

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**1.3 KW GÜCÜNDE DAHİLİ MİKNATISLI BİR SENKRON
MOTORUN ANALİZİ, TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ**

OĞUZHAN OCAK

KOCAELİ 2012

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

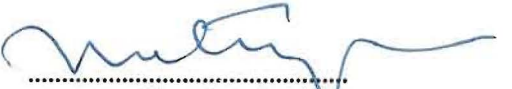


**1.3KW GÜCÜNDE DAHİLİ MIKNATISLI BİR SENKRON
MOTORUN ANALİZİ, TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ**

Oğuzhan OCAK

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

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

Doç.Dr. Timur AYDEMİR
Jüri Üyesi, Gazi Üniv.


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 06.07.2012

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Özellikle nadir toprak elementlerinin bulunması ile dünyada sürekli mıknatıslı servomotorların kullanımı bir hayli artmıştır. Artan bu istek ile birlikte çeşitli uygulamalar için çok farklı tasarımlar yapılmaya başlanmıştır. Uygulamanın ve kullanılacağı alanın türüne göre tasarım aşamasının zorluğu ya da kolaylığı belirlenmektedir.

Bu uygulamada, savunma sanayi gibi kritik yerlerde kullanım amacıyla üretilmiş yüzeyden mıknatıslı bir servomotor referans alınarak, aynı moment seviyelerinde daha yüksek hızlara çıkabilen özel bir dahili mıknatıslı servomotor (DMS) tasarımı gerçekleştirilmiştir. Farklı tasarım yöntemleri uygulanarak, elde edilen en iyi sonuçlar doğrultusunda tasarıma yön verilmiştir. Tasarlanan servomotor sadece tasarım aşamasında bırakılmamış, prototip üretimi gerçekleştirilerek laboratuvar ortamında oluşturulan test düzeneği sayesinde analiz sonuçları doğrulanmıştır.

Tez çalışması süresince her zaman ilgilerini yakından hissettiğim, çalışmama yapmış olduğu katkıları ve fikirleri sayesinde bugünlere gelmemde yol gösterici olan değerli danışmanım Sn. Yrd.Doç.Dr. Metin AYDIN'a teşekkür ederim. Ayrıca vermiş olduğu fikirler ve yönlendirmeler için Sn. Doç.Dr. Cüneyt OYSU' ya, yardımları için araştırma görevlisi Ersin YOLAÇAN' a teşekkür ederim.

Tez çalışması kapsamında kullanılan analiz programı için CEDRAT firmasına, prototip ve test düzeneğinin üretilmesi, geliştirilmesi ve çalışmalarına devam etmem konusunda destek veren MDS Motor Tasarım Ltd., TÜBİTAK, Elsim Elektronik A.Ş., Akım Metal Sanayi ve Ticaret A.Ş., ASELSAN A:Ş.' ye teşekkür ederim.

Tez çalışmamı tamamlayabilmem için desteğini hiç bir zaman eksik etmeyen babam Mubin OCAK, annem Sevgiye OCAK, kardeşim Elif OCAK ve son olarak da eşim Duygu Fatoş OCAK' a sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Haziran - 2012

Oğuzhan OCAK

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.....	3
2. SABİT MIKNATISLI MOTORLAR.....	6
2.1. Giriş.....	6
2.2. Sürekli Mıknatıslı Motorlar.....	6
2.3. YüzeYden Mıknatıslı Motorlar	8
2.4. Dahili Mıknatıslı Motorlar	9
2.4.1. Dahili mıknatıslı motor yapıları.....	10
2.4.2. Dahili mıknatıslı motor denklemleri.....	12
2.5. Sürekli Mıknatıslı Motor Tasarım Süreci.....	15
2.6. Sürekli Mıknatıslı Motorlarda Kullanılan Malzemeler	17
2.6.1. Silisli çelik malzemeleri.....	17
2.6.2. Sürekli mıknatis malzemeleri	20
3. DAHİLİ MIKNATISLI SERVOMOTOR ÖN TASARIMI	23
3.1. Giriş.....	23
3.2. Referans Motor ve Tasarım Kriterleri	23
3.3. Dahili Mıknatıslı Motorda Kullanılan Stator Yapısı.....	24
3.4. İncelenen Dahili Mıknatıslı Motor Rotor Yapıları.....	25
3.5. Detaylı Ön Tasarım	27
3.6. Sonuçlar.....	30
4. DAHİLİ MIKNATISLI MOTOR SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	31
4.1. Giriş.....	31
4.2. YüzeYden Mıknatıslı Referans Motorun Sonlu Elemanlar Analizi	31
4.3. Çubuk Tip Yapı Detaylı Sonlu Elemanlar Analizi.....	35
4.3.1. Çubuk tip standart yapı	36
4.3.2. Çubuk tip değişken hava aralığı uygulanmış yapı	41
4.3.3. Çubuk tip mıknatis uzunluğu optimizasyonu	46
4.3.4. Çubuk tip mıknatis genişliği optimizasyonu	48
4.3.5. Çubuk tip yamuk mıknatıslı yapı.....	50
4.3.6. Çubuk tip diş eklenmiş yapı.....	51
4.3.7. Çubuk tip segmentli yapı	54
4.4. Analizlerin Karşılaştırılması	58
4.5. Sonuçlar.....	61
5. DAHİLİ MIKNATISLI MOTOR YAPISAL ANALİZİ.....	62

5.1. Giriş.....	62
5.2. Yapısal Analiz.....	62
6. DAHİLİ MIKNATISLI MOTOR PROTOTİP ÜRETİMİ VE DENEY DÜZENİĞİNİN KURULMASI.....	66
6.1. Giriş.....	66
6.2. Dahili Mıknatıslı Motor Prototip Üretimi.....	66
6.3. DeneY DüzenİĞi.....	69
6.4. Deneysel Çalışmalar.....	70
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	76
EKLER.....	78
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	82

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yüzeiden mıknatıslı ve dahili mıknatıslı senkron motor örnek yapıları...	4
Şekil 1.2. Elektrik motorlarının sınıflandırılması	5
Şekil 2.1. Farklı sürekli mıknatıslı motor yapıları	7
Şekil 2.2. Yüzeiden mıknatıslı AC motor yapısı	8
Şekil 2.3. Dahili mıknatıslı motor ve rotor yapısı	9
Şekil 2.4. Dahili mıknatıslı motor yapıları.....	11
Şekil 2.5. Dahili mıknatıslı motor yapısı ve temel motor bileşenleri	12
Şekil 2.6. Sürekli mıknatıslı senkron motorun d-q eksen eşdeğer devresi	13
Şekil 2.7. SM motor tasarım aşamaları	16
Şekil 2.8. DM motor tasarımında mekanik analizin gerekliliği	17
Şekil 2.9. Motor sac datalarına örnek.....	18
Şekil 2.10. SMC kullanılarak üretilen stator	20
Şekil 3.1. Tasarlanacak DM motor	24
Şekil 3.2. Tasarlanacak DM motor stator yapısı ve bitmiş gövde resmi.....	25
Şekil 3.3. DM motor yapı örnekleri	26
Şekil 3.4. Çubuk tip DM motor yapısı ve rotora odaklanmış hali	27
Şekil 3.5. Çubuk tip DMM moment-hız ve güç-hız değişimleri.....	28
Şekil 3.6. Çubuk tip DM motor akımı, gerilimi ve çıkış momenti	29
Şekil 3.7. Çubuk tip DMM yüksüz durum sonlu	30
Şekil 4.1. Referans motor SEA modeli	31
Şekil 4.2. Referans motor mesh yapısı.....	32
Şekil 4.3. Referans motor vuru moment momentini değişimi	32
Şekil 4.4. Referans motor zıt EMK değişimi ve FFT analizi.....	33
Şekil 4.5. Referans motor momentinin kontrol açısına.....	34
Şekil 4.6. Referans motoru çıkış momentini değişimi	34
Şekil 4.7. Referans motor moment akım ilişkisi.....	35
Şekil 4.8. Standart yapıya ait SEA modeli ve hava aralığına odaklanmış hali	36
Şekil 4.9. SEA modeli ağ yapısı ve hava aralığına odaklanmış hali.....	36
Şekil 4.10. Yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi ve akı çizgileri	37
Şekil 4.11. Standart çubuk tip yapıya ait vuru moment momentinin.....	38
Şekil 4.12. Standart yapıya ait zıt EMK hat gerilimi dalga şekli ve FFT	39
Şekil 4.13. Sabit akım uygulanması sonucunda elde edilen moment	40
Şekil 4.14. Standart yapıdan elde edilen moment çıkışı	40
Şekil 4.15. Değişken hava aralığı içeren çubuk tipli yapı.....	41
Şekil 4.16. Değişken hava aralığı için tanımlanan g_1	42
Şekil 4.17. Farklı g_2 parametreleri için vuru moment momentini değişimleri.....	42
Şekil 4.18. Farklı g_2 parametreleri için vuru moment momentini.....	43
Şekil 4.19. $g_1=0.5\text{mm}$ ve $g_2=1.5\text{mm}$ durumu için vuru moment momentini değişimi	43
Şekil 4.20. Farklı g_2 parametreleri için zıt EMK şekilleri ve FFT	44
Şekil 4.21. g_2 parametreleri için çıkış moment momentini değişimi	45
Şekil 4.22. Farklı g_2 ' ler için moment dalgalanmalarının yüzdesi.....	46

Şekil 4.23. Farklı mıknatıs uzunluğuna sahip yapılar	46
Şekil 4.24. Mıknatıs uzunluğu l_x ' in geometrik anlamı.....	47
Şekil 4.25. l_x değerleri için zıt EMK değişimi ve FFT analizleri.....	47
Şekil 4.26. Farklı mıknatıs genişliğine sahip yapılar	48
Şekil 4.27. Mıknatıs genişliği l_y 'nin geometrik anlamı.....	49
Şekil 4.28. Farklı l_y değerleri için zıt EMK şekillerinin değişimi.....	49
Şekil 4.29. Yamuk mıknatıslı yapı.....	50
Şekil 4.30. Yamuk mıknatıslı yapının değiştirilen l_a ve l_b	50
Şekil 4.31. Farklı l_a ve l_b parametreleri için zıt EMK değişimi	51
Şekil 4.32. Dış eklenmiş yapı.....	52
Şekil 4.33. Dış uzunluğu d_x in geometrik anlamı.....	52
Şekil 4.34. d_x parametresine göre ortalama momentin değişimi.....	52
Şekil 4.35. d_x ' in 1mm olması durumunda vuru momentinin değişimi	53
Şekil 4.36. d_x ' in 1mm olması durumunda zıt EMK değişimi ve FFT	53
Şekil 4.37. 4 segmentli yapı sonlu elemanlar modeli.....	54
Şekil 4.38. Farklı segment sayıları ve kaykçı açıları için vuru tepe	55
Şekil 4.39. Farklı segment sayıları vuru momentini tepe değerlerinin	56
Şekil 4.40. 4 segmentli yapı için vuru momentinin değişimi.....	56
Şekil 4.41. 4 segmentli yapı için zıt EMK şeklinin değişimi ve	57
Şekil 4.42. 4 segmentli yapı için çıkış momentinin değişimi	58
Şekil 4.43. 4 segmentli yapı için moment-akım grafiği	58
Şekil 4.44. Vuru momentinin karşılaştırılması	59
Şekil 4.45. Zıt EMK' nın karşılaştırılması.....	60
Şekil 4.46. Çıkış momentinin karşılaştırılması	61
Şekil 5.1. 3 boyutlu katı modeli	62
Şekil 5.2. Mekanik sonlu elemanlar modeli ve ağ yapısı.....	63
Şekil 5.3. 3000 rpm hız için rotordaki yer değiştirmeler ve gerilme	64
Şekil 5.4. 10000 rpm hız için rotordaki yer değiştirmeler ve gerilme	65
Şekil 6.1. Prototip üretimi gövde ve statora ait görüntüler	66
Şekil 6.2. Kalıp üretimi	67
Şekil 6.3. Üretimi gerçekleştirilmiş rotor segmenti	68
Şekil 6.4. Rotor adaptörü ve segmentlerin adaptöre yerleştirme aşaması.....	68
Şekil 6.5. Adaptörlerin mile montajının yapılmış hali.....	68
Şekil 6.6. Deney düzeneği.....	69
Şekil 6.7. Vuru momentini ölçüm sonuçları	70
Şekil 6.8. Vuru momentini ölçümü ve SEA' inin karşılaştırılması	71
Şekil 6.9. 400 rpm için zıt EMK dalga şekli	71
Şekil 6.10. Zıt EMK test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması	72
Şekil 6.11. 3 faz zıt EMK dalga şekillerinin değişimi	72
Şekil 6.12. Moment çıkış grafiği ve akımın değişimi	73
Şekil 6.13. Moment akım ilişkisi	74

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Farklı tür motorların karşılaştırılması.....	8
Tablo 2.2. Farklı standartlarda silisli çelik malzemeleri ve eşdeğerleri	18
Tablo 2.3. Avrupa normlarında sık kullanılan motor sac malzemeleri	19
Tablo 2.4. En sık kullanılan sacların demir kayıpları karşılaştırması	19
Tablo 2.5. Farklı sürekli mıknatıs malzemelerinin karşılaştırılması	21
Tablo 2.6. NdFeB tip mıknatısların manyetik özellikleri	22
Tablo 3.1. Elektriksel ve Mekanik Tasarım Kriterleri	24
Tablo 3.2. Çubuk tip DMM'in referans motor dataları ile karşılaştırılması	30

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

d_x	: Çentik uzunluğu, (mm)
g_1	: Hava aralığı 1, (mm)
g_2	: Hava aralığı 2, (mm)
i_d	: d eksen akımı, (A)
i_q	: q eksen akımı, (A)
J	: Atalet momenti, (kg m ²)
L	: Endüktans, (H)
l_a	: Trepezoidal mıknatıs üst kenar uzunluğu, (mm)
l_b	: Trepezoidal mıknatıs alt kenar uzunluğu, (mm)
L_d	: d eksen endüktans, (H)
L_q	: q eksen endüktans, (H)
l_x	: Mıknatıs uzunluğu, (mm)
l_y	: Mıknatıs genişliği, (mm)
p	: Kutup çifti sayısı
R	: Direnç, (Ω)
T_e	: Elektriksel moment, (Nm)
T_L	: Yük momenti, (Nm)
v_d	: d eksen gerilimi, (V)
v_q	: q eksen gerilimi, (V)
θ_e	: Elektriksel konum, (rad)
θ_r	: Mekanik konum, (rad)
Ψ_d	: d eksen manyetik akı, (Wb)
Ψ_q	: q eksen manyetik akı, (Wb)
Ψ_m	: Mıknatıs manyetik akısı, (Wb)
ω_e	: Elektriksel hız, (rad/s)
ω_r	: Mekanik hız, (rad/s)

Kısaltmalar

AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
BLDC	: Brushless Direct Current (Fırçasız Doğru Akım)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DM	: Dahili Mıknatıslı
DMSM	: Dahili Mıknatıslı Senkron Motor
EMK	: Elektro Motor Kuvveti
FFT	: Fast Fourier Transformation (Hızlı Fourier Dönüşümü)
IPM	: Interior Permanent Magnet Motor (Dahili Mıknatıslı Motor)
RPM	: Revolute Per Minute (Dakikadaki Dönüş Sayısı)
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi

SMC : Soft Magnetic Material (Yumuşak Manyetik Malzeme)
SMSM : Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
YMSM : Yüzeyden Mıknatıslı Senkron Motor

1.3 KW GÜCÜNDE DAHİLİ MİKNATISLI BİR SENKRON MOTORUN ANALİZİ, TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, kritik uygulamalar için tasarlanmış yüzeyden mıknatıslı bir servomotor referans olarak alınmış ve benzer moment seviyelerinde, daha yüksek moment yoğunluğuna sahip, yüksek hızlara çıkabilen dahili mıknatıslı özel bir servomotor tasarımı yapılmıştır. Referans motora ait stator yapısında hiçbir değişiklik yapılmamış, sadece rotor yapısında değişiklikler gerçekleştirilmiştir. Bir çok farklı türde dahili mıknatıslı motor topolojisi kullanılarak her birine ait analiz sonuçları elde edilmiş ve kriterler açısından en iyi sonucu veren topolojiye ait prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Prototip üretimi gerçekleştirilen servomotor laboratuvar ortamında oluşturulan deney düzeneği kullanılarak test edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilmiş olan vuru moment, zıt EMK ve çıkış momenti gibi veriler üretilen prototip için deney düzeneğinde test edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Son olarak doğrulanan prototip referans motor ile karşılaştırılarak avantaj ve dezavantajları gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dahili Mıknatıslı Motor, Motor Test Düzeneği, Sürekli Mıknatıslı Motor, Sürekli Mıknatıslı Motor Tasarımı.

ANALYSIS, DESIGN AND MANUFACTURING OF A 1.3 KW INTERIOR PERMANENT MAGNET MOTOR

ABSTRACT

In this study, designed motor for critical applications was taken as a reference and redesigned at same power ratio as a interior permanent magnet motor. There is not any changes at stator of the reference motor. The only difference between reference motor and new design is rotor structure. So that comparison between two different designs will be fair. Analysis for different IPM motor types are realized and motor type which provide best results is prototyped. Different tests are applied for prototyped motor using the test setup at laboratory. Cogging torque, back EMF and torque output are tested by using test setup and results are compared with simulation results. Finally prototyped motor compared with reference motor and advantages and disadvantages are summerized.

Keywords: Interior Permanent Magnet Motor, Motor Test Setup, Permanent Magnet Motor, Design of Permanent Magnet Motor.

GİRİŞ

Günümüzde elektrik motorları birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Neredeyse her endüstriyel uygulamada en az birkaç çeşit elektrik motoru ya da generatörü kullanılmaktadır. Dünya çapında çeşitli uygulamalarda kullanılan milyarlarca elektrik motoru bulunmaktadır. Bunların önemli bir çoğunluğu küçük güçlü motorlardır ve ev aletlerinde kullanılmaktadır. Yine de bu motorlar elektrik motorlarının toplam kullandıkları elektriğin sadece %5' ini kullanmaktadırlar. Elektrik tüketimleri fazla olan 3 fazlı motorlar daha büyük uygulamalarda kullanılırlar. Bu elektrik motorları uzun saatler boyunca çalışırlar ve toplam elektrik tüketiminin yarısından fazlasını kaplarlar [1-3].

Bu çalışmanın amacı, üç fazlı yüzeyden mıknatıslı bir motoru referans alarak, benzer güç seviyelerinde dahili mıknatıslı bir motor tasarımı gerçekleştirmektir. Referans motorun statorunda bir değişiklik yapmadan sadece rotor yapısı değiştirilerek dahili mıknatıslı motor tasarımına yön verilecektir. Burada amaç, dahili mıknatıslı motorların yapısından kaynaklanan avantajları bünyesinde barındıran bir motor tasarımı elde etmek ve bu tasarımın prototip üretimi gerçekleştirilerek sonuçlarının örtüşüğünü göstermektir [3].

Bu tez kapsamında, yüzeyden mıknatıslı servo motora ait analizler yapılmış ve ardından farklı dahili mıknatıslı motor yapılarına ait ön tasarım gerçekleştirilmiştir. Elde edilen en iyi sonuç için detaylı sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve motor performansının daha iyi olabilmesi için farklı tasarım teknikleri uygulanmıştır. Elde edilen en iyi tasarım için mekanik tasarım yapılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Nihai tasarım için prototip üretime geçilmiş ve elde edilen prototip için testler yapılmıştır. Test sonuçları ile simülasyon sonuçlarının uygunluğu kontrol edilmiştir. Yapılmış olan çalışmalar 7 ana başlık altında toplanmıştır. Bu ana başlıklar altında yapılan çalışmalar aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

Bölüm 1' de elektrik motorları ile ilgili genel bilgilendirme yapılarak elektrik motorlarının sınıflandırılması verilmiştir. Farklı tür motorların avantaj ve

dezavantajları genel hatları ile belirtilerek sürekli mıknatıslı motorların elektrik motorları içerisindeki yeri vurgulanmaya çalışılmıştır. Ayrıca literatür araştırması sonucunda elde edilen bazı bilgiler bu kısımda özetlenmiştir.

Bölüm 2' de sürekli mıknatıslı motorlarla ilgili bilgiler verilmiştir. Motor yapıları, denklemleri, tasarım süreci ve motorlarda kullanılan malzemeler konusunda bilgilendirme yapılmıştır.

Bölüm 3' de ise tasarım hedefi olan referans motoruna ait teknik detaylar verilmiş ve bu kriterler doğrultusunda ön tasarım gerçekleştirilmiştir. Bir çok farklı dahili mıknatıslı yapı burada incelenmiş ve aralarında en iyi sonucu veren yapı elde edilmeye çalışılmıştır.

Bölüm 4' de ön tasarım sonucunda en iyi sonucu veren yapı için detaylı sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha iyi sonuçlar elde edebilmek için farklı tasarım teknikleri uygulanmıştır. Uygulanan tasarım teknikleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış prototip üretimi için en iyi sonucu veren yapıya karar verilmiştir.

Bölüm 5' de motora ait yapısal tasarım ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Prototip üretimi öncesi rotor yapısının nasıl üretileceğine karar verilmiş ve motorun çalışması esnasında problem yaratmaması için yapılması gereken analizler sırası ile yapılmıştır. Ayrıca motor termal olarak bu kısımda incelenmiş ve motorun çalışma şartlarında termal olarak bir problem çıkarıp çıkarmayacağı bu kısımda incelenmiştir.

Bölüm 6' da prototip üretimi ile ilgili bilgiler verilmiştir. Ayrıca üretilen prototipe ait testlerin yapılacağı deney düzeneği bu kısımda detaylı olarak tanıtılmış ve yapılacak olan testlere ait bilgiler verilmiştir. Test sonucunda elde edilen sonuçlar burada verilerek simülasyon sonuçları ile karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçların uyumluluğu bu kısımda incelenmiştir.

Bölüm 7' de elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve çalışmalara ait genel bir değerlendirme yapılmıştır. Bu çalışmanın devamı niteliğinde sayılabilecek çalışmalarla ilgili düşüncelere bu kısımda yer verilmiştir.

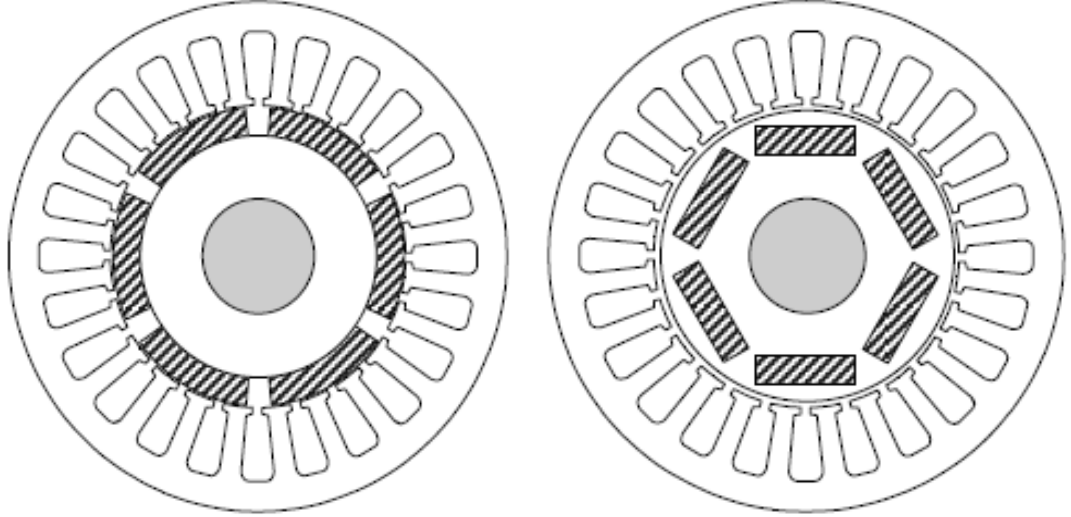
1. GENEL BİLGİLER

Elektrik motorlarının en eski tipi olan alan etkili DC motorlar, yıllar boyunca basit hız kontrolü yapılabilmesi sayesinde yaygın olarak kullanılmıştır. Her ne kadar bu motorların uygulama alanlarının çoğunu ayarlanabilir AC sürücüler almış olsa da bazı küçük ve yüksek verim gerektiren uygulamalarda hala kullanılmaktadırlar. DC motorların kullanım alanlarının azalmasına neden olan en başlıca problemler evirici gerektirmesi ve bakım maliyetlerinin olması olarak gösterilebilir. Diğer önemli bir faktör ise AC motorlara göre aynı güç seviyesinde daha fazla alan kaplaması olduğu söylenebilir. Asenkron motorlar AC motorlar arasında en çok kullanılan motorlar arasındadır. Güvenilir olmaları ve fırça ile yüzük bakım maliyetleri içermemeleri en belirgin avantajları arasında gösterilebilir. Ayrıca tek fazlı olarak da çalışabilmeleri farklı bir artıları olarak gösterilebilir. Diğer taraftan rotorlarında sargıların bulunması verimlerinin düşük olmasına neden olduğu gibi termal olarak da problemlerin baş göstermesine neden olur. Rotor sargılarından kaynaklanan sıcaklık nedeniyle motor parametrelerinin değişmesi de ayrıca bir geri bildirim olarak verilebilir [1-5].

Birçok relüktans motoru endüstride ve robotik uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Yapısı basit ve kararlı olan stator ve rotor sayesinde maliyetlerin oldukça aşağı çekilebiliyor olması önemli bir avantajı olarak gösterilebilir. Ayrıca evirici gereksinimleri de DC motorlar kadar gibi çok ciddi değildir. Basit bir yarım dalga doğrultucu motoru sürmek için kullanılabilir. Diğer taraftan relüktansın değişiyor olması çok ciddi bir moment dalgalanmasına ve dolayısıyla beraberinde de titreşim ile gürültüye neden olmaktadır [1].

Senkron motorların DC motorlara ve asenkron motorlara göre farklı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Alan sargılı senkron motorlar DC ve asenkron motorlara göre çok daha verimli olabilirler ve yüksek yüklerin olduğu elektrik üretimi gibi uygulamalarda tercih edilirler. Eğer senkron motorların rotorlarında yer alan alan sargısı mıknatıslar ile değiştirilirse özel bir tür elde edilmiş olur. Bu tür sürekli mıknatıslı senkron motor olarak isimlendirilir ve hem sinüzoidal hem de trepezoidal akım ile sürülebilirler. Bu motorlar rotor yapılarına göre yüzeyden

mıknatıslı ve dahili mıknatıslı olmak üzere 2 temel şekilde sınıflandırılırlar (Şekil 1.1). Burada en temel dahili mıknatıslı yapı gösterilmiş olsa da bu motorların çok sayıda alternatifi makalelerde ve patentlerde mevcuttur.

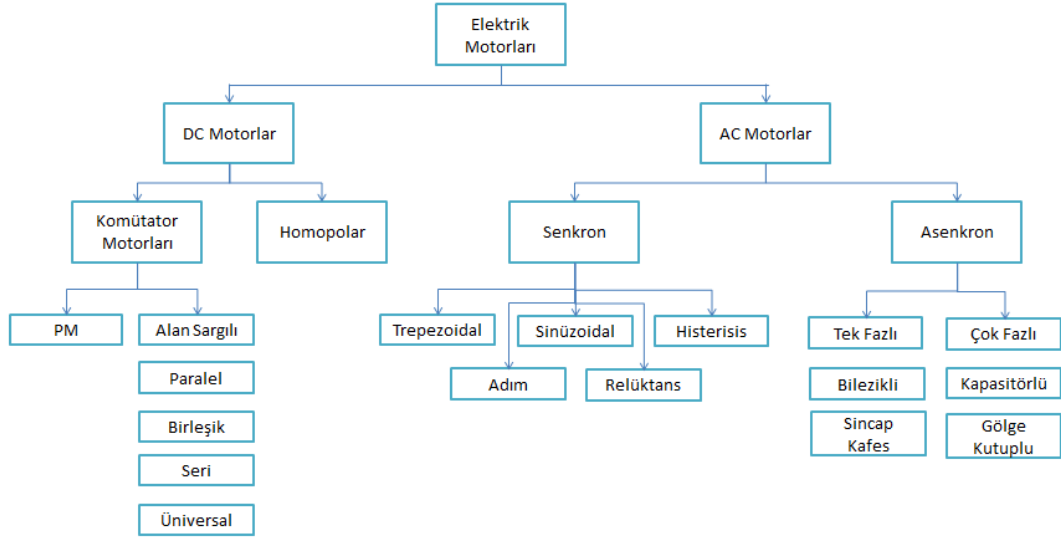


Şekil 1.1. Yüzeysel mıknatıslı ve dahili mıknatıslı senkron motor örnek yapıları

Rotor sargılarının ve kaymanın olmamasının yanı sıra yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim ve küçük boyut gibi özellikler bu tür motorları endüstride farklı servo uygulamaları için avantajlı kılmaktadır. Bunlara ek olarak sürekli mıknatıslı motorlar diğer motorlara göre daha iyi moment-hız eğrisine sahiptirler ve daha iyi dinamik cevap verirler. Uzun çalışma ömrüne sahip olmaları, sessiz çalışmaları, ve yüksek çalışma hız aralıkları diğer avantajları arasında gösterilebilir [1-3].

Elektrik motorlarının sınıflandırılması için farklı yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemlere örnek olarak besleme türüne göre, rotor yapısına göre ve stator yapısına göre olan yöntemler verilebilir. En yaygın olan yöntemlerden birisi Şekil 1.2' den görüldüğü üzere elektrik motorlarını AC ve DC olarak ikiye ayırmak şeklindedir. AC motorlar kaynak olarak alternatif akımı ya da gerilimi kullanırlarken, DC motorlar DC gerilim kaynağını sargıları beslemek için kullanırlar. DC motorlar alan bağlantılarına göre seri, paralel ve bileşik uyartım gibi türlere ayrılırlar. Diğer taraftan AC motorlar 2 temel türe sahiptirler. Bunlar elektrik alanın dönüşü ile mekanik alanın dönüşünün bire bir gerçekleştiği senkron motorlar ve elektrik alanı dönüşü ile mekanik dönüş arasında fark bulunan asenkron motorlardır. Asenkron

motorlar tek ve çok fazlı, sincap kafes ve bilezikli olabilirler. Senkron motorlar ise rotor yapısına ve besleme şekline göre birçok şekilde isimlendirilebilirler.



Şekil 1.2. Elektrik motorlarının sınıflandırılması

2. SABİT MIKNATISLI MOTORLAR

2.1. Giriş

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

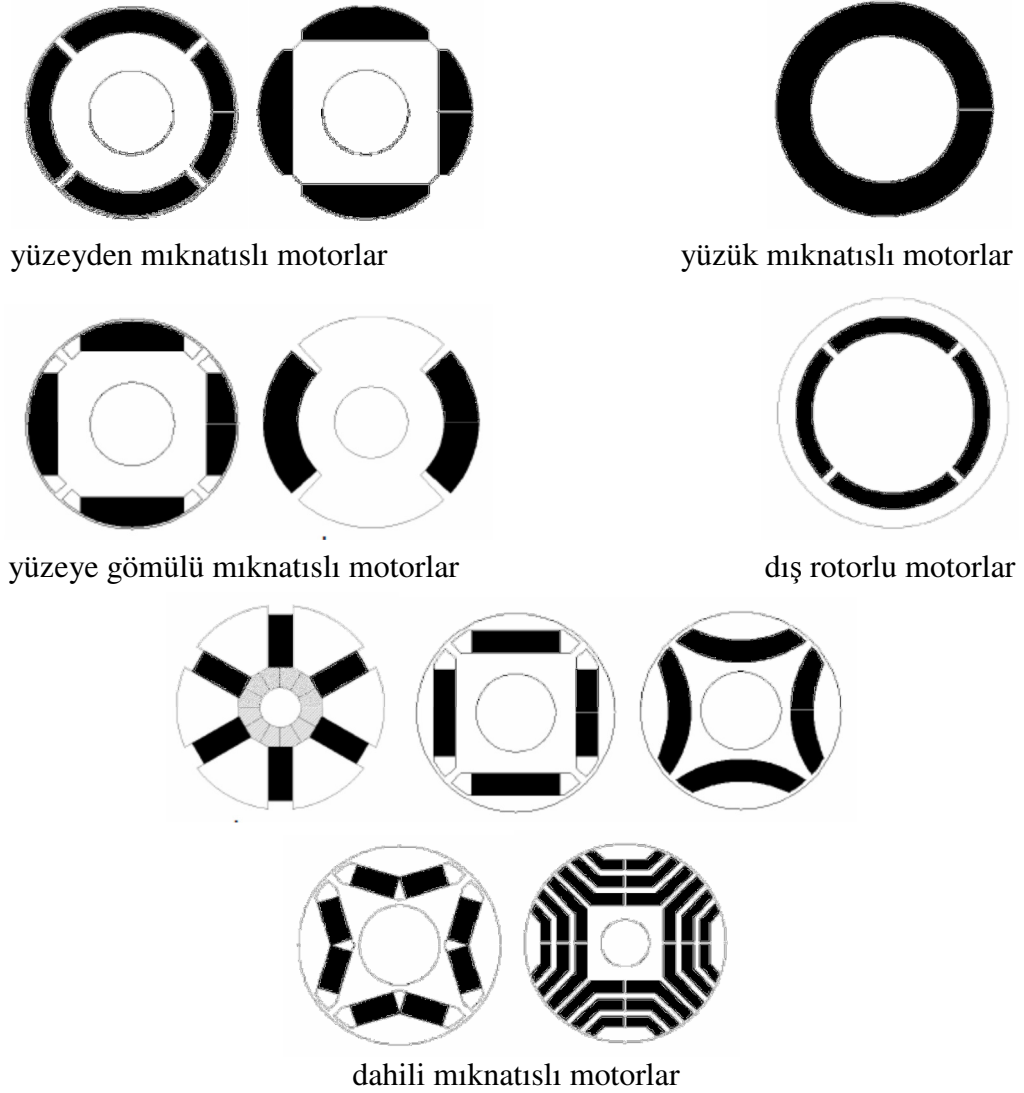
2.2. Sürekli Mıknatıslı Motorlar

Senkron motorların rotorlarında yer alan dc uyarımın mıknatıs kullanılarak yapıldığı motor türleri sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM) olarak isimlendirilmektedir. Sürekli mıknatıslı motor kavramı yaklaşık 90 yıl önce 1920'li yıllara dayanmaktadır. Birçok mühendis ve üniversite bu motorlarla ilgili çalışmalar gerçekleştirmiş fakat malzeme alanındaki problemler, güç elektroniği teknolojisinin yeterince gelişmemiş olması ve motor kontrol tekniklerinin yetersizliği nedeniyle radikal bir ilerleme kaydedilememiştir. Özellikle 1970'li yıllarda birim hacimdeki güçleri oldukça fazla olan nadir toprak (rare earth) türü mıknatısların bulunması ile mıknatıs üretim teknolojisi gelişmiş ve bu tür motorların ve generatörlerin kullanımı hızlı bir şekilde artmaya başlamıştır. Özellikle 1980'li yılların başında Genel Elektrik (GE) Laboratuvarlarında yüksek enerjili NdFeB tür mıknatısların keşfedilmesi ve yarı iletken malzemelerin geliştirilmesi ile güç elektroniği alanındaki hızlı ilerleme SMSM' ların bir çok uygulamaya girmesini sağlamış ve asenkron motor ile klasik DC motorların yerini almaya başlamışlardır [1-3].

Sürekli mıknatıslı senkron motor tiplerine bakıldığında bir çok farklı tip motor olduğu görülmektedir (Şekil 2.1). Bu motorlar temel iki farklı türe ayrılabilir. Bunlar yüzeyden mıknatıslı motorlar ve dahili mıknatıslı motorlardır. Sürekli mıknatıslı motorun karakteristiğini belirleyen unsur motorun rotor yapısıdır. Yüksek hız

gerektiren uygulamalarda yüzük ya da yüzeye yapıştırılmış mıknatıslı yapılar tercih edilirken, geniş bir sürekli güç bölgesine ihtiyaç duyulan uygulamalarda ise mıknatısları rotorun içerisine gömülü olan dahili mıknatıslı motorlar tercih edilir.

Yüzeyden mıknatıslı motor ile dahili mıknatıslı motora ait temel bir karşılaştırma Tablo 2.1’ de yapılmıştır [1-3]. Tablodan görüldüğü üzere dahili mıknatıslı motorların yüzeyden mıknatıslı motorlara göre en belirgin avantajı yüksek hızlara çıkabiliyor olmasıdır. Fakat diğer taraftan rotor karmaşıklığını da beraberinde getirmektedir. Bu karmaşıklık da özellikle üretilebilirlik açısından bir problem olarak tasarımcının karşısına çıkmaktadır.



Şekil 2.1. Farklı sürekli mıknatıslı motor yapıları

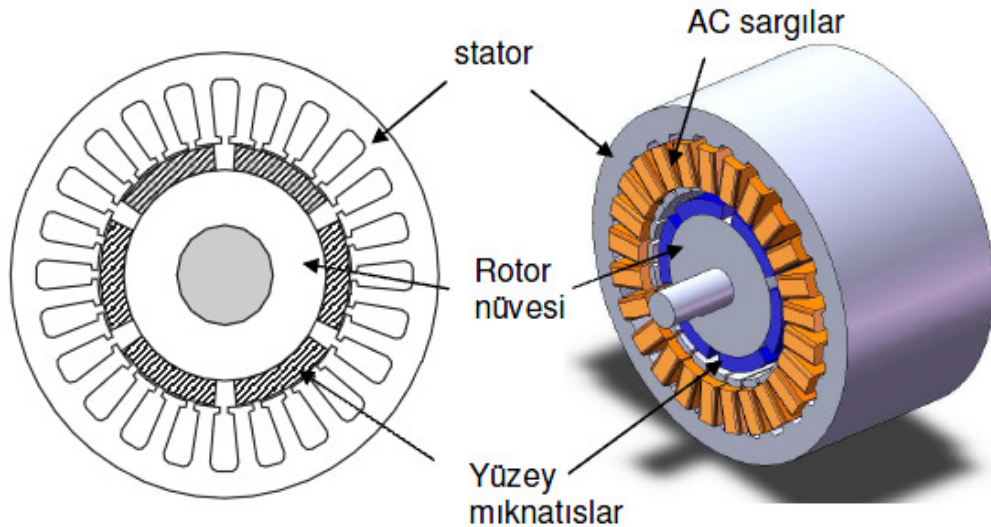
Tablo 2.1. Farklı tür motorların karşılaştırılması

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

2.3. Yüzeyden Mıknatıslı Motorlar

Günümüzde mıknatıslı senkron motorlar ailesinde en sık kullanılan motorlar yüzeyden mıknatıslı senkron motorlardır (YMSM). Yüksek enerjili NdFeB mıknatısların bu tip motorlarda kullanılmasıyla endüstriyel ve servo uygulamalarda sıkça kullanılmaya başlamıştır [4-9].

Yüzeyden mıknatıslı senkron motorlara ait genel görünüm Şekil 2.2’te verilmiştir. Bu tip motorlarda mıknatıslar rotor yüzeyine yapıştırılmıştır. Ayrıca yüzeyden mıknatıslı motorlarda L_d ve L_q endüktansları birbirlerine eşit olduğundan relüktans momenti de oluşmaz.



Şekil 2.2. Yüzeyden mıknatıslı AC motor yapısı [5]

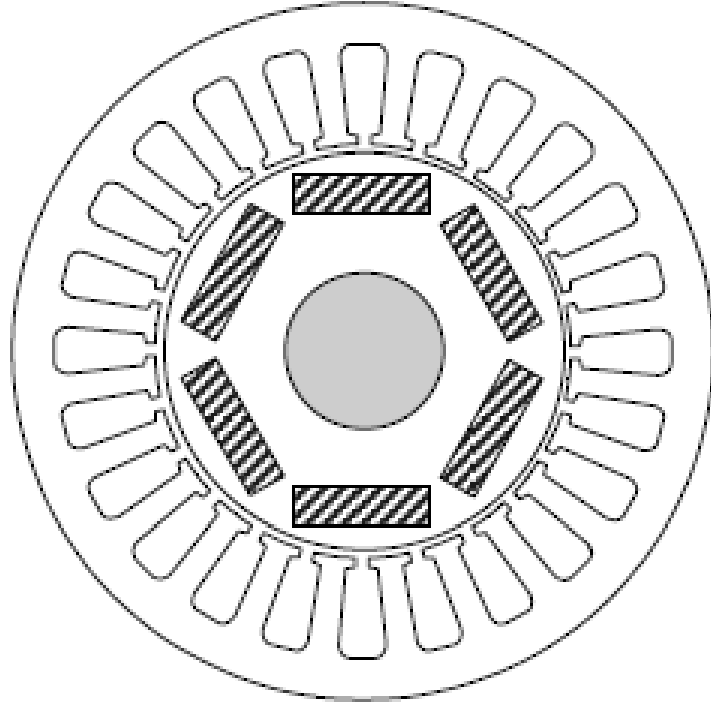
Yüzeyden mıknatıslı senkron motorların DC ve asenkron motorlara oranla daha küçük boyutlara ve yüksek moment yoğunluğuna sahip olmaları, üretim açısından

düşük maliyetli olmaları en belirgin avantajları arasında gösterilebilir. Ayrıca farklı tip sürekli mıknatıslı motorlara oranla daha yaygın bir üretime sahiptir. YMSM'ler kullanım alanı itibari ile yüksek güç yoğunluğu gerektiren nispeten düşük hızlı uygulamalarda tercih edilmektedirler [2,3,6,10].

2.4. Dahili Mıknatıslı Motorlar

Dahili mıknatıslı motorlarda kullanılan mıknatıslar rotor yapısının içerisine gömülmüştür. Örnek bir dahili mıknatıslı motor

Şekil 2.3' de gösterilmiştir. Dahili mıknatıslı motorlar getirdiği farklı avantajlar nedeniyle endüstriyel ve özel uygulamalarda ilgi uyandırmış ve kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Bu tip motorların kullanımının yaygınlaşmasında özellikle güç elektroniği ve kontrol alanındaki gelişmeler etkili olmuştur. Bu gelişmeler sayesinde özellikle kontrolün daha zor olduğu bu tip motorların kullanılabilirliği artmıştır [1,3].



Şekil 2.3. Dahili mıknatıslı motor ve rotor yapısı [5]

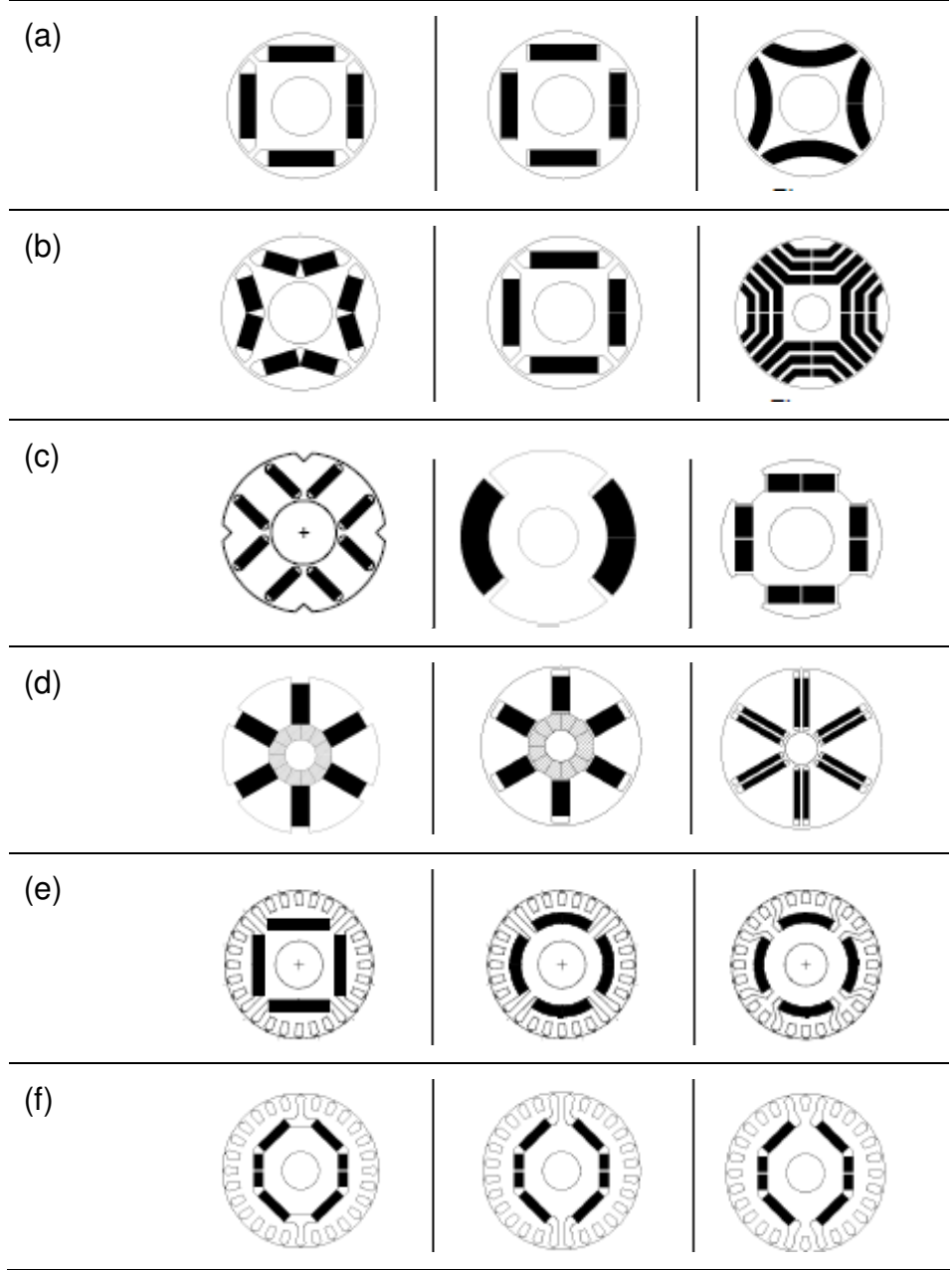
Dahili mıknatıslı motorların bir çok karakteristik avantajları mevcuttur. Boyut olarak fırçalı DC motorlara ve AC asenkron motorlara göre çok daha küçük olmaları, moment hacim oranlarının diğer motorlara göre yüksek olması, sistem maliyetlerinin

az olması, mıknatısların rotor yapısının içine gömülü olmalarının sağladığı mekanik avantaj, paslanmaya karşı dayanım ve düşük vuruş momenti bileşeni, düşük ses ve titreşim seviyesi, düşük demagnetizasyon dayanımı, kısa devre akımı seviyesinin az olması ve yüksek hızlara çıkabilme özelliği bu motorların en temel avantajları arasındadır. Bu avantajların yanı sıra dahili mıknatıslı motorların dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajlar arasında rotor üretiminin daha karmaşık olması ve beraberinde getirdiği üretim maliyeti, daha kontrol sisteminin daha karmaşık yapıda oluşu ve sürekli olarak d-eksen akım bileşeninin mevcut olması sayılabilir [8,12-14].

2.4.1. Dahili mıknatıslı motor yapıları

Dahili mıknatıslı motorlarda yüzeysel mıknatıslı motorlar mevcut olmayan relüktans momenti ve standart motorlarda mevcut mıknatıs kaynaklı moment bileşenleri mevcuttur. Bu motorların stator yapıları standart AC motor statoru ile benzer olduğu için rotor yapılarına göre sınıflandırma yolunu gidilir. Farklı dahili mıknatıslı motor yapıları Şekil 2.4' de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi en sık rastlanan DMM yapıları klasik tek ve çok katmanlı DMM (a-b-c), demir kutuplu DMM (c), çıkık kutuplu DMM (c), çubuk tip DMM (d) ve hat beslemeli DMM (sincap kafesli DMM olarak da adlandırılır) (e) yapılarıdır. Bu farklı yapılar incelendiğinde her birinin farklı avantaj ve dezavantajları olduğu görülmektedir. Örneğin tek ve çok katmanlı DMM yapıları üretim avantajı ve ortaya koyduğu geniş sürekli güç bölgesi nedeniyle literatürde ve uygulamalarda sıkça görülmektedir.

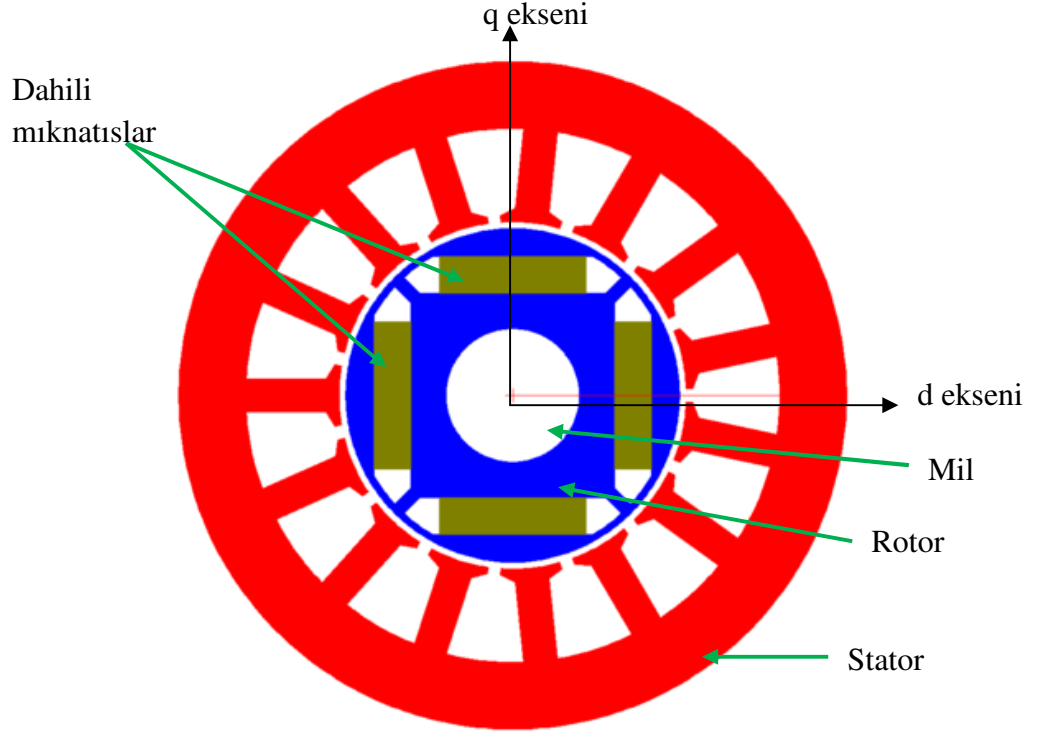
Diğer taraftan çubuk tip DMM yapıları ise servo ve generatör uygulamalarında üretim kolaylığı nedeniyle kullanılmaktadırlar. Hat beslemeli DMM yapıları ise şebekeden rahatça beslenebilmesi ve klasik sincap kafesli asenkron motorlara göre verim artışı nedeniyle özellikle de asenkron motorun kullanıldığı alanlarda tercih edilmektedir. Ancak üretimin karmaşık yapıdan dolayı zor oluşu ve maliyetin asenkron motorlara göre fazla olması problemi hala mevcuttur [1,3].



Şekil 2.4. Dahili mıknatıslı motor yapıları

En temel dahili mıknatıslı motor yapısı ve motoru oluşturan bileşenler Şekil 2.5'de gösterilmiştir. Stator yapısı manyetik nüve ve AC sargılardan oluşmaktadır. Statorun yapısal olarak AC asenkron motorlardan bir farkı yoktur. Rotor ise rotor nüvesi, rotor içine gömülen mıknatıslar ve milden oluşmaktadır. Dahili mıknatıslı yapılarda mıknatıs ve hava aralığı arasındaki küçük köprüler motor tasarımında en kritik mekanik parametredir ve özellikle tasarım aşamasında mekanik analizler dikkatle yapılmalıdır. Dahili mıknatıslı motorlarda d ve q eksenlerin belirlenmesi diğer motorlara kısmen farklıdır. N veya S kutbunun oluşturduğu akı motorun d eksenini

oluştururken, bu eksenin elektriksel olarak 90 derece ilerisi ise q-eksenini oluşturmaktadır. Farklı bir ifadeyle, dahili mıknatıslı motorlarda relüktansın maksimum olduğu eksen d eksen, minimum olduğu eksen ise q eksen olarak tanımlanır [11-14].



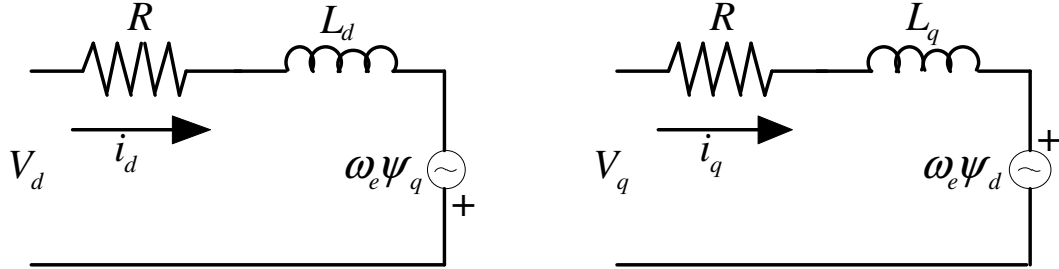
Şekil 2.5. Dahili mıknatıslı motor yapısı ve temel motor bileşenleri [11]

2.4.2. Dahili mıknatıslı motor denklemleri

Sürekli mıknatıslı senkron motorun d-q eksen matematiksel modeli Şekil 2.6'da verilmiştir. SMSM motorun d-q eksen modelinin geleneksel serbest uyartımlı bir DC motora benzediği aşikârdır. Bu modelin çıkarılabilmesi için bazı kabuller yapılmıştır. Yapılan bu kabuller;

- Doyma ve dış etkilerinin ihmal edilmesi,
- Histeresis ve fuko kayıplarının ihmal edilmesi,
- Deri olayının ihmal edilmesi.
- Direnç ve endüktans değerlerinin sıcaklık ve frekanstan bağımsız olduğu,
- Rotorun silindirik yapıda olduğu ve mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirildiği,

- Sürekli mıknatısların oluşturduğu toplam manyetik akının değerinin sürekli ve sıcaklıktan bağımsız olduğu, şeklindedir.



Şekil 2.6. Sürekli mıknatıslı senkron motorun d-q eksen eşdeğer devresi [22]

Şekil 2.6'ten SMSM motorun d-q modeli aşağıdaki eşitliklerle açıklanabilir.

$$v_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e \psi_q \quad (2.1)$$

$$v_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_e \psi_d \quad (2.2)$$

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

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_m \quad (2.4)$$

Burada d-q eksenler için v_d ve v_q gerilimleri, R stator sargı direncini, i_d ve i_q akımları, L_d ve L_q endüktansları, ψ_d , ψ_q manyetik akıları, ψ_m mıknatıs akısını ve ω_e elektriksel açısal hızı ifade etmektedir.

Denklem (2.3) ve (2.4) sırasıyla Denklem (2.1) ve (2.2) de yerlerine yazıldığında d-q eksenler için gerilim ifadeleri Denklem (2.5-2.6) şeklini alır. Ayrıca d-q eksen gerilimleri matris formda Denklem (2.7) deki gibi yazılabilir [22].

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

$$v_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_m \quad (2.6)$$

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

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

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

Yukarıdaki denkleme yük momentini T_L eklendiğinde SMSM için hareket denklemini Denklem (2.9) da verildiği gibi olmaktadır.

$$T_e - T_y = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (2.9)$$

SMSM'lerde ve genel olarak elektrik motorlarında mekanik hız ile konum arasındaki ilişki Denklem (2.10) da verilmiştir. Ayrıca motorun elektriksel hız ve konum bilgileri sırasıyla Denklem (2.11) ve (2.12) de verilmiştir.

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2.10)$$

$$\omega_e = \omega_r p \quad (2.11)$$

$$\theta_e = \theta_r p \quad (2.12)$$

Burada T_L yük momentini, J atalet momentini, ω_r mekanik açısal hızı, B sürtünme katsayısını, ω_e elektriksel açısal hızı, p kutup çifti sayısını, θ_e ve θ_r ise sırasıyla elektriksel ve mekanik olarak rotor konumunu ifade etmektedir.

SMSM'ler için faz ve d-q eksen genel modelleri verilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, dahili mıknatıslı senkron motorlar ve yüzeyden mıknatıslı senkron motorların d-q eksen endüktansları arasındaki farklılıktır. Yüzeyden mıknatıslı

senkron motorlarda $L_d = L_q$ eşitliği geçerlidir. Dahili mıknatıslı motorlarda ise relüktans farkından dolayı $L_d \neq L_q$ olmaktadır [15].

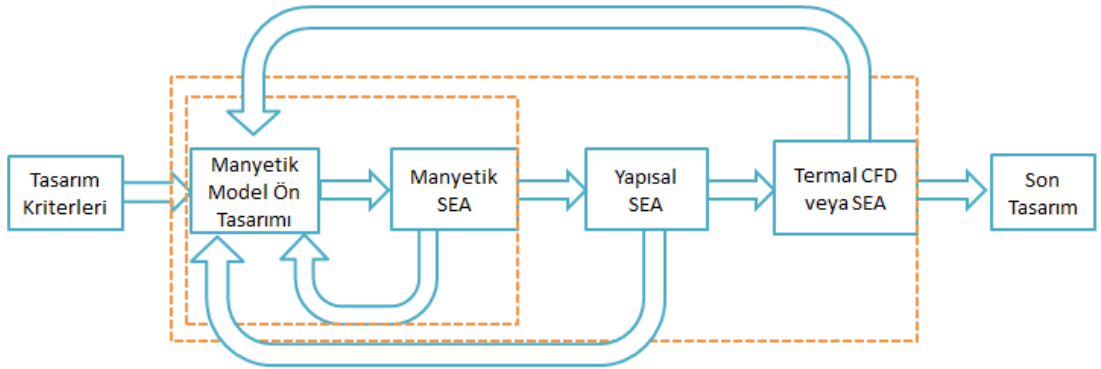
2.5. Sürekli Mıknatıslı Motor Tasarım Süreci

DM motor tasarımı diğer türden elektrik motorlarının tasarımlarında olduğu gibi manyetik devre modellenmesi ile başlar. Tasarım kriterleri doğrultusunda manyetik devre ve akı kaynakları (mıknatıs ve akım kaynakları dahil) modellenerek oluk sayısı, kutup sayısı, temel boyutlar gibi parametreler elde edilmek suretiyle motor ön tasarımı gerçekleştirilir. Bu aşamada tasarım kriterlerine göre motor gücü, moment, moment yoğunluğu, verim, maliyet gibi farklı herhangi bir parametre ya da parametrelere odaklanılarak optimizasyon çalışması yapılabilir. Bu optimizasyon çalışması gelişmiş optimizasyon teknikleri ile yapılabileceği gibi belirli kriterlerin parametrik analizi yapılarak da gerçekleştirilebilir. Çalışmada kullanılan optimizasyon tekniği sonucunda elde edilen tasarım ile tasarım kriterleri karşılaştırılarak çok boyutlu uzaydaki tasarımlardan amaçlanan tasarım elde edilmeye çalışılır [1-8].

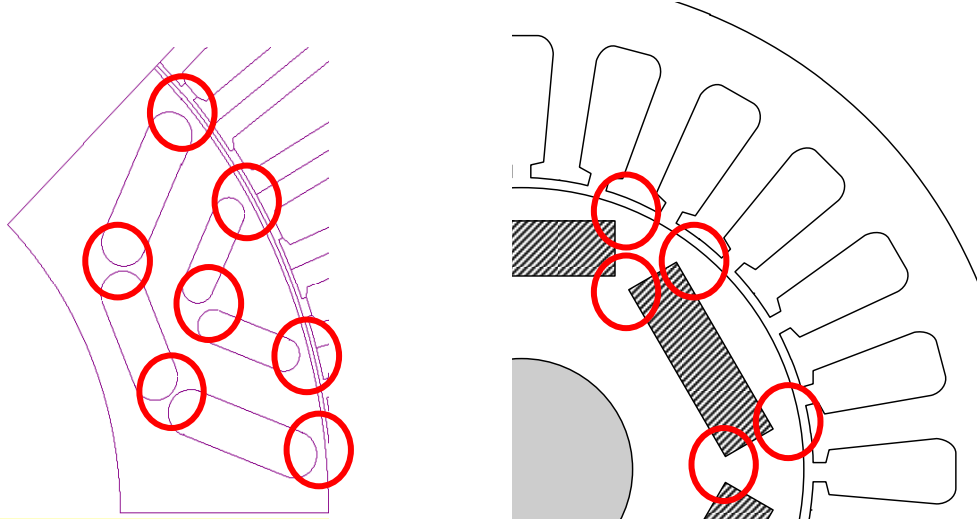
Asenkron ve DC motor tasarımlarında bu tip bir çalışmaya kritik uygulamalar hariç ihtiyaç duyulmaz. Ancak DM motorlarının manyetik devrede yüksek doyum bölgeleri içermesi, tasarım kodlarının oluşturma zorluğu, piyasada mevcut yazılımların DM motor tasarımı modüllerinin olgunlaşmamış olması bu tip motorların tasarımını güçleştiren etkenlerdir [2-6,17-18].

Genelde DM motor tasarımı standart sürekli mıknatıslı motor tasarımlarından daha güçtür. Bunun temel sebebi ise DM motorlarda mıknatıs ve relüktans momenti olarak adlandırılan iki farklı moment kaynağının mevcut olması ve bu moment kaynaklarının yüksek performansa sahip, yüksek moment yoğunluklu bir motor elde etmek için uygun bir şekilde düzenlenmesi ihtiyacıdır. Buna ek olarak manyetik devredeki doyum bu motorlarda önemli bir tasarım parametresidir. Maksimum çalışma koşulunda manyetik devredeki doyum, tasarım ve analizi zorlaştıran bir başka nedendir. Ayrıca rotor yapısında mıknatıslar arasındaki köprüler hem yapısal hem de manyetik açıdan tasarım sürecinde dikkatle incelenmeli ve herhangi bir problemle karşılaşılacağından emin olunmalıdır.

DM motor tasarım evrelerinin yer aldığı detaylı şema Şekil 2.7’ de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere tasarım kriterleri kullanılarak manyetik devre modellenir ve yapılan optimizasyon çalışması sonucunda bir ön tasarım elde edilir. Ön tasarıma ait Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ile performans kontrolü yapıldıktan sonra elektromanyetik tasarım elde edilir. SEA aşamasını geçemeyen bir tasarım eksikliklerinin giderilmesi için tekrar manyetik devre modelleme ve ön tasarım aşamasına geri dönmelidir. Elektromanyetik tasarım aşamasını geçen bir DM motor tasarımı yapısal tasarım ve analize tabi tutulur. Bilindiği üzere DM motorların yapısal bütünlüğü mıknatısların rotor içine gömülü olması nedeniyle çok kritik bir çalışmadır. Yapısal analiz aşamasını geçen bir tasarımın uygulamaya bağlı olarak termal SEA veya CFD gibi yazılımlar kullanılarak ısı analiz yapılr. Bu testi geçemeyen tasarımların elektromanyetik tasarımı tekrarlanarak iyileştirmeler yapılır. Birbirini izleyen bu tasarım süreci tüm aşamaları ile tamamlandıktan sonra “DM motor tasarımı” elde edilmiş olur. Şekil 2.8’de DM motorlarda yapısal analizin ne kadar kritik olduğu gerçeği görülmektedir. Mıknatısları ve mıknatısların hava aralığına bakan kısımlarındaki nüveyi tutan yerlerin ince olması tasarımın elektromanyetik olarak zorluğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle elektromanyetik tasarım ve mekanik tasarım aşamalarının birlikte yürütülmesi kaçınılmazdır [3-7,17-18].



Şekil 2.7. SM motor tasarım aşamaları

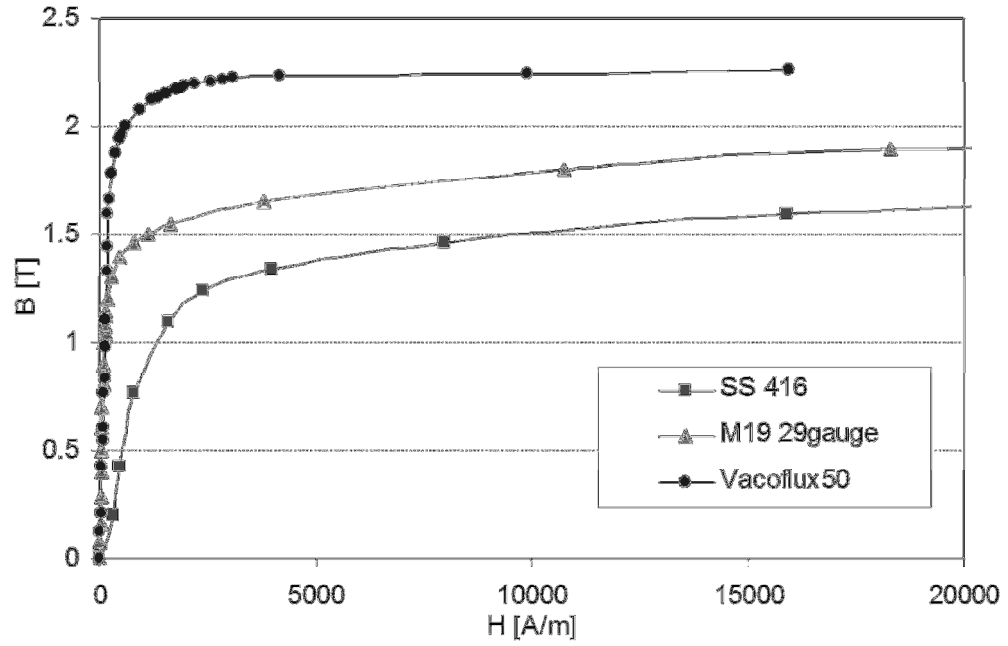


Şekil 2.8. DM motor tasarımında mekanik analizin gerekliliği [2]

2.6. Sürekli Mıknatıslı Motorlarda Kullanılan Malzemeler

2.6.1. Silisli çelik malzemeleri

Dahili mıknatıslı motorlarda bir çok farklı sac malzemesi kullanılmaktadır. Sac malzemesi seçiminde belirleyici olan unsurlar arasında üretim adetleri, maliyetin uygulama için önemi ve uygulamanın türü bulunmaktadır. Bu unsurlar göz önünde bulundurularak uygulama için en uygun sac dikkatle seçilmelidir. Seri üretimin fazla olduğu ve dolayısıyla maliyet faktörünün çok önemli olduğu beyaz eşya sektörü ile performansın daha önemli olduğu, maliyetin ise ikinci planda kaldığı savunma sanayi uygulamaları gibi kritik uygulamalar için tasarlanan servomotorlardaki sac yapıları çok farklıdır. Diğer taraftan tasarlanan servomotor yüksek frekanslarda çalışacaksa kayıpların çok artacağı göz önünde bulundurularak sac seçimi bu doğrultuda yapılmalıdır. Bu tarz uygulamalarda kullanılan sac kalınlığı 0.1mm ye kadar inmektedir. Frekansı daha düşük olan uygulamalarda ise kayıpların nispeten daha az olacağı düşünülerek maliyeti daha az olan kalın saclar seçmek daha mantıklı bir tercih olacaktır. Avrupa standartlarındaki muadili “M270-35A” olan “M19” türü sac malzemesi endüstriyel uygulamalarda oldukça fazla tercih edilmektedir. Bu türden bir malzeme ile “standart 416” çelik malzemesi gibi sıradan motorlarda kullanılan sac malzemelerine ait doyum eğrisi Şekil 2.9’ da verilmiştir. Ayrıca aynı grafiğe kalınlığı 0,1mm olan ve yüksek frekanslı uygulamalarda tercih edilen Vacoflux 50 türü bir malzeme de fikir vermesi açısından eklenmiştir [2,6-8].



Şekil 2.9. Motor sac datalarına örnek

Tablo 2.2. Farklı standartlarda silisli çelik malzemeleri ve eşdeğerleri [23]

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

Ayrıca farklı standartlarda bir birinin muadili olan silisli çelik malzemeleri ile Avrupa standartlarında en çok kullanılan motor sac malzemeleri, kalınlıkları ve

kayıp değerleri sırasıyla Tablo 2.2 ve Tablo 2.3 gösterilmiştir. Tablo 2.4’ de ise elektrik motorlarında sıklıkla kullanılan M-27, M-36 ve M-43 silisli çelik sac malzemeleri için demir kayıplarının 60hz de karşılaştırması verilmiştir. Bu malzemelerden kayıp oranları düşük olanlar DM motorlarda sıkça kullanılmaktadır.

Tablo 2.3. Avrupa normlarında sık kullanılan motor sac malzemeleri [23]

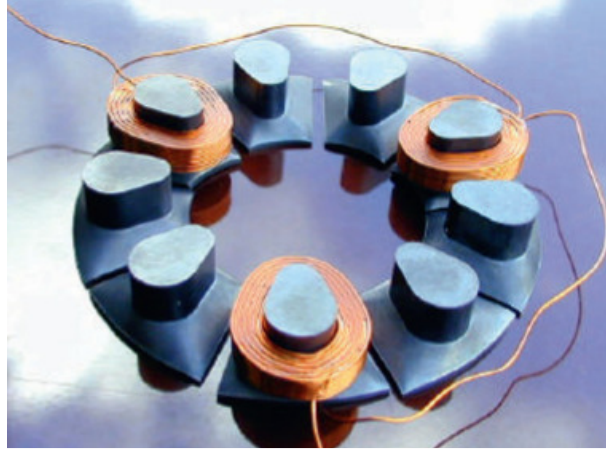
Sınıf EN 10106	Kalınlık	50 Hz de maksimum toplam kayıp		50 Hz de minimum manyetik kutuplaşma		
		$\hat{j} = 1.5T$ W/kg	1.0 T** W/kg	$\hat{H}=2500$ T	5000 T	1000 A/m T
M235-35A	0.35	2.35	0.95	1.49	1.60	1.70
M250-35A	0.35	2.50	1.00	1.49	1.60	1.70
M270-35A	0.35	2.70	1.10	1.49	1.60	1.70
M300-35A	0.35	3.00	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	50	2.50	1.05	1.49	1.60	1.70
M270-50A	50	2.70	1.10	1.49	1.60	1.70
M290-50A	50	2.90	1.15	1.49	1.60	1.70
M310-50A	50	3.10	1.25	1.49	1.60	1.70
M330-50A	50	3.30	1.35	1.49	1.60	1.70
M350-50A	50	3.50	1.50	1.50	1.60	1.70
M400-50A	50	4.00	1.70	1.53	1.63	1.73
M470-50A	50	4.70	2.00	1.54	1.64	1.74
M530-50A	50	5.30	2.30	1.56	1.65	1.75
M600-50A	50	6.00	2.60	1.57	1.66	1.76
M700-50A	50	7.00	3.00	1.60	1.69	1.77
M800-50A	50	8.00	3.60	1.60	1.70	1.78
M940-50A	50	9.40	4.20	1.62	1.72	1.81

Tablo 2.4. En sık kullanılan sacların demir kayıpları karşılaştırması [23]

Manyetik Akı Yoğunluğu, T	Bakır Kayıpları, W/kg							
	0.36 mm		0.47 mm			0.64 mm		
	M-27	M-36	M-27	M-36	M-43	M-27	M-36	M-43
0.20	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13
0.50	0.47	0.52	0.53	0.56	0.59	0.62	0.64	0.66
0.70	0.81	0.89	0.92	0.97	1.03	1.11	1.14	1.17
1.00	1.46	1.61	1.67	1.75	1.87	2.06	2.12	2.19
1.30	2.39	2.58	2.67	2.80	2.99	3.34	3.46	3.56
1.50	3.37	3.57	3.68	3.86	4.09	4.56	4.70	4.83
1.60	4.00	4.19	4.30	4.52	4.72	5.34	5.48	5.60
1.70	4.55	4.74	4.85	5.08	5.33	5.99	6.15	6.28
1.80	4.95	5.14	5.23	5.48	5.79	6.52	6.68	6.84

Silisli çelik malzemelerin yanı sıra elektrik motorlarında literatürde SMC (Soft Magnetic Composites) olarak adlandırılan ‘toz-demir kompozit nüveli’ malzemeler

de getirdikleri üretim avantajı nedeniyle sıkça kullanılmaktadırlar. Bu tip bir malzemenin tercih edilmesinin temelde iki farklı amacı bulunmaktadır. Bunlardan ilki karmaşık geometriye sahip yapıların elde edilebilmesi ve ikincisi de akının üç boyutlu akmasına imkan tanınmasıdır. Üretimde getirdikleri zorluklar nedeniyle bu tür malzemeler standart motorlarda pek de tercih edilmeyen malzemelerdir. SMC türü malzeme kullanılarak modüller halinde üretilen bir stator yapısı Şekil 2.10' de gösterilmiştir [2,6-8].



Şekil 2.10. SMC kullanılarak üretilen stator [2]

2.6.2. Sürekli mıknatıs malzemeleri

1930' lu yıllarda keşfedilen Alnico türü mıknatıslar alüminyum, nikel, demir ve kobalt alaşımli bir mıknatıs türüdür. Bu mıknatısların keşfi sürekli mıknatıslı motor teknolojisinden devrim niteliğindedir ve günümüzde hala sürekli mıknatıslı motorlarda kullanılmaktadırlar. Br değerlerinin yüksek olması bu türden mıknatısların en belirgin özellikleridir. Diğer taraftan bu tür mıknatısların pahalı olması ve mıknatıslanma özelliklerini kolayca kaybetmeleri dezavantajları arasında gösterilebilir. Diğer bir mıknatıs türü olan ferrite tür mıknatıslar ise Alnico mıknatıslara göre maliyeti düşük mıknatıslardır ve daha yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bununla birlikte Hc değerlerinin daha yüksek olması demagnetizasyona karşı dirençli olmalarını sağlamaktadır. Her iki mıknatıs türünün de mıknatıs enerjileri düşüktür. Bu nedenle, yapılan çalışmalar neticesinde 1960'lı yıllarda Somaryum ve Kobaltın (SmCo) kullanıldığı nadir toprak (rare-earth) mıknatısları bulunmuş ve bu buluş da mıknatıs teknolojisinde büyük bir adım olarak kabul edilmiştir. SmCo tür mıknatısların enerjisi (MEP) Alnico ve Ferrite tip

mıknatıslara göre çok daha yüksektir. En büyük dezavantajları ise kırılğan olmalarıdır. 1983 yılında Neodimiyum Demir Boron (Neodymium-Iron-Boron : NdFeB) türü mıknatısların bulunması, sürekli mıknatıslı motorlarda bir dönüm noktası olarak kabul edilmiş ve sürekli mıknatıslı motorların kullanım alanları ciddi şekilde genişlemiştir. Mıknatıs enerjileri 400kJ/m^3 leri aşmış, B_r ve H_c değerleri ise mevcut duruma göre çok daha yüksek seviyelere bu sayede çıkarılabılmıştır. Dikkat edilmesi gereken nokta ise kırılğan olmaları ve paslanmaya karşı korunmalarının gerekliliğidir. Tablo 2.5’de sürekli mıknatıslı malzemelerinin karşılaştırılması detaylı bir biçimde özetlenmiştir.

Tablo 2.5. Farklı sürekli mıknatıs malzemelerinin karşılaştırılması [23]

Mıknatıs Türü	Çalışma Sıcaklığı (Mak)	Pasa Karşı Direnci	Manyetik Kararlılık	Üretilebilirlik (şekillendirme kolaylığı)	Maliyet Faktörü
Alnico	540 °C	orta	yüksek	zor	% 30
Ferrite	250 °C	mükemmel	zayıf	zor	% 5
SmCo	300 °C	mükemmel	çok yüksek	yüksek	% 100
NdFeB	220 °C	zayıf	çok yüksek	iyi	% 60

Ferit ve NdFeB tür mıknatıslar hemen hemen her tür sürekli mıknatıslı servomotorda sıkça kullanılmaktadır. Ancak Ferit türü mıknatıslar 0,4T B_r değerine kadar üretilmekte, sinterlenmiş NdFeB türü mıknatıslar ise 1,0T B_r ve üzerinde üretilmektedir. 0,5-1,0T arasında ise tek seçenek “Bonded-NdFeB” adı verilen ve Türkçe’de “plastik mıknatıs” olarak adlandırılan mıknatıs çeşididir. Bu tip mıknatıslarda, mıknatıs malzemesi ile plastik yapıştırıcı uygun oranlarda karıştırılarak ve preslenerek ihtiyaç duyulan B_r seviyesinde NdFeB mıknatıslar üretilir. Bu mıknatıslar ortaya koyduğu esnek B_r seviyesi nedeniyle özellikle de DM motorlarda sıkça kullanılmaktadırlar.

Tablo 2.6’de farklı gradelerde sinterlenmiş NdFeB türü mıknatıslar ve özellikleri verilmiştir. Sinterlenmiş bu mıknatıslar 80-200 derece aralığında 1,0T’ B_r değerlerinden 1,48T B_r değerlerine kadar geniş bir aralıkta sunulmaktadır. 200 derecelerin üzerinde ise daha pahalı ve sıcaklık değişimlerinden çok az etkilenen SmCo tip mıknatıslar kullanılmaktadır [2,6-8].

Tablo 2.6. NdFeB tip mıknatısların manyetik özellikleri [23]

Derece	Kalıcılık		Zorlayıcı Kuvvet				Mak. Çalışma Sıcaklığı.
	B_r		H_c		H_{ci}		T_w °C
	kG	mT	kOe	kA/m	kOe	kA/m	
N27	10,50	1050	>10,0	>796	>12	>955	80
N30	11,00	1100	>10,2	>812	>12	>955	80
N33	11,50	1150	>10,5	>836	>12	>955	80
N35	12,00	1200	>10,9	>868	>12	>955	80
N38	12,40	1240	>11,3	>899	>12	>955	80
N40	12,70	1270	>11,4	>907	>12	>955	80
N42	13,00	1300	>11,5	>915	>12	>955	80
N45	13,50	1350	>11,6	>923	>12	>955	80
N48	14,00	1400	>11,6	>923	>12	>955	80
N50	14,30	1430	>10,3	>820	>12	>955	80
N30M	11,00	1100	>10,2	>812	>14	>1114	100
N33M	11,50	1150	>10,5	>836	>14	>1114	100
N35M	12,00	1200	>10,9	>868	>14	>1114	100
N38M	12,40	1240	>11,4	>907	>14	>1114	100
N40M	12,70	1270	>11,6	>923	>14	>1114	100
N42M	13,00	1300	>12,0	>955	>14	>1114	100
N45M	13,50	1350	>12,5	>995	>14	>1114	100
N48M	14,00	1400	>12,9	>1027	>14	>1114	100
N50M	14,30	1430	>13,1	>1043	>14	>1114	100
N30H	11,00	1100	>10,2	>812	>17	>1353	120
N33H	11,50	1150	>10,5	>836	>17	>1353	120
N35H	12,00	1200	>10,9	>868	>17	>1353	120
N38H	12,40	1240	>11,4	>907	>17	>1353	120
N40H	12,70	1270	>11,6	>923	>17	>1353	120
N42H	13,00	1300	>12,0	>955	>17	>1353	120
N45H	13,50	1350	>12,5	>999	>17	>1353	120
N48H	14,00	1400	>12,9	>1027	>17	>1353	120
N30SH	11,00	1100	>10,2	>812	>20	>1592	150
N33SH	11,50	1150	>10,6	>844	>20	>1592	150
N35SH	12,00	1200	>11,0	>876	>20	>1592	150
N38SH	12,40	1240	>11,4	>907	>20	>1592	150
N40SH	12,70	1270	>11,8	>939	>20	>1592	150
N42SH	13,00	1300	>12,4	>987	>20	>1592	150
N45SH	13,50	1350	>12,6	>1003	>20	>1592	150
N28UH	10,60	1060	>9,6	>764	>25	>1990	180
N30UH	11,00	1100	>10,2	>812	>25	>1990	180
N33UH	11,50	1150	>10,8	>860	>25	>1990	180
N35UH	12,00	1200	>11,3	>899	>25	>1990	180
N38UH	12,40	1240	>11,5	>915	>25	>1990	180
N40UH	12,70	1270	>11,8	>939	>25	>1990	180

3. DAHİLİ MİKNATISLI SERVOMOTOR ÖN TASARIMI

3.1. Giriş

Bu kısımda dahili mıknatıslı servomotor ön tasarımı yapılmıştır. Referans olarak alınan motora ait bilgiler verilmiş ve tasarım kriterleri belirlenmiştir. Dahili mıknatıslı motor tasarımı sırasında referans motora göre ne gibi farklılıklar olacağı açıklanmıştır. Hangi yapılara ait ön tasarım çalışması gerçekleştirildiği belirtilmiş ve en iyi sonuç elde edilen yapı için ön tasarım detayları sunulmuştur.

3.2. Referans Motor ve Tasarım Kriterleri

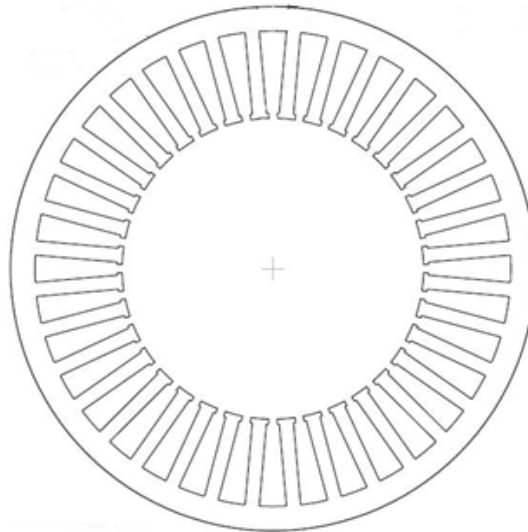
Yüzeyden mıknatıslı bir servomotor referans alınacaktır. Tasarım hedefi dahili mıknatıslı motor rotor yapısı kullanarak güç ve moment seviyesi bakımından referans motor değerlerine yaklaşmak, hatta üstene çıkmaktır. Yapılacak çalışmalarda daha önce tasarımı gerçekleştirilen yüzeyden mıknatıslı servomotor referans olarak alınacak ve yapılacak rotor tasarımı bu motorun statoru için gerçekleştirilecektir. Bu sayede ek bir stator üretimine ihtiyaç duyulmayacak, zaman kaybı önlenecek ve mevcut kalıplarla hızlı bir şekilde DMM için de stator üretilebilecektir. Diğer bir amaç da stator tarafında hiçbir değişiklik yapmadan, sadece rotorda değişiklik yaparak yüzeyden mıknatıslı motor ile DM motor arasında daha adil bir kıyaslama yapabilmektir. Tasarımda motorun DC bara gerilimi 24V kabul edilecek, anma hızı 1800rpm olarak alınacaktır. Kutup sayısı 12 de tutulacaktır. Ayrıca tasarlanacak motorun gövde yapısında bir değişiklik yapılmayacaktır. Son olarak motor milinin çapı referans motorda kullanılan mil çapı ile aynı tutulacaktır. Tüm bu değerler Tablo 3.1' de özetlenmiştir.

Tablo 3.1. Elektriksel ve Mekanik Tasarım Kriterleri

Tasarım Kriteri	Değeri
Servomotor çıkış gücü	1350W
Anma hızı	1800rpm
Kutup sayısı	12
Anma momenti	7,5Nm
Çevre sıcaklığı	-40°C / +60°C
DC bara gerilimi	24V
Stator oluk sayısı	36

3.3. Dahili Mıknatıslı Motorda Kullanılan Stator Yapısı

Dahili mıknatıslı motor tasarımlarında kullanılacak stator yapısı referans motor statorudur. Stator çizimleri ve daha önceki uygulamalar için üretilmiş hali Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de gösterilmiştir. DMM stator yapıları referans motoru statoru ile aynı tutularak ek bir stator üretimine ihtiyaç duyulmayacak, üretimden kaynaklanan zaman kaybı önlenecek ve mevcut kalıplarla hızlı bir şekilde DMM için de stator üretilebilecektir. Ayrıca tasarımları tamamlanan DMM, mevcut referans motor gövde yapısı ile aynı olduğu için sisteme monte edilebilecek ve sistemde performansı fiziksel farklılık olmaksızın rahatlıkla kontrol edilebilecektir. Diğer taraftan motorun sadece rotor kısmında değişiklik yapılacağı için yüzeyden mıknatıslı motor ile dahili mıknatıslı motor arasında daha adil bir kıyaslama da yapılacaktır.



Şekil 3.1. Tasarlanacak DM motor stator çizimi



Şekil 3.2. Tasarlanacak DM motor stator yapısı ve bitmiş gövde resmi

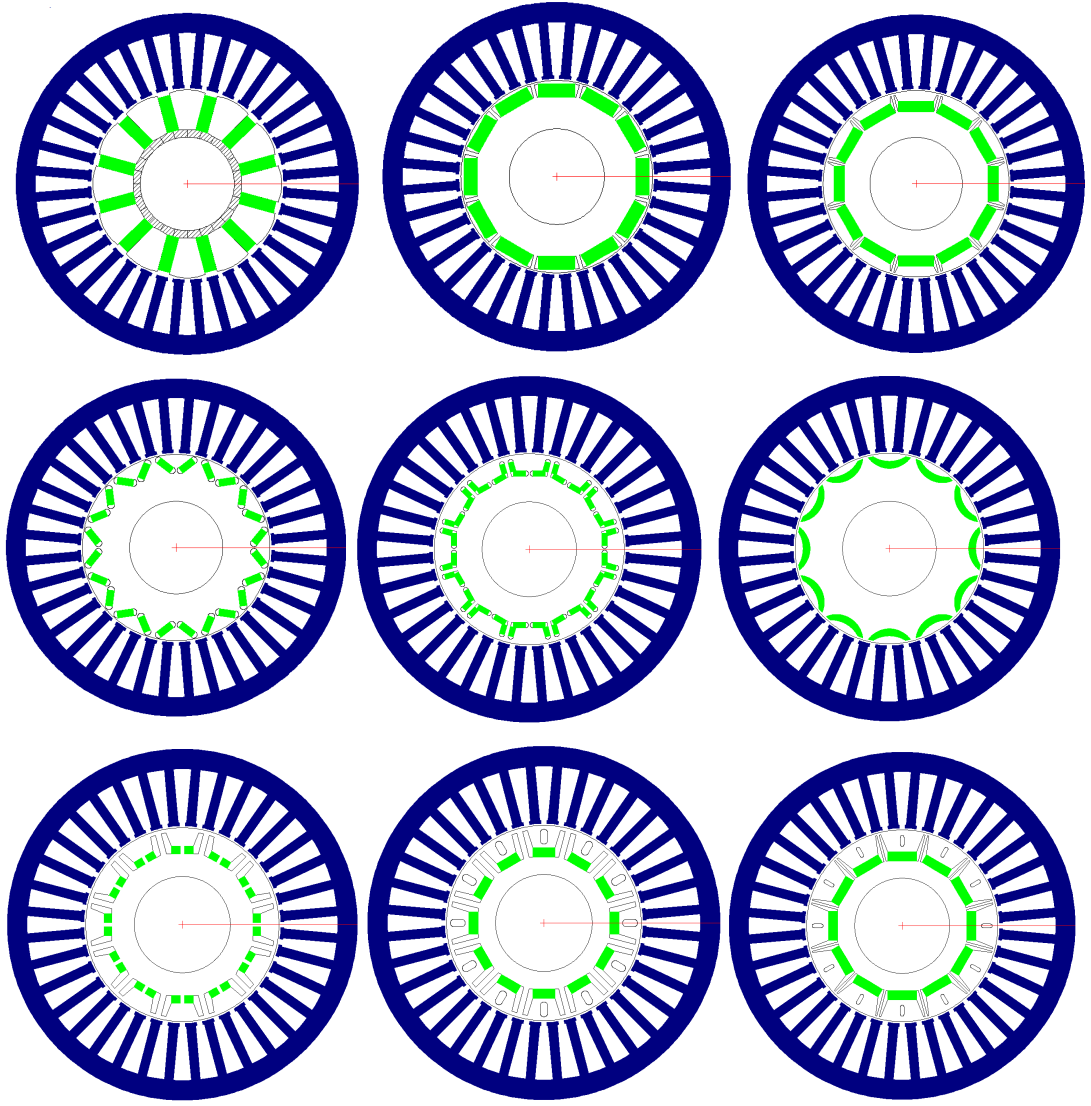
3.4. İncelenen Dahili Mıknatıslı Motor Rotor Yapıları

Bu bölümde yüzeysel mıknatıslı referans motorda kullanılan stator yapısı ve gövde aynı tutularak farklı DM motor yapıları incelenmiş, detaylı analiz ve tasarım çalışması için hangi yapıların daha mantıklı olacağı kararı verilmiştir.

Şekil 3.3' de DM motor yapıları verilmiştir. Tasarım kriterleri doğrultusunda bu yapılara ait ön tasarım çalışması yapılarak bir birlerine göre avantaj ve dezavantajları görülmüştür. İncelenen yapılar arasında;

- Çubuk tip yapı,
- Tek katmanlı yapı,
- Tek katmanlı derine gömülü yapı,
- V şekilli yapı,
- Yay şekilli yapı

bulunmaktadır.



Şekil 3.3. DM motor yapı örnekleri

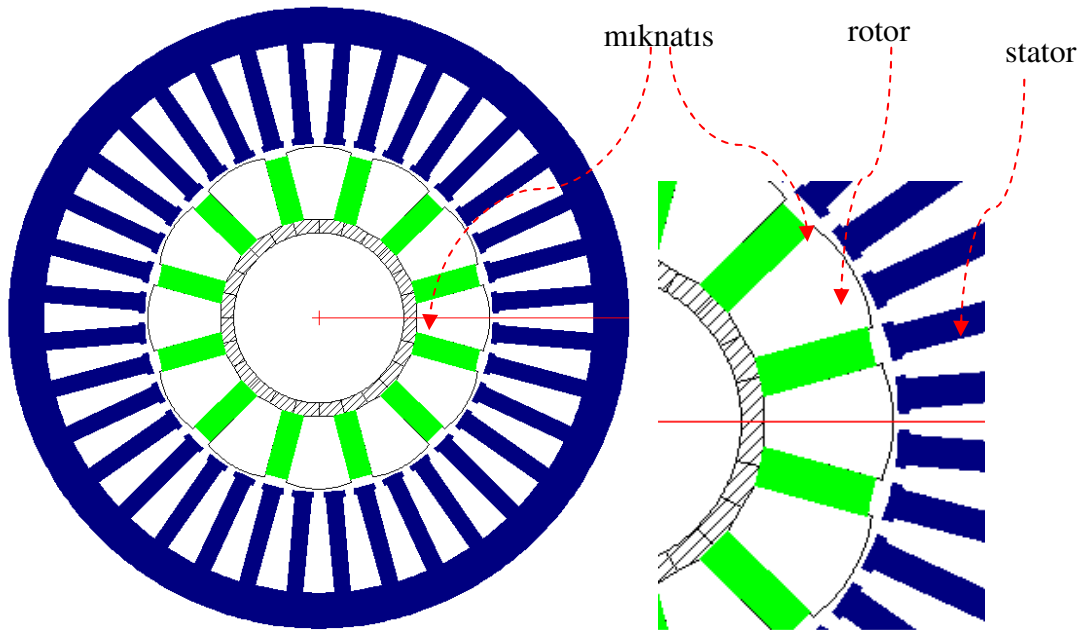
Bu yapılar incelenirken en önemli kriter rotor dış çapı, kutup sayısı ve mil çapı olmuştur. Çok katmanlı yapılara mevcut rotor boyutları yeterli olmadığından gidilememiştir. Çok geniş çubuk tip yapılar yine benzer nedenlerle incelenememiştir. Ayrıca tasarımı sınırlayan bir başka faktör kutup sayısıdır. Bu faktör nedeniyle de çok geniş yapılar ve farklı şekilli mıknatıslı yapılar ile çok katmanlı V şekilli yapılar analiz edilememiştir. Fiziksel olarak tasarıma imkan verilen yapılara ait ön tasarımlar yapılmıştır. Yapılan ön tasarım sonuçlarında mevcut tasarım kriterleri için en avantajlı yapının çubuk tip yapı olduğu sonucuna varılmıştır. Çubuk tip yapıya ait ön tasarım verileri aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

3.5. Detaylı Ön Tasarım

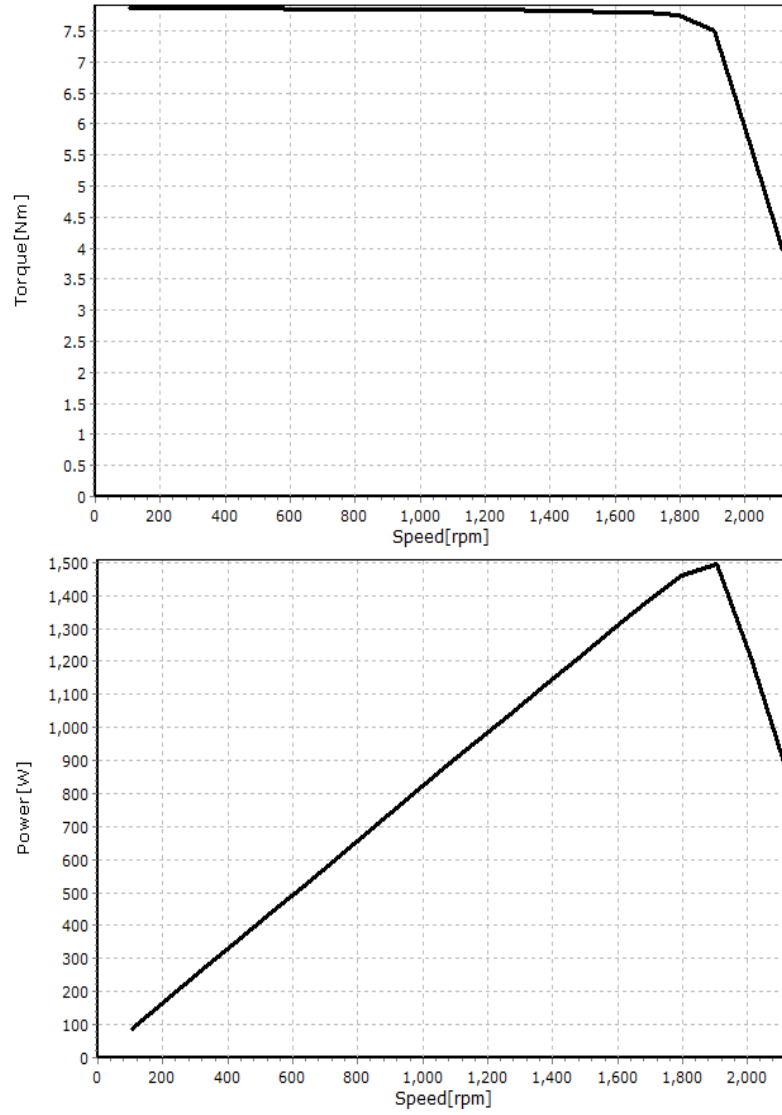
Birçok farklı DM motor yapısı için ön tasarım çalışması yapılmıştır. Yapılan ön tasarım çalışmaları sonucunda mevcut tasarım kriterleri açısından en avantajlı yapının çubuk tip yapı olduğu sonucuna varılmıştır.

Literatüre bakıldığında çubuk tip DM motorunun bazı avantajları mevcuttur. En önemli avantajları arasında d ve q eksen relüktans farkı fazla olması dolayısıyla moment yoğunluğunun bu tip motorlarda fazla olması ve düzgün geometrik şekilli mıknatıslar sayesinde üretimin kolaylığı sağlaması söylenebilir. Ayrıca çubuk tip motor özel bir dahili mıknatıslı bir motor olduğu için bu motor da yüksek hızlara çıkabilme özelliğini bünyesinde barındırmaktadır [3-5].

Çubuk tip yapıya ait motor modeli Şekil 3.4' de gösterilmiştir. Motorun stator akımı 60Arms de sürekli tutularak referans motor ile aynı momenti verecek şekilde ön tasarım yapılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde bu motorun moment-hız ve güç-hız grafiklerinin referans motora çok benzer olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.4. Çubuk tip DM motor yapısı ve rotora odaklanmış hali

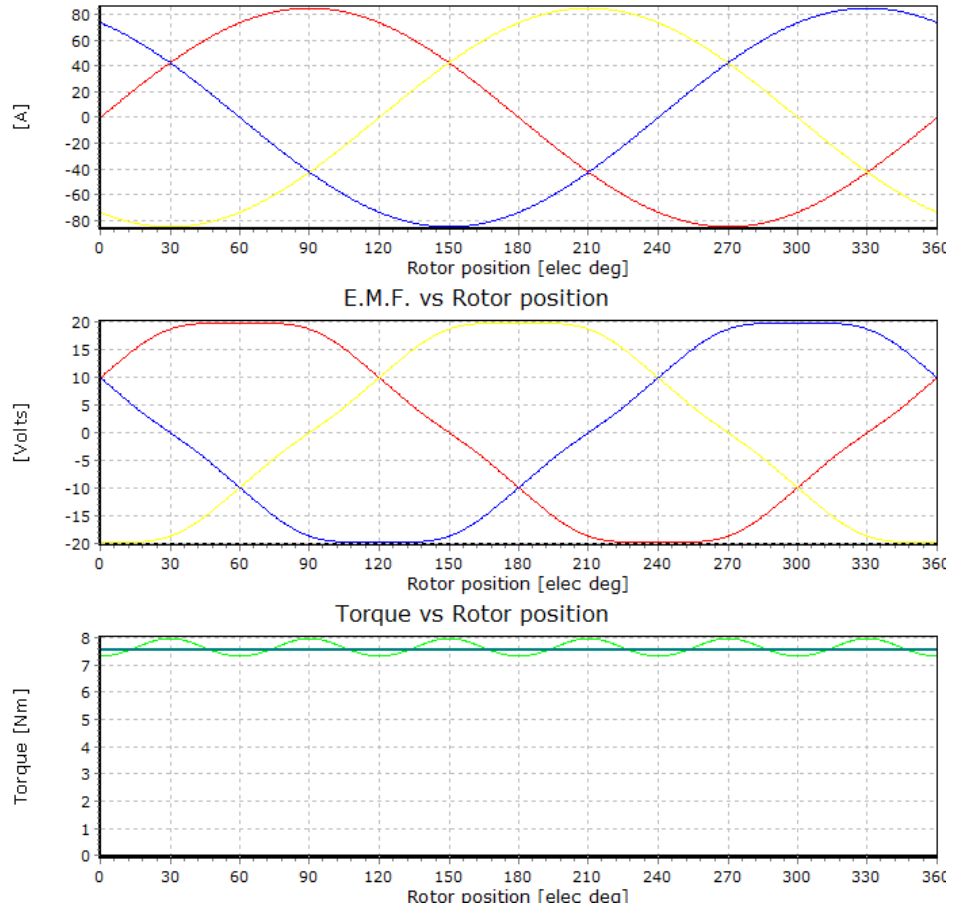


Şekil 3.5. Çubuk tip DMM moment-hız ve güç-hız değişimleri

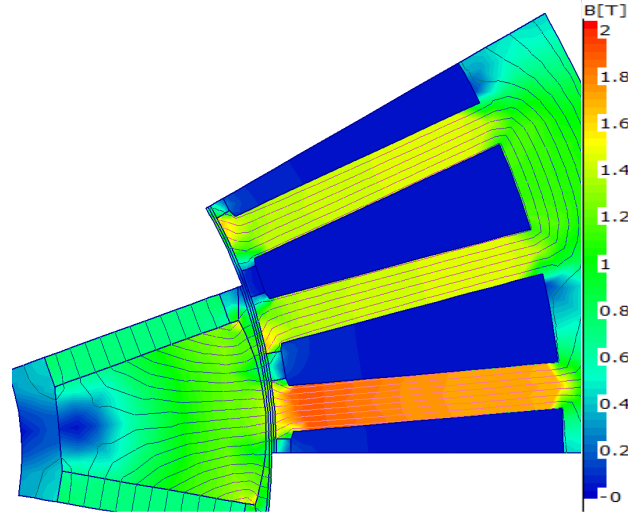
Rotor ön tasarımı yapılmış olan çubuk tip DM motor ile referans motoru karşılaştırmalı olarak Tablo 3.2'de gösterilmiştir. Her iki motorun çektiği faz akımı, mil momenti, gücü ve anma noktasındaki hızı yaklaşık olarak aynıdır. Çubuk tip motorun en büyük avantajı ise referans motora göre kullanılan mıknatıs ağırlığının %37 daha az olmasıdır. Ayrıca motor atalet momenti referans motordan %12 daha az olması da bu motorun artıları arasında sayılabilir. Son olarak faz endüktansının referans motoru faz endüktansına göre fazla olması motor kontrolü açısından bir avantaj olarak kabul edilebilir. Faz endüktansının büyük olması elektrik motorunun 'elektriksel hava aralığının' küçük olması ile orantılıdır. DM motorlara bakıldığında bu değer yüzey mıknatıslı motorlara göre büyüktür ve dolayısıyla bu faz endüktansının büyük olması sonucunu doğurur. Bu sayede akım regülasyonu daha

rahat yapılır ve gürültüsüz bir akım dalga şekli ile motor beslenebilir. Son olarak bu motorun d ve q-eksen endüktans oranları referans motoru dataları ile karşılaştırıldığında küçük de olsa bir avantaj görülmektedir.

Tasarımda kullanılan mıknatıs ağırlığı, 7,5Nm momenti elde edecek şekilde minimum seviyede tutularak ön analiz çalışmaları yapıldığında Şekil 3.6'dan da görüldüğü gibi sinüzoidal gerilim değişimi elde edilebilmektedir. Motor momenti ise 7,5Nm ortalama değere ulaşabilmektedir. Ayrıca, Şekil 3.7'de yüksüz durum motor ön sonlu elemanlar analizi verilmiş. Özellikle rotor yapısında bir manyetik sorun olmadığı gözlenmiştir. Detaylı sonlu elemanlar analiz sonuçları bir sonraki bölümde verilecektir.



Şekil 3.6. Çubuk tip DM motor akımı, gerilimi ve çıkış momenti



Şekil 3.7. Çubuk tip DMM yüksüz durum sonlu elemanlar analizi

Tablo 3.2. Çubuk tip DMM'in referans motor dataları ile karşılaştırılması

Parametre	Simge	Referans Motor	Çubuk DMM	% Fark
Akım	I_R	60 Arms	60 Arms	--
Moment	T_R	7,5 Nm	7,5 Nm	--
Güç	P_R	1490 W	1520 W	--
Hız	ω_R	1900 rpm	1900 rpm	--
Mıkn. Ağırlığı	W_{PM}	0,348 kg	0,218 kg	- %37
Rotor Atal. M.	J_m	5,23 kgcm ²	4,60 kgcm ²	- %12
Endüktans - faz	L_{ph}	22,5 uH	32,3 uH	+ %43
Endüktans oranı	L_q/L_d	24uH/25uH	34uH/39uH	--

3.6. Sonuçlar

Fiziksel olarak tasarıma imkan veren farklı DM motor rotor yapılarına ait ön tasarımlar yapılarak aralarından mevcut tasarım kriterleri açısından en avantajlı olanı seçilmiştir. En avantajlı görünen çubuk tip yapı için ön tasarım detayları verilmiştir. Ön tasarım verileri ile referans motor verileri karşılaştırılarak avantaj ve dezavantajları tablo halinde özetlenmiştir. Bir sonraki bölümde çubuk tip yapıya ait detaylı sonlu elemanlar analizleri yapılacak ve gerek görülen noktalarda farklı tasarım teknikleri kullanılacak ve ihtiyaç duyulması halinde parametre optimizasyonları yapılacaktır.

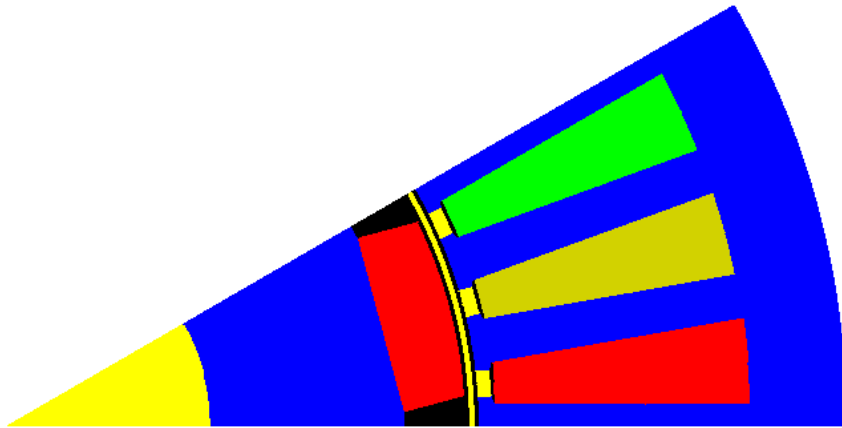
4. DAHİLİ MİKNATISLI MOTOR SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

4.1. Giriş

Bir önceki bölümde birçok farklı DM motor yapısına ait ön tasarım çalışması yapılarak aralarında mevcut tasarım kriterleri açısından en avantajlı olanın çubuk tipli yapı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu bölümde de önce mevcut referans motora ait sonlu elemanlar analizleri yapılmış ve ardından çubuk tipli yapının sonlu elemanlar analizlerine geçilmiştir. Çubuk tipli yapının analizleri esnasında belirlenen problemlerin giderilmesi için farklı tasarım teknikleri uygulanacak ve bazı parametreler için de optimizasyon çalışması yapılmıştır. Son olarak da elde edilen en iyi çubuk tipli yapı ile referans motoru arasında karşılaştırma yapılmıştır.

4.2. Yüzeyden Mıknatıslı Referans Motorun Sonlu Elemanlar Analizi

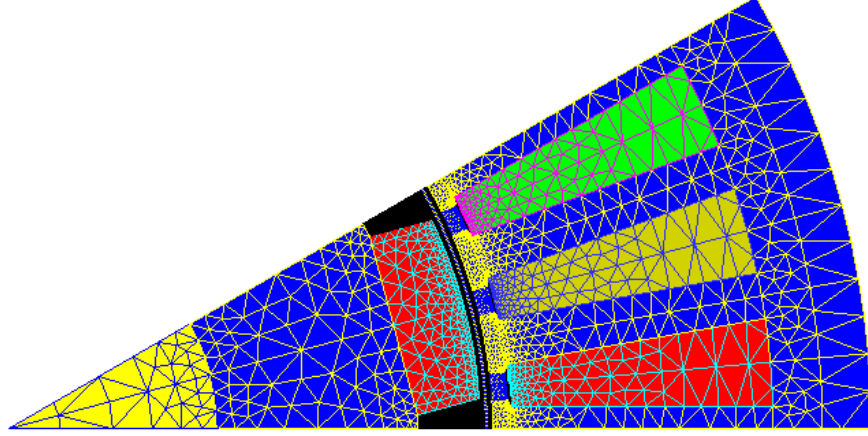
Referans motor 36 oluk 12 kutuplu bir yapı olduğu için simetri özelliği kullanmaya uygundur. Referans motorun 1/12 si yani 1 kutup-3 oluğun yer aldığı SEA modeli Şekil 4.1' de gösterilmiştir. Simetri özelliğinin kullanılması modeli küçülttüğü gibi çözüm süresini de oldukça kısaltmaktadır. Bu da kısa sürede daha fazla analiz yapmaya imkan sağlamaktadır.



Şekil 4.1. Referans motor SEA modeli

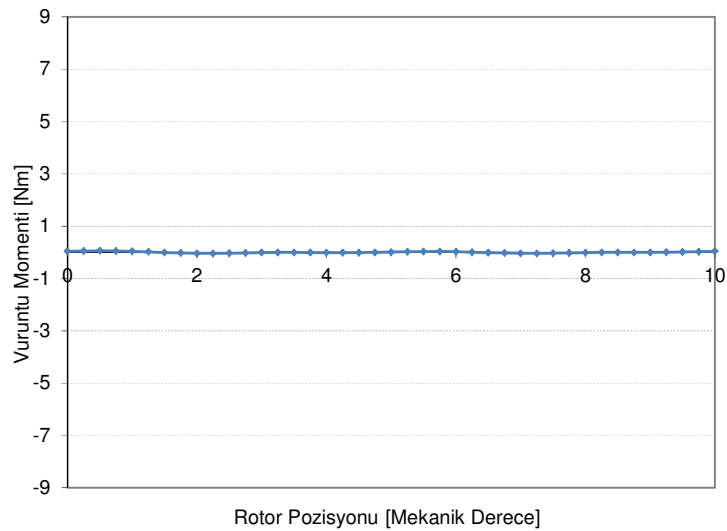
Modele ait ağ yapısı Şekil 4.2' den görüldüğü üzere oldukça iyidir. Özellikle hava aralığında ki mesh yapısı 3 farklı katman kullanılması sayesinde oldukça iyidir.

Elektromekanik enerji dönüşümünün hava aralığında olmasından dolayı hava aralığı mesh yapısı elektrik motorlarının sonlu elemanlar analizinde çok önemlidir. Hava aralığı için fazladan kullanılan katmanlardaki amaç özellikle bu bölgedeki ağ yapısını daha iyi hale getirmektir.

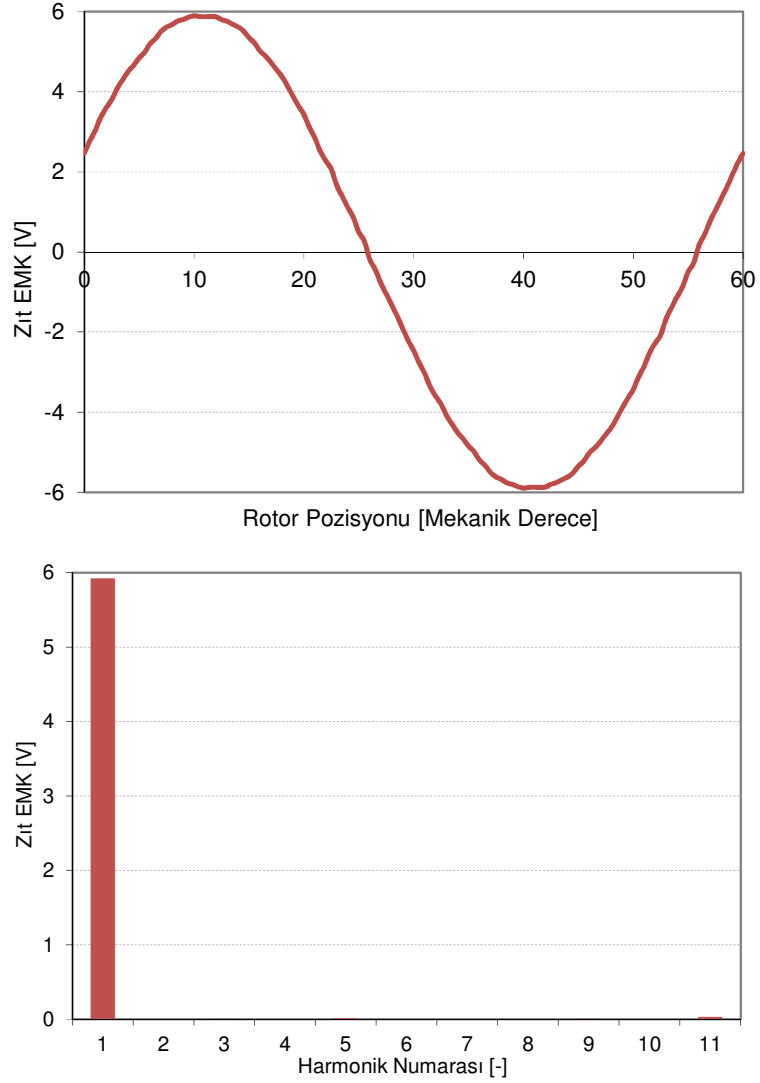


Şekil 4.2. Referans motor mesh yapısı

Referans motora ait vuruğu momenti analizi gerçekleştirilmiştir ve motorda vuruğu momentinin çok düşük seviyelerde olduğu görülmüştür (Şekil 4.3). Ayrıca motor 500 rpm hızda çevrilererek zıt EMK dalga şekli elde edilmiş ve FFT analizi yapılarak harmonikleri incelenmiştir (Şekil 4.4). Elde edilen sonuçlara göre zıt EMK hat gerilimi tamamen sinüzoidaldir ve harmonik içermemektedir. Harmoniklerin dağılımına bakıldığında sadece temel harmoniğin mevcut olduğu, diğer harmoniklerin ise olmadığı görülmektedir.

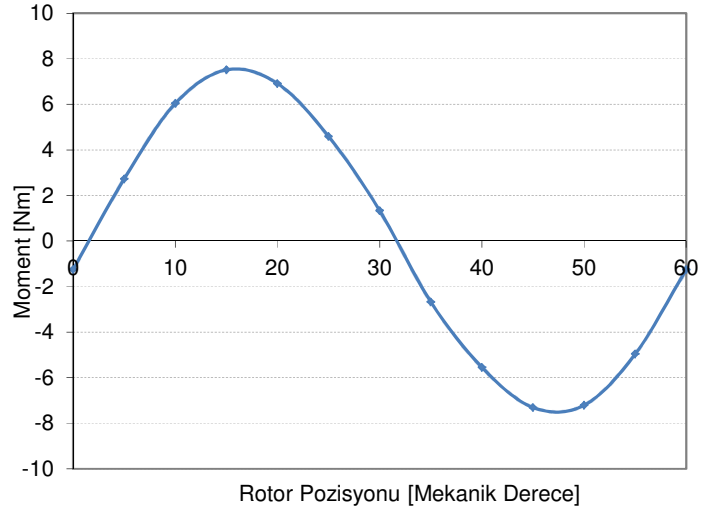


Şekil 4.3. Referans motor vuruğu momenti değışimi

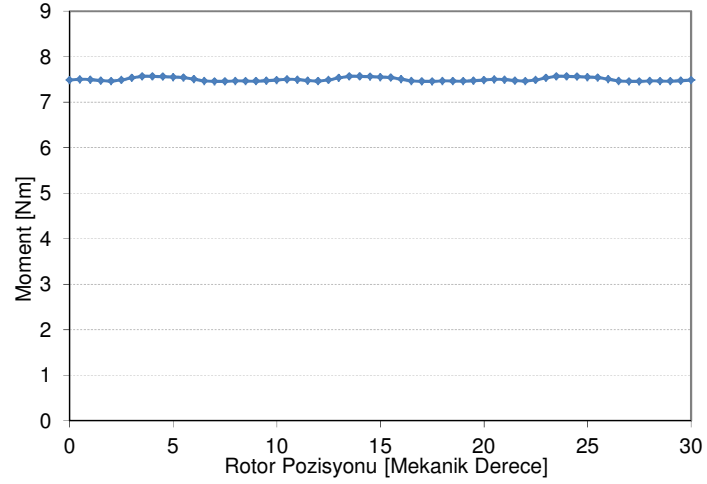


Şekil 4.4. Referans motor zıt EMK değişimi ve FFT analizi

Motorun maksimum moment veren rotor pozisyonunu bulmak amacıyla motor sargılarına sürekli akım uygulanarak momentin değişimine bakılmıştır (Şekil 4.5). Burada amaç motorun maksimum moment verdiği noktasını tespit edip rotoru o açığa sabitlemek ve elektrik alanı ile birlikte çevirmeye başlamaktır. Yapılan analiz sonucunda rotorun başlangıç pozisyonunda maksimum momenti verdiği görülmüş ve herhangi bir çevirme işlemi yapılmaksızın bulunduğu konumda elektriksel alan ile birlikte çevrilmeye başlanmış ve moment çıkışı elde edilmiştir (Şekil 4.6). 60Arms faz akımı için ortalama 7,5Nm moment elde edilmiştir. Çıkış momentindeki moment dalgalanması ortalama momente göre %1,47'si mertebelerindedir. Moment dalgalanmasının bu denli düşük olması, vuru momentinin olmaması ve zıt EMK hat geriliminin yüksek harmonikler içermemesi ile açıklanabilir.

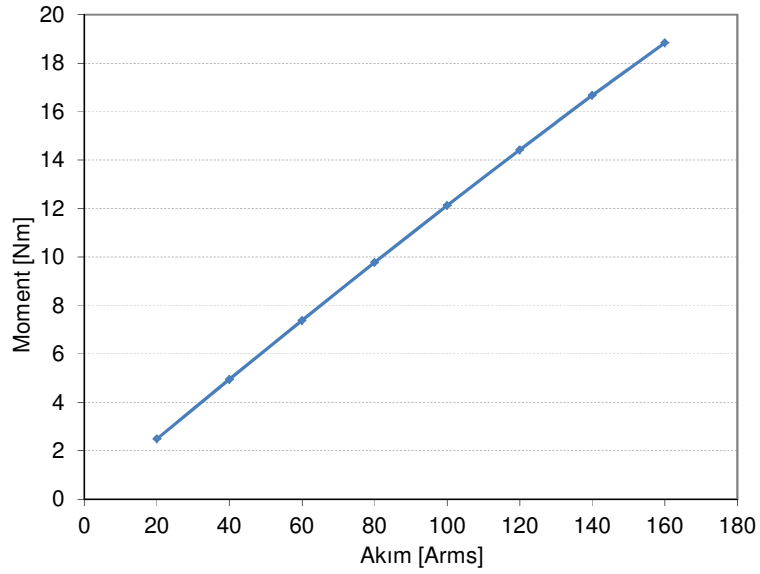


Şekil 4.5. Referans motor momentinin kontrol açısına göre değişimi



Şekil 4.6. Referans motoru çıkış momenti değişimi

Referans motora ait moment akım eğrisi elde edilmek üzere uygulanan farklı akımlar karşısında ortalama moment değerleri kaydedilmiş ve Şekil 4.7' de gösterilmiştir. Moment katsayısı 0,125Nm/Arms olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Referans motor moment akım ilişkisi

4.3. Çubuk Tip Yapı Detaylı Sonlu Elemanlar Analizi

Ön tasarım aşamasında gerçekleştirilen çalışmalar sonunda tasarım kriterleri için en avantajlı yapının çubuk tip yapı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu kısımda da en temel çubuk tip yapıya ait sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilerek görülen problemlerin giderilmesi için farklı tasarım teknikleri uygulanacak veya optimizasyon çalışmaları yapılacaktır. Uygulanan tasarım teknikleri;

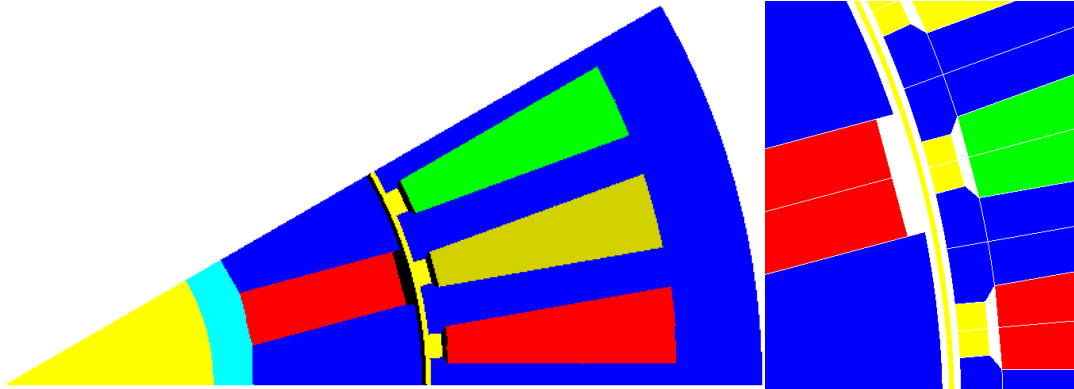
- Değişken hava aralığı,
- Mıknatıs uzunluğunun değiştirilmesi,
- Mıknatıs genişliğinin değiştirilmesi,
- Yamuk mıknatıs yapısının kullanılması,
- Mıknatıs üzerine eklenen diş,
- Segmentli yapı

şeklinde sınıflandırılabilir. Yapılan çalışmalara ait detaylar alt başlıklar halinde sıralanmış ve en sonda karşılaştırmalar kısmında da bir birlerine göre avantaj ve dezavantajları irdelenmiştir.

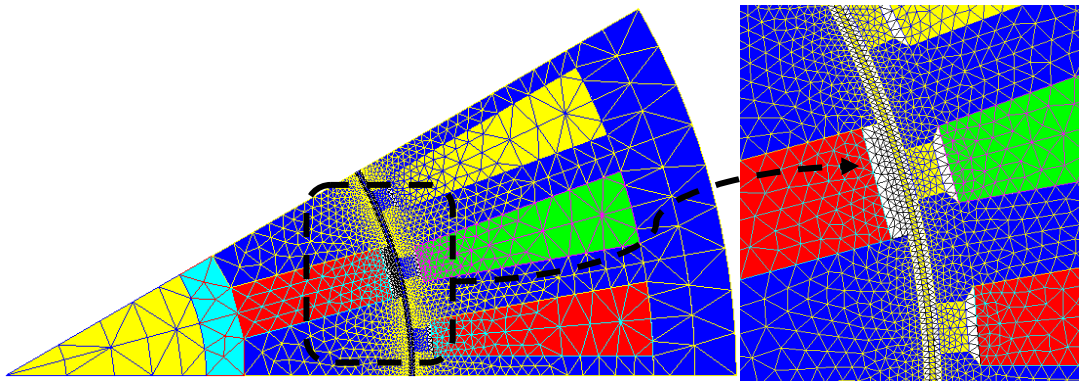
4.3.1. Çubuk tip standart yapı

Çubuk tip yapının birçok avantajı olmasının yanı sıra dezavantajları da mevcuttur. Bunlar arasında en önemli olanlar yüksek vuruş momenti, bozuk zıt EMK ve dalgalanması çok olan çıkış momentidir. Dezavantajlarını gidermeksizin bu tip yapıların kullanılması neredeyse imkânsızdır [19].

Herhangi bir tasarım tekniği uygulanmadan standart çubuk tip yapıya ait sonlu elemanlar analizleri yapılarak problemler belirlenmiş ve bu problemlerin ortadan kaldırılabilmesi için de farklı tasarım teknikleri uygulanmıştır. Standart tip çubuk miknatıslı yapıya ait SEA modeli Şekil 4.8’ da gösterilmiştir. Ayrıca modele ait ağ yapısı da Şekil 4.9’ da gösterilmiştir. Bu ve bundan sonraki modellerin hepsinde referans motorda olduğu gibi simetri özelliğinden faydalanılmış ve 1/12’ lik kısmın analizi yapılmıştır. Bu da zamandan kazanç ve daha yüksek hassasiyette çözüm sağlamıştır.

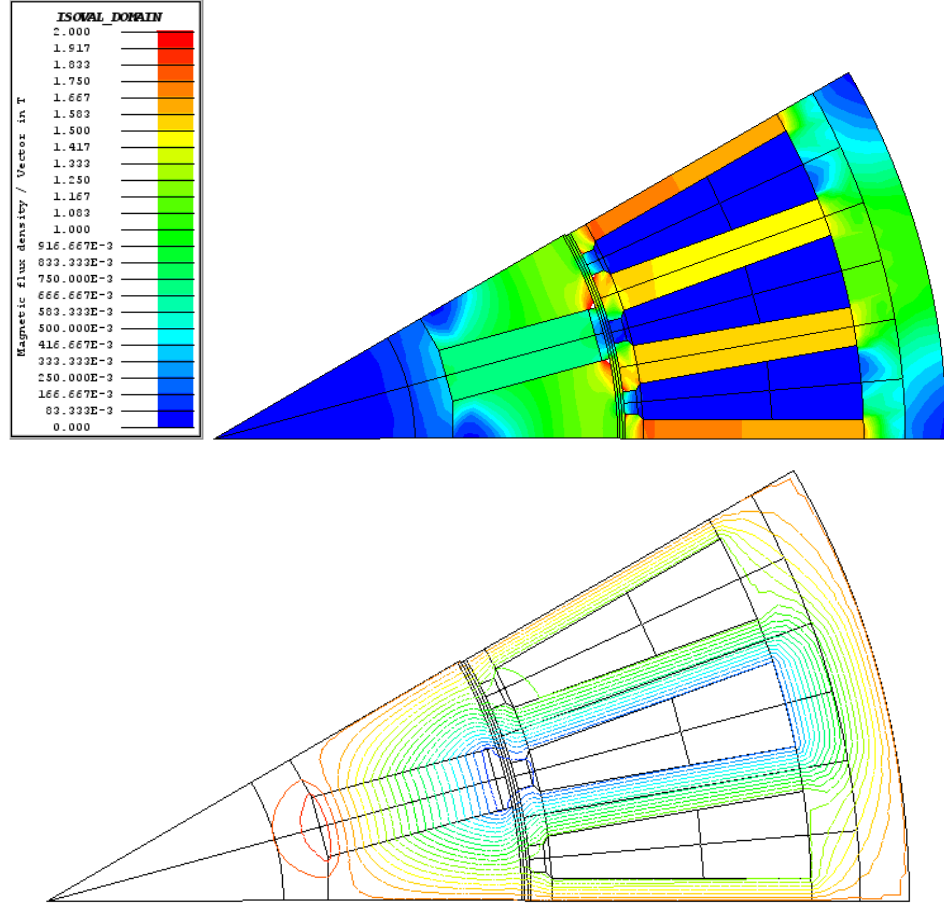


Şekil 4.8. Standart yapıya ait SEA modeli ve hava aralığına odaklanmış hali



Şekil 4.9. SEA modeli ağ yapısı ve hava aralığına odaklanmış hali

Oluşturulan SEA modeli için yüksüz durum analizi yapılarak akı yoğunluğu seviyeleri ve akı çizgilerine bakılmıştır (Şekil 4.10). Akı yoğunlukları seviyeleri referans motoru akı yoğunluğu seviyeleriyle hemen hemen aynıdır.

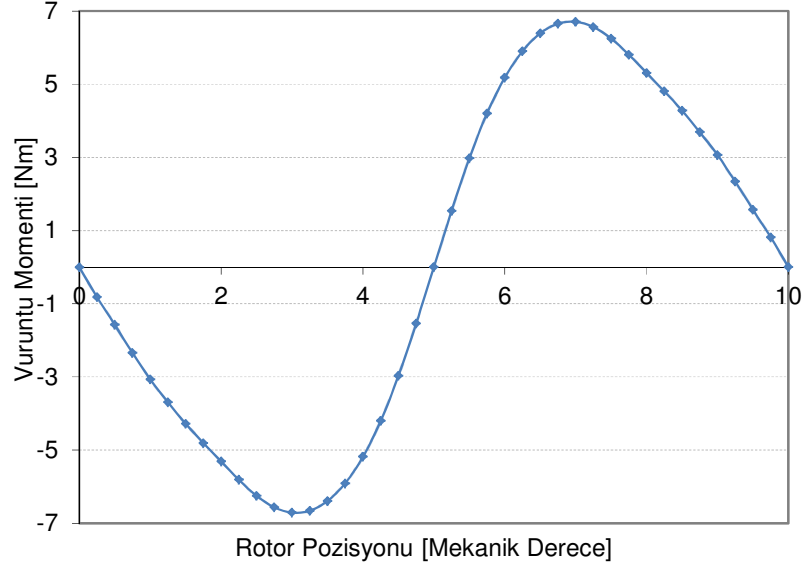


Şekil 4.10. Yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi ve akı çizgileri

Sürekli mıknatıslı motorlarda vuru mu momenti adı verilen bir moment bileşeninin olduğu ve özellikle düşük hızlarda kontrol uygulamalarında bu moment bileşeninin hayati önem taşıdığı bilinmektedir. Vuru mu momenti en temel anlamda rotordaki mıknatıslar ile stator olukları arasındaki etkileşimden kaynaklanan moment bileşenidir. Stator sargılarına herhangi bir akım uygulamaksızın rotordan elde edilen moment vuru mu momenti olarak adlandırılır [8,18].

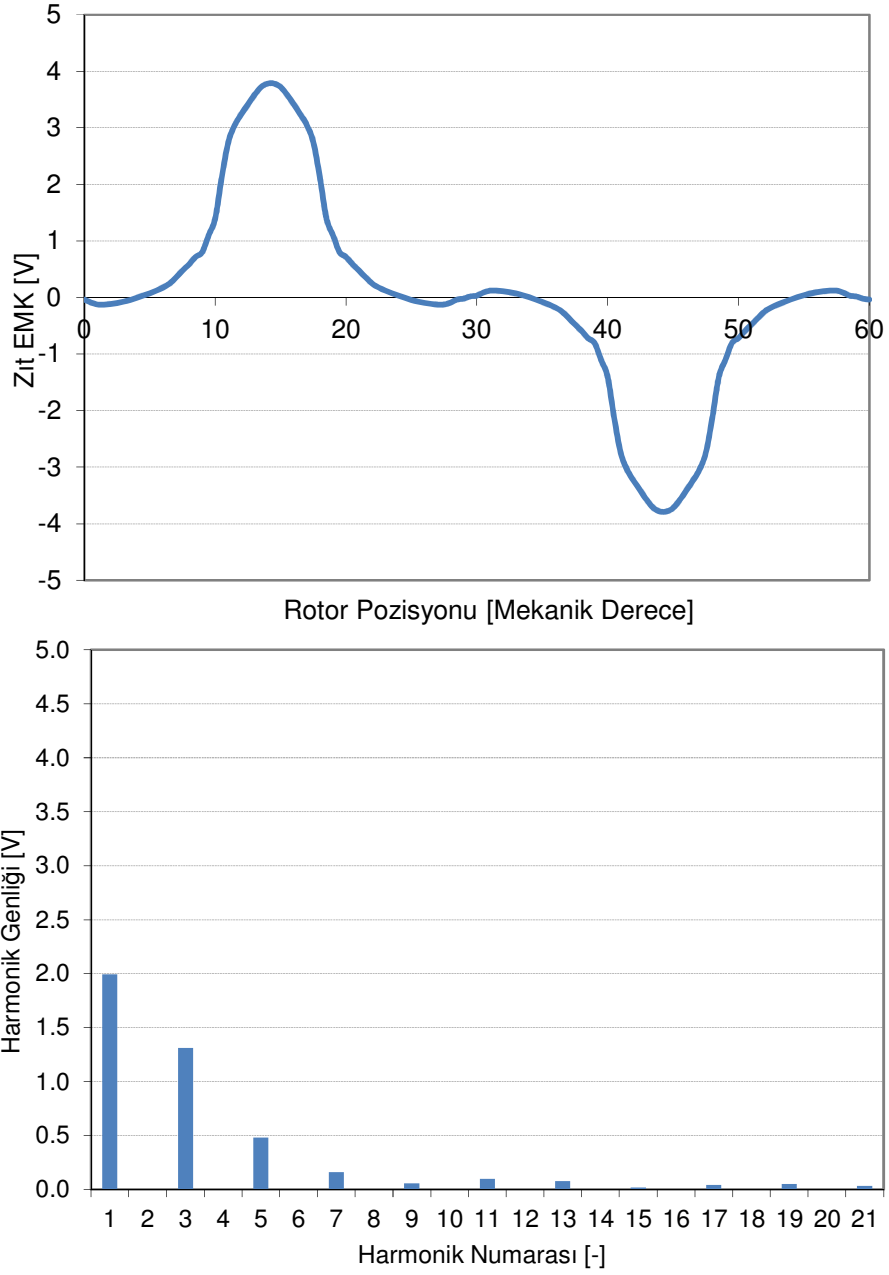
Standart çubuk tip yapı için stator sargılarına akım uygulanmadan rotordaki moment değerine bakılarak vuru mu momenti elde edilmiştir (Şekil 4.11). Elde edilen vuru mu momentinin tepe değeri 6,71Nm civarındadır. Bu değer de ortalama momentin %77' si mertebelerindedir. Özellikle düşük hızlı uygulamalarda vuru mu momenti çok

büyük önem kazandığı göz önüne alınırsa elde edilen bu değer çok büyük bir değerdir. Vuruntu momentinin azaltılması ve mümkün ise tamamen ortadan kaldırılması gerekmektedir.



Şekil 4.11. Standart çubuk tip yapıya ait vuruntu momentinin değişimi

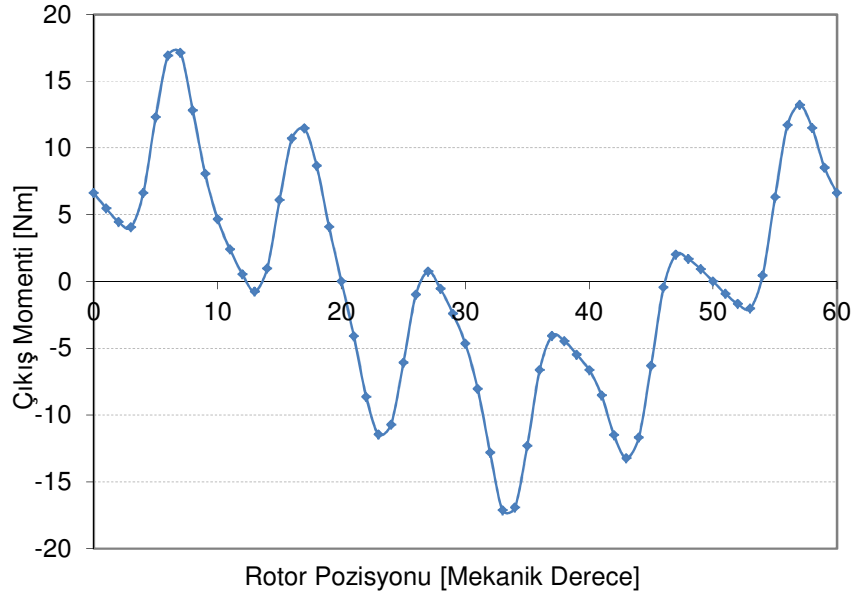
Standart tip yapıya ait yapılan analizlerden biri de zıt EMK analizidir. Zıt EMK hat geriliminin elde edilebilmesi için rotor yüksek hızda çevrilerek fazlar arasındaki gerilime bakılmıştır. Yapılan analizlerde hız olarak 500 rpm kullanılmış ve zıt EMK dalga şekli elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen dalga şekline ait FFT analizi yapılarak harmonik dağılımı incelenmiştir (Şekil 4.12). Şekilden de görüldüğü üzere hat gerilimi dalga şekli tam olarak sinüzoidal değildir. Dolayısıyla yüksek harmonikler içermesi kaçınılmazdır. Yapılan FFT analizinden de görüldüğü üzere temel harmonik genliği 2V' dur. Temel harmoniğin %65' i mertebesinde 3. harmonik,%24'ü mertebesinde de 5. Harmonik ve %8'i mertebelerinde de 7. harmonik görülmektedir. Zıt EMK nın kötü olması motor kontrolünü zorlaştıracaktır [8,18]. Bunun için de hat geriliminden elde edilen harmonik değerlerini ortadan kaldırıcı önlemler alınmalıdır.



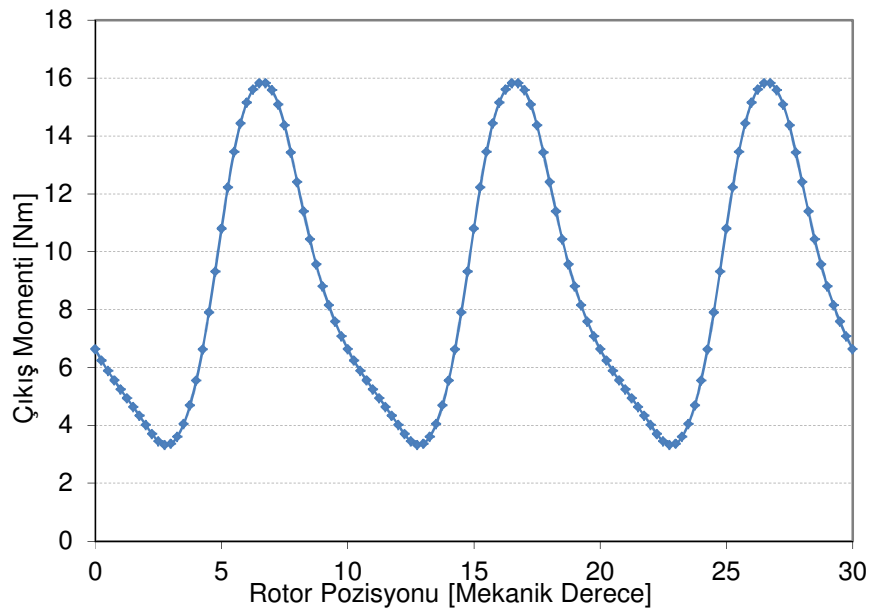
Şekil 4.12. Standart yapıya ait zıt EMK hat gerilimi dalga şekli ve FFT analizi

Zıt EMK analizi de yapıldıktan sonra yüklü durum analizlerine geçilmiştir. Stator sargılarına 60Arms değerine sahip sabit akım uygulanarak moment değişimine bakılmış ve maksimum moment veren rotor pozisyonu tespit edilmiştir (Şekil 4.13). Şekilden görüldüğü üzere maksimum moment rotorun 7,5 derece olması durumunda elde edilmiştir. Ayrıca moment değişiminin sinüzoidal olmaması çıkış momentindeki dalgalanmanın fazla olacağını habercisidir. Nitekim 60Arms akım için yapılan çıkış momenti analizinden de görüldüğü üzere moment dalgalanması bir hayli fazladır.

Elde edilen çıkış momenti ortalama değeri 8,74Nm' dir. Tepeden tepeye moment dalgalanması ise ortalama momentin %143' ü mertebelerindedir. Yüksek moment dalgalanması bir elektrik motorunda istenmeyen bir özelliktir. Bunun için de bu durumun ortadan kaldırılması gerekmektedir. Yapılan analizler sonucunda motora ait kritik problemler tespit edilmiş olup farklı tasarım kriterleri uygulanarak bu problemler ortadan kaldırılmaya çalışılacaktır.



Şekil 4.13. Sabit akım uygulanması sonucunda elde edilen moment değişimi

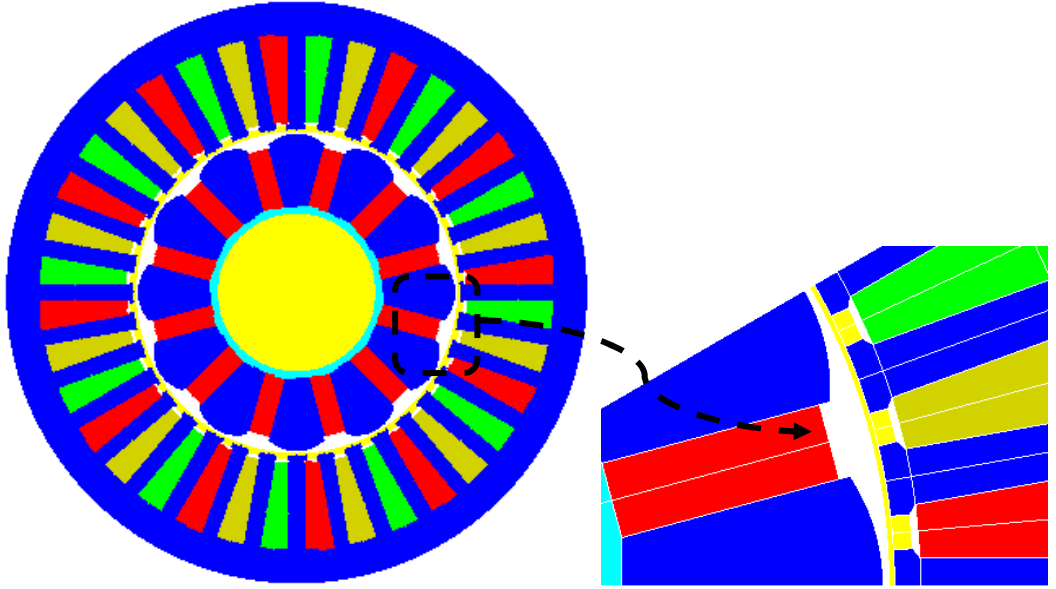


Şekil 4.14. Standart yapıdan elde edilen moment çıkışı

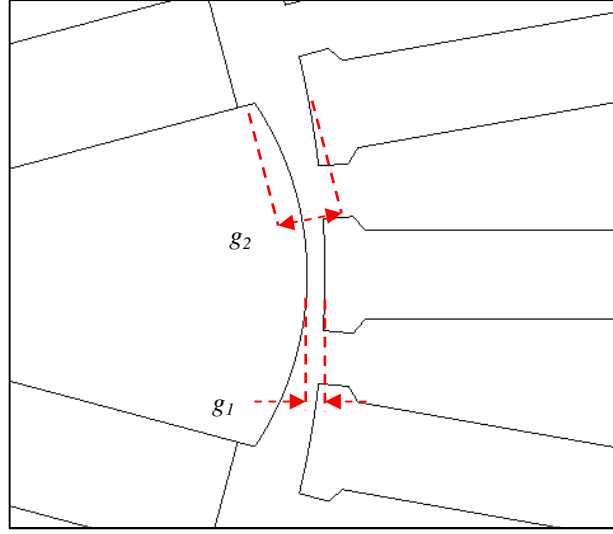
4.3.2. Çubuk tip değişken hava aralığı uygulanmış yapı

Standart çubuk tip yapıda belirlenen problemleri ortadan kaldırmak için uygulanan ilk tasarım tekniği değişken hava aralığının kullanılmasıdır. Hava aralığının her yerde aynı olması standart bir uygulamadır. Fakat hava aralığı belirli bir formda büyütülürse vuru mu momentini azaltıcı, zıt EMK dalga şeklini düzeltici ve sonuç olarak da çıkış momenti dalgalanmasını azaltıcı yönde yeni yapı elde edilebilir [20].

Çubuk tip yapı için oluşturulan değişken hava aralığı içeren yapıya ait SEA modeli Şekil 4.15’ da gösterilmiştir. Ayrıca değişken hava aralığı için iki ayrı hava aralığı değişkeni kullanılmıştır. Bu değişkenler g_1 ve g_2 olarak isimlendirilmiş ve Şekil 4.16’ de gösterilmiştir.

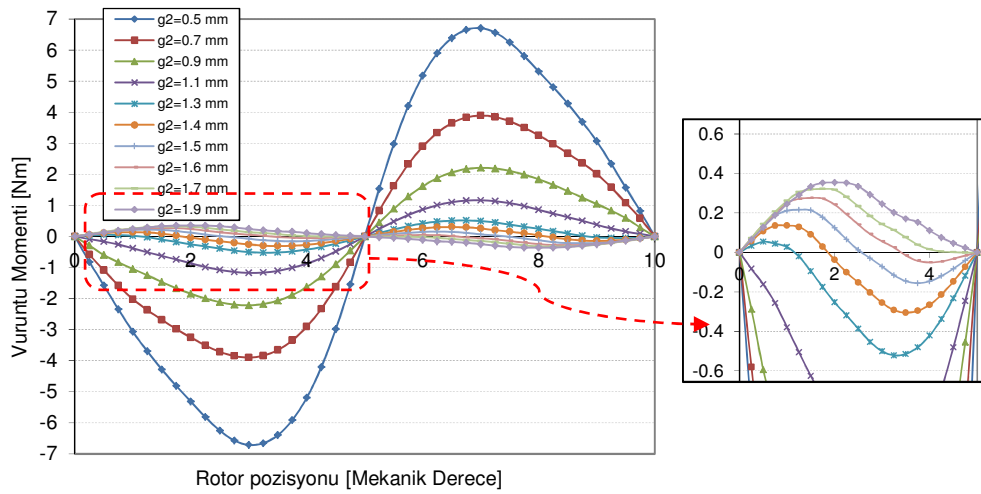


Şekil 4.15. Değişken hava aralığı içeren çubuk tipli yapı

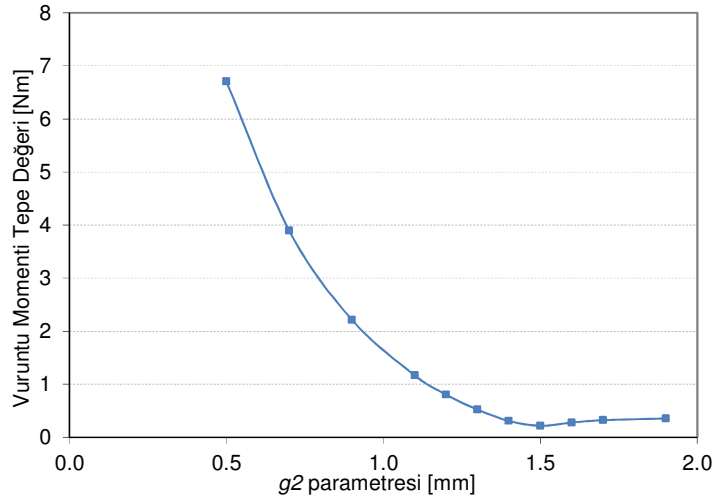


Şekil 4.16. Değişken hava aralığı için tanımlanan g_1 ve g_2 parametreleri

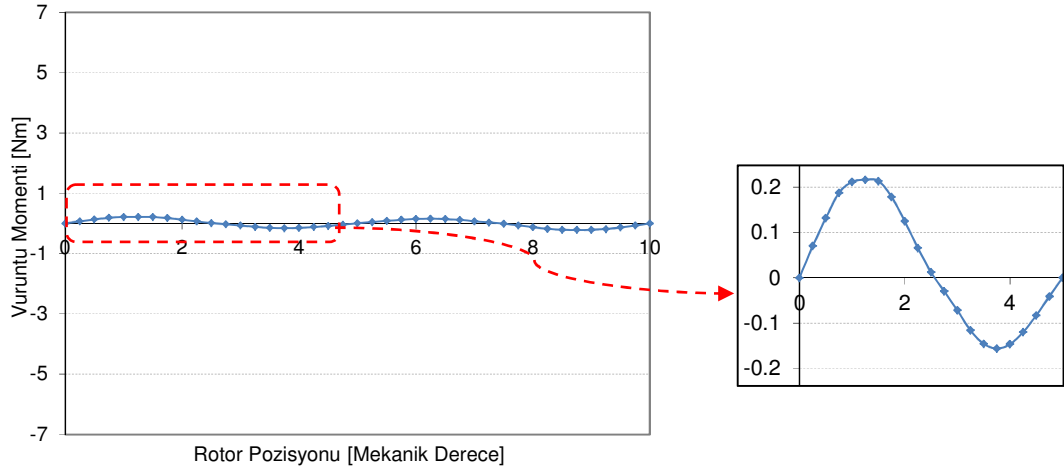
Yapılan ilk çalışmada g_1 parametresi standart çubuk tip yapıda olduğu gibi 0.5mm alınarak farklı g_2 ölçüleri için vuruğu momenti değişimine bakılmıştır. Başlangıçta g_1 parametresi ile g_2 parametresi aynı alınmış ve g_2 'nin değişimi için elde edilen vuruğu momentine göre bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Elde edilen vuruğu momenti değişimleri üst üste çizdirilmiş ve Şekil 4.17' de gösterilmiştir. Ayrıca vuruğu momenti tepe değerlerinin değişimi de Şekil 4.18' da gösterilmiştir. Minimum vuruğu momenti tepe değeri g_2 'nin 1,5mm olması durumunda, 0,22Nm olarak elde edilmiştir. Bu değer de vuruğu momentinin %2,8'i seviyelerindedir. Minimum vuruğu momentinin elde edildiği g_1 ' in 0,5mm ve g_2 ' nin 1,5mm olduğu durum için vuruğu momentinin değişimi Şekil 4.19' de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Farklı g_2 parametreleri için vuruğu momenti değişimleri

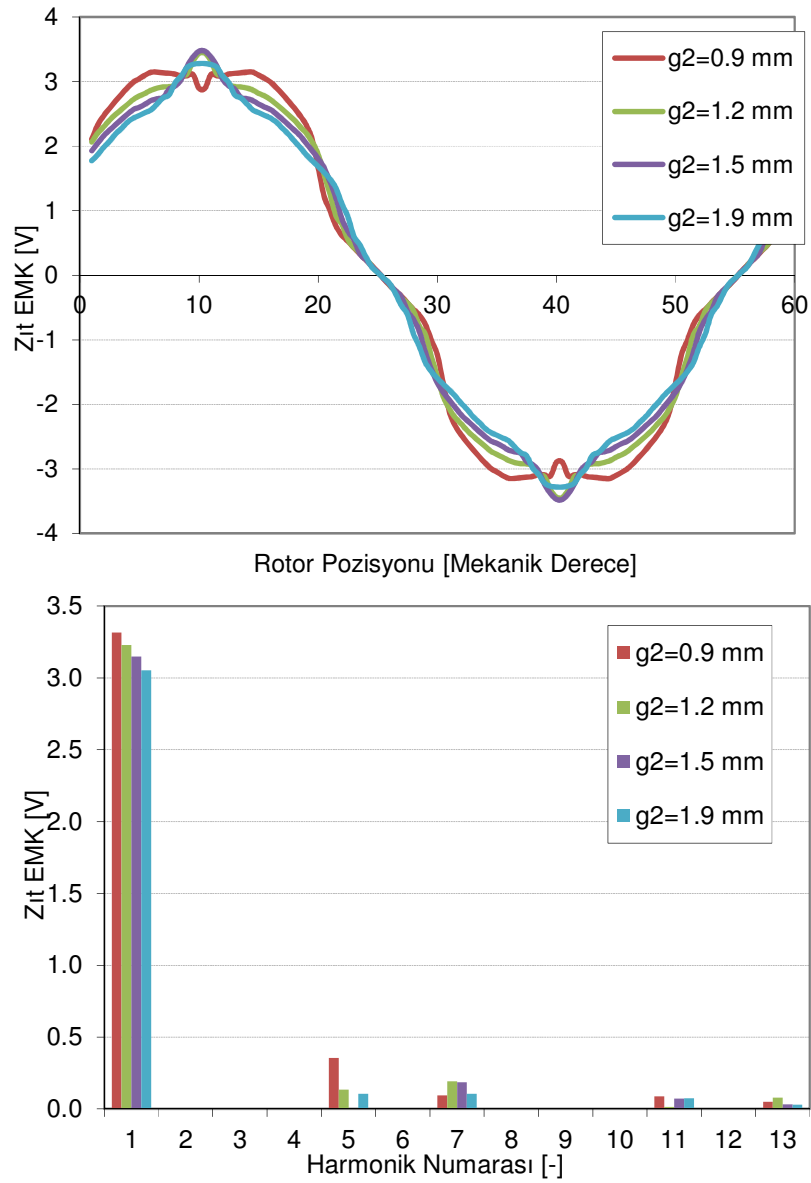


Şekil 4.18. Farklı g_2 parametreleri için vuruntu momenti tepe değerleri



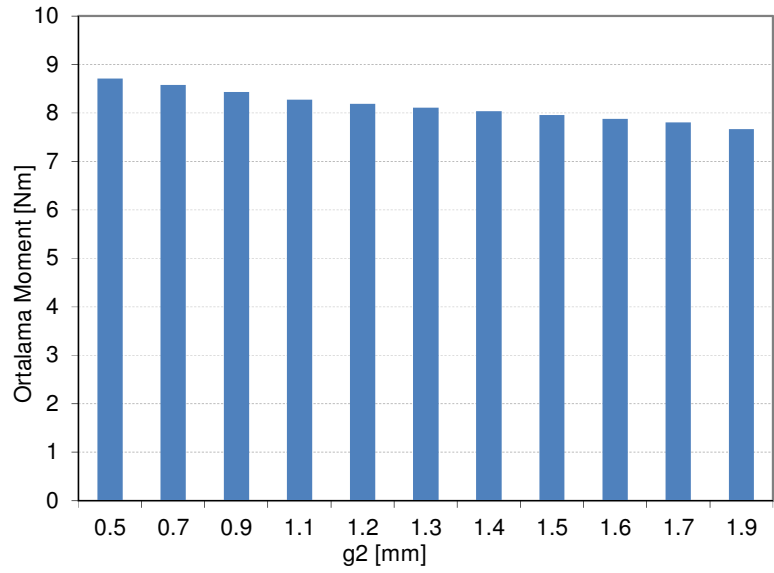
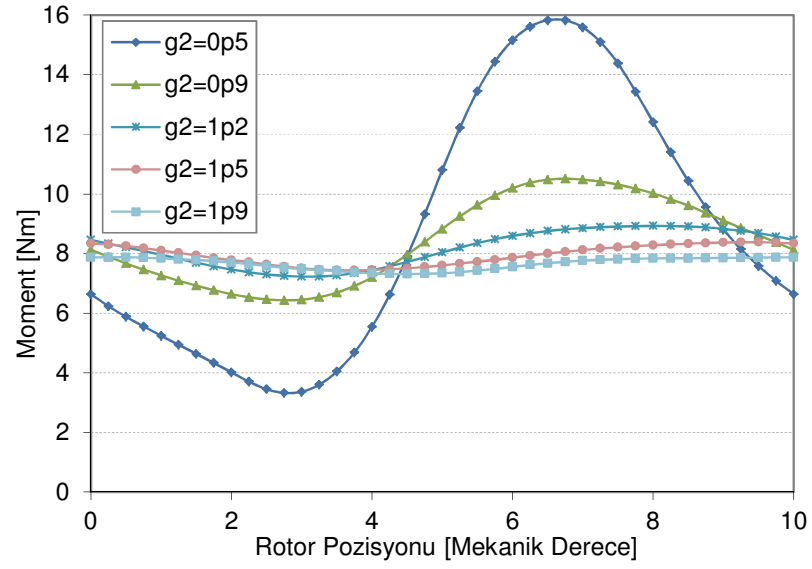
Şekil 4.19. $g_1=0,5\text{mm}$ ve $g_2=1,5\text{mm}$ durumu için vuruntu momentinin değişimi

Ayrıca farklı g_2 değerleri için zıt EMK dalga şeklinin değişimi ve bu dalga şekillerine ait FFT analizleri Şekil 4.20' de gösterilmiştir. Vuruntu momentinin minimum elde edildiği $g_2=1,5$ değeri için 500rpm hızda zıt EMK dalga şekline bakıldığında tamamen sinüzoidal olmadığı, temel harmonik dışında harmonikler içerdiği görülmektedir. Bu sonuç ayrıca yapılan FFT analizinden de görülmektedir. Her ne kadar 3. ve 5. harmonikleri içermese de 7. ve 11. harmonikler dalga şeklini bozucu yönde etki etmiştir.

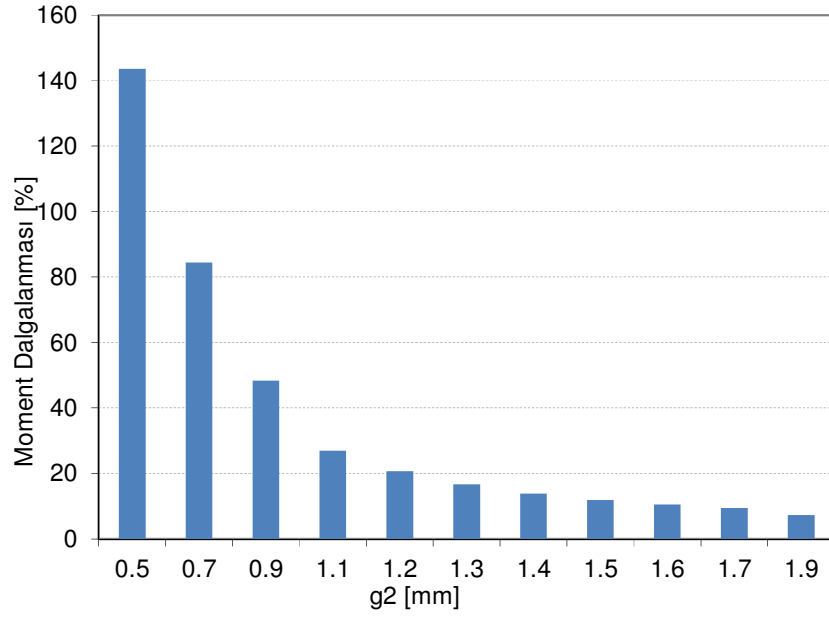


Şekil 4.20. Farklı g_2 parametreleri için zıt EMK şekilleri ve FFT analizleri

Son olarak g_2 parametresinin değiştirilmesi ile çıkış momentinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Çıkış momentlerine ait ortalama değerler ve moment dalgalanmaları kıyaslanmıştır (Şekil 4.21, Şekil 4.22). Standart yapı yani $g_2 = 0,5\text{mm}$ olması durumunda çıkış momenti ortalama değeri $8,71\text{Nm}$ 'iken moment dalgalanması da ortalama momentin %143' ü mertebelerindedir. g_2 'nin minimum vuruntu momentini veren 1.5mm değeri için elde edilen ortalama moment ise bir miktar düşerek $7,95\text{Nm}$ seviyelerine inerken moment dalgalanması da ortalama momente göre %11,86 seviyelerine inmiştir.



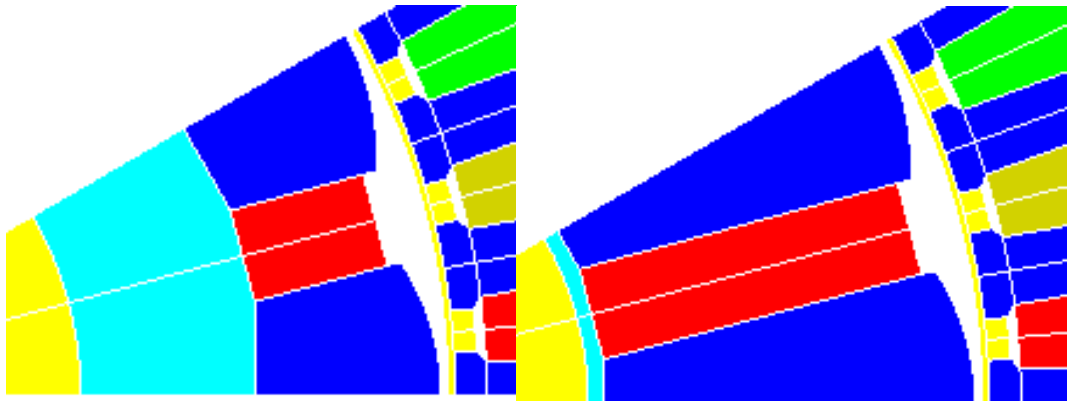
Şekil 4.21. g_2 parametreleri için çıkış momentinin değişimi ve ortalama değerleri



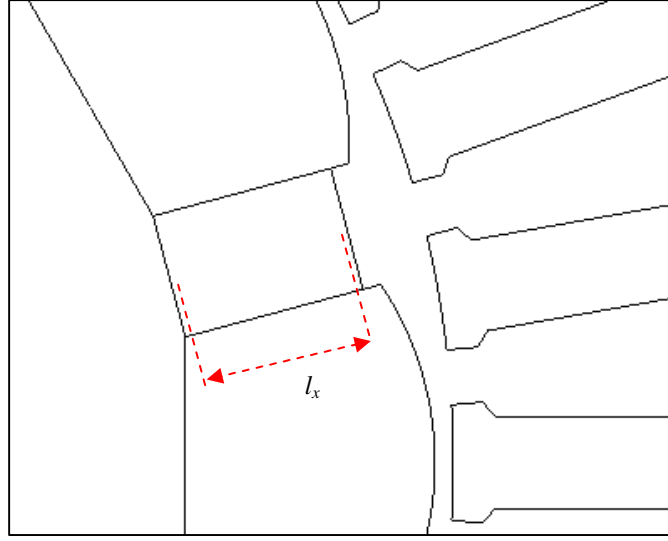
Şekil 4.22. Farklı g_2 ' ler için moment dalgalanmalarının yüzdesi

4.3.3. Çubuk tip mıknatıs uzunluğu optimizasyonu

Standart çubuk tip yapıda belirlenen problemlerin giderilmesi için uygulanan bir diğer tasarım tekniği de mıknatıs uzunluğunun değiştirilmesidir. Şekil 4.23' de iki farklı mıknatıs uzunluğuna sahip yapıya ait SEA modelleri verilmiştir. Bir önceki çalışmada elde edilen minimum vurutuyu veren $g_2=1,5mm$ değeri kullanılarak mıknatıs uzunluğu l_x olarak alınmış (Şekil 4.26) ve bu parametrenin değişimiyle zıt EMK' nin nasıl değiştiği incelenmiştir.

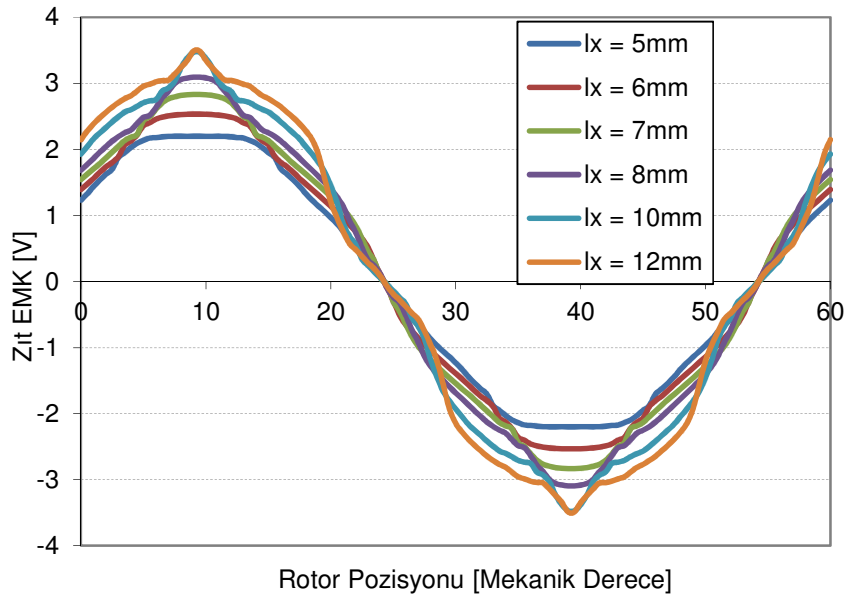


Şekil 4.23. Farklı mıknatıs uzunluğuna sahip yapılar

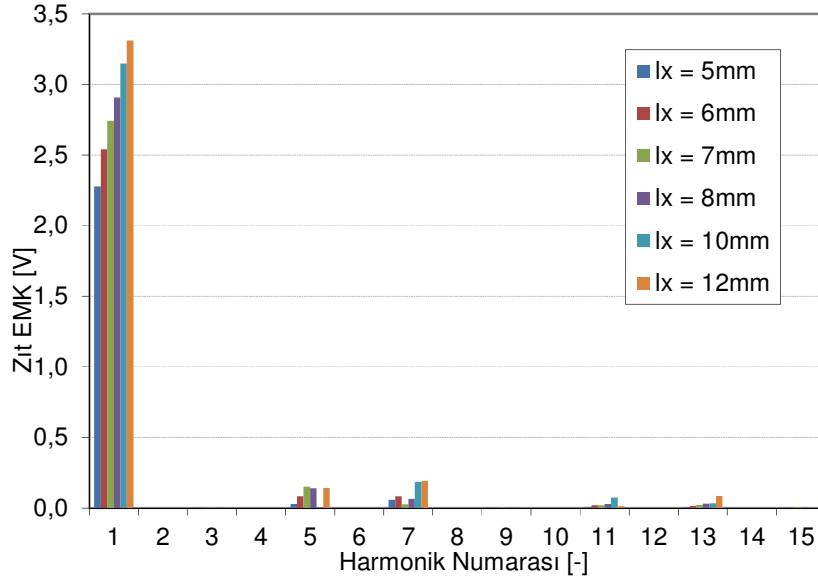


Şekil 4.24. Mıknatis uzunluğu l_x ' in geometrik anlamı

Her biri 500 rpm hız için gerçekleştirilen analizler sonucunda farklı mıknatis uzunlukları için elde edilen zıt EMK hat gerilim dalga şekilleri ve bu dalga şekillerine ait FFT analizleri Şekil' de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere tamamen sinüzoidal bir yapı görülmektedir. Bu durum FFT analizlerinden de görülmektedir. Özellikle 5. ve 7. harmonikler etkin olup, bu harmonikler hat gerilimi dalga şeklini bozarak sinüzoidallikten uzaklaştırmaktadırlar.



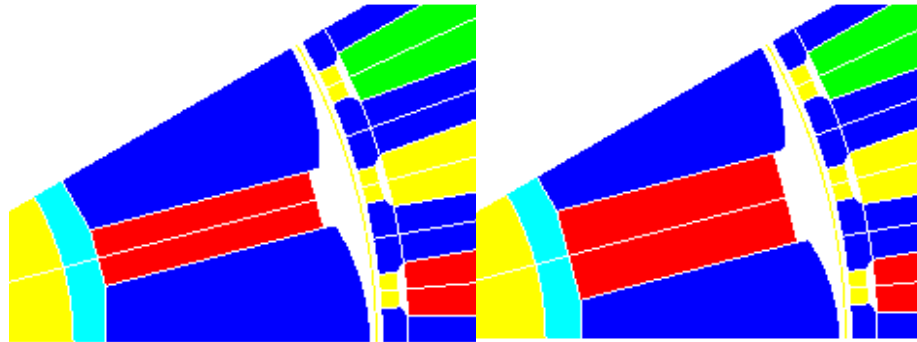
Şekil 4.25. l_x değerleri için zıt EMK değişimi ve FFT analizleri



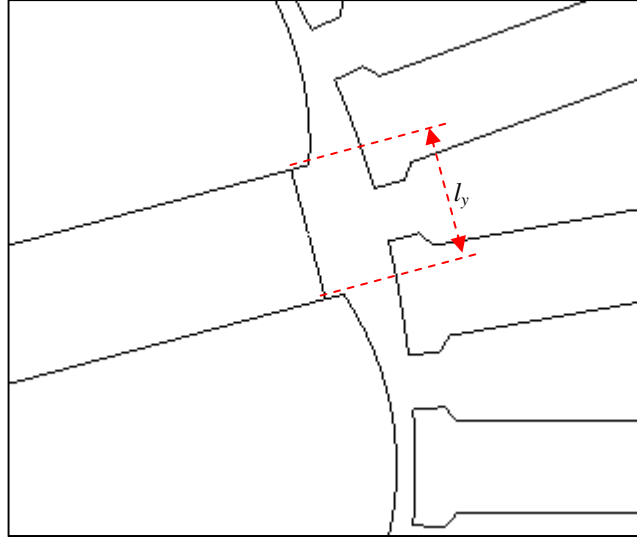
Şekil 4.25. (Devamı) l_x değerleri için zıt EMK değişimi ve FFT analizleri

4.3.4. Çubuk tip mıknatıs genişliği optimizasyonu

Uygulanan bir diğer tasarım tekniği de mıknatıs genişliğinin (adımının) değiştirilmesidir. Farklı mıknatıs adımları için oluşturulmuş SEA modelleri Şekil 4.26’ de gösterilmiştir. Mıknatıs genişliği l_y olarak isimlendirilmiştir (Şekil 4.27). Mıknatıs genişliği farklı değerlere alınarak zıt EMK hat gerilimlerine bakılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak aynı grafik üzerinde gösterilmiştir (Şekil 4.28). Burada da g_2 değeri 1.5mm olarak alınmıştır.

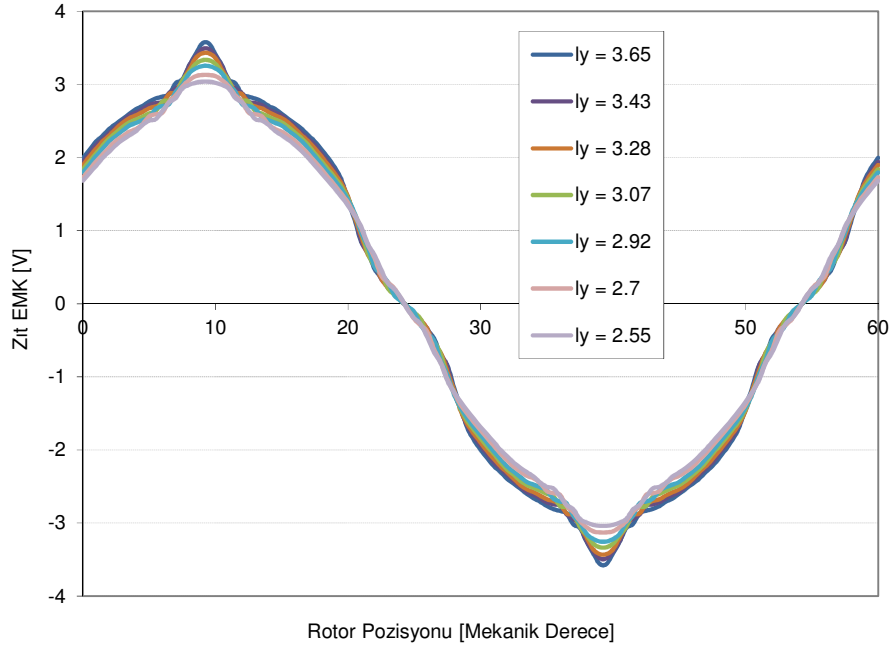


Şekil 4.26. Farklı mıknatıs genişliğine sahip yapılar



Şekil 4.27. Mıknatıs genişliği l_y 'nin geometrik anlamı

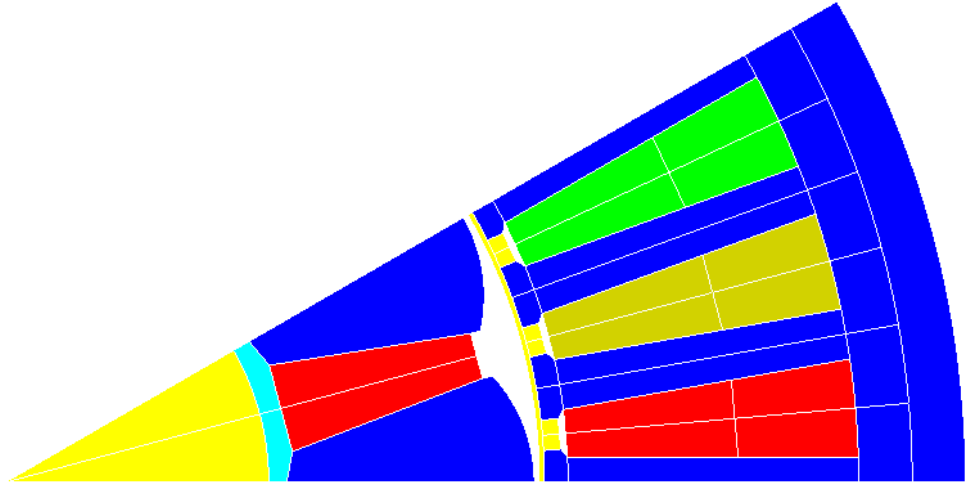
Her biri 500 rpm hız için gerçekleştirilen analizler sonucunda farklı mıknatıs genişlikleri için elde edilen zıt EMK hat gerilim dalga şekilleri Şekil 4.28' da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere tamamen sinüzoidal bir yapı görülememektedir. Bu durum FFT analizlerinden de görülmektedir. Özellikle 5. ve 7. harmonikler etkin olup, bu harmonikler hat gerilimi dalga şeklini bozarak sinüzoidallikten uzaklaştırmaktadırlar.



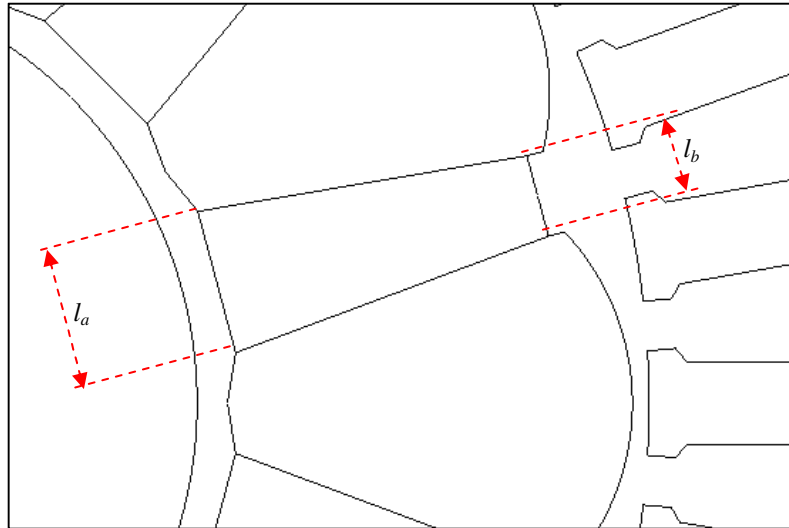
Şekil 4.28. Farklı l_y değerleri için zıt EMK şekillerinin değişimi

4.3.5. Çubuk tip yamuk mıknatıslı yapı

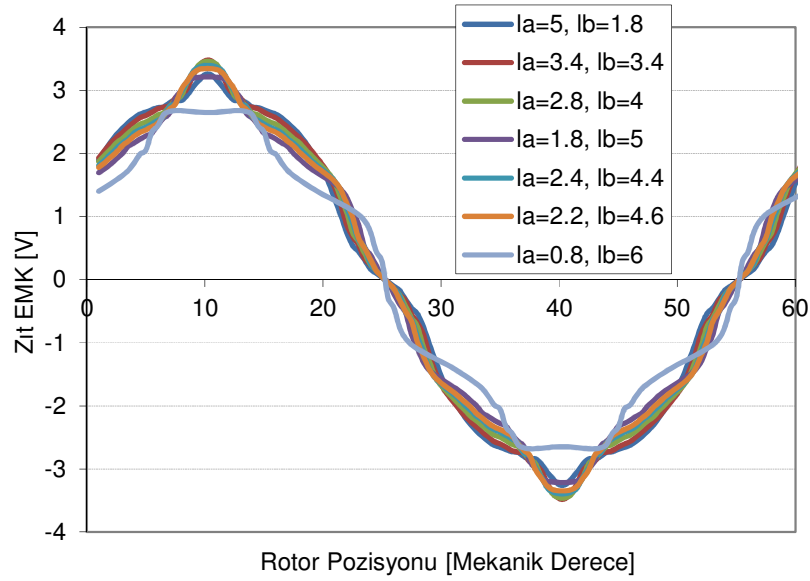
Bu tasarım tekniğinde mıknatıs şekli yamuk şekline getirilmiş ve yamuğun açısı değiştirilerek etkisine bakılmıştır (Şekil 4.29). Bu teknikte de g_2 değeri 1,5mm olarak alınmıştır. Mıknatıs yüksekliği sabit tutularak sadece alt (l_a) ve üst (l_b) kenar uzunlukları değiştirilerek zıt EMK dalga şeklinin değişimi incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Şekil 4.31). Şekilden de görüldüğü üzere sinüzoidale yakın bir dalga şekli görülmemektedir.



Şekil 4.29. Yamuk mıknatıslı yapı



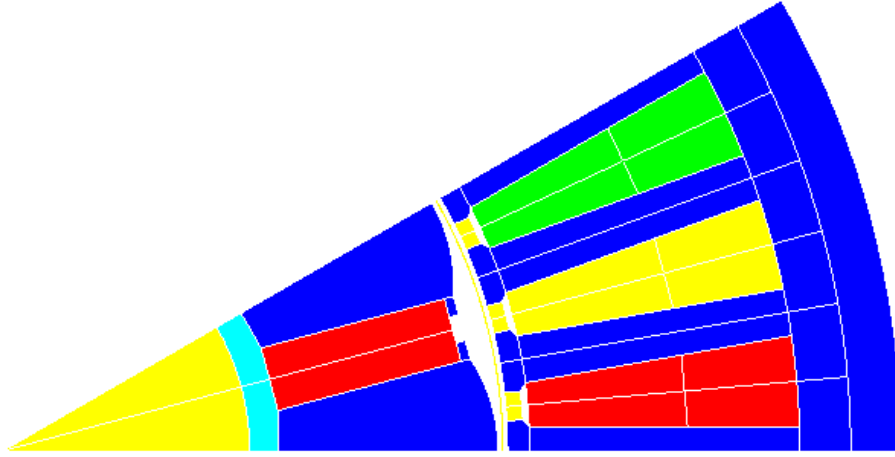
Şekil 4.30. Yamuk mıknatıslı yapının değiştirilen l_a ve l_b parametreleri



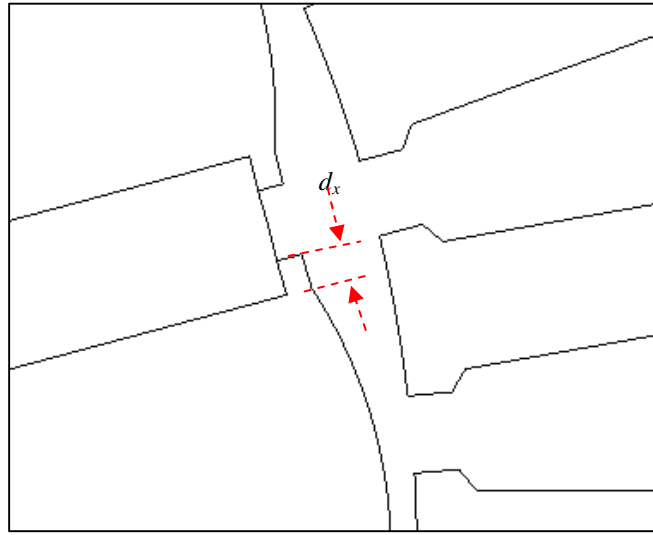
Şekil 4.31. Farklı l_a ve l_b parametreleri için zıt EMK değişimi

4.3.6. Çubuk tip diş eklenmiş yapı

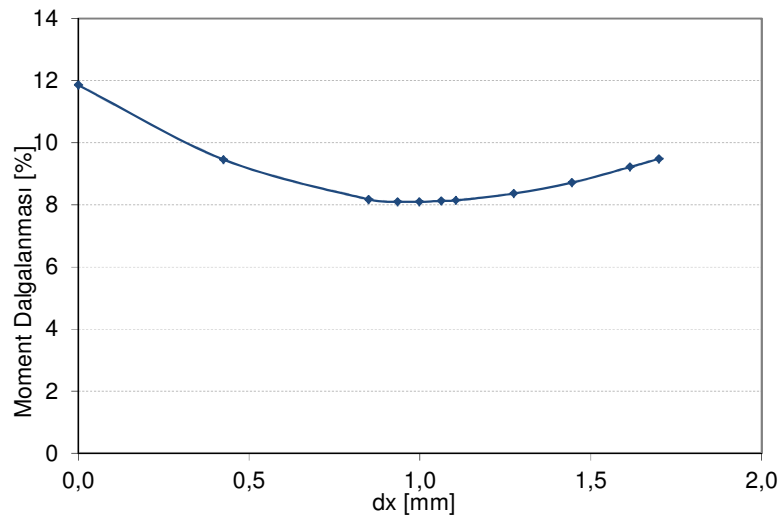
Bu tasarım tekniğinde mıknatıs üst kısmına farklı uzunluklarda diş eklenmiş ve etkileri incelenmiştir (Şekil 4.32). Bu teknikte de g_2 değeri 1.5mm olarak alınmış, mıknatıs üzerindeki dişin uzunluğu da d_x ile ifade edilmiştir (Şekil 4.33). Farklı d_x uzunlukları için çıkış momenti dalgalanmasına bakılmış ve d_x ' in 1mm olması durumunda ortalama moment değerine göre moment dalgalanmasının minimum olduğu görülmüştür (Şekil 4.34). Bu noktada moment dalgalanması ortalama momentin %8,1' i mertebelerindedir. Ortalama moment ise 7,74Nm olarak elde edilmiştir. Minimum moment dalgalanmasının elde edildiği d_x değeri için vuruğu momenti (Şekil 4.35) ve 500 rpm hız için zıt EMK dalga şekli (Şekil 4.36) incelenmiştir. Vuruğu momenti tepe değeri 0,07Nm olarak elde edilmiştir. Bu değer ortalama momentin %0,8'i mertebesinde. Bu vuruğu momenti değerinin de oldukça düşük bir değer olduğu söylenebilir. Zıt EMK dalga şekli ise sinüzoidallikten uzaktır. Bu durum FFT analizinden de görülmektedir. 7. ve 11. harmonikler hat gerilimine ait dalga şeklinin sinüzoidallikten uzaklaşmasına neden olmuştur.



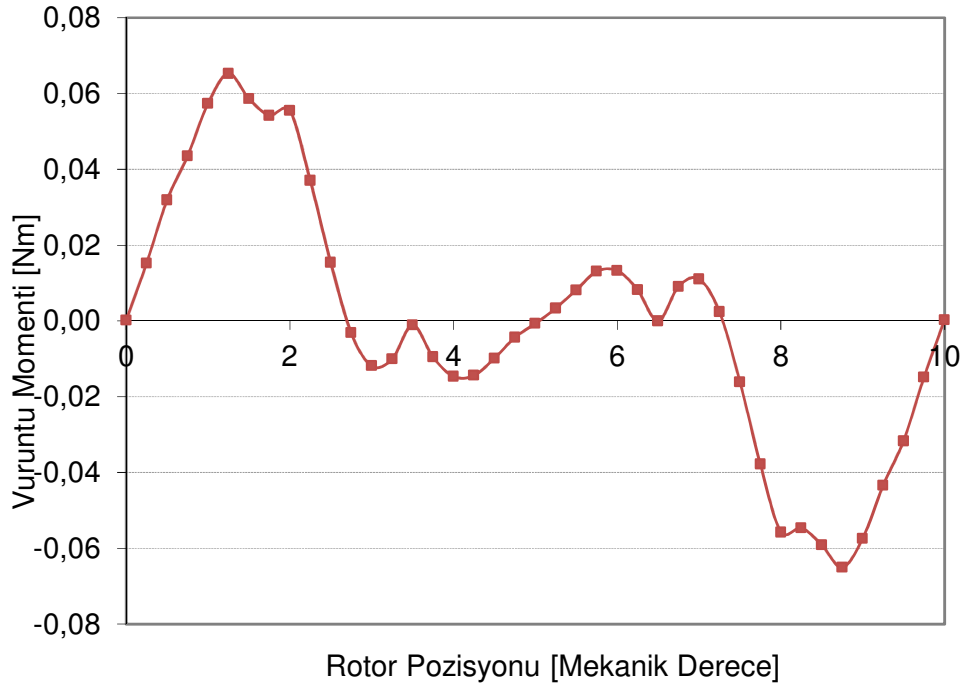
Şekil 4.32. Diş eklenmiş yapı



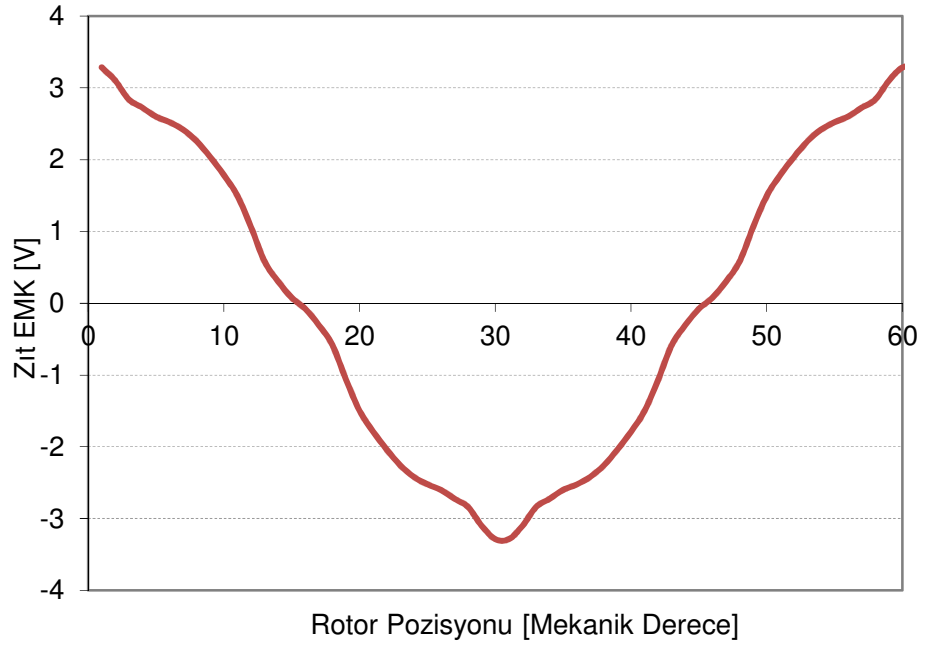
Şekil 4.33. Diş uzunluğu d_x in geometrik anlamı



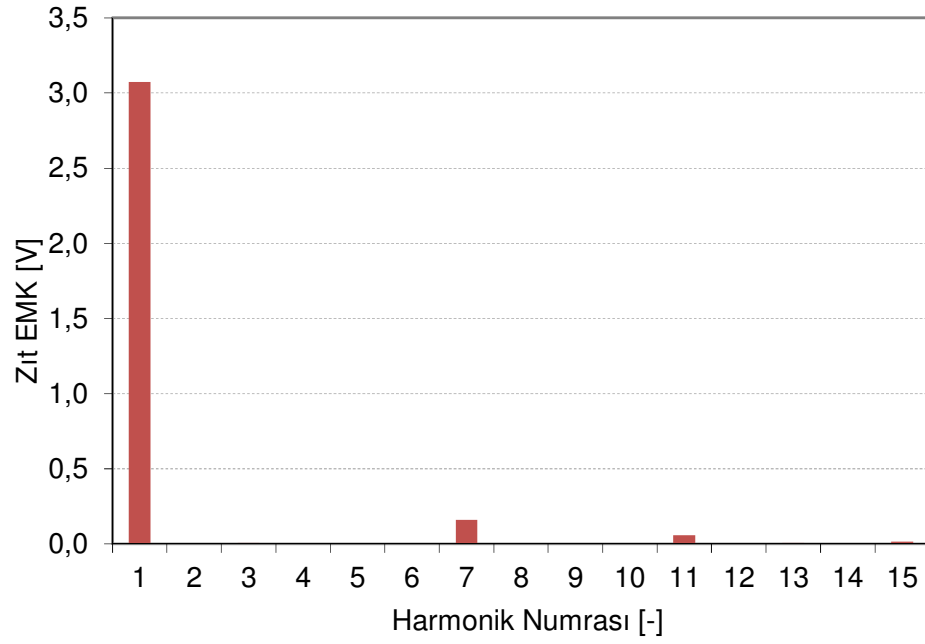
Şekil 4.34. d_x parametresine göre ortalama momentin değişimi



Şekil 4.35. d_x ' in 1mm olması durumunda vuruntu momentinin değişimi



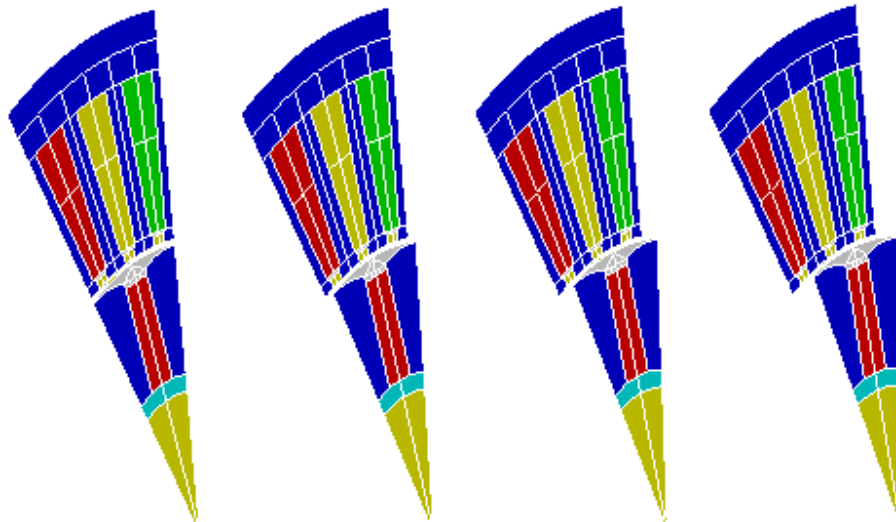
Şekil 4.36. d_x ' in 1mm olması durumunda zıt EMK değişimi ve FFT analizi



Şekil 4.36. (Devam) d_x ' in 1mm olması durumunda zıt EMK değişimi ve FFT analizi

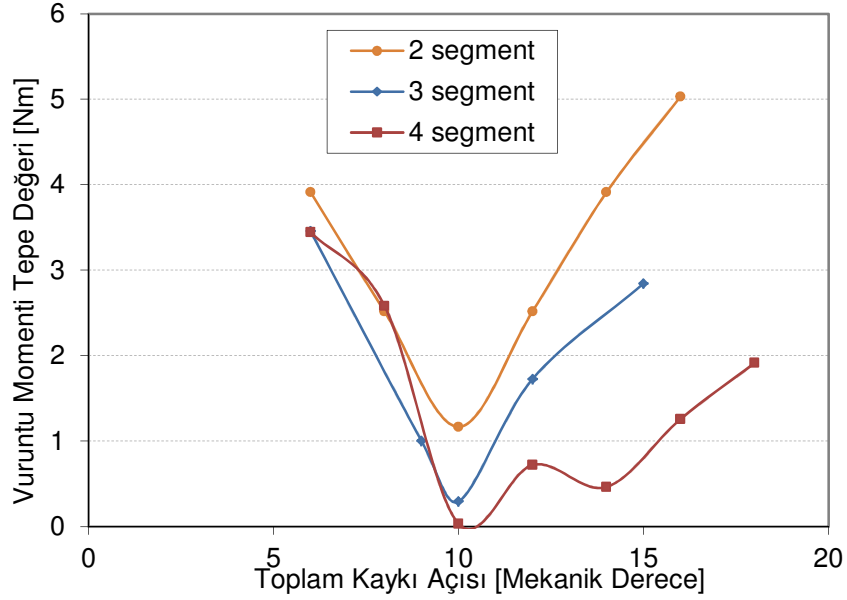
4.3.7. Çubuk tip segmentli yapı

Uygulanan son tasarım tekniği rotorun segmentli yapıdan oluşturulmasıdır. Farklı segment sayıları ve farklı kaykık açıları denenerek en iyi sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Rotoru 4 segmentten oluşan ve toplamda 10 derece kaykık uygulanmış motora ait sonlu elemanlar modeli Şekil 4.37' de gösterilmiştir [20-22].



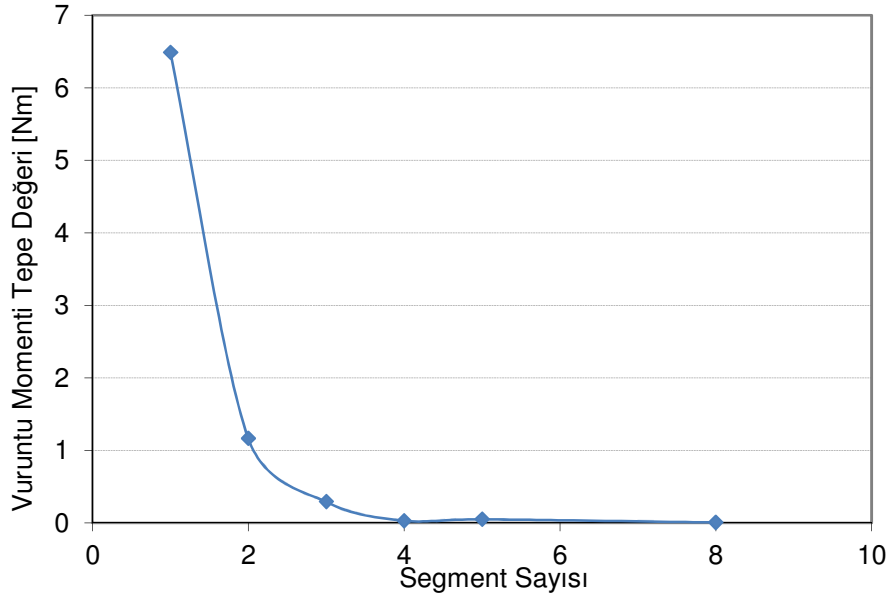
Şekil 4.37. 4 segmentli yapı sonlu elemanlar modeli

Farklı segment sayıları için farklı toplam kaykđ açıları uygulanmış ve her bir durum için vuruñtu momentinin tepe değeri hesaplanmıştır (Şekil 4.38). Elde edilen sonuçlardan görüldüğü üzere minimum vuruñtu momentini tepe değeri toplam kaykđ açısının 10 derece olduğu durum için elde edilmiştir.

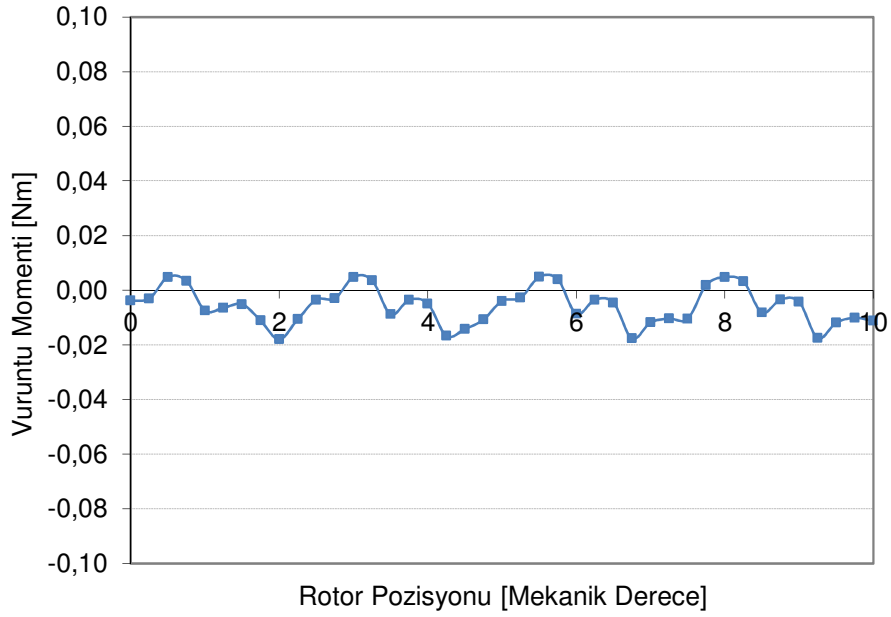


Şekil 4.38. Farklı segment sayıları ve kaykđ açıları için vuruñtu tepe değeri

Toplam kaykđ açısı minimum vuruñtu momentini veren 10 derece olarak alınmış ve farklı segment sayıları için tepe değeri değişimi incelenmiştir (Şekil 4.39). Elde edilen grafikten görüldüğü üzere segment sayısının 4 olduğu durumda vuruñtu momentini değeri neredeyse sıfırlanarak ortadan kaldırılmıştır. Analiz sonucu olarak 0,018 Nm gibi çok küçük bir tepe değeri elde edilmiştir ve bu moment değeri programdan kaynaklanan nümerik hatalardan oluşmaktadır. Bu hatalar olmasaydı vuruñtu momentini ortalama değeri sıfır olduğu görülebilirdi. 4 segmentli durum için vuruñtu momentini değeri Şekil 4.40' de gösterilmiştir. Segment sayısının artmasıyla maliyetin de artacağı göz önüne alınarak 4 segmentli yapı için diğeri analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

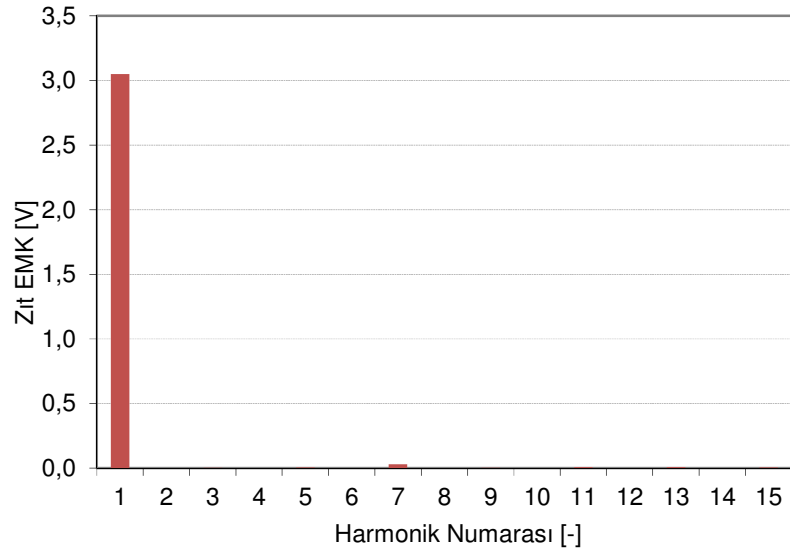
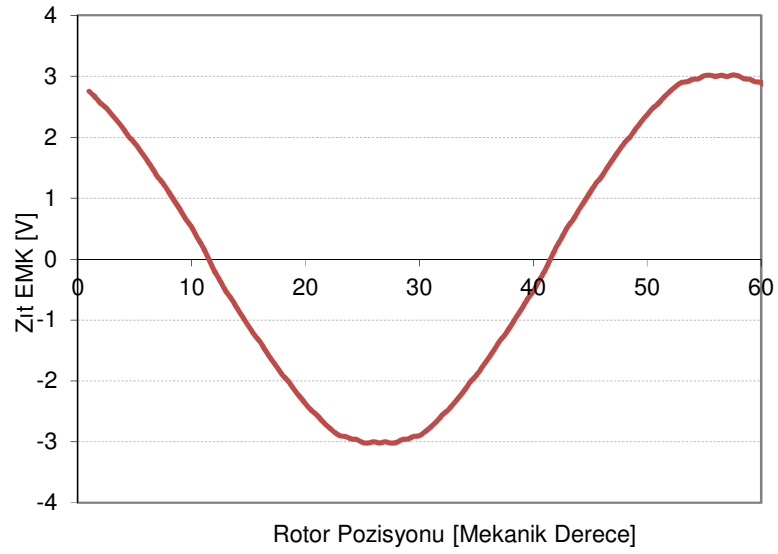


Şekil 4.39. Farklı segment sayıları vuruntu momenti tepe değerlerinin değişimi



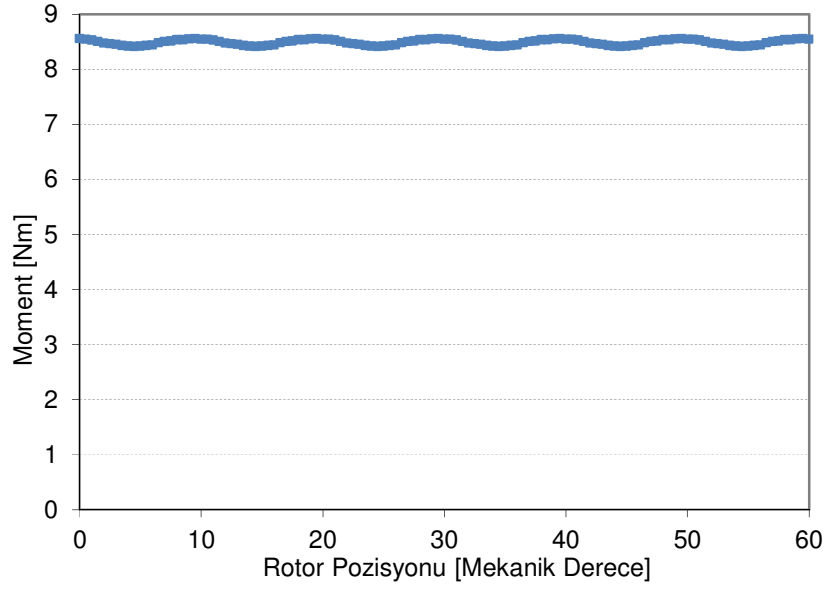
Şekil 4.40. 4 segmentli yapı için vuruntu momentinin değişimi

Toplamda 10 derece kaykısı verilmiş 4 segmentli yapı için 500rpm hızda zıt EMK dalga şekli elde edilmiştir (Şekil 4.41). Şekilden görüldüğü üzere zıt EMK dalga şekli harmonik içermemektedir. Bu durum FFT analizinden de görülmektedir. Zıt EMK dalga şekli temel harmonik dışında harmonik göstermemektedir.



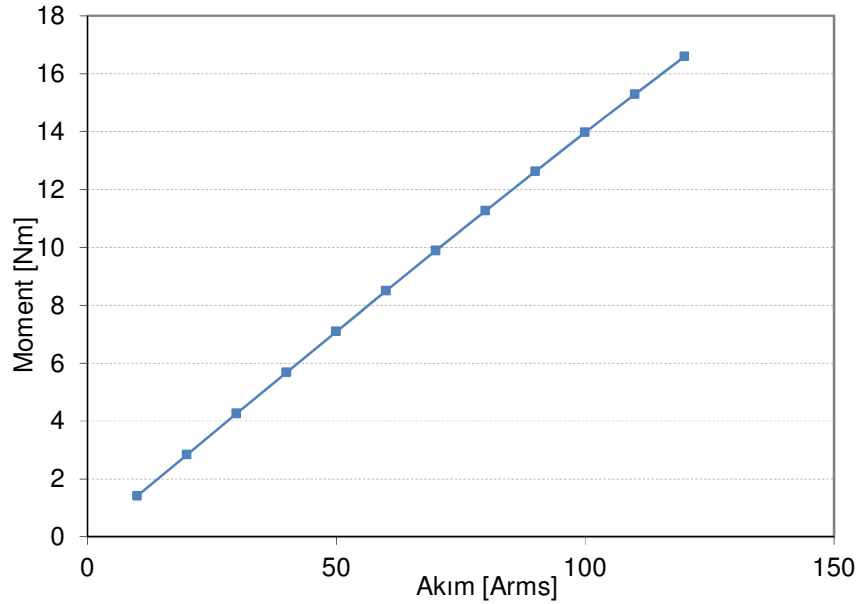
Şekil 4.41. 4 segmentli yapı için zıt EMK şeklinin değişimi ve FFT analizi

Kayıklı yapıya ait çıkış momenti analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen grafik Şekil 4.42' de gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere çıkış momentine ait ortalama moment 8,5Nm civarındadır. Ayrıca çıkış momentindeki dalgalanma ortalama momente göre %1,74 mertebelerindedir. Moment dalgalanmasının ortalama momentin %5' inin altında olmasının tasarım açısından önemli olduğu göz önüne alınırsa elde edilen değer oldukça iyi bir değerdir.



Şekil 4.42. 4 segmentli yapı için çıkış momentinin değişimi

Son olarak kaykılı yapıya ait moment-akım grafiği elde edilmiş ve Şekil 4.43' de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere moment katsayısı 0,14[Nm/Arms] olarak elde edilmiştir.

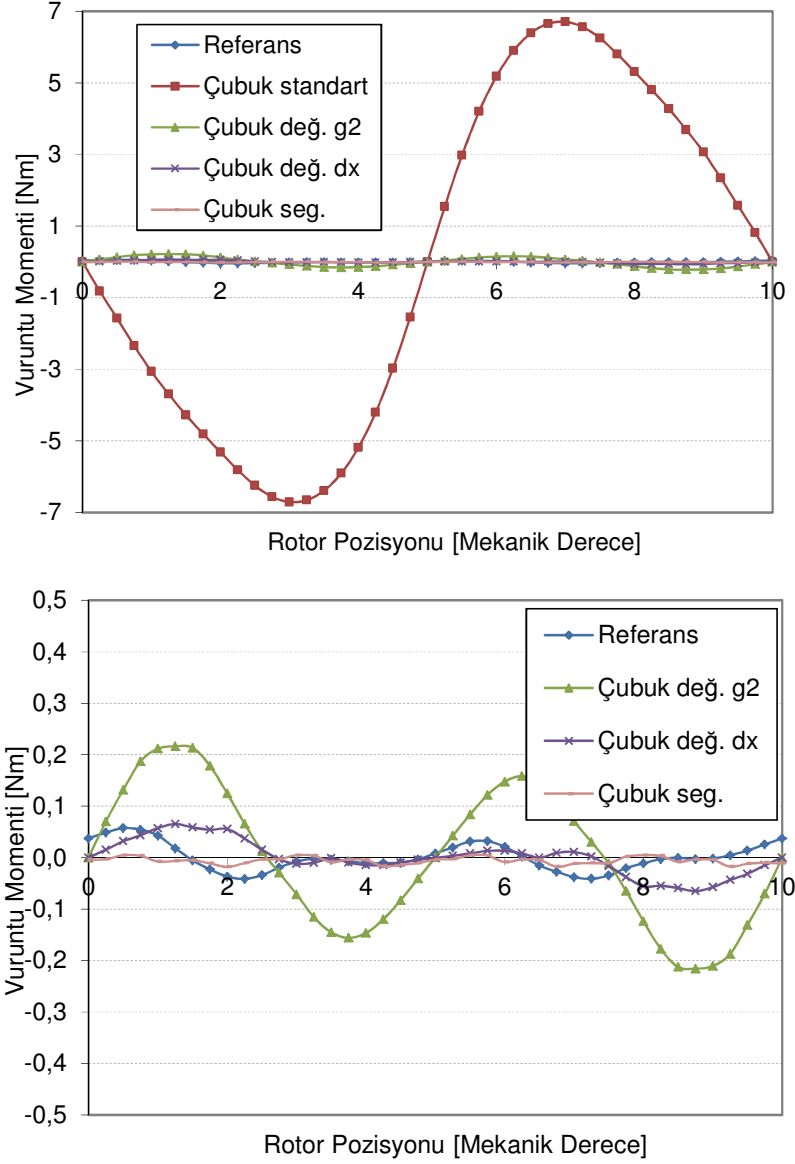


Şekil 4.43. 4 segmentli yapı için moment-akım grafiği

4.4. Analizlerin Karşılaştırılması

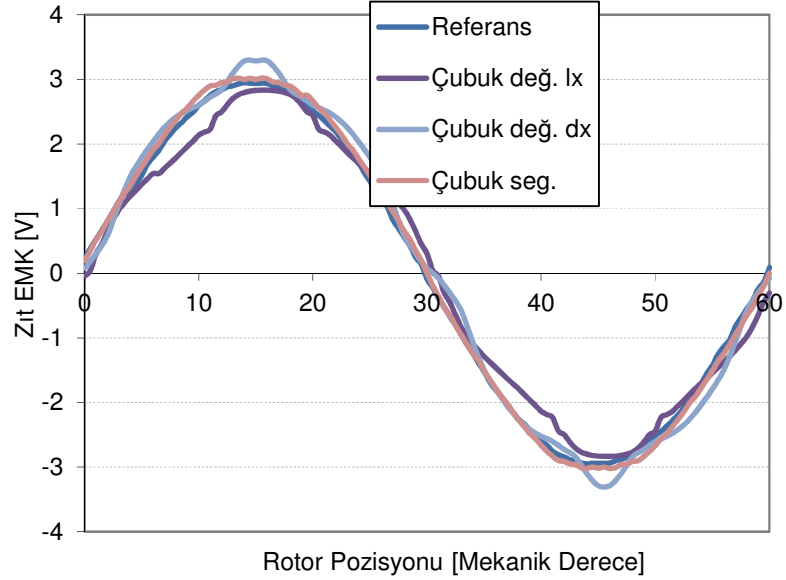
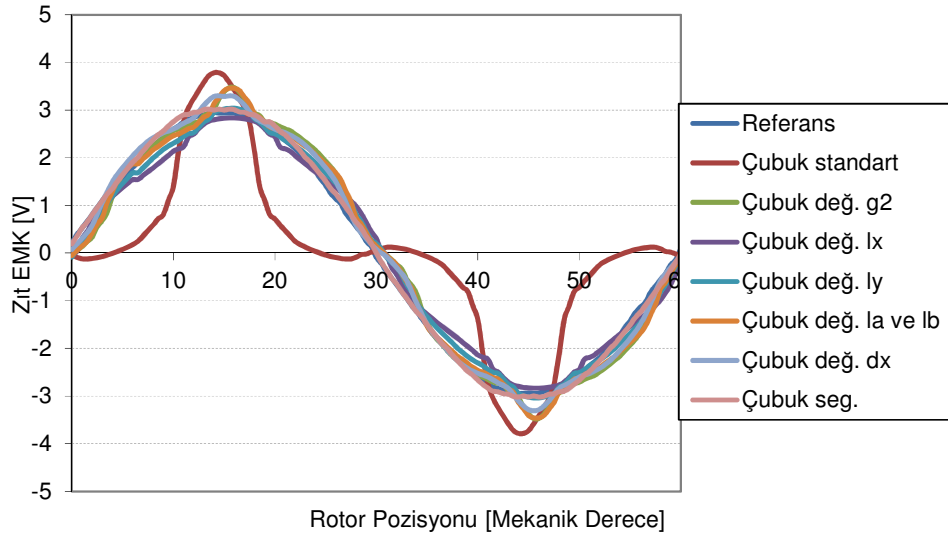
Bu kısımda daha önce analizleri gerçekleştirilen tasarım teknikleri için karşılaştırmalar yapılmış ve en iyi sonucu veren yapı belirlenmiştir. Yapılan ilk

karşılaştırma vuruğu momenti karşılaştırmasıdır. Vuruğu momentine ait karşılaştırma Şekil 4.44' de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere standart tip çubuk mknatıslı yapıda tepe değeri 6,71 [Nm] olan çok büyük bir vuruğu momenti gözlenmektedir. En düşük vuruğu momenti ise 4 segmentli yapıdan elde edilmiştir. Bu yapı için vuruğu momenti tepe değeri de 0,018[Nm] gibi çok küçük bir değerdir.



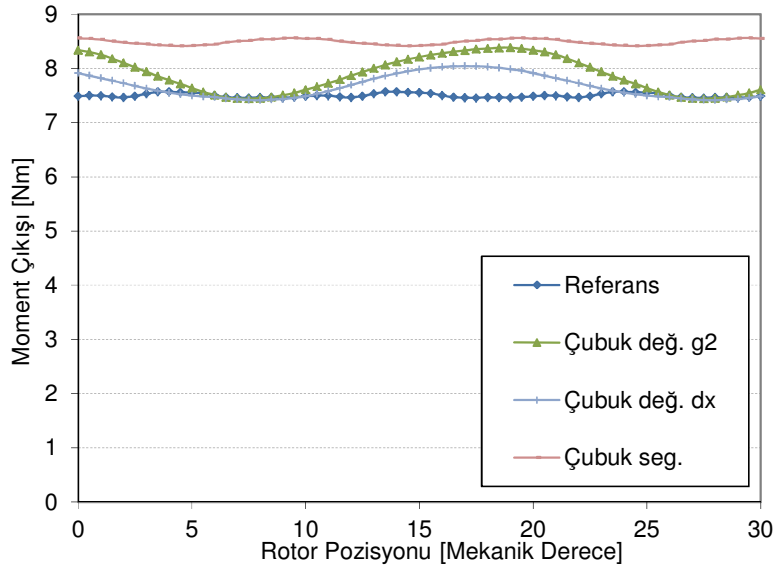
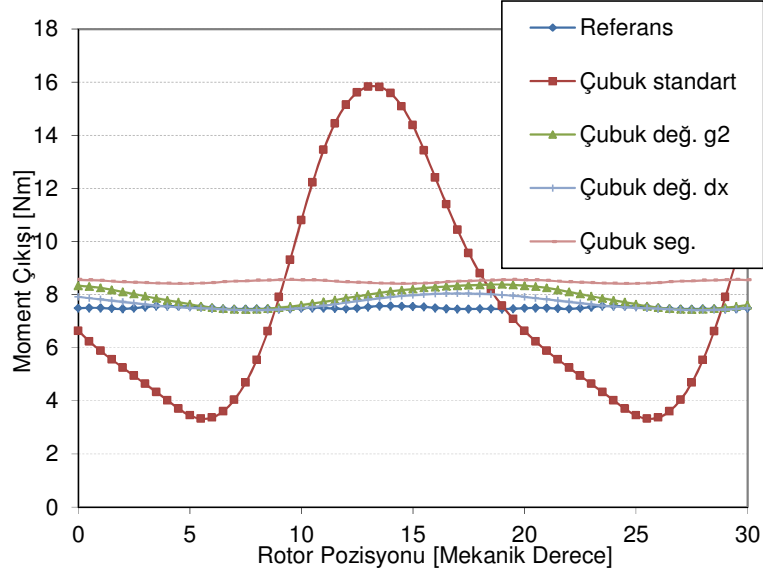
Şekil 4.44. Vuruğu momentinin karşılaştırılması

Yapılara ait zıt EMK' dalga şekillerine ait karşılaştırması ise 500 rpm hız için Şekil 4.45' de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere sinyaller arasında sinüzoidallikten en uzak yapı yine standart çubuk tip yapıdır. En iyi sonuç da yine 4 segmentli yapıdan elde edilmiştir.



Şekil 4.45. Zıt EMK' nın karşılaştırılması

Moment çıkışı için de benzer bir karşılaştırma yapılmıştır. Karşılaştırma Şekil 4.46' da gösterilmiştir. Çıkış momentinde de yine en kötü sonuç standart çubuk tipli yapıdan elde edilmiştir. En iyi sonucu ise yine 4 segmentli yapı vermiştir. 4 segmentli yapı için çıkış momentini ortalaması 8,5 [Nm], moment dalgalanması ise ortalama momente göre %1,74 mertebelerindedir.



Şekil 4.46. Çıkış momentinin karşılaştırılması

4.5. Sonuçlar

Çubuk tip yapı için farklı 7 tasarım için detaylı sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş ve çeşitli optimizasyonlar yapılarak en iyi sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Yapılan sonlu elemanlar analizi çalışmaları sonucunda hem motor performansı hem de maliyet göz önüne alındığında 4 segmentli yapının bu çalışma için en uygun yapı olduğu kanaatine varılmıştır. Bir sonraki aşamada bu yapı mekanik olarak modellenecek ve prototip üretimine geçmek için gerekli analizler tamamlanacaktır.

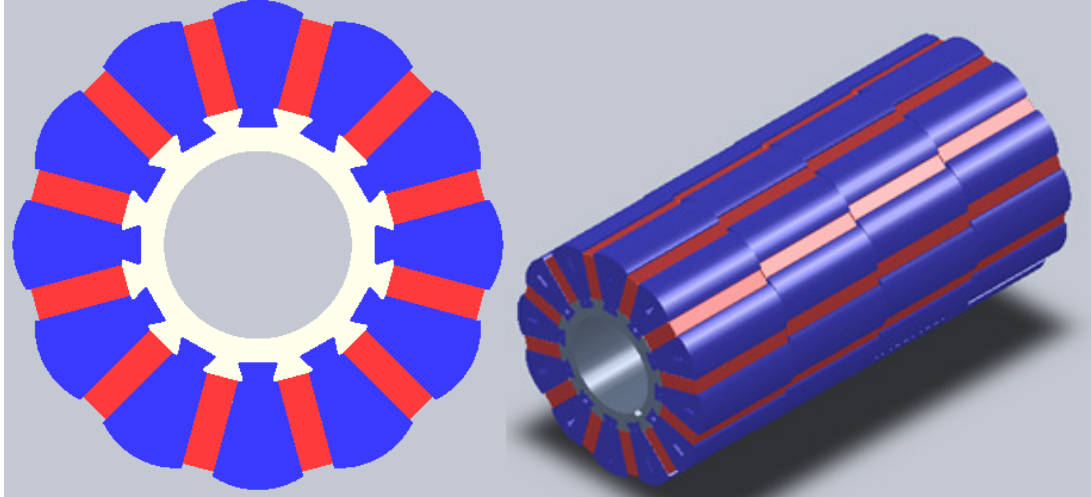
5. DAHİLİ MİKNATISLI MOTOR YAPISAL ANALİZİ

5.1. Giriş

Bu kısımda prototip üretimine karar verilen yapı için yapısal analizler gerçekleştirilecektir. Dahili mıknatıslı yapı için özel bir tasarım yapılmış ve bu tasarımın yüksek hızlarda problem çıkarmayacağı kontrol edilmiştir.

5.2. Yapısal Analiz

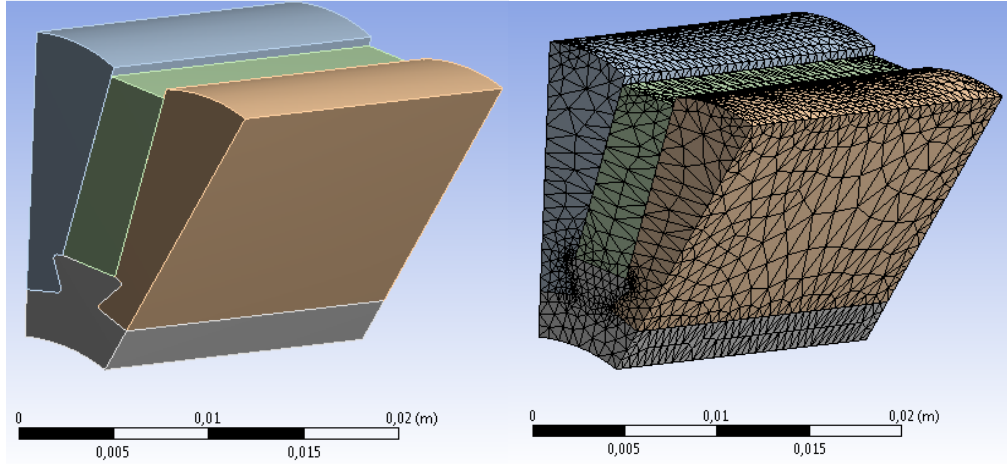
Prototipi üretilecek olan çubuk tip yapıya ait 3 boyutlu çizimler Şekil 5.1' de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere her bir modül arasında açı farkı vardır. Bu açı farkı her bir modül arasında 2,5 derece olup, tüm modelde 10 dereceye karşılık gelmektedir. Ayrıca mıknatısların manyetik olarak kısa devre olmamaları için özel bir tasarım yapılmıştır. Manyetik olmayan bir parça adaptör olarak kullanılmış ve sac parçalar raylı bir sistem gibi bu adaptör üzerine geçirilmiştir.



Şekil 5.1. 3 boyutlu katı modeli

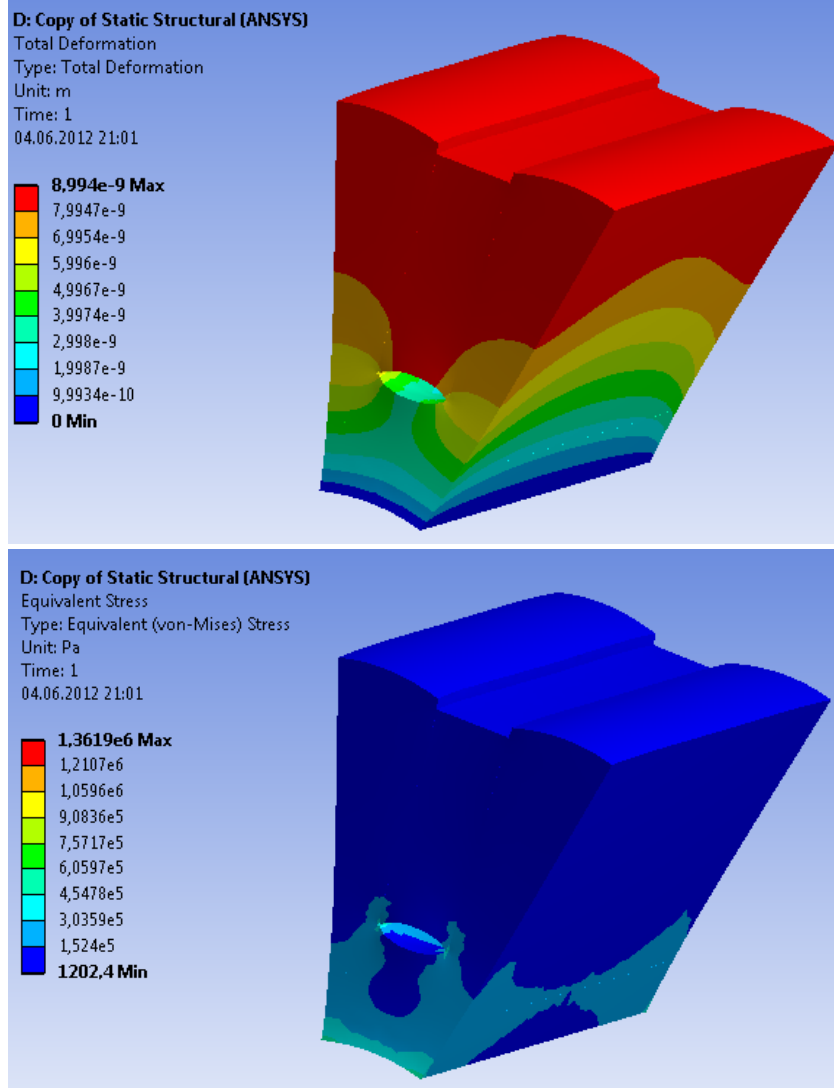
Yapıya ait mekanik analizler gerçekleştirilmiş ve motorun çalışması esnasında mekanik bir problemle karşılaşılıp karşılaşılmayacağı kontrol edilmiştir. Oluşturulan

model ve ağ yapısı Şekil 5.2’ de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere modelin 1 kutupluk kısmı ve 4 modülden de sadece 1 tanesi modellenmiş ve analizi gerçekleştirilmiştir. Simetri özelliği kullanılarak model küçültülmüş ve dolayısıyla ağ yapısı küçültülmüş ve çözüm süresi kısaltılmıştır.



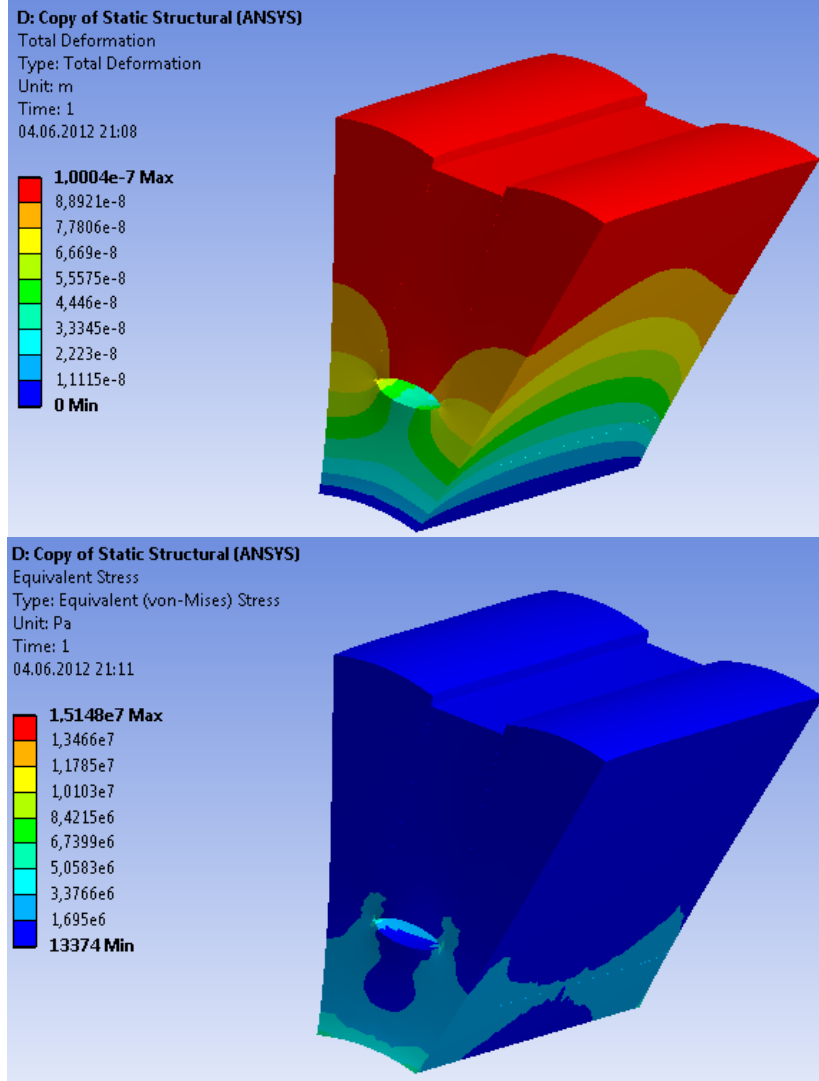
Şekil 5.2. Mekanik sonlu elemanlar modeli ve ağ yapısı

Rotor 3000 rpm hızda çevrilmiş ve model üzerindeki yer değiştirmeler ile gerilme değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 5.3’ den görüldüğü üzere maksimum yer değiştirme $8,99e-6$ mm ve maksimum gerilme değeri de 1,36MPa olarak elde edilmiştir. Bu değerler de motorun çalışması için yada yüksek hızlarda yük altında problem teşkil etmeyecek değerlerdir.



Şekil 5.3. 3000 rpm hız için rotordaki yer değıştirmeler ve gerilme değeri

Rotor gerçekçi olmayan 10000 rpm hızda çevrilmiş ve model üzerindeki yer değıştirmeler ile gerilme değeri tekrar kontrol edilmiştir. Şekil 5.3' den görüldüğü üzere maksimum yer değıştirme $1e-4$ mm ve maksimum gerilme değeri de 15,2MPa olarak elde edilmiştir. Bu değeri de dönüş hızının realistik olmadığı bu durum için bile büyük değeri değildir.



Şekil 5.4. 10000 rpm hız için rotordaki yer değiştirmeler ve gerilme değerleri

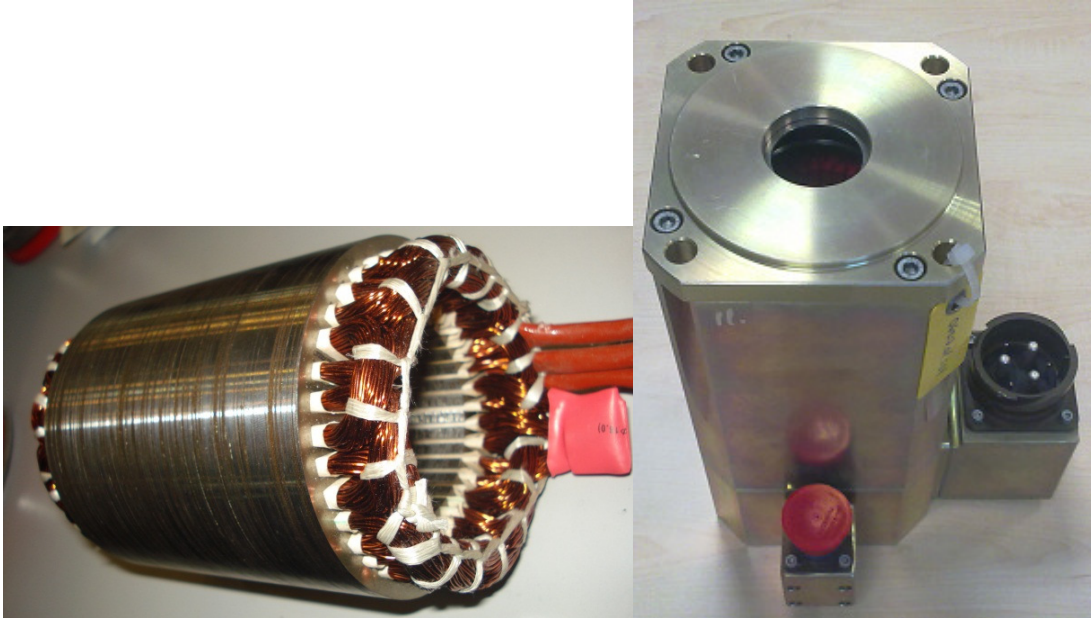
6. DAHİLİ MİKNATISLI MOTOR PROTOTİP ÜRETİMİ VE DENEY DÜZENEĞİNİN KURULMASI

6.1. Giriş

Bu bölümde dahili mıknatıslı motor prototip üretim aşaması hakkında bilgi verilmiş ve üretim esnasında çekilmiş olan fotoğraflarla üretim aşamaları anlatılmıştır. Ayrıca üretilen prototip testlerinin yapılacağı deney düzeneği hakkında bilgi verilmiş ve ne gibi testlerin yapılacağı anlatılmıştır.

6.2. Dahili Mıknatıslı Motor Prototip Üretimi

Dahili mıknatıslı motor prototip üretimi sırasında motora ait gövde, stator ve mil parçaları referans motorunki ile aynı olduğu için hazır olarak satın alınmıştır. Bu kısımlar Şekil 6.1' de gösterilmiştir.

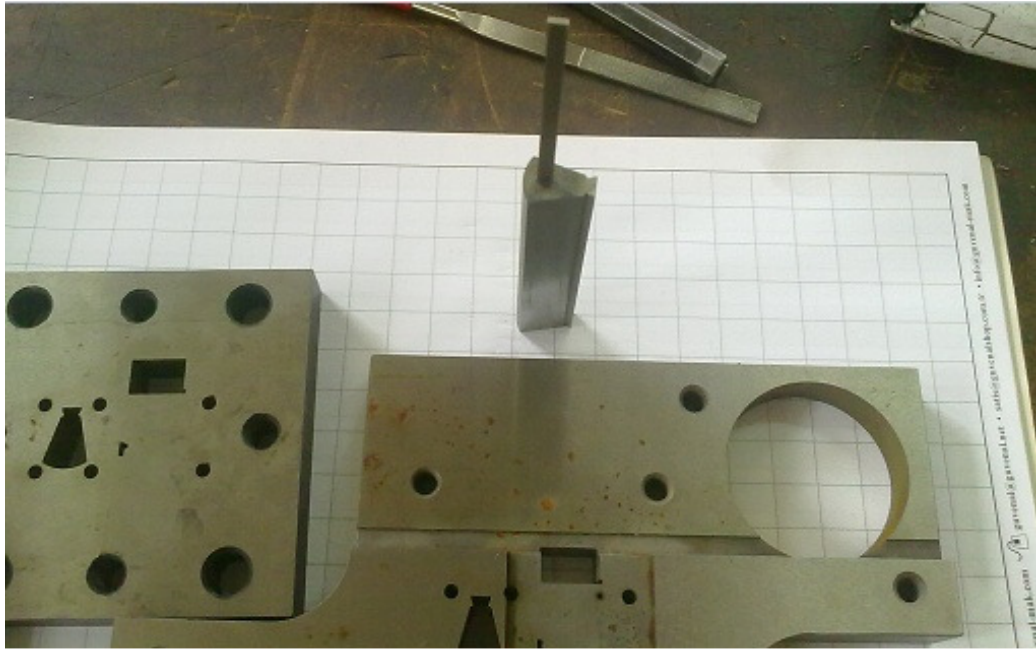


Şekil 6.1. Prototip üretimi gövde ve statora ait görüntüler

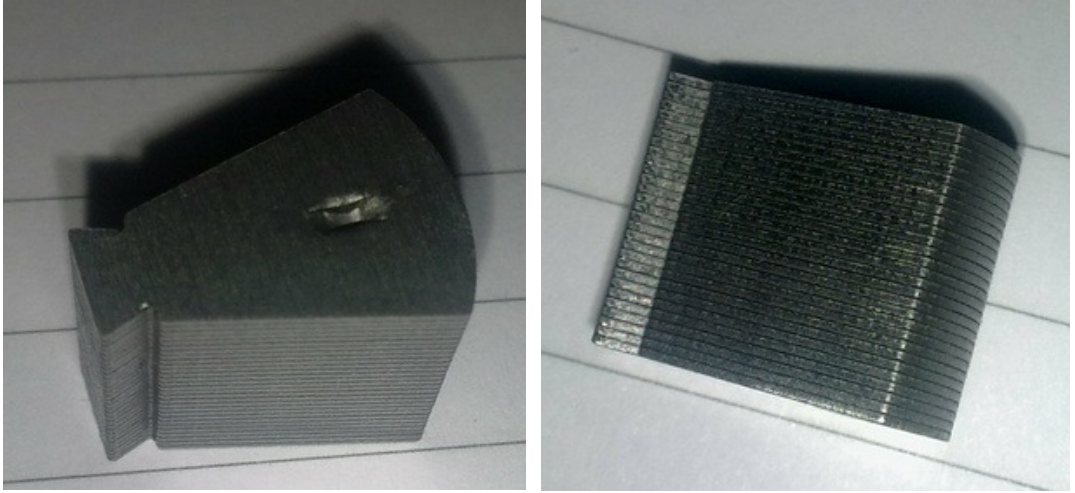
Rotor kısmının üretimi için kesme kalıbı yaptırılmış, bu kalıp kullanılarak sac malzemeler basılmış ve bir araya getirilmiştir. Kalıp üretimi aşaması Şekil 6.2' de

gösterilmiştir. Ayrıca üretilmiş kalıp ile basılan saclardan oluşan rotor yapısındaki segmentler Şekil 6.3' de gösterilmiştir.

Rotor nüvesini oluşturan segmentleri bir arada tutmak için bir adaptör tasarlanmış ve tel erezyon kullanılarak kestirilmiştir (Şekil 6.4). Burada dikkat edilmesi gereken husus adaptör malzemesinin manyetik olmayan bir malzeme olması gerektiğidir. Manyetik olan bir malzeme olması durumunda mıknatıslar kısa devre olacak ve motordan istenen performans elde edilemeyecektir. Bir motor için dört adet adaptör üretilmiş ve hem adaptörlere hem de motor miline açılan kama delikleri sayesinde üretilen bu paketler arasına kaykı verilmesi sağlanmıştır. Segmentleri ve mıknatısları adaptöre monte edilmiş paketlerin mile yerleştirilmiş nihai hali Şekil 6.5' de gösterilmiştir.



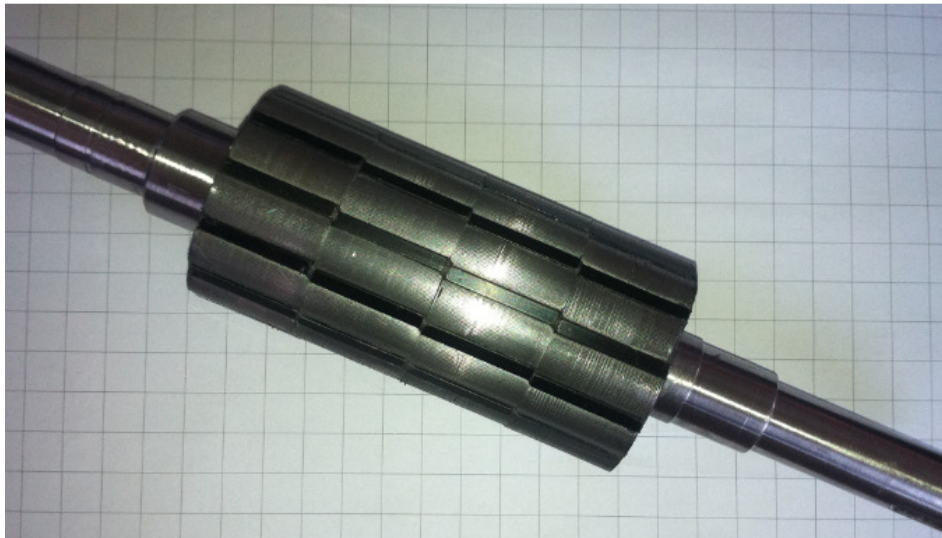
Şekil 6.2. Kalıp üretimi



Şekil 6.3. Üretimi gerçekleştirilmiş rotor segmenti



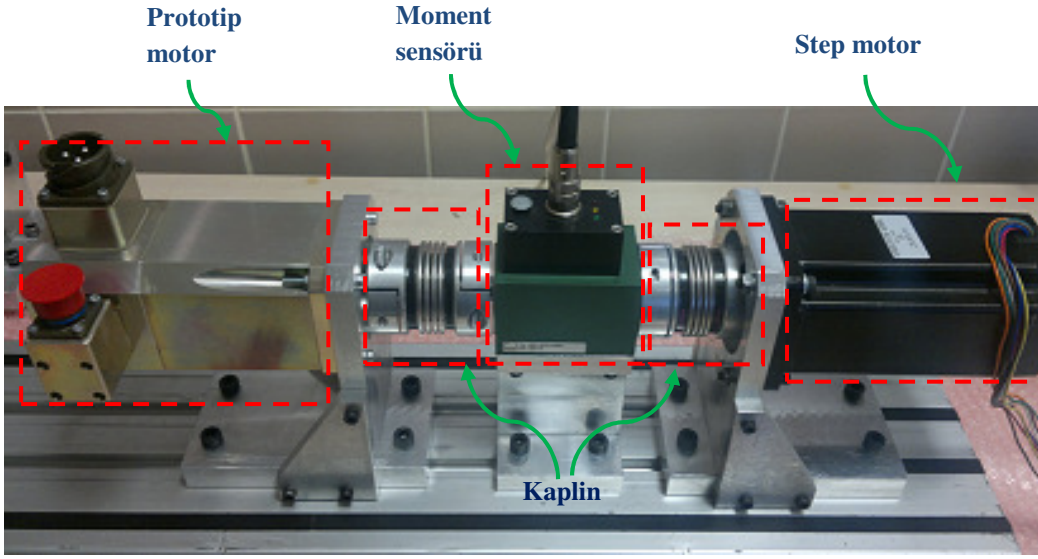
Şekil 6.4. Rotor adaptörü ve segmentlerin adaptöre yerleştirme aşaması



Şekil 6.5. Adaptörlerin mile montajının yapılmış hali

6.3. Deney Düzenegi

Üretilen dahili mıknatıslı motor prototipinin testlerini yapmak amacıyla Şekil 6.6' de görüldüğü gibi bir deney düzenegi oluşturulmuştur. Deney düzeneginde prototip motoru, moment sensörü, step motor ve ara bağlantı elemanları bulunmaktadır. Deney düzenegi kullanılarak 3 farklı test yapılabilmektedir. Bunlar vuru mu momenti ve zıt EMK' nin elde edilebilmesi için yapılan yüksüz durum testleri ve yüklü durum testidir.



Şekil 6.6. Deney düzenegi

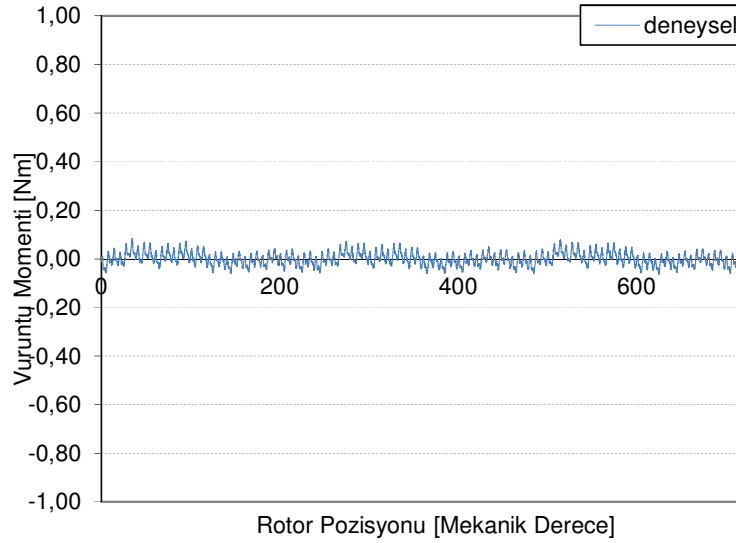
Vuru mu momentini elde etmek amacıyla prototip motoru yüksüz durumdayken çok düşük hızlarda çevrilir ve bu durumda elde edilen moment değerine bakılır. Bu durum için elde edilen moment vuru mu momenti olarak isimlendirilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus çevirme hızının düşük (bir kaç rpm gibi) ve sabit bir hız olmasıdır. Prototip motorunu düşük hızda çevirmek için step motor kullanılmaktadır. Motor 1 rpm hızda çevrilerek prototipte üretilen moment datası sensör yardımıyla okunur ve böylelikle vuru mu momenti elde edilmiş olur. Moment sensörü ve step motora ait özellikler sırasıyla EK-1 ve EK-2' de verilmiştir.

Vuru mu momentine benzer olarak prototip motoru yine yüksüz durumdayken bu sefer vuru mu momentinin aksine motor yüksek hızda çevrilerek o hız için terminaller arasında zıt EMK gerilimi elde edilir. Elde edilen gerilim değeri bir osiloskop yardımıyla veriye çevrilerek elde edilmiş olur.

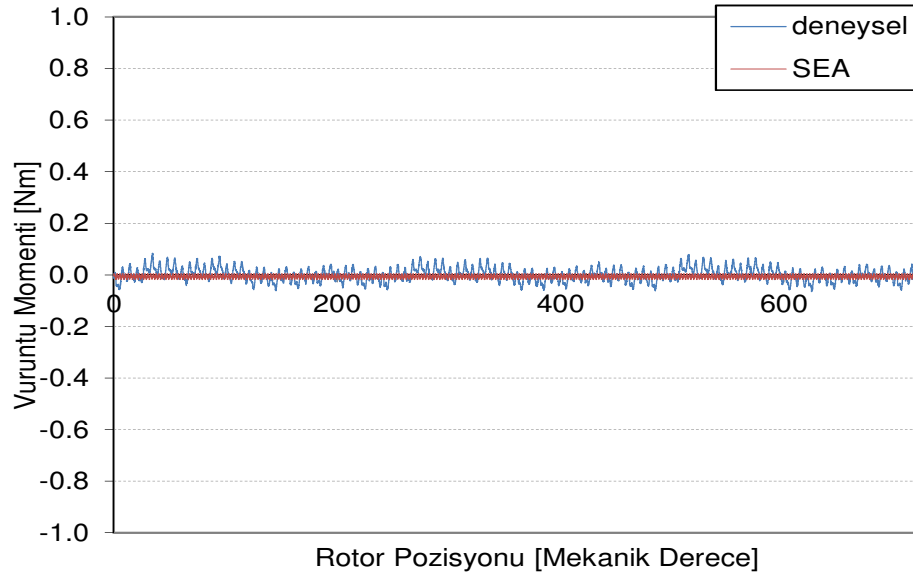
Son olarak deney düzeneği kullanılarak yapılan test yüklü durum testidir. Prototip motorunun yüklenmesi için step motor kullanılmaktadır. Step motor belirli bir hızda ve momentte çevrilerek bir yük oluşturmakta ve diğer tarafta yer alan prototip motorunun yüklenmesini sağlamaktadır. Yükün seviyesi moment sensörü kullanılarak ölçülmekte ve kaydedilmektedir. Farklı hız ve moment değerleri için ölçümler yapılmakta ve motora ait moment hız grafiği çıkarılmaktadır.

6.4. Deneysel Çalışmalar

Deney düzeneği kullanılarak yapılan ilk test vuruntu momenti testidir. Vuruntu momentinin elde edilebilmesi için dahili mıknatıslı motor prototip motoruna hiç enerji vermeden step motor 1 rpm hızda çevrilmiş ve elde edilen moment değerleri kaydedilmiştir. Ölçüm sonucunda elde edilen vuruntu momenti değişimi ve bu değerın analiz sonuçları ile karşılaştırılması sırası ile Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’ da gösterilmiştir.



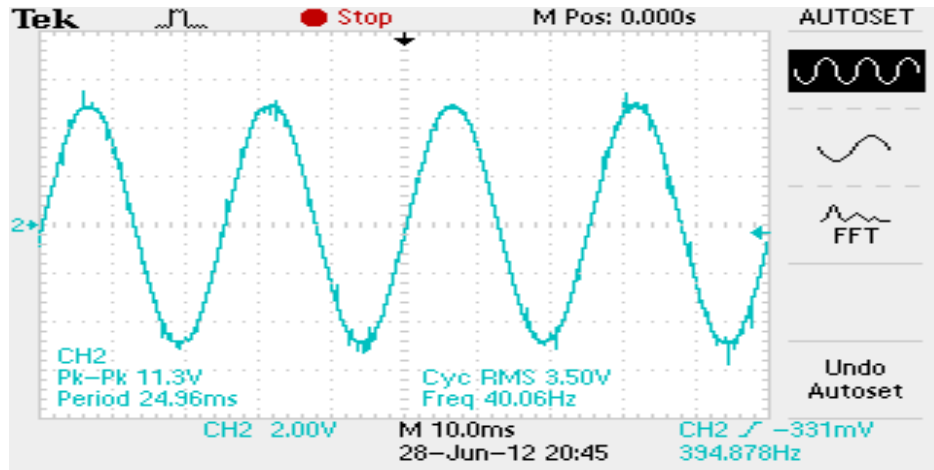
Şekil 6.7. Vuruntu momenti ölçüm sonuçları



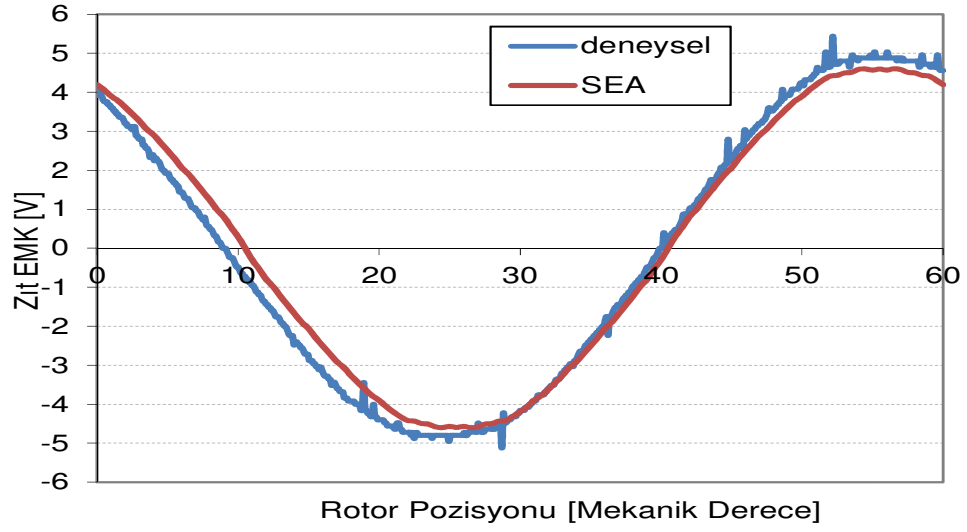
Şekil 6.8. Vuruntu momenti ölçümü ve SEA' inin karşılaştırılması

Şekillerden görüldüğü üzere vuruntu momenti tepe değeri 0.055Nm olup, oldukça küçük değerdir. Vuruntu momenti, anma momenti ortalamasının % 0,65' i mertebelerindedir. Bu değer de sürekli mıknatıslı bir motor için oldukça iyi bir değerdir.

Deney düzeneği kullanılarak yapılan diğer bir test de zıt EMK testleridir. Step motor 400rpm hızda çevrilmiş ve terminaller arasında elde edilen hat gerilimi dalga şekline bakılmıştır. Veriler bir osiloskop yardımıyla kayıt edilmiş ve SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Osiloskop ekran görüntüsü ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırmalar sırasıyla Şekil 6.9 ve Şekil 6.10' de gösterilmiştir.

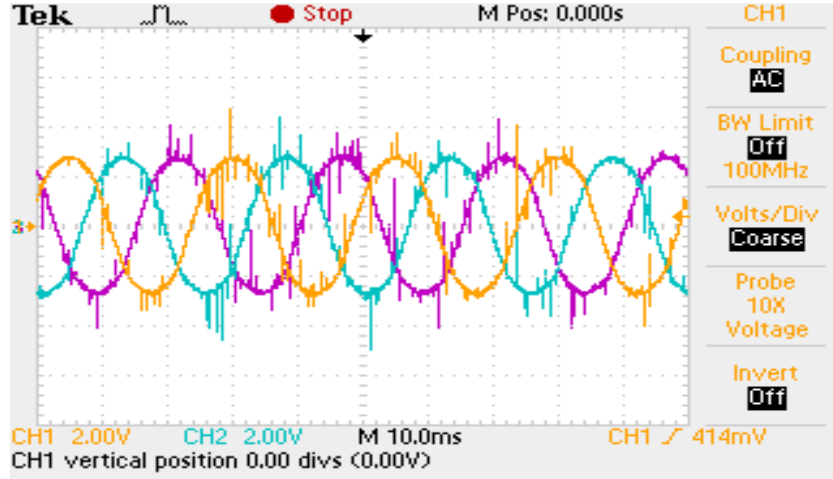


Şekil 6.9. 400 rpm için zıt EMK dalga şekli



Şekil 6.10. Zıt EMK test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

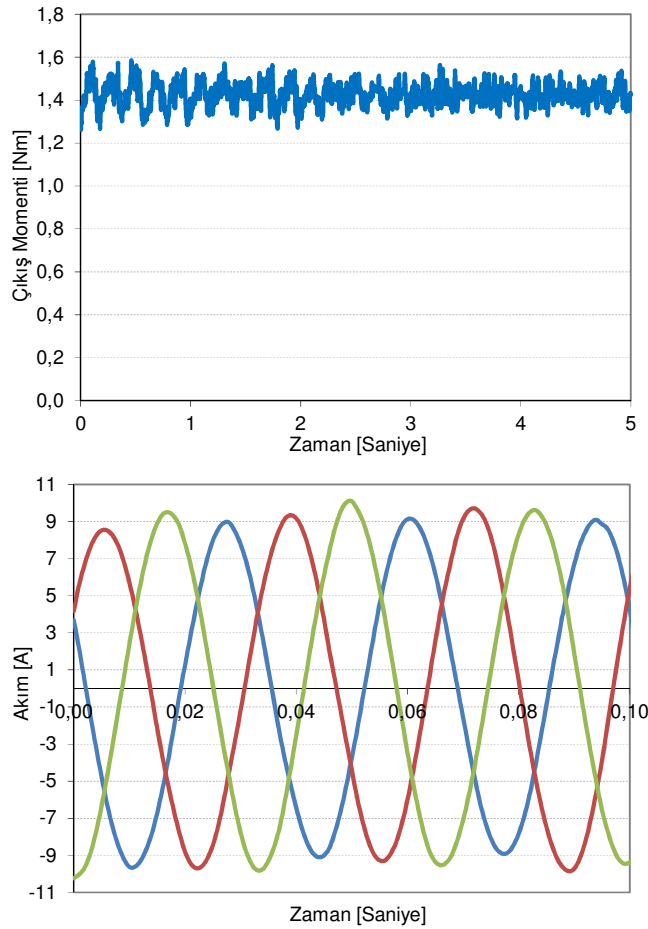
Şekilden görüldüğü üzere simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların dalga formları bir birlerine oldukça yakındır. Tepe değerleri arasında %8' lik bir fark bulunmaktadır. Bu farkın da üretim esnasında yapılan hatalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca her üç fazdan ölçüm alınarak fazlar arasında olması gereken 120 derece açı farkı gösterilmiştir (Şekil 6.11). Şekilden de görüldüğü üzere fazlar arasında eşit ve 120 derecelik bir faz farkı vardır.



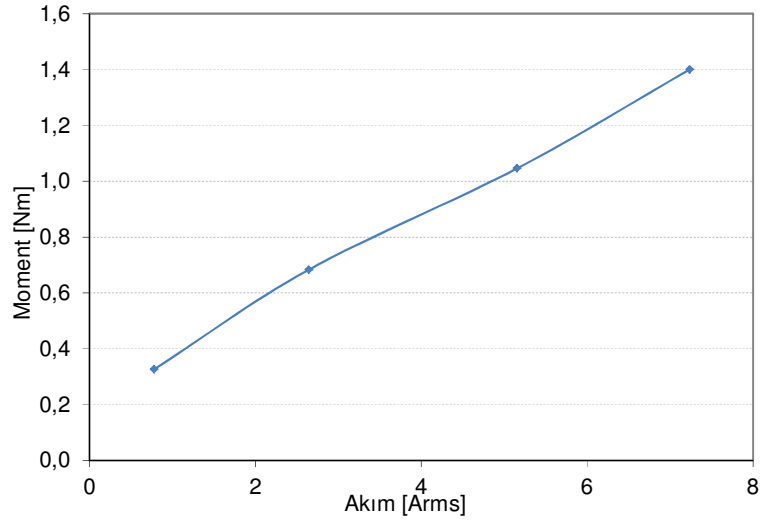
Şekil 6.11. 3 faz zıt EMK dalga şekillerinin değişimi

Deney düzeneği kullanılarak yapılan son test yüklü durum testleridir. Deney düzeneğindeki motor moment modunda çalıştırılmış, prototip motor ise hız moduna alınarak gerekli olan momenti oluşturulması sağlanmıştır. Oluşturulan moment moment sensörü kullanılarak elde edilmiş ve sonuçlar kaydedilmiştir. Motorun

1.42Nm yüklenmesi durumunda elde edilen çıkış momenti ve akımın değişimi Şekil 6.12' de görüldüğü gibidir. Şekilde çıkış momentinde dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Bu dalgalanmanın sebebinin deney düzeneğinde yer alan aksel bozukluk olduğu düşünülmektedir. Akımlara bakıldığında da aralarında 120° şer derece faz farkı olduğu görülmektedir. Ayrıca motorun 1,42Nm yükleme durumu için 9,4A' lik faz akımı çektiği şekilden görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre bu değerın 10A olması gerektiği göz önüne alınırsa %6' lık bir hata payı ile sonucun doğrulandığı aşıkardır. Ayrıca motora ait moment akım ilişkisini gösteren grafik Şekil 6.13' de gösterilmiştir. Motorun moment katsayısına bakıldığında düşük akım değerleri için 0,41Nm/A' iken akım değeri arttığında 0,19 Nm/A değerine geldiği görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında elde edilen 0,14 Nm/A değerine ulaşamamasının nedeninin düşük akımlarda sensörlerin doğru sonuç veremiyor olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.12. Moment çıkış grafiği ve akımın değişimi



Şekil 6.13. Moment akım ilişkisi

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında sürekli mıknatıslı motorların günümüzdeki yeri ve önemi ile ilgili bilgiler verildikten sonra özellikleri ve çeşitleri ile ilgili detaylı açıklamalar yapılmıştır. Yüzeiden mıknatıslı ve dahili mıknatıslı motorlara ait karşılaştırma yapılarak bir birlerine göre avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir.

Referans olarak alınan yüzeiden mıknatıslı motora ait kriterler tanımlanmış ve bu kriterler doğrultusunda stator yapısında hiçbir değişiklik yapmadan, sadece rotor yapısı değiştirilerek benzer özelliklerde dahili mıknatıslı motor ön çalışmaları yapılmıştır. Bir çok farklı dahili mıknatıslı motor topolojisi incelenmiş ve sonuç olarak çubuk tipli yapının bu uygulama için en iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu yapıya ait ön tasarım sonuçları verildikten sonra detaylı sonlu elemanlar analizlerine geçilmiştir.

Referans motora ait detaylı sonlu elemanlar analizleri yapıldıktan sonra çubuk tip yapı incelenmiştir. Birçok farklı tasarım tekniği uygulanarak en iyi sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. En iyi sonucu veren yapının yapılan karşılaştırmalar sonucunda 4 segmentli çubuk tip yapı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. 4 Segmentli çubuk tip yapı için mekanik tasarım yapılmış ve ardından mekanik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bir problem görülmediği için de prototip üretimine geçilmiştir.

Motorların testlerini yapabilmek amacıyla deney düzeneği oluşturulmuş, bu deney düzeneği kullanılarak vuruuntu momenti, zıt EMK ve çıkış momenti gibi motora ait bilgiler elde edilmiş ve motorun temel karakteristiği incelenmiştir. Deneysel sonuçların benzetim çalışmaları ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Miller T. J. E., *SPEED's Electric Motors*, University of Glasgow, 2002-2008.
- [2] Aydin M., *108E051 Nolu Tübitak Proje Raporu*, 2008.
- [3] Aydin M., Brushless Permanent Magnet Servomotors, Editör: Küçük S., *Serial and Parallel Robot Manipulators: Kinematic Dynamics Control and Optimization*, First Edition, Published by InTech, Rijeka, 275-294, 2012.
- [4] Aydin M., Huang S., Lipo T. A., Design, Analysis and Control of a Hybrid Field Controlled Axial Flux Permanent Magnet Motor, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **63**, 78-87.
- [5] Aydin M., Zhu Z. Q., Lipo T. A., Howe D., Minimization of Cogging Torque in Axial-Flux Permanent-Magnet Machines: Design Concepts, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, **43**, 3614-3622.
- [6] Aydin M., Ocak O., Ertugrul B. T., Sincar E., Oysu C., Design, Analysis and Experimental Verification of a Permanent Magnet AC Servomotor for Mobile Robot Applications, *20th International Conference on Electrical Machines*, Marseille, Fransa, 2-5 Eylül 2012.
- [7] Demir Y., Ocak O., Aydin M., No-load analysis of permanent magnet AC servomotors: A comparative study", *12th International Workshop on Research and Education in Mechatronics*, Kocaeli, Türkiye, 15-16 Eylül 2011.
- [8] Ocak O., Aydin M., Rotor segmentation for spoke type interior permanent magnet servomotors, *12th International Workshop on Research and Education in Mechatronics*, Kocaeli, Türkiye, 15-16 Eylül 2011.
- [9] Aydın M., Özel Uygulamalar İçin DC ve AC Sürekli Mıknatıslı Motorların Optimum Elektromanyetik Tasarımı, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 26-30 Kasım 2008.
- [10] Sebastian T., Slemonand G. R., Rahman M. A., Design considerations for variable speed permanent magnet motors, *Proceedings of International Conference on Electrical Machines*, München, Almanya, 8-10 Eylül 1986.
- [11] <http://www-2004.infolytica.com/en/coolstuff/ex0121/> (Ziyaret tarihi: 1 Haziran 2012).
- [12] Chong L., Dutta R., Rahman M. F., Application of Concentrated Windings in Interior Permanent Magnet Machine, *Power Engineering Conference*, Australasian Universities, Setubal, Portekiz, 12-14 Nisan 2007.

- [13] 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.
- [14] Germishuizen J., Kamper M., Design and Performance Characteristics of IPM Machines with Single Layer Non-Overlapping Concentrated Windings, *Industry Applications Conference*, Louisiana, Amerika, 23-27 Eylül 2007.
- [15] Pillay P., and Krishnan R., Modeling of permanent magnet motor drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1998, **35**, 537-541.
- [16] Thomas M., Jahnsand Wen L., Soong, Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, **43**, 321-330.
- [17] Guemes J. A., Iraolagoitia A. M., Del Hoyoand J. I., Fern´andez P., Torque Analysis in Permanent-Magnet Synchronous Motors: A Comparative Study, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, **26**, 55-63.
- [18] Bianchi N., Bolognani S., Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, **38**, 1259-1265.
- [19] Eastham J. F., Ionel D. M., Balchin M. J., Betzer T., Demeter E., Finite element analysis of an interior-magnet brushless DC machine, with a step-skewed rotor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1997, **33**, 2117-2119.
- [20] Qi G., Chen J. T., Zhu Z. Q., Howe D., Zhou L. B., Gu C. L., Influence of Skew and Cross-Coupling on Flux-Weakening Performance of Permanent-Magnet Brushless AC Machines, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, **45**, 2110-2117.
- [21] Stumberger B., Hamler A., Trlep M., Jesenik M., Analysis of interior permanent magnet synchronous motor designed for flux weakening operation, *IEEE Transactionson Magnetics* , 2001, **37**, 3644-3647.
- [22] Pillay P., Krishnan R., Modeling of permanentmagnet motor drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1998, **35**, 537-541.
- [23] <http://www.birmingham.ac.uk/research/activity/metallurgy-materials/magnets/background/magnetic-materials-history.aspx> (Ziyaret Tarihi: 3 Şubat 2012)

EKLER

EK-1

Moment Sensörü Özellikleri

burster

Precision Torque Sensor

Non-contact transmission for rotating applications
optional measurement of angle and speed

Code: 8661 EN
Delivery: on request
Warranty: 24 months

Model 8661

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



New product with outstanding features

- Measuring range from 0 ... ± 0.05 Nm to 0 ... ± 200 Nm
- High linearity of ≤ 0.05 % F.S.
- Intelligent operating state indicator
- 16 bit D/A converter including digital adjustment
- Output signal 0 ... ± 10 V or USB (option)
- Angle measurement accuracy to 0.09° (option)
- Excellent price-performance ratio

EK-2

Step Motor Özellikleri

► Step Motor

- [SY-0.30Nm-SY42STH47M](#)
- [SY-0.50Nm-SY42STH47](#)
- [SY-1.00Nm-SY57STH51](#)
- [SY-1.35Nm-SY57STH76M](#)
- [SY-1.85Nm-SY57STH76](#)
- [SY-3.00Nm-SY60STH86](#)
- [SY-3.40Nm-SY85STH65](#)
- [SY-4.50Nm-SY85STH80](#)
- [SY-8.50Nm-SY85STH118](#)
- [SY-12.5Nm-SY85STH156](#)
- [SY-11.0Nm-SY110STH99](#)
- [SY-21.0Nm-SY110STH150](#)
- [SY-28.0Nm-SY110STH201](#)
-
- [EV-0.16Nm-MT17AP1401](#)
- [EV-0.50Nm-MT17AP1801](#)
- [EV-0.83Nm-MT23AK2202](#)
- [EV-1.30Nm-MT23AK3003](#)
- [EV-1.60Nm-MT23AK3001](#)
- [EV-3.52Nm-MT24FK3503](#)
- [EV-3.40Nm-MT34FN2604](#)
- [EV-4.50Nm-MT34FN3106](#)
- [EV-8.50Nm-MT34FN4706](#)
- [EV-12.5Nm-MT34FN6206](#)
- [EV-11.5Nm-MT42FN3910](#)
- [EV-22.0Nm-MT42FN5911](#)
- [EV-30.0Nm-MT42FN7911](#)

► Step Sürtücü

► Servo Motor/Sürtücü

► CNC Controller

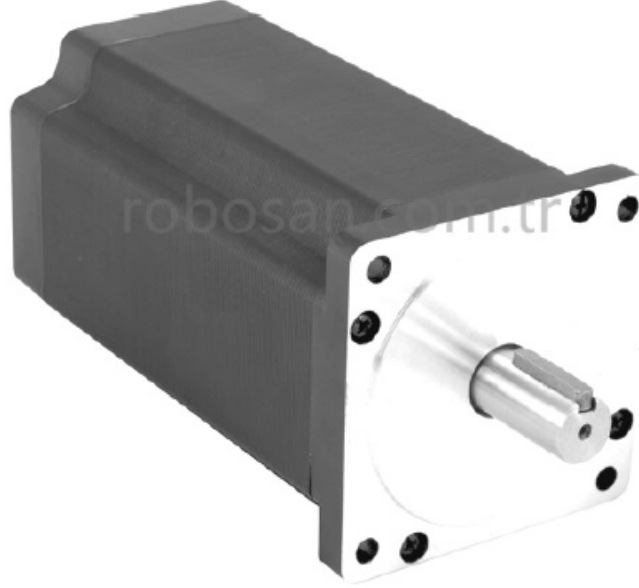
► Motion Controller

► PLC

► HMI

► YAZILIM

SY85STH156-4208A Step Motor



Step / Tur: 200

Step Açısı: $1.8^\circ \pm 5.0\%$

Flanş: 85.8 x 85.8 mm

İzolasyon Sınıfı: B 130° C

Çalışma Sıcaklığı: $-20^\circ +50^\circ$ C

Maksimum Isınma: 80° C

Uzunluk : 156 mm

Bipolar Tutma Torku: 12.5 Nm

Akım/Faz : 4.2 A

Direnç/Faz : 1.25 ohm

İndüktans/Faz : 12 mH

Rotor Ataleti : 4000 gcm²

Ağırlık : 5.4 kg

Tel Sayısı : 8

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Aydın M., **Ocak O.**, Ertugrul B. T., Sincar E., Oysu C., Design, Analysis and Experimental Verification of a Permanent Magnet AC Servomotor for Mobile Robot Applications, *20th International Conference on Electrical Machines*, Marseille, Fransa, 2-5 Eylül 2012.
- [2] **Ocak O.**, Aydın M., Rotor segmentation for spoke type interior permanent magnet servomotors, *12th International Workshop on Research and Education in Mechatronics*, Kocaeli, Türkiye, 15-16 Eylül 2011.
- [3] Demir Y., **Ocak O.**, Aydın M., No-load analysis of permanent magnet AC servomotors: A comparative study, *12th International Workshop on Research and Education in Mechatronics*, Kocaeli, Türkiye, 15-16 Eylül 2011.
- [4] Yolacan E., Ozyurt E., **Ocak O.**, Aydın M., Cogging Torque Minimization and Torque Quality of Radial and Axial Flux Permanent Magnet Servomotors, *11th International Workshop on Research and Education in Mechatronics*, Czech Republic, 9-10 Eylül 2010.
- [5] **Ocak O.**, Oysu C., Bingül Z., Delta Robot Tasarımı ve Simülasyonu, *Ulusal Otomatik Kontrol Toplantısı*, Kocaeli, Türkiye, 21-23 Eylül 2010.

ÖZGEÇMİŞ

Oğuzhan OCAK, Ocak 1986, Mersin doğumludur. İlk, orta öğrenimini Artvin’de lise öğrenimini ise Kocaeli’nde tamamladı. 2004 yılında kazandığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü’nden 2009 yılında Mekatronik Mühendisi olarak mezun oldu. 2009 yılında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır. 2009-2010 yılları arasında B/S/H/ 'da, 2010-2012 yılları arasında MDS Motor Ltd. de Ar-Ge Mühendisi olarak çalışmıştır. 2012 yılında ise Akım Metal Sanayi ve Tic. A.Ş. şirketinde Ar-Ge mühendisi olarak çalışmaya başlamış ve halen devam etmektedir.