sargı yapısına sahip olan yapı ile performans sonuçları karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık yapıları geometrilere, farklı malzemelere sahip problemleri çözebilen sayısal bir tekniktir. Temelinde, bir yapıyı sonlu elemanlar diye adlandırılan en küçük elemanlara parçalayarak modeller. Bu sonlu elemanlar birbirlerine iki veya üç elemanlı düğümler (node) ile bağlıdır. Elemanların özellikleri denge denklemleri olarak formülize edilir. Daha sonra tüm yapının denklemleri her elemanın denge denklemlerinin birleştirilmesiyle elde edilir. Gerekli sınır koşulları uygulanır ve denge denklemleri çözülerek istenen değişkenler bulunur [21, 22].

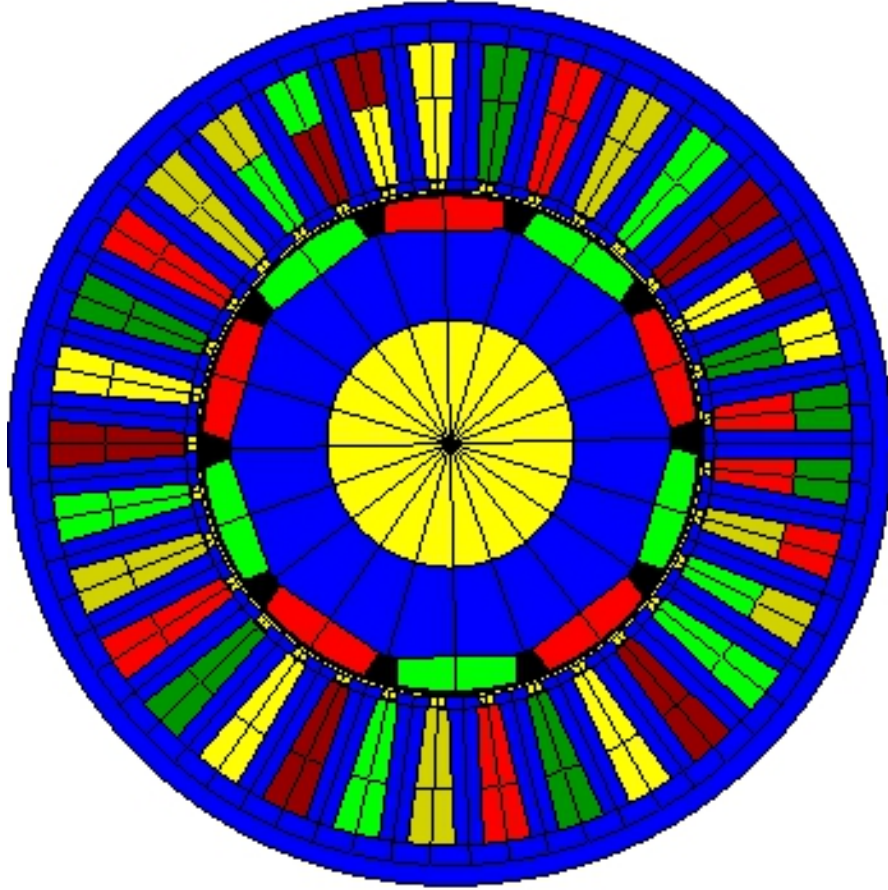
Sonlu elemanlar analizi (SEA) karmaşık yapıdaki elektromanyetik alan problemleri ve devre parametrelerinin çözümünde günümüzde oldukça sık kullanılan nümerik bir metottur. Özellikle, malzeme karakteristikleri lineer olmayan problemlerin çözümünde oldukça faydalıdır. Bu yöntem, 2 boyutlu problemler için motor kesitinin küçük alanlara; 3 boyutlu problemler için de motor hacminin küçük hacimlere bölünmesini içerir. Lineer olmayan diferansiyel denklemler kullanılarak manyetik alanın değişimi ifade edilir ve motorun farklı bölgelerindeki akı, akı yoğunluğu ve yönü gibi motor için önemli büyüklükleri belirlemede kullanılır. SEA herhangi bir şekle, yöne ve malzeme özelliğine sahip mıknatısları doğru ve hassas olarak analiz edebilir. Analitik yöntemlere gerek kalmadan relüktans, endüktans ve moment gibi büyüklükler SEA'nden kolaylıkla elde edilebilir [20, 23, 24].

##### **4.1. Sonlu Eleman Analizi (SEA)**

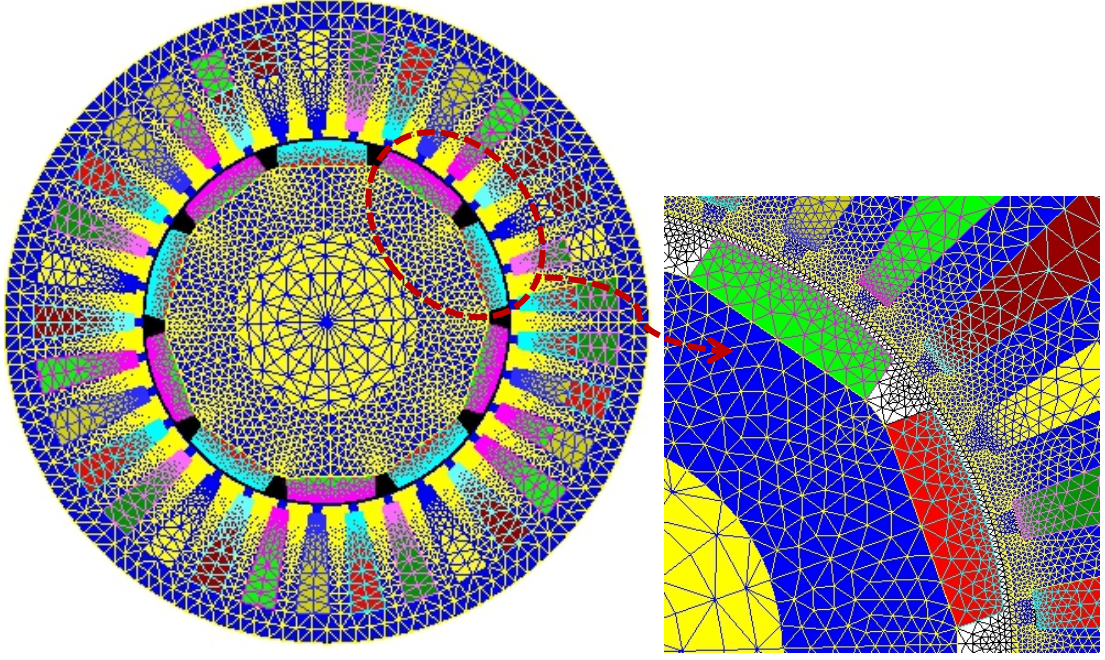
Sonlu eleman analizi (SEA) elektrik motorlarının analizinde çok sık kullanılmaktadır. Yapılan SEA'lerinin amacı; motor ya da generatörün stator ve rotor nüvesi, mıknatıs, diş, oluk gibi farklı noktadaki doyum seviyeleri hakkında bilgi

sahibi olmak, motorun vuruuntu momenti, zıt elektromotor kuvveti (zıt-EMK) ve çıkış momenti gibi performans analizlerini yaparak, motor modelinin doğruluğunu test etmektir. Farklı SEA programları ile motor kayıp bileşenleri ve motor verimi gibi performans verileri de hesaplanabilmektedir. SEA'leri gerçekleştirilmeden prototip ya da üretim aşamasına geçmek, bir problem yaşanma ihtimalini artırır ve bu da zaman ve para kaybı anlamına gelmektedir.

Bu çalışmada kullanılan 33 oluk 10 kutuplu yapının 2D Flux SEA modeli Şekil 4.1'de verilmiştir. Ayrıca modelin tamamına ait ve iki kutba odaklanmış kısmının ağ yapısı Şekil 4.2'de verilmiştir. Ağ yapısının yoğunluğu enerji dönüşümünün hava aralığında gerçekleştiği göz önüne alınırsa çok iyi seviyededir.



Şekil 4.1. Servomotor SEA modeli



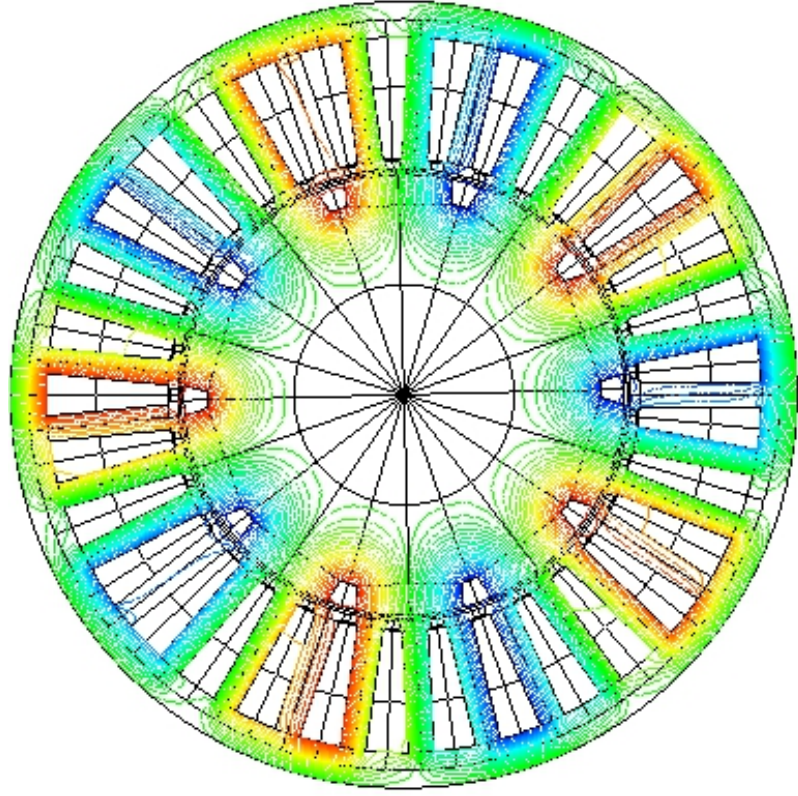
Şekil 4.2. Servomotorun tamamına ait ve iki kutba odaklanmış kısmına ait ağ yapısı

#### 4.1.1. Yüksüz durum SEA

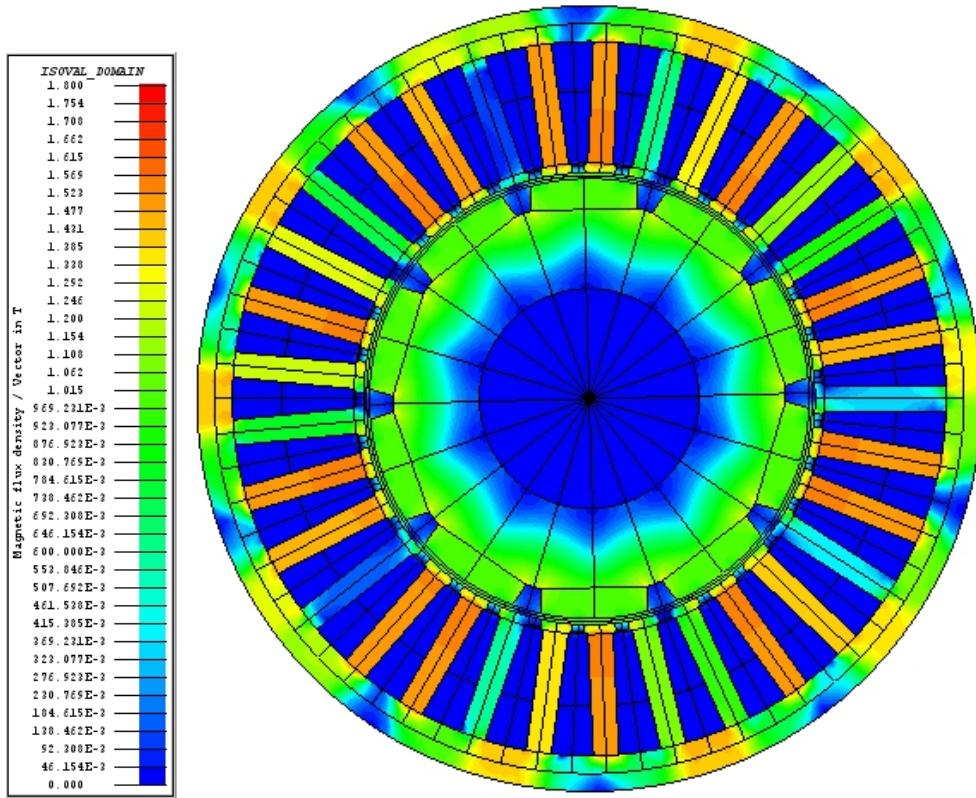
Servomotorun yüksüz durumda çalışması halinde elde edilen akı çizgileri Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi N mıknatıstan çıkan akı hava aralığını geçerek statora ulaşmakta, stator dişlerinden ilerleyerek stator tepesindeki nüveye girip, buradan da stator dişi, hava aralığı ve S mıknatis üzerinden devresini tamamlamaktadır. Akı çizgileri beklenildiği gibi olup, kaçak akılar gözlenmemiştir. Şekil 4.4’de ise yüksüz durumda motorun farklı bölgelerinde elde edilen akı yoğunlukları gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi maksimum akı yoğunluğu dişlerde meydana gelmektedir ve maksimum 1,56T seviyelerindedir. Diğer malzemelerdeki akı yoğunlukları seviyelerinde de bir doyum problemi gözlenmemiştir.

Motor vuru mu momenti analizi için bir optimizasyon çalışması yapılmıştır ve farklı mıknatis açısı (betam değişimine göre) değerleri için elde edilen değişim Şekil 4.5’de verilmiştir. Bu grafikten de görüldüğü gibi mıknatis açısı değeri 140 derece iken vuru mu momenti en küçük değerlerini almıştır. Bu değişimin tepe değeri ise 0,0003Nm’dir. Kullanılan oluk kutup kombinasyonundan dolayı vuru mu momenti beklenildiği gibi yok denecek kadar azdır. Vuru mu momenti için gerçekleştirilen tüm analizler 1rpm gibi çok düşük bir hızda gerçekleştirilmiştir.

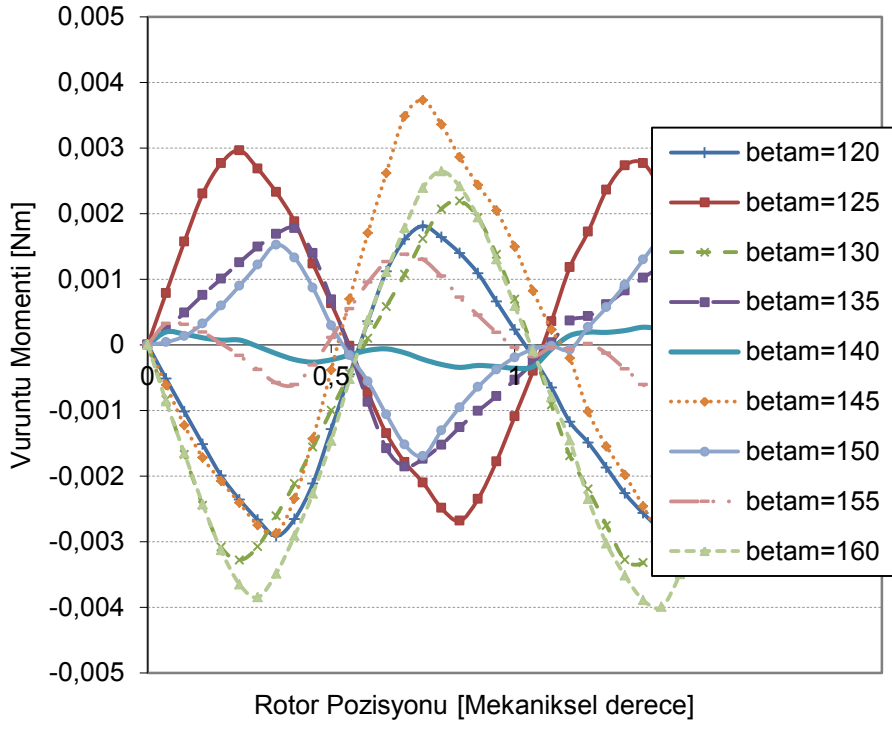




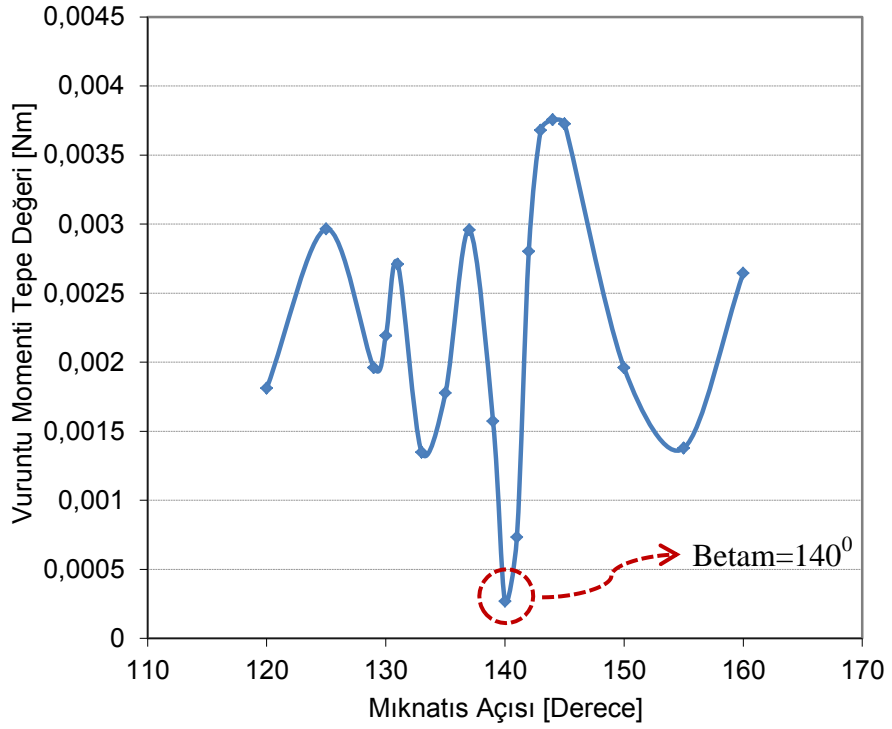
Şekil 4.3. Servomotorun yüksüz durum akı çizgileri



Şekil 4.4. Servomotor modelinin yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi



Şekil 4.5. Vuruntu momentinin farklı mıknatıs açılarındaki değişimleri

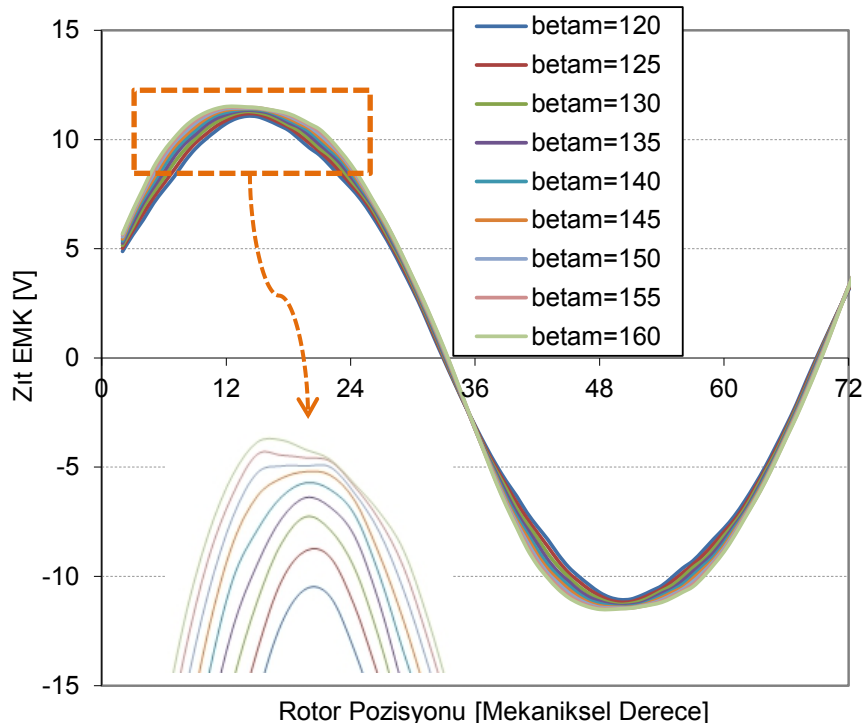


Şekil 4.6. Vuruntu momentini tepe değeri için farklı mıknatıs açılarındaki değişimleri (beta=120°-160°)

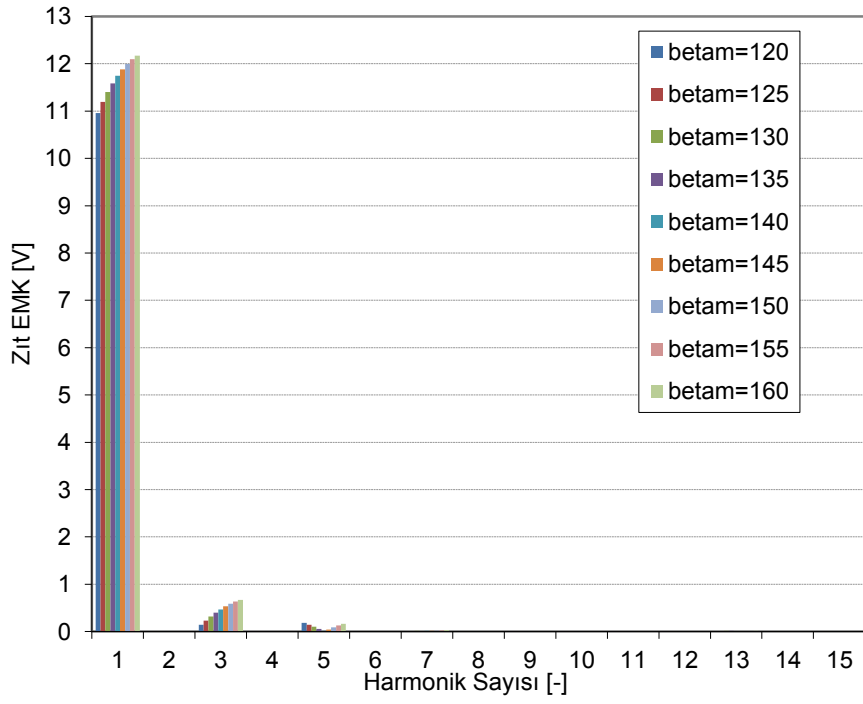
Şekil 4.5’de verilen farklı mıknatıs açısındaki vuruntu momenti değişimlerinin tepe değerleri Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Burada mıknatıs açısı değişimi  $120^{\circ}$  ile  $160^{\circ}$  arasında  $5^{\circ}$ ’er derecelik adımlarla ilerletilerek elde edilmiştir. Görüldüğü gibi bu momentin tepe değeri, mıknatıs açısı  $140^{\circ}$  iken minimum olarak elde edilmiştir.

Yüksüz durumda yapılan bir başka analiz ise motorun performansını belirlemeye önemli ölçüde katkıda bulunan zıt EMK analizidir. Bu analiz için de farklı mıknatıs açılarında bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi hat geriliminin sinüzoidal bir şekle ulaşmasını sağlamak, diğeri de temel harmoniğin dışındaki harmonikleri minimize etmektir.

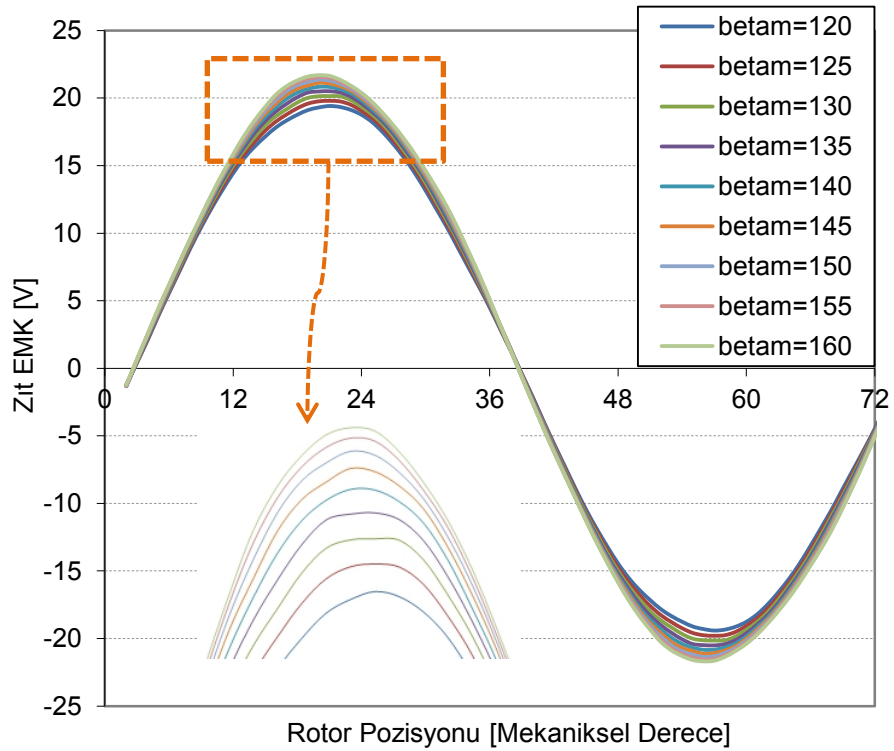
Şekil 4.7’de 1000rpm hızdaki faz gerilim değişimleri, farklı mıknatıs açıları için verilmiştir. Ayrıca bu değişimin harmonik içerikleri incelenmiş ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi temel harmoniğin dışında da harmonikler görülmektedir. Şekil 4.9’da ise 1000rpm hızdaki hat geriliminin değişimi yine farklı mıknatıs açısı değerleri için gösterilmiştir. Görüldüğü gibi tüm sonuçlar sinüzoidal dalga şekline yakın bir değişim göstermektedir. Burada önemli olan bu değişimin harmonik içerikleridir ve bu sonuç da Şekil 4.10’da verilmiştir. Görüldüğü gibi temel harmoniğin dışındaki harmonikler oldukça küçük değerler almaktadır.



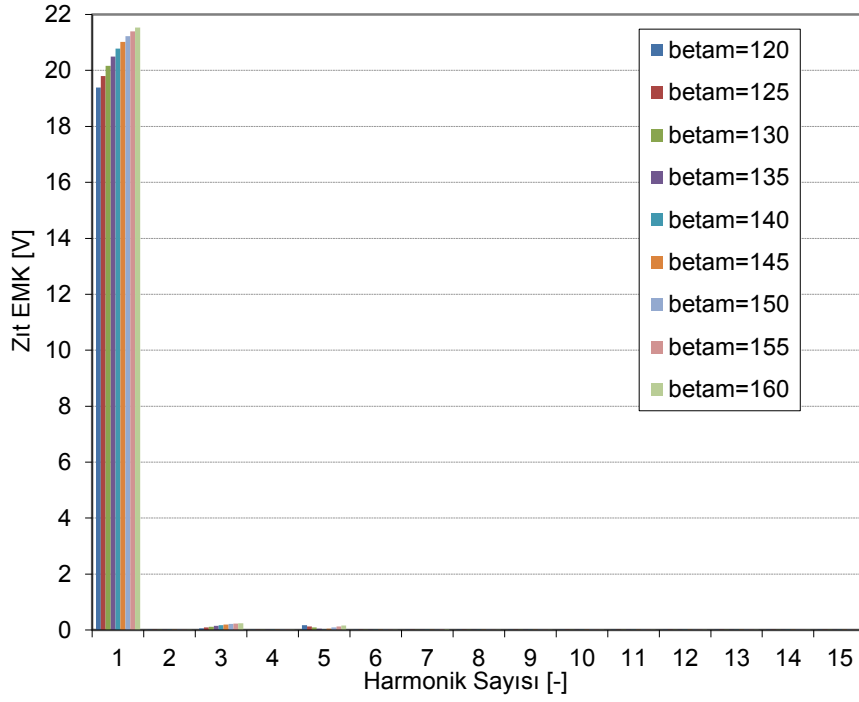
Şekil 4.7. 1000rpm hızdaki faz gerilimi değişimleri



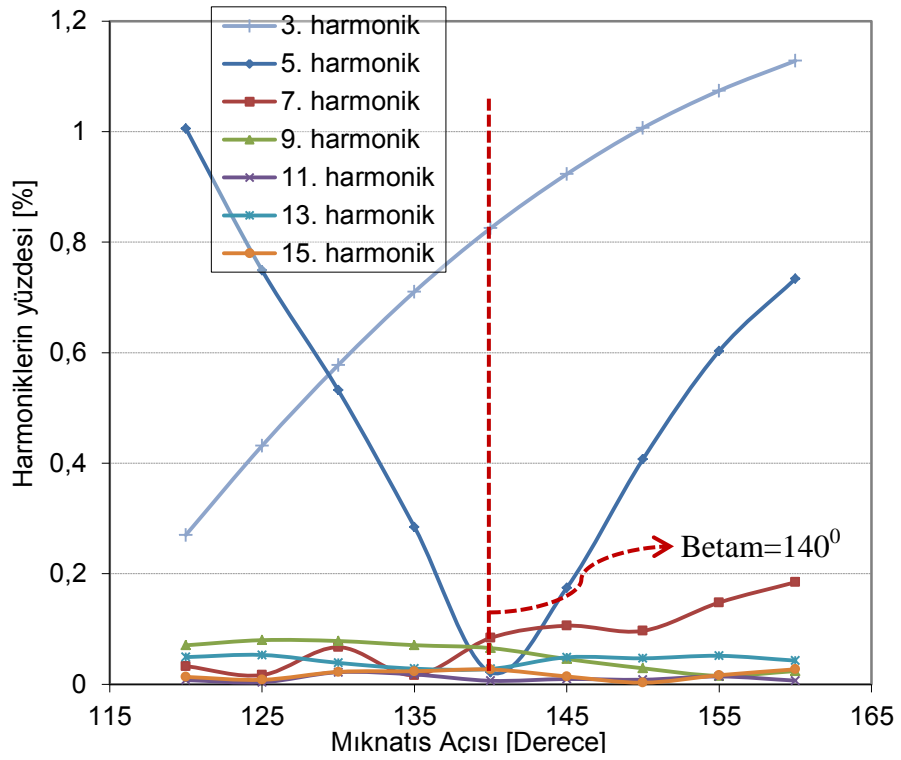
Şekil 4.8. 1000rpm hızdaki faz gerilimi değişiminin harmonik içeriği



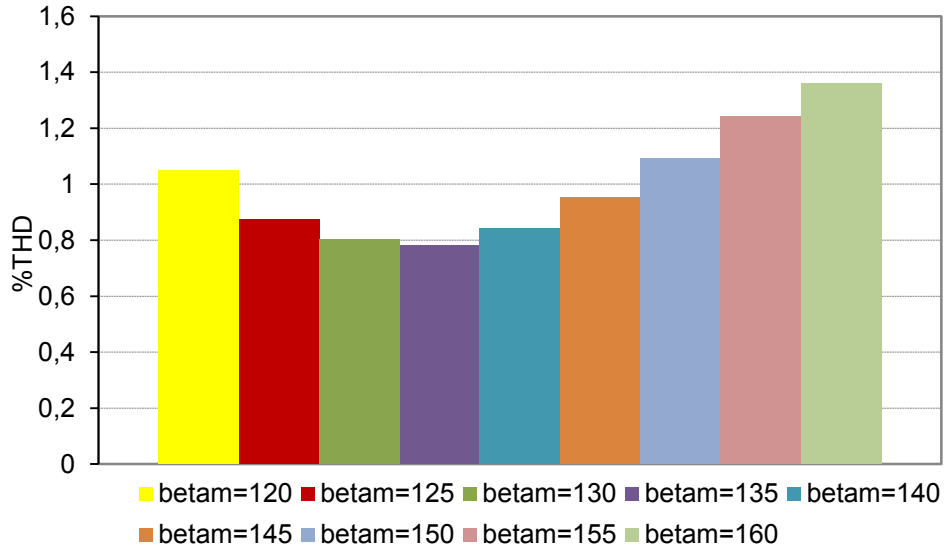
Şekil 4.9. 1000rpm hızdaki hat gerilimi değişimleri



Şekil 4.10. 1000rpm hızdaki hat gerilimi değişiminin harmonik içeriği



Şekil 4.11. Harmoniklerin temel harmoniğe göre yüzdelерinin mıknatıs açısına göre değişimleri



Şekil 4.12. Toplam harmonik bozunumları (%THD)

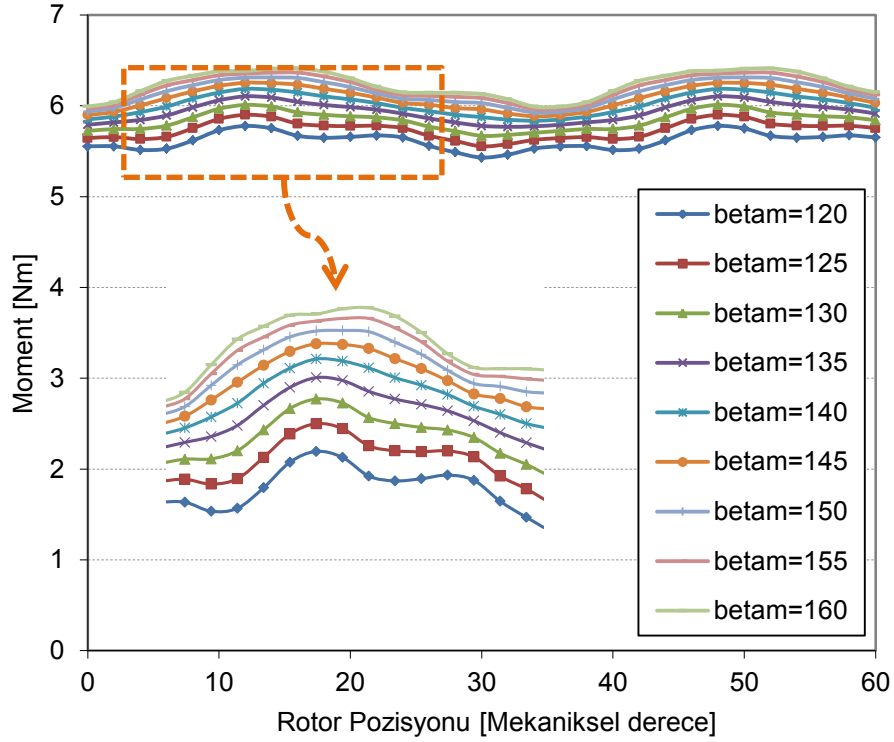
Şekil 4.10’da verilen hat gerilimi harmonik içeriğinin bir anlam kazanabilmesi için temel harmoniğin dışındaki harmonikler incelenmiştir. Çünkü bu harmoniklerin minimize olması motorun kontrolünü oldukça kolaylaştırmaktadır. İncelenen harmoniklerin temel harmoniğe göre etkisi Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Daha sonra tüm harmoniklerin temel harmoniğe göre olan etkisini görmek için toplam harmonik bozunumları (THD) da ayrıca incelenmiştir (Şekil 4.12). Görüldüğü gibi tüm mıknaş açısı değişimlerinde %THD değeri neredeyse %1’e yakın (Betam= 150°-160° iken) ve 150°’nin altındaki tüm durumlarda da %1’den daha düşük değerler almaktadır. Bu da seçilen oluk-kutup kombinasyonunun avantajını göstermektedir.

#### 4.1.2. Yüklü durum SEA

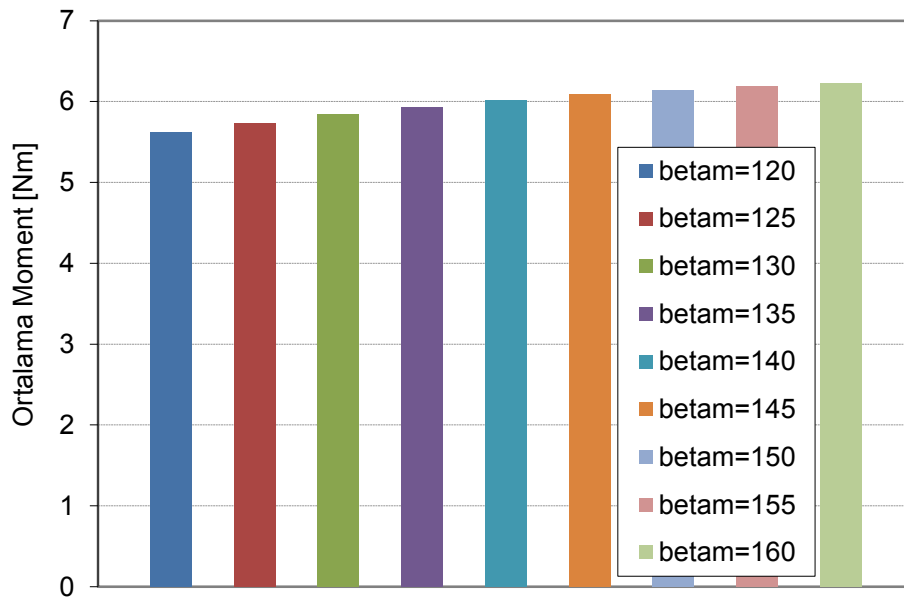
Maksimum moment noktasını belirlemek amacıyla 33 oluk 10 kutuplu yapının sargılarına sabit akım uygulanmıştır (25Arms). Maksimum momentin elde edildiği noktada çıkış momenti için farklı mıknaş açılarında (farklı betam değerleri için) bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Daha sonra ortalama moment ve moment dalgalanması sonuçları incelenmiş ve optimum sonuca ulaşılmıştır.

İlk olarak maksimum moment veren noktadaki çıkış momenti değişimleri incelenmiştir ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.13’de gösterilmiştir. Uygulanan akım değerinde elde edilmesi istenen ortalama moment değeri 6Nm’dir. Şekil 4.14’de elde edilen ortalama moment değerleri karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi 6Nm değeri,

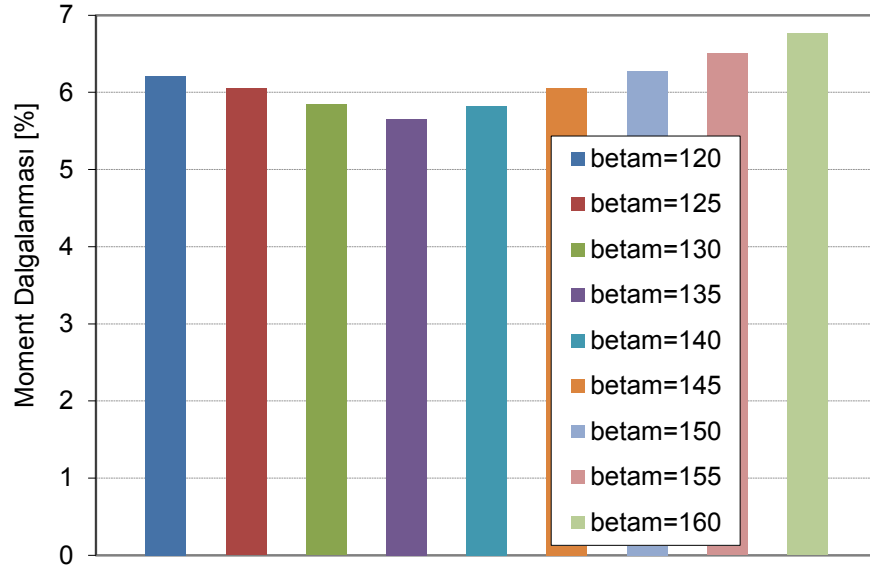
mıknatıs açısı  $140^0$  iken elde edilmiştir. Bunun yanı sıra farklı mıknatıs açlarına sahip modellerin ortalama momente göre moment dalgalanması yüzdeleri karşılaştırılmıştır ve bu sonuçlar da Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Mıknatıs açısı betam en küçük değerini  $135^0$  iken almıştır ve %5,65’dir. Mıknatıs açısı  $140^0$  iken ise moment dalgalanması değeri %5,83’dir.



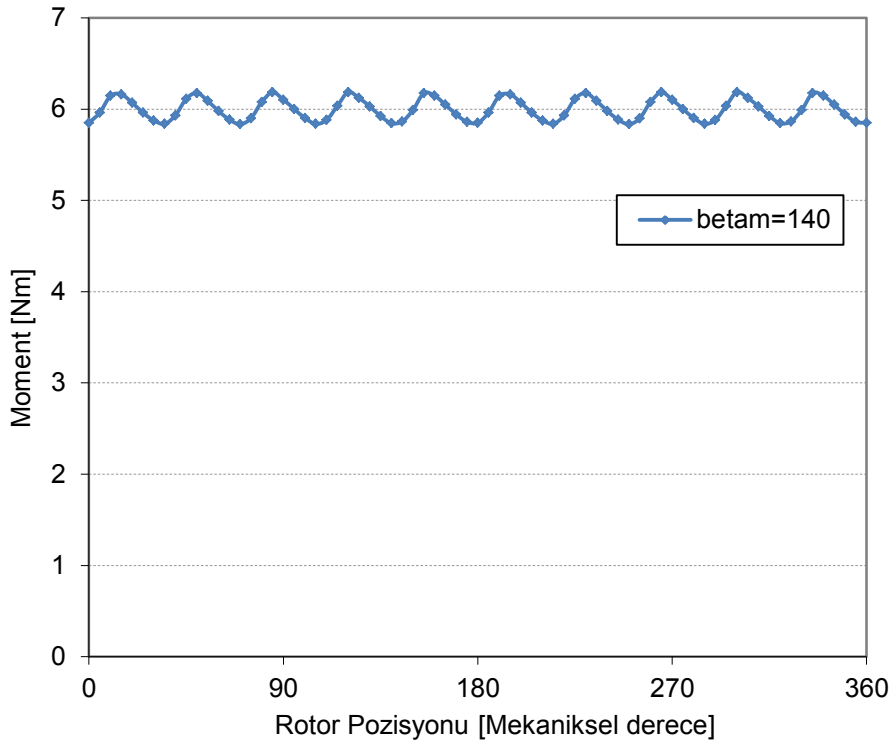
Şekil 4.13. Çıkış momentinin farklı mıknatıs açlarındaki değişimi



Şekil 4.14. Ortalama momentin farklı mıknatıs açlarındaki değişimi



Şekil 4.15. Moment dalgalanmasının farklı mıknatıs açılarındaki değişimi



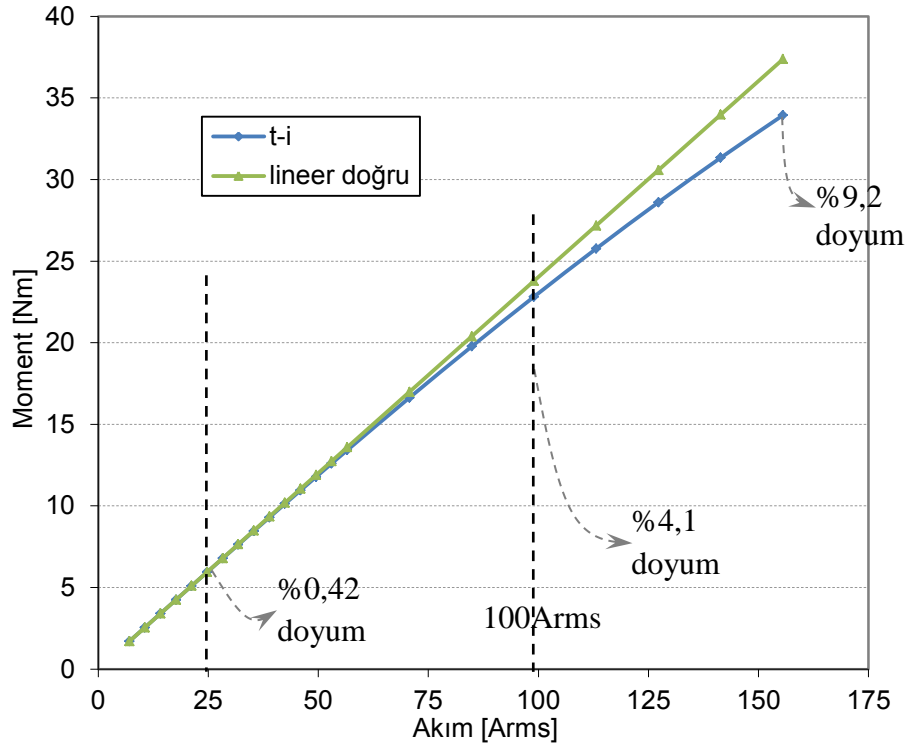
Şekil 4.16. Çıkış momenti değişimi

Farklı mıknatıs açıları için yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler dikkate alınarak en ideal tasarım elde edilmiştir. Yüksüz durumda yapılan vurutu momenti ve zıt EMK analizleri sonucunda mıknatıs açısı  $\beta = 140^\circ$  iken istenen sonuçların elde edildiği görülmüştür. Diğer taraftan, yüklü durum analizi sonucunda elde edilen



moment dalgalanması minimum değerini mıknatıs açısının  $135^0$  olduğu durumda almasına rağmen, hem yüksüz durum SEA sonuçları ışığında hem de moment dalgalanmasında en küçük ikinci değerin yine  $140^0$  de edilmesi optimum mıknatıs açısı değerinin  $140^0$  olarak karar verilmesini sağlamıştır. Bu durumda elde edilen çıkış momenti değişimi (25Arms için) Şekil 4.16’da verilmiştir. Burada ortalama moment 6Nm ve ortalama momente göre moment dalgalanması %5,83 seviyesindedir.

Bu yapıya ait moment-akım grafiği Şekil 4.17’de verilmiştir. Bu motorun anma akımında (25Arms) doyum %0,42 seviyelerinde olacaktır. Ayrıca bu motor %600 yüklemde 33,9Nm seviyelerinde moment kabiliyetine anlık olarak sahiptir.



Şekil 4.17. Moment-akım değişimi

#### 4.1.3. Dengesiz manyetik çekme kuvveti

Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda rotora etkiyen kuvvetler sargıların genellikle simetrik olmasından dolayı göz ardı edilir. Fakat oluk/kutup/faz oranının kesirli olduğu bazı yapılarda sargıların dağılımı simetrik değildir, bu da dengesiz manyetik çekme kuvvetinin (DMÇK) kaynağı olan, akı yoğunluğu dağılımında asimetriye yol açar. Dengesiz manyetik çekme kuvveti genellikle rotor eksenel kaçıklığı gibi mekanik asimetriklerin olduğu durumlarda veya sargı hatalarının olduğu

durumlardaki büyük boyutlu asenkron ve senkron motorlar ile ilişkilendirilir [34-36]. Fakat bunun yanında küçük boyutlu ve hatta rotorunda bir garipliğin olmadığı motorlar da dengesiz manyetik çekme kuvvetine maruz olabilirler [37-39]. Servomotorlarda bu kuvvetlerin ortaya çıkması rulmanların ömrünü azaltacağı gibi bunun yanında duyulabilir gürültüye ve titreşime de neden olur [40-45]. Bu durum özellikle kesir olukların kullanıldığı servomotorlarda ortaya çıkar [46], ama bu kuvveti ortaya çıkaran en önemli etken sargıların dağılımıdır.

DMÇK hava aralığındaki manyetik alan dağılımının simetrik olmamasından dolayı ortaya çıkan ve rotora radyal kuvvetlerin etkideği bir bileşke kuvvettir. Bu kuvvet hem analitik olarak hem de sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilir. Eksenel uzunluğu  $l_a$  olan bir rotora etkiyen kuvvet bileşenleri  $F_x$  ve  $F_y$  şeklinde ayrılabilir. Bu bileşenler, hava aralığının ortasındaki  $r$  yarıçaplı dairesel bir yüzey boyunca Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'de verilen ifadelerin hesaplanmasıyla bulunur [46].

$$F_x = rl_a \int_0^{2\pi} S_x d\alpha \quad (4.1)$$

$$F_y = rl_a \int_0^{2\pi} S_y d\alpha \quad (4.2)$$

Dik koordinat tensörleri  $S_x$  ve  $S_y$  kutupsal koordinat eşdeğerleri olan  $S_n$  ve  $S_\alpha$  cinsinden Denklem (4.3) ve Denklem (4.4)'deki gibi yazılır.

$$S_x = S_n \cos \alpha - S_\alpha \sin \alpha \quad (4.3)$$

$$S_y = S_n \sin \alpha + S_\alpha \cos \alpha \quad (4.4)$$

Bu eşitliklerde  $S_n$  ve  $S_\alpha$  ifadeleri Denklem (4.5)'de verilmiştir.

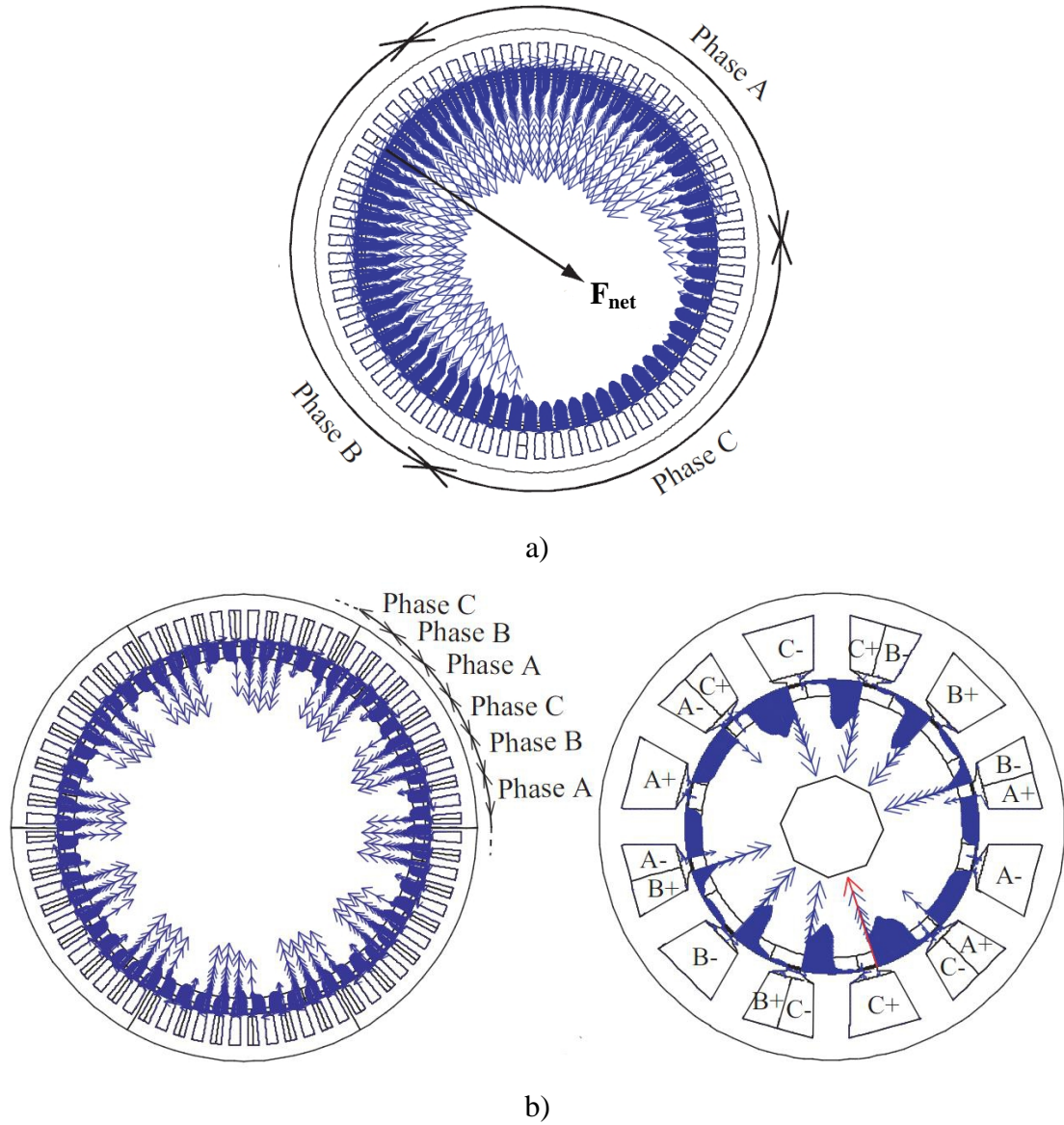
$$S_n = -\frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_\alpha^2) \text{ ve } S_\alpha = -\frac{1}{\mu_0} (B_r B_\alpha) \quad (4.5)$$

Son olarak Denklem (4.3) ile Denklem (4.5) arasındaki ifadeler Denklem (4.1) ile Denklem (4.6)'daki yerlerine yazılırsa dengesiz manyetik çekme kuvvetinin analitik olarak hesaplanabileceği Denklem (4.6) ve Denklem (4.7) elde edilmiş olur. Burada

$B_r$  artık mıknatıslanmayı,  $B_\alpha$  dairesel manyetik akı yoğunluğu bileşenini,  $\mu_0$  ise geçirgenliği ifade etmektedir.

$$F_x = \frac{rl_a}{2\mu_0} \int_0^{2\pi} [(B_\alpha^2 - B_r^2) \cos \alpha + 2B_r B_\alpha \sin \alpha] d\alpha \quad (4.6)$$

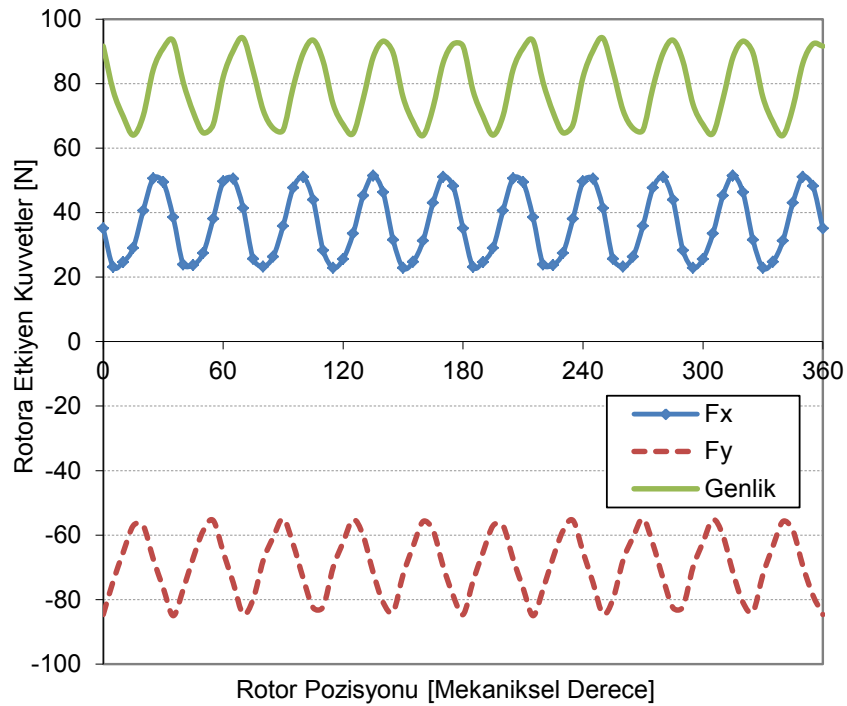
$$F_y = \frac{rl_a}{2\mu_0} \int_0^{2\pi} [(B_\alpha^2 - B_r^2) \sin \alpha - 2B_r B_\alpha \cos \alpha] d\alpha \quad (4.7)$$



Şekil 4.18. Sargıların dağılımına göre bazı SM motorlardaki kuvvetlerin dağılımı a) Asimetrik sargı dağılımı ve b) Simetrik sargı dağılımı [47]

Şekil 4.18.a'da gösterildiği gibi dengesiz çekme kuvveti sargıların asimetrik bir şekilde dağılımından dolayı oluşur. Sargılarda hiçbir simetri olmadığından dolayı çekme kuvveti açık bir şekilde görülmektedir. Fakat sargıların simetrik bir şekilde yerleştirildiği durumda (Şekil 4.18.b) bu kuvvetler birbirlerini dengeleyeceği için dengesiz çekme kuvveti çok küçük değerler alır. Özetle, bu kuvvet bileşeninin tek kaynağı sargıların asimetrik dağılımıdır. Bu yüzden DMÇK oluşturacak oluk-kutup kombinasyonları seçildiğinde (dengesiz sargı yapılı motorlar gibi) dikkat edilmesi gereken nokta, radyal kuvvetlere dayanımı yüksek olan rulmanların tercih edilmesidir.

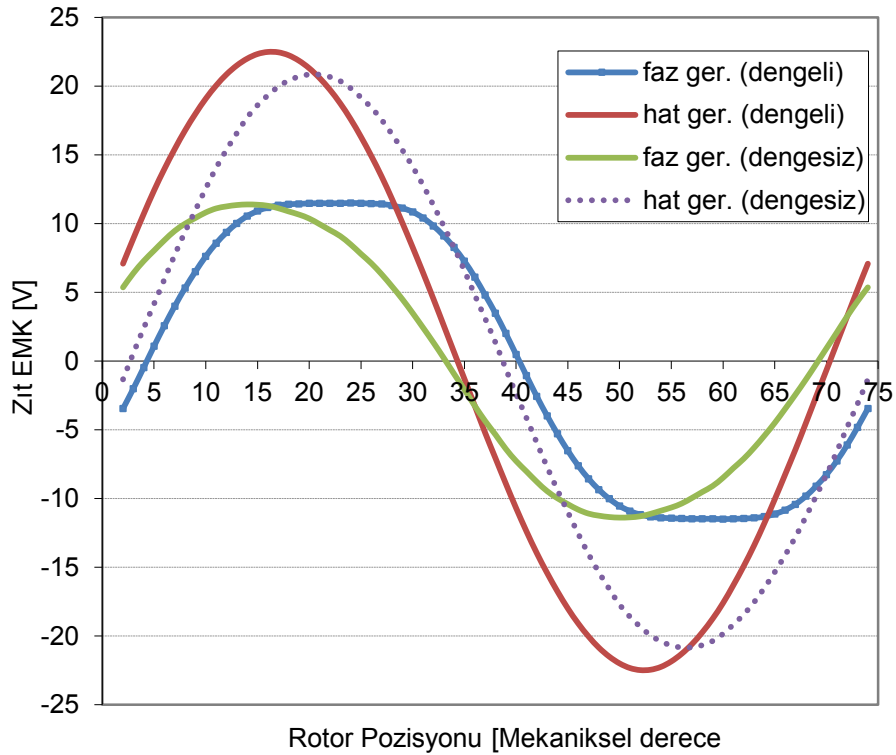
Bu çalışmada kullanılan 33-oluk 10-kutuplu servomotorda da sargıların dağılımı simetrik değildir ve bu yüzden rotora etkiyen kuvvetlerin olacağı aşikârdır. Yapılan SEA sonucu elde edilen kuvvetin değişimi Şekil 4.19'da verilmiştir. Burada iki eksene de etkiyen kuvvetlerin genliği alındığında, rotora ortalama 79N'lik bir kuvvetin etki ettiği görülmektedir. Bu kuvvet de ilerleyen zamanlarda hem rulmanların ömrünü azaltacak hem de duyulabilir gürültülere sebep olacaktır. Bu da seçilen oluk-kutup kombinasyonundan dolayı 33-oluklu servomotorun performans açısından her ne kadar bazı avantajlara sahip olduğunu gösterse de, bahsedilen olumsuzluk ise motorun bir dezavantajıdır.



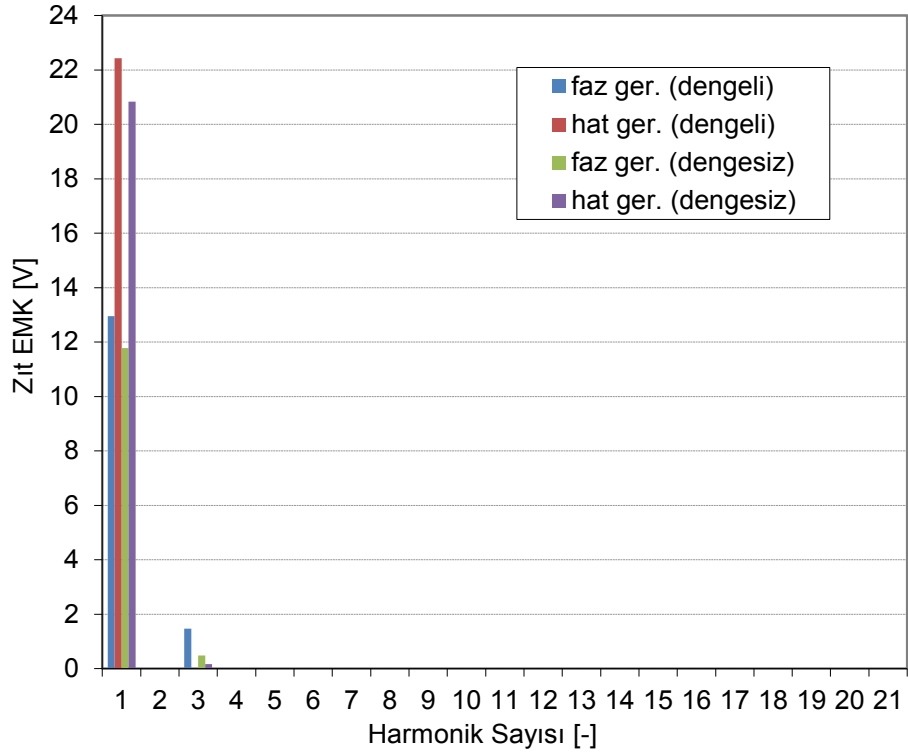
Şekil 4.19. Rotora etkiyen kuvvetlerin değişimi

#### 4.2. 33-Oluklu Dengeli ve Dengesiz Sargı Yapılı Motorların Performans Karşılaştırması

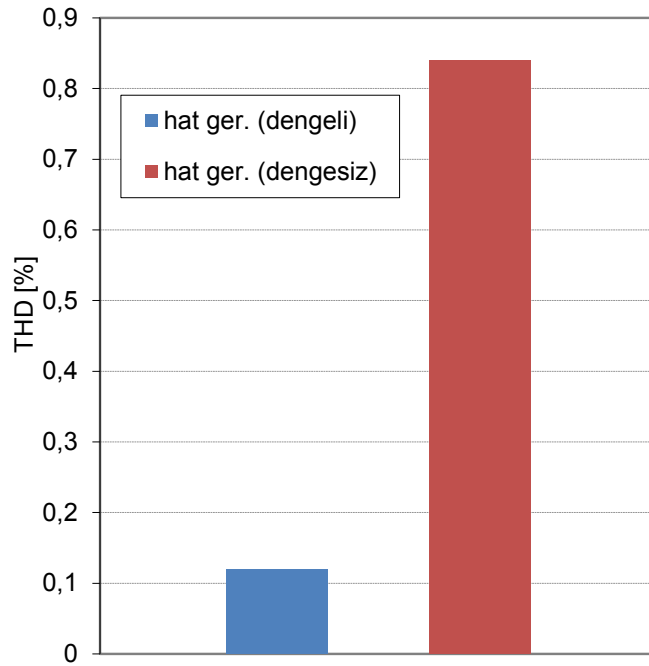
Bu kısımda aynı oluk-kutup kombinasyonuna sahip motorun dengeli ve dengesiz sargı yapısına sahip olması durumundaki performansları karşılaştırılmıştır. Sargı yapısının vuru momentine etkisi olmadığından yüksüz durumda sadece zıt-EMK gerilimi analizleri yapılmıştır. Şekil 4.20’de hem faz hem de hat gerilimlerinin 1000rpm hızdaki değişimleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi hat geriliminin tepe değeri dengesiz sargı yapısı kullanıldığı zaman bir miktar azalmaktadır. Bu değer dengeli sargı yapısı kullanıldığında 22,5V iken, dengesiz sargı yapısı kullanıldığında 20,8V olmaktadır. Ayrıca, faz ve hat gerilim harmonikleri incelenmiştir (Şekil 4.21). Her iki yapının faz geriliminde harmonikler görülürken, hat gerilimde ise rastlanmamıştır. Bu durum hat gerilimindeki toplam harmonik bozunumları (%THD) incelendiğinde de açıkça görülmektedir (Şekil 4.22). Şekil incelendiğinde %THD değerinin %1’in altında olduğu görülmektedir. Bu da her iki sargı yapısı kullanıldığı durumda da gayet düzgün bir sinüzoidal şekle sahip bir hat geriliminin elde edileceğini göstermektedir.



Şekil 4.20. Faz ve hat gerilimlerinin değişimi (@1000rpm)



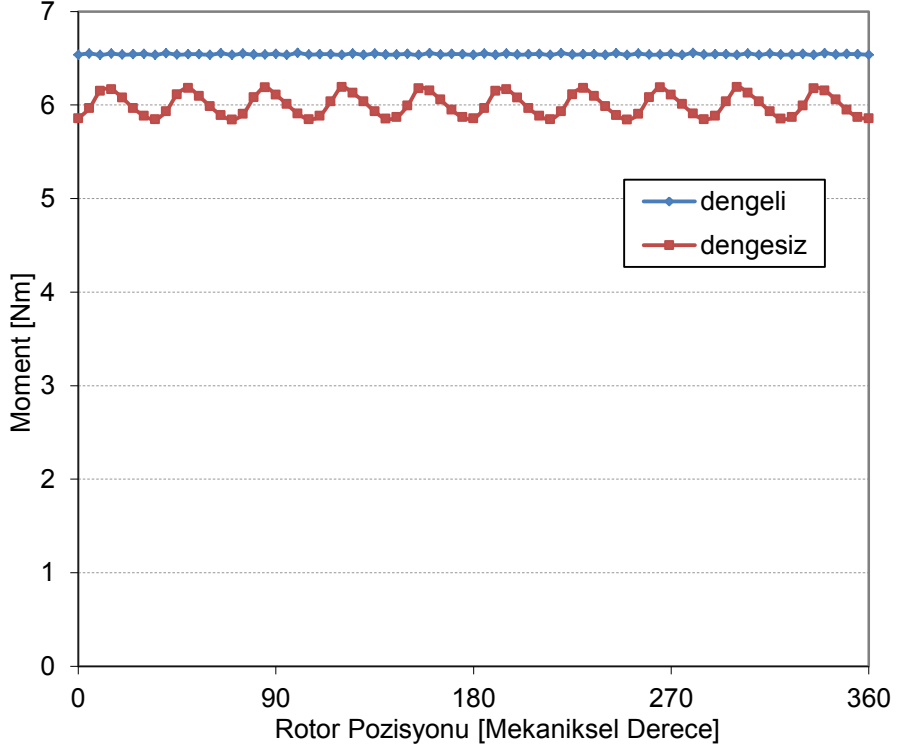
Şekil 4.21. Faz ve hat gerilimi harmoniklerinin değişimi (@1000rpm)



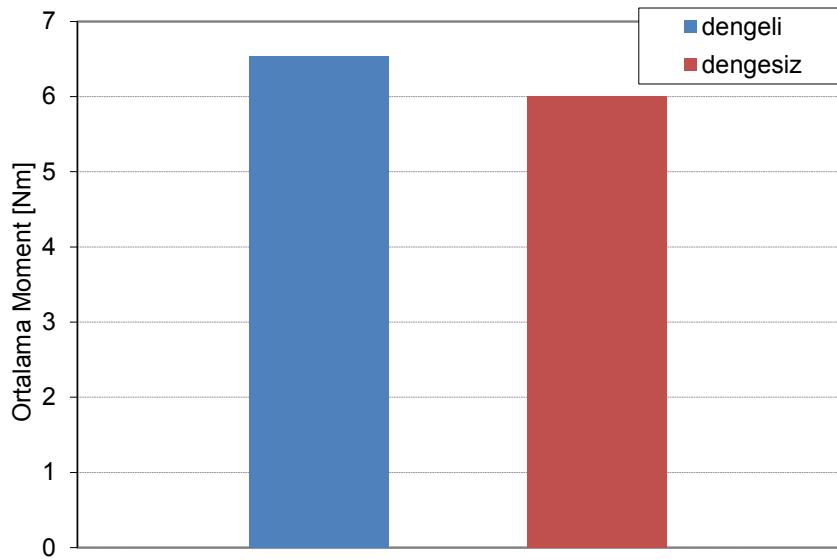
Şekil 4.22. Hat gerilimlerinin toplam harmonik bozunumları (%THD)

Diğer taraftan, motorların yüklü durumdaki analizleri de yapılmış ve çıkış momenti değişimleri ile ortalama momentleri, moment dalgalanmaları, moment-akım eğrileri

ve motorların maruz kalacağı manyetik çekme kuvvetleri incelenmiştir. Şekil 4.23'de her iki yapının aynı akım değeri için (25Arms) çıkış momenti değişimleri verilmiştir. Dengeli sargı yapısı kullanıldığı durumda hem ortalama momentin attığı hem de moment dalgalanmasının azaldığı görülmektedir.

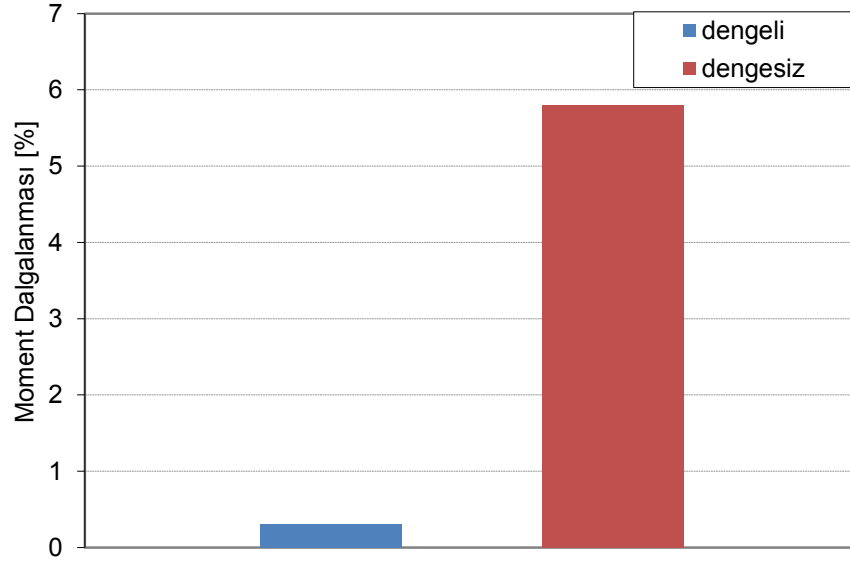


Şekil 4.23. Dengeli ve dengesiz sargılı motorların çıkış momenti değişimleri (@25Arms)

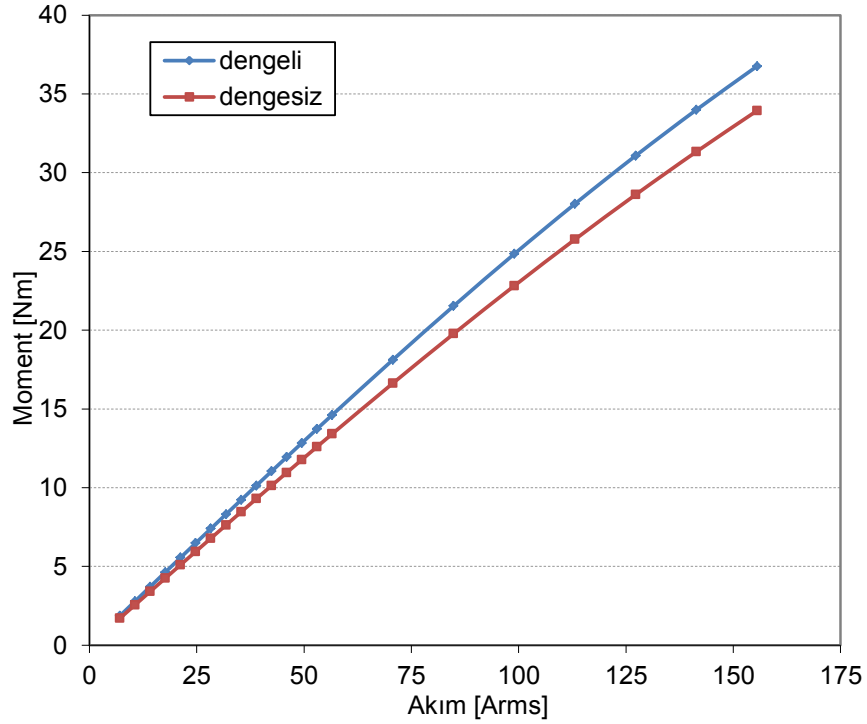


Şekil 4.24. Dengeli ve dengesiz sargılı motorların ortalama moment değişimleri

Şekil 4.24'de görüldüğü gibi dengersiz sargı yapısı kullanıldığı durumdaki 6Nm'lik ortalama moment değeri dengeli sargı yapısı kullanıldığında %9 artmıştır. Ayrıca moment dalgalanması dengeli sargı yapısı kullanıldığında %0,3 iken, dengersiz sargı yapısı kullanıldığı durumda %5,8 seviyelerindedir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25. Dengeli ve dengersiz sargılı motorların moment dalgalanmaları

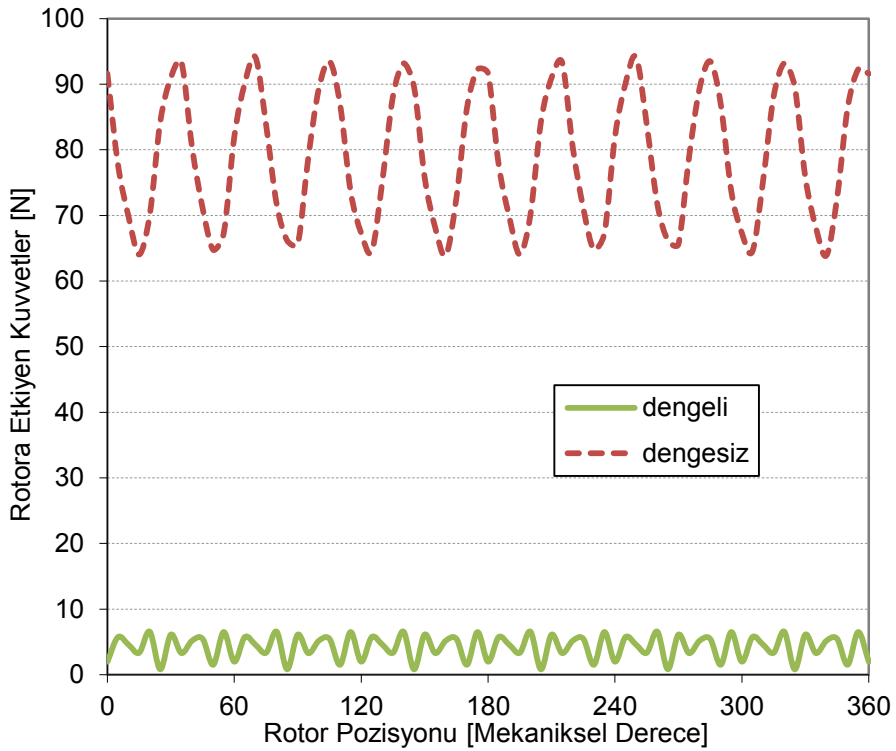


Şekil 4.26. Dengeli ve dengersiz sargılı motorların moment-akım eğrisi



Her iki yapının moment-akım eğrileri Şekil 4.26’da verilmiştir. Görüldüğü gibi her iki motorda da yüksek akım seviyelerine çıkılmasına karşın çok büyük bir doyum gözlenmemiştir. Motorlar yaklaşık %400 yüklendiğinde dengeli sargı yapılı motorda %4,2 ve dengesiz sargı yapılı motorda ise %4,1 seviyelerinde doyum gözlenmiştir.

Son olarak yüklü durumda rotora etkiyecek olan kuvvetler incelenmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi DMÇK statordaki sargıların dağılımına bağlı olarak ortaya çıkan bir kuvvettir. Özellikle dengesiz ya da asimetrik dağılıma sahip sargı yapısı kullanıldığında rotora etki eden kuvvetler artacaktır. Bu durum Şekil 4.27’de çok net bir şekilde görülmektedir. Dengeli sargı yapısı kullanıldığı durumda DMÇK değeri dengesiz sargı yapısındaki kuvvet değerine göre %95 azalmaktadır. Aradaki bu ciddi farkın sadece sargıların dağılımından kaynaklandığı dikkat edilmesi gereken bir husustur.



Şekil 4.27. Rotora etkiyen manyetik çekme kuvvetleri

## 5. DÜŞÜK HIZLAR İÇİN DENGELİ VE DENGESİZ MOTORLARIN PERFORMANS KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde farklı oluk-kutup kombinasyonlarına sahip 5 dengeli ve 5 dengesiz sargı yapılı 10 farklı motor için hem yüksüz hem de yüklü durumdaki performans karşılaştırmaları yapılmış ve dengesiz sargı yapısı kullanmanın avantajlarından bahsedilmiştir.

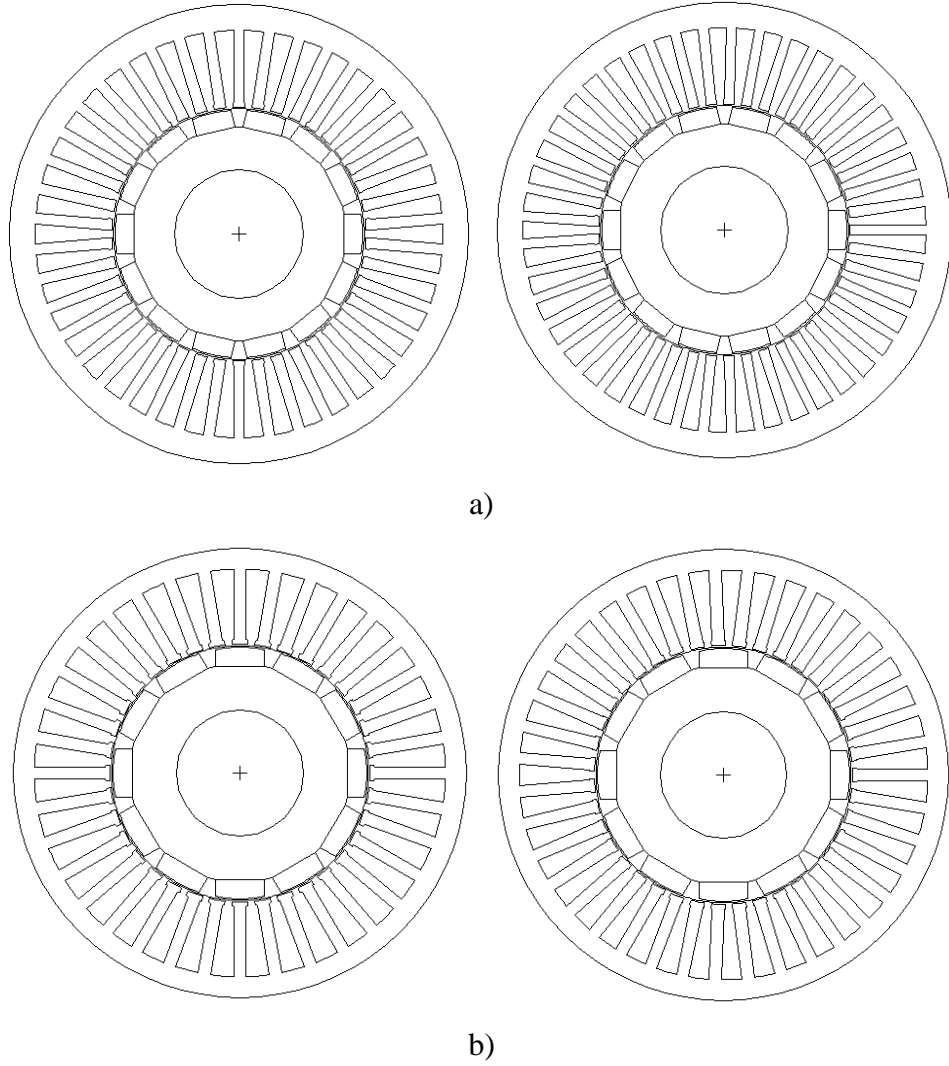
Sürekli mıknatıslı servomotorlar yüksek verimleri, küçük boyutları ve geniş hız aralığı ile savunma sanayi, elektrikli araçlar, servo sistemler gibi endüstriyel uygulamalarda çok sık kullanılmaktadır. SM motorların moment kalitesi, düşük gürültülü ve düzgün bir çıkış momenti elde etme açısından oldukça büyük bir önem taşır. Ayrıca, düşük hızlarda yörünge takibinde kullanılan motorlar da son derece yüksek bir moment kalitesi gerektirir, çünkü küçük bir moment titreşimi bile önemli hatalara sebep olabilir. Bu yüzden SM motorların moment kalitesi çok önemlidir.

Genel olarak, farklı tiplerdeki SM motorların moment kalitesini hesaplamak zor bir iştir, çünkü moment dalgalanmasını belirlerken vuru momentini de hesaba katmak gerekir. Moment kalitesini analitik olarak elde etmek, kaçak akıların modellenmesinin zorluğu göz önüne alındığında, kolay bir iş değildir ve SEA paket programları böyle motorların moment bileşenlerini hesaplamada ve moment kalitesini iyileştirmede oldukça kolaylık sağlar.

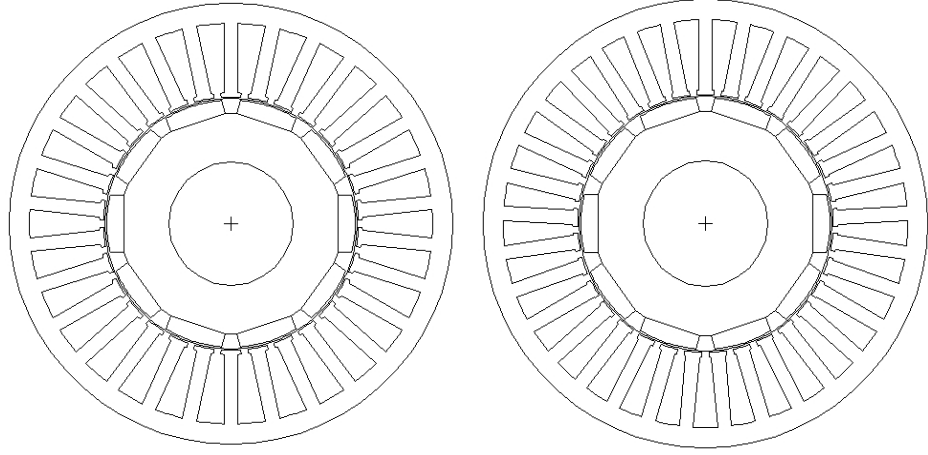
Bu çalışmada dengeli ve dengesiz sargı yapılı, yüzeyden mıknatıslı 10 farklı SM servomotor karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Analizler hem yüksüz durum hem de yüklü durum için gerçekleştirilmiştir ve 2D SEA kullanılmıştır. Özellikle düşük hızlarda, yüksek kaliteli bir moment çıkışı elde etmek için vuru momentini bileşenini minimuma indirerek her bir motordaki moment dalgalanmasını da minimize etmek amaçlanmış ve istenen sonuç elde edilmiştir. Bunun yanında motor kontrolünü etkileyen önemli parametrelerden biri olan zıt elektromotor kuvveti (zıt-EMK) gerilimleri de istenildiği gibi dalga şekli sinüzoidal olacak şekilde elde edilmiştir ve harmonikler minimize edilmiştir.

## 5.1. Analizi Yapılan Motorlar ve Tasarım Kriterleri

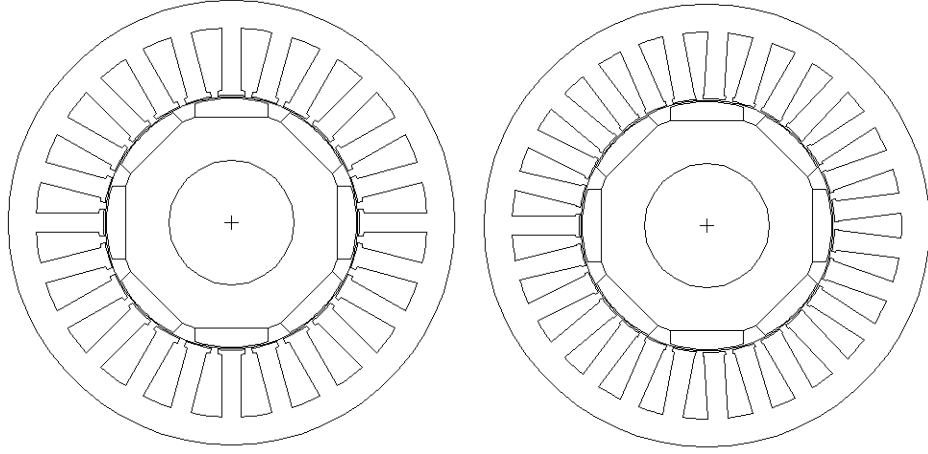
Bu çalışmada 2D SEA kullanılarak on farklı motorun analizi yapılmıştır. Bu motorlardan beşi oluk/kutup/faz oranının 1 olduğu geleneksel motorlardır. Diğer beşi ise oluk/kutup/faz oranının 1'e yakın olduğu, dengesiz sargı yapısına sahip motorlardır. Analizi yapılan tüm motorlarda mıknatıs, rotor ve stator sacı gibi kısımlarında aynı malzemeler kullanılmıştır. Tasarım kriteri açısından, aynı paket boyuna sahip, farklı geometrik boyutlarda olmasına rağmen aynı mıknatıs hacminde olan ve stator dişlerindeki manyetik akı yoğunluğu seviyeleri hemen hemen aynı olan tasarımlar gerçekleştirilmiştir. İncelenen motorların özeti Tablo 5.1'de verilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan tüm motorların kesitleri Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



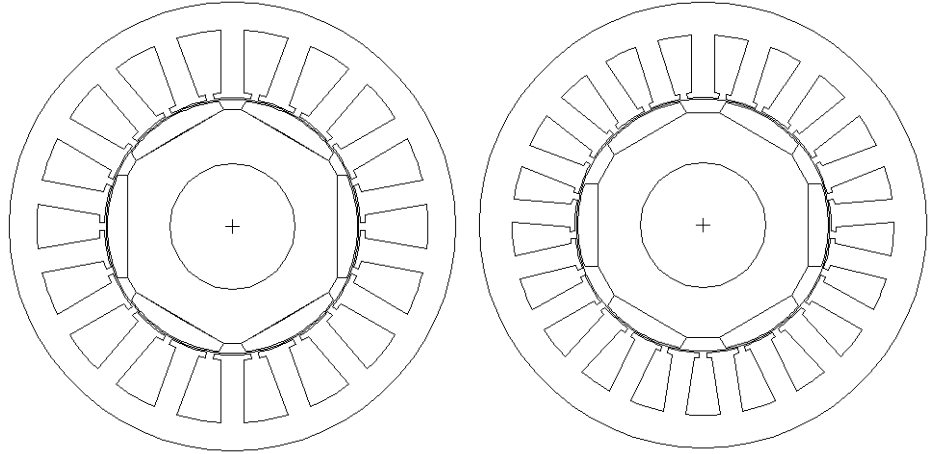
Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan motorların kesitleri a) 42 ve 45-oluk 14-kutup, b) 36 ve 39-oluk 12-kutup, c) 30 ve 33-oluk 10-kutup d) 24 ve 27-oluk 8-kutup ve e) 18 ve 21-oluk 6-kutup



c)



d)



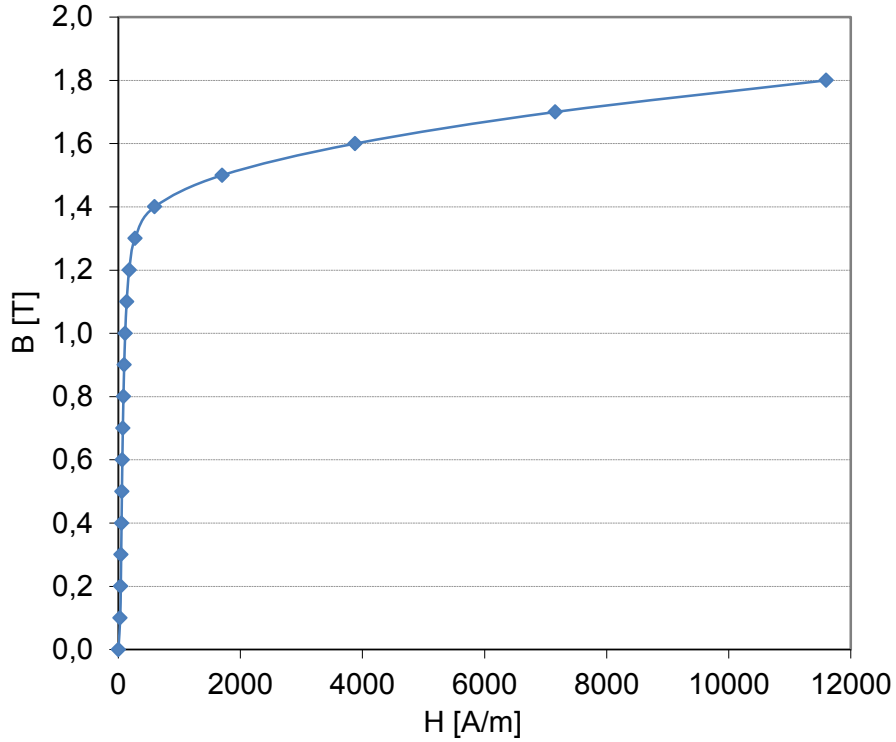
e)

Şekil 5.1. (Devamı) Çalışmada kullanılan motorların kesitleri a) 42 ve 45-oluk 14-kutup, b) 36 ve 39-oluk 12-kutup, c) 30 ve 33-oluk 10-kutup d) 24 ve 27-oluk 8-kutup ve e) 18 ve 21-oluk 6-kutup

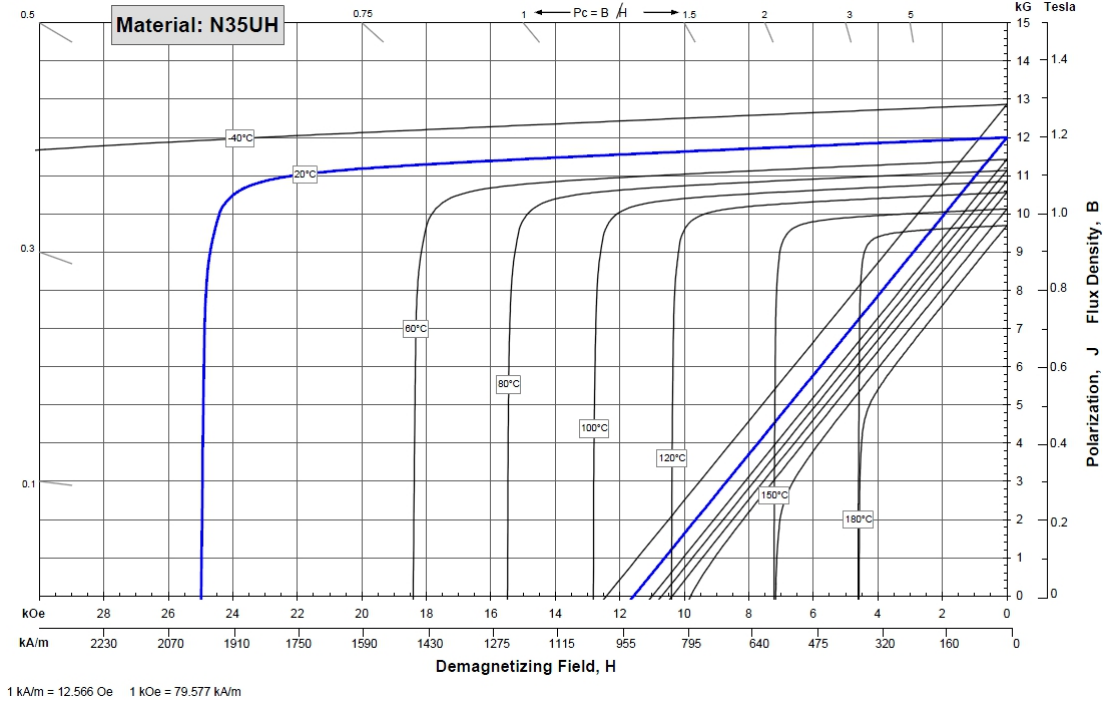
Tablo 5.1. Analizi yapılan motorların özeti

Kutup Sayısı	Dengeli		Dengesiz	
	Oluk Sayısı	$q$ (oluk/kutup/faz)	Oluk Sayısı	$q$ (oluk/kutup/faz)
6 kutup	18 oluk	1	21 oluk	1,167
8 kutup	24 oluk	1	27 oluk	1,125
10 kutup	30 oluk	1	33 oluk	1,1
12 kutup	36 oluk	1	39 oluk	1,083
14 kutup	42 oluk	1	45 oluk	1,071

Motorlar bir stator ve yüzeyden mıknatıslı bir rotordan oluşmaktadır. Statorlar olukludur ve üç fazlı sargıların yerleştirildiği lamineli manyetik sac malzemesinden meydana gelmiştir. Saclarda kullanılan M270-35A silisyum çeliği malzemesidir. Bu malzeme aynı zamanda motorların yine lamineli olan rotorları için de kullanılmıştır. Şekil 5.1'den görüldüğü gibi tüm servomotorların rotor kısmında, rotor yüzeyine yüksek enerjili NdFeB sürekli mıknatıslar yerleştirilmiştir. Kullanılan sac malzemesi ve mıknatıs malzemesi özellikleri sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de verilmiştir.

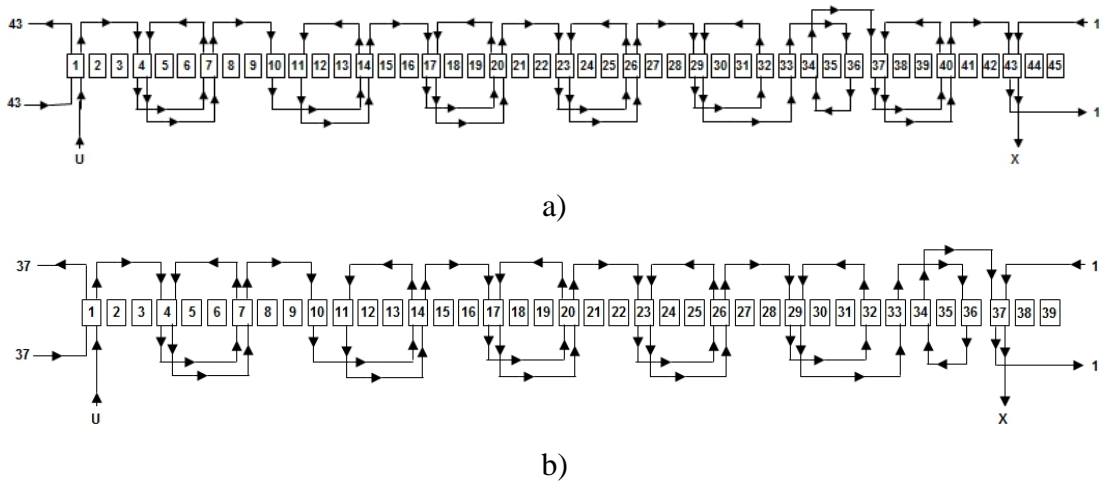


Şekil 5.2. Sac malzemesi B-H eğrisi

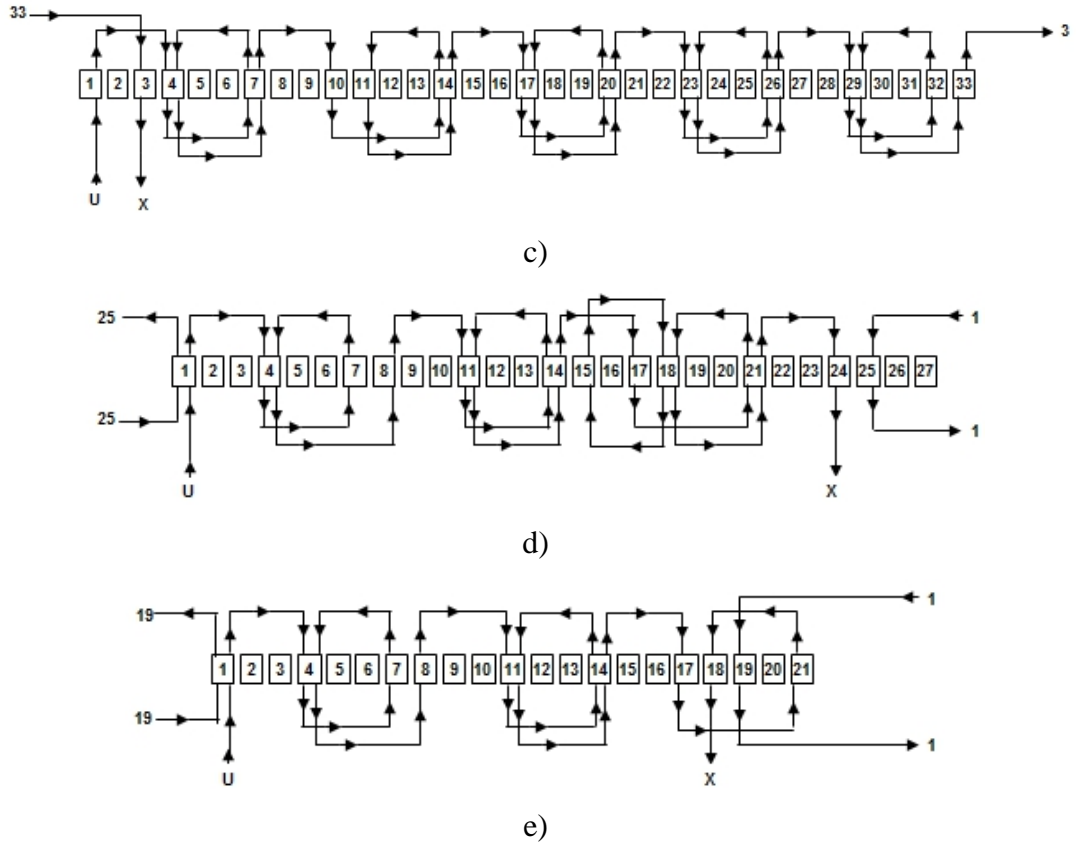


Şekil 5.3. Mıknatıs malzemesi B-H eğrisi [51]

Oluk/kutup/faz oranı tamsayı olan motorlar standart sargı yapısına sahiptir ve dengeli motorlar olarak adlandırılır. Oluk sayısının 39, 27 gibi sayılar olduğu kesir oluklu yapılarda ise standart bir sargı yapısı kullanılamaz, bu yüzden bu motorlarda dengesiz bir sargı yapısı kullanılmıştır. Bu çalışmada, oluk/kutup/faz oranı 1'den farklı olan servomotorlar için kullanılan sargı yapıları Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Motorların sargı şeması a) 45-oluk 14-kutup, b) 39-oluk 12-kutup, c) 33-oluk 10-kutup, d) 27-oluk 8-kutup ve e) 21-oluk 6-kutup



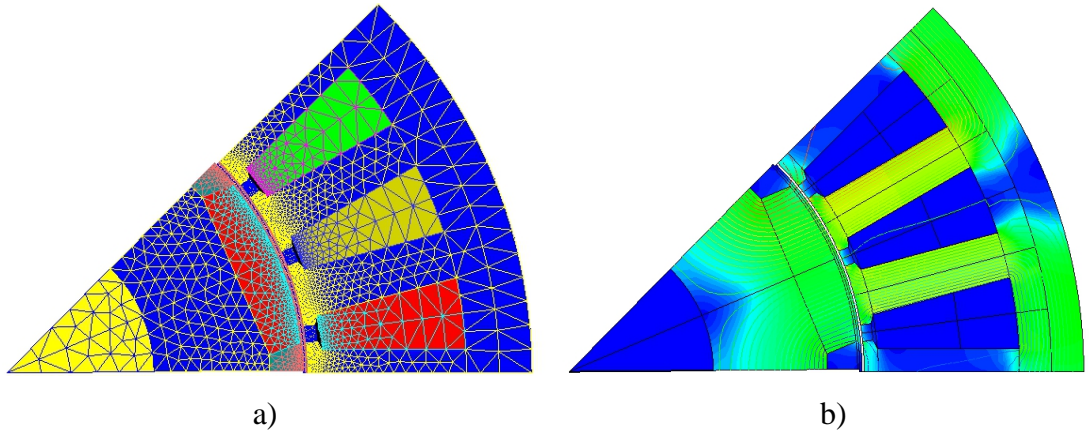
Şekil 5.4. (Devamı) Motorların sargı şeması a) 45-oluk 14-kutup, b) 39-oluk 12-kutup, c) 33-oluk 10-kutup, d) 27-oluk 8-kutup ve e) 21-oluk 6-kutup

## 5.2. Servomotorların Yüksüz Durum SEA

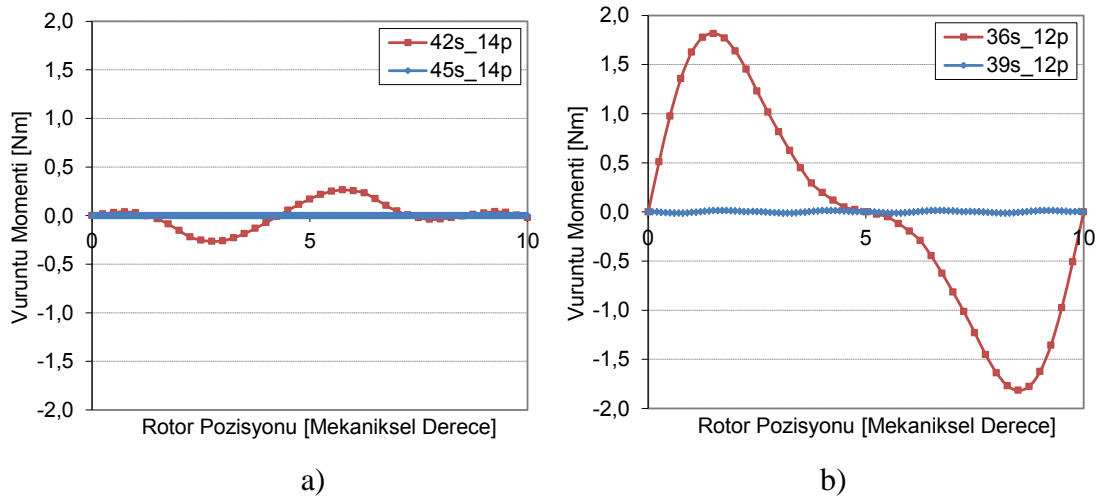
Bu çalışmada kullanılan 10 farklı servomotorun, vurutu momenti, zıt-EMK ve çıkış momenti gibi motor performansı hakkında bilgi verecek analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak motorların yüksüz durum akı yoğunlukları incelenmiştir. Tüm motorlar stator dişlerindeki akı yoğunluğu yaklaşık olarak aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 5.5’de örnek olarak 24-oluk 8-kutuplu modelin ağ yapısı ve akı yoğunluğu gösterilmiştir.

10 farklı servomotor için vurutu momenti simülasyonları Flux2D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hem dengeli hem de dengesiz sargı yapısına sahip motorlar için yapılan analiz sonucunda elde edilen vurutu momenti değişimleri Şekil 5.6’da gösterilmiştir. Grafiklerin anlaşılmasını kolaylaştırmak için aynı ölçeklendirme kullanılmıştır. Burada bahsedilmesi gereken,  $q$  (oluk/kutup/faz) değerinin 1 olduğu durumlarda vurutu momentini minimize etmek için hiçbir önlem alınmamıştır. Grafiklerden de görüldüğü gibi bu durumlardaki vurutu momenti

bileşeni yüksektir ve motorların anma momentinin %4'ü ile %20'si arasında değişmektedir. Diğer taraftan,  $q$  değerinin tam sayı olmadığı durumlarda bu moment bileşeni çok küçük değerler almaktadır (motorların anma momentinin %0,2'den daha az). Hassas pozisyon kontrolü veya yüksek moment kalitesi gerektiren düşük hızlı uygulamalar için vurutu momenti çok büyük bir önem teşkil eder. Bu şekilde bir oluk-kutup kombinasyonunun seçimi ile ( $q \neq 1$ ) vurutu momentini neredeyse ortadan kaldırmak mümkün olur. Böylece, üretimi zorlaştıracak ekstra bir yapısal önlem almaya gerek kalmadan bu moment bileşenini ortadan kaldırmak mümkün olur.

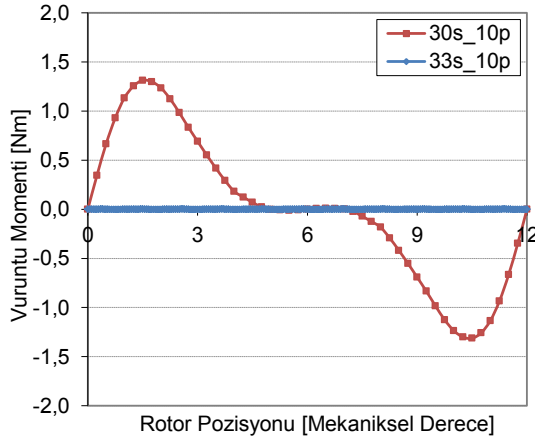


Şekil 5.5. 24-oluk 8-kutuplu yapının 2D SE modeli a) ağ yapısı ve b) akı yoğunluğu dağılımı

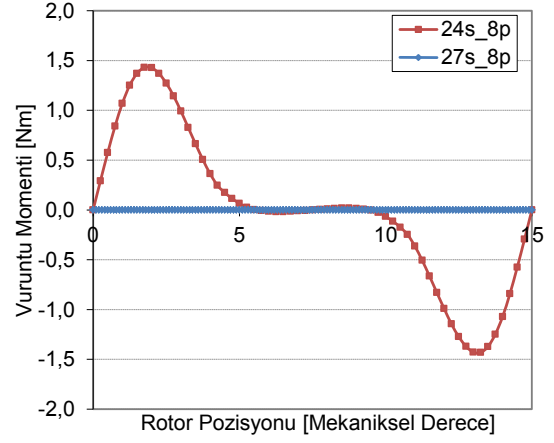


Şekil 5.6. Vurutu momenti değişimleri a) 42 ve 45-oluk 14-kutup, b) 36 ve 39-oluk 12-kutup, c) 30 ve 33-oluk 10-kutup, d) 24 ve 27-oluk 8-kutup ve e) 18 ve 21-oluk 6-kutup

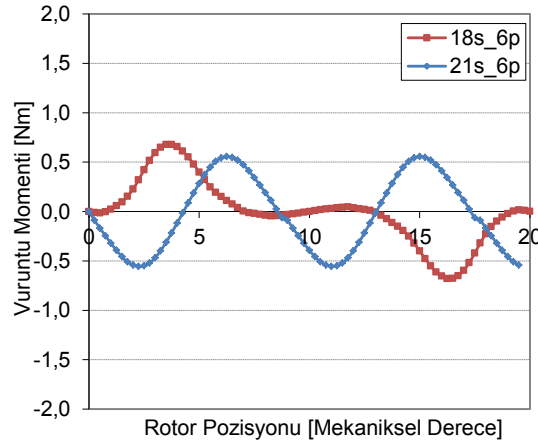




c)



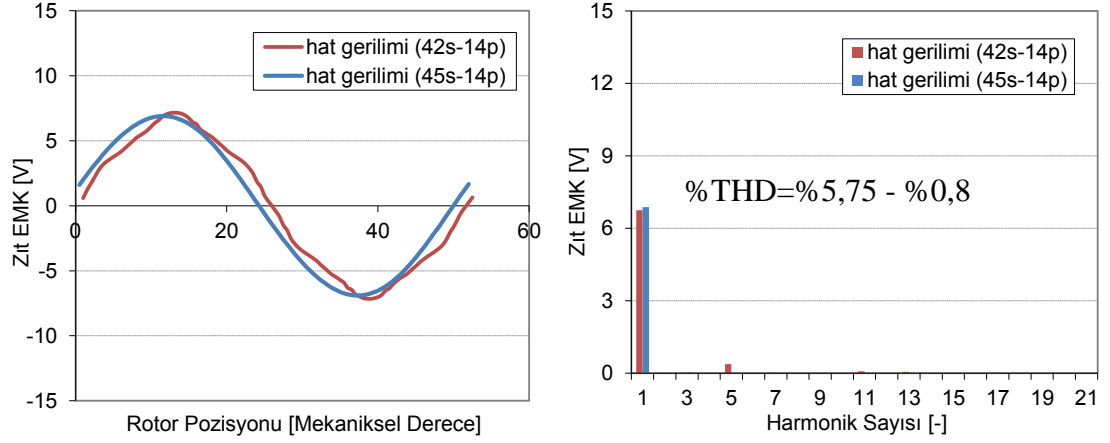
d)



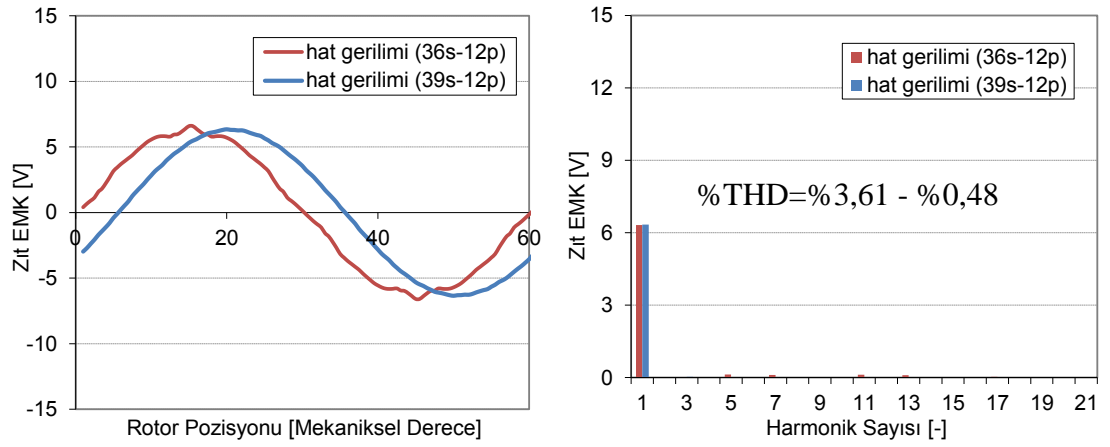
e)

Şekil 5.6. (Devamı) Vuruntu momenti değişimleri a) 42 ve 45-oluk 14-kutup, b) 36 ve 39-oluk 12-kutup, c) 30 ve 33-oluk 10-kutup, d) 24 ve 27-oluk 8-kutup ve e) 18 ve 21-oluk 6-kutup

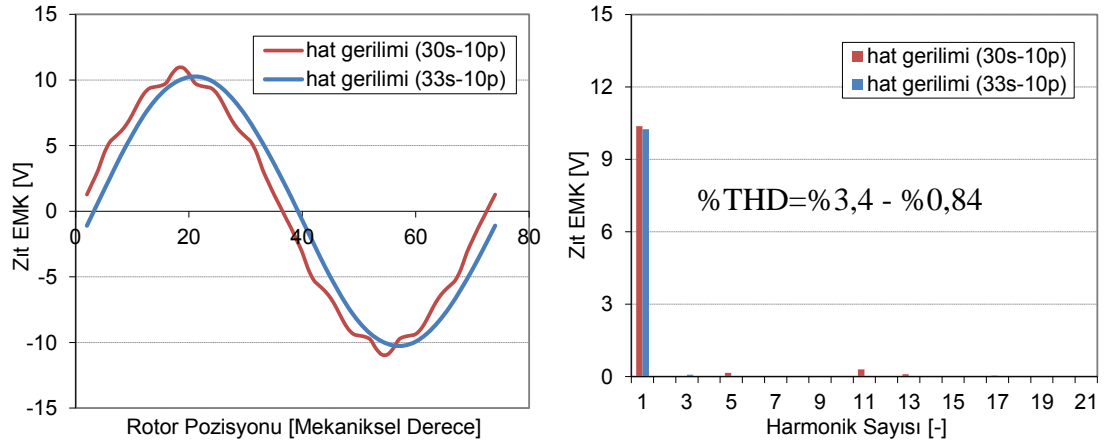
Yüksüz durumda yapılan zıt-EMK gerilimi analizinde motorların 500rpm hızdaki hat gerilimi değişimleri incelenmiştir. Şekil 5.7’de dengeli ve dengesiz sargı yapıları servomotorların hat gerilimi değişimleri ile bu değişimlerin harmonik içerikleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi seçilen oluk-kutup kombinasyonu ile elde edilen hat gerilimi dalga şekli sinüzoidale daha da yaklaşmaktadır. Gerilimlerin harmonikleri ve toplam harmonik bozunumları (THD) incelendiğinde bu fark net bir şekilde görülmektedir. 42-oluk 14-kutuplu servomotorda %THD değeri 5,75 iken, 45-oluk 14-kutuplu servomotorda ise bu değer %0,8’e kadar düşmektedir. Zaten %THD değerinin 1’e yakın olması dalga şeklinin sinüzoidal şekle yaklaştığını göstermektedir.



a)

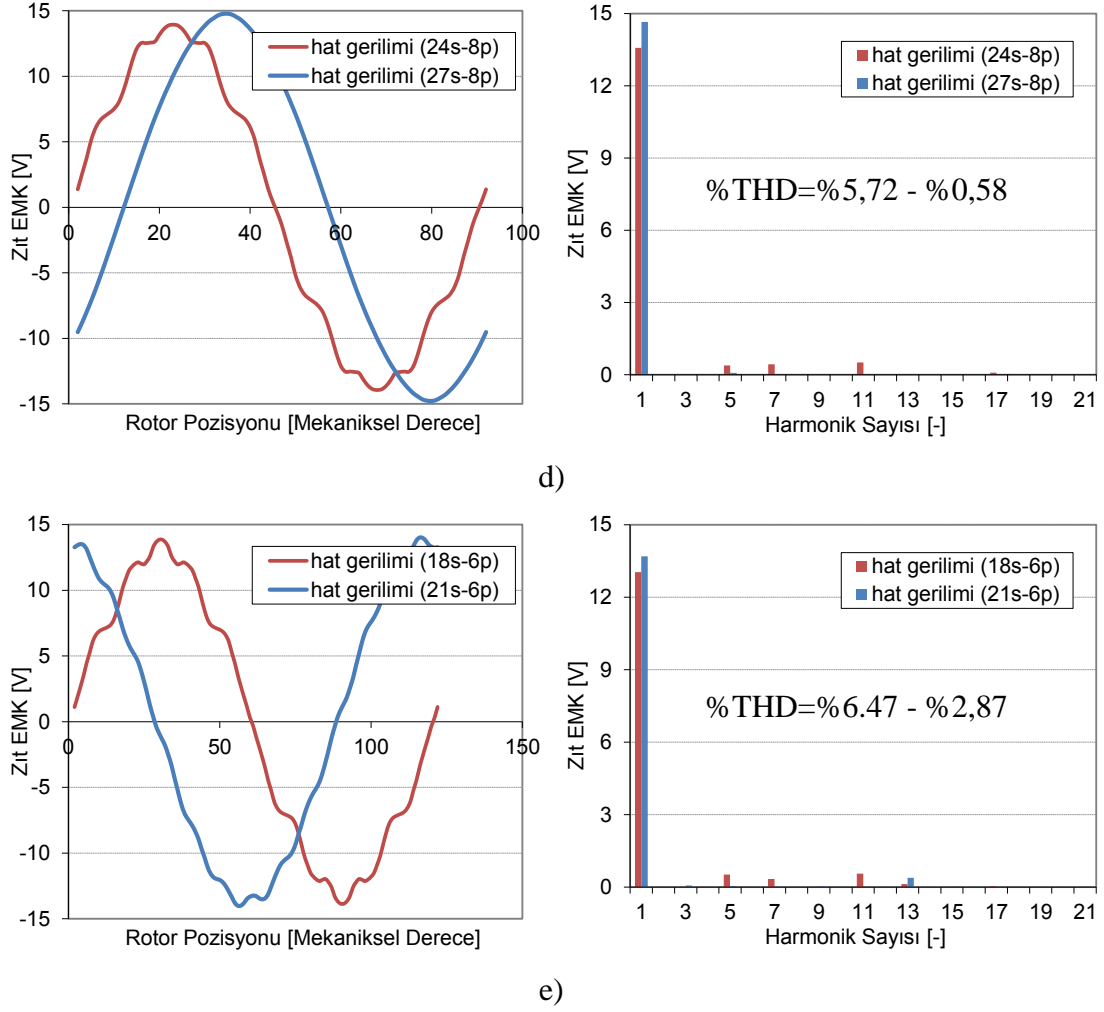


b)



c)

Şekil 5.7. 500rpm hızdaki hat gerilimi değişimleri ve harmonik içerikleri a) 42 ve 45-oluk 14-kutup, b) 36 ve 39-oluk 12-kutup, c) 30 ve 33-oluk 10-kutup, d) 24 ve 27-oluk 8-kutup ve e) 18 ve 21-oluk 6-kutup

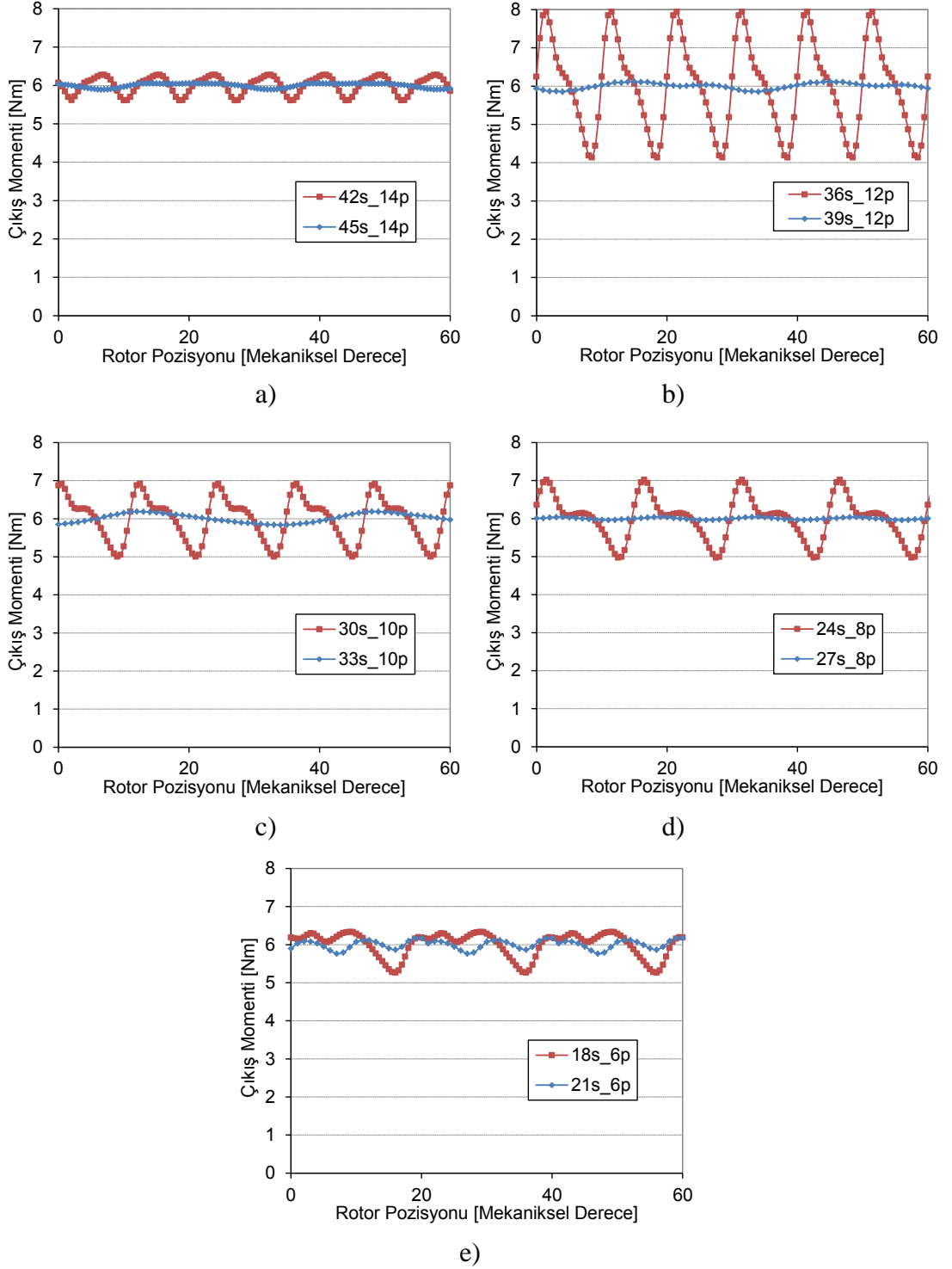


Şekil 5.7. (Devamı) 500rpm hızdaki hat gerilimi değişimleri ve harmonik içerikleri a) 42 ve 45-oluk 14-kutup, b) 36 ve 39-oluk 12-kutup, c) 30 ve 33-oluk 10-kutup, d) 24 ve 27-oluk 8-kutup ve e) 18 ve 21-oluk 6-kutup

### 5.3. Servomotorların Yüklü Durum SEA

Moment kalitesi motor performansını ve kontrol edilebilirliğini etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Moment kalitesini değerlendirirken sadece moment yoğunluğu ve moment-ağırlık oranı göz önünde bulundurulmaz, bunların yanında moment titreşimlerini de hesaba katmak gerekir [48]. Moment titreşimleri, vuruntu momenti ve moment dalgalanması bileşenlerinden oluşur. Vuruntu momenti, sürekli mıknatıslar ile stator oluk ve dişleri arasında relüktans değişimlerine yol açan, manyetik etkileşimden dolayı ortaya çıkar. Moment titreşimlerine istenmeyen harmonikler eklediği için SM senkron motorların tasarımında vuruntu momentinin varlığı problem teşkil eder. Moment dalgalanması ise endüvi manyeto motor kuvveti (MMK) ve alan dağılımı değişimlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkar ve yüksek

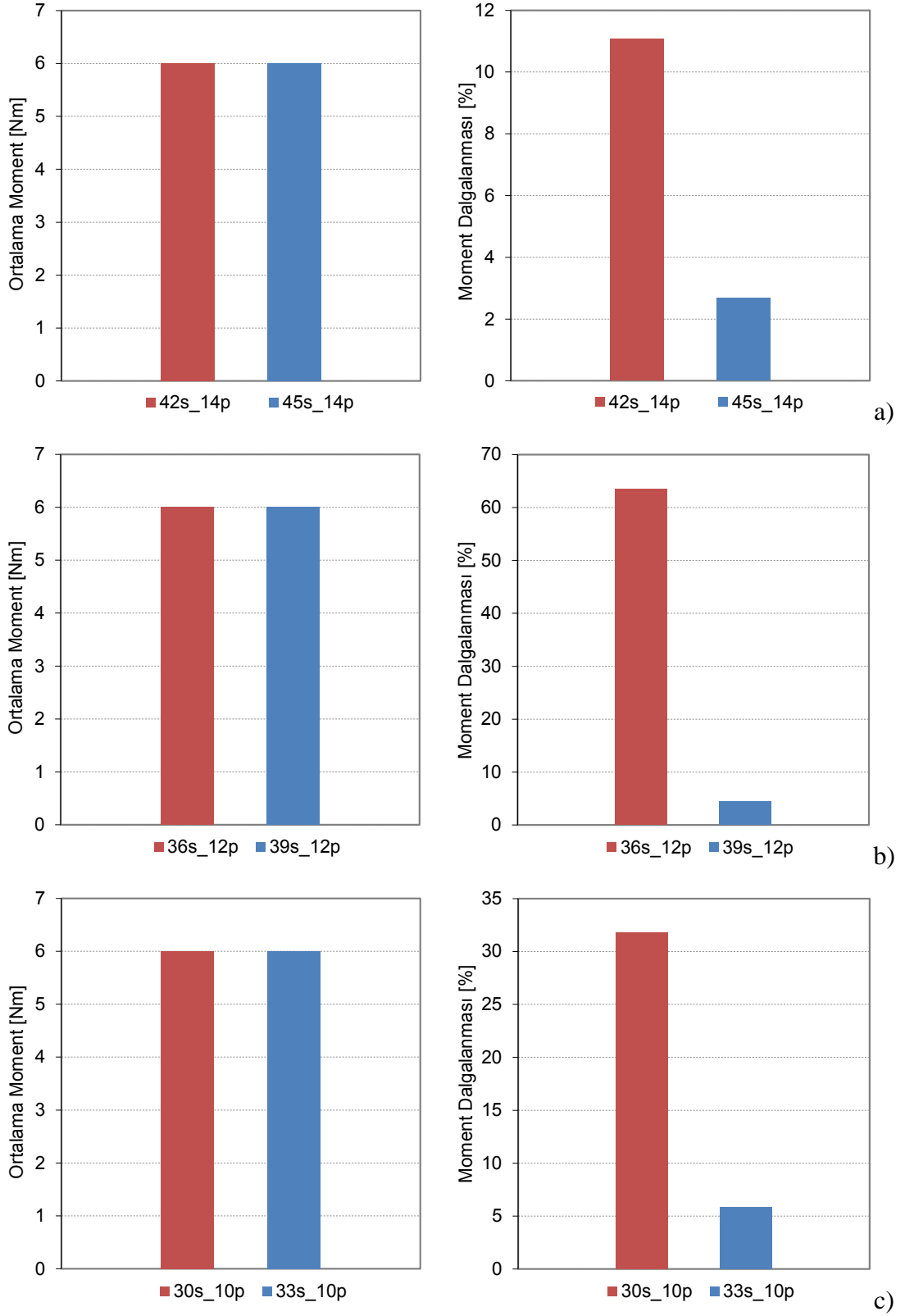
hızlarda bu bileşen sistem ataleti tarafından genellikle ortadan kaldırılır. Fakat düşük hızlarda moment dalgalanması düzgün bir moment çıkışı elde edilmesini etkiler ve ayrıca da gürültülere ve mekanik titreşimlere neden olur [49, 50].



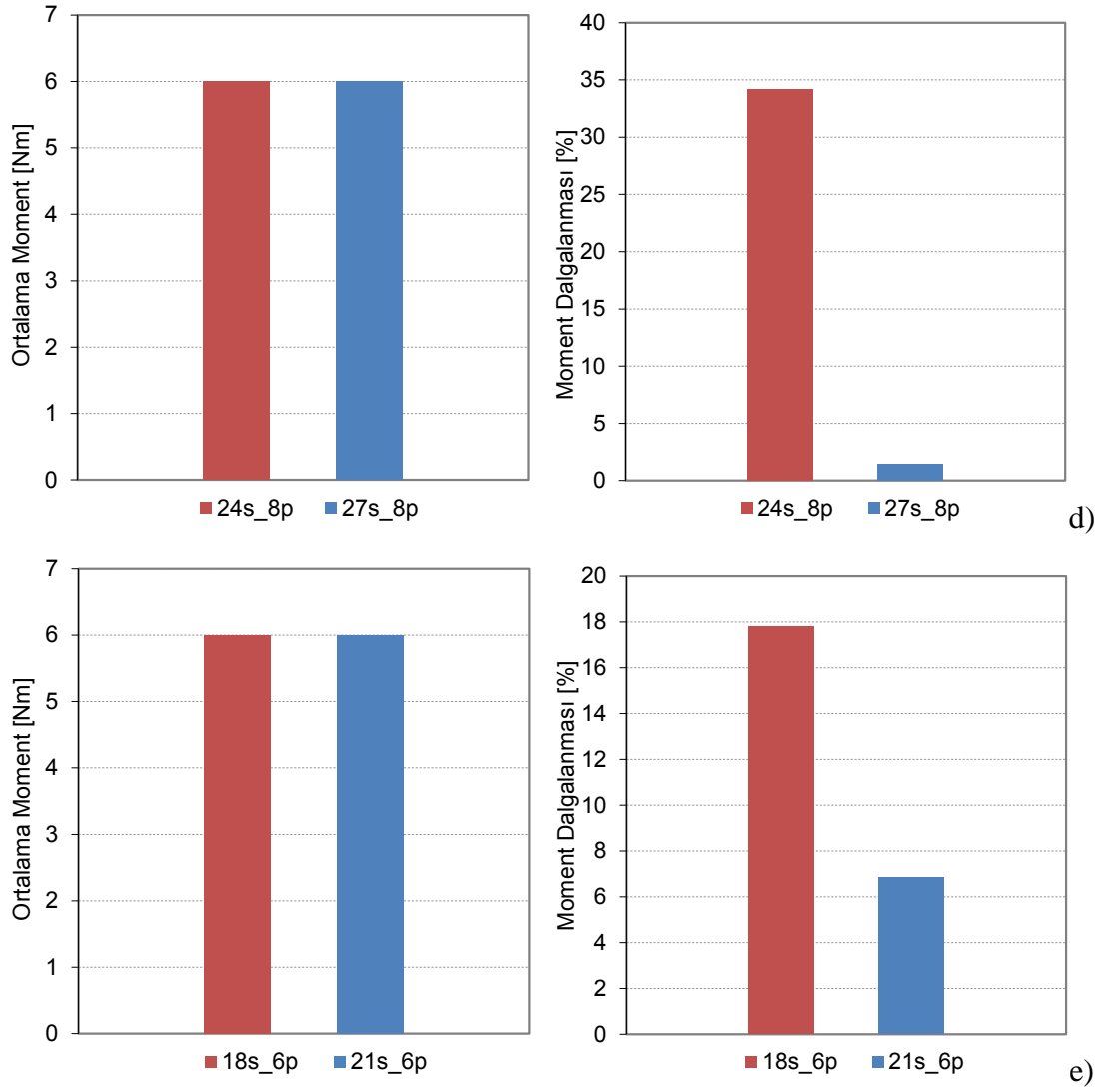
Şekil 5.8. Çıkış momenti değişimleri a) 42 ve 45-oluk 14-kutup, b) 36 ve 39-oluk 12-kutup, c) 30 ve 33-oluk 10-kutup, d) 24 ve 27-oluk 8-kutup ve e) 18 ve 21-oluk 6-kutup

10 farklı servomotor için yapılan yüklü durum sonlu eleman analizi sonuçları Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi tüm motorlar aynı ortalama moment değerini verecek şekilde tasarlanmıştır (6Nm). Ayrıca, ortalama momente göre moment dalgalanmaları incelendiğinde, kullanılan oluk-kutup kombinasyonunun avantajı da görülmektedir. 36-oluk 12-kutuplu motorda moment dalgalanması %63,5 iken, 39-oluk 12-kutuplu servomotor için bu değer %4,4 mertebelerindedir.

Şekil 5.9'da tüm servomotorların ortalama moment değerleri ile ortalama momente göre moment dalgalanma yüzdeleri verilmiştir. Görüldüğü gibi kesir oluklu servomotorlarda moment dalgalanması oldukça azalmaktadır. 24-oluk 8-kutuplu motorda moment dalgalanması %34,2 iken, tek sayıda oluk ile tasarlanan 27-oluk 8-kutuplu motor %1,45 moment dalgalanmasına sahiptir. Moment dalgalanmasının %5'in altında olması tasarım açısından oldukça iyi bir performansı sağlayacağını bir göstergesidir.



Şekil 5.9. Ortalama moment ve moment dalgalanması değişimleri a) 42 ve 45-oluk 14-kutup, b) 36 ve 39-oluk 12-kutup, c) 30 ve 33-oluk 10-kutup, d) 24 ve 27-oluk 8-kutup ve e) 18 ve 21-oluk 6-kutup

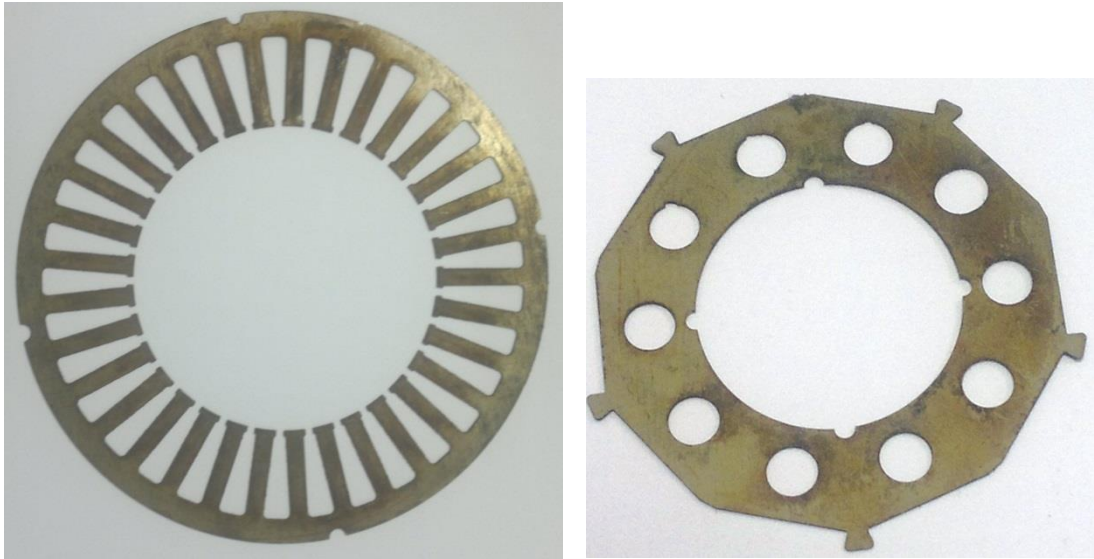


Şekil 5.9. (Devamı) Ortalama moment ve moment dalgalanması değişimleri a) 42 ve 45-oluk 14-kutup, b) 36 ve 39-oluk 12-kutup, c) 30 ve 33-oluk 10-kutup, d) 24 ve 27-oluk 8-kutup ve e) 18 ve 21-oluk 6-kutup

## 6. MOTOR PROTOTİP ÜRETİMİ

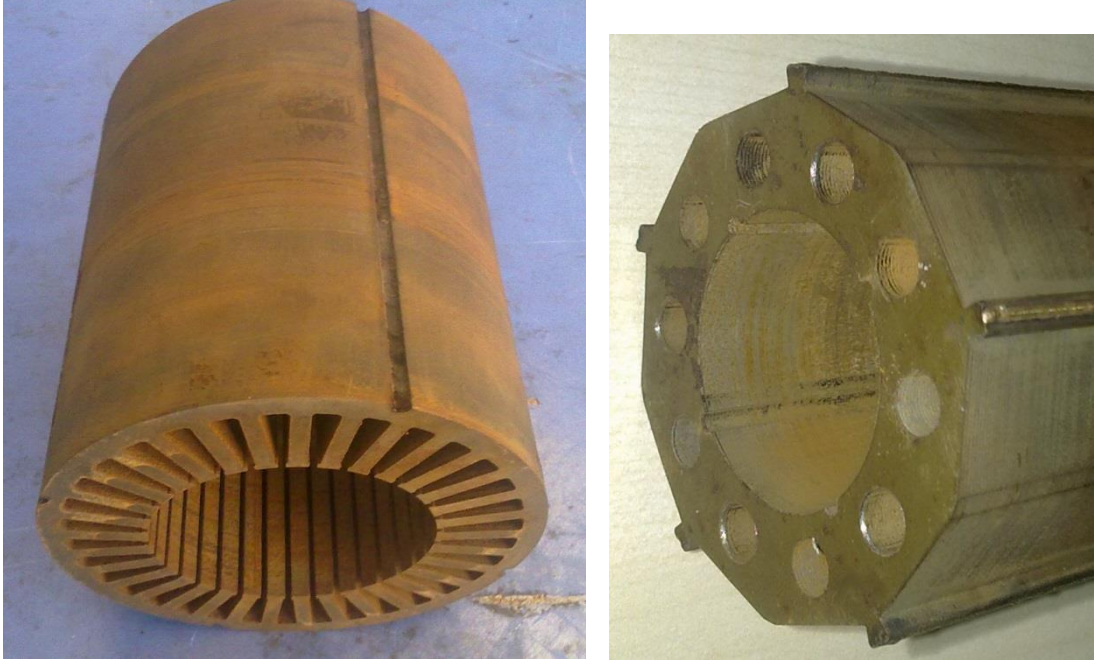
Bu bölümde, prototip üretimi en başından itibaren anlatılarak, stator ve rotorda kullanılan malzeme ve motor parçaları hakkında bilgiler verilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda 33-oluk 10-kutuplu motor prototipi üretilmiş, SEA'dan elde edilen motor performans sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması sağlanmıştır. Kullanılan motor 33-oluk 10-kutuba ve dengesiz bir sargı yapısına sahiptir.

Motor stator ve rotor sacının yapısı ve bu sacların paketlenmesiyle oluşan stator ve rotor sac paketleri sırasıyla Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Rotor sacında kullanılan lamineli malzeme M270-35A çeliğidir. Bu malzeme aynı zamanda stator saclarında da kullanılmıştır. Şekil 6.3'de ise servomotorun miline sacların yerleştirildiği, sacların üzerine de yüksek enerjili NdFeB mıknatısların Loctite yapıştırıcısı ile yapıştırıldığı rotor yapısı gösterilmiştir.

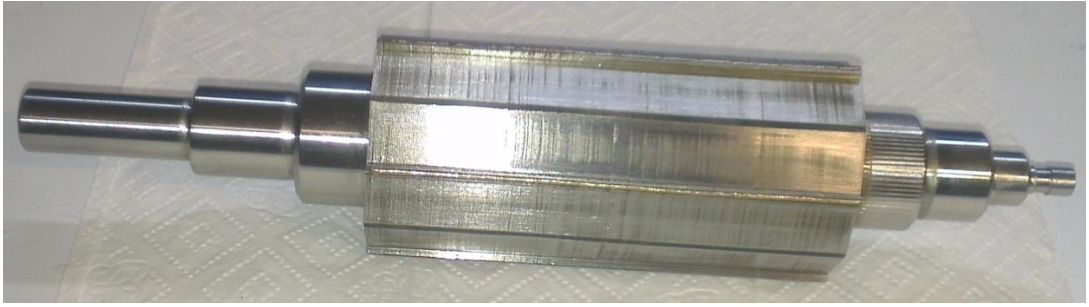


Şekil 6.1. Stator ve rotor sac yapısı





Şekil 6.2. Stator ve rotor saclarının paketlenmiş hali



a)

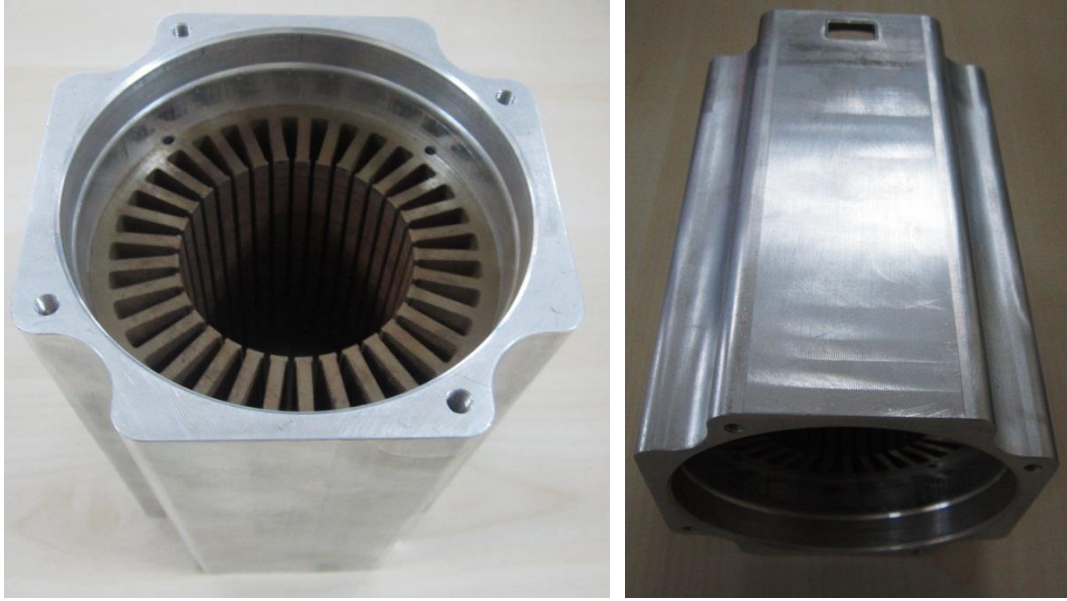


b)

Şekil 6.3. a) Mıknatıssız ve b) sürekli mıknatıslı rotor yapısı

Motor stator yapısı da lamineli manyetik çelik malzemesinden oluşmaktadır ve stator oluklarına çok fazlı sargılar yerleştirilmiştir. Hem rotor saclarının hem de stator saclarının kesiminde tel erozyon teknolojisi kullanılmıştır. Şekil 6.4'de kesimi

tamamlanmış stator paketinin gövdeye yerleştirilmiş hali, Şekil 6.5’de ise statora sargıların yerleştirilmesiyle sarım işlemi tamamlanmış durum gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Gövdeye yerleştirilmiş stator yapısı



Şekil 6.5. Statora sargıların yerleştirilmiş hali

Şekil 6.6’da gösterilen motor ön ve arka kapağının da gövdeye montajının tamamlanmasıyla Şekil 6.7’de gösterilen, dengesiz sargı yapısına sahip, SM servomotor elde edilmiştir.



Şekil 6.6. Motor ön ve arka kapağı



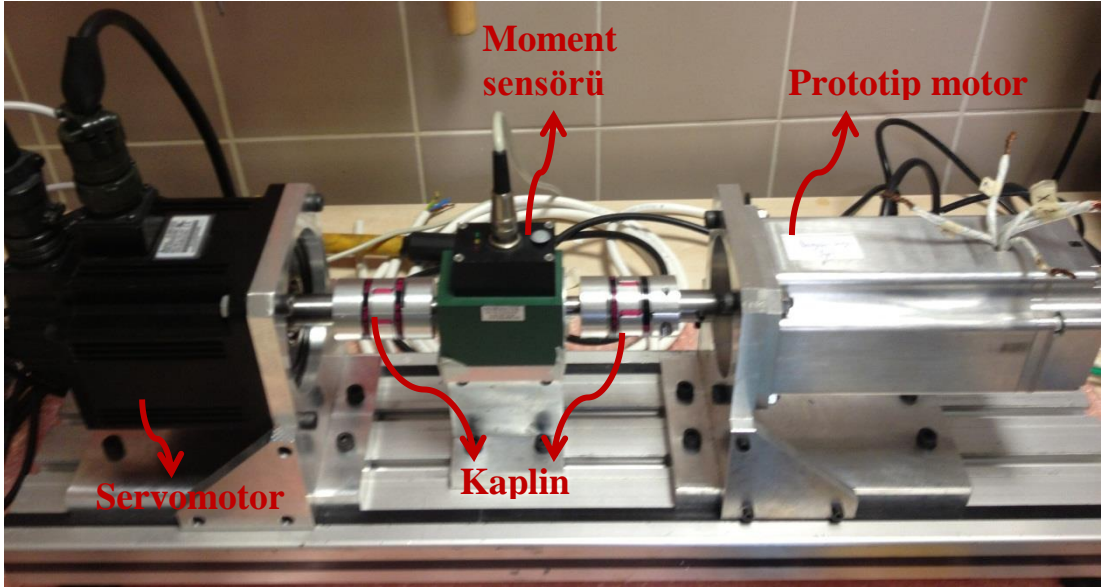
Şekil 6.7. Montajı tamamlanmış servomotor

## 7. DENEYSEL SONUÇLAR VE DOĞRULAMA

Bu bölümde sürekli mıknatıslı AC servomotorun performans kontrolü yapılmıştır. Motorun vuruğu momenti değeri ve zıt EMK gerilim dalga şekilleri deneysel çalışmalarla elde edilmiş ve sonlu elemanlar analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

### 7.1. Motor Test Düzenegi

Üretilen sürekli mıknatıslı AC servomotor prototipinin testlerini yapmak amacıyla Şekil 7.1’de gösterilen deney düzenegi oluşturulmuştur. Deney düzeneginde prototip motor, moment sensörü, servomotor ve bağlantı elemanları bulunmaktadır. Deney düzenegi ile motorun yüksüz durumda yapılan vuruğu momenti ve zıt EMK gerilimi testleri yapılmaktadır.



Şekil 7.1. Motor deney düzenegi

Prototip motoru yüksüz durumdayken çok düşük hızlarda (1rpm gibi) sabit hızla çevrilir ve moment değerine bakılır. Bu durum için elde edilen moment değeri vuruğu momenti olarak isimlendirilir. Prototip motoru düşük hızda çevirmek için bir servomotor kullanılmıştır ve üretilen moment değeri sensör tarafından okunup, değerlerin kaydedilmesiyle vuruğu momenti elde edilmiş olur. Şekil 7.1’de deney

düzeneğinde kullanılan moment sensörü ve servomotora ait teknik bilgiler EK-A'da verilmiştir.

Prototip motoru yine yüksüz durumdayken ve vuruğu momentinin aksine bu kez yüksek hızlarda çevirerek motor terminalleri arasında endüklenen gerilime bakılır. Elde edilen gerilim değeri bir osiloskop yardımıyla veriye dönüştürülerek elde edilir.

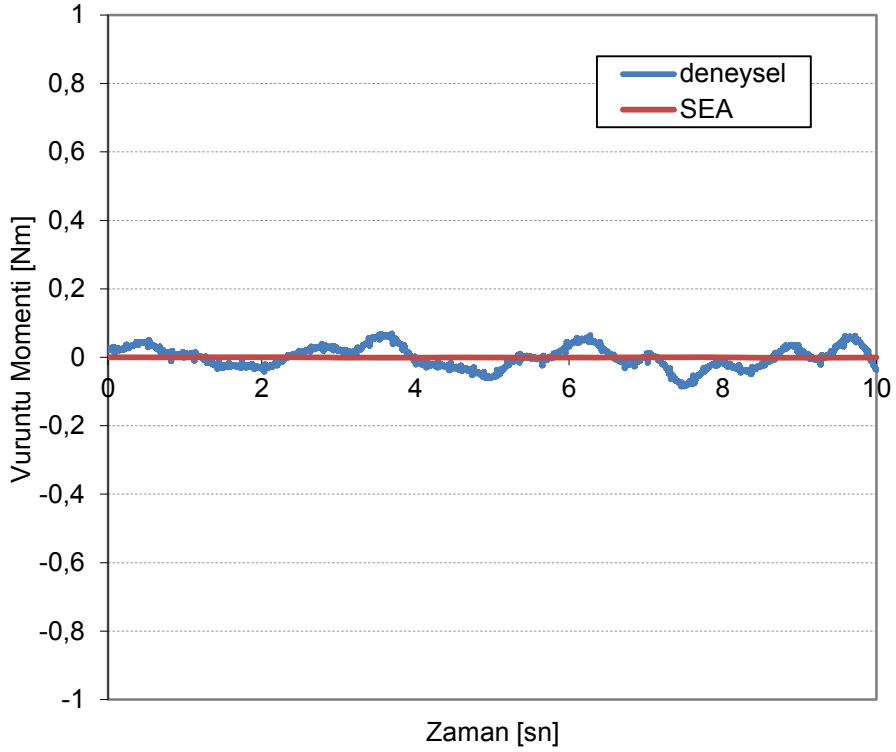
## 7.2. Yüksüz Durum Çalışmaları

Deney düzeneği kullanılarak yapılan ilk çalışma vuruğu momentinin elde edildiği testtir. Motorun sargılarına enerji verilmeden servomotoru 1rpm hızda çevirerek elde edilen moment değerleri vuruğu momentinin değişimini verir. Yapılan test sonucu ve SEA sonucu elde edilen vuruğu momentinin değişimi Şekil 7.2'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi hem deneysel olarak hem de SEA ile edilen değerler oldukça küçük bir değişim göstermektedir. Deneysel olarak elde edilen vuruğu momenti tepe değeri 0,05Nm olup, anma momentinin ortalamasının %0,83'i mertebelerindedir. Bu değer de SM bir motor için oldukça iyi bir değerdir. Deneysel olarak elde edilen vuruğu momenti değerinin SEA'e göre daha yüksek olması mekanik hatalardan ve moment sensörünün hassasiyetinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

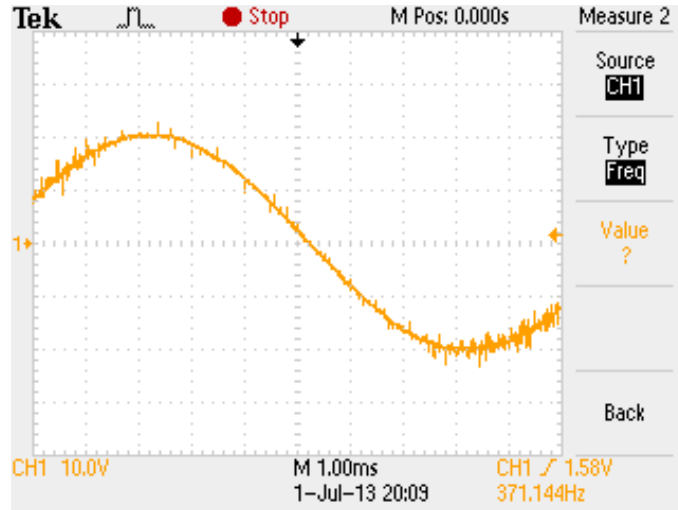
Yapılan bir diğer çalışma ise motorda endüklenen gerilimin elde edildiği zıt EMK testidir. Deney düzeneğindeki servomotor 1000rpm hızda çevrilmiş ve terminaller arasından elde edilen hat gerilimi şekline bakılmıştır. Veriler osiloskop yardımıyla kaydedilmiştir (Şekil 7.3). Osiloskoptan elde edilen veriler ile SEA sonuçları karşılaştırılmıştır (Şekil 7.4). Görüldüğü gibi deneysel ile SEA sonuçları arasında oldukça iyi bir uyum söz konusudur ve aralarında yaklaşık %0,22'lik bir fark vardır. Hat geriliminin tepeden tepeye değeri ise 41,7V'dir. Farklı hızlarda bu çalışmaları tekrarlandığında elde edilen hat gerilimi tepe değerlerinin değişimleri ise Şekil 7.5'de hem deneysel hem de SEA için karşılaştırılarak verilmiştir. Her iki çalışmadan elde edilen sonuçlar arasındaki uyum açıkça görülmektedir. Bu da SE analizi ile yapılan çalışmaların doğruluğunu net bir şekilde göstermektedir.

Yukarıda belirtilen çalışmalardan zıt EMK gerilimi dengeli sargı yapısına sahip motor için de tekrarlanmıştır. Sargı yapısının değişmesinin vuruğu momentine bir etkisi olmadığı bilindiğinden vuruğu momenti testi gerçekleştirilmemiştir. Hem

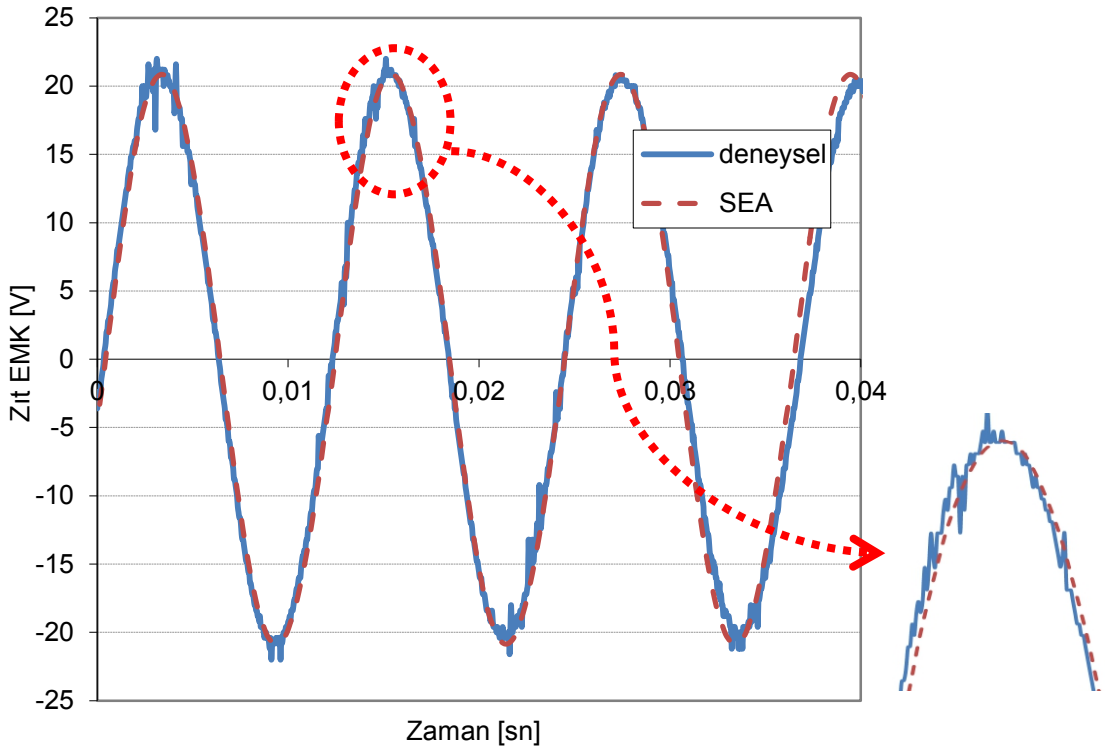
deneysel olarak hem de SEA ile elde edilen farklı hız değerleri için zıt EMK hat geriliminin değişimi Şekil 7.6'da verilmiştir. Görüldüğü gibi oldukça iyi bir uyum söz konusudur.



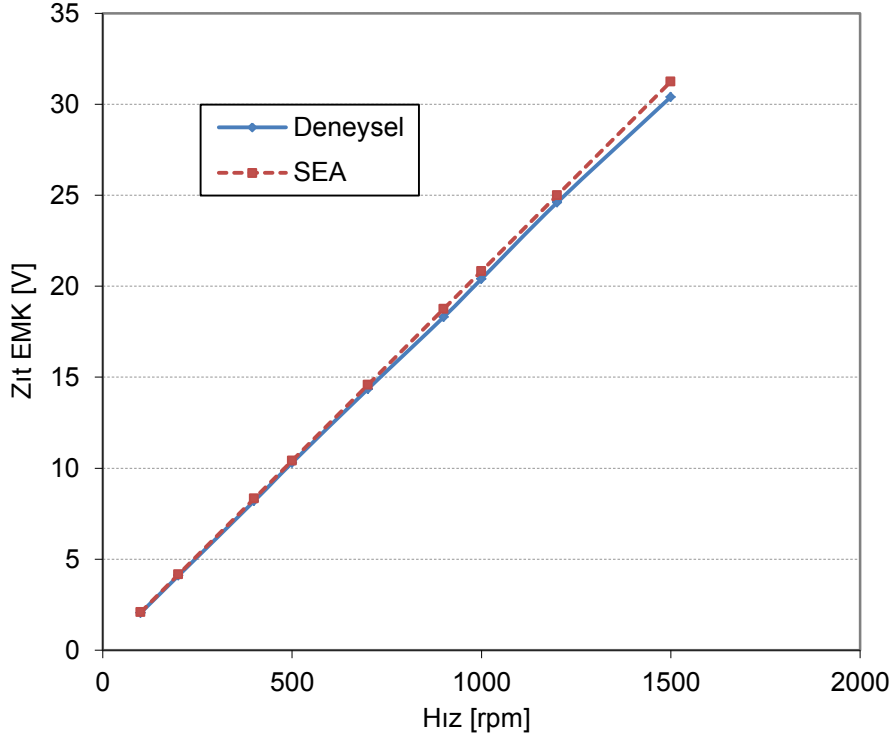
Şekil 7.2. SEA sonucu ve deneysel olarak elde edilen vuruntu momentini değişimlerinin karşılaştırılması



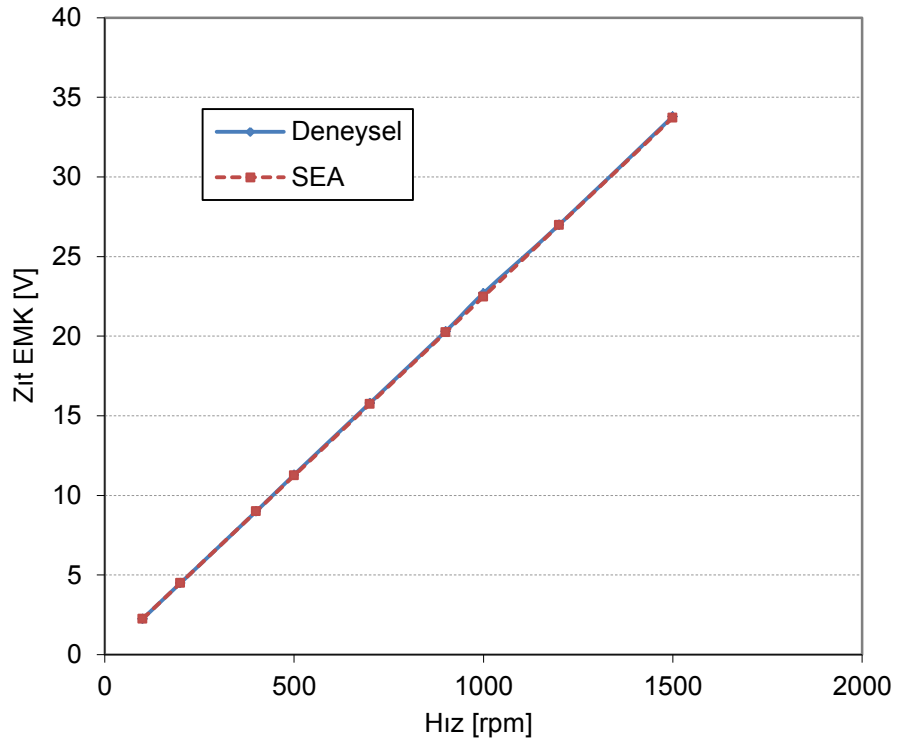
Şekil 7.3. 1000rpm için deneysel olarak elde edilen hat gerilimi Şekli



Şekil 7.4. 1000rpm hızda deneysel ve SEA ile elde edilen hat gerilimi karşılaştırması



Şekil 7.5. Hız-zıt EMK hat gerilimi karşılaştırması (dengesiz motor için)



Şekil 7.6. Hız-zıt EMK hat gerilimi karşılaştırması (denge motor için)



## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sürekli mıknatıslı motorların temelleri özetlenmiş, diğer motor türleri ile farklılıkları açıklanmış, SM motorların çeşitleri, kullanılan malzemeler ve tasarım süreçleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca, sargı yapıları hakkında bilgiler verilerek, sargı yapısının hangi oluk-kutup kombinasyonları kullanıldığında geçerli bir sargı yapısı vereceği anlatılmıştır. Dengeli ve yapısal olarak dengesiz sargı yapısı örneklerle açıklanmış, birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları verilmiştir, uygulamalardaki önemine değinilmiştir.

Mevcut bir tasarım kriteri için 24V DC baradan çalışan bir SM motor tasarımı tez kapsamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşaması olan manyetik eşdeğer devre modelleme hakkında bilgiler verilerek, 33-oluk 10-kutuplu dengesiz sargı yapılı motorun sonlu eleman analizinden elde edilen yüksüz durum akı yoğunluğu ile tam modelin yüksüz durumdaki akı yoğunluğu sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu aşamadan sonra, motor tasarım sürecinde de bahsedildiği gibi, detaylı SEA yapılarak motor performansı incelenmiştir. Dengesiz sargı yapılı motor kullanmanın avantajlarını görmek için birçok optimizasyon çalışması tamamlanmıştır. Seçilen oluk-kutup kombinasyonundan dolayı vuru momentini minimize edilmiş, sargı yapısının avantajı olarak da sinüzoidal bir zıt-EMK gerilimi elde edilmiş ve moment dalgalanması azaltılmıştır. Bu sayede moment kalitesi yüksek bir fırçasız AC Motor tasarımı sonlandırılmıştır. Ayrıca, 33-oluk 10-kutuplu yapıda dengeli sargı yapısı kullanılabilirdiğinden bu sargı yapısının da motor performansına olan etkisi incelenmiş ve dengesiz sargı yapılı durumdaki analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Burada rotora etkiyen kuvvetlerin dengeli sargı yapısı kullanıldığında sargıların simetrik dağılımından dolayı azaldığı gösterilmiştir.

Dengesiz sargı yapısı kullanmanın avantajlarını görebilmek için farklı oluk-kutup kombinasyonlarına sahip, 5 dengeli sargı yapısı ( $q=1$ ) ve 5 dengesiz sargı yapısı ( $q \neq 1$ ) olmak üzere 10 farklı motor tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu motorların performans karşılaştırılması detaylı olarak yapılmıştır. Analizi yapılan tüm

motorlarda mıknatıs, rotor ve stator sacı gibi kısımlarında aynı malzemeler kullanılmıştır. Tasarım kriteri açısından, aynı paket boyuna sahip, boyutları farklı olmasına rağmen mıknatıs hacimleri aynı olan ve stator dışlarındaki manyetik akı yoğunlukları aynı seviyede olan tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bütün bu sonuçlar aynı güç, moment ve hız seviyesi için elde edilmiştir. Karşılaştırmalar sonucu, dengeli sargı yapısına sahip yapılarda vuruğu momentinin yüksek değerlerde olduğu gözlenmiştir (anma momentinin %4'ü ile %20'si arasında). Buna karşın, dengesiz sargı yapıları motorlarda vuruğu momenti değerinin anma momentinin %0,2'sinden daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu motorların zıt-EMK gerilimleri de karşılaştırılmıştır ve %THD değerlerinden de görüldüğü gibi gerilim dalga şekillerinin  $q=1$  olduğu durumdaki sonuçlara göre çok daha sinüzoidal bir şekle sahip olduğu söylenebilir. Moment dalgalanması değişimlerinde de yine dengesiz sargı yapısı kullanıldığında ciddi bir azalma söz konusudur. Buradan çıkarılacak sonuç; dengesiz sargı yapısı kullanıldığında stator ya da rotor tarafında hiçbir yapısal önlem almaya gerek kalmadan yukarıda bahsedilen avantajları elde etmek mümkündür. Böylece üretimi zorlaştıracak ekstra bir yapısal önlem almaya gerek kalmadan istenilen motor performansını elde etmek mümkün olabilmektedir. Dengesiz sargı yapıları motorların en büyük dezavantajı ise sargı yapısının asimetrik olmasından dolayı rotora dengesiz çekme kuvveti etki etmesidir. Bu kuvvet de hem rulmanların ömrünü azaltır hem de ilerleyen zamanlarda gürültüye neden olabilmektedir.

Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucu 33-oluk 10-kutuplu dengesiz ve dengeli sargı yapılarına sahip motorların prototip üretimi gerçekleştirilerek, deney düzeneği kullanılarak temel elektromanyetik performans testleri yapılmıştır. Elde edilen vuruğu momenti ve zıt-EMK gerilimi sonuçları SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır ve sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- [1] Merrill F. W., Permanent magnet excited synchronous motors, *AIEE Trans.*, 1954, **73**, 1754-1760.
- [2] Douglas J. F. H., Current loci of permanent-magnet synchronous motors, *AIEE Trans.*, 1959, **78**, 76-78.
- [3] Cedrat Co., *Flux 2D user manual*, Meylan, 2011.
- [4] Khrishnan R., *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*, 1th ed., CRC Press, New York, 2010.
- [5] Sebastian T., Slemon G. and Rahman M., Modeling of permanent magnet synchronous motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1986, **22**, 1069-1071.
- [6] Aydin M., Ocak O., Ertugrul B. T., Sincar E., Oysu C., Design, analysis and experimental verification of permanent magnet AC servomotor for mobile robot applications, *20th International Conf. on Electrical Machines*, Marseille, France, 2-5 Sept. 2012.
- [7] Demir Y., Ocak O., Aydin M., No-load analysis of permanent magnet AC servomotors: A comparative study, *12th International Workshop on REM*, Kocaeli, Turkey, 15-16 Sept. 2011.
- [8] Gieras J. F., Wing M., *Permanent magnet motor technology*, 2nd ed., Marcel Dekker, Switzerland, 2002.
- [9] Ocak O., Aydin M., Rotor segmentation for spoke type interior permanent magnet servomotors, *12th International Workshop on REM*, Kocaeli, Turkey, 15-16 Sept. 2011.
- [10] Dutta R., Rahman M. F., Design and analysis of an interior permanent magnet (IPM) machine with very wide constant power operation range, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, **23**, 25-33.
- [11] Chong L., Dutta R., Rahman M. F., Application of concentrated windings in interior permanent magnet machine, *Power Eng. Conf.*, Setubal, Portugal, 12-14 April 2007.
- [12] Aydin M., Brushless permanent magnet servomotors, Editors: Küçük S., *Serial and parallel robot manipulators: Kinematic dynamics control and optimization*, 1th ed., Published by InTech, Rijeka, 275-294, 2012.
- [13] Gieras J. G., *Advancements in Electric Machines*, 1th ed., Springer, Illinois, USA, 2008.

- [14] [http://www.sura.se/Sura/hp\\_products.nsf/vOpendocument/03A8B2433FAE16C4C1256AA8002280E6/\\$FILE/NO-11.pdf?OpenElement](http://www.sura.se/Sura/hp_products.nsf/vOpendocument/03A8B2433FAE16C4C1256AA8002280E6/$FILE/NO-11.pdf?OpenElement), (Ziyaret tarihi: 1 Şubat 2013).
- [15] Guo Y. G., Zhu J. G., Watterson P. A. and Wu W., Comparative study of 3D flux electrical machines with soft magnetic composite cores, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, **39**, 1696-1703.
- [16] <http://www.staff.ncl.ac.uk/s.j.bull/smc.html>, (Ziyaret tarihi: 15 Mart 2013).
- [17] Campbell P., *Permanent magnet materials and their application*, 1th ed., Cambridge University Press, New York, Cambridge, England, 1994.
- [18] Ruoho S., Demagnetization of permanent magnets in electrical machines, *Doctoral School of Energy and Geotechnology Conf.*, Kuressaare, Estonia, 15-20 Jan. 2007.
- [19] Fitzgerald A. E., Kingsley C. Jr., Umans S. D., *Electric machinery*, 6th ed., McGraw-Hill, New York, USA, 2003.
- [20] 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.
- [21] Silvester P., Cabayan H. S., Browne B. T., Efficient techniques for finite element analysis of electric machines, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 1973, **92**, 1274-1281.
- [22] Zhong D., Finite element analysis of synchronous machines, Doctor of Philosophy, The Pennsylvania State University, USA, 2009.
- [23] Hameyer K., Henrotte F., Sande H. V., Deliege G., Gersem H. D., Finite element models in electrical machine design, *5th Brazilian Conf. on Electromagnetics (CBMag 2002)*, Gramado, Brazil, 4-6 Nov. 2002.
- [24] Bianchi N., *Electrical machine analysis using finite elements*, CRC Press, Bosa Roca, USA, 2005.
- [25] Jussila H., Salminen P., Niemela M., Pyrhonen J., Guidelines for designing concentrated winding fractional slot permanent magnet machines, *POWERENG 2007 Int. Conf. on Power Eng. Energy and Elec. Drives*, Setubal, Portugal, 12-14 Apr. 2007.
- [26] Magnussen F., Sadarangani C., Winding factors and joule losses of permanent magnet machines with concentrated windings, *IEMDC'03 IEEE Int. Elec. Machines and Drives Conf.*, Madison, USA, 1-4 June 2003.
- [27] Libert F., Soulard J., Investigation on pole-slot combinations for permanent-magnet machines with concentrated windings, *ICEM'04 IEEE, Int. Elec. Machines and Drives Conf.*, Cracow, Poland, 5-8 Sept. 2004.

- [28] Bianchi N., Bolognani S., Frare P., Design criteria of high efficiency SPM synchronous motors, *IEMDC'03 IEEE Int. Elec. Machines and Drives Conf.*, Madison, USA, 1-4 June 2003.
- [29] El-Refaie A. M., Zhu Z. Q., Jahns T. M., Howe D., Winding inductances of fractional slot surface-mounted permanent magnet brushless machines, *IAS'08 Industry App. Society Annual Meeting*, Alberta, Canada, 5-9 Oct. 2008.
- [30] Cros J., Viarouge P., Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings, *IEEE Trans. Energy Conversion*, 2002, **17**, 248-253.
- [31] Akita H., Nakaraha Y., Miyake N., Oikawa T., New core structure and manufacturing method for high efficiency of permanent magnet motors, *38th IAS Industry App. Conf.*, Salt Lake City, USA, 12-16 Oct. 2003.
- [32] El-Refaie A. M., Jahns T. M., Optimal flux weakening in surface PM machines using fractional-slot concentrated windings, *IEEE Trans. on Industry App.*, 2005, **41**, 790-800.
- [33] Fornasiero E., Alberti L., Bianchi N., Bolognani S., Considerations on selecting fractional-slot winding, *ECCE IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, Italy, 12-16 Sept. 2010.
- [34] Burakov A., Arkkio A., Comparison of the unbalanced magnetic pull mitigation by the parallel paths in the stator and rotor windings, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, **43**, 4083-4088.
- [35] Dorrell D. G., Experimental behavior of unbalanced magnetic pull in 3-phase induction motors with eccentric rotors and the relationship with tooth saturation, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999, **14**, 304-309.
- [36] Perers R., Lundin U., Leijon M., Saturation effects on unbalanced magnetic pull in a hydroelectric generator with an eccentric rotor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, **43**, 3884-3890.
- [37] Bi C., Aung N. L. H., Phyu H. N., Jiang Q., Lin S., Unbalanced magnetic pull induced by drive current in PM-BLDC motor operation, *Inter. Conf. on Electrical Machines and Systems*, Seoul, Korea, 8-11 Oct. 2007.
- [38] Bi C., Liu Z. J., Low T. S., Effects of unbalanced magnetic pull in spindle motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1997, **33**, 4080-4082.
- [39] 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**, 2675-2685.
- [40] Vijayraghavan P., Krishnan R., Noise in electric machines: a review, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1998, **1**, 251-258.

- [41] Dorrell D. G., The sources and characteristics of unbalanced magnetic pull in cage induction motors with either static or dynamic eccentricity, in *IEEE Int. Symp. on Electric Power Engineering*, Stockholm, Sweden, 18-22 June 1995.
- [42] Dorrell D. G., Ooshima M., Chiba A., Force analysis of a buried permanent-magnet bearingless motor, *IEEE International IEMDC'03 Conf.*, Madison Wisconsin, USA, 1-4 June 2003.
- [43] Yoon T., Magnetically induced vibration in a permanent-magnet brushless DC motor with symmetric pole-slot configuration, *IEEE Trans. Magn.*, 2005, **41**, 2173-2179.
- [44] Kim T. J., Hwang S. M. and Park N. G., Analysis of vibration for permanent magnet motors considering mechanical and magnetic coupling effects, *IEEE Trans. Magnetics*, 2000, **36**, 1346-1350.
- [45] Li Y. B., Ho S. L., Fu W. N. and Xue B. F., Analysis and solution on squeak noise of small permanent-magnet DC brush motors in variable speed applications, *IEEE Trans. on Magnetics*, 2009, **45**, 4752-4755.
- [46] 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**, 1544-1553.
- [47] Meier F., Permanent-magnet synchronous machine with non-overlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications, Doctor of Philosophy, KTH Royal Institute of Technology, Sweden, 2008.
- [48] Huang S., Aydin M., Lipo T. A., Torque quality assessment and sizing optimization for surface mounted permanent magnet machines, *Thirty-Sixth IAS Annual Meeting Conference*, Chicago, USA, 30 Sept. - 4 Oct. 2001.
- [49] Zhu Z. Q., Fractional slot permanent magnet brushless machines and drives for electric and hybrid propulsion systems, *Int. J. for COMPEL*, 2011, **30**, 9-31.
- [50] Chen Y. S., Zhu Z. Q., Howe D., Vibration of PM brushless machines having a fractional number of slots per pole, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, **42**, 3395-3397.
- [51] [http://www.arnoldmagnetics.com/Neodymium\\_Literature.aspx](http://www.arnoldmagnetics.com/Neodymium_Literature.aspx), (Ziyaret tarihi: 15 Mart 2013).

## **EKLER**

EK-A

**burster**

**Precision Torque Sensor**  
Non-contact transmission for rotating applications  
optional measurement of angle and speed

Code: 8661 EN  
Delivery: 1 - 2 weeks  
Warranty: 24 months

Model 8661

CAD data 2D/3D for this sensor:  
Download directly at [www.traceparts.com](http://www.traceparts.com)  
Info: refer to data sheet 80-CAD-EN



**New Features**  
Optional  
USB interface  
and dual range

- Measuring range from 0 ...  $\pm 0.05$  Nm to 0 ...  $\pm 200$  Nm
- High linearity of  $\leq \pm 0.05$  % F.S.
- Intelligent operating state indicator
- 16 bit D/A converter including digital adjustment
- Output signal 0 ...  $\pm 10$  V
- Angle measurement accuracy to 0.09° (option)
- Mechanical power computation (option USB) with powerful software DigiVision
- Excellent price-performance ratio

Şekil A.1. Moment sensörünün özellikleri



**Medium / High Inertia Servo Motor**

Model: ECMA Series	E313				E318	G313		
	500W	1kW	1.5kW	2kW	2kW	300W	600W	900W
	05	10	15	20	20	03	06	09
Rated output power (kW)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0	0.3	0.6	0.9
Rated torque (N-m)	2.39	4.77	7.16	9.55	9.55	2.86	5.73	8.59
Maximum torque (N-m)	7.16	14.3	21.48	28.65	28.65	8.59	17.19	21.48
Rated speed (rpm)	2000				1000			
Maximum speed (rpm)	3000				2000			
Rated current (A)	2.9	5.6	8.3	11.01	11.22	2.5	4.8	7.5
Maximum current (A)	8.7	16.8	24.9	33.03	33.66	7.5	14.4	22.5
Power rating (kW/s) (without brake)	7	27.1	45.9	62.5	26.3	10.0	39.0	66.0
Rotor moment of inertia (Kg.m <sup>2</sup> ) (without brake)	8.17E-4	8.41E-4	11.18E-4	14.59E-4	34.68E-4	8.17E-4	8.41E-4	11.18E-4
Mechanical time constant (ms) (without brake)	1.91	1.51	1.10	0.96	1.62	1.84	1.40	1.06
Torque constant-KT (N-m/A)	0.83	0.85	0.87	0.87	0.85	1.15	1.19	1.15
Voltage constant-KE (mV/rpm)	30.9	31.9	31.8	31.8	31.4	42.5	43.8	41.6
Armature resistance (Ohm)	0.57	0.47	0.26	0.174	0.119	1.06	0.82	0.43
Armature inductance (mH)	7.39	5.99	4.01	2.76	2.84	14.29	11.12	6.97
Electrical time constant (ms)	12.96	12.88	15.31	15.86	23.87	13.55	13.50	16.06
Insulation class	Class A (UL), Class B (CE)							
Insulation resistance	>100MΩ, DC 500V							
Insulation strength	1500V AC, 60 seconds							
Weight (kg) (without brake)	6.8	7	7.5	7.8	13.5	6.8	7	7.5

Şekil A.2. 1,5kW gücündeki servomotor özellikleri

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **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.
- [2] **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.
- [3] **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.
- [4] **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.
- [5] **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, Kasım 1988, Tokat doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini Tokat'da tamamladı. 2007 yılında kazandığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nden 2011 yılında Mekatronik Mühendisi olarak mezun oldu. 2011 yılında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitime başladı. 2012 yılında MDS Motor Ltd. şirketinde Ar-Ge mühendisi olarak çalışmaya başlamış ve halen devam etmektedir.