

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI

DIŞ ROTORLU SABİT MIKNATISLI SENKRON
RELÜKTANS MOTOR TASARIMI VE UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SADIK ÇATAK

DENİZLİ, ARALIK - 2022

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**



**DIŞ ROTORLU SABİT MIKNATISLI SENKRON
RELÜKTANS MOTOR TASARIMI VE UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SADIK ÇATAK

DENİZLİ, ARALIK - 2022

Bu Tez Çalışması Pamukkale Üniversitesi - Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü Tarafından 2021FEBE059 nolu proje ile desteklenmiştir.

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

SADIK ÇATAK

ÖZET

DIŞ ROTORLU SABİT MİKNATISLI SENKRON RELÜKTANS MOTOR TASARIMI VE UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SADIK ÇATAK

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŐMANI: PROF. DR. YUSUF ÖNER)

DENİZLİ, ARALIK - 2022

Günümüzde elektrikli araçlara olan ilginin giderek artmasıyla özel tasarım elektrik motorları üzerine yapılan çalışmalarda önemli ilerlemeler kaydedilmektedir. Bununla birlikte birçok alanda da özel tasarım motorlara ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanım amacına, verimine ve diğer performans özelliklerine göre motorlara olan ihtiyaçlar değişebilmektedir. Bir elektrikli araç için düşünüldüğünde güç kayıplarının büyük bir kısmını motorun mili ile aracın tekerleği arasında görev alan mekanik kısımlarda harcanmaktadır. Bu enerji kaybını azaltmak için tüm sistem verimini arttırmak amaçlandığında dış rotorlu bir motora ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca araçlarda ağırlık artışı ile araç menzili arasında ters yönlü bir ilişki olması sebebiyle dişli, diferansiyel gibi ağır mekanik sistemlere ihtiyaç duyulmaması aracın menziline olumlu katkı yapmaktadır.

Bu çalışmada tasarlanan motorun dış rotorlu olmasının yanında tork dalgalanmasının düşük ve motor veriminin de yüksek olması amaçlanmıştır. Bu hedefi gerçekleştirmek için rotor bakır kayıplarının yok edilmesi olumlu bir katkı sağlayacağı için tasarlanacak motorun bir senkron relüktans motor olmasına karar verilmiş, iyi bir performans hedefi için ise sabit mıknatıs desteğine ihtiyaç duyulmuştur. Relüktans motorların çalışma prensibi gereği tork dalgalanması yüksek olduğundan temel tasarım hedeflerinin başında yüksek verim ve düşük tork dalgalılığı gelmektedir. Bu hedeflere ulaşmak için rotor geometrisinde ve mıknatıs boyutlandırılmasında parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda rotorun içinden dışına doğru giden sırada mıknatıs yay açılarının artışı verim ve tork dalgalanması açısından olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu açıdan en iyi sonuç veren bir tasarım seçilerek prototipi üretilen motorun performans testi yapılmıştır. Sonuç olarak testi yapılan prototip ile analiz sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELELER: Dıştan rotorlu motor, Senkron relüktans motor, Sabit mıknatıslı motor, Motor tasarımı

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN OUTER ROTOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR

MSC THESIS
SADIK ÇATAK

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF. DR. YUSUF ÖNER)

DENİZLİ, DECEMBER 2022

Nowadays, with the increasing interest in electric vehicles, significant progress has been made in studies on specially designed electric motors. In addition, special design motors are needed in many areas. The needs of the motors may change according to the purpose of use, efficiency and other performance characteristics. Considering an electric vehicle, most of the power losses are spent in the mechanical parts between the motor shaft and the vehicle's wheel. In order to reduce this energy loss, an outer rotor motor is needed when it is aimed to increase the efficiency of the whole system. In addition, since there is an inverse relationship between vehicle weight gain and vehicle range, the absence of the need for heavy mechanical systems such as gears and differentials makes a positive contribution to the range of the vehicle.

In this study, it is aimed to have low torque ripple and high motor efficiency as well as being outer rotor of the designed motor. In order to achieve this goal, it was decided that the motor to be designed would be a synchronous reluctance motor, since the elimination of rotor copper losses would make a positive contribution, and permanent magnet support was needed for a good performance target. Since the torque ripple is high due to the working principle of reluctance motors, high efficiency and low torque ripple are the main design goals. To achieve these goals, parametric analyzes were performed on rotor geometry and magnet sizing. As a result of the analyzes, it has been seen that the increase in magnet arc angles during the going from inside the rotor to the outside gives positive results in terms of efficiency and torque ripple. In this respect, a design that gives the best results was selected and the performance test of the motor whose prototype was produced was carried out. As a result, it was seen that the test results were compatible with the prototype tested.

KEYWORDS: Outer rotor motor, Synchronous reluctance motor, Permanent magnet motor, Motor design

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	vii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Özeti	2
2. SENKRON RELÜKTANS MOTOR.....	8
2.1 Temel Yapısı	8
2.2 Çalışma Prensibi.....	10
2.3 Matematiksel Modeli.....	11
3. MOTOR TASARIM PARAMETRELERİ.....	15
3.1 Motorun Temel Özellikleri ve Tasarım Kısıtları.....	15
3.1.1 Manyetik Malzemeler	16
3.1.2 Motor Çapı.....	17
3.1.3 Paket Uzunluğu.....	18
3.1.4 Hava Aralığı.....	18
3.2 Stator Tasarımı	19
3.2.1 Kutup Sayısı ve Stator Oluk Sayısı.....	20
3.2.2 Stator Oluklarının Boyutlandırılması.....	20
3.2.3 Sargı Tasarımı.....	21
3.3 Rotor Tasarımı.....	22
3.3.1 Rotor Çapı.....	23
3.3.2 Akı Bariyeri Tipi ve Sayısı	23
3.3.3 İzolasyon Oranı (Hava Demir Oranı)	24
3.3.4 Kiriş Kalınlığı	26
3.3.5 Mıknatıs Tipi ve Boyutları.....	26
4. MOTORUN 2D MANYETİK ANALİZLERİ.....	28
4.1 Temel parametrelerin ve stator parametrelerinin analizleri.....	28
4.1.1 Oluk Sayısı.....	29
4.1.2 Hava Aralığı.....	30
4.1.3 Sargı Yapısı.....	31
4.2 Rotor Manyetik Analizleri.....	34
4.2.1 Akı Bariyeri Tipinin Seçilmesi	35
4.2.2 Mıknatıs Boyutlarının Analizi	38
4.2.3 Mıknatıs Boyutlarının Parametrik Analizi.....	40
4.3 Tasarlanan Motorun Simülasyon Sonuçları	51
5. PROTOTİP ÜRETİMİ VE TEST SONUÇLARI	58
5.1 Prototip Üretim Süreci.....	58
5.2 Test Sonuçlarının Alınması	62
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	68
7. KAYNAKLAR.....	70

8. ÖZGEÇMİŞ	73
--------------------------	-----------

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 W tipi çentikli model.	3
Şekil 1.2: C tipi çentikli model (Bonthu 2017).	4
Şekil 2.1: DRMSRM'nin kesiti (Bonthu 2018).	9
Şekil 2.2: Mıknatıs destekli senkron relüktans motorun d-q eksenleri.	10
Şekil 2.3: Senkron relüktans motorun tek faz modeli (Kazmierkowski, 2002).	12
Şekil 3.1: Motor tasarımı iş akış diyagramı.	16
Şekil 3.2: M470-50A2 çeliğinin B-H eğrisi (ANSYS).	17
Şekil 3.3: Oluk geometrisi.	21
Şekil 3.4: Farklı akı bariyerlerine göre rotor modelleri.	24
Şekil 3.5: Rotorun demir bölütleri ve akı bariyerleri.	25
Şekil 3.6: L_d ve L_q endüktanslarının Kwq ile değişimi (Dulanto 2015).	25
Şekil 4.1: Akı bariyerinin a) 1, b) 2 ve c) 3 olması durumunda rotor geometrisi.	28
Şekil 4.2: Oluk sayısına göre motorların $\frac{1}{4}$ kesitleri a) 24 oluk, b) 36 oluk.	30
Şekil 4.3: Önerilen çift katmanlı, dağıtılmış sargı şeması (ANSYS Rmxprt).	32
Şekil 4.4: Sargıların bağlantı şeması (MotorCAD).	33
Şekil 4.5: Sargıların üç faz vektörel gösterimi.	34
Şekil 4.6: Rotor üzerindeki mıknatıs ve yay açılarının isimlendirilmesi.	35
Şekil 4.7.a) Model A: Yay şeklinde akı bariyeri, yay şeklinde mıknatıs; b) Model B: Yay şeklinde bakı bariyeri, dikdörtgen şeklinde mıknatıs; c) Model C: Köşeli U şeklinde akı bariyeri, köşelerde dikdörtgen mıknatıs; d) Model D: Yuvarlak kenarlı U şeklinde akı bariyeri, yay şeklinde mıknatıs.	36
Şekil 4.8: Manyetik Akı dağılımları a) Model A b) Model B.	38
Şekil 4.9: Tip A mıknatıslı ve 3 akı bariyerli modelin verim ve tork dalgalanmalarının değişimi.	39
Şekil 4.10: Mıknatıs yay açısı 17 olan modelin manyetik akı dağılımı.	40
Şekil 4.11: MYA1 ve MYA2 sabit iken MYA3'ün değişiminde tork grafiği.	41
Şekil 4.12: MYA1 ve MYA2 sabit iken MYA3'ün değişiminde verim ve tork dalgalanması.	42
Şekil 4.13: MYA1 ve MYA3 sabit iken MYA2'nin değişiminde tork grafiği.	43
Şekil 4.14: MYA1 ve MYA3 sabit iken MYA2'nin değişiminde verim ve tork dalgalanması.	44
Şekil 4.15: MYA2 ve MYA3 sabit iken MYA1'in değişiminde tork grafiği.	45
Şekil 4.16: MYA2 ve MYA3 sabit iken MYA1'in değişiminde verim ve tork dalgalanması.	46
Şekil 4.17: MYA 6° olduğunda a) tork dalgalanması, b) verim.	48
Şekil 4.18: MYA 7° olduğunda a) tork dalgalanması, b) verim.	48

Şekil 4.19: MYA 8° olduğunda a) tork dalgalanması, b) verim.....	49
Şekil 4.20: MYA 9° olduğunda a) tork dalgalanması, b) verim.....	49
Şekil 4.21: MYA 10° olduğunda a) tork dalgalanması, b) verim.....	49
Şekil 4.22: MYA 11° olduğunda a) tork dalgalanması, b) verim.....	50
Şekil 4.23: Uçları düzleştirilmiş mıknatıslarla tasarlanmış rotorun bir kutbu.....	51
Şekil 4.24: Önerilen motorun ortalama manyetik akı yoğunlukları.....	52
Şekil 4.25: Önerilen motorun akım yoğunlukları.....	53
Şekil 4.26: Hız – zaman grafiği.....	53
Şekil 4.27: Endüklenen gerilim – zaman grafiği.....	54
Şekil 4.28: Akım – zaman grafiği.....	55
Şekil 4.29: Tork – zaman grafiği.....	55
Şekil 4.30: Çıkış gücü (mekanik güç) – zaman grafiği.....	56
Şekil 5.1: Sacların paketlenip vidalanmasıyla oluşan a) Rotor ve b) Stator.....	59
Şekil 5.2: Sacların paketlenip vidalanmasıyla oluşan stator ve rotor.....	59
Şekil 5.3: Sargıları oluklara yerleştirilmiş statorun a) Önden görünümü, b) Yandan görünümü.....	60
Şekil 5.4: Motor gövdesinin a) Ön kapağı, b) Arka kapağı, c) Mili.....	61
Şekil 5.5: Üretilen motor prototipi a) Arkadan görünümü, b) Yandan görünümü.....	62
Şekil 5.6: Test düzeneği.....	63
Şekil 5.7: Tork sensöründen alınan tork, hız ve çıkış gücü değerleri.....	64
Şekil 5.8: Tork sensöründen alınan tork, hız ve çıkış gücü değerleri.....	64
Şekil 5.9: Güç analizöründen alınan tork, hız ve çıkış gücü değerleri.....	65
Şekil 5.10: Tam yükte gerilim ve akım.....	65
Şekil 5.11: Tam yükte gerilim, akım, güç faktörü ve elektriksel güçler.....	66

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Rotor çapının sac kullanımına etkileri.....	18
Tablo 4.1: Oluk sayısına göre motor performansının değişimi.....	29
Tablo 4.2: Hava aralığı değerinin değişimi ile motor performansı.....	31
Tablo 4.3: Akı bariyeri tipi ve sayısına mollerin verim ve tork dalgalanmaları.....	37
Tablo 4.4: Mıknatısların yay açısına göre motorun performansı.....	39
Tablo 4.5: Motor performansının mıknatıs açısı 3 ile değişimi.....	42
Tablo 4.6: Motor performansının mıknatıs açısı 2 ile değişimi.....	44
Tablo 4.7: Motor performansının mıknatıs açısı 1 ile değişimi.....	46
Tablo 4.8: Tüm mıknatısların optimizasyonu ile elde edilen en iyi sonuçlar.....	47
Tablo 5.1: Motorun özellikleri.....	67
Tablo 5.2: Simülasyon ve uygulamanın test sonuçları.....	67

KISALTMALAR LİSTESİ

ω	: Açısal Hız
EMK	: Elektro Motor Kuvveti
MMK	: Manyeto Motor Kuvveti
SynRM	: Senkron Relüktans Motor
PMSynRM	: Sabit Mıknatıslı Senkron Relüktans Motor
ORPMSynRM	: Dış Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Relüktans Motor
MYA	: Mıknatıs Yay Açısı

ÖNSÖZ

Lisans eğitimim boyunca mental ve teknik olarak gelişmeye katkı sağlayan çok değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Yüksek lisans sürecinde teknik desteğinin yanında manevi desteği için tez danışmanım Prof. Dr. Yusuf ÖNER'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğüne 2021FEBE059 no'lu proje ile verdikleri destek sebebiyle teşekkürlerimi sunuyorum.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Teknolojinin gelişmesi ile yaşamın her alanında birçok kolaylık yaşanmasına rağmen enerji tüketiminde ciddi artışlar olmaktadır. Enerji tüketiminde oluşan bu büyük artışlar insanlar ve doğa için birçok alanda risk oluşturmaktadır. Gereksiz enerji sarfiyatını azaltmak için ise kamuda ve özel sektörde önlem alma gereksinimi doğmaktadır. Bu konuda önde gelen önlemlerden biri olarak cihazların verimini arttırmak sayılabilir.

Son dönemde özellikle taşıtlarda akaryakıtla çalışan motorlar yerini yavaş yavaş elektrikli motorlara bırakmaya başlamıştır. Diğer yandan ise gelişen sanayi ile birlikte elektrik motorlarına olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Elektrik tüketimi olarak önemli bir yere sahip olan elektrik motorlarının dünyada elektrik tüketim payına bakılırsa, istatistiklere göre yaklaşık %30 civarında olduğu görülmektedir (Özkara 2022). Bu payın sadece elektrik motorlarına ait olduğunu göz önüne aldığımızda elektrik motorlarında verim adına yapılacak iyileştirmelerin önemi, bu yüksek verimli motorların kullanımı arttıkça küresel elektrik tüketimine olumlu etkileri dikkat çekici bir boyuta ulaşacağı öngörülmektedir.

Enerjinin hayatımızdaki yeri gün geçtikçe artmaya devam ederken üretici firmalar tarafında enerji verimliliği konusunda rekabet giderek artmaktadır. Tesla, Toyota gibi elektrikli araç sektöründe önemli yere sahip firmalar ürettiği elektrikli araçlarla bu konuya ne kadar önem verdiklerini göstermektedir. Araçlarında kullandıkları motorların tasarımında, uyguladıkları yeniliklerle piyasa standartlarının oldukça üzerinde performansa sahip motorlar üretmeyi başarmışlardır.

Bu tez çalışmasında, 1,5 kW gücünde bir senkron relüktans motor, kullanım amacına yönelik olarak dış rotorlu bir yapıda ve yüksek verim sınıfına uygun olarak, performans konusunda ise seri üretimi yapılan motorlara göre tatmin edici bir motor tasarlanması ve prototipinin üretilmesi amaçlanmıştır. Tasarımı yapılacak motorun

birincil özelliklerinden başında yüksek verim sınıfında olması gelmektedir. Relüktans motorlar tasarlanırken verimin yüksek olması hedeflenirken moment dalgalılığının yüksek olması gibi bir olumsuz sonuç ortaya çıkmaktadır. Yüksek verimli olmasının yanında moment dalgalanmalarını azaltmak gibi performans değerlerinin iyileştirilmesi ve kullanım açısından elverişli bir motor tasarlanması, daha sonra ise prototipinin üretilerek tasarıma uygunluğu laboratuvar ortamında teknik açıdan test edilmesi amaçlanmıştır.

1.2 Literatür Özeti

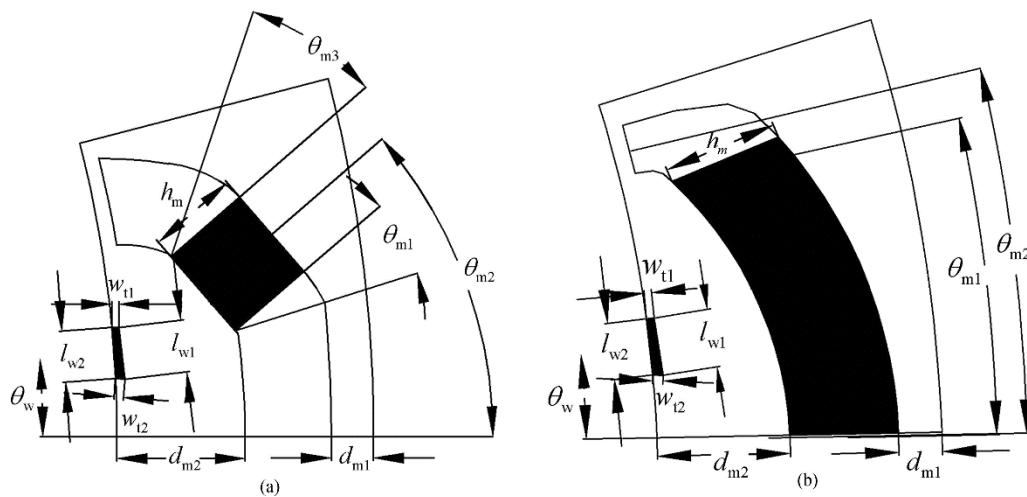
Elektrik motorları hayatımızı oldukça kolaylaştıran birçok cihazda kullanılmaktadır. İlk kullanımı 18. yüzyılın ilk yarısına kadar uzanan elektrik motorları, icadından günümüze kadar geçen zamanda çok önemli gelişmelere uğramıştır. Bu dönemin teknolojisini incelediğimiz zaman motor tasarımı üzerine çok sayıda farklı yöntemler kullanılarak performans, maliyet, boyut gibi ihtiyaçlara göre farklı özelliklerde elektrik motorları üretilmektedir. Farklı özelliklerde tasarlanan bu motorların ortak özelliği ise performansının ve verimlerinin sürekli daha da iyileştirilmesi için çalışılıyor olmasıdır.

Bir çalışmada Jurca ve arkadaşları (2017) düşük hız uygulamalarında dış rotorlu senkron relüktans motor analizi üzerine çalışmışlardır. Araştırmacılar farklı oluk/kutup kombinasyonları, sargı yapıları, akı bariyerlerinin sayıları gibi etmenleri irdelemişlerdir. 30, 39 ve 45 slotlu yapılar 20 kutuplu olacak şekilde analiz edilmiş, çok katmanlı akı bariyerleriyle de tasarımlar çeşitlendirilmiştir. Üç tip olarak seçilen modellerde akı bariyerleri bir, iki ve üç katmanlı olarak belirlenmiştir. Bu analizler sonucunda, tork dalgalanmaları incelendiğinde, tek katmanlı akı bariyerine sahip model en iyi sonucu vermektedir. Genel olarak performans özelliklerine bakıldığında ise araştırmacılar tek akı bariyerli 39 slot ve 20 kutuplu tasarımın en iyi performansı gösterdiğini ifade etmektedirler.

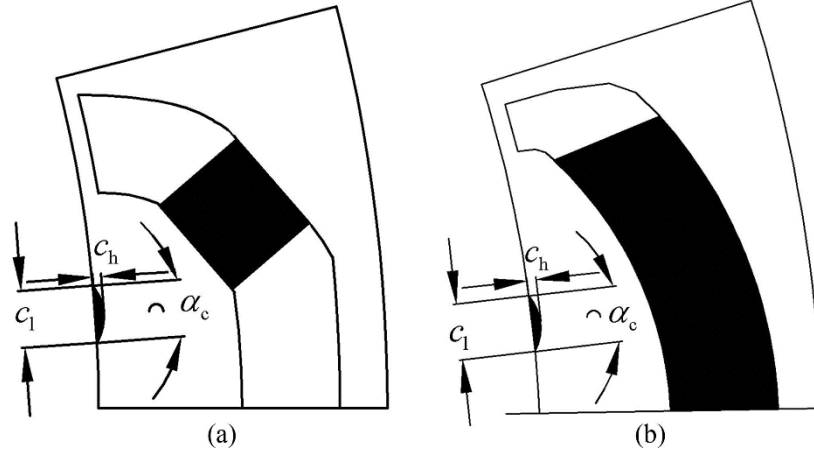
Inte ve diğerleri (2017) dış rotorlu bir senkron relüktans motorun tork dalgalanmalarını düşürme üzerinde bir çalışma yapmışlar ve etkileri incelemek adına farklı oluk kutup kombinasyonlarını kıyaslamışlardır. Statorlarında konsantre sargı tipi olan bu motorların tork yoğunluğunun ve veriminin daha yüksek olduğunu ifade

etmektedirler. Buna karşın tork dalgalanmalarının yüksek olması ve güç faktörünün düşük seviyelerde olması bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu dezavantajı olabildiğince azaltmak için yaptıkları bu çalışmada, ilk tasarımın tork dalgalanma oranı %60'ın üzerindeyken, uygun rotor geometrisinin seçimiyle tork dalgalanmasını %37 seviyelerine indirmişlerdir. Daha sonra motorun boyu üzerine yaptıkları optimizasyon sonucunda bu tasarım için tork dalgalanmalarının en düşük seviyelerde olduğu değerin yaklaşık 10 Nm büyüklüğünde olduğunu ve bunun da %30 seviyelerine kadar düştüğünü göstermişlerdir.

Bonhu ve diğerleri (2018) yaptıkları bir çalışmada dış rotorlu sabit mıknatıslı bir senkron relüktans motorun tork dalgalanmaları üzerine bazı teknikler uygulamışlardır. Mıknatıs yerleşimi olarak Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'deki gibi iki farklı tasarım incelenmiştir. Tork dalgalanmalarını düşürmek için ise tasarımlarına uygun bir algoritma belirleyip rotorun hava aralığına bakan bölümünde çentikli bir yapı oluşturmuşlardır. Şekil 1.1'de W tipi olarak isimlendirilen bir çentik belirlenmiş, Şekil 1.2'de ise C tipi olarak isimlendirilmiş çentikler tasarıma uygun olarak boyutlandırılmıştır. Tasarımlar tamamlanarak simülasyonu yapıldığında bu çentik yapılarına göre oluşturulan modellerin arasındaki performans kıyaslaması yapılmıştır. Bu modellerde yüksek tork ve düşük tork dalgalanması elde edilmesi hedeflenmiştir. Belirledikleri algoritmalar doğrultusunda hedefe en yakın sonucu %5'ten daha düşük tork dalgalanmasıyla W tipi çentikli yapıda elde etmişlerdir.



Şekil 1.1 W tipi çentikli model.



Şekil 1.2: C tipi çentikli model (Bonthu 2017).

Senkron relüktans motor performansı üzerine yapılan bir çalışmada mıknatıs destekli ve mıknatıssız modellerin karşılaştırılması yapılmıştır (Inte ve diğ. 2019^a). Yapısal özelliklerine bakıldığında 27 slotlu modelleri 4 kutuplu ve 6 kutuplu olarak tasarlamışlar ve bunları mıknatıssız, ferrit destekli ve NdFeB destekli olarak tasarlamışlardır. Daha sonra rotorda akı bariyerlerinin içine yerleştirilen bu mıknatısların performans etkilerini incelemişlerdir. Analiz sonuçları ve grafikler incelendiğinde 4 kutuplu motorun tork dalgalanmaları 6 kutuplu motorun tork dalgalanmalarına göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Mıknatısların etkileri incelendiğinde ise ferrit destekli model ve NdFeB destekli model kıyaslanmış ve NdFeB tipi mıknatısın ürettiği torkun daha yüksek olduğu görülmektedir. Araştırmacılar çalışmadaki modeller içinde üretilen en yüksek torkun 6 kutuplu NdFeB mıknatıs destekli model olduğunu ifade etmektedirler fakat tork dalgalanmalarının yüksekliği sebebiyle, özellikle küçük güçlü motorlarda kullanıma en elverişli modelin 4 kutuplu NdFeB mıknatıs destekli model olduğunu ifade etmektedirler.

Inte ve arkadaşlarının (2019^b) yaptığı bir başka çalışmada dış rotorlu senkron relüktans motorun performansı incelenmiştir. Boyut, çıkış gücü gibi özellikleri sabit tutularak farklı sayıda ve tipte akı bariyeri tasarlanmış ve tork, tork dalgalılığı ve akı yoğunluğu gibi değerler incelenmiştir. İlk oluşturdukları modelde köşeleri dik olmak üzere her kutupta üç adet akı bariyeri bulunan bir rotor tasarlanmış ve bu modelin analizlerini yapılmıştır. Daha sonra karşılıklı iki kutbun akı bariyerleri aynı kalmak üzere diğer iki kutupta ayrı ayrı bir ve iki akı bariyeri olacak şekilde iki model daha tasarlamışlar. Rotor geometrilerini biraz daha değiştirerek akı bariyerlerinin

geometrisini karşılıklı iki tanesini aynı kalacak şekilde belirlerken diğer iki tanesini ise yay şeklinde belirlemişler, bunları da sırasıyla bir ve iki akı bariyeri olacak şekilde tasarlamışlardır. Son modellerde ise kutup geometrisinde bir yay şekli kalacak biçimde akı bariyeri oluşturulmuş ve bunlar sırasıyla bir ve iki adet olacak şekilde tasarımları yapılmıştır. Tüm modellerde çekirdeğin doyuma gitmemesine dikkat edilerek tasarımlar yapılmış ve tüm rotor geometrilerinde değiştirilmiş akı bariyerlerinde tek akı bariyerinin olduğu yapılarda ortalama tork ve tork dalgalılığı daha düşük çıkarken iki akı bariyerinin olduğu yapılarda ortalama tork ve tork dalgalılığı daha yüksek çıkmıştır. Araştırmacılar tork dalgalılığının düşürülmesi, performansın ve torkun artırılması için akı bariyerinin sayısı ve geometrisinin optimize edilmesini önermektedirler.

Khan ve diğerleri (2019^c) tarafından yapılan bir çalışmada dış rotorlu senkron relüktans motor tasarlanmış ve bu motorun tasarımında farklı sayıda ve yapıda akı bariyerleri oluşturularak motor performansı incelenmiştir. Oluşturdukları 4 farklı tasarımla elektrikli bisiklet için uygun bir motor tasarlamayı hedeflemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda, birbirinden farklı rotor geometrisine sahip motor tiplerini kıyaslamışlar, önerilen modellerde torku artmış ve demir kayıplarının azalmış olduğunu görmüşlerdir. Geleneksel tipteki motorda olan uzun akı yolu ve kaçak akılar önerilen motorda olmaması sebebiyle, bu yeni motordaki demir kaybı %45 daha düşük seviyededir.

Yu ve arkadaşları (2019) sabit mıknatıslı senkron motor üzerine yaptıkları bir çalışmada, rotorunda yay şeklinde akı bariyeri ve bunların ortasında mıknatıs olan bir modelin optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Çalışmada ferrit mıknatısların olduğu bir tasarım ile ferrit ve NdFeB35 mıknatısların birlikte kullanıldığı hibrit bir tasarım incelenmiştir. Ferrit mıknatıslı tasarımın sahip olduğu tork yoğunluğunun arttırmanın amaçlanması ile NdFeB35 mıknatıs kullanım ihtiyacı artsa da bu mıknatısın kullanımının minimum seviyede kalmasına dikkat edilmiştir. Oluşturulan bu hibrit modelde olumsuz etkilerin en aza indirilmesi adına akı bariyerlerine yerleştirilen mıknatıslardan ortaya yerleştirilenler ferrit, onların ucuna yerleştirilenler ise NdFeB35 tipinde mıknatıslar olarak seçilmiştir. Daha sonra yay şeklinde olan akı bariyeri köşeli yapıya ve mıknatıslar ise dikdörtgen yapıda tasarlanarak üretim kolaylığı açısından daha elverişli bir model oluşturulmuştur. Bu hibrit tasarımlarda

verim değeri yaklaşık olarak aynı mertebede kalmış, üretilen tork ve güç faktöründe ise önemli bir iyileşme kaydedilmiştir.

Mukherjee ve diğerleri (2019) iç rotorlu ve dış rotorlu olmak üzere iki senkron relüktans motoru kıyasladıkları çalışmada bu iki tasarımın boyu, dış çapı, besleme akımları, slot alanlarının büyüklükleri gibi değerleri sabit tutarak performans değerlerini incelemişlerdir. Bu değerlerin değişmediği iki tasarıma bakıldığında iç rotorlu modelde üretilen torkun değerinin daha yüksek olduğunu elde etmişlerdir. Buna karşın akı yoğunlukları kıyaslandığında ise dış rotorlu modelin üzerindeki akı yoğunluklarının iç rotorlu modele göre biraz daha yüksek olduğu görülmektedir. Mekanik stres açısından kıyaslandığında ise iç rotorlu tasarımın stres seviyesinin daha yüksek olduğu ortaya çıkmaktadır. Tasarlanan nominal hız için mevcut tasarımlar bir sorun oluşturmasa da daha yüksek hızlara çıkılması istendiği durumlarda akı bariyerlerinin uçlarındaki köprülerin daha boyunun artırılması motorun mekanik dayanımının artmasına faydalı olacağını vurgulamışlardır.

Inte ve diğerleri (2019) dış rotorlu sabit mıknatıs destekli senkron relüktans motor üzerine yaptıkları bir çalışmada aynı geometrik ve elektriksel kısıtlamalar altında 3 farklı motor tasarımının analizini yapmışlardır. Slot sayısı 12 olan bu motorlarda kutup sayıları sırasıyla 10, 14 ve 16 olarak belirlenmiştir. Analizleri gerçekleştirilen bu motorlarda elektromanyetik tork, tork dalgalanması ve toplam kütle olmak üzere üç kriter kıyaslanmıştır. Bu üç modelde de motorun kütleleri arasında önemli bir fark olmamakla birlikte en düşük tork dalgalılığına sahip modelin 12 slot ve 14 kutuplu tasarımın olduğu görülmektedir. Seçilen tasarımda %19,6 gibi yüksek bir değerde tork dalgalılığı hesaplanmıştır. Bu değeri azaltmak için statora kaykı verilerek yeni tasarımlar oluşturulmuş ve sonuç olarak statora küçük miktarda kaykı verilmesi ortalama torkun fazla değişmeden tork dalgalılığının önemli miktarda azaldığı ifade edilmiştir.

Cheshmeh Beigi ve arkadaşları (2020) yaptığı bir çalışmada dış rotorlu senkron relüktans motoru çeşitli tasarım parametrelerine göre incelemişlerdir. Üç akı bariyerli ve bu akı bariyerlerinin ortalarında mıknatıs olacak şekilde oluşturdukları tasarımda akı bariyerleri arasında kalan bölgelerin manyetik akı yoğunluklarını eşitleyecek şekilde rotor geometrisini oluşturmuşlar. Çeşitli q eksenli yalıtım oranları (kwq) seçerek mıknatıs kalınlıkları hesaplanmış ve çıkış momenti simüle edilmiş.

Simülasyon grafiklerinden izolasyon oranı arttıkça momentin ve moment dalgalanmasının da arttığı görülmektedir. Bir diğer inceledikleri parametrede ise akı bariyerlerinin şafta olan uzaklığı olmuş ve bu mesafe arttıkça moment değerinin azalmasına rağmen moment dalgalılığı sürekli aynı yönde değişmemektedir. Momentin ve moment dalgalılığının kabul edilebilir değerlere ulaşabilmesi için parametrik analiz yaptıkları 6 kutuplu motor için en iyi sonucu üç akı bariyerli tasarımın olduğunu belirtmişlerdir.

Bozkurt ve arkadaşları (2021) yaptıkları bir çalışmada dış rotorlu sabit mıknatıs destekli senkron relüktans motor tasarımında optimum çıktıları veren bir tasarım gerçekleştirmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemini (SEY) kullanarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda yüksek tork ve düşük tork dalgalılığı elde etmek için parametrik analizler yapmışlardır. Gücü 1 kW olan ve yüksek güç yoğunluğunda tasarladıkları motorun veriminin analizler sonucunda %91,3 olduğunu göstermişlerdir. Devir hızı 750 devir/dakika olan ve 12,87 Nm nominal tork üretebilen bu tasarımın istenilen performans değerleriyle uyumlu olarak tasarlanması için modelin 48 oluk/8kutup kombinasyonun ve kutup başına üç akı bariyerli topolojinin seçilmesinin uygun olduğunu ifade etmişlerdir.

2. SENKRON RELÜKTANS MOTOR

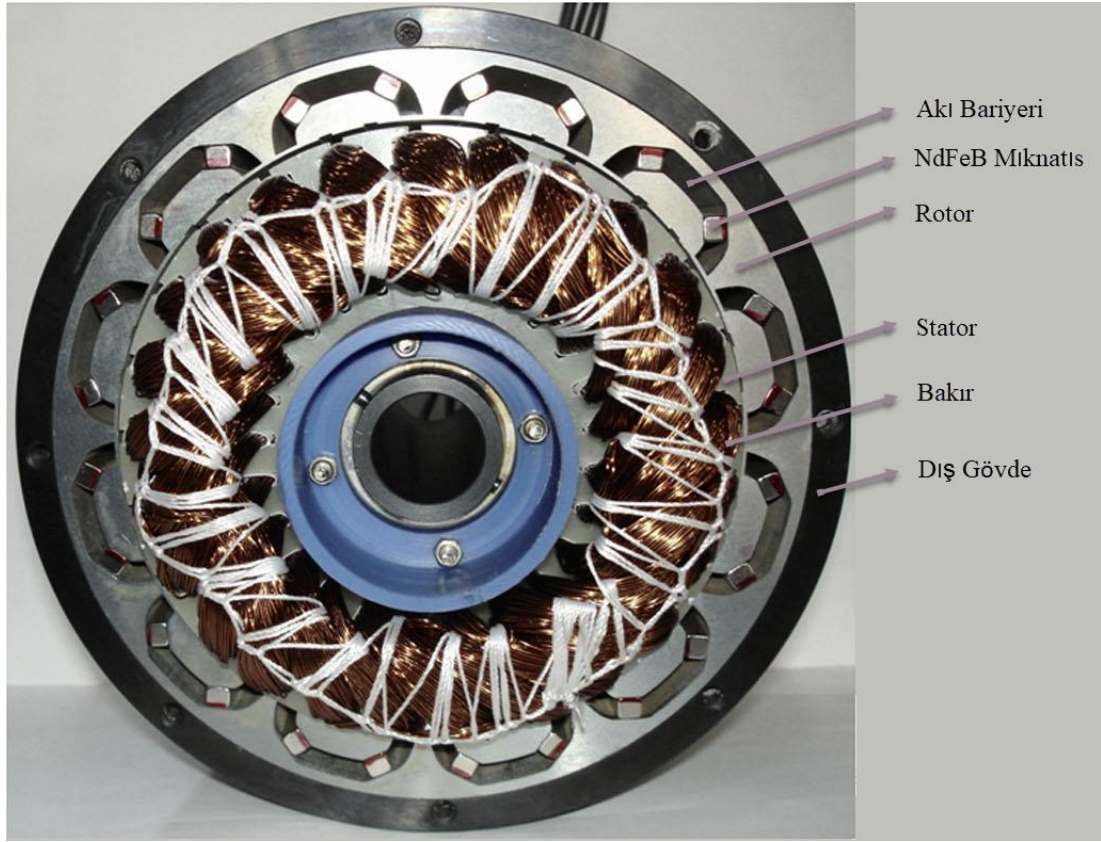
2.1 Temel Yapısı

Dış Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Relüktans Motorlar (DRSMSRM) çalışma prensipleri gereği çok fazlı olarak çalışabilen alternatif akım makineleridir. Makineyi merkezinden radyal yönde inceleyecek olursak merkezde bir mil ve onun etrafında sabit bir stator bulunmaktadır. En dış kısımda ise rotor bulunduğu için makinenin dış kısmı dönmektedir. Sargılar sadece makinenin statorunda bulunmakla birlikte rotorunda herhangi bir sargı bulunmamaktadır. Rotorunda sargı olmaması rotor bakır kayıplarının oluşmasını engellemekte ve bu sebeple rotorda oluşabilecek ısınmaların da önüne geçmektedir. Bu özellikleri ile literatürde soğuk rotorlu makineler olarak isimlendirilmektedirler (Ersöz ve diğ. 2016).

Bu makinelerin merkezinde tasarımına göre manyetik veya manyetik olmayan malzemedan seçilebilecek bir mil bulunmaktadır. Milin etrafında sabit halde duran stator ferromanyetik bir malzemedan yapılmaktadır. Genellikle silisyumlu sac olarak seçilen bu malzeme çeşitli kalınlıklarda aksel yönde lamine edilerek stator oluşturulur. Laminasyon işlemi öncesinde bir yüzü ince bir izolasyon malzemesiyle kaplı olan saclar tasarlanan ölçülerde kesilir. Daha sonra preslenerek düzgün bir geometriye sahip olması sağlanır. Birbirinden izole ince saclar halinde üretilmeleri girdap akımı kayıplarının azaltılması amacıyla elektrik makinelerinde uygulanan bir üretim tekniğidir. Statorun radyal yönde en dış kısmında ise oluklar bulunmaktadır. Bu oluklar makinenin sargılarının bulunduğu boşluklardır. Makinenin istenilen performans özelliklerine göre farklı tipte ve ölçülerde tasarlanabilmektedirler. Genellikle kaçak akıların yüksek olmaması için köşeli tipte yapılmamasına özen gösterilmektedir. Oluk içine yerleştirilen sargılar izolasyon kaplı bakır veya alüminyum malzemedan iletkenlerden oluşmaktadır. Tasarım özelliklerine göre ise dağıtık ya da konsantrik yapılarda olabilirler (Tap 2017).

Statorun dış kısmında çok küçük bir hava aralığından sonra statorla benzer yöntemle imal edilen bir rotor bulunmaktadır. Bu makinelerde rotorlar üzerinde sargı

bulunmamaktadır. Moment üretimi rotorun yapısında bulunan akı bariyeri adı verilen hava boşluklarının yardımıyla gerçekleşmektedir. Bu yüzden akı bariyerleri tasarımında farklı geometriler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Kutup başına akı bariyeri sayısı ve akı bariyerlerinin biçimleri motorun performans özelliklerini tamamen değiştirebilmektedir. Bunlara ek olarak makinenin ürettiği momenti arttırmak amacıyla akı bariyerinin içinde yüksek kalite mıknatıslar bulunmaktadır. Mıknatıstan alınan performansın yüksek olabilmesi için genellikle akı bariyerinin ortasına yerleştirilir.



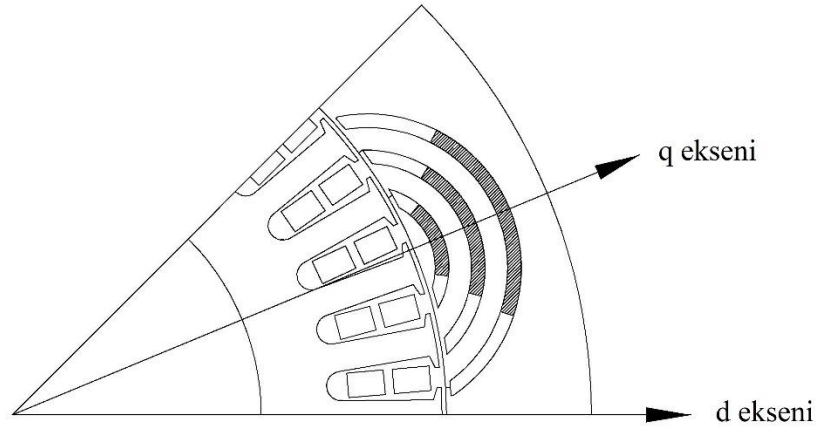
Şekil 2.1: DRSMSRM'nin kesiti (Bonthu 2018).

Makinenin en dışında ise mekanik dayanımı yüksek bir gövde bulunmaktadır. Bu gövde, makinenin içeriden ve dışarıdan oluşabilecek kuvvetlere ve meydana gelebilecek darbelere karşı makinenin bütünlüğünü koruyucu özellikte imal edilmektedir.

2.2 Çalışma Prensibi

Senkron relüktans makinelerde, diğer senkron makinelerde olduğu gibi stator sargılarından akan akımlar sayesinde döner alan oluşturur. Bu akımların frekansı statorda oluşan döner alanın hızını belirler. Kararlı çalışma durumlarında da makinenin senkron hızı bu döner alanın hızıyla doğru orantılı olmaktadır. Makinenin senkron hızda dönebilmesi için statorun oluşturduğu döner alanı, rotorun kayma olmadan takip edebilmesi gerekmektedir.

Statorda üretilen manyetik akı N-S kutupları arasında devresini tamamlarken makine üzerinde düşük relüktans yollarını takip etmeye çalışmaktadır. Rotor relüktansın düşük olduğu d -ekseni ve relüktansın yüksek olduğu q -ekseninden oluşur. Motora güç uygulandığında ise rotor statorun ürettiği manyetik alanın iletimi yönü ile düşük relüktans eksenini hizalama eğilimine girerek dönemeye çalışır ve moment üretimine başlanır (Sathyan 2013). Değişken manyetik akı ile kutupların sürekli yer değiştirmesi sonucu statorda oluşan döner alan rotorda oluşan döner alan tarafından takip ederek motorun dönmesini sağlayan moment üretilmiş olmaktadır.



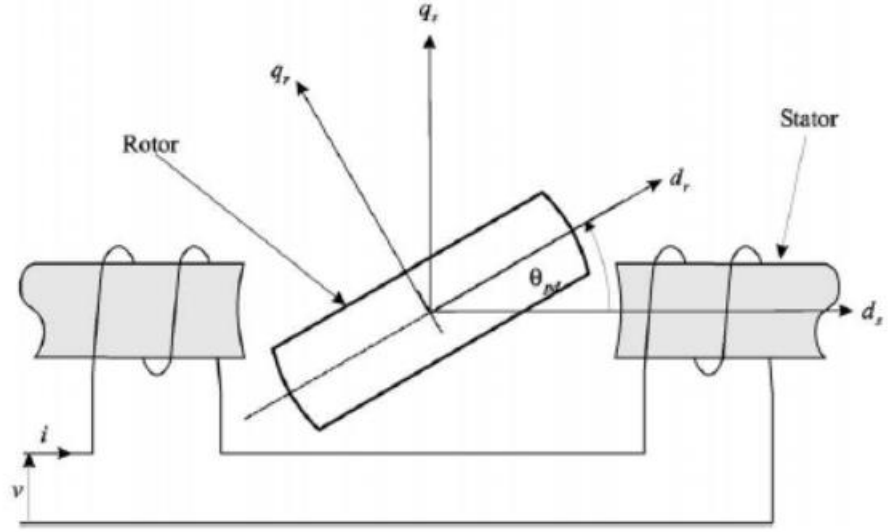
Şekil 2.2: Mıknatıs destekli senkron relüktans motorun d - q eksenleri.

Şekil 2.2’de görüldüğü üzere d ve q eksenleri boyunca yapısal farklılıklar bulunmaktadır ve bu sebeple oluşan, akı yollarındaki relüktans değerini etkileyen çıkıklık oranı makinenin moment üretimi için önemli bir faktördür. Relüktans makinelerin moment üretiminin temel ögesi makinenin çıkıklık oranınca belirlenen d - q eksenleri arasındaki relüktans değerlerinin farkıdır. Bu farkı oluşturan en önemli

etken ise bu eksenler üzerinde hesaplanan L_d ve L_q endüktanslarıdır. L_d ve L_q endüktansları arasındaki farkın büyüklüğü d ve q eksenleri üzerinde oluşan relüktansın da büyüklüğünü etkileyeceği için, bu iki endüktans arasındaki farkın büyüklüğü makinenin moment üretme kabiliyetini doğrudan etkilemektedir. Makinenin yüksek moment üretebilmesi için d ve q eksenlerinde oluşan relüktans değerleri arasındaki farkın artırılması amacıyla q eksenini boyunca konumlanmış olan akı bariyerlerinin ortalarına sabit mıknatıs desteği koyulmaktadır. Bu mıknatısların kalınlığı radyal yönde, akı yolunu engellemeyecek şekilde yerleştirilerek L_d ve L_q değerleri arasındaki farkı ve dolayısıyla üretilen momenti de arttırmaktadır. Endüktans değerleri arasındaki bu farkın büyüklüğü aynı zamanda makinenin moment dalgalılığını da etkilediği için L_d ve L_q endüktansları arasındaki farkın çok yüksek olması moment dalgalılığı açısından genellikle olumsuz sonuçlar doğurmaktadır (Tap 2017, Xheladini 2017).

2.3 Matematiksel Modeli

Relüktans makinelerin bir mıknatısın bir demir parçasını çekmesi gibi temel bir fiziksel özelliği kullanmaları bu makinelerin en eski elektrikli makineler arasında olmasının en önemli sebebidir (Kazmierkowski, 2002). Relüktans makinelerin bir türü olan Senkron Relüktans Makinelerini daha iyi anlamak için diğer elektrik makinelerinde de olduğu gibi matematiksel modelini oluşturmak gerekir. Matematiksel modelin belirlenmesi aşamasında bu makinelerin matematiksel modeli d - q eksen takımı baz alınarak oluşturulacaktır. Şekil 2.3'te relüktans makinenin en sade modeli verilmiştir. Bu tez kapsamında mıknatıs destekli bir senkron relüktans motorun inceleneceği düşünülürse Şekil 2.3'teki gibi, rotorun q eksenini üzerinde mıknatısların yerleştirilmesi gerekir. Motorun matematiksel modelini ifade etmek için ilk olarak Şekil 2.3'te gösterilen SynRM örneği üzerinden açıklanacaktır.



Şekil 2.3: Senkron relüktans motorun tek faz modeli (Kazmierkowski, 2002).

SynRM'nin temel modelinin bir faza indirgenmiş modeli için gerilim denklemleri yazıldığında;

$$v_i = R_s i_a^2 + i \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.1)$$

$$v = R_s i_a + \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.2)$$

Burada λ halkalanan akıyı, v faz gerilimini, R_s bir faz direncini ve i_a faz akımını göstermektedir. Bununla birlikte halkalanan akı, rotor pozisyonunun bir fonksiyonu olan endüktansa bağlıdır.

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = [L_{abc}(\theta_{er})] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte, θ_{er} rotorun elektriksel açısını, $[L_{abc}(\theta_{er})]$ ise statorun öz endüktansı ve karşıt endüktanslarını ifade eden bir endüktans matrisidir. Endüklenen tork ifadesini elde edebilmek için bu ifade uygulandığında Denklem (2.4) elde edilir.

$$T_e = \frac{p}{2} [i_a \quad i_b \quad i_c] \frac{\partial L_{abc}(\theta_{er})}{\partial \theta_{er}} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'e göre endüktanslar rotorun konumuna bağlıdır. Denklem (2.3)'e göre ise halkalanan akılar zamanla değişen akımlara ve rotor konumunun bir fonksiyonu olan endüktanslara bağlıdır. Makinenin analizini yapabilmek için çok sayıda birbirine bağlı değişkenlerin olduğu bir denklem takımını çözmek çok fazla hesaplama ve iterasyon yapılmasını gerektirmektedir. Motor analizini daha hızlı ve isabetli yapabilmek için 3 fazlı olan sistemi Park dönüşümleriyle daha basit bir form olarak $dq0$ eksem takımına indirgemek gerekir. Park dönüşümlerinin uygulanmasıyla birlikte;

d -ekseninde;

$$\frac{d\lambda_d}{dt} = v_d - R_s i_d + \omega_r \lambda_q; \quad \lambda_d = L_d i_d; \quad L_d = L_{s\sigma} + L_{dm} \quad (2.5)$$

q -ekseninde;

$$\frac{d\lambda_q}{dt} = v_q - R_s i_q - \omega_r \lambda_d; \quad \lambda_q = L_q i_q; \quad L_q = L_{s\sigma} + L_{qm} \quad (2.6)$$

denklemler elde edilir.

d - q eksenindeki mıknatıslanma endüktansı ise;

$$L_{dm} = \frac{3}{2}(L_h + L_0); \quad L_{qm} = \frac{3}{2}(L_h - L_0) \quad (2.7)$$

Yukarıdaki denklemlerde $L_{s\sigma}$ stator kaçak endüktansını, L_m stator mıknatıslanma endüktansını, L_h stator mıknatıslanma endüktansını, L_0 hava aralığı endüktansının sinüzoidal değişen bileşenini ve ω_r rotorun mekanik hızını göstermektedir.

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

SynRM'lerde endüklenen tork ifadesi Denklem (2.8)'teki gibi olmaktadır. Bu denklemde sabit mıknatıs desteği olmadığı için denklemde mıknatısa dair bir bileşen bulunmamaktadır. Mıknatıs etkisi de dahil edilerek v_d , v_q ve tork ifadeleri tekrar yazılırsa;

d -ekseninde;

$$\frac{d\lambda_d}{dt} = v_d - R_s i_d + \omega_r \lambda_q - \omega_r \lambda_{pm}; \quad \lambda_d = L_d i_d; \quad L_d = L_{s\sigma} + L_{dm} \quad (2.9)$$

q -ekseninde;

$$\frac{d\lambda_q}{dt} = v_q - R_s i_q - \omega_r \lambda_d; \quad \lambda_q = L_q i_q - \lambda_{pm}; \quad L_q = L_{s\sigma} + L_{qm} \quad (2.10)$$

şeklinde olur. Sabit mıknatıslı senkron relüktans makine için tork ifadesi ise aşağıdaki gibi olur.

$$T = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_d i_q + \lambda_{pm} i_d] \quad (2.11)$$

Yukarıdaki tork ifadesi daha açık yazılırsa Denklem (2.12) elde edilir.

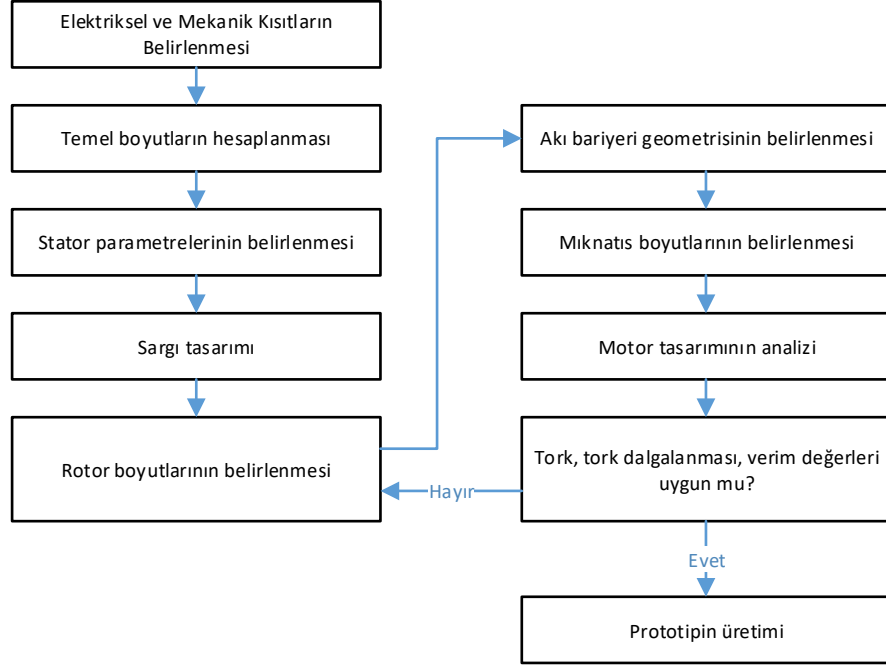
$$T = \frac{3}{2} p (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d + \lambda_{dm} i_q - \lambda_{qm} i_d) \quad (2.12)$$

3. MOTOR TASARIM PARAMETRELERİ

Motor tasarımında stator ve rotor tasarımının doğruluğu kadar stator ve rotorun birbirine göre uyumu da önemlidir. Bu tez kapsamında, kabul edilebilir bir stator tasarımı yapıldıktan sonra rotor tasarımı yapılacaktır. Stator ve rotor tasarımı sonucunda hedeflenen performansa ulaşamaması durumunda stator üzerinde iyileştirme çalışmaları ile başlanarak ilk tasarım süreci tekrarlanacaktır. Stator tasarımı ve rotor tasarımı bölümlerinde önemli parametrelerin seçimleri belirlenerek değişimleri durumunda performansa etkileri açıklanacaktır.

3.1 Motorun Temel Özellikleri ve Tasarım Kısıtları

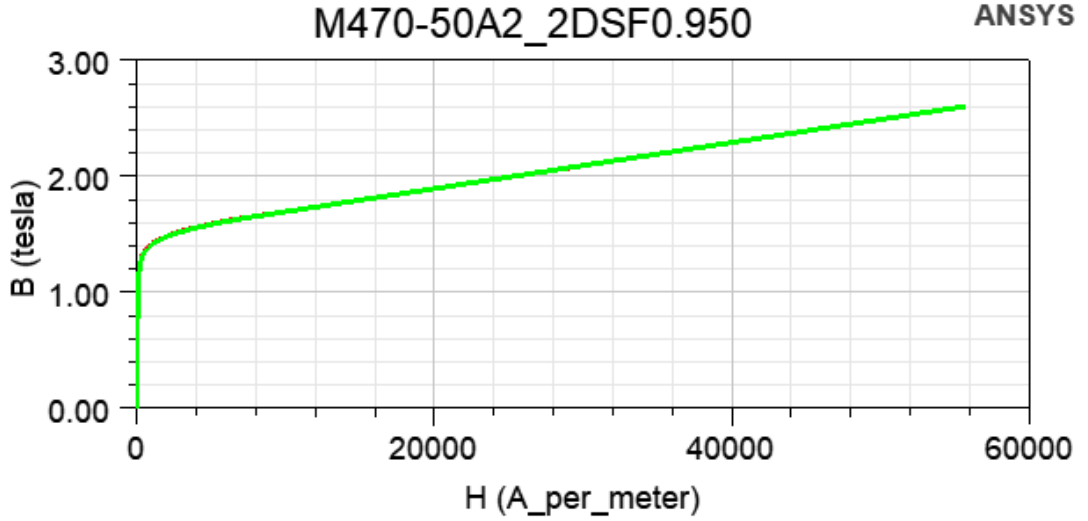
İlk modeli oluşturmadan önce motorun kullanım amacının belirlenmesi gerekir. Bu tez kapsamında 1500 watt mekanik güç üretebilecek ve 750 devir/dakika hızla dönebilecek bir motor tasarlanması amaçlanmıştır. Motorun dönüş hızını belirleyen önemli faktörlerden birinin kutup sayısıdır. Bu nedenle ilk belirlenecek özelliklerden biri olan kutup sayısı 8 olarak seçilmiştir. Bir diğer tasarım kriterinin de verim olması sebebiyle güç kayıplarını olabildiğince düşük seviyelerde tutmak amaçlanmaktadır. Güç kayıplarında birçok belirleyici etken bulunmaktadır. Başlıca etkenler olarak malzeme seçimi, malzemelerin büyüklükleri, iç ve dış geometrileri, birbirlerine göre pozisyonları sayılabilir. Tasarlanacak motorun tork dalgalanmasının düşük olmasının yanında veriminin de yüksek olması hedeflendiği için rotorunda sabit mıknatıs kullanımı amaçlanmakta ve bu sebeple maliyetinde önemli artış olmaktadır. Kullanılan mıknatısın düşük miktarda kullanılması maliyetin de düşük seviyelerde kalmasını sağlamaktadır. Maliyet artışına sebep olan bir diğer etken de motorun çapı ve paket boyudur. Motorun hacminin yüksek olması hem maliyeti önemli ölçüde artırmakta hem de güç yoğunluğunun düşük olmasına sebep olmaktadır. Bu kriterlere uygun olmakla birlikte iyi seviyelerde performans sergileyebilecek bir motor tasarlanması hedeflenmektedir. Şekil 3.1’de tasarım aşamasına ait akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Motor tasarımı iş akış diyagramı.

3.1.1 Manyetik Malzemeler

Motorda kullanılacak saclar belirlenirken dikkat edilmesi gereken önemli konuların başında malzemenin manyetik özelliklerinin yeterli ve iyi seviyede olması ayrıca teminin ve uygulanabilirliğinin de kolay olması gelir. Bu bağlamda tasarım aşamasında simülasyonlar yapılırken kriterlere uygun bazı silisli saclar denenmiş ve uygun olan bir sac seçilmiştir. Bu seçim yapılırken dikkat edilen bir diğer kriter olarak da makinenin çalışması esnasında oluşan histerezis ve girdap akımlarının olabildiğince düşük seviyelerde olmasıdır. Bu kriterlerle ve yapılan temel simülasyon seçimleriyle kullanılacak manyetik malzeme olarak sac kalınlığı 0,5 mm olan M470-50A seçilmiştir. Bu malzemeye ait teknik verilere göre ANSYS programında çizdirilen mıknatıslanma eğrisi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2: M470-50A2 çeliğinin B-H eğrisi (ANSYS).

3.1.2 Motor Çapı

Motor çapı tasarım kısıtlarından biri olmakla birlikte rotor çapına bağlı olarak değişebilmektedir. Bu parametrenin büyük olması rotor çapının ve dolayısıyla rotor kütlelerinin de artacağına anlamına gelmektedir. Bu durumda denklem (3.1)'e göre r_1 rotorun dış yarı çapı r_2 iç yarıçapı olmak üzere hem m kütlesi artmaktadır hem de r_1^2 artmaktadır. Bu artışların etkisi simülasyon programında incelendiğinde motorun kalkış performansı üzerinde olumsuz etkilerinin olduğu görülmüştür.

$$I = \frac{1}{2} m(r_1^2 + r_2^2) \quad (3.1)$$

Motor çapının büyük olmasının bir diğer etkisi ise motorun daha büyük olması ve çalışma ortamında alan sorunlarının oluşması anlamına gelmektedir. Bir elektrikli taşıt için kullanılacak olduğu düşünüldüğünde aracın da büyük olması anlamına gelmektedir. Büyük hacimli ve büyük kütleli bir motorun tercih edilmesi elektrikli aracın veya kullanılacak sistemin mekanik tasarımında başka sorunlar oluşturması muhtemeldir. Bununla birlikte boyut olarak büyük bir makinenin üretimi kullanılan malzemenin miktarını da arttırmakta ve maliyetler büyük miktarda artmaktadır. İyi bir kalkış performansı, düşük kütle ve hacim, düşük maliyetler bir motorda önemli tercih sebeplerindedir. Bu hedeflere ulaşmak için motoru doyuma götürmemek şartıyla rotor çapı olabildiğince küçük seçilmiştir.

Tablo 3.1: Rotor çapının sac kullanımına etkileri.

Rotor apı (mm)	220	230	240	250
Motor Hacmi (mm³)	2,28·10 ⁶	2,49·10 ⁶	2,71·10 ⁶	2,95·10 ⁶
Sac Ağırlığı (kg)	9,91	11,46	13,08	14,77
Kullanılan Sac Ağırlığı (kg)	21,83	23,83	25,92	28,09
Atalet (kg·m²)	0,1467	0,2241	0,3123	0,4125

Tablo 3.1 stator çapı ve sac paket uzunluğu sabit kalmak üzere rotor çapının değişiminin motorda kullanılan sacın hacmini, ağırlığını ve rotorun ataletini göstermektedir. apı 220 mm olan model ile 250 mm olan model arasında yaklaşık 4,86 kg ağırlık farkı bulunmaktadır. Modelin büyümesi ile ağırlığın artışıında önemli bir artış ve motor için büyük bir dezavantaj oluşmaktadır.

3.1.3 Paket Uzunluğu

Motorun paket uzunluğunun etkileri de motor çapına benzer etkiler göstermektedir. Paket uzunluğunun artması sonucunda motorun büyüklüğü, ağırlığı ve ataleti de artmaktadır, ancak bu artışlar rotor çapına oranla daha düşük seviyelerde olmaktadır. Ancak bunlara ilave olarak statorun da büyüklüğü artacağı için stator üzerinde bulunan sargıların ve mıknatısların da miktarı artacaktır. Bu artış tasarımıımızın maliyetinin önemli miktarda artmasına sebep olabilmektedir. Endüklenen momenti ve güç yoğunluğunu yüksek seviyelerde tutacak şekilde motor paket uzunluğunu düşürmek tasarım açısından faydalı olmaktadır.

3.1.4 Hava Aralığı

Hava aralığı azaldıkça motorun güç faktörünün ve motorun veriminin iyileştiği görülmektedir. Ayrıca motorun moment üretim kabiliyetini etkileyen faktörlerden biridir. Momentin artmasında olumlu bir rol oynasa da moment dalgalılığında istenmeyen seviyelerde artışlara sebep olmaktadır (Xheladini 2017). Bir çalışmada hava aralığının L_q endüktansını çok az etkilerken L_d endüktansını önemli ölçüde değiştirmektedir. Dolayısıyla hava aralığındaki değişimler endüktans farkı ve ıkıklık oranında büyük değişiklikler oluşturmakta bunun sonucunda da üretilen tork ve güç faktörü de değişmektedir (Kamper 1994). Yüksek miktarda tork

üretimi olması için hava aralığının mümkün olduğunca düşük olması tercih edilir. Ancak hava boşluğunun yüksek olması tork dalgalanmalarının ve demir kayıplarının daha düşük olmasına sebep olduğundan oldukça önemlidir (Moghaddam 2017). Hava aralığının büyüklüğünü belirlerken yüksek moment ve verim ile düşük moment dalgalılığı arasında optimizasyon sonucunda hedefler çerçevesinde bir sonuca ulaşmak gerekmektedir. Her ne kadar hedeflenen sonucun çok düşük hava aralığı değerlerinde elde edilmesi mümkünse de üretim aşamasında mümkün olmayan değerlerin seçilmemesine dikkat edilmelidir. Bu çalışmada 0,6 mm, 1 mm, 1,5 mm değerlerinde hava aralığı büyüklükleri analiz edilerek hedefe uygun hava aralığı değerinin 1 mm olduğuna karar verilmiştir.

3.2 Stator Tasarımı

Elektrik motorunun tasarımı elektriksel ve mekanik kriterlerin belirlenmesinden sonra stator tasarımıyla başlar. Bu aşamada tasarım kriterlerinin uygunluğuna göre bir ilk model oluşturularak oluk sayısı, oluk boyutu, sargı tipi ve sarım sayısı belirlenir. Bu değerler ilk tasarımı büyük ölçüde değiştirebilmektedir. Motorun performansına göre bir ya da çok sayıda parametrenin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu tez kapsamında yapılan analizlerin çıktıları ilerleyen bölümlerde daha detaylı verilecektir.

Stator tasarımında bir ilk model oluşturulurken farklı hesaplamalar olmakla birlikte bu çalışmada ön tasarım aşamasında aşağıdaki denklemlerden yararlanılacaktır.

$$B_{av} = \frac{P\phi}{\pi DL} \quad (3.2)$$

$$C_o = 1,11 \cdot \pi^2 \cdot K_w \cdot B_{av} \cdot ac \cdot 10^{-3} \quad (3.3)$$

$$KVA = 3 \cdot 4,44 \cdot K_w \cdot f \cdot \phi \cdot T_{ph} \cdot I_{ph} \quad (3.4)$$

$$T_{ph} = \frac{ac \cdot \pi \cdot D}{6 \cdot I_{ph}} \quad (3.5)$$

$$D^2 L = \frac{KVA}{C_o n_s} \quad (3.6)$$

ϕ	: Hava aralığı akısı
P	: Kutup sayısı
K_w	: Sargı faktörü
B_{av}	: Hava aralığındaki ortalama hava yoğunluğu
ac	: İletkenin metre başına akım taşıma kapasitesi
D	: Motor çapı
L	: Motor paket uzunluğu
n_s	: Senkron hız (rps)
KVA	: Görünür Güç

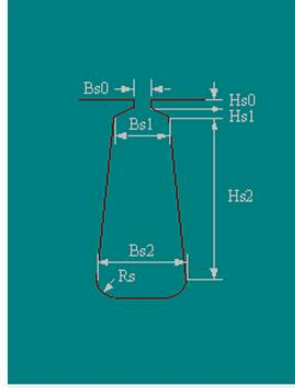
3.2.1 Kutup Sayısı ve Stator Oluk Sayısı

Tasarlanan motorda istenilen bir hız değeri olduğu için kutup sayısı başlangıç kriterlerinden biridir. 750 devir/dakika nominal hızda dönmesi için motorun kutup sayısı 8 olarak belirlenmiştir. Stator oluk sayısının ise 24, 36 ve 48 olması durumları incelenmiştir. Relüktans motorlarda moment dalgalılığı yüksek olmakla birlikte bu dalgalılığı azaltmanın yollarından biri oluk sayısı artırılmasıdır (Tap 2017). Ancak 48 oluklu tasarımın seçilmesi durumunda statorun boyutlarının küçük olması sebebiyle dişler arasındaki mesafenin çok küçük olduğu görülmektedir. Ayrıca hesaplanan sarım sayısının oluğa yerleştirilebilmesi için oluk derinliğinin oldukça fazla olması gerektiği görülmektedir. Bununla birlikte ortalama akı yoğunluklarının yüksek seviyelerde olması sebebiyle sacların doyuma gitme ihtimali tasarımda birçok zorluğu da beraberinde getirmektedir.

3.2.2 Stator Oluklarının Boyutlandırılması

Stator oluklarının boyutlandırılmasında iki mekanik kısıt bulunmaktadır. Bunlardan birincisi oluklarının bulunduğu statorun büyüklüğü, diğeri de olukların içinde bulunduğu sargıların miktarıdır. Statoru küçük olan bir motorun oluklarının derinliğinin büyük olması iyi bir tasarım için mümkün olmamaktadır. Çünkü boyunduruğun küçük olmasına dolayısıyla boyunduruktaki manyetik akı yoğunluğunun yüksek olmasına sebep olacaktır. İkinci kısıt statorun doluluk oranının uygun değerde olmasıdır. Eğer stator için hesaplanan sargının oluk içine yerleştirilmesi mümkün olmuyorsa motorun imal edilmesi olanaksız bir hale dönüşmektedir. Oluk yapısı belirlenirken ANSYS programının tanımlı oluk

yapılarından seçilebileceği gibi daha farklı geometriler tasarlanabilmektedir. Ön tasarım aşamasında farklı oluk tipleri denenerek tork, tork dalgalanması ve vuruntu torku açısından değerlendirilerek seçim yapılmalıdır.



Şekil 3.3: Oluk geometrisi.

Stator dişlerinin aksiyel yönde paralel olarak tasarlanması durumunda, ortalama manyetik akı yoğunluğunun dış boyunca yaklaşık olarak aynı seviyede olacağı ve paralellik boyunca daha dengeli bir manyetik akı yoğunluğuna sahip olacağı kabul edilmiştir. Paralel dişin genişliğinin belirlenmesi aşamasında dişlerin doyuma gitmemesine dikkat edilmez. Ancak manyetik saclardan en fazla faydalanabilmek için ortalama akı yoğunluğunun malzemenin özelliğine göre doyuma yakın seviyelerde olması tercih edilecektir. Elektriksel açıdan değerlendirilecek olursa oyukların uçlarındaki açıklığın çok düşük olması durumunda ters EMK'nın harmonik bileşenlerinin ve dişli torkunun azaldığı gösterilmiştir. Ayrıca L_d endüktansı artmakta dolayısıyla çıkıklık oranı ve relüktans tork da azalmaktadır.

3.2.3 Sargı Tasarımı

Stator sargılarının tasarımında ilk olarak iletken tipi belirlenmelidir. Elektriksel özellikleri açısından kıyaslandığında bakır iletkenin seçilmesi daha uygun görülmüştür. Sargı tipi olarak ise konsantre sargılar ve dağıtık sargılar incelenmiş ve literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Dağıtık sargı tipinin üstünlüklerinin başında bu sargılar yardımıyla daha düzgün bir MMF oluşumu gelir. Sargılarda endüklenen gerilim ise daha az harmonikli ve sinüs formuna daha yakın olmaktadır.

Bu etkenlerle birlikte konsantre sargılarda daha yüksek olan tork dalgalanmaları dağıtık sargılarda daha iyi seviyelere düşürülebilmektedir. Seçilen sargı tipinin diğer üstünlükleri olarak motorda sargı faktörünün, güç yoğunluğunun ve verimin daha yüksek seviyelerde olması sayılabilmektedir (Andrada 2013). Konsantre sargılı bir motorda dağıtılmış sargılı bir motora göre bakır kayıpları daha yüksek seviyelerde olabilmektedir ancak nominal hız ve daha yüksek hızlı çalışma durumlarında mıknatıslarda oluşan girdap akımı kayıpları daha düşük olması sebebiyle toplam kayıplar dağıtılmış sargılarda daha düşük çıkmaktadır. Girdap akımlarındaki bu kayıplar konsantre sargının MMF dağılımındaki büyük harmonikler sebebiyle gerçekleşmektedir.

İletkenlerin oluk için dağılımına göre sargı tipi tek katmanlı veya çift katmanlı olarak adlandırılırlar. Tek katmanlı sargı bir oluk içinde sadece bir faza ait sargının bulunması anlamına gelir. Çift katmanlı sargı ise bir oluk içinde iki farklı faza ait sarımın bulunabileceği anlamına gelir. Çift katmanlı sargılarda hava aralığı akısındaki harmonik bileşenler azaldığı için harmonik kaynaklı kayıplar azalmakta ve sargı faktöründe önemli artış olmaktadır. Harmoniklerin azalmasının bir diğer olumlu etkisi ise manyetik kuvvetlerin daha dengeli olmasıdır. Bu da tork dalgalanmasının, titreşim ve gürültünün de önemli ölçüde azalması anlamına gelmektedir (Candel 2015). Diğer parametrelerde olduğu gibi sargı tipi de motorun tasarım kriterlerine göre belirlenmelidir. Relüktans motorların yüksek tork dalgalanmasına sahip olması ve diğer tasarım kriterlerine göre performansını en iyi seviyelerde tasarlayabilmek için çok katmanlı ve dağıtık sargı tipi seçilmiştir.

3.3 Rotor Tasarımı

Relüktans motorların rotorunda sargı bulunmadığı için tasarımı yapılırken sargı ile ilgili parametre bulunmamaktadır. Rotor tasarımında genel olarak akı bariyeri geometrisinin ve bu akı bariyerlerinin içine yerleştirilecek olan mıknatısların tasarımının yapılması gerekmektedir. Temel olarak bu iki parametrenin optimizasyonu ile motorun performansının iyi değerlere ulaşılmasına çalışılmıştır.

3.3.1 Rotor apı

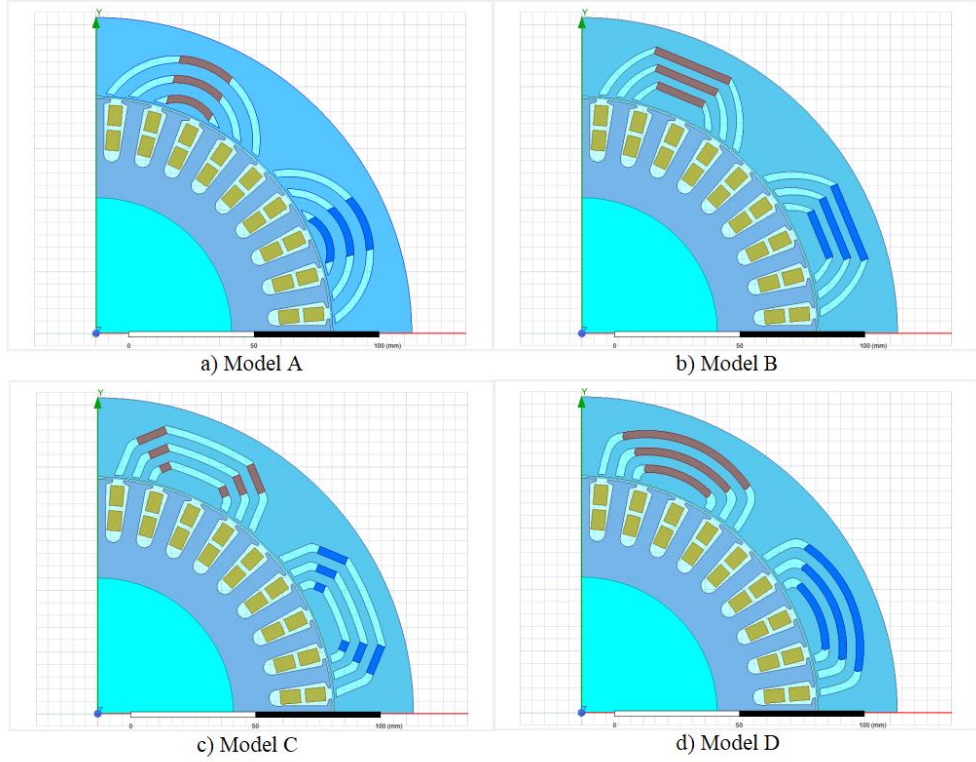
Dış rotorlu bir elektrik motorunun bklgn etkileyen değerlerin başında gelen rotor çapı, önemli bir tasarım kriteri olduğu için bir ilk değer hesaplanmıştır. Rotor çapının belirlenmesinde motorun tasarlanacağı g önem kazanmaktadır. İlk hesaplardan sonra, istenilen performans değerlerine ulaşmak için simülasyon sonuçları incelenerek rotor çapı belirlenecektir. Uygun sayıda akı bariyeri ve mıknatıs yerleşiminin rotor genişliği ile uyumlu olması rotor çapının belirlenmesinde en önemli sebeplere dendir.

3.3.2 Akı Bariyeri Tipi ve Sayısı

Akı bariyerleri farklı tiplerde olabilmektedir. Akı bariyerlerinin sayısı, biçimi ve konumu akı yolundaki mesafeleri doğrudan etkilediği için L_d ve L_q endüktanslarını, endüktanslar arasındaki farkı doğrudan etkilemektedir. Denklem 2.11'de görüleceği üzere moment üretimi bu iki endüktans arasındaki farkla ilişkilidir. Ayrıca akı bariyerlerinin şekli ve mıknatısların büyüklüğü, konumu gibi parametreler üretilen momentin büyüklüğünün yanı sıra moment dalgalılığını da etkilemektedir. Bu nedenle rotor tasarımında en önemli kriterlerin başında akı bariyeri ve mıknatıs tasarımı gelmektedir. Bu tez kapsamında tasarlanacak motor için literatürde tasarlanan akı bariyeri ve mıknatıs tipleri kullanılarak simülasyon programı yardımıyla analizleri yaptırılmıştır.

şekil 3.4'te $\frac{1}{4}$ kesitleri verilen rotor tiplerinde bir, iki ve üç akı bariyeri ve bu bariyerlerin içinde şekildeki gibi mıknatıslar yerleştirilerek performansları incelenmiştir. şekil 3.4.a'da çember yayı şeklinde akı bariyerleri bulunmakta ve mıknatıslar da çember yayı biçimindedir, şekil 3.4.b'de ise ilk modelden farklı olarak mıknatısların kesiti dikdörtgen biçimindedir. Diğer iki modelde ise akı bariyerleri tabanı geniş bir U biçimindedir. şekil 3.4.c modelinde dikdörtgen biçiminde olan mıknatıslar iki grup olarak akı bariyerinin köşelerine yerleştirilmiş, şekil 3.4.d modelinde ise çember yayı şeklinde olan mıknatıslar akı bariyerlerinin ortalarına yerleştirilmiştir. Bu dört model ve her biri için üç farklı akı bariyeri olacak şekilde toplam 12 farklı modelin analizleri yapıldığında verim, tork üretimi ve tork

dalgalanmaları kıyaslanmıştır. Analizler sonucunda en uygun bariyer geometrisi ve akı bariyeri sayısı belirlenecektir.

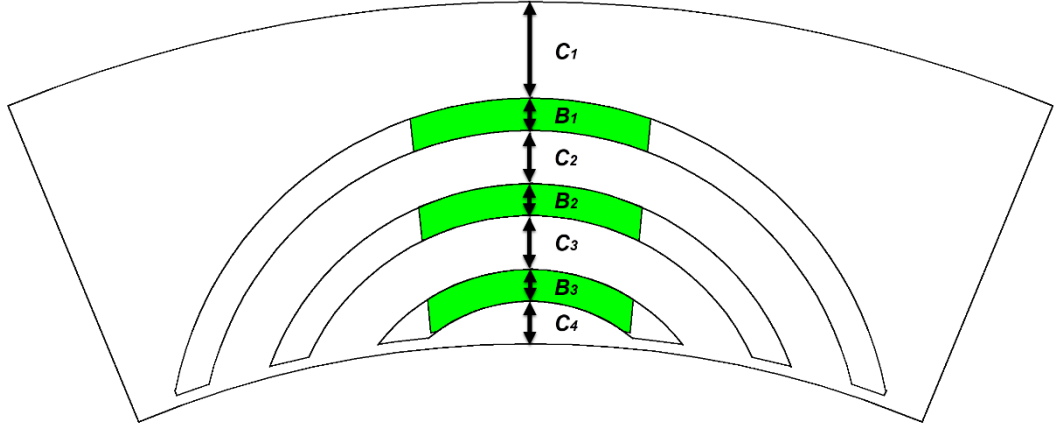


Şekil 3.4: Farklı akı bariyerlerine göre rotor modelleri.

3.3.3 İzolasyon Oranı (Hava Demir Oranı)

İzolasyon oranı, merkezi rotorun merkezi olmak üzere rotorun iç ve dış çemberleri arasında seçilen bir doğrusal yol üzerinde toplam hava aralığı uzunluğunun toplam manyetik malzeme uzunluğuna oranı şeklinde ifade edilir. Bu oran analizlerden önce d ve q eksenleri için ayrı ayrı hesaplanır. d eksenli tasarımlarda genellikle doğrudan yolu göstermekte ve rotor üzerinde hava aralığı bulunmadığı için motorun tasarımında q eksenli üzerinde bulunan izolasyon oranı belirleyici olmaktadır. İzolasyon oranı motorun ürettiği moment, moment dalgalılığı, verim gibi performans çıktılarının belirlenmesinde önemli rol almaktadır. İzolasyon oranı belirlenirken çıkıklık oranının yüksek olması hedeflenmektedir. Bunun yanında akı bariyerlerinin yapısı, mıknatıs tipi ve miktarı gibi özellikleri motorun çıkıklık oranını etkileyen diğer etkenlerdir. Literatürde farklı akı bariyeri tasarımları için en

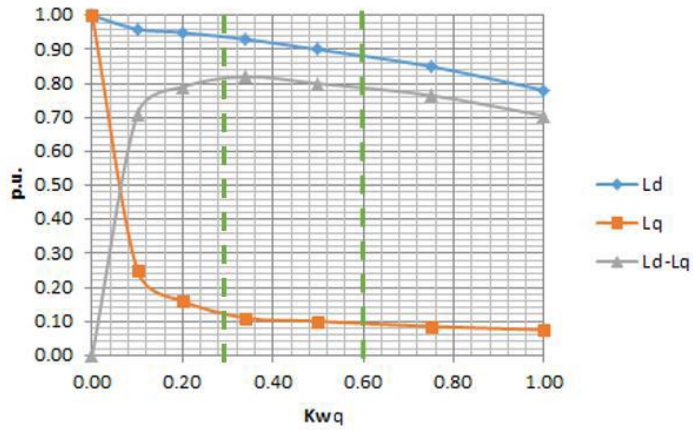
uygun çıkıklık oranının belirlenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır ancak tasarım için diğer parametrelerin de optimizasyonu gereklidir.



Şekil 3.5: Rotorun demir bölütleri ve akı bariyerleri.

$$k_{wq} = \frac{B_1 + B_2 + B_3}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} \quad (3.7)$$

Şekil 3.5'te q ekseninde izolasyon oranını hesaplamak için gerekli uzunluklar tanımlanmıştır. İzolasyon oranı hesaplanırken denklem 3.7 kullanılmıştır. Dulanto (2015) yaptığı tez çalışmasında, kullandığı verilerle q ekseninde izolasyon oranına ile L_d ve L_q endüktanslarının değişimini göstermiştir.



Şekil 3.6: L_d ve L_q endüktanslarının K_{wq} ile değişimi (Dulanto 2015).

Şekil 3.6’da L_d-L_q farkının en yüksek olduğu K_{wq} değerinin 0,3 ile 0,6 arasında olduğunu ifade edilmiştir. Bu tez kapsamında da benzer şekilde uygun olan bir K_{wq} değeri kullanılacaktır.

3.3.4 Kiriş Kalınlığı

Senkron relüktans motorlarda akı bariyerleri rotor kutuplarını bariyer sayısından bir fazla parçaya bölmektedir. Her bir akı bariyerinden bir iç bölgede olan demir bölütü mekanik olarak kiriş adı verilen kısımlar tutmaktadır. Kiriş rotorun hava aralığına en yakın kısmında çok küçük bir genişliğe sahiptir. Bu sebeple rotorun dönme hareketini yaparken mekanik dayanımının uygun olması amacıyla kiriş genişliğinin çok küçük değerler seçilmemesi gerekmektedir. Rotorda manyetik akının demir bölütler üzerinden devreyi tamamlaması amaçlandığından, demir bölütleri mekanik olarak tutmakla görevli kirişler doyuma gidebilecek kadar küçük genişlikte olmalıdır. Kirişlerin doyuma gitmesiyle birlikte demir bölütler de manyetik olarak birbirinden ayrılmakta, böylece motorun ürettiği momenti olumlu etkilemektedir (Marino 2015).

3.3.5 Mıknatıs Tipi ve Boyutları

Mıknatıs tipi seçilirken yüksek kaliteli olmasının yanında maliyet unsurları da gözletilmelidir. NdFeB ve SmCo gibi mıknatıslar ülkemizde üretilmemektedir. Ayrıca bu tip mıknatısların özel ölçülerde imalatında üretim süreci hem uzun sürmekte hem de oldukça maliyetli olmaktadır. Mıknatıs seçiminde bir diğer etken ise Currie sıcaklığıdır. Mıknatıslar Currie sıcaklığına maruz kalmaları durumunda manyetik özelliklerini kalıcı olarak kaybetmektedirler. Bu özellikleriyle mıknatısların düzgün çalışabilmesi için motorun ulaşacağı en yüksek çalışma sıcaklığından daha yüksek bir Currie sıcaklığına sahip bir mıknatıs seçilmelidir.

Boyutlarının belirlenmesinde sınırlayıcı kriter ise mıknatısların içine yerleştirileceği akı bariyerlerinin boyutudur. Akı bariyerlerinin seçimine göre mıknatısların da seçimi belirlenmektedir. Akı bariyerleri belirlenirken üzerinde çalışılan dört farklı geometri için mıknatıs tasarımı yapılacaktır. Her bir modelde akı

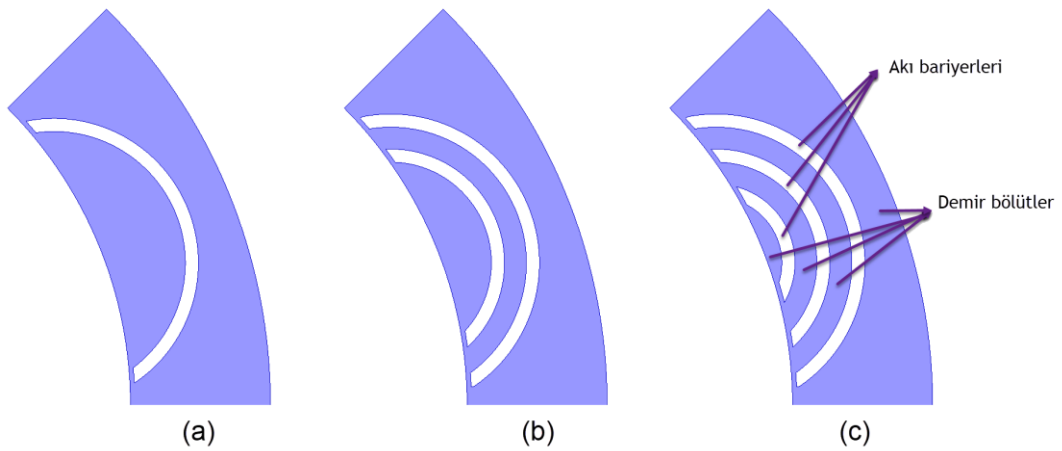
bariyerinin içine yerleştirilen mıknatısların motor verimine, üretilen torka ve tork dalgalılığına etkileri üzerine analizler yapılacaktır. Çok sayıda akı bariyeri olan modellerde her bir mıknatısın kalınlığı, boyu, yay açısı gibi geometrik özellikleri ayrı ayrı optimize edilmesi gerekmektedir. Yapılan ön çalışmalarda rotorun en dışında olan akı bariyerinin içindeki mıknatısların büyük olması motorun verimini arttırmakla birlikte tork dalgalanmalarını arttırmaktadır. Ayrıca bu mıknatısların etrafındaki bölgelerde akı yoğunluklarının oldukça yüksek olmasına sebep olduğundan, bu bölgelerde nüvenin doyuma gitmemesi için mıknatıs boyutlarının belirlenmesi oldukça önem kazanmaktadır. Mıknatıslarının temel boyutlarının belirlenmesiyle birlikte mıknatısların uç kısımlarının da çeşitli geometrik yapılara göre performansa etkileri incelenecektir. Bu yapılarda uçların ince, sivri ve farklı açılarda kesimine göre simülasyonlar yapılacak, performans ve üretim kolaylığı açısından uygun model seçilecektir.

4. MOTORUN 2D MANYETİK ANALİZLERİ

Bu bölümde tezin manyetik analizlerinin yapılırken her bir parametrenin motorun performansını nasıl etkilediği ve bu durumlarda hangi yöntemler izlendiği açıklanacaktır. Elektriksel ve mekanik kısıtlara göre ilk hesaplamaları yapılan motorun ANSYS programı yardımıyla simülasyonları yapılmıştır. ANSYS programında DRSM SRM modeli olmadığı için öncelikle stator tasarımı üzerine durulmuş daha sonra Maxwell modülü yardımıyla rotorun çizimi yapılmıştır. Rotorda değiştirilecek parametreler tanımlanarak parametrik analizlerin yapılması adımına geçilmiştir. Stator ve rotorun tasarımında önemli parametrelerin motor performansı üzerindeki etkileri ayrı başlıklar altında bu bölümde verilecektir.

4.1 Temel parametrelerin ve stator parametrelerinin analizleri

Dış rotorlu motorlarda motor çapı stator tasarımına ve rotorda bulunan akı bariyerlerine bağlı bir parametre olması sebebiyle tasarım sürecinde bu iki parametreye göre değişiklikler gösterebilmektedir. İlk aşama olarak stator tasarımına göre stator çapı belirlenmiştir. Daha sonra rotor üzerinde olması gereken akı bariyeri sayısının birden üçe kadar değişeceği öngörüldüğü için rotor genişliğinde en az üç akı bariyerinin sığabileceği kadar bir alanın bulunması gerekir.



Şekil 4.1: Akı bariyerinin a) 1, b) 2 ve c) 3 olması durumunda rotor geometrisi.

Şekil 4.1’de görüleceği üzere akı bariyerlerinin sayısı arttıkça akı yollarını oluşturan demir bölütlerin genişliği azalmaktadır. Ayrıca boyunduruğun da doyuma gitmemesi için rotor çapının artması gerekmektedir. Bu aşamada bu üç durumu da test edebilmek için mıknatıs destekli tasarımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Mıknatıs destekli simülasyonların gerçekleştirilmesiyle motor çapının değişimi üzerine daha doğru değerler elde edilecektir. Paket boyu belirlenirken ise motorun boyunun aksel yönde artmasının motor performansına etkisinin önemli düzeyde olmaması sebebiyle motor hacminin ve kullanılan malzeme miktarının artmaması için hesaplanan paket boyu ile analizler yapılmıştır.

4.1.1 Oluk Sayısı

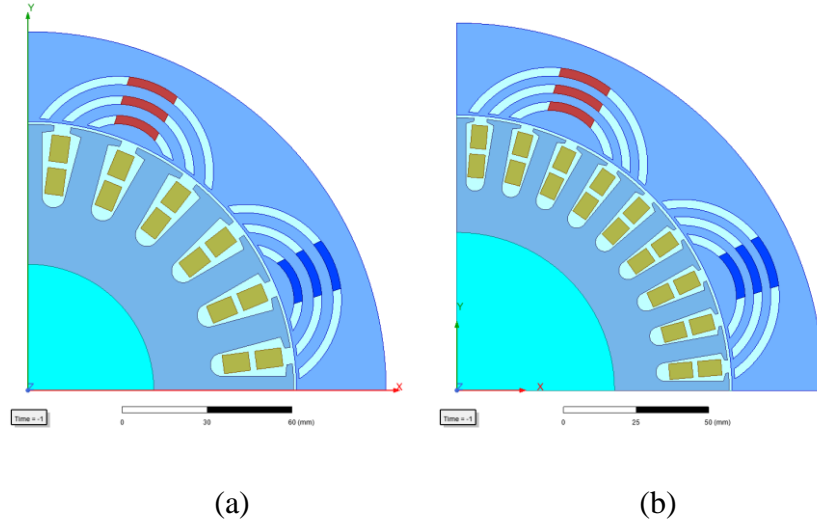
Stator oluklarının tasarımı ile sargı tasarımının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Oluk sayısı ve tasarımı değiştiğinde bundan ilk etkilenen parametrelerden biri sarım sayısı olmaktadır. Tasarım kriterlerine en uygun tasarımı elde etmek için her bir oluk sayısı değeri için sarım sayısını tekrar analiz etmek gerekmektedir. Tasarlanacak motorun faz sayısı ve kutup sayısı dikkate alındığında, daha dengeli bir MMF elde edebilmek için 24, 36 ve 48 oluklu modeller incelenmiştir. Stator geometrisinin oluk sayısı ile değişimi incelendiğinde oluk sayısı arttıkça oluk ve stator dişi için kullanılabilir alanın oldukça küçüldüğü görülmektedir. 48 oluk için hesaplandığında bir oluk ve dişin toplam genişliği 12,4 mm’den küçük olmaktadır. Bu genişlik sınırı içinde tasarlanan modellerde hedeflenen güce ulaşmak istendiğinde stator dişlerinin doyuma gittiği görülmüştür. Manyetik açıdan statoru daha etkin kullanabilmek için oluk ve stator genişliklerini daha büyük seçerken oluk sayısını da yüksek seçilmesine dikkat edilmiştir.

Tablo 4.1: Oluk sayısına göre motor performansının değişimi.

Oluk Sayısı	Pi (W)	Po (W)	Verim (%)	Tork (Nm)	Ripple (Nm)	Tork Dalg. (%)	Akım (A)	Güç Faktörü
24	1658	1516	91,40	19,32	3,09	16,00	11,12	0,53
36	1670	1516	90,75	19,30	1,38	7,12	8,04	0,73

Tablo 4.2’de aynı rotora sahip iki motor, oluk sayısının 24 ve 36 olması durumlarına göre performansı kıyaslanmıştır. Bu iki tasarımdan 24 oluklu modelin

verimi daha iyi çıkmıştır. Ancak tork dalgalanması değerlerinde önemli bir fark bulunmaktadır. 24 oluklu olan ilk modelde tork dalgalanması %16 seviyesinde iken oluk sayısı 36 olduğunda bu dalgalanma miktarı önemli bir değişimle %7,12 seviyesine inmektedir. Benzer şekilde güç faktörü değeri de 36 oluklu modelde daha yüksek olmasının da etkisiyle ikinci modelin çektiği akımın ilk modele göre daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2: Oluk sayısına göre motorların ¼ kesitleri **a)** 24 oluk, **b)** 36 oluk.

Oluk sayısına göre tasarımı yapılan iki modelin görünümü Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Oluk sayısı 24 olan motorun stator diş genişlikleri daha büyük olarak tasarlanabilmektedir. Bu özelliğiyle akı yoğunluğu daha etkin kullanılabilmekte ve daha yüksek verim değerlerine ulaşılabilmektedir ancak tork dalgalanmaları oluk sayısı 36 olan modele göre çok yüksek çıkmaktadır. Tork dalgalanmalarındaki farkın büyük olması sebebiyle oluk sayısının 36 olması avantaj sağlamaktadır.

4.1.2 Hava Aralığı

Hava aralığının motor performansına etkisini incelemek için farklı uzunluklarda hava aralığı değerleri için simülasyonlar yapıldığında özellikle verim ve tork dalgalanmalarında önemli değişiklikler olduğu görülmektedir. Hava aralığının artması sonucunda tork dalgalanmalarında önemli düşüşler gözlemlenmektedir. Tablo 4.1’de görüleceği üzere hava aralığı 0,6 mm ile 2 mm arasında değişirken tork dalgalanması %10,13 değeri ile %6,16 değerleri arasında

değişmektedir. Hava aralığı artarak değişirken verim değerinde de önemli bir düşüş meydana gelmektedir. En uygun hava aralığının belirlenmesinde yüksek verim ve düşük tork dalgalanması elde etmenin yanı sıra üretim teknolojisindeki kısıtlamalar da belirleyici olmaktadır. Yüksek verim elde etmek için çok düşük bir hava aralığı elde etmek gerekse de çok düşük hava aralığında motorun üretimi ve çalışmasında sorunlar olabilmektedir. Bu sebeple 0,6 mm hava aralığının riskli bir tasarım oluşturabileceği göz önünde bulundurulacaktır. Ayrıca verim ve tork dalgalanmasındaki en iyi noktanın değerlendirilmesi sonucunda hava aralığı 1 mm olarak seçilmiştir.

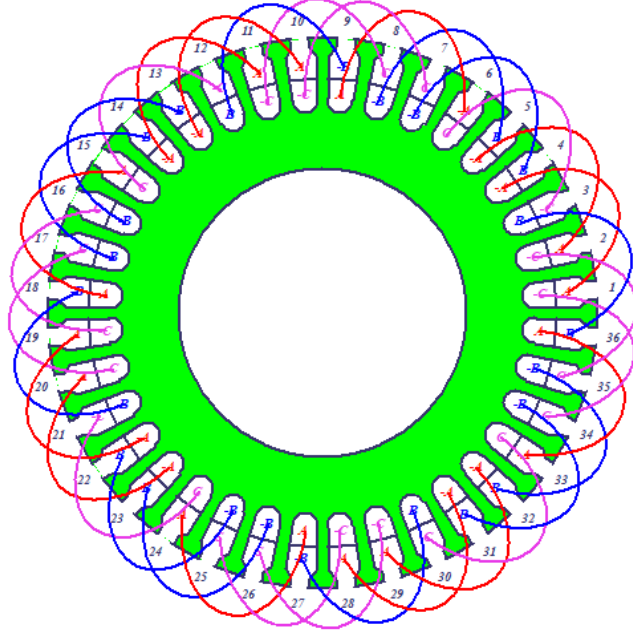
Tablo 4.2: Hava aralığı değerinin değişimi ile motor performansı.

Hava Aralığı (mm)	Pi (W)	Po (W)	Verim (%)	Tork (Nm)	Ripple (Nm)	Tork Dalg. (%)	Akım (A)	Güç Faktörü
0,6	1653	1543	93,33	19,64	1,99	10,13	6,85	0,84
1	1676	1544	92,12	19,66	1,74	8,84	7,47	0,78
1,5	1711	1545	90,30	19,66	1,44	7,34	8,32	0,72
2	1747	1543	88,30	19,64	1,21	6,16	9,21	0,66

4.1.3 Sargı Yapısı

Oluk sayısı belirlendikten sonra sargı yapısının belirlenmesi gerekmektedir. Elektrik motorlarında sık kullanılan sargı tipleri incelendiğinde iletkenlerin oluk içi dağılımına göre tek katmanlı ve çift katmanlı sargı olarak adlandırılmaktadır. Tek katmanlı sargı olması, bir oluk içindeki sargının tek bir faza ait olması anlamına gelmektedir. Çift katmanlı sargı ise aynı oluk içinde aynı ya da farklı iki faza ait sargıların bulunması anlamına gelir. Tek katmanlı sargılarda manyetik akılarda daha fazla harmonik bileşen oluşmaktadır. Relüktans makinelerde, yapısı sebebiyle moment dalgalılığının yüksek olması ve harmonik bileşenlerin motor performansına daha fazla etki etmesi sebebiyle çift katmanlı sargının kullanılması daha uygundur.

	Phase	Turns	In Slot	Out Slot
Coil_1	A	26	1T	4B
Coil_2	A	26	2T	5B
Coil_3	-C	26	3T	6B
Coil_4	B	26	4T	7B
Coil_5	B	26	5T	8B
Coil_6	-A	26	6T	9B
Coil_7	C	26	7T	10B
Coil_8	C	26	8T	11B
Coil_9	-B	26	9T	12B

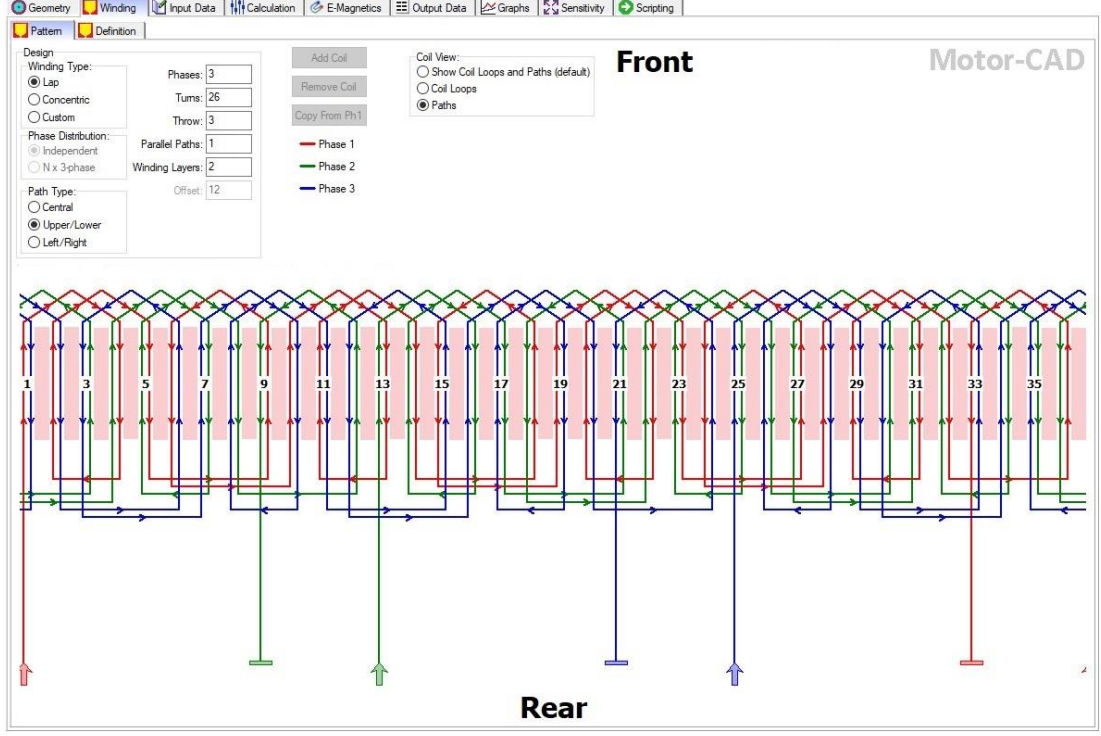


Şekil 4.3: Önerilen çift katmanlı, dağıtılmış sargı şeması (ANSYS Rmxprt).

Sargıların stator içindeki dağılımı açısından sınıflandırıldığında en çok kullanılan sargı tipleri olarak dağıtılmış sargı ve konsantre sargı ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada dağıtılmış sargı seçilmesinde bu sargıların daha az harmonik üretmesi büyük öneme sahiptir. Harmoniklerin düşük olması sebebi ile endüklenen gerilim daha sinüzoidal bir dalga şekline sahip olmaktadır. Ayrıca demir kayıplarının da daha düşük olması verim üzerine olumlu bir etki yapmaktadır. Şekil 4.3'te bu kriterlerle tasarlanmış olan çift katmanlı, dağıtılmış sargılı bir statorun RMXprt görüntüsü bulunmaktadır. Her bir sargının girdiği ve çıktığı oluklar arasında 3 adet stator dişini kapsadığını göstermektedir ve bu durum sargı adımının 3 olduğu şeklinde ifade edilmektedir. Soldaki şemada toplam oluk sayısının $\frac{1}{4}$ 'lük kısmına denk gelen 9 bobinin her birinin kaçınıcı oluktan girip kaçınıcı oluktan çıktığı verilmiştir.

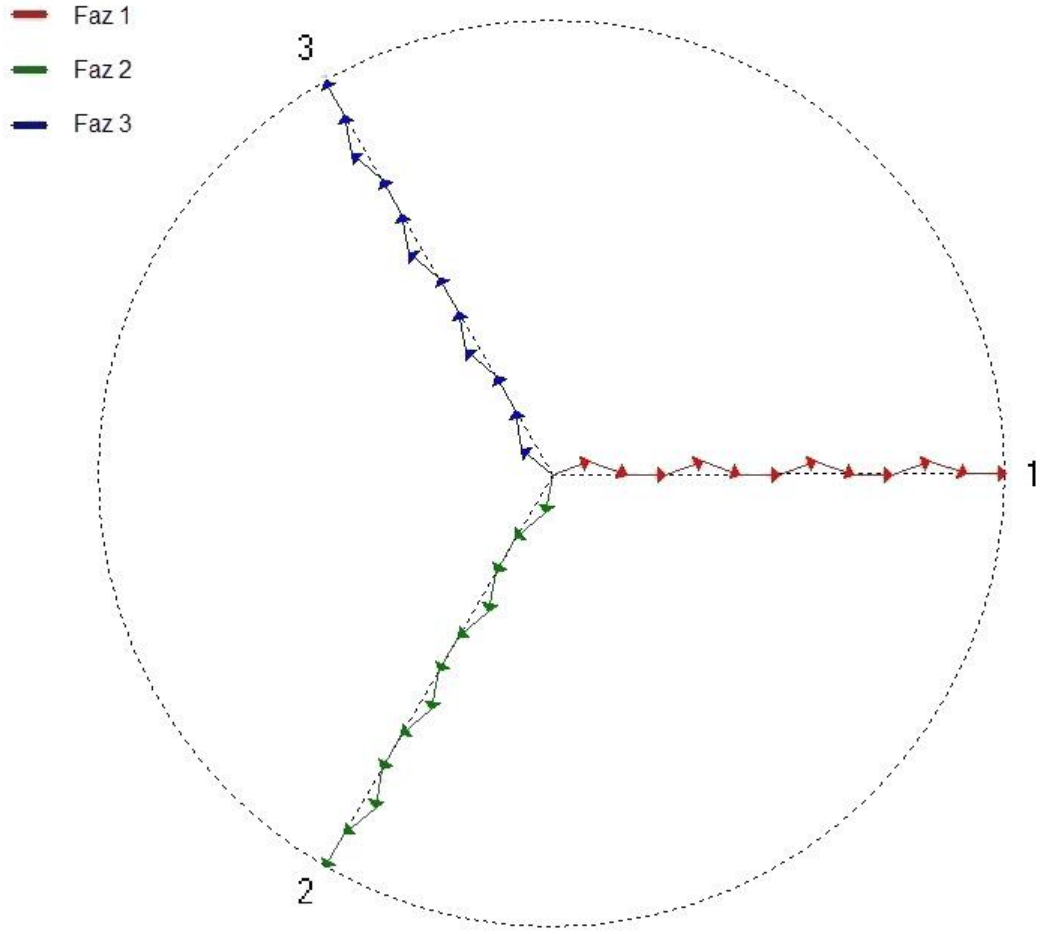
Sargıların stator oluklarına dağılımını bir başka açıdan incelemek için tasarım Motor-CAD programına aktarılmıştır. Şekil 4.4'te verilen sargı dağılımı incelendiğinde her bir oluk içindeki sargının hangi faza ait olduğu ve hangi yönde olduğu görülmektedir. Sargı şemasının alt kısmında ise her bir faza ait sargıların başlangıç bitiş uçları gösterilmiştir. Dengeli bir faz dağılımı için sargılar sırasıyla 1, 13 ve 25 numaralı oluklardan girmektedir. Sargıların çıkışları ise sırayla 33, 9 ve 21

numaralı oluklardan yapılmaktadır. Fazlar arasında 120° elektriksel açı olması gerektiği için 36 oluklu bir makinede sargıların başlangıçları arasında da 12 oluk fark olmaktadır.



Şekil 4.4: Sargıların bağlantı şeması (MotorCAD).

Bu çalışmada sargılar vektörel olarak Şekil 4.5'teki gibi her bir faz sargısı arasında 120° olacak şekilde dengeli olarak dağıtılmıştır. Sargıların türü, iletken sayısı ve iletken kesiti ön tasarım hesaplarıyla belirlenmiş ve harmonik bileşenlerin düşük seviyelerde olması sebebiyle analizlere devam edilmiştir. Sargı tasarımı dağıtılmış sargı olmak üzere Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te görüldüğü gibi oluk başına 52 sarım olarak gerçekleştirilmiştir. Sargının çift katmanlı olması sebebiyle her bir olukta iki faza ait sargı bulunmaktadır. Sargılarda kesiti $0,7 \text{ mm}^2$ bakır kullanılmıştır.



Şekil 4.5: Sargıların üç faz vektörel gösterimi.

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi fazlar arasında ve oluklarda dengeli bir sargı dağılımından sonra stator tasarımı tamamlanmaktadır. Sargı tasarımında dikkat edilmesi gerek bir diğer konu ise harmoniklerdir. Harmoniklerin yüksek olması hava aralığı akısı, endüklenen gerilim, MMF gibi büyüklüklerin sinüs dalga biçiminde bozulmalara sebep olacağı için dikkat edilmesi gereken önemli değerlerdendir. Gerilim ve akım harmoniklerini motorun nihai tasarımı ile analiz edilecektir.

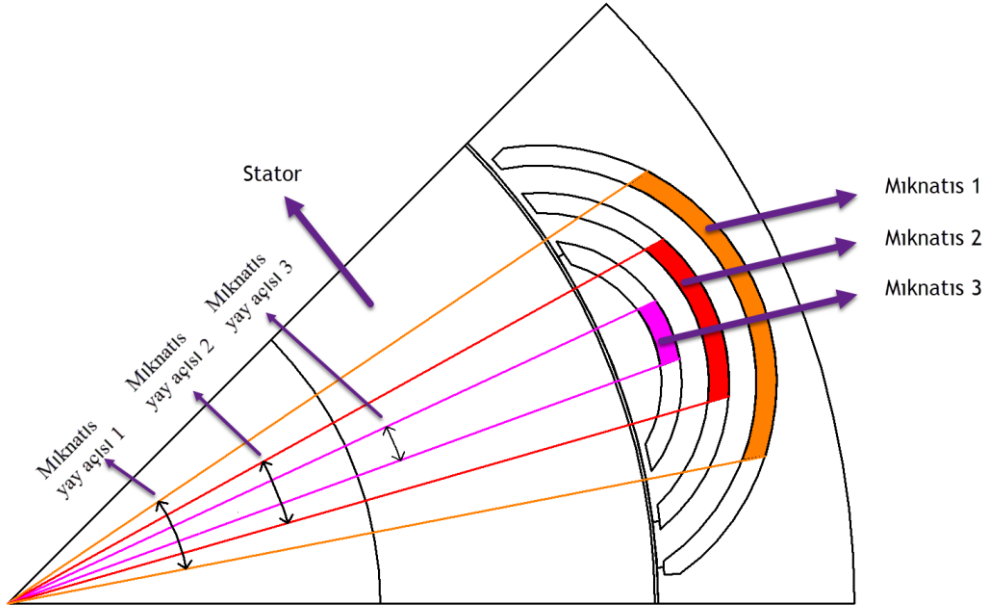
4.2 Rotor Manyetik Analizleri

Statorun tasarımından sonra rotor parametrelerinin belirlenmesi ve bu parametrelerin değişimi ile motor performansının değerlendirilmesi gelmektedir. Rotor çapının çok büyük değerlere ulaşmaması amacıyla demir bölütlerin genişlikleri manyetik doyuma ulaşmaması koşuluyla olabildiğince düşük seviyelerde

tutulmuştur. Bu çalışmada rotor tasarımı süresince öncelikle akı bariyeri tipinin ve akı bariyeri sayısının seçimi gerçekleştirilecektir. Daha sonra seçilen modelde farklı mıknatıs boyutlarına göre parametrik analizler yapılarak performans çıktıları değerlendirilecektir.

4.2.1 Akı Bariyeri Tipinin Seçilmesi

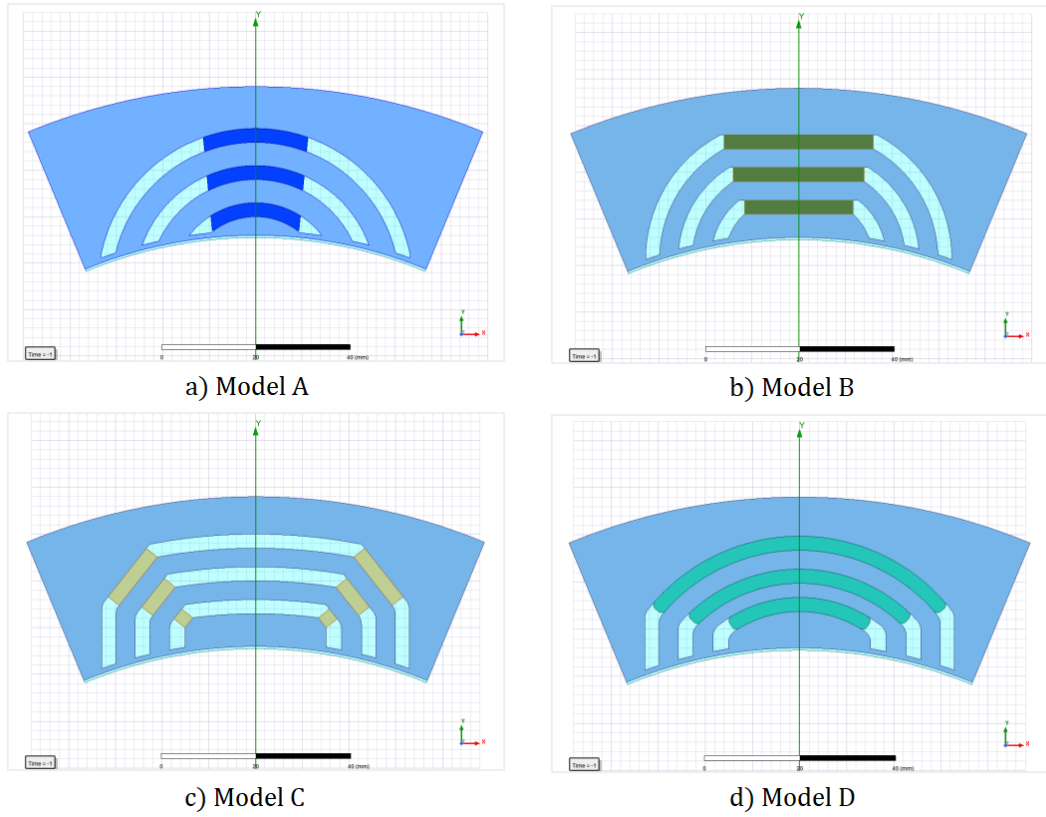
Mıknatıslı tasarımların analizine geçmeden önce stator üzerinde gerekli tanımlamalar yapılacaktır. Şekil 4.6'da üzerinde akı bariyerleri ve mıknatıslar olan bir rotor görünümü bulunmaktadır. Tezin bundan sonraki bölümlerinde mıknatıslar bu şekilde de görüldüğü üzere rotorun dışından içine doğru sırasıyla mıknatıs 1, mıknatıs 2 ve mıknatıs 3 olarak adlandırılacaktır. Rotorun optimizasyonunda büyük öneme sahip olan mıknatıslar boyutlandırılırken eğer mıknatıs dikdörtgen biçiminde ise en ve boyuna göre; yay biçiminde ise yay açlarına göre isimlendirilecektir. Şekil 4.6'da her bir mıknatısın motorun merkezi ile yaptıkları yay açıları gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Rotor üzerindeki mıknatıs ve yay açılarının isimlendirilmesi.

Stator tasarımı tamamlandıktan sonra, motor performansı üzerinde en önemli etkisi olan değişkenlerin seçimi yapılacaktır. Bu bölümde rotora bağlı olan akı

bariyerlerinin ve mıknatısların ölçülerinin değişimi üzerine tasarımlar analiz edilecektir. Mıknatıs yerleşimi ve boyutları, akı bariyeri tipi ve ölçüleri belirlenirken beraber incelenecektir. İlk önce akı bariyerlerinin tipi ve sayısı belirlenecektir. Burada literatürde kullanılan 4 farklı akı bariyeri ve mıknatıs eşleşmesine dair 3 farklı akı bariyeri için tasarımlar incelenerek bu 12 model içinden hangi modelin istenilen tasarım kriterlerine en uygun olduğu seçilecektir. Daha sonra seçilen bir model üzerinde yapılan çalışmalarla her akı bariyeri içindeki mıknatısların boyutlarının optimizasyonu yapılacaktır.



Şekil 4.7. a) Model A: Yay şeklinde akı bariyeri, yay şeklinde mıknatıs; b) Model B: Yay şeklinde akı bariyeri, dikdörtgen şeklinde mıknatıs; c) Model C: Köşeli U şeklinde akı bariyeri, köşelerde dikdörtgen mıknatıs; d) Model D: Yuvarlak kenarlı U şeklinde akı bariyeri, yay şeklinde mıknatıs.

Literatürde DRSMR ile çalışılan 4 farklı akı bariyeri tipi Şekil 4.7’de verilmiştir. Bu modellere ait akı bariyeri ve mıknatıs tiplerine uygun olarak her bir model için bir, iki ve üç akı bariyeri olacak şekilde tasarlanmış ve performans değerleri kıyaslanmıştır. Dış rotorlu motorlarda rotor genişliği iç rotorlu motorlara göre daha sınırlı olduğu için dört akı bariyerli modellerde rotor çapı çok fazla büyüyeceği için üzerinde çalışılmamıştır. Bu üç farklı tipte rotor geometrisi ve akı

bariyeri sayısının motorun verimi, tork üretimi ve tork dalgalanması üzerine etkileri kıyaslanarak uygun olan model seçilmiştir. Bu seçim yapılırken Tablo 4.3'teki veriler ve motorların manyetik akı dağılımları etkili olmuştur.

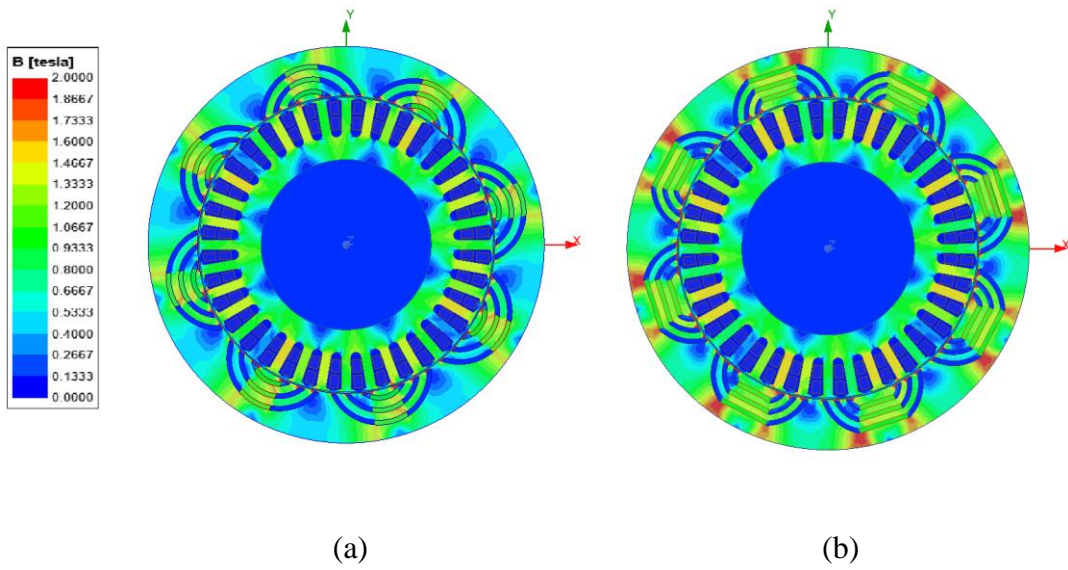
Tablo 4.3: Akı bariyeri tipi ve sayısına mollarin verim ve tork dalgalanmaları.

Model	Akı Bariyeri Sayısı	Pi (W)	Po (W)	Verim (%)	Tork (Nm)	Tork Dalg. (Nm)	Tork Dalg. (%)	Akım (A)
A	1	1734	1518	87,55	19,33	2,21	11,43	8,92
	2	1686	1506	89,28	19,19	2,46	12,80	8,10
	3	1630	1510	92,59	19,22	2,56	13,31	6,41
B	1	1663	1494	89,88	19,06	3,18	16,70	7,76
	2	1626	1509	92,83	19,21	3,83	19,91	6,30
	3	1614	1515	93,85	19,28	4,14	21,47	5,71
C	1	1925	1528	79,38	19,45	3,02	15,51	12,36
	2	1711	1496	87,41	19,05	2,18	11,44	8,92
	3	1692	1495	88,35	19,04	2,20	11,57	8,49
D	1	1619	1518	93,74	19,32	3,87	20,02	5,70
	2	1709	1503	87,97	19,13	4,79	25,05	8,58
	3	1802	1502	83,34	19,12	6,57	34,34	10,55

Bu dört modele ait veriler Tablo 4.3'te incelendiğinde A, B ve C modelleri için akı bariyeri sayısı arttıkça motordan alınan verim değeri de artmaktadır. Tork dalgalanması değerlerinde bazı farklılıklar bulunmaktadır. Model D için ise akı bariyeri sayısı arttıkça verim değeri düşmekte ve tork dalgalanması değeri artmaktadır. D tipinde performans değerlerinin akı bariyeri sayısı ile bu kadar hızlı değişiminde en önemli etken kullanılan mıknatısın büyüklüğüdür. Yapılan analizler sonucunda bu modelde mıknatısın büyük olması halinde mıknatısın etrafındaki nüvenin akı yoğunluğu yüksek olmakta ve doyuma gitmektedir. Bu sebeple motorun verimi düşmekle beraber tork dalgalanmalarında da büyük artışlar olmaktadır. C modelinde ise tork dalgalanmaları makul seviyelerde olsa da diğer modellere kıyasla verim değerleri çok düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu durum mıknatıs yerleşiminin akı bariyerinin orta kısımlarda olması gerektiğini göstermektedir.

Verim ve tork dalgalanması değerlerine beraber bakıldığında A ve B modellerinin tasarımının daha uygun olduğu görülmektedir. Bu iki model birtakım analizlerle daha iyi seviyelere çıkabilecektir. Bu modellerde iyileştirmeler yapmadan önce bu iki modelin manyetik akı dağılımları incelenmesi gerekmektedir. Şekil 4.8'de A ve B modellerinin, motorun senkron hızda çalışırken sergilediği manyetik

akı yoğunlukları görülmektedir. A modelinde çekirdek sadece akı bariyerlerinin uç kısımlarında bulunan bölgelerde doyuma gitmiştir. Diğer bölgelerde manyetik akı yoğunlukları doyuma yakındır ancak çekirdek doyuma gitmemiştir. B modelinde ise akı bariyerlerinin uç kısımları ile bazı bölgelerde de çekirdek doyuma gitmektedir. En dıştaki mıknatısların uç kısımlarında manyetik akı yoğunlukları 2,25 Teslanın üzerinde değer almaktadır. Şekil 4.7’de verilen dört model bu özellikleriyle değerlendirildiğinde A modelinin 3 akı bariyerli tipinin tasarım hedeflerine en uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 4.8: Manyetik Akı dağılımları a) Model A b) Model B.

Manyetik akı dağılımları incelendiğinde akı bariyerleri düzgün birer çember yayı şeklinde olan A modeli seçilmiş ancak mıknatıs boyutları daha detaylı analizlerle optimize edilerek hem verim değerinde artış, hem de tork dalgalanmalarında düşüş elde edilebilmektedir. Performansında daha iyi sonuçlar elde etmek amacıyla mıknatısların yay açıları değiştirilerek analizler yapılmıştır. Analizler yapılırken verim ve tork dalgalanmasındaki değişimler dikkate alınarak 3 adet akı bariyerli modelin daha iyi performans göstereceği öngörülmektedir.

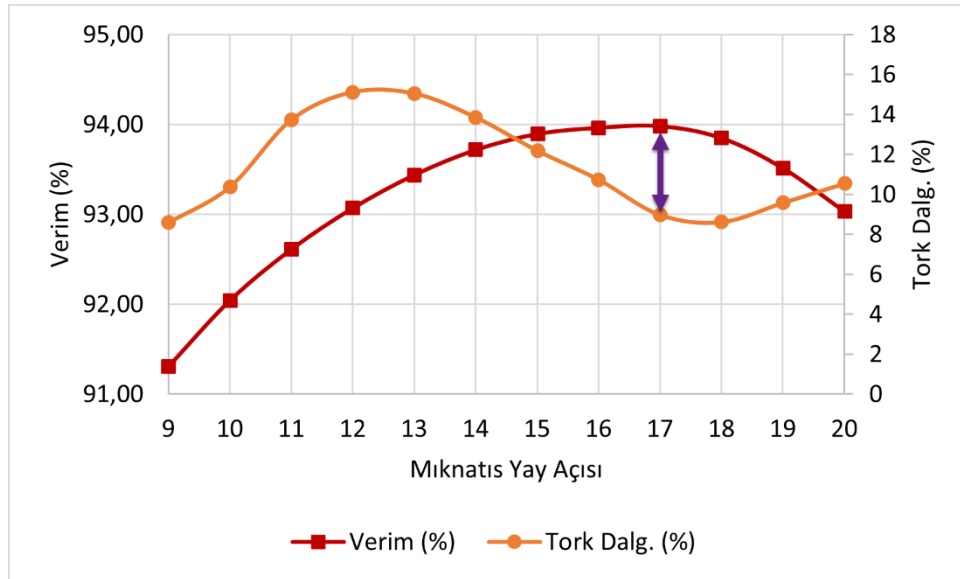
4.2.2 Mıknatıs Boyutlarının Analizi

Akı bariyeri modeli seçildikten sonra, üç akı bariyeri içindeki mıknatıslar da aynı açı ile boyutlandırılmış ve mıknatıs boyutunun performansa etkileri

gözlenmiştir. Tablo 4.4'te bu kriterlere göre motorun verimi ve tork dalgalanmaları görülmektedir. Bu aşamada en uygun tasarım, performans çıktılarında yüksek verim ve düşük tork dalgalanmasının en uygun olduğu değer tespit edilerek yapılmıştır.

Tablo 4.4: Mıknatısların yay açısına göre motorun performansı.

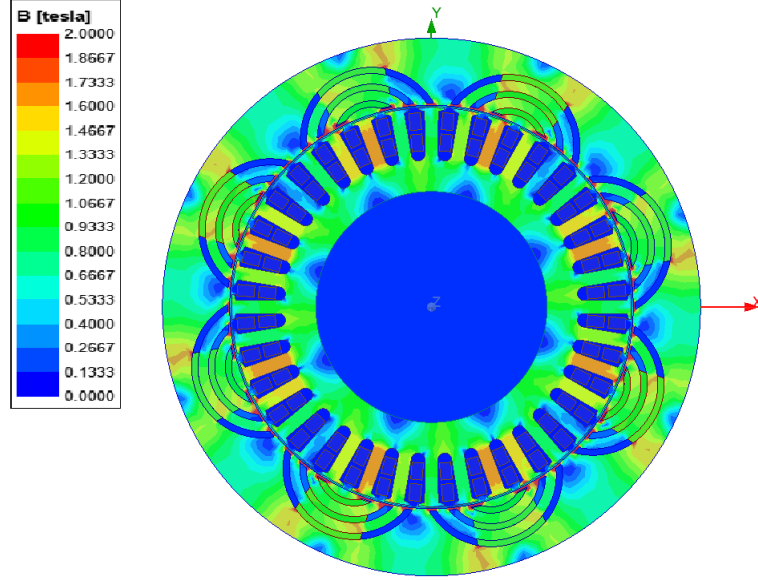
MYA	Po (W)	Verim (%)	Tork (Nm)	Tork Dalg. (%)	Akım (A)
9	1503	91,31	19,13	8,59	5,48
10	1501	92,04	19,11	10,38	5,51
11	1503	92,61	19,13	13,73	5,58
12	1500	93,07	19,10	15,11	5,49
13	1499	93,44	19,09	15,04	5,56
14	1501	93,72	19,11	13,85	5,66
15	1501	93,89	19,11	12,19	5,52
16	1504	93,96	19,15	10,74	5,58
17	1501	93,98	19,11	8,98	5,66
18	1501	93,85	19,12	8,62	5,55
19	1501	93,51	19,11	9,58	5,64
20	1499	93,03	19,09	10,54	5,77



Şekil 4.9: Tip A mıknatıslı ve 3 akı bariyerli modelin verim ve tork dalgalanmalarının değişimi.

Şekil 4.9'da görüldüğü üzere verim ile tork dalgalanmalarının arasındaki farkın en fazla olduğu kısım olarak yay açısının 17° olduğu tasarımdır. Bu tasarımda ilk modele göre verimde yaklaşık %1,39 büyüklüğünde bir artış olmuştur. Ayrıca bu iyileştirme tork dalgalanmasında daha dikkat çekici bir seviyededir. Tork dalgalılığı ilk modelde %13,31 seviyelerindeyken son tasarımda %8,98 seviyelerine kadar

düşmüştür. Verim ve tork dalgalanmalarındaki değişimin karakteristiğini gözlemlemek için Şekil 4.9 incelendiğinde verim değerinde grafiğin bir tepe noktası bulunurken tork dalgalanmasında birden fazla tepe noktasının olduğu görülmektedir. Bunun sebebi her bir akı bariyeri içindeki mıknatısın motorun performansına etkisinin aynı oranda olmamasıyla ilgilidir.



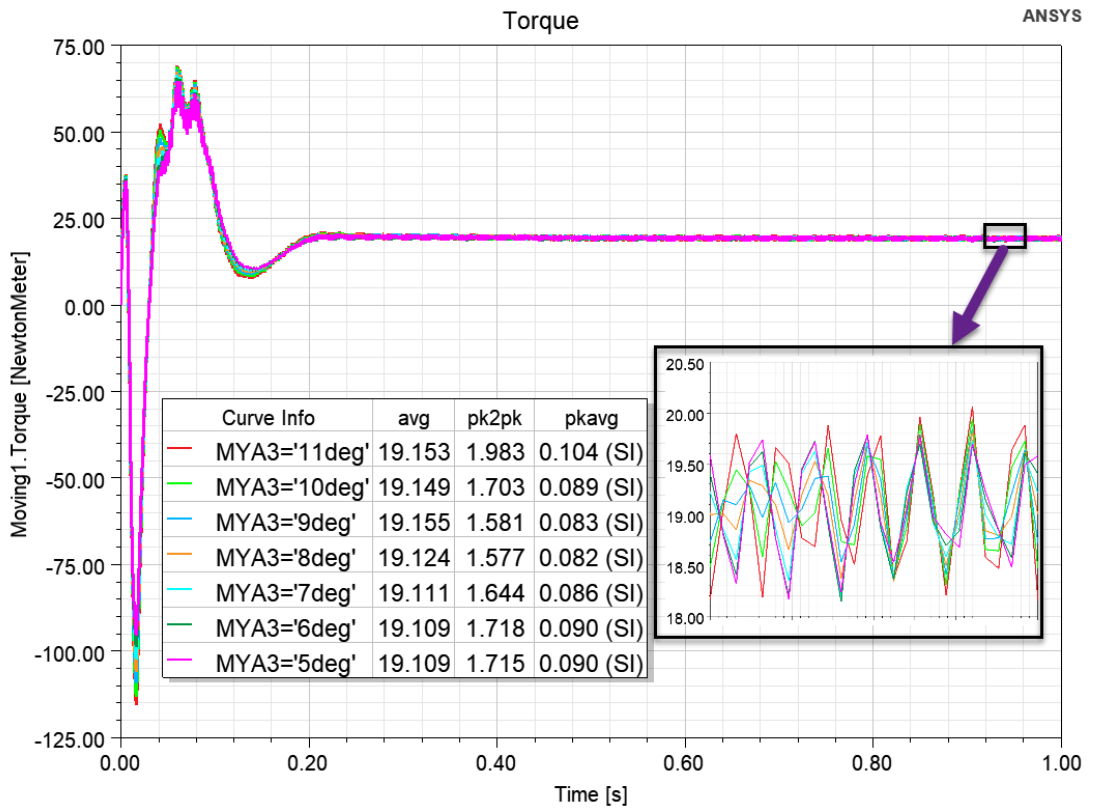
Şekil 4.10: Mıknatıs yay açısı 17 olan modelin manyetik akı dağılımı.

Mıknatıs yay açısı 17° olan modelin manyetik akı dağılımı incelendiğinde motorun çekirdeğinin doyuma gitmediği, akı bariyerlerinin uç bölgeleri dışında kalan bölgelerin akı yoğunluklarının 1,7 tesladan düşük olduğu görülmektedir (Şekil 4.10). Mıknatısların akı bariyerleri içindeki yay açılarının değiştirilerek analiz edilmesi, mıknatısların performansa etkilerini optimum düzeye gelmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

4.2.3 Mıknatıs Boyutlarının Parametrik Analizi

Rotorun mıknatıs tasarımında her bir akı bariyerindeki mıknatısın boyutlarının motor performansına ayrı ayrı etkileri olmaktadır. Bu sebeple bir rotor kutbu içindeki üç mıknatısın da boyutları birbirinden farklı olacak şekilde değiştirilerek optimizasyon yapılmıştır. Burada mıknatısların uç bölgeleri daha önceki tasarım aşamaları ile benzer şekilde tasarlanmıştır. Boyut farkını oluşturan

temel parametre ise mıknatısların motor merkezi ile yaptıkları açı büyüklüğüdür. Her bir oluk içindeki mıknatısın yay boyunun hangi parametreleri nasıl etkilediği aşağıdaki tablolarda kıyaslamalı olarak verilmiştir. Aşağıdaki grafiklerde MYA 3'ün 5° ile 11° aralığında; MYA 2'nin 9° ile 21° aralığında; MYA 1'in ise 9° ile 23° aralığında olması durumlarında motorun veriminin ve tork dalgalanmalarının yüzdesel büyüklüğü gösterilmiştir. Bu çalışmada tasarlanacak motorun seçiminde verimin yüksek ve tork dalgalanmasının düşük seviyelerde olmasına dikkat edilecektir. Tasarım hedeflerine ulaşmak adına bu grafikler ayrı ayrı değerlendirilecektir.



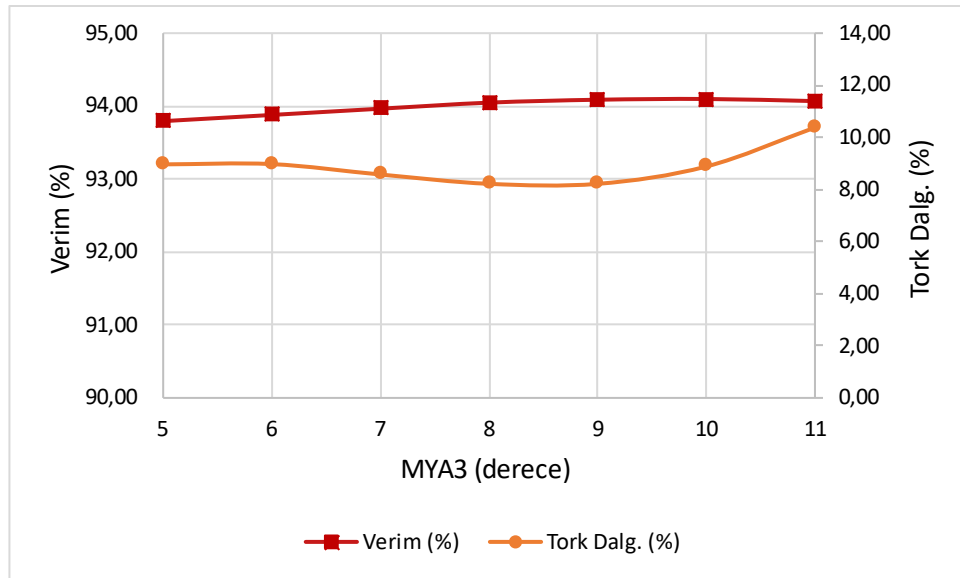
Şekil 4.11: MYA1 ve MYA2 sabit iken MYA3'ün değişiminde tork grafiği.

Şekil 4.11'de MYA1 ve MYA2 değerleri sabit tutularak MYA3'ün 5° ile 11° aralığındaki değerleri için tork grafiği verilmiştir. Bu grafikte motorun nominal yükte yüklendiği durumlarda ürettiği tork değeri, tork dalgalılığının Nm olarak büyüklüğü ve oransal büyüklüğü görülmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre MYA3'ün 8° olduğu varyasyon tork dalgalılığının en düşük olduğu tasarımdır. Bu tasarımda tork dalgalılığı %8,25 olarak hesaplanmaktadır.

Tablo 4.5: Motor performansının mıknatıs açısı 3 ile değişimi.

MYA1	MYA2	MYA3	Verim (%)	Tork (Nm)	Tork Dalg. (%)	Akım (A)
17	17	5	93,80	19,11	8,98	5,71
17	17	6	93,88	19,11	8,99	5,67
17	17	7	93,97	19,11	8,60	5,62
17	17	8	94,05	19,12	8,25	5,57
17	17	9	94,08	19,16	8,25	5,54
17	17	10	94,09	19,15	8,90	5,52
17	17	11	94,07	19,15	10,36	5,52

Motor performansını inceleyebilmek için tork dalgalılığının yanında motor verimini de değerlendirmek gerekmektedir. Tablo 4.5'te motorun verimi, torku, yüzdesel tork dalgalanması ve akımı verilmiştir. Tork dalgalanması MYA3'ün 8° ve 9° olduğu modellerde en iyi değerler almaktadır. Verim değerinde ise en iyi değer olarak MYA3'ün 10° olduğu değer görülse de bu varyasyonun tork dalgalanması diğerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Verim ve tork dalgalanması değerlerine göre kıyaslandığında en iyi modelin MYA3'ün 9° olduğu model olduğu görülmektedir.

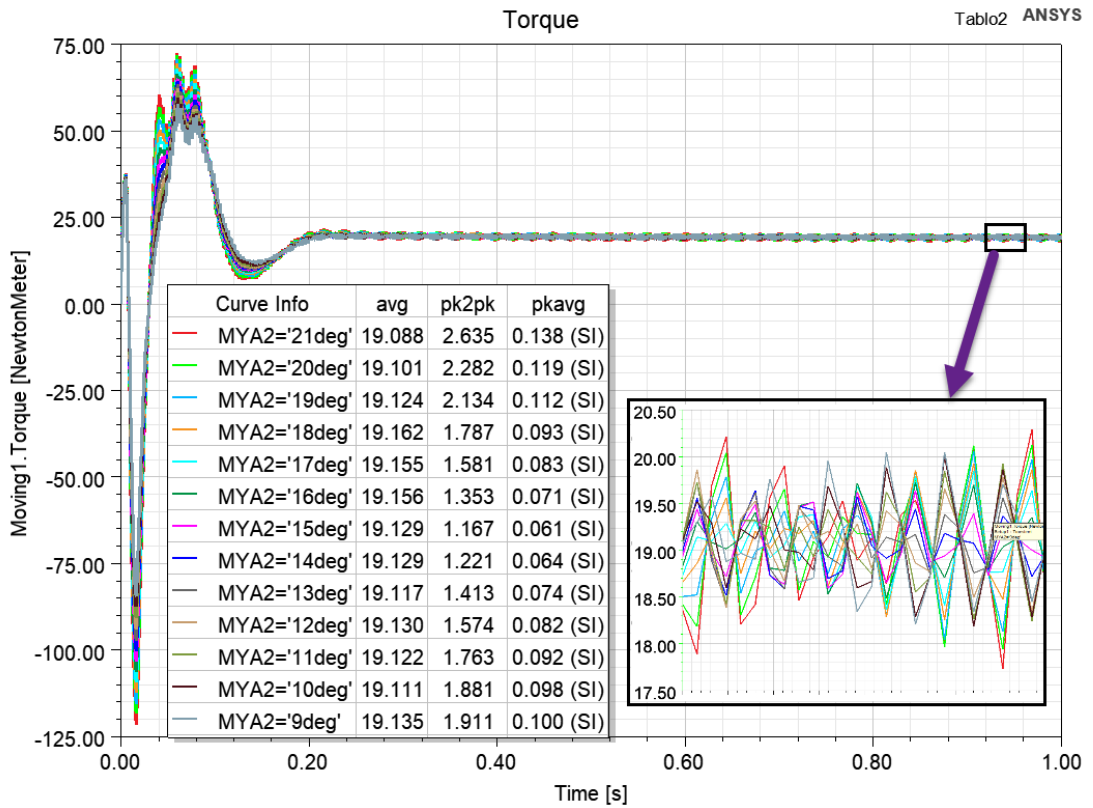


Şekil 4.12: MYA1 ve MYA2 sabit iken MYA3'ün değişiminde verim ve tork dalgalanması.

Mıknatısların üçünün de yay açılarının aynı olduğu analizde en iyi sonuç mıknatıs yay açılarının 17° olduğu modelde elde edilmiştir. Bu aşamada MYA1 ve MYA2'nin 17° olacak şekilde sabit tutularak analiz yapıldığında MYA3'ün değişiminin verim ve tork dalgalanması üzerine etkisi Şekil 4.12'de görülmektedir.

En yüksek verim ve en düşük değerinin optimum noktası olarak MYA3'ün 9° olduğu modelin daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

Diğer mıknatısların performans etiklerini görmek için sırasıyla diğer mıknatısların değişimi de incelenmelidir. Tablo 4.13'te MYA1'in 9°, MYA3'ün 17° olması durumunda motorun verim ve yüzdesel tork dalgalanmalarının değişimleri verilmiştir. Bu verilerin daha iyi kıyaslanabilmesi için değişimler Tablo 4.6'da ve grafik halinde Şekil 4.14'te verilmiştir.



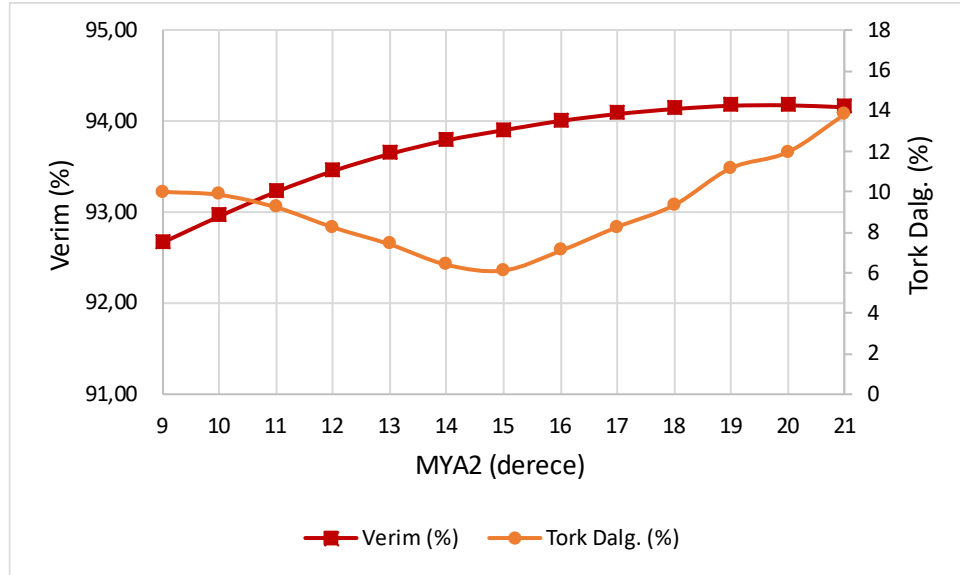
Şekil 4.13: MYA1 ve MYA3 sabit iken MYA2'nin değişiminde tork grafiği.

Şekil 4.13'te MYA1 ve MYA3 değerleri sabit tutularak MYA2'nin 9° ile 21° aralığındaki değerleri için tork grafiği verilmiştir. Bu grafikte motorun nominal yükte ürettiği tork değeri, tork dalgalılığının Nm olarak büyüklüğü ve oransal büyüklüğü görülmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre MYA3'ün 15° olduğu varyasyon tork dalgalılığının en düşük olduğu tasarımıdır. Bu tasarımda tork dalgalılığı %6,10 olarak hesaplanmaktadır. Motorun performansını değerlendirebilmek için tork dalgalılığının yanında verimini de incelemek gerekmektedir.

Tablo 4.6: Motor performansının mıknatıs açısı 2 ile değişimi.

MYA1	MYA2	MYA3	Verim (%)	Tork (Nm)	Tork Dalg. (%)	Akım (A)
17	9	9	92,67	19,14	9,99	6,39
17	10	9	92,96	19,11	9,84	6,22
17	11	9	93,23	19,12	9,22	6,07
17	12	9	93,46	19,13	8,23	5,94
17	13	9	93,64	19,12	7,39	5,83
17	14	9	93,79	19,13	6,38	5,74
17	15	9	93,91	19,13	6,10	5,66
17	16	9	94,01	19,16	7,07	5,60
17	17	9	94,08	19,16	8,25	5,54
17	18	9	94,14	19,16	9,33	5,50
17	19	9	94,18	19,12	11,16	5,46
17	20	9	94,18	19,10	11,95	5,44
17	21	9	94,16	19,09	13,81	5,44

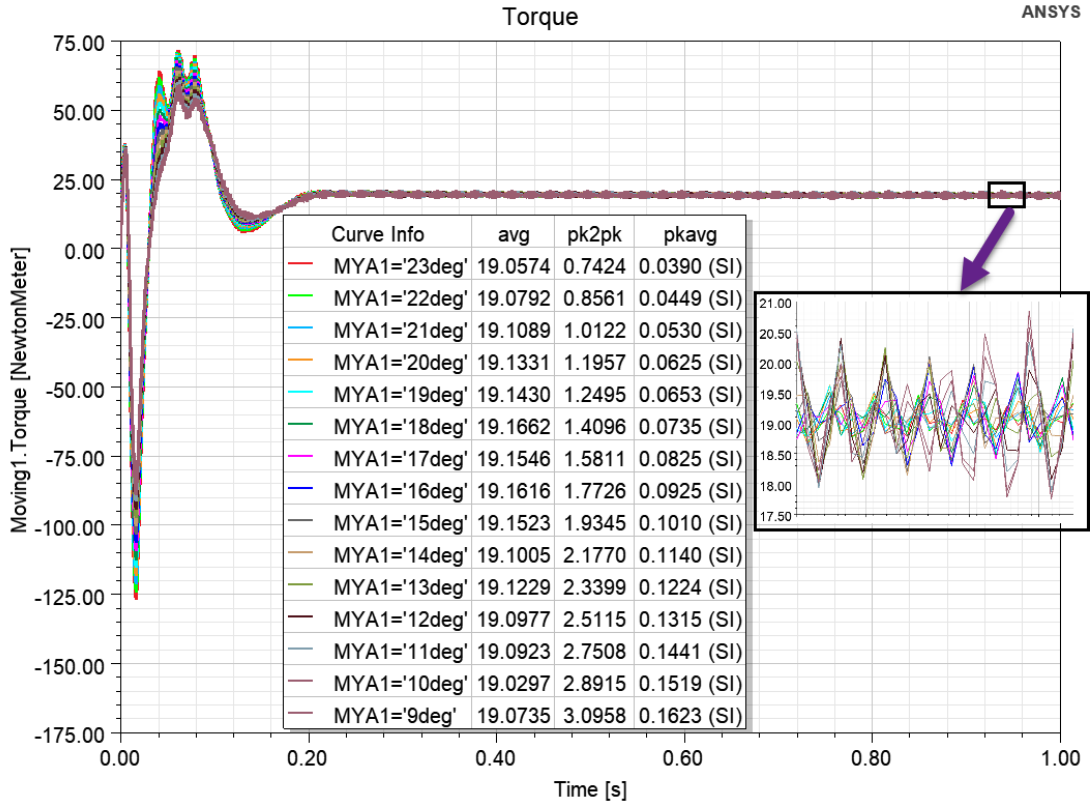
Tablo 4.6’da MYA1 ve MYA3 değerleri sabit, MYA2 değeri 9° ile 21° arasında değişirken motorun verim, tork, yüzdesel tork dalgalanması ve akım değerleri verilmiştir. Tork dalgalanması MYA2’nin 15° olduğu modelde en iyi değerler almaktadır. Verim değeri ise MYA3’ün 19° ve 20° olduğu değerlerde en yüksek olsa da bu varyasyonlarda tork dalgalanması oldukça artmaktadır.



Şekil 4.14: MYA1 ve MYA3 sabit iken MYA2’nin değişiminde verim ve tork dalgalanması.

Şekil 4.14’te Tablo 4.6’da elde edilen değerlere göre hazırlanan grafik verilmiştir. Bu grafikte MYA2 arttıkça motorun verimi de bir tepe noktasına kadar

artmaktadır ancak yüzdesel tork dalgalanması miktarı da bir en düşük değerden sonra hızla artmaktadır. Bu grafikte verim ile yüzdesel tork dalgalanması arasındaki fark MYA2'nin 15°, 16° ve 17° olduğu varyasyonlarda daha yüksektir. Tasarım kriterlerine en uygun motor için mıknatıs açısı l'in değişiminin de performansa etkilerinin incelenmesi gerekmektedir.



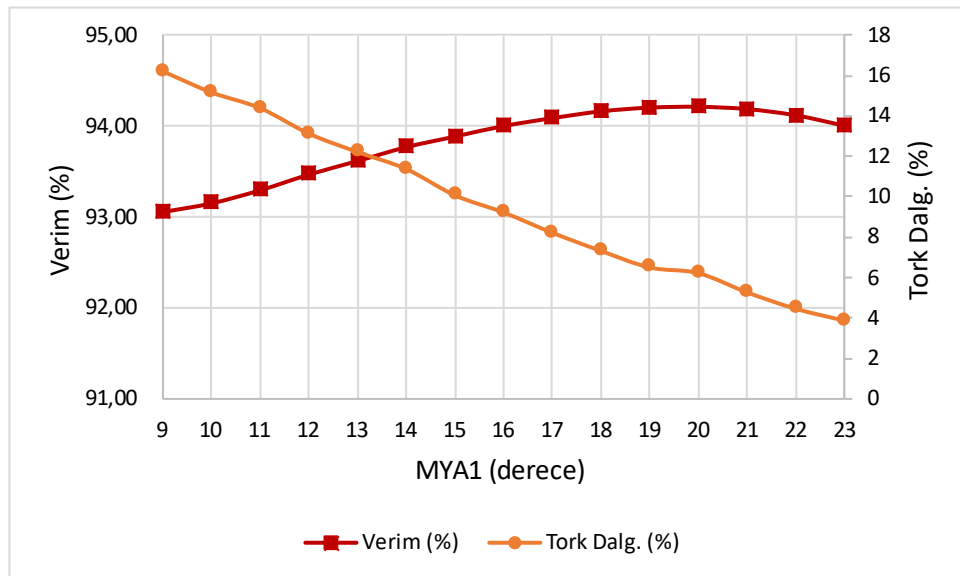
Şekil 4.15: MYA2 ve MYA3 sabit iken MYA1'in değişiminde tork grafiği.

MYA2 ve MYA3 değerleri sabit tutularak MYA2'nin 9° ile 23° aralığındaki değerleri için tork grafiği Şekil 4.15'te verilmiştir. Bu grafikte motorun nominal yükte ürettiği tork değeri, tork dalgalılığının Nm olarak büyüklüğü ve oransal büyüklüğü görülmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre MYA1'in 23° olduğu varyasyon tork dalgalılığının en düşük olduğu tasarımdır. Bu tasarımda tork dalgalılığının %3,90 olduğu görülmektedir. Motorun performansı açısından tork dalgalanmasının yanında verim değerini de incelemek gerekir. Mıknatıs yay açlarına göre verim, tork, tork dalgalanması ve akım değerleri Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7: Motor performansının miknatıs açısı 1 ile değişimi.

MYA1	MYA2	MYA3	Verim (%)	Tork (Nm)	Tork Dalg. (%)	Akım (A)
9	17	9	93,06	19,07	16,23	6,11
10	17	9	93,16	19,03	15,19	6,05
11	17	9	93,30	19,09	14,41	5,98
12	17	9	93,47	19,10	13,15	5,89
13	17	9	93,62	19,12	12,24	5,81
14	17	9	93,77	19,10	11,40	5,72
15	17	9	93,88	19,15	10,10	5,66
16	17	9	94,00	19,16	9,25	5,60
17	17	9	94,08	19,16	8,25	5,54
18	17	9	94,16	19,17	7,35	5,50
19	17	9	94,20	19,14	6,53	5,47
20	17	9	94,21	19,13	6,25	5,46
21	17	9	94,18	19,11	5,30	5,47
22	17	9	94,12	19,08	4,49	5,50
23	17	9	94,00	19,06	3,90	5,56

Tablo 4.7’de MYA2 ve MYA3 değerleri sabit tutulup, MYA1 değeri 9° ile 23° arasında değişirken motorun verim, tork, yüzdesel tork dalgalanması ve akım değerleri verilmiştir. Tork dalgalanması MYA1’in 23° olduğu modelde en iyi değeri alarak %3,90 olmaktadır. Verim değeri ise MYA1’in 20° olduğu değerde en yüksek değeri almaktadır. Verim ve tork dalgalanması açısından değerlendirildiğinde MYA1’in yüksek olduğu varyasyonlar daha iyi sonuç göstermektedir.



Şekil 4.16: MYA2 ve MYA3 sabit iken MYA1’in değişiminde verim ve tork dalgalanması.

Şekil 4.16’da Tablo 4.7’de elde edilen değerlere göre hazırlanan grafik verilmiştir. Bu grafikte MYA1’in 20° olduğu açı değerinde verimin en yüksek değerde olduğu görülmektedir. Tork dalgalanması ise analiz yapılan varyasyonlarda MYA1’in artmasıyla düşüş göstermektedir. Verim ve tork dalgalanması açısından kıyaslandığında bu iki değer arasındaki farkın yüksek olduğu tasarımlar tasarım hedeflerine daha uygun sonuçlar vermektedir.

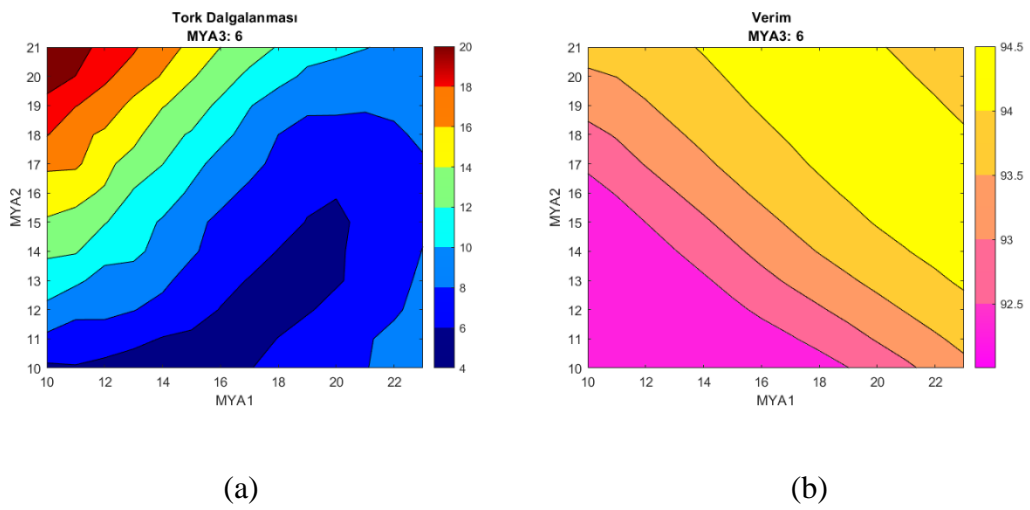
Mıknatıs yay açalarına dair analizler incelendiğinde verime etkisi en yüksek mıknatısın 2 numaralı mıknatıs olduğu görülmektedir. Diğer mıknatısların büyüklüğüne de bağlı olarak 2 numaralı mıknatısın büyük olduğu modellerde motor verimi oldukça yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Her ne kadar verim değeri hedeflenen seviyelerde olsa da tork dalgalılığı da yüksek seviyelerde olmaktadır. Tork dalgalılığının düşük seviyelerde olması için ise Şekil 4.16’da görüleceği üzere 1 numaralı mıknatıs yay açısının büyük olması gerekmektedir. Bu bilgiler dahilinde 1 numaralı mıknatısın yay açısını büyük seçerken 2 ve 3 nolu mıknatısların boyutlarının optimizasyonunun yapılması gerekmektedir.

Tablo 4.8: Tüm mıknatısların optimizasyonu ile elde edilen en iyi sonuçlar.

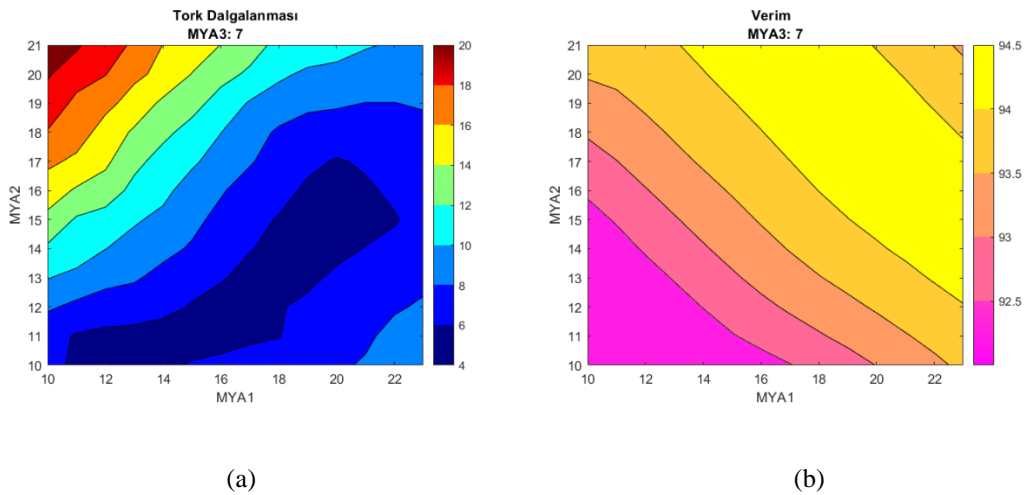
MYA1	MYA2	MYA3	Verim (%)	Tork (Nm)	Tork Dalg. (%)	Akım (A)
22	15	8	94,23	19,15	5,84	5,45
22	15	9	94,22	19,12	5,80	5,45
22	16	8	94,24	19,12	5,03	5,44
22	16	9	94,18	19,12	4,34	5,47
22	17	8	94,19	19,12	5,25	5,47
22	17	9	94,11	19,08	4,49	5,50
22	18	8	94,10	19,12	5,46	5,51
22	18	9	93,99	19,08	5,31	5,57
23	15	8	94,24	19,12	6,51	5,44
23	15	9	94,20	19,12	6,07	5,46
23	16	8	94,20	19,13	5,66	5,46
23	16	9	94,12	19,12	5,07	5,51
23	17	8	94,11	19,08	5,23	5,50
23	17	9	94,00	19,06	3,90	5,56
23	18	8	93,97	19,11	5,37	5,59
23	18	9	93,84	19,05	4,43	5,66

Şekil 4.12’den 3 numaralı mıknatısın yay açısının 9°, Şekil 4.14’ten 2 numaralı mıknatısın yay açısının 17°, Şekil 4.16’dan ise 3 numaralı yay açısının 23°

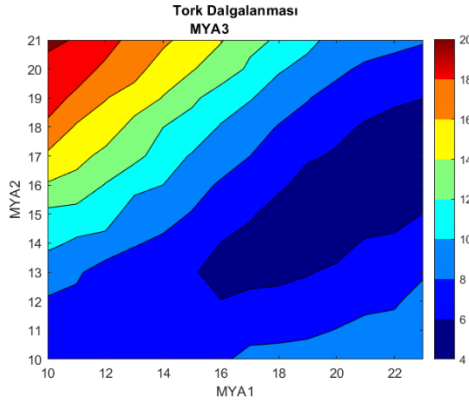
olması gerektiği görülmektedir. Ancak mıknatıs yay açılarının birlikte değişiminin performansa etkilerini daha net olarak görebilmek bu mıknatıs yay açıları dışında kalan varyasyonlar için performansın yüksek çıktığı diğer tasarımları da incelemek gerekir. Tablo 4.8’de MYA1’in 22° ve 23° , MYA2’nin 15° ile 18° arasındaki değerlerde, MYA3’ün ise 8° ile 10° arasındaki değerlerde olduğu tasarımlarda yapılan simülasyon sonuçları verilmiştir. Bu tabloya göre mıknatıs yay açılarının sırasıyla 23° , 17° , 9° olması durumunda verim ve tork dalgalanması değerleri diğer tasarımlara göre daha iyi sonuç vermektedir. Tüm varyasyonları kıyaslayabilmek için Şekil 4.17 ile Şekil 4.22 arasındaki grafikler verilmiştir.



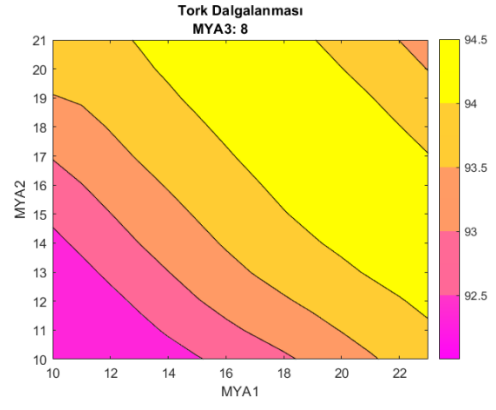
Şekil 4.17: MYA 6° olduğunda a) tork dalgalanması, b) verim.



Şekil 4.18: MYA 7° olduğunda a) tork dalgalanması, b) verim.

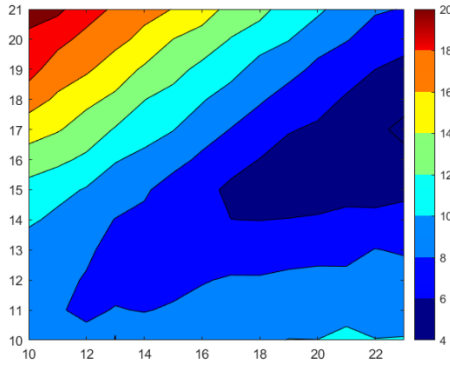


(a)

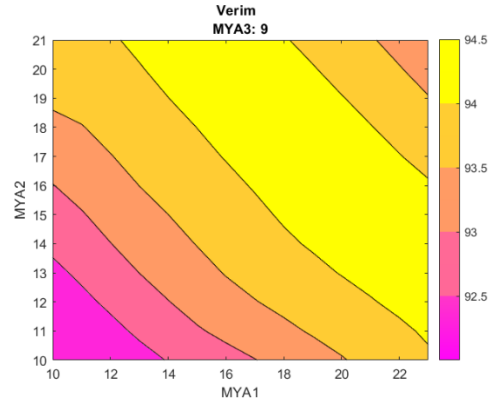


(b)

Şekil 4.19: MYA 8° olduğunda a) tork dalgalanması, b) verim.

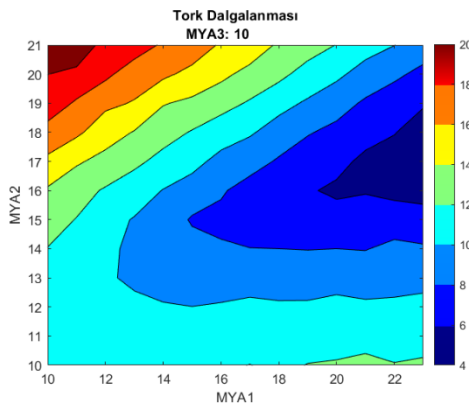


(a)

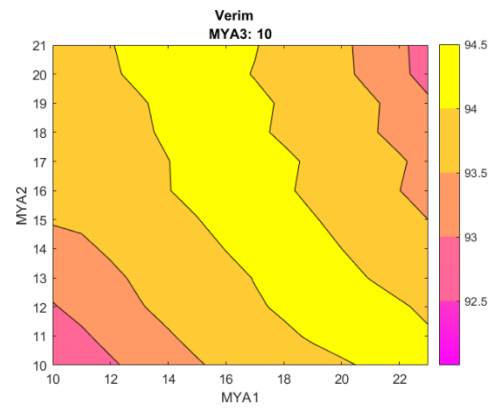


(b)

Şekil 4.20: MYA 9° olduğunda a) tork dalgalanması, b) verim.

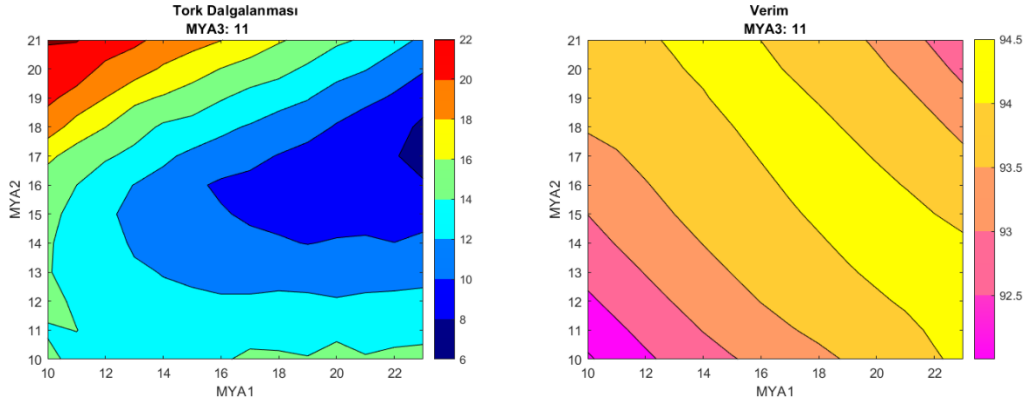


(a)



(b)

Şekil 4.21: MYA 10° olduğunda a) tork dalgalanması, b) verim.



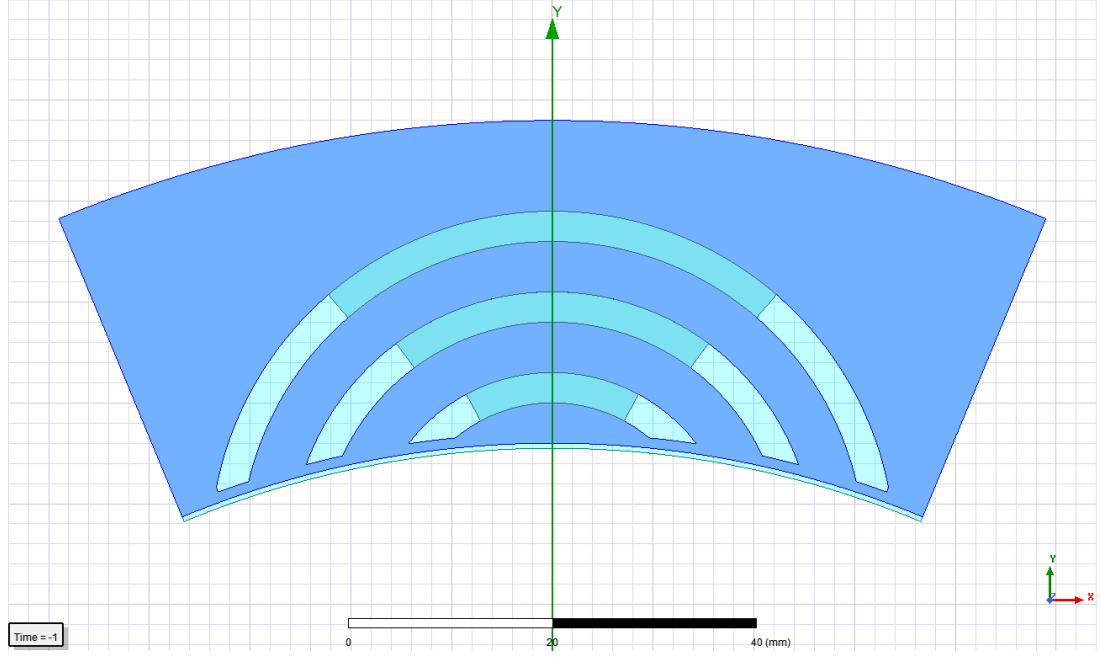
(a) (b)
Şekil 4.22: MYA 11° olduğunda a) tork dalgalanması, b) verim.

Çeşitli mıknaş yay açıları için yapılan parametrik analizler sonucunda tork dalgalanması ve verim değerine ait Şekil 4.17'den Şekil 4.22'ye kadar olan grafikler elde edilmiştir. Bu şekillerde tork dalgalanması ve verim değerlerinin mıknaş yay açılarının değişimine göre dağılımı gösterilmektedir. Yatay eksenler MYA1 değerlerini, dikey eksenler MYA2 değerlerini ifade etmektedir. Tork dalgalanmalarının olabildiğince düşük olması hedeflendiğinden grafiklerde tork dalgalanmasının en düşük olduğu, lacivert renk ile gösterilen bölgeler tasarım hedefine uygun olabilecek bölgelerdir. Verim grafiklerinde ise en yüksek değerler sarı renk ile gösterilmiştir ve bu bölgeler tasarım hedeflerine daha yakın sonuçlar vermektedir.

Tork dalgalanmalarının MYA1 değerinin küçük olduğu değerlerde düşük olduğu gözlenirken, yüksek verim değerleri daha geniş bir bantta değişim göstermektedir. Verim değerleri MYA1 ve MYA2 değerleri aynı anda çok düşük veya çok yüksek olduğu durumlarda düşüş gösterirken şekillerde sarı renk ile gösterilen bölgelerde %94 seviyesinin üstünde çıkmaktadır. Seçilecek modelin hem düşük tork dalgalanması hem de yüksek verim değerleri sunması istendiğinden MYA1'in yüksek seçilirken MYA2'nin 15°-17° olduğu varyasyonlar ön plana çıkmaktadır. MYA3'ün 6° ve 7° olduğu durumlar bu genellemenin dışında kalmaktadır.

Mıknaş yay açılarını belirleyebilmek için yukarıdaki grafiklerde ön plana çıkan varyasyonların tork dalgalanması ve verim değerleri Tablo 4.8 ile birlikte

değerlendirmek gerekmektedir. Analiz sonuçlarına göre mıknatıs yay açılarının sırasıyla 23°, 17° ve 9° olduğu tasarımda %94,00 verim ve %3,90 tork dalgalanması ile en iyi sonuca ulaşılmıştır.



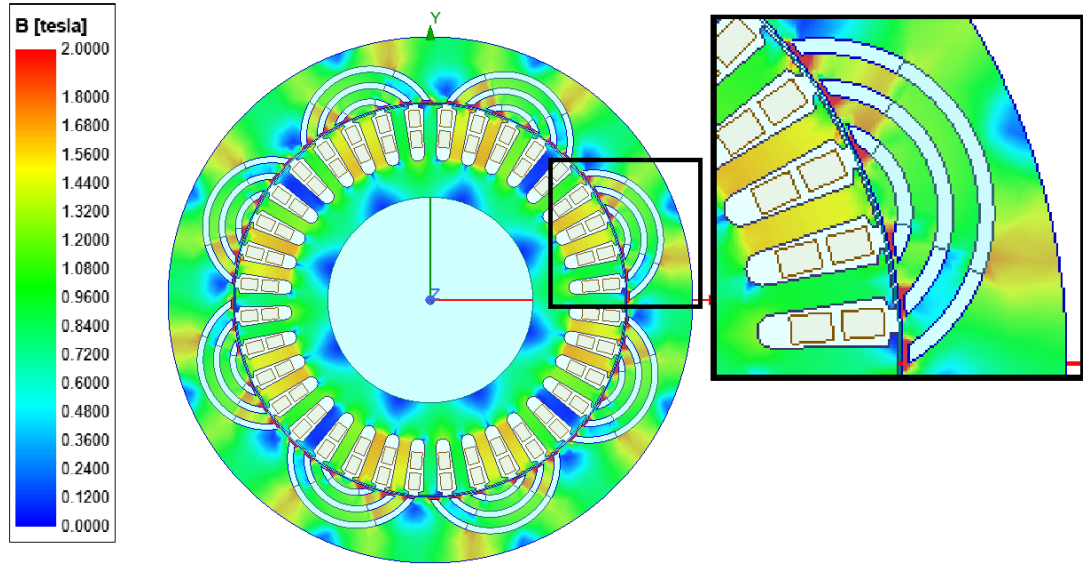
Şekil 4.23: Uçları düzleştirilmiş mıknatıslarla tasarlanmış rotorun bir kutbu.

Seçilen tasarıma ait modelin mıknatıslarının uç kısımlarındaki sivri bölgeler daha düz bir yapıda tekrar modellenmiştir (Şekil 4.23). Bu işlemin motorun performansına önemli bir etkisi olmasa da üretim kolaylığı ve sağlamlığı açısından bir faydası olmaktadır. Ayrıca mıknatısların rotora yapıştırılması ve sabitlenmesi işlemlerinde ince ve sivri uçlar sebebiyle mıknatıslarda kırılmalar meydana gelmektedir. Bu modelle birlikte motorun verim ve tork performansı açısından analizleri tamamlanmıştır.

4.3 Tasarlanan Motorun Simülasyon Sonuçları

Tez çalışmasının bu bölümünde tasarlanan motorun simülasyon sonuçları incelenecektir. Önceki bölümlerde performans değerleri sayısal büyüklüklerle verilmişti ancak motorun tasarım kriterleri ile çalışma şartlarının uyumlu olduğunun daha sağlıklı bir şekilde kontrol edilebilmesi için manyetik akı yoğunluğu,

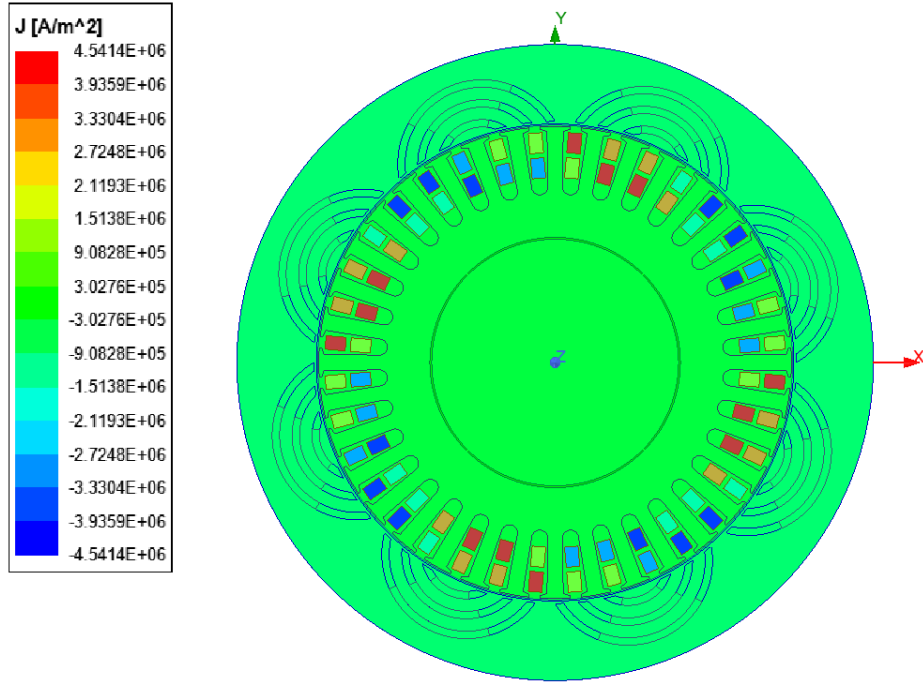
endüklenen gerilim gibi değerlerin sayısal büyüklüklerinin yanında dağılımının ve dalga şeklinin de incelenmesi gerekmektedir.



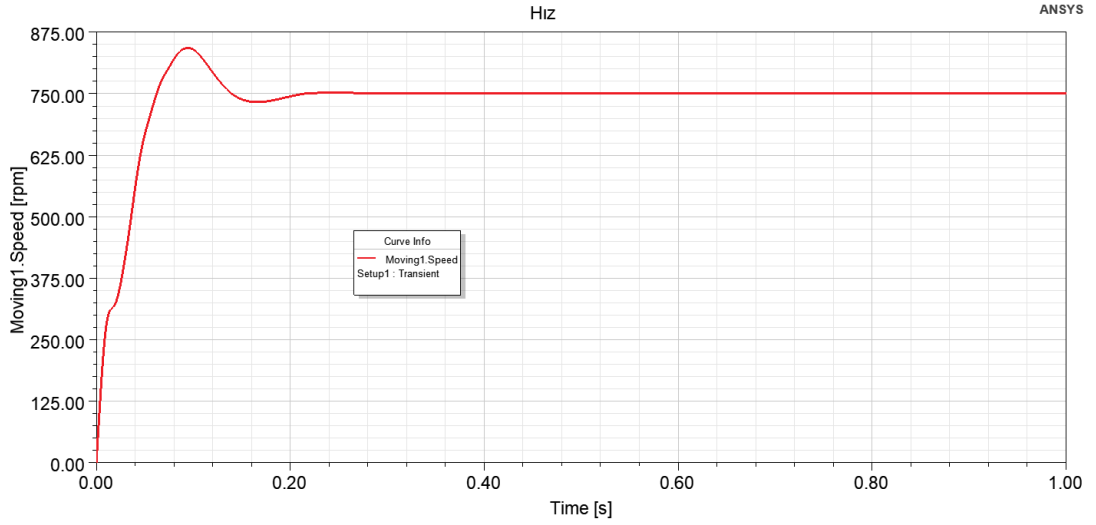
Şekil 4.24: Önerilen motorun ortalama manyetik akı yoğunlukları.

Şekil 4.24'te motorun üzerindeki manyetik akı yoğunlukları verilmiştir. Motor çekirdeğinin doyuma gitmemesi için akı yoğunluklarının 1,7 Tesla'nın altında olmasına dikkat edilmiştir. Bu durumun bir istisnası olarak akı bariyerlerinin hava aralığına en yakın olduğu bölgelerdir. Kiriş adı verilen bu bölgelerde akı yoğunlukları doyuma gidecek kadar yüksek olmaktadır. Ancak akı bariyerleri arasında kalan akı yolları doyuma giden bu küçük bölgelerden olumsuz etkilenmemiştir. Motorda farklı noktalar incelendiğinde ortalama akı yoğunluklarının uygun olduğu görülmektedir.

Şekil 4.25'te sargılardaki akım yoğunlukları görülmektedir. Akım yoğunluklarının çok yüksek seviyelerde olması sargıların fazla ısınmasına sebep olacağı için sınırlandırılması gerekir. Tasarım aşamasında akım yoğunluğunun azami değerinin 4-6 A/mm² değeri arasında kalmasına dikkat edilmiştir. Bu sebeple sargılarda akım yoğunluğunun en yüksek olduğu değer yaklaşık 4,55 A/mm² değerinde olacak şekilde sargı tasarımı yapılmıştır.



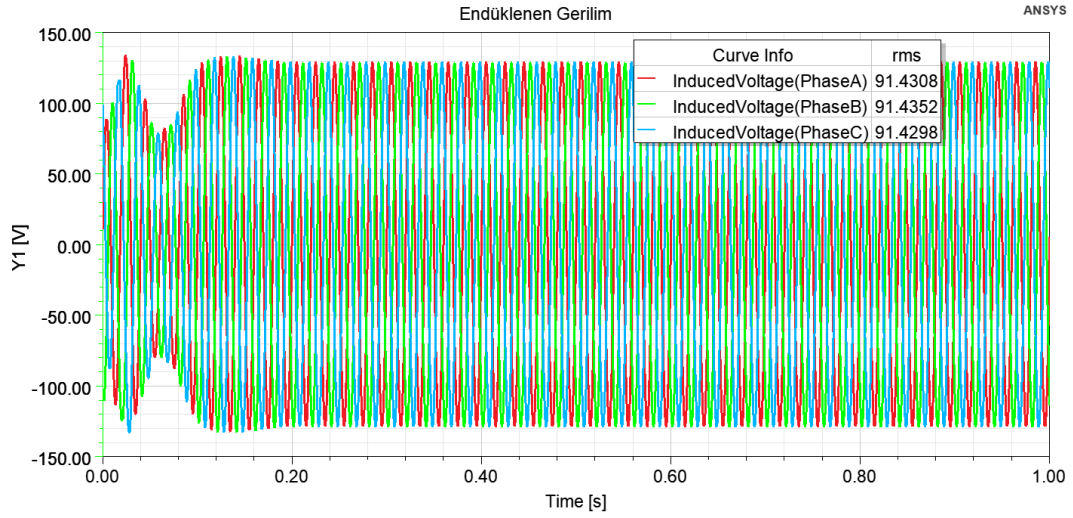
Şekil 4.25: Önerilen motorun akım yoğunlukları.



Şekil 4.26: Hız – zaman grafiği.

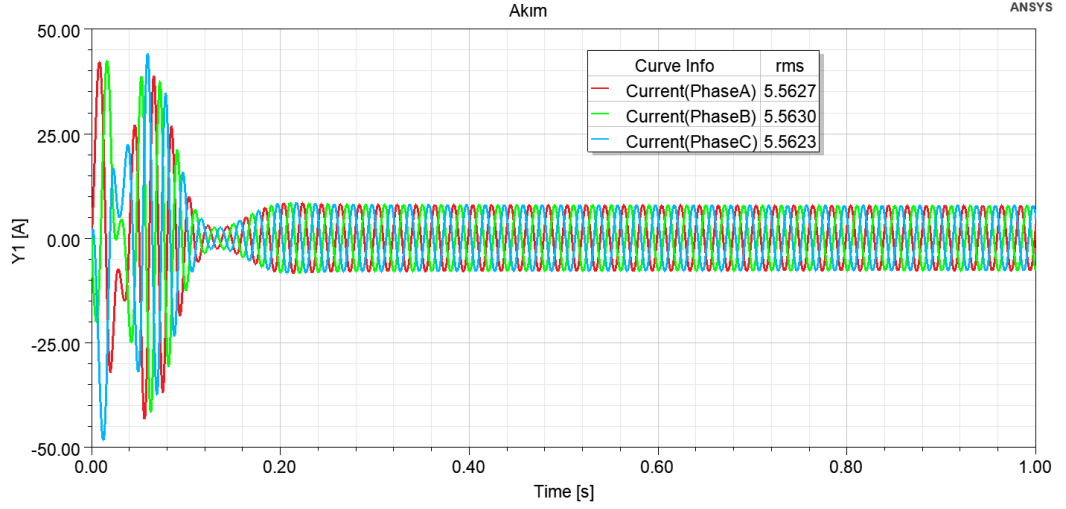
Motorun sargılarını akım taşıma kapasitesi açısından çekirdeğini ise manyetik akı açısından inceledikten sonra motorun hareketi ile ilgili simülasyon grafikleri incelenmektedir. Şekil 4.26’da motorun Hız-Zaman grafiğinde motor yol alırken dalgalı bir grafik sergiledikten sonra senkron hıza ulaşmaktadır. Tasarım kriterlerinde de verildiği üzere 50 Hz frekanslı anma geriliminde motor 750

devir/dakika hıza ulaşmaktadır. Motor yol alma süreci ile senkron hıza yaklaşık 230 ms'de ulaşmaktadır.



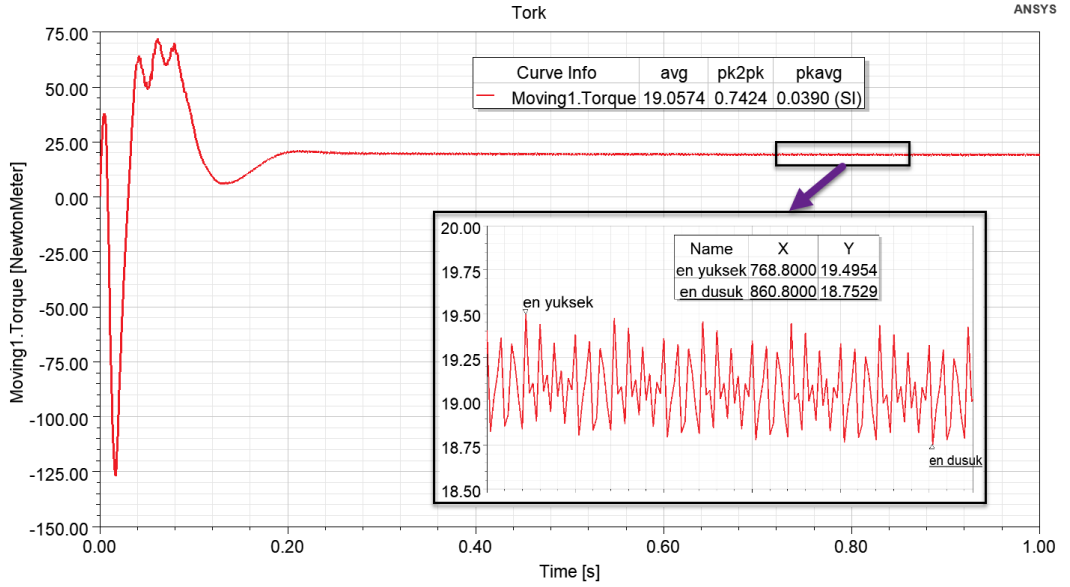
Şekil 4.27: Endüklenen gerilim – zaman grafiği.

Endüklenen gerilim grafiğinde motorun senkron çalışma bölgesindeki gelim dalga şekli ve büyüklüğü görülmektedir (Şekil 4.27). Endüklenen gerilimin dalga şeklinin düzgün bir sinüs formuna yakın olduğu görülmektedir. Dalga şeklinin bu formda olmasında harmonik bileşenlerin büyüklüklerinin düşük olmasının büyük etkisi bulunmaktadır. Sargı tasarımının optimize edilmesiyle endüklenen gerilim, akım, hava aralığı akısı ve tork dalgalılığında iyileşmeler gerçekleşmiştir. Tasarlanan motorun sargı uçlarına faz-nötr gerilimi 96 volt olacak bir gerilim uygulanırken endüklenen gerilim yaklaşık 91,43 V olarak okunmaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre sargılar üzerinde 4,57 V değerinde bir gerilim düşümü olmaktadır.



Şekil 4.28: Akım – zaman grafiği.

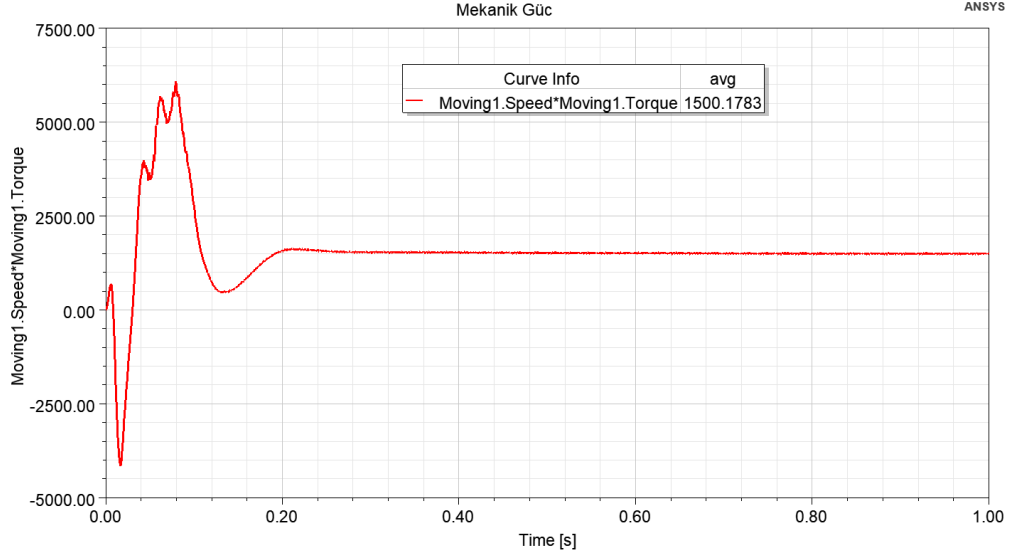
Akım değeri ise Şekil 4.28’den yaklaşık 5,56 A olarak okunmaktadır. Motorun simülasyon modelinde bir sürücü kullanılmadığından 0 ile 230 ms zamanları arasında kalan aralıkta yüksek bir yol alma akımı çekmekte, 230 ms’den sonra nominal akım çekmeye başlamaktadır. Şebeke gerilimi ve akımın faz açlarına göre güç faktörü hesaplandığında ortalama 0,98 değeri elde edilmektedir.



Şekil 4.29: Tork – zaman grafiği.

Bu çalışmada tasarım hedeflerinden en fazla üzerinde durulan kriterler üretilen torkun dalgalığının düşük olması ve aynı zamanda verimin yüksek seviyelerde olmasıdır. Şekil 4.29’da tork-zaman grafiğinde motor nominal tork

değeri olan 19,1 Nm değerini sağladığı görülmektedir. Tork grafiğinde yakınlştırılmış görüntüde tork dalgalılığı görülmektedir. Bu grafikte torkun en yüksek değeri 19,4954 Nm, en düşük değeri ise 18,7529 Nm olarak ölçülmüştür. Tork dalgalılığı 0,7424 Nm büyüklüğünde iken oransal olarak da %3,90 değeri elde edilmiştir. Bu değerleriyle tork dalgalanması iyi bir performans sergilemektedir.



Şekil 4.30: Çıkış gücü (mekanik güç) – zaman grafiği.

Simülasyon sonuçlarına göre çıkış gücü yaklaşık olarak motorun anma gücü olan 1500 W değerindedir. Giriş gücü hesaplanırken çıkış gücüne 77,6 W bakır kaybı ve 18 W nüve kaybı eklenir. Bu güç kayıplarının dışında sürtünme ve diğer kayıplar da meydana gelmektedir. Bu kayıplar üretim ve motorun çalışma koşullarına bağlı olduğu için kesin bir şekilde öngörülememektedir. Ticari olarak piyasada yer alan motorlarla kıyaslandığında sürtünme ve diğer kayıplar toplam 30 W olarak öngörülmüştür. Simülasyon sonuçlarına göre giriş gücü 1595,6 W olarak hesaplanır. Bu giriş gücüne sürtünme ve diğer kayıplar da eklendiğinde giriş gücü 1625,6 W olarak elde edilmektedir.

Analiz sonuçlarına göre verim değeri ise %94,00 olarak hesaplanmaktadır. Ancak prototipin üretim sürecinde sargı boyları farklı çıkabilmektedir. Bu durum genellikle sargı direncinin artarak bakır kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. Sacların kesiminde ise lazer hassasiyetine bağlı olarak çok küçük farklar oluşabilmektedir. Bu farklar diğer kayıplar olarak adlandırabileceğimiz ilave kayıplar

getirebilmektedir. Bu farklar tekrar değerlendirilerek prototipin test sonuçlarıyla kıyaslanacaktır.

5. PROTOTİP ÜRETİMİ VE TEST SONUÇLARI

Bu bölümde tasarlanan motorun prototipinin üretim süreci ve yapılan testler anlatılacaktır. Prototipleme sürecinde önemli aşamalara dair fotoğraflar ve açıklamaları verilecektir. Daha sonra motor bir deney düzeneğine bağlanarak performansına dair değerler ve dalga şekilleri ölçülecektir. Simülasyon ile deney sonuçları karşılaştırılarak motorun performansı değerlendirilecektir.

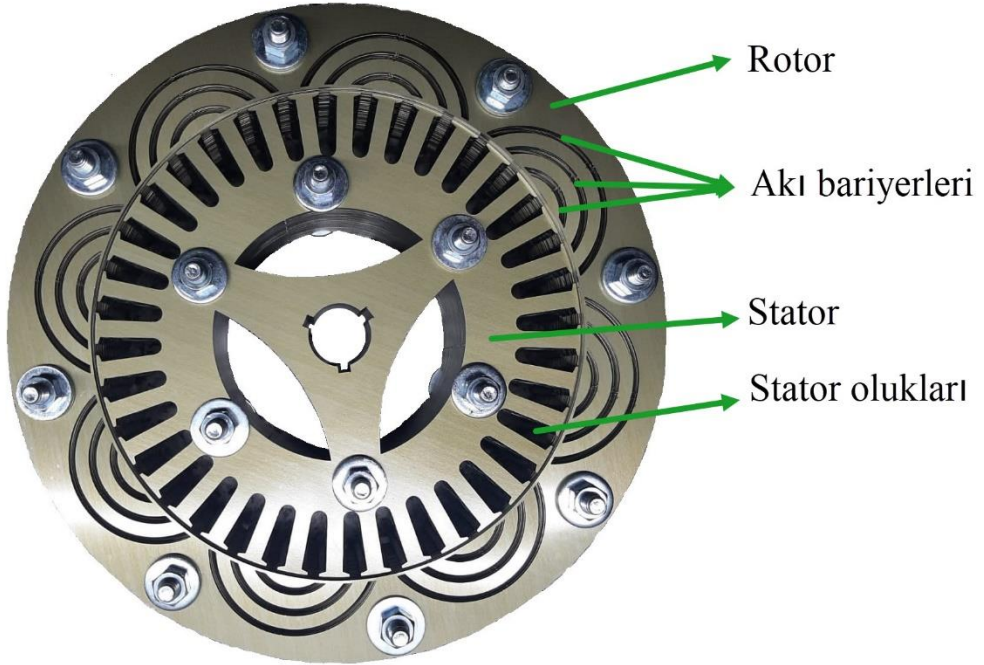
5.1 Prototip Üretim Süreci

Motorun tasarımı tamamlandıktan sonra prototipin üretim süreci gelmektedir. Başlangıç kriterlerine göre tasarlanan modellerden seçilen bir tasarımın 2D modeli çizdirilerek üretim süreci başlamıştır. Üretim sürecinde, özel üretim olması ve ağırlıklı olarak Çin üretimi olması sebebiyle termin süresi en uzun malzeme olan mıknatısların siparişinin ilk olarak verilmesi sağlanmıştır. Burada mıknatısların çizimi ve ölçülerinin sayısal olarak ifade edilerek tedarikçi firma tarafından da kontrolü yapılmıştır. Sipariş verilirken her bir mıknatıs için 4 adet N kutbu ve 4 adet S kutbu olacak şekilde miktar belirlenmiş ayrıca kırılma ihtimaline karşı %50 ilave sipariş edilmiştir. Mıknatıs siparişinde simülasyonlarla uyumlu olarak NdFeB35 tipinde mıknatıslar olmasına dikkat edilmiştir. Bu siparişte dikkat edilmesi gereken bir başka değer ise mıknatısın çalışma sıcaklığıdır. Üretici firmaların yayınladığı kataloglarda azami çalışma sıcaklığı motor prototipinin çalışma sıcaklığının üstünde olmalıdır.

Motor prototipinin üretilmesi aşamasında öncelikle tüm malzemelerin tasarıma uygun özelliklerde olması gerekmektedir. Mıknatıs siparişinden sonra, tasarıma uygun olarak seçilen M470-50A2 tipi saclar, lazer kesim yöntemiyle tasarım ölçülerine uygun olarak kesilmiştir. Kesilen saclar ortak bir eksenle hizalanarak üst üste konulmak suretiyle birleştirilmiş, daha sonra paketlenen sacların bütünlüğünün korunabilmesi için hem stator hem de rotor ayrı ayrı olarak altışar noktadan vidalanmıştır (Şekil 5.1).

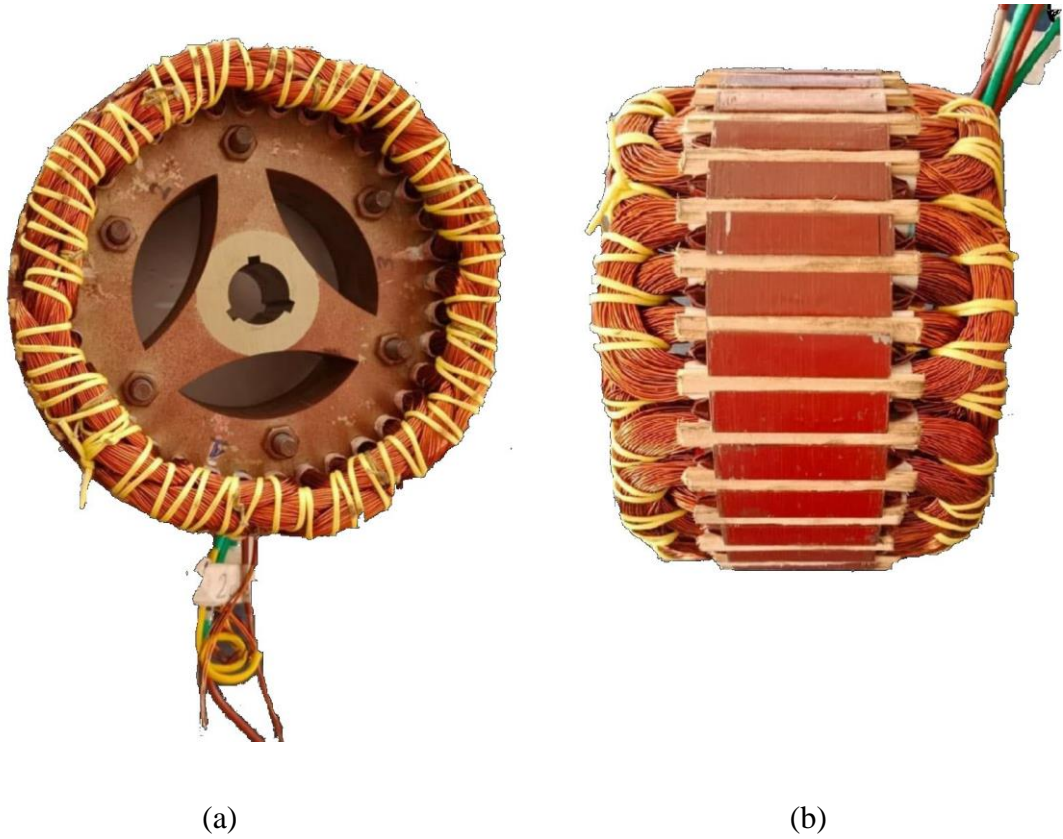


Şekil 5.1: Sacların paketlenip vidalanmasıyla oluşan a) Rotor ve b) Stator.



Şekil 5.2: Sacların paketlenip vidalanmasıyla oluşan stator ve rotor.

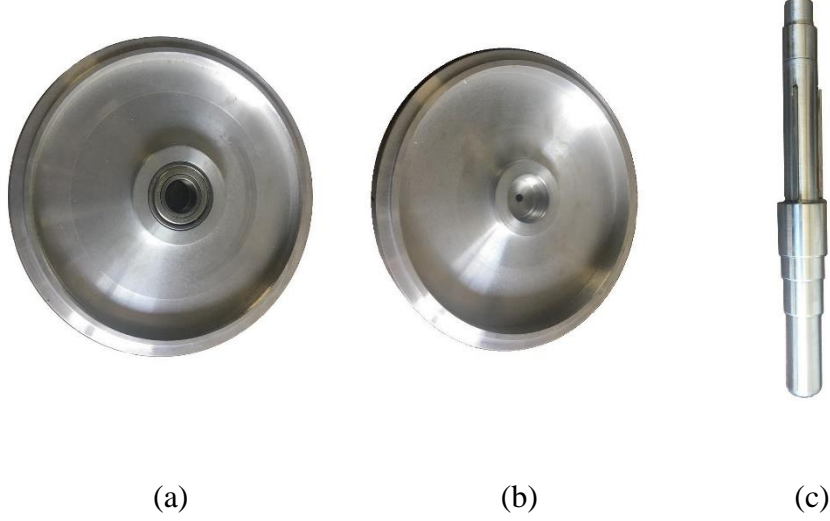
Hassas bir yöntemle kesilen stator ve rotor paketlenikten sonra üzerlerinde saçak kalma ihtimaline karşı kesim yüzeyleri zımparalanmıştır (Şekil 5.2). Bu yöntemle kesilen bölgelerin üretim hatasından kaynaklı olarak oluşabilecek ilave kaçak akı kayıplarının önüne geçilmeye amaçlanmaktadır. Rotor üzerinde radyal yöndeki üç akı bariyeri bir kutup oluşturmaktadır ve bu üç akı bariyerinin ortalarına bu akı bariyerleriyle aynı genişlikte, tasarımla birlikte sipariş edilen NdFeB35 türünde mıknatıslardan birer adet yerleştirilecektir. Sacların kesildikten sonra paketlenmesiyle oluşan stator ve rotor Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3: Sargıları oluklara yerleştirilmiş statorun a) Önden görünümü, b) Yandan görünümü.

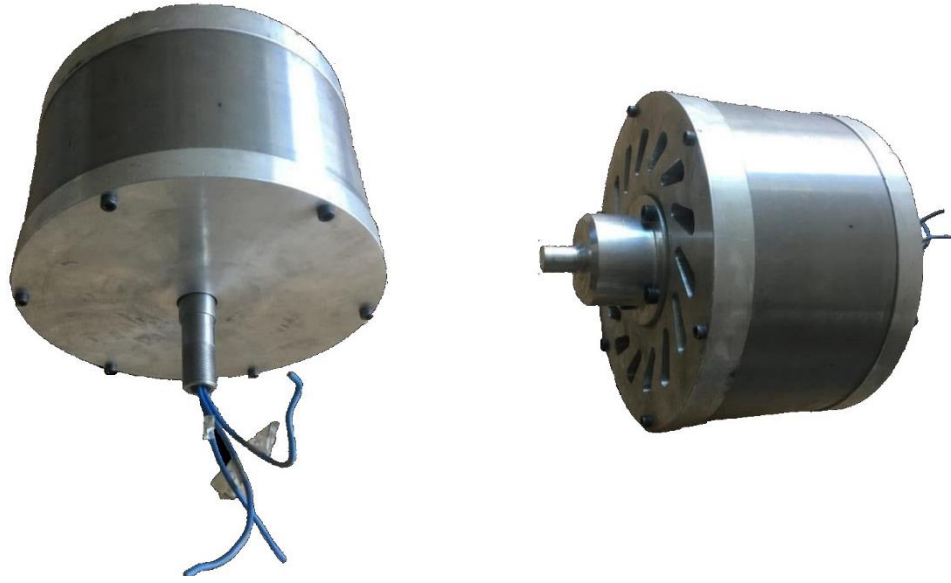
Stator yapısında Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’te görüldüğü üzere tasarıma uygun olarak 36 adet oluk bulundurmaktadır. Bu oluklar birbirinden paralel dişler ile ayrılmaktadır. Olukların içine iki katmanlı bakır sargılar yerleştirilmiştir. Dağıtılmış tipte tasarlanan sargılar yerleştirilirken Motor-CAD programından yardım alınmıştır. Tasarım aşamasında verilen sargı yerleşimi ile motorun sarım işinde olası hataların tespiti kolaylıkla sağlanabilmektedir. Ayrıca sargı uçlarının dışarı alınmasında bağlantılarının doğru bir şekilde yapılabilmesi için gerekmektedir. Şekil 4.3’te sargı yerleşiminde görüleceği üzere bir oluğa yerleşen bir sargının geri dönüşü o oluktan 3

oluk sonrasında olmaktadır. Sargıların yerleşiminden sonra motorun dış gövdesinin montajı yapılırken sargıların uçları dışarı alınacaktır.



Şekil 5.4: Motor gövdesinin a) Ön kapağı, b) Arka kapağı, c) Mili.

Sarım işlemleri ile stator imalatı tamamlanmıştır. Bu aşamadan sonra paketlenmiş halde olan rotorun akı bariyerlerinin ortalarına mıknatısların yerleştirilmesi ve sabitlenmesi gelmektedir. Bu işlemler esnasında, mıknatıs siparişi verilirken öngörüldüğü üzere bazı mıknatısların kırılması gibi olumsuzluklar yaşanmıştır. Bu sorunu en aza indirmek için mıknatısların yapıştırılması için kullanılan yapıştırıcının çok ince katmanlar halinde kullanılmasına dikkat edilmiştir. Mıknatısların akı bariyerlerine yerleştirilmesi ile rotor montajı da tamamlanmıştır. Motorun rotorunun da montajı tamamlandıktan sonra motoru dış kuvvetlerden koruyacak dış gövde montajı yapılmıştır. Şekil 5.4'te Motor gövdesinin kapakları ve motorun mili görülmektedir.



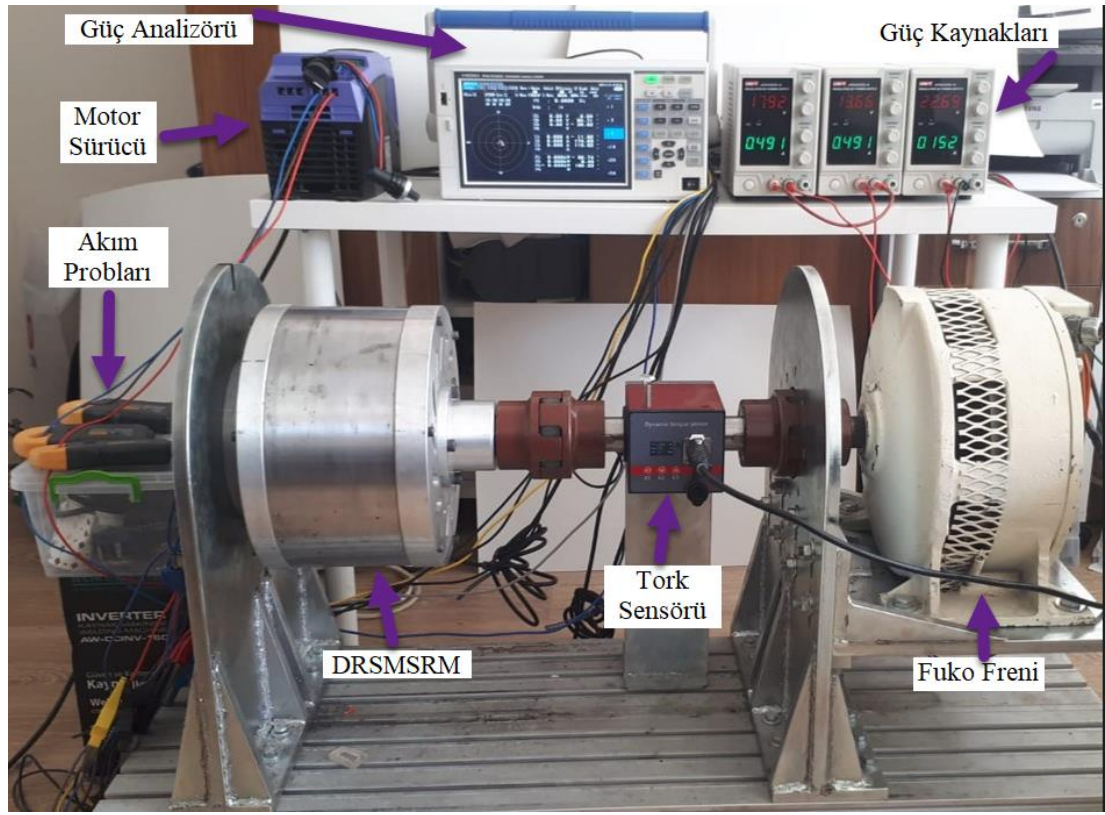
Şekil 5.5: Üretilen motor prototipi a) Arkadan görünümü, b) Yandan görünümü.

Üretilen motor prototipinin tamamlanmış hali Şekil 5.5'te verilmiştir. Motorun arkadan görünümü ve yandan görünümü verilmiştir. Motorun arkadan görünümünde motoru besleyebilmek için kablo uçları görülmektedir.

5.2 Test Sonuçlarının Alınması

Deneyel testlerin yapılabilmesi için motor sargıları bir senkron motor sürücüsü yardımıyla beslenmektedir. Enerji ile beslenen motor bir fuko freni yardımıyla yüklenirken, bir tork sensörü yardımıyla da yüklenme miktarı ölçülmektedir. Motorun çektiği akım, uygulanan gerilim ve bunların dalga şekilleri güç analizörü yardımıyla okunmuştur. Bu bölümde bu verilerin sayısal büyüklüğü ve dalga şekilleri verilerek simülasyon sonuçlarıyla kıyaslanacaktır. Simülasyonda bir faza ait sargı direnci 0,8344 ohm olarak elde edilirken prototip motorda sargı direnci 0,985 ohm olarak ölçülmüştür. Direnç değerindeki bu fark, bakır kayıplarında bir fark oluşmasına sebep olacak ve verim değeri simülasyon değerlerine göre daha düşük çıkacaktır. Nihai tasarımda yeni direnç değeri ile simülasyonlar yapıldığında faz akımı 5,54 A rms çıkmaktadır. Bu akım ve direnç değerine göre bakır kayıpları 77,6 W değerinden 90,7 W değerine yükselmiştir. Sürtünme ve diğer kayıpların 30

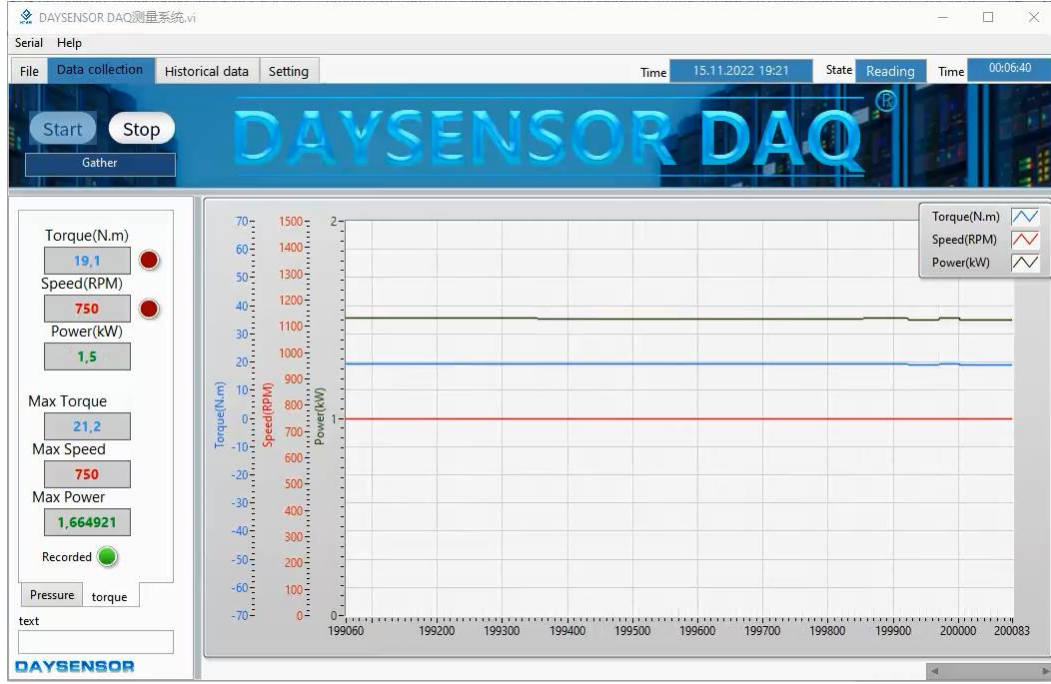
W olarak ön görülmesi ve simülasyon sonuçlarına göre motorun giriş gücü 1638,7 W olarak hesaplanmıştır. Verim değeri ise % 91,54 olarak hesaplanmıştır.



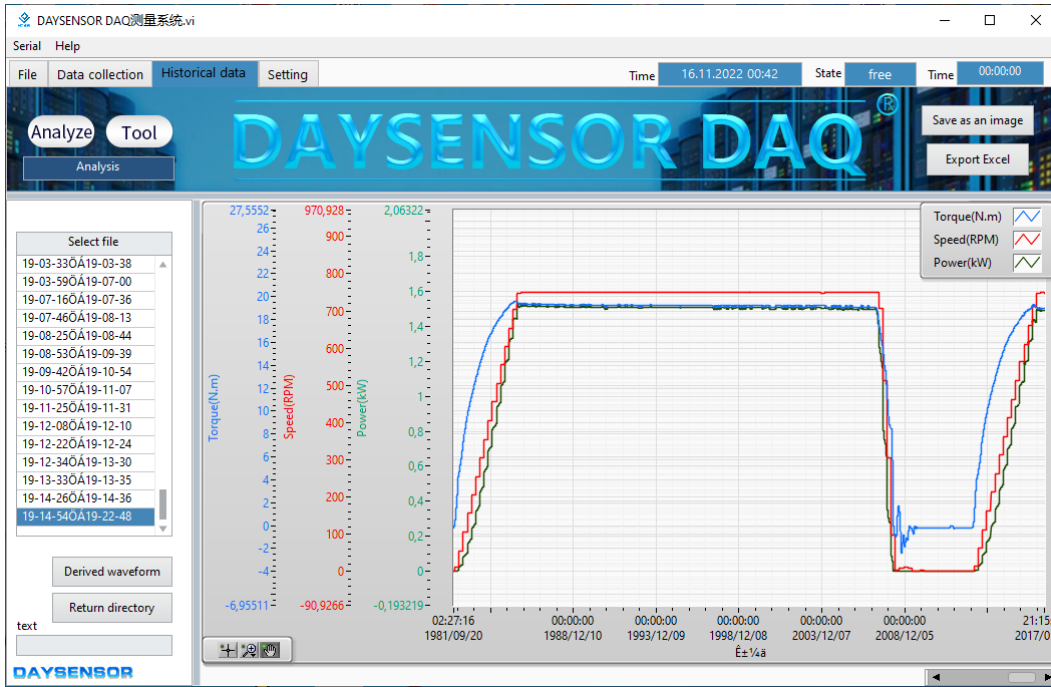
Şekil 5.6: Test düzeneği.

Motorun yüklenme performansını test edebilmek için kurulan test düzeneği Şekil 5.6'da verilmiştir. Motor yüklenebilmesi için bir fuko fren kullanılmıştır. Bir tork sensörü ile motorun yüklenme seviyesi ölçülmüştür. Motor 19,1 Nm tork üretirken testleri yapılarak performansı ölçülmüştür.

Şekil 5.7'de tork sensöründen alınan sonuçlar görülmektedir. Motor 19,1 Nm ile yüklendiğinde ve 750 rpm hızla döndüğünde mekanik güç 1500 W olarak okunmaktadır. Motor daha fazla yüklendiğinde 21,2 Nm tork seviyesine ulaşabilmektedir. Senkron hızda bu çalışma koşulunda ise motorun mekanik gücü 1665 W seviyelerinde olmaktadır. Bu değerler prototipin uygun seviyede tork ve mekanik güç değerlerini verdiğini göstermektedir.

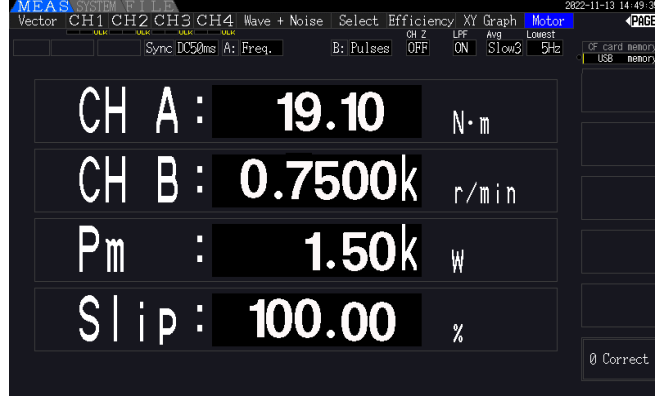


Şekil 5.7: Tork sensöründen alınan tork, hız ve çıkış gücü değerleri.



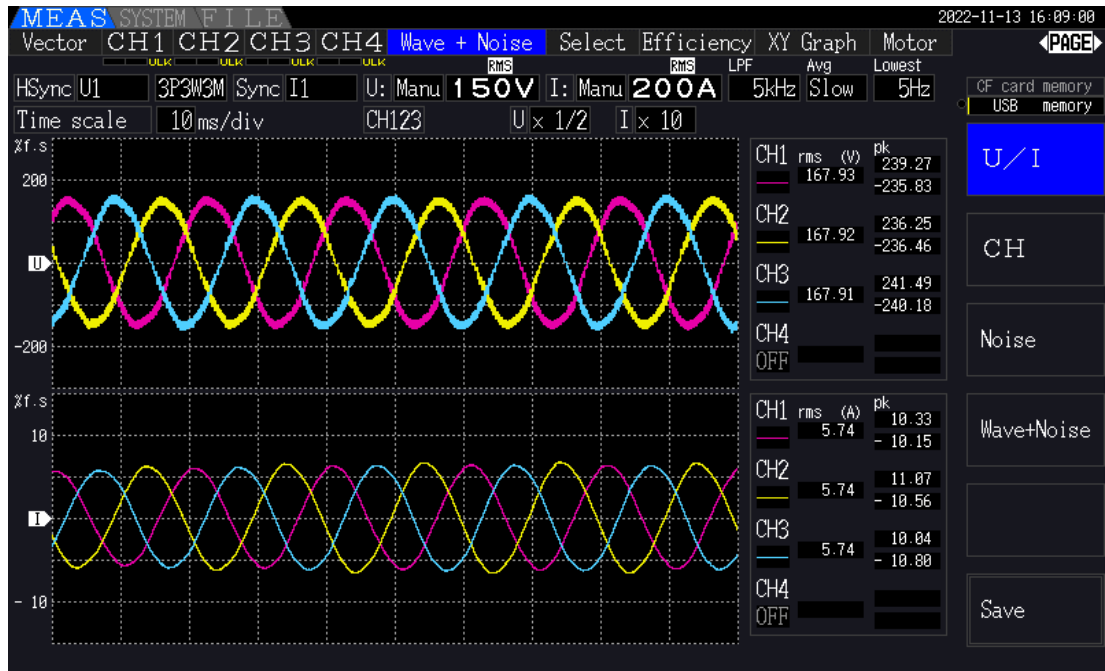
Şekil 5.8: Tork sensöründen alınan tork, hız ve çıkış gücü değerleri.

Motorun yol alma anında tork sensöründen alınan tork, hız ve çıkış gücünün yer aldığı çıktı Şekil 5.8’de verilmiştir. Motora sürücü yardımıyla enerji verildiğinde motor başarılı bir şekilde kalkış yaparak 19,1 Nm çıkış torku üretebilmektedir.



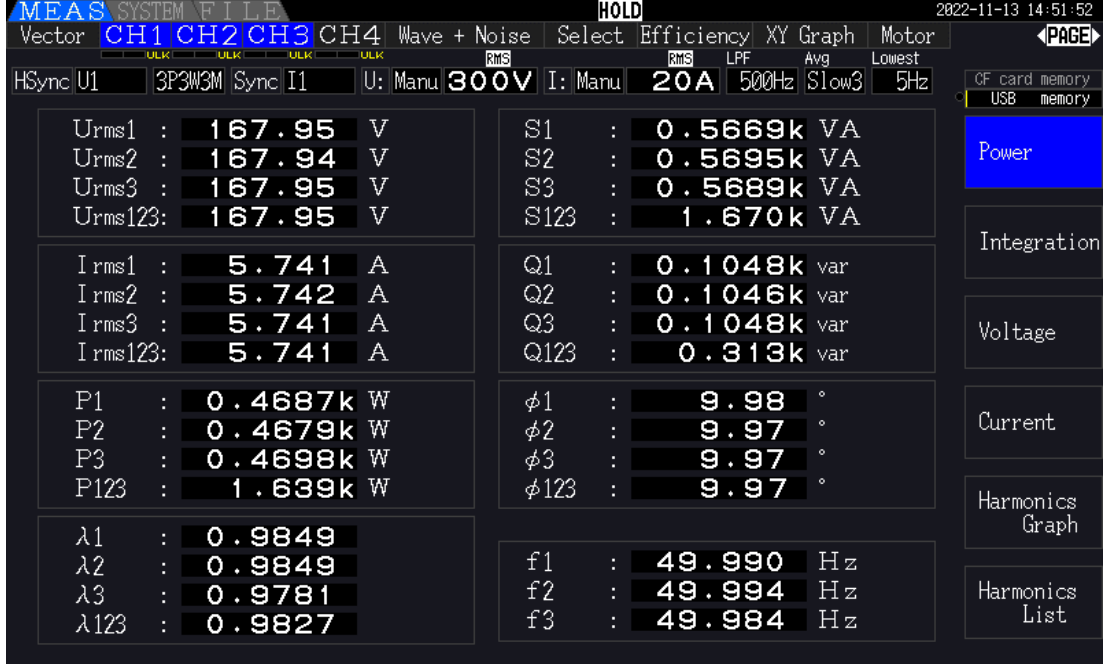
Şekil 5.9: Güç analizöründen alınan tork, hız ve çıkış gücü değerleri.

Güç analizöründen alınan tork, hız ve çıkış gücü değerleri Şekil 5.9’da verilmiştir. Analizörden alınan sonuçlar da simülasyon sonuçlarından ve tork sensöründen alınan sonuçlarla uyumlu olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.10: Tam yükte gerilim ve akım.

Güç analizöründen alınan, gerilim ve akım dalga şekilleri Şekil 5.10’da verilmiştir. Dalga şekilleri incelendiğinde, harmonik bileşenlerin etkileri çok küçük olması sebebiyle akım dalga şeklinin sinüs formuna çok yakın biçimde olduğu görülmektedir. Faz akımının büyüklüğü ise senkron hızda çalışırken 5,74 A rms olarak okunmaktadır. Test sonucu okunan 5,74 A değeri simülasyonda elde edilen 5,54 A değerinden yaklaşık 0,2 A kadar yüksek çıkmıştır.



Şekil 5.11: Tam yükte gerilim, akım, güç faktörü ve elektriksel güçler.

Güç analizöründen alınan elektriksel performans değerleri Şekil 5.11’de verilmiştir. Faz gerilimi 96 volt rms olarak tasarlanan bu motora anma gerilimi uygulanmıştır. Simülasyona göre faz akımı 5,54 A iken analizörden 5,74 A olarak okunmuştur. Toplam elektriksel güç simülasyonda 1638,7 VA olurken, prototipin tam yükte 1639 VA çektiği görülmektedir. Bu değer simülasyon sonuçları ile yakın ve uyumludur. Analizörden motorun güç faktörü 0,9827 gibi yüksek bir değer elde edilmiştir. Bu değer simülasyonlarda elde edilen 0,98 değeriyle uyumludur. Güç faktörünün yüksek olması sebebiyle aktif güç yüksek çıkarken reaktif güç ise düşük seviyelerde çıkmıştır. Analizör sonuçlarına göre toplam aktif güç 1639 W olarak ölçülürken reaktif güç ise 313 VAR ölçülmüştür. Bu güç değerlerine bağlı olarak ölçülen görünür güç ise 1670 VA olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.1’de motorun temel özellikleri verilmiştir. Prototip motorun temel ölçüleri, kullanılan malzemelerin türü, uygulanan gerilim ve akımın büyüklüğü verilmiştir. Ayrıca güç faktörü, giriş ve çıkış güçleri verilerek verim değeri hesaplanmıştır. Boyutlarına bakıldığında paket boyu 50 mm, sacların dış çapı 256 mm olan bir motor prototipi üretilmiştir.

Tablo 5.1: Motorun özellikleri.

Parametre	Değer	Birim
Rotor Dış Çap	256	mm
Stator Dış Çap	190	mm
Hava Aralığı	1	mm
Paket Boyu	50	mm
Mıknatıs Tipi	NdFeB35	
Manyetik Sac	M470-50A2	
Faz Gerilimi	96	V rms
Anma Akımı	5,741	A rms
Güç Faktörü	0,982	
Reaktif Güç	313	VA
Çıkış Gücü	1500	W
Giriş Gücü	1639	VA
Verim	91,51	%

Motorun tasarımı ve uygulamanın testi yapıldıktan sonra simülasyon ve uygulama sonuçları kıyaslanmıştır. Simülasyon sonuçları verilirken sargı direnci uygulamada ölçülen dirence göre yenilenmiş ve son analiz sonuçları kullanılmıştır. Simülasyon ve uygulama sonuçları verim açısından oldukça yakın çıkmıştır. Simülasyon programında analiz edilemeyen ve tahmin edilerek belirlenen sürtünme ve diğer kayıpların toplam 30 W olduğu görülmüştür. Verim değeri ise % 91,51 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.2: Simülasyon ve uygulamanın test sonuçları.

Parametre	Simülasyon	Uygulama	Birim
Hız	750	750	rpm
Frekans	50	50	Hz
Ortalama Tork	19,06	19,10	Nm
Tork Dalgallılığı	3,90	-	%
Güç Faktörü	0,98	0,982	
Faz Akımı	5,54	5,74	A
Nüve Kayıpları	17,8	139	W
Stator Bakır Kayıpları	90,7		W
Sürtünme ve Diğer Kayıplar	30		W
Toplam Güç Kayıpları	138,7	139	W
Çıkış Gücü (Mekanik Güç)	1500	1500,0	W
Giriş Gücü (Elektriksel Güç)	1638,7	1639	VA
Verim	91,54	91,51	%

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında küçük güçlü bir elektrik araç veya dış rotorlu kullanıma uygun bir makine için yüksek verim ihtiyacını karşılayabilecek bir DRSM SRM tasarlanmış ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Amacına uygun olarak gerçekleştirilen bu çalışmada birçok tasarım parametresi üzerine analizler yapılmıştır. Başlangıç kriterlerine uygun bir tasarım oluşturabilmek için performansı önemli miktarda etkileyeceği öngörülen parametreler seçilmiştir. İlk olarak statorun oluk sayısı ve sargı tasarımı gerçekleştirilmiş, daha sonra rotorda akı bariyeri sayısı, tasarım, mıknatıs boyutlarının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Oluk sayısının 24, 36 ve 48 olduğu durumlar incelenmiştir. Stator tasarımında oluk sayısının artması ile endüklenen gerilimin dalga şeklinin ve MMK dağılımının sinüs formuna yaklaştığı sonucuna ulaşılmıştır. Oluk sayısının 48 olması durumunda stator dişlerinin genişliği çok küçük ölçülerde belirlenebilmesi sebebiyle manyetik akı yoğunluğu çok yüksek olmakta ve dişlerin doyuma gitmesiyle sonuçlanmaktadır. Bu sebeple stator dişlerinin manyetik doyuma gitmeden seçilebilecek en yüksek sayıda stator oluğuna sahip olacak şekilde 36 oluklu olarak seçilmiştir.

Stator tasarımından sonra rotor tasarımı ile birlikte çıkış gücü, çıkış momenti değerleri incelenerek nominal değerlerde olması koşuluyla tork dalgalılığının da en düşük seviyelerde elde edilmeye çalışılmıştır. Rotor tasarımında literatürde yer alan bazı akı bariyeri ve mıknatıs modelleri üzerine tasarımlarla en iyi model belirlenmeye çalışılmış ve tasarım hedeflerine en uygun cevabı veren modelin yay şekline akı bariyeri ve mıknatıs geometrisinin olduğu belirlenmiştir. Rotor geometrisi belirlenirken akı bariyeri sayısı da belirlenerek en uygun sayıda akı bariyerinin üç olduğu gösterilmiştir. Rotor geometrisi temel hatlarıyla belirlendikten sonra 3 adet akı bariyeri ve mıknatıs için geniş bir ölçekte parametrik analiz yapılmıştır. Bu analizlerde her bir akı bariyeri ve bu akı bariyerinin ortasına yerleştirilmiş olan mıknatısların verime ve tork dalgalılığına etkisinin aynı olmadığı gösterilmiştir. Çalışılan boyutlarda statora yakın olan mıknatısların büyüklüğünün verime etkisi küçük olsa da tork dalgalanmasında önemli bir değişiklik oluşturmaktadırlar. Ortadaki mıknatısın büyüklüğü geniş bir değer aralığında arttıkça verim de artmaktadır, ancak 2 numaralı mıknatısın çok küçük ya da çok büyük olması

durumunda tork dalgalılığında önemli artışlar olmaktadır. Rotorun en dışında olan 1 numaralı mıknatısın büyüklüğünün artması bir tepe noktasına kadar verim artışına sebep olmaktadır. Tork dalgalılığının düşük olması açısından ise 1 numaralı mıknatısın diğer iki mıknatısa göre daha büyük bir yay açısında seçilmesi gerektiği görülmüştür. Bu üç mıknatısın büyüklüklerinin verim ve tork dalgalılığına etkileri birbirinden farklı olsa da bu iki performans çıktısı için en iyi değerleri elde edebilmek için bu mıknatısların boyutlarının ve konumlarının birbiri ile uyumlu olması gerektiği gözlemlenmiştir.

Analizler tamamlandıktan sonra başlangıç kriterlerine en uygun olan modelin prototipi üretilmiştir. Tasarım programı ANSYS'de yapılan analizler ile üretilen prototip üzerinde yapılan performans testleri benzer ve tutarlı çıkmıştır. Motorun anma yükünde faz akımı 5,74 A rms, verimi ise % 91,51 olarak ölçülmüştür.

Tasarım kriterleri içinde verim ve tork dalgalanması açısından en iyi değerleri elde edebilmek için üç mıknatısın boyutlandırılmasının yanında bu mıknatısların uyumunu etkileyen akı bariyerlerinin konumu, yay açıları, mıknatısların, akı yollarının genişlikleri gibi parametrelerin daha detaylı analizleri yapılabilir. Böylece akı bariyerleri arasında kalan akı yollarının konumu ile mıknatıs boyutları arasında daha genel bir tasarım ilişkisi elde edilebilir. Bu ilişki ile mıknatıslardan daha fazla fayda sağlanıp yüksek verim, düşük tork dalgalılığı ve yüksek güç yoğunluğu elde etmek amaçlanabilir.

7. KAYNAKLAR

Andrada , P., Blanqué, B., Martínez, E., Torrent, M., Sánchez, J. A., Perat, J. I., “Fractional-slot permanent magnet synchronous generator for low voltage applications”, *Electrical Engineering Electronic Journal*, 1(2), (2013).

Bonthu, S. S. R., Tarek, M. T. B., Choi, S., “Optimal torque ripple reduction technique for outer rotor permanent magnet synchronous reluctance motors”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(3), 1184-1192, (2017).

Bozkurt, A., Baba, A. F., Oner, Y., “Design of outer-rotor permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor for electric vehicles”, *Energies*, 14(13), 3739, (2021).

Candel, M. T., “Cogging Torque Reduction for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors” Doktora Tezi, *Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona*, Barselona, (2015).

Dulanto, A. O., “Design of a synchronous reluctance motor assisted with permanent magnets for pump applications”, Yüksek Lisans Tezi, *KTH Royal Institute of Technology*, Stockholm, (2015).

Ersöz, M., Öner, Y., Bingöl, O., “Akı bariyerli TLA tipi senkron relüktans motor tasarımı ve optimizasyonu”. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(4), 941-950, (2016).

Inte, R. A., Jurca, F. N., “Torque ripple reduction of outer rotor synchronous reluctance machine with concentrated winding”, *19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)* (pp. 248-252), (2017).

Inte, R. A., Jurca, F. N., Martis, C., “Analysis performances of outer rotor synchronous reluctance machine with or without permanent magnets for small electric propulsion application”, *11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)* (pp. 1-6), (2019^a, March).

Inte, R. A., Jurca, F. N., Vărățiceanu, B., Minciunescu, P., Marțiș, C., “Performance Analysis of Outer Rotor Synchronous Reluctance Machine with Different Number and Form of Flux Barriers Per Pole”, *Electric Vehicles International Conference (EV)* (pp. 1-4), (2019^b, October).

Inte, R. A., Jurca, F. N., Marțiș, C., “Design and Analysis of Outer Rotor Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine with Concentrated Winding for Small Electric Propulsion”, *AEIT International Annual Conference (AEIT)* (pp. 1-6), (2019^c, September).

Jurca, F. N., Martis, C., “Analysis of outer rotor synchronous reluctance motor for low-speed applications”, *19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)* (pp. 242-247), (2017).

Kamper, M. J., Volsdhenk, A. F., “Effect of rotor dimensions and cross magnetisation on Ld and Lq inductances of reluctance synchronous machine with cageless flux barrier rotor”, *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 141(4), 213-220, (1994).

Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., Blaabjerg, F., *Control in Power Electronics* (Vol. 17), San Diego: Academic Press, (2002).

Khan, M. A., Khan, F., Jamshed, U., Ali, S., Ajmal, Z., Zahid, A., Ahmad, N. “Design and analysis of outer segmental rotor synchronous reluctance machine for future electric bike”, *International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)* (pp. 1-5), (2019).

Marino, L., “Design and Analysis of a Fractional-Slot Concentrated-Wound PM-Assisted Reluctance Motor”, Yüksek Lisans Tezi, *KTH Royal Institute of Technology*, Stockholm, (2015).

Moghaddam, R. R. “Synchronous reluctance machine (SynRM) design”, Doktora Tezi, *KTH Royal Institute of Technology*, Stockholm , (2007).

Moradi CheshmehBeigi, H., Behroozi, L., “Analytical design, electromagnetic field analysis and parametric sensitivity analysis of an external rotor permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor. *Electrical Engineering*, 102(4), 1947-1957, (2020).

Mukherjee, V., Sokolov, M., Pippuri, J., Hinkkanen, M., Belahcen, A., “Comparative study of inner and outer rotor bearingless synchronous reluctance motors”, *The Journal of Engineering*, 2019(17), 4375-4379, (2019).

Özkara, Y., “Dünyada Enerji Verimliliği Gelişmelerine ve Elektrik Motorlarının Durumuna Kısa Bir Bakış [online]”, (06 Kasım 2022), <https://www.emosad.org/etkinlikdetay-dunyada-enerji-verimliliği-gelismelerine-ve-elektrik-motorlarinin-durumuna-kisa-bir-bakis-9.html>, (2022).

Sathyan, S., “Synchronous reluctance motor for household applications”, Yüksek Lisans Tezi, *Aalto University School Of Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering*, Espoo, (2013).

Tap, A., “Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı*, İstanbul, (2017).

Yu, D., Huang, X., Zhang, X., Zhang, J., Lu, Q., Fang, Y., “Optimal design of outer rotor interior permanent magnet synchronous machine with hybrid permanent magnet”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(2), 1-5, (2019).

Xheladini, L., “A Performance Improvement Study Of A Permanent-Magnet Assisted Synchronous Motor Used In Washers”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı*, İstanbul, (2017).