

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SENKRON RELÜKTANS MOTORDA MOMENT
DALGALANMASININ AZALTILMASI

Burak SOLAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı

Danışman
Doç. Dr. Yasemin ÖNER

Temmuz, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SENKRON RELÜKTANS MOTORDA MOMENT
DALGALANMASININ AZALTILMASI

Burak SOLAK tarafından hazırlanan tez çalışması 13.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Yasemin Öner
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Yasemin ÖNER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim ŞENOL, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

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

Danışmanım Doç. Dr. Yasemin ÖNER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Senkron Relüktans Motorun Moment Dalgalanmasının Azaltılması başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Burak SOLAK

İmza



Aileme...

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitim süresince tecrübeleriyle bana yol gösteren değerli danışmanım Doç. Dr. Yasemin ÖNER'e saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam kapsamındaki prototipleme faaliyetlerinde gerekli desteği veren WAT MOTOR SAN. ve TİC. A.Ş. 'ye ve desteklerinden ötürü Erman Sayar'a, Erhan Kara'ya ve Ünal Gül'e teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimime dek bir an olsun desteğini esirgemeyen çok değerli annem Şerife SOLAK'a , babam Ali SOLAK'a ve bu süreçte her daim yanımda olan sevgilim Güzin BAYRAKTAR'a sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Burak SOLAK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Taraması.....	1
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı.....	12
1.3 Hipotez	12
2 SENKRON RELÜKTANS MOTOR	14
2.1 SynRM Çalışma Prensibi.....	17
2.3 SynRM Farklı Rotor Yapıları	18
2.3.1 Çıkık Kutuplu Rotor Yapısı	18
2.3.2 Eksenel Laminasyonlu [ALA] Rotor yapısı.....	19
2.3.3 Enine Laminasyonlu Rotor Yapısı.....	20
2.3.4 Enine ve Eksenel Laminasyonlu Rotor Yapılarının Karşılaştırılması ..	20
2.4 Senkron Relüktans Motor Matematiksel Modeli:	22
2.4.1 SynRM d-q koordinat sisteminde elektromanyetik tork	25
2.4.2 Moment/Güç Oranı ve Güç Katsayısı	26
3 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	29
3.1 Maxwell Denklemleri.....	29
3.2 Sınır Koşulları	30
4 REFERANS MOTORUN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ	31
4.2. Referans Motorun Modellenmesi.....	31
4.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi Analiz Sonuçları.....	34
5 SENKRON RELÜKTANS MOTOR TASARIMI	38
5.1 Bariyer Sayısı ve Şeklinin Belirlenmesi	38
5.1.1 Tek ve Köşeli Bariyerli Rotor Yapısı	39
5.1.2. Tek ve Yuvarlak Bariyerli Rotor Yapısı.....	43
5.1.2. İki ve Köşeli Bariyerli Rotor Yapısı.....	47

5.1.4. İki ve Yuvarlak Bariyerli Rotor Yapısı.....	50
5.1.5 Üç ve Köşeli Bariyerli Rotor Yapısı.....	53
5.1.6. Üç ve Yuvarlak Bariyerli Rotor Yapısı	57
5.1.7. Dört ve Köşeli Bariyerli Rotor Yapısı.....	59
5.1.8. Dört ve Yuvarlak Bariyerli Rotor Yapısı	62
6 KARAR VERİLEN ROTOR YAPISI İÇİN OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI	67
6.1 Optimize Edilen Modelin Rezonans Durumunun İncelenmesi.....	76
6.1.1 Doğal Frekansların Bulunması.....	76
6.1.2 Harmonik Cevap Analizi	78
7 PROTOTİP ÇALIŞMASI	81
7.1 Prototip Motor Test Çalışması	82
8 SONUÇ VE ÖNERİLER	89
KAYNAKÇA	91
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	97

SİMGE LİSTESİ

$\dot{I}_a$	A Fazı Akımı
V_a	A Fazı Gerilimi
θ	Akım Açısı
$\dot{I}_b$	B Fazı Akımı
V_b	B Fazı Gerilimi
$\dot{I}_c$	C Fazı Akımı
V_c	C Fazı Gerilimi
R_{cm}	Çekirdek Kayıpları
L_d/L_q	Çıkıklık Oranı
$\dot{I}_d$	d Eksen Akımı
L_d	d Eksen Endüktansı
X_d	d Eksen Reaktansı
ϵ	Dielektrik Sabiti
E	Elektrik Alan Şiddeti
D	Elektriksel Akı yoğunluğu
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
H	Manyetik Alan Şiddeti
L_m	Manyetizasyon Endüktansı
T_e	Moment
P_1	Motor Kutup Çifti
$\dot{I}_q$	q Eksen Akımı
L_q	q Eksen Endüktansı
X_q	q Eksen Reaktansı
I_s	Stator Akımı
R_s	Stator Sargı Direnci
L_s	Toplam Kaçak Akı Endüktansı
K_w	Yalıtım Oranı

KISALTMA LİSTESİ

AA	Alternatif Akım
ALA	Aksiyal Laminasyon
ASM	Asenkron Motor
DA	Doğru Akım
SynRM	Senkron Relüktans Motor
TLA	Enine Laminasyon



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Kotsko'nun tasarımı [1]	2
Şekil 1.2 Douglas rotor tasarımı [2]	2
Şekil 1.3 Bauer'in sincap kafesli rotor tasarımı [3]	3
Şekil 1.4 Rao rotor tasarımı [9]	4
Şekil 1.5 Machaon laminasyonu ve Romeo & Juliet tipi laminasyonlar [51]	8
Şekil 1.6 Tez çalışmasının kapsamı	12
Şekil 2.1 Elektrik motorlarının sınıflandırılması [52]	14
Şekil 2.2 Bir SynRM'nin iki boyutlu kesiti	16
Şekil 2.3 Manyetik alan (Ψ) ve moment üretim mekanizmasında anizotropik geometri (a) ve izotropik geometri (b) olan bir nesne [50]	17
Şekil 2.4 Çıkık kutuplu klasik rotor tasarımı [43]	18
Şekil 2.5 Dört kutup eksenle lamine edilmiş rotor tasarımı [43]	19
Şekil 2.6 Dört kutup enine lamine edilmiş rotor tasarımı [43]	20
Şekil 2.7 a) Enine laminasyonlu rotor b) Eksenel laminasyonlu rotor [48]	21
Şekil 2.8 Eşdeğer devre modeli [40]	24
Şekil 2.9 d-q koordinat düzleminde elektriksel değerlerin yerleştirilmesi [39,40]	25
Şekil 2.10 Vektör diyagramı [53]	28
Şekil 2.11 Güç faktörü – çıkıklık oranı ilişkisi [50]	28
Şekil 4.1 Referans asenkron motorun modellenmiş geometrisi	32
Şekil 4.2 Modele ait ağ yapısı	33
Şekil 4.3 Referans modele ait manyetik malzeme	33
Şekil 4.4 Motora ait akı yoğunluğu dağılımı	35
Şekil 4.5 Hava akısı normal bileşeni	35
Şekil 4.6 Motorun manyetik akı çizgileri	36
Şekil 4.7 15 kW asenkron motora ait moment-zaman grafiği	37
Şekil 4.8 15 kW asenkron motora ait faz akımları	37
Şekil 5.1 Tek bariyerli yapının 2d görünümü	39
Şekil 5.2 Tek ve köşeli bariyerli yapı için manyetik akı yoğunlukları	40
Şekil 5.3 Tek ve köşeli bariyerli yapı için manyetik akı yolları	40
Şekil 5.4 Tek ve köşeli bariyerli yapı için moment zaman grafiği	41
Şekil 5.5 Hava aralığı akı yoğunlukları	41

Şekil 5.6 d ve q eksen endüktansları	42
Şekil 5.7 Dış kaburga kalınlığının momente olan etkisi.....	43
Şekil 5.8 Tek ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için 2D görünümü	44
Şekil 5.9 Tek ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yoğunlukları	44
Şekil 5.10 Tek ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yolları	45
Şekil 5.11 Tek ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için moment zaman grafiği.....	45
Şekil 5.12 Tek ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için hava aralığı akı yoğunlukları	46
Şekil 5.13 Tek ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için d ve q eksen endüktansları	46
Şekil 5.14 İki ve köşeli bariyerli rotor yapısı için 2D görünümü	47
Şekil 5.15 İki ve köşeli bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yoğunlukları	47
Şekil 5.16 İki ve köşeli bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yolları,	48
Şekil 5.17 İki ve köşeli bariyerli rotor yapısı için moment zaman grafiği.....	48
Şekil 5.18 İki ve köşeli bariyerli rotor yapısı için hava aralığı akı yoğunlukları	49
Şekil 5.19 İki ve köşeli bariyerli rotor yapısı için d ve eksen endüktansları	49
Şekil 5.20 İki ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için 2D görünümü.....	50
Şekil 5.21 İki ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yoğunlukları....	50
Şekil 5.22 İki ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yolları	51
Şekil 5.23 İki ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için moment zaman grafiği	52
Şekil 5.24 İki ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için hava aralığı akı yoğunlukları	52
Şekil 5.25 İki ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için d ve q eksen endüktansları ..	53
Şekil 5.26 Üç ve köşeli bariyerli rotor yapısı için 2D görünüm	53
Şekil 5.27 Üç ve köşeli bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yoğunluğu	54
Şekil 5.28 Üç ve köşeli bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yolları	54
Şekil 5.29 Üç ve köşeli bariyerli rotor yapısı için moment zaman grafiği	55
Şekil 5.30 Üç ve köşeli bariyerli rotor yapısı için hava aralığı akı yoğunlukları	55
Şekil 5.31 Üç ve köşeli bariyerli rotor yapısı için d ve q eksen endüktansları.....	56
Şekil 5.32 Üç ve köşeli bariyerli rotor yapısı için bariyer genişliğinin momente olan etkisi	56
Şekil 5.33 Üç ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için 2D görünüm	57
Şekil 5.34 Üç ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yoğunlukları....	57
Şekil 5.35 Üç ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yolları.....	58
Şekil 5.36 Üç ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için moment zaman grafiği	58

Şekil 5.37 Üç ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için hava aralığı manyetik akı yoğunlukları.....	59
Şekil 5.38 Üç ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için d ve q eksen endüktansları...	59
Şekil 5.39 Dört ve köşeli bariyerli rotor yapısının 2D görünümü	60
Şekil 5.40 Dört ve köşeli bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yoğunlukları.....	60
Şekil 5.41 Dört ve köşeli bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yolları	61
Şekil 5.42 Dört ve köşeli bariyerli rotor yapısı için moment zaman grafiği	61
Şekil 5.43 Dört ve köşeli bariyerli rotor yapısı için hava aralığı akı yoğunlukları .	62
Şekil 5.44 Dört ve köşeli bariyerli rotor yapısı için d ve q eksen endüktansları	62
Şekil 5.45 Dört ve yuvarlak bariyerli rotor yapısının 2D görünümü.....	63
Şekil 5.46 Dört ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yoğunlukları	63
Şekil 5.47 Dört ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yolları.....	64
Şekil 5.48 Dört ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için moment zaman grafiği	65
Şekil 5.49 Dört ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için hava aralığı akı yoğunlukları	65
Şekil 5.50 Dört ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için d ve q eksen endüktansları	66
Şekil 6.1 Optimizasyon için kullanılan tasarım parametreleri.....	68
Şekil 6.2 Rotor başlangıç konumuna göre ortalama moment	68
Şekil 6.3 Kontrol açısına göre ortalama moment	69
Şekil 6.4 Kontrol açısına göre moment dalgalanması.....	69
Şekil 6.5 Köprü kalınlığının ortalama moment ve moment dalgalanması	70
Şekil 6.6 Akı bariyer uçlarının rotor dış çapına mesafesinin ortalama moment ve moment dalgalanması	70
Şekil 6.7 Birinci bariyer konumunun ortalama moment ve moment dalgalanması	71
Şekil 6.8 $Y_0=6$ iken ortalama moment ve moment dalgalanması.....	71
Şekil 6.9 $Y_0=7$ iken ortalama moment ve moment dalgalanması.....	72
Şekil 6.10 $Y_0=7,5$ iken ortalama moment ve moment dalgalanması	72
Şekil 6.11 $Y_0=8,7$ iken ortalama moment ve moment dalgalanması	73
Şekil 6.12 Karar verilen rotor geometrisinin 2D görünümü	73
Şekil 6.13 Karar verilen rotor geometrisi için akı yoğunluklarının dağılımı.....	74
Şekil 6.14 Karar verilen rotor geometrisi için manyetik akı yolları	74
Şekil 6.15 Karar verilen rotor geometrisi için moment zaman grafiği	75

Şekil 6.16 Karar verilen rotor geometrisi için hava aralığı akı yoğunlukları	75
Şekil 6.17 Karar verilen rotor geometrisi için d ve q eksen endüktansları.....	76
Şekil 6.18 Doğal Frekansın birinci modu	77
Şekil 6.19 Doğal frekansın ikinci modu.....	77
Şekil 6.20 Doğal frekansın üçüncü modu	77
Şekil 6.21 Multifizik analiz yapısı.....	78
Şekil 6.22 886,35 Hz'de ki deformasyon	78
Şekil 6.23 1302,4 Hz'de ki deformasyon	79
Şekil 6.24 2344,4 Hz'de ki deformasyon	79
Şekil 6.25 Frekansa göre yer değiştirme	79
Şekil 7.1 Lazer kesim sonrası elde edilen laminasyonlar.....	81
Şekil 7.2 Prototip motor rotor yapısı	81
Şekil 7.3 Mil geçirme operasyonu.....	82
Şekil 7.4 (a) Prototip motor genel görünümü (b) Prototip motor bağlantıları	83
Şekil 7.5 Isınma testi sonuçları.....	84
Şekil 7.6 Nominal yükteki akım ve gerilim değerlerinin analizör çıktıları.....	85
Şekil 7.7 Nominal yükteki dinamo çıktıları.....	86
Şekil 7.8 Nominal yükteki sürücü görüntüsü.....	86
Şekil 7.9 Motor çıkış gücü.....	87
Şekil 7.10 Dinamodan elde edilen moment zaman grafiği	87
Şekil 7.11 Nominal yükteki hız moment grafiği.....	88

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 Referans motor etiket bilgileri	31
Tablo 4.2 M700 sac malzemesinin 50Hz'deki kayıp katsayıları.....	34
Tablo 5.1 Tasarım parametreleri.....	38
Tablo 6.1 Bariyer sayısı ve bariyer şekillerine göre analiz sonuçları.....	67
Tablo 7.1 Standartta tanımlanan titreşim seviyeleri	88
Tablo 7.2 15 kw senkron relüktasn motor farklı yüklerdeki performans testi değerleri.....	88



Senkron Relüktans Motorda Moment Dalgalanmasının Azaltılması

Burak SOLAK

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Yasemin ÖNER

Bu tez çalışmasında 15 kW'lık bir asenkron motor ile aynı stator yapısını kullanan senkron relüktans motor tasarımı gerçekleştirilmiş olup, performans ve verimlilik için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Tezin ana hedefi rotor geometrisi optimizasyonu yapılarak moment dalgalanması değerinin azaltılmasıdır.

Çalışmada, ANSYS Rmxport ve ANSYS Maxwell 2D paket programları kullanılmıştır. Rotor geometrileri için literatürde sıkça kullanılan yuvarlak ve köşeli bariyer şekilleri tercih edilmiştir. Farklı bariyer sayısı ve şekilleri için tasarımlar gerçekleştirilip, en iyileme çalışmaları için dört ve köşeli bariyerli rotor geometrisi tercih edilmiştir.

Bu çalışma, asenkron motorlarla aynı maliyet sınıfında değerlendirilebilecek senkron relüktans motorların daha iyi performans değerleri ile enerji verimliliği için faydalı olabileceği incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Senkron relüktans motor, optimizasyon, asenkron motor, rotor geometrisi

Reducing Torque Ripple in Synchronous Reluctance Motor

Burak SOLAK

Department of Electrical Engineering
Master of Science Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Yasemin ÖNER

In this thesis, a synchronous reluctance motor design using the same stator structure as a 15 kW asynchronous motor has been carried out, and optimization studies have been carried out for performance and efficiency. The main goal of the thesis is to reduce the torque ripple value by optimizing the rotor geometry.

ANSYS Rmxport and ANSYS Maxwell 2D package programs were used in the study. Round and angular barrier shapes, which are frequently used in the literature, are preferred for rotor geometries. Designs were made for different barrier numbers and shapes, and four and angular barrier rotor geometry was preferred for optimization studies.

In this study, it has been investigated that synchronous reluctance motors, which can be evaluated in the same cost class with asynchronous motors, can be beneficial for energy efficiency with better performance values.

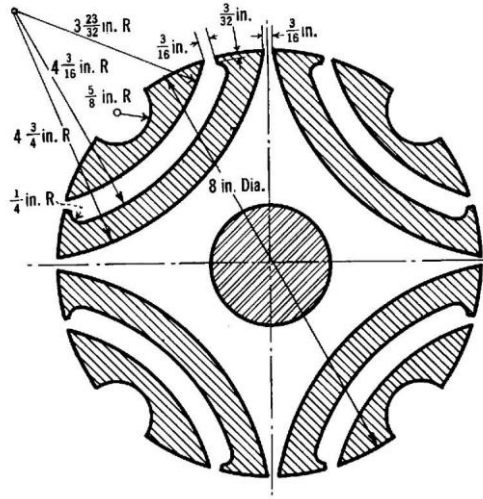
Keywords: Synchronous reluctance motor, optimization, asynchronous motor, rotor geometry

1 GİRİŞ

Dünyada hızla gelişen teknoloji ve sanayileşme ile birlikte enerji ihtiyacı da giderek artmaktadır. Artan enerji ihtiyacı enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasının önemini de arttırmaktadır. Sanayileşmenin sonucu olarak enerjinin büyük bir miktarı elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren elektrik motorları tarafından kullanılmaktadır. IEC 'nin endüstriyel motorların verim sınıflarının artırılmasına yönelik aldığı regülasyon kararıyla birlikte motor üreticileri yüksek verimli ve düşük maliyetli motor arayışına girmişlerdir. Bu doğrultuda endüstriyelde yaygın olarak kullanılan asenkron motorlara alternatif olabilecek ve yüksek verimlilik sağlayabilecek motor tasarımları giderek önem kazanmaktadır. Aynı zamanda yarı iletken malzeme teknolojisinde yaşanan gelişmelerle birlikte sürücü kontrollü motorlar ön plana çıkmaktadır. Bütün bu gelişmeler doğrultusunda asenkron motora kıyasla daha iyi verimliliğe sahip olan senkron relüktans motorlar ve sabit mıknatıslı senkron motorlar ilk akla gelen alternatif motor tipleri olmaktadır. Yüksek verimlilik değerlerine sahip olmasına karşın sabit mıknatıslı senkron motorlar rotorlarında bulunan mıknatıslar sebebiyle maliyetlidir. Hem asenkron motora göre daha verimli hemde sabit mıknatıslı senkron motora göre daha ucuz olan senkron relüktans motorlar iyi bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır.

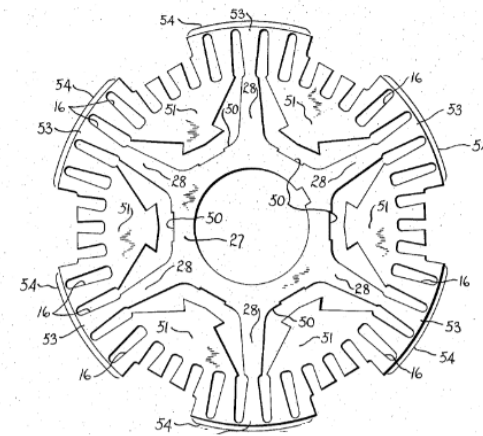
1.1 Literatür Taraması

Senkron relüktans motorları (SynRM) Kotsko'nun 1923 yılında yayınladığı "Polyphase Reaction Synchronous Motors"adlı çalışmasından itibaren teorik olarak var olan motor tipleridir. Kotsko bu çalışmada o zamana kadar var olan çıkık statorlu ve çıkı rotorlu relüktans motorları yerine yeni bir yapı önermiştir. Önerilen bu yapıda çıkıklığı sağlamak amacıyla akı bariyerleri eklenerek, bu akı bariyerlerinin optimum tasarımıyla d ve q eksen endüktans farkının artırılarak moment üretiminin sağlanabileceği belirtilmiştir [1]. Kotsko bu çalışmasıyla günümüzdeki birçok çalışmasının başlangıç noktası olmuştur.



Şekil 1.1 Kotsko'nun tasarımı [1]

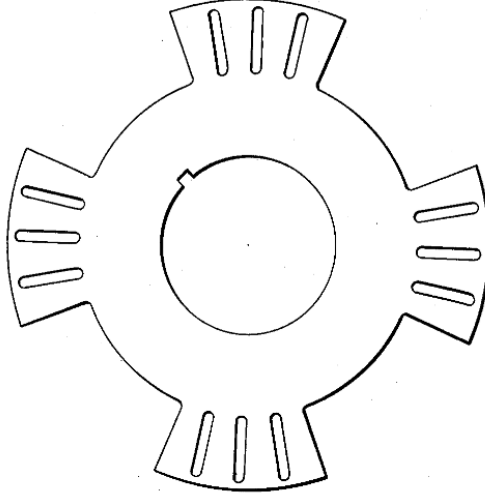
1959 yılında John F. Douglas ve Pentti Rautimo, “Synchronous Induction Motor” adı ile farklı rotor tipleri için patent almışlardır [2].



Şekil 1.2 Douglas rotor tasarımı [2]

SynRM'lerin stator yapısına bakıldığı zaman diğer çok fazlı alternatif akım makinelerinde kullanılan stator yapısıyla aralarında farklılık olmadığı görülmektedir. Bu nedenledir ki yapılan çoğu çalışmada rotor yapısının iyileştirmek ana çalışma konusu olmuştur. Kotsko'nun çalışmasından birkaç on yıl sonar P.F. Bauer ve N. Rich yeni rotor geometrileri üzerine tasarımlar gerçekleştirmişlerdir [3][4]. 1960'larda Lawrenson tarafından yeni bir rotor tasarımı olan parçalı rotor tasarımı öne sürülmüştür. Bu tasarım klasik çıkık kutuplu rotorlu bir makina ile

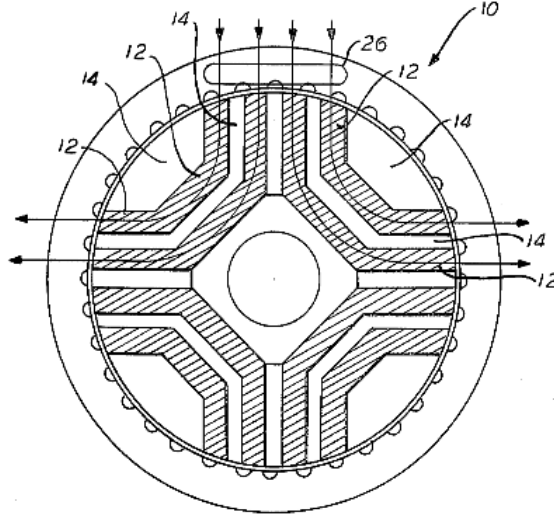
kıyaslandığında güç faktörü, moment ve verim değerleri olarak daha iyi değerler elde edildiği belirtilmiştir [5][6].



Şekil 1.3 Bauer'in sincap kafesli rotor tasarımı [3]

A.F. Anderson ve A.J.O. Cruickshank tarafından yapılan “Eksenel Laminasyonlu Rotor Sahip Relüktans Motorlarının Teorisi ve Performansı” isimli çalışmada ise eksenle lamine rotor yapısı kullanılmıştır. Laminasyonlarının paketlenme yönleri radyal oluşturulan bu yapının, klasik rotorlu bir relüktans motorundan çok daha üstün performans göstereceği vurgulanmıştır. Radyal olarak oluşturulan bu paketlenme sayesinde q eksen endüktansının azalması ve d eksen endüktansının artması sağlanmıştır. Bu sayede artırılan d ve q endüktans farkları sayesinde daha iyi bir moment ve verim elde edilebileceği gösterilmiştir [7][8].

Eksenel laminasyonlu tasarımın performans olarak diğer tasarımlardan daha üstün olduğu genel bir Kabul görmüş ve 1978 yılında Rao tarafından patentlenmiştir [9]. Ancak üretim şartları düşünüldüğü zaman yaşanan zorluklar nedeniyle bu rotor yapısına olan ilgi azalmıştır. Yüksek hızlı uygulamalara bakıldığında zaman enine laminasyonlu rotor tasarımının eksenle laminasyonlu sahip tasarımlardan daha dayanıksız olduğunu Fratta 1992’de yaptığı çalışmaya belirtmiştir [10].



Şekil 1.4 Rao rotor tasarımı [9]

D ve q eksen endüktanslarının matematiksel ifadelerini çıkararak her iki eksen için ortak endüktans ifadelerini ortaya çıkaran Honsinger aynı zamanda bir C katsayısı tanımlanmıştır. Bu C katsayısı bazı tasarım parametrelerine göre değişiklik göstermektedir. Bu parametrelerin bazıları sargı faktörü, kutup sayısı, rotor çapıdır. Matematiksel ifadelerle hesaplanan d ve q eksen (X_d, X_q) reaktans değerlerinin gerçekteki sonuçlara benzer değerlerde olduğu görülmüştür [11].

Bazı araştırmacılar L_d 'yi sabit tutarak L_q 'yu azaltmak için q eksenini boyunca hava kanalları (akı bariyeri) açılarak gerçekleştirilen rotor tasarımları öne sürmüşlerdir. Bu tip makineler akı bariyeri sayısına göre tek bariyerli, çift bariyerli, temel bariyerli (kutup çift başına bir bariyer) olarak sınıflandırılmıştır [11,12,13]. Bu tip rotor tasarımının en büyük sorunu doymadan dolayı L_d/L_q oranının düşmesidir.

Fong'un tasarımında doymamış durumda L_d/L_q oranı 10.7 iken tam yükte 2.58-5,75 arasında değişmektedir. Bu tip makineler hava aralığında yüksek harmonikli akı içermektedirler. Bu yüzden kayıplar artmaktadır. Ayrıca moment dalgalılığı bulunmakta ve normal çalışma durumunda, diğer rotor tasarımlarına göre daha gürültülü çalışmaktadırlar [13].

T.A. Lipo yaptığı çalışmada senkron relüktans makinesinin asenkron makine ile kıyaslamış ve senkron relüktans makinesinin daha verimli olduğunu ortaya koymuştur [14].

T.J.E. Miller tarafından yapılan çalışmada ise gelişen sürücü teknolojiye beraber senkron relüktans motorların tekrar önem kazandığının altı çizilmiştir. Çalışmada ayrıca senkron relüktans motorlarının en önemli parametrelerinden olan d ve q eksen endüktans farkı olarak bildiğimiz çıkıklık oranı ifadesi tanımlanmış ve bu ifadenin motor performansına olan etkisi gösterilmiştir. Yazar çalışmasında iki farklı test motoru tasarlayarak, asenkron ve fırçasız motorla kıyaslamıştır. Tasarlanan motorlarda akı bariyer seçimi yapılırken mıknatıs yerleşimine uygun olarak seçilmiştir. Kıyaslamalar neticesinde motorların moment değerleri ele alındığında senkron relüktans motorun senkron motorla yarışabileceği ortaya çıkmıştır. Miller'in bu yapmış olduğu bu çalışmayla birlikte hibrit motorların ve senkron relüktans motorların sürücü sistemleri ile kullanılabileceği gösterilmiştir[15].

1992'de Vagati ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada rotor geometrisinde bulunan akı bariyerlerini rotora bağlayan ve literatürde kaburga (ing: rib) olarak ifade edilen parçanın etkisinden bahsedilmiştir. Kaburga kalınlığının q eksen endüktansını artırıcı bir etkisinin olduğuna dikkat çekilmiştir. İdeal durum olarak kaburganın olmaması gerektiğini ancak mekaniksel dayanım olarak önemli olduğu için kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Yazarlar kaburga etkisini azaltmak için olabildiğince ince kesilmesini tavsiye etmişlerdir [16].

D.A. Staton ve arkadaşları tarafından yapılan "Senkron Relüktans Makinesinin Çıkıklık Oranını Artırmak" isimli çalışmada moment üretimindeki ana etkenin d ve q eksen endüktans farkı olan çıkıklık oranının arttırılması gerektiğini belirtmişlerdir. Çıkıklık oranın arttırılması için bobin başına düşen amper sarım değerinin ve güç faktörü değerinin artırılması gerekmektedir. Bunun yanı sıra çıkıklık oranının arttırılmasında bazı fiziksel engeller bulunmaktadır. Bu engellerden ilki q eksen endüktansının hiçbir zaman sıfır olamamasıdır. Diğer bir engel ise d eksen boyunca laminasyonların doyuma gitmesi sebebiyle d eksen endüktansının azalmasıdır. Laminasyonlar gerektiğinden kalın olarak üretilirse eddy kayıpları artarak stator oluk açıklıklarında kısa devreye sebep olabilir [17].

T. Matsuo ve T.A. Lipo tarafından yapılan başka bir çalışma olan "Senkron Relüktans Makinelerinde Rotor Tasarım Optimizasyonu" adlı makalede çıkıklık oranını arttırarak motor verimi, motor performansı ve güç faktörü değerini arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Aynı zamanda makalede rotor geometrisini

oluştururken önemli bir parametre olan yalıtım oranı olarak adlandırılan Kw parametresi tanımlanmıştır. Bu parametrenin tanımı rotor içindeki hava boşluğu alanının sac alanına oranı olarak ifade edilmiştir ve bu oranın çıkıklık oranı üzerindeki etkisi vurgulanmıştır. Yapılan teorik çalışmalarda yalıtım oranının yüksek olması istenmiştir. Ancak yapısal açıdan yalıtım oranının düşük olması istenmektedir. Optimum değer olarak 0,5 değerini belirleyen yazarlar bu noktada en iyi çıkıklık oranının sağlandığını göstermişlerdir [18].

A. Vagati tarafından yapılan çalışmada relüktans makinelerinin hem sabit güç hem de sabit moment uygulamalarında değerlendirilebilecek bir AC sürüş sistemi olduğundan söz edilmiştir. Ayrıca düşük maliyetli ve alan zayıflatma yöntemine olan uygunluğu nedeniyle de bu motor tipinin ön plana çıktığı belirtilmiştir. Motorun temel çalışma prensibinin d ve q eksen endüktans farkına dayandığını da açıklamıştır [19].

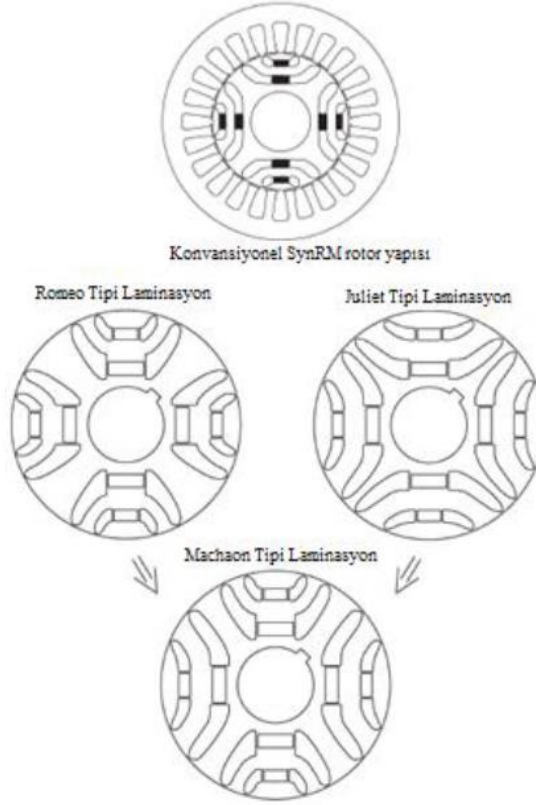
M.J. Kamper yaptığı çalışmasında daha önce senkron relüktans motorların analizlerinde kullanılmamış olan sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak optimum tasarımlar ortaya konmaya çalışılmıştır. Yapılan analizler neticesinde arzulanan sonuçlar elde edilmiştir [20].

A. Vagati ve arkadaşları tarafından yapılan “ Yüksek Performanslı Senkron Relüktans Makinelerinde Moment Dalgalanmasının Değerlendirilmesi” adlı makalede relüktans motorlarının en büyük problemlerinden biri olan moment dalgalılığını azaltmak için çalışmalarda bulunulmuştur. Rotora kayk verılarak moment dalgalanmasının azaltılabileceğinden ancak tamamen yok olmasını sağlamayacağından bahsetmiştir. Ayrıca stator oluklarının moment dalgalanması üzerine olan etkisinden de söz edilmiştir. Matematiksel model olarak kayk ve rotor adımının etkisini belirtmişlerdir. Hazırlanan prototip ile doğrulama çalışmaları yapılmıştır ve düz rotorlu bir motora göre kayk verilmiş bir rotorun daha az moment dalgalılığı değerine sahip olduğunu belirtmişlerdir [21].

G. Pellegrini ve arkadaşları yüksek güçlü uygulamalar için senkron relüktans motoru incelemiş ve aynı boyuttaki bir asenkron motorla kıyaslamışlardır. Kıyaslama sonucunda aynı durumdaki bir asenkron motora göre SynRM'nin daha yüksek sürekli moment ürettiği gözlemlenmiştir. Sargı sıcaklıkları incelendiği zaman SynRM'nin sargı sıcaklığının daha düşük olduğu görülmüş ve asenkron motora göre daha sıcak ortamlarda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [22].

A. Vagati, M. Pastorelli ve arkadaşları tarafından yazılan “ Düşük Moment Dalgalılığına Sahip Senkron Relüktans Motoru Tasarımı” isimli makalede düşük moment dalgalanmasına sahip SynRM üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yazarlar çalışmalarında kaburga ve akı bariyerlerinin konuma göre değişen bir sınıflandırma yapmışlardır. Daha sonra belirlenen bir stator yapısını kullanarak farklı rotor yapıları için karşılaştırmalar yapılmıştır. 3 farklı rotor yapısı için çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda kaburga sayısı ile oluk sayısı arasındaki farkın moment dalgalılığını etkilediği belirtilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda kaburga sayısı ve oluk sayısı arasındaki farkın dört olduğu durumlarda en düşük moment dalgalılığı değeri elde edilmiştir [23].

Nicola Bianchi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada moment dalgalanmasının azaltılabilmesi için akı bariyeri tasarımları üzerinde durulmuştur. Romeo&Juliet ve Machaon rotor yapıları incelenmiştir. Klasik gömülü mıknatıslı bir senkron motorda karşılaştırmalarda kullanılmıştır. Karşılaştırmalar sonucu Romeo&Juliet ve Machaon rotor yapısına sahip SynRM’nin gömülü mıknatıslı senkron motora göre daha az moment dalgalanmasına sahip olduğunu belirtmişlerdir. İki rotor yapısından moment dalgalılığı değeri azalırken, Romeo&Juliet yapısında ortalama moment değeri de azalmıştır. Machaon yapısının hem ortalama moment değerinin düşmemesi hem de düşük moment dalgalılığı değerine sahip olması nedeniyle kullanılmasının daha avantajlı olduğu belirtilmiştir [24][25].



Şekil 1.5 Machaon laminasyonu ve Romeo & Juliet tipi laminasyonlar [51]

Shiego Morimoto ve arkadaşları kompresör uygulaması için farklı tipte motorları karşılaştırmışlardır. Gömülü mıknatıslı motor, yüzey mıknatıslı motor ve senkron relüktans motor olmak üzere 3 farklı tipte motor bu karşılaştırmada kullanılmıştır. Mıknatıslı motorların vuruş momentine sahip olduğu belirtilmiştir. 4000 rpm hızında yapılan testler sonucunda SynRM'nin diğer iki mıknatıslı motor göre daha düşük bir verim değerinde olduğu görülmüştür. Düşük maliyetli olması SynRM'nin diğer motorlara göre daha avantajlı olduğu bir noktadır. 3 motor incelendiği zaman verim ve sıcaklık altında motor performansı açısından gömülü mıknatıslı motordan alınan sonuçlar daha iyidir. Ancak fiyat performans açısından bakılacak olursa SynRM'lerin gömülü mıknatıslı motora iyi bir alternatif olduğu belirtilmiştir [26].

R.R. Moghaddam ve arkadaşları "Bir Akı Bariyerli Senkron Relüktans Motor Rotor Geometrisi Üzerine Fem Araştırması ve En Uygun Bariyer Yapısı İçin Rehber Olarak Kullanılması" adlı çalışmalarında akı bariyerleri için farklı parametreler belirleyerek, bu parametrelerin motor performansına olan etkilerini araştırmışlardır. Bu parametreler d ve q eksen kalınlıkları, bariyerin radyal

pozisyonu ve bariyerin taradığı açıdır. Bu parametrelerden yola çıkılarak yapılan testlerde d ve q eksen kalınlıklarının moment dalgalırlılığını etkilediğı, radyal pozisyonun herhangi bir etkisinin olmadığı ve taranan açının artmasıyla beraber belirli bir noktaya kadar moment dalgalırlılığının artarak sabit bir noktaya geldiğini gözlemlemişlerdir. Optimum açı için 120°-135° arasında olduğunu belirtmişlerdir [27].

Jere Kolehmainen tarafından 2010 yılında yapılan bir çalışmada yüksek hızlı uygulamalar için yeni bir rotor yapısı önerilmiştir. Önerilen bu yapıda mekanik dayanımı artırmak adına akı bariyerleri kıvrılmıştır. Bunun sebebi normal bariyerli bir yapıda yüksek hızlı uygulamalarda akı bariyerlerinin kırıldığıının gözlemlenmesidir. Bu mekanik dayanım artırılması için laminasyonlarda bir köprü bırakılarak yapılıyordu. Yazarın önerdiği bu yöntemle beraber köprülere binen yük bariyer boyunca dağıtılacak ve böylece yüksek hızlı uygulamalardaki kırılma sorunları çözülmüş olacaktır. Bu çalışma sayesinde SynRM'lerin yüksek hızlı uygulamalar için uygun olduğu görülmüştür [28].

J. Haataja ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada senkron relüktans motorlarda kullanılabilir olacak olan mıknatısların rotor içerisindeki konumunun performansa olan etkisi incelenmiştir. Yapılan incelemede tek bir mıknatıs konumunun moment-yük açısı karakteristiğinin şeklini etkilediğı ancak çok büyük bir etkisinin bulunmadığını görmüşlerdir. Ancak söz konusu birden çok mıknatıs kullanımı olduğu zaman aynı yük açısında mıknatıs kullanılmayan SynRM'ye göre daha fazla çıkış gücü verdiği belirtilmiştir [29].

K. Wang ve arkadaşları tarafından yapılan bir diğer çalışmada en iyi oluk/kutup kombinasyonu ve akı bari katman sayısının belirlenmesi için çalışma yapılmıştır. Bakır kayıplarının sabit tutularak yapılan bu çalışmada stator ve rotor için üç farklı parametreden bahsedilmiştir. Bu parametreler rotorda akı bariyeri uzunluğu, kutup adımı açısı ve akı bariyerinin kalınlığı iken statorda diş ve ayak kalınlığı ve boyunduruktur. Farklı oluk/kutup kombinasyonlar olan tasarımlar içerisinde moment üretimi en belirgin olan 12 oluk 4 kutup yapısı seçilmiştir. Bu yapıdaki moment dalgalırlılığının %60 civarında olduğu görülmüştür. Stator oluk sayısının moment dalgalırlılığına herhangi bir etkisinin olup olmadığının görülmesi için kutup sayısını sabit tutarak oluk sayısı artırılmıştır. Oluk sayısı artan modelde ortalama moment değeriinin değişmediğı ancak moment dalgalırlılığının azaldığı görülmüştür.

Sonraki çalışmada bariyer katman sayısının en uygun değeri bulunmaya çalışılmış ve sonuç olarak 3 katmanlı yapının en ideal durum olduğu belirtilmiştir. Yapılan tüm çalışma sonucunda bir SynRM için en uygun oluk/kutup kombinasyonu 24 oluk 4 kutup ve akı bariyeri katman sayısı 3 olarak belirlenmiştir [30].

Nicola Bianchi ve arkadaşları tarafından yazılan “Hibrit elektrikli araçlar için SynRM Tasarımı” adlı makalede hibrit elektrik araçlarda kullanılabilecek bir SynRM tasarımı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Rotor tasarımı yapılırken bariyer sayısı, bariyer genişliği gibi bazı parametreler belirlenmiştir. Tasarım için 36 oluk 4 kutup bir motor seçilmiştir. Tasarımda bariyer sayısını değiştirerek analizler gerçekleştirilmiş ve 3 bariyerli yapıda düşük moment dalgalılığı ve yüksek ortalama moment elde edilmiştir. Bariyer sayısı belirlendikten sonra Machaon rotor yapısında kullanılmasıyla beraber ortalama moment değerinin arttığı ve moment dalgalılığı değerinin daha da azaldığı görülmüştür. Motorda mıknatıs kullanılmadığı için vuruş momenti olmaması ve düşük maliyet gibi avantajları söz konusudur. Aynı zamanda bu tip motorların yüksek verim karakteristiğine sahip olduğu belirtilmiştir [31].

Shiego Morimoto ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise moment dalgalılığını azaltmak için yeni bir yaklaşım öne sürülmüştür. Bu yaklaşımda stator dişleri ve rotor akı bariyeri ucu arasındaki açığa her kutup için farklı bir değer verilerek asimetric bir yapı elde edilmiştir. Bu asimetric yapının kullanılmasıyla beraber %50 olan moment dalgalılığını %12 değerlerine kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Bununla birlikte simetric yapıli modeldeki verim ve ortalama moment değerleri de korunmuştur [32].

R.R. Moghaddam akı bariyerlerinin boyutlandırılması ve analitik tasarım süreci için bir yapı oluşturmıştır. Bu yapı oluşturulurken Manyeto motor kuvvetini (MMK) d ve q eksenli bileşenlerine ayırarak MMK ile orantılı olacak şekilde demir bölütlerin kalınlıklarını boyutlandırmayı başarmıştır [33][34][35].

Minghu Yu ve arkadaşları tarafından yazılan “Kompresör Uygulamaları için Hibrid Magnet destekli senkron relüktans motor analizi” isimli makalede kompresör uygulaması için mıknatıs destekli bir senkron relüktans motorun tasarımı üzerine çalışmalar yapılmıştır. MDSynRM ana avantajının sadece mıknatıs momenti ya da sadece relüktans momenti kullanmak yerine hem relüktans hem de mıknatıs momentinden faydalanarak moment üretimini sağlamasıdır. Ayrıca makalede ferrit

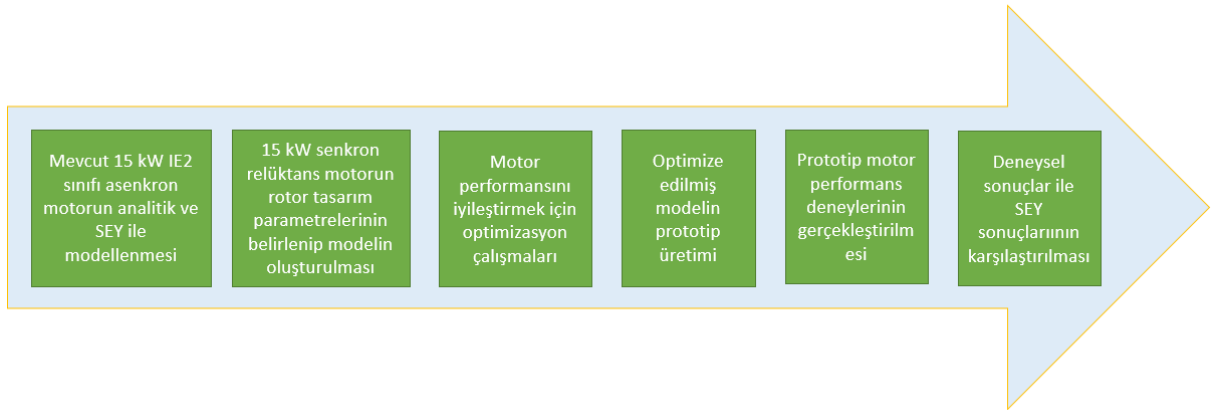
destekli senkron relüktans motorların son yıllarda giderek daha popüler bir hal alacağı da belirtilmiştir. Ancak şu anki durumda ferrit destekli motorların neodmiyum mıknatıs destekli motorlara göre performanslarının daha aşağı seviyede olduğu söylenmiştir. Yapılan çalışmada maliyet odaklı olarak kompresör uygulaması için yüksek moment yoğunluğuna sahip mıknatıs destekli senkron relüktans motor kullanımı önerilmiştir. 9/6 oluk kutup kombinasyonuna kullanılmış olup 2 farklı mıknatıs kullanılarak tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Ferrit ve neodmiyum mıknatıslar farklı miktarlarda kullanılarak momente olan katkıları incelenmiştir. Mıknatısların yalıtım oranına olan katkılarından bahsedilmiştir. Hava aralığının azaltılmasının yalıtım oranını arttıracığı fakat bu durumun manyetik sac üzerindeki doyma sorununu ortaya çıkaracağı belirtilmiştir. Yapılan çalışmada mıknatıs kalınlıkların arttırılmasının moment ve yalıtım oranını belirli bir noktaya kadar olumlu etkilediği ve aynı zamanda mıknatıs kalınlığını arttırırken mıknatısın demanyetizasyon performansının da göz önüne alınarak tasarımların gerçekleştirilmesi gerektiğinin altı çizilmiştir [36].

Günümüzde enerjinin verimli kullanılmasının gerekliliği giderek artarken yüksek verimli motor ihtiyacının da karşılanması gerekmektedir. Bu nedenle Ji Hoon Park yaptığı çalışmadan yüksek verimli motor ihtiyacının senkron relüktans motorlarla sağlanabileceğini belirtmiştir. SynRM'lerin rotorlarında asenkron motorların rotorların da olduğu gibi alüminyum baralar bulunmaması nedeniyle için rotor kayıpları en aza indirilmiştir. Mıknatıslı motorların verim değerlerinin daha iyi olmasına rağmen yüksek maliyet ve demanyetizasyon problemi sebebiyle SynRM'ler iyi bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bu şartlar altında bakıldığı zaman yüksek verim ve düşük maliyet gibi kriterlerin SynRM'ler ile sağlanabileceği düşünülmüştür. Yazar çalışmada 36 oluklu ve 24 oluklu stator yapılarıyla birlikte farklı rotor yapıları için analizler yapmıştır. Oluk sayısının yüksek olduğu tasarımda moment ve verim değerinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bariyer sayısının artmasının moment ve verim değerleri üzerinde olumlu etkisi olduğundan fakat doyma etkisinden ötürü bariyer sayısı ve kalınlığına dikkat edilmesi gerektiğini belirtmiştir. En iyi tasarımın tüm parametrelerin birlikte değerlendirilmesinden sonra ortaya çıkabileceğini belirtmiştir [37].

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada endüstride kullanılan 3 fazlı IE2 verim sınıfına sahip 15 kW gücünde bir asenkron motorla aynı stator yapısını kullanarak IE4 verim sınıfı bir senkron relüktans motor tasarlanarak moment dalgalanması değerini düşürülmesi hedeflenmiştir. Çalışmada maliyet göz önünde bulundurularak stator yapısı değiştirilmeden yeni bir rotor tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Başlangıç olarak mevcut asenkron motor modellenmiştir. İkinci adım olarak senkron relüktans motorun rotor tasarım parametreleri belirlenerek SEY ile modellenmiştir. Modellemenin ardından moment dalgalanmasının düşürülmesi amacıyla belirlenen tasarım parametreleri doğrultusunda optimizasyon çalışması yapılmıştır. Üretime uygunluğu açısından motorun mekanik dayanım analizleri ve titreşim analizler gerçekleştirilmiştir. Manyetik ve mekanik modelleme sonucu ortaya çıkan tasarım ile bir prototip motor üretimi gerçekleştirilmiş ve performans deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın son aşamasında üretimi yapılan prototip senkron relüktans motorun manyetik analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.6 Tez çalışmasının kapsamı

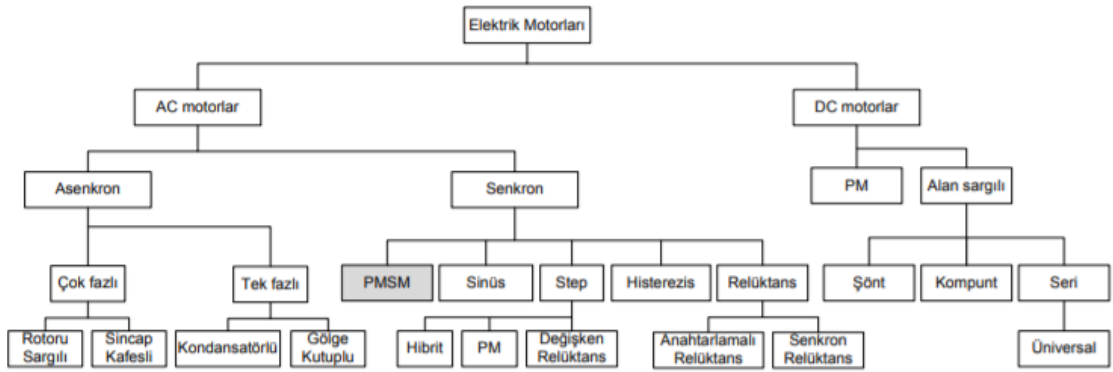
1.3 Hipotez

Günümüzde artan enerji ihtiyacı ile birlikte enerjinin verimli kullanılması giderek önem kazanan bir konu haline gelmiştir. Bu kapsamda endüstride yaygın olarak kullanılan asenkron motorların verim sınıflarını artırmak kadar, asenkron motorlara alternatif olarak kullanılabilecek daha verimli motor tiplerine olan ihtiyaç da artmaktadır. Senkron relüktans motorlar hem maliyet hemde verimlilik

açısından asenkron motorlarla rekabet edebilecek motor tipleridir. SynRM'lerin en büyük dezavantajlarından olan yüksek moment dalgalılığı problemi bu motorların kullanım alanlarını daraltmaktadır. Bu tez çalışması ile birlikte senkron relüktans motorların dezavantajlarından biri olan yüksek moment dalgalılığı problemine sonlu elemanlar metodu ile farklı tasarımlar gerçekleştirilerek çözüm aranmıştır. Farklı bariyer şekilleri ve farklı bariyer sayıları için moment ve moment dalgalılığı değerlerinin değiştiği gözlemlenmiştir. Literatürde moment dalgalanmasının azaltılması için farklı metotlar uygulanmıştır. Yapılan bu çalışmada analitik çözümler ile deneysel sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Senkron motor ailesi altında değerlendirilen senkron relüktans motorlar, diğer çok fazlı AA makinelerinin stator yapısını ve moment üretimi için relüktans farkını kullanan motorlardır. Şekil 2.1’de elektrik motorlarının sınıflandırılmasına ait şema verilmiştir.



Şekil 2.1 Elektrik motorlarının sınıflandırılması [52]

Senkron relüktans motorlar yapısının basit ve dayanıklı aynı zamanda ucuz olması gibi avantajlara sahiptir. Sağlam yapıları nedeniyle yüksek hızlı motor uygulamalarında kullanımı uygundur. Rotorlarında herhangi bir sargı ya da alüminyum iletken bulunmaması nedeniyle iletken kayıpları en aza indirilmiş ve aynı zamanda rotordaki ısınma azaltılmıştır. Rotorun bu yapısı sayesinde asenkron motorların aksine üretilen elektromanyetik moment rotor sıcaklığından bağımsız hale gelmiştir. Mıknatıslı motorlara karşı olan avantajı ise rotorunda mıknatıs bulunmaması sebebiyle herhangi bir demagnetizasyon problemi olmaması ve bu sayede mıknatıslı motorlara nazaran daha yüksek sıcaklıktaki uygulamalar için kullanımının elverişli olmasıdır. Aynı zamanda mıknatıs kullanımı olmadığı için mıknatıslı motorlara göre de daha düşük maliyetlidir.

Son yirmi yıla bakıldığı zaman SynRM ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Bu motorun avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

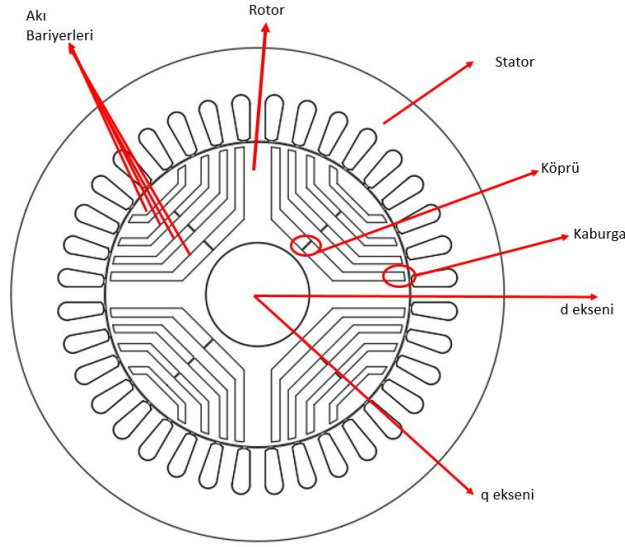
Avantajları;

- Basit yapılı ve imalatının kolay olması.
- Dayanıklı yapısı sayesinde yüksek hızlı uygulamalar için elverişli olması
- Rotorlarında ısınma problemi olmaması sebebiyle mekanik bakım sürelerinin uzun olması
- Üretilen elektriksel moment rotor sıcaklığından bağımsız olması
- Rotorunda mıknatıs olmadığından dolayı demagnetizasyon problemi olmaması ve bu yüzden yüksek ısılı uygulamalar için sürekli mıknatıslı motorlara göre daha avantajlıdır.
- Mıknatıslı makinalara göre daha ucuz olması
- Rotorunda aktif malzeme bulunmaması sebebiyle rotor kayıpları çok düşük olması
- Rotor kayıplarının az olması nedeniyle yüksek verimli olması
- Düşük ataletle sahip olması
- Enkodersiz hız kontrolü kolay olması [38][39].

Dezavantajları;

- Kullanımı için sürücü sistemi gerektirmesi
- Düşük güç faktörü ve yüksek moment dalgalılığına sahip olması.

SynRM'lerin en büyük sorunlarından biri yüksek moment dalgalılığıdır. Bu nedenle tasarım yapılırken harmonikleri en aza indirebilmek için stator yapısındaki oluk sayısı yüksek seçilmelidir. Aynı zamanda stator sargılarında hem dağıtılmış hem de konsantre sargı yapısı kullanılabilir. Ancak dağıtılmış sargının harmonik içeriğinin konsantre sargıya göre daha iyi olması nedeniyle dağıtılmış sargı tercih edilmiştir. Şekil 2.2 'de akı bariyerli bir senkron relüktans motorun kesiti verilmiştir. Bu kesitte akı bariyerli bir rotor yapısı, d ve q eksenlerinin konumları ve oluklu bir stator yapısı görülmektedir.



Şekil 2.2 Bir SynRM'nin iki boyutlu kesiti

Şekil 2.2 'de görülen senkron relüktans motor ve mıknatıs destekli senkron relüktans motor yapılarında görülebilecek olan köprü ve kaburga yapıları rotor tasarımındaki önemli parametreleri oluşturmaktadır. Kaburga yapısı rotordaki akı bariyerlerini rotora bağlayan ve akı bariyerlerinin uç kısmında bulunan yapıdır. Bu yapının olmamasının ideal durum olduğu fakat mekanik açıdan böyle bir durumun mümkün olamayacağı bilinmektedir [16]. Kaburgalar rotorun çalışma hızına dayanacak kadar kalın ve manyetik akıyı geçirmeyecek kadar ince seçilmelidir. Aynı zamanda kaburga kalınlıkları çıkış momenti üzerinde direkt bir etkiye sahiptir. Köprü yapısı ise rotorun devir sayısına bağlı olarak oluşan merkezkaç kuvvetlerinden dolayı akı bariyerlerinin yapısının bozulmasını önlemek amacıyla tasarımda dikkat edilmesi noktalardan biridir. Senkron relüktans makinelerinde kullanılan rotorlar çok farklı yapıdadır. Rotor yapılarının bazıları asenkron motorlardaki sincap kafes yapısına benzerdir ve bu sayede şebekeden doğrudan kalkış yapabilirler. Bu tip rotorlu makinelerde senkronizasyona kadar rotor çubuklarından akım akar. Sürücü beslemeli olan tiplerin ise rotorlarında herhangi bir iletken bulunmaz ve kalkış yapabilmek için sadece relüktans momentinden faydalanır. En yaygın olarak kullanılan rotor tipleri ise eksenle lamine edilmiş ve enine lamine edilmiş rotor tipleridir.

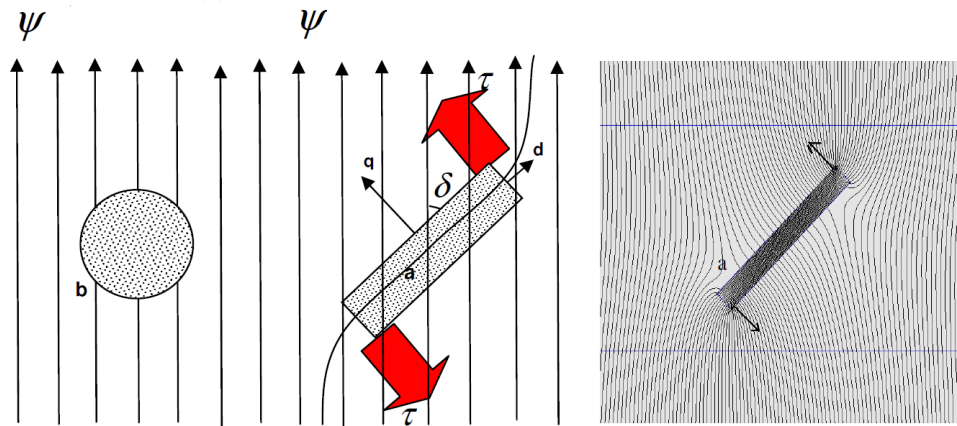
2.1 SynRM Çalışma Prensibi

Senkron relüktans motorlar diğer üç fazlı alternatif akım makinelerinde olduğu gibi bir stator ve rotor yapısından oluşmaktadır. Stator sargılarından geçen çok fazlı alternatif akım sayesinde alternatif akımın oluşturduğu döner alanın hızı akımların frekansına bağlıdır. Bu hıza senkron hız adı verilir. Senkron relüktans makinesi bir senkron makinedir ve bu nedenle rotor, statorda oluşan döner alan hızıyla senkronize bir şekilde dönmektedir.

Senkron relüktans makinesi (SynRM), moment üretimi için geleneksel asenkron motorun statoru tarafından üretilen relüktans momenti ve dönen sinüzoidal manyeto motor kuvvetini kullanır. Relüktans momenti kavramının çok eski bir geçmişi vardır ve 1900 öncesine kadar izlenebilir [1,40].

Rotordaki hava boşlukları sayesinde oluşturulan bu relüktans momenti; manyetik alan içinde kalan her yönde aynı manyetikliğe sahip olmayan (anizotropik) bir manyetik malzemenin, düşük relüktans eksenini uygulanan manyetik alan ile aynı hizaya getirmek istemesinden ötürü ortaya çıkar.

Anizotropik nesneye (a) uygulanan bir manyetik alan (ψ), d eksenini alan arasında bir açı ($d \perp b$) farkı varsa moment üretir. (a) nesnesinin d eksenini alanla hizalı değilse, ana alanda bir alan bozulmasına neden olacağı açıktır. Bu bozulma alanının ana yönü, nesnenin q eksenini boyunca hizalanır. SynRM alanı, asenkron motorlardaki gibi oluklu bir statorda sinüzoidal olarak dağıtılmış bir sargı tarafından üretilir ve stator ile rotor arasından hava aralığı bulunmaktadır.



Şekil 2.3 Manyetik alan (Ψ) ve moment üretim mekanizmasında anizotropik geometri (a) ve izotropik geometri (b) olan bir nesne [50]

Bu durumda, q eksenindeki endüktans hiçbir zaman sıfır olamayacağı için tüm sistem potansiyel enerjisini azaltmaya yarayan bir moment her zaman var olacaktır. Kontrollü bir yük açısı ile birlikte elektromanyetik enerji sürekli olarak mekanik enerjiye dönüşecektir.

Stator akımı hem mıknatıslanmadan hem de moment üretiminden sorumludur. Bu mevcut stator sargısının vektörü ile akım açısının kontrolü sayesinde mümkün olabilir [41,42].

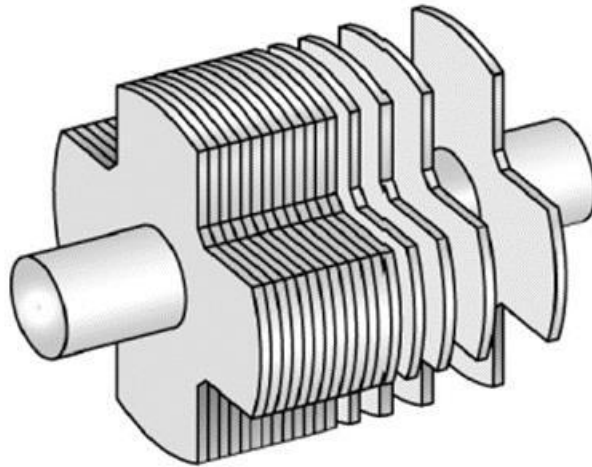
Rotor tarafından üretilen momentin büyüklüğü rotorun manyetik yapısına bağlıdır. Burada rotor yapısı ne kadar manyetik olarak anizotropik olursa moment üretimi de o kadar fazla olacaktır. Yani d ve q eksenleri arasındaki endüktans farkı (çıkıklık) ne kadar büyükse motorun moment üretme kapasitesi o kadar fazla olacaktır.

2.3 SynRM Farklı Rotor Yapıları

SynRM'lerin tarihsel gelişimine bakıldığında genellikle rotor geometrilerinin değiştiği görülmektedir. Bu bölümde farklı rotor yapılarının avantaj ve dezavantajları incelenmiş olup, çalışmanın devamında kullanılacak olan rotor yapısının özellikleri de anlatılmıştır.

2.3.1 Çıkık Kutuplu Rotor Yapısı

Temel olarak anizotropik rotor yapısının sahip üç farklı senkron relüktans motor yapısı vardır. Literatürde klasik tasarım olarak ifade edilen en basit rotor tipidir.



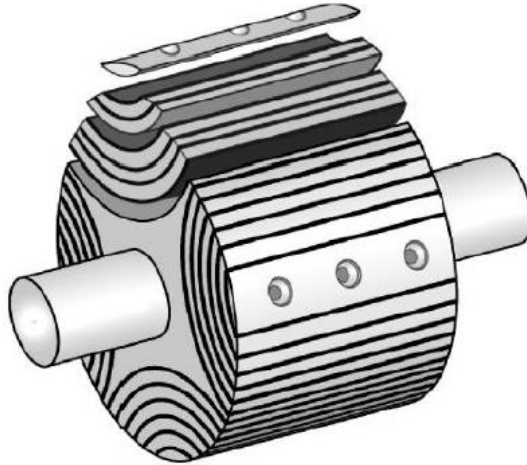
Şekil 2.4 Çıkık kutuplu klasik rotor tasarımı [43]

Rotordaki enine bölgelerden bir miktar malzemenin çıkarılması ile elde edilir. Tek parça çelikten veya enine lamine edilmiş olarak iki farklı tipte üretim yapılabilir. Bu rotor tipini kullanan makinalarda en yüksek çıkıntı oranı Cruickshank'ın tasarladığı klasik rotor yapısında elde edilmiştir [6]. Yapısının sağlam olmasından dolayı yüksek hızlı uygulamalar için kullanımı uygundur. Düşük çıkıklık oranına sahip olması nedeniyle güç faktörü ve verim değerleri de düşüktür [44,45].

Çıkık kutuplu rotor tasarımları düşük performans değerlerine sahip olmasına rağmen basit yapıları ve üretilebilirlik açısından kabul edilebilir rotor tasarımlarıdır. 1960'lı yıllarda şebeke kalkışlı uygulamalarda sıkça kullanılan bu tip motorlara olan ilgi gelişen teknoloji ile birlikte azalmıştır. Bunun başlıca sebebi düşük performans ve vektör kontrol yöntemine uygun motor tipleri olmamasıdır [46].

2.3.2 Eksenel Laminasyonlu [ALA] Rotor yapısı

Eksenel lamine edilmiş rotor tasarımı Kotsko'nun yapmış olduğu çalışmadan itibaren biliniyordu. Ancak ilk olarak 1966'da Cruickshank ve Menzies tarafından prototipleştirilmiştir [7,8].



Şekil 2.5 Dört kutup eksenle lamine edilmiş rotor tasarımı [43]

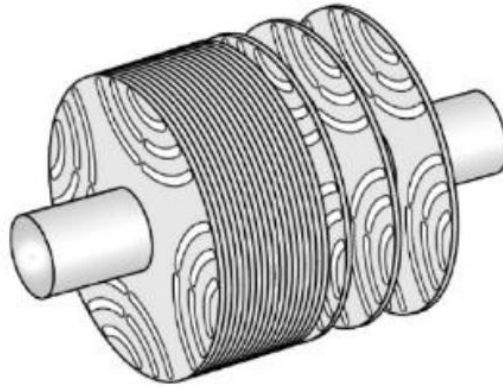
Var olan rotor yapıları arasından en yüksek çıkıklık oranına sahip olan rotor yapısı eksenle laminasyonlu rotor yapısıdır. Bunun sebebi q eksenine dik olacak şekilde dizilen akı bariyerlerinin q eksen endüktansı (L_q) üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olmasıdır. Öte yandan d eksenine yerleştirilen laminasyon saclarının d eksenine

üzerindeki akı geçişini kolaylaştırması sayesinde d eksen endüktansı (L_d) artmaktadır [8].

Çok sayıda kullanılan akı bariyerleri sayesinde hava aralığı harmonileri ve demir kayıpları azaldığı için motor verimi artmaktadır. Ancak tüm avantajlara rağmen eksenle laminasyonlu rotorun üretim şartları zordur ve maliyetlidir [47].

2.3.3 Enine Laminasyonlu Rotor Yapısı

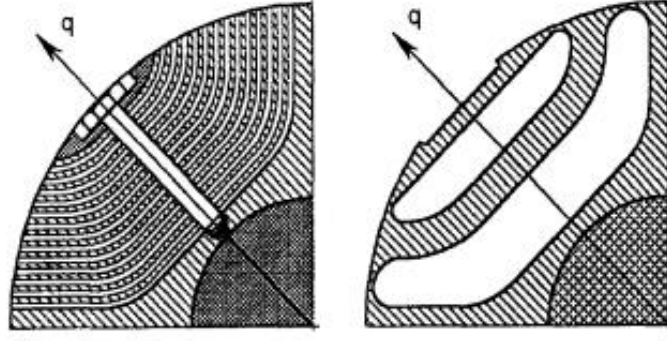
Enine laminasyonlu rotor yapısı klasik yassı laminasyonlardan oluşmaktadır. Üretim şartları ve maliyet açısından kullanılan rotor yapıları arasında en yaygın olarak tercih edilen rotor yapılarıdır. Asenkron motor ile hem performans hem de maliyet olarak yarışabilecek enine laminasyonlu senkron relüktans motorların araştırmalarına üreticiler tarafından ağırlık verilmiştir. Moment dalgalılığını düşürmek için rotor geometrisinde optimizasyon çalışması yapılmalıdır.



Şekil 2.6 Dört kutup enine lamine edilmiş rotor tasarımı [43]

2.3.4 Enine ve Eksenel Laminasyonlu Rotor Yapılarının Karşılaştırılması

Enine lamine rotorlar (TLA), tercih edilen akı yollarını elde etmek için akı bariyerlerinin delindiği standart yassı laminasyonlardan yapılır. ALA tipinde ise rotor laminasyonları manyetik olmayan malzeme ile karıştırılmıştır. ALA tipi rotor, literatürde 1923'ten beri tanıtılmıştır [1].



Şekil 2.7 a) Enine laminasyonlu rotor b) Eksenel laminasyonlu rotor [48]

TLA tipi rotorun kılçıkları esas olarak q eksenli relüktans değerini azaltır ve bu nedenle bu rotor tipi doğal olarak kılçıklara gerekmediği ALA tipi motordan daha düşük bir çıkıklık (L_d/L_q) oranına sahiptir. Manyetik teğet ağlar sayesinde rotor yüzeyi pürüzsüz hale getirilir ve böylece hava boşluğu akısı harmoniklerinin hacmini azaltma avantajına sahip olunur. Akı bariyerleri, q eksenli akısını azaltırken aynı zamanda çıkıklık oranını artırır. TLA rotor tipi muhtemelen uygun maliyetlerde üretilebilecek tek modeldir ve bu nedenle sincap kafesli indüksiyon motorları üreten fabrikalar bu tür motorlar üstüne yoğunlaşmaktadır. Hava boşluğu uzamsal harmoniklerinin neden olduğu rotor yüzey kayıpları ile ilgili olarak ince enine laminasyonlar da faydalıdır. Fakat bu rotor tipi ile mümkün olan en büyük endüktans oranlarına ulaşmak kolay olmayabilir.

ALA tipi rotor yapısı çok sayıda akı bariyerinin kullanılmasını, teğet ve iç kılçıklara tasarımda kullanılmamasının ve böylece mümkün olan en yüksek endüktans oranlarının elde edilmesini mümkün kılar. ALA tipi rotorda, hava boşluğu akısı harmonik içeriğini, moment dalgalanmasını ve demir kayıplarını azaltmak için çok sayıda akı bariyeri kullanılır.

Stator oluk açıklıkları, ALA yapısındaki girdap akımlarını indükleyen değişken hava boşluğu akı yoğunluğunu oluşturur. Bu nedenle, laminasyonlar ince ve son derece sağlam olmalıdır. Bununla birlikte, ALA tip rotoru üretimi bir sincap kafesli rotordan daha zor ve çok daha pahalıdır.

Yapılan bazı çalışmalar tork dalgalanmasını büyük ölçüde azaltmak için SynRM rotorunun bir oluk aralığıyla eğilmesini önermektedir. Bu eğiltme, ortalama tork

üzerinde küçük bir etkiye sahiptir. TLA tipi rotorun levhalarının eğrilmesi, ALA tipi rotorun serpiştirilmiş yapraklarına göre daha kolaydır.

Üretim nedenleriyle TLA tipi motor, endüksiyon motoru için ALA tipi motordan daha iyi bir seçenek gibi görünür. TLA tipi motor düşük maliyetlerle üretilebilir ve tork dalgalanmasını azaltmak için rotoru bükülebilir. Son yıllarda, asenkron motorların ve senkron relüktans motorların performansını kıyaslamak için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Çalışmalar temel olarak motor verimi ve güç faktörü üzerine odaklanmaktadır. IM (asekron motor) ile karşılaştırılabilir olan uygulanabilir SynRM rotor tipleri, enine lamine (TLA) ve eksenle lamine (ALA) rotorlardır. Kaburgalarından dolayı TLA-rotor, ALA tipinden daha düşük bir çıkıklık oranına sahiptir. Fakat TLA, IM motorunun rotor laminasyonlarının imalatında kullanılanla aynı tipte delme aletleri kullanılarak üretilebildiği için IM için daha iyi bir alternatif gibi görünmektedir. TLA eğri rotor endüktans oranını iyileştirmek için nispeten küçük bir hava boşluğuna ihtiyaç duyar.

2.4 Senkron Relüktans Motor Matematiksel Modeli

Elektrik motorlarında dönüşümler, daha kolay analiz ve hesaplamalar için 3 fazlı sistemlerin, 2 fazlı dq0 eksenine çevrilmesi için kullanılır. Böylece 3 fazlı AA sistemleri, direk (d), tümlev (q) ve sıfır (0) adlarıyla adlandırılan eksenlere dönüştürülerek bir DA sistemine çevrilmiş olur. 1929'da R.H. Park'ın yazdığı "Two Reaction Theory of Synchronous Machines" adlı makale ile dq0 dönüşümü senkron motorlar için yapılmıştır [49]. Daha sonra yapılan bütün bu dönüşümler Park dönüşümleri olarak genelleştirilmiştir. Park'ın yaptığı dönüşümle 3 fazlı bir senkron motorun, bütün stator parametreleri bir rotor referans noktasına göre çevrilmiş ve dq0 eksenleri kullanılarak analitik hesapları kolaylaştırılmıştır.

Relüktans motorları da senkron makineler sınıfına girdiğinden dolayı devre parametreleri ve matematiksel modeli ortaya çıkartılırken Park dönüşümü kullanılmıştır [49].

$$\frac{d\lambda_a}{dt} = V_a - i_a * R_s \quad (2.1)$$

$$\frac{d\lambda_b}{dt} = V_b - i_b * R_s \quad (2.2)$$

$$\frac{d\lambda_c}{dt} = V_c - i_c * R_s \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = |L_{abc}(\theta_{er})| * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$T_e = \frac{P_1}{2} * |i_a, i_b, i_c| * \left| \frac{\partial L_{abc}(\theta_{er})}{\partial \theta_{er}} \right| * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

(2.4) ve (2.5) numaralı denklemler kullanılarak üç fazlı sistemde motorun akı ve moment hesapları yapılabilir. (2.5) numaralı denklemde P_1 ile gösterilen kutup çifti sayısını temsil etmektedir. Burada endüktanslar, rotor konum açısının fonksiyonları durumundadır ve yalnızca sinüs olarak değiştikleri kabul edildiklerinde analitik hesaplarla çözülebilmektedir. Buna göre;

$$L_{aa} = L_{s\sigma} + L_h + L_0 * \cos 2\theta_{er} \quad (2.6)$$

$$L_{bb} = L_{s\sigma} + L_h + L_0 * \cos \left(2\theta_{er} + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.7)$$

$$L_{cc} = L_{s\sigma} + L_h + L_0 * \cos \left(2\theta_{er} - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.8)$$

$$L_{ab} = -\frac{L_h}{2} + L_0 * \cos \left(2\theta_{er} - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.9)$$

$$L_{bc} = -\frac{L_h}{2} + L_0 * \cos 2\theta_{er} \quad (2.10)$$

$$L_{ac} = -\frac{L_h}{2} + L_0 * \cos \left(2\theta_{er} + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.11)$$

Park dönüşümü uygulandığında d ve q gerilim, akı ve endüktans denklemleri 2.12 ve 2.13 gibi yazılabilir;

$$\frac{d\lambda_d}{dt} = V_a - i_d * R_s + \omega_r * \lambda_q; \lambda_d = i_d * L_d; L_d = L_{s\sigma} + L_{dm} \quad (2.12)$$

$$\frac{d\lambda_q}{dt} = V_q - i_q * R_s + \omega_r * \lambda_d; \lambda_q = i_q * L_q; L_q = L_{s\sigma} + L_{qm} \quad (2.13)$$

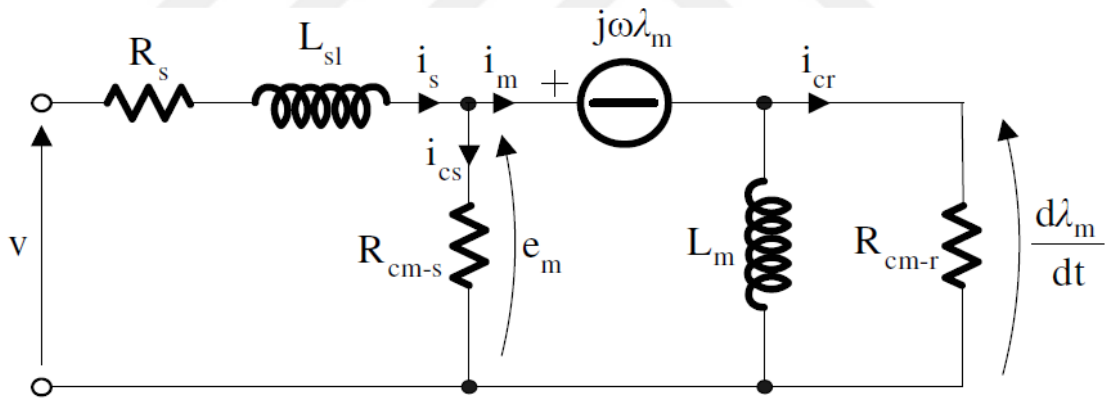
Burada d ve q eksenlerindeki manyetizasyon endüktanslarının değeri ise 2.14'te ki şekildedir;

$$L_{dm} = \frac{3}{2} * (L_h + L_0); L_{qm} = \frac{3}{2} * (L_h - L_0) \quad (2.14)$$

Bütün elde edilen denklemlerle, motorun d-q eksenindeki moment denklemi 2.15'teki gibi elde edilebilir;

$$T_e = \frac{3}{2} * P_1 * (L_d - L_q) * i_d * i_q \quad (2.15)$$

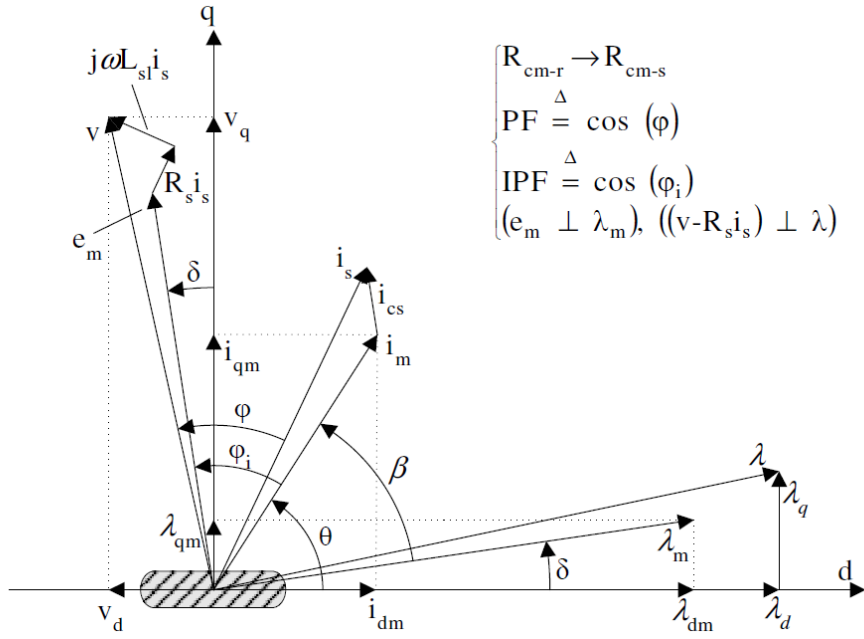
(2.15) numaralı denklemde L_d endüktansı i_d akımına bağlı bir fonksiyondur. Bilindiği gibi bu analitik denklemler yazılırken değişimin sinüs şeklinde olduğu kabul edilmiştir. Yapılan dönüşümle ortaya çıkan denklem, moment üretiminin d ve q eksenlerinde oluşan endüktansların farkına ne kadar bağlı olduğunu göstermiştir [1]. Son olarak senkron relüktans motorları için bir eşdeğer devre modeli çıkartılabilir. Şekil 2.8'de elde edilen devre modeli verilmiştir.



Şekil 2.8 Eşdeğer devre modeli [40]

Yukarıdaki eşdeğer devre modeli hem d hem de q eksenlerinin ortak bir referans noktasına göre çizilmiştir. Burada L_{sl} toplam kaçak akı endüktansını; V , d ve q eksenlerinin toplam gerilimini; R_s statordaki sargı direncini, e_m ise hava aralığında bulunan elektromotor gerilimini temsil eder. R_{cm} çekirdek kayıpları olup, L_m manyetizasyon endüktansını, λ_m ise manyetizasyon akısını göstermektedir. Burada e_m doğrudan λ_m değerine bağlıdır.

Bütün bu değerlerin d-q koordinat düzlemine yerleştirilişi ise aşağıdaki gibidir;



Şekil 2.9 d-q koordinat düzleminde elektriksel değerlerin yerleştirilmesi [39,40]

2.4.1 SynRM d-q koordinat sisteminde elektromanyetik tork

Bütün elektrik makinelerinde iki önemli çıktı vardır; moment/akım kapasitesi ve verimlilik. Senkron relüktans motorlarında moment denklem 2.16 'da ki gibi ifade edilir;

$$T = \frac{3p}{2} (L_d - L_q) i_d i_q \quad (2.16)$$

d, q indüktansları denklem 2.17 ve 2.18 'de verilmiştir.

$$L_{ds} = L_{Id} + L_{md} \quad (2.17)$$

$$L_{qs} = L_{Iq} + L_{mq} \quad (2.18)$$

I değerlerini açıkça yazacak olursak denklem 2.19 ve 2.20 ile ifade edilir.

$$I_{ds} = I_s \cos \varphi \quad (2.19)$$

$$I_{qs} = I_s \sin \varphi \quad (2.20)$$

Elektromanyetik momenti stator akım genliği ve MMK açısı cinsinden yazacak olursak denklem 2.21 ile ifade edilir.

$$T = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (L_d - L_q) i_d i_q = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (L_d - L_q) I_s^2 \sin 2\theta \quad (2.21)$$

Burada p kutup sayısını, I_s stator akımını ve θ da akım açısını simgeler. Diğer yandan motorun düşük hızda döndüğü kabul edilince verim değeri denklem 2.22’de ki gibi verilir.

$$\eta = \left(1 + \frac{P_{\text{loss}}}{\omega_r T}\right)^{-1} \quad (2.22)$$

Burada P_{loss} ifadesi ise bakır kayıplarına eşit olmak üzere denklem 2.23’de ki gibi ifade edilir.

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{Cu}} = 3R_s I_s^2 \quad (2.23)$$

Verim ifadesi düzenlenirse denklem 2.24 ortaya çıkmış olur.

$$\eta = \left(1 + \frac{1}{\frac{\omega_r}{3R_s} \left(\frac{T}{I_s^2}\right)}\right)^{-1} \quad (2.24)$$

Yukarıdaki denklemler göstermiştir ki demir ve yan kayıplar ihmal edildiğinde T/I_s oranını arttırmak, verimi arttırmakla eşdeğerdir.

Bu durum yüksek hızlarda geçerliliğini yitirecektir. Her ne kadar ortalama momenti etkilemese de kötü tasarımıyla ortaya çıkacak yüksek moment dalgalılığı, demir kayıplarını arttırarak verimliliğin düşmesine sebep olacaktır.

Öte yandan T/I_s oranını arttırmak direk olarak $(L_d - L_q)$ farkı olarak tanımlanan çıkıklık faktörüne bağlıdır. Bu faktörün arttırılması ise geometrik parametrelerin devreye girmesini sağlayacaktır [50].

Momenti bağlayan ve kayıpları bağlayan parametreler birbirinden farklı olması, tasarımda yüksek moment ile yüksek verimlilik arasında optimum bir nokta bulmayı gerektirmektedir.

2.4.2 Moment/Güç Oranı ve Güç Katsayısı

Bir motor tasarımında öne çıkan diğer iki karakteristik ise moment/güç oranı ve güç katsayısıdır. Denklem (2.21) ve Şekil 2.9 ‘da ki vektör diyagramı kullanılarak T/I_s oranı çıkartılabilir. Bu oranı çıkartmak için denklem (2.25)’ten faydalanılır;

$$\xi = \frac{L_d}{L_q} \quad (2.25)$$

Yukarıdaki ifade bize çıkıklık oranını vermektedir.

$$T = k_1 L_d p \left(1 - \frac{1}{\xi}\right) i_s^2 \sin\theta \cos\theta \quad (2.26)$$

$$KVA = k_2 v_s i_s = k_2 \omega_r i_s \sqrt{L_d^2 i_d^2 + L_q^2 i_q^2} = k_2 \omega_r i_s L_d \sqrt{i_d^2 + \frac{i_q^2}{\xi^2}} \approx k_2 \omega_r i_s L_d i_d \quad (2.27)$$

$(i_d \gg \frac{i_q}{\xi})$ kabul edilir ise;

$$KVA \approx k_2 \omega_r L_d i_s^2 \cos\theta \quad (2.28)$$

Şeklinde ifade edilebilir. Bu ifadelerden sonra moment/güç ifadesi yazılacak olursa;

$$\frac{T}{KVA} = \frac{k_1 L_d p \left(1 - \frac{1}{\xi}\right) i_s^2 \sin\theta \cos\theta}{k_2 \omega_r L_d i_s^2 \cos\theta} \approx k \frac{p}{\omega_r} \left(1 - \frac{1}{\xi}\right) \sin\theta \quad (2.29)$$

Eğer güç faktörü yazılacak olursa;

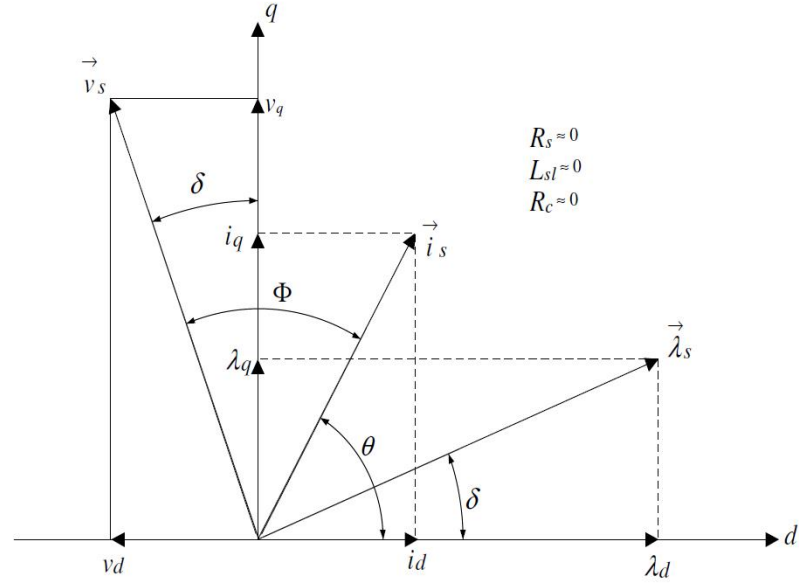
$$IPF = \cos\Phi = \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{\frac{L_d i_d + i_q}{L_q i_q + i_d}}{\frac{L_d - 1}{L_q}}\right)\right) = (\xi - 1) \sqrt{\frac{\sin 2\theta}{2(\tan\theta + \xi^2 \cot\theta)}} \quad (2.30)$$

Güç faktörünün en yüksek değerine ulaşması için $\tan\theta = \sqrt{\xi}$ kabulü yapılırsa bu durumda maksimum güç faktörü;

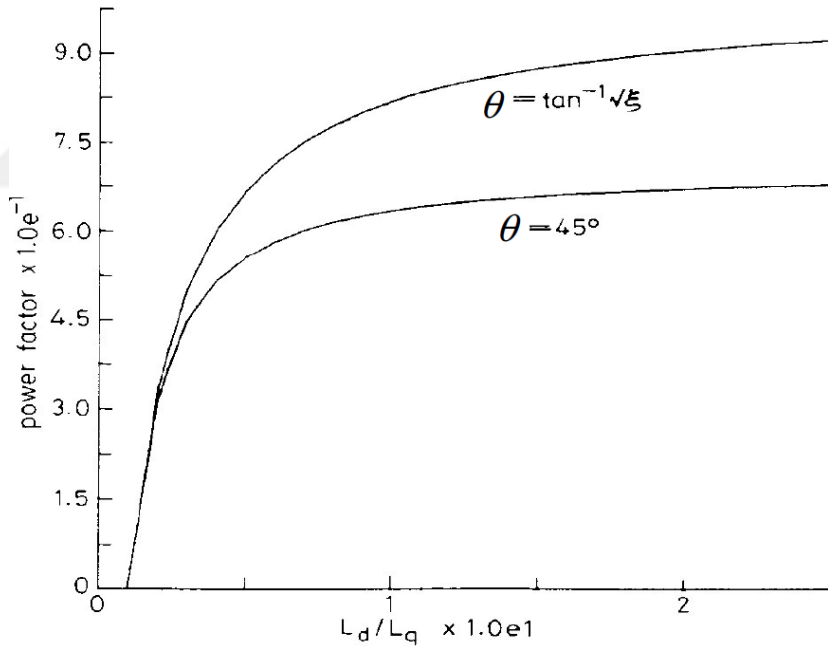
$$IPF_{\max} = \frac{\xi - 1}{\xi + 1} \quad (2.31)$$

şeklinde yazılabilir.

Formüller gösteriyor ki çıkıklık oranı T/KVA ve güç faktörü parametrelerini direk olarak etkiliyor. Elde edilen daha yüksek çıkıklık oranı daha yüksek moment/güç oranı ve güç faktörü demektir. Şekil 2.11 çıkıklık oranı ile güç faktörünün arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Daha ayrıntılı hesap için statorun kaçak reaktansı ve sargı direnci de eklenirse güç faktörü bir nebze iyileşmektedir. Fakat temel çıkıklık oranı, motorun güç faktörü için iyi bir fikir vermektedir.



Şekil 2.10 Vektör diyagramı [53]



Şekil 2.11 Güç faktörü – çıkıklık oranı ilişkisi [50]

Sonlu elemanlar yöntemi mühendisliğin pek çok farklı dalında problemlerin çözümü için kullanıldığı gibi elektrik makinalarının tasarımında da sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bir elektrik makinasının tasarımında ele alınacak problemler elektrik, mekanik ve ısı problemlerdir.

Günümüzde bu temel problemlerin çözümlerinin daha hızlı ve güvenilir olarak gerçekleştirilmesi için bilgisayar kullanımı giderek artmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında sonlu elemanlar yöntemini kullanan ticari bir paket programı olan ANSYS Maxwell paket programı kullanılmıştır.

3.1 Maxwell Denklemleri

Elektromanyetik problemlerin SEY ile çözümüne bakılacak olursa aslında belirlenen sınır şartları altında Maxwell denklemlerinin çözümü olduğu görülmektedir. Bu bölümde Maxwell tarafından tanımlanan denklemler kısaca açıklanmıştır.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.4)$$

Denklem 3.1-3.4 arasında $\mathbf{E}$ [V/m] elektrik alan şiddeti, $\mathbf{D}$ [C/m] elektriksel akı yoğunluğu, $\mathbf{H}$ [A/m] manyetik alan şiddeti ve $\mathbf{B}$ [T] manyetik akı yoğunluğudur. Alanların zamanla değişmediği durumlara elektrostatik ve manyetostatik durumlar denir ve bu durumlarda türev bileşenleri sıfır olur.

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (3.5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (3.7)$$

Yukarıdaki denklemlerden de görüldüğü gibi elektrik alan ve manyetik alan arasında herhangi bir etkileşim yoktur. Sabit bir alan varken elektrik alan ve manyetik alan birbirinden bağımsızdır.

Yukarıda verilen denklemlerde bilinmeyen sayısının denklem sayısından fazla olmasından dolayı tanımsız bir denklem setidir. Ancak aşağıda verilen denklemler ile ilişkilendirildiği zaman anlamlı bir hal alır.

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3.10)$$

Denklem 3.8-3.10'da ϵ bir malzemenin dielektrik sabitini [F/m], μ manyetik geçirgenliği [H/m] ve σ iletkenliğini [siemens/m] ifade eder.

3.2 Sınır Koşulları

Elektromanyetik bir problemin çözümünde sonlu elemanlar yönteminin kullanılabilmesi için sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Sınır koşulları Dirichlet, Neumann ve Karma sınır koşulları olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilir. Sonlu elemanlar yönteminde en sık karşılaşılan sınır koşulları Dirichlet ve Neumann sınır koşullarıdır.

Dirichlet sınır koşulları, problemin tanımlı olduğu uzayın sınırlarındaki noktalara vektör potansiyelleri atanarak, akı çizgilerinin sınıra paralel olması sağlanır. Neumann sınır koşullarında ise vektör potansiyellerinin türevleri 0 olarak atandığı için akı çizgileri bu bölgeleri dik olarak keser. Eğer Dirichlet sınır koşulları belirlenmiş ise, Neumann sınır koşulları da otomatik olarak atanacaktır.

REFERANS MOTORUN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

Çalışma kapsamında referans olarak 15 kW gücünde 4 kutuplu bir asenkron motor alınmıştır. Bu motor seri üretimde pompa ve fan gibi değişik uygulamalarda kullanılan bir motordur. Endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilen asenkron motorların bakım sürelerinin uzun olması, düşük maliyetli olması ve dayanıklı olması gibi avantajları vardır. Tablo 4.1’de asenkron motora ait etiket bilgileri verilmiştir.

Tablo 4.1 Referans motor etiket bilgileri

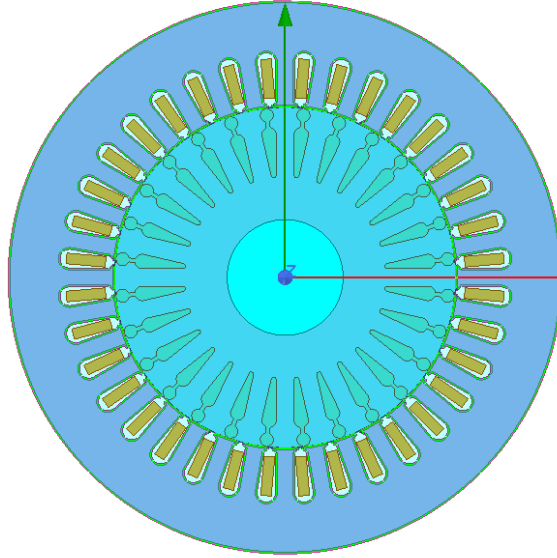
Parametre	Değer
Çıkış Gücü [kW]	15
Gerilim [V]	400/690
Akım [A]	30,9/
Frekans [Hz]	50
Kutup Sayısı	4
Devir sayısı [min^{-1}]	1482

Referans alınan motorun stator yapısı 36 oluklu olup, rotorunda 28 rotor çubuğu bulunmaktadır. Stator ve rotor malzemesi olarak aynı manyetik malzeme (M700-50A) seçilmiştir ve rotor çubuklarında ise alüminyum kullanılmıştır.

4.2. Referans Motorun Modellenmesi

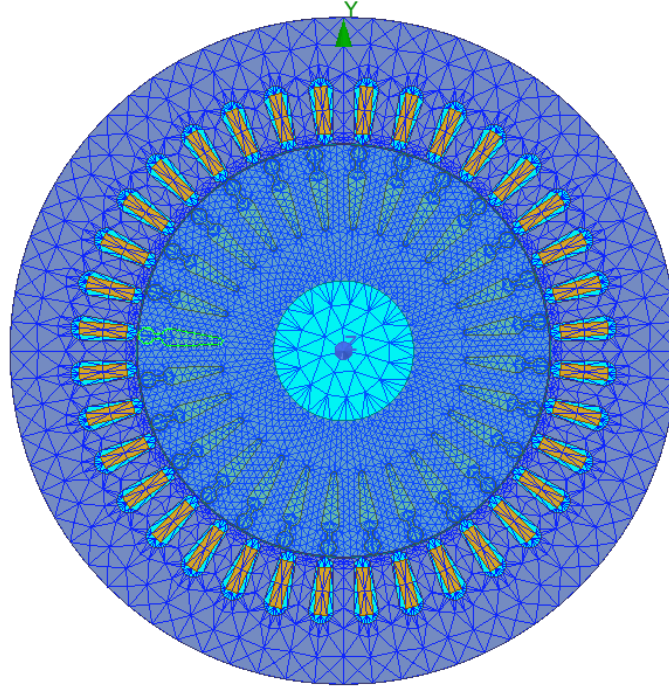
Tasarımı yapılan motorun stator, rotor geometrileri sonlu elemanlar analizi yapılmak üzere ANSYS Maxwell 2D programına girilmiştir. Malzeme bilgisi (B-H eğrisi ve malzeme kayıp katsayıları) programa eklenmiştir. Kullanılacak olan B-H eğrisi Şekil 4.3’te verilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi birçok alanda kullanılmaktadır ve tasarım sonuçlarının hızlıca görülüp yorumlanması ve yapılacak olan ilk numune hakkında önceden bilgi ve görüş edinilmesine olanak sağlamaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ve bu yöntemi kullanarak analiz yapan programlar özellikle manyetik devrelerde meydana gelebilecek doyma etkilerini

gözlemlemek için sıklıkla kullanılır. Sonlu elemanlar yöntemine kullanılacak olan modele ait 2D Şekil 4.1’ de verilmiştir



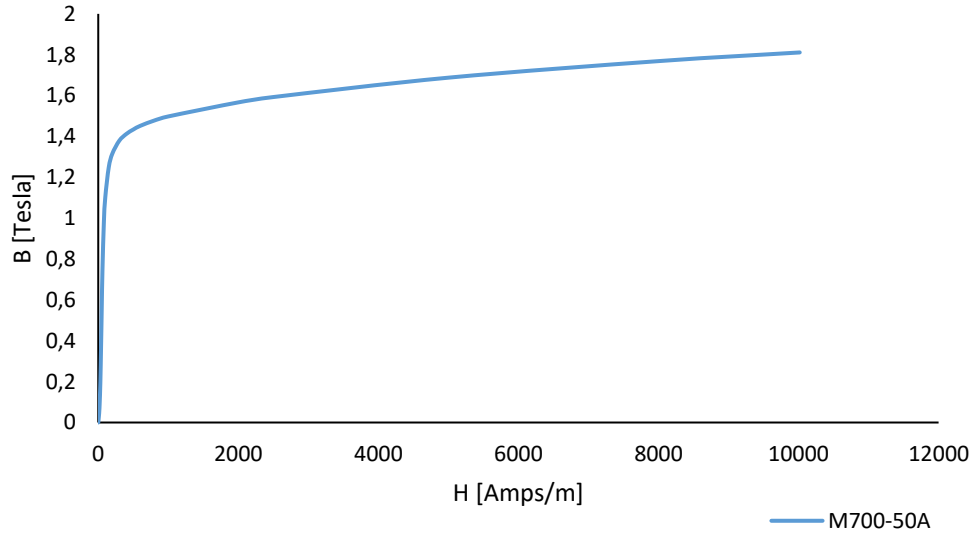
Şekil 4.1 Referans asenkron motorun modellenmiş geometrisi

Seri üretimde olan referans motorun modellenmesinde bağlantı tipi olarak üçgen bağlantı kullanılmıştır. Ağ yapısı olarak üçgensel elemanlar kullanılmıştır. Hesaplama süresi açısından kullanılan ağ yapısı ve sayısı büyük önem kazanmaktadır. Hassas sonuçların elde edilmesi için ağ yapısı elemanların küçük seçilmesi gerekir ancak küçük seçilen ağ yapısı analiz süresini uzatacaktır. Motor ağ yapısına ait görsel Şekil 4.2’de verilmiştir. Seri üretimde olan asenkron motorun üretimde kullanılan manyetik sac malzemesine ait B-H eğrisi Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.2 Modele ait ağ yapısı

B-H Eğrisi



Şekil 4.3 Referans modele ait manyetik malzeme

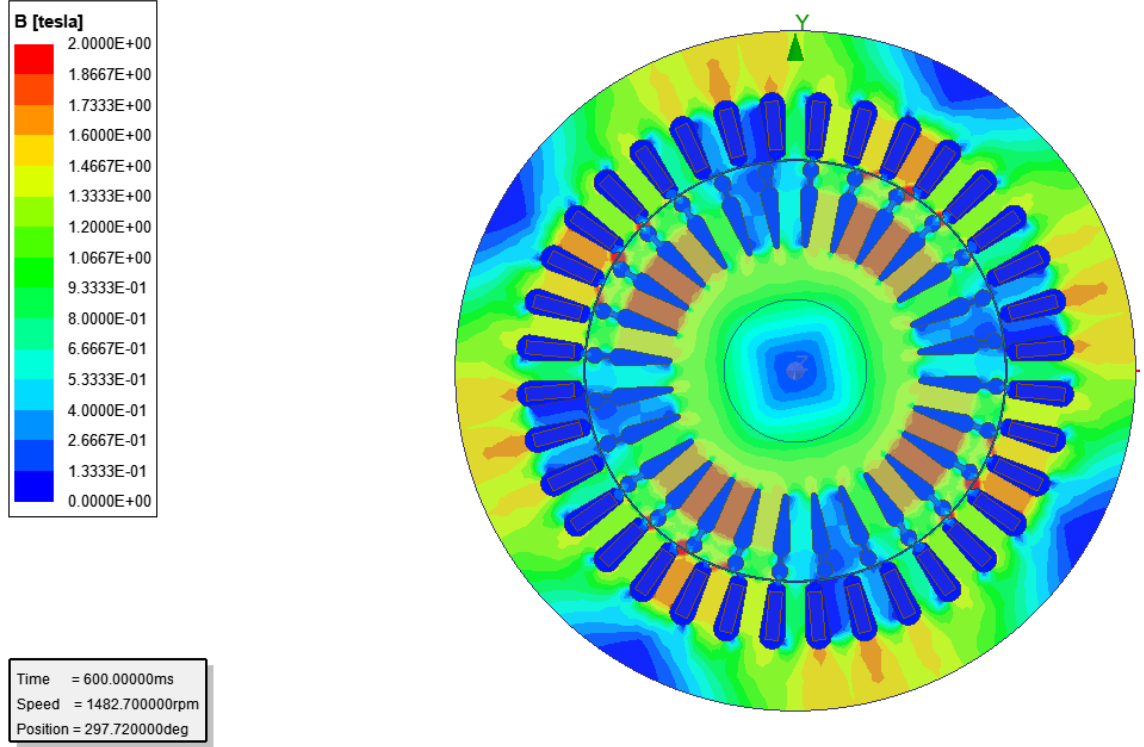
Ayrıca M700 saca ait malzeme kayıp katsayılarının 50 Hz'deki değerleri Tablo 4.2' de verilmiştir. M700 sacın öz direnci $25 \mu\Omega\text{cm}$, sac kalınlığı ise 0,5 mm'dir.

Tablo 4.2 M700 sac malzemesinin 50Hz'deki kayıp katsayıları

B(T)	H(A/m)	W/kg	VA/kg
0,1	67,8	0,05	0,14
0,2	88,3	0,16	0,36
0,3	99,2	0,37	0,63
0,4	108	0,59	0,92
0,5	116	0,84	1,23
0,6	124	1,12	1,58
0,7	132	1,43	1,96
0,8	142	1,77	2,38
0,9	152	2,15	2,84
1	164	2,57	3,36
1,1	180	3,03	3,96
1,2	206	3,55	4,71
1,3	254	4,14	5,76
1,4	363	4,83	7,57
1,5	690	5,68	12,4
1,6	1760	6,54	30,3
1,7	4230	7,29	79,7
1,8	8130	7,81	172

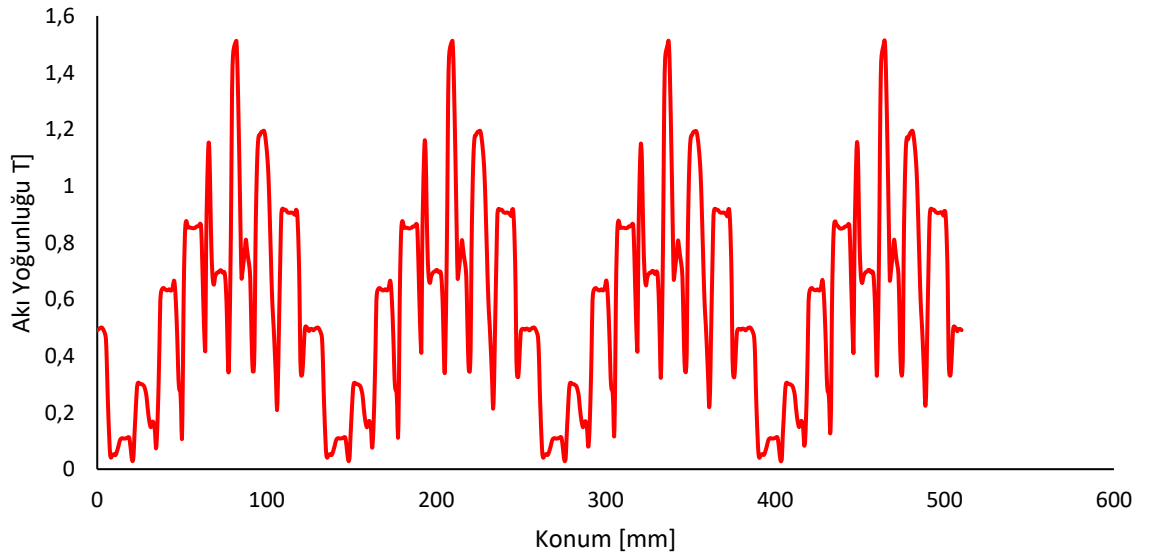
4.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi Analiz Sonuçları

Senkron relüktans motora referans olarak seçilen 15 kW 4 kutuplu asenkron motorun sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analiz sonuçları paylaşılmıştır. Analiz çıktılarında en önemli parametreler olan manyetik akı yoğunluğu, hava aralığı akı yoğunluğu, motor momenti, motor faz akımları gibi parametreler aşağıda verilmiştir. Şekil 4.4 incelenirse motorun stator ve rotor çevresindeki en büyük akı yoğunluk değerleri görülebilir. Bu değerler stator boyunduruğu çevresinde 1.4 T, stator dişlerinde 1.65 T olarak görülmüştür. Rotor baralarında ise en büyük akı yoğunluğu değeri yaklaşık 1.5 T olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.4 Motora ait akı yoğunluğu dağılımı

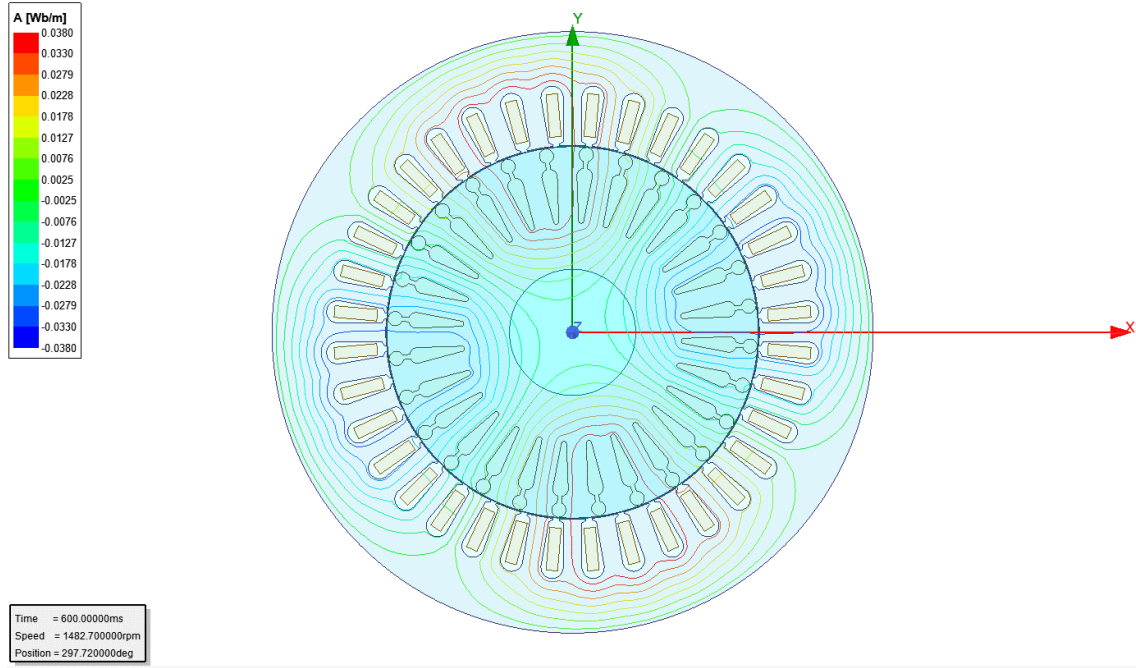
Hava Aralığı Akı Yoğunluğu (T)



Şekil 4.5 Hava akısı normal bileşeni

Motorun analiz sonuçlarını doğrulamanın yapılabileceği en önemli noktalardan biri de manyetik akı çizgileridir. Manyetik akı çizgileri ile kaçak akı yolları ve motorun

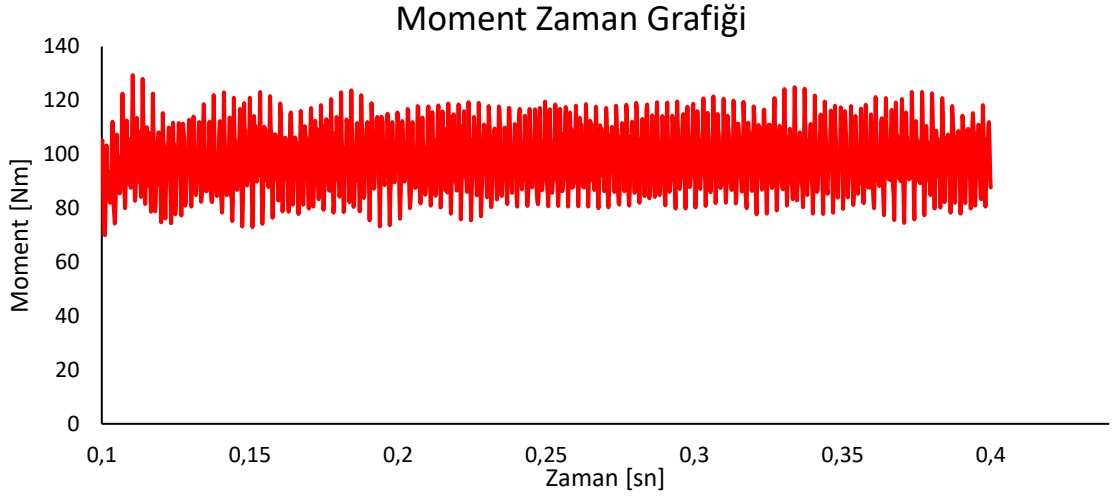
kutup sayısına dair bilgi vermektedir. Şekil 4.6 'da motora at manyetik akı çizgileri verilmiştir.



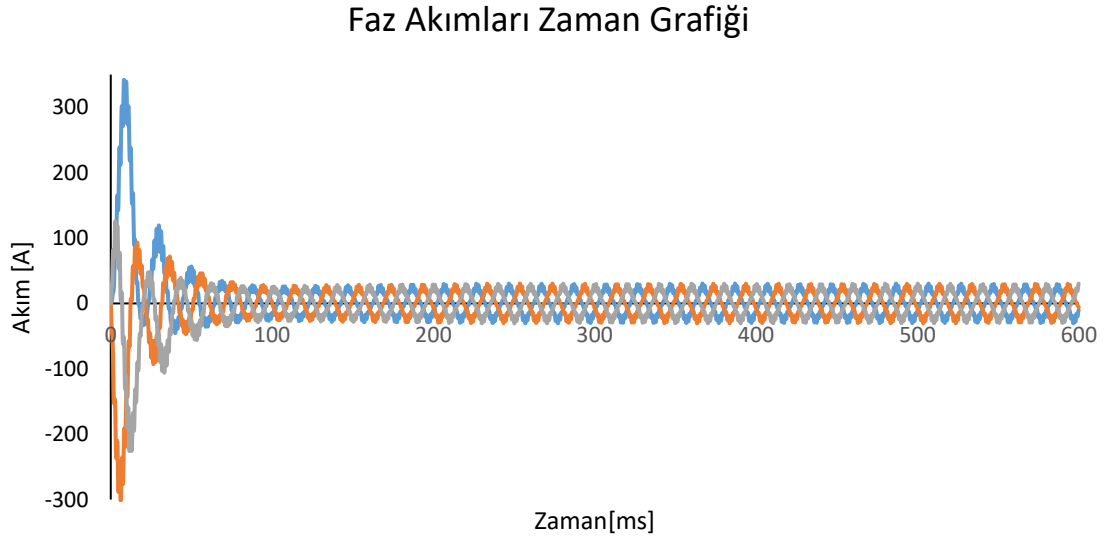
Şekil 4.6 Motorun manyetik akı çizgileri

Şekil 4.6 incelendiği zaman motorun akı çizgilerinden 4 kutubun olduğu net olarak görülmektedir.

Referans motor için analiz sonuçlarından elde edilen ortalama moment değeri 96,5 Nm olarak hesaplanmıştır. Bu değer test değerleri ile örtüşmektedir. Aynı zamanda faz başına çekilen akım değerleri verilmiş olup akımların dengeli olduğu görülmüştür. Faz başına akım değerleri yaklaşık olarak 16,5 A etkin değere sahiptir.



Şekil 4.7 15 kW asenkron motora ait moment-zaman grafiği



Şekil 4.8 15 kW asenkron motora ait faz akımları

Sonuçta referans olarak seçilen asenkron motorun manyetik analiz çıktıları ile test sonuçlarının birbiriyle örtüştüğü görülmüştür.

SENKRON RELÜKTANS MOTOR TASARIMI

Referans olarak alınan asenkron motorun doğru bir şekilde modellenmesinden sonra tasarımı gerçekleştirilecek olan senkron relüktans motorun tasarımına başlanmıştır.

Tasarım aşamasında ilk olarak senkron relüktans motorun tasarım parametreleri belirlenerek Tablo 5.1’de bu tasarım parametreleri paylaşılmıştır. Tasarım parametrelerinden elde edilen sonuçlara göre nihai tasarıma karar verilmiştir.

Tablo 5.1 Tasarım parametreleri

Tasarım Parametreleri	Sabit Tutulan Parametreler
Bariyer Sayısı	Kutup Sayısı
Bariyer Şekli	Sarım Sayısı
İzolasyon Oranı	Sargı Dağılımı
Dış Kaburga Kalınlığı	Stator Geometrisi
Köprü Kalınlığı	Manyetik Malzeme

Tasarım parametreleri seçilirken rotor yapısı üzerindeki parametreler dikkate alınmıştır. Referans motorun stator geometrisi, sarım bilgileri, sargı dağılımı ve malzeme yapısı gibi parametreler sabit tutulmuştur. Tasarım parametreleri arasında yer alan bariyer sayısı, bariyer şekli, izolasyon oranı gibi parametreler senkron relüktans motorun tasarımındaki en önemli parametrelerden olup bu parametreler çıkış momenti ve moment dalgalılığı gibi tasarım çıktılarını direkt olarak etkilemektedir.

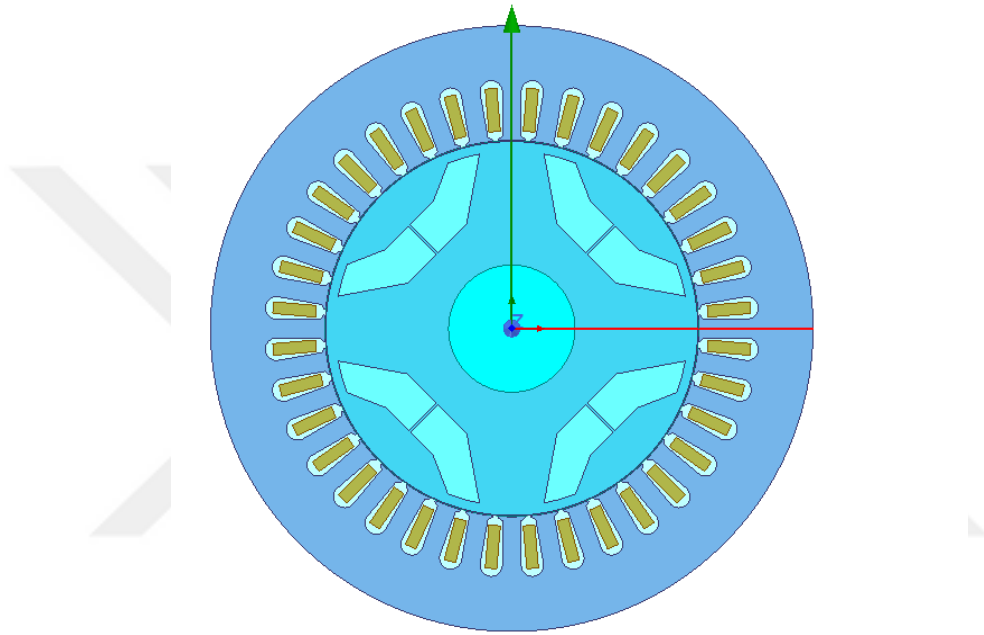
5.1 Bariyer Sayısı ve Şeklinin Belirlenmesi

Tasarım parametrelerinden olan bariyer sayısının ve bariyer şeklinin motorun performansına olan etkileri incelenmiştir. Bariyer sayısı kadar bariyer şeklinin de motorun çıkış momenti ve moment dalgalanması üzerine olan etkisi büyüktür. Bu

nedenle literatürde sıkça karşılaştırılan köşeli bariyer ve yuvarlak bariyer yapıları üzerinde analizler yapılarak sonuçlar paylaşılmıştır.

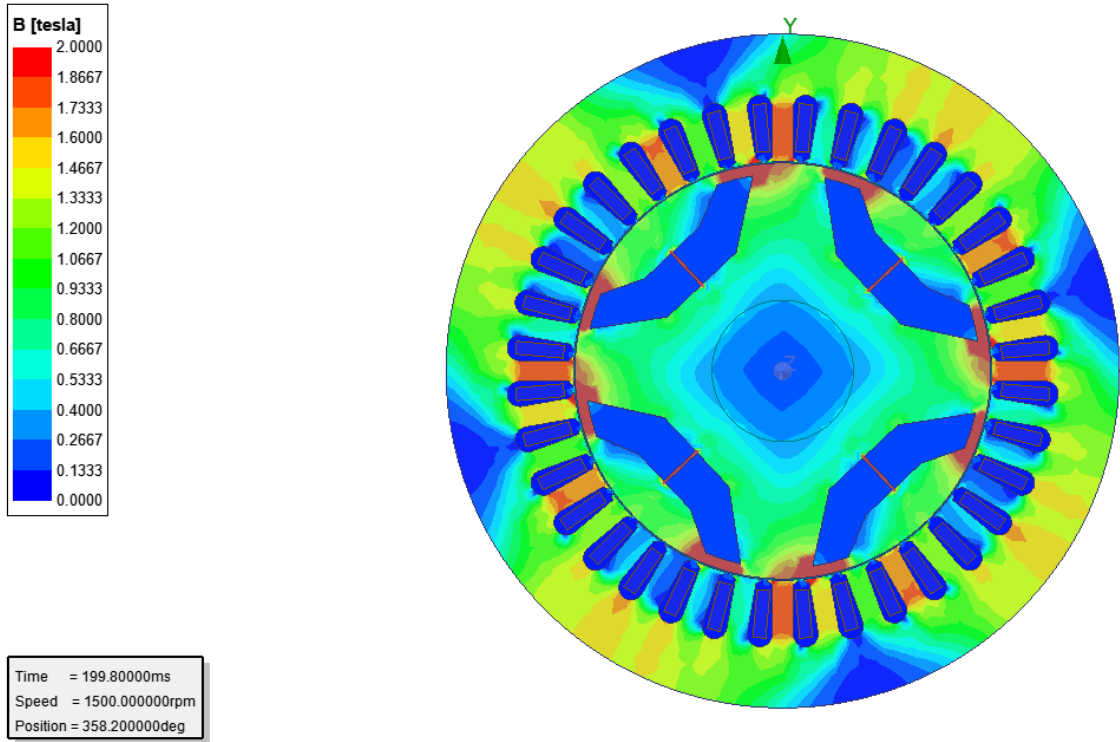
5.1.1 Tek ve Köşeli Bariyerli Rotor Yapısı

Bariyer sayısının ve şeklinin motor performansına olan etkisini incelemek için ilk olarak tek ve köşeli bariyerli bir rotor geometrisi oluşturulmuş ve optimizasyon çalışması yapılmıştır. Şekil 5.1’de tek bariyerli yapıya ait rotor geometrisi verilmiştir.



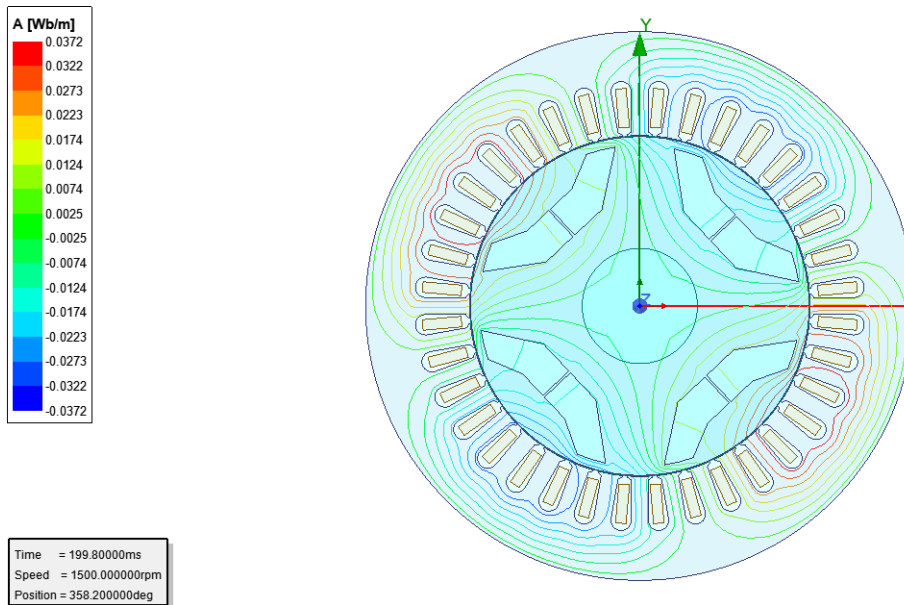
Şekil 5.1 Tek bariyerli yapının 2d görünümü

Şekil 5.1’de verilen rotor geometrisinde köşeli bariyer yapısı kullanılmıştır. Şekil 5.2’de bu geometriye ait akı yoğunlukları verilmiş olup stator bölgesindeki en yüksek akı değeri 1,75 T civarındadır. Rotorda yer alan akı bariyerlerinin etrafındaki kısmı doymalar hariç akı yoğunluğu 1,25 T civarındadır.



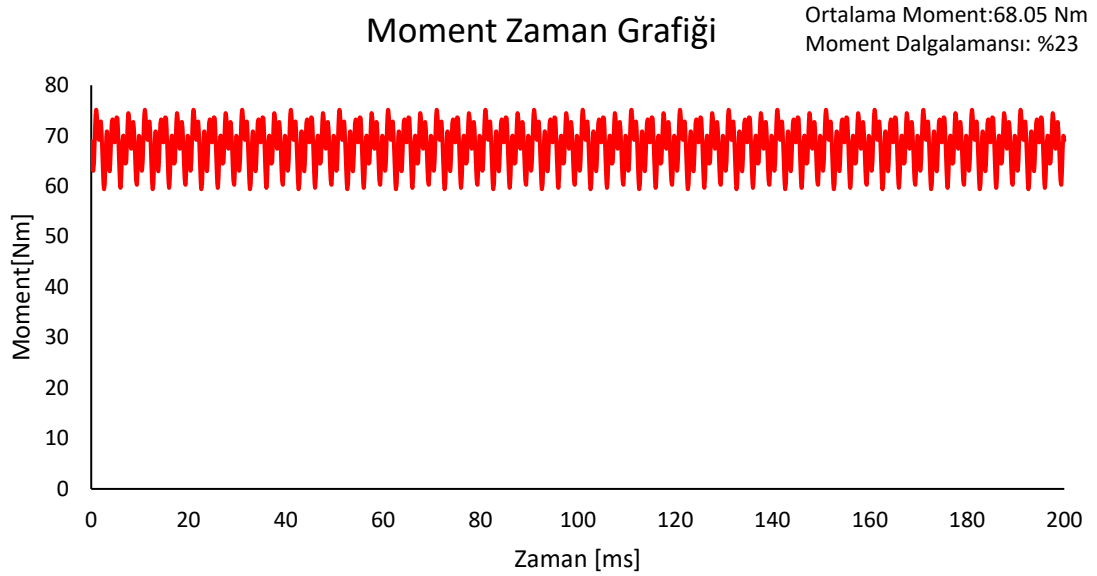
Şekil 5.2 Tek ve köşeli bariyerli yapı için manyetik akı yoğunlukları

Şekil 5.3'te tek bariyerli köşeli akı bariyerlerine sahip geometriye ait akı yolları görülmektedir. Akı yollarının dağılımına bakılarak rotor kutup sayısının referans motor ile aynı kutup sayısında alındığı görülebilmektedir.



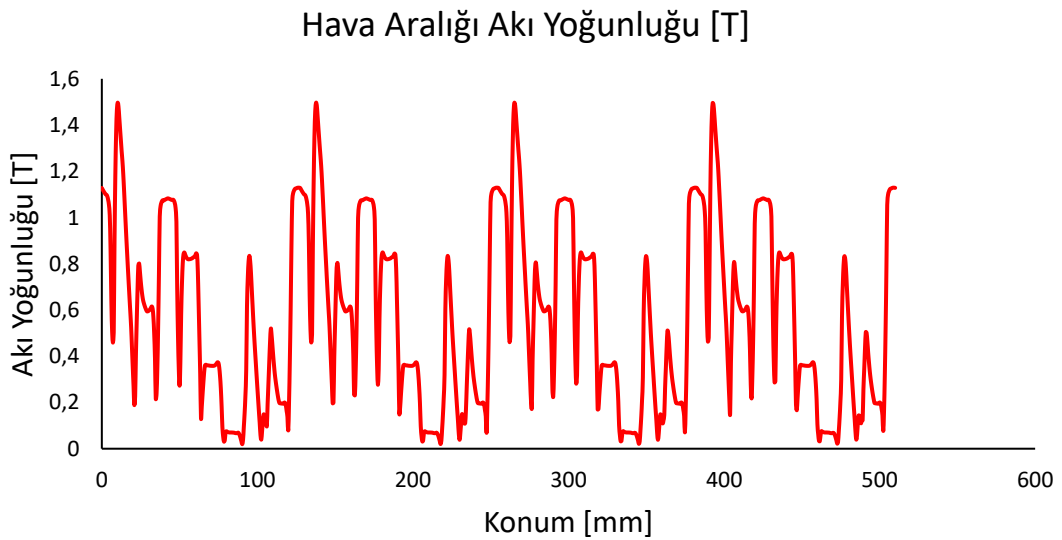
Şekil 5.3 Tek ve köşeli bariyerli yapı için manyetik akı yolları

Şekil 5.4'te bu geometriye ait moment-zaman grafiği görülmektedir. Motora ait ortalama moment değeri 68 Nm civarında olup tepeden tepeye moment farkı 15,7 Nm'dir.



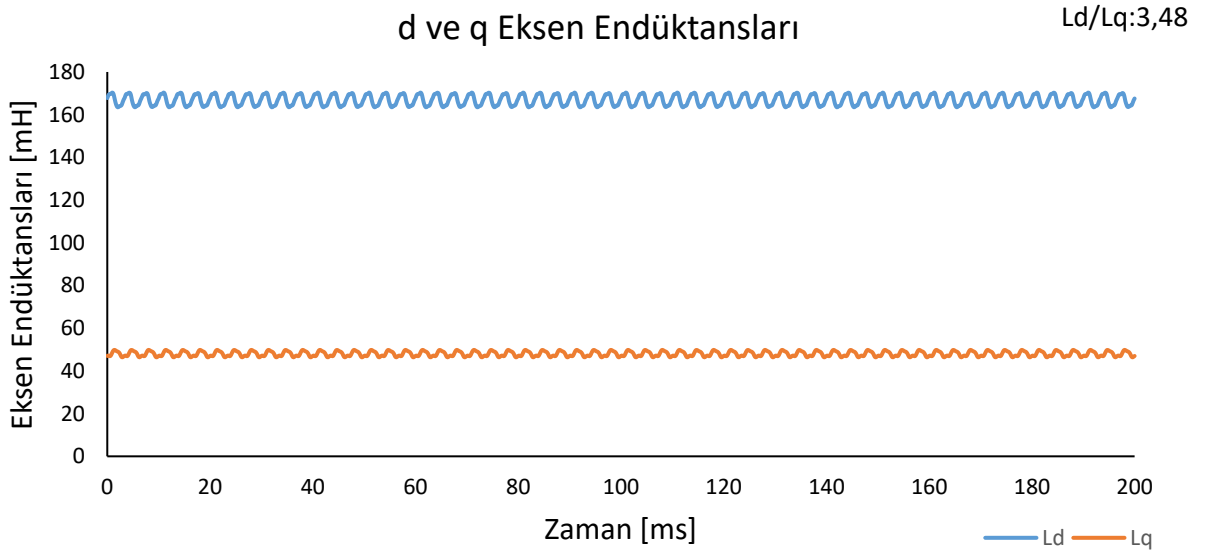
Şekil 5.4 Tek ve köşeli bariyerli yapı için moment zaman grafiği

Şekil 5.5'te tek bariyerli köşeli akı bariyerine sahip rotorun hava aralığındaki akı yoğunlukları görülmektedir.



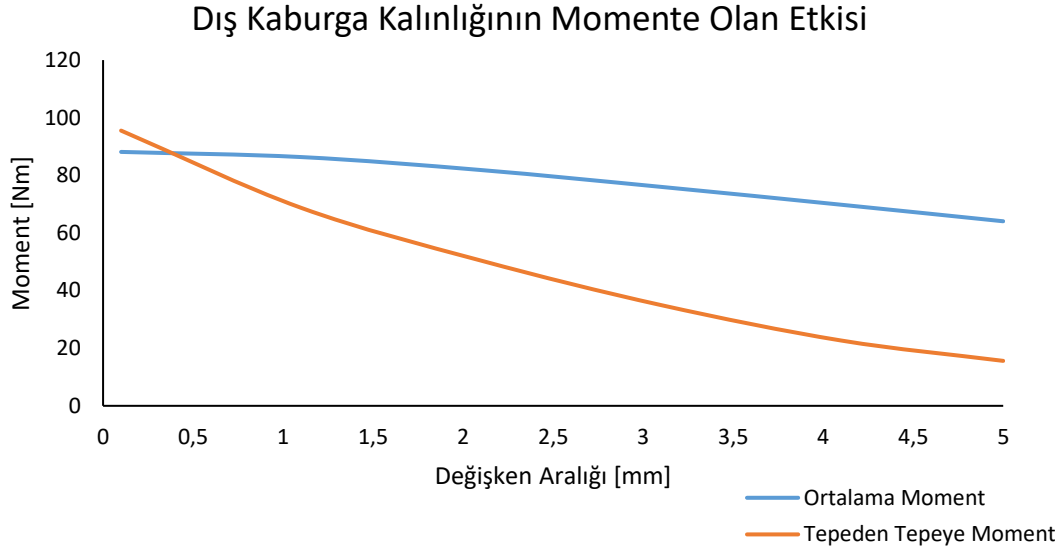
Şekil 5.5 Hava aralığı akı yoğunlukları

Şekil 5.6 'da motor performansına büyük etkisi olduğu bilinen çıkıklık oranı (L_d/L_q) değerine ait grafik verilmiştir. Çıkıklık oranını ne kadar büyük olursa motorun performansının o kadar iyi olduğu bilinmektedir.



Şekil 5.6 d ve q eksen endüktansları

Rotor geometrisinin son halini alması için rotor geometrisine ait bazı büyüklüklerin seçiminde parametrik analizler yapılmıştır. Şekil 5.7 'de motordaki kaçak akıları ve manyetik doyumu büyük oranda etkileyen dış kaburga kalınlığı için elde edilen analiz sonuçları verilmiştir. Dış kaburga kalınlığının doymalara izin vermeyecek kadar kalın, kaçak akılara izin vermeyecek kadar ince olması istenir.



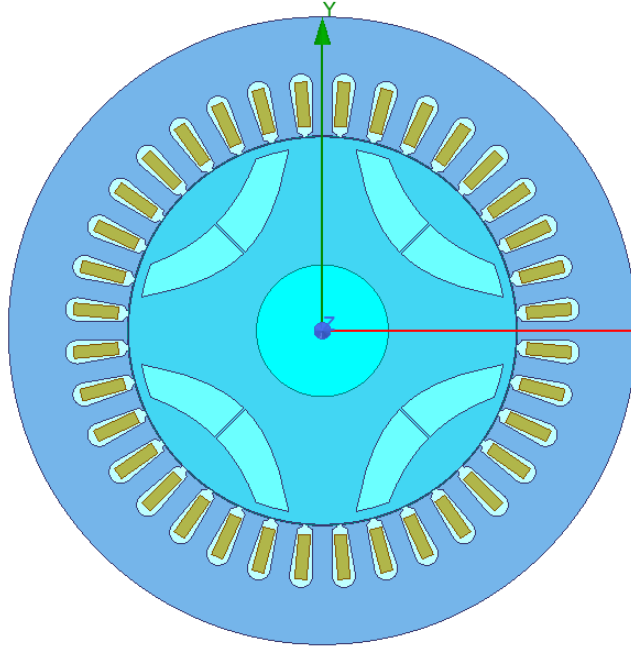
Şekil 5.7 Dış kaburga kalınlığının momente olan etkisi

H uzunluğu 0.1-5mm aralığında 0,5'er mm arttırılarak parametrik analiz gerçekleştirilmiştir. En düşük moment dalgalanması 5 değerinde görünse de ortalama momentin değerinin de düşük olduğu görülmektedir. 3 değerinden 4 değerine geçerken moment dalgalanmasında yaklaşık %35'lik bir azalma gerçekleşip ortalama moment değerinde yaklaşık %6'lık bir azalma gerçekleşmiştir. Bu yüzden ortalama momentin yüksek ve moment dalgalanmasının yeterince düşük olduğu kabul edilen 4.1mm değeri seçilerek geometri oluşturulmuştur.

5.1.2. Tek ve Yuvarlak Bariyerli Rotor Yapısı

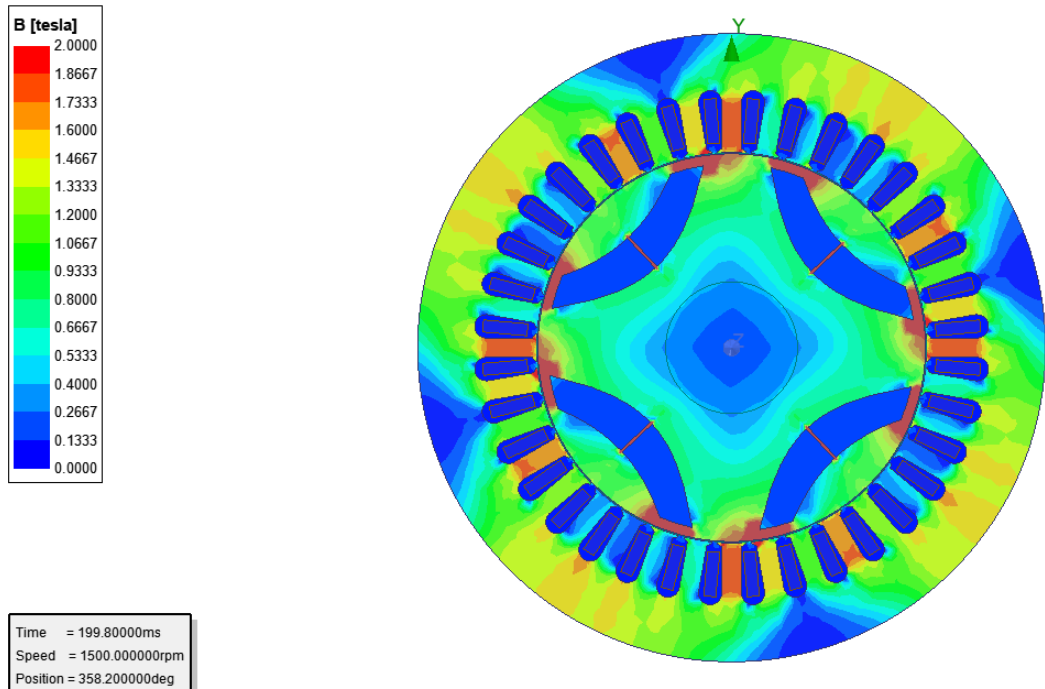
Diğer bir bariyer şekli olan yuvarlak bariyer yapısına ait rotor ve stator geometrisi Şekil 5.8 'de görülmektedir. Köşeli bariyer yapısına alternatif olarak oluşturulan bu modelde

köşeli bariyer yapısında elde edilen rotor geometri parametreleri referans alınmıştır. Şekil 5.9'da tek ve yuvarlak bariyer yapısına ait manyetik akı yoğunluğu dağılımı görülmektedir.



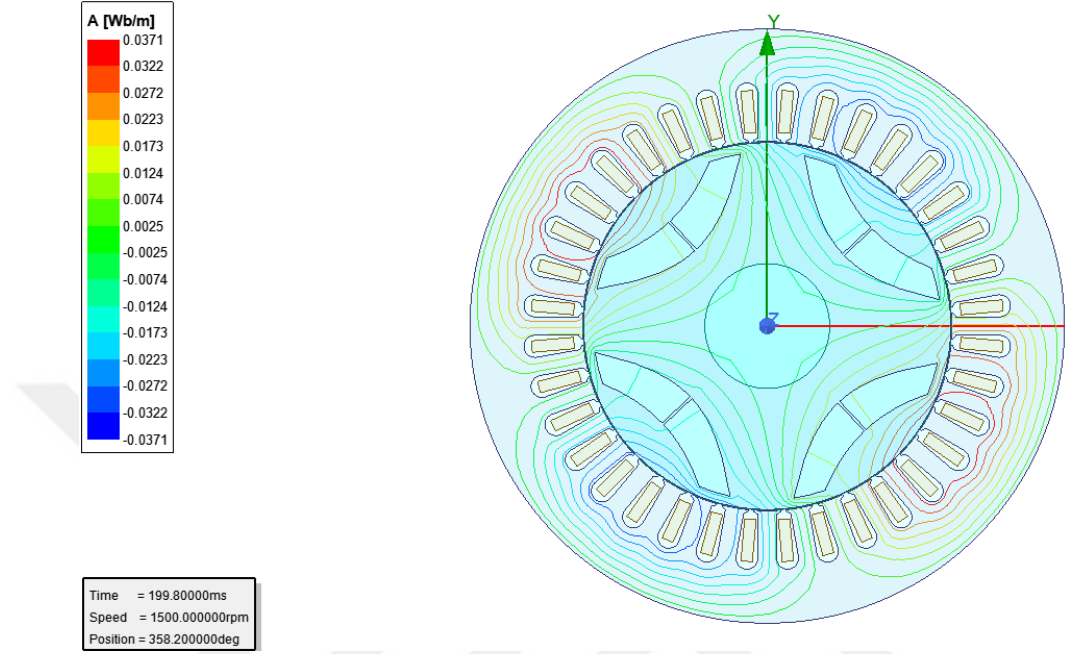
Şekil 5.8 Tek ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için 2D görünümü

Şekil 5.9 'da görüldüğü gibi rotordaki kısmi doymalar haricinde akı yoğunluğu 1,2 T civarındadır. Statorda ise maksimum 1,7 T civarındadır.



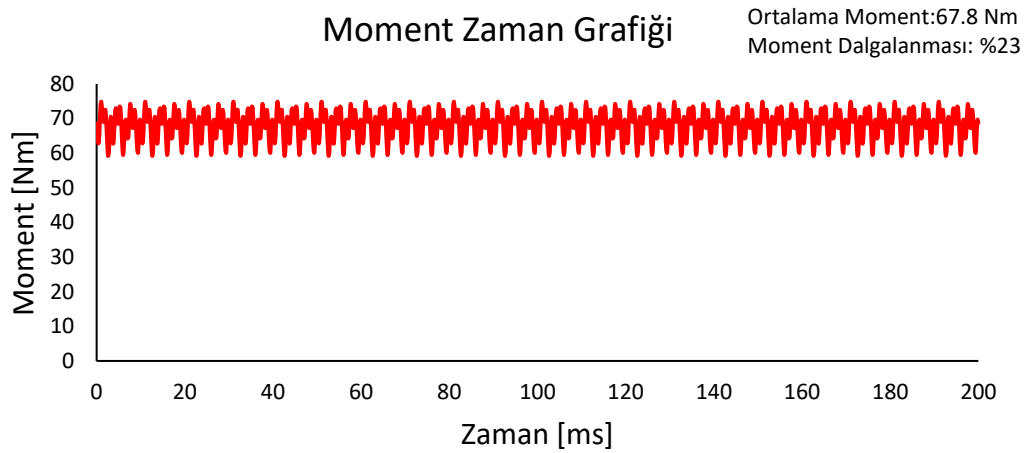
Şekil 5.9 Tek ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yoğunlukları

Şekil 5.10'da bu rotor geometrisine ait akı yollarının dağılımı görülmektedir. Bu dağılım ile motorun dört kutuplu olduğu açıkça görülebilmektedir. Ayrıca bu yapıda köşeli bariyer yapısına nazaran daha çok kaçak akı olduğu görülebilmektedir.



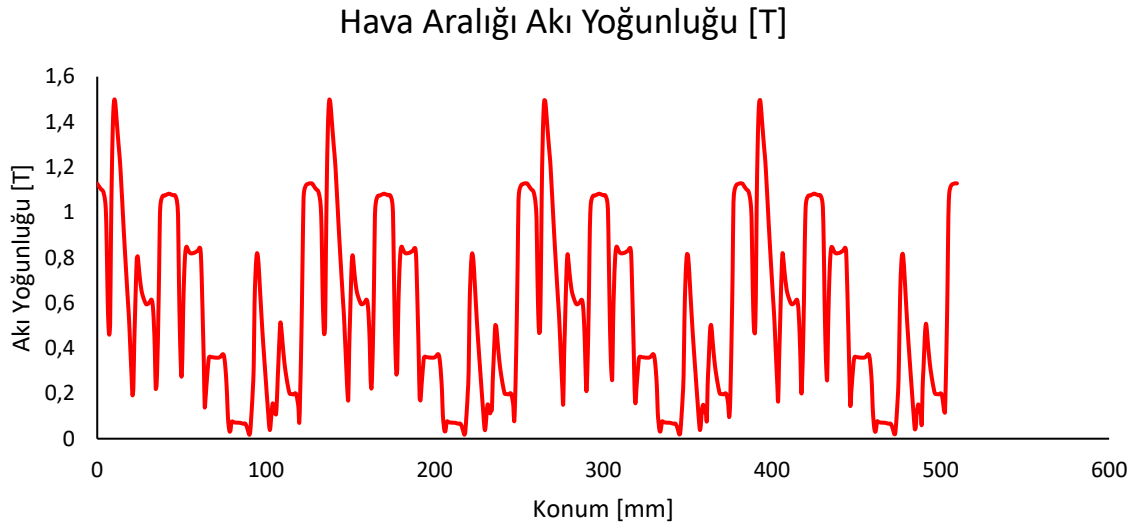
Şekil 5.10 Tek ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yolları

Şekil 5.11'de motorun moment zaman grafiği verilmiş olup, ortalama moment değerinin 67.8 Nm ve moment dalgalanması değerinin %23 civarında olduğu görülmektedir. Tepeden tepeye moment değeri ise 15.7 Nm'dir.

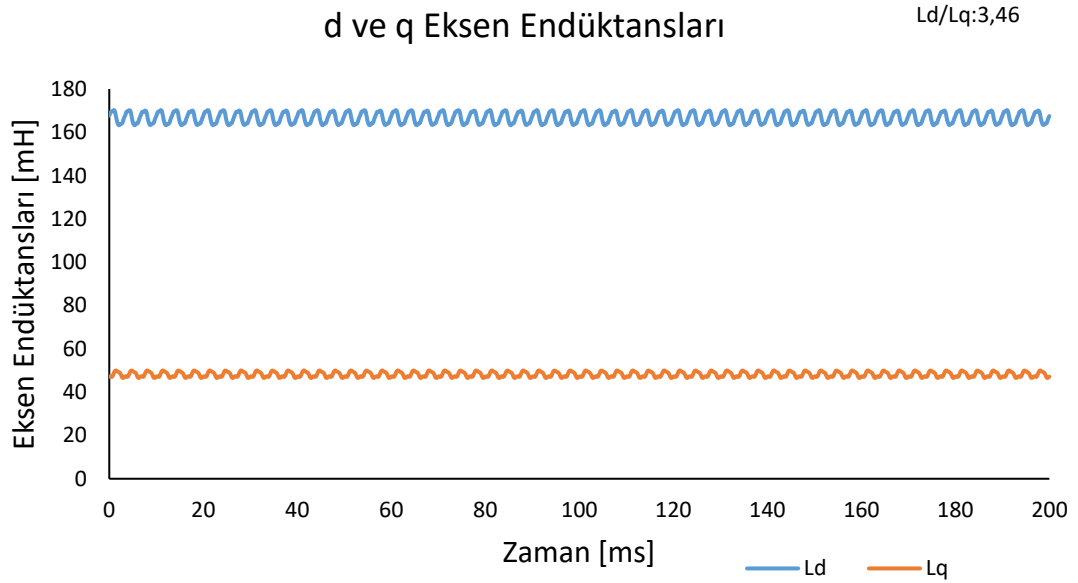


Şekil 5.11 Tek ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için moment zaman grafiği

Şekil 5.12 hava aralığındaki akı yoğunluğunun normal bileşeni olup değeri 0,58 T'dir.



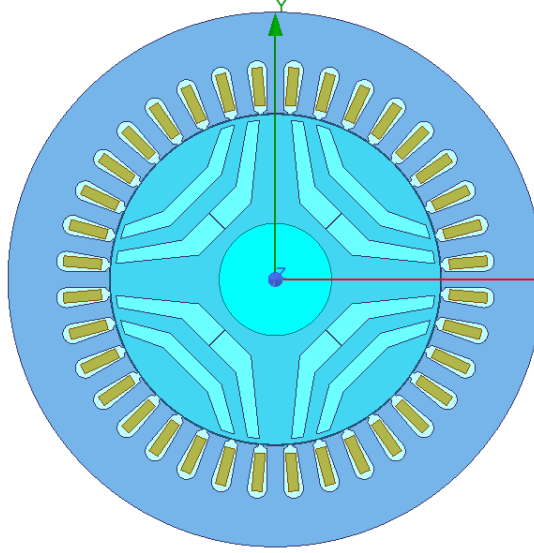
Şekil 5.12 Tek ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için hava aralığı akı yoğunlukları
Şekil 5.13'te ise motor çıkış performansını etkileyen çıkıklık oranı verilmiştir.



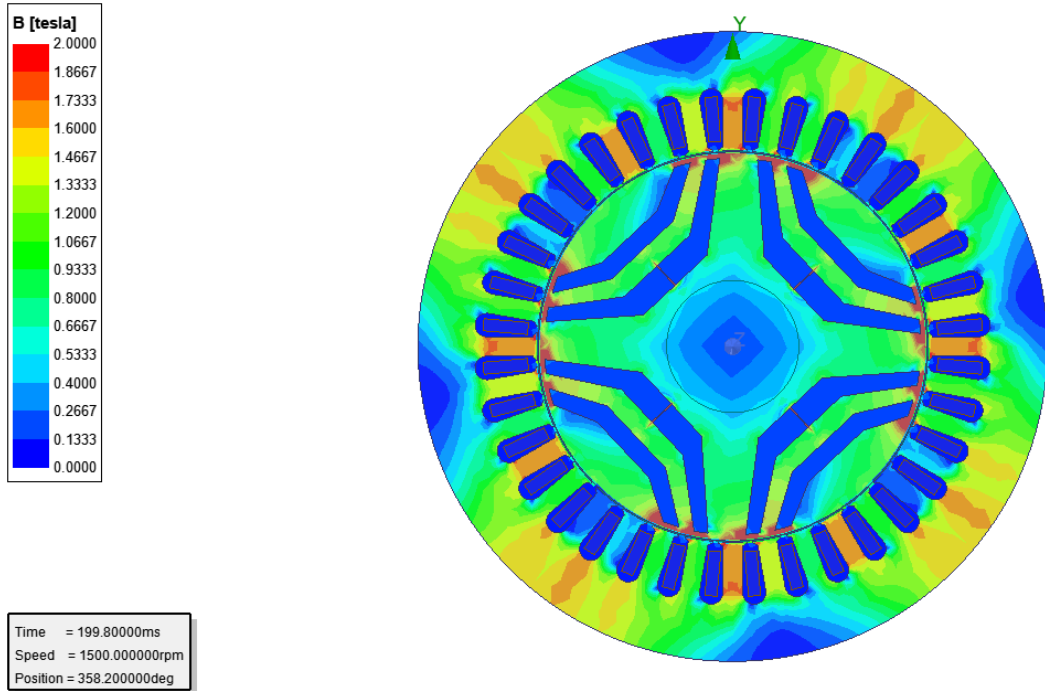
Şekil 5.13 Tek ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için d ve q eksen endüktansları

5.1.2. İki ve Köşeli Bariyerli Rotor Yapısı

Şekil 5.14'te bariyer sayısı iki olan ve bariyer şekli köşeli olan bir rotor geometrisi görülmektedir. Şekil 5.15'te bu rotor geometrisi için akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Statordaki en yüksek akı yoğunluğu değeri 1,7 T civarındadır. Rotorda ise kısmi doyumlar haricinde en yüksek akı yoğunluğu değeri 1,3 T civarındadır.

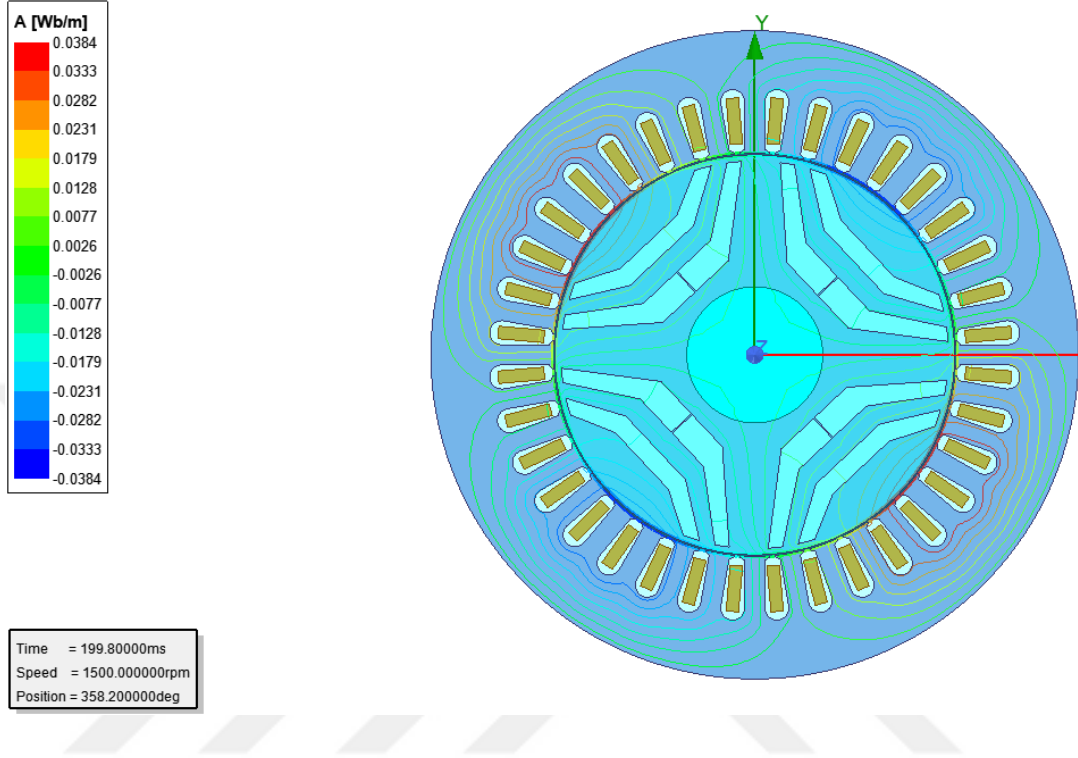


Şekil 5.14 İki ve köşeli bariyerli rotor yapısı için 2D görünümü



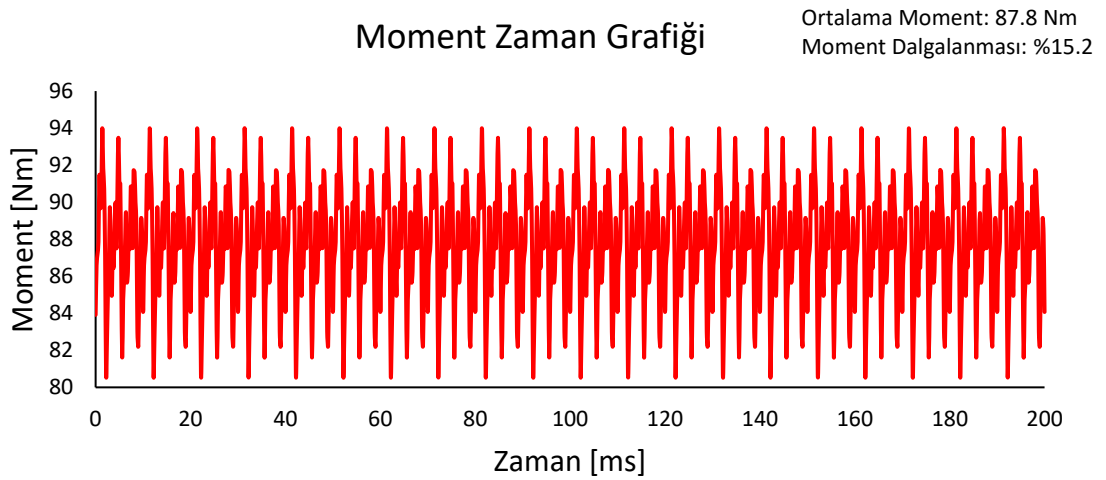
Şekil 5.15 İki ve köşeli bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yoğunlukları

Şekil 5.16'da motora ait akı yolları görülmektedir. Akı yoğunluklarından anlaşılabacağı gibi motorun kutup sayısı dört olarak görünmektedir. Ayrıca tek bariyerli rotor yapılarındaki kaçak akıların bu geometride yok olduğu da görülmektedir.



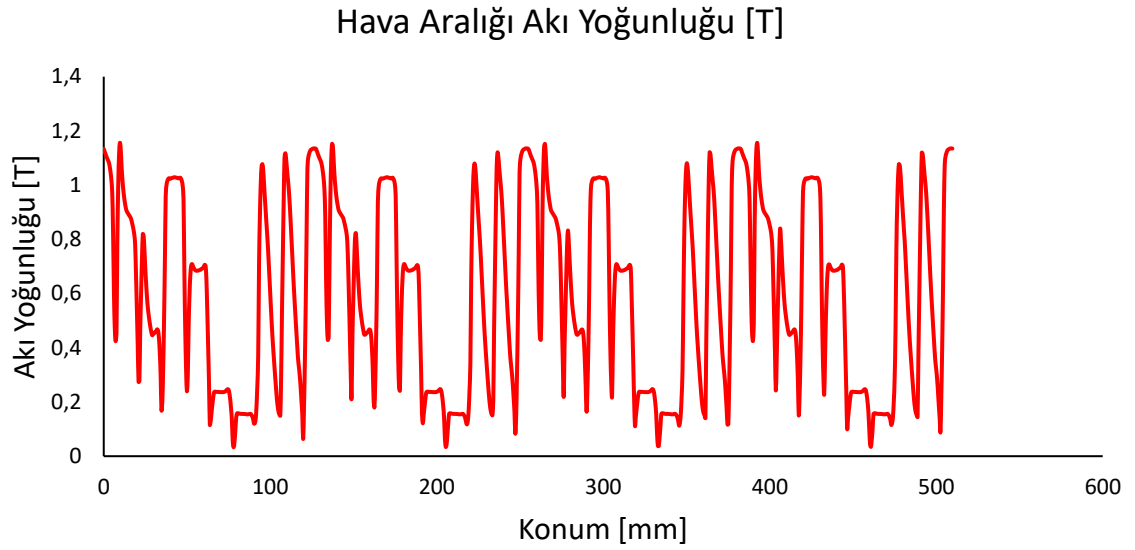
Şekil 5.16 İki ve köşeli bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yolları,

Şekil 5.17 'de verilen moment zaman grafiğinde motorun ortalama çıkış momenti 87,8 Nm iken tepeden tepeye moment değeri 13,3 Nm'dir. Motorun moment dalgalanması %15,2 'dir.



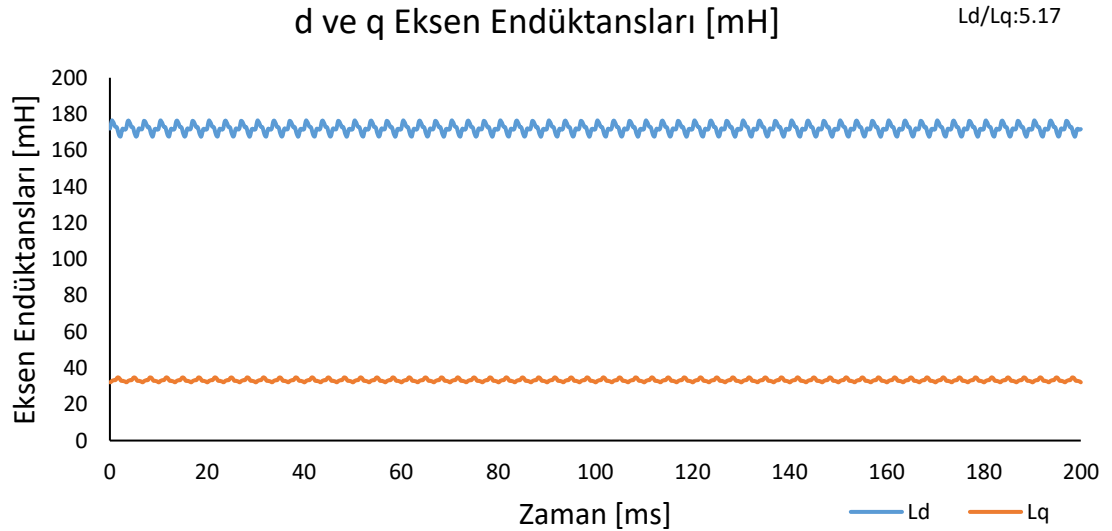
Şekil 5.17 İki ve köşeli bariyerli rotor yapısı için moment zaman grafiği

Şekil 5.18’de motorun hava aralığı akı yoğunluğu verilmiş olup, bu değer 0,6 T civarındadır.



Şekil 5.18 İki ve köşeli bariyerli rotor yapısı için hava aralığı akı yoğunlukları

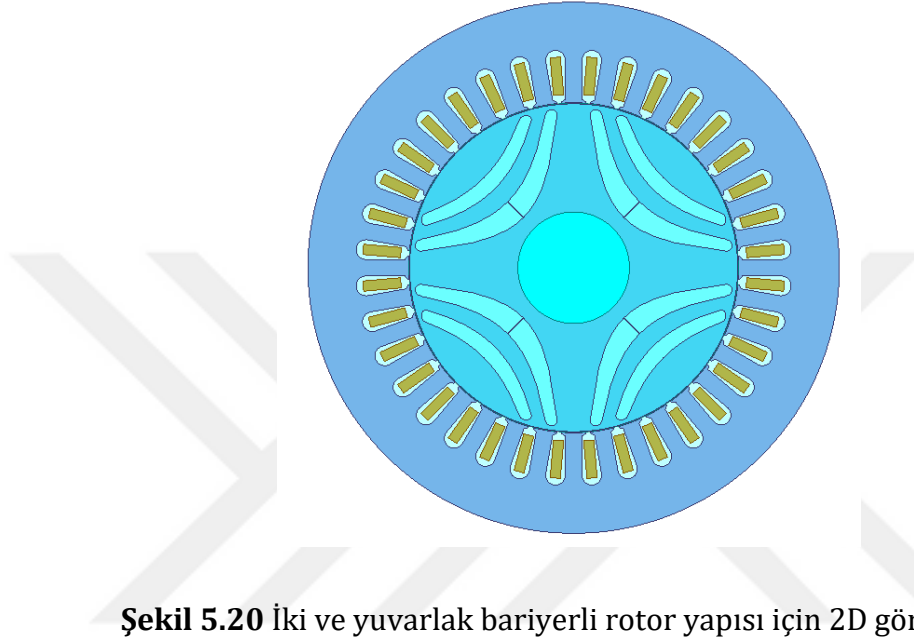
Şekil 5.19’da çıkıklık oranı olan L_d/L_q değeri görülmektedir. Bariyer sayısının artmasıyla bu değerin arttığı açıkça görülmektedir. Bu değerin artmasıyla birlikte motordan elde edilen relüktans moment değeri de artmıştır.



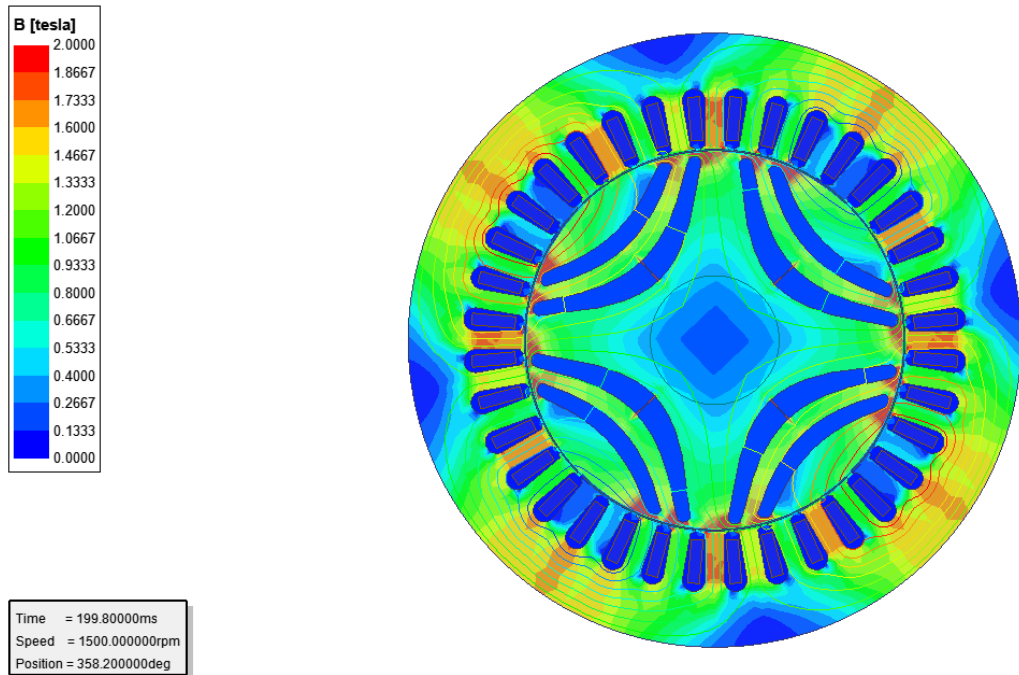
Şekil 5.19 İki ve köşeli bariyerli rotor yapısı için d ve eksen endüktansları

5.1.4. İki ve Yuvarlak Bariyerli Rotor Yapısı

Şekil 5.20’de iki ve yuvarlak bariyerli rotor yapısına ait model görünmektedir. Şekil 5.21’de bu rotor geometrisi için akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Statordaki en yüksek akı yoğunluğu değeri 1,7 T civarındadır. Rotorda ise kısmi doyumlar haricinde en yüksek akı yoğunluğu değeri 1,3 T civarındadır.

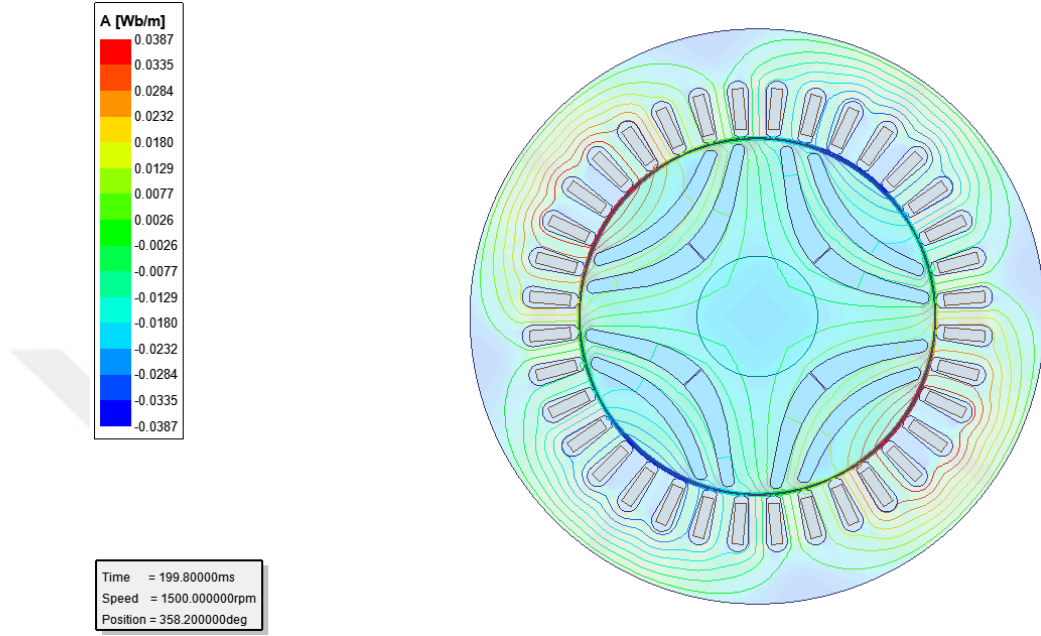


Şekil 5.20 İki ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için 2D görünümü



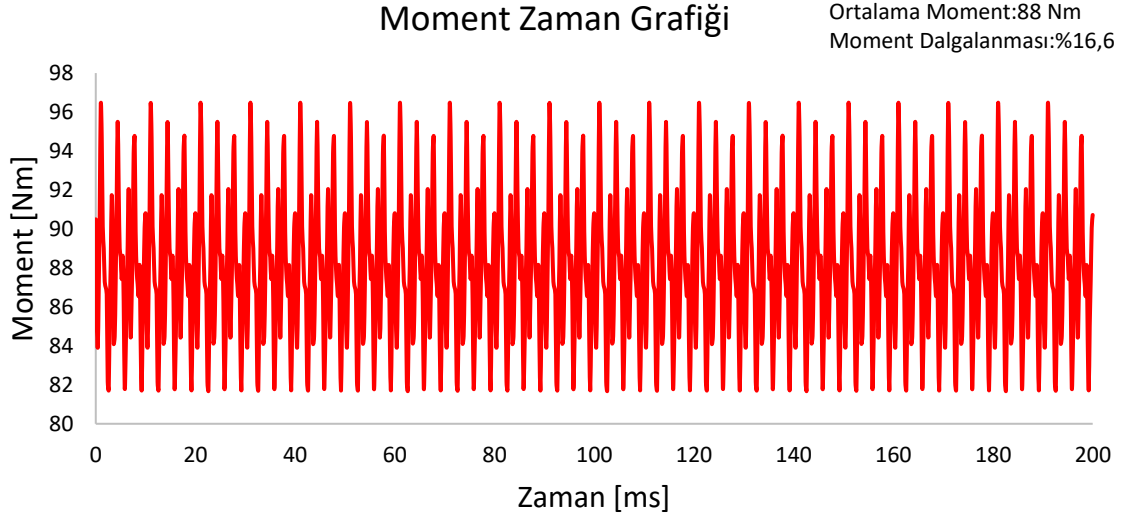
Şekil 5.21 İki ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yoğunlukları

Şekil 5.22’de motora ait akı yolları görülmektedir. Akı yoğunluklarından anlaşılaçağı gibi motorun kutup sayısı dört olarak görülmektedir. Köşeli bariyer yapısının aksine kaçak akılar bu yapıda dikkat çekmektedir.



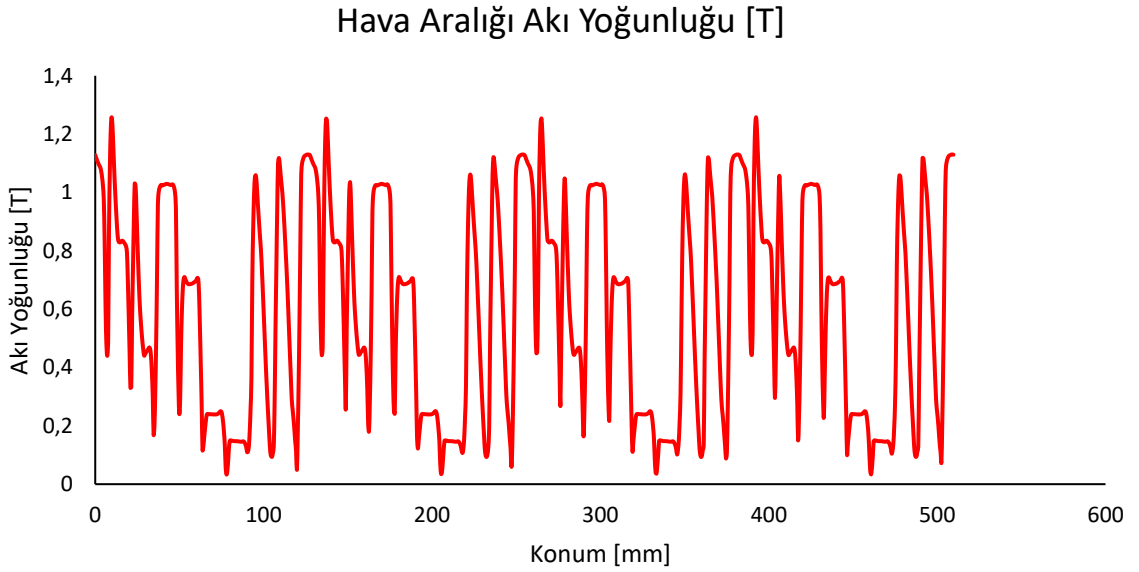
Şekil 5.22 İki ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yolları

Şekil 5.23 ‘de verilen moment zaman grafiğinde motorun ortalama çıkış momenti 88 Nm iken tepeden tepeye moment değeri 14,7 Nm’dir. Motorun moment dalgalanması %16,6 ‘dır.



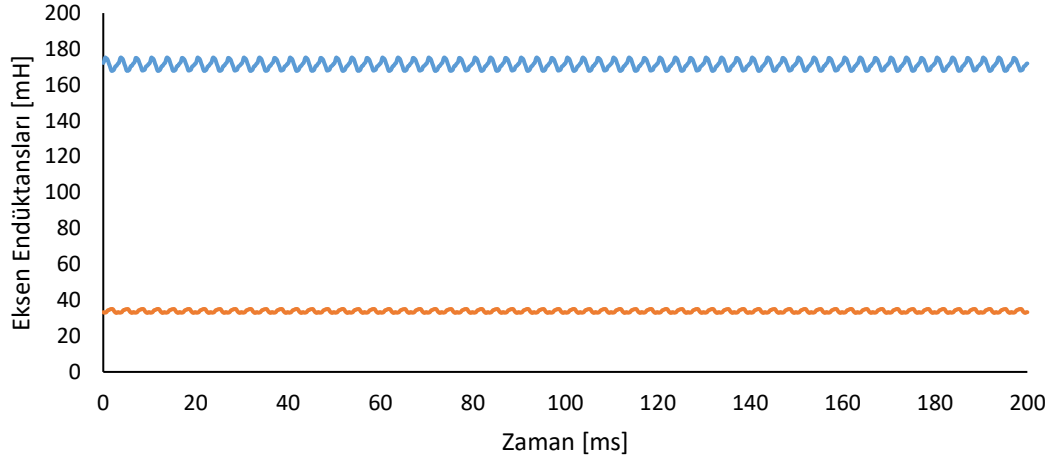
Şekil 5.23 İki ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için moment zaman grafiği

Şekil 5.24'te motorun hava aralığı akı yoğunluğu verilmiş olup, bu değer 0,6 T civarındadır.



Şekil 5.24 İki ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için hava aralığı akı yoğunlukları

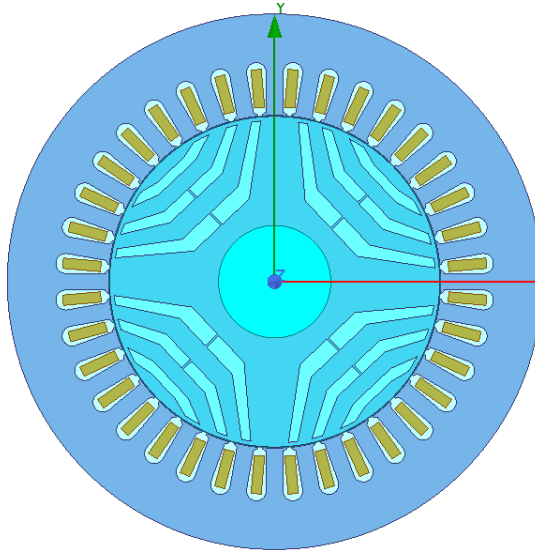
Şekil 5.25'te çıkıklık oranı olan L_d/L_q değeri görülmektedir. Çıkıklık oranı köşeli yapıya göre daha düşüktür.



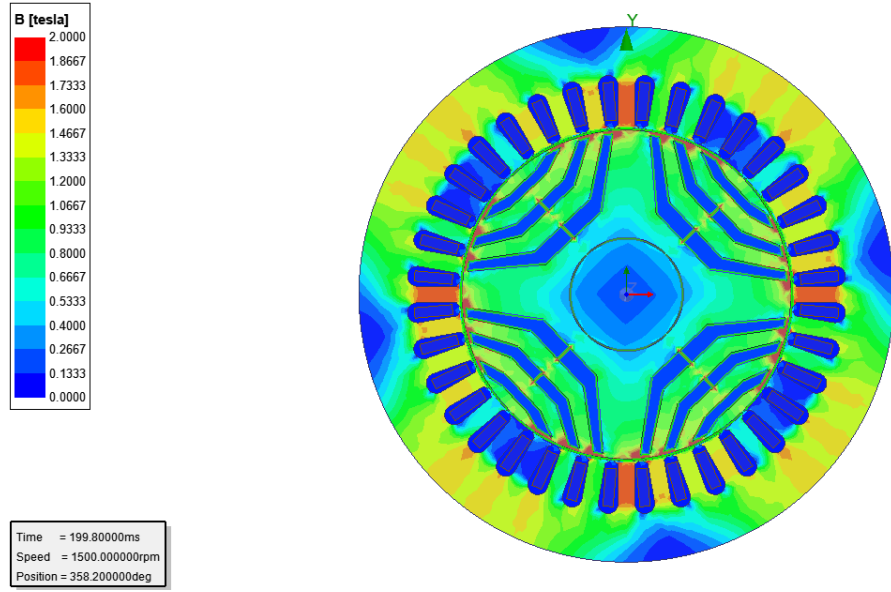
Şekil 5.25 İki ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için d ve q eksen endüktansları

5.1.5 Üç ve Köşeli Bariyerli Rotor Yapısı

Şekil 5.26'da üç ve köşeli bariyerli rotor yapısına ait model görünmektedir. Şekil 5.27'de bu rotor geometrisi için akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Statordaki en yüksek akı yoğunluğu değeri 1,7 T civarındadır. Rotorda ise kısmi doyumlar haricinde en yüksek akı yoğunluğu değeri 1,2 T civarındadır.

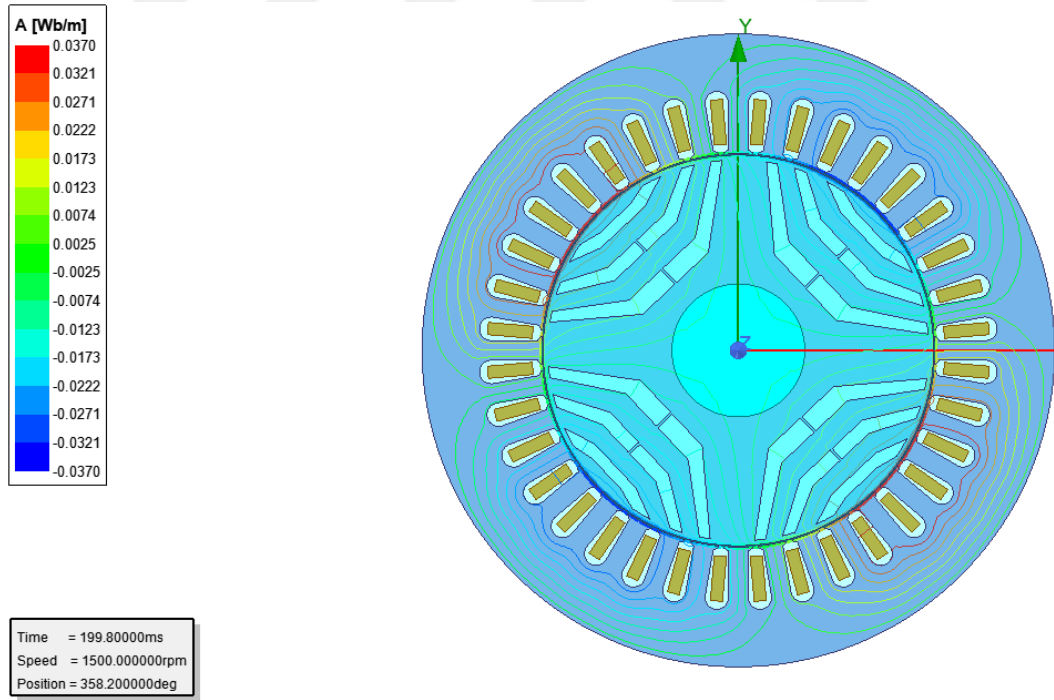


Şekil 5.26 Üç ve köşeli bariyerli rotor yapısı için 2D görünüm



Şekil 5.27 Üç ve köşeli bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yoğunluğu

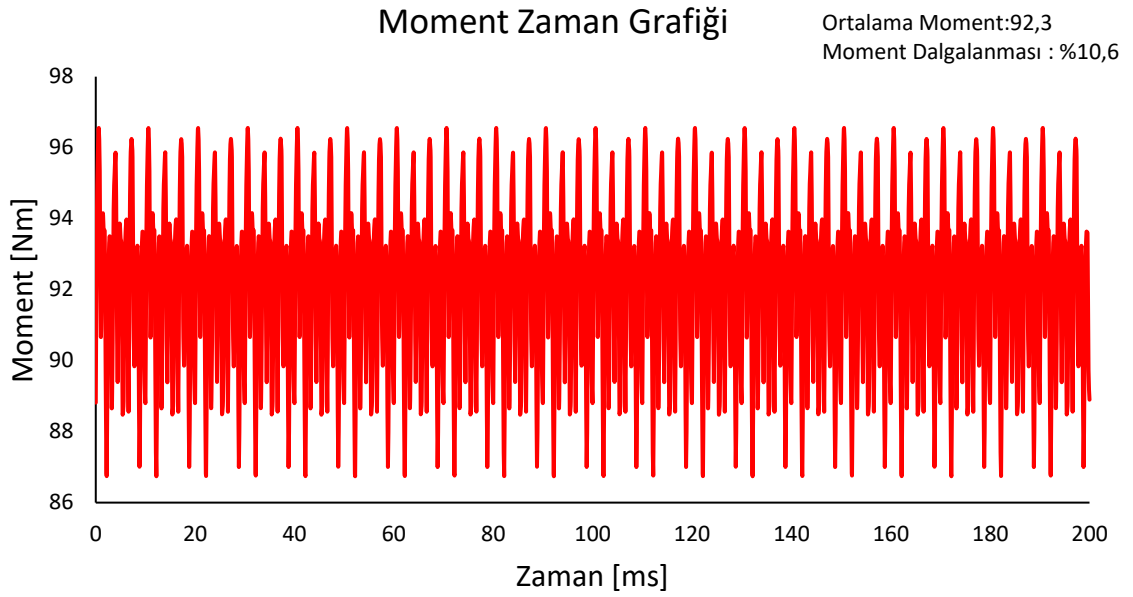
Şekil 5.28’de motora ait akı yolları görülmektedir. Akı yollarının dağılımından görüleceği üzere motorun kutup sayısı dörttür.



Şekil 5.28 Üç ve köşeli bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yolları

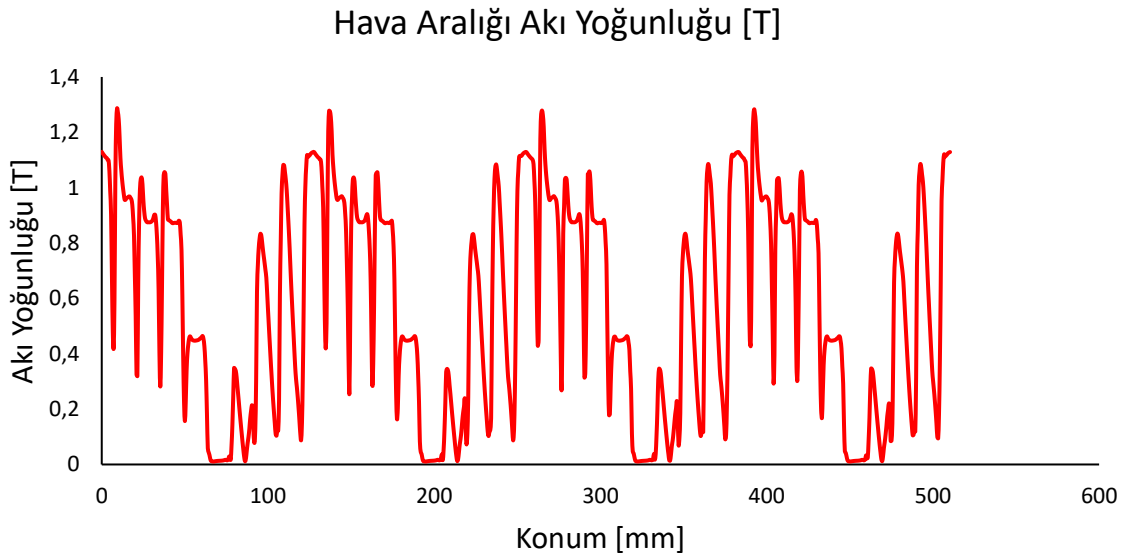
Şekil 5.29 ‘de verilen moment zaman grafiğinde motorun ortalama çıkış momenti 92,3 Nm iken tepeden tepeye moment değeri 9,81 Nm’dir. Motorun moment

dalgalanması %10,6 'dır. Artan bariyer sayısı ile elde edilen moment değeri de artmaktadır.



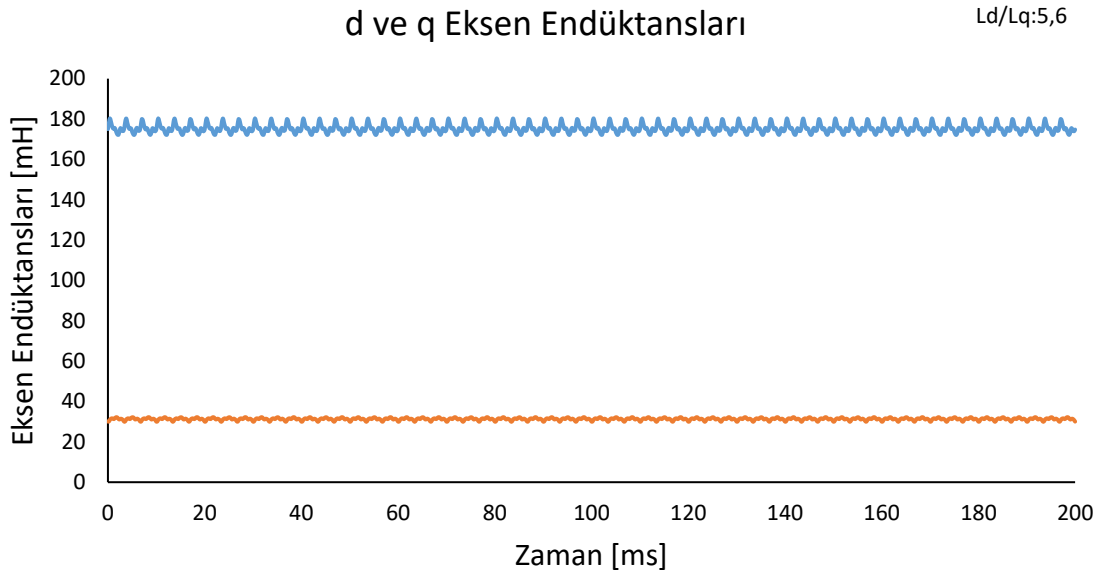
Şekil 5.29 Üç ve köşeli bariyerli rotor yapısı için moment zaman grafiği

Şekil 5.30'da motorun hava aralığı akı yoğunluğu verilmiş olup, bu değer 0,58 T civarındadır.



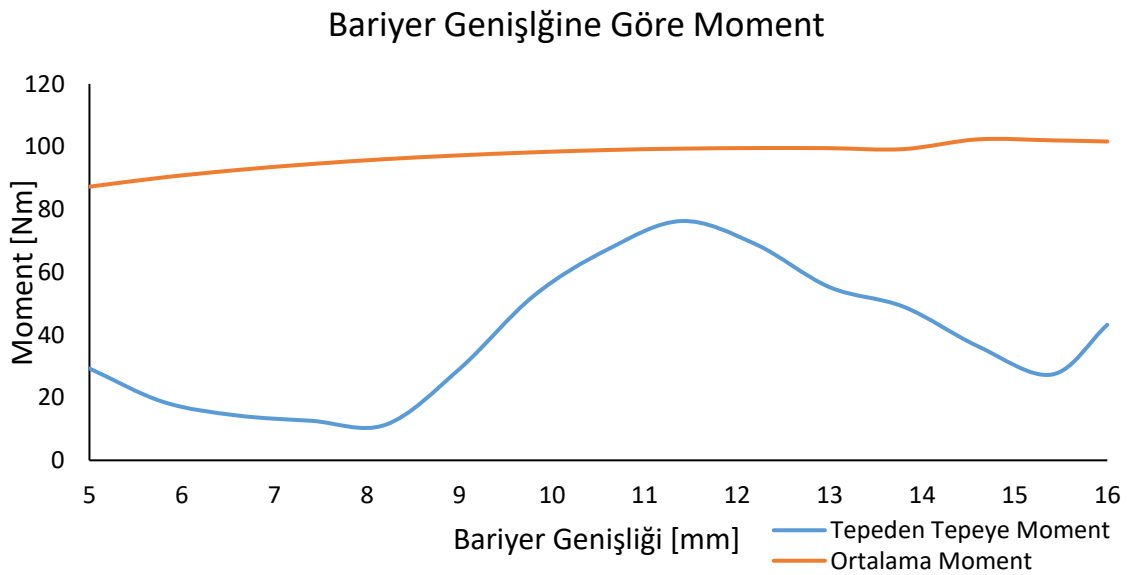
Şekil 5.30 Üç ve köşeli bariyerli rotor yapısı için hava aralığı akı yoğunlukları

Şekil 5.31’te çıkıklık oranı olan L_d/L_q değeri görülmektedir. Bariyer sayısının artmasıyla birlikte çıkıklık oranında arttığı görülmektedir.



Şekil 5.31 Üç ve köşeli bariyerli rotor yapısı için d ve q eksen endüktansları

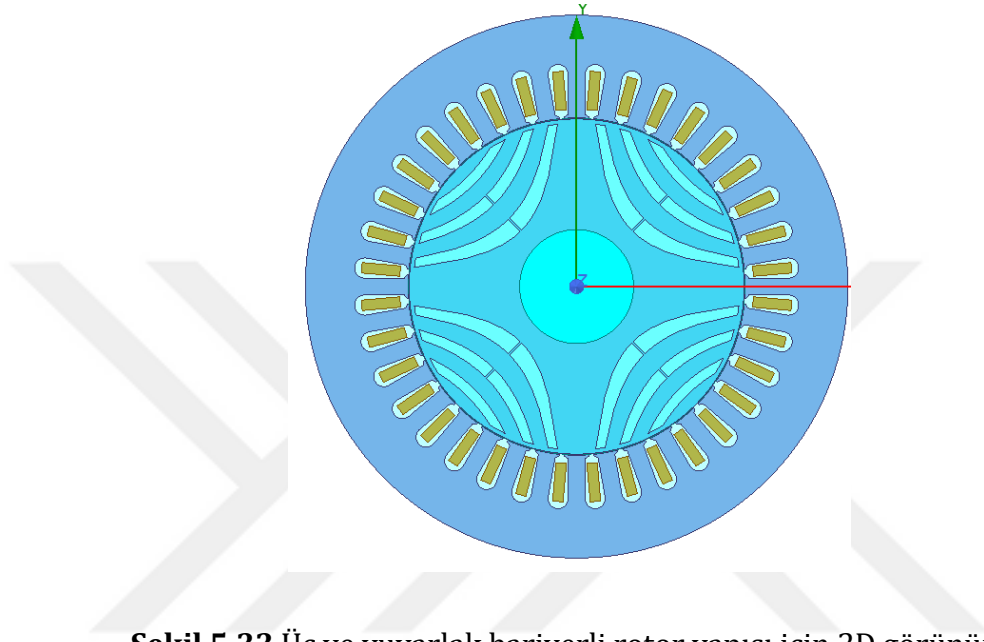
Bariyer genişliğinin belirlenmesi için 5-16 mm aralığında parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en uygun moment ve en düşük moment dalgalılığı değerleri için bariyer genişliği değerinin seçimi yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 5.32’de verilmiştir.



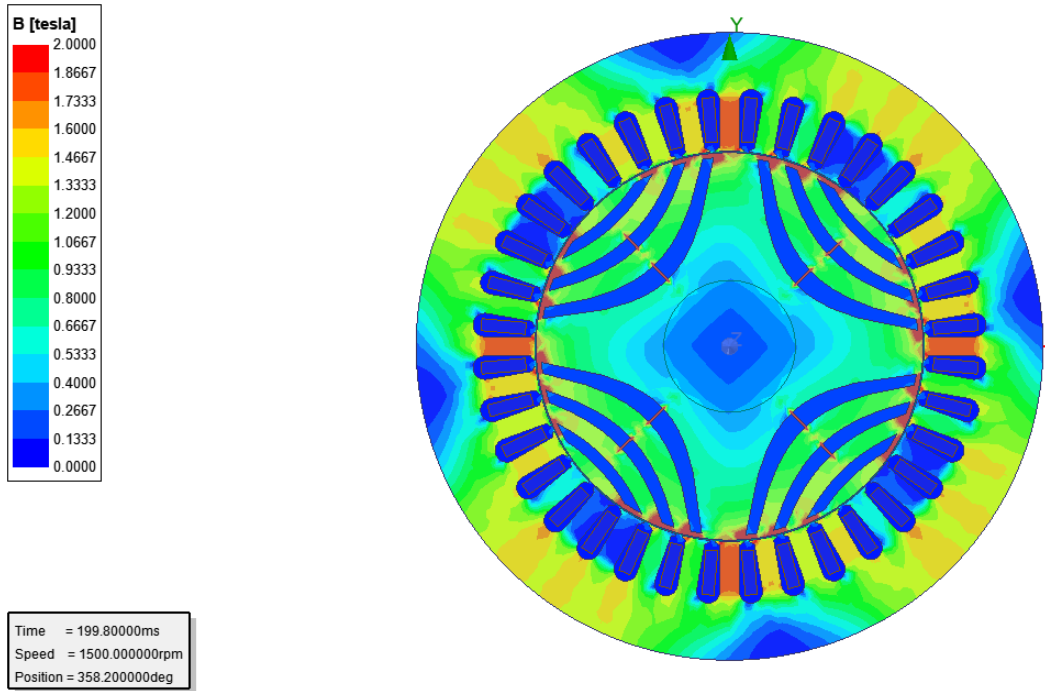
Şekil 5.32 Üç ve köşeli bariyerli rotor yapısı için bariyer genişliğinin momente olan etkisi

5.1.6. Üç ve Yuvarlak Bariyerli Rotor Yapısı

Şekil 5.33’de üç ve yuvarlak bariyerli rotor yapısına ait model görünmektedir. Şekil 5.34’de bu rotor geometrisi için akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Statordaki en yüksek akı yoğunluğu değeri 1,8 T civarındadır. Rotorda ise kısmi doyumlar haricinde en yüksek akı yoğunluğu değeri 1,1 T civarındadır.

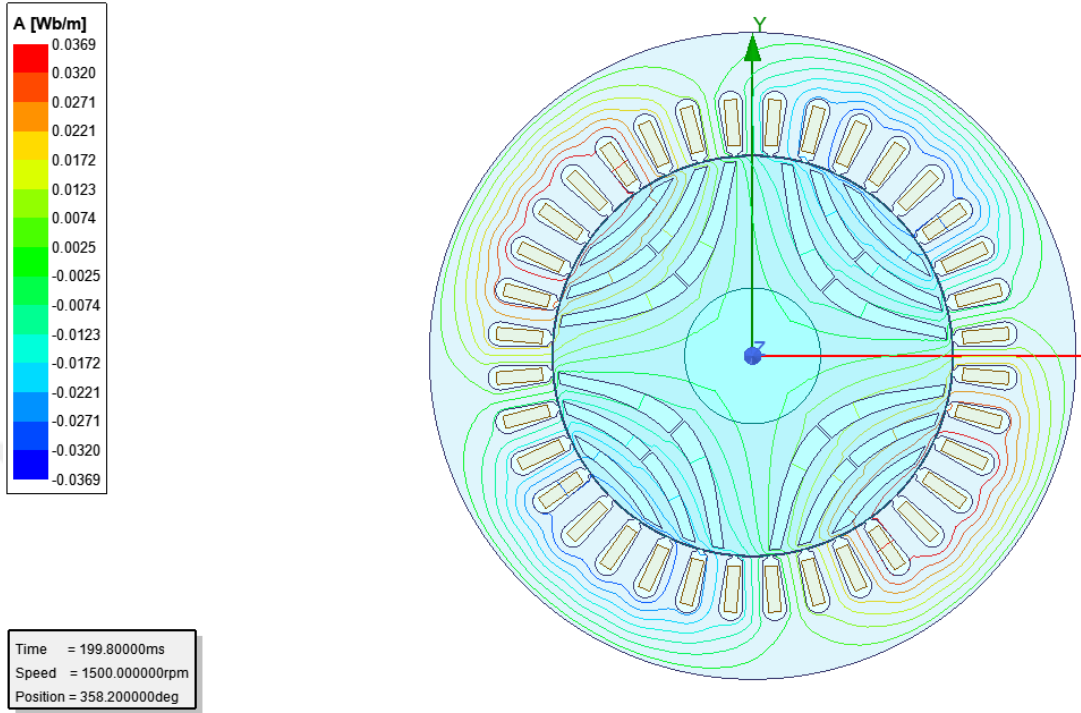


Şekil 5.33 Üç ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için 2D görünüm



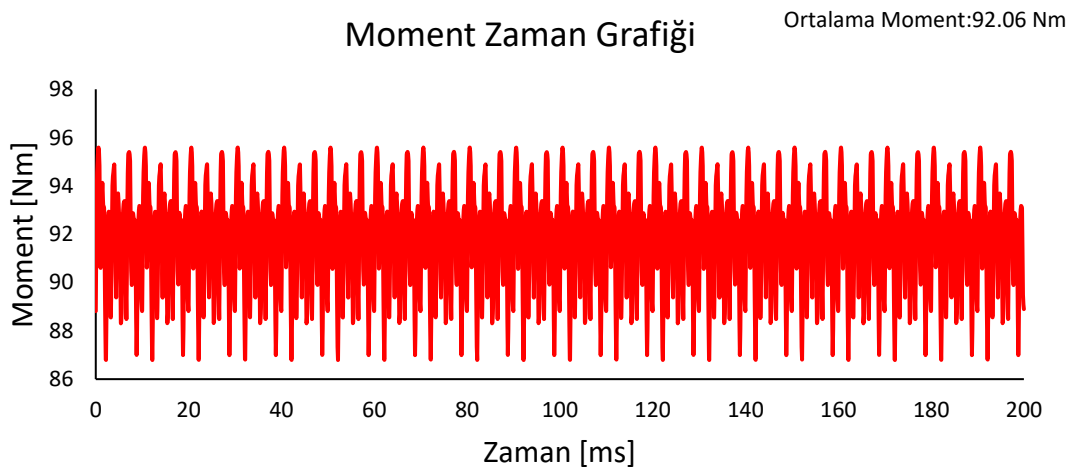
Şekil 5.34 Üç ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yoğunlukları

Şekil 5.35'te motora ait akı yolları görülmektedir. Akı yollarının dağılımından anlaşılacağı gibi motorun kutup sayısı dört olarak görünmektedir.



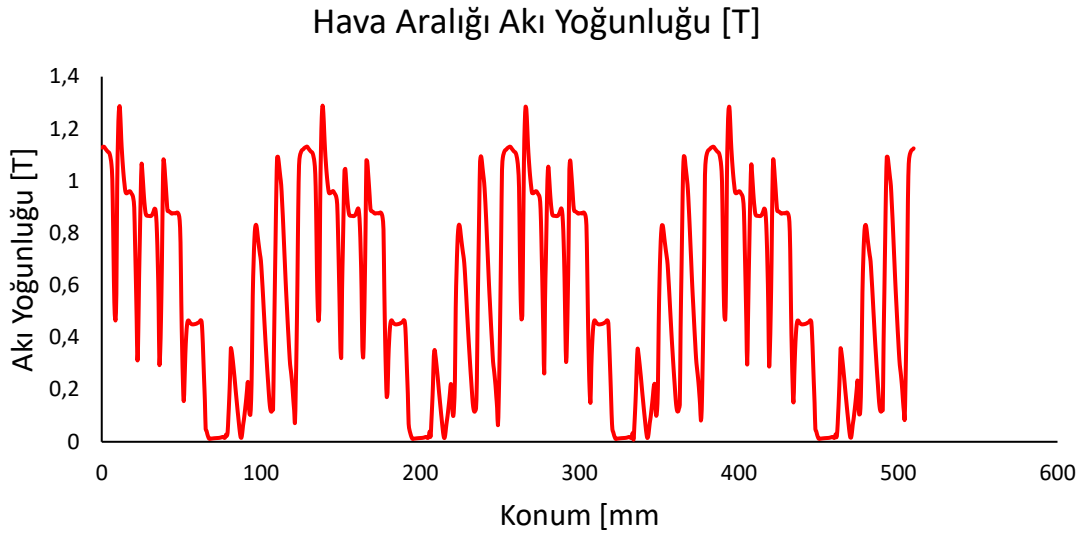
Şekil 5.35 Üç ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yolları

Şekil 5.36 'da verilen moment zaman grafiğinde motorun ortalama çıkış momenti 92,06 Nm iken tepeden tepeye moment değeri 9,9 Nm'dir. Motorun moment dalgalanması %10,8 'dır. Artan bariyer sayısı ile elde edilen moment değeri de artmaktadır.



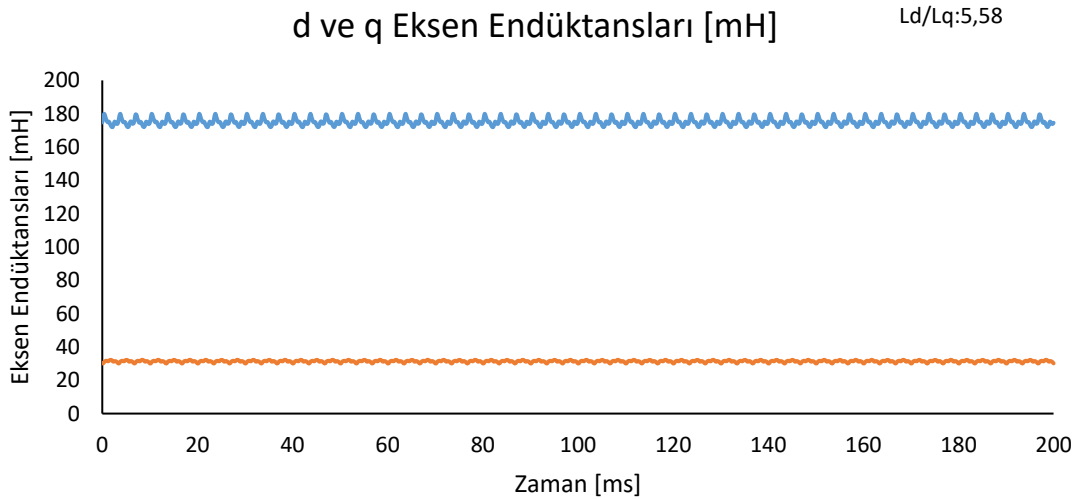
Şekil 5.36 Üç ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için moment zaman grafiği

Şekil 5.37’de motorun hava aralığı akı yoğunluğu verilmiş olup, bu değer 0,58 T civarındadır.



Şekil 5.37 Üç ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için hava aralığı manyetik akı yoğunlukları

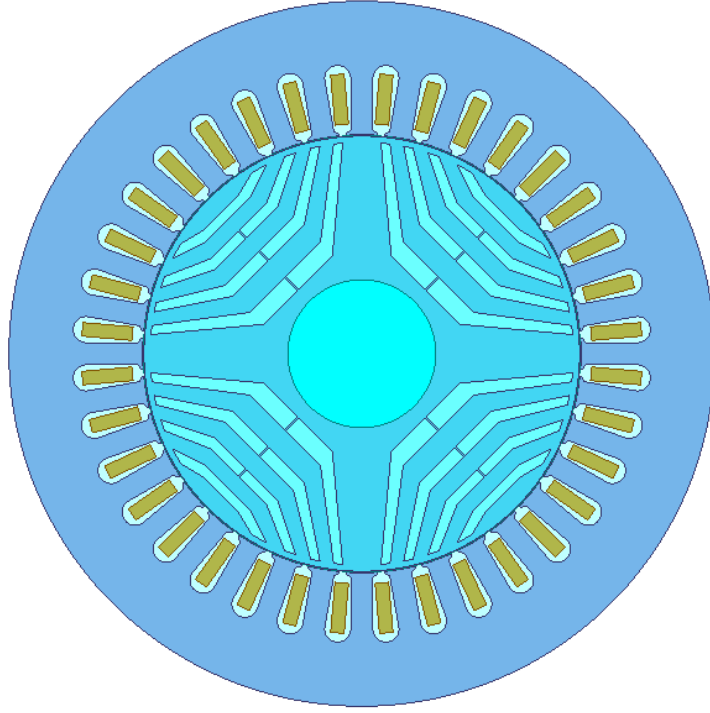
Şekil 5.38’de çıkıklık oranı olan L_d/L_q değeri görülmektedir.



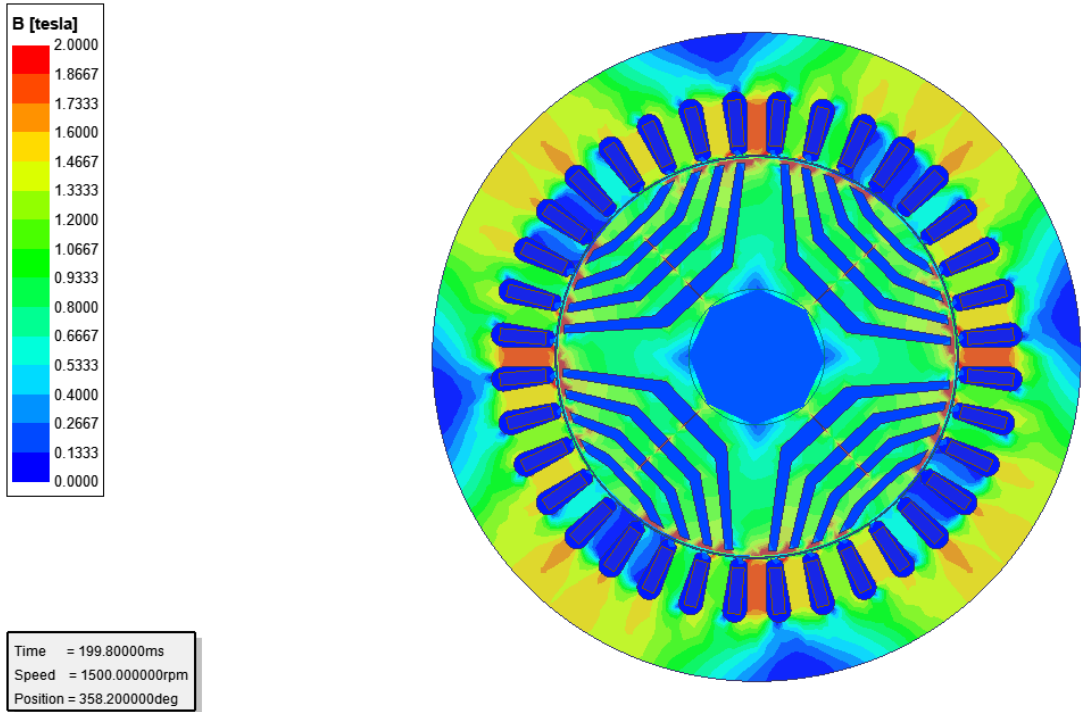
Şekil 5.38 Üç ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için d ve q eksen endüktansları

5.1.7. Dört ve Köşeli Bariyerli Rotor Yapısı

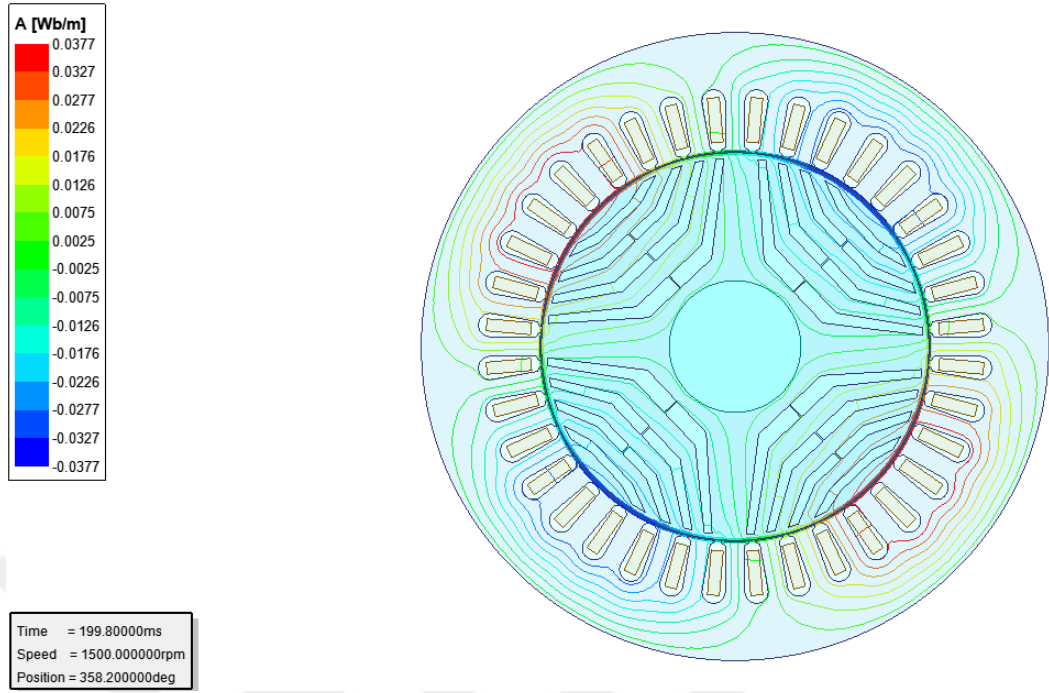
Şekil 5.39’da dört ve köşeli bariyerli rotor yapısına ait model görünmektedir. Şekil 5.40’de bu rotor geometrisi için akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Statordaki en yüksek akı yoğunluğu değeri 1,65 T civarındadır. Rotorda ise kısmi doyumlar haricinde en yüksek akı yoğunluğu değeri 1,3 T civarındadır.



Şekil 5.39 Dört ve köşeli bariyerli rotor yapısının 2D görünümü

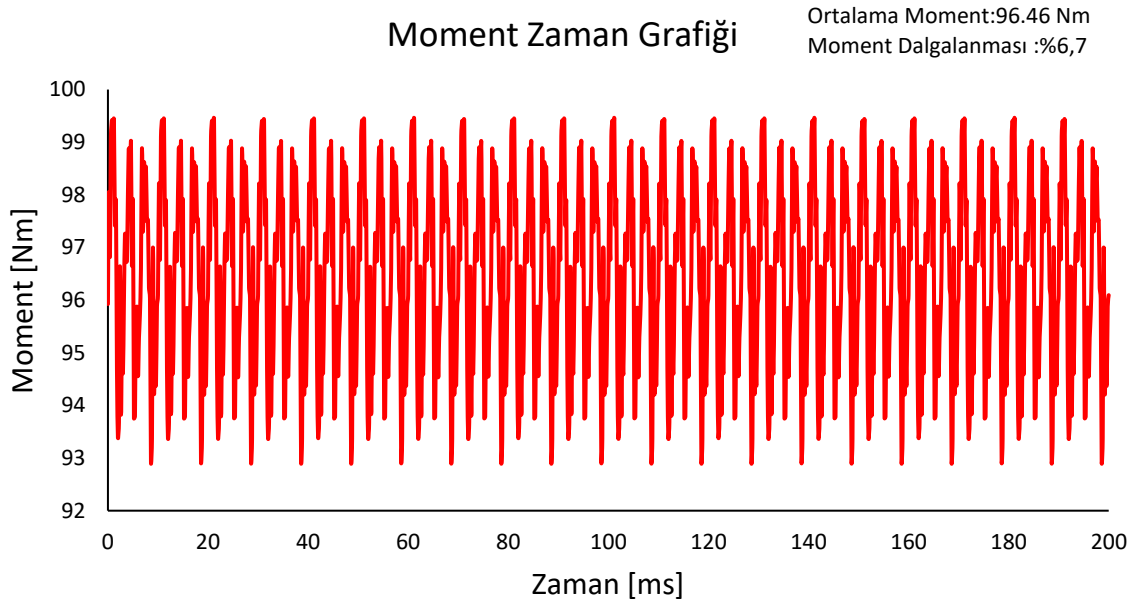


Şekil 5.40 Dört ve köşeli bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yoğunlukları
Şekil 5.41'de motora ait akı yolları görülmektedir. Akı yollarının dağılımından görüleceği üzere motorun kutup sayısı dördür.



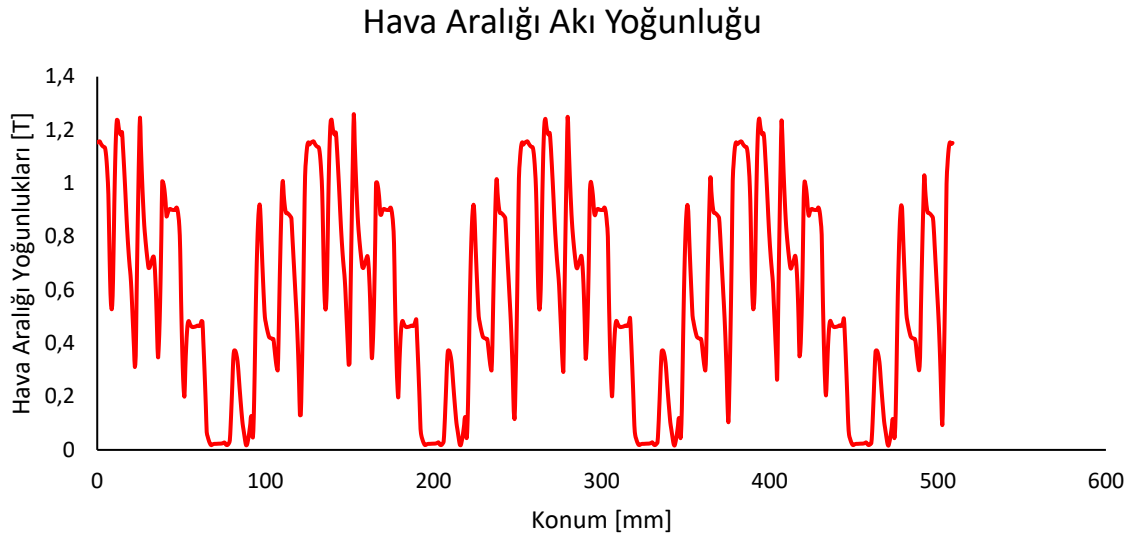
Şekil 5.41 Dört ve köşeli bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yolları

Şekil 5.42 'de verilen moment zaman grafiğinde motorun ortalama çıkış momenti 96,5 Nm iken tepeden tepeye moment değeri 6,5 Nm'dir. Motorun moment dalgalanması %6,7 'dir. Artan bariyer sayısının ve değişen bariyer konumlarının motorun çıkış performansına olan olumlu etkisi açık bir şekilde görülebilmektedir.



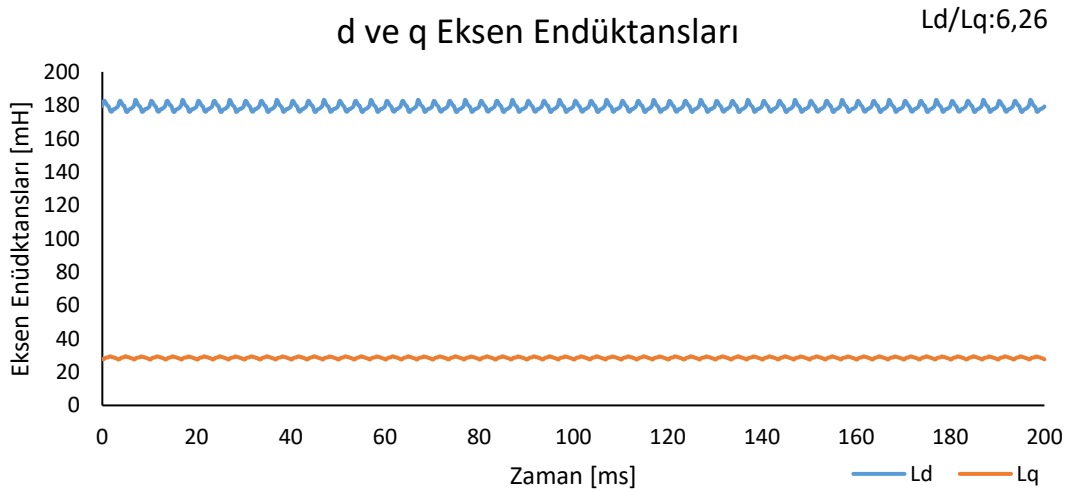
Şekil 5.42 Dört ve köşeli bariyerli rotor yapısı için moment zaman grafiği

Şekil 5.43'te motorun hava aralığı akı yoğunluğu verilmiş olup, bu değer 0,6 T civarındadır.



Şekil 5.43 Dört ve köşeli bariyerli rotor yapısı için hava aralığı akı yoğunlukları

Şekil 5.44'te çıkıklık oranı olan L_d/L_q değeri görülmektedir. Bariyer sayısının artmasıyla birlikte çıkıklık oranında arttığı görülmektedir.

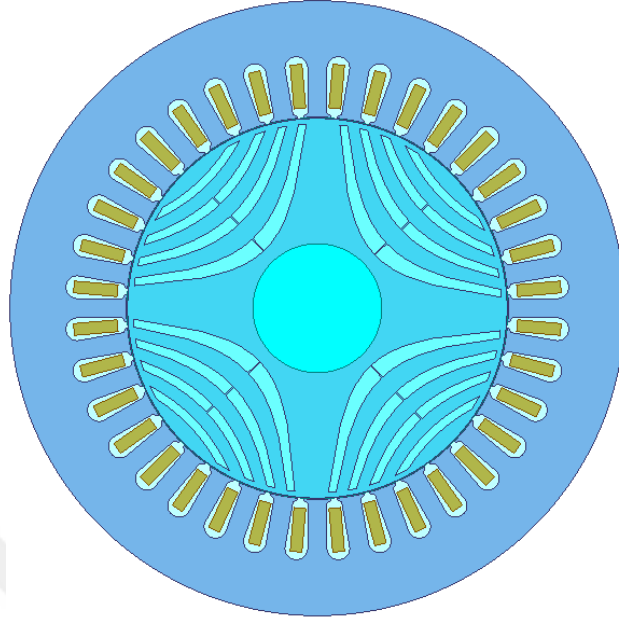


Şekil 5.44 Dört ve köşeli bariyerli rotor yapısı için d ve q eksen endüktansları

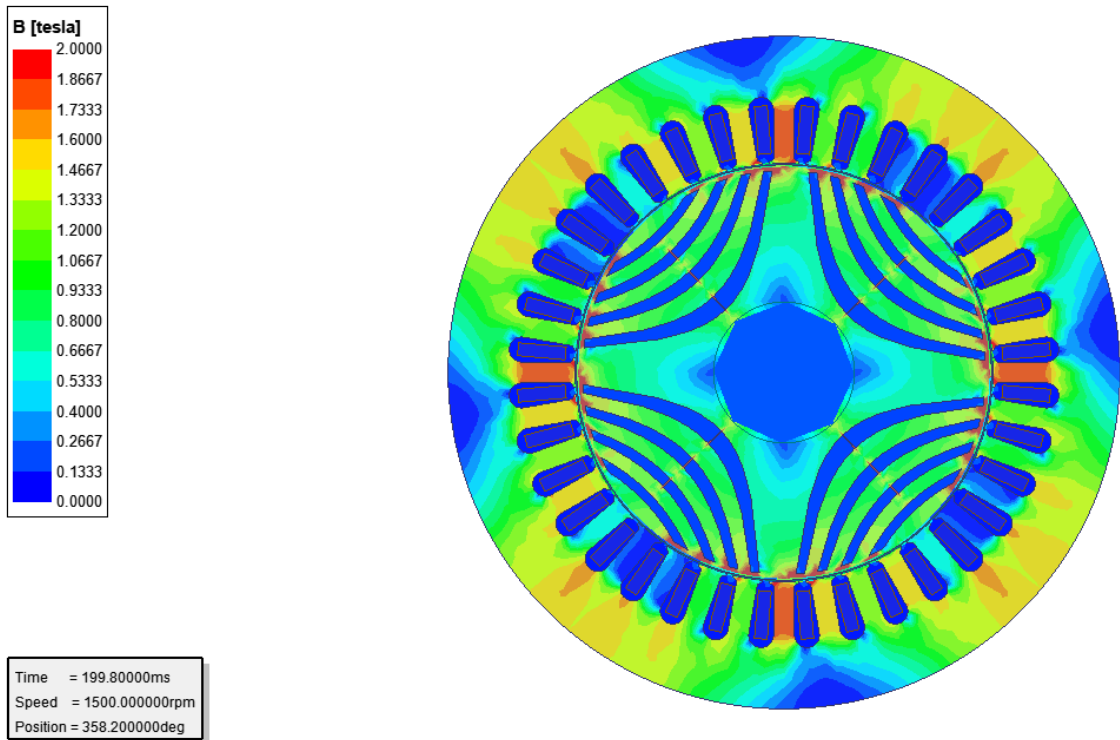
5.1.8. Dört ve Yuvarlak Bariyerli Rotor Yapısı

Şekil 5.45'de dört ve yuvarlak bariyerli rotor yapısına ait model görünmektedir. Şekil 5.46'de bu rotor geometrisi için akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Statordaki

en yüksek akı yoğunluğu değeri 1,7 T civarındadır. Rotorda ise kısmi doyumlar haricinde en yüksek akı yoğunluğu değeri 1,3 T civarındadır.

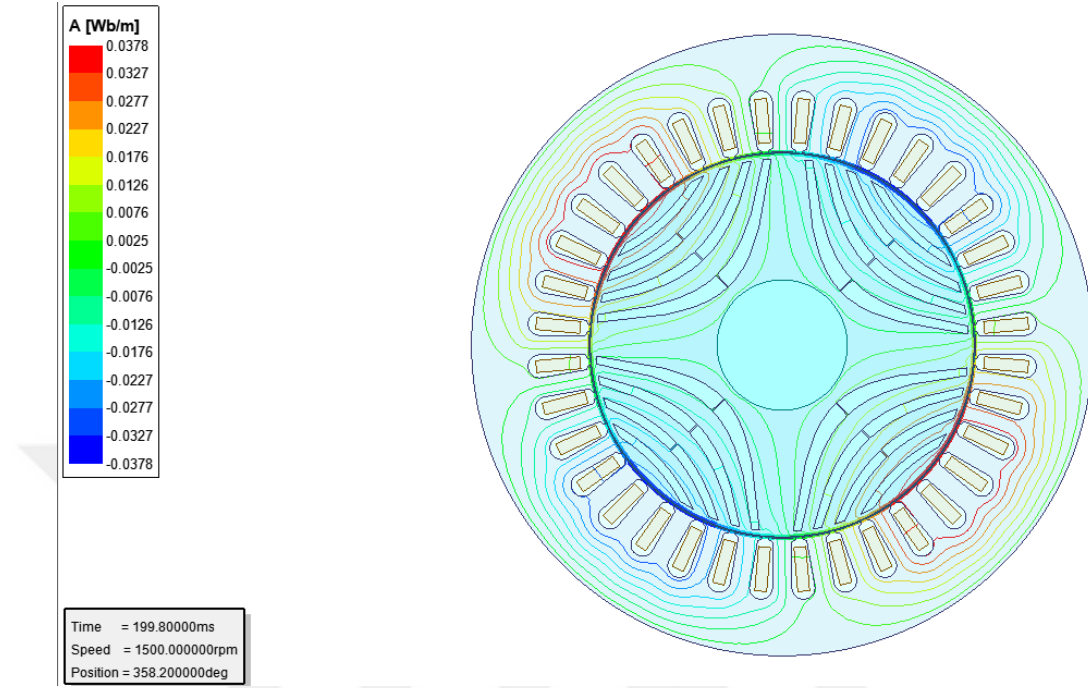


Şekil 5.45 Dört ve yuvarlak bariyerli rotor yapısının 2D görünümü



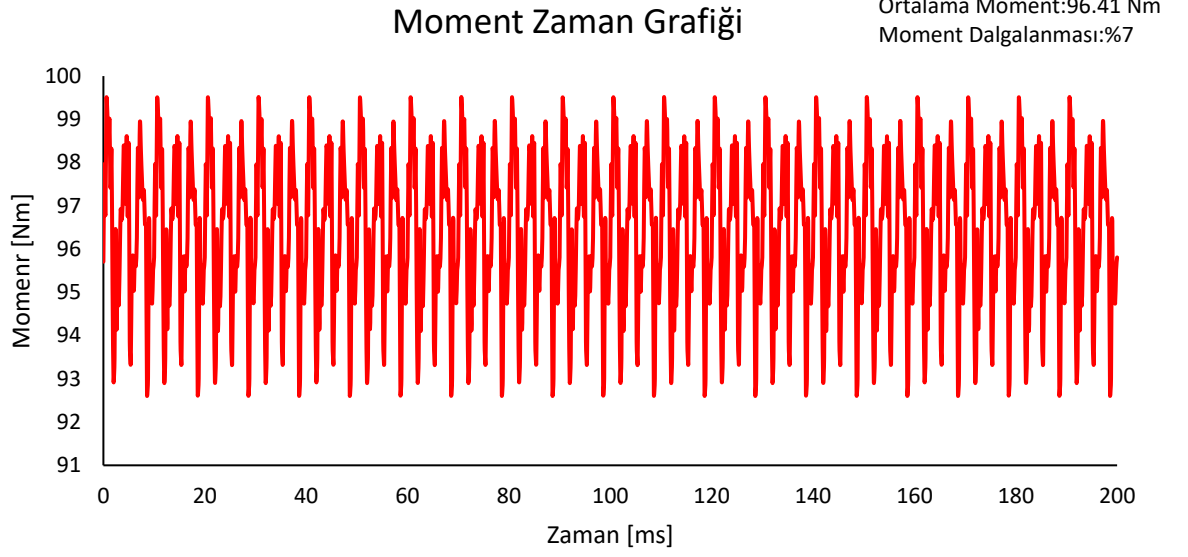
Şekil 5.46 Dört ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yoğunlukları

Şekil 5.47’de motora ait akı yolları görülmektedir. Akı yollarının dağılımından görüleceği üzere motorun kutup sayısı dörttür.



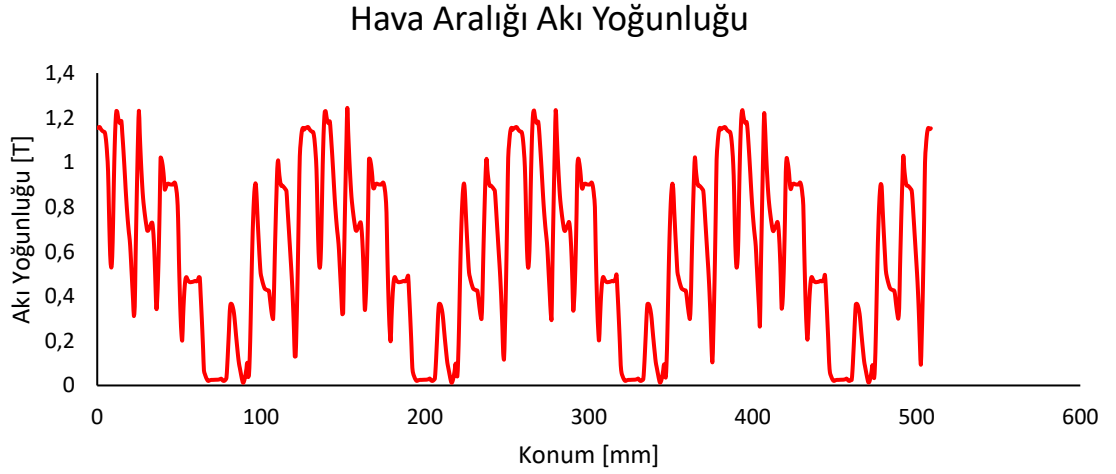
Şekil 5.47 Dört ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için manyetik akı yolları

Şekil 5.48 'de verilen moment zaman grafiğinde motorun ortalama çıkış momenti 96,4 Nm iken tepeden tepeye moment değeri 6,75 Nm'dir. Motorun moment dalgalanması %7 'dir. Artan bariyer sayısının ve değişen bariyer konumlarının motorun çıkış performansına olan olumlu etkisi açık bir şekilde görülebilmektedir.



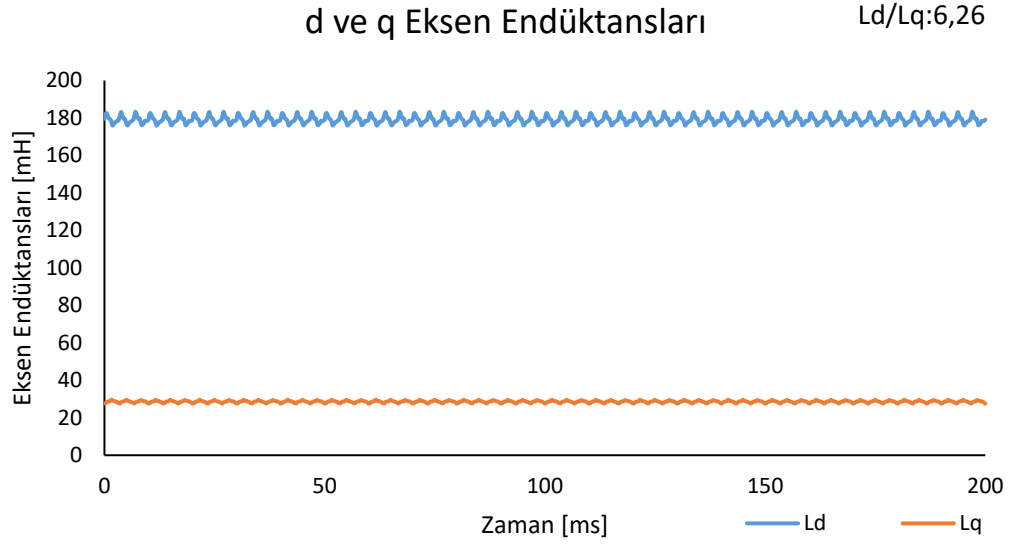
Şekil 5.48 Dört ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için moment zaman grafiği

Şekil 5.49'da motorun hava aralığı akı yoğunluğu verilmiş olup, bu değer 0,6 T civarındadır.



Şekil 5.49 Dört ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için hava aralığı akı yoğunlukları

Şekil 5.50'de çıkıklık oranı olan L_d/L_q değeri görülmektedir. Bariyer sayısının artmasıyla birlikte çıkıklık oranında arttığı görülmektedir.



Şekil 5.50 Dört ve yuvarlak bariyerli rotor yapısı için d ve q eksen endüktansları

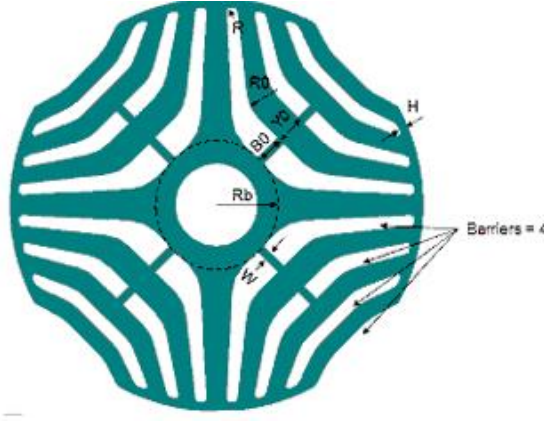
6 KARAR VERİLEN ROTOR YAPISI İÇİN OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI

Bariyer sayısı ve bariyer şekilleri için yapılan analiz sonuçlarının çıktıları Tablo 6.1’de verilmiştir. Bu tasarım çıktılarına göre dört ve köşeli bariyerli rotor yapısı üzerine odaklanılmış olup, optimizasyon çalışmaları için bu rotor yapısı üzerine yoğunlaşmıştır.

Tablo 6.1 Bariyer sayısı ve bariyer şekillerine göre analiz sonuçları

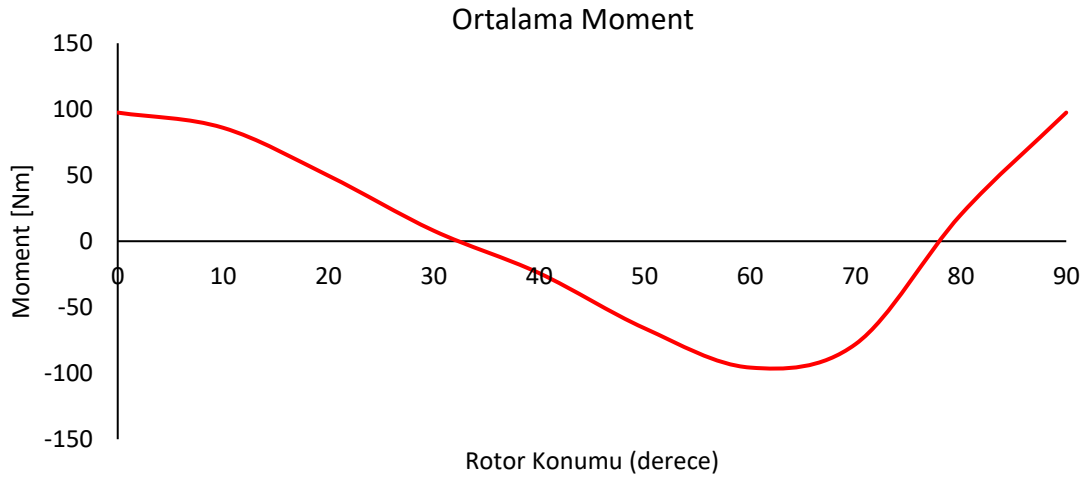
Parametre	Tek Bariyer		İki Bariyer		Üç Bariyer		Dört Bariyer	
	Köşeli	Yuvarlak	Köşeli	Yuvarlak	Köşeli	Yuvarlak	Köşeli	Yuvarlak
Akı Yoğunlukları (Stator Maksimum [T])	1,75	1,75	1,7	1,7	1,7	1,8	1,65	1,7
Akı Yoğunlukları (Rotor Maksimum [T])	1,25	1,2	1,3	1,3	1,2	1,1	1,3	1,3
Hava Aralığı Akı Yoğunlukları [T]	0,58	0,58	0,6	0,6	0,58	0,58	0,6	0,6
Moment [Nm]	68,05	67,8	87,8	88	92,3	92,06	96,46	96,41
Moment Dalgalanması (%)	23	23	15,2	16,6	10,6	10,8	6,7	7
Çıkıklık Oranı	3,48	3,46	5,17	5,05	5,6	5,58	6,26	6,26

Karar verilen rotor yapısının geometrisini oluşturabilmek için rotor parametreleri üzerine optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Optimizasyon yapılan rotor parametreleri Şekil 6.1’de görünmektedir.



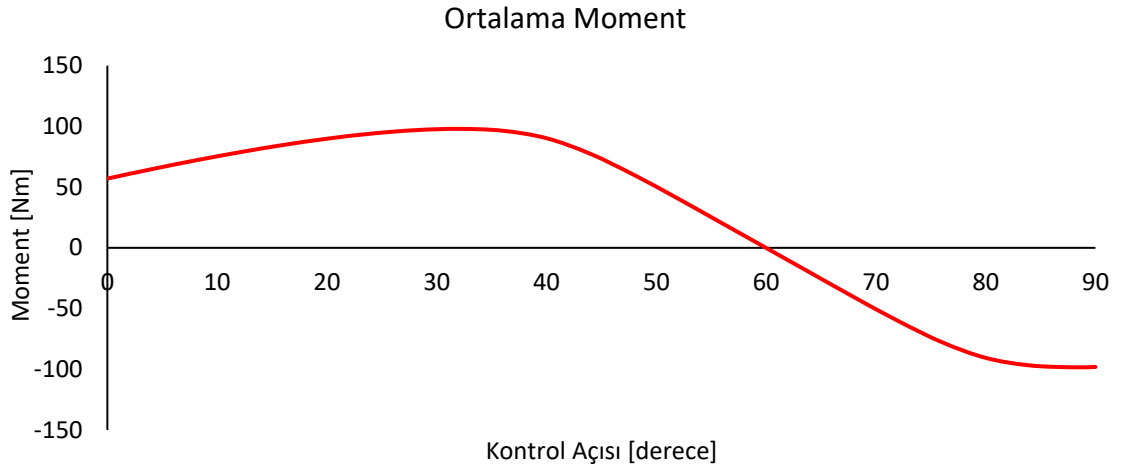
Şekil 6.1 Optimizasyon için kullanılan tasarım parametreleri

Öncelikle motorun rotor başlangıç konumunun belirlenmesi için analizler yapılmış olup, sonuçlar Şekil 6.2’de verilmiştir. Motor simetrik bir yapıya sahip olduğu için 0° ve 90° ‘deki rotor konumlarında aynı moment değerlerini vermektedir. Rotor başlangıç konumu olarak 0° seçilmiştir.

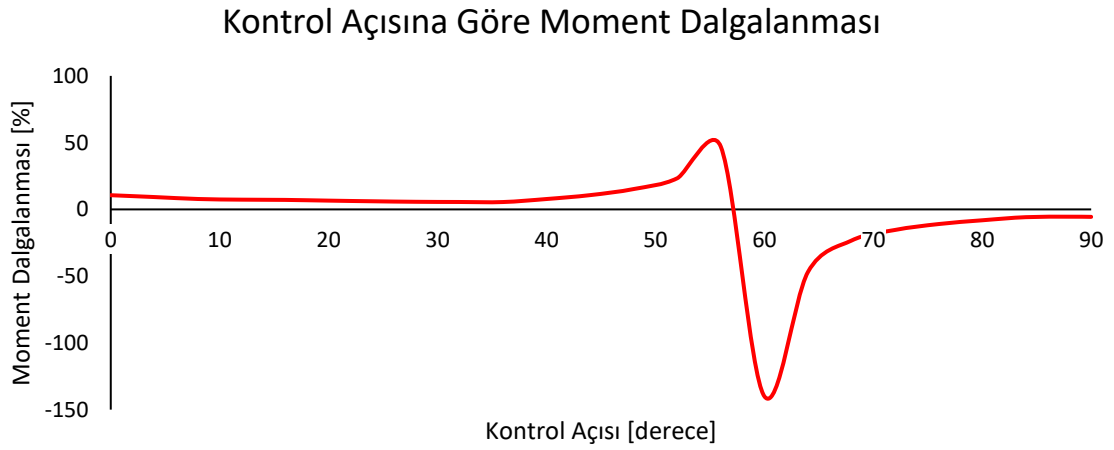


Şekil 6.2 Rotor başlangıç konumuna göre ortalama moment

Şekil 6.3’de kontrol açısının belirlenmesine ait analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 6.4’te ise kontrol açısına göre moment dalgalanmasının değişimi görünmektedir. Bu sonuçlara göre motorun en iyi moment ve moment dalgalanması değeri veren kontrol açısı olarak 36° seçilmiştir.

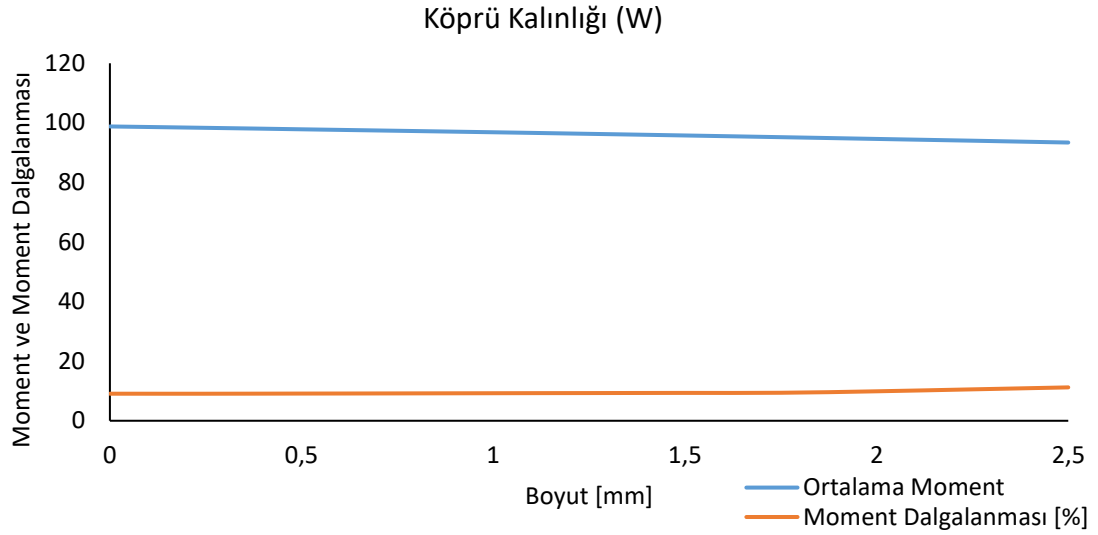


Şekil 6.3 Kontrol açısına göre ortalama moment

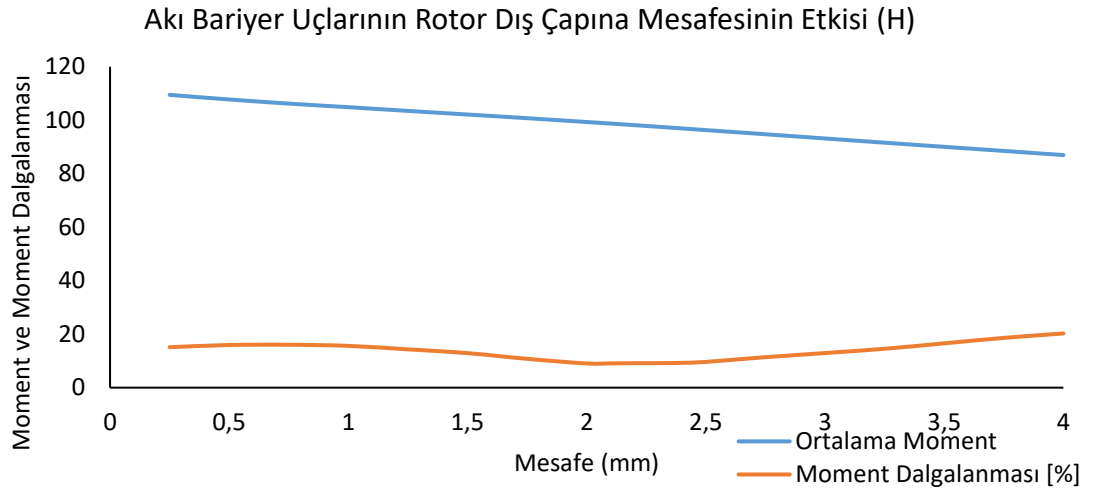


Şekil 6.4 Kontrol açısına göre moment dalgalanması

Şekil 2.2 'de belirtilen rotor geometrisindeki köprü ve kaburga kalınlıklarının belirlenmesi içinde parametrik analiz yöntemi kullanılmış olup sonuçlar Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da görülmektedir. Köprü yapısının kullanılmadığı durumda motor performansı daha iyi olmasına rağmen mekanik dayanımı artırmak adına en iyi performans değeri veren köprü kalınlığı seçilmeye çalışılmıştır.

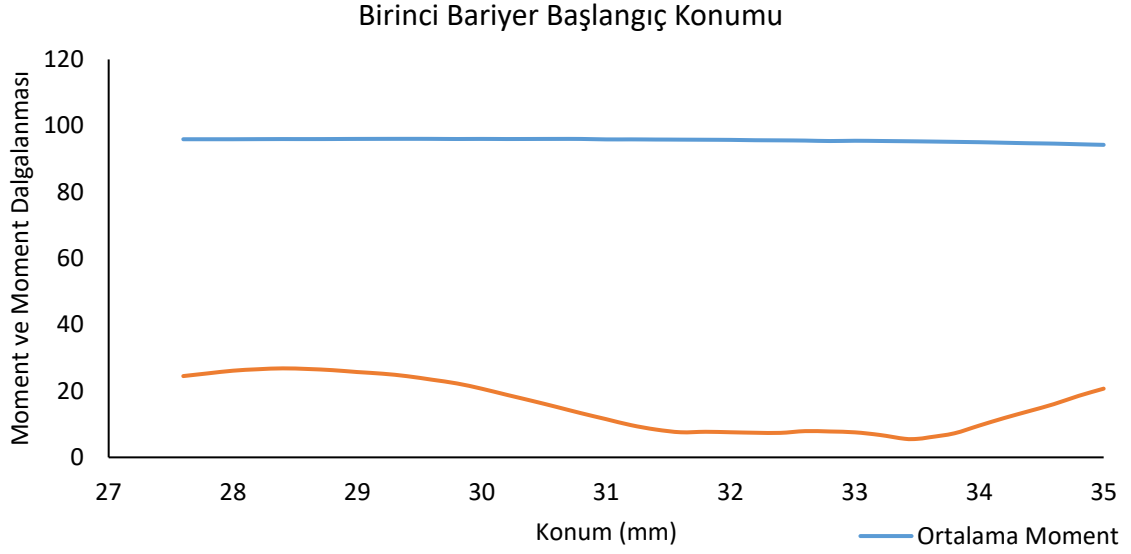


Şekil 6.5 Köprü kalınlığının ortalama moment ve moment dalgalanması



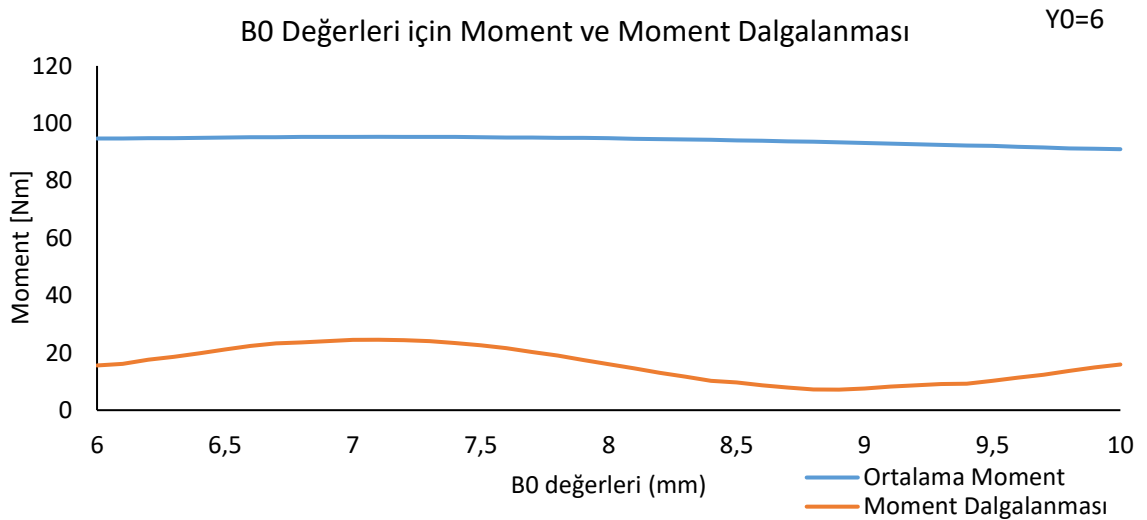
Şekil 6.6 Akı bariyer uçlarının rotor dış çapına mesafesinin ortalama moment ve moment dalgalanması

Şekil 6.7 'de birinci akı bariyerinin konumunun moment ve moment dalgalanmasına olan etkisi görülmektedir. Birinci bariyerin rotor merkezine olan uzaklığı 33.5 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 6.7 Birinci bariyer konumunun ortalama moment ve moment dalgalanması

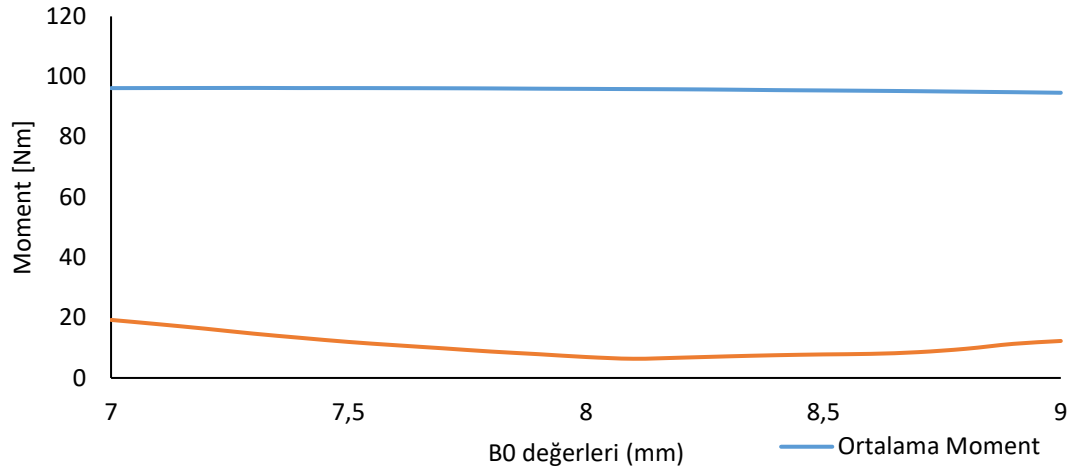
Bariyer genişlikleri için ortalama moment ve moment dalgalanması göz önünde bulundurularak analizler yapılmış olup, Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de sonuçlar görülmektedir. Bu kısımda izolasyon oranı olarak tanımlanan bariyer genişliklerinin manyetik malzeme genişliklerine oranının etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak B0 değerinin 7,2 ve Y0 değerinin 8,7 olduğu noktada en düşük moment dalgalanması elde edilmiştir.



Şekil 6.8 Y0=6 iken ortalama moment ve moment dalgalanması

B0 değerleri için Moment ve Moment Dalgalanması

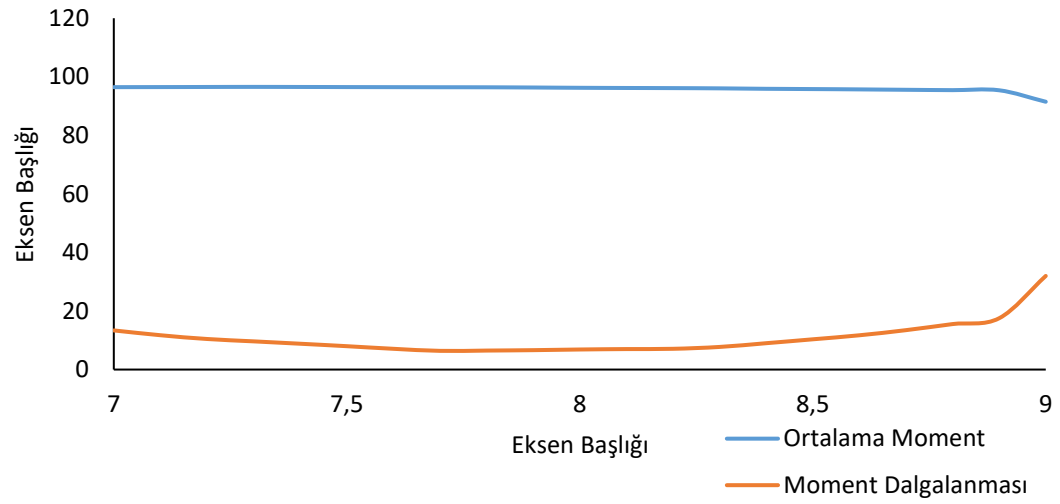
Y0=7



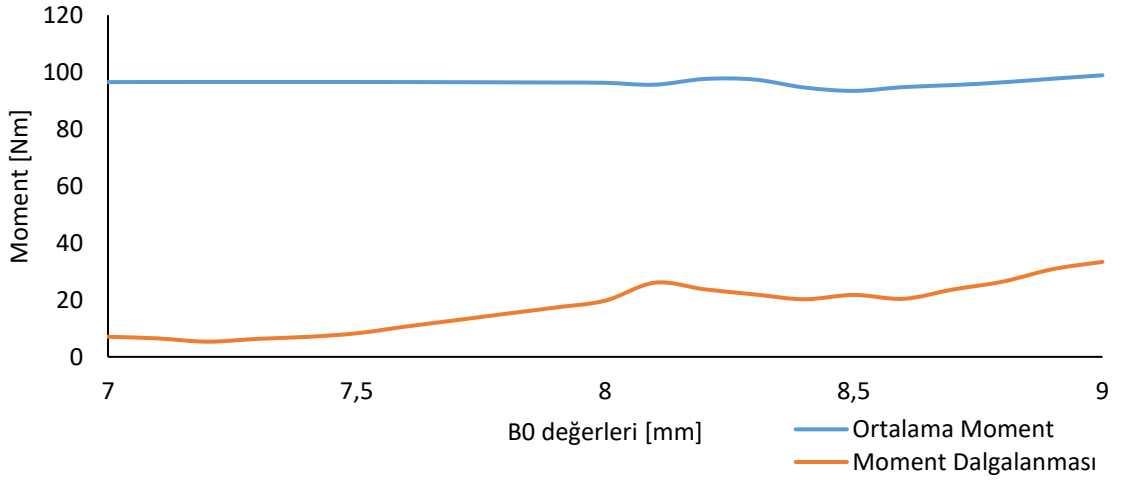
Şekil 6.9 Y0=7 iken ortalama moment ve moment dalgalanması

Moment ve Moment Dalgalanması

Y0=7,5

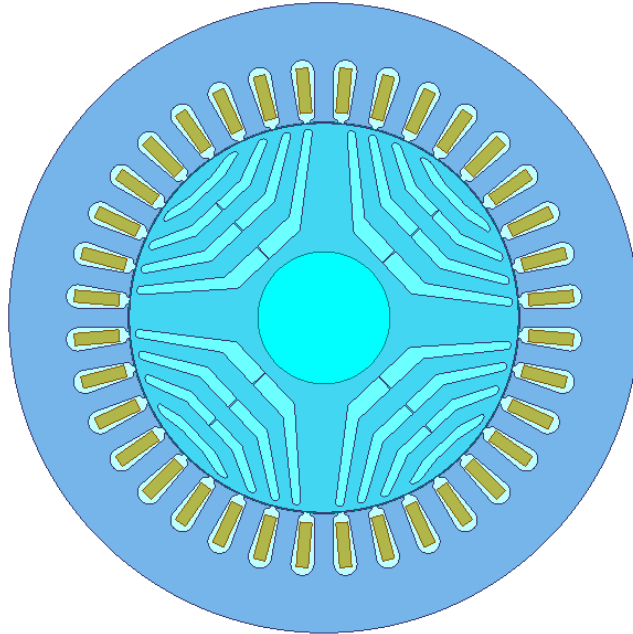


Şekil 6.10 Y0=7,5 iken ortalama moment ve moment dalgalanması

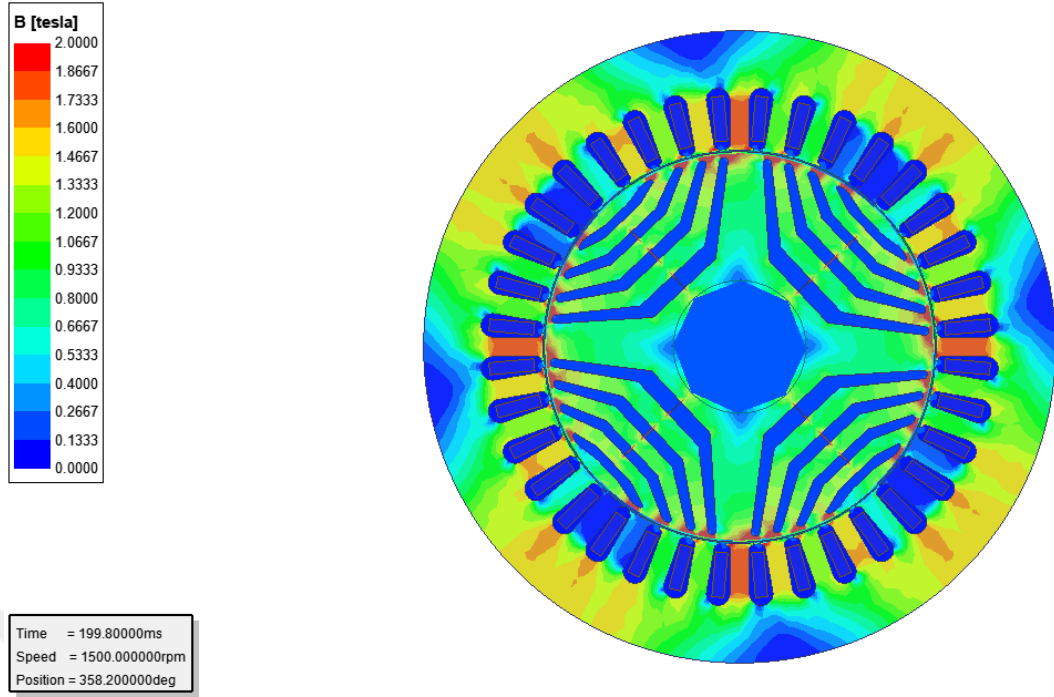


Şekil 6.11 Y0=8,7 iken ortalama moment ve moment dalgalanması

Şekil 6.12’de karar verilen rotor yapısına ait 2D model görünmektedir. Şekil 6.13’te bu rotor geometrisi için akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Statordaki en yüksek akı yoğunluğu dişler haricinde değeri 1,6 T civarındadır. Rotorda ise kısmi doyumlar haricinde en yüksek akı yoğunluğu değeri 1,1 T civarındadır.

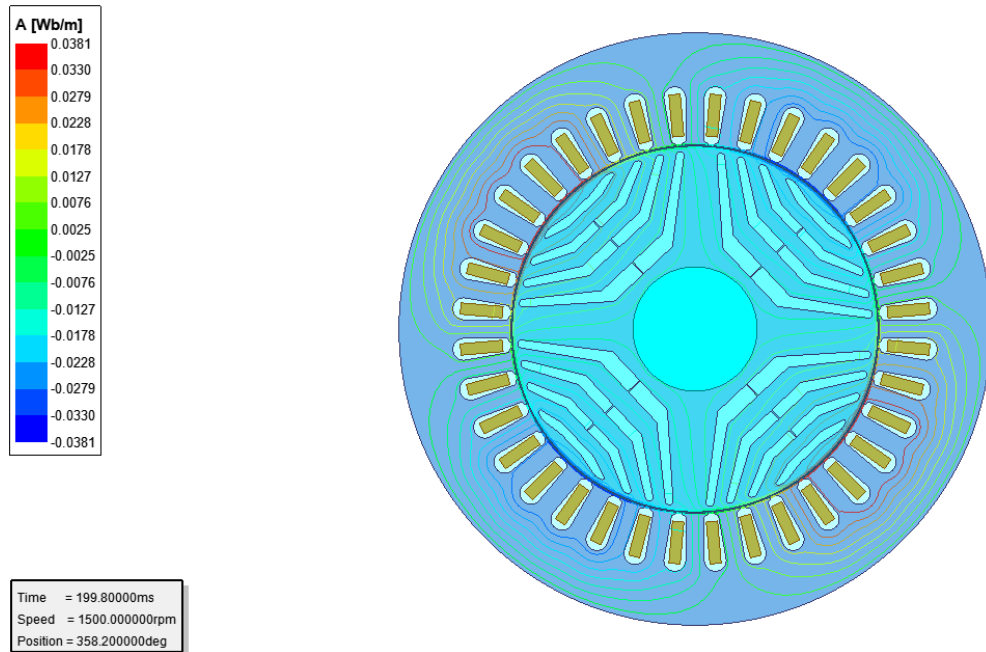


Şekil 6.12 Karar verilen rotor geometrisinin 2D görünümü



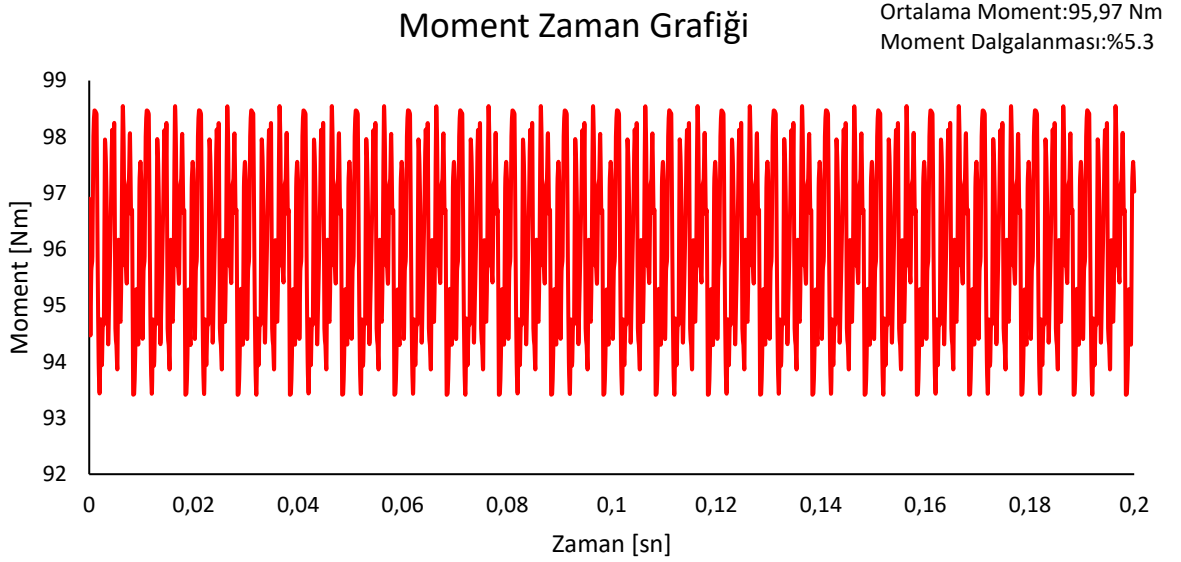
Şekil 6.13 Karar verilen rotor geometrisi için akı yoğunluklarının dağılımı

Şekil 6.14'te motora ait akı yolları görülmektedir. Akı yollarının dağılımından anlaşılacağı gibi motorun kutup sayısı dört olarak görünmektedir.



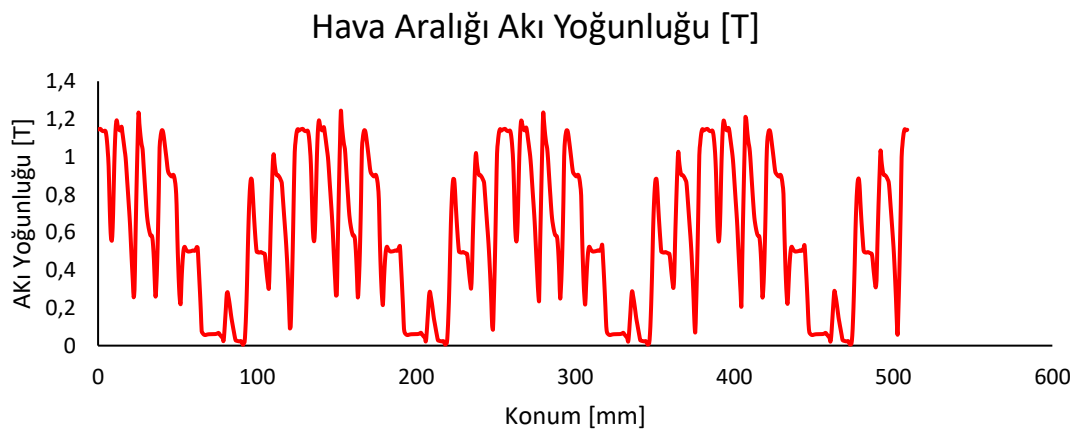
Şekil 6.14 Karar verilen rotor geometrisi için manyetik akı yolları

Şekil 6.15 'te verilen moment zaman grafiğinde motorun ortalama çıkış momenti 95,97 Nm iken tepeden tepeye moment değeri 5,08 Nm'dir. Motorun moment dalgalanması %5,3'tür. Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda motorun moment dalgalanması değeri %5 seviyelerine kadar düşmektedir.



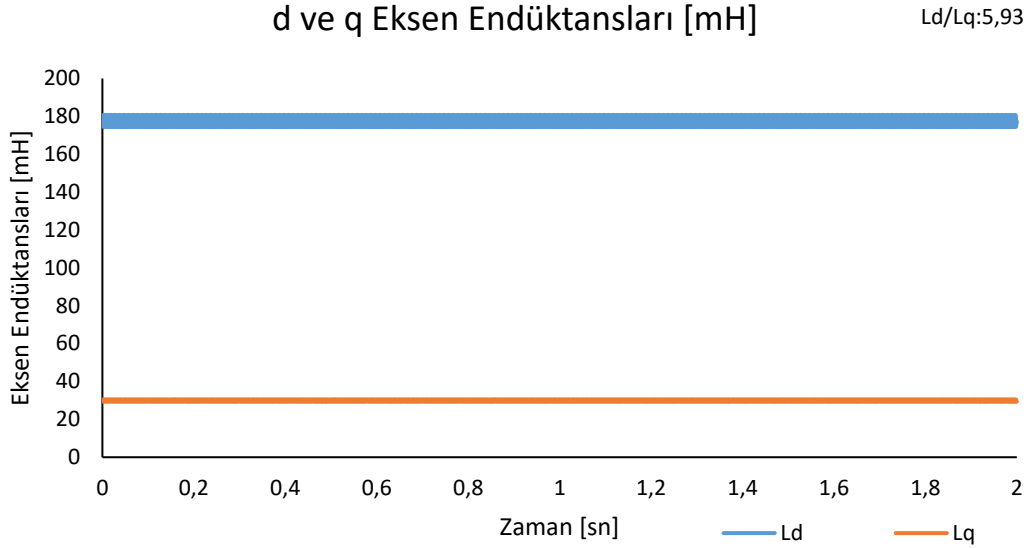
Şekil 6.15 Karar verilen rotor geometrisi için moment zaman grafiği

Şekil 6.16'da motorun hava aralığı akı yoğunluğu verilmiş olup, bu değer 0,6 T civarındadır.



Şekil 6.16 Karar verilen rotor geometrisi için hava aralığı akı yoğunlukları

Şekil 6.17’de çıkıklık oranı olan L_d/L_q değeri görülmektedir. Bariyer sayısı ve bariyer şekilleri için yapılan analizler arasından en yüksek çıkıklık oranı elde edilen dört ve köşeli bariyerli rotor yapısı olmuştur.



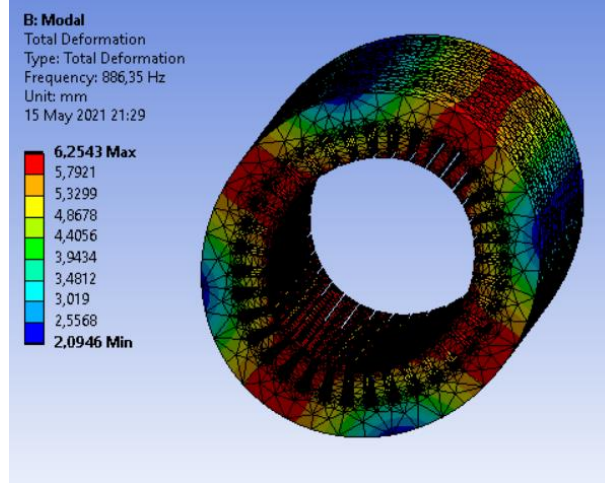
Şekil 6.17 Karar verilen rotor geometrisi için d ve q eksen endüktansları

6.1 Optimize Edilen Modelin Rezonans Durumunun İncelenmesi

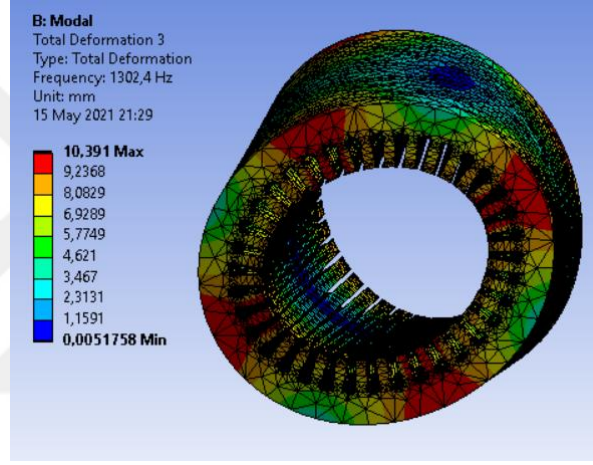
Optimizasyon çalışması sonrasında motordaki ses ve titreşim etkilerini incelemek amacıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle stator yapısının doğal frekansları bulunmuş ve daha sonra motorun zorlanmış frekanslar altındaki davranışı incelenmiştir.

6.1.1 Doğal Frekansların Bulunması

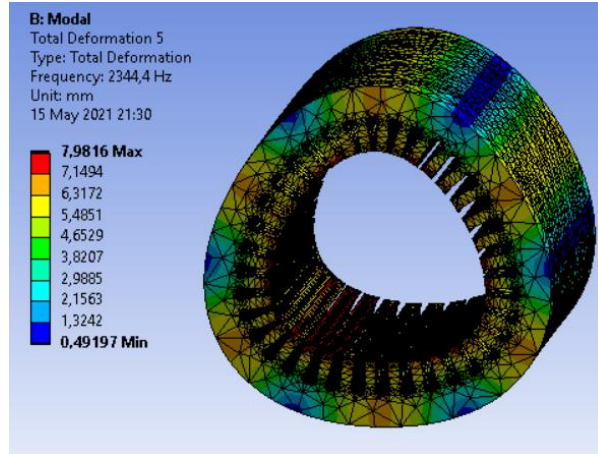
Doğal frekans, bir nesnenin yalnızca elastikiyetine ve kütlesine bağlı olan ve belirli bir frekansta uyarıldığında nesnenin sürekli ve yüksek genlikte titreşeceği frekans değeridir. Bu bölümde, farklı modlar için stator geometrisinin doğal frekansları Ansys Workbench Modal yazılımı kullanılarak incelenecektir. Doğal frekansların belirlenmesi için yapılan analiz sonuçları Şekil 6.18 , 6.19 ve 6.20 ‘de görülmektedir.



Şekil 6.18 Doğal Frekansın birinci modu



Şekil 6.19 Doğal frekansın ikinci modu



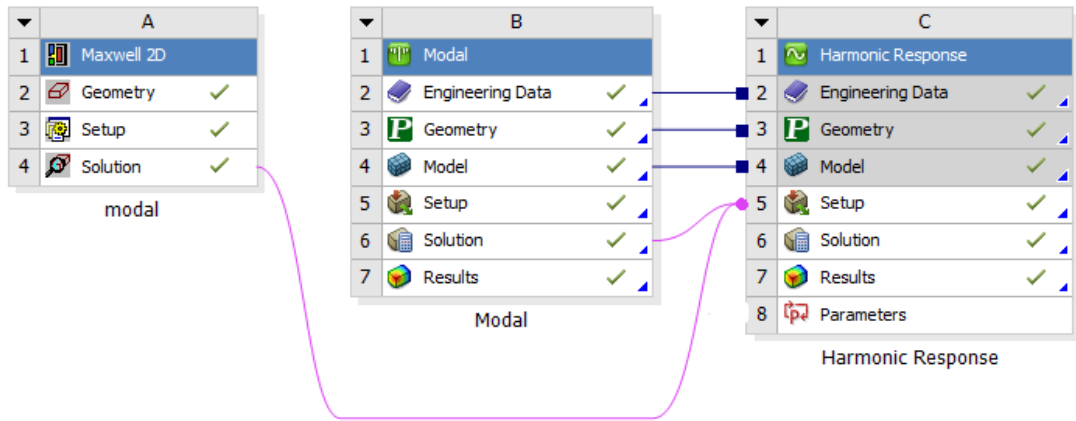
Şekil 6.20 Doğal frekansın üçüncü modu

Doğal frekans analizi sonuçları incelenmiş olup, bu frekanslar sırasıyla 886,35 Hz, 1302,4 Hz ve 2344,4 Hz' dir.

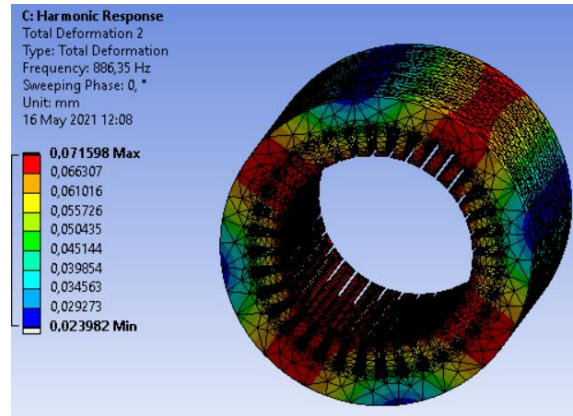
Doğal frekansların bulunmasından sonra stator geometrisi için zorlanmış frekansları bulmak amacıyla harmonik analizi yapılmıştır.

6.1.2 Harmonik Cevap Analizi

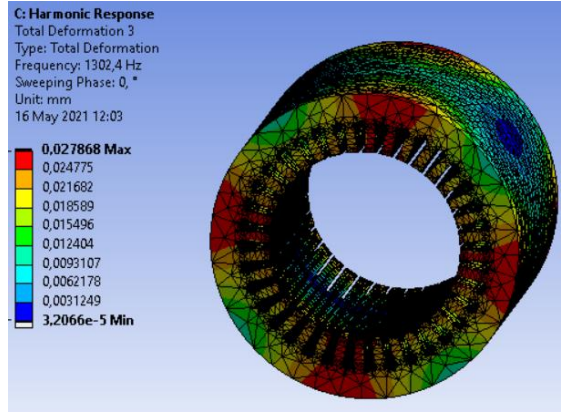
Dinamik bir kuvvet altında zorlanmış titreşimler yapan bir geometrinin doğal frekansı ile zorlanmış frekans eşitse, malzeme rezonans ve deformasyona girer. Bu bölümde, stator dişleri üzerindeki radyal elektromanyetik kuvvetler Ansys Maxwell yazılımında analiz edilmektedir. Daha sonra bu kuvvetler Ansys Harmonic Response yazılımına aktarılarak elektromanyetik kuvvetlerin motora olan etkileri, stator dişler üzerindeki etkileri multifizik ile analiz edildi.



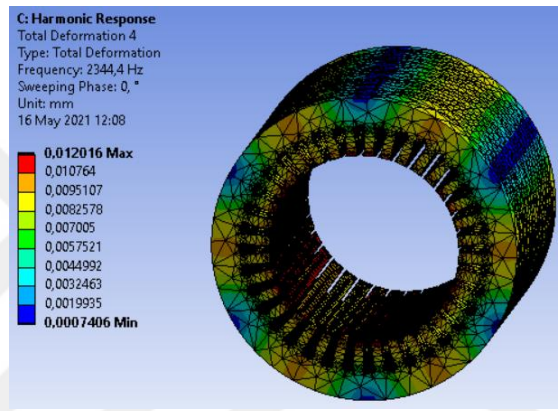
Şekil 6.21 Multifizik analiz yapısı



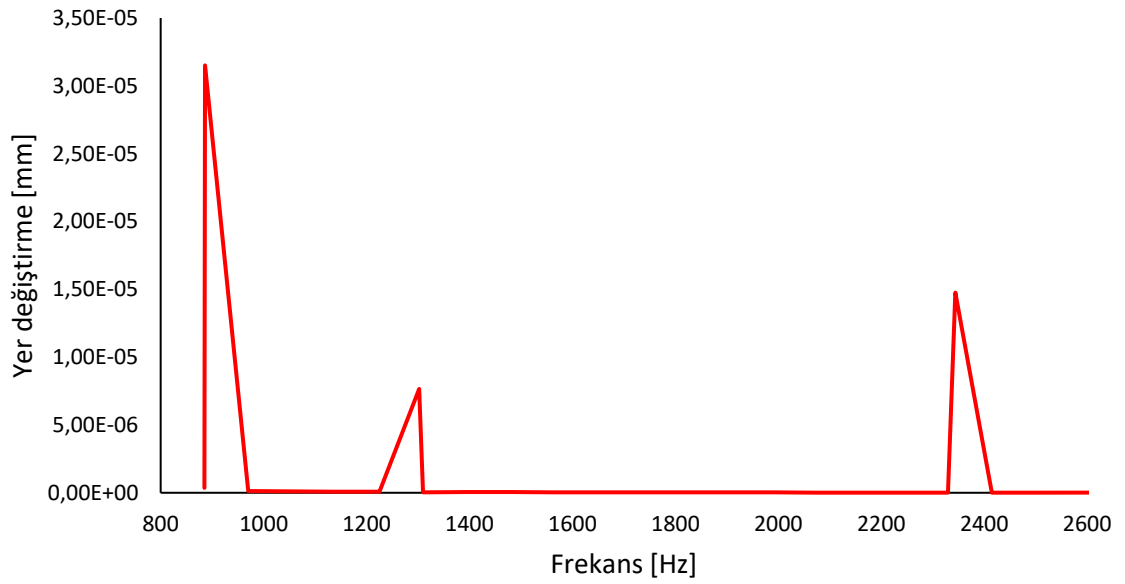
Şekil 6.22 886,35 Hz'de ki deformasyon



Şekil 6.23 1302,4 Hz'de ki deformasyon



Şekil 6.24 2344,4 Hz'de ki deformasyon



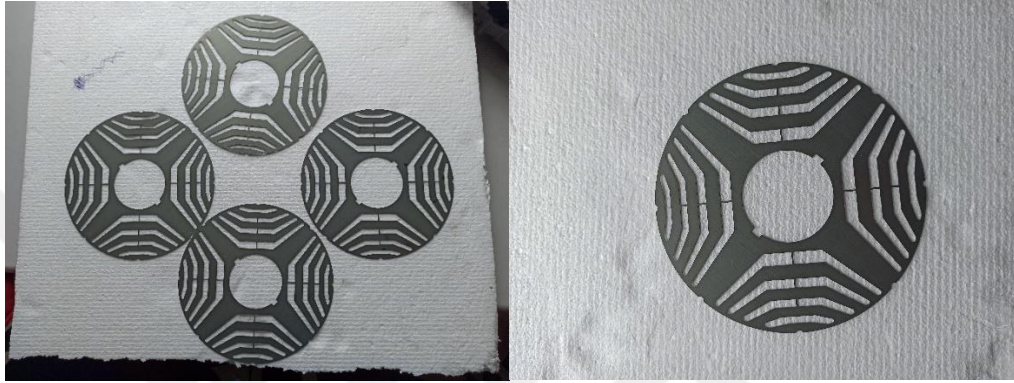
Şekil 6.25 Frekansa göre yer değiştirme

Burada Şekil 6.22, 6.23, 6.24 ve 6.25'te görüldüğü gibi, elektromanyetik kuvvetlerden kaynaklanan belirli frekanslardaki yer değıştirme değeri, temelde motorun çalışma durumundaki titreşim değeri'dir. Enerji kaynağı olan bu titreşimler insan gözü ile fark edilememekte ve ölçü aletleri ile ölçülebilmektedir. Aynı zamanda bu titreşimler, diğeri bir enerji kaynağı olan gürültüye dönüştürülerek insan kulağında hissedilebilmekte ve ölçüm cihazları ile ölçülebilmektedir.



7 PROTOTİP ÇALIŞMASI

Bu bölümde tasarım çıktılarına göre belirlenen ve optimize edilen modelin prototip çalışmaları yapılmıştır. Prototip üretimi gerçekleştirilecek olan modele ait rotor yapısı lazer kesim yöntemi ile kesildikten gruplanmıştır. Şekil 7.1’de lazer kesim sonrası elde edilen laminasyonlar görülmektedir.



Şekil 7.1 Lazer kesim sonrası elde edilen laminasyonlar

Laminasyonlar bir dizme aparatı yardımıyla uygun paket boyunda dizilerek rotor çekirdeği haline gelmiştir. Şekil 7.2 ‘de gruplanmış rotor çekirdeği görünmektedir.



Şekil 7.2 Prototip motor rotor yapısı

Rotor gruplama işleminin ardından sırasıyla mil geçirme, balanslama ve gövde geçirme işlemleri yapılarak test edilebilir bir hale getirilmiştir. Senkron relüktans motorlar direk olarak şebekeden sürülemedikleri için hali hazırda endüstride kullanılan özelleşmiş yazılıma sahip bir sürücü temin edilmiş olup prototip motor için test çalışmalarına başlanmıştır.

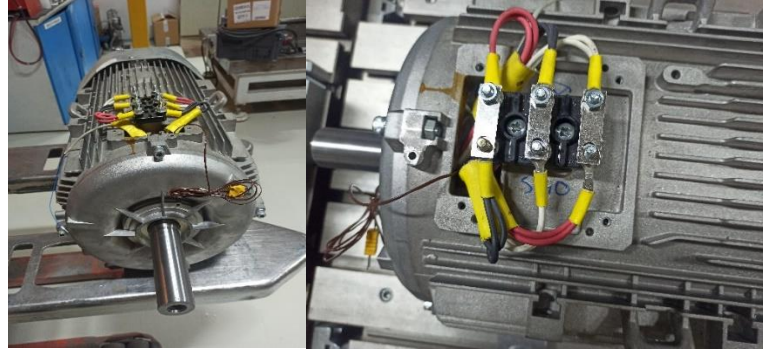


Şekil 7.3 Mil geçirme operasyonu

7.1 Prototip Motor Test Çalışması

Bölüm 7.1’de dört ve köşeli bariyer yapısına sahip olan modelin prototip üretimi için seçilip motor haline getirildikten sonra testlerinin yapılması anlatılmıştır. Performans testleri için bir sürücü devresi ve bir dinamofren kullanılmıştır. Motor test edilirken IEC standartlarına uygun olarak nominal yükün %25, %50, %75, %100 ve %125 katlarına yüklenerek sonuçlar kaydedilmiştir.

Prototip motor ve test aşamasında kullanılan sürücüye ait görseller Şekil 7.4’te verilmiştir.



(a)

(b)



(c)

(d)

Şekil 7.4 (a) Prototip motor genel görünümü (b) Prototip motor bağlantıları
(c) Sürücü görünümü (d) Test sisteminin genel görünümü

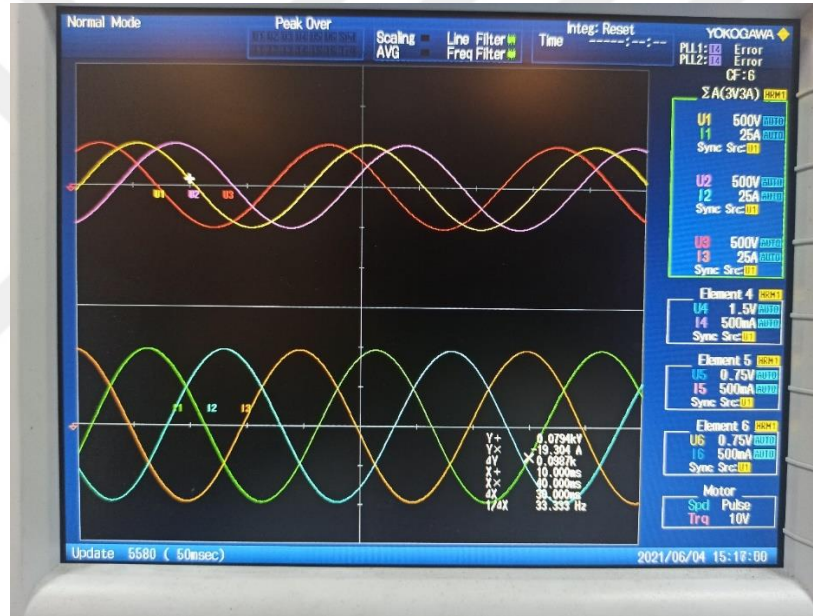
Motor testlerine başlamadan önce tam yükte ısınma testi yapılmıştır. Sargı sıcaklığı 104.6 °C değerinde sabitlenmiştir. Ortam sıcaklık 28.4 °C'dir.



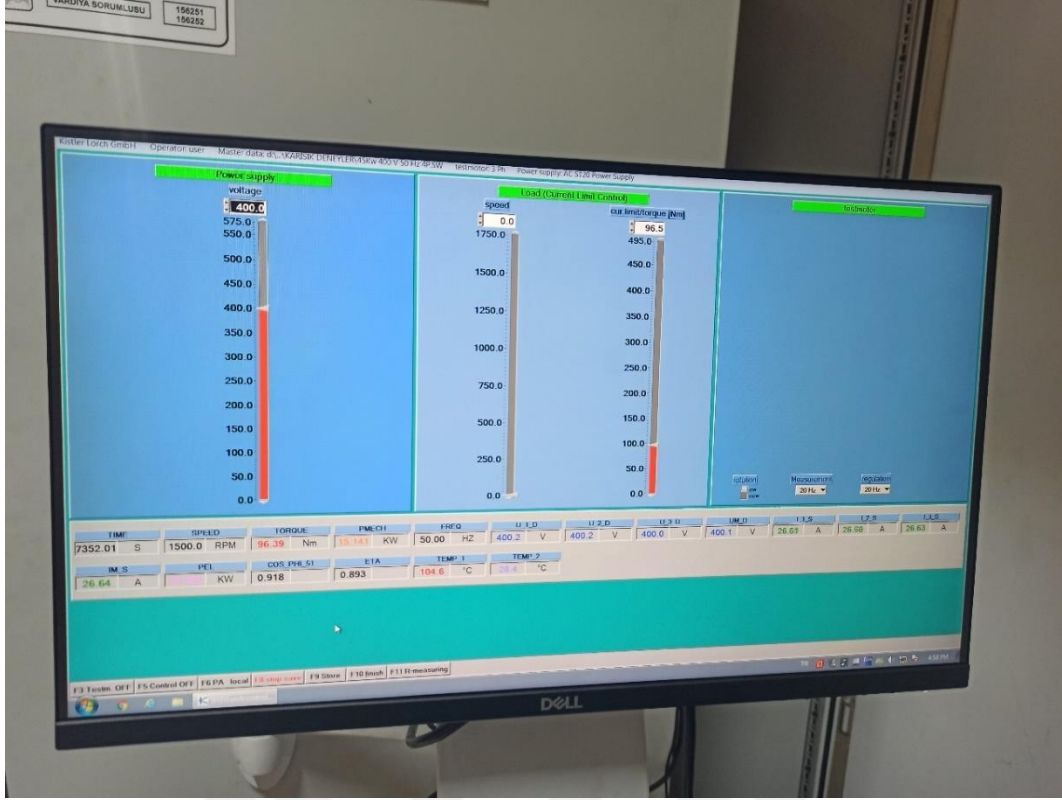
Şekil 7.5 Isınma testi sonuçları

Şekil 7.5'te görülen verim değeri sistem (sürücü+motor) verimi %89,3 olup, sürücü verimi % 95.1 'dir. Bu durum göz önüne alındığında tam yük noktasında motor verim değeri % 94 'tür. IEC standartlarına göre 15 kW 4 kutup bir motorun IE4 verim sınıfına sahip olması için gereken nominal verim değeri %93,9'dur. Bu doğrultuda prototip çalışması ile elde edilen motor verim değeri IE4 verim sınıfını nominal değerin üzerinden yakalamaktadır.

Motorun nominal yükünde çalışmasına ait dinamo ve analizör çıktıları Şekil 7.6, Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'de verilmiştir.



Şekil 7.6 Nominal yükteki akım ve gerilim değerlerinin analizör çıktıları

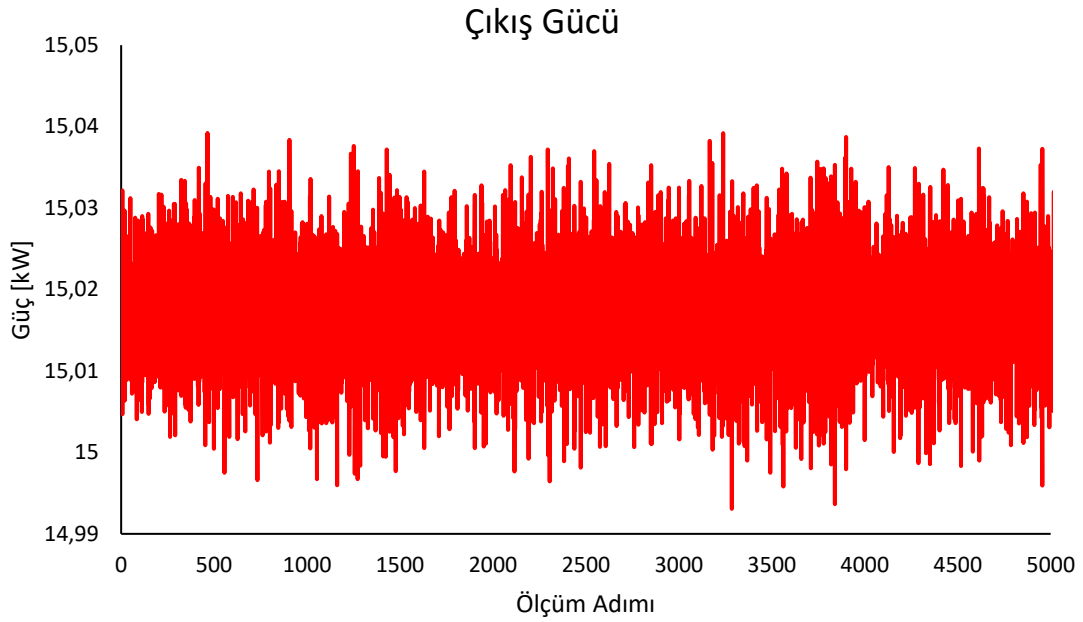


Şekil 7.7 Nominal yükteki dinamo çıktıları



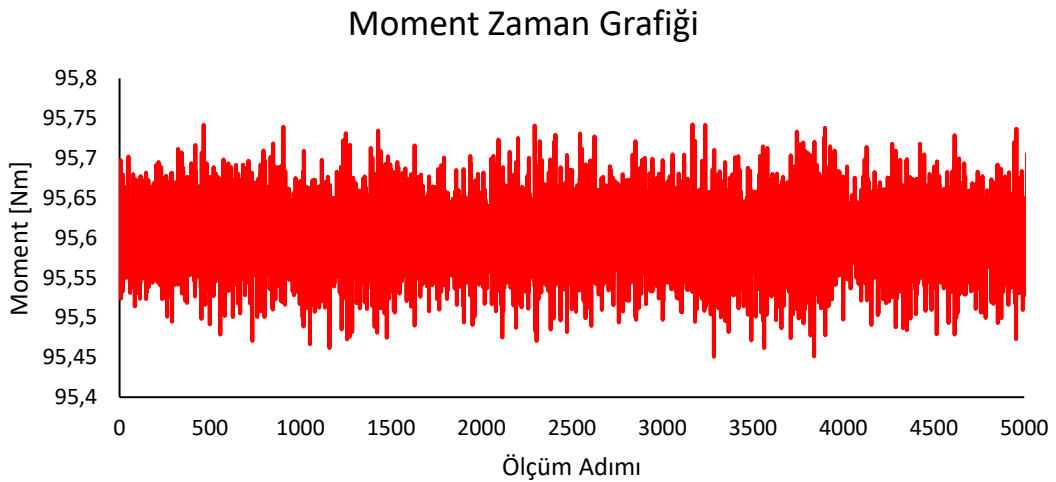
Şekil 7.8 Nominal yükteki sürücü görüntüsü

Nominal yükteki motorun çıkış gücü Şekil 7.9 verilmiştir. Ölçümler saniyede 5 değer olarak alınmıştır.

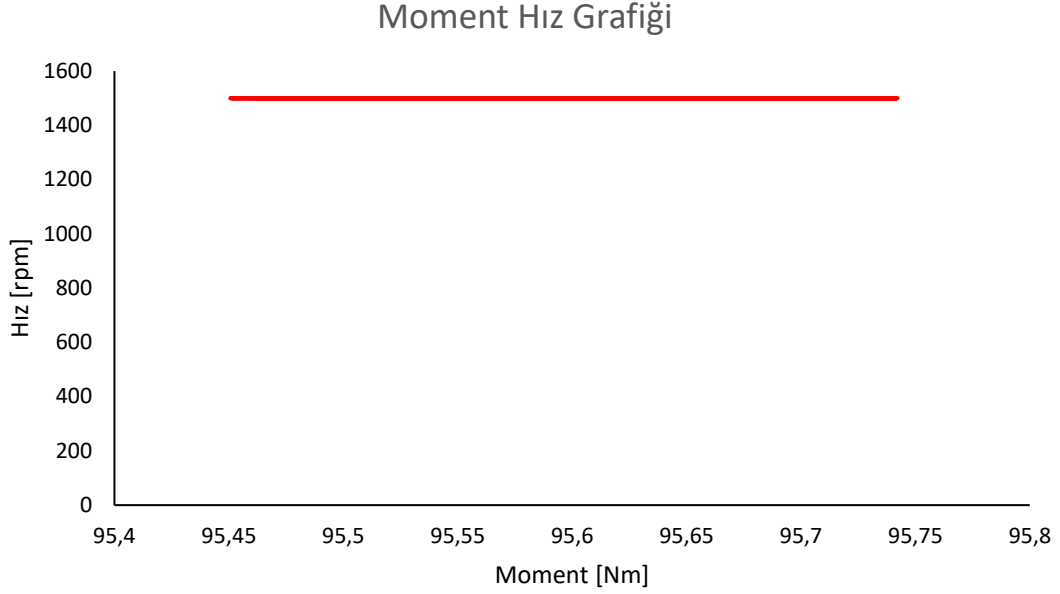


Şekil 7.9 Motor çıkış gücü

Nominal yükte elde edilen moment değerleri Şekil 7.10'da verilmiş olup, ortalama değer 95,6 Nm'dir. Nominal yük altında en düşük 95,45 Nm ve en yüksek 95,75 Nm değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler ışığında motorun moment dalgalanması değeri %0,3'tür. Ölçümler saniyede 5 değer olarak alınmıştır. Şekil 7.11'de hız moment grafiği verilmiştir.



Şekil 7.10 Dinamodan elde edilen moment zaman grafiği



Şekil 7.11 Nominal yükteki hız moment grafiği

Motora yapılan titreşim testi sonucuna göre motorun titreşim seviyesi 0,562 m/s² elde edilmiştir. EN 60034-14 standartına göre 160 frame bir motorun titreşim seviyesinin limit değeri 3,5 m/s²'dir. Limit değerleri Tablo 7.1'de verilmiştir. H ile gösterilen değer mil yüksekliğinin milimetre olarak yüksekliğidir.

Tablo 7.1 Standartta tanımlanan titreşim seviyeleri

TS EN 60034-14 Titreşim Limit Değerleri		
56≤H≤132	132<H≤280	H>280
İvme	İvme	İvme
m/s ²	m/s ²	m/s ²
2,5	3,5	4,4

Tablo 7.2 15 kw senkron relüktans motor farklı yüklerdeki performans testi değerleri

15 kW Senkron Relüktasn Motor Farklı Yüklerdeki Performans Testi Değerleri								
U _{motor} [V]	I _{faz} [A]	P _{giriş} [kW]	P _{çıkış} [kW]	T [Nm]	min-1	Motor Verimi (%)	Frekans	Sürücü Verimi (%)
400	33,3	21,3	18,75	119,4	1500	0,925638	50	0,951
400	26,5	16,8	15,02	95,6	1500	0,940113	50	0,951
400	20,2	12,6	11,26	71,7	1500	0,939696	50	0,951
400	14,3	8,53	7,51	47,8	1500	0,925786	50	0,951
400	8,4	4,47	3,76	23,9	1500	0,884504	50	0,951

8 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında son 20 yılda giderek önem kazanmış olan, değişken hızlı uygulamalarda kullanılan ve özellikle asenkron motora göre hem verimlilik hem de maliyet olarak alternatif olarak görülen senkron relüktans motorun tasarımı ve moment dalgalanmasının azaltılması hedeflenmiştir. Çalışmanın çıkış noktası olarak 15 kW gücüne bir asenkron motora alternatif bir motor oluşturmaktır. Çalışmanın tamamında sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçlar ile prototip bir motor yapılarak performans sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın ilk adımında seri üretimde kullanılan 15 kW gücündeki dört kutuplu asenkron motorun manyetik analizleri yapılmıştır. Manyetik analiz sonuçları ile performans sonuçları karşılaştırılmış olup, sonuçların birbiriyle tutarlı olduğu görülmüştür.

İkinci adımda ise; asenkron motor referans alınarak senkron relüktans motorun tasarımına başlanmış olup, parametreler belirlenmiştir. Parametreler belirlenirken özellikle stator yapısına ait olan stator geometrisi, sarım sayısı ve sargı şeması gibi parametreler sabit tutulmuştur. Değişken olarak bariyer sayısı, bariyer şekli ve izolasyon oranı belirlenerek bu parametrelere göre optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda dört bariyerli ve köşeli yapının moment ve moment dalgalanması yönünden en iyi sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. En iyi sonucu veren rotor yapısı için optimizasyon çalışmalarına başlanmıştır. Optimizasyon sonucunda moment dalgalanması değerinde iyileşme görülmüştür.

Elde edilen bu sonuçlar ışığında prototip model için dört bariyerli ve köşeli yapıya karar verilmiştir. Prototip model için referans asenkron motorun stator ve gövde yapısı kullanılmıştır. Manyetik analiz sonuçları ile performans sonuçlarının tutarlılığını görmek amacıyla prototip motorun performans testleri yapılmıştır. Motor testleri esnasında sürücü olarak senkron relüktans motorun sürüşü için özel yazılıma sahip olan bir sürücü kullanılmıştır. IEC standartlarında tanımlanan farklı yük kademeleri için testler gerçekleştirilmiştir. Nominal yükte gerçekleştirilen test sonuçlarına göre motor verimi %94 , motor momenti 95,6 Nm , akım değeri 31,9 A elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçların analiz sonuçları ile karşılaştırıldığı zaman

yakın sonuçlar olduğu gör÷lm÷ştür. Rotor geometrisinde yapılacak olan optimizasyon çalışmaları ile moment dalgalanması probleminin azaltılabileceği anlaşılmış olup, bu optimizasyon sırasında doğru sınır koşulları belirlenerek yapılacak olan analizlerin de deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu anlaşılmıştır.



- [1] J. K. Kostko, "Polyphase reaction synchronous motors," in Journal of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 42, no. 11, pp. 1162-1168, Nov. 1923, doi: 10.1109/JoAIEE.1923.6591529.
- [2] Douglas J. F. H., "Synchronous Induction Motor", U.S. Patent 2 913 607, 17 Kasım 1959
- [3] Bauer, P.F., "Synchronous induction motor having a segmented rotor and squirrel cage winding", US Patent 2733362, 1956
- [4] Risch, N., "Segmented rotor core lamination for use in a synchronous induction motor", US Patent 2769108 A, 1956
- [5] Lawrenson P. J., Agu L. A., 1964. Theory and performance of polyphase reluctance machines, IEE Proceedings, 111, 1435-1445.
- [6] Lawrenson, P.J., "Development and application of reluctance motors", Electronics and Power , vol.11, no.6, pp.195,198, June 1965
- [7] Anderson, A.F.; Cruickshank, A.J.O., "Development of the reluctance motor," Electronics and Power , vol.12, no.2, pp.48,, February 1966
- [8] Cruickshank, A.J.O.; Anderson, A.F.; Menzies, R.W., "Theory and performance of reluctance motors with axially laminated anisotropic rotors," Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of , vol.118, no.7, pp.887,894, July 1971
- [9] Rao, S.C., "AC synchronous motor having an axially laminated rotor", US Patent 4110646, August 1978
- [10] Fratta, A.; Vagati, A., "A reluctance motor drive for high dynamic performance application," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.28, no.4, pp.873,879, Jul/Aug 1992

- [11] Honsinger, V.B. "The Inductances L_d and L_q of Reluctance Machines" *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* vol. pas-90 no. 1. 1971.
- [12] Chalmers, B.J.; Mulki, A.S., "Design and Performance of Reluctance Motors with Unlaminated Rotors," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* , vol.PAS-91, no.4, pp.1562,1569, July 1972
- [13] Fong W., Htsui, J. S. C., 1970. New type of reluctance motor, *IEE Proceedings*, 117, 545–551.
- [14] Lipo, T.A. "Synchronous Reluctance Machines – A Viable Alternative for AC Drives". *Electric Machines and Power Systems*. Hemisphere Publishing Corporation. 1991.
- [15] Miller, T.J.E. "Design of a Synchronous Reluctance Machine Drive". *IEEE Transactions on Industry Applications* vol.27 no.4. 1991.
- [16] Vagati, A, Franceschini, G. Marongiu, I. ve Troglia, G.P. "Design Criteria of High Performance Synchronous Reluctance Motors" 1992.
- [17] Staton, D.A. Miller T.J.E. ve Wood, S.E. "Maximising the Saliency Ration of the Synchronous Reluctance Machine" *IEEE Proceedings* vol. 140 no. 4. 1993.
- [18] Matsuo, T. ve Lipo, T.A. "Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine" *IEEE Transactions on Energy Conversion* vol. 9 no. 2. 1994.
- [19] Vagati, A. "Synchronous Reluctance Solution: A New Alternative in AC Drives". 1994.
- [20] Kamper, M.J. "Finite Element Design Optimization of the Cageless Reluctance Synchronous Machines" *IEEE Transactions on Energy Convestion* vol. 11 no. 3. 1996
- [21] 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 Ekim1993.

- [22] Pellegrino, G. Amando, E. Guglielmi P. ve Vagati, A. "A 250 kW transverse laminated Synchronous Reluctance Motor" 2007.
- [23] Vagati, A. Pastorelli, M. Franceschini, G. ve Petrache, S.C. "Design of Low Torque Ripple Synchronous Reluctance Motors" *IEEE Transactions on Industry Applications* vol. 34 no. 4. 1998.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Moghaddam, R.R. Magnussen, F. ve Sadarangani, C. "A FEM Investigation on the Synchronous Reluctance Machine Rotor Geometry With Just One Flux Barrier as a Guide Toward The Optimal Barrier Shape". 2009.
- [28] Kolehmainen, J. "Synchronous Reluctance Motor with Form Blocked Rotor" *IEEE Transactions on Energy Conversion* vol. 25 no. 2. 2010
- [29] Haataja, J. Pyrhönen, J. "Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor: an Alternative Motor in Variable Speed Drives". *Energy Efficiency in Motor Driven Systems*. ISBN 978-3-642-55475-9. Springer – Verlag. Berlin. 2003.
- [30] Wang, K. Zhu, Z.Q., Ombach, G., Koch, M., Zhang, S., Xu, J. "Optimal Slot – Pole and Flux Barrier Layer Number Combinations" 8. *International Conference and*

- Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. 2013.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Moghaddam, R.-R.; Magnussen, F.; Sadarangani, C., "Novel rotor design optimization of Synchronous Reluctance Machine for low torque ripple," *Electrical Machines (ICEM)*, 2012 XXth International Conference on , vol., no., pp.720,724, 2-5 Sept. 2012
- [34] Moghaddam, R.-R.; Gyllensten, F., "Novel High-Performance SynRM Design Method: An Easy Approach for A Complicated Rotor Topology," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.61, no.9, pp.5058,5065, Sept. 2014
- [35] Moghaddam, R.R.; Magnussen, F.; Sadarangani, C., "Novel rotor design optimization of synchronous reluctance machine for high torque density," *Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012)*, 6th IET International Conference on, vol., no., pp.1,4, 27-29 March 2012
- [36] 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.
- [37] 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.

- [38] Boglietti, A., Cavagnino, A., Pastorelli M., Vagati A., 2005. Experimental comparison of induction and synchronous reluctance motors performance, Industry Applications Conference, Fourtieth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2005, 1, 474 – 479.
- [39] Hatajaa, J., 2003. A Comparative Performance Study Of Four-Pole Induction Motors And Synchronous Reluctance Motors In Venable Speed Drives, Lappeenranta University of Technology, Doc. Thesis, 138, Finland.
- [40] T. A. Lipo, T. J. E. Miller, A. Vagati, I. Boldea, L. Malesani, and T. Fukao, “*Synchronous reluctance drives*” tutorial presented at IEEE-IAS Annual Meeting, Denver, CO, Oct. 1994.
- [41] I. V. Hrabovcova, J. Pyrhonen, J. Haataja, “*Reluctance Synchronous motor (RSM) and its performances*”, Lappeenranta University of Technology, May 2005.
- [42] L. Xu, X. Xu, T.A. Lipo and D. W. Novotny, “*Vector control of a synchronous reluctance motor including saturation and iron loss*”, IEEE Trans. Industry Applications., vol. 27,no. 5, pp. 977-987, Sept. 1991.
- [43] T. Fukami, M. Momiyama, K. Shima, R. Hanaoka, S. Takata, “*Performance of a Dual-Winding Reluctance Generator with a multiple-Barrier rotor*”, Department of Electrical and Electronic Engineering, Kanazawa Institute of Technology, Ishikawa 921-8501, Japan, June 30, 20063.
- [44] Chalmers, B. J., Mulki, A. S., 1970. New reluctance motors with unlaminated rotors, Proc.IEE, 17, 2271-2272.
- [45] Chalmers, B. J., Mulki, A. S., 1972. Design and performance of reluctance motors with unlaminated rotors, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 91,1562-1569.
- [46] Niazi. P., 2005. Permanent magnet assisted synchronous reluctance motor design and performance improvement, Texas A&M University, Submitted to the

Office of Graduate Studies, Doc. Thesis, 153, Texas.

- [47] Özdemir, Ü., 2004. Senkron Relüktans Motorun Vektör Kontrolü. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, Elazığ.
- [48] A. Vagati, M. Pastorelli, P. Guglielmi, A. Canova, "*Synchronous reluctance motor based sensorless drive for general purpose application*", Dipartimento di Ingegneria Elettrica Industriale, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi, 24, I-10129 Torino (Italy).
- [49] R. H. Park, "Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part I," in Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 48, no. 3, pp. 716-727, July 1929, doi: 10.1109/T-AIEE.1929.5055275.
- [50] Moghaddam, R. R. *Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design*. (Master Thesis). Royal Institute of Technology. Stockholm. Retrieved from <http://www.diva-portal.se>. (2007)
- [51] Barcaro M., Bianchi N., "Torque components in integral- and fractional-slot IPM machines," Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International, Niagara Falls, ON, 2011, pp. 1340-1345.
- [52] Aydogmus, O., 2011. Matris çevirici ile beslenen sürekli mıknatıslı senkron motor sürücü tasarımı ve algılayıcısız hız denetimi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [53] Moghaddam, R.R. Magnussen, F. ve Sadarangani, C. (2010). Theoretical and Experimental Reevaluation of Synchronous Reluctance Machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, issue 1, pages 6-13.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

- B. Solak and Y. Öner, "Design and Optimization of Transmitter Laminated Synchronous Reluctance Motor," *2020 12th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2020, pp. 212-220, doi: 10.1109/ELECO51834.2020.00037.

