

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇAMAŞIR MAKİNESİ UYGULAMASI İÇİN KONSANTRE
SARGILI MIKNATIS DESTEKLİ SENKRON RELÜKTANS
MOTOR TASARIMI, ÜRETİMİ VE DOĞRULAMASI**

ÖMER FARUK PAYZA

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

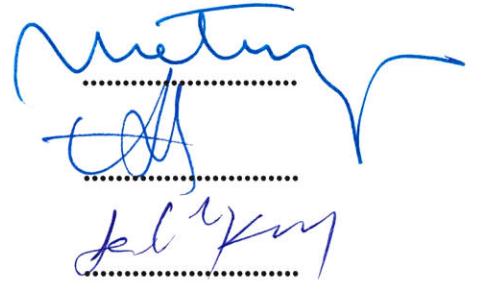
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇAMAŞIR MAKİNESİ UYGULAMASI İÇİN KONSANTRE
SARGILI MIKNATIS DESTEKLİ SENKRON RELÜKTANS
MOTOR TASARIMI, ÜRETİMİ VE DOĞRULAMASI

ÖMER FARUK PAYZA

Doç. Dr. Metin AYDIN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Ahmet HAVA
Jüri Üyesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Selçuk KIZIR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi


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

Tezin Savunulduğu Tarih: 02.07.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım ve lisansüstü eğitimim süresince kıymetli desteklerini ve tecrübelerini esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Metin AYDIN' a,

Tez çalışmalarım süresince bana destek veren ARÇELİK Merkez Ar-Ge güç elektroniği yöneticiliğindeki başta Yasemin ERTUĞRUL, Gamze ODABAŞ ve Oğuz ATSIZ olmak üzere tüm çalışma arkadaşlarıma ve yöneticilerime,

Hayatım boyunca her şartta yanımda olan ve hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen en kıymetlilerim babam Kazım PAYZA' ya, annem Sevgi PAYZA' ya, ablalarım Pınar PAYZA ve Zuhal TAŞÇI' ya sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz - 2018

Ömer Faruk PAYZA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT	xi
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	2
1.1. Tezin Kapsamı ve Metot	2
1.2. SRM ve MDSRM Literatür Çalışmaları	4
1.3. MDSRM Kontrolü Literatür Çalışmaları	14
2. MIKNATIS DESTEKLİ SENKRON RELÜKTANS MOTOR	20
2.1. Senkron Relüktans Motor Farklı Rotor Yapıları.....	20
2.2. Miknatıs Destekli Senkron Relüktans Motorun Tanımlanması	21
2.3. Moment Üretimi	22
2.4. Fazör Diyagramı.....	22
2.5. Maksimum Güç Faktörü.....	24
2.6. Kayıplar	25
2.6.1. Demir kayıpları	25
2.6.2. Bakır kayıpları.....	26
2.6.3. Deri etkisi kayıpları.....	26
2.7. Kritik Motor Tasarım Parametreleri.....	27
2.7.1. Akı bariyerleri sayısı	27
2.7.2. Akı bariyerlerinin konumu	27
2.7.3. Köprü kalınlığı ve kiriş kalınlığı	27
2.7.4. Miknatısların konumu ve boyutları	28
2.7.5. Hava aralığı	28
2.8. MDSRM Kontrolü.....	28
2.8.1. Vektör kontrol	28
2.8.2. Kontrol prensipleri	29
2.8.3. Akım başına maksimum moment kontrolü	30
2.8.4. Akı zayıflatma kontrolü	30
3. ÖNERİLEN MIKNATIS DESTEKLİ SENKRON RELÜKTANS MOTORUN TASARIMI	31
3.1. Tasarım Kriterleri	31
3.2. Akı Bariyeri Sayısının Etkisinin İncelenmesi	32
3.2.1. Tek bariyerli yapının incelenmesi	32
3.2.2. İki bariyerli yapının incelenmesi	38
3.3. Miknatıs Yerleşiminin Etkisinin İncelenmesi	44
3.3.1. Yan bariyerlere miknatıs yerleşiminin incelenmesi	44
3.3.2. Bariyer ortasına miknatıs yerleşiminin incelenmesi	44
3.4. Akı Bariyerlerinin Konumunun Etkisinin İncelenmesi.....	50

3.5. Kiriş Kalınlığının Etkisinin İncelenmesi	51
3.6. Köprü Kalınlığının Etkisinin İncelenmesi	52
3.7. Hava Aralığının Etkisinin İncelenmesi.....	54
3.8. Bariyerler Arasında D Eksen Uzaklığının Etkisinin İncelenmesi	55
3.9. Bariyer İçindeki Mıknatısların Konumunun Etkisinin İncelenmesi.....	56
3.10. Oluk Açıklığının Etkisinin İncelenmesi	58
3.11. Kontrol Açısının Etkisinin İncelenmesi	59
3.12. Prototipi Üretilecek Tasarımın Belirlenmesi.....	61
3.13. Mıknatis Miktarının Geniş Hız Aralığına Etkisinin İncelenmesi.....	66
3.14. Önerilen Motorun Geniş Hız Aralığında Çalışmasının İncelenmesi.....	69
3.15. Önerilen Motorun Kayıplarının İncelenmesi.....	71
3.15.1. Bakır kayıplarının incelenmesi.....	71
3.15.2. Demir kayıplarının incelenmesi	71
3.15.3. Deri etkisinin incelenmesi	72
4. ÖNERİLEN MOTORUN ÜRETİMİ VE DOĞRULANMASI	76
4.1. Önerilen Motorun Üretimi.....	76
4.2. Prototip Motor Doğrulama Çalışmaları.....	78
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR	85
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	90
ÖZGEÇMİŞ	91

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Tez Metodolojisi	3
Şekil 2.1. (a) Basit çıkık kutuplu rotor (b) Eksenel lamineli rotor (c) Enine lamineli rotor	20
Şekil 2.2. MDSRM'un (a) Köprü kalınlığı (b) mıknatıs (c) giriş kalınlığı (d) akı bariyerleri	21
Şekil 2.3. SRM fazör diyagramı.....	23
Şekil 2.4. MDSRM fazör diyagramı	23
Şekil 2.5. Güç faktörü-çıkıklık oranı değişimi.....	25
Şekil 2.6. MDSRM akım vektör kontrolünün blok diyagramı.....	29
Şekil 3.1. Optimizasyon parametreleri.....	31
Şekil 3.2. Tek bariyerli yapı SEY modeli görünümü.....	33
Şekil 3.3. Tek bariyerli yapı SEY modeli ağ yapısı görünümü	33
Şekil 3.4. Tek bariyerli yapı yüklü durum akı yoğunluğu görünümü	34
Şekil 3.5. Tek bariyerli yapı yüksüz durum akı yoğunluğu görünümü.....	34
Şekil 3.6. Tek bariyerli yapı manyetik akı çizgileri görünümü.....	35
Şekil 3.7. Tek bariyerli yapı vuru moment değişim grafiği.....	36
Şekil 3.8. Tek bariyerli yapı faz zıt EMK gerilimi dalga şekli (@500rpm)	36
Şekil 3.9. Tek bariyerli yapı faz zıt EMK gerilimi harmonik görünümü.....	36
Şekil 3.10. Tek bariyerli yapı faz arası zıt EMK gerilimi şekli(@500rpm).....	37
Şekil 3.11. Tek bariyerli yapı faz arası zıt EMK harmonik görünümü.....	37
Şekil 3.12. Tek bariyerli yapı hava aralığı toplam akısının değişimi.....	37
Şekil 3.13. Tek bariyerli yapı hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni	38
Şekil 3.14. Tek bariyerli yapı ortalama moment ve relüktans moment grafiği.....	38
Şekil 3.15. İki bariyerli yapı SEY modeli görünümü.....	39
Şekil 3.16. İki bariyerli yapı yüklü durum akı yoğunluğu görünümü.....	39
Şekil 3.17. İki bariyerli yapı yüksüz durum akı yoğunluğu görünümü	40
Şekil 3.18. İki bariyerli yapı yüklü durum manyetik akı çizgileri görünümü.....	40
Şekil 3.19. İki bariyerli yapı vuru moment değişim grafiği.....	41
Şekil 3.20. İki bariyerli yapı faz zıt EMK gerilimi dalga şekli(@500rpm)	41
Şekil 3.21. İki bariyerli yapı faz zıt EMK gerilimi harmonik görünümü	42
Şekil 3.22. İki bariyerli yapı faz arası zıt EMK gerilimi dalga şekli(@500rpm)	42
Şekil 3.23. İki bariyerli yapı faz arası zıt EMK gerilimi harmonik görünümü	42
Şekil 3.24. İki bariyerli yapı hava aralığı akısının değişimi	43
Şekil 3.25. İki bariyerli yapı hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni	43
Şekil 3.26. İki bariyerli yapı ortalama moment ve relüktans moment grafiği	44
Şekil 3.27. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı SEY modeli görünümü.....	45
Şekil 3.28. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı yüklü durum akı yoğunluğu görünümü.....	45
Şekil 3.29. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı yüksüz durum akı yoğunluğu görünümü.....	46

Şekil 3.30. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı manyetik akı çizgileri görünümü.....	46
Şekil 3.31. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı vuru mu momenti de ğişim grafi ği	47
Şekil 3.32. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı faz zıt EMK gerilimi dalga şekli	47
Şekil 3.33. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı faz zıt EMK gerilimi harmonik görünümü	48
Şekil 3.34. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı faz arası zıt EMK gerilimi dalga şekli(@500rpm).....	48
Şekil 3.35. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı faz arası zıt EMK gerilimi harmonik görünümü	48
Şekil 3.36. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı hava aralığı akısının de ğişimi	49
Şekil 3.37. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni	49
Şekil 3.38. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı ortalama moment ve relüktans moment grafi ği	50
Şekil 3.39. Ortalama momentin D0 uzaklığına göre de ğişim grafi ği	50
Şekil 3.40. Moment dalgalanmasının D0 uzaklığına göre de ğişim grafi ği.....	51
Şekil 3.41. Ortalama momentin kiriş kalınlığına göre de ğişim grafi ği.....	52
Şekil 3.42. Moment dalgalanmasının kiriş kalınlığına göre de ğişim grafi ği	52
Şekil 3.43. Ortalama momentin köprü kalınlığına göre de ğişim grafi ği.....	53
Şekil 3.44. Moment dalgalanmasının kiriş kalınlığına göre de ğişim grafi ği	53
Şekil 3.45. Ortalama momentin hava aralığı genişliğine göre de ğişim grafi ği.....	54
Şekil 3.46. Moment dalgalanmasının hava aralığı genişliğine göre de ğişim grafi ği.....	54
Şekil 3.47. Ortalama momentin web parametresine göre de ğişim grafi ği.....	55
Şekil 3.48. Moment dalgalanmasının web parametresine göre de ğişim grafi ği.....	56
Şekil 3.49. Ortalama moment de ğerinin M0 uzaklığına göre de ğişimi	56
Şekil 3.50. Moment dalgalanması de ğerinin M0 uzaklığına göre de ğişimi.....	57
Şekil 3.51. M0 = 0 de ğeri için yüklü durum akı yoğunluğu görünümü.....	57
Şekil 3.52. M0 = 4 de ğeri için yüklü durum akı yoğunluğu görünümü.....	58
Şekil 3.53. Ortalama momentin oluk açıklığı genişliğine göre de ğişim grafi ği.....	58
Şekil 3.54. Moment dalgalanmasının oluk açıklığı genişliğine göre de ğişim grafi ği.....	59
Şekil 3.55. D ve q eksen i akımları arasındaki kontrol açısı	59
Şekil 3.56. Ortalama momentin kontrol açısı de ğerine göre de ğişim grafi ği	60
Şekil 3.57. Moment dalgalanmasının kontrol açısı de ğerine göre de ğişim grafi ği.....	60
Şekil 3.58. Prototiplenecek yapı yüklü durum akı yoğunluğu görünümü	61
Şekil 3.59. Prototiplenecek yapı yüksüz durum akı yoğunluğu görünümü	62
Şekil 3.60. Prototiplenecek yapı yüklü durum manyetik akı çizgileri görünümü	62
Şekil 3.61. Prototiplenecek yapı vuru mu momenti de ğişim grafi ği.....	63

Şekil 3.62. Prototiplenecek yapı faz zıt EMK gerilimi dalga şekli (@500rpm)	63
Şekil 3.63. Prototiplenecek yapı faz zıt EMK gerilimi harmonik görünümü	64
Şekil 3.64. Prototiplenecek yapı faz arası zıt EMK gerilimi dalga şekli (@500rpm)	64
Şekil 3.65. Prototiplenecek yapı faz arası zıt EMK gerilimi harmonik görünümü	64
Şekil 3.66. Prototiplenecek yapı hava aralığı akısının değişimi	65
Şekil 3.67. Prototiplenecek yapı hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni	65
Şekil 3.68. Prototiplenecek yapı hava aralığı akı yoğunluğu tanjant bileşeni	65
Şekil 3.69. Prototiplenecek yapı ortalama moment ve relüktans moment grafiği.....	66
Şekil 3.70. Önerilen model SEY modeli görünümü	67
Şekil 3.71. Mıknatısı azaltılmış model SEY modeli görünümü	67
Şekil 3.72. Önerilen modelin stator geriliminin rotor pozisyonuna göre değişimi (@12500rpm).....	68
Şekil 3.73. Mıknatısı azaltılmış modelin stator geriliminin rotor pozisyonuna göre değişimi (@12500rpm)	68
Şekil 3.74. Önerilen tasarım ve mıknatıs miktarı azaltılmış tasarım farklı hızlarda için stator gerilimleri karşılaştırılması	69
Şekil 3.75. Önerilen motorun moment-hız eğrisi.....	69
Şekil 3.76. Önerilen motorun farklı hızlarda ki moment dalgalanması grafiği.....	70
Şekil 3.77. Önerilen motorun farklı hızlarda stator terminal geriliminin değişimi.....	70
Şekil 3.78. Demir kaybı-hız grafiği	71
Şekil 3.79. Malzeme türünün demir kaybına etkisi	72
Şekil 3.80. Deri etkisi kayıplarının değişimi (@650rpm).....	73
Şekil 3.81. Deri etkisi kayıplarının değişimi (@3500rpm).....	73
Şekil 3.82. Deri etkisi kayıplarının değişimi (@14000rpm).....	73
Şekil 3.83. Deri etkisi analizi yapılmış modelin SEY akım yoğunluğu görünümü (@650rpm)	74
Şekil 3.84. Deri etkisi analizi yapılmış modelin SEY akım yoğunluğu görünümü (@3500rpm)	74
Şekil 3.85. Deri etkisi analizi yapılmış modelin SEY akım yoğunluğu görünümü (@14000rpm)	75
Şekil 4.1. Üretilen rotor prototipi.....	76
Şekil 4.2. Üretilen stator prototipi.....	77
Şekil 4.3. Üretilen motor prototipi	77
Şekil 4.4. Zıt EMK dalga şekli deneysel ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması (@500rpm).....	78
Şekil 4.5. Deneysel ve analiz Zıt EMK gerilimlerinin hıza göre değişim grafiği.....	78
Şekil 4.6. Deneysel ve analiz moment-akım grafiği karşılaştırılması.....	79
Şekil 4.7. Motor test sistemi.....	79
Şekil 4.8. Prototip yükleme testlerinde elde edilen faz akımı dalga şekli [0,6 Nm].....	81
Şekil 4.9. Prototip yükleme testlerinde elde edilen faz akımı dalga şekli [0,7 Nm].....	81

Şekil 4.10. Prototip yükleme testlerinde elde edilen faz akımı dalga şekli [0,8 Nm].....	82
Şekil 4.11. Prototip yükleme testlerinde elde edilen faz akımı dalga şekli [0,874 Nm].....	82



TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Motor tasarım kriterleri.....	32
Tablo 4.1. Prototip motor yüklü durum test sonuçları	80



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

EMK	: Elektromotor Kuvveti
FEA	: Finite Elements Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)
MDSRM	: Miknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor
PMaSRM	: Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor (Sürekli Miknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor)
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SRM	: Senkron Relüktans Motor



ÇAMAŞIR MAKİNESİ UYGULAMASI İÇİN KONSANTRE SARGILI MIKNATIS DESTEKLİ SENKRON RELÜKTANS MOTOR TASARIMI, ÜRETİMİ VE DOĞRULAMASI

ÖZET

Beyaz eşya sektöründe değişen enerji regülasyonları ile kullanılan elektrik motorlarının verimi önemli bir unsur haline almıştır. Regülasyonların getirdiği zorunlulukla beraber çamaşır makinalarında universal motorlardan fırçasız senkron motorlara geçiş kaçınılmaz olmuştur. Ancak bu geçişin getirdiği sürücü ihtiyacı ile beraber maliyet dezavantajı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca kullanılan mıknatıslı motorlarda ki mıknatıs fiyatı ve hammaddenin büyük bir kısmının uzak doğu ülkelerinde olmasından dolayı ortaya çıkan mıknatıs fiyatında ki dalgalanmalar seri üretim şartları için büyük bir risk oluşturmaktadır. Bu nedenle bu dezavantajı ve riski ortadan kaldırmak için bu tez çalışması kapsamında mıknatıs bağımlılığını azaltabilecek sürekli mıknatıs destekli senkron relüktans motor önerilmiştir. Çalışmada mıknatıs destekli senkron relüktans motorun tasarımı yapılmış ve bu motorun çamaşır makinası uygulaması için kullanılabilirliği incelenmiştir. 9-oluk 8-kutuplu, konsantre sargılı, 3-faz, 650-12500rpm hız aralığına, en az %70 verim seviyesine sahip motor tasarımı yapılmıştır. İlk olarak motor için ön boyutlandırma yapılmıştır. Daha sonra FLUX 2D SEY programı ile rotorda bulunan kritik tasarım parametreleri üzerinde optimizasyon çalışmaları tamamlanmıştır. Optimizasyon çalışmalarından sonra tasarım sonlandırılarak bu tasarım için prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Prototipi yapılan motorun motor test sisteminde testleri gerçekleştirilmiş ve test sonuçları sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları ile üretilen prototipin performans sonuçlarının tutarlı olduğu görülmüştür. Çalışmalar sonucunda tasarlanan ve önerilen mıknatıs destekli senkron relüktans motorun çamaşır makinasında kullanılabilecek bir alternatif olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çamaşır Makinası, Konsantre Sargılı, Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor, Sürekli Mıknatıs.

DESIGN, MANUFACTURING AND VERIFICATION OF A CONCENTRATED WINDING MAGNET ASSISTED SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR FOR WASHING MACHINE APPLICATION

ABSTRACT

In the white goods industry, the efficiency of the electric motors with the changing energy regulations has become an important issue. Along with the requirements of the regulations, the switch to brushless synchronous motors from universal motors in washing machines has become inevitable. However, with the need for the driver that this transition brings, a cost disadvantage arises. In addition, the price of the magnet in the motor and the fluctuations in the price of the magnet due to the fact that a large part of the raw material is in the far eastern countries constitutes a great risk for the mass production. Therefore, to overcome this disadvantage and the risk, a permanent magnet assisted synchronous reluctance motor (PMSRM) is proposed to reduce magnet dependence. In the study, a new PMSRM is designed and its usability for washing machine is investigated. 9-slot 8-pole, concentrated winding, 3-phase, 650-12500rpm speed range, at least 70% efficiency level motor design has been completed. Firstly, initial design of the motor is completed. Then, with the FLUX-2D FEA program, optimization studies are carried out for the critical parameters of the rotor. After the optimizations, the final design is determined and the prototype is manufactured. Motor tests are carried out and the test results are compared with the analyses obtained by the FEA. The results and the comparison show that the performance of the prototype is consistent. Furthermore, it has been seen that the designed PMSRM is an alternative which can be used in washing machine applications.

Keywords: Washing Machine, Concentrated Winding, Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor, Permanent Magnet.

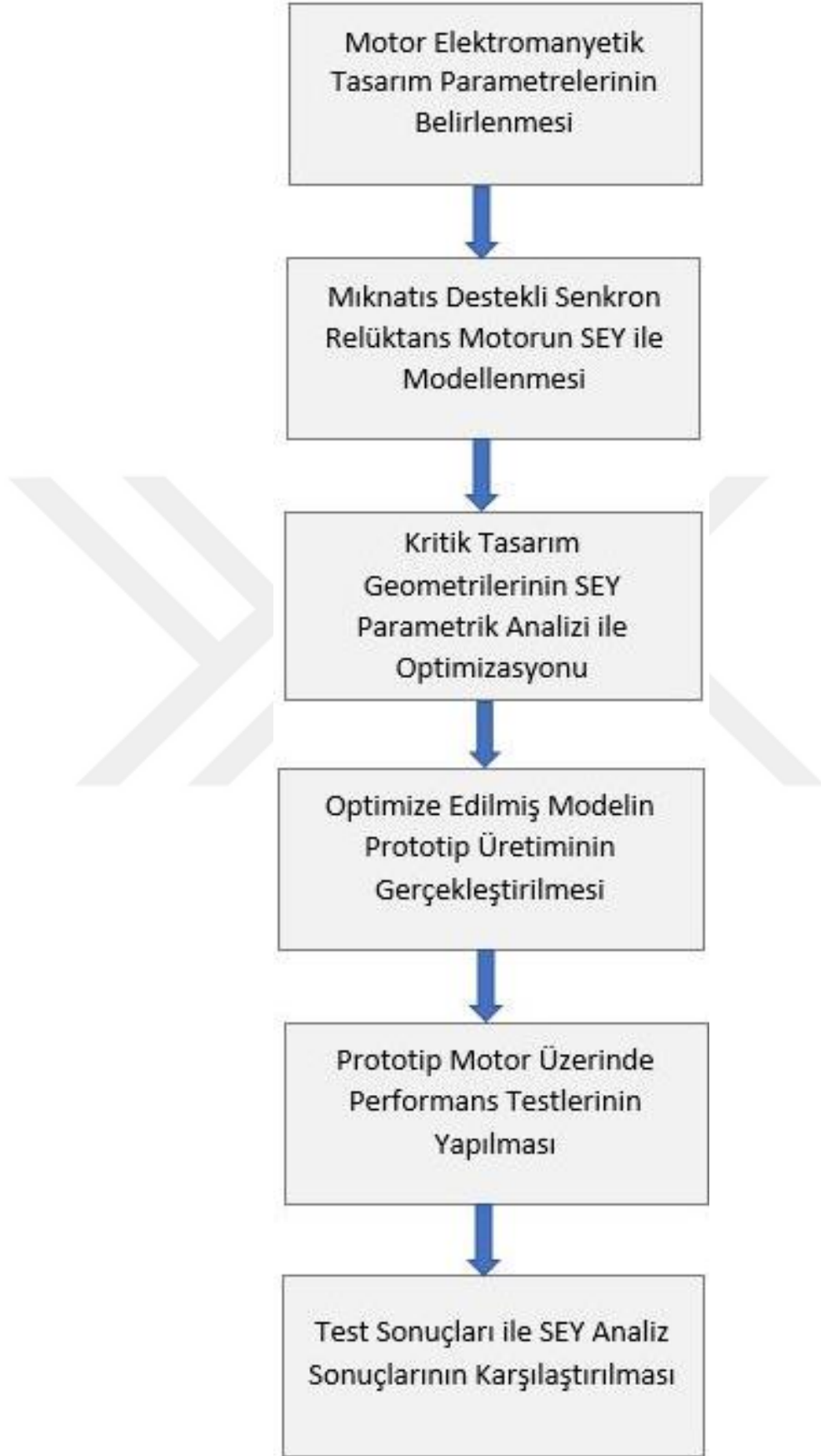
GİRİŞ

Beyaz eşya uygulamalarında yüksek adetler ile üretim yapıldığı ve kullanım yaygınlığı göz önüne alındığında verim ve maliyet değerlerinin yüksek öneme sahip olduğu görülmektedir. Özellikle değişen enerji regülasyonları ile birlikte elektrik motorlarında enerji verimliliği sınıfının önemi giderek artmaktadır. Beyaz eşya endüstrisinde elektrik motoru ihtiyacı universal motorlar, asenkron motorlar ve güç elektroniği teknolojisinin gelişmesi ve yarı iletken malzemelerin maliyetlerinin düşmesi ile birlikte mıknatıslı senkron motorlar tarafından sağlanmaktadır. Bu motorlar arasında universal ve asenkron motorlar, mıknatıslı senkron motorlara göre daha düşük verim seviyesine sahiptir. Ancak mıknatıslı senkron motorlara geçiş ile birlikte gelen elektrik motor kontrol kart maliyeti bu çözümlü pahalı hale getirmektedir. Bu nedenle regülasyonun zorunlu kıldığı yerlerde senkron motorlar kullanılırken, maliyet kaygısından dolayı, bu zorunluluğun olmadığı yerlerde universal motor ve asenkron motor kullanımına devam edilmektedir. Maliyet ve de verim olarak universal motor ile mıknatıslı senkron motorların arasında bulunan mıknatıs destekli senkron relüktans motor bu zorunluluğu ortadan kaldırmak için önemli bir alternatif haline gelmektedir. Mıknatıs destekli senkron relüktans motorların mıknatısa olan bağımlılığı azaltılarak, mıknatıs piyasasının Çin pazarının elinde olmasından kaynaklanan fiyat dalgalanmasından şirketlerin en az şekilde etkilenmesi konusunda avantaj sağlayacağı öngörülmektedir. Maliyet olarak mıknatıslı senkron motorlardan ucuz verim olarak da universal motorlardan daha verimli bir mıknatıs destekli senkron relüktans motor çözümlü ile çamaşır makinası uygulamasın fırçasız motorların tüm ürünlere yaygınlaşması çalışmanın ana amaçları arasında bulunmaktadır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Tezin Kapsamı ve Metot

Bu tez çalışması kapsamında çamaşır makinası uygulaması için seri üretimde kullanılan universal motorun yerini alacak miknatis destekli senkron relüktans motor tasarımı amaçlanmıştır. Tasarlanan motorun universal motordan daha yüksek performanslı ve daha verimli olması istenmektedir. Tasarlanacak olan motorun 3 faz, en az %70 verim seviyesine sahip, 200W gücünde ve 650-12500 rpm geniş hız aralığında çalışıyor olması hedeflemiştir. Tasarıma başlamadan önce çamaşır makinesi isterleri belirlenmiş ve bu ihtiyaca göre istenen motorun elektromanyetik tasarım çıktıları belirlenmiştir. Daha sonra bu çıktılar için ön tasarım yapılmıştır. Ön tasarımda ilk olarak motorun oluk kutup kombinasyonu belirlenerek ilk tasarım ortaya çıkarılmıştır. Tasarımı yapılan motorun yüksek adetlerde seri olarak üretilmesi planlandığı için stator sargı yapısının seri üretimde kullanılan sargı makinalarına uygun olmasına dikkat edilmiştir. Seri üretimde şartlarında konsantre sargı yapılı motorlarda daha yüksek hızlarda üretim yapıldığı için sargı makinasına uygunluk açısından konsantre sargılı yapıya uygun olan oluk kutup kombinasyonları üzerinde durulmuştur. Belirlenen yapının SEY programında analiz edilebilmesi için modeli oluşturulmuştur. Daha sonra stator ve özellikle rotor için mekanik dayanım, performans, üretilebilirlik gibi kriterlere göre önemli tasarım parametreleri belirlenmiştir. Bu kritik tasarım parametrelerinin etkisini incelemek için sonlu elemanlar manyetik analiz programı ile kritik boyutlar için parametrik analiz yapılmıştır. Parametrik analiz sonuçları yüklü ve yüksüz durum için ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan tasarım çalışmaları sonucunda elde edilen veriler ışığında final tasarım boyutları belirlenmiştir. Boyutları belirlenen final tasarım için prototip üretimi yapılmıştır. Üretilen prototip motor, hazırlanan motor test düzeneği üzerinde yüklü ve yüksüz durum için test edilmiştir. Elde edilen test sonuçları, motorun tasarımı sırasında elde edilen SEY analiz sonuçları ile karşılaştırılmış ve prototip sonuçları ile analiz verileri arasında ki tutarlılığa bakılmıştır. Şekil 1.1'de tez çalışması sırasında motor tasarımı için izlenen yöntem gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Tez Metodolojisi

1.2. SRM ve MDSRM Literatür Çalışmaları

SRM geniş bir ürün yelpazesi olan farklı birçok uygulamada kullanılan fırçasız elektrik motorlarıdır. Mıknatsız ve mıknatıs destekli tasarımları sayesinde farklı uygulamalara göre tasarımları yapılabilmektedir. Bu bölümde geniş bir literatür taraması yapılarak mıknatıslı ve mıknatısız SRM için uygulama alanları, bu motorda büyük bir dezavantaj olan moment dalgalanmasının azaltılmasına ve performansın iyileştirmesine yönelik çalışmalar, güç faktörünün iyileştirmesine yönelik çalışmalar ve farklı MDSRM yapıları incelenmiştir.

J.K. Kostko tarafından yayınlanan ‘Polyphase Reaction Synchronous Motors’ isimli çalışmada tarihte bilinen ilk senkron relüktans motor tanımlanmıştır. Kostko bu çalışmada rotorda bulunan akı bariyerlerinin optimum tasarımı ile endüktans farkı yaratılarak moment elde edilebileceğini ifade etmiştir. Böylece bu çalışma akı bariyerleri ile moment üretiminin sağlanabileceğini gösteren ilk çalışma olma özelliğini almıştır [1].

Nicola Bianchi ve arkadaşları tarafından yayınlanan ‘Torque Harmonic Compensation in a Synchronous Reluctance Motor’ isimli çalışmada moment harmoniklerini azaltmak için rotordaki akı bariyerlerinde yaptıkları çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda akı bariyerlerinin konumunu değiştirerek moment dalgalanmasını azalttıkları belirtilmiştir. Bunun için Romeo ve Juliet isimli rotor laminasyonları üretilmiştir. İki laminasyon kaykısı verecek şekilde tek rotorda toplanmıştır. Bu motor Romeo ve Juliet yapısından önceki rotor yapısı ile karşılaştırılmış ve moment dalgalanmasının %13 değerinden %4 değerine indiği görülmüştür. Ortalama moment değerinin de çok az miktarda azaldığı ifade edilmiş. Sonuç olarak bu çalışmada R&J isimli özel rotor yapısını kullanılarak iki farklı laminasyon yapısıyla moment harmoniklerinin azaltılabildiği görülmüştür [2].

Nicola Bianchi ve arkadaşları tarafından yayınlanan ‘Rotor flux-barrier design for torque ripple reduction in synchronous reluctance motors’ isimli çalışmada moment dalgalanmasının azaltılması için akı bariyerleri tasarımı üzerine çalışılmıştır. Romeo&Juliet rotor yapıları ve Machaon rotor yapısı incelenmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde bulunan klasik yapı bir gömülü mıknatıslı senkron motorda karşılaştırmalara eklenmiştir. Çalışmada R&J yapı ve Machaon yapı rotora sahip

motorlarda gömülü mıknatıslı motora göre moment dalgalanmasının azaldığı görülmüştür. İki yapının da moment dalgalanmasını azalttığı ifade edilmiş ancak R&J yapılı motorda ortalama moment değeri düşerken Machaon yapılı motorda ortalama moment değerinin düşmediği görülmüştür. Machaon rotor yapısının hem moment dalgalanmasını azaltması hem de ortalama momenti düşürmemesi nedeniyle kullanılmasının avantajlı olduğu görülmüştür [3,4].

D.A Staton ve arkadaşları tarafından yapılan ‘Maximising the Saliency Ratio of the Synchronous Reluctance Machine’ adlı çalışmada SRM için ana moment üretim kaynağı olan d ve q eksen endüktansları arasında ki farkı arttırmaya yönelik çalışmalar yapıldığı belirtilmiştir. D ve q eksenler arasında ki endüktans farklı çıkıklık oranı olarak ifade edilmiştir. Çıkıklık oranının artırılmasında faydalanmak için sürüş yönteminde kullanılan algoritmanın iyileştirilmesi dolayısıyla da güç faktörünün artırılması gerektiği vurgulanmıştır. Çalışma da q eksen endüktansı sıfır olamayacağı için çıkıklık oranının artırılmasının bir sınırı olduğundan bahsedilmiştir. Yapılan çalışmalarda d eksende yaşanan doymadan dolayı d eksen endüktansının azalabileceğinden, rotor ve stator da oluşan kısa devreler ve kaçak akılardan dolayı çıkıklık oranının azalabileceğinden bahsedilmiştir [5].

Nicola Bianchi ve arkadaşları tarafından yayınlanan ‘Optimization of Interior PM Motors With Machaon Rotor Flux Barriers’ isimli çalışmada gömülü mıknatıslı motorlarda moment dalgalanmasını azaltma da kullanılan Machaon rotor yapısı için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Çalışmada 24 oluk/4 kutup bir mıknatıslı senkron relüktans motor kullanılmıştır. Rotordaki akı bariyerlerine d ve q eksenlerine göre farklı açılar verilerek performans çıktıları incelenmiştir. Bariyerlere verilen açı sayesinde oluşturulan asimetrik yapı ile moment dalgalanmasının ve moment harmoniklerinin azaldığı görülmüştür. Moment dalgalanmasında ki azalmaya rağmen ortalama momentin azalmadığının altı çizilmiştir [6].

Nicola Bianchi ve arkadaşları tarafından yayınlanan ‘Design of Synchronous Reluctance Motor for Hybrid Electric Vehicles’ adlı çalışmada hibrit elektrikli araçlar için senkron relüktans motor tasarımı üzerine çalışılmıştır. İlk olarak çalışmada rotor tasarımı üzerinde durulmuş olup akı bariyerlerinin açısı, bariyer sayısı gibi parametreler incelenmiştir. Moment dalgalanmasını düşürmek ve yüksek ortalama

moment sağlamak için çalışmalar yapıldığı belirtilmiştir. Tasarım için 36oluk/4kutup bir motor seçilmiş olup stator dış çapı 150mm ve paket boyu 70mm alınmıştır. Oluksuz ve oluklu olmak üzere aynı rotor için iki farklı stator yapısı kullanılmış ve bunlar için bir analitik model oluşturulmuştur. Oluksuz yapılı lineer rotorlu, oluksuz yapılı nonlinear rotorlu, oluklu lineer rotor ve statorlu ve oluklu nonlinear rotor ve statorlu yapılar karşılaştırılmıştır. Analitik modele göre malzeme özellikleri lineer olarak analiz edilen motorda analitik modele yakın sonuçlar elde edilmiş olduğu belirtilmiştir. Nonlinear malzeme kullanılan modelde doyma etkisinden dolayı sonuçların analitik sonuçtan biraz farklı çıktığı ifade edilmiştir. Ancak yine de analitik model ile ortalama moment ve moment dalgalanması değerlerinin tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır. Tasarımda bariyer sayısı değiştirilerek rotorda ki bariyer sayısı 1,2 ve 3 için sonuçlar elde edilmiştir. Bariyer sayısı 3 olan modelde ortalama momentin yüksek ve moment dalgalanmasının düşük olduğu görülmüştür. Machoon rotor yapısı 2 farklı bariyer yapısı ile denenmiş ve bu yapılar hem ayrı ayrı hem de aynı rotor üzerinde analiz edilmiştir. Machoon rotor yapısında momentin arttığı ve moment dalgalanmasının iyileştiği belirtilmiştir. Motorun 7000rpm hız değerine kadar geniş bir hız aralığında çalıştığı ifade edilmiştir. Mıknatıs olmaması sebebiyle düşük maliyet, vuruş momenti olmaması gibi avantajları olduğu ve yüksek verimle çalışabilen bir karakteristiğe sahip olduğu belirtilmiştir [7].

Shiego Morimoto ve arkadaşları tarafından yayınlanan ‘Torque Ripple Improvement for Synchronous Reluctance Motor using Asymmetric Flux Barrier Arrangement’ isimli çalışmada asimetrik rotor bariyer yapısı ile moment dalgalanmasını azaltma çalışması yapılmıştır. 36oluk/4kutup bir SRM seçilerek çalışmalar bu motor üzerinde çalışılmıştır. Stator dişleri ile rotor akı bariyerlerinin ucu arasında ki açı her kutup için değiştirilerek asimetrik bir rotor yapısı elde edilmiştir. Simetrik rotor yapılı modelde moment dalgalanması %50 iken asimetrik rotor yapısı sayesinde bu değer %12 ‘ye kadar düşürülmüştür. Bunun yanında ortalama moment, d ve q eksen endüktansları ve verim değerlerinin de simetrik model ile aynı kaldığı görülmüştür [8].

Shiego Morimoto ve arkadaşları tarafından yayınlanan ‘The Performance Comparison of SPMSM, IPMSM and SynRM in Use as Air-conditioning Compressor’ adlı çalışmada gömülü mıknatıslı, yüzey mıknatıslı ve senkron relüktans motorun kompresör uygulamaları için kullanılabilir olup olmadığını incelemiş ve bu motorların karşılaştırmasını vermiştir. 3 tip motorunda 4 kutuplu tasarımları ele alınmıştır.

Gömülü mıknatıslı motorun yüzey mıknatıslı motora göre yüksek vuruş momentine sahip olduğu, senkron relüktans motorda vuruş momenti olmadığı belirtilmiştir. 4000rpm hızda verim testleri sonucunda Senkron relüktans motorun asenkron, gömülü mıknatıslı ve yüzey mıknatıslı motor ile kıyaslandığında mıknatıslı senkron motorlardan düşük asenkron motorlardan yüksek verim sağladığı görülmüştür. Malzeme maliyeti olarak kıyaslandığında senkron relüktans motorun yüzey ve gömülü mıknatıslı motordan çok daha ucuz olduğu görülmüş. Gömülü mıknatıslı motor performansı ve yüksek sıcaklık altında verim performansı olarak en uygun motor olarak görülmüş ancak senkron relüktans motorun performans olarak gömülü mıknatıslı motor kadar iyi bir performansa sahip olmamasına rağmen maliyet-performans kriteri göz önüne alındığında kullanılabilir olduğu ifade edilmiştir [9].

Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada ve Yoji Takeda tarafından yayınlanan 'Performance of PM Assisted Synchronous Reluctance Motor for High Efficiency and Wide Constant Power Operation' adlı çalışmada MDSRM' un geniş sabit güç aralığında yüksek verimli performansı üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Mıknatıs etkisinin incelemesi için farklı miktarlarda mıknatısa sahip rotor yapısı incelenmiştir. Mıknatıs miktarı arttıkça momentin arttığı ve yüksek hız performansını toplam akıya ve endüktanslara bağılı olarak iyileştiğı belirtilmiştir. Mıknatıs miktarı fazla olan modelin daha yüksek verimli çalıştığı ifade edilmiş. Mıknatıs ilavesinin alan zayıflatma bölgesinde daha rahat çalışma imkânı sağladığı görülmüş. Bu sonuçlar ışığında MDSRM' un geniş hız aralığında yüksek verimle çalışabileceğı ifade edilmiştir [10].

Shigeo Morimoto ve arkadaşları tarafından yayınlanan 'Characteristic of PMASynRM with Ferrite Magnets for EV/HEV Applications' adlı çalışmada elektrikli araçlar ve hibrit elektrikli araçlar için ferrit mıknatıslı SRM tasarımı üzerinde çalışılmıştır. 48oluk/8kutuplu dış çapı 250mm, paket boyu 100mm olan bir motor tasarımı yapılmış. 137,5A ve 275A akım değerlerinde sırasıyla 100nm ve 220nm moment değerlerine ulaşabildiğı belirtilmiştir. Bu değerler için motorun 10000rpm hıza kadar geniş bir hız aralığında çalışabildiğı ifade edilmiştir. 137,5A ve 275A akım değerlerinde %97 verim değerine ulaşabildiğı görülmüştür. Yüksek hıza çıkarken mekanik mukavemet sağlamak ve demagnetizasyona karşı direnç göstermek için akı bariyerleri arasına kiriş eklendiğinden bahsedilmiştir. Motorun aynı zamanda analitik

olarak hesaplamasının yapıldığı ancak mekanik kayıplar ve armatür direncinin fazla olmasından dolayı prototip ölçümleriyle aynı çıkmadığı ölçüm değerlerinin analitik hesaptan daha düşük çıktığı ifade edilmiş. Sonuç olarak MDSRM' un çalışma aralığı, verimi, çıkış gücü ve geniş hız aralığındaki güç-verim ilişkisinden dolayı bu tip uygulamalarda kullanılabilir olduğunun altı çizilmiştir [11].

T.A. Lipo ve arkadaşları tarafından yapılan 'Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine' adlı çalışmada motor güç faktörünü, verimini ve performansını arttırmak için d ve q eksen arasında endüktans oranını arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada yazarlar rotor yalıtım olarak k_w parametresini tanımlamışlardır. Bu parametreyi rotorda hava boşluklarının toplam kalınlığının sac kalınlığına oranı olarak ifade etmişlerdir ve bu değer yüksek olmasının motorun çıkıklık oranını arttırdığını belirtmişlerdir. Ancak bu oranın teoride yüksek olması istense de üretim için düşük olmasının tercih edildiğini belirtmişlerdir. İki durumda ele alındığında k_w değerinin 0,5 olduğu durumda en uygun çıkıklık oranı değerini sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca çalışmada tasarımı yapılan motorun 10 çıkıklık oranına sahip olduğu ve bu değer verim ve performans açısından iyi bir sonuç sağladığı ifade edilmiştir [12].

Alfredo Vagati ve arkadaşları tarafından yayınlanan 'Evaluation of Torque Ripple in High Performance Synchronous Reluctance Machines' isimli çalışmada SRM için moment dalgalanması azaltma çalışması yapılmıştır. Stator oluklarının moment dalgalanmasına etki ettiğinden bahsedilmiştir. Kaykının rotor anizotropi üzerindeki etkisi belirtilmiş. Kayk ve rotor adımları ile moment dalgalanmasının tam olarak ortadan kaldırılamasa da azaltılabildiği ifade edilmiş. Oluşturulan matematiksel model ile kayk ve rotor adımlarının etkisi görülmüş. Görülen bu bir prototip de doğrulanmış ve sonuçları paylaşılmış. Düz rotora göre, uygun rotor adımlı ve kaykılı modelde moment dalgalanmasının azaldığı ispatlanmıştır [13].

Alfredo Vagati ve arkadaşları tarafından yayınlanan 'Design of Low-Torque-Ripple Synchronous Reluctance Motors' adlı çalışmada düşük moment titreşimli SRM tasarımı üzerine çalışılmıştır. İlk olarak olası rotor yapıları belirlenen bir statora göre karşılaştırılmıştır. İç rotorlu tasarımın düşük moment dalgalanmasını işaret ettiği belirtilmiştir. Çalışmada 3oluk/4kutuplu bir motor seçilmiştir. Aynı statora sahip üç

farklı rotor için deneyler yapılarak sonuçları paylaşılmış. Üç farklı rotor için n_r sırasıyla 18,14,22 olarak alınmıştır. n_s Değeri 18,14,22 alınarak 18/18,18/14 ve 18/22 oranına sahip yapılar dağıtılmış ve tam dış sargı yapısı için analiz edilmiştir. 18/22 oranına sahip rotor yapısında en düşük moment dalgalanması değerine ulaşıldığı görülmüştür. Tam dolu sargı yapısının da en iyi sonucu verdiği ifade edilmiştir. Buna ek olarak enine tipte bir laminasyon yapısı kullanılması moment dalgalanmasını düşürdüğü görülmüştür [14].

Alfredo Vagati ve arkadaşları tarafından yayınlanan ‘Performance of IPM-PMASR motors with ferrite injection for home appliance washing machine’ isimli çalışmada MDSRM’ un çamaşır makinası uygulamasına uygunluğunu incelenmiştir. 4 kutuplu bir rotor yapısı seçilip, plastik katkıli ferrit ile prototip üretilmiş. Motorun 800 W çıkış gücüne ulaşabildiği ve 3000-16000rpm gibi geniş bir hız aralığında çalışabildiği ifade edilmiştir. Mıknatıs desteği olmayan motorun ise 1800-9500rpm hız aralığında çalışırken 320 W güç verebildiği görülmüş. Bu nedenle mıknatıs desteğinin motor momentini arttırdığı, sürücü boyutunu küçülttüğü ve hız aralığını arttırdığı belirtilmiş. Mıknatıs akısı gömülü mıknatıslı ve yüzey mıknatıslı motorlara göre düşük olduğu için yüksek hızlarda sürücü arızası durumunda yüksek gerilim sorununu sınırladığı ifade edilmiştir [15].

T.J.E. Miller tarafından yapılan ‘Design of a Synchronous Reluctance Machine Drive’ adlı çalışmada, sürücü teknolojilerinin gelişmesiyle SRM’ un önemi artan bir motor olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada d ve q eksen endüktansları arasında ki oran çıkıklık oranı olarak tanımlanmış ve bu oranın motor performansını doğrudan etkilediği ifade edilmiştir. Çalışmada mıknatıslı ve mıknatıs olmak üzere iki SRM tasarlanmış olup bunların prototipleri yapılarak bu motorlar asenkron motor ve fırçasız motorlarla karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarında mıknatısız olan SRM’ un performans olarak diğer motorlarla yakın olduğu, mıknatıslı SRM’ nin ise diğer motorlardan daha yüksek performansa sahip olduğu görülmüştür [16].

Peyman Niazi ve Hamid A. Toliyat tarafından 2005 yılında yayınlanan ‘Design of a Low-Cost Concentric Winding Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Drive’ isimli çalışmada, düşük maliyetli konsantre sargılı mıknatıs destekli senkron relüktans motor tasarımı ve bu parametrelerin değişimi incelenmiştir. Bu

parametrelerin elektromanyetik momente ve d-q endüktanslarına etkisini göstermek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Genel verimlilik ve tasarım parametreleri üzerinde konsantre sargının etkisi incelenmiştir. Akı bariyerlerinin genişliği, yeri ve l_d/l_q oranının motorun performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Akı bariyerlerinin yerinin moment dalgalanmasını önemli ölçüde etkilediği ama ortalama momenti aynı seviyede etkilemediği belirtilmiştir. Konsantre sargı yapısının doyma olmayan bölgede yüksek l_d-l_q farkı sağladığı için daha yüksek moment üretme kapasitesine sahip olduğu ve bu nedenle daha yüksek verimli tasarım imkânı sağladığı görülmüştür. Bununla birlikte konsantre sargının l_d/l_q oranına bir faydası olmadığı görülmüştür. Daha düşük maliyete konsantre sargılı yapıyla ulaşılabileceğinin altı çizilmiştir [17].

Jeihoon Baek, Mina M. Rahimian ve Hamid A. Toliyat tarafından yayınlanan ‘Optimal Design and Comparison of Stator Winding Configurations in Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Generator’ isimli çalışmada sessiz ve yüksek performanslı çalışma için 3kW gücünde mıknatıs destekli senkron relüktans jeneratörü incelenmiştir. MDSRM’ un büyük sabit güç hız aralığı, yüksek verim ve yüksek güç faktörü imkânı sunabileceği belirtilmiştir. Konsantre ve dağıtılmış sargı yapıları karşılaştırılmış. Aynı dış çapa sahip 12oluk/4 kutup dağıtılmış sargı yapılı ve 12oluk/8kutup konsantre sargı yapılı motorlar incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Akım değerleri iki tasarım için de 15A değerinde tutulmuştur. Konsantre sargılı yapının armatür kayıplarının dağıtılmış sargılı yapıya göre %45 az olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte konsantre sargılı yapıda paket boyunda %17 ve mıknatıs miktarında %40 civarında azalma olmuştur. Bu sonuçlardan dolayı konsantre sargılı makinenin dağıtılmış sargılı makineye göre daha ucuz olacağı ve daha iyi çıkış karakteristiği sağlayacağı belirtilmiştir [18].

Alfredo Vagati ve arkadaşları tarafından yayınlanan ‘A 250kW transverse-laminated Synchronous Reluctance Motor’ adlı çalışmada endüstriyel uygulamalar için 1000rpm hız 250kWgüç değerinde enine lamineli senkron relüktans motor incelemiş ve aynı boyuttaki asenkron motor ile karşılaştırılmıştır. Senkron relüktans motor 1200rpm 250 kW maksimum çıkış gücüne sahip olup sürekli güç değeri 230kW ve hız aralığı 1000-15000rpm’dir. Asenkron motor 200kW olup hız aralığı 1000-2000rpm’dir. SRM’ un aynı durumda asenkron motora göre daha yüksek devamlı moment ürettiği görülmüştür. SRM’ un daha düşük sargı sıcaklığı olduğu belirtilmiştir [19].

Minghu Yu tarafından yayınlanan ‘Analysis of Hybrid Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor for Compressor’ adlı çalışmada kompresör uygulaması için mıknatıs destekli senkron relüktans motor analizine yer verilmiştir. Mıknatıs destekli senkron relüktans motorun, sadece mıknatıslı ve sadece relüktans momenti üreten motorlara göre daha avantajlı olduğunu bu yüzde mıknatıs destekli motorun daha çok ilgi gördüğü belirtilmiştir. Son yıllarda bilim adamlarının ferrit destekli SRM’ a yöneldiğinin altı çizilmiştir. Ancak hala neodmiyum mıknatıslı motorun ferrit destekli motora göre daha verimli ve daha düşük hacimli olduğu söylenmiş. Bu çalışmada yüksek moment yoğunluğuna sahip maliyet odaklı bir klima kompresörü için hibrit kalıcı mıknatıslı senkron relüktans motor önerilmiştir. 9 oluk/6kutup bir motor tasarımı yapılarak çalışmalar bu motor üzerinde yapılmış. Ferrit ve neodmiyum mıknatıslar farklı miktarlarda kullanılarak değişimlerin etkisi ve momente katkısı incelenmiş. Mıknatısların yalıtım oranını iyileştirdiği görülmüş. Hava aralığını azaltmayla yalıtım oranının artabildiği ama bunun aynı zamanda doyma sorunu getirdiği belirtilmiş. Mıknatıs kalınlığını her durumda arttırmanın momenti ve yalıtım oranını arttırmadığı görülmüş. Mıknatıs kalınlığını maksimum moment için ayarlarken demagnetizasyon performansını bu parametreyle beraber düşünmek gerektiği belirtilmiştir [20].

C.M Spargo, B.C Mecrow ve J.D. Widmer tarafından yayınlanan ‘Higher Pole Number Synchronous Reluctance Machines with Fractional Slot Concentrated Windings’ adlı çalışmada kesir oluklu konsantre sargılı yüksek kutuplu SRM’ un avantajları, dezavantajları ve uygulama zorlukları anlatılmış. Konsantre sargı yapısına geçiş ile sargı sonu uzunluğunun düştüğü, dolgu faktöründe iyileşme olduğu ve termal anlamda avantaj sağlandığı belirtilmiştir. Motorda çap/paket boyu oranı incelenmiş olup 6 oluk/4 kutup bir senkron relüktans motor seçilerek çap/paket=1 ve çap/paket=2 için çalışma yapılmıştır. Oran büyük olan motorda verimin gözle görülür şekilde arttığı belirtilmiş. Aynı çap ve paket boyuna sahip 6oluk/4kutup ve 9oluk/6kutup iki SRM karşılaştırılmış ve aynı hız için 9oluk/6kutup motorun daha yüksek moment sağladığı ifade edilmiş. Sonuç olarak yüksek kutuplu kesir oluklu konsantre sargı yapılı SRM ‘un verimi arttırdığı, maliyeti ve karmaşıklığı azalttığı ve termal özellikleri iyileştirdiği görülmüştür. Yüksek kutuplu motorlarda yüksek kutbun parazit etkilerinden dolayı belirli limitlerin ve tasarım sorunlarının olduğu ifade edilmiştir. Geniş çaplı daha

küçük paket boylu tasarımın bakır kayıplarını azalttığı için daha verimli olabileceği ifade edilmiş. 9 oluk 6 kutup motorun uygun çap/boy oranı ile 4 kutuplu motordan daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir. Ancak motorun yüksek verim ve iyi bir çıkış gücü çalışmasına rağmen hala güç faktörü ve sürücü kullanımı konusunda endişe kaynağı olduğu belirtilmiştir [21].

Ji-Hoon Park ve arkadaşları tarafından yayınlanan ‘Characteristics Analysis of 15kW Industrial Machine using Synchronous Reluctance Motor for High Efficiency’ adlı çalışmada endüstriyel uygulamalar için yüksek verimli senkron relüktans motor için çalışılmıştır. Son dönemlerde çevre için artan endişelerin getirdiği yüksek verimli motor ihtiyacını SRM ile karşılayabileceği anlatılmıştır. Mıknatıslı motorlar yüksek verimli olmasına rağmen yüksek mıknatıs maliyeti ve demagnetizasyon nedeniyle alternatif motor ihtiyacı duyulduğu belirtilmiştir. Asenkron motorlarda kullanılmasına rağmen alüminyum rotordan dolayı ekstra bir kayıp getirdiği için verim düzeyinde sıkıntı olabildiği anlatılmıştır. Çalışmada 15kW güç, 80nm moment, 1800rpm hız ve %95 verim kriterlerini sağlayacak bir SRM analiz edilmiştir. 36 oluk ve 24 oluklu stator yapıları 3,4,5 ve 6 bariyer yapıları olarak analiz edilmiştir. İki yapı içinde bariyer sayısı belli güç değerlerinde arttıkça momentin ve verimin küçük güç faktörü değerinde arttığı görülmüştür. Çalışmada genel olarak stator oluk sayısı, rotor bariyer oranı ve bariyer sayısı üzerine çalışmış bunların etkisi analiz edilmiştir. Oluk sayısı yüksek olan tasarımın moment ve verim değerleri daha iyi çıkmıştır. Bariyer sayısının artışı verim ve moment olumlu yönde etkilerken kalınlık ve bariyer sayısında doyma etkisine dikkat edilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Optimum tasarım değerlerinin tüm analiz sonuçlarının yorumlanması sonucu elde edilebileceği belirtilmiştir [22].

A.J.O. Cruickshank, R.W. Menzies ve A.F. Anderson tarafından yapılan ‘Axially Laminated Anisotropic Rotors for Reluctance Motors’ adlı çalışmada relüktans motorlar için sac laminasyonlarını radyal konumda paketleme yöntemi önerilmiştir. Bu sayede q eksen akısı azaltılarak q eksen endüktansını azaltıp, d eksen endüktansını artırarak çıkıklık oranının artırılması hedeflenmiştir. Çalışmada üretilen motorlar üzerinde yapılan testlerde bu yöntemle çıkıklık oranının artırıldığı gösterilmiştir [23].

Seyedmorteza Taghavi ve Pragasen Pillay tarafından yayınlanan ‘A Comparative Study of Synchronous Reluctance Machine Performance with Different Pole Numbers

for Automotive Applications' adlı çalışmada otomotiv uygulamaları için SRM' un farklı kutuplu tasarımlarının karşılaştırılması yapılmıştır. 36oluk/4kutup ve 36oluk/6kutup motor karşılaştırılması yapılmıştır. 34kW güç, 150nm moment, 9000rpm maksimum hız değerlerinde çalışabilecek iki tasarım ele alınmıştır. Rotor bariyerleri arasındaki kirişler kalınlıkları aynı tutularak sonuçlar elde edilmiştir. 6 kutuplu motorun moment/akım oranının daha yüksek olduğu görülmüştür. Aynı zamanda moment dalgalanması 6 kutuplu motorda daha düşük çıkmıştır. Rotordaki bariyerlerin kirişlerinin etkisini incelemek için bir kirişin kalınlığı artırılarak analiz yapılmış ve kirişin kalınlığının artması moment kaybına neden olmuştur. Ancak moment düşerken moment dalgalanması değeri de düşmüştür. Kirişlerin kalınlığının artması aynı zamanda mekanik dayanımın artması anlamına geldiği ifade edilmiştir. Yüksek kutuplu tasarımın daha iyi performans, düşük moment dalgalanması ve yüksek hızlarda daha iyi mekanik dayanım sağladığı ifade edilmiştir [24].

M. Palmieri, M. Perta ve F. Cupertino tarafından yayınlanan 'Design of a 50.000 rpm Synchronous Reluctance Machine for an Aeronautic Diesel Engine Compressor' adlı çalışmada havacılık alanında kullanılmak üzere 50000rpm hızda çalışabilen SRM çalışılmıştır. Son zamanlarda yüksek hızlı uygulamalara ilginin arttığı ifade edilmiş. 100000 ile 500000rpm arasındaki hızlara yüzey mıknatıslı senkron motor ile çıkıldığı ancak rotor da tutucuların kullanıldığı belirtilmiştir. Gömülü mıknatıslı motor ile de 40000rpm hızlara çıkılmış ancak rotorda tutucu kullanılmış. Bu tutucuların da ekstra kayıp ortaya çıkardığı belirtilmiştir. Kafesli rotorlu asenkron motorlarında yüksek hız için uygun olduğu ancak mıknatıslı senkron motorlara göre daha yüksek rotor kayıpları ve düşük moment yoğunluğu olduğu ifade edilmiş. Tutuculardan ve ekstra kayıplardan kaçınmak için ekstra çözüm olarak senkron relüktans motor önerilmiştir. Ama tatmin edici performans elde etmek için özel üretim prosesleri ve özel materyaller kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Yüksek hızlarda da tutucu kullanılmasının sağlamlık açısından kritik olduğu aksi halde rotordaki tasarımsal düzenlemeler ile yapılacak sağlamlaştırmanın performanstan ödün verme anlamına geleceği ifade edilmiş. Çalışmada, 5kW çıkış gücüne sahip, 50000rpm hızda çalışabilen, 1,6nm moment verebilen bir SRM üzerine çalışılmıştır. Yüksek oluk ve kutup performansı arttırmasına rağmen rotordaki kutupların artması kayıplarında artması anlamına geldiği ve rotordaki kayıpların minimize edilmesi öncelikli amaç olduğu için yüksek kutuptan

vazgeçildiği ifade edilmiş. 24 oluk/4 kutup motor seçilerek rotor bariyer sayısı 3 olarak belirlenmiştir. Senkron relüktans motorun yapısal avantajlarını kullanmak adına mekanik dayanımı tutucu ile değil rotor kirişleri ile sağlama yoluna gidilmiştir. Düşük hızlı tasarımlarda kullanılan yönlendirilmemiş laminasyon ve çoklu bariyer yapısı kullanılarak tasarımın yapılması yapının basitliği açısından çok önemli olduğu ifade edilmiştir. Motorun prototipi üretilerek analiz ile elde edilen sonuçlar deneysel olarak doğrulanarak motorun performans olarak yüksek hızlı uygulamalarda kullanılabilir olduğu ifade edilmiştir [25].

Yateendra Deshpande ve Hamid A Toliyat tarafından yayınlanan ‘Design of an Outer Rotor Ferrite Assisted Synchronous Reluctance Machine (Fa-SynRM) for Electric Two Wheeler Application’ adlı çalışmada iki tekerli elektrikli araç için dış rotorlu ferrit MDSRM çalışması yapılmıştır. Ferrit mıknatıslı SRM’ un yüksek verim ve geniş güç-hız aralığında çalışma ihtiyacı olan ve maliyet konusunda hassasiyeti olan uygulamalarda kullanılabileceği belirtilmiştir. Tasarım için kutup sayısı 10-16 arasında değişen konsantre ve dağıtılmış sargılı yapılar denenmiştir. 48 oluk/10 kutuplu yapı denemelerin içinden seçilmiş ve optimum yapı olarak prototiplenmiştir. Hedeflenen prototip ile neodmiyum mıknatıslı bir yüzey mıknatıslı senkron motor karşılaştırılmıştır. Dış rotorlu mıknatıs destekli motorun hem boyut hem de performans olarak daha iyi olduğu ifade edilmiştir. Dış rotorlu yapılardan 48 oluk/10 kutup, 54 oluk/12 kutup, 30 oluk/14 kutup ve 18 oluk/16 kutuplu 4 motor karşılaştırılmıştır. 2 bariyerli rotora sahip bu motorlardan 48 oluk/10 kutup ve 54 oluk/12 kutuplu motorların performans olarak diğer iki motordan iyi olduğu görülmüştür. Üretilen prototip olan 48 oluk/10 kutuplu ve rotorunda 2 bariyer bulunduran yapı test düzeneği ile test edilmiştir. Geliştirilen algoritma sayesinde motorun istenen verimlilik kısıtlarında geniş sabit güç-hız aralığında çalışabileceği belirtilmiştir [26].

1.3. MDSRM Kontrolü Literatür Çalışmaları

Çalışmanın bu bölümünde MDSRM için kontrol literatürü incelenmiş olup yapılan farklı çalışmalar ve kontrol algoritmaları verilmiştir.

P. Guglielmi, M. Pastorelli, G. Pellegrino, A. Vagati tarafından yapılan ‘Position Sensorless Control of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motors’ adlı çalışmada MDSRM için sensörsüz konum kontrolü yöntemi önermişlerdir. Düşük

ve yüksek hızlarda d eksen akısı üzerinden kontrol yapıldığı ifade edilmiştir. Motora düşük hız ve sıfır hızda titreşimli d eksen akısı uygulanırken yüksek hızlarda gerilim ve ek kayıpları azaltmak için bu akıyı uygulamayı kestiklerini ifade etmişlerdir. Kontrol algoritmasında motor manyetik davranışını içeren akı tabanlı bir gözleyici kullanılmıştır. Bu sayede yük değişkenliği ve manyetik doyma etkisine karşı daha iyi bir kontrol sağlanmıştır. Aynı zamanda bu yöntem ile istenen moment, akı ve seçilen kontrol değişkenleri olan d eksen akısı ve q eksen akımı arasında kolay ve etkili bir uyum sağlandığı ifade edilmiştir. Ayrıca çalışma da MDSRM prototip üretilmiş ve bu motor üzerinde kontrol çalışmaları sağlanmıştır. Sunulan yöntemin oldukça iyi bir performans sergilediği ve rotorda bulunan kalıcı mıknatıslar sayesinde geniş bir akı zayıflatma aralığı sağlandığı bu sayede geniş bir hız aralığı yakalandığı ifade edilmiştir [27].

H.W. de Kock ve M.J. Kamper tarafından yapılan ‘Dynamic control of the permanent magnet-assisted reluctance synchronous machine’ adlı çalışmada MDSRM dinamik kontrolü üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma da dinamik performansa vurgu yaparak MDSRM için dijital sinyal işlemci tabanlı bir kontrol sistemi önermişlerdir. Makinanın akım ve hız kontrolörlerini tasarlamak için klasik tasarım yaklaşımını kullanmışlardır. Motorun stator akımı d ve q eksen arasında ki mevcut açı sabit olacak şekilde kontrol edilmiştir. Yük ve akım ilişkisi uzay durum gözleyicisi kullanılarak kestirme yapılmış ve sürücü dinamik performansını iyileştirmek için tahmin edilen yüke göre dengeleme akımı kullanılmıştır. Kontrol sistem tasarımı içinde kullanılan tahmin verileri makinanın sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen verilere dayanmaktadır. Kontrol sistemi 110 kW güç seviyelerinde test edilmiştir. Özellikle sabit moment bölgesinde kontrol yönteminin mevcut akım değeri için maksimum momenti verecek şekilde çalıştığı görülmüştür. Simülasyon ve test sonuçları karşılaştırıldığında sistemin iyi bir dinamik performansa sahip olduğu görülmüştür [28].

Peyman Niazi, Hamid A. Toliyat ve Abbas Goodarzi tarafından yapılan ‘Robust Maximum Torque per Ampere (MTPA) Control of PM-Assisted SynRM for Traction Applications’ adlı çalışmada çekiş sistemleri için MDSRM’ un akım başına maksimum moment sağlaması için çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada MDSRM’ un son zamanlarda hibrit elektrikli araçlarda çekiş motoru olarak

kullanılmasının mümkün hale geldiği ifade edilmiştir. Kontrol yöntemi olarak kullanılan akım başına maksimum moment yaklaşımı için motor parametre bilgilerinin gerekli olduğu ancak yüksek sıcaklık ve doymalardan dolayı endüktans ve mıknatıs akı yoğunluğu gibi parametrelerin değişiminin önlenemez bir durum olduğu ifade edilmiştir. Motor parametrelerini tahmin etmek için kullanılan çevrimdışı modellerde doyum ve mıknatıs akısının değişimi de hesaplara dahil edildiğinde çok karmaşık bir yöntemin ortaya çıktığı ifade edilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada MDSRM için basit bir parametre tahmin ve pratik bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde çıkış momentini maksimize etmek için mevcut faz açısı referansına küçük miktarda bozucu eklenmiştir. Çıkış momenti de motor parametreleri ve ölçülen stator akımından hesaplanmaktadır. Motor parametreleri de çevrimiçin yöntem ile tahmin edilmektedir. Bu sayede de çıkış momentinin doyma ve akı değişimlerinden etkilenmediği ifade edilmiştir. Önerilen yöntem ile akım başına maksimum moment koşulunu sağladığı ve doyma, akı değişimi gibi etkilere karşı da sağlam bir kontrol elde edildiği ifade edilmiştir. Kontrolörün geçerliliğini ve uygulanabilirliğini doğrulamak için düşük güçlü bir prototip üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir [29].

Jiang Dong Zhao Zhengming Duan Yao Guo Wei tarafından yapılan 'Position Sensorless Direct Torque Control of Synchronous Reluctance with Permanent Magnet Motor' adlı çalışmada MDSRM için sensörsüz doğrudan moment kontrolü yöntemi incelenmiştir. Çalışmada SRM yapısına ve özellikle MDSRM' da moment kontrolü karakteristiğine odaklanılmıştır. Çalışmada MDSRM' un matematiksel modeli verilmiş olup motorun matematiksel modelinin geleneksel mıknatıslı motorlarla çok benzer olmasına rağmen özel yapısı nedeniyle kontrol yöntemi açısından ayrıldığına dikkat çekilmiştir. Çalışmada MDSRM' un sensörsüz konum ve hız kestirme stratejisi incelenmiştir. Çalışmada sensörsüz kontrolün ana noktası momenti açısı tam olarak tahmin edildiği ifade edilmiştir. Ayrıca hem konum hem de hız döngülerinden alınan geri besleme ile sensörsüz doğrudan moment kontrol yöntemi doğru şekilde çalıştırılabildikleri yani moment açısını doğru şekilde tahmin edebildikleri ifade edilmiştir [30].

Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada tarafından yapılan 'A Novel Control Scheme for Wide Speed Range Operation of Direct Torque Controlled Synchronous Reluctance Motor' adlı çalışmada SRM' un geniş hız aralığında

çalışması için yeni bir kontrol şeması önerilmiştir. Önerilen kontrol şeması, akım başına maksimum moment, akı başına maksimum moment, akı zayıflatma kontrolü ve moment sınırlama kombinasyonlarından oluşmaktadır. Bu yöntemler stator akı bağlantısı ile senkronize olan döner alan matematik modeline dayanmaktadır. Çalışma da önerilen yöntem doğrudan moment kontrolü ve akı yönlendirmeli kontrol için uygundur. Önerilen yöntemin, armatür gerilimi, armatür akımı ve moment açısının sınırlamalarını karşıladığı deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Önerilen akı zayıflatma ve moment sınırlama yönteminin kontrol şemaları parametre değişimine karşı duyarsız olduğu ifade edilmiştir [31].

Zhiwei Zhang, Libing Zhou tarafından yapılan ‘Sensorless Control of a Ferrite PM Assisted-Synchronous Reluctance Machines by Using Sliding Mode Observer and High Frequency Signal Injection’ adlı çalışmada MDSRM için kayma kip gözleyicisi ve yüksek frekanslı sinyal kullanarak geniş hız aralığında sensörsüz kontrolünü sağlamaya yönelik bir yöntem önerilmiştir. İlk olarak MDSRM ‘un topolojisi ve özellikleri tanıtılmıştır. Daha sonra kullanılan gözleyicinin temel denklemlerinin MDSRM’ un dinamik modeline dayandırıldığı ifade edilmiştir. Orta ve yüksek hız aralığında rotor pozisyonunu tahmin etmek için EMK tabanlı bir gözleyici önerilmiştir. Aynı zamanda yüksek frekanslı sinyal uygulama, dijital sinyal işleme ve rotor polarite tanımlanmasının prensipleri de analiz edilmiştir. Teorik analizler deneysel çalışmalarla doğrulanmış ve tahmini konum sinyalinin çözünürlüğünün bazı endüstriyel sürücüler için uygun olabileceği ifade edilmiştir [32].

Peyman Niazi ve Hamid A. Toliyat tarafından yapılan ‘Robust Maximum Torque per Amp (MTPA) Control of PM-Assisted Synchronous Reluctance Motor’ adlı çalışmada MDSRM’ un dayanıklı akım başına maksimum moment kontrolü üzerine çalışılmıştır. Çalışma da basit bir parametre tahmin edicisi ile birlikte kontrol şeması tanıtılmıştır. Bu yöntemde mevcut akımda maksimum moment koşulu, belirli bir çalışma bölgesinde maksimum çıkış momentinin ararken çıkış momentinin hesaplanması ve bir değişkenin bozulmasıyla sağlanmıştır. Elektromanyetik momentin en üst düzeye çıkarılmasının motor parametrelerine ve yük momentine bağlı olduğu ifade edilmiştir. Bu hassasiyeti de azaltmak için motor parametrelerin tahmin etmek ve elektromanyetik momenti doğru hesaplamak için basit bir çevrimiçi parametre tahmin edici sistem kullanıldığı belirtilmiştir. Bu sayede de yükün değişimi ve dinamiği

kontrolörü en az düzeyde etkilenmiştir. Önerilen teknik simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırılması ile doğrulanmıştır [33].

Tzu-shien Chuang tarafından yapılan ‘A High-Efficiency PM-Assisted Synchronous Reluctance Motor Drive’ adlı çalışmada 3 faz 6 oluk 4 kutuplu MDSRM için sürücü önerilmiştir. Sürücüyü enerji tasarrufu sağlayan klimalar veya diğer endüstriyel uygulamalara uygun hale getirmek için birim güç faktörü kontrol şemasına dayalı akım vektörü uygulanmıştır. Bu sayede yüksek verim, yüksek moment, düşük akustik gürültü ve çabuk hız cevabı ile yüksek performanslı bir sistem edildiği ifade edilmiştir. Deneysel sonuçlarda 3 faz 400W gücünde olan motorun 100rpm ile 3000rpm hızı arasında çalıştığı, sürücü verim değerinin %86-88 arasında olduğu ve 3Nm maksimum mil momentine sahip olduğu görülmüştür. Önerilen sürücünün enerji tasarrufu sağlayan yüksek performanslı otomasyon uygulamaları için çok uygun olduğu ifade edilmiştir [34].

Anil K. Chakali, Hamid A. Toliyat, Haitham Abu-Rub tarafından yapılan ‘Observer-Based Sensorless Speed Control of PM-Assisted SynRM for Direct Drive Applications’ adlı çalışmada doğrudan tahrikli uygulamalar için MDSRM’ un gözleyici tabanlı sensörsüz hız kontrolü üzerine çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada MDSRM ‘un yüksek verimliliğe sahip değişken hız sürücüleri için ilginç bir alternatif olduğu ifade edilmiştir. Relüktans momenti sayesinde kalıcı mıknatıs miktarı azaltılarak ucuz çözüm avantajı sağladığı belirtilmiş ve bu nedenlerden dolayı sunulan çözümün benzer sabit mıknatıslı senkron motordan daha ucuz olacağı belirtilmiştir. Aynı zamanda geniş bir akı zayıflatma bölgesi sayesinde de geniş hız aralığı sağlayabilmesi ve yüksek güç faktörü elde edilebilmesinin mümkün olduğundan söz edilmiştir. Çalışmada doğrudan tahrikli bir çamaşır makinasında kullanılan MDSRM için vektör kontrol uygulaması önerilmiş ve sensörsüz hız kontrolüne odaklanılmıştır. Kayma kipli gözlemci tekniği kullanılmış ve bu sayede sensor kullanmadan ucuz maliyetli ve güvenilir bir sistem ortaya çıkarıldığı iddia edilmiştir. Gözlemci tabanlı hız kontrol sisteminin gereksinimi olan karmaşık matematiksel hesaplamaları gerçekleştirmek için dijital sinyal işlemcisi kullanımı gerektiği belirtilmiştir. Çalışmada önerilen çözümün ile sabit mıknatıslı senkron motorlara kıyasla daha geniş alan zayıflatma bölgesi için daha ucuz ve uygun olabileceği ifade edilmiştir. Önerilen yöntem deneysel sonuçlarla da doğrulanmıştır [35].

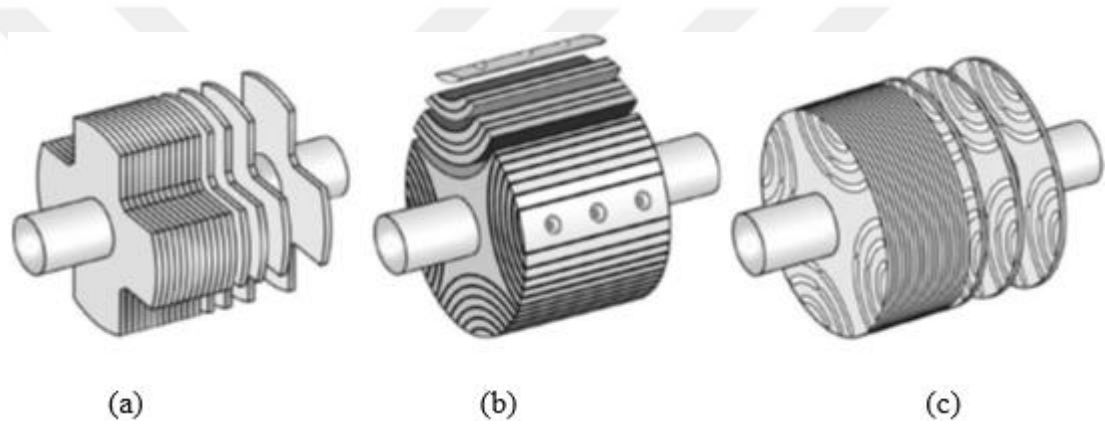
Y. Inoue, S. Morimoto ve M. Sanada tarafından yapılan ‘A Novel Control Scheme for Maximum Power Operation of Synchronous Reluctance Motors Including Maximum Torque Per Flux Control’ adlı çalışmada SRM’ un maksimum güç çalışması için yeni bir kontrol şeması önerilmiştir. Önerilen kontrol şeması, akım başına maksimum moment, akı başına maksimum moment, akı zayıflatma kontrolü ve moment sınırlama kombinasyonlarından oluşmaktadır. İlk üç yöntemde stator akı bağlantısı ile senkronize olan döner alan matematik modeline dayanmaktadır. Son yöntem ise akı ve akım vektörlerinden hesaplanan bir reaktif momenti kullanmaktadır. Çalışma da önerilen yöntem doğrudan moment kontrolü ve akı yönlendirmeli kontrol için uygundur. Önerilen kontrol şeması bir sürücü üzerinde uygulanıp simülasyon ve deney sonuçları ile doğrulanmıştır [36].

Silverio Bolognani, Luca Peretti ve Mauro Zigliotto tarafından yapılan ‘Online MTPA Control Strategy for DTC Synchronous-Reluctance-Motor Drives’ adlı çalışmada SRM için doğrudan moment kontrolüne çevrimiçi akım başına maksimum moment kontrol algoritma önerilmiştir. Algoritma sürücüye rastgele bozucu etki modeli uygulayan bir sinyal uygulama metoduna dayanmaktadır. Yöntemde otomatik prosedürü gerçekleştirmek için sadece stator direncine ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Algoritma bir doğrudan moment kontrollü sürücüsünün akı sinyal referansına rastgele bir model enjekte ederek örneklenen akım büyüklüğünden maksimum moment noktası bilgisini almaktadır. Model simülasyon ve deneysel sonuçlar sonucunda doğrulanmıştır. Yöntemin sadeliği ve etkinliği sayesinde de sabit mıknatıslı motor ve asenkron motorlar gibi farklı tipte sürücülere uygulanabileceği ifade edilmiştir [37].

2. MIKNATIS DESTEKLİ SENKRON RELÜKTANS MOTOR

2.1. Senkron Relüktans Motor Farklı Rotor Yapıları

Senkron relüktans motorun geliştirilmeye başlanması yaklaşık 100 yıl öncesine dayanmaktadır. Geliştirilmeye başlamasından günümüze kadar da farklı tiplerde rotor yapıları geliştirilmiştir [1]. Bu yapıların en çok kullanılanları ve bilinenleri basit çıkık kutuplu rotor, aksel lamine rotor ve enine lamine rotor yapılarıdır [1,23]. Şekil 2.1'de senkron relüktans motora ait farklı rotor yapılarının görünümü verilmiştir [38].



Şekil 2.1. (a) Basit çıkık kutuplu rotor (b) Aksel lamine rotor (c) Enine lamine rotor

Basit çıkık kutuplu rotor sağlam ve basit bir yapıda olup düşük üretim maliyetlerine sahiptir. Sağlam yapılarından dolayı yüksek hızlı uygulamalarda kullanılmaya uygundur. Ancak düşük yalıtım oranından dolayı performansı düşüktür [39]. Bu nedenle kullanım oranı günümüzde azalmıştır.

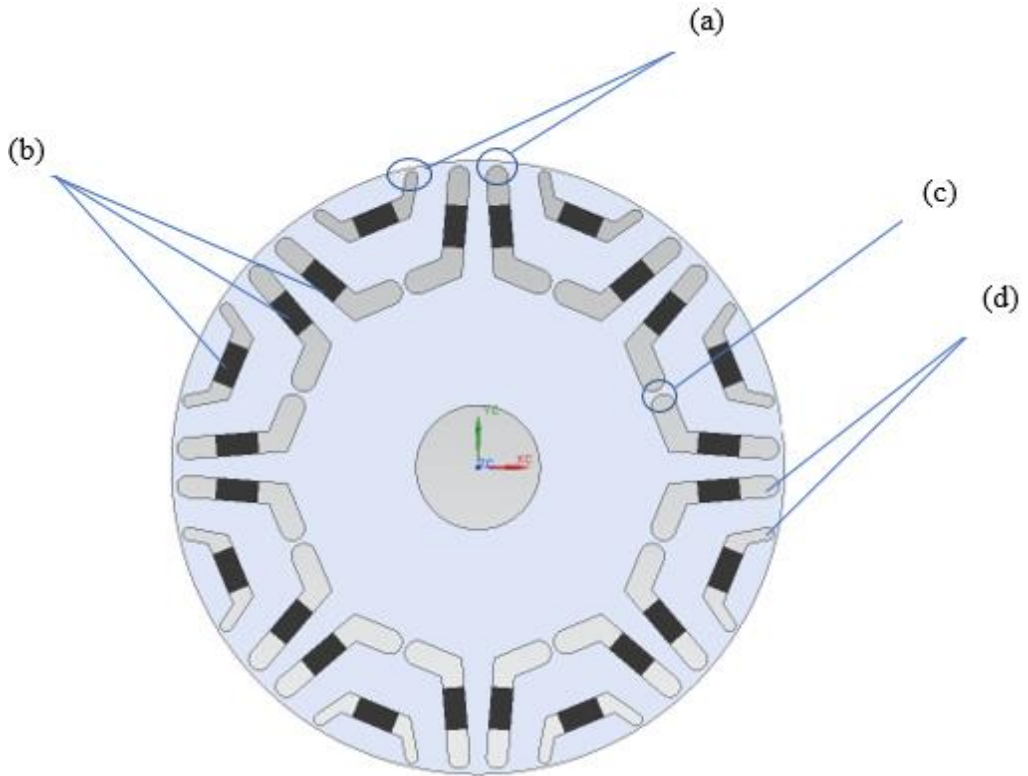
Aksel lamine rotor yüksek anizotropi ve yüksek çıkıklık oranına sahiptir [40]. Ancak aksel lamine yapısından dolayı girdap akımı kayıpları yüksektir. Ayrıca bu yapı kompleks yapısından dolayı seri üretim koşulları için uygun değil ve üretimi zordur. Bu nedenle üretim adetlerinin yüksek olduğu endüstriyel uygulamalarda tercih edilmezler [38].

Enine lamine rotorlu yapı senkron relüktans motorun rotor tiplerinin en yenisi ve en çok kullanılan yapısıdır. Rotorun mekanik olarak dayanımını kiriş kalınlığı ve köprü

kalınlıkları belirler. Kiriş ve köprü kalınlığından dolayı aksel lamine rotora göre kaçak akıları daha fazladır. Bu da moment üretiminde kayıplara yol açmakta ve güç faktörünü düşürmektedir [39]. Ancak yine de bu yapıda laminasyonların kalıp ve lazer kesim teknolojisi ile kesilebilmesinden dolayı seri üretim için çok uygun ve ucuzdur. Bu özelliği de tercih edilme oranını arttırmaktadır. Bu çalışma da seri üretime uygun bir tasarım hedeflendiği için enine lamine rotor yapısı seçilmiştir.

2.2. Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motorun Tanımlanması

MDSRM aksel lamine veya enine lamine rotor yapılarında ki akı bariyerlerinin içine mıknatıs eklenmesiyle oluşmaktadır. Mıknatıs ilavesi sayesinde güç faktörü ve motor performansı iyileşmektedir. Ayrıca mıknatıs desteğiyle birlikte motorun çalışma hızı aralığı genişlemektedir. Bu motorlar yapı olarak klasik gömülü mıknatıslı motorlara benzemektedir. Ayrıca gömülü mıknatıslı motorlara göre mıknatıs akısı daha düşüktür ve gömülü mıknatıslı motorlardan farklı olarak mıknatıs yüksek endüktans ekseninde değil yüksek relüktans ekseninde konumlanmıştır. Bu çalışmada da geniş hız aralığında çalışacak MDSRM tasarımı hedeflenmiştir. Motora ait görsel ve kritik rotor tasarım parametreleri Şekil 2.2’ de verilmiştir.



Şekil 2.2. MDSRM'un (a) Köprü kalınlığı (b) mıknatıs (c) kiriş kalınlığı (d) akı bariyerleri

2.3. Moment Üretimi

MDSRM' da moment iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler d ve q eksen endüktanslarının farkından oluşan relüktans momenti ve mıknatıs akısından oluşan mıknatıs momentidir. Motor çıkış momentini tanımlamak için öncelikle d ve q eksen akı ve gerilim ifadeleri tanımlanmalıdır. D ve q eksene gerilim ifadeleri Eşitlik (2.3) ve Eşitlik (2.4) ile ifade edilebilir [18].

$$\lambda_d = L_d I_d \quad (2.1)$$

$$\lambda_q = L_q I_q - \lambda_m \quad (2.2)$$

$$V_d = -\omega_r (L_q I_q - \lambda_m) \quad (2.3)$$

$$V_q = \omega_r (L_d I_d) \quad (2.4)$$

Bu ifadelerde λ_m mıknatıstan kaynaklanan akı bağı, L_d ve L_q sırasıyla d ve q eksen endüktansları, I_d ve I_q sırasıyla d ve q eksen akımlarıdır. V_d ve V_q stator d ve q eksen gerilimleridir. Bu denklemlerden yola çıkarak elektromanyetik moment ifadesi aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [41].

$$T_e = 3 \frac{P}{2} (\lambda_m I_d + (L_d - L_q) I_d I_q) \quad (2.5)$$

Burada T_e elektromanyetik moment ifadesi, P rotor kutup sayısını ifade etmektedir. Eşitlik (2.5) 'de verilen ifadeye bakıldığında ilk bölüm mıknatıs momentini, ikinci bölüm ise relüktans momentini ifade etmektedir. Eşitliklerden de görüldüğü gibi d ve q eksen endüktansları arasında ki farkın artması motor relüktans momentini arttırmaktadır. Akı bariyerleri içine eklenen mıknatıs sayesinde de motor çıkış momenti artmakta ve güç faktörü iyileşmektedir [42].

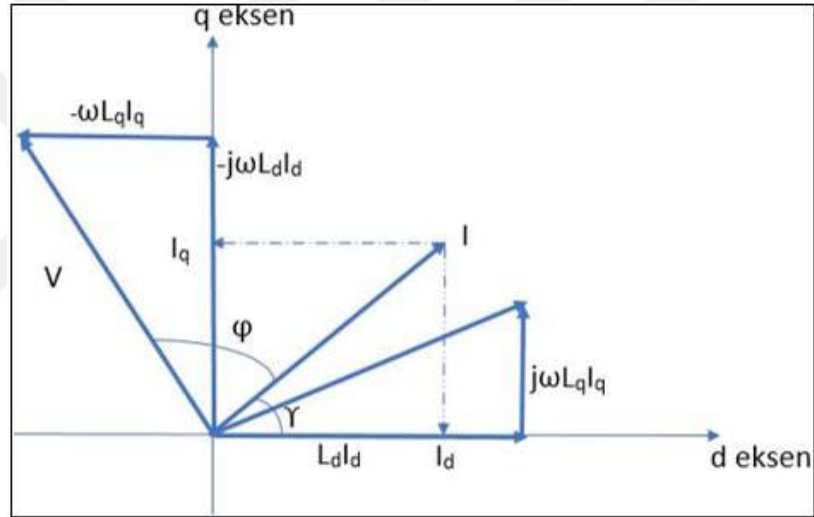
2.4. Fazör Diyagramı

Bu bölümde SRM ve MDSRM' ların fazör diyagramları verilecektir. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4' de sırasıyla SRM' un ve MDSRM' un fazör diyagramları verilmiştir. SRM' un dezavantajlarından bir tanesi güç faktörünün düşük olmasıdır [43]. Şekil 2.3' de verilen fazör diyagramından görülen akım ve gerilim arasında bulunan ϕ açısı güç faktörünün

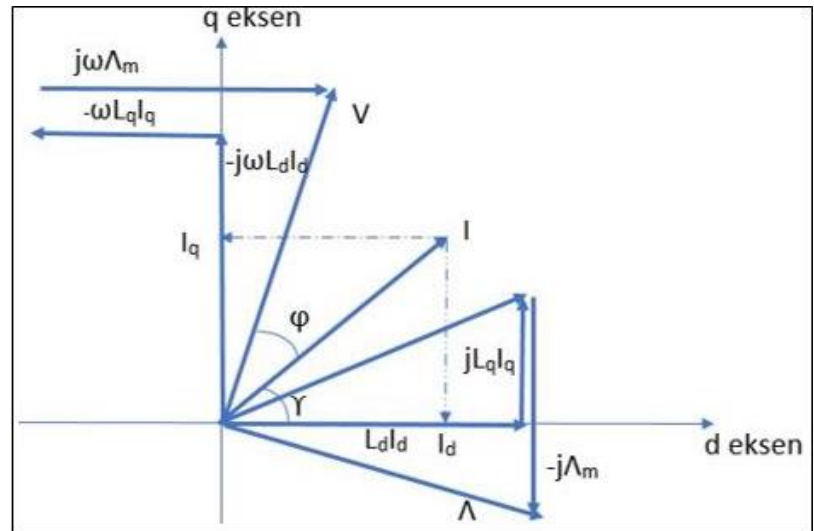
açısıdır. Bu açı da çıkıklık oranının bir fonksiyonudur. Çıkıklık oranı aşağıdaki Eşitlik (2.6) ile ifade edilebilir.

$$K = \frac{L_d}{L_q} \quad (2.6)$$

Burada K çıkıklık oranını ifade etmektedir. Çıkıklık oranının artması güç faktörünü ve motor performansını arttırmaktadır. SRM' a mıknatıs eklenmesi sayesinde çıkıklık oranı ve güç faktörü artırılabilir. Şekil 2.4'de görüldüğü gibi mıknatıs ilavesi sayesinde fazör diyagramında gerilim ve akım arasındaki açı olan φ açısı azalmıştır. Güç faktörünün de bu açının kosinüs ($\cos \varphi$) değerine eşit olduğu düşünüldüğünde açının azalmasının güç faktörünü arttırdığı görülmektedir.



Şekil 2.3. SRM fazör diyagramı



Şekil 2.4. MDSRM fazör diyagramı

2.5. Maksimum Güç Faktörü

Motor performansını arttırmak için SRM' da güç faktörü kritik parametrelerden biridir. Bu nedenle güç faktörünü arttırmak için çalışmalar yapılmaktadır. Güç faktörü aşağıda ki şekilde Eşitlik (2.7) ile tanımlanabilir [43].

$$\cos \phi = \frac{V_{qs} \sin \varepsilon + V_{ds} \cos \varepsilon}{\sqrt{V_{qs}^2 + V_{ds}^2}} \quad (2.7)$$

Burada V_{ds} ve V_{qs} sırasıyla d ve q eksen stator gerilimleri, ε gerilim açısıdır. Denklemden güç faktörü gerilimin açısı olarak ifade edilmiştir. Bu nedenle burada güç faktörünün maksimum olmasını sağlayacak ε açısı bulunacaktır. Aşağıda Eşitlik (2.8)'de maksimum güç faktörü verilmiştir [43].

$$\cos \phi_{\max} = \frac{K-1}{k+1} K_{\phi\max} \quad (2.8)$$

Bu denklemde $K_{\phi\max}$ değerini Eşitlik (2.9) ile ifade edersek,

$$K_{\phi\max} = \frac{\sqrt{1 + \frac{r_s^2}{x_{ds}x_{qs}} + A}}{(1+B)(1+C)} \quad (2.9)$$

Bu denklemde verilen A, B ve C ifadelerini sırasıyla Eşitlik (2.10), Eşitlik (2.11) ve Eşitlik (2.12) ile aşağıdaki şekilde tanımlarsak,

$$A = 2 \frac{r_s}{x_{qs}} \left(\frac{1}{x_{qs}} \right) \left(\sqrt{\frac{x_{ds}}{x_{qs}}} \right) + 2 \left(\frac{r_s}{x_{qs}} \right)^2 \left(\frac{1}{x_{qs}} \right) \sqrt{1 + \frac{r_s^2}{x_{ds}x_{qs}}} + 2 \left(\frac{r_s}{x_{qs}} \right)^3 \left(\frac{1}{x_{qs}} \right) \left(\sqrt{\frac{x_{ds}}{x_{qs}}} \right) \quad (2.10)$$

$$B = \frac{2r_s}{x_{qs}} \left(1 + \frac{r_s^2}{x_{ds}x_{qs}} \right)^{3/2} \left(\frac{1}{x_{qs}} \right) \left(\sqrt{\frac{x_{ds}}{x_{qs}}} \right) + \left(\frac{r_s}{x_{qs}} \right)^2 \left(\frac{2}{x_{qs}} \right) \left(\frac{x_{ds}}{x_{qs}} + 3 \right) + \left(\frac{r_s}{x_{qs}} \right)^4 \left(\frac{2}{x_{qs}} \right) \left(\frac{x_{ds}}{x_{qs}} \right) \quad (2.11)$$

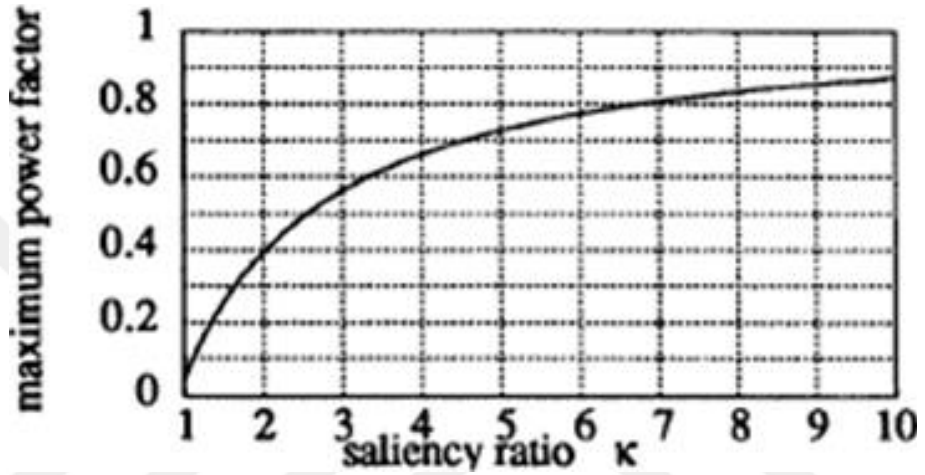
$$C = 2 \frac{r_s}{x_{qs}} \left(\frac{1}{x_{qs}} \right) \left(\sqrt{\frac{x_{ds}}{x_{qs}}} \right) \sqrt{1 + \frac{r_s^2}{x_{ds}x_{qs}}} + 2 \left(\frac{r_s}{x_{qs}} \right)^2 \left(\frac{1}{x_{qs}} \right) \quad (2.12)$$

Yukarıdaki denklemlerden ε açısına indirgenip ifade edilirse ve Eşitlik (2.13)'e ulaşırsa buradan çıkıklık oranının güç faktörü açısına bağlı olarak ifadesi elde edilmektedir. [29]. Denklemlerden görüldüğü gibi güç faktörü değerini çıkıklık oranı

önemli derecede etkilemektedir. Uygun r_s/x_{ds} değeri seçilerek maksimum güç faktörüne ulaşılabilir.

$$\tan \varepsilon = \sqrt{K} \left(\sqrt{1 + \frac{r_s^2}{x_{ds}x_{qs}}} + \sqrt{\frac{r_s^2}{x_{ds}x_{qs}}} \right) \quad (2.13)$$

Şekil 2.5' de güç faktörünün çıkıklık oranına göre değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi çıkıklık oranının artması güç faktörünü arttırmıştır.



Şekil 2.5. Güç faktörü-çıkıklık oranı değişimi

2.6. Kayıplar

2.6.1. Demir kayıpları

Demir kayıpları Bertotti' nin son halini verdiği şekilde histeresiz kayıpları, girdap akımı kayıpları ve anormal kayıpların toplamı olarak ifade edilmiştir. Toplam demir kaybı Eşitlik (2.18) ile ifade edilebilir [44].

$$P_t = P_h + P_g + P_a \quad (2.14)$$

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_m^n \quad (2.15)$$

$$P_g = K_g \cdot f^2 \cdot B_m^2 \quad (2.16)$$

$$P_a = K_a \cdot f^{1.5} \cdot B_m^{1.5} \quad (2.17)$$

$$P_t = K_h \cdot f \cdot B_m^n + K_g \cdot f^2 \cdot B_m^2 + K_a \cdot f^{1.5} \cdot B_m^{1.5} \quad (2.18)$$

Yukarıda verilen kayıp denkleminde ilk kısım histeresiz kayıplarını, ikinci kısım girdap akımı kayıplarını ve üçüncü kısım da anormal kayıpları ifade etmektedir. Burada K_h histeresiz sabiti, K_g girdap akımı sabiti ve K_a anormal kayıp sabiti olup malzeme özelliklerine bağlı katsayılarıdır. F manyetik alanın frekansını ve B değeri de maksimum manyetik alan yoğunluğunu ifade etmektedir.

Denklemlerden de görüldüğü gibi frekans artışı demir kayıplarını önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu nedenle yüksek hızlı ve yüksek frekanslı uygulamalarda demir kayıplarını incelenmesi önemli hale gelmektedir. Senkron relüktans motorda demir kayıpları özellikle yüksek hızlarda baskın kayıplardır. Bu kayıpların azaltılmasında malzeme seçimi ve rotor tasarımı önemli rol oynamaktadır.

2.6.2. Bakır kayıpları

Fırçasız elektrik motorlarının statorunda bulunan sargıların oluşturduğu dirençten kaynaklanan kayıplara bakır kayıpları denir. Bakır kayıpları akımın karesi ve sargı direnci ile orantılıdır. Bu nedenle kullanılan sargıda kullanılan telin çapı, öz direnci çok önemli olmaktadır. Ayrıca bakır kayıpları, sargıların ısınmasına bağlı olarak sargı direncin artmasından dolayı artmaktadır. Bu nedenle kullanılan telin sıcaklığa bağlı direnç değişimi önemli parametrelerdendir.

2.6.3. Deri etkisi kayıpları

Akımın tel çapının tamamını kullanamadığı durumda ortaya çıkan kayıplar deri etkisi kayıpları olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda akım iletken telin merkezinden uzaklaşarak yüzeye yakın bölgelerden akmaktadır. Bu nedenle akımın geçtiği iletken çapının düşmesinden dolayı akımın gördüğü sargı direncini arttırmaktadır. Bundan dolayı da iletken kayıpları artmaktadır. Akımın girme derinliği Eşitlik (2.19)'da ki gibi tanımlanmaktadır [45].

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_r \mu_0 \omega}} \quad (2.19)$$

Burada δ girme derinliği, ω akımın açısal frekansı, μ_r bağl manyetik geçirgenlik, μ_0 havanın manyetik geçirgenliği, ρ ise elektriksel direnç değerlerini simgelemektedir.

2.7. Kritik Motor Tasarım Parametreleri

Senkron relüktans motoru diğer motorlardan ayıran en önemli karakteristik özelliği rotor yapısıdır. Rotor yapısında bulunan akı bariyerlerinin tasarımı motorun performansını en önemli derecede etkileyen parametredir. Bu nedenle bu bölümde rotor için kritik olan parametreler tanıtılmıştır.

2.7.1. Akı bariyerleri sayısı

MDSRM’de çıkış momenti; relüktans momenti ve mıknatıs momenti olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Mıknatıs momenti mıknatıs akısı ile orantılıyken relüktans momenti d ve q eksen endüktansları arasında k_i farkla doğru orantılıdır. Bu motorlarda relüktans momentini sağlayan endüktans farkı da rotorda bulunan akı bariyerlerinin tasarımı ile elde edilmektedir. Bu nedenle rotorda bulunan akı bariyerlerinin sayısı moment üretimi ve çıkış momenti kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Akı bariyerlerinin sayısı rotor çapı, kutup sayısı gibi etmenlere bağlı olarak 1, 2, 3 veya daha fazla seçilebilir.

2.7.2. Akı bariyerlerinin konumu

Rotor tasarımının en kritik tasarım parametresi olan akı bariyerlerinin, sayısının olduğu gibi konumlarının da çıkış momenti ve kalitesi üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Akı bariyerlerinin hava aralığına, m ile ve d - q ekseninde birbirine olan uzaklıkları, d ve q eksen endüktanslarını doğrudan etkilediği için çıkış momentini ve momenti kalitesini artırıcı veya azaltıcı etkiye sahiptir.

2.7.3. Köprü kalınlığı ve kiriş kalınlığı

Köprü kalınlığı ve kiriş kalınlığı parametreleri rotor tasarımında hem motor çıkış momenti büyüklüğü hem de rotor mekanik dayanımı açısından kritik öneme sahiptir. Köprü ve kiriş kalınlığının artması akı kısa devrelerini arttırmadan dolayı motor performansında kayıplara ve çıkış momentinde azalmaya sebebiyet vermektedir. Ancak bu iki köprü ve kiriş kalınlığının azalması da rotor yüksek hızlar da dönerken meydana gelen yüksek merkezkaç kuvvetlerinden dolayı mekanik olarak rotorun zayıflamasına ve rotorun yırtılmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle köprü ve kiriş kalınlığı değerleri motorun çalışacağı hızlardaki merkez kaç kuvvetlerine

dayanabilecek şekilde yapısal analizler belirlenmelidir. Motorda ekstra akı kaybı yarattığı ve motor performansını düşürdüğü için bu değerlerin en az olacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

2.7.4. Mıknatısların konumu ve boyutları

Motorun ana moment bileşenlerinden olan mıknatısın, konumu ve boyutları, moment üretimi, moment kalitesi ve motor çalışma hızı aralığı açısından önemlidir. Mıknatıs miktarının artışı ile birlikte çıkış momenti ve motor çalışma hızı aralığı artmaktadır. Mıknatısın akı bariyerlerinin içinde ki konumu akı bariyerlerinin ortasında veya yan köşelerin de olabilir. Mıknatısları rotor da ki konumu ise akı bariyerlerinin konumu ile belirlenmektedir. Şekil 2.2’de akı bariyerlerini yan köşelerinde ortasında bulunan mıknatıs konumları verilmiştir.

2.7.5. Hava aralığı

Hava aralığı motorlarda elektriksel dönüşümün olduğu momentin üretildiği ana bölümdür. Bu motorlarda hava aralığının azalması motor çıkış momentini arttırmaktadır. Ancak, relüktans momenti ve mıknatıs momenti oranına bağlı olarak hava aralığının azalması motor çalışma hızı aralığı arttırabilmekte veya azaltabilmektedir. Ayrıca hava aralığını belirlerken üretim proseslerinin getirdiği kısıtları ve rotor hızına bağlı olarak değişen rotor laminasyonunun esnemesi dikkate alınmalıdır.

2.8. MDSRM Kontrolü

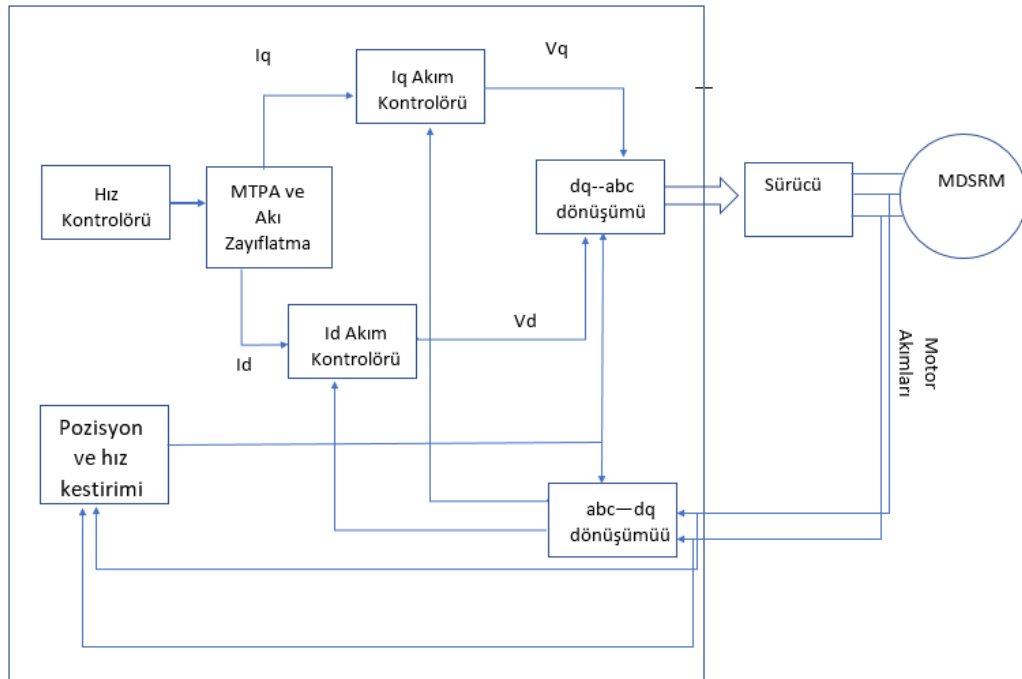
2.8.1. Vektör kontrol

Vektör kontrol ifadesi makinenin alternatif akımla uyarılması sırasında akımın hem genlik hem de fazlarını kontrol etme tekniğine dayanmaktadır. Akımların ve gerilimlerin vektör kontrolü, rotor ve stator manyetik alanlarının yönünün kontrol edilmesini sağlar bu nedenle vektör kontrol alan yönlendirmeli kontrol olarak adlandırılmaktadır. MDSRM’ de moment üretimini kontrol etmek için stator akımı, endüktansları ve indüklenen gerilim değerleri kritik öne sahiptir. MDSRM’ nin moment denkleminde (2.5) görüldüğü gibi her bir moment değeri sonsuz sayıda $i_d - i_q$ değeri bulunmaktadır. Yüksek verim sürücüler için önemli gereksinim olduğundan

akım başına maksimum moment prensibi kontrol kriteri olarak kabul edilir. Kontrol kriterleri aynı zamanda sürücünün gerilim ve akım sınırlarından da etkilenmektedir [47].

2.8.2. Kontrol prensipleri

Vektör kontrolde sürücü ve motorun akım ve gerilim için bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Kontrolde de bu ifadelerin genlikleri ve yönleri bu sınırlara göre belirlenmektedir. Birden fazla vektör kontrol şeması bulunmaktadır ve bu şemalar arasında rotor akı yönlendirmeli kontrol şeması diğerlerine göre daha basit ve pratiktir. MDSRM' un rotor akı yönlendirmesi ile akım kontrolünün blok şeması şekilde gösterilmektedir. Bu sürücü uygulamalarında referans i_d akımı hız kontrolörü, moment kontrolörü veya konum kontrolöründen elde edilir ve referans i_q akımı da çalışma koşullarına bağlı olarak akım başına maksimum moment algoritmalarından elde edilir. MDSRM' un fazör diyagramı incelendiğinde görülen stator akımı olan d eksen akımı i_d ile motor faz akımı arasın bulunan açı kontrol açısı olarak adlandırılmaktadır. Motorun performansı üzerinde doğrudan etkili olan kontrol açısı farklı hızlar ve yükler için geri besleme algoritmaları ile optimum seviyede tutularak akım başına maksimum moment elde edilmektedir [47].



Şekil 2.6. MDSRM akım vektör kontrolünün blok diyagramı

2.8.3. Akım başına maksimum moment kontrolü

Eşitlik 2.5 de verilen MDSRM' un moment denklemi akım açısı ile tekrar tanımlanırsa Eşitlik (2.20) elde edilmektedir [47].

$$T_e = 3 \frac{P}{2} (\lambda_m I_s \cos \Upsilon + (L_d - L_q) I_s I_s \sin 2\Upsilon) \quad (2.20)$$

Yukarıda verilen denklemden akım başına maksimum momentin elde edildiği akım faz açısı denklemi Eşitlik (2.21) ile tanımlanmaktadır. Maksimum moment için d ve q eksen akımları arasındaki ilişki Eşitlik (2.22) ile ifade edilebilir [47].

$$\Upsilon = \sin^{-1} \frac{-\lambda_m \pm \sqrt{\lambda_m^2 + 8(L_d - L_q) I_s I_s}}{4(L_d - L_q) I_s} \quad (2.21)$$

$$I_q = \frac{\lambda_m}{2(L_d - L_q)} - \sqrt{\frac{\lambda_m^2}{4(L_d - L_q)^2} + I_d^2} \quad (2.22)$$

Akım başına maksimum moment kontrolünde terminal gerilimi sınıra ulaşana kadar sabit moment sağlayabileceği nominal hız değeri Eşitlik (2.23) ile tanımlanmıştır. Bu hızın üstünde ki hız değerlerinde motor alan zayıflatma kontrolü ile çalışmaktadır [47].

$$\omega_b = \frac{V_{smaks}}{\sqrt{(\lambda_m - L_q I_q)^2 + (L_d I_d)^2}} \quad (2.23)$$

2.8.4. Akı zayıflatma kontrolü

Motorun çalışması sırasında hız ve yüke bağlı olarak stator terminal gerilimi sınıra ulaştığında akım vektörünün kontrol edilmesi gerekmektedir. Akı zayıflatma kontrolü d-q eksen akımlarını stator gerilimi sınırlarına göre kontrol etmektedir. Denklemlerde belirli bir w hızında maksimum momenti sağlamak için optimum i_d - i_q açıları verilmiştir. Eşitlik (2.24)'den görüldüğü gibi alan zayıflatma bölgesinde hız arttıkça q eksen akımı pozitif yönde artarken d eksen akımı azalmaktadır. Bu sayede hız artarken moment azalır ve stator gerilimi istenen seviyelerde tutulabilmektedir [47].

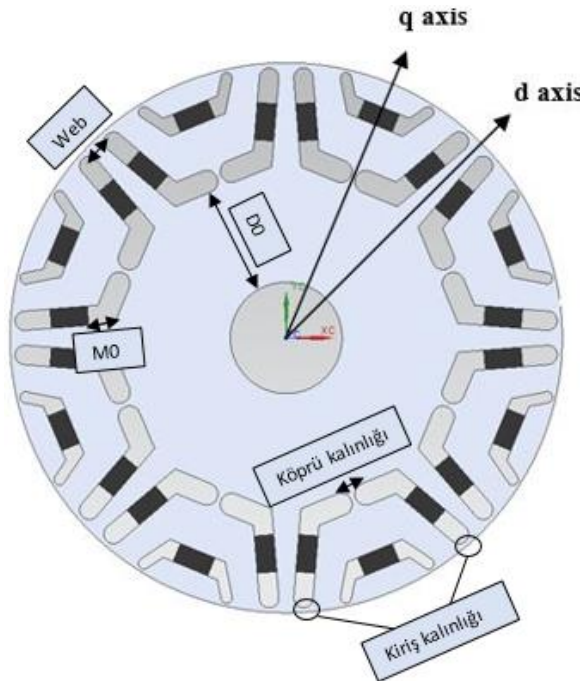
$$I_q = \frac{-\lambda_m L_q \pm \sqrt{(\lambda_m L_q)^2 - (L_d^2 - L_q^2) \left\{ \left(\frac{V_s}{\omega} \right)^2 \right\} - (I_s L_d)^2}}{(L_d^2 - L_q^2)} \quad (2.24)$$

3. ÖNERİLEN MIKNATIS DESTEKLİ SENKRON RELÜKTANS MOTORUN TASARIMI

3.1. Tasarım Kriterleri

Bu tez çalışması kapsamında 9 oluk 8 kutup konsantre sargılı MDSRM tasarımı yapılmıştır. Motor, 12,5 çevrim oranına sahip çamaşır makinası uygulaması için çamaşır makinasının isterlerine göre tasarlanmıştır. Referans alınan çamaşır makinası yıkama 52rpm hızında, sıkma bölgesinde ise 1000rpm hızında çalışmaktadır. 12,5 çevrim oranı kullanıldığı düşünülürse motor 650rpm ile 12500 arasında geniş bir hız aralığında çalışacak şekilde tasarlanmıştır.

Ön boyutlandırması yapılan motor için kritik tasarım parametreleri üzerinde FLUX 2D SEY programı kullanılarak parametrik analizler tamamlanmıştır. Şekil 3.1’de verilen kritik rotor tasarım parametreleri olan akı bariyeri sayısı, mıknatıs yerleşimi, akı bariyerlerinin konumu, hava aralığı, köprü ve kiriş kalınlıkları gibi parametrelerin optimizasyonu ile tasarım sonlandırılmıştır. Tasarlanan motora ait tasarım kriterleri ve ön boyutlar Tablo 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Optimizasyon parametreleri

Tablo 3.1. Motor tasarım kriterleri

Oluk sayısı	9	Anma momenti	0,874 Nm
Kutup sayısı	8	Anma hızı	3500 rpm
Stator dış çap	117 mm	Anma akımı	2,2A _{tepe}
Rotor dış çapı	74 mm	Faz sayısı	3
Paket boyu	25 mm	Maksimum hız	14000 rpm
Hava aralığı	0,4 mm	Sarım sayısı	115
Sac malzeme	M270-35A	Mıknatıs	NdFeb N28-UH

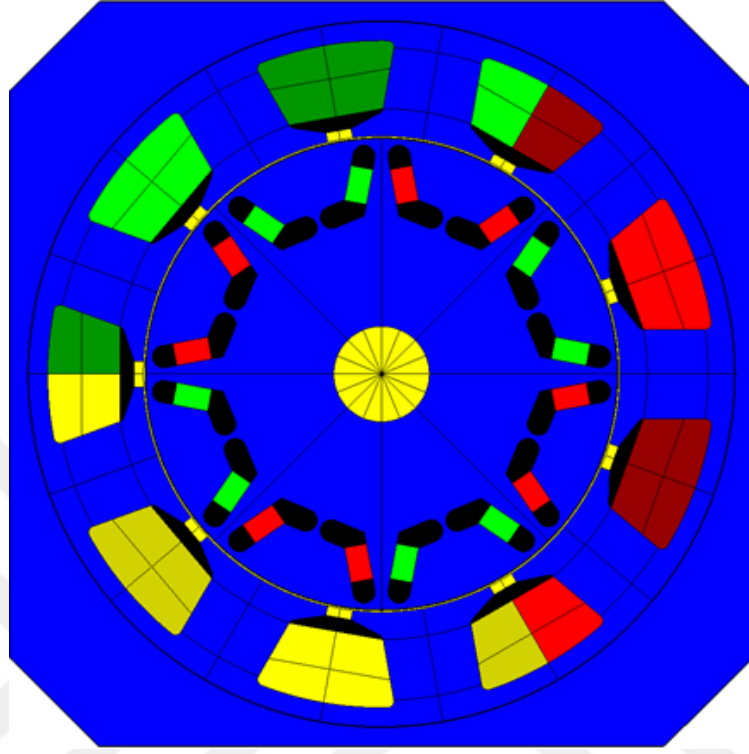
3.2. Akı Bariyeri Sayısının Etkisinin İncelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde daha önce ön boyutlandırması yapılan motor için rotorda bulunan akı bariyerlerinin sayısının performansa etkisi incelenecektir. 1 ve 2 bariyerli yapılar, motorun paket boyu, sarım sayısı, akım değeri, kullanılan mıknatıs ve sac miktarı aynı tutularak performans olarak karşılaştırılacaktır. Rotor dış çapı ve kutup sayısından dolayı bariyerlerin rotor içinde yerleşimi tasarımın zorlayıcı parametrelerindedir. Akı bariyerleri içine eklenen mıknatısın kalınlığı üretim kısıtlarından dolayı önemli hale gelmektedir. 3 bariyerli yapıda bariyer kalınlığı inceleyeceği ve azalan mıknatıs kalınlığının üretimde kırılabilirlik ve yerleşim zorluğu yaratacağı öngörüldüğü için 3 bariyerli yapı tercih edilmemiştir.

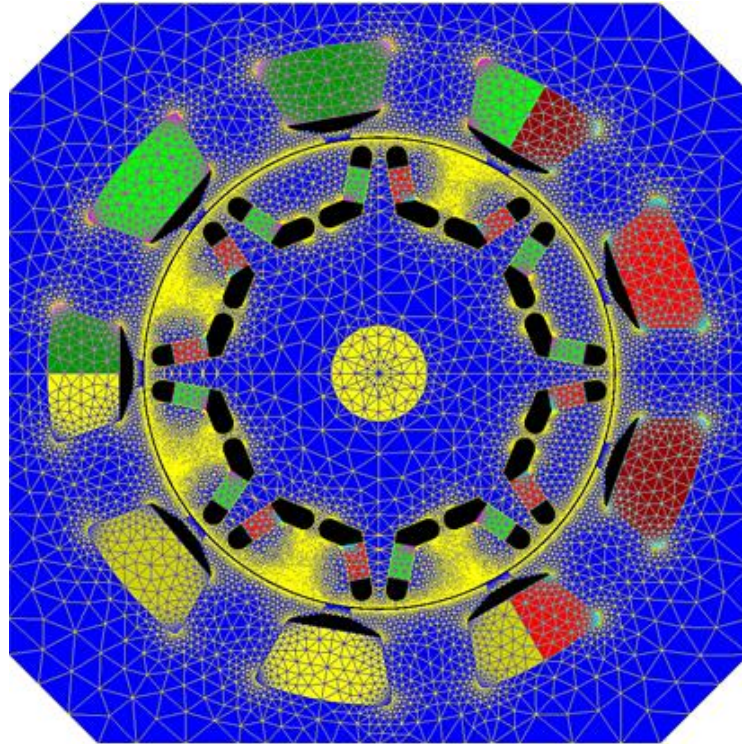
3.2.1. Tek bariyerli yapının incelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de sırasıyla SEY yöntemi ile modellenmiş görünümü ve ağ yapısı verilen motorun tek bariyerli yapı için yüklü ve yüksüz durum analiz sonuçları incelenecektir. Şekil 3.4'de tek bariyerli yapı için yüklü durum akı yoğunluğu grafiği görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi stator için en büyük akı yoğunluğu değeri statorun dışlarında stator oluşunun yan bölgesinde oluşmakta ve bu bölgede akı yoğunluğu 1,6 T değerindedir. Beklendiği gibi rotor köprü ve giriş bölgelerinde doymalar oluşmaktadır. Akı bariyerlerinin d eksen üzerinde arada kalan sacın akı yoğunluğu değerinin 1,9 T olduğu görülmektedir. Şekil 3.5'de motorun yüksüz durum akı yoğunluğu görülmektedir. Stator bölgesinde ve

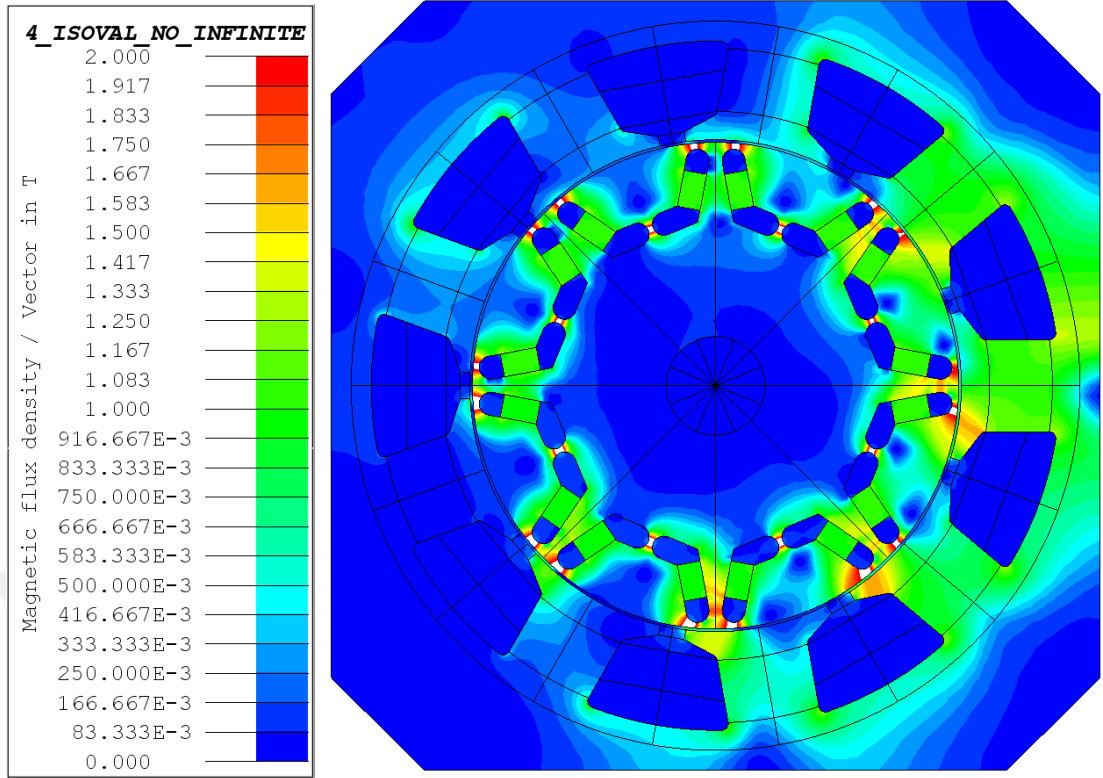
rotor bölgesinde yüksüz durumda akı yoğunluğunun 1 T değerinin altında olduğu görülmektedir. Şekil 3.6'da manyetik akı çizgileri görülmektedir.



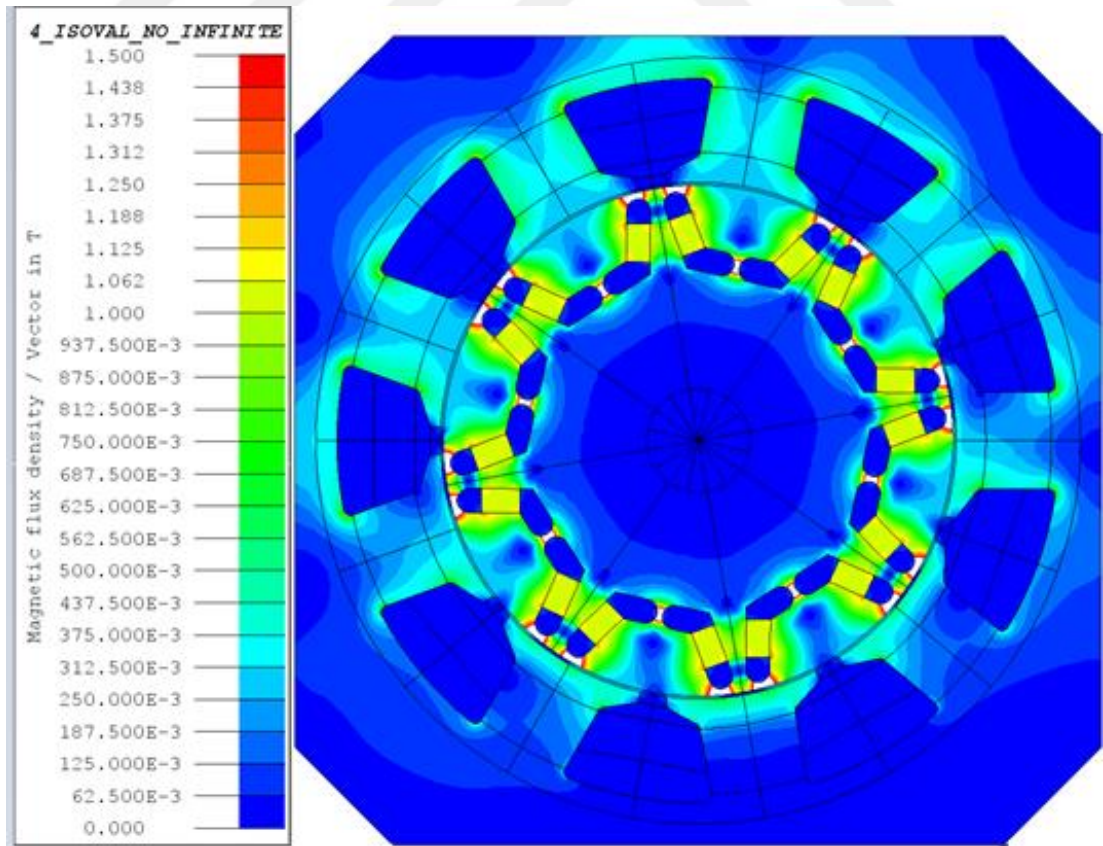
Şekil 3.2. Tek bariyerli yapı SEY modeli görünümü



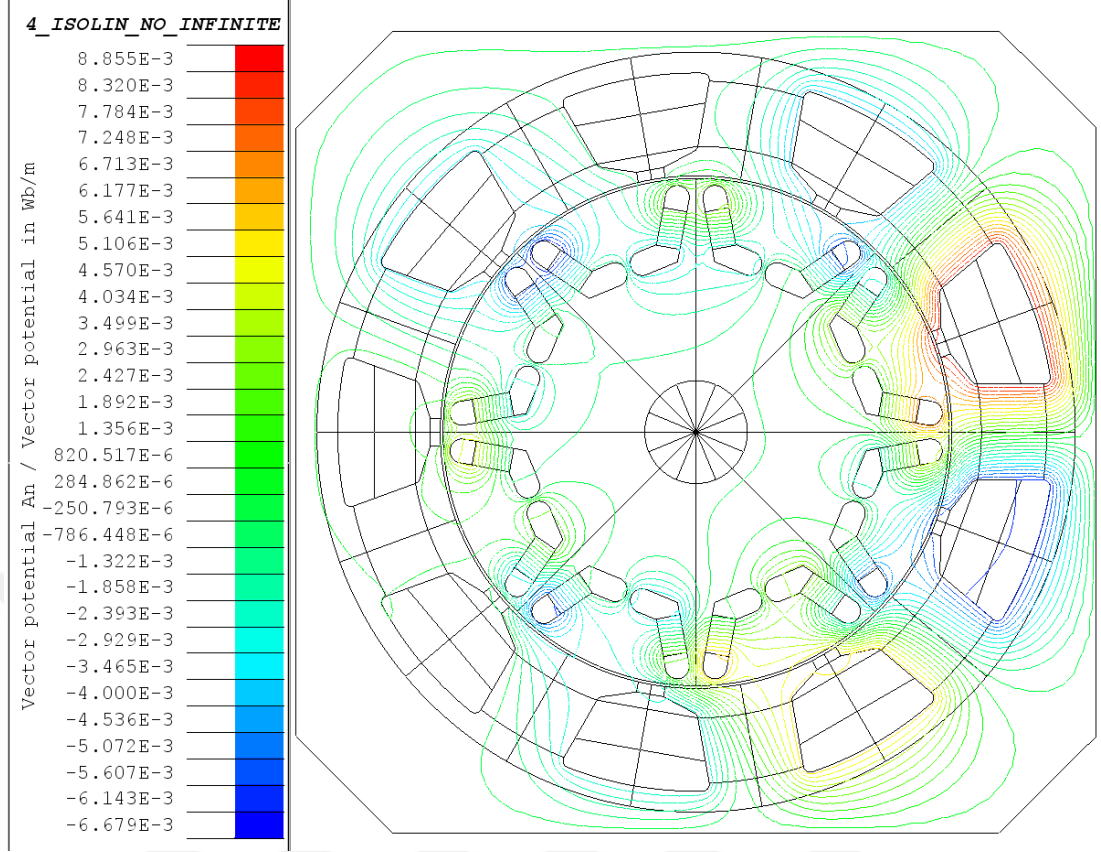
Şekil 3.3. Tek bariyerli yapı SEY modeli ağ yapısı görünümü



Şekil 3.4. Tek bariyerli yapı yüklü durum akı yoğunluğu görünümü

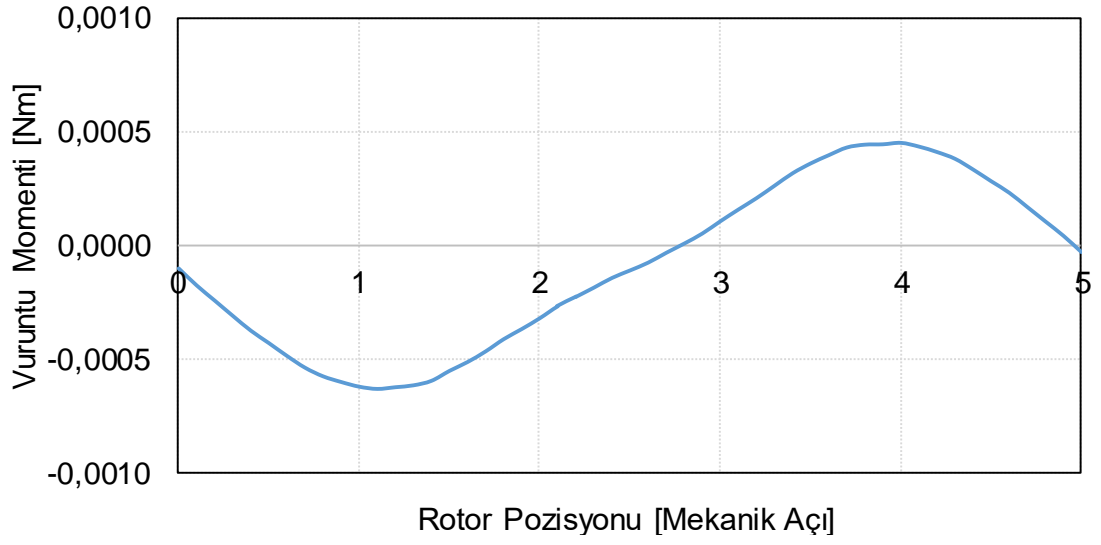


Şekil 3.5. Tek bariyerli yapı yüksüz durum akı yoğunluğu görünümü

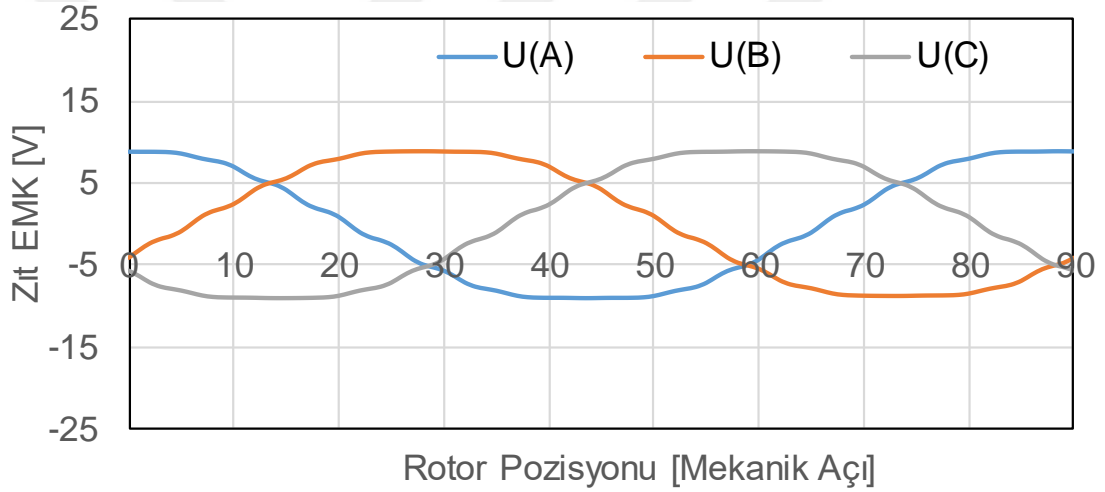


Şekil 3.6. Tek bariyerli yapı manyetik akı çizgileri görünümü

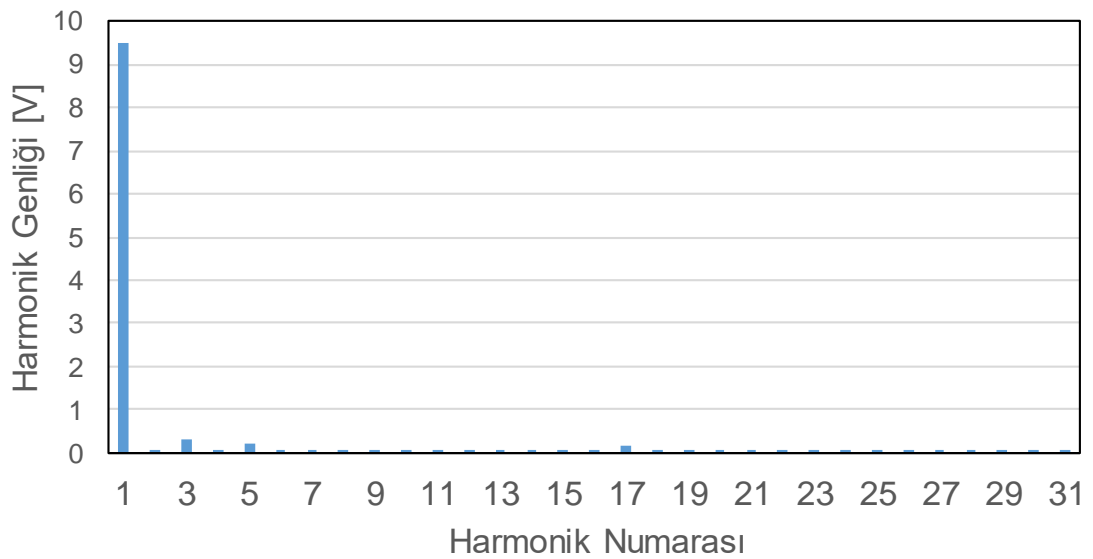
Şekil 3.7’de motorun yüksüz durum analizi sonucunda elde vuruntu momenti grafiği görülmektedir. Vuruntu momentinin tepe değeri 0,0005Nm değerine sahiptir. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da sırasıyla motorun 500rpm hızda zıt EMK faz gerilimi dalga şekli ve zıt EMK faz geriliminin harmonikleri görülmektedir. Zıt EMK faz gerilimi tepesi 8,9 V değerine sahiptir. Zıt EMK dalga şeklinin akı bariyerlerinin tasarımında dolayı trapezoidal dalga şekline yakın olduğu ve uzay harmoniklerine sahip olduğu görülmektedir. Toplam harmonik bozunumu 4,39 değerine sahipken temel harmonik genliğinin 9,48 V olduğu görülmektedir. Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de sırasıyla motorun 500rpm hızda zıt EMK faz arası gerilimi dalga şekli ve zıt EMK faz arası geriliminin harmonikleri görülmektedir. Zıt EMK faz gerilimi tepesi 16,62 V değerine sahiptir. Zıt EMK dalga şeklinin akı bariyerlerinin tasarımında dolayı uzay harmoniklerine sahip olduğu görülmektedir. Faz arası zıt EMK gerilimi için toplam harmonik bozunumu 2,66 değerine sahipken temel harmonik genliğinin 16,4 V olduğu görülmektedir.



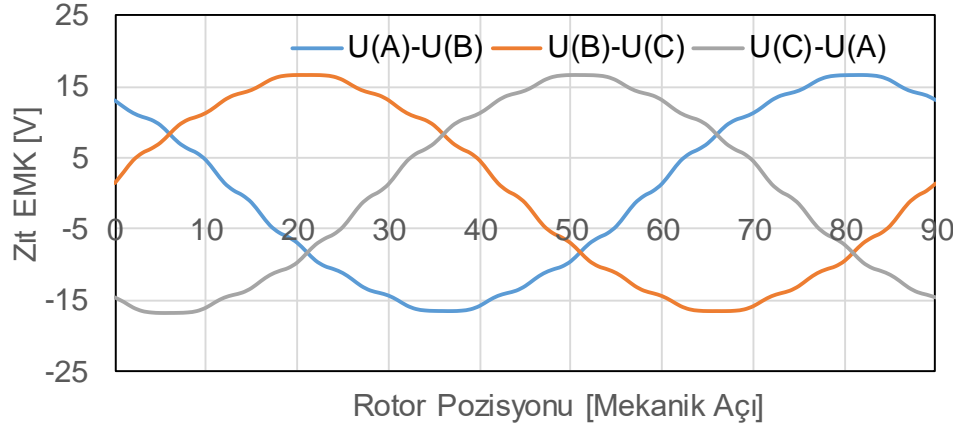
Şekil 3.7. Tek bariyerli yapı vuruntu momenti değişim grafiği



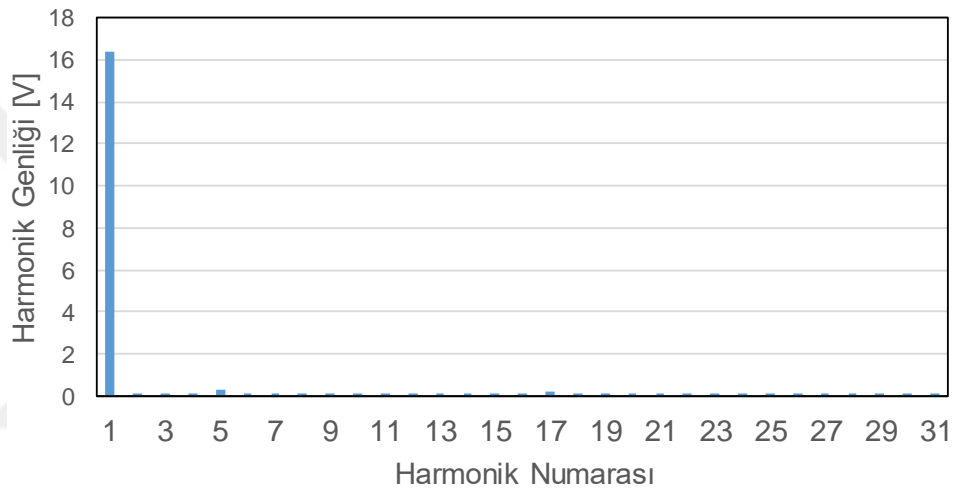
Şekil 3.8. Tek bariyerli yapı faz zıt EMK gerilimi dalga şekli (@500rpm)



Şekil 3.9. Tek bariyerli yapı faz zıt EMK gerilimi harmonik görünümü

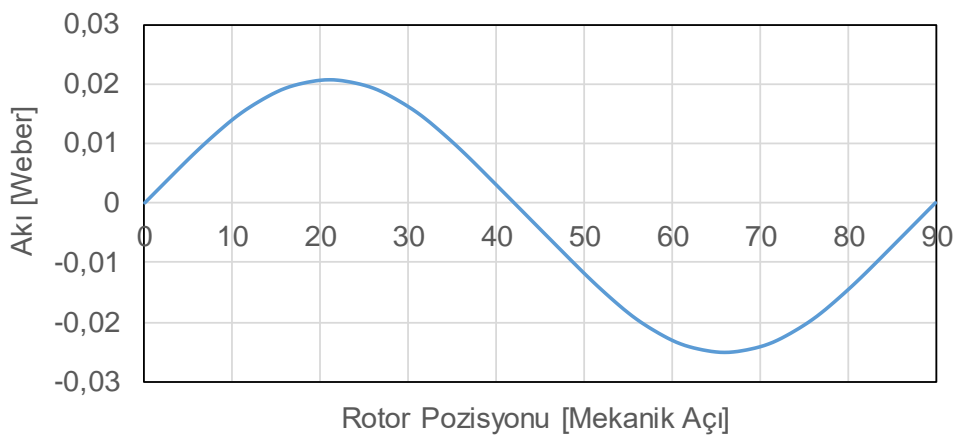


Şekil 3.10. Tek bariyerli yapı faz arası zıt EMK gerilimi şekli (@500rpm)

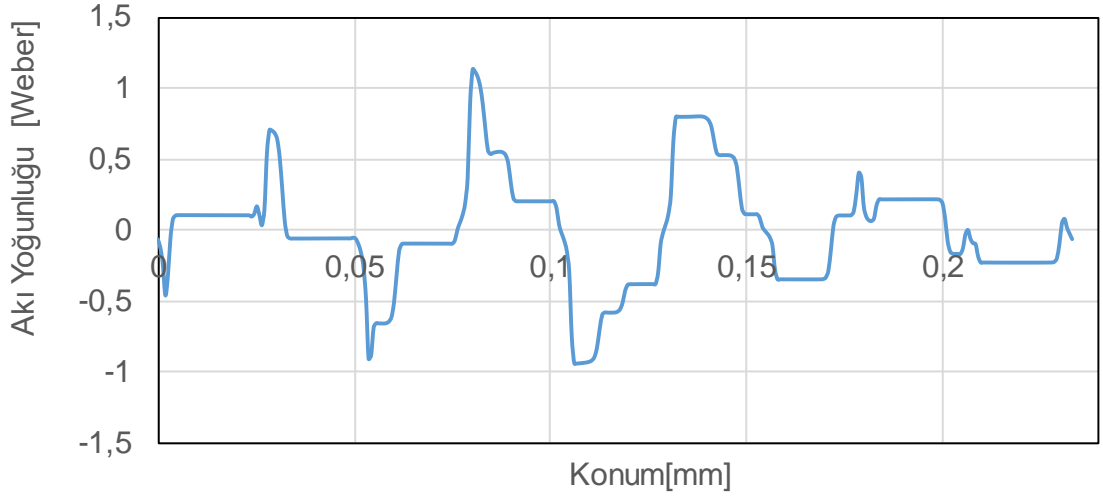


Şekil 3.11. Tek bariyerli yapı faz arası zıt EMK harmonik görünümü

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de sırasıyla hava aralığı akısı ve hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni görülmektedir. Sinüs formunda olan hava aralığı akısı tepe noktasının 0,021 Weber değerine sahip olduğu görülmektedir. Hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni etkin değeri 0,39 T olarak hesaplanmıştır.

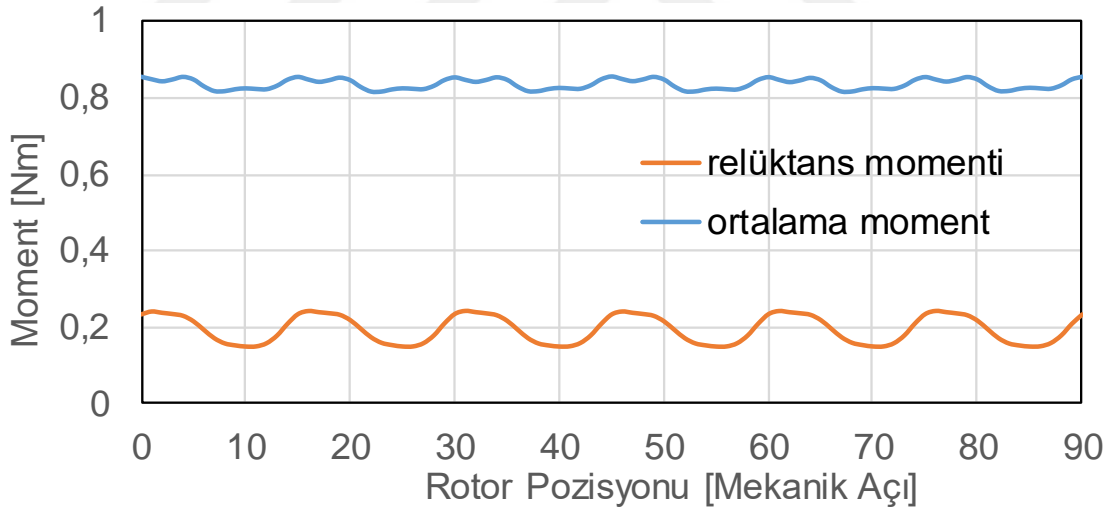


Şekil 3.12. Tek bariyerli yapı hava aralığı toplam akısının değişimi



Şekil 3.13. Tek bariyerli yapı hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni

Şekil 3.14'de motorun ortalama moment ve relüktans momenti bileşenleri görülmektedir. Ortalama moment değerinin 0,834Nm olduğu, relüktans momenti ortalama değerinin 0,195Nm olduğu görülmektedir. Ortalama momentin moment dalgalanması %4,49 değerine sahiptir.

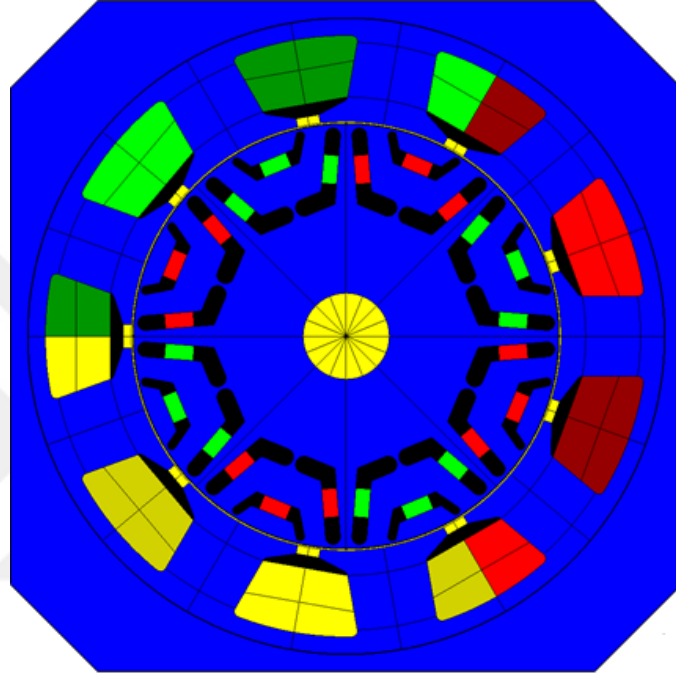


Şekil 3.14. Tek bariyerli yapı ortalama moment ve relüktans moment grafiği

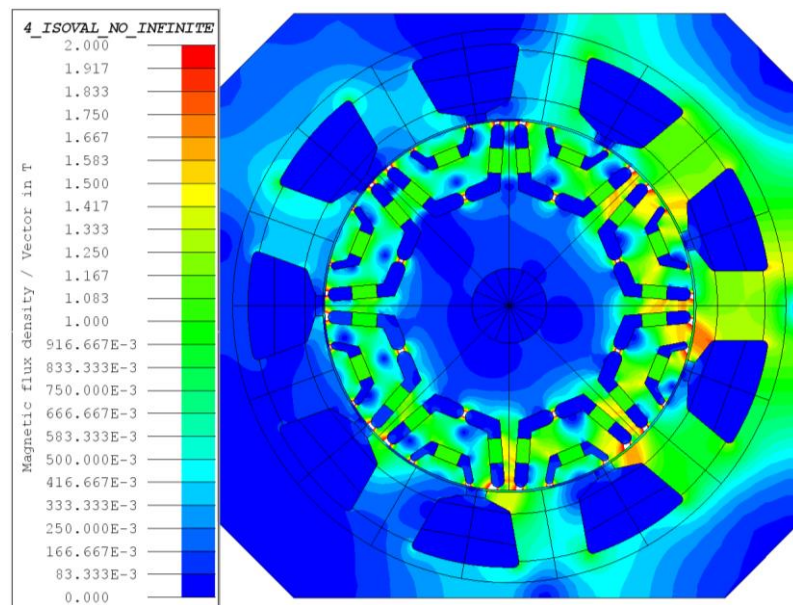
3.2.2. İki bariyerli yapının incelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde Şekil 3.15'de SEY yöntemi ile modellenmiş görünümü verilen motorun iki bariyerli yapı için yüklü ve yüksüz durum analiz sonuçları incelenecektir. Şekil 3.16 'de tek bariyerli yapı için yüklü durum akı yoğunluğu grafiği görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi stator için en büyük akı yoğunluğu değeri statorun dişlerinde stator oluğunun yan bölgesinde oluşmakta ve bu bölgede akı

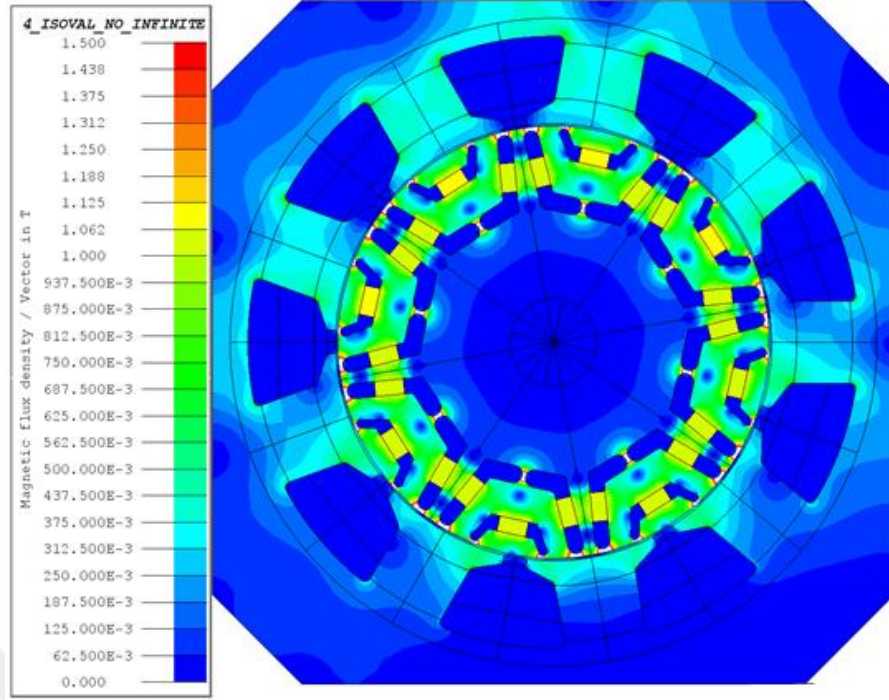
yoğunluğu 1,72 T değerindedir. Beklendiği gibi rotor köprü ve kiriş bölgelerinde doymalar oluşmaktadır. Akı bariyerlerinin d eksen üzerinde arada kalan sacın akı yoğunluğu değerinin 1,7 T olduğu görülmektedir. Şekil 3.17’de motorun yüksüz durum akı yoğunluğu görülmektedir. Stator bölgesinde ve rotor bölgesinde yüksüz durumda akı yoğunluğunun 1 T değerinin altında olduğu görülmektedir. Şekil 3.18’de manyetik akı çizgileri görülmektedir.



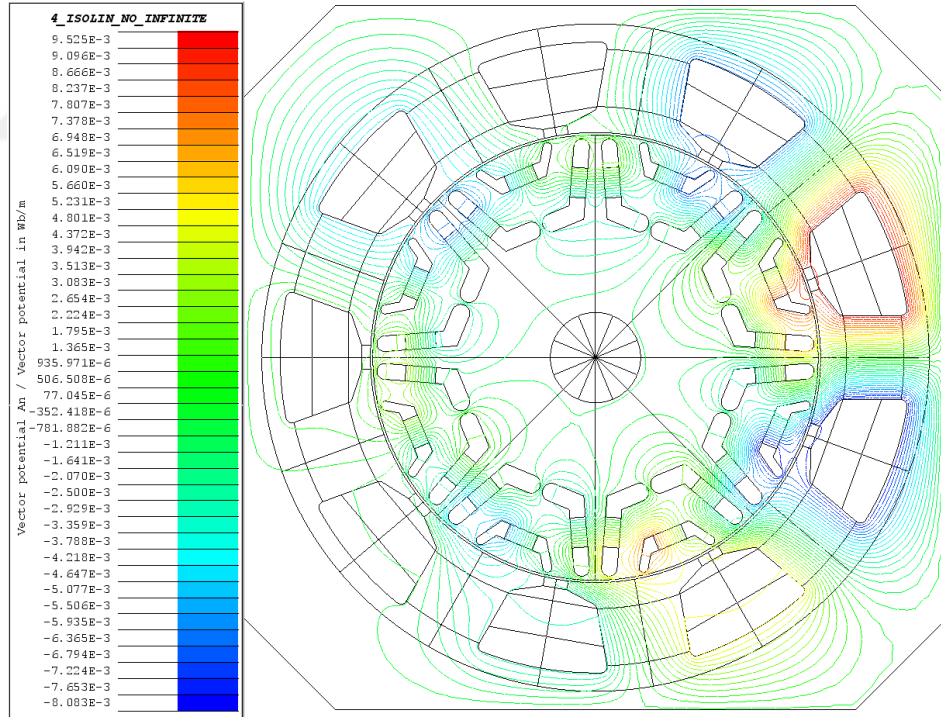
Şekil 3.15. İki bariyerli yapı SEY modeli görünümü



Şekil 3.16. İki bariyerli yapı yüklü durum akı yoğunluğu görünümü



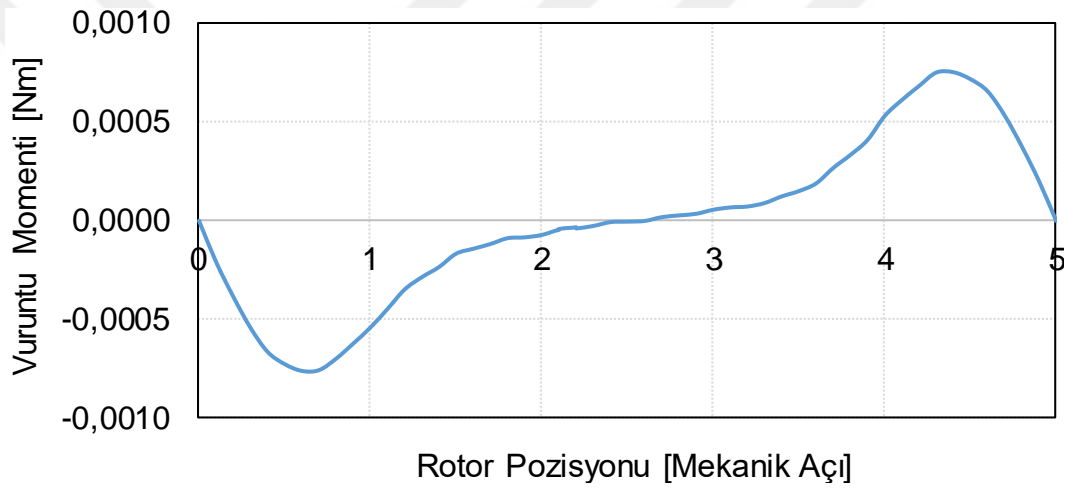
Şekil 3.17. İki bariyerli yapı yüksüz durum akı yoğunluğu görünümü



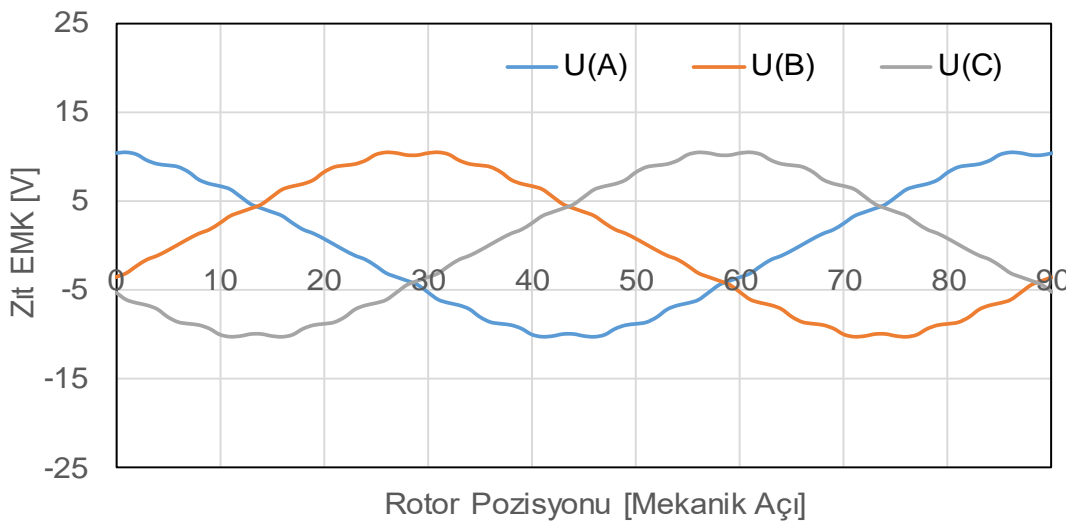
Şekil 3.18. İki bariyerli yapı yüklü durum manyetik akı çizgileri görünümü

Şekil 3.19’de motorun yüksüz durum analizi sonucunda elde edilen vuruş momenti grafiği görülmektedir. Vuruş momentinin tepe değeri 0,0008Nm değerine sahiptir. Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de sırasıyla motorun 500rpm hızda zıt EMK faz gerilimi dalga

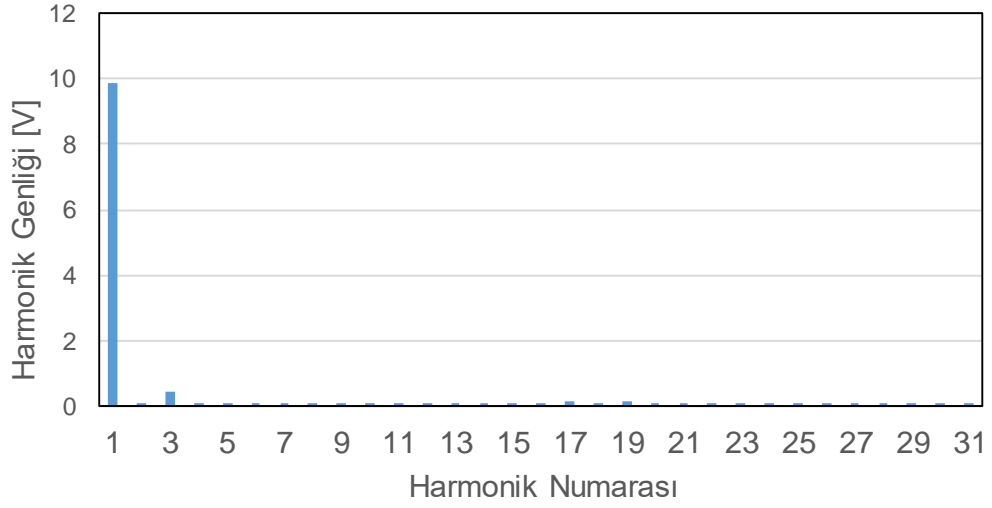
şekli ve zıt EMK faz geriliminin harmonikleri görülmektedir. Zıt EMK faz gerilimi tepesi 10,4 V değerine sahiptir. Zıt EMK dalga şeklinin akı bariyerlerinin tasarımında dolayı uzay harmoniklerine sahip olduğu görülmektedir. Toplam harmonik bozunumu 5,05 değerine sahipken temel harmonik genliğinin 9,85 V olduğu görülmektedir. Şekil 3.22 ve Şekil 3.23’de sırasıyla motorun 50rpm hızda zıt EMK faz arası gerilimi dalga şekli ve zıt EMK faz arası geriliminin harmonikleri görülmektedir. Zıt EMK faz gerilimi tepesi 17,47 V değerine sahiptir. Zıt EMK dalga şeklinin akı bariyerlerinin tasarımında dolayı uzay harmoniklerine sahip olduğu görülmektedir. Faz arası zıt EMK gerilimi için toplam harmonik bozunumu 2,15 değerine sahipken temel harmonik genliğinin 17,05 V olduğu görülmektedir.



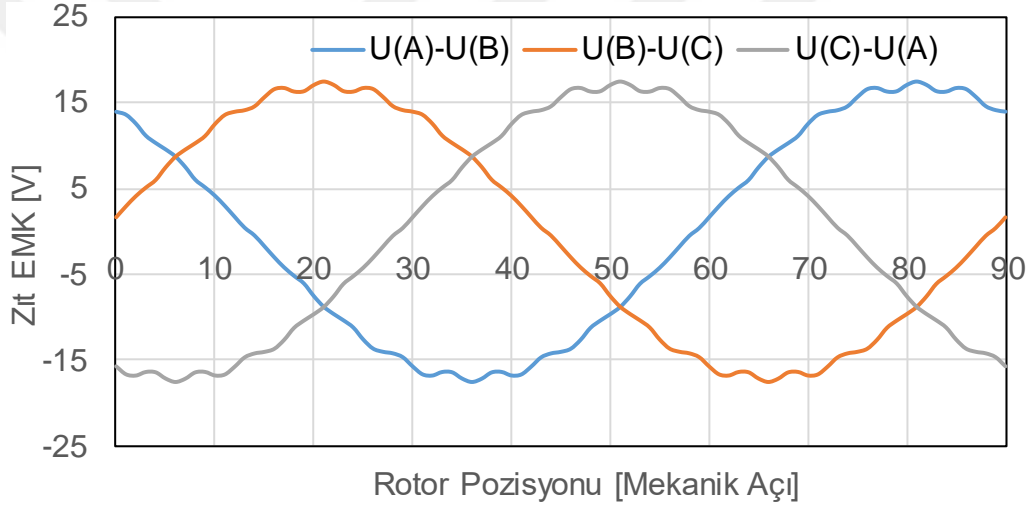
Şekil 3.19. İki bariyerli yapı vurutu momenti değişim grafiği



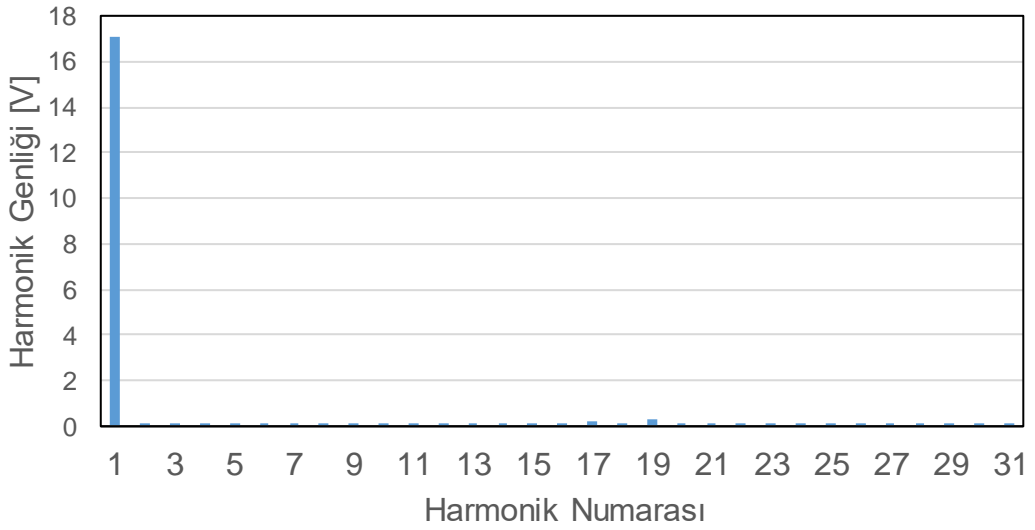
Şekil 3.20. İki bariyerli yapı faz zıt EMK gerilimi dalga şekli(@500rpm)



Şekil 3.21. İki bariyerli yapı faz zıt EMK gerilimi harmonik görünümü

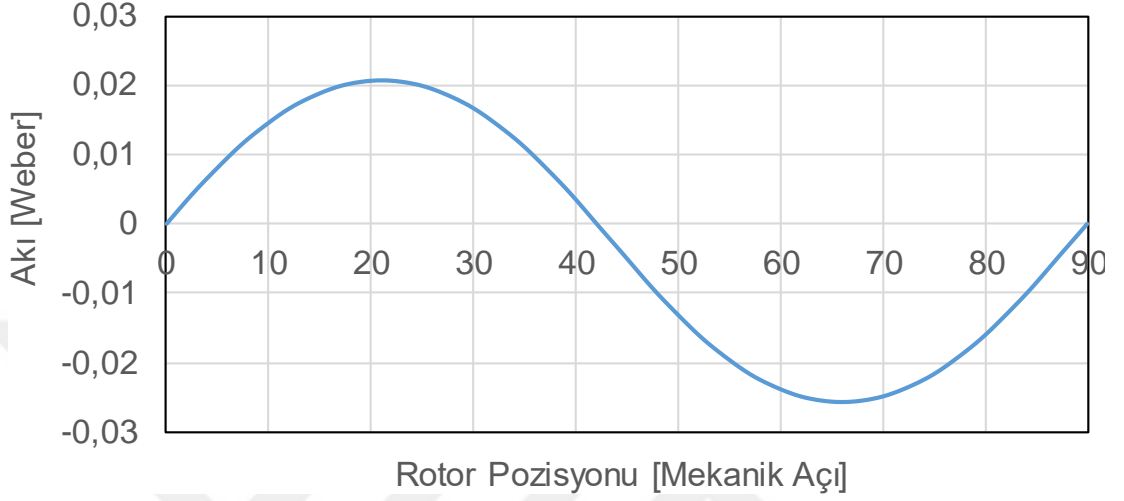


Şekil 3.22. İki bariyerli yapı faz arası zıt EMK gerilimi dalga şekli(@500rpm)

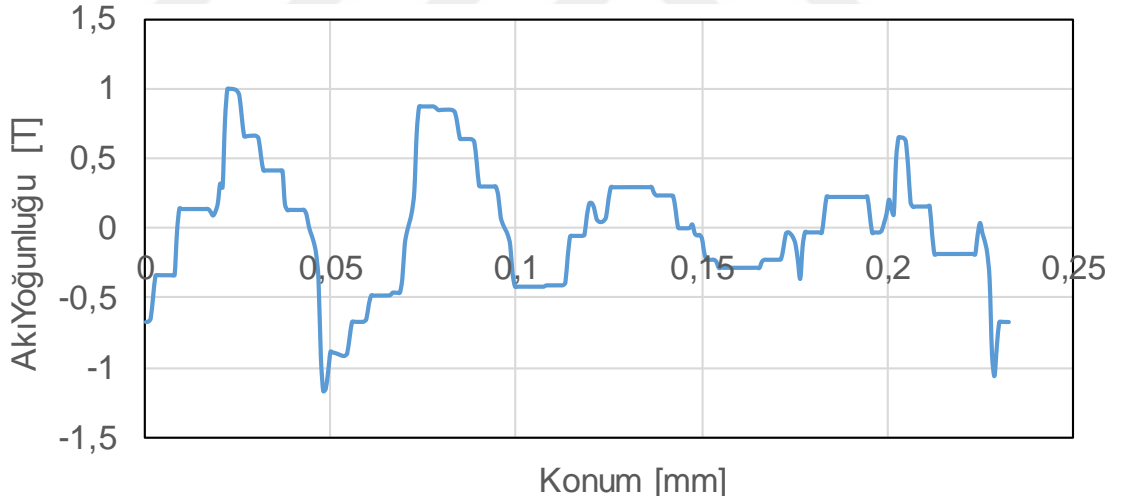


Şekil 3.23. İki bariyerli yapı faz arası zıt EMK gerilimi harmonik görünümü

Şekil 3.24 ve Şekil 3.25’de sırasıyla hava aralığı akısı ve hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni görülmektedir. Sinüs formunda olan hava aralığı akısı tepe noktasının 0,021Weber değerine sahip olduğu görülmektedir. Hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni etkin değeri 0,436 T olarak hesaplanmıştır.

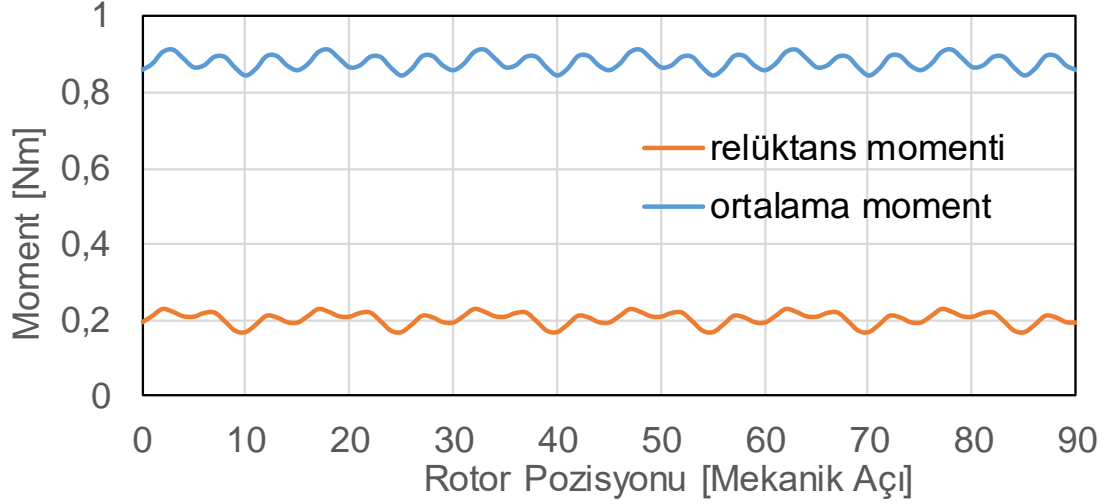


Şekil 3.24. İki bariyerli yapı hava aralığı akısının değişimi



Şekil 3.25. İki bariyerli yapı hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni

Şekil 3.26’de iki bariyerli yapıya sahip olan motorun toplam çıkış momenti ve relüktans momenti bileşenleri görülmektedir. Çıkış momentinin ortalama değerinin 0,88Nm olduğu görülmektedir. Mıknatıs desteği olmadan sadece akı bariyerleri ile elde edilen relüktans momentinin ortalama değerinin ise 0,2Nm olduğu görülmektedir. Çıkış momentinin moment dalgalanmasının %7,52 değerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.26. İki bariyerli yapı ortalama moment ve relüktans moment grafiği

3.3. Mıknatıs Yerleşiminin Etkisinin İncelenmesi

Rotor içinde mıknatısın akı bariyerlerinin farklı konumlarına yerleştirilebilme imkânı bulunmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde mıknatısın bariyerlerin farklı konumlarına yerleştirilmesinin motor performansına etkisi incelenecektir.

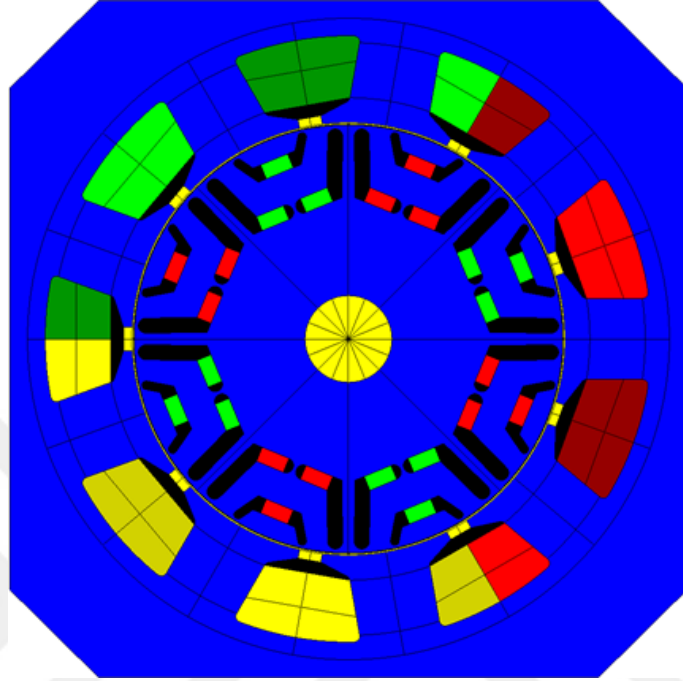
3.3.1. Yan bariyerlere mıknatıs yerleşiminin incelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde Şekil 3.15’de SEY modeli görünümü verilen iki bariyerli yapının sonuçları referans alınacaktır. İki bariyerli tasarım ile yan bariyerlere mıknatıs yerleştirilmiş tasarım aynı olduğu için analiz sonuçları bu bölümde tekrar verilmeyecektir. Bariyer ortasına mıknatıs yerleşimi yapılmış model ile karşılaştırma yapılırken Bölüm 3.2.2. İki bariyerli yapının incelenmesi de çalışması yapılan iki bariyerli yapının sonuçları ile karşılaştırma yapılacaktır.

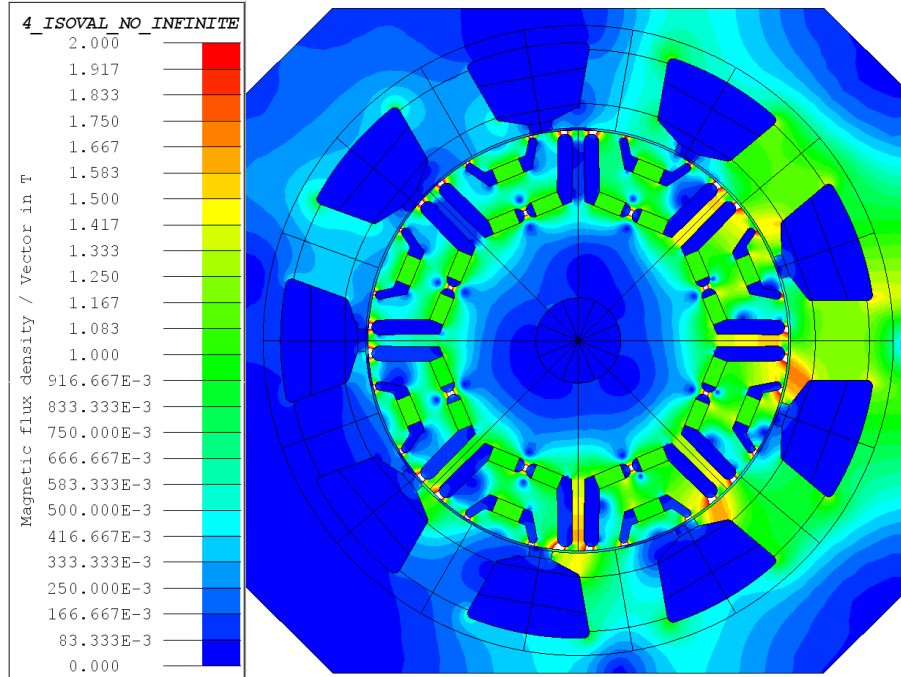
3.3.2. Bariyer ortasına mıknatıs yerleşiminin incelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde Şekil 3.27’de SEY yöntemi ile modellenmiş görünümü verilen motorun iki bariyerli yapı için yüklü ve yüksüz durum analiz sonuçları incelenecektir. Şekil 3.28’de tek bariyerli yapı için yüklü durum akı yoğunluğu grafiği görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi stator için en büyük akı yoğunluğu değeri statorda dişlerinde stator oluğunun yan bölgesinde oluşmakta ve bu bölgede akı yoğunluğu 1,75 T değerindedir. Beklendiği gibi rotor köprü ve kiriş bölgelerinde doymalar oluşmaktadır. Akı bariyerlerinin d eksen üzerinde arada kalan sacın akı yoğunluğu değerinin 1,62 T olduğu görülmektedir. Şekil 3.29’da motorun yüksüz

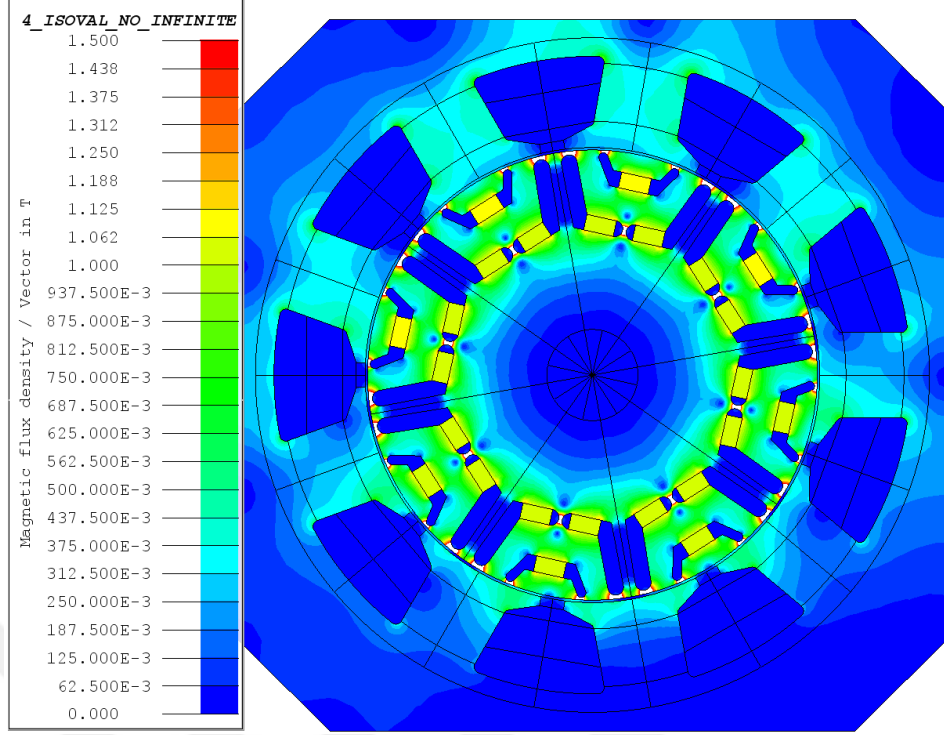
durum akı yoğunluğu görülmektedir. Stator bölgesinde ve rotor bölgesinde yüksüz durumda akı yoğunluğunun 1 T değerinin altında olduğu görülmektedir. Şekil 3.30'de manyetik akı çizgileri görülmektedir.



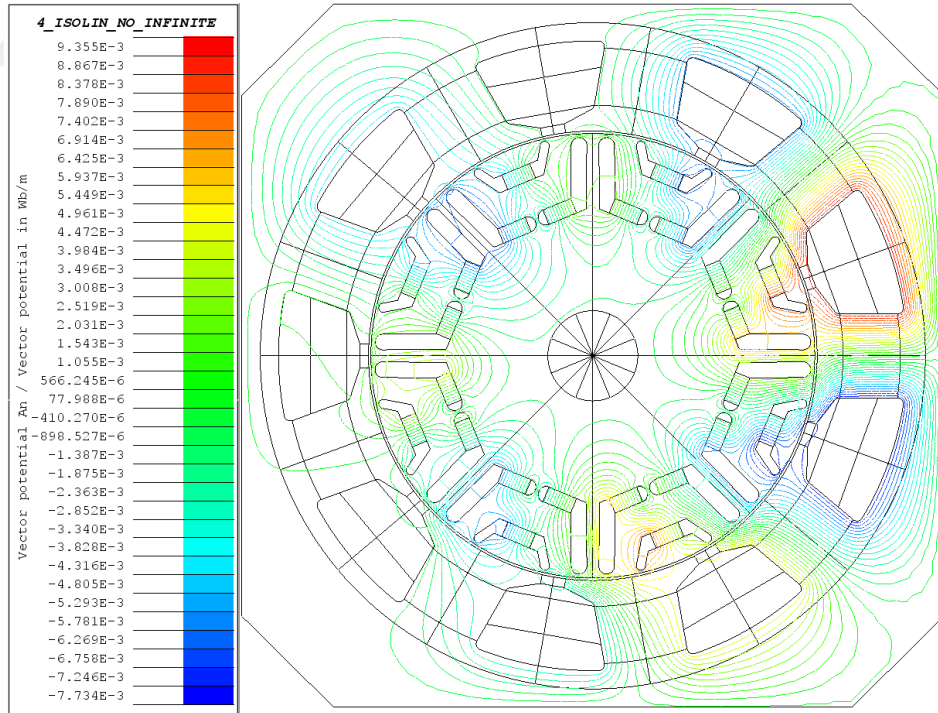
Şekil 3.27. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı SEY modeli görünümü



Şekil 3.28. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı yüklü durum akı yoğunluğu görünümü



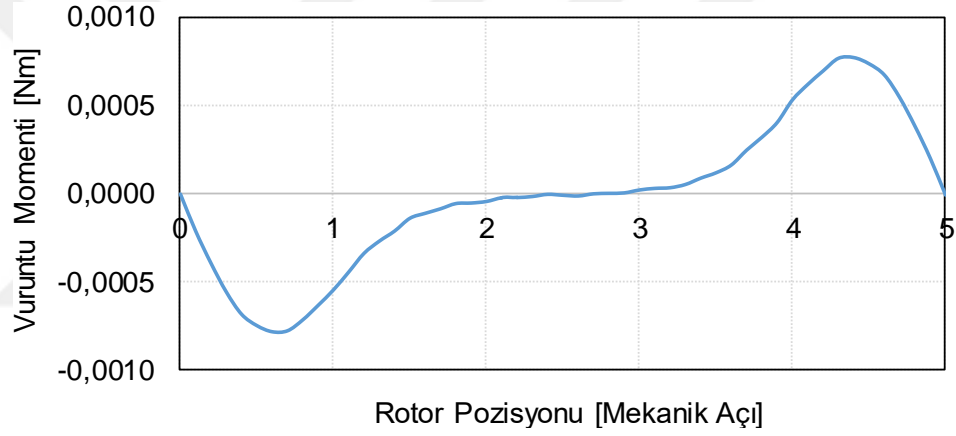
Şekil 3.29. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı yüksüz durum akı yoğunluğu görünümü



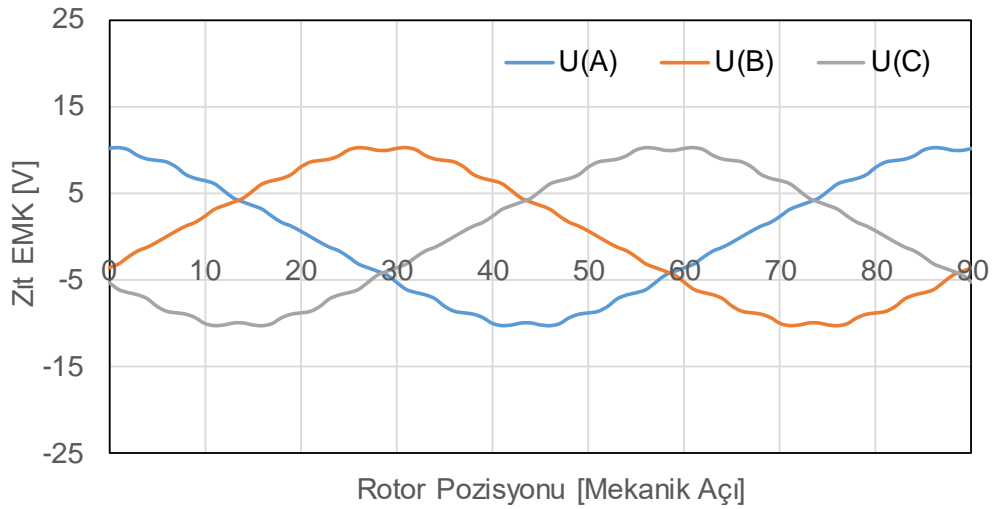
Şekil 3.30. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı manyetik akı çizgileri görünümü

Şekil 3.31’de motorun yüksüz durum analizi sonucunda elde edilen vuru mu momenti grafiği görülmektedir. Vuru mu momentinin tepe değeri 0,0008Nm değerine sahiptir.

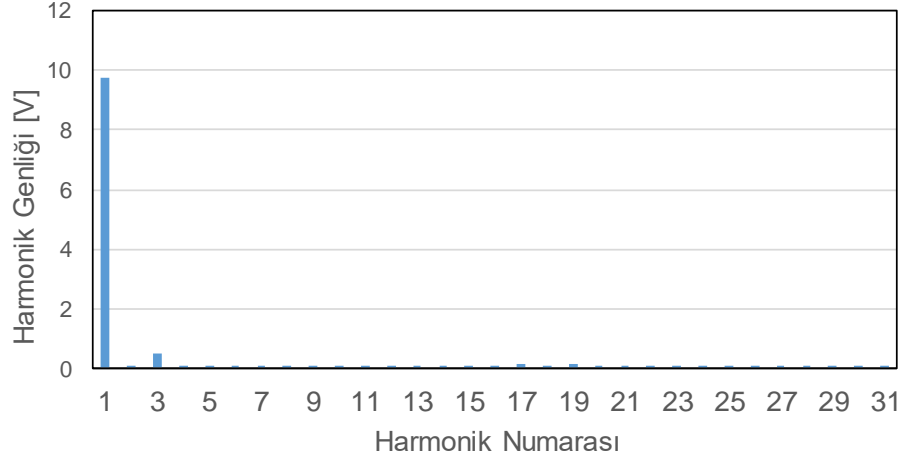
Şekil 3.32 ve Şekil 3.33’de sırasıyla motorun 500rpm hızda zıt EMK faz gerilimi dalga şekli ve zıt EMK faz geriliminin harmonikleri görülmektedir. Zıt EMK faz gerilimi tepesi 10,33 V değerine sahiptir. Zıt EMK dalga şeklinin akı bariyerlerinin tasarımında dolayı uzay harmoniklerine sahip olduğu görülmektedir. Toplam harmonik bozunumu 5,36 değerine sahipken temel harmonik genliğinin 9,77 V olduğu görülmektedir. Şekil 3.34 ve Şekil 3.35’de sırasıyla motorun 500rpm hızda zıt EMK faz arası gerilimi dalga şekli ve zıt EMK faz arası geriliminin harmonikleri görülmektedir. Zıt EMK faz gerilimi tepesi 17,34 V değerine sahiptir. Zıt EMK dalga şeklinin akı bariyerlerinin tasarımında dolayı uzay harmoniklerine sahip olduğu görülmektedir. Faz arası zıt EMK gerilimi için toplam harmonik bozunumu 2,18 değerine sahipken temel harmonik genliğinin 16,92 V olduğu görülmektedir.



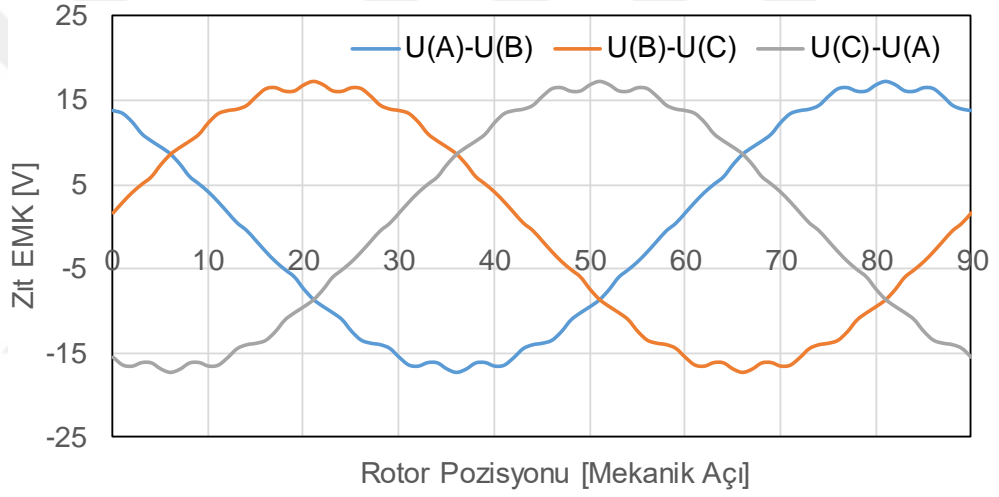
Şekil 3.31. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı vurutu momenti değişim grafiği



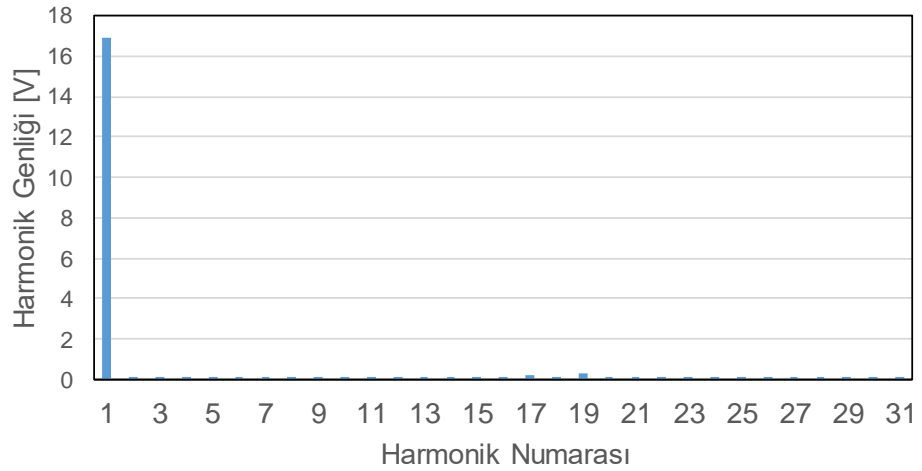
Şekil 3.32. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı faz zıt EMK gerilimi dalga şekli



Şekil 3.33. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı faz zıt EMK gerilimi harmonik görünümü

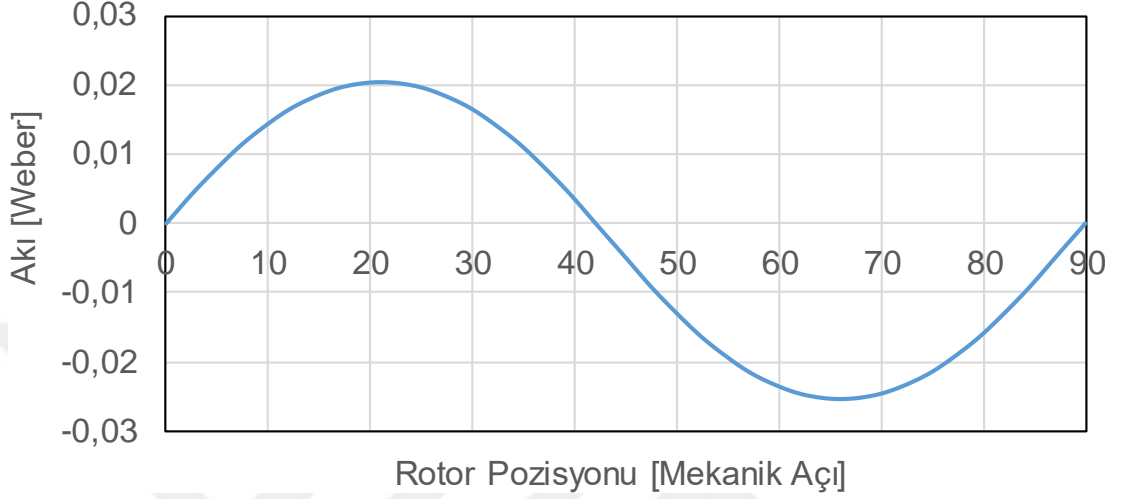


Şekil 3.34. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı faz arası zıt EMK gerilimi dalga şekli (@500rpm)

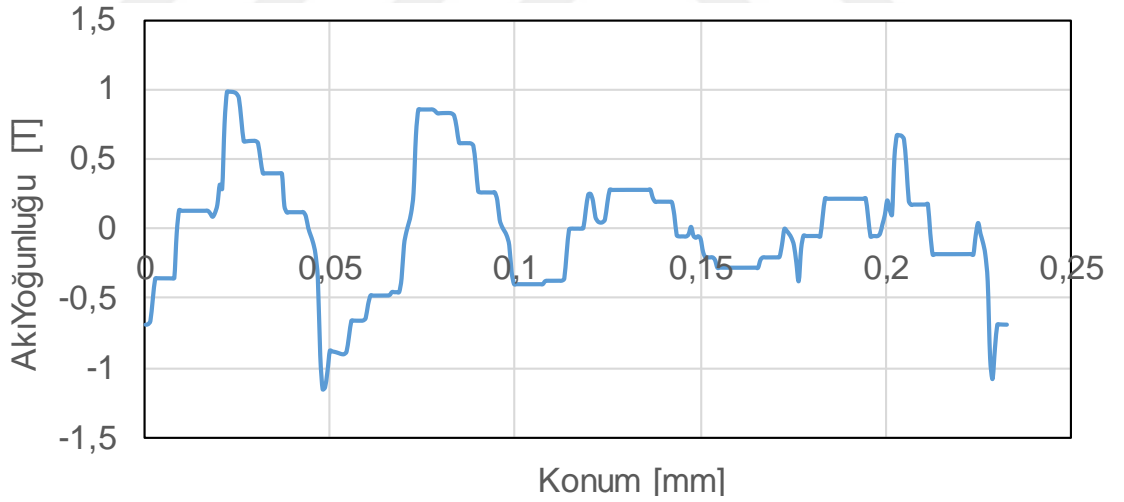


Şekil 3.35. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı faz arası zıt EMK gerilimi harmonik görünümü

Şekil 3.36ve Şekil 3.37’de sırasıyla hava aralığı akısı ve hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni görülmektedir. Sinüs formunda olan hava aralığı akısı tepe noktasının 0,021Weber değerine sahip olduğu görülmektedir. Hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni etkin değeri 0,425 T olarak hesaplanmıştır.

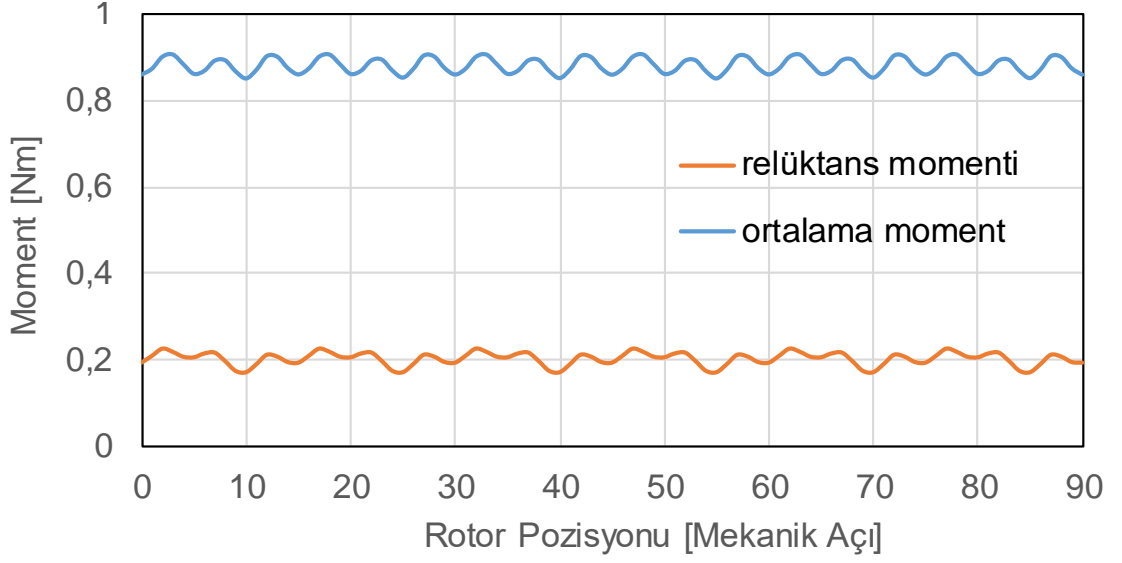


Şekil 3.36. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı hava aralığı akısının değişimi



Şekil 3.37. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni

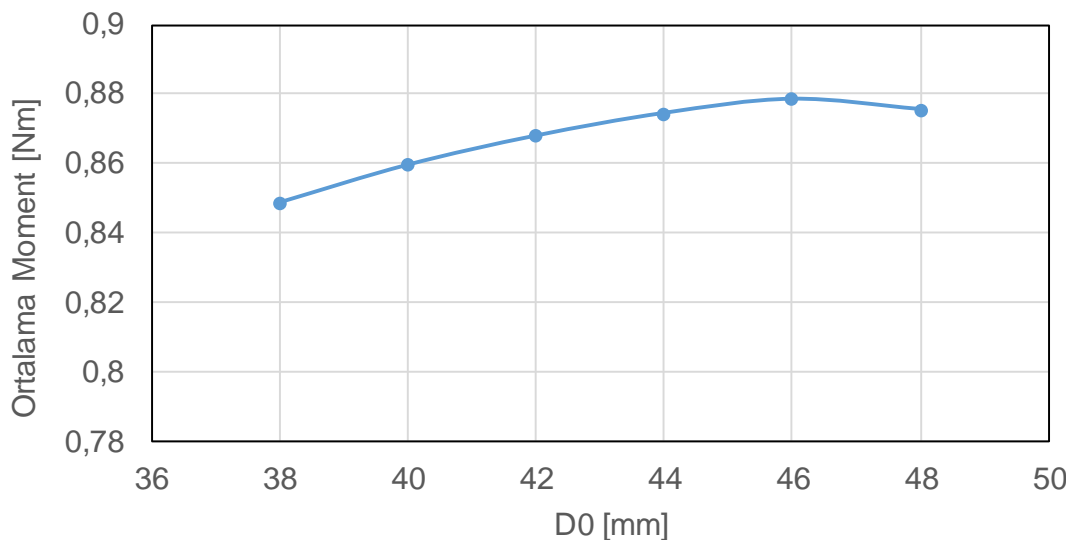
Şekil 3.38’de bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş olan motorun çıkış momenti ve relüktans momenti bileşenleri görülmektedir. Çıkış momentinin ortalama moment değerinin 0,88Nm olduğu, görülmektedir. Sadece akı bariyerlerinin tasarımı ile elde edilen relüktans momentinin ortalama değerinin ise 0,2Nm olduğu görülmektedir. Motor çıkış momentinin moment dalgalanması %6,07 değerine sahip olduğu görülmektedir.



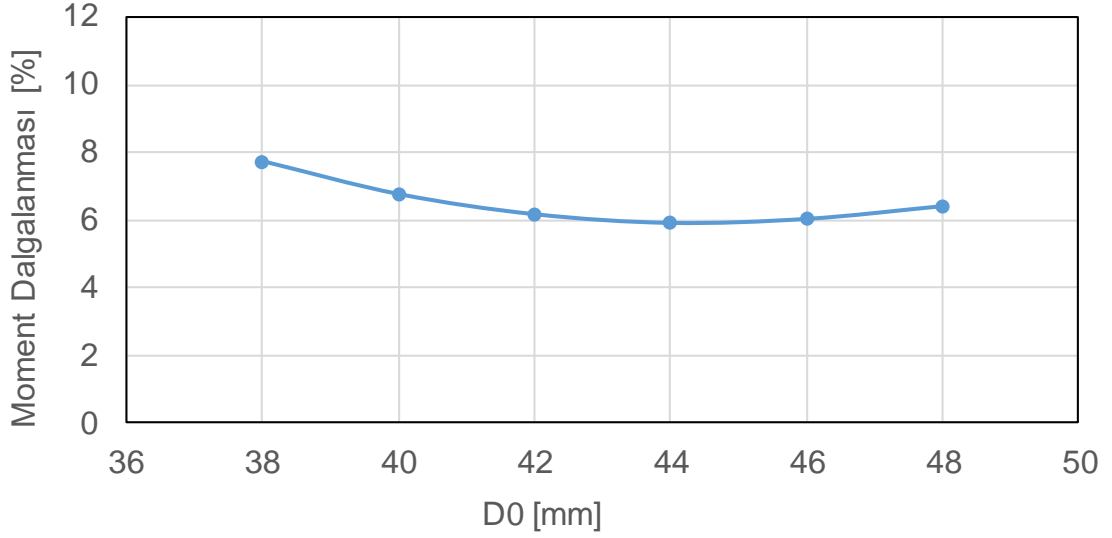
Şekil 3.38. Bariyer ortasına mıknatıs yerleştirilmiş yapı ortalama moment ve relüktans moment grafiği

3.4. Akı Bariyerlerinin Konumunun Etkisinin İncelenmesi

Rotorda ki akı bariyerlerinin tasarımı senkron relüktans motorun en önemli tasarım parametrelerindedir. Bu nedenle bölümde akı bariyerlerinin motor miline ve hava aralığına uzaklığının(D0) motor performansına etkisi incelenecektir. Çalışmada Şekil 3.1’de gösterilen 1. Akı bariyeri için parametrik analiz yapılmıştır. Akı bariyerinin motor miline uzaklığı 38-48 mm arasında 2mm adımlarla arttırılarak bu değerler için ortalama moment değeri ve moment dalgalanmasının sonuçları incelenmiştir. Ortalama momentin D0 parametresine bağlı değişim grafiği Şekil 3.39’de verilmiştir. Moment dalgalanmasının D0 parametresine bağlı değişimi Şekil 3.40’de verilmiştir.



Şekil 3.39. Ortalama momentin D0 uzaklığına göre değişim grafiği



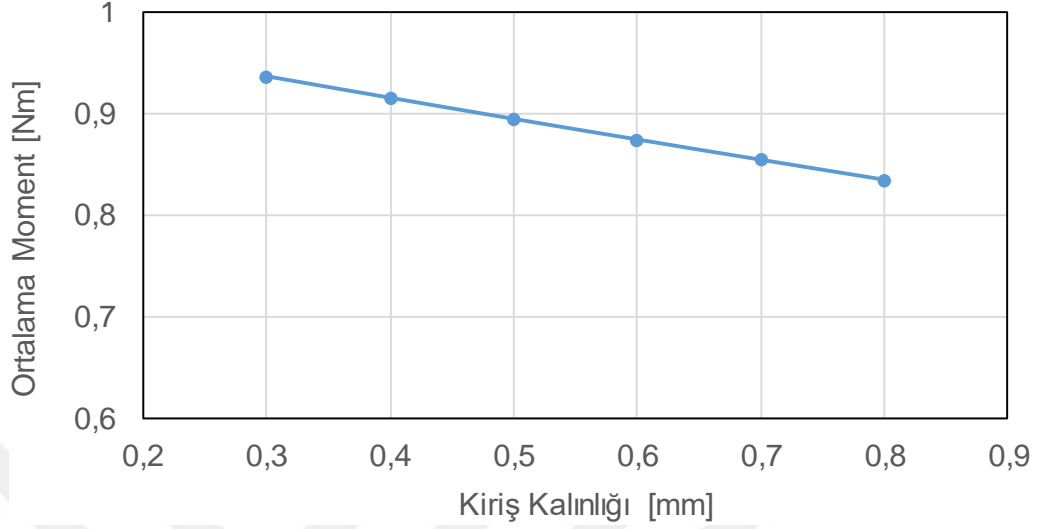
Şekil 3.40. Moment dalgalanmasının D0 uzaklığına göre değişim grafiği

Şekil 3.39 ve Şekil 3.40’de görüldüğü gibi 44mm ve 46mm değerleri hem ortalama moment hem de moment dalgalanması değerleri açısından en uygun değerlerdir. 46mm değeri ortalama moment açısından en yüksek değer olmasına rağmen 2.akı bariyerine daha yakın olduğu için 1. ve 2. akı bariyeri arasında bulunan sac bölgesinde ki doymaların artması riskinden dolayı momentini çok düşürmeden en düşük moment dalgalanması değerine ulaşılan 44 mm değeri final tasarım için uygun görülmüştür.

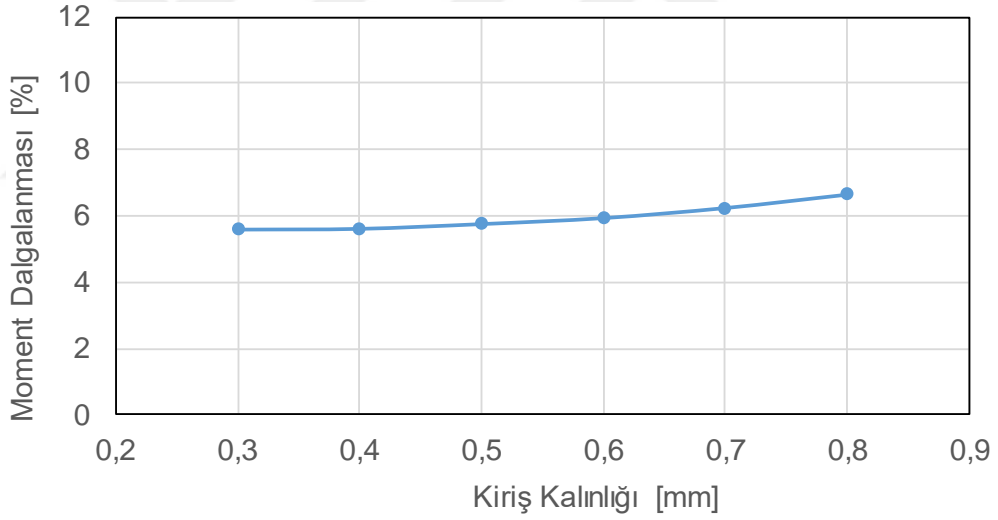
3.5. Kiriş Kalınlığının Etkisinin İncelenmesi

Akı bariyerlerinin hava aralığına yakın ucunda rotorun bir arada kalmasını sağlayan kiriş kalınlığı motor performansı ve özellikle yüksek hızlarda rotorun dayanımı açısından kritik bir parametredir. Bu bölümde kiriş kalınlığının performansa etkisi incelenecektir. Çalışmada Şekil 3.1’de gösterilen 1. bariyerin kiriş bölgesinin kalınlığı değiştirilerek parametrik analiz yapılmıştır. Kiriş kalınlığı değeri 0,3-0,8mm değerleri arasında 0,1mm arttırılarak bu değerler için ortalama moment değeri ve moment dalgalanmasının sonuçları incelenmiştir. Ortalama momentin kiriş kalınlığının değişimine bağlı değişim grafiği Şekil 3.41 ’de verilmiştir. Moment dalgalanmasının kiriş kalınlığının değişimine bağlı değişim grafiği Şekil 3.42’de verilmiştir. Şekil 3.41’den görüldüğü gibi kiriş kalınlığının artması kaçak akıları arttırdığı için motor çıkış momentini düşürmektedir. Teknik olarak kiriş kalınlığı değerinin en düşük olduğu noktada maksimum çıkış momentini elde edilmektedir. Ancak senkron relüktans motorlarda kiriş kalınlığı özellikle yüksek hızlarda rotor mekanik dayanımı sağladığı için bu değer bu kriter göz önüne alınarak seçilmelidir. Bu çalışmada çıkış

momentinden taviz verildiği halde mekanik dayanım konusunda güvenli bölgede kalmak için kiriş kalınlığı 0,6mm seçilmiştir.



Şekil 3.41. Ortalama momentin kiriş kalınlığına göre değişim grafiği

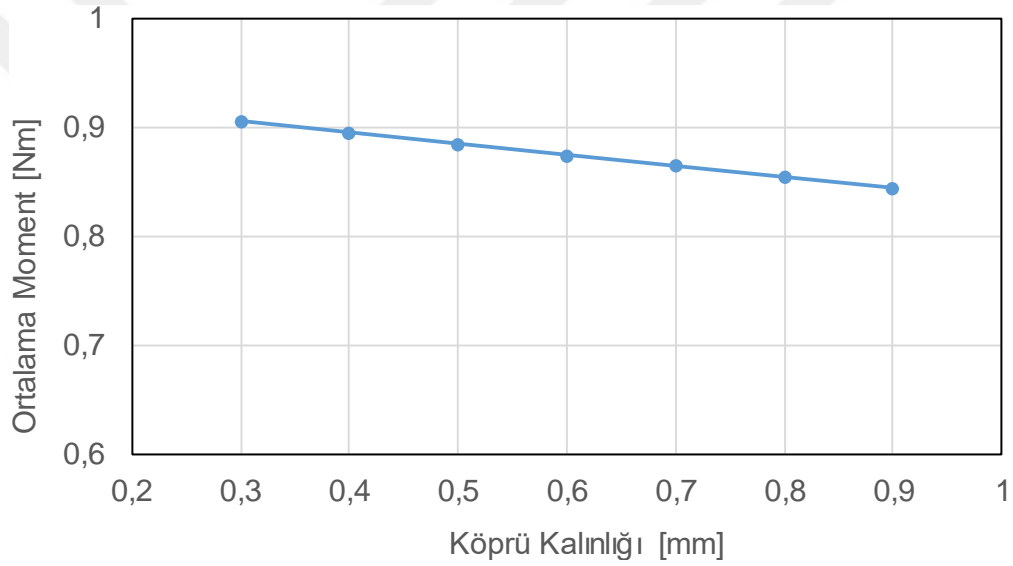


Şekil 3.42. Moment dalgalanmasının kiriş kalınlığına göre değişim grafiği

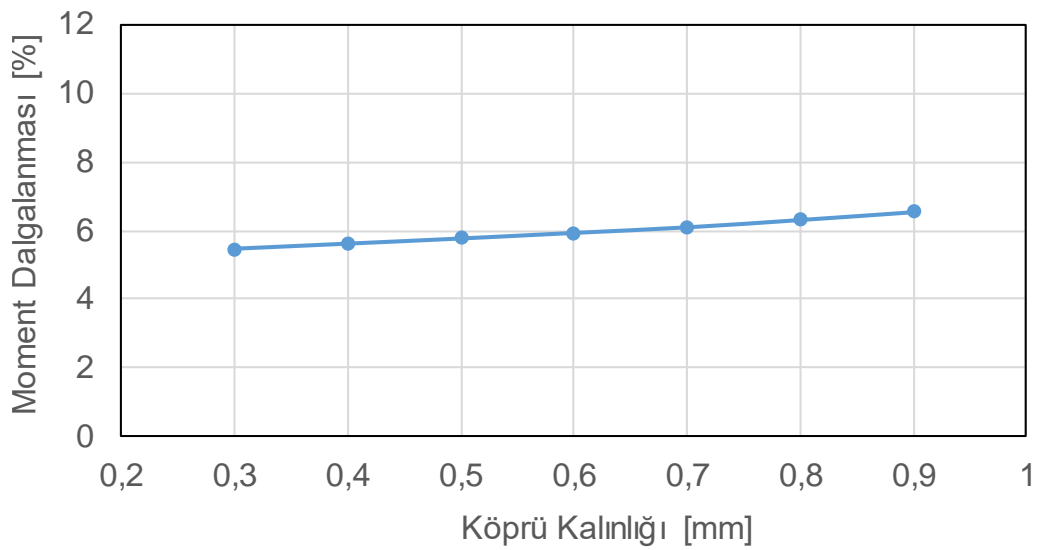
3.6. Köprü Kalınlığının Etkisinin İncelenmesi

Bariyerler arasında rotor mekanik dayanımını sağlayan köprülerin kalınlığı hem motor performansı hem de mekanik dayanımı açısından önemlidir. Çalışmanın bu bölümünde farklı köprü kalınlıklarının motor performansına etkisi incelenecektir. Çalışmada Şekil 3.1’de gösterilen 1. akı bariyerinin arasında bulunan sac bölge olan köprü kalınlığı değeri değiştirilerek parametrik analiz yapılmıştır. Köprü kalınlığı değeri 0,3-0,9mm arasında 0,1 mm adımlarla arttırılarak bu değerler için çıkış momenti ve moment dalgalanması sonuçları incelenmiştir. Şekil 3.43’de ortalama

moment değerinin köprü kalınlığının değişimine göre değişim grafiği verilmiştir. Şekil 3.44'da moment dalgalanmasının köprü kalınlığına göre değişimi verilmiştir. Şekil 3.43'de görüldüğü gibi köprü kalınlığının artması tıpkı kiriş kalınlığının artmasında olduğu gibi kaçak akıları arttırdığı için ortalama moment değerini düşürmektedir. Ancak köprü kalınlığı yüksek hızlarda rotorda meydana gelen merkezkaç kuvvetlerinden dolayı meydana gelecek rotor yırtılmalarını engellemek ve rotor mekanik dayanımını artırmak için kritik bir parametredir. Motor 12500rpm gibi yüksek hızlara çıktığı için rotor mekanik dayanımı açısından güvenli bölgede kalmak amacıyla ortalama momenti düşürmesine rağmen köprü kalınlığı değeri 0,6mm olarak seçilmiştir.



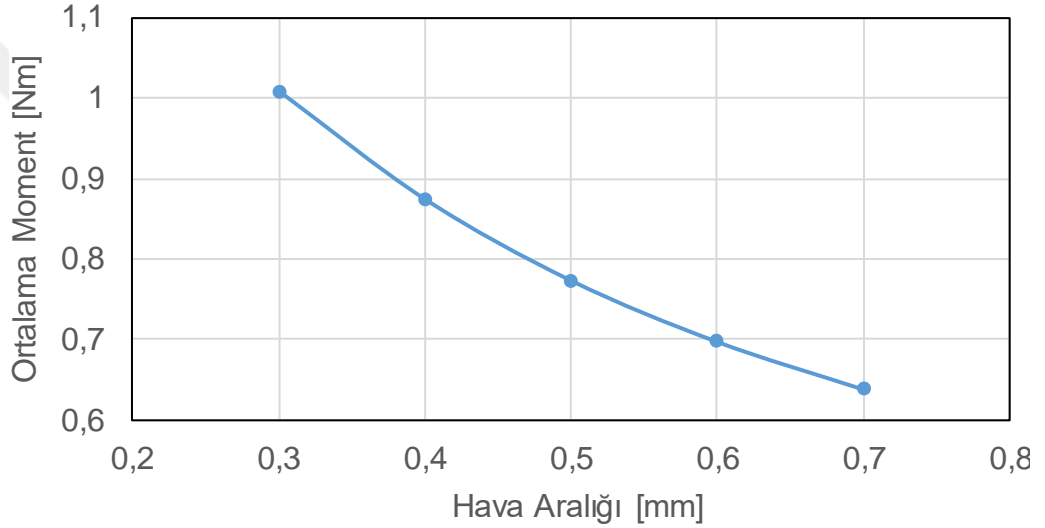
Şekil 3.43. Ortalama momentin köprü kalınlığına göre değişim grafiği



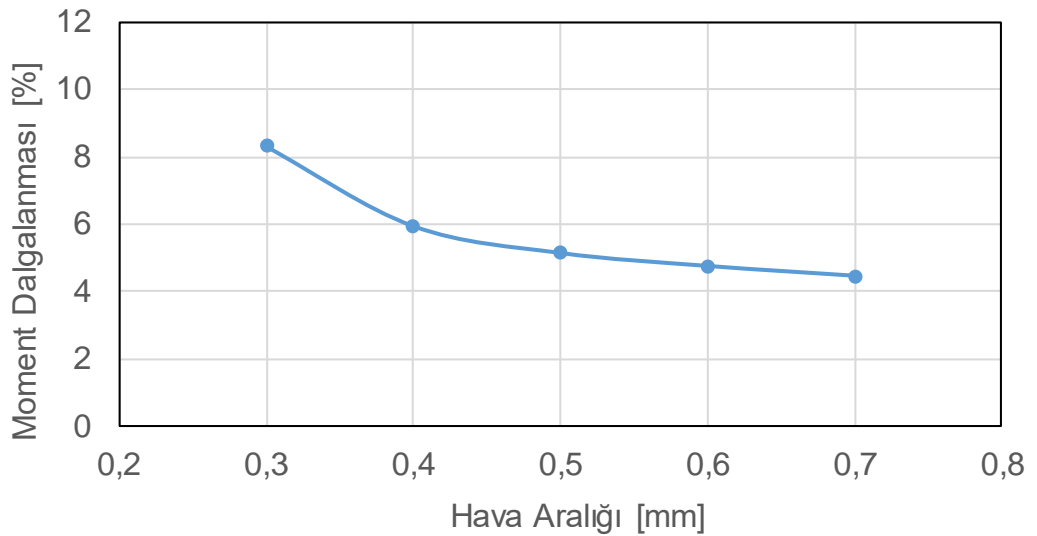
Şekil 3.44. Moment dalgalanmasının köprü kalınlığına göre değişim grafiği

3.7. Hava Aralığının Etkisinin İncelenmesi

Hava aralığı tüm elektrik motorlarının tasarımında en önemli parametrelerdendir. Çalışmanın bu bölümünde hava aralığı genişliğinin etkisi incelenecek olup üretim kısıtları göz önüne alınarak uygun hava aralığı seçimi yapılacaktır. Çalışmada hava aralığı değeri 0,3-0,7mm arasında 0,1 mm adımlarla artırılarak parametrik analiz yapılmış ve bu değerlerin motor çıkış momentine etkisi incelenmiştir. Şekil 3.45'de ortalama momentin hava aralığı genişliğine göre değişim grafiği verilmiştir. Şekil 3.46'de moment dalgalanmasının hava aralığı genişliğine göre değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 3.45. Ortalama momentin hava aralığı genişliğine göre değişim grafiği

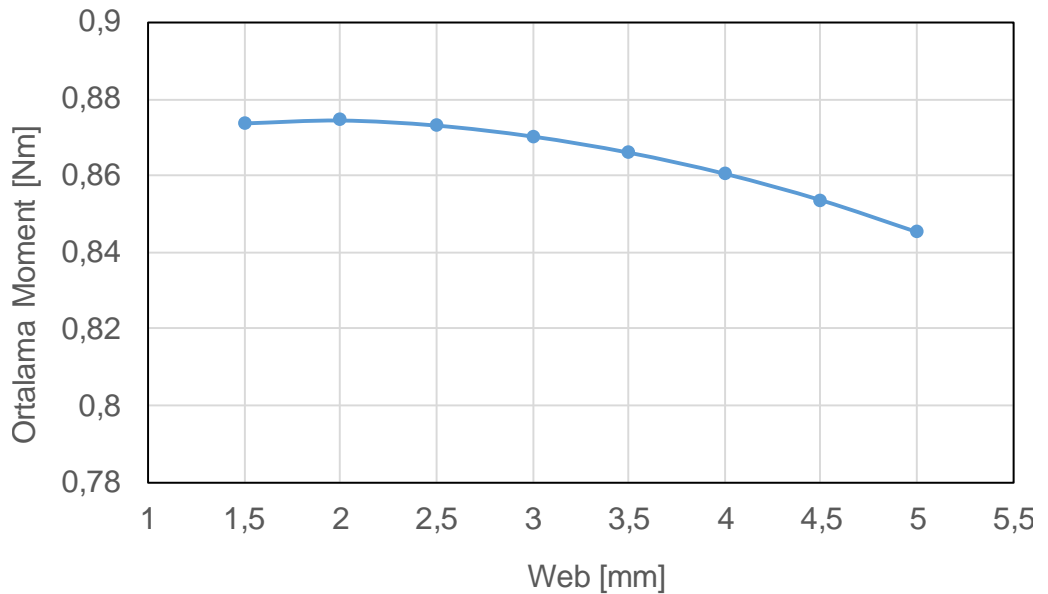


Şekil 3.46. Moment dalgalanmasının hava aralığı genişliğine göre değişim grafiği

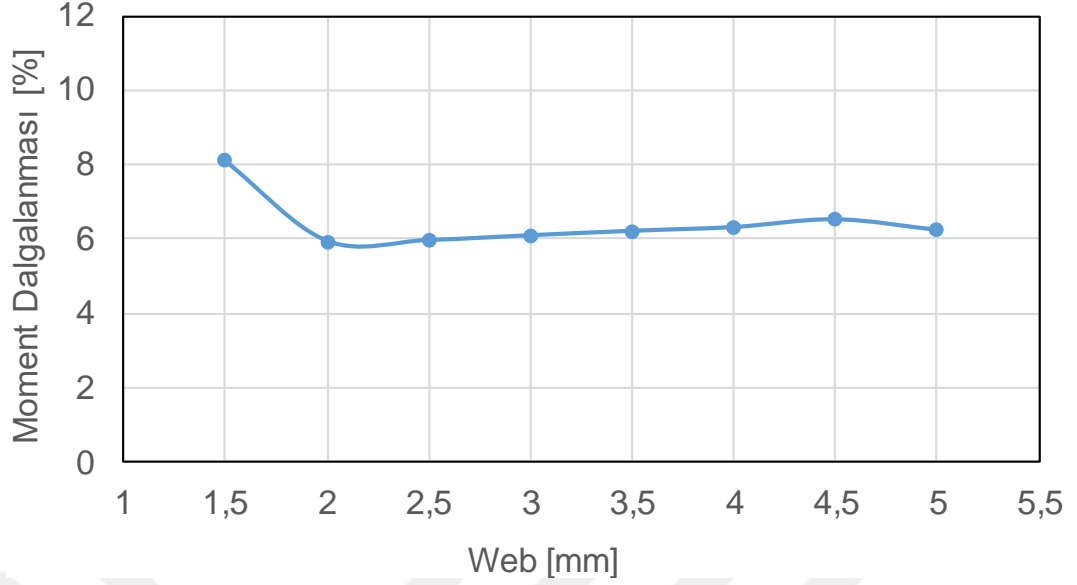
Şekil 3.45’de görüldüğü gibi hava aralığı genişliği arttıkça motor çıkış momenti beklendiği gibi azalmaktadır. Burada özellikle relüktans momentini maksimum değerde tutabilmek için hava aralığı seçilebilecek en küçük değerde seçilmelidir. Üretim kısıtları göz önüne alındığında 0,3mm hava aralığının prototip üretimi için zorlayıcı olacağı öngörülmüş ve 0,4mm hava aralığı değeri seçilmiştir.

3.8. Bariyerler Arasında D Eksen Uzaklığının Etkisinin İncelenmesi

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi akı bariyerlerinin rotor içinde ki konumu tasarımın önemli parametrelerindedir. Çalışmanın bu bölümünde akı bariyerleri arasında d eksen boyunca olan uzaklık(Web) değerini optimizasyon çalışmaları yapılacaktır. 1. akı bariyeri için Şekil 2.2’de verilen Web parametresi 1,5-5mm arasında 0,5 mm adımlarla arttırılarak parametrik analiz yapılmıştır. Bu uzaklığın ortalama moment ve moment dalgalanması üzerinde ki etkisi incelenecektir. Ortalama momentin Web parametresine bağlı değişim grafiği Şekil 3.47’da verilmiştir. Moment dalgalanmasının Web parametresine bağlı değişim grafiği Şekil 3.48’da verilmiştir. Şekil 3.47’da görüldüğü gibi bariyerler arasında d eksen boyunca uzaklık arttıkça ortalama moment değeri azalmaktadır. Şekil 3.48’ da verilen moment dalgalanmasının değişim grafiğinde de en düşük moment dalgalanması değerinin uzaklık 2mm iken olduğu görülmektedir. Bu değer içinde ortalama moment değerinin en yüksek değer olduğu görüldüğü için 2mm uzaklık değeri uygun görülmüştür.



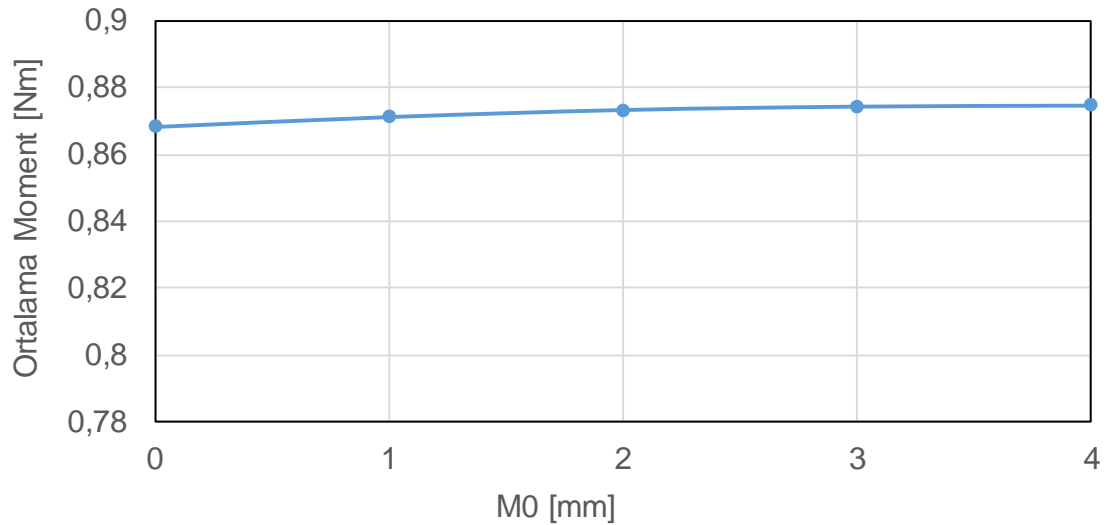
Şekil 3.47. Ortalama momentin web parametresine göre değişim grafiği



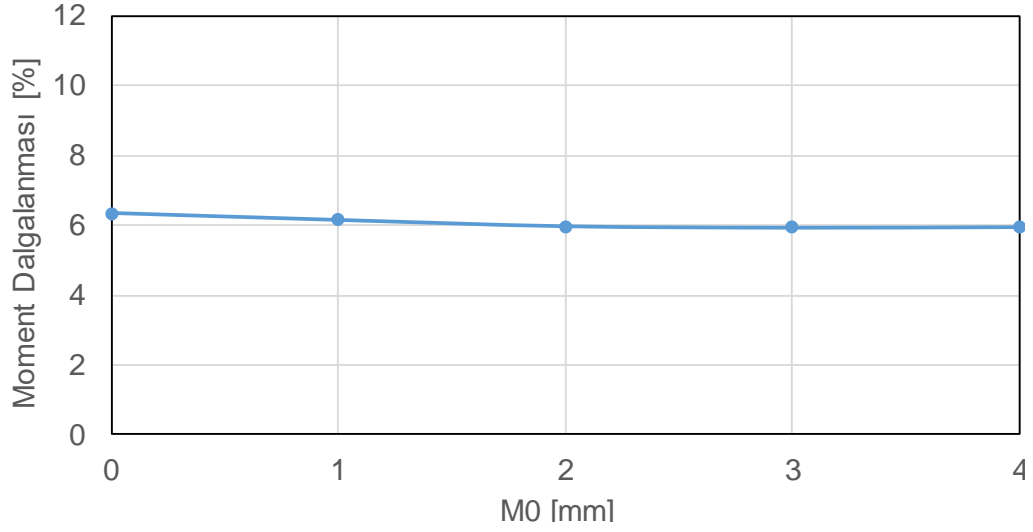
Şekil 3.48. Moment dalgalanmasının web parametresine göre değişim grafiği

3.9. Bariyer İçindeki Mıknatısların Konumunun Etkisinin İncelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde Şekil 3.1’de belirtilen 1 bariyerin yan köşelerinde mıknatısın bariyer içinde ki konumunun motor performansına etkisi incelenecektir. Çalışmada M_0 uzaklığı 0-4mm arasında 1mm adımlarla arttırılarak parametrik analiz yapılmıştır. Uzaklığın değişimine göre ortalama momentin ve moment dalgalanmasının değişimi incelenmiştir. Şekil 3.49’de ortalama momentin M_0 uzaklığına göre değişimi verilmiştir. Şekil 3.50’de moment dalgalanması değerinin M_0 uzaklığına bağlı değişim verilmiştir. Şekil 3.51 ve Şekil 3.52’de sırasıyla $M_0=0$ mm ve $M_0=4$ mm değerleri için yüklü durum akı yoğunlukları verilmiştir.

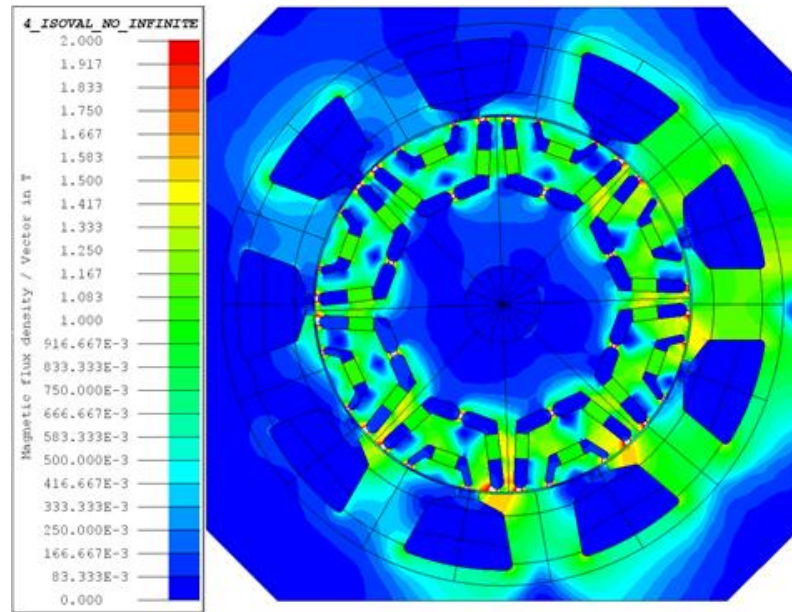


Şekil 3.49. Ortalama moment değerinin M_0 uzaklığına göre değişimi

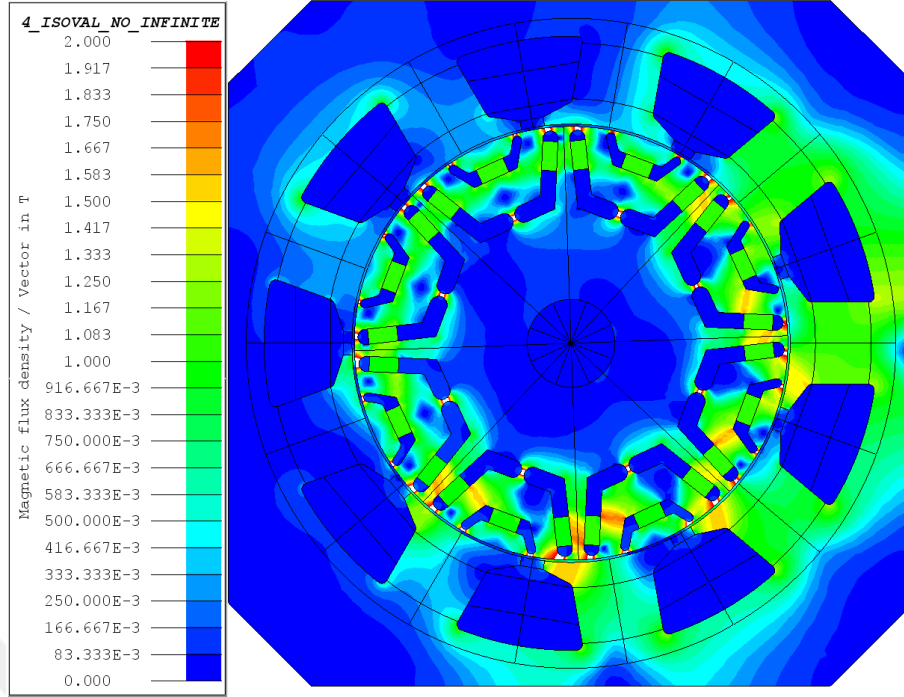


Şekil 3.50. Moment dalgalanması değerinin M0 uzaklığına göre değişimi

Şekil 3.49 ve Şekil 3.50'den görüldüğü gibi M0 uzaklığı arttıkça çok küçük değerlerde de olsa ortalama moment artmakta ve moment dalgalanması azalmaktadır. Ancak mıknatısın giriş bölgesine yaklaşmasından dolayı Şekil 3.52'de görüldüğü gibi M0 = 4mm değerinde 1.bariyer ve 2. bariyer arasındaki sac bölgelerinde doymalar arttırmaktadır. Bu nedenle sac bölgelerindeki doymaları arttırmamak için hem ortalama momenti hem de moment dalgalanmasının kabul edilebilir olduğu 1mm değeri seçilmiştir.



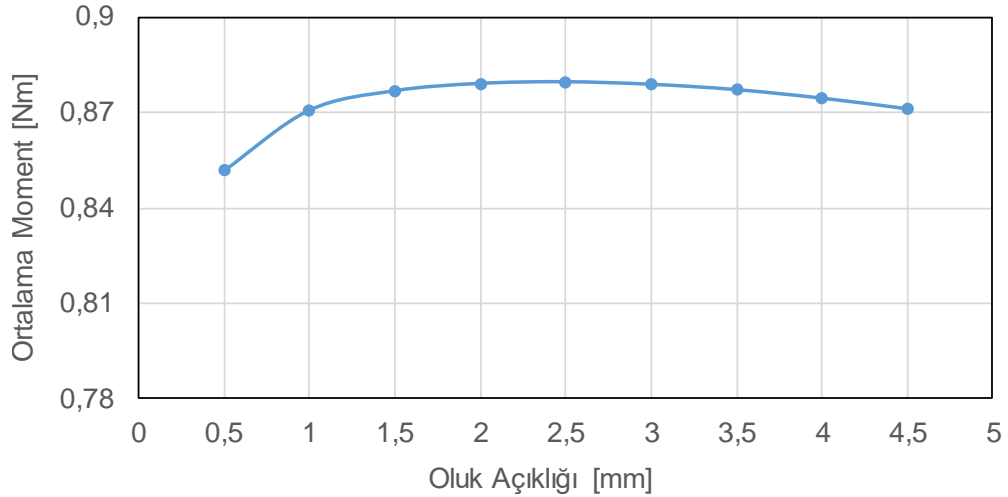
Şekil 3.51. M0 = 0 değeri için yüklü durum akı yoğunluğu görünümü



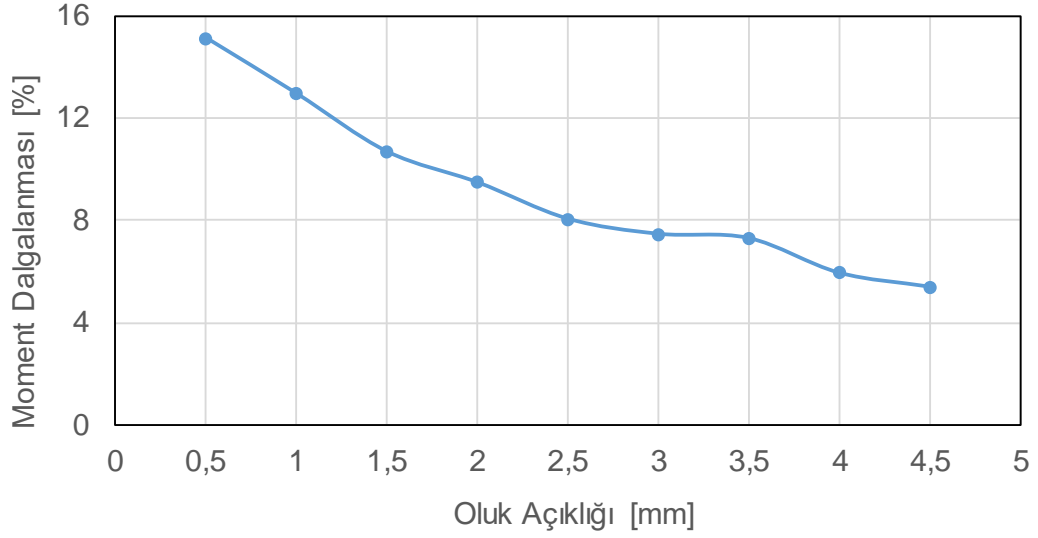
Şekil 3.52. $M_0 = 4$ değeri için yüklü durum akı yoğunluğu görünümü

3.10. Oluk Açıklığının Etkisinin İncelenmesi

Stator oluk açıklığı vurutu moment ve moment dalgalanması üzerinde etkili olan bir parametredir. Bu nedenle bu çalışma da motor çıkış momentini arttırmak için oluk açıklığının parametrik analizi yapıp motor performansına etkisi incelenecektir. Çalışmada oluk açıklığı değeri 0,5-4,5mm değerleri arasında 0,5mm adımlarla artırılarak parametrik analiz yapılmıştır. Ortalama momentin oluk açıklığı genişliğine göre değişim grafiği Şekil 3.53’de verilmiştir. Moment dalgalanmasının oluk açıklığı genişliğine göre değişim grafiği Şekil 3.54’de verilmiştir.



Şekil 3.53. Ortalama momentin oluk açıklığı genişliğine göre değişim grafiği

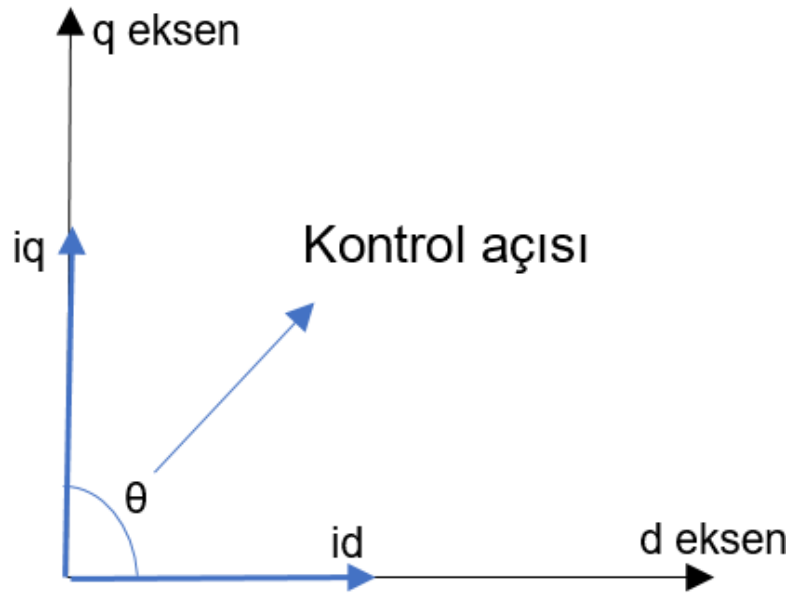


Şekil 3.54. Moment dalgalanmasının oluk açıklığı genişliğine göre değişim grafiği

Şekil 3.54’de görüldüğü gibi oluk açıklığı değeri arttıkça moment dalgalanması azalmaktadır. Ortalama momenti çok fazla düşürmeden moment dalgalanmasını azaltmak için oluk açıklığı değeri 4mm olarak seçilmiştir.

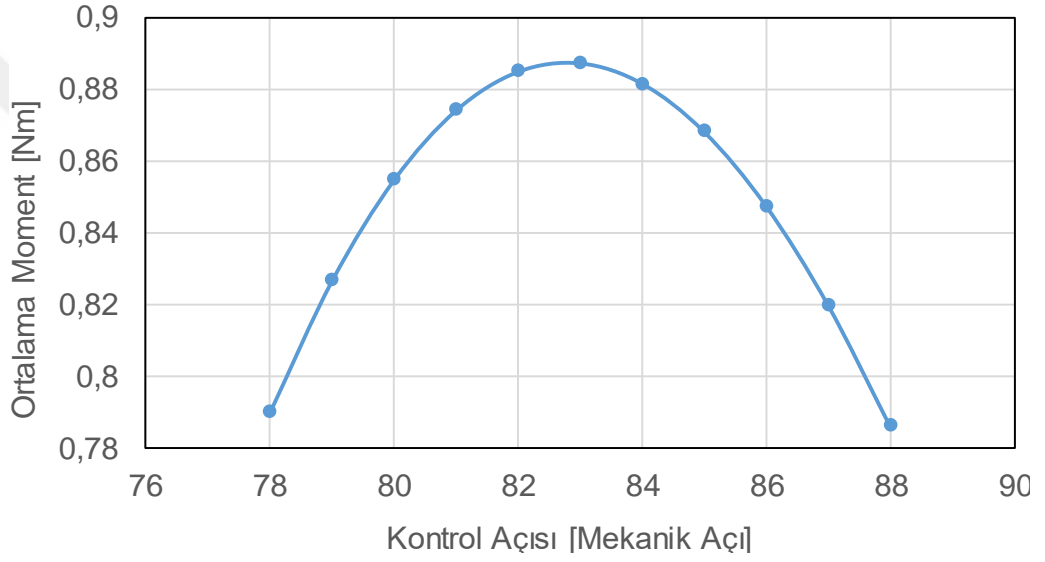
3.11. Kontrol Açısının Etkisinin İncelenmesi

Stator d ve q eksene akımları arasındaki açı olan kontrol açısı motor performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Çalışmanın bu bölümünde Şekil 3.55’de gösterimi verilen kontrol açısının değişiminin çıkış momenti ve moment dalgalanması üzerindeki etkisi incelenecektir.

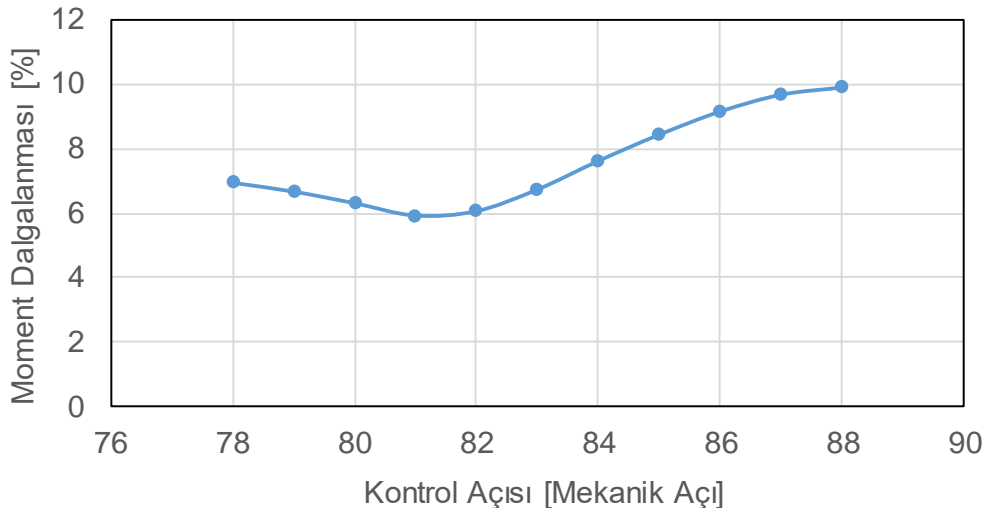


Şekil 3.55. D ve q ekseni akımları arasındaki kontrol açısı

Çalışmada kontrol açısı değeri 78-88 derece arasında 1 derece adımlarla arttırılarak parametrik analiz yapılmıştır. Ortalama moment değerinin kontrol açısına bağlı değişimi Şekil 3.56'da verilmiştir. Moment dalgalanmasının kontrol açısına göre değişimi Şekil 3.57'de verilmiştir. Şekil 3.56 ve Şekil 3.57'de görüldüğü gibi kontrol açısının çıkış momenti ve ortalama moment üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Moment dalgalanmasının en düşük değer olduğu 81 derece için çıkış momenti değerine bakıldığında en yüksek moment noktasından uzakta olmadığı görülmektedir. Motor performansından en az şekilde taviz vererek çıkış momenti kalitesini arttırmak için 81 derece değeri uygun görülmüştür.



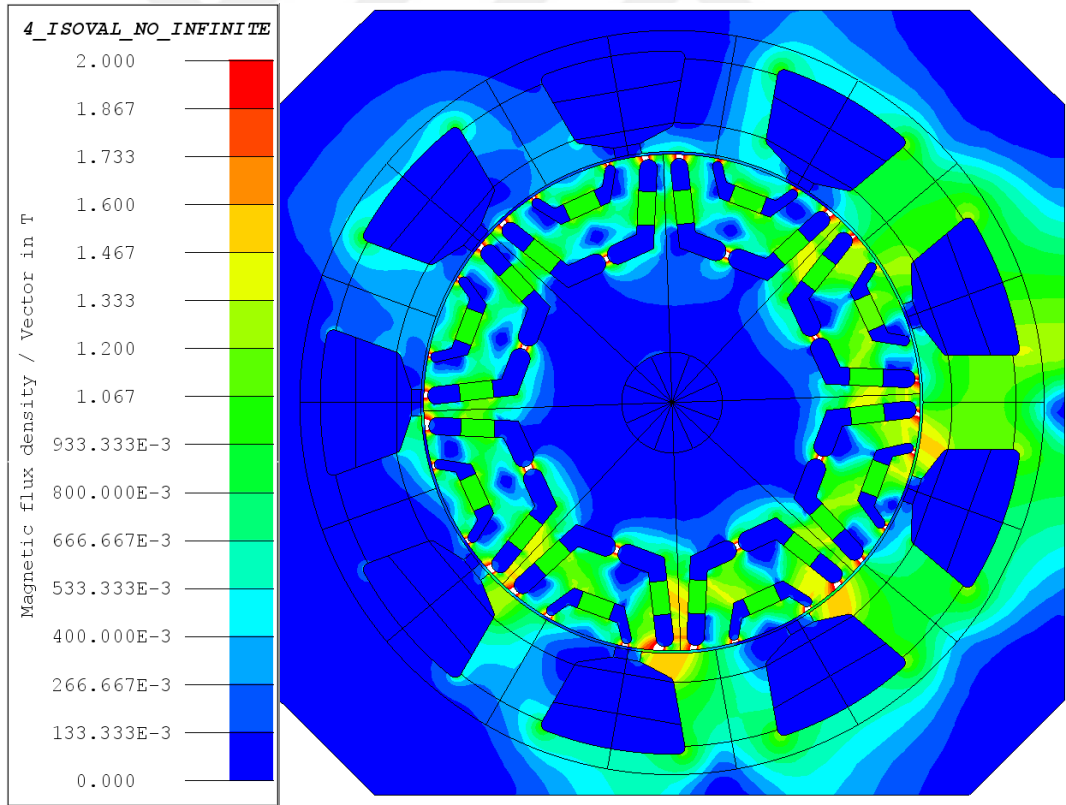
Şekil 3.56. Ortalama momentin kontrol açısı değerine göre değişim grafiği



Şekil 3.57. Moment dalgalanmasının kontrol açısı değerine göre değişim grafiği

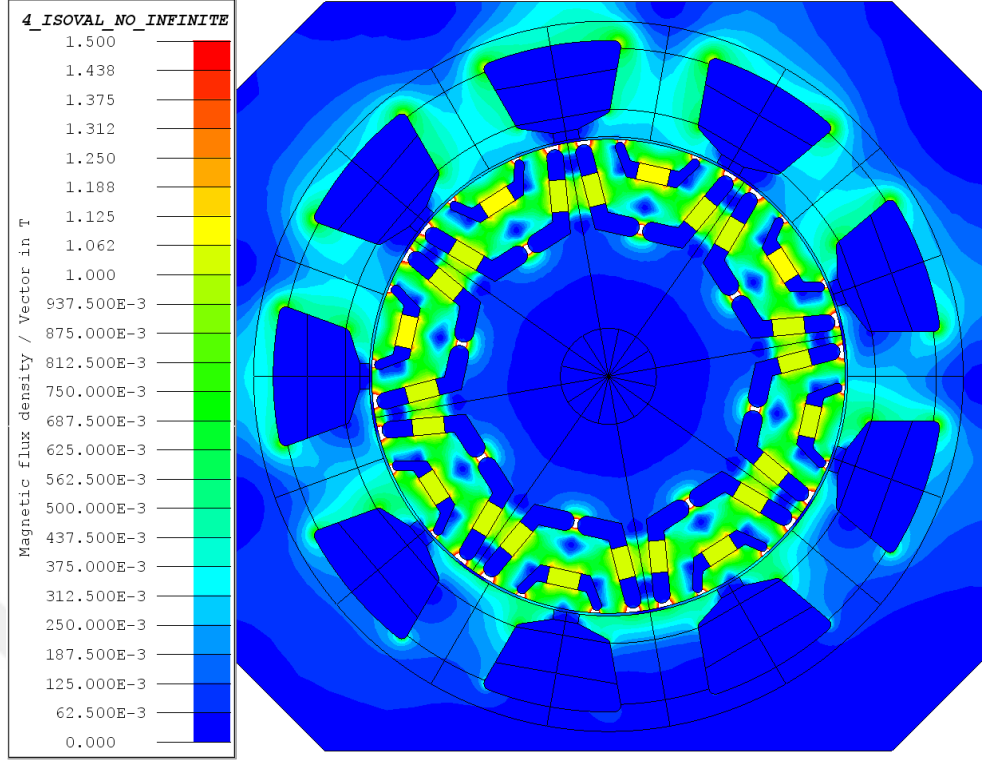
3.12. Prototipi Üretilecek Tasarımın Belirlenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, daha önceki bölümlerde yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda belirlenen tasarım sonuçları incelenecektir. Şekil 3.58’de prototipi üretilecek yapının yüklü durum akı yoğunluğu grafiği görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi stator için en büyük akı yoğunluğu değeri statorun dışlarında stator oluğunun yan bölgesinde oluşmaktadır. Statorun oluşmuş en yüksek akı yoğunluğu değeri bu bölgede ve 1,6 T değerindedir. Beklendiği gibi rotor köprü ve kiriş bölgelerinde doymalar oluşmaktadır. Bu doymalar düşük akı yoğunluğu değerlerinde meydana gelmekte ve tasarımcı tarafından rotor köprü ve kiriş bölgelerinden meydana gelen doymalar istenmektedir. Çünkü rotorda bulunan köprü ve kirişler rotorda akı kaçaklarına dolayısıyla da performans düşüklüğüne sebebiyet vermektedir. Bu bölgelerde düşük akı değerlerinde doyma yaşandığı için bu bölgelerin relüktansı artmakta ve akı geçişi azalmaktadır.

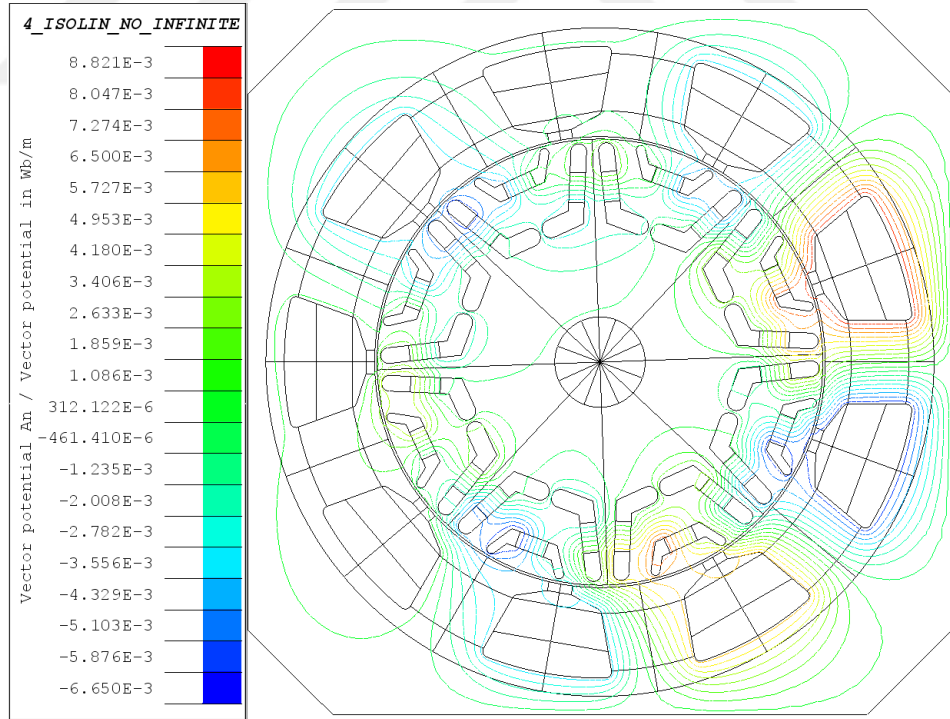


Şekil 3.58. Prototiplenecek yapı yüklü durum akı yoğunluğu görünümü

Şekil 3.59’da motorun yüksüz durum akı yoğunluğu görülmektedir. Stator bölgesinde ve rotor bölgesinde yüksüz durumda akı yoğunluğunun 1 T değerinin altında olduğu görülmektedir. Şekil 3.60’de manyetik akı çizgileri görülmektedir.



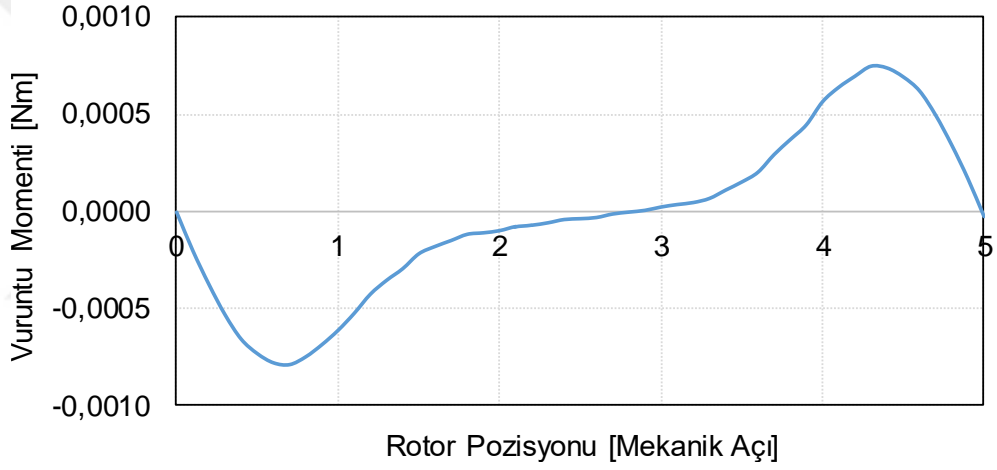
Şekil 3.59. Prototiplenecek yapı yüksüz durum akı yoğunluğu görünümü



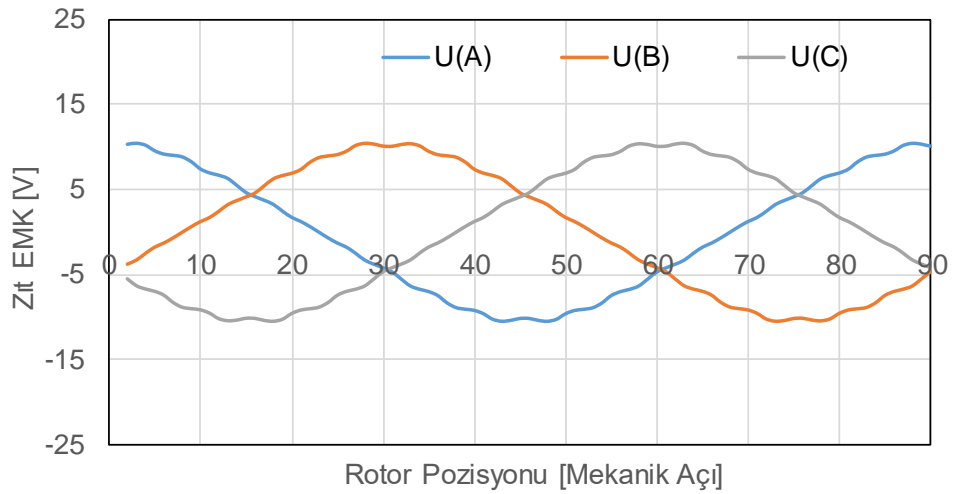
Şekil 3.60. Prototiplenecek yapı yüklü durum manyetik akı çizgileri görünümü

Şekil 3.61’de motorun yüksüz durum analizi sonucunda elde edilen vuru mu momenti grafiği görölmektedir. Vuru mu momentinin tepe değer i 0,0008Nm değer ine sahiptir.

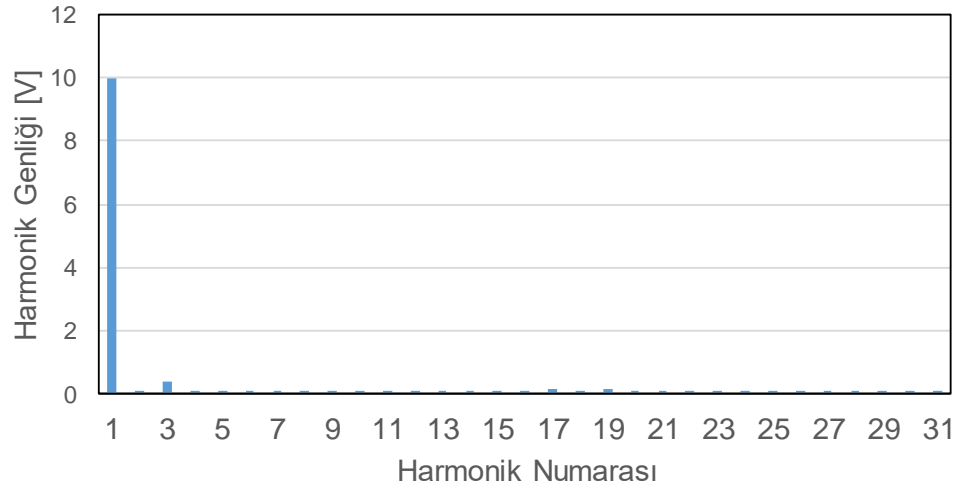
Şekil 3.62 ve Şekil 3.63’de sırasıyla motorun 500rpm hızda zıt EMK faz gerilimi dalga şekli ve zıt EMK faz geriliminin harmonikleri görülmektedir. Zıt EMK faz gerilimi tepesi 10,5 V değerine sahiptir. Zıt EMK dalga şeklinin akı bariyerlerinin tasarımında dolayı uzay harmoniklerine sahip olduğu görülmektedir. Toplam harmonik bozunumu 4,51 değerine sahipken temel harmonik genliğinin 9,99 V olduğu görülmektedir. Şekil 3.64 ve Şekil 3.65’de sırasıyla motorun 500rpm hızda zıt EMK faz arası gerilimi dalga şekli ve zıt EMK faz arası geriliminin harmonikleri görülmektedir. Zıt EMK faz gerilimi tepesi 17,3 V değerine sahiptir. Zıt EMK dalga şeklinin akı bariyerlerinin tasarımında dolayı uzay harmoniklerine sahip olduğu görülmektedir. Faz arası zıt EMK gerilimi için toplam harmonik bozunumu 2,03 değerine sahipken temel harmonik genliğinin 17,3 V olduğu görülmektedir.



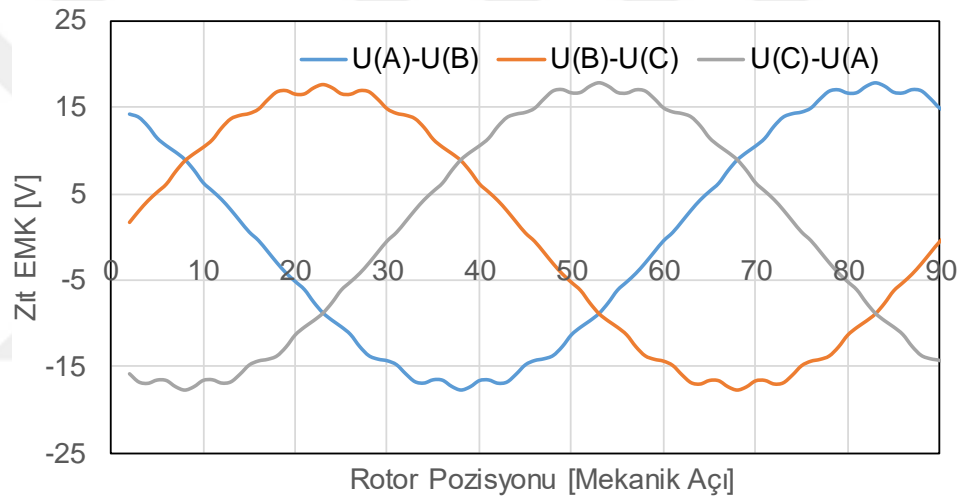
Şekil 3.61. Prototiplenecek yapı vuru momentini değişim grafiği



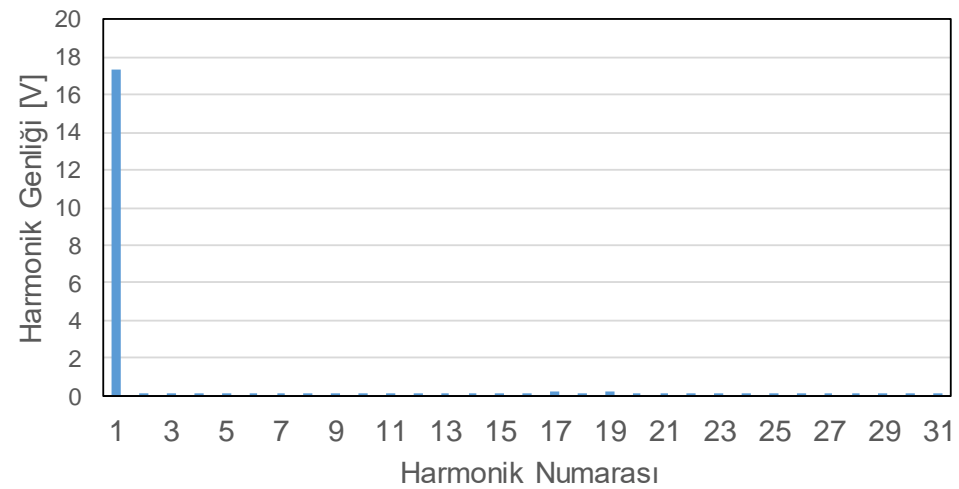
Şekil 3.62. Prototiplenecek yapı faz zıt EMK gerilimi dalga şekli(@500rpm)



Şekil 3.63. Prototiplenecek yapı faz zıt EMK gerilimi harmonik görünümü

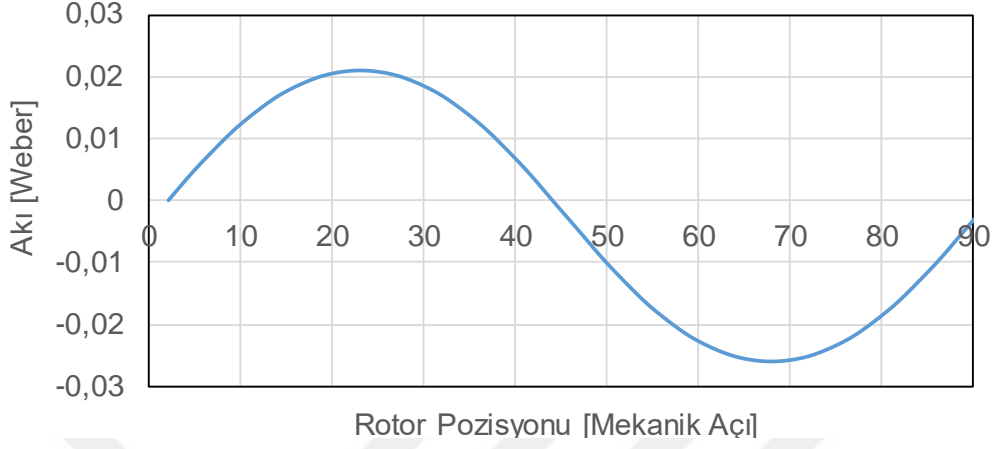


Şekil 3.64. Prototiplenecek yapı faz arası zıt EMK gerilimi dalga şekli (@500rpm)

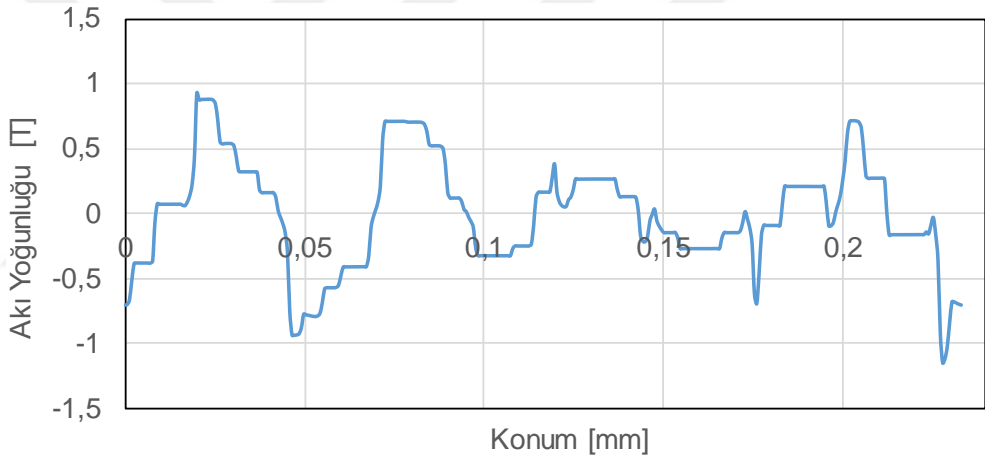


Şekil 3.65. Prototiplenecek yapı faz arası zıt EMK gerilimi harmonik görünümü

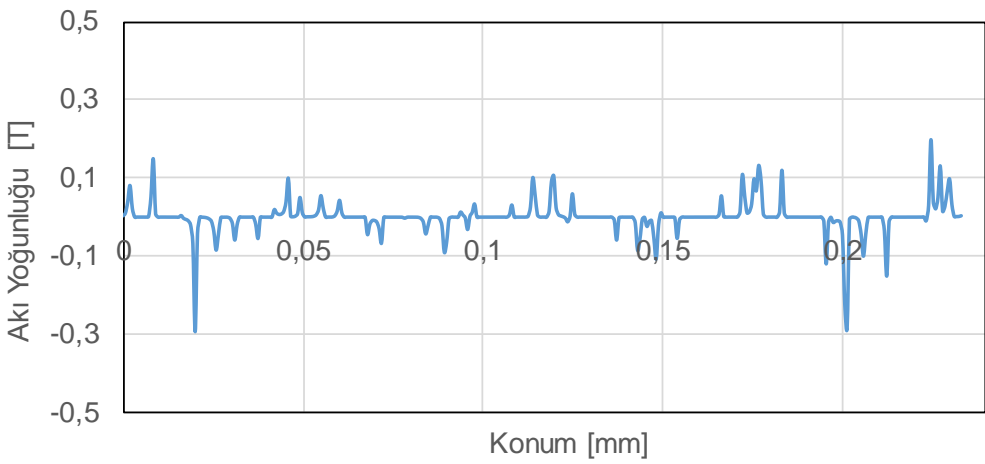
Şekil 3.66, Şekil 3.67 ve Şekil 3.68’de sırasıyla hava aralığı akısı ve hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni ve hava aralığı akısı tanjant bileşeni görülmektedir.



Şekil 3.66. Prototiplenecek yapı hava aralığı akısının değişimi



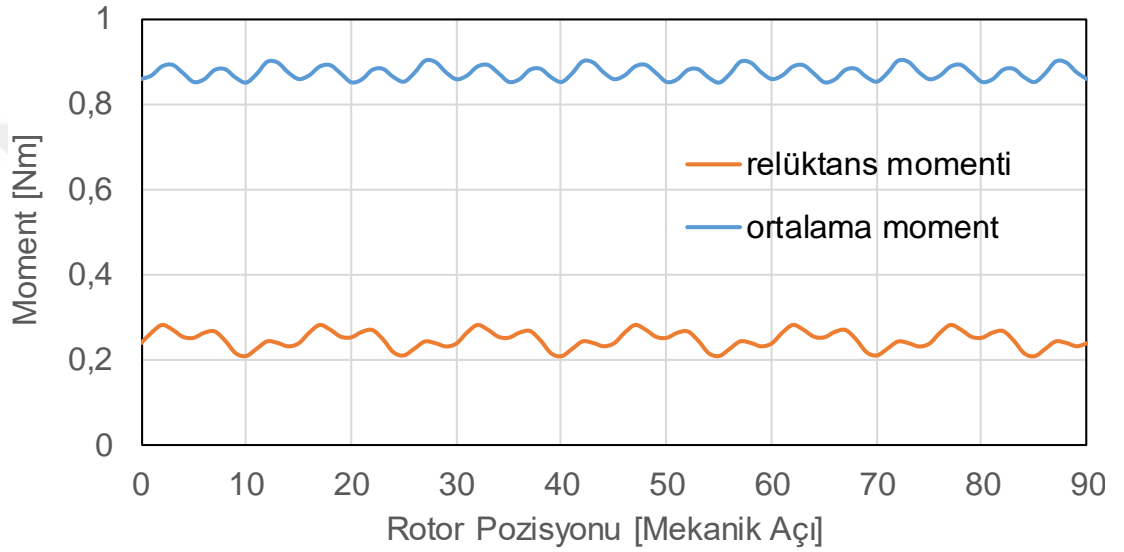
Şekil 3.67. Prototiplenecek yapı hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni



Şekil 3.68. Prototiplenecek yapı hava aralığı akı yoğunluğu tanjant bileşeni

Sinüs formunda olan hava aralığı akısı tepe noktasının 0,021Weber değerine sahip olduğu görülmektedir. Hava aralığı akı yoğunluğu normal bileşeni etkin değeri 0,41 T olarak hesaplanmıştır.

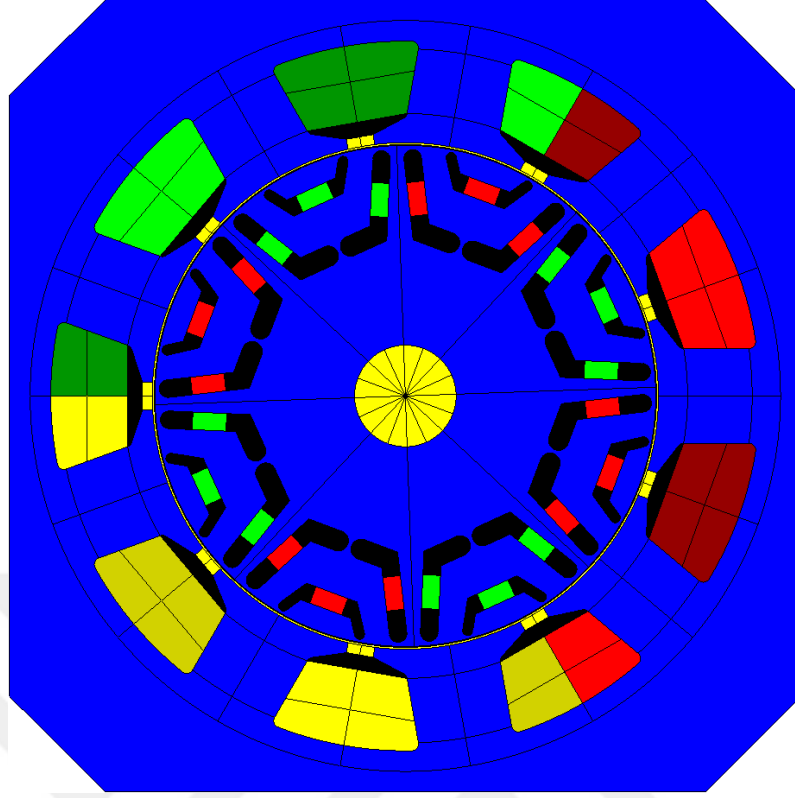
Şekil 3.69'de motorun ortalama moment ve relüktans momenti bileşenleri görülmektedir. Ortalama moment değerinin 0,874Nm olduğu, relüktans momenti ortalama değerinin 0,246Nm olduğu görülmektedir. Ortalama momentin moment dalgalanması %5,93 değerine sahiptir.



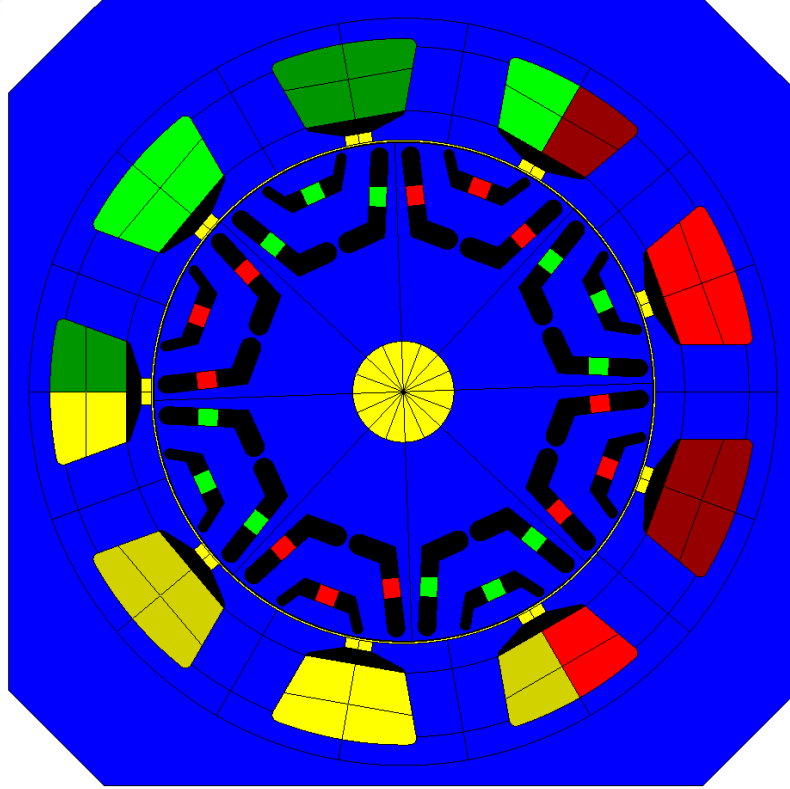
Şekil 3.69. Prototiplenecek yapı ortalama moment ve relüktans moment grafiği

3.13. Mıknatıs Miktarının Geniş Hız Aralığına Etkisinin İncelenmesi

Mıknatıs destekli senkron relüktans motorlarda mıknatısın Şekil 3.1'de verildiği gibi q ekseninde bulunmasından dolayı mıknatıs motor geniş hız aralığı performansı artırmaktadır. Mıknatıs akısı alan zayıflatma bölgesinde stator gerilimini düşürmekte ve doğal alan zayıflatma etkisi yaratmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde mıknatıs miktarının motor hız aralığına etkisi incelenecektir. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda önerilen model üzerinde mıknatıs miktarı normal modelin ve mıknatıs miktarı %40 azaltılmış modelin geniş hız aralığı performansları analiz edilecektir. Şekil 3.70 ve Şekil 3.71'da sırasıyla önerilen model ile mıknatısı azaltılmış modelin SEY modeli görünümü verilmiştir.

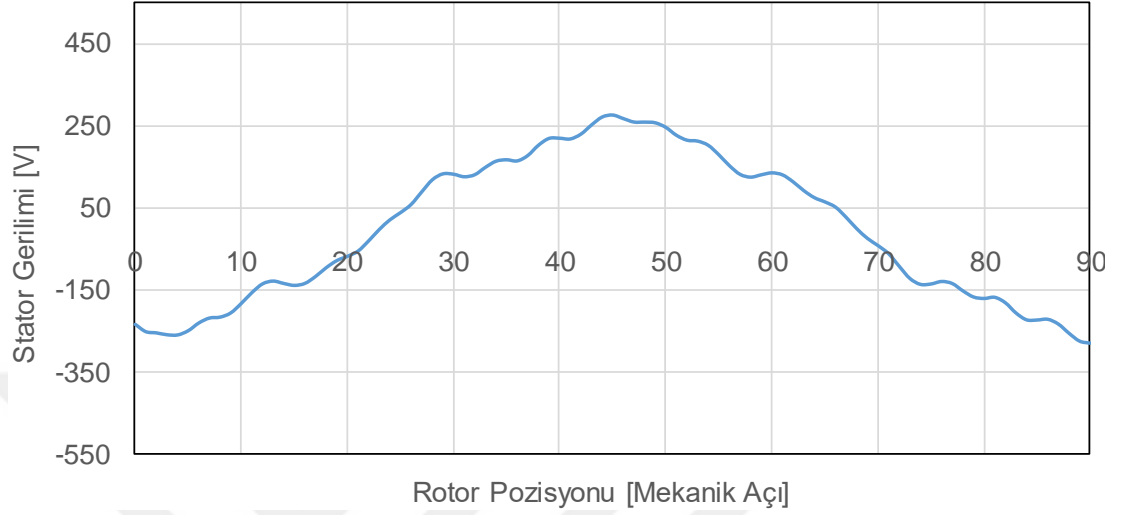


Şekil 3.70. Önerilen model SEY modeli görünümü

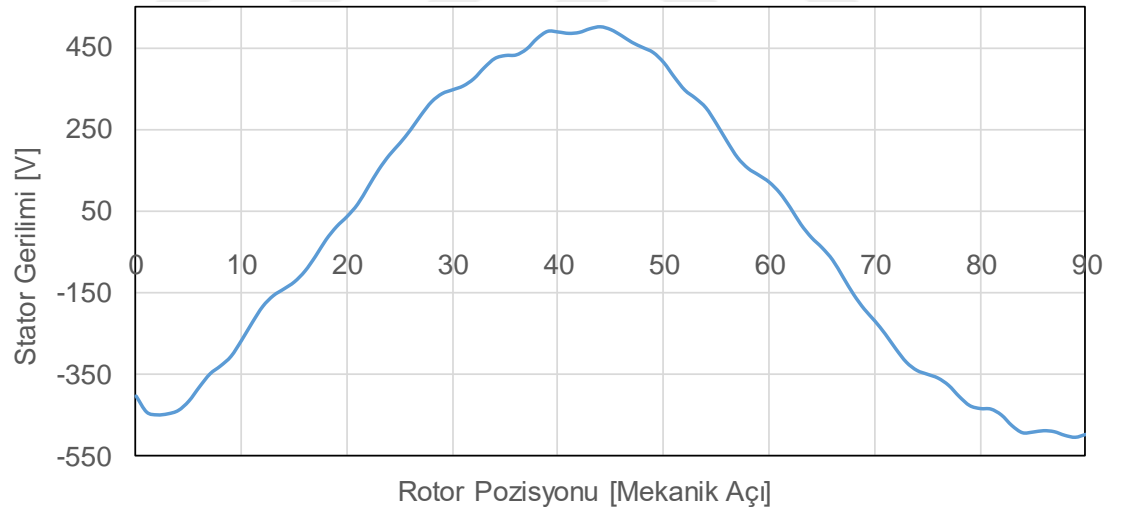


Şekil 3.71. Mıknatısı azaltılmış model SEY modeli görünümü

Şekil 3.72 ve Şekil 3.73’ de sırasıyla önerilen motorun ve mıknatısı azaltılmış motorun stator gerilimlerinin grafiği verilmiştir. Şekil 3.74’de önerilen tasarım ve mıknatıs miktarı azaltılmış tasarım için farklı hızlardaki stator gerilimleri verilmiştir.

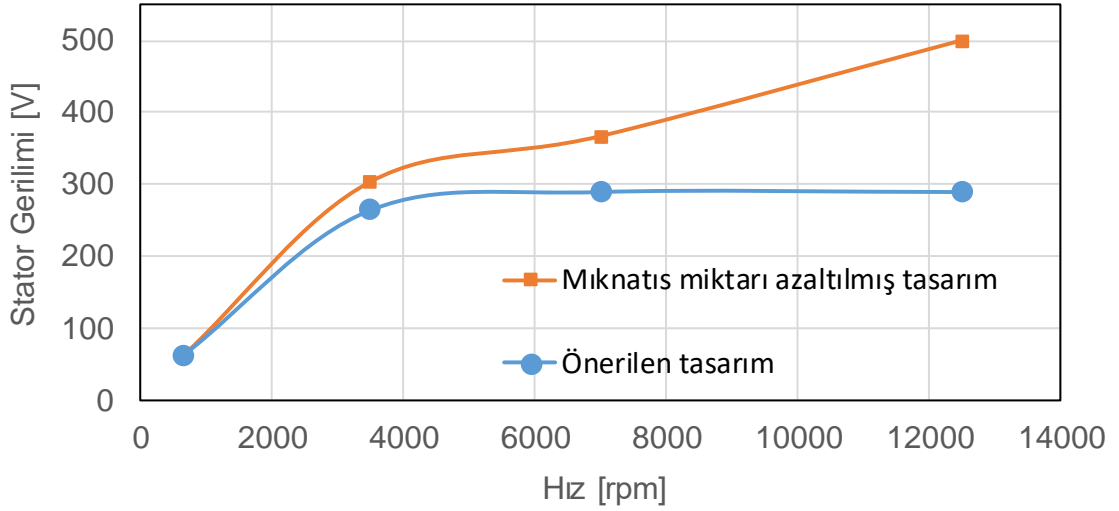


Şekil 3.72. Önerilen modelin stator geriliminin rotor pozisyonuna göre değişimi(@12500rpm)



Şekil 3.73. Mıknatısı azaltılmış modelin stator geriliminin rotor pozisyonuna göre değişimi(@12500rpm)

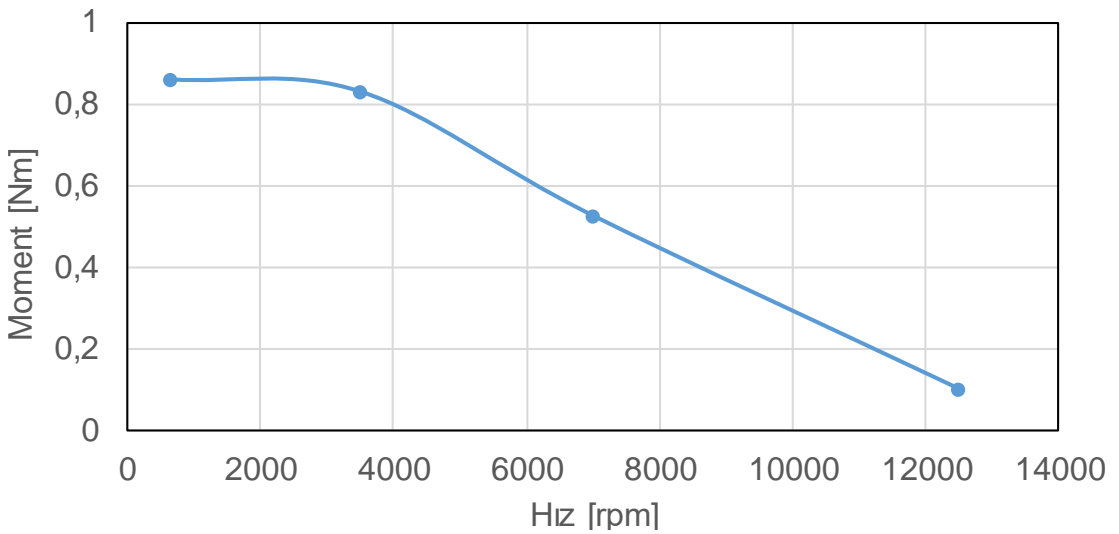
Şekil 3.72 ve Şekil 3.73’den görüldüğü gibi mıknatısı azaltılmış modelin 12500rpm hızında stator geriliminin tepe değeri 501 V iken mıknatısı fazla olan modelin stator geriliminin tepe değeri 278 V olmaktadır. Şekil 3.74’den görüldüğü gibi mıknatıs miktarının azalması stator gerilimini arttırmaktadır. Başka bir deyişle stator geriliminin artmasıyla motorun çıkabileceği maksimum hız limiti azalmaktadır.



Şekil 3.74. Önerilen tasarım ve mıknatis miktarı azaltılmış tasarım farklı hızlarda için stator gerilimleri karşılaştırılması

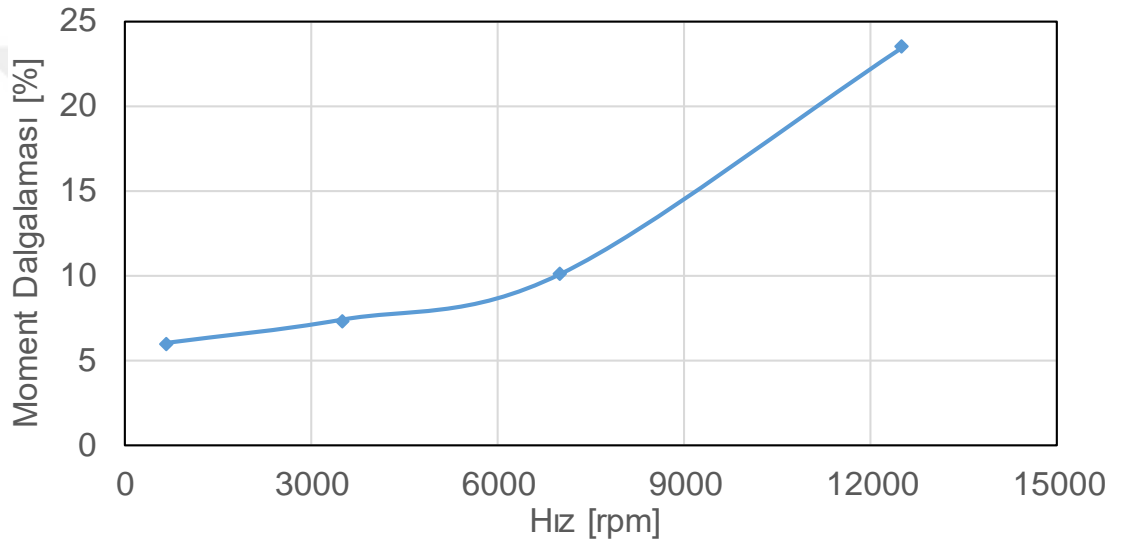
3.14. Önerilen Motorun Geniş Hız Aralığında Çalışmasının İncelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen son tasarımın gecik hız aralığındaki çalışma durumu incelenecektir. Motor beyaz eşya ev uygulamasına yönelik tasarlandığı için DC bara limiti 310 V değerindedir. Ancak kontrol yöntemindeki güvenlik sınırlarından dolayı DC bara limiti 290 V olarak kullanılmaktadır. Tasarımlar stator terminal gerilimi olan 290 V değerini aşmayacak şekilde yapılmıştır. Şekil 3.75’de önerilen motorun moment-hız eğrisi gösterilmektedir. Şekil 3.76’da farklı hızlardaki moment dalgalanması değerleri gösterilmektedir.

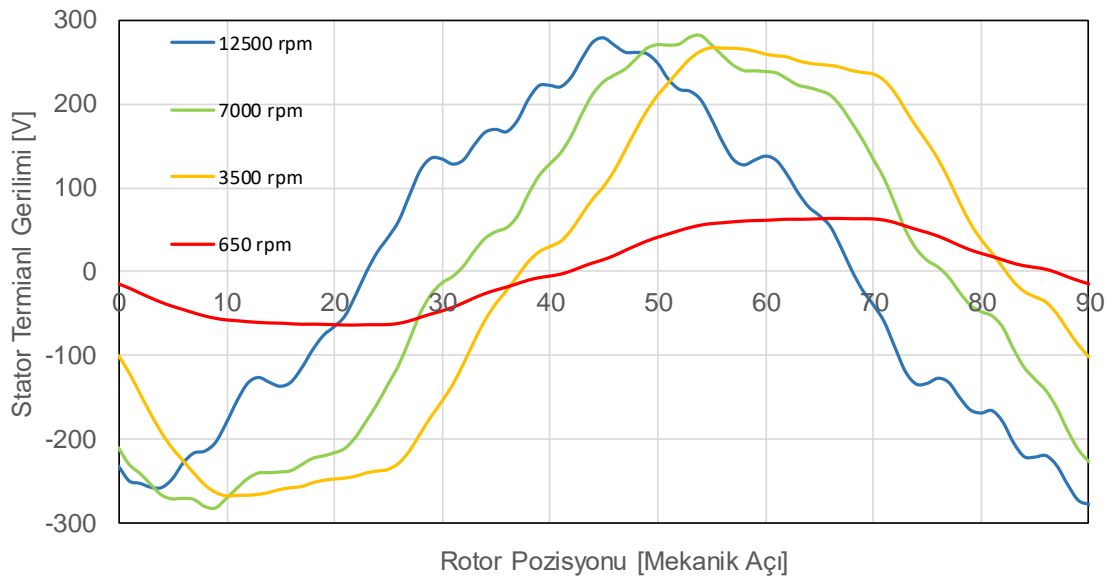


Şekil 3.75. Önerilen motorun moment-hız eğrisi

Şekil 3.77’de motorun farklı hızlarda SEY ile elde edilmiş stator terminal gerilimlerinin grafikleri gösterilmektedir. Şekil 3.75’de görüldüğü gibi motor 3500rpm hızından sonra alan zayıflata bölgesine girmekte ve hız artarken moment azalmaktadır. 12500rpm hızında ise 0,1Nm moment değerine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 3.76’de görüldüğü gibi hız arttıkça özellikle alan zayıflatma bölgesinde, yüksek hızlara çıkabilmek için kontrol açısı değişiminden dolayı moment dalgalanması artmaktadır. Şekil 3.77’den motorun 650rpm hızında stator terminal geriliminin tepe değerinin 63 V değerlerine çıktığı, 3500rpm ve sonraki hızlarda alan zayıflatma bölgesine girdiği için yaklaşık 280 V değerlerinde kaldığı görülmektedir.



Şekil 3.76. Önerilen motorun farklı hızlardaki moment dalgalanması grafiği



Şekil 3.77. Önerilen motorun farklı hızlarda stator terminal geriliminin değişimi

3.15. Önerilen Motorun Kayıplarının İncelenmesi

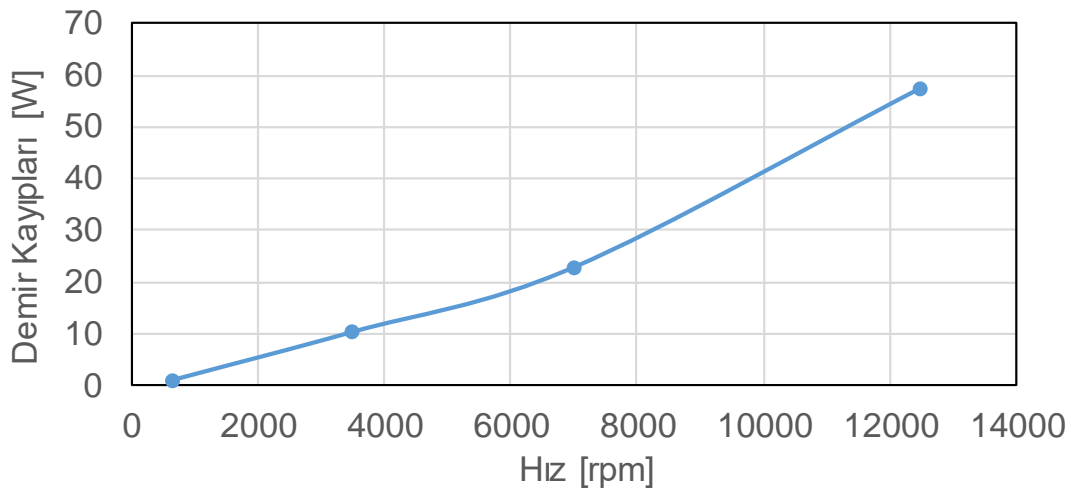
Çalışmanın bu bölümünde, yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda final tasarımı çıkan motorun bakır kayıpları, demir kayıpları ve deri etkisi kayıpları incelenecektir.

3.15.1. Bakır kayıplarının incelenmesi

Mıknatıs destekli senkron relüktans motorun en büyük avantajlarından bir tanesi alan zayıflatma bölgesinde mıknatısın alan zayıflatmaya yardımcı olmasıdır. Klasik gömülü mıknatıslı motorlarda, yüksek hıza çıkabilmek için alan zayıflatma bölgesinde mıknatısa ters yönde akım artırılarak mıknatıs akısı zayıflatılmakta ve stator gerilimi düşürülmektedir. Mıknatıs destekli senkron relüktans motorlarda ise mıknatıs akısı alan zayıflatma işlemine yardımcı olmaktadır. Yüksek hızlarda akım arttırılmak yerine kontrol açısı değiştirilerek akım I_q akımına devredilmektedir. Bu sayede yüksek hızlara çıkarken meydana gelecek olan akım artmasından kaynaklı bakır kayıplarının artması sorunu bu motorlarda yaşanmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada önerilen mıknatıs destekli senkron relüktans motorun bakır kayıpları tüm hız bölgelerinde eşit ve 18W değerindedir.

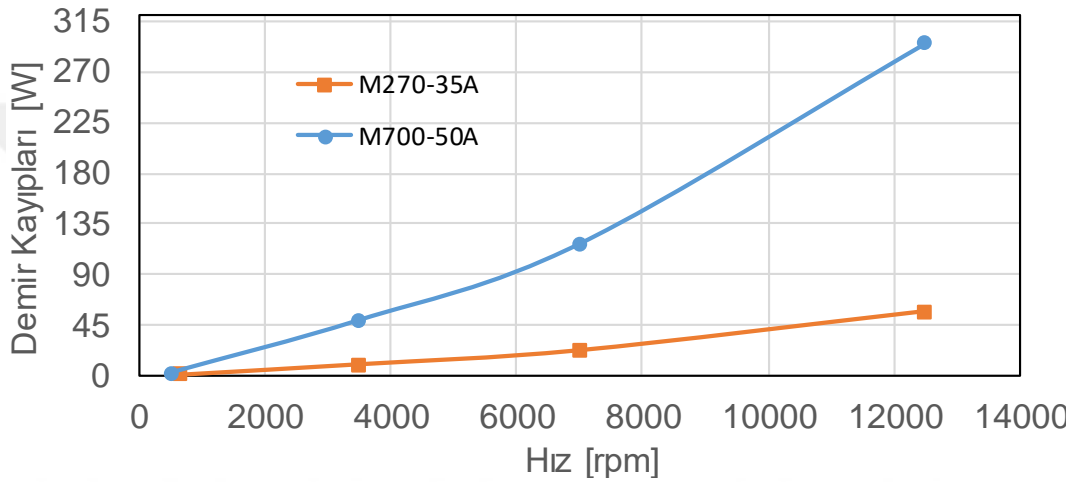
3.15.2. Demir kayıplarının incelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde önerilen motorun kayıplarının en önemli bölümünü oluşturan demir kayıpları incelenecektir. Şekil 3.78’de demir kayıplarının hıza bağlı değişimi verilmiştir.



Şekil 3.78. Demir kaybı-hız grafiği

Şekilden de görüldüğü gibi hız arttıkça frekansların artmasından dolayı demir kayıpları büyük oranda artmıştır. Demir kayıplarında kullanılan sac malzemenin kalınlığı ve manyetik özelliği büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle bu çalışmada kullanılan sac malzeme türünün kayıplara etkisi de incelenmiştir. M270-35A tipi silisli sac ile M700-50A tipi silisli sac malzemesi için demir kaybı analizi yapılmıştır. Şekil 3.79’de malzeme türüne göre demir kaybı değişiminin grafiği verilmiştir. Şekilden de görüldüğü kullanılan malzemenin kalitesi ve kalınlığı değişikçe demir kayıpları ciddi derecede değişmektedir.

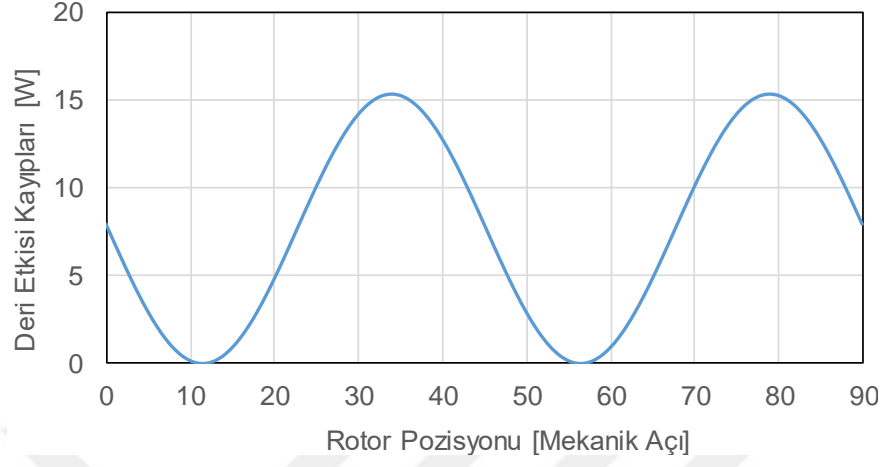


Şekil 3.79. Malzeme türünün demir kaybına etkisi

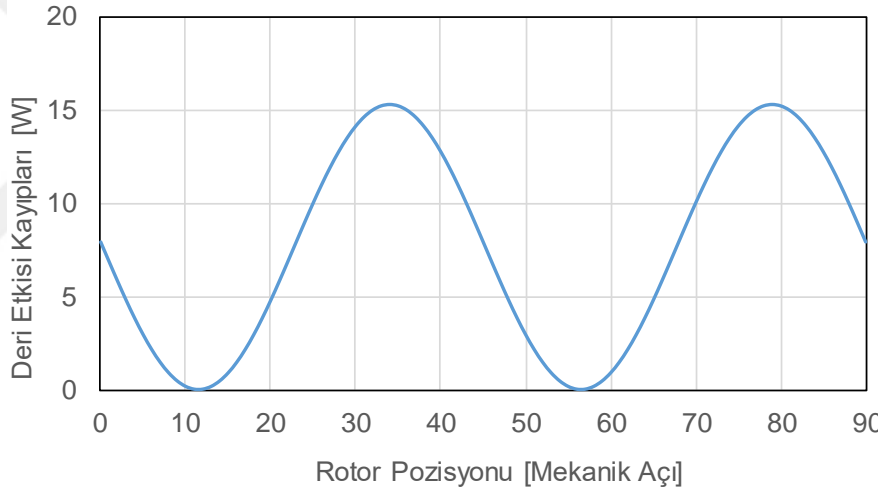
3.15.3. Deri etkisinin incelenmesi

Deri etkisi yüksek frekanslarda ve hızlarda motorun kayıplarını etkileyen önemli etkenlerdendir. Bu çalışmada önerilen motor 650-14000rpm gibi geniş bir hız aralığında çalıştığı için deri etkisi kayıpları incelenmektedir. Şekil 3.80 , Şekil 3.81 ve Şekil 3.82’de sırasıyla 650rpm,3500rpm ve 14000rpm hızları için deri etkisi kayıplarının sonuçları gösterilmektedir. Tüm hızlar için kayıpların ortalama değerinin 7,5 W olduğu görülmektedir. Şekil 3.83 , Şekil 3.84 ve Şekil 3.85’de sırasıyla 650rpm,3500rpm ve 14000rpm hızları için akım yoğunluğu gösterilmektedir. Tüm hızlar için akım yoğunluğu değerleri incelendiğinde sargılardaki akım yoğunluğu değerlerinin genel olarak yaklaşık 7,5 A/mm² olduğu görülmektedir. Sadece 14000rpm hızından sargıların stator dışının alt bölgesine yakın kısımlarında küçük bölgelerde akım yoğunluğunun 11 A/mm² değerine yükseldiği görülmektedir. Deri etkisi kayıpları incelendiğinde, önerilen motorun yüksek frekanslarda akımın tel çapının

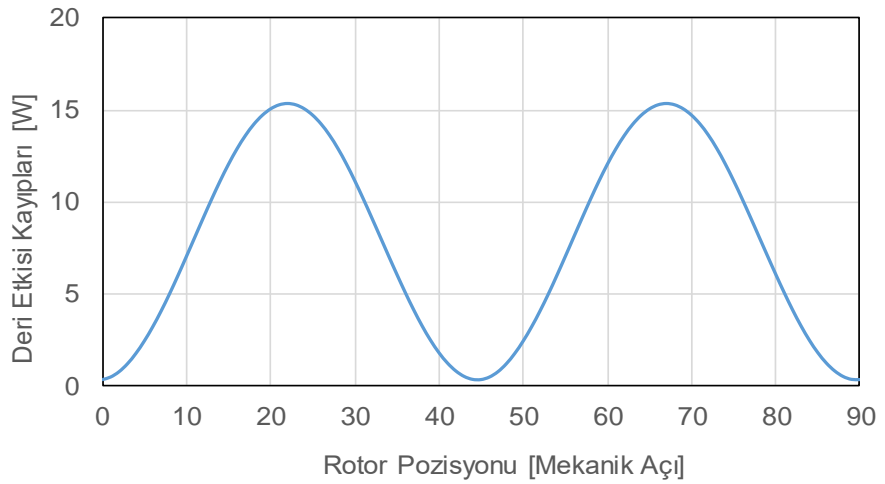
yüzeyine doğru akma eğilimi göstermesinden kaynaklık deri etkisi kayıplarından büyük oranda etkilenmediği görülmektedir.



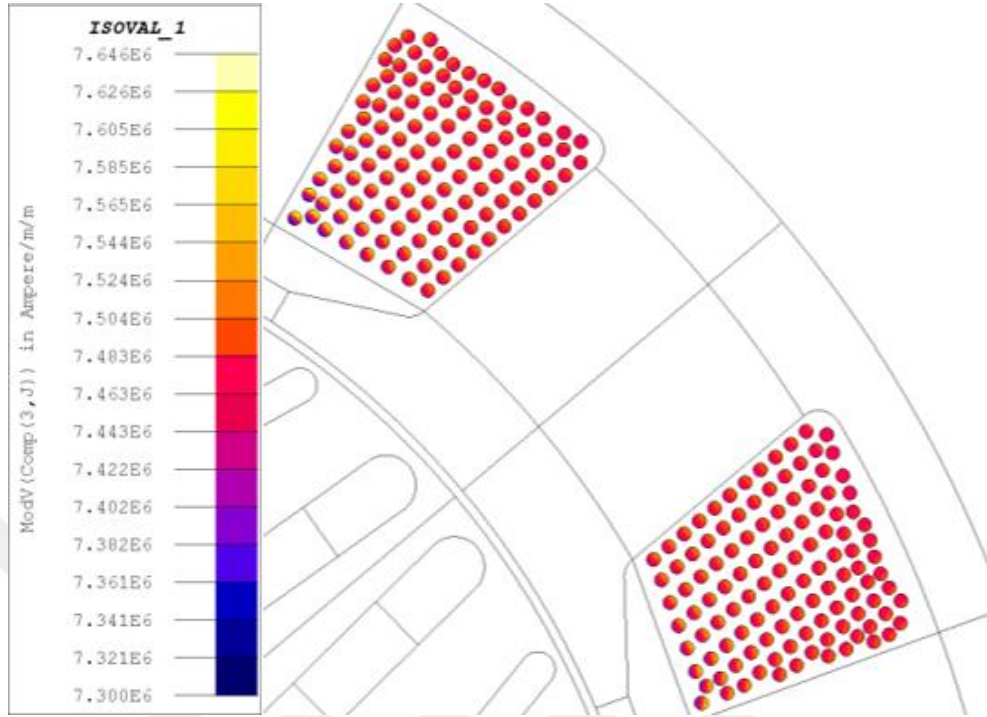
Şekil 3.80. Deri etkisi kayıplarının değişimi (@650rpm)



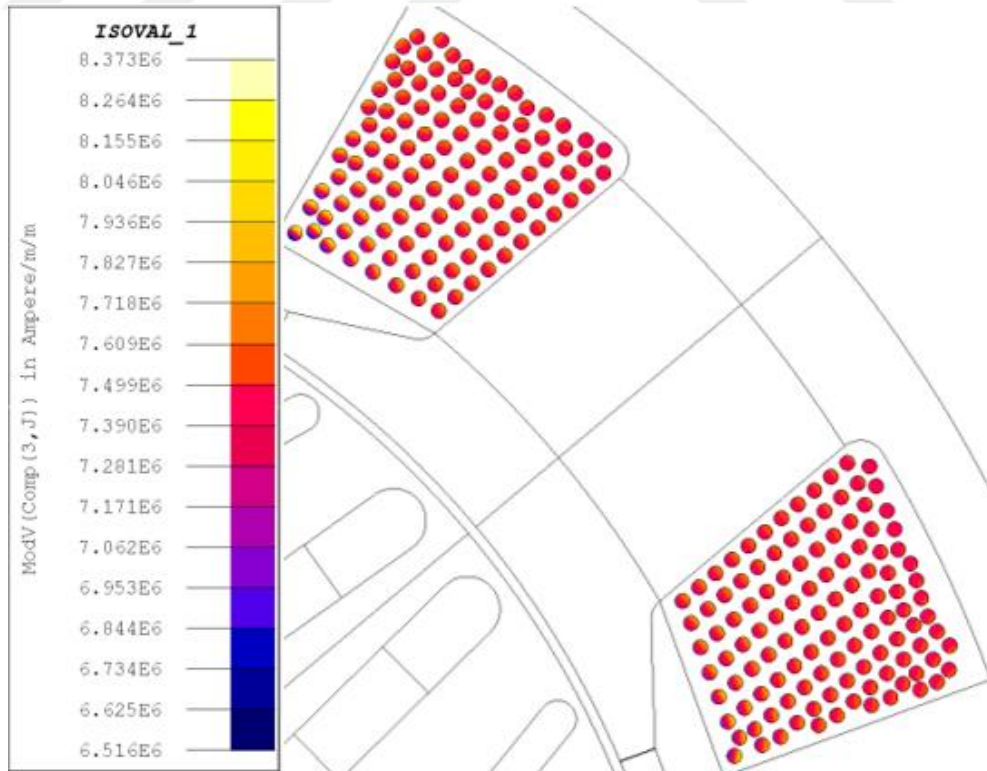
Şekil 3.81. Deri etkisi kayıplarının değişimi (@3500rpm)



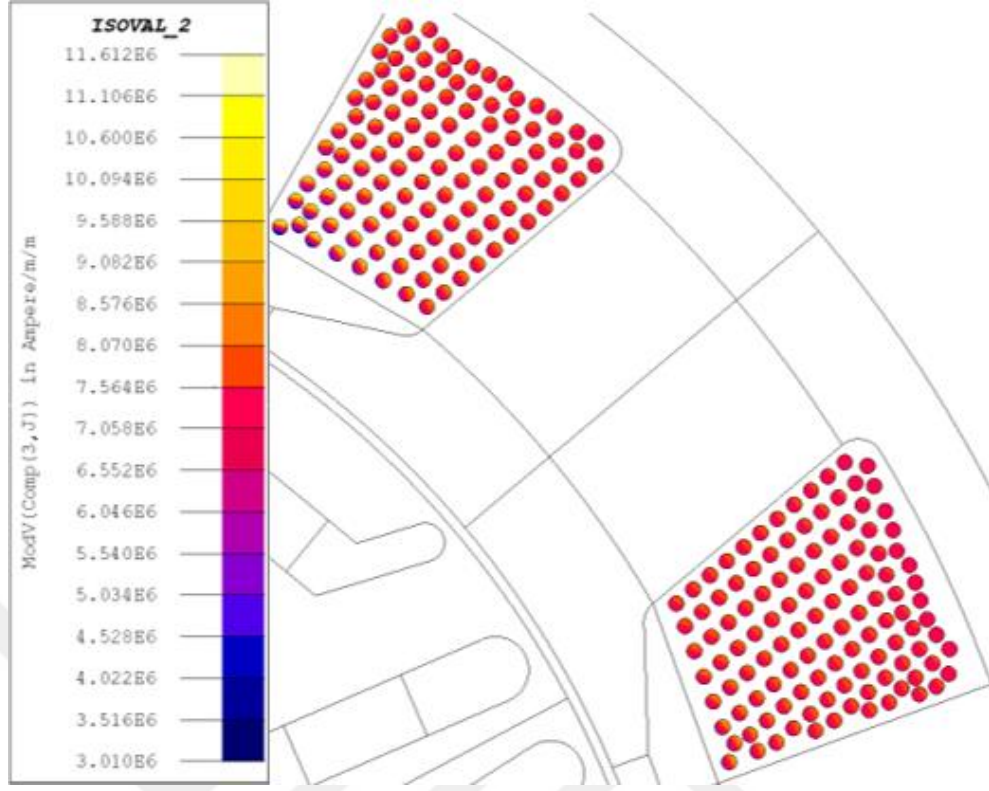
Şekil 3.82. Deri etkisi kayıplarının değişimi (@14000rpm)



Şekil 3.83. Deri etkisi analizi yapılmış modelin SEY akım yoğunluğu görünümü(@650rpm)



Şekil 3.84. Deri etkisi analizi yapılmış modelin SEY akım yoğunluğu görünümü(@3500rpm)

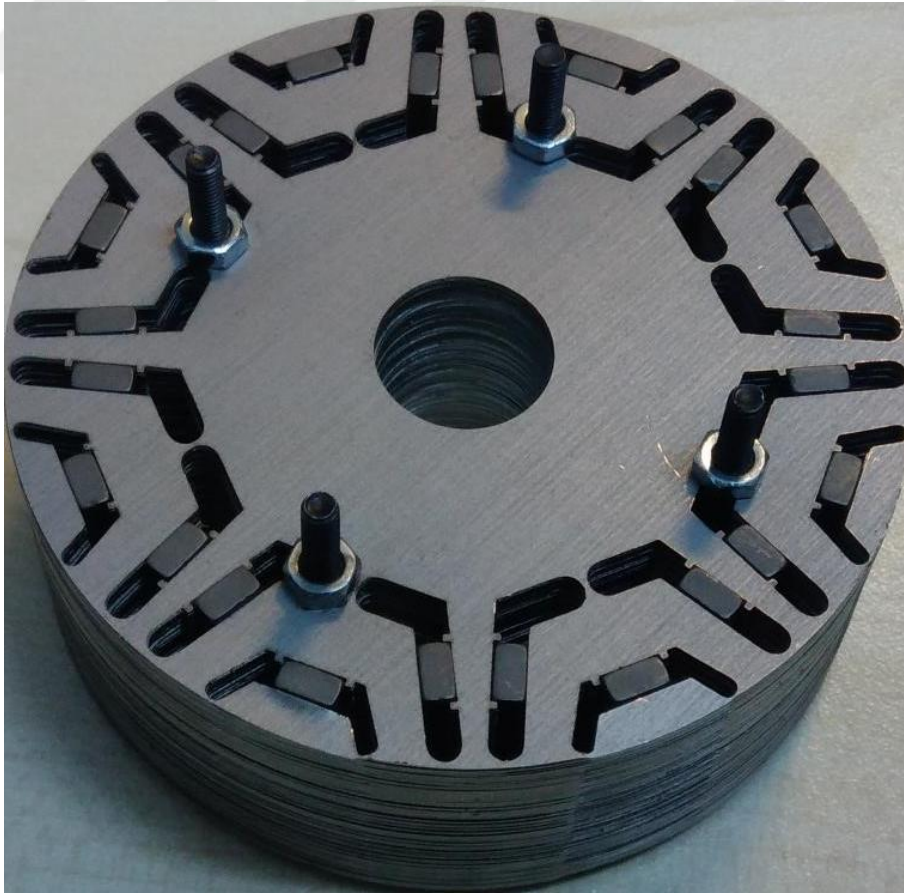


Şekil 3.85. Deri etkisi analizi yapılmış modelin SEY akım yoğunluğu görünümü(@14000rpm)

4. ÖNERİLEN MOTORUN ÜRETİMİ VE DOĞRULANMASI

4.1. Önerilen Motorun Üretimi

Yapılan tasarım ve optimizasyon çalışmaları sonucunda belirlenen boyutlara ve parametreler göre son tasarım ortaya çıkmış bulunmaktadır. Modeli belirlenen tasarımın rotor ve statorunun laminasyonu lazer kesim cihazında kesilerek sac laminasyonlar elde edilmiştir. Elde edilen laminasyonlar paketleme işlemine tabi tutularak toplanmıştır. Rotor grubu toplandıktan sonra içindeki akı bariyerlerine tasarımda belirlenen bölgelere mıknatıslar yerleştirilmiştir. Paketlenen stator grubu da sargı işleminin yapılmasından sonra son halini almıştır. Şekil 4.1’de paketlenen rotor grubu görülmektedir. Şekil 4.2’de paketlenen ve sargı oluklarına sargıları yerleştirilmiş stator grubu görülmektedir. Şekil 4.3’de stator ve rotorun birleştirilmesiyle oluşturulan motor prototipi görülmektedir.



Şekil 4.1. Üretilen rotor prototipi



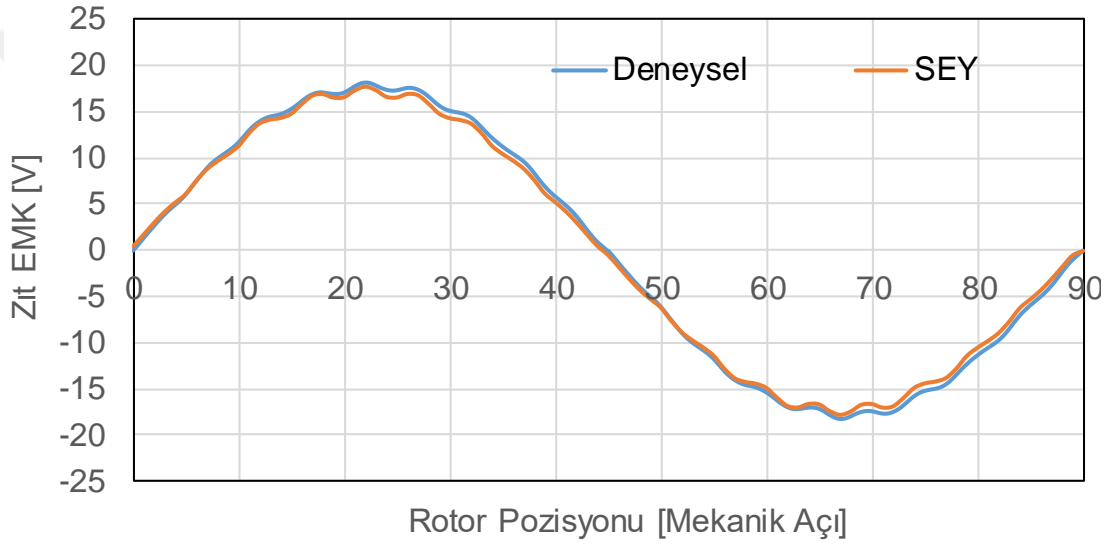
Şekil 4.2. Üretilen stator prototipi



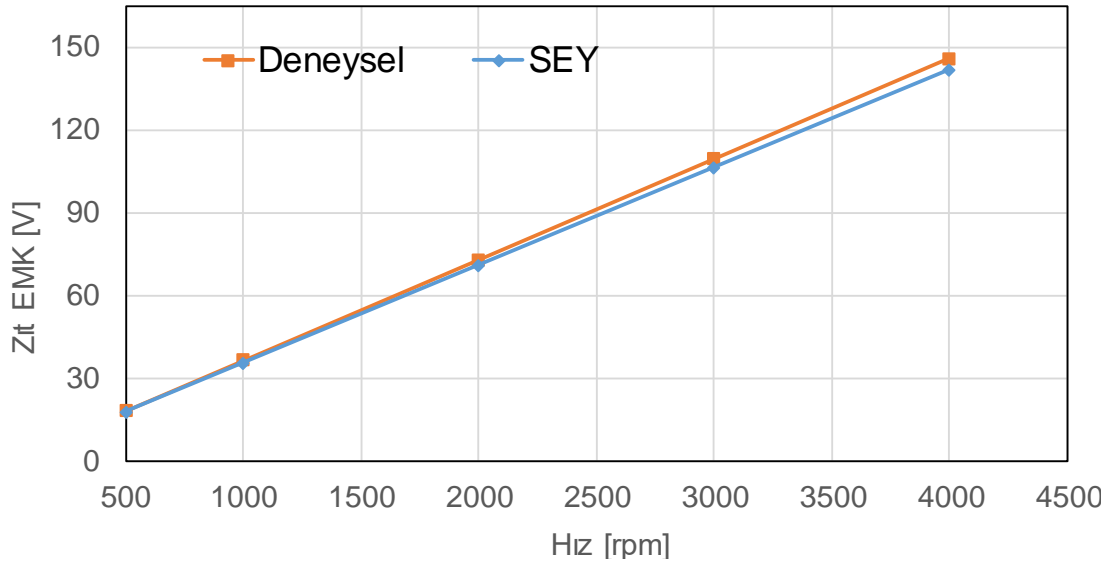
Şekil 4.3. Üretilen motor prototipi

4.2. Prototip Motor Doğrulama Çalışmaları

Şekil 4.3’de prototipi gösterilen motorun yüklü ve yüksüz durum için doğrulama testleri yapılacaktır. İlk olarak motor yüksüz durum testi için motor dışardan tahrik edilerek 500rpm hızında zıt EMK dalga şekli osiloskop ile ölçülmüştür. Şekil 4.4’de analiz ile elde edilmiş 500rpm hızındaki zıt EMK dalga şekli ile SEY ile elde edilmiş 500rpm hızındaki zıt EMK dalga şekillerinin karşılaştırılması verilmiştir. Prototip ile analiz zıt EMK sonuçları arasında %2,71 hata hesaplanmaktadır. Şekil 4.5’de zıt EMK geriliminin hıza göre değişimi analiz ve deneysel verilerin karşılaştırılması olarak verilmiştir.

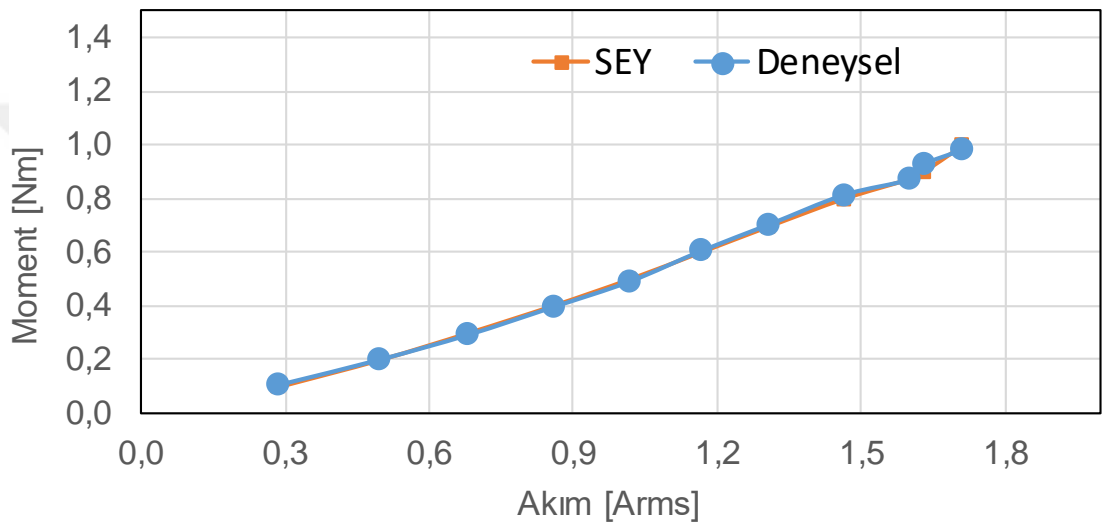


Şekil 4.4. Zıt EMK dalga şekli deneysel ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması (@500rpm)



Şekil 4.5. Deneysel ve analiz Zıt EMK gerilimlerinin hıza göre değişim grafiği

Motor yüklü durum testleri için motor test sistemi düzeneğinde yükleme testleri yapılmıştır. Şekil 4.7’de motor test sistemi gösterilmektedir. Yükleme için kullanılan test sistemi 2 tane 3 faz analizör ve 1 tane tek faz analizör olmak üzere 3 analizörden oluşmaktadır. Test sistemi üzerinde bulunan karşıt motor ile istenilen moment değerleri için yükleme testleri yapılabilmektedir. Sistemde bulunan 3 faz analizörler sayesinde motor giriş ve çıkış akım, gerilim değerleri ölçülebilmektedir. Bu sayede motor verimi elde edilebilmektedir. Şekil 4.6’da analiz ve deneysel olarak moment-akım grafiğinin karşılaştırması verilmiştir.



Şekil 4.6. Deneysel ve analiz moment-akım grafiği karşılaştırılması



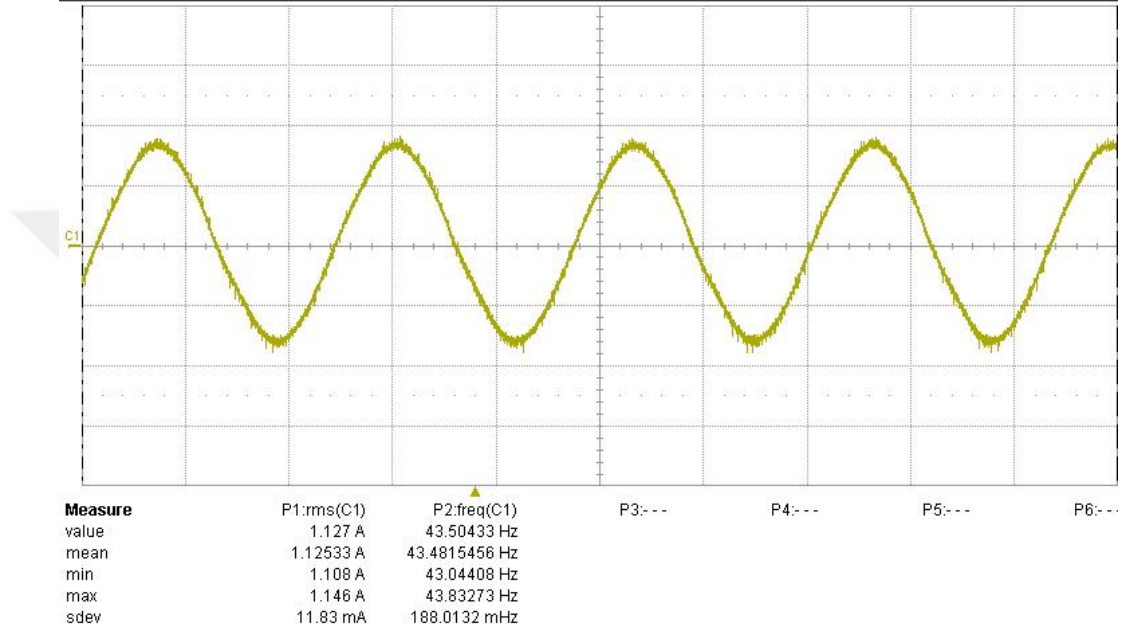
Şekil 4.7. Motor test sistemi

Tablo 4.1’de motor yüklü durum test sonuçları gösterilmektedir. Tablo 4.1’ de motor tasarım kriterlerinde moment ve akım değerleri incelendiğinde 650rpm hızda 0,874Nm moment değerinde motorun çektiği akımın etkin değerinin 1,56 A olduğu görülmektedir. Prototip test sonuçları incelendiğinde 0,874Nm moment değeri için motorun çektiği akımın etkin değerinin 1,602 A olduğu görülmektedir. Anma değerinde prototip motorun çektiği akım ile SEY analizindeki akım değeri karşılaştırıldığında %2,62’lik bir hata payı görülmektedir. Bu değer prototip için kabul edilebilir sınırlar içerisindedir.

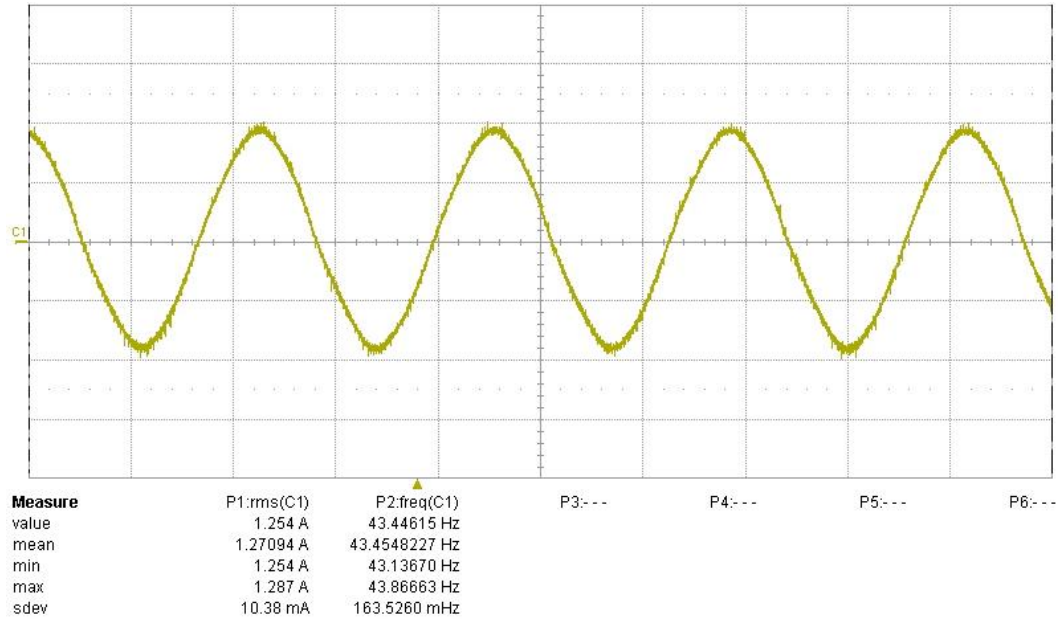
Tablo 4.1. Prototip motor yüklü durum test sonuçları

Moment [Nm]	Hız [rpm]	Akım [A _{etkin}]	Giriş Gücü [W]	Çıkış Gücü [W]	Verim [%]
0,098	650	0,284	6,67	10,87	61,4
0,198	650	0,495	13,49	19,2	70,27
0,298	650	0,68	20,36	27,81	73,24
0,4	650	0,857	27,3	36,91	73,99
0,499	650	1,018	34,1	46,35	73,55
0,599	650	1,165	40,94	55,98	73,18
0,697	650	1,308	47,58	65,65	72,47
0,799	650	1,463	54,41	76,27	71,34
0,874	650	1,602	59,3	85,01	69,76
0,898	650	1,63	61,22	86,32	70,93
0,998	650	1,759	68,14	96,56	70,56
1,096	650	1,884	74,79	107,74	69,35

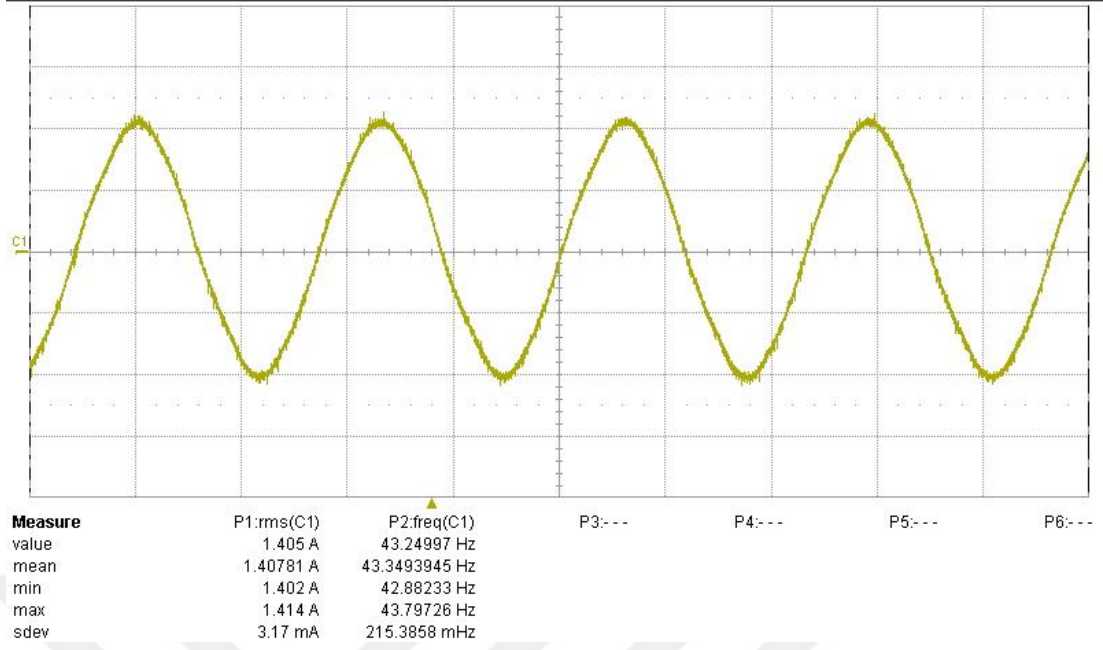
Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de sırasıyla 0,6Nm, 0,7Nm, 0,8Nm, 0,874Nm moment değerleri için 650 rpm hızda motor faz akımlarının dalga şeklinin görüntüsü elde edilmiştir. Dalga şekilleri motor yükleme testi sırasında akım probu yardımıyla motor fazından osiloskop yardımı ile elde edilmiştir. Akım değerlerinin sinüs forma yakın olduğu dalga şekillerinden de görülmektedir. Osiloskop ile ölçülen akım değerlerinin test sistemi ile ölçülen akım değerleriyle de uyduğu görülmektedir.



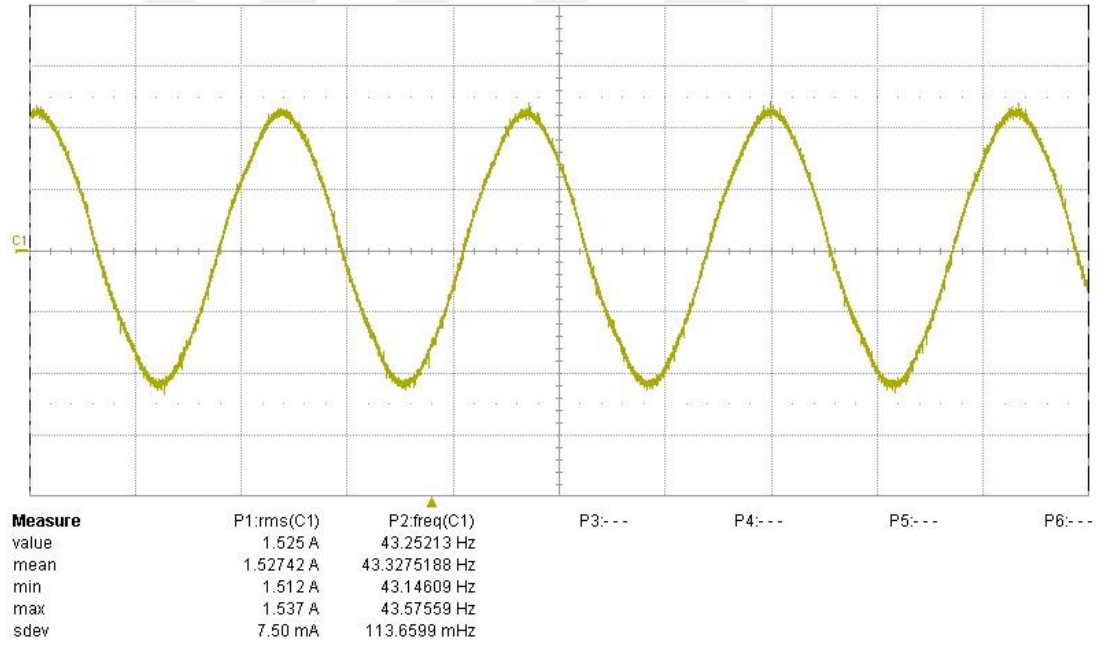
Şekil 4.8. Prototip yükleme testlerinde elde edilen faz akımı dalga şekli [0,6 Nm]



Şekil 4.9. Prototip yükleme testlerinde elde edilen faz akımı dalga şekli [0,7 Nm]



Şekil 4.10. Prototip yükleme testlerinde elde edilen faz akımı dalga şekli [0,8 Nm]



Şekil 4.11. Prototip yükleme testlerinde elde edilen faz akımı dalga şekli [0,874 Nm]

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında çamaşır makinası uygulaması için MDSRM tasarımı yapılması planlanmıştır. Tasarım için ilk olarak tasarım kriterleri belirlenmiştir. 12,5 çevrim oranına sahip kayış kasnaklı çamaşır makinası için 650 rpm yıkama hızında 0,87Nm moment, 12500 rpm sıkma hızında 0,1Nm moment kapasitesine sahip motor hedeflenmiştir. Beyaz eşya uygulamalarında yüksek adetli üretimler söz konusu olduğu için serim üretim aşamasında kolaylık sağlaması için konsantre sargılı yapı tercih edilmiştir. Motor boyutları makine içinde kısıtlara ve mevcutta kullanılan motorun boyutuyla kısıtlı tutulmuştur. Ön boyutlandırması yapılan motorun aktif malzemesi, paket boyu, çapı, sarım sayısı ve akım sayısı parametreleri sabit tutularak, kritik rotor tasarım parametreleri, kontrol açısı ve stator oluk açıklığı üzerinde optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon için FLUX 2D SEY programı kullanılmıştır. SEY ile modellenen motor için etkisi görülmek istenen boyutlar üzerinde parametrik analizi yapılmıştır. Rotorda akı bariyerlerinin sayısı ve mıknatıs yerleşiminin etkisi incelenmiştir. Bariyer sayısı için tek bariyerli yapı ve iki bariyerli yapı incelenmiştir. Tek bariyerli yapı ile iki bariyerli yapıda aynı miktarda aktif malzeme kullanıldığı halde tek bariyerli yapının relüktans momentinin düşük olmasından dolayı ortalama moment değerinin iki bariyerli yapıdan düşük olduğu görülmüştür. Bu nedenle iki bariyerli yapı ile devam edilmiştir. İki bariyerli yapı üzerinde mıknatısın akı bariyerlerinin ortasına ve yan köşelerine yerleştirilmesi durumu için SEY analizi ile inceleme yapılmıştır. İki modelde motor performansları birbirine yakın olduğu halde mıknatısları bariyer ortasına yerleştirilmiş modelde d eksen boyunca bariyerler arasında kalan bölgenin doyumunun artmasından dolayı d eksen endüktansını azaltma riskine sahip olması ve mıknatıs boyutlandırmasında sağlayacağı tasarım esnekliğinden dolayı mıknatısların akı bariyerlerinin yan köşelerine yerleştirildiği model tercih edilmiştir.

Model belirlendikten sonra rotor üzerinde akı bariyerleri ve mıknatıs için optimizasyon çalışmaları tamamlanmıştır. Çalışmalar sırasında köprü ve kiriş kalınlıklarının artmasının motor performansını ciddi derecede kötü etkilediği

görülmüştür. Ancak bu kalınlıkların rotorun mekanik dayanımını sağlaması nedeniyle bu kalınlıklar güvenli bölgede kalarak seçim yapılmıştır. Kontrol açısı ve oluk açıklığı parametreleri için motor performansını iyileştirmek özellikle de moment dalgalanmasını düşürmek için çalışmalar yapılmıştır. Bu parametreler için moment dalgalanmasını düşürecek ancak çıkış momentinden de kabul edilebilir düzeyde taviz verilecek şekilde seçim yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda prototip üretimi için kullanılacak model belirlenmiştir. Bu modelin geniş hız aralığında çalışma durumu incelenmiş ve motorun 650-12500rpm hızları arasından geniş bir aralıkta çalışabildiği SEY analizi ile görülmüştür. Önerilen model ile önerilen modelin mıknatıs miktarı %40 azaltılmış durumdaki model için geniş hız aralığında çalışma performansı karşılaştırılmıştır. Mıknatıs miktarı azaldıkça motorun çıkabildiği en yüksek hız değerinin azaldığı ve stator geriliminin de arttığı görülmüştür.

Bu çalışmalardan sonra önerilen motor için bakır kayıpları, demir kayıplar ve deri etkisi kayıpları incelenmiştir. MDSRM' da mıknatısın q ekseninde konumlanmasından dolayı alan zayıflatma bölgesinde mıknatısı zayıflatmak için akım artırılmamaktadır. Bu sayede yüksek hızlarda akım artmamakta ve bakır kayıpları sabit kalmaktadır. Demir kayıpları ise hızın artmasına bağlı olarak frekansın artmasından dolayı yüksek oranda artmaktadır. Deri etkisi kayıpları 650rpm, 3500rpm ve 14000rpm hızları için incelenmiştir. Bu hızlar için sargıların genelinde akım yoğunluğu çok değişmemekle birlikte özellikle 14000rpm hızında stator oluk açıklığına yakın bölgedeki sargılarda akım yoğunluğunun arttığı da görülmektedir.

Tasarım çalışmaları sonucunda belirlenen son tasarım için prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Yüklü ve yüksüz durum için testler yapılmıştır. Yüksüz durumda prototip ile SEY modeli zıt EMK gerilimi karşılaştırıldığında %2,71 hata olduğu görülmektedir. Bu değer prototip için kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Motorun yüklü durum testleri de gerçekleştirilerek SEY analizi ile elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yüklü durum testlerinin SEY analizi ve prototip sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür.

Tez çalışması kapsamında tasarımı yapılan ve üretilen motorun testleri sonucunda performans açısından çamaşır makinası uygulaması için gerekli isterleri sağladığı ve çamaşır makinası kullanılabilecek ciddi bir motor alternatifi olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Kostko J.K., Polyphase Reaction Synchronous Motors, *A.I.E.E. Journals*, 1923, **42**(11), 1162-1168.
- [2] Bianchi N., Bolognani S., Bon D., Pre M., Torque Harmonic Compensation in a Synchronous Reluctance Motor, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, **23**(2), 466-473.
- [3] Bianchi N., Bolognani S., Bon D., Pre M., Rotor Flux Barrier Design for Torque Ripple Reduction in Synchronous Reluctance Motors, *IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, Florida, ABD, 8-12 Ekim 2006.
- [4] Bianchi N., Bolognani S., Bon D., Pre M., Rotor Flux-Barrier Design for Torque Ripple Reduction in Synchronous Reluctance and PM-Assisted Synchronous Reluctance Motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, **45**(3), 921-928.
- [5] Staton D.A., Miller T.J.E., Wood S.E., Maximising the Saliency Ratio of the Synchronous Reluctance Machine, *IEE Proceedings B Electric Power Applications*, 1993, **140**(4), 249-259.
- [6] Alotto P., Barcaro M., Bianchi N., Guarnieri M., Optimization of Interior PM Motors With Machaon Rotor Flux Barriers, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, **47**(5), 958-961.
- [7] Ferrari M., Bianchi N., Doria A., Fornasiero E., Design of Synchronous Reluctance Motor for Hybrid Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, **51**(4), 3030-3040.
- [8] Sanada M., Hiramoto K., Morimoto S., Takeda Y., Torque Ripple Improvement for Synchronous Reluctance Motor Using Asymmetric Flux Barrier Arrangement, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, **40**(4), 1076-1082.
- [9] Murakami H., Honda Y., Kiriya H., Morimoto S., Takeda Y., The Performance Comparison of SPMSM, IPMSM and SynRM in Use as Air-Conditioning Compressor, *Industry Applications Conference*, 1999, **2**(2), 840-845.
- [10] Morimoto S., Sanada M., Takeda Y., Performance of PM Assisted Synchronous Reluctance Motor for High Efficiency and Wide Constant Power Operation, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2001, **37**(5), 1234-1240.

- [11] Obata M., Morimoto S., Sanada M., Inoue Y., Characteristic of PMASynRM with Ferrite Magnets for EV/HEV Applications, *15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sapporo, Japonya, 21-24 Ekim 2012.
- [12] Matsuo T., Lipo T.A., Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1994, **9**(2), 359-365.
- [13] Fratta A., Troglia G.P., Vagati A., Villata F., Evaluation of Torque Ripple in High Performance Synchronous Reluctance Machines, *Conference Record of Industry Applications Society Annual Meeting*, Toronto, Kanada, 2-8 Ekim 1993.
- [14] Vagati A., Pastorelli M., Franceschini G., Petrache S.C., Design of Low Torque Ripple Synchronous Reluctance Motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1998, **34**(4), 758-765.
- [15] Armando E., Guglielmi P., Pastorelli M., Pellegrino G., Vagati A., Performance of IPM-PMASR Motors With Ferrite Injection for Home Appliance Washing Machine, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Edmonton, Kanada, 5-9 Ekim 2008.
- [16] Miller T.J.E., Design of a Synchronous Reluctance Machine Drive, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1991, **27**(4), 741-749.
- [17] Niazi P., Toliyat H.A., Design of a Low-Cost Concentric Winding Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Drive, *Industry Applications Conference Fourtieth IAS Annual Meeting*, Hong Kong, Çin, 2-6 Ekim 2005.
- [18] Baek J., Rahimian M.M., Toliyat H.A., Optimal Design and Comparison of Stator Winding Configurations in Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Generator, *International Electric Machines and Drives Conference*, Miami, ABD, 3-6 Mayıs 2009.
- [19] Pellegrino G., Armando E., Guglielmi P., Vagati A., A 250kW Transverse-Laminated Synchronous Reluctance Motor, *13th European Conference on Power Electronics and Applications*, Barselona, İspanya, 8-10 Eylül 2009.
- [20] Yu M., Analysis of Hybrid Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor for Compressor, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Busan, Güney Kore, 26-29 Ekim 2013.
- [21] Spargo C.M., Mecrow B.C., Widmer J.D., Higher Pole Number Synchronous Reluctance Machines with Fractional Slot Concentrated Windings, *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, Manchester, İngiltere, 8-10 Nisan 2014.
- [22] Park J., Seo J., Cha C., Lee J., Characteristics Analysis of 15kW Industrial Machine Using Synchronous Reluctance Motor for High Efficiency, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Busan, Güney Kore, 26-29 Ekim 2013.

- [23] Cruickshank A.J.O., Menzies R.W., Anderson, A.F., Axially Laminated Anisotropic Rotors for Reluctance Motors. *I.E.E. Proceedings*, 1966, **113**(12), 2058-2060.
- [24] Taghavi S., Pillay P., A Comparative Study of Synchronous Reluctance Machine Performance with Different Pole Numbers for Automotive Applications, *40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dallas, ABD, 29 Ekim - 1 Kasım 2014.
- [25] Palmieri M., Perta M., Cupertino F., Design of a 50.000 rpm Synchronous Reluctance Machine for an Aeronautic Diesel Engine Compressor, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Pittsburgh, ABD, 14-18 Eylül 2014.
- [26] Deshpande Y., Toliyat H.A., Design of an Outer Rotor Ferrite Assisted Synchronous Reluctance Machine (Fa-SynRM) for Electric Two Wheeler Application, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Pittsburgh, ABD, 14-18 Eylül 2014.
- [27] Guglielmi P., Pastorelli M., Pellegrino G., Vagati A., Position Sensorless Control of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, **40**(2), 615-622.
- [28] De Kock H.W., Kamper M.J., Dynamic Control of the Permanent Magnet Assisted Reluctance Synchronous Machine, *IET Electric Power Application*, 2007, **1**(2), 153-160.
- [29] Niazi P., Toliyat H.A., Goodarzi A., Robust Maximum Torque per Ampere (MTPA) Control of PM-Assisted SynRM for Traction Applications, *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 2007, **56**(4), 1538-1545.
- [30] Dong J., Zhengming Z., Yao D., Wei G., Position Sensorless Direct Torque Control of Synchronous Reluctance with Permanent Magnet Motor, *5th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Şangay, Çin, 14-16 Ağustos 2006.
- [31] Inoue Y., Morimoto S., Sanada M., A Novel Control Scheme for Wide Speed Range Operation of Direct Torque Controlled Synchronous Reluctance Motor, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, ABD, 12-16 Eylül 2010.
- [32] Zhang Z., Zhou L., Sensorless Control of a Ferrite PM Assisted-Synchronous Reluctance Machines by Using Sliding Mode Observer and High Frequency Signal Injection, *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 2016, **22**(4), 1392-1215.
- [33] Niazi P., Toliyat H.A., Robust Maximum Torque per Amp (MTPA) Control of PM-Assisted Synchronous Reluctance Motor, *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Dallas, ABD, 19-23 Mart 2006.

- [34] Chuang T., A High-Efficiency PM-Assisted Synchronous Reluctance Motor Drive, *Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Florida, ABD,17-21 Mart 2013.
- [35] Chakali A.K., Toliyat H.A., Abu-Rub H., Observer-Based Sensorless Speed Control of PM-Assisted SynRM for Direct Drive Applications, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Bari, İtalya, 4-7 Temmuz 2010.
- [36] Inoue Y., Morimoto S., Sanada M., A Novel Control Scheme for Maximum Power Operation of Synchronous Reluctance Motors Including Maximum Torque Per Flux Control, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, **47**(1), 115-121.
- [37] Bolognani S., Peretti L., Zigliotto M., Online MTPA Control Strategy for DTC Synchronous-Reluctance Motor Drives, *IEEE Transactions On Power Electronics*,2011, **26**(1), 20-28.
- [38] Kolehmainen J., Synchronous Reluctance Motor With Form Blocked Rotor, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 2010, **25**(2), 450-456.
- [39] Niazi P., Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Design and Performance Improvement, Doktora Tezi, Teksas Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Teksas, 2005.
- [40] Lipo T.A., Vagati A., Malesani L., Fukao T., Synchronous Reluctance Solution a New Alternative AC Drives, *20th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Bologna, İtalya, 5-9 Eylül 1994.
- [41] Dulanto A.O., Design of a Synchronous Reluctance Motor Assisted with Permanent Magnets for Pump Applications, Yüksek Lisans Tezi, KTH Royal Teknoloji Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Stockholm, 2015.
- [42] Ometto A., Parassiliti F., Vilani M., Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motors for Electric Vehicle Applications, *Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, Helsinki, Finlandiya, 15-17 Eylül 2015.
- [43] Matsuo T., Lipo T.A., Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1994, **9**(2), 359-365.
- [44] Hargreaves P.A., Mecrow B.C., Hall R., Calculation of Iron Loss in Electrical Generators Using Finite Element Analysis. *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2012, **48**(5), 1460-1466.
- [45] Eggers D., Steentjes S., Hameyer K., Advanced Iron Loss Estimation for Nonlinear Material Behavior, *IEEE Transactions On Magnetics*, 2012, **48**(11), 3021-3024.
- [46] Huang H., Hu Y., Xiao Y., Lyu H., Research of Parameters and Antidemagnetization of Rare-Earth-Less Permanent Magnet-Assisted

Synchronous Reluctance Motor, *IEEE Transactions On Magnetics*, 2015, **51**(11), 8112504.

- [47] Chakali A.K., Sensorless Speed Control Of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor(PMA-SYNRM), Yüksek Lisans Tezi, Teksas Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Teksas, 2009.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Payza O., Demir Y., Aydın M., Investigation of Losses for a Concentrated Winding High Speed Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor for Washing Machine Application, *IEEE Transactions On Magnetics*, DOI: 10.1109/TMAG.2018.2848881.



ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Malatya’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul’da, lise öğrenimini Malatya’da tamamladı. 2011 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü’nden 2015 yılında mezun oldu. 2015 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2015 yılından beri ARÇELİK Merkez Ar-Ge Güç Elektronikleri Bölümü’nde Araştırma ve Geliştirme Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

