
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ÇERÇEVESİZ SINIRLI AÇILI ÇOK FAZLI TOROİDAL MOTOR TASARIMI VE UYGULAMASI

Akın AYDIN

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Akın AYDIN
24/06/2025

ÇERÇEVESİZ SINIRLI AÇILI ÇOK FAZLI TOROİDAL MOTOR TASARIMI VE UYGULAMASI

(Doktora Tezi)

Akın AYDIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2025

ÖZET

Bu tez çalışmasında belirli bir çalışma bölgesine ve hassas hareket kabiliyetine sahip, 4 kutuplu, toroidal sargılı doğru akım sınırlı açılı tork motoru tasarımı ve kontrolü yapılmıştır. Motoru oluşturan bileşenlerin farklı geometrideki durumları ve farklı kutup sayısının motor performansı üzerine etkisi sunulmuştur. Alternatif tasarımların elektriksel ve manyetik büyüklüklerinin değeri hem analitik hem de sonlu elemanlar analizi ile ortaya çıkarılmıştır. Yüksek birim moment yoğunluğu ve sabit çalışma bölgesinde vuruntusuz tork çıkışları gerçekleştirilmiştir. Performans karakteristiklerini reel ortamda görmek adına prototip oluşturulmuştur. Yüksek hassasiyetli enkoder ile hassas konum denetimi gerçekleştirilmiş hem simülasyon ortamında hem de gerçekte rotor pozisyonu izlenmiştir. Geleneksel fırça ve fırçasız DC motorların giremeyeceği alanlarda çalışabilen, basit yapısı, kullanım alanına özel hassas konum kontrolü sağlayan, sınırlı açılı tork motorunun havacılık ve askeri gibi alanlarda ve küçük ölçekli uygulamalarda kullanılabileceği teorik ve pratik anlamda kanıtlanmıştır.

Bilim Kodu	:	93413
Anahtar Kelimeler	:	Sınırlı açılı tork motoru, Sınırlı açılı toroidal motor, sonlu elemanlar analizi
Sayfa Adedi	:	111
Danışman	:	Doç. Dr. Ali SAYGIN

DESING AND APPLICATION OF FRAMELESS LIMITED ANGLE POLYPHASE TOROIDAL MOTOR

(Ph. D. Thesis)

Akın AYDIN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2025

ABSTRACT

In this study, a 4-pole toroidal winding direct current limited angle torque motor with a specific operating region and precise movement capability has been designed and controlled. The effect of different geometries of the motor components and different number of poles on the motor performance is presented. The electrical and magnetic magnitudes of alternative designs are analysed both analytically and by finite element analysis. High unit torque density and torque outputs without cogging in the constant operating region have been realised. A prototype is created in order to see the performance characteristics in real environment. Precise position control is performed with a high precision encoder and rotor position is monitored both in simulation environment and in reality. It has been theoretically and practically proved that the limited angle torque motor, which can operate in areas where conventional brushed and brushless DC motors cannot enter, can be used in aerospace and military fields and small-scale applications.

Science Code	:	93413
Key Words	:	Limited angle torque motor, limited angle toroidal motor, finite element analysis
Page Number	:	111
Supervisor	:	Assist. Prof. Dr. Ali SAYGIN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardımları ve katkılarıyla beni yönlendiren, danışmanım Doç. Dr. Ali SAYGIN'a, tez izleme komitesi üyelerim Prof.Dr. Nihat ÖZTÜRK'e ve Prof.Dr. Mehmet Fatih IŞIK'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım ve imalat sürecinde desteklerini esirgemeyen TMS Motor A.Ş. yönetici ve çalışanlarına, Core Elektronik Tic. San. Ltd. Şti. firması ve çalışanlarına ve iş yerimdeki çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca tez projesinde prototip oluşturmamda maddi olarak destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığına (FDK-2023-8444 nolu proje) teşekkür ederim.

Son olarak, tez çalışması süresince yardımlarını esirgemeyen anneme, bana gösterdiği anlayış ve manevi desteği ile eşim Zümray AYDIN ve canım oğlum Yaman Efe AYDIN'a sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE ÇALIŞMANIN AMACI 3

2.1. Literatür Araştırması 3

2.2. Çalışmanın Amacı 9

2.3. Çalışmanın Bilime Katkısı 10

3. TOROİDAL SARGILI SINIRLI AÇILI TORK MOTORLARI VE MOTORA AİT DİNAMİK VE ELEKTROMANYETİK DENKLEMLER 11

3.1. Toroidal Sargılı Sınırlı Açılı Tork Motorları 11

3.2. LAT Motorlara Ait Dinamik ve Elektromanyetik Denklemler 13

4. ÇERÇEVESİZ SINIRLI AÇILI ÇOK FAZLI TOROİDAL MOTOR TASARIM SÜREÇLERİ 23

4.1. Giriş 23

4.2. Tasarım Yöntemi ve Akış 23

4.3. Boyutlandırma Çalışmaları 25

4.3.1. Stator ve rotor boyutlandırması 25

Sayfa

4.3.2. Hava aralığı ve mekanik açıklık hesaplanması 26

4.3.3. Kutup sayısı ve mıknatıs boyutlandırması 29

4.3.4. Sarım sayısı, sargı ve kutup yay uzunlukları belirlenmesi..... 30

4.4. Tasarım Parametreleri Belirlenmesi..... 33

5. SONLU ELEMAN YÖNTEMİ İLE SINIRLI AÇILI TOROİDAL MOTORUN MANYETİK-GEÇİCİ DURUM ANALİZİ VE TASARIM SÜRECİ DOĞRULAMASI..... 39

5.1. Giriş..... 39

5.2. Ansys Maxwell Model Oluşturulması 40

5.2.1. Stator konfigürasyonu..... 41

5.2.2. Stator sargıları..... 42

5.2.3. Rotor konfigürasyonu 43

5.2.4. Mıknatıs tasarımı..... 44

5.3. Manyetik Analiz Süreci..... 45

5.4 Geçici Durum Analiz Süreci 58

6. ÇERÇEVESİZ SINIRLI AÇILI ÇOK FAZLI TOROİDAL MOTORUN ÜRETİM AŞAMASI..... 61

6.1. Giriş..... 61

6.2. Prototip Süreci..... 62

6.2.1. Stator ve rotor..... 62

6.2.2. Sarım süreci..... 63

6.2.3. Mıknatıslar ve rotor montajı 65

6.3. Motor Prototip Sonucu..... 67

7. ÇERÇEVESİZ SINIRLI AÇILI ÇOK FAZLI TOROİDAL MOTORUN KONTROL SÜRECİ..... 71

7.1 Giriş..... 71

Sayfa

7.2. Sistemin Kontrolü 73
7.3. Pozisyon Kontrolü 75
7.4. Enerjilendirme 76
7.4.1. H köprü 76
7.4.2. PWM uygulaması 77
7.5. Mikrodenetleyici 78
7.6. Motor Sürücü Kartı 79
7.7. Enkoder 80
7.8. STM32Cube IDE Yazılım Uygulaması 82
8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE KARŞILAŞTIRMA 87
8.1. Test Sisteminin Kurulumu 87
8.2. Çalışma Deneyi 89
8.2.1. Denetimsiz çalışma 89
8.2.2. PID pozisyon denetimli çalışma 94
9. SONUÇ VE ÖNERİLER 101
KAYNAKLAR 105
ÖZGEÇMİŞ 111

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Örnek bir sınırlı açılı tork motora ait kriterler matrisi..... 35

Çizelge 4.2. Mekanik açıklık kriterleri..... 36

Çizelge 5.1. Ansys/Maxwell Bakır Malzeme parametreleri..... 43

Çizelge 5.2. Ansys/Maxwell N52 Mıknatıs Malzeme parametreleri..... 44

Çizelge 5.3. Tasarım boyutlandırma parametreleri..... 57

Çizelge 5.4. Tasarım parametrelerinin analitik hesaplama ve Ansys sonlu eleman analiz sonuçları..... 57

Çizelge 5.5. LATM3500 motorun birim hacim-tork yönünden karşılaştırması [2,15,44,45,81]..... 60

Çizelge 6.1. Mıknatısların karakteristikleri..... 66

Çizelge 7.1. LATM3500 Motor parametreleri..... 72

Çizelge 7.2. LATM3500 PID konum denetimi parametreleri..... 76

Çizelge 8.1. Test Sonuçları..... 99

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. LATM tork-rotor konum açısal değişimi 12

Şekil 3.2. LATM eşdeğer devresi 13

Şekil 3.3. İki kutuplu yay tip mıknatıslı LATM 14

Şekil 3.4. Dört kutuplu yay tip mıknatıslı LATM yarım kesit..... 16

Şekil 3.5. Dört kutuplu LATM manyetik eşdeğer devresi..... 18

Şekil 4.1. LATM tasarım akış gösterimi..... 24

Şekil 4.2. B-H eğrisi, çelik 1010..... 26

Şekil 4.3. Hava aralığında manyetik akı dağılımları..... 27

Şekil 4.4. Yüzey ve gömülü tip kutuplarda akı dağılımı, (a) Yüzey tip mıknatıs, (b) Gömülü tip mıknatıs..... 29

Şekil 4.5. Stator iç çapında sargıların gösterimi 31

Şekil 4.6. LATM tasarımın hiyerarşik çerçevesi 35

Şekil 5.1. LATM3500 motor ağ(mesh) yapısı gösterimi..... 41

Şekil 5.2. Stator geometrisi..... 42

Şekil 5.3. Stator sargı geometrisi 42

Şekil 5.4. Rotor geometrisi 43

Şekil 5.5. Mıknatıs geometrisi 44

Şekil 5.6. İç çap (Di) değişiminin rotor açısı-tork eğrisinde etkisi..... 45

Şekil 5.7. Kutup yay açısının (θr) değişiminin rotor açısı-tork eğrisinde etkisi 46

Şekil 5.8. Sargı yay açısının (θs) değişiminin rotor açısı-tork eğrisinde etkisi..... 46

Şekil 5.9. Mıknatıs kalınlığı (lm) değişiminin rotor açısı-tork eğrisinde etkisi 47

Şekil 5.10. Mıknatıs kalınlığı (lm) değişiminin rotor açısı-tork eğrisinde etkisi (3d sütun gösterimi) 48

Şekil 5.11. Hava aralığı mesafesinin rotor açısı-tork eğrisine etkisi 49

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.12. Rotor iç çap mesafesinin rotor açısı-tork eğrisine etkisi 49

Şekil 5.13. LATM3500 Tork-açı eğrisi 50

Şekil 5.14. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı..... 50

Şekil 5.15. LATM3500 farklı pozisyonlarda manyetik akı yoğunluğu dağılımları, (a) Rotor konumu -45°, (b) Rotor konumu 0°, (c) Rotor konumu 15°..... 52

Şekil 5.16. Manyetik akı ve manyetik alan şiddeti vektörel dağılımları, (a) Manyetik akı yoğunluğu vektörel dağılım, (b) Manyetik alan şiddeti vektörel dağılım 53

Şekil 5.17. Farklı akımlarda hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu değişimi 54

Şekil 5.18. Manyetik akı hesaplayıcı 55

Şekil 5.19. Farklı akımlarda torkun değişimi..... 56

Şekil 5.20. Akım yoğunluğu dağılımı..... 56

Şekil 5.21. Geçici durum analizi: tork ve akım eğrisi..... 59

Şekil 5.22. Geçici durum analizi: pozisyon eğrisi 59

Şekil 6.1. Motor katı görünüm..... 61

Şekil 7.1. LATM3500 rotor pozisyonu transfer fonksiyonu blok şeması..... 72

Şekil 7.2. Motor kontrolü için PID denetim blok şeması 74

Şekil 7.3. PID denetimle motor kontrolü..... 74

Şekil 7.4. PID denetimli pozisyon kontrolü..... 75

Şekil 7.5. H-köprü çalışma durumları [73] 76

Şekil 7.6. PWM zamanlama gösterimi 77

Şekil 7.7. STM32F401 Pin Konfigürasyonu gösterimi [79]..... 83

Şekil 7.8. STMCube Ide yazılım akış özeti 84

Şekil 8.1. Deney düzeneği modeli 87

Şekil 8.2. Pozisyon değişimi (%80 duty)..... 90

Şekil 8.3. Akım değişimi (%80 duty) 90

Şekil **Sayfa**

Şekil 8.4. Hız değişimi (%80 duty)..... 91

Şekil 8.5. Pozisyon değişimi (%50 duty)..... 91

Şekil 8.6. Akım değişimi (%50 duty) 92

Şekil 8.7. Hız değişimi (%50 duty)..... 92

Şekil 8.8. Pozisyon değişimi (%22,5 duty)..... 93

Şekil 8.9. Akım değişimi (%22,5 duty) 93

Şekil 8.10. Hız değişimi (%22,5 duty)..... 94

Şekil 8.11. Hedef konum, (a) -14°, (b) +14° olduğu durum..... 95

Şekil 8.12. Hedef konum, (a) -10°, (b) +10° olduğu durum..... 96

Şekil 8.13. Hedef konum, (a) -7°, (b) +7° olduğu durum..... 97

Şekil 8.14. Hedef konum, (a) -3°, (b) +3° olduğu durum..... 98

Şekil 8.15. Hedef konum: 0°..... 99

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 6.1. Stator nüve 62

Resim 6.2. Rotor 63

Resim 6.3. Stator sarım süreci 64

Resim 6.4. LATM3500 için sargılı stator 65

Resim 6.5. N52 Mıknatıs 66

Resim 6.6. Rotor, mil ve mıknatısların montajı 67

Resim 6.7. Alüminyum gövde ve sargılı stator montajı 68

Resim 6.8. LATM3500 motor alt kapak ve rotor montajı 68

Resim 6.9. LATM3500 motor üst kapak 69

Resim 6.10. LATM3500 prototip son görünüş 69

Resim 7.1. STM32F401Re 78

Resim 7.2. Pololu G2 Yüksek Güç Çift Kanal Motor Sürücü 24v18 80

Resim 7.3. Biss-C Mutlak (Absolute) Enkoder 81

Resim 7.4. MAX485 entegresi 82

Resim 8.1. Deney Düzeneği 88

Resim 8.2. Sargı direnç ölçümü 88

Resim 8.3. Sargı endüktans ölçümü 89

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{A_g}$	Hava boşluğunun kesit alanı, m^2
$\mathbf{A_m}$	Mıknatısın kesit alanı, m^2
B	Manyetik akı yoğunluğu, T
$\boldsymbol{B_v}$	Viskoz sürtünme katsayısı, Nms/rad
$\mathbf{B_g}$	Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, T
$\boldsymbol{B_g}'$	Hava aralığındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, T
$\mathbf{B_m}$	Mıknatıs manyetik akı yoğunluğu, T
$\mathbf{d_s}$	Stator radyal kalınlığı, m
$\mathbf{D_i}$	Stator iç çap, mm
$\mathbf{D_o}$	Stator dış çap, mm
$\mathbf{D_w}$	İletken kesiti, m
$\boldsymbol{F_m}$	Mıknatısın ürettiği manyeto motor kuvvet, A-t
$\boldsymbol{F_w}$	Enerjili sargıların ürettiği manyeto motor kuvvet, A-t
$\boldsymbol{F_{w'}}$	Enerjili sargıların sabit bölgede ürettiği manyeto motor kuvvet, A-t
$\boldsymbol{F_{w''}}$	Enerjili sargıların rotor konuma bağlı ürettiği manyeto motor kuvvet, A-t
$\boldsymbol{\phi}$	Manyetik akı, Wb
$\boldsymbol{\phi_g}$	Hava aralığında manyetik akı, Wb
$\boldsymbol{H_c}$	Koersif kuvvet, $A.m^{-1}$
I	Akım, A
$\mathbf{I_p}$	Sargıdan geçen maksimum akım, A
j	Lineer akım yoğunluğu, A/m
$\boldsymbol{J_{AWG}}$	Ortalama akım yoğunluğu A/m^2
$\mathbf{J}_m$	Motor eylemsizlik momenti $kg\text{-}m^2$
$\boldsymbol{k_l}$	Kaçak akı faktörü

Simgeler	Açıklamalar
k_s	Sargı faktör sabiti
λ	Toplam akı, Wb
K_e	Emk sabiti
K_t	Tork sabiti
L	Sargı endüktansı, H
L_a	Motor eksenel uzunluk, yükseklik, m
L_{as}	Stator eksenel uzunluk, yükseklik, m
l_g	Hava boşluğundaki uzunluk, m
l_m	Mıknatısın kalınlığı, akı boyunca uzunluk, m
l_w	Sargı kalınlığı, m
μ	Manyetik geçirgenlik, H/m
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği, H/m
μ_m	Mıknatısın manyetik geçirgenliği, H/m
N_s	Sarım sayısı, tur
θ	Rotor konumu, derece
θ_0	Sabit tork bölgesi, derece
θ_r	Kutup yay uzunluğu, derece
θ_s	Sargı yay uzunluğu, derece
p	Kutup sayısı
R	Sargı direnci, ohm
R_i	Rotor iç çap, mm
R_o	Rotor dış çap, mm
$r_{avg.g}$	Hava aralığı ortalama yarıçap, m
$r_{avg.m}$	Mıknatıs ortalama yarıçap, m
$\Re$	Manyetik relüktans, A/wb
$\Re_g$	Hava boşluğunun manyetik relüktansı, A/wb
$\Re_{gg}$	Hava boşluğunun yarım yay mesafede manyetik relüktansı, A/wb
$\Re_m$	Mıknatısın manyetik relüktansı, A/wb
$\Re_{mm}$	Yarım yay mıknatısın manyetik relüktansı, A/wb
t_i	Sargı izolasyon kalınlığı, m

Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{T, T_e}$	Elektromanyetik tork, Nm
$\mathbf{T_f}$	Sürtünme tork, Nm
$\mathbf{T_l}$	Yük tork, Nm
$\mathbf{T_p}$	Tepe tork, Nm
$\mathbf{T_{vuruntu}}$	Vuruntu momenti, Nm
$\mathbf{V}$	Gerilim, V
$\boldsymbol{\omega}$	Açısal hız, rad/s
$\boldsymbol{W_{F_M}}$	Mıknatıs kaynaklı koenerji, joule
$\boldsymbol{W_{F_{MT}}}$	Mıknatıs kaynaklı toplam koenerji, joule
$\boldsymbol{W_{F_W}}$	Enerjili sargı kaynaklı koenerji, joule
$\boldsymbol{W_{F_{W'}}}$	Rotor karşısında enerjili sargı kaynaklı koenerji, joule
$\boldsymbol{W_{F_{W'}T}}$	Rotor karşısında enerjili sargı kaynaklı toplam koenerji, joule
$\boldsymbol{W_{F_{W''}}}$	Enerjili sargı kaynaklı açıya bağlı koenerji, joule
$\boldsymbol{W_{F_{W''T}}}$	Enerjili sargı kaynaklı açıya bağlı toplam koenerji, joule
$\boldsymbol{W'_T}$	Toplam koenerji, joule

Kısaltmalar	Açıklamalar
AD	Aksiyomatik Tasarım
AHP	Analitik Hiyerarşi Süreci
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CL	Bakır Kayıpları
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
LAT	Sınırlı Açılı Tork
LATM	Sınırlı Açılı Tork Motoru
MAOR	Maksimum Açısal Çalışma Aralığı
MC	Mekanik Açıklık
V	Hacim
W	Ağırlık

1. GİRİŞ

Günümüzde hayatın her alanında elektrik motorları kendine yer bulmuştur. Elektrik motorları besleme tipi göre, güç seviyesine göre, fiziksel boyutlarına göre birbirinden ayrılabilir. Besleme tipi olarak alternatif akım (AA) motorları veya doğru akım (DA) motorları olarak sınıflandırılabilir. Asenkron motorlar alternatif akımda çalışan en bilinen motorlar iken, fırçalı, fırçasız doğru akım motorları ise DA'da çalışan en bilinen motorlardır. Senkron motorlar ise hem AA hem de DA gerektirdiğinden çift beslemeli olarak sınıflandırılırlar. Fiziksel boyutları büyük olan motorların genelde güç ihtiyacı daha fazla olup bu motorlar, santraller, lokomotifler, gemiler veya fabrikalarda endüstriyel makineler olarak kullanılmaktadır. Daha düşük ölçekte olanlar ise otomotivde, elektrikli ev aletleri gibi daha genel amaçlı işler için kullanılmaktadır.

Gelişen teknoloji ile insanların gereksinimleri değişmekte ve dolayısıyla elektrik motorundan beklentiler de değişmektedir. Bu yüzden özel elektrik motorlarında çeşitlilik de artmakta ve var olan motorlarda iyileştirme, performans artışı sağlanmaktadır. Hem teknolojideki gelişmeler hem de yeni ihtiyaçların ortaya çıkmasıyla; örneğin insansız hava araçlarında, uzay teknolojisinde, tarayıcı başlıklarda, optik tarama, termal görüntülüme ve lazer aynalarda çok daha küçük ölçekli motorlar kullanılmaktadır. Bu motorlar söz konusu kullanım alanlarda güvenilirlik açısından kilit bileşenlerdir. Çalışma koşullarındaki zorluklara rağmen, doğru konumlandırma ve hızlı tepki vermesi beklenen motorlardır. Hassasiyetin ön planda olduğu bu tip gereksinimlerde sınırlı açılı tork motoru tercih edilir. Servo motor veya adım motoru gibi motorlarla bazı benzer görevler üstlense de sınırlı açılı tork motorları daha özel uygulamaların motorudur. Servo motorlar gibi dişli ve dolayısıyla mekanik boşluk gerektirmeyip doğrudan tahrikli olması, titreşim ve gürültünün olmaması veya step motorlar gibi belli adımlarla çalışma yerine belli aralıkta yüksek hassasiyetle çalışması sebebiyle bu motor tıbbi cihazlarda, lazer yönlendirmede, havacılıkta, savunma sanayinde, pozisyonlama ve tork gerektiren kritik özel uygulamalarda kullanılmaktadır.

Doğrudan tahrikli ve kullanım alanına özel sınırlı açılı tork motorun kullanım alanındaki şartlara göre çeşitli alternatifleri bulunmalıdır. Ancak özel uygulamalarda tercih edilmesinden dolayı endüstride sınırlı açılı tork motor çeşitliliği geleneksel motorlar kadar

fazla değildir. Bu yüzden, gelişen teknoloji ile kullanım alanının şartlarını ve isterlerini en iyi karşılayacak tasarım çeşitliliğine ihtiyaç duyulmaktadır.

Yapılan araştırma geliştirme aşamaları kapsamında hazırlanan bu tez toplamda 9 bölümden oluşmaktadır.

Bölüm 2'de çalışmanın konusu, sınırlı açılı tork motorlarının kullanım alanları, literatürde söz konusu motorla ilgili yapılan araştırmalar, çalışmanın amacı ve tezin bilime katkısı yer almaktadır.

Bölüm 3'te ele alınan motorun matematiksel denklemleri, eşdeğer devre modeli oluşturma aşamaları ve parametreler açıklanmıştır.

Bölüm 4'te motorun tasarım aşamaları ele alınmıştır. Kullanım alanındaki kısıtlamalar gözetilerek boyutlandırma ve tasarım üzerine en iyileştirme çalışmalarına değinilmiştir.

Bölüm 5'te motorun boyutlandırma aşamaları ve sonlu elemanlar metodu ile performansı incelenmiştir. Birçok alternatif tasarımın her birinden elde edilen tepe moment, sabit moment, sabit moment bölgesi incelenmiş, manyetik analizler ve geçici durum analizleri sunulmuştur.

Bölüm 6'da motorun prototip üretim aşamalarına değinilmiş olup, karşılaşılan zorluklar ve bu sorunlara uygulanan çözümler ele alınmıştır.

Bölüm 7'de motorun kontrol sistemi teorik olarak incelenmiş, gerçek ortamda kontrol uygulaması için gerekli donanımlar ortaya konmuş, yazılım desteği ile pozisyon denetimi aşamaları açıklanmıştır.

Bölüm 8'de motorun analitik sonuçları, sonlu eleman analiz çıktıları ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Bölüm 9'da yapılan çalışmaların ayrı ayrı sonuçlarının değerlendirilmesi, gelecek de yapılması düşünülen tasarımlarda öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE ÇALIŞMANIN AMACI

2.1. Literatür Araştırması

Literatürde sınırlı açılı tork motoru (LATM) geliştirilmesine yönelik yapılan araştırmalar, geleneksel DC fırçalı-fırçasız tip motorlar veya AC motorlara göre oldukça azdır. Araştırmalarda karşılaşılan kaynaklarda genellikle iki kutuplu sınırlı açılı tork motorlarının oluklu ve oluksuz tiplerinin incelenmesi, konum denetimi yapılması, fiziksel boyutları, optimizasyonları üzerinedir.

Widdowson vd. (1991), yüksek enerjili kalıcı mıknatıslar kullanarak o yıla ait bilgisayar destekli tasarım (CAD) programları ile bir takım optimizasyon çalışması yapmıştır. Maksimum tork/amper ve minimum bakır kayıp için iki ayrı çalışma yürütmüştür. Ancak motorda birden fazla değişkenin eş zamanlı gözlenebilmesi için LATM'nin geniş kapsamlı doğrulamayla gelişmiş bilgisayar destekli optimizasyonu gerektiğini önermiştir [1].

Krishna ve Kannan (1996), çok yüksek çözünürlüklü radyometre (VHRR) tarama ayna mekanizmasında kullanılmak üzere LATM tasarımı üzerine testler gerçekleştirmiştir. Sınırlı dönüş aralığında yüksek performansla çalışabilirliğini göstermiştir. Oluklu ve oluksuz tip LATM'lerde performans karşılaştırmasında, oluklu tiplerde daha yüksek tork sabiti elde etmesine rağmen, manyetik sürtünme, demir kayıpları ve oluk nedeniyle tork dalgalanmasının daha fazla olduğunu göstermiştir [2].

Zhang vd. (1999), LATM'nin parametrelerini blok diyagramda belirterek, sonlu eleman analizi veya sayısal analiz yapılmadan dinamik performansı doğru tahmin etmeye çalışmışlar ve basitleştirilmiş tahrik sisteminde faydalı olduğunu önermişlerdir [3].

Chunyang vd. (2003), LATM'lerin optik sistemlerde tarama görevinde kullanımında kontrol tasarımı geliştirmişlerdir. Tekrarlı kontrol olarak adlandırılan yöntem ile motorun izleme performansında geleneksel denetleyicilerden üstünlükleri tespit etmişlerdir [4].

Tsai vd. (2009), küçük ölçekli gaz türbin motorlarının yakıt akış kontrolünü sağlamak üzere, toroidal olarak sarılmış stator ve iki kutuplu rotora sahip fırçasız LATM tasarlamıştır.

Konumlandırma performansı için DSP tabanlı konum denetleyicisi ile kapalı devre yakıt kontrol sistemi oluşturmuştur. Yapılan deneyler ile yakıt kontrol sisteminde tasarımın etkinliğini ve kullanışlılığını ispatlamıştır [5].

Bencheikh vd. (2010), Avrupa uzay ajansı talebi üzerine LAT aktüatörü tasarımı yapmışlardır. Hassas noktalama uygulamaları için düşünülen bu motorda tork hassasiyetini ve tork sabitini artırabilme adına hava boşluğu ve toroidal sargı incelenmiştir. Testler ile uzay gereksinimlerinin karşılandığını sunmuştur [6].

Ahmet vd. (2010), araçlarda mekanik aktüatörlerin modellemesini tork motoru özelinde ele almış, bu amaçla pankek tipi motor tasarımını incelemiş ancak matematiksel modelleme gerekliliğinden parametrik model üzerine çalışılması gerektiği sonucuna varmışlardır [7,8].

Obreja ve Edu (2011), sınırlı açılı tork motorlarında manyetik akı yoğunluğu dağılımını incelemişler ve daha yüksek akım da oluşan manyetik doygunluğun, tork sabitinde düşüşe neden olduğunu göstermişlerdir [9].

Jagadeeshwaran vd. (2013), tarama ayna mekanizmalarında kullanılabilecek sınırlı açılı tork motorlarında kontrol elektroniği üzerine çalışmışlardır. +-20 derecelik çalışma bölgesinde farklı hızlarda yapılan testlerde 0,2 derecelik konum doğruluğu yakalamışlardır [10].

Hekmati ve Mirsalim (2013), trapez kesitli stator ile çift taraflı oluksuz eksenel akılı sabit mıknatıslı motorun modifiye edilerek sınırlı açılı tork motoru tasarımı incelemişlerdir. Tasarımın incelenmesinde sonlu eleman analizi ve simülasyonlardan yararlanılmış ve ortaya çıkan döner aktüatörün geleneksel çift taraflı oluksuz eksenel akılı motorlarla, radyal tip sınırlı açılı motorlarla ve pankek tiplerle kıyaslamasını yapmışlardır. Trapez kesitli yeni yapıda radyal akılı motorlara göre aynı hacim ve giriş gücünde tork artışı gözlemlerken pankek tipine göre olumlu sonuç alamamışlar fakat daha doğrusal tork çıkışı gözlemişlerdir [11].

Roohnavazfar vd. (2014), sınırlı açılı tork motorunun tasarım parametrelerinde birtakım değişiklikler yaparak en iyi tasarım çözümü için analitik hiyerarşi süreci ve aksiyomatik tasarım yöntemlerini uygulamıştır. Her iki çözümleme yöntemini karşılaştırmış ve sonuç

olarak aksiyomatik tasarımda uzman gereksiniminin az olması ancak hızlı sonuca ulaştırdığını tespit etmişlerdir [12].

Zou vd. (2014), segmentlere ayrılmış manyetik kutuplu ve iç sargılı oluksuz LATM tasarımı gerçekleştirmişler ve manyetik doyumu gözeterek sabit tork katsayısı elde etmişlerdir [13].

Li vd. (2015), çift Halbach dizisi ile yeni bir sınırlı açılı tork motoru tasarımı ile ilgilenmişlerdir. Parçacık sürüsü optimizasyonu tekniği ile tork artışı amaçlanmış, geometrik sınırlar gözetilerek rotor ataletinde düşüş ile verimlilik artırmışlardır. Simülasyon düzeyinde kalan bu çalışma ile yüksek güç/ağırlık oranı ve kararlı tork gözlemlemişlerdir [14].

Zarandi vd. (2015), toroidal sargılı iki kutuplu DC LATM tasarımında yay tip kutup modelini incelemişlerdir. Ele aldıkları geleneksel tip LATM'de analitik ve sonlu eleman analizi (FEA) yapmışlar ve analitik hiyerarşi süreci ile prototip oluşturmuşlardır. Rotor kutup yapısında dönen parçaların hacmini ve ağırlığını azaltmak amacıyla rotor kutbunu parçalara ayırmışlar ve sonuç olarak segment tip motorda tork da bir miktar azalma olsa da maliyet düşüşü elde etmişlerdir [15].

Chen vd. (2015), geniş açılı çalışma uygulamaları için silindirik Halbach manyetik dizine sahip tek fazlı LATM ele almışlardır. Motorda açıya bağlı doğrusal olmayan akım-tork ilişkisini yönetmek için çıkış geri besleme kontrolü önermişler ve hassas kontrolün sağlandığını prototip üretimde doğrulamışlardır [16].

Yu vd. (2015), oluklu tip LAT (sınırlı açılı tork) motorlar için maksimum açısal çalışma aralığı (MAOR) tahminine yönelik çalışma yapmışlardır. Oluklu tipler için yapılan test ve analizlerde kutup sayısının artmasının MAOR'da azalmaya sebebiyet verdiğini göstermişlerdir [17].

Zou vd. (2015), oluklu tip LAT motorlar için sargı yuvası diş yapısında değişiklikler denemiş ve tork performansında geleneksel tip LAT motorlara kıyasla iyileştirme gözlemlemiştir [18].

Jibin vd. (2016), çalışma bölgesinde sabit tork çıkışı veren hareketli bobin tip de yeni bir LATM tasarımı üzerine çalışmışlardır. Önerilen tasarımla, dinamik tepkide hız ve tork/atalet oranında artış gözlemişlerdir [19].

Ionica vd. (2016), sınırlı açılı tork motorlarında 2D ve 3D analizler ile malzemenin doyum sınırları seviyelerinde bazı karşılaştırmalar yapmışlardır [20].

Wu vd. (2016), Parçaçık sürüsü optimizasyon tekniği, toroidal sargılı servo motorlar için sınırlı açılı uygulamalarda kullanılmış yöntemin modellemelere uygunluğunu tespit etmişlerdir [21].

Jagadeeshwaran vd. (2016), sınırlı açılı tork motorlarında kullanılan mıknatısların radyal, paralel ve düz zeminli tipleri için bir takım karşılaştırma yapmış, yaklaşık aynı boyuttaki mıknatısların geometrik farklarının motor performansına etkisini incelemiştir. Konum denetimi ve hız denetimini belli değerlerde test etmiş ve yakın sonuçları sunmuştur [22].

Wu vd. (2017), küçük aralıklı çalışma durumları için oluksuz LATM tasarımı önermiştir. Tork-atalet oranının yüksek olması amacıyla Halbach dizi tercih edilmiş ve manyetik eşdeğer devre oluşturarak analitik model üretilmiştir. Eşdeğer devre parametreleri matris biçiminde düzenlenerek tork sabiti doğrusallığı elde edilmiştir. Prototip üretim sonunda görülen yüksek doğrusallığın servo kontrol uygulamalarında elverişliliği tespit edilmiştir [23].

Hekmati vd. (2017), oluksuz radyal akılı geleneksel tip iki kutuplu iç rotorlu LATM ile iki kutuplu dış rotorlu LATM yapısını incelemiştir. Her iki tip motorun matematiksel modellemesi FEA ile doğrulandıktan sonra performans karşılaştırması yapmıştır. Aynı tepe tork ve sabit tork bölgesi için iki kutuplu dış rotorlu LATM'nin geleneksel tip iki kutuplu LATM'ye göre daha düşük hacim ve giriş gücü ile elde edildiği sonucuna varmışlardır. İki kutuplu tasarımlarda, dış rotor tip LATM'nin kolay sarım işçiliği ve daha az malzeme gerektirdiğini göstermişlerdir [24].

Lee vd. (2017), havacılık endüstrisi veya askeri amaçlı kullanılan LAT motorlar için rotor kutup açısında birtakım değişiklikler yaparak tork analizi yapmıştır. Stator, rotor ve gövde arasındaki saçaklanma etkisini de içeren üç boyutlu manyetik akı dağılımları incelemiş ve

sonuç olarak kutup açısına ek manyetik dağılıma etki edecek diğer parametrelerin değişiminin incelenmesi gerektiği sonucuna varmıştır [25].

Guodaong vd. (2017), oluklu tip sınırlı açılı tork motorlarında alan-devre kuplaj yöntemi ile pozisyon izleme ve çalışma sıcaklığını dinamik olarak değerlendirmek istemişlerdir. Simülasyon ve deneysel sonuçlarla yapılan karşılaştırmalarda konum hatasında 8%, sıcaklık hatasında 3 derece fark tespit etmişlerdir [26].

Krishnan vd. (2018), uzay araçları uygulaması için geniş açılı tork motor tasarımlarını dört farklı tipte incelemişlerdir. Sonlu eleman analizleri ile yapılan tasarımlardan yeni bir iki kutuplu motorun tek komütasyonla 270 dereceye kadar tork çıkışı verebildiğini ve bu tip motorun uzay aracında işaretleme uygulamasında kullanılabileceğini göstermişlerdir [27].

Yu vd. (2019), asimetrik diş yapısına sahip yeni bir radyal akılı LAT motor tasarımı üzerine çalışmışlardır. Yapılan manyetik analizler ve sonlu eleman analizleri sonucunda, aynı hacim ve giriş gücündeki geleneksel tip de LATM'ye göre tork da %20 iyileşme ve daha düşük vuruntu ve daha az malzeme doyumu sonucuna ulaşmışlardır [28].

Li vd. (2020), düzensiz oluk sayısında asimetrik sargı şeması ile yeni bir LATM önermişlerdir. Tasarım parametrelerinin motor performansı üzerindeki etkisini sayısal ve deneysel olarak sunmuşlar ve çalışma bölgesinin genişliğinde bir miktar artış tespit etmişlerdir. Tork-açı karakteristiğinde geleneksel tip LATM'ye göre olumsuz durum görülmeden benzer çıkışlarda daha az bakır kaybı tespit etmişlerdir [29].

Guodong vd. (2020), LATM'de doğrusal olmayan matematiksel modelleme ile torkun manyetik akı ile ilişkisini ve endüktansın akım ve rotor pozisyonuna göre tepkisini yüksek doğrulukla ölçülmesini önermişlerdir. Önerilen model ile, gerçek test ortamı olmadan LATM'nin konum izleme performansını değerlendirebilmenin mümkün olabileceğini sunmuşlardır [30].

Zhou vd. (2020), havacılıkta kullanılan yakıt valflerinin kontrolü için 4 kutuplu sınırlı açılı tork motoru tasarımı üzerine çalışmışlardır. Oluklu tipte 3 farklı diş ve mıknatıs topolojisinde sınırlı açılı tork motorlar üzerine karşılaştırmalar yapmış, manyetik sıfır geri dönüşlü özel tasarımda elde edilen motorun, geleneksel tipte olanlara göre daha fazla tork

kazanımını göstermişlerdir. Torktaki doğrusallık bozulsa da havacılık uygulamalarında daha uzun ömürlü ve yüksek torklu tasarımlarını öne sürmüşlerdir [31].

Lee vd. (2021), toroidal sargılı ancak oluksuz sınırlı açılı tork motorları için tasarım kolaylığını göstermek amacıyla çalışma yapmışlar ve parametrelerin iyileştirilmesiyle en optimum sonuca ulaşılabileceğini vurgulamışlardır [32].

Ma vd. (2021), oluklu sınırlı açılı tork motorları için ortaya çıkan tork dalgalanmasını tahmin etmek ve bir miktar azaltabilmek için çalışmalar yapmış, önerilen yaklaşımla vuruntu moment genliğinde bir miktar azalma kaydetmişlerdir [33].

Yu vd. (2021), genetik algoritma ile oluklu statora sahip sınırlı açılı tork motorunda torkda dalgalanmaları belli oranda azaltmışlardır [34].

Pengcheng vd. (2021), düzensiz oluk sayısı ve asimetrik sargı yapısına sahip sınırlı açılı tork motoru üzerine çalışmalar yapmışlar ve önerdikleri yeni tasarımda ağırlık ve hacimde azalmalar tespit etmişlerdir [35].

Zhan vd. (2022), sınırlı açılı titreşim tork motorları üzerine çalışma yapmışlar, oluklu tipte özel bir diş yapısı ile önerilen tasarımın elektrikli diş fırçası (sonik motor) olarak kullanılabilirliğini göstermişlerdir. Ayrıca basit imalatı ve kendi kendine yay gibi geri dönme özelliği ile motoru elektrikli ev aletleri için önermişlerdir [36].

Chen vd. (2022), yakıt ölçüm cihazında kullanılmak üzere ele alınan LATM'nin kontrol stratejisi üzerine çalışma yapmışlardır. CPSO tabanlı PID denetimle modelde kontrol performansında artış göstermişlerdir [37].

Literatür araştırmalarında çeşitli amaçlara yönelik sınırlı açılı tork motoru tasarımları ele alınmıştır. Bu amaçlar çoğu zaman tork da dalgalanmayı azaltmak, bazen de mümkün olan en yüksek torku almaktır. Genelde 2 kutuplu LAT motorlar ele alınmış olup, sargı yapısının değişmesi, stator veya rotorun geometrisinde birtakım değişiklikler ile performans karşılaştırmaları sunulmuştur.

2.2. Çalışmanın Amacı

Havacılık, uzay ve özellikle askeri alandaki uygulamaların hızlı değişimi LAT motorlardan performans açısından beklentileri değiştirmiştir. Motorun kullanım ortamının değişimi sürekli yeni tasarım yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Üretici firmaların envanterine bağımlı olma durumu yeni uygulama alanı geliştirmeye engeldir. Ayrıca literatür taramasında motor tasarımının sayısal analizinde kutup sayısının ve motoru oluşturan parametrelerin değişiminden ve doğrusal olmayan değişkenlerin getirdiği zorluklardan dolayı sayısal analizin yetersiz kaldığı tespit edilmiştir. Bu yüzden motor performansı ölçmede bazı karar verme araçları veya bazı blok diyagram matris oluşturma yöntemleri tercih edilmiştir.

Yapılan araştırmalarda sınırlı açılı tork motorun matematiksel modellemesinde geleneksel iki kutuplu yapının ele alındığı görülmüştür. Kutup sayısının ve kutup geometrisinin değişiminin matematiksel modellemeye etkisi ve eşdeğer devre analizi, torku etkileyen bileşenlerin tespiti konusunda önemlidir.

Yapılan araştırmalarda sınırlı açılı tork motorunu oluşturan bileşenlerin geometrik farklılıklarının performansa etkisi sunulmuş ancak tüm bileşenlerin birlikte değişiminin etkisi gereklidir. Çünkü motorun lineer olmayan davranışından dolayı farklı geometrideki mıknatıslardan seçilen en iyi geometri, motorun iç çapı, dış çapı, stator yapısı, kutup sayısı, boşluklar, kalınlık ve sargı yapısı değişiminde en iyi geometri olmayabilir. Bu yüzden tüm değişkenlerin değişiminin birlikte etkisi incelenmelidir.

Motorun sabit tork bölgesinde salınım olmaması ve birim hacimde en yüksek tork, arzu edilen durumdur. Tepe torkun %80'ni ve üzerindeki bölge, sabit tork bölgesi olarak gösterildiği literatür araştırmalarında görülmüştür. Bu oranda artış daha doğrusal tork anlamına gelmektedir. Bu amaçla %80 ve üzeri tork da daha geniş açıda çalışma veya aynı çalışma bölgesinde daha lineer tork üretimi için tasarım iyileştirilmelidir.

Literatür taramasında az kaynak olması ve motorun askeri amaçlı da kullanımından ötürü ticari gizliliği bulunduğu görülmüştür [3,5]. Yukarıda da bahsedilen bu gerekçelerden dolayı kullanım alanına özel yeni tasarımlara ışık tutmak, farklı kutup sayısında ve motoru oluşturan bileşenlerin farklı geometride olması durumunda motor performansını manyetik eşdeğer devrede modellemek, paket programlar aracılığıyla simülasyonlarla performansı

sunmak ve kullanım alanın kısıtlarıyla uygun, doğrudan tahrikli tasarım oluşturmak temel amaçtır. Prototip üretimden kontrol sürecine hassas konum ile pozisyonlama gerçekleştirmek bir diğer amaçtır. Nihai amaç ise, oluşturulan tasarımın az sayıda üreticinin envanterindeki motor tipleri ve literatürde ele alınan LAT motorlar ile karşılaştırma yapıp, benzer giriş gücü ve benzer hacimdeki motorlar arasından tork-pozisyon eğrisinde daha lineer ve birim hacimde daha yüksek tork elde etmektir.

2.3. Çalışmanın Bilime Katkısı

Sınırlı açılı tork motorunun kullanım alanın farklılığından dolayı her yerde aynı performans istenmemektedir. Bulunduğu yerde bazen birim hacime göre en yüksek torku vermesi beklenirken sabit çalışma bölgesinde bir miktar salınım yapması sorun olmayabilir, bazen de salınıma tolerans vermeyip tork ikinci öncelik olabilir. Bir başka durumda da hem salınımsız hem kayda değer tork istenebilir. Yapılan çalışma ile kullanım alanına ve amacına özgü yeni bir sınırlı açılı tork motoru tasarımlarına yol gösterilmiştir.

Sınırlı açılı tork motorunun farklı kutup sayılarında ve geometride modellenmesinde yapılacak analitik incelemenin sonuçlarının tutarlılığı görülmüş, bu sayede ileride yapılacak yeniliklere ve iyileştirmelere ön adım olması beklenmektedir.

Tasarımda ele alınan modelin, aynı boyuttaki literatürdeki alternatifleri ve tedarikçilerin envanterindeki ürünleri ile karşılaştırıldığında birim hacimdeki torkunun %37 daha yüksek olduğu ve %95 doğrusallıkla sabit tork çalışma bölgesi sunduğu simülasyon çalışmalarında görülmüş olup, hassas konum denetimi de prototip sonucunda gerçek zamanlı olarak gösterilmiş, performansını kanıtlamış yeni bir motordur.

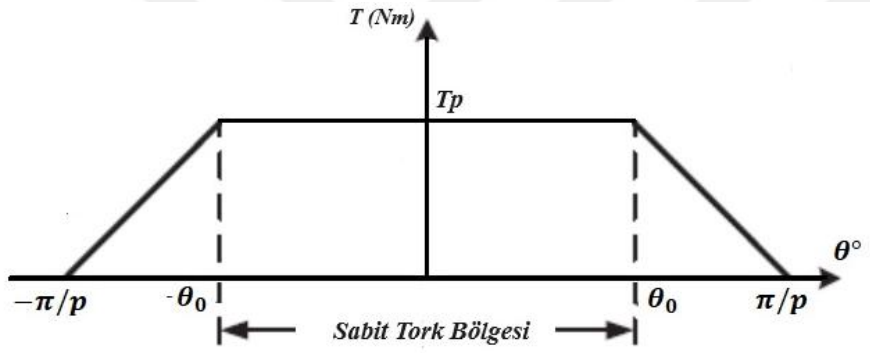
3. TOROİDAL SARGILI SINIRLI AÇILI TORK MOTORLARI VE MOTORA AİT DİNAMİK VE ELEKTROMANYETİK DENKLEMLER

3.1. Toroidal Sargılı Sınırlı Açılı Tork Motorları

Sınırlı açılı tork motorları (LATM) doğrudan tahrik sistemine bağlanabilen, sınırlı dönüş gerektiren uygulamalarda tork üreten elektromanyetik aktüatörlerdir. Küçük elektrik akımını 180 dereceden daha az açısal harekete dönüştüren özel bir elektrik motorudur [3-5, 38]. İnsansız hava araçlarında, askeri ve uzay teknolojisinde, optik tarama, görüntüleme, lazer aynalarda, servo valflerde aç-kapa işlemlerinde, referans sinyali takip eden küçük ölçekli uygulamalarda kullanılmaktadır [15,19,20,39-41]. Sınırlı hareket gerektiren bu uygulamalarda kullanım gerekçesi, yüksek tork/güç oranı, birim hacim ve ağırlıkta yüksek güç, az mekanik bileşenle basit yapısı, düşük maliyet ve yüksek güvenilirlik sayılabilir [22, 24, 26, 28, 42]. Ayrıca servo motorlardaki gibi dişli mekanik bileşenler olmadığından uzay teknolojisinde örneğin vakumlu ortamda aşınma, yıpranma olmadan kullanılabilmektedir [5,22, 43-45]. Uygulama yerlerinde sistem yapılandırılmasına kolayca uyarlanabilmesi ve ilave donanıma ihtiyaç duymaması geleneksel motorlara kıyasla hassas kontrol avantajı sağlar. Düşük ataletleri ile son derece hızlı tepki süresi ve yüksek hassasiyet ile doğru konumlandırma ayırt edici önemli bir özelliğidir. Komütasyon ve mekanik anahtarlamanın olmayışı bakım kolaylığı sağlamakta ve güvenilirliği artırmaktadır [16, 28, 36, 37].

Sınırlı açılı tork motorun yapısı tipik bir fırçasız DC motora benzemektedir. Sargılar stator üzerinde taşınırken, mıknatıslar rotora monte edilmektedir. Manyetik akının dolaşımı yönünden bakıldığında genellikle radyal akılı LAT motorlar kullanımdadır. Radyal akı yoluna sahip LATM'ler de iki çeşit tip kullanılır. İlki, sargıların oluk içine gömüldüğü oluklu tasarım, diğeri ise sargıların doğrudan stator üzerine sarıldığı toroidal sargılı tasarımdır. Oluklu tasarımda daha yüksek tork sabiti elde edilebiliyorken, manyetik sürtünme ile demir kayıpları olmasından dolayı tork dalgalanması daha fazla görülebilmektedir. Toroidal sarımda ise hava boşluğundaki değişmeyen manyetik relüktans yolu ile tork dalgalanmasının olmaması, dolayısıyla vuruntusuz ve hassas konumlandırmaya daha uygun olması tercih edilme sebebidir [2, 5, 46].

Toroidal sargılı LATM'ler hareketli mıknatıs ve sargıların taşındığı statordan oluşmaktadır. Stator ve içerisinde rotor, eş merkezli yapıya sahip olup radyal kuvvetin birbirini dengelediği durum da iç rotor tip LATM olarak adlandırılır. Toroidal olarak sarılmış iletkenlerden doğru akım geçtiğinde oluşan manyetik akı ile sabit mıknatısların ürettiği manyetik akı arasındaki etkileşim, motorun temel çalışma prensibini oluşturur. Mıknatısın ürettiği manyetik akı sabit olduğundan LATM hareket yönünü sargılardan geçen akımın yönü belirler. Oluşan elektromanyetik tork ise sargıların ürettiği manyeto motor kuvvet, mıknatısın güç yoğunluğu ve tasarım geometrisine bağlıdır. LATM'nin çalışma aralığı kutup sayısına bağlıdır. Motorun ayırt edici özelliklerinden sabit çalışma bölgesi ise toroidal bobin yay uzunluğu ve kutup yay uzunluğuna bağlıdır. Şekil 3.1'de ideal durumdaki LATM'nin tork-açı eğrisi verilmiştir.



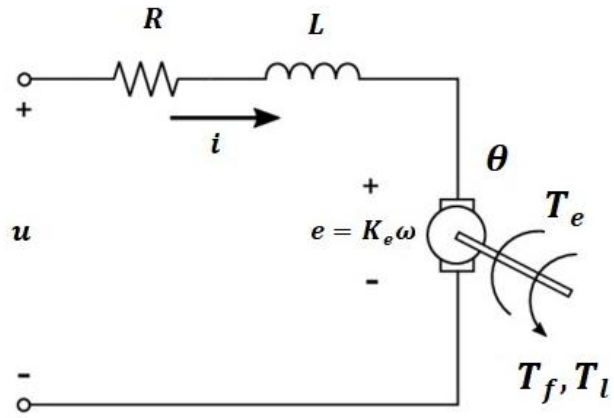
Şekil 3.1. LATM tork-rotor konum açısal değişimi

$$\theta_0 = \frac{\theta_s - \theta_r}{2} \tag{3.1}$$

$$\theta = \frac{\pi}{p} \tag{3.2}$$

olarak ifade edilir. Eş. 3.1'de θ_s ve θ_r sırasıyla sargı ve kutup yay uzunluğu açısı olup, Eş. 3.2'de p kutup sayısıdır. Şekil 3.1'den ve eşitliklerden de görüleceği üzere kutup sayısındaki artış çalışma bölgesini azaltıyorken, bobin ve kutup yay uzunlukları sabit tork çalışma bölgesini doğrudan etkilemektedir. Buradan hareketle, 2 kutuplu yapılarda ±90 derecelik çalışma aralığı varken, 4 kutuplu yapılarda ise ±45 derecelik çalışma bölgesi oluşmaktadır.

3.2. LAT Motorlara Ait Dinamik ve Elektromanyetik Denklemler



Şekil 3.2. LATM eşdeğer devresi

Sınırlı açılı tork motoru bir doğru akım motoru olduğundan eşdeğer devresi Şekil 3.2'deki gibi gösterilebilir ve LATM'ye ait dinamik eşitlikler aşağıdaki gibidir.

$$u = iR + L\frac{di}{dt} + K_e\omega \tag{3.3}$$

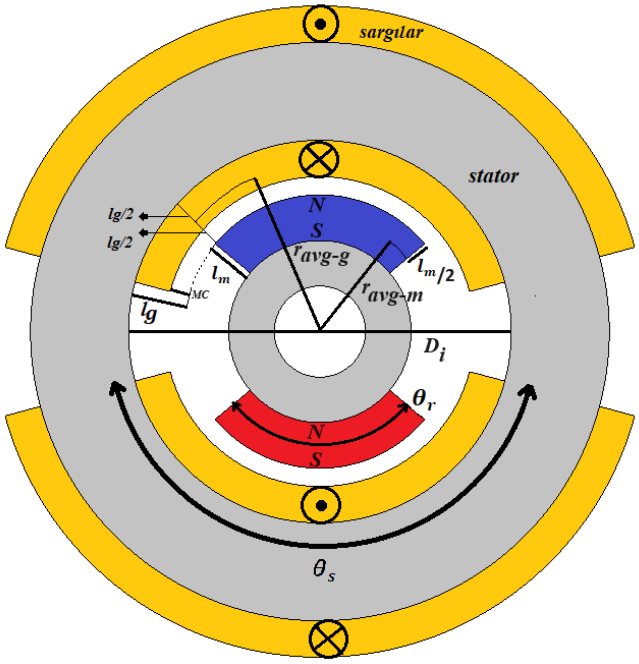
$$T_e = J_m\frac{d\omega}{dt} + T_f + T_l \tag{3.4}$$

Eşitliklerde u sargı gerilimi, i sargı akımı, R ve L sargı direnci ve endüktansı, K_e ters EMK sabiti, θ ve ω rotor konumu ve hızı, J_m rotor eylemsizlik, T_f, T_l, T_e sırasıyla sürtünme, yük ve elektromanyetik torktur. Sürtünme ve yük tork göz ardı edildiğinde Eş. 3.1 ve Eş. 3.2'den uzay vektörü yaklaşımı ile;

$$\begin{bmatrix} \frac{d_i}{d_t} \\ \frac{d_\omega}{d_t} \\ \frac{d_\theta}{d_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L} & \frac{-K_e}{L} & 0 \\ \frac{K_t}{J_m} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L^{-1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \tag{3.5}$$

sonucuna ulaşılır. K_t tork sabitidir. Manyetik alan sabit olduğundan üretilen tork, sargılara uygulanan akımla doğru orantılıdır [4].

Elektrik makinalarında olduğu LATM'de de motorun performans karakteristiklerini belirlemede manyetik eşdeğer devre çözümlemesi yapmak gereklidir. Şekil 3.3'te gösterilen geleneksel 2 kutuplu yay tip mıknatısa sahip LATM için manyetik eşdeğer devre oluşturup dolaşımdaki manyetik akıyı tespit etmek gerekir [15, 50-52]. Şekil 3.3'te birbirine zıt yönde sarılmış sargılar ve zıt polarite de mıknatısların dizilimi görülmektedir. Stator iç çapı D_i, mıknatısların ürettiği manyetomotor kuvvette etkili olan radyal uzunluk veya akı yolu ise l_m olarak gösterilmiş, sargılar ile mıknatıs arasında kalan mekanik açıklık MC ve sargı kalınlığı ve mekanik boşluğu kapsayan hava aralığı l_g olarak gösterilmiştir. Sargı yay uzunluğu θ_s ve kutup yay uzunluğu ise θ_r olarak belirtilmiştir.



Şekil 3.3. İki kutuplu yay tip mıknatıslı LATM

LAT motorlarda akım taşıyan sargıların oluşturduğu manyetik alan ile sabit mıknatısların ürettiği manyetik akı etkileşimi, hava aralığında bir kuvvet oluşturur. Dairesel dizilimde karşılıklı bu kuvvetler tork üretir. Üretilen kuvvetin yönü, akım yönü ile belirlenir. Hava aralığında oluşan maksimum kuvvet ve dolayısıyla neden olduğu maksimum tork, hava aralığında üretilen manyetik akı ile orantılıdır. Manyetik akı değeri ise eşdeğer devrede var olan elektromotor kuvvet ve manyetik akı yolundaki relüktans ile ilişkilidir. Bu yüzden manyetik eşdeğer devrede relüktansları belirlemek gerekir. Stator relüktansı ve mıknatısları taşıyan rotorun relüktansı, hava aralığı relüktansına oranla oldukça küçük olduğundan ihmal edildiğinde, devrede mıknatıslar ve hava aralığındaki relüktanslar incelenmelidir. Bilindiği

üzere bir malzemenin manyetik relüktansı, aşağıdaki denklemde ifade edildiği gibi, manyetik akı yolunun uzunluğu ile doğru orantılı, malzemenin geçirgenliği ve kesit alanı ile ters orantılıdır [32].

$$\Re = \frac{l}{\mu.A} \tag{3.6}$$

Eş. 3.6'da μ manyetik geçirgenlik, A kesit ve l akı yolundaki uzunluktur. Yay şeklindeki hava aralığı ve yay şeklindeki mıknatıs için akı yolundaki kesit hesabında ortalama yarı çap hesaba alınmıştır.

$$r_{avg.g} = \frac{D_i - l_g}{2} \tag{3.7}$$

$$r_{avg.m} = \frac{D_i}{2} - l_g - \frac{l_m}{2} \tag{3.8}$$

Eş. 3.7 ve Eş. 3.8'de $r_{avg.g}$ ve $r_{avg.m}$ sırasıyla hava aralığı ve mıknatısın manyetik akı yolundaki kesitinin ortalama yarıçapıdır [47]. Manyetik akı yolundaki kesit ise, radyan cinsinden kutup açısı ve motorun eksenel uzunluğu (kalınlık) hesaba katıldığında aşağıdaki eşitliklerdeki gibi belirlenebilir.

$$A_g = r_{avg.g}\theta_r L_a \tag{3.9}$$

$$A_m = r_{avg.m}\theta_r L_a \tag{3.10}$$

Eş. 3.9 ve Eş. 3.10'da A_g ve A_m sırasıyla yay şeklindeki hava aralığı ve mıknatısın akı yolundaki kesitidir. L_a motorda yükseklik veya kalınlıktır. Hesaplanan kesitler ile hava aralığı ve mıknatısın relüktansları;

$$\Re_g = \frac{l_g}{\mu_0 x(A_g)} \tag{3.11}$$

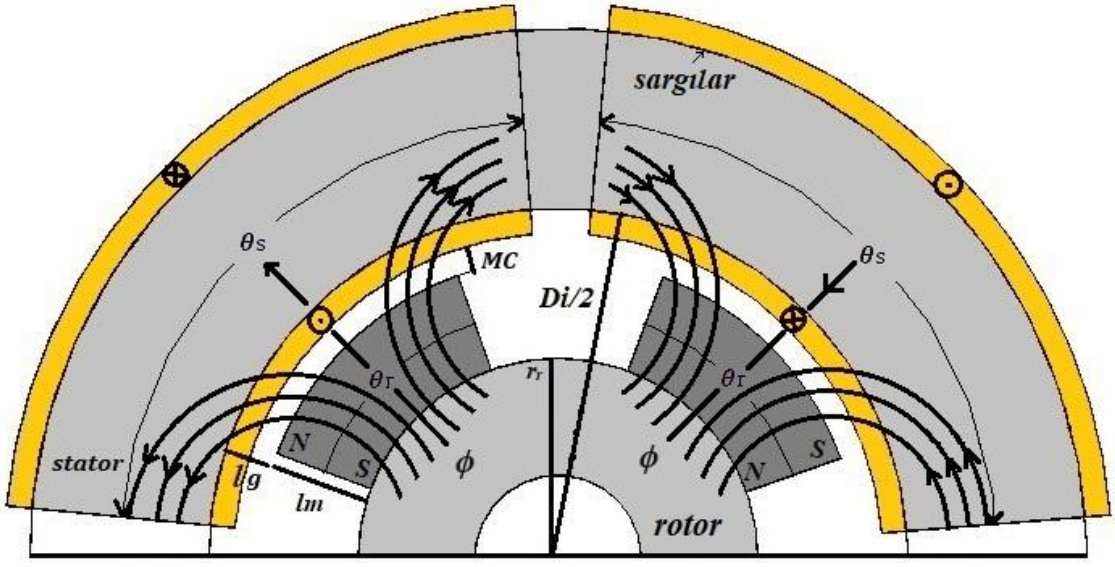
$$\Re_m = \frac{l_m}{\mu_0 x \mu_m x(A_m)} \tag{3.12}$$

şeklinde bulunur. Denklemde μ_0 ve μ_m sırasıyla boşluğun ve mıknatısın manyetik geçirgenlik değerleri olup, $\Re_g$ ve $\Re_m$ hava aralığı ve mıknatısın relüktanslarıdır. Mıknatıslardan kaynaklanan manyetik akı ise devrede üretilen manyeto motor kuvvetin relüktansa oranı olup manyetik akı;

$$\phi = \frac{F_M}{\Re} = \frac{H_c l_m}{\Re_g + \Re_m} \tag{3.13}$$

olarak tespit edilir [47-49]. Eşitlikte F_M ve H_c sırasıyla mıknatısın manyeto motor kuvveti ve koersif kuvvet değerleridir.

Manyetik akının yönü ve büyüklüğü manyetik eşdeğer devre analizinde incelenmesi gereken durumdur. Aşağıda 4 kutuplu LATM için yarım kesiti gösterilen LATM verilmiştir. Şekil 3.4'de görüleceği üzere mıknatıslarda üretilen manyetik akı kutup yönlerine göre dağılım göstermektedir.



Şekil 3.4. Dört kutuplu yay tip mıknatıslı LATM yarım kesit

Mıknatısın ürettiği manyetik akının büyük çoğunluğu önce hava aralığına sonra sargılı stator malzemesine sonra diğer komşu kutuptaki hava aralığına ve mıknatısa ulaşarak devresini tamamlar. Sargılar enerjisiz olduğunda simetrik dizilime sahip kutuplardan geçen manyetik akının her iki yana yaklaşık eşit ve simetrik dağıldığı varsayılabilir. Buradan hareketle, manyetik eşdeğer devre çözümlemesinde kolaylık sağlaması açısından mıknatıs ve hava

aralığının radyal olarak ikiye ayrıldığı sonucuna varılır. Bu durumda relüktanslar aşağıdaki eşitlikteki gibi olur. Kesitlerin yarısı dikkate alındığında relüktanslar iki katına çıkmaktadır.

$$\Re_{gg} = \frac{l_g}{\mu_0 x(A_g/2)} \tag{3.14}$$

$$\Re_{mm} = \frac{l_m}{\mu_0 x \mu_m x(A_m/2)} \tag{3.15}$$

Eş. 3.14 ve Eş. 3.15'te $\Re_{gg}$ ve $\Re_{mm}$ sırasıyla hava aralığı ve mıknatısın yarım kesite karşılık relüntanslarıdır. Hava aralığında kuvvet ve sonucunda döner hareket oluşması için sargılardan akım geçmesi gerekmektedir. Sargılardan geçen akımın yönüne göre stator malzemesinden geçen manyetik akı bir yönde yoğunlaşır. Akımın yönü değiştiğinde lineer olmayan malzemenin manyetik doyuma yaklaşan bölgesi de değişmektedir. Devrede manyeto motor kuvveti, mıknatıs ve enerjili sargılardan oluşur. Aşağıda mıknatıs ve sargıların manyeto motor kuvvetlerinin eşitlikleri verilmiştir [11, 28].

$$F_M = H_c l_m \tag{3.16}$$

$$F_w = N_s I_s \tag{3.17}$$

Eşitliklerde F_M ve F_w sırasıyla mıknatıs ve sargıların ürettiği manyeto motor kuvveti iken N_s sarım sayısı, I_s ise stator üzerine sarılı iletkenden geçen akım değeridir. Manyeto motor kuvvetler ve manyetik akı yolunun belirlenmesi ile manyetik eşdeğer devre 4 kutuplu sınırlı açılı tork motoru için Şekil 3.5'teki gibi oluşturulmuştur. Sargıların ürettiği manyeto motor kuvvet olan F_w, kutup karşısındayken kutup yay oranı kadar etki eder.

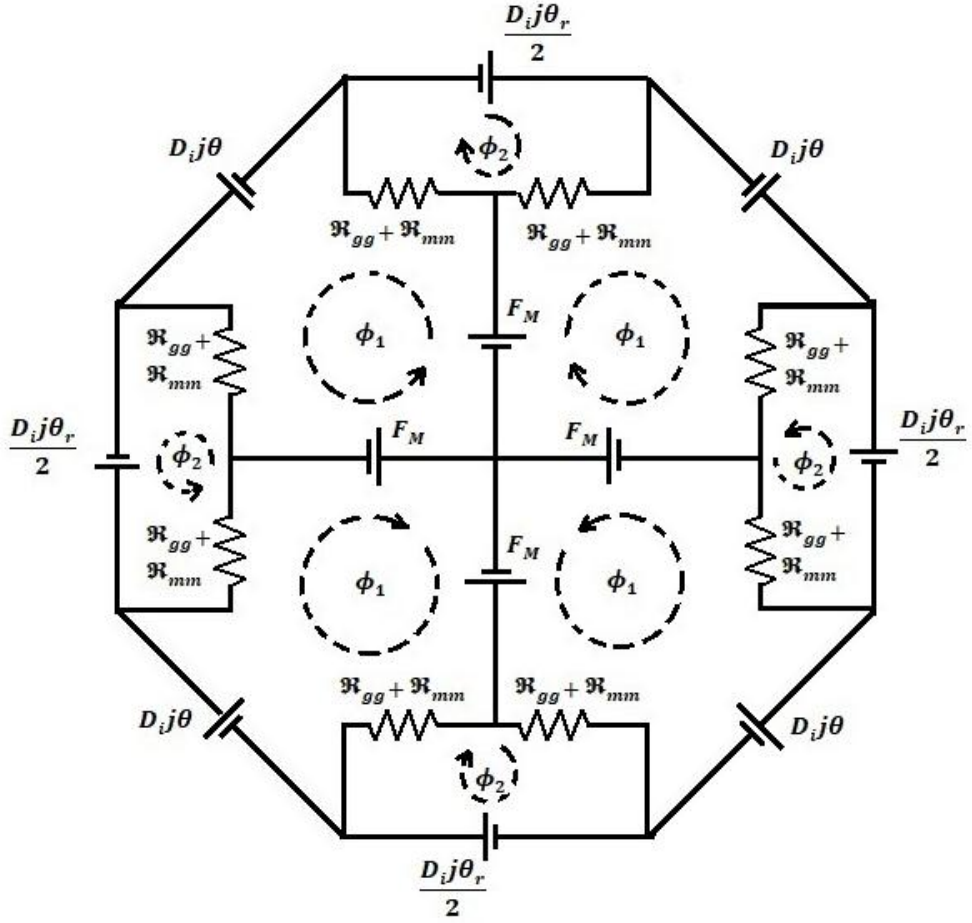
$$F_{W'} = F_w \frac{\theta_r}{\theta_s} = \frac{N_s I_s}{\theta_s} \theta_r \tag{3.18}$$

Eş. 3.18'de $F_{W'}$ sargının kutup karşısında etkili manyetomomotor kuvvet oranıdır. Eşitlikte θ_r ve θ_s ise sırasıyla radyan cinsinden kutup ve sargı yay uzunluğudur. Sargıların ürettiği manyeto motor kuvvet, kutup dışındaki bölgede ise rotorun konumuna göre açıya bağlı olarak değişmekte olup aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$F_{W}'' = F_w \frac{2\theta}{\theta_s} = \frac{N_S I_S}{\theta_s} 2\theta \tag{3.19}$$

Hesaplamalarda değişkenleri azaltmak amacıyla lineer akım yoğunluğu veya birim uzunluktaki manyeto motor kuvvet *j* hesaba katılmış ve aşağıdaki eşitlikle gösterilmiştir [1].

$$j = \frac{N_S I_S}{(D_i/2)\theta_S} \tag{3.20}$$



Şekil 3.5. Dört kutuplu LATM manyetik eşdeğer devresi

Şekil 3.5'te de gösterildiği gibi oluşturulan eşdeğer devrede iki farklı manyetik akı dolaşımdadır. Devre çözümlemesi yapıldığında manyetik akılar;

$$\phi_1 = \frac{2F_M}{2(\Re_{gg}+\Re_{mm})} + \frac{D_i j\theta}{2(\Re_{gg}+\Re_{mm})} \tag{3.21}$$

$$\phi_2 = \frac{\frac{D_i j\theta_r}{2}}{2(\Re_{gg}+\Re_{mm})} \tag{3.22}$$

olarak hesaplanır.

Manyetik eşdeğer devrede oluşan manyetik akıların sistemi doyuma götürmediği durumda, sistemde oluşan manyetik enerji ve koenerji eşit düşünülebilir ve eşdeğer devrede oluşan toplam koenerji Eş. 3.23'deki gibi ifade edilebilir [48-50].

$$W_T' = \sum \int \lambda \, di = \sum \frac{F\phi}{2} \tag{3.23}$$

Buradan hareketle mıknatısın manyetomotor kuvveti ve üzerinden geçen toplam manyetik akı ile oluşan toplam koenerji;

$$W_{F_M} = \frac{1}{2} F_M \, 2\left(\frac{2F_M}{2(\Re_{gg}+\Re_{mm})} + \frac{D_i j\theta}{2(\Re_{gg}+\Re_{mm})}\right) \tag{3.24}$$

$$W_{F_M} = \frac{2{F_M}^2}{2(\Re_{gg}+\Re_{mm})} + \frac{F_M D_i j\theta}{2(\Re_{gg}+\Re_{mm})} \tag{3.25}$$

$$W_{F_{MT}} = \frac{4{F_M}^2+2F_M D_i j\theta}{\Re_{gg}+\Re_{mm}} \tag{3.26}$$

olarak belirlenir. Manyetik eşdeğer devrede belirtilen, Eş. 3.18'de de ifade edilen, enerjili sargıların ürettiği manyeto motor kuvvetten kaynaklanan toplam koenerji;

$$W_{F_{W'}} = \frac{1}{2} F_{W'} \frac{\frac{D_i j\theta_r}{2}}{2(\Re_{gg}+\Re_{mm})} \tag{3.27}$$

$$W_{F_{W'T}} = F_{W'} \frac{\frac{D_i j\theta_r}{2}}{\Re_{gg}+\Re_{mm}} \tag{3.28}$$

olarak tespit edilir. Enerjili sargıların eşdeğer devrede rotor konumuna bağlı bileşeninin toplam koenerjisi ise;

$$W_{F_{W''}} = \frac{1}{2} F_w \frac{2\theta}{\theta_s}\left(\frac{2F_M}{2(\Re_{gg}+\Re_{mm})} + \frac{D_i j\theta}{2(\Re_{gg}+\Re_{mm})}\right) \tag{3.29}$$

$$W_{F_{W''T}} = \frac{1}{\theta_s}\left(\frac{4F_w F_M\theta}{\Re_{gg}+\Re_{mm}} + \frac{2F_w D_i j\theta^2}{\Re_{gg}+\Re_{mm}}\right) \tag{3.30}$$

olarak bulunur. Manyetik eşdeğer devrede Eş. 3.23'te de gösterildiği gibi toplam koenerji;

$$W_T' = W_{F_{MT}} + W_{F_{W'T}} + W_{F_{W''T}} \tag{3.31}$$

$$W_T' = \frac{4F_M{}^2+2F_M D_i j\theta}{\Re_{gg}+\Re_{mm}} + F_{W'}\frac{\frac{D_i j\theta_r}{2}}{\Re_{gg}+\Re_{mm}} + \frac{1}{\theta_s}\left(\frac{4F_w F_M\theta}{\Re_{gg}+\Re_{mm}} + \frac{2F_w D_i j\theta^2}{\Re_{gg}+\Re_{mm}}\right) \tag{3.32}$$

$$W_T' = \frac{1}{\theta_s}\left(\frac{2F_w D_i j}{\Re_{gg}+\Re_{mm}}\right)\theta^2 + \frac{\left(2F_M D_i j+\frac{4F_w F_M}{\theta_s}\right)}{\Re_{gg}+\Re_{mm}}\,\theta + \frac{4F_M{}^2+\frac{F_{W'} D_i j\theta_r}{2}}{\Re_{gg}+\Re_{mm}} \tag{3.33}$$

sonucuna ulaşılır. Döner sistemde tork ifadesi ise koenerjinin rotor açısına göre değişimidir [3, 49,53,54].

$$T = \frac{\partial W_T{}'}{\partial\theta} = \frac{2\theta}{\theta_s}\left(\frac{2F_w D_i j}{\Re_{gg}+\Re_{mm}}\right) + \left(\frac{2F_M D_i j+\frac{4F_w F_M}{\theta_s}}{\Re_{gg}+\Re_{mm}}\right) \tag{3.34}$$

olarak belirlenir. $\theta = 0' da$; elektromanyetik tepe tork;

$$T_p = \frac{\left(2F_M D_i j+\frac{4F_w F_M}{\theta_s}\right)}{\Re_{gg}+\Re_{mm}} \tag{3.35}$$

ve j ve F_W yerine sırasıyla; $\frac{N_s I_s}{(D_i/2)\theta_s}$ ve $N_s I_s$ yazıldığında;

$$T_p = \frac{8F_M N_s I_s}{(\Re_{gg}+\Re_{mm})\theta_s} \tag{3.36}$$

olarak tespit edilir.

Burada görüleceği üzere sınırlı açılı tork motorunun sabit çalışma bölgesinde ürettiği tepe tork değeri akıma, sarım sayısına ve mıknatısa bağlı olup doğru orantılıdır. Hava aralığı relüktansı, mıknatısın relüktansı ve sargı yay uzunluğu ile ters orantılıdır. Ne kadar az alanda ne kadar çok sarım yapılıp ve çok akım geçirilirse motorun ürettiği torku artıracağı açıktır.

4. ÇERÇEVESİZ SINIRLI AÇILI ÇOK FAZLI TOROİDAL MOTOR TASARIM SÜREÇLERİ

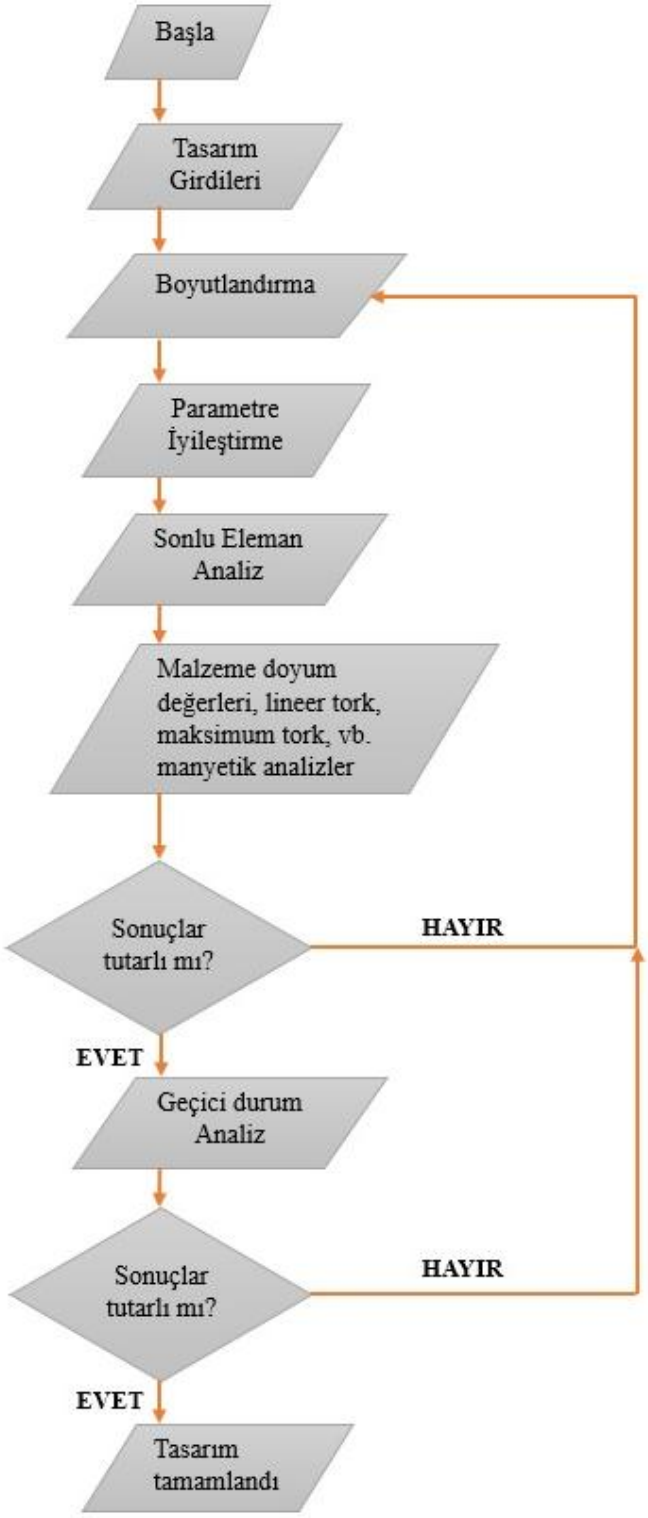
4.1. Giriş

Çerçevesiz sınırlı açılı toroidal motorları veya toroidal sarımlı sınırlı açılı tork motoru üretimleri belirli firmalar tarafından belirli hız, tork, güç ve çalışma aralıklarında yapılmaktadır. Ancak teknolojinin hızla değişiminden dolayı küçük ölçekli bu motorların, uygulama alanına ve amacına yönelik tasarım gereksinimi vardır. Çünkü, üretici envanterine bağımlı olup yeni uygulama alanını, motora göre belirlemektense motorun parametrelerini ve performans karakteristiklerini kullanım alanına özel belirlemek ve geliştirmek daha verimli sonuç doğuracaktır.

4.2. Tasarım Yöntemi ve Akış

Genelde elektrik motorları tasarlanırken gözetilen belli başlı tasarım kriterleri LATM içinde dikkate alınmaktadır. Birim hacim ve ağırlıkta yüksek güç yoğunlukları, düşük maliyetler ve verimli çalışma koşullarına ek olarak LAT motorlarda sınırlı çalışma bölgelerinde vuruntusuz ve doğrusal tork eğrisi tasarım kriterlerindendir. Yüksek hızda ve yüksek hassasiyet de çalışması aranan bir diğer özelliktir.

Bu tez çalışmasında yukarıda bahsedilen tasarım kriterleri, kullanım alanının boyutsal sınırlamaları ve güç değerleri düşünülerek incelenecektir. Gerçekleştirilecek tasarımda standart geometriye sahip mıknatıslardan özel kesim mıknatıslara kadar tasarım incelemesi yapılacak ve mümkün olan en küçük boyutta mıknatıs araştırılacaktır. Motorda mıknatısları taşıyan hareketli kısmın, malzemenin manyetik doyuma gitmeden en hafif olduğu durum araştırılacaktır. Vuruntunun olmadığı veya en düşük olduğu tasarım şekli incelenecek, çalışma bölgesinde tork-konum eğrisinde yüksek doğrusallık aranacaktır. Akım yoğunlukları incelenecek, soğutma sistemi kurulmadan minimum bakır kayıplarının olduğu durum araştırılmıştır.



Şekil 4.1. LATM tasarım akış gösterimi

Şekil 4.1'de de gösterilen tasarım akış çalışmasında öncelikle tasarım girdileri belirlenmelidir. Motor ile ilgili performans gereksinimleri ve uygulama alanında motor için ayrılan boyut tespit edilmelidir. Bu verilere göre motorda değişkenler tespit edilerek farklı alternatifler üretilecektir. Analitik hesaplarla tespit edilebilen manyetik akı yoğunluğu ve

tork ile malzemenin doyum sınırına gelmeden ulaşabildiği en yüksek tork değeri incelenecektir. Parametrelerin iyileştirilmesi ile ulaşılan belli tasarım örnekleri sonlu eleman analizinde ayrıntılı olarak incelenecektir. Matematiksel veriler ve tasarım ihtiyaçlarını karşılamadaki tutarlılık ile boşta çalışma durumu performansı gözlenecektir. İletkenlerin neden olduğu bakır kayıpları gözlenecek ve verimdeki duruma göre akım yoğunluğu ve termal davranış tespit edilecektir.

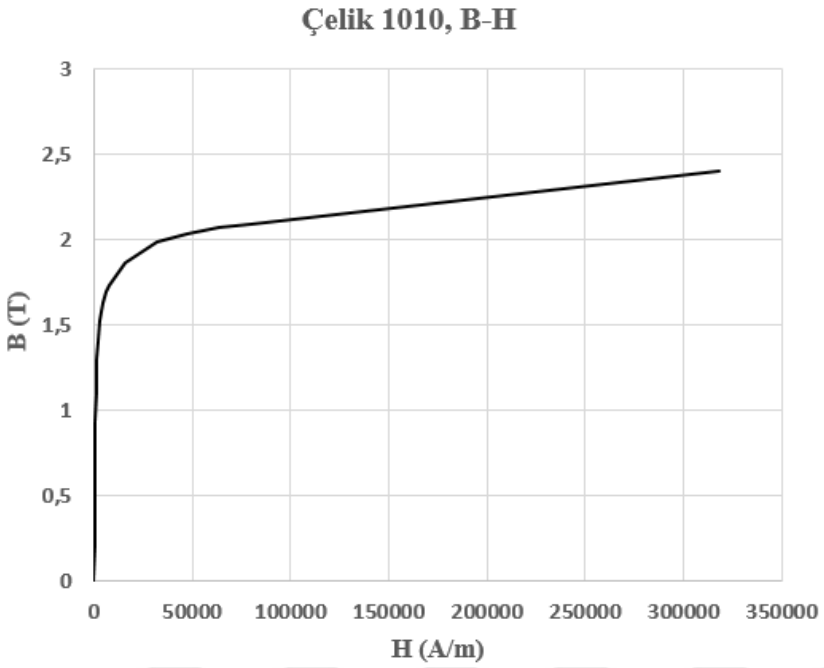
4.3. Boyutlandırma Çalışmaları

Elektrik makinalarının boyutlandırma süreçlerinde çeşitli yazılım programları kullanılmaktadır. Bu uygulamalar ile oluşturulan tasarımların performansları ölçülmektedir. İstenen güç, tork, verim, hız ve benzeri özelliğe göre boyutlandırma işlemi yapılmaktadır. Bu yüzden, analitik hesaplamalarla ön görülen performans çıktıları yazılım programları ile teyit edilerek tasarım yapılmaktadır.

Motorun kullanım alanındaki dış çap ve kalınlıkların olabileceği maksimum değerler tasarım girdilerinde belirlendikten sonra, motorda değiştirilebilir parametreler belirlenmelidir. Bu parametreler, stator iç çap, rotor iç ve dış çap değeri, mıknatıs kalınlığı, hava aralığı ve mekanik açıklık mesafeleri, sarım sayısı, sargı ve kutup yay uzunlukları olarak sıralanabilir.

4.3.1. Stator ve rotor boyutlandırması

Sınırlı açılı tork motorunda sargıların taşındığı yer stator, mıknatısları taşıyan hareketli kısım rotor olarak adlandırılır. Stator ve rotor ferromanyetik malzemeden oluşur. Manyetik geçirgenliğin yüksek olması manyetik akının kolay dağılımını sağlar. Bu yüzden stator ve rotor için seçilen ferromanyetik malzemenin B-H eğrisinde en fazla manyetik akı yoğunluğuna sahip olan malzeme kullanılmalıdır. Şekil 4.2’den de görüleceği üzere ferromanyetik malzemelerin manyetik akı yoğunlukları belirli bir manyetik alan şiddetinden sonra doyuma ulaşır ve artış göstermez. Stator ve rotor boyutlandırma işleminde bu doyum sınırı gözetilerek tasarım yapılmalıdır. Bunun yanı sıra ferromanyetik malzeme yüksek doyum değerine sahip, düşük histeresiz kayıplı ve düşük maliyetli olmalıdır.



Şekil 4.2. B-H eğrisi, çelik 1010

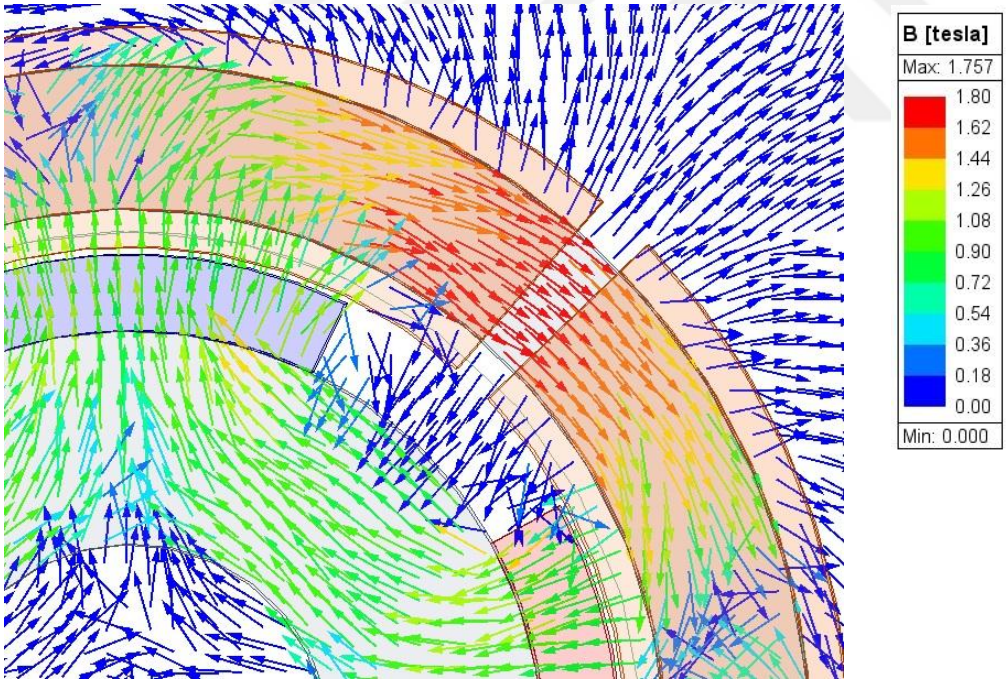
Tasarım girdilerinde boyutsal dış sınırlar örneğin motorun toplam dış çap ve kalınlık belirlendikten sonra, stator da iç çap, rotorda ise iç ve dış çap değişken durumdadır. Yukarıda bahsedilen manyetik doyum değerleri gözetilerek en uygun stator iç çap incelenmelidir. Mıknatısların ürettiği manyetik akı değerleri sabit olduğundan, statora ulaşan manyetik akılar sabittir. Ancak iç çapın değişmesiyle kesit değişmekte ve dolayısıyla manyetik akı yoğunluğu değişmektedir. Benzer şekilde mıknatısları taşıyan rotorun hareketli kısım olması sebebiyle atalet momentinin düşük olması istenir. Ancak manyetik doyum sınırlarının izin verdiği ölçüde iç ve dış çap değişikliği yapılabilir.

4.3.2. Hava aralığı ve mekanik açıklık hesaplanması

LAT motorlarda diğer elektrik motorlarında olduğu gibi hava aralığında manyetik akı yoğunluğu hesaplanması gerekmektedir. Mıknatıslardan ve enerjili sargılardan kaynaklanan manyetik akı etkileşimi hava aralığında manyetik akı oluşturur. Bu etkileşim sonucu kuvvet ve dolayısıyla moment elde edilir. Hava aralığı esasen kutuplar ile stator iç çap arasındaki mesafedir. Sargıların toplam kalınlığını da kapsayan bu mesafede ölçülen hava aralığı, artırılıp azaltılarak motor performansı değerlendirilir. Mekanik açıklık ise, sargıların bitiminden kutuplara kadar olan uzaklık olup, eş-merkezli stator-rotor tasarımındaki işçilik

kabiliyeti ile ayarlanabilir. Mekanik açıklığın mümkün olan en kısa mesafesi ayarlandığında hava aralığını değiştirecek bileşen toplam sarım kalınlığıdır.

Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu değeri, kuvveti ve torku etkiler. Bu değerin hesaplanması için öncelikle hava aralığından geçen, dolaşımdaki manyetik akı ve kesitin bilinmesi gerekmektedir. Şekil 4.3'de 4 kutuplu bir LATM'de hava aralığından geçen manyetik akının dağılımı gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere mıknatıslar tarafından üretilen akı önce hava aralığına sonra sargıların ürettiği akı ile birlikte statora ve sonra diğer kutup ve mıknatısa ulaşarak devresini tamamlar. Mıknatısın kutup yönlerine göre akış gerçekleşir. Manyetik akının vektörel gösteriminde manyetik akı yoğunluğu büyüklüğü renklerine göre ayrılmıştır. Büyüklük ölçütü olarak sırasıyla kırmızı, sarı, yeşil ve mavi olarak gösterimi yapılan motorda faydalı akının malzeme üzerinde dolaşımını yaptığı, küçük ölçekte kaçak akıların ise iki kutup arasında hava üzerinde atlama yaptığı mavi renkle gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Hava aralığında manyetik akı dağılımları

Eş. 3.21 ve Eş. 3.22'de hesaplanan manyetik akılar yardımıyla mıknatıs ve hava aralığından geçen toplam manyetik akılar hesaplanabilir. Buradan hareketle mıknatıs üzerinden geçen $2\phi_1$ değerindeki manyetik akı, kaçak akılar ile birlikte hava aralığından geçer. Bu durumda manyetik akı yoğunluğu;

$$B_g{}' = \frac{2\phi_1}{A_g} \tag{4.1}$$

olarak hesaplanır. Eş. 4.1'de ki $B_g{}'$ kaçak akılar ile birlikte hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğudur. Motor tasarım uygulamalarında, analizlerde ve literatürdeki deneyimlerden kaçak akı faktörü genelde k_l 1,1 olarak alınmıştır [50,56]. Mıknatıstan geçen manyetik akı ve kaçak akılar ile birlikte hava aralığına ulaşan manyetik akı eşitliği,

$$B_g A_g k_l = B_m A_m \tag{4.2}$$

olarak ifade edilir [50, 57]. Burada B_g ve B_m sırasıyla hava aralığı ve mıknatısın manyetik akı yoğunlukları olup birimi Tesla'dır. Mıknatısın manyetik akı yoğunluğu,

$$B_m = \frac{2\phi_1}{A_m} \tag{4.3}$$

olduğundan hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu,

$$B_g = \frac{B_m A_m}{A_g k_l} \tag{4.4}$$

veya;

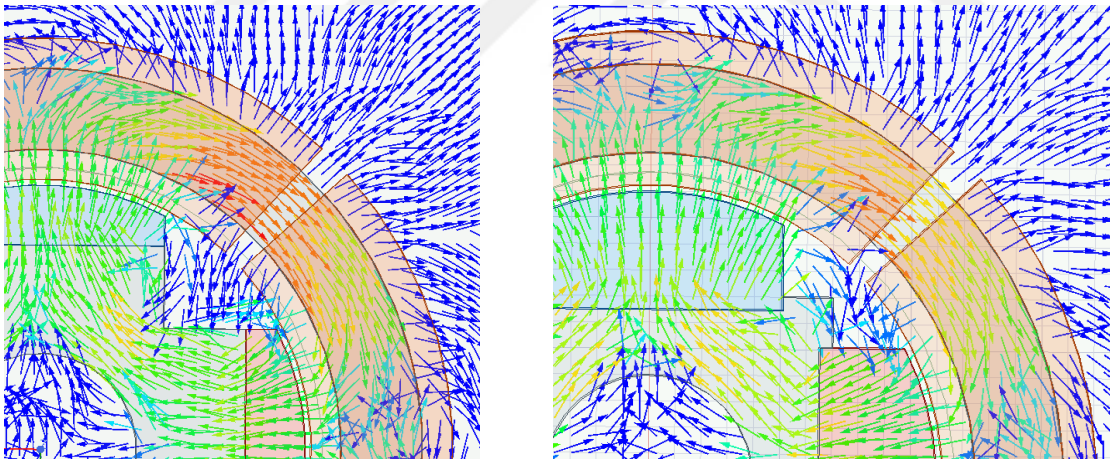
$$B_g = \frac{B_g{}'}{1{,}1} \tag{4.5}$$

olarak da gösterilebilir.

Hava aralığı tasarımlarında, değişkenlerin manyetik akı yoğunluğuna etkisi analitik olarak ifade edilmiştir. Hesaplanan B_g değeri DC makinalarda ortalama 0,4 T ile 0,8 T arasında olmaktadır [15, 55].

4.3.3. Kutup sayısı ve mıknatıs boyutlandırması

Hava aralığından geçen akıyı büyük ölçüde belirleyen ve LAT motorda performansı etkileyen bir diğer bileşen kutuplar ve mıknatısın geometrisidir. Hareketli kısımda, rotorda taşınan mıknatıslar olarak genellikle Neodyum demir bor nadir toprak mıknatıs tercih edilir. Raydal manyetize edilmiş bu mıknatısların yüksek enerjili, yüksek koersif kuvveti gibi avantajları, motorda yüksek tork ve daha küçük boyutlarda tasarıma izin vermektedir. Rotor yüzeyine yapıştırıldığı tasarımlar veya gömülü tip tasarımlar mevcuttur. Manyetik akının her iki tasarımdaki akı yolu gözetilerek en yüksek tork değerdeki durumu tercih edilir. Radyal manyetize olmasından dolayı manyetik akıda saçılmalar fazla olduğundan, tasarım için farklı geometrilerin alternatif olarak araştırılması gerekmektedir. Aşağıdaki şekilde, radyal manyetize edilmiş farklı tip mıknatıslar gösterilmektedir. Şekil 4.4 a'da ve Şekil 4.4 b'de yay tip ve altı düz mıknatısların yüzey ve bir miktar gömülü tasarımları gösterilmiştir. Her iki tasarımda gösterilen akı dağılımları benzer olsa da yüzey tip mıknatısta kaçak akı büyük ölçüde hava yoluyla, gömülü tipte ise kaçak akı bir miktar malzeme üzerinden geçmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.4. Yüzey ve gömülü tip kutuplarda akı dağılımı, (a) Yüzey tip mıknatıs, (b) Gömülü tip mıknatıs

Şekillerden de görüleceği üzere mıknatısların ürettiği manyetik akının havada ve ferromanyetik malzemede geçiş durumu farklı olduğundan, hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğuna ve torka etkisi farklı olacaktır. Gömülü tipte hava aralığını azaltma avantajı, torku artırabileceği düşünülse de mıknatısın ürettiği manyetik akının dağılımı ayrı sonuçlar doğuracaktır.

Tasarım girdilerinde motorun toplam kalınlığının sınırları belli olduğundan, mıknatıstan maksimum verim elde etme yolu mıknatısın radyal uzunluğudur. Ancak radyal uzunluğun belli bir değerin üzerine çıkması, bağlı olduğu rotorda ve statorda malzemeyi doyuma götüreceğinden uzunluğun detaylı incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca, diğer motorlarda olduğu gibi hareketli kısmın ağır olmaması düşünülerek, mıknatıs boyutları incelenmelidir.

Motor performansını mıknatıs açısından etkileyen bir diğer durum kutup sayısıdır. Eş. 3.2'den de görüleceği üzere kutup sayısı çalışma bölgesini doğrudan etkilemektedir. Geniş veya dar aralıkta çalışma isteklerine göre kutup sayısı ayarlanmalıdır. Kutup sayısındaki artış çalışma bölgesini azaltsa da torku ve tarama hızını artırmaktadır [2, 11, 27].

4.3.4. Sarım sayısı, sargı ve kutup yay uzunlukları belirlenmesi

Ele alınan LAT motorda tasarım girdilerinde vuruntusuz tork ve belirli çalışma bölgesinde mümkün olan en doğrusal ve maksimum tork eğrisi istendiğinde, tasarım da sargı yapısı toroidal olmak durumundadır. Hava aralığında olukların ve sargıların oluşturacağı relüktans farkı toroidal sarım da bulunmamaktadır. Sargıların olukların içine gömülü olduğu durum, hava aralığını azaltma ve torku artırabilme avantajı gösterse de çalışma bölgesinde vuruntusuz ve doğrusal tork, toroidal sarım ile sağlanabilmektedir. Çünkü vuruntu momenti kaynağı, sabit mıknatıslardan kaynaklanan elektromotor kuvvet harmoniklerinin stator oluklarındaki etkileşimidir [46,58]. Sargıdan geçen akımdan bağımsız olarak hava aralığın oluşan manyetik akının karesi ile orantılıdır. Eş. 4.6'da gösterildiği gibi vuruntu, hava aralığı relüktansının rotor açısının değişimine oranıdır. Hava aralığı relüktansı oluksuz stator yapısında aynı olduğundan vuruntu momenti oluşmamakta bu yüzden toroidal sarım seçimi yapılacaktır [5,34,59,61].

$$T_{vuruntu}(\theta) = -\frac{\partial W_g(\theta)}{\partial(\theta)} = -\frac{1}{2}\emptyset_g^2 \frac{d\Re_g}{d\theta} \tag{4.6}$$

LAT motorda kutup karşında bulunan sargıların eksenel uzunlukları, kutuba bakan tarafları kuvveti belirleyen bölgedir. Burada yapılan sarımın kalınlığı torku doğrudan etkiler. Ancak sarım sayısının fazla olması hava aralığı mesafesini artırmakta ve hava aralığında oluşan manyetik akıyı azaltmaktadır. Bu yüzden değişkenlerin her birinin birlikte değişiminin etkisi incelenmelidir.

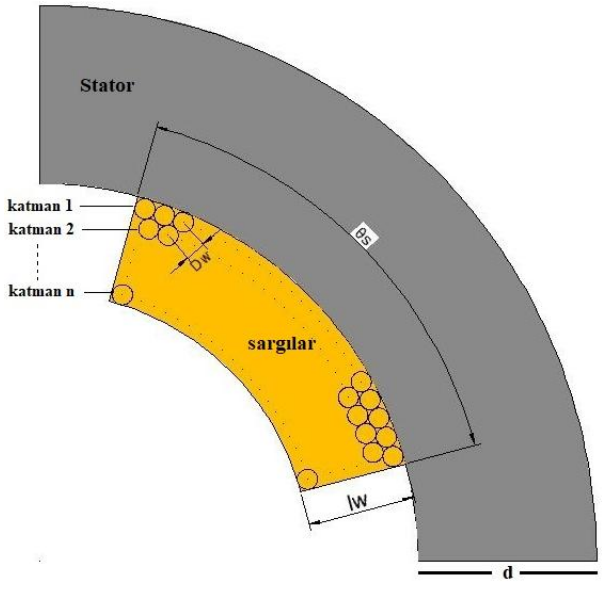
Motorda kutup sayısı çalışma bölgesini belirlerken, sabit çalışma bölgesi sınırları sargı ve kutupların yay uzunluklarına bağlıdır. Eş. 3.1'de belirtilen stator sargı yay açısı ile rotor kutup yay açısı arasındaki fark sabit bölgeyi oluşturur. Literatür araştırmalarında sabit çalışma bölgesinin tepe torkun %80'nine ulaştığındaki durum olarak belirtilmiştir [2, 5]. Tasarım aşamalarında yüksek doğrusallık için bu değerin üzerinde çalışma bölgesi araştırılacaktır.

Sarım sayısının artması sargıların ürettiği manyeto motor kuvvetini artıracağından motor performansını etkiler. Hava aralığı ve mekanik açıklıklarla birlikte düşünülmesi gereken bir durumdur. Sargıların sarım yönü akım yönü ile ilişkili olup, seri veya paralel bağlantı mümkün olabilmektedir. Komütasyon olmayışı bakım kolaylığı sağlamaktadır.

Sargıda kullanılan iletkenin kesiti, iletkenden geçen akım ve doğal soğuma ile ilgili olup, aşağıdaki gibi ifade edilebilir [50].

$$D_w = 2\sqrt{\frac{I_p}{\pi J_{AWG}}} \tag{4.7}$$

Eş. 4.9'da I_p sargıdan geçen maksimum akım olup, J_{AWG} ortalama akım yoğunluğudur. Hesaplanan kesit ile birlikte sarım sayısı, iletken uzunlukları ve direnç bulunabilmektedir.



Şekil 4.5. Stator iç çapında sargıların gösterimi

Şekil 4.5'de statorun iç çevresinde sargıların gösterimi yapılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi toroidal sarım da sargıların kutuba bakan bileşenlerinde belli kesitte iletkenler katmanlar şeklinde dizilmektedir. Her bir katmanda tek bir iletkenin sarıldığı alan toroidal yapıda değişmektedir. İzolasyon kalınlığı ve sargı faktörü ile yay uzunluk, n katmanda,

$$yay\ uzunluk^n = \left(\frac{D_i - \left(1+(n-1)\sqrt{3}\right)D_w - 2t_i}{2}\right)\theta_s k_s \tag{4.8}$$

olarak hesaplanabilir. Eş. 4.8'de t_i izolasyon kalınlığı olup, k_s sargı faktörü sabitidir. Her bir katmandaki sarım sayısı ise, yay uzunluklarının iletken kesitine oranı olup,

$$N^n = \frac{yay\ uzunluk^n}{D_w} \tag{4.9}$$

olarak bulunabilir. Toroidal sarımda toroid uzunluk katmanlardan dolayı değişmekte olup, n'inci katmanda toroid uzunluk;

$$\text{Toroid Uzunluk}^n = 2\left[L_{as} + d_s + 4t_i + 2(1+(n-1)\sqrt{3})D_w\right] \tag{4.10}$$

olarak bulunur. Eş. 4.10'da L_{as} statorun eksenel uzunluğu, d_s ise stator dış yarıçap ve iç yarıçap arasındaki farktır. Toplam sargı uzunluğu ise n'inci katmadaki toroid uzunluğunun n'inci katmandaki sarım sayısı ile çarpımı olup,

$$Sargı\ uzunluğu^n = N^n x \text{Toroid Uzunluk}^n \tag{4.11}$$

olarak ortaya çıkarılır. Tüm katmanlar ile birlikte toplam sargı uzunluğu tespit edildiğinde, sargı direnci bulunabilir. Seçilen iletkenin birim uzunluktaki direncinden toplam sargı direnci bulunabilir.

Toroid sarımda sargıların diziliminde bir diğer husus sarım kalınlığıdır. Seçilen kesitte yapılan toroid sarımda toplam sarım kalınlığının belli bir değeri geçmemesi gerekir. Bu değer, hava aralığı mesafesinde mekanik açıklık ve sarımda kullanılan izolasyon kalınlığı gözetilerek hesaplanabilmektedir.

Sarım kalınlığında n katmanlı durum için hesaplama;

$$Sargı\ kalınlığı = \left(1 + \frac{(n-1)\sqrt{3}}{2}\right) D_w \quad (4.12)$$

olarak belirlenir. Eş. 4.12'den birinci katmandaki sarım kalınlığı iletkenin kesiti iken, sonraki katmanlar ile sarım kalınlığı artmaktadır. Toplam katman sayısı müsaade edilen sarım kalınlığı ile belirlenmektedir.

Tasarım girdilerinde istenen sabit çalışma bölgesini sargı yay açısı ve kutup yay uzunlukları arasındaki fark belirlediği için sargı yay açısının uzunluğuna göre kutup açısı belirlenmelidir. Olabildiğince az mıknatısla, maksimum fakat doğrusal tork çıkışı aranmaktadır.

4.4. Tasarım Parametreleri Belirlenmesi

Sınırlı açılı toroidal sarımlı motorlarda bahsedilen değişkenlerin analitik olarak hesaplamaları ve motor performansına etkisi incelenmiştir. Her parametrede yapılacak değişimler kendi sonucunu doğururken, belirli parametrelerin birlikte değişimi bambaşka sonuçlar doğurmaktadır. Bu yüzden endüstriyel gereksinimler ve kısıtlamalar gözetilerek değişkenlerin birlikte etkisi incelenecektir. Endüstriyel gereksinimleri karşılayan en iyi tasarımı seçmek için karar verme araçlarına ihtiyaç vardır. Karar verme araçları için literatürde avantajları ve dezavantajlarıyla birçok araç önerilmiştir. Saaty tarafından önerilen Analitik hiyerarşi metodu (AHP) çok kriterli karar verme sürecinde kullanılabilecek faydalı araçlardan biridir [12, 15, 60]. AHP'nin kullanılması daha verimli alternatif seçmede karşılaştırmanın tutarlılığını hem objektif hem de sübjektif problemlerde kontrol edebilme avantajı sunmaktadır [15].

AHP, karmaşık sorunları parçalara ayırıp, bunları hiyerarşik çerçevede gösterme yaklaşımıdır [12]. Hiyerarşinin en üst seviyesinde temel amaç yer alırken, alt seviyelerde kriterleri, son seviyede ise karar alternatiflerini sunmaktadır. AHP'de bazı etkili kriterler gözetilerek uzman yargılarına göre tasarım çözümleri değerlendirilmektedir. Bu amaçla ilk olarak kriterlerde öncelik tanımlaması için ikili karşılaştırmalar kullanılır. Sadece ikili durum hakkında yorumlama yapmak, tüm unsurlar için görüş bildirmekten daha kolaydır. İkili karşılaştırma için birimsiz olarak 9 seviyeli bir ölçek önerilmiştir. 1'den 9'a kadar tek sayılardan oluşan ölçekte 1 eşit değer olarak belirlenirken, 9 en önemli değer olarak

varsayılabilir. Karar verme işlemi, bu ölçeğe dayalı yargılama yapar. Eş. 4.13'de ikili karşılaştırma matrisi ile tüm kriterlerin bir arada gösterimi verilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & a_{ji} = 1/a_{ij} & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

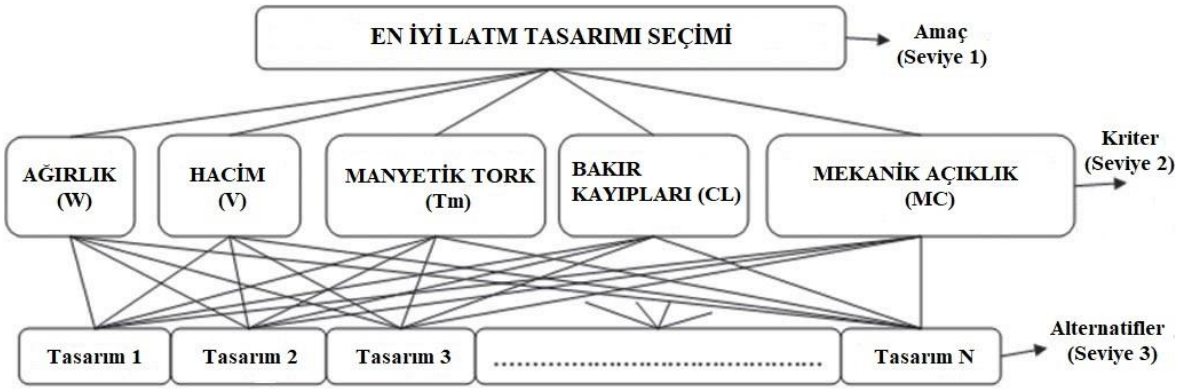
Eş. 4.13'de matriste köşegen elemanları 1 olup, a_{ij} nin i'ninci elemanının j'ninci elemana göre göreceli önemi tanımlanmaktadır.

Kriter olarak, ağırlık, hacim, zaman sabiti, manyetik tork, manyetik akı, mekanik açıklık, bakır kayıpları, verim vs. göz önüne alınabilir. Endüstriyel gereksinimlere göre uzman yargılama değerleri değişmektedir. Örneğin tasarım prosedüründe üretim sürecinde en kolay durumun istenmesi mekanik açıklığın fazla olması önceliğini getirirken, ağırlığın son derece önemli olduğu durumlarda ağırlık kritiktir. Tasarım gereksinimlerine göre belirlenen kriterlerin ikili karşılaştırması Eş. 4.13'de oluşturulduktan sonra AHP de öncelik vektörünün tespit edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla literatürde aritmetik ortalama, en küçük kareler yöntemi ve geometrik ortalama kullanılmıştır. Aritmetik ortalama yönteminde, öncelikle Eş. 4.13'te verilen karşılaştırma matrisinin her elemanının bulunduğu sütunun toplamına bölünmesi ve sonra satır dizesini oluşturan değerlerin ortalaması şeklinde öncelik vektörü oluşturulur.

AHP'nin temel amacı uzman yargılaması yardımıyla belirlenen alternatif tasarımların arasından en iyisini seçmektir. Bu amaçla, örnek alınan alternatiflerin her birinin kriterleri için ayrı ayrı ikili matris oluşturulur. Oluşturulan matrisler için yukarıda bahsedilen aritmetik ortalama yöntemi uygulanır ve elde edilen vektörel değerler ağırlık matrisinin bileşenlerini oluşturur. Ağırlık matrisinin öncelik vektörü ile çarpımı sonucunda en yüksek değere sahip alternatif, en iyi tasarım çözümünü sunmaktadır.

Aşağıdaki Şekil 4.6'da analitik hiyerarşi aşamaları gösterilmiştir. Burada kriter olarak, ağırlık, hacim, manyetik tork, bakır kayıpları ve mekanik açıklık seçilmiştir. Yukarıda bahsedilen boyutlandırma çalışmalarında analitik olarak yapılan hesaplamalar kullanılarak rastgele tasarım çeşitleri seçilmiştir. Seçilen tasarımlar endüstriyel gereksinimler ve

kısıtlamalar dahilinde olup tüm kriterlerin birbirlerine olan önem dereceleri Eş. 4.13'deki gibi ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur.



Şekil 4.6. LATM tasarımın hiyerarşik çerçevesi

Manyetik torkun en önemli olduğu, ağırlığın daha az sorun teşkil ettiği örnek bir matris aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.1. Örnek bir sınırlı açılı tork motora ait kriterler matrisi

	Ağırlık (W)	Hacim (V)	Manyetik Tork (Tm)	Bakır Kayıpları (CL)	Mekanik Açıklık (MC)
Ağırlık (W)	1	1/3	1/9	1/7	1/5
Hacim (V)	3	1	1/7	1/5	1/3
Manyetik Tork (Tm)	9	7	1	3	5
Bakır Kayıpları (CL)	7	5	1/3	1	3
Mekanik Açıklık (MC)	5	3	1/5	1/3	1

Çizelge 4.1'de verilen değerlerin oluşturduğu öncelik vektörü, aritmetik ortalama yöntemiyle aşağıdaki gibi tespit edilir.

$$\text{öncelik vektörü} = \begin{bmatrix} 0{,}0348 \\ 0{,}0678 \\ 0{,}5028 \\ 0{,}2602 \\ 0{,}1344 \end{bmatrix}$$

Yukarıdaki kriterleri en çok sağlayan en faydalı tasarımı tespit etmek için alternatiflerin her bir kriter için birbirlerine olan üstünlükleri karşılaştırılmalıdır. Örneğin dış çevresi 90 mm, kalınlığı 32 mm olan ± 15 derecelik sabit çalışma bölgesinde mümkün en yüksek ve en lineer

tork istekleri için çeşitli tasarım alternatifleri düşünülmüştür. Bunun için 5 farklı tasarım seçilmiştir. Tasarım 1'den tasarım 5'e kadar alınan örnekler birbirleri ile yukarıdaki kriterler açısından kıyaslanmıştır. Aşağıda mekanik açıklık açısından tasarımların birbirilerine olan üstünlükleri örnek olarak verilmiştir.

Çizelge 4.2. Mekanik açıklık kriterleri

MEKANİK AÇIKLIK (MC)	Tasarım 1	Tasarım 2	Tasarım 3	Tasarım 4	Tasarım 5
Tasarım 1	1	3	3	1	3
Tasarım 2	1/3	1	1	1/3	1
Tasarım 3	1/3	1	1	1/3	1
Tasarım 4	1	3	3	1	3
Tasarım 5	1/3	1	1	1/3	1

Çizelge 4.2'den de görüleceği üzere tasarım 1 ve tasarım 4 aynı mekanik açıklığa sahipken, tasarım 2, 3 ve 4'te diğer mekanik açıklığa eşittir. Burada yapılacak değerlendirme, tasarım 1 ve 4 ün mekanik açıklığı tasarım 2, 3 ve 5'e göre daha büyük, işçiliği daha kolay ve bu kriter için tercih sebebidir.

Çizelge 4.2'nin öncelik vektörü aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\text{öncelik vektörü} = \begin{bmatrix} 0{,}333 \\ 0{,}111 \\ 0{,}111 \\ 0{,}333 \\ 0{,}111 \end{bmatrix}$$

Tasarımların kendi aralarında tüm kriterlerce karşılaştırılmasının ardından elde edilen öncelik vektörlerinin oluşturduğu nihai matris, kriterler matrisinin öncelik vektörü ile çarpıldığında en yüksek değere sahip tasarım, AHP'nin belirlediği en iyi tasarımdır.

Boyutlandırma aşamalarında da detayları verilen hesaplamalar yardımıyla, belirli tasarım örnekleri ele alınmış ve AHP ile yapılan değerlendirme sonucu aşağıdaki tasarım parametreleri elde edilmiştir.

Endüstriyel gereksinim olarak ± 15 derecelik çalışma bölgesinde geometrik kısıtlamalar gözetilerek tasarım parametrelerine ulaşılmıştır. İstenen çalışma bölgesinde doğrusal ve mümkün olan en yüksek tork için, Eş. 3.36'da verilen tork ifadesi kullanılmıştır. Ayrıca yüksek tork için hava aralığında maksimum akı yoğunluğu, malzeme doyumu düşünülerek incelenmiştir. Tepe torka 2 A'lik akım geçmesi durumunda ulaşılacağı varsayılarak bu değere göre iletken kesitleri seçilmiş, sarım kalınlıkları ve mekanik boşluklar bu bağlamda değerlendirilmiştir.

5. SONLU ELEMAN YÖNTEMİ İLE SINIRLI AÇILI TOROİDAL MOTORUN MANYETİK-GEÇİCİ DURUM ANALİZİ VE TASARIM SÜRECİ DOĞRULAMASI

5.1. Giriş

Endüstride bilgisayar destekli tasarım (CAD) programları elektrik motoru tasarım ve analizlerinde oldukça sık kullanılmaktadır. Analitik hesaplamalardaki süre kaybının önüne geçmek ve analitik hesaplamalardaki göz ardı edilebilen hususları dahil ederek daha net sonuçlar ortaya konması ve tasarım doğrulaması genel tercih nedenidir. Bu avantajlı yönüyle motor tasarımcılarına kolaylık sağlamaktadır.

Bilgisayar destekli yazılım programlarında elektrik ve manyetik alan çözümlemesinde sonlu eleman yöntemi (FEM) kullanılır. FEM kullanımı kısmi diferansiyel denklemlerle veya fonksiyonel olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde tercih edilir [62]. Karmaşık problemlerin hassas çözümünde kullanılan sonlu eleman yönteminde temel hedef basite indirgemektir. Şöyle ki, motor tasarımında düzgün olmayan geometrik bölgede elektrik veya manyetik alanların tespiti için bölge çok sayıda elemandan oluşan alt bölgelere ayrılır [63]. Alt bölgelerdeki her eleman ayrı bir polinomla ifade edilir. Bu elemanlar sonlu eleman ağını oluşturur. Ağ yapısında düğüm noktaları bulunmakta ve noktalar arası boşluklar da elemanları oluşturmaktadır. Düğüm noktaları hesaplamaların başlangıç konumu olup, interpolasyon fonksiyonları ile elemanlara indirgenmektedir. Ağ yapısında doğru sonuca ulaşmak için yeterli sayıda ve küçük boyutlandırma yapmak önemlidir [63-65].

Analizlerde geometrik yapıda sonuca etkisi olmayan bölgelerin sadeleştirilmesi yapılır. Bölgede kullanılacak eleman tipi ve ağ yapısı belirlenir. Hata yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde ağda eleman sayısı artırılarak doğru sonuca yaklaşılır. Eleman sayısının artması hesaplama yoğunluğunu artırmakta, bu yüzden işlemcisi güçlü bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır. En doğru analiz sonucu ağ yapısının her yere doğru sayıda ulaşması ile mümkün olmaktadır.

Sonlu elaman analiz yöntemi Ansys firmasının Maxwell 3D manyetik analizi ile incelenmiştir. Bu programla, ele alınan tasarımda kuvvet, tork ve endüktans değerleri,

doğrusal olmayan malzemede manyetik akı dağılımları ve doyum bölgeleri, akım yoğunlukları ve sıcaklar vb. durumlar incelenebilmektedir.

5.2. Ansys Maxwell Model Oluşturulması

Tasarım yapılacak modelin öncelikle 3 boyutlu katı gösterimi yapılır. Oluşan modelle her bileşen farklı materyal olduğu için malzeme ataması yapılır. Ansys kütüphanesinde, çelikten, bakıra, farklı üreticilerin mıknatıslarına birçok malzeme tanımlıdır. Daha sonra malzemeler arasında yalıtım olabilecek yerler belirlenir. Parametreler olarak endüktans için ilgili sargılar belirlenir ve tork için vektörel yönlerin tanımlaması yapılır. Sargılarda tur sayısı ve akım ataması yapılır. Manyetik analiz sonlu eleman yöntemiyle olup Maxwell eşitliklerinden yararlanır.

Bu denklemler diferansiyel formda;

$$\nabla . D = \rho \tag{5.1}$$

$$\nabla . B = 0 \tag{5.2}$$

$$\nabla x E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{5.3}$$

$$\nabla x H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{5.4}$$

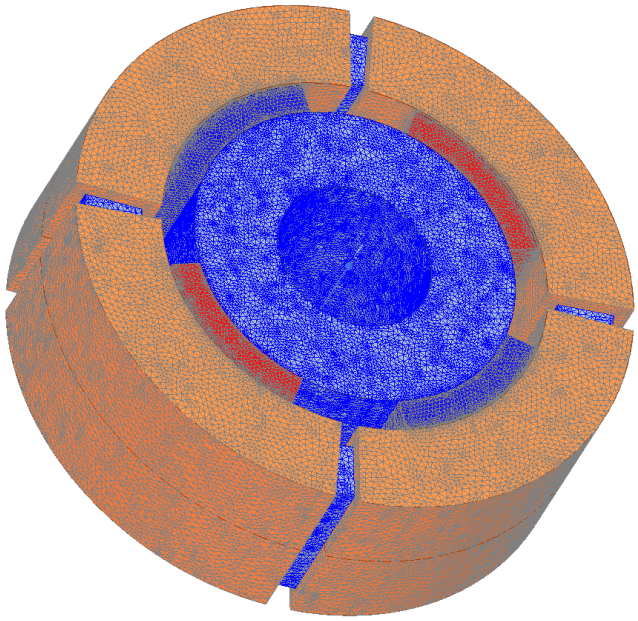
şeklindedir. Özetlenecek olursa burada Eş. 5.1 elektrik alan için Gauss yasası olup özetle bir noktadaki elektriksel yer değiştirmenin (D) diverjansının o noktadaki serbest yük yoğunluğuna (ρ) eşit olduğudur. Eş. 5.2 ise manyetik alan için Gauss yasasıdır. Burada manyetik alan çizgilerinin daima kapalı döngüler oluşturduğu, yani bir yüzeye giren manyetik akının bu bölgeden çıkan manyetik akıya eşit olduğu ifade edilir. Eş. 5.3 ise, indüksiyon yasası olup, zamanla değişen manyetik alanın bir elektrik alan oluşturması, Eş. 5.4 ise Ampere yasası olup, zamanla değişen elektrik alanın oluşturduğu manyetik alanı ifade eder [66].

Manyetik alan çözümlemesi ile H manyetik alan şiddeti, B manyetik akı yoğunluğu, J akım yoğunluğu olup, Lorentz kuvveti ile moment hesaplamaları yapılır [67].

$$T = \int \vec{r}\, x \left(\vec{J} x \vec{B}\right) dv \tag{5.5}$$

burada r dönüş ekseninde konum vektörüdür.

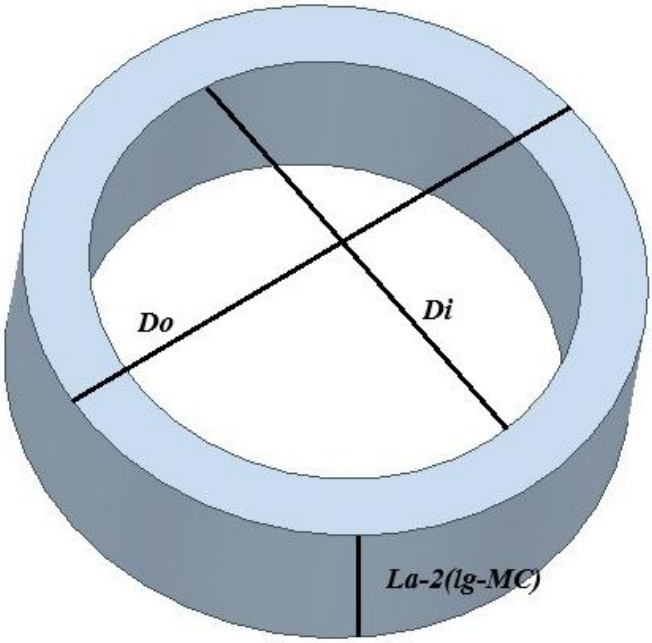
Önceki bölümlerde analitik hesaplamaları ve analitik hiyerarşi yönteminden elde edilen tasarım parametreleri, bilgisayar ortamında Ansys Maxwell programında modellenmiştir. Dört kutuplu model için 3 boyutlu gösterimi Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Ağ yapısı gösterilen tasarım, sonlu eleman analizine tabi olup detaylı incelenecektir. Dış çap olarak 88,9 mm (3,5 inc) sınır değer olarak alınmıştır. Motor isimlendirmesinde ise söz konusu motor LATM3500 olarak ifade edilecektir.



Şekil 5.1. LATM3500 motor ağ(mesh) yapısı gösterimi

5.2.1. Stator konfigürasyonu

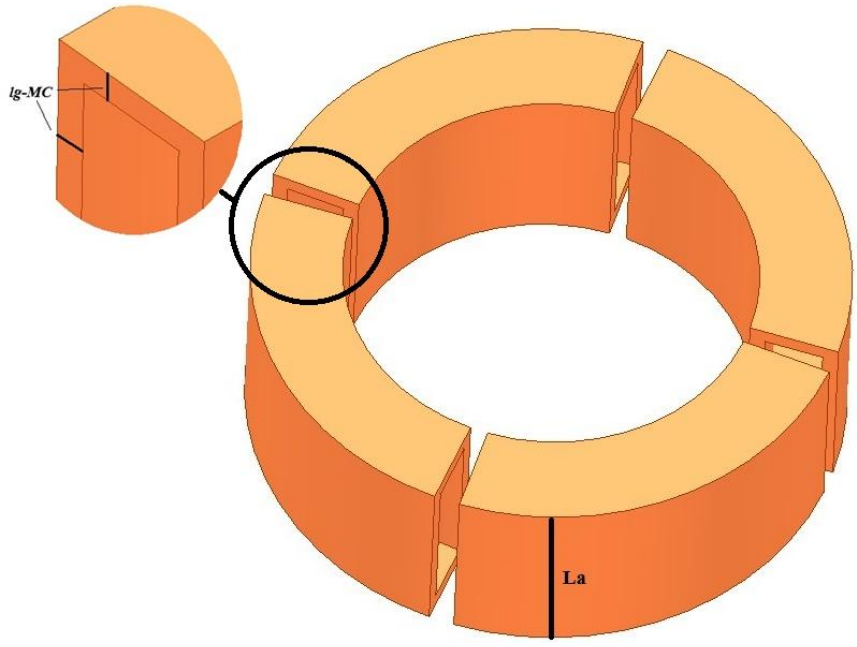
Bağıl manyetik geçirgenliği lineer olmayan, B-H eğrisi Şekil 4.2'de verilen stator için çelik 1010 malzeme seçimi yapılmıştır. Şekil 5.2'de çizimi verilen statorda 3,5 inç dış çap belirlenen kesitte yükseklik ayarlanırken sarım kalınlığı gözetilmiştir. Rotora bağlı mıknatısların karşılarına gelecek sarılı statorun aynı düzeyde olması gerekmektedir. Bu yüzden stator yüksekliği motorun eksenel uzunluğundan sarım kalınlıklarının çıkarılması şeklinde belirlenir. Sarım kalınlığı ise hava aralığından mekanik açıklığın çıkarılması ile elde edilmektedir.



Şekil 5.2. Stator geometrisi

5.2.2. Stator sargıları

Stator üzerine sarılı iletkenin kesiti, sarım sayıları, katman sayıları ve sarım kalınlıkları gibi ifadeler önceki başlıkta analitik olarak hesaplanmıştı.



Şekil 5.3. Stator sargı geometrisi

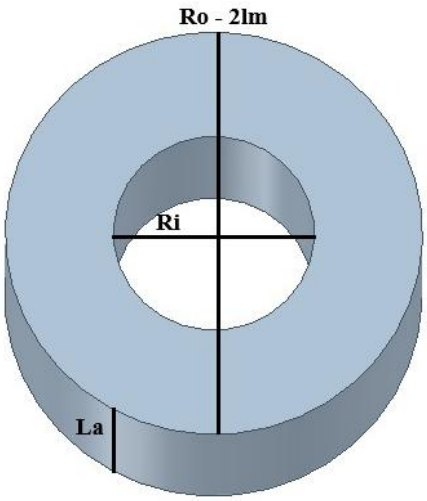
Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler ile sargı yapısı Şekil 5.3'de olduğu gibi modellenmiştir. Sarım kalınlıklarının $(l_g - MC)$ analitik olarak belirlenmesi ile tasarım yapılmış, malzeme olarak Çizelge 5.1'de özellikleri verilen bakır seçilmiştir. Çok telli, çok katmanlı sarım yapılarında Ansys Maxwell'de bakır uyarımlarında çok telli bakır (stranded) tip seçilmiştir. Her bobinin xy düzleminde ayrı uyarma yönleri belirlenerek sarım yönleri ayarlanmıştır. Aynı uyarma yönünde farklı polaritede akımlarla da tasarım gerçekleştirilebilmektedir. Bobinler arası boşluklarda simetriklik sağlanmıştır.

Çizelge 5.1. Ansys/Maxwell Bakır Malzeme parametreleri

Bakır Özellikleri	Değer	Birim
Bağıl Geçirgenlik	0,99999	B/H
İletkenlik	58x10E6	Siemens/m
Isı iletkenliği	400	W/m-C
Birim hacimdeki ağırlık	8933	kg/m3
Özgül Isı	385	J/kg-C

5.2.3. Rotor konfigürasyonu

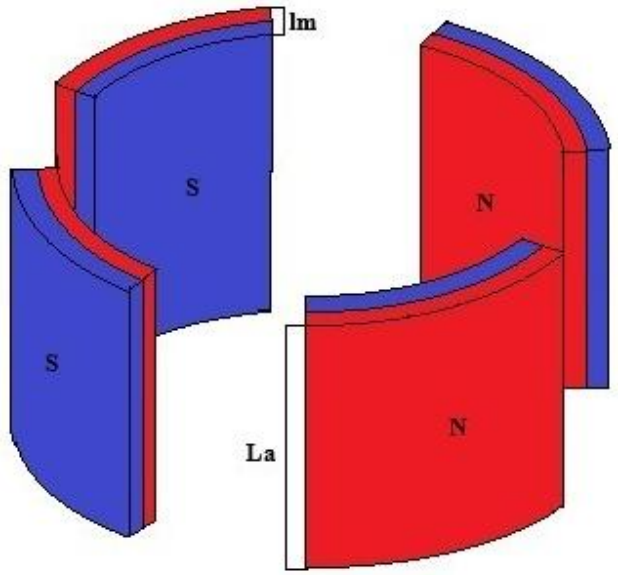
Tasarım parametrelerinde ulaşılan değerler ile rotor geometrisi oluşturulmuş, malzeme seçiminde stator ile aynı tip çelik 1010 değeri atanmıştır. Yükseklikler mıknatıs boyları ile aynı uyumlu belirlenmiştir.



Şekil 5.4. Rotor geometrisi

5.2.4. Mıknatıs tasarımı

Analitik hesaplamalarda belirlenen değerler için ihtiyaç olunan mıknatıslar Şekil 5.5'te gösterilmiştir. θ_r yay açısında ayarlanan N52 mıknatıslar kutup yönlerine göre dizilim sağlanmıştır. Mıknatıslar geleneksel geometrilerde olmadığı için, silindirik koordinatta kutuplar radyal olarak yönlendirilmiştir. Detayları Çizelge 5.2'de de gösterildiği gibi malzeme atanması yapılmıştır.



Şekil 5.5. Mıknatıs geometrisi

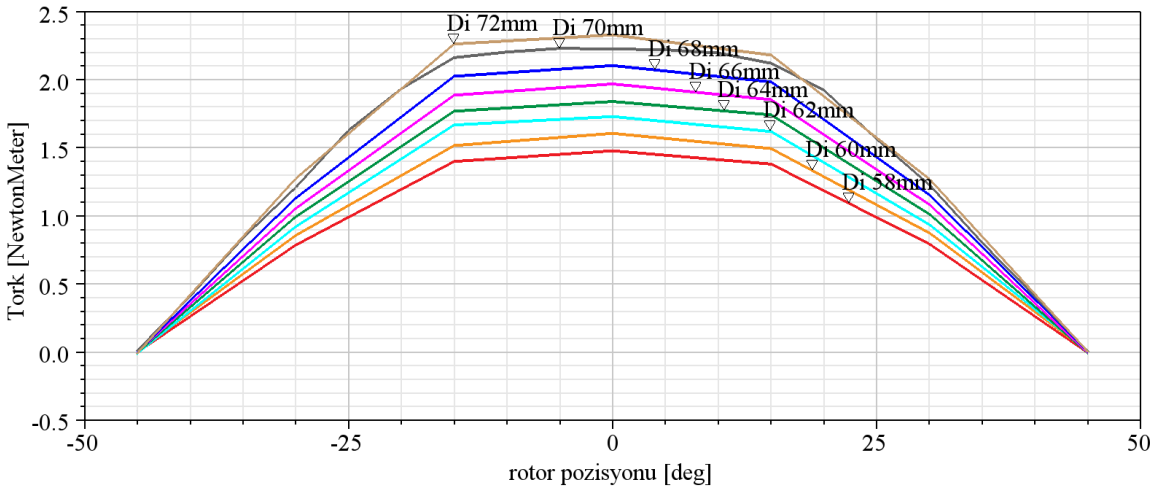
Çizelge 5.2. Ansys/Maxwell N52 Mıknatıs Malzeme parametreleri

N52 Mıknatıs Özellikleri	Değer	Birim
Bağıl Geçirgenlik	1,01856	B/H
İletkenlik	555555,5556	Siemens/m
Manyetik Koersivite	-1024100	A/m
R Bileşen	1	
Phi Bileşen	0	
Z Bileşen	0	
Isı iletkenliği	7,6	W/m-C
Birim hacimdeki ağırlık	7500	kg/m3
Özgül Isı	460	J/kg-C

5.3. Manyetik Analiz Süreci

Tasarım geometrisinin oluşturulması ve her bileşenin malzeme ataması Ansys Maxwell'de tanımlandıktan sonra motorda mıknatıs ve bağlı olduğu rotor, hareketli bileşen olarak belirlenmiş ve tork parametresi atanmıştır. 4 kutuplu yapıdan dolayı rotor pozisyonunun -45º den +45º ye hareket alanı bulunmaktadır. Dış çap mesafesi, motorun eksenel kalınlığı gibi sınırlamalar dahilinde, analitik hesaplamalar ve analitik hiyerarşi yönteminde bahsedilen değişkenlerin performansa etkisi ayrıntılı incelenecektir.

Statorun iç çap mesafesinin değişimi gerek stator malzemesinin manyetik akı yoğunluğu gerekse üzerine sarılı sargının mesafesi, kalınlığı, tur sayısı gibi değişkenleri etkilemektedir. Mıknatısın kalınlığı (lm), hava aralığı (lg), stator sargı yay açısı ve kutup yay açısı eşit kalmak kaydıyla Di'nin değişimine paralel rotor dış çapı ve sarım tur sayısı değişmektedir. Sargılardan 2A akım geçtiğinde, yukarıdaki şartlar altında Di'nin belli aralıklarda değişiminin rotor pozisyonu-tork eğrisine etkisi Şekil 5.6'da gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere stator iç çapının artması sarım sayısını da artırdığından tork da artış gözlenmektedir. Ancak ±15º lik çalışma bölgesinde tork doğrusallığı da bir miktar bozulmaktadır.

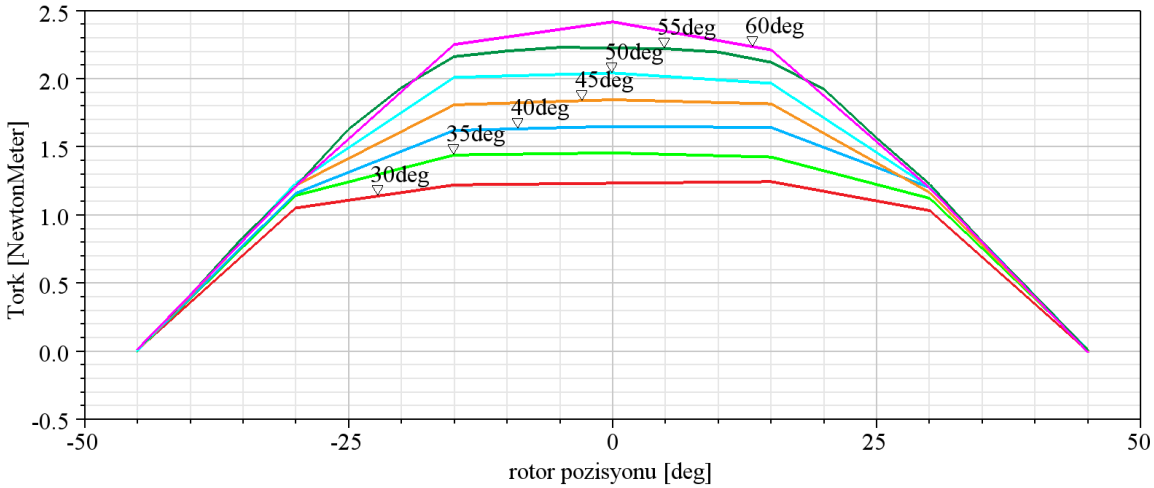


Şekil 5.6. İç çap (D_i) değişiminin rotor açısı-tork eğrisinde etkisi

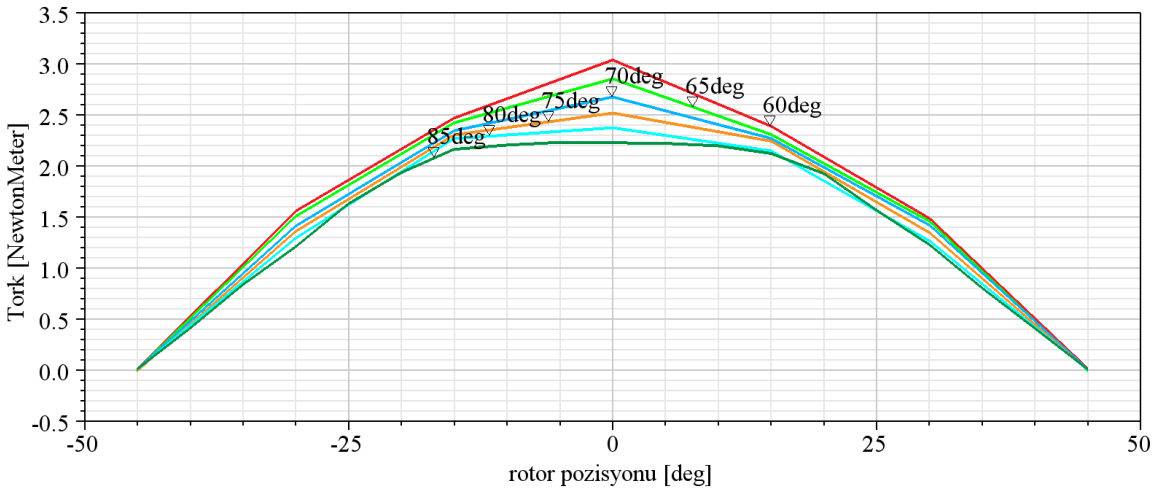
Endüstriyel gereksinimler ve sınırlamalar dahilinde en yüksek tork ve en doğrusal tork Di'nin 70 mm olduğu durumda olduğu gözlenmiştir. Di'nin diğer alternatiflerinde daha

yüksek tork yakalanabilirken sabit tork çalışma bölgesinde doğrusallık bozulmakta veya sabit çalışma bölgesinde daha doğrusal tork elde ederken tepe tork azalmaktadır.

Performans değerlerini etkileyen bir başka değişken, stator sargı yay açısı ve kutup yay açısının değişimidir. Analitik hesaplamalarda da bahsedildiği gibi yay açısı mesafeleri sabit çalışma bölgesini etkilemektedir. Bunun yanı sıra sargı yay açısı mesafeleri sarım yerlerindeki bölgeyi de etkilediğinden ampertur sarım sayısının değişimine neden olmakta dolayısıyla tork değerini etkilemektedir.



Şekil 5.7. Kutup yay açısının (θ_r) değişiminin rotor açısı-tork eğrisinde etkisi

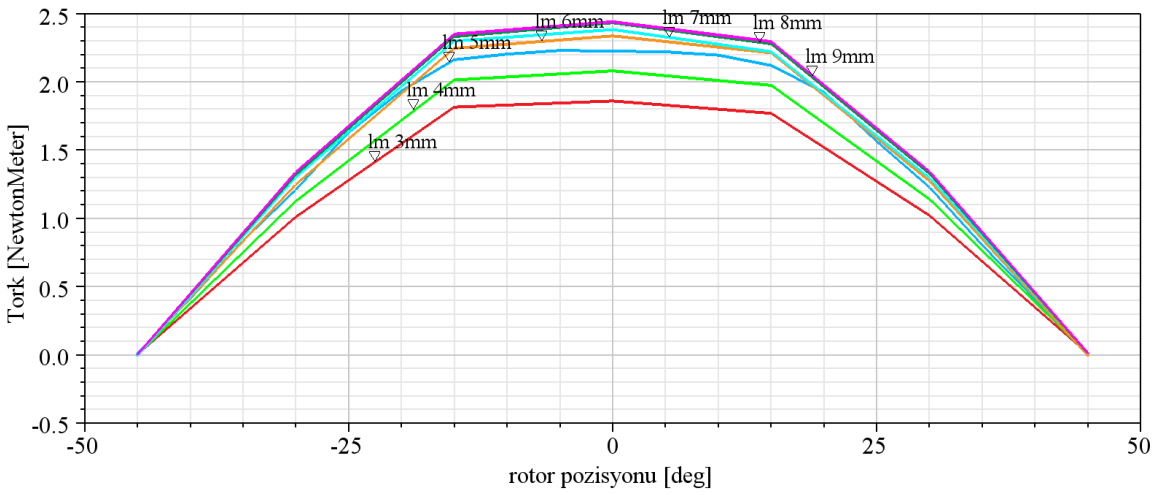


Şekil 5.8. Sargı yay açısının (θ_s) değişiminin rotor açısı-tork eğrisinde etkisi

Şekil 5.7'de sargı yay açısının 85º ve stator iç çapının (Di) 70 mm olduğu durumda, rotor kutup açısının değişiminin performansa etkisi gösterilmiştir. Benzer şekilde Şekil 5.8'de de

aynı sınır değerlerde kutup yay açısının 55º olduğunda stator sargı yay açısının değişiminin rotor pozisyonu-açı eğrisine etkisi gösterilmiştir. Her iki şekilden de görüleceği üzere sargı ve kutup yay açısı değerleri birbirlerine yaklaştıkça tork değeri artmakta ancak çalışma bölgesindeki doğrusallık azalmaktadır. İstenen çalışma bölgesinde tasarım belirlenebilmektedir. Bu doğrultuda ±15º lik çalışma bölgesinin stator sargı ve kutup yay açısı değerlerinin sırasıyla 85º ve 55º olduğu durumda sağlandığı gözlenmiştir.

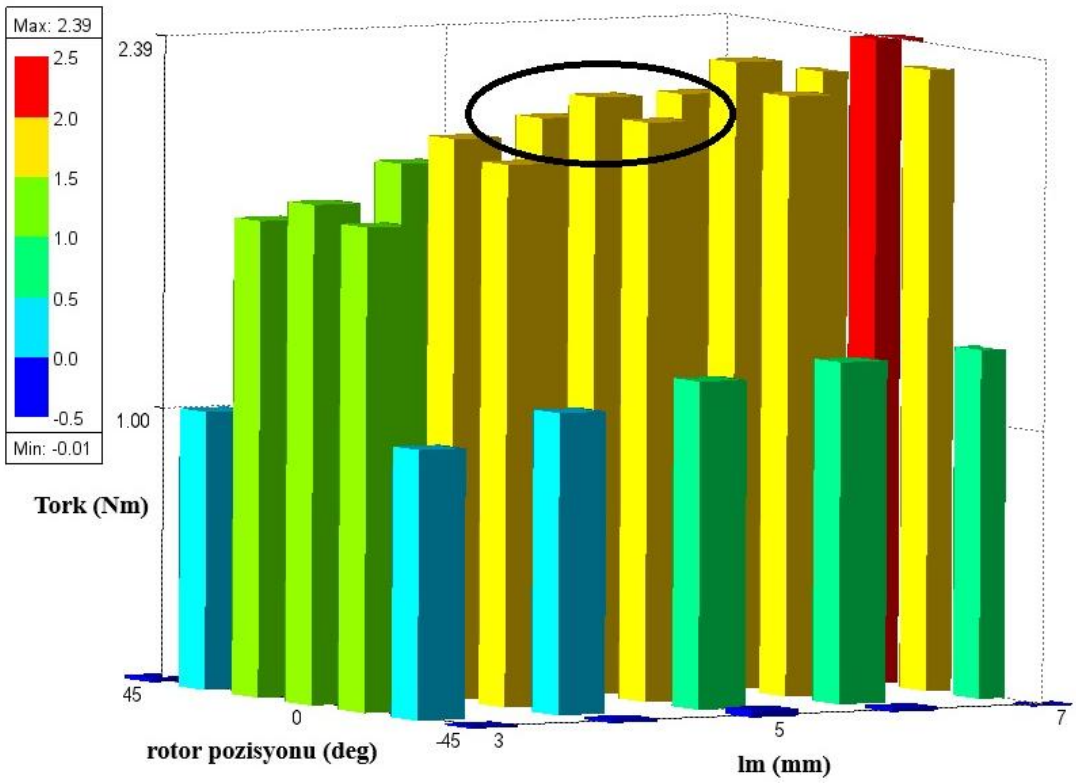
Performansını etkileyen bir diğer değişken mıknatıs geometrisidir. Nadir elementlerdeki zaman zaman tedarik zorluğu ve maliyetler ile motor tasarımlarında mümkün olan en küçük boyutta mıknatıs kullanılmaktadır. Bu bağlamda dış sınırlamalar, stator iç çap, sargı ve kutup yay açısı ve hava aralıkları mesafesi sabit kaldığında, mıknatıs boyunun değişimi rotoru büyütecek veya küçültecektir. Mıknatıs kalınlığının rotor ile paralel ölçekte değişimi gözetilerek kalınlığın değişiminin rotor pozisyonu-tork eğrisine etkisi Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Mıknatıs kalınlığı (l_m) değişiminin rotor açısı-tork eğrisinde etkisi

Şekilden de görüleceği üzere mıknatıs kalınlığının artması mıknatısın ürettiği manyeto motor kuvvetini artırdığından tork artmaktadır. Ayrıca mıknatısın kalınlığının artması, stator iç çapının sabit olduğu durumda rotorun radyal uzunluğunun azalması durumudur. Bu durumda rotor malzemesinde dolaşan manyetik akıyı değiştirmesinden dolayı torku etkilemektedir. Tüm bu hususlar ile tork eğrisinin, mıknatıs kalınlığının (l_m) 5 mm olduğu durumda en doğrusal olduğu anlaşılmaktadır. Bu değere kadar doğru orantılı artan tork eğrisi bu değerden sonra bozulmaktadır.

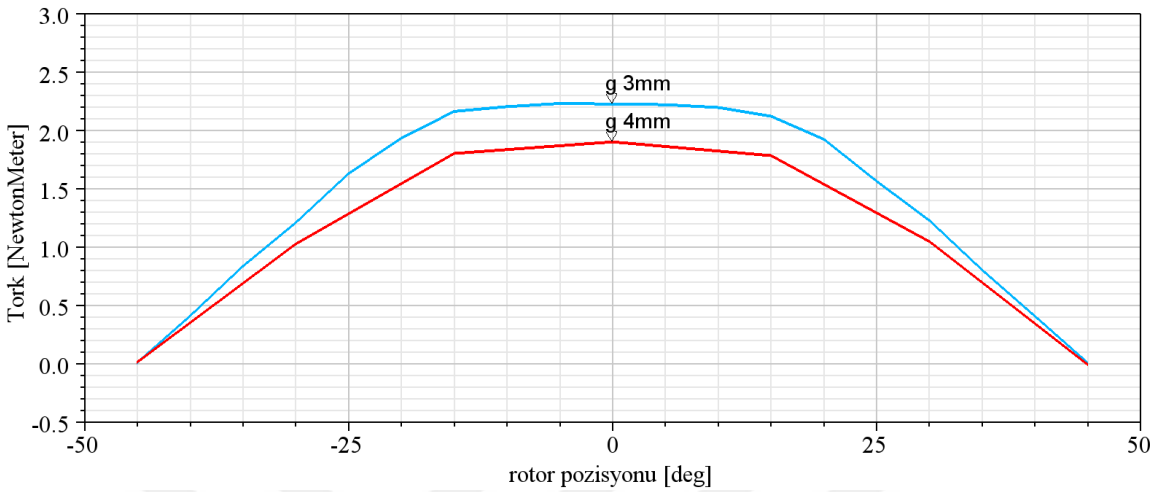
Mıknatıs kalınlığının etkisi, stator iç çapının (Di) 70 mm olduğu durumda ±15º lik çalışma bölgesini sağlayan sargı ve kutup yay ölçülerinde incelenmiştir. Stator iç çapının artması sarım alanını artırdığından daha yüksek torka neden olduğu Şekil 5.6'da gösterilmişti. Bu yüzden stator iç çapının artması durumunda mıknatıs kalınlık etkisi incelenmiş aynı kalınlıkla mıknatısta torkta çok az artış gözlemlense de tork doğrusallığında bir miktar bozulma ve stator-rotor malzemenin doyum sınırlarına çok yaklaştığı görülmüştür. Sonuç olarak Şekil 5.10'da da görüldüğü gibi en ideal durum stator iç çapının 70 mm, mıknatıs kalınlığının ise 5 mm olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.10. Mıknatıs kalınlığı (l_m) değişiminin rotor açısı-tork eğrisinde etkisi (3d sütun gösterimi)

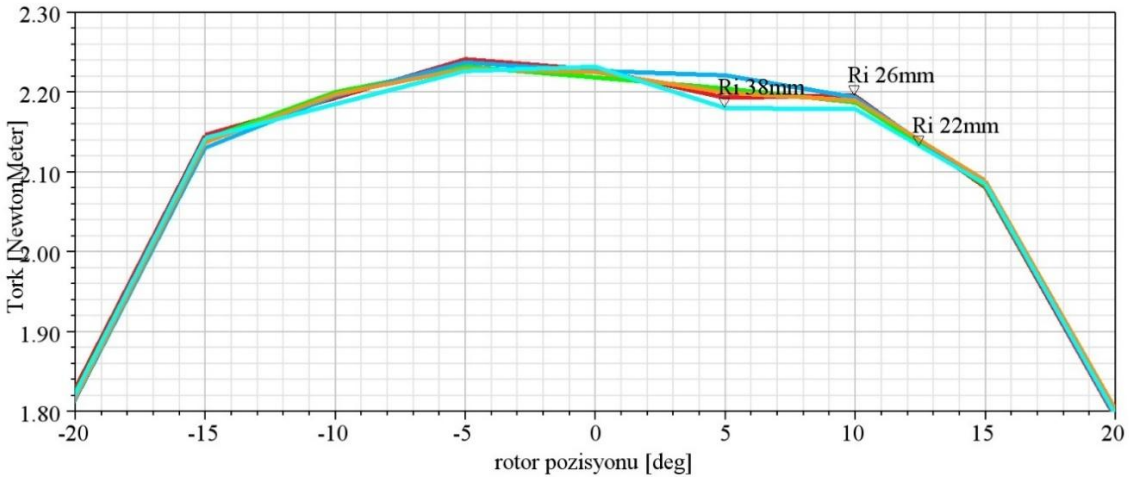
Motor geometrisindeki değişkenlerden bir diğeri de hava aralığı ve mekanik açıklıklardır. Hava aralığı mesafesinin torka etkisi analitik hesaplamalarda ortaya çıkarılmış, açıklık mesafesi işçilik durumlarına göre ayarlanmaktadır. En yüksek tork, hava aralığının en düşük olduğu durumda olmakla birlikte mıknatıslı rotorun stator ile eş merkezli yapısından dolayı yerleşim oldukça problemlidir. Sarım kalınlığının altında boşluk olamayacağı için hava aralığının bir miktar artmasının rotor pozisyonu-tork eğrisine etkisi Şekil 5.11'de verilmiştir.

Şekilden de görüleceği üzere mekanik açıklığın artması tepe torkta kayıba neden olmaktadır. Ancak doğrusallık aynı kalmıştır.



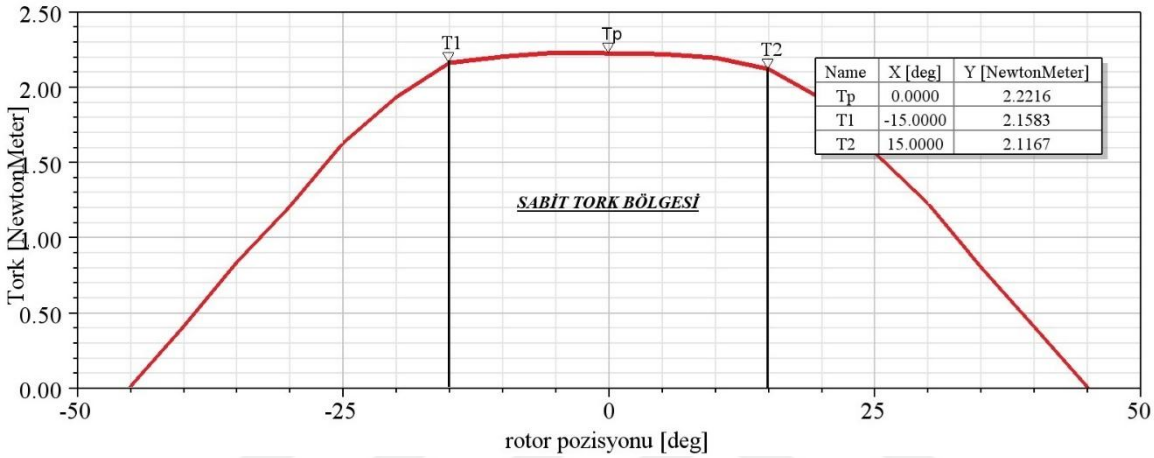
Şekil 5.11. Hava aralığı mesafesinin rotor açısı-tork eğrisine etkisi

Rotor iç çapı veya şaft mesafesinin değişimi de rotorda dolaşımdaki manyetik akıyı etkileyen bir faktördür. Motorda bir taraftan hareketli kısmın hafif, küçük olması istenirken diğer taraftan doyuma gitmeden mümkün olan en yüksek tork istenir. Şekil 5.12 ‘de rotor iç çap değişiminin torka etkisi verilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere rotor malzemesinde iç çap arttığında malzeme küçüldüğünde manyetik akı yoğunluğu artmasına rağmen tepe torka %1-%2 negatif etkisi görülmektedir. Burada en uygun iç çap, rotor miline, işçiliğe ve rotora bağlanacak yüke göre belirlenecektir.



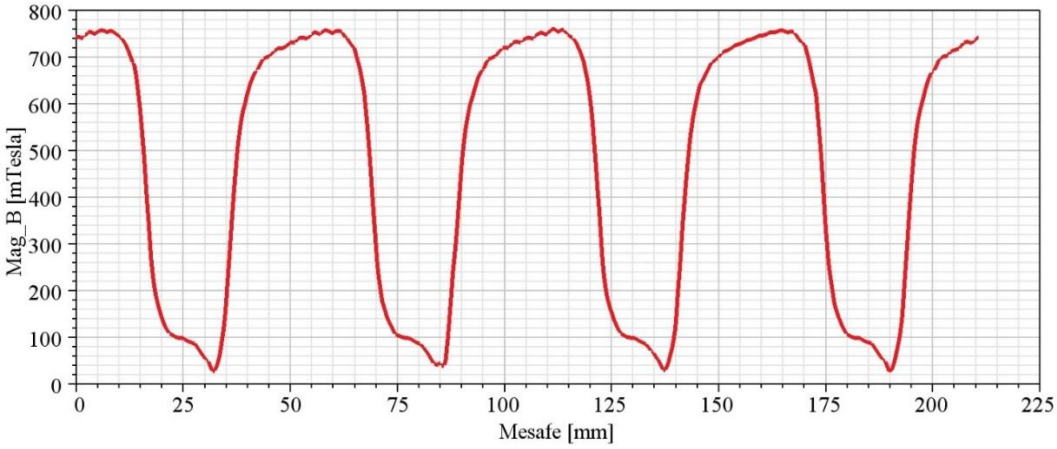
Şekil 5.12. Rotor iç çap mesafesinin rotor açısı-tork eğrisine etkisi

Değişkenlerin üzerine yapılan incelemelerde sınırlamalar gözetilerek bulunan en iyi tasarımın tork pozisyon eğrisi, Şekil 5.13'deki gibidir. Şekil 5.13'de gösterildiği gibi tepe tork değeri, rotor konumu 0'a geldiğinde 2,221 Nm olarak bulunmuş olup -15º de 2,158 Nm tork değeri ve +15º de 2,116 Nm tork değerleri tepe torka neredeyse eşit olup ideal duruma %95 olarak yaklaşılmıştır. Şekilden görüleceği üzere -23º ile +23º arasında tepe torkun %80 ve üzeri gözlenebilmektedir.

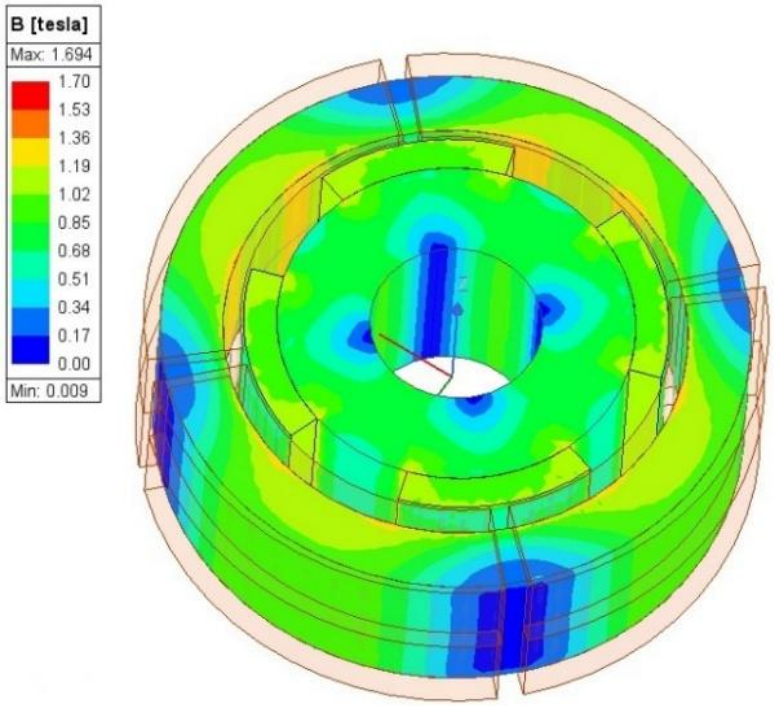


Şekil 5.13. LATM3500 Tork-açı eğrisi

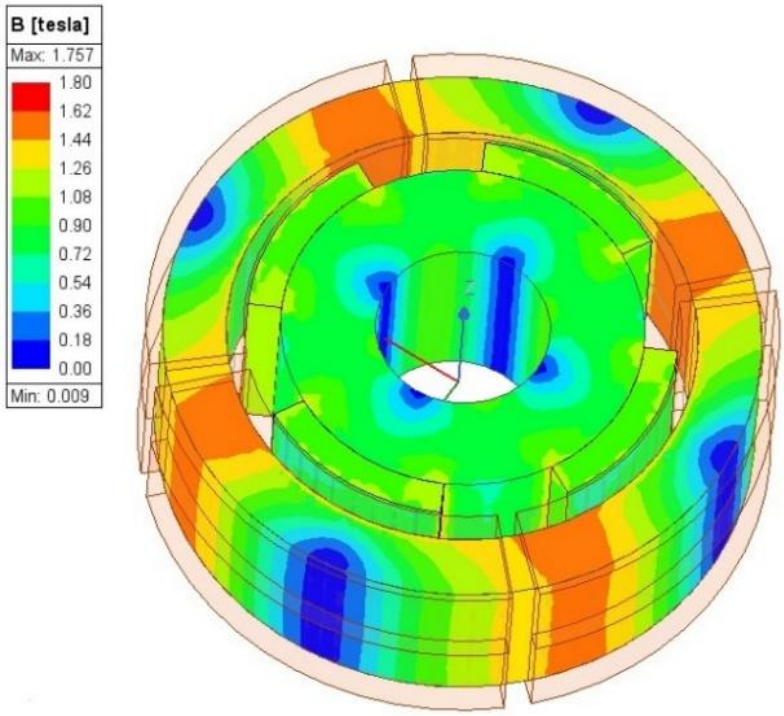
Torkun üretilmesini sağlayan manyetik akı yoğunluğunun hava aralığındaki dağılımı Şekil 5.14'de gösterildiği gibidir. 4 kutuplu LATM3500'de kutup bölgelerinde manyetik akı yoğunluğu değeri yaklaşık 0,8 T değerine ulaşırken kutupların dışında azalmaktadır. Kutuplarda simetrik manyetik akı dağılımı oluşmuş olup stator, rotor ve mıknatısların farklı pozisyonlarda manyetik akı dağılımları Şekil 5.15'de gösterildiği gibidir.



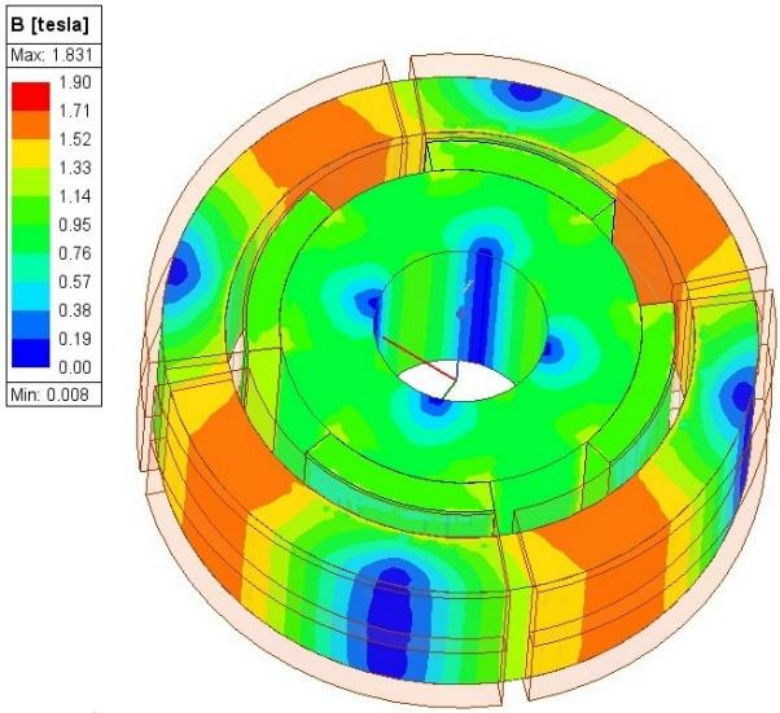
Şekil 5.14. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı



(a) Rotor konumu -45°



(b) Rotor konumu 0°

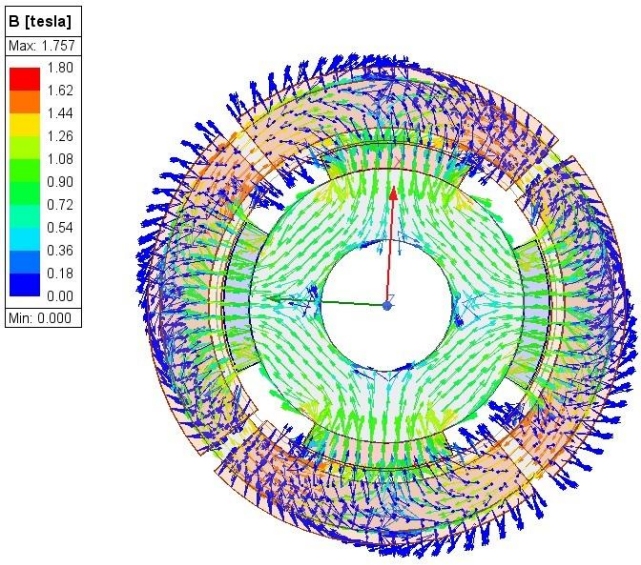


(c) Rotor konumu 15°

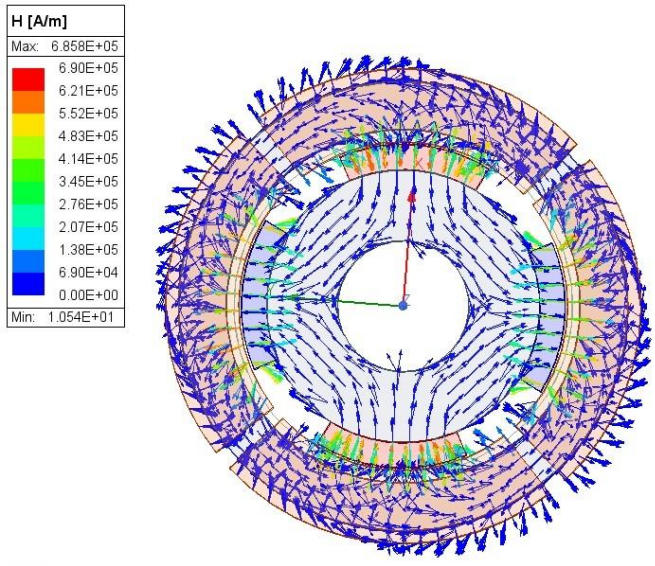
Şekil 5.15. LATM3500 farklı pozisyonlarda manyetik akı yoğunluğu dağılımları, (a) Rotor konumu -45°, (b) Rotor konumu 0°, (c) Rotor konumu 15°

Şekil 5.15'den de görüleceği üzere, malzeme üzerinde manyetik akı yoğunluğu değeri farklı pozisyonlarda değişmekte, rotorun sargı ile karşı karşıya geldiği 0° konumunda maksimum olduğu görülmektedir. Malzemenin hareket yörüngesinde doyum sınırlarına ulaşmadığı anlaşılmıştır.

Manyetik akının vektörel dağılımları manyetik analizde incelenmiştir. Mıknatısların oluşturduğu manyetik akının hava aralığına, sonra sargılar üzerinden stator malzemesine ve daha sonra komşu kutuplara yönelimi Şekil 5.16'da verilmiştir. Kaçak akıların göz ardı edilmediği tasarımda manyetik akılar sargılardan geçen akımın polaritesine göre bir yönde yoğunlaşmaktadır. Şekil 5.16-a ve Şekil 5.16-b'de de görüleceği üzere pozitif akımın etkisi ile manyetik akı yoğunluğunun statorda sol üst taraf ve yine statorda sağ alt tarafta olduğu görülmüştür.



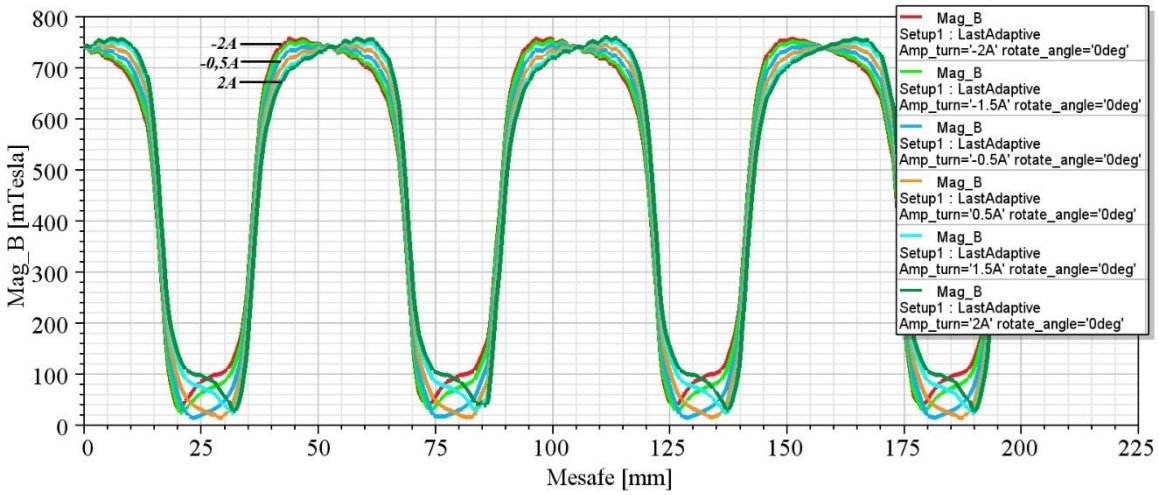
a) Manyetik akı yoğunluğu vektörel dağılımı



b) Manyetik alan şiddeti vektörel dağılımı

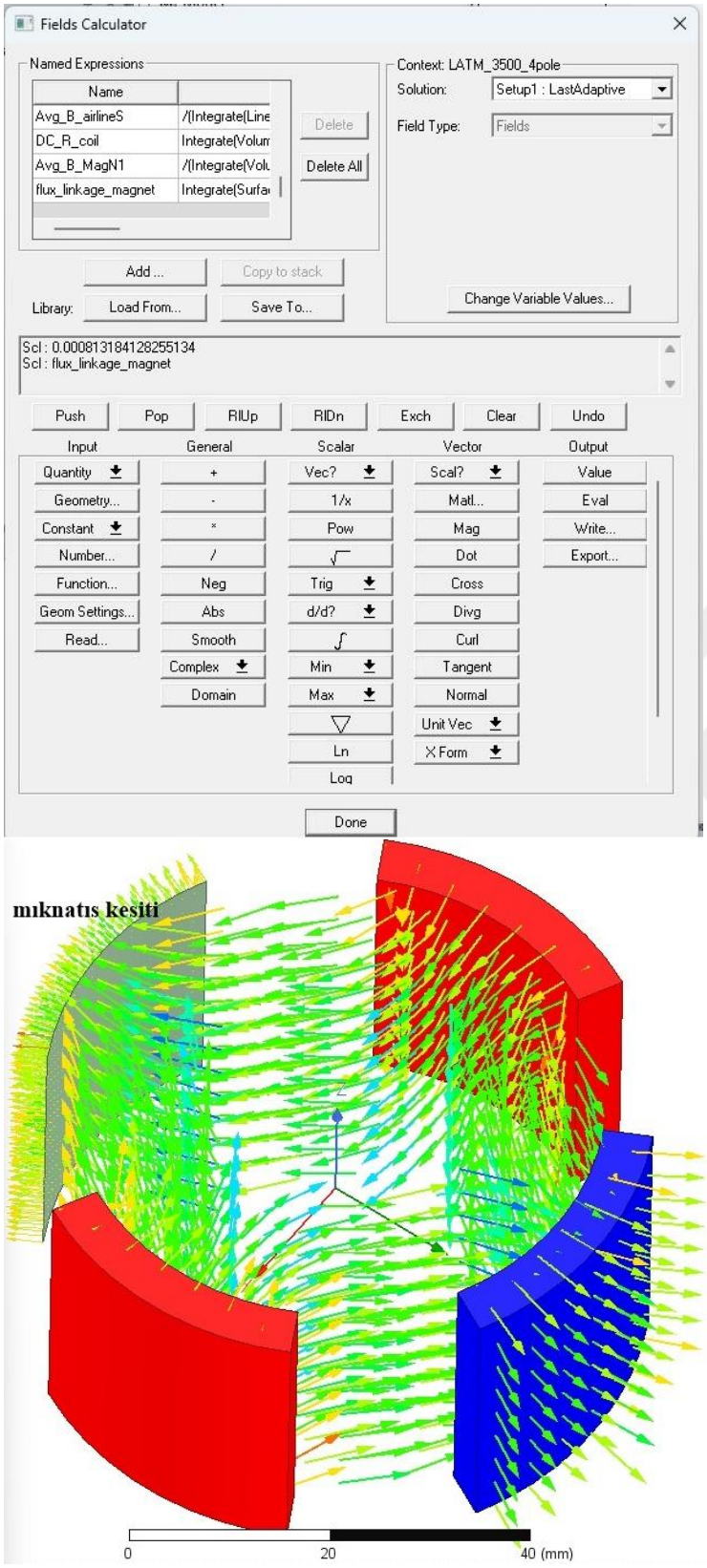
Şekil 5.16. Manyetik akı ve manyetik alan şiddeti vektörel dağılımları, (a) Manyetik akı yoğunluğu vektörel dağılım, (b) Manyetik alan şiddeti vektörel dağılım

Manyetik akının yoğunlaşma yörüngesi akımın yönü ile dolayısıyla rotorun hareket yönüne bağlıdır. Hava aralıklarındaki simetrik manyetik akı yoğunluğu eğrisi akımın polaritesi ile değişse de kutupların sargının tam karşısında olduğu durumda orta noktada aynı manyetik akı yoğunluğu değeri tespit edilmiştir. Şekil 5.17'de de gösterildiği gibi sargı ile kutup arasında hava aralığındaki manyetik akının tepe değeri ve tepe değerine ulaştığı yeri akıma bağlıdır.



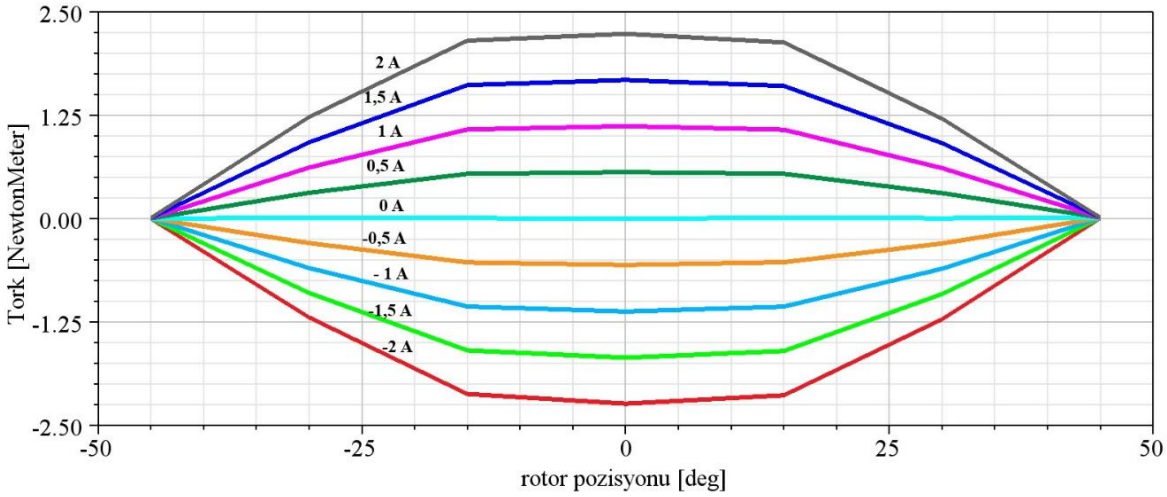
Şekil 5.17. Farklı akımlarda hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu değişimi

Analitik hesaplamalarda manyetik akının hesaplamasında ortalama yarıçap ve bu yarıçapın kesitinden yararlanılarak mıknatıs ve hava aralığındaki akı hesabı yapılmıştı. Bu hesaplamaları test etmek amacıyla mıknatıstan ortadan kesit alınıp ortalama manyetik akı hesabı yaptırılmıştır ve Şekil 5.18'de de görüldüğü gibi 0,813 mWb manyetik akı geçişi tespit edilmiştir.



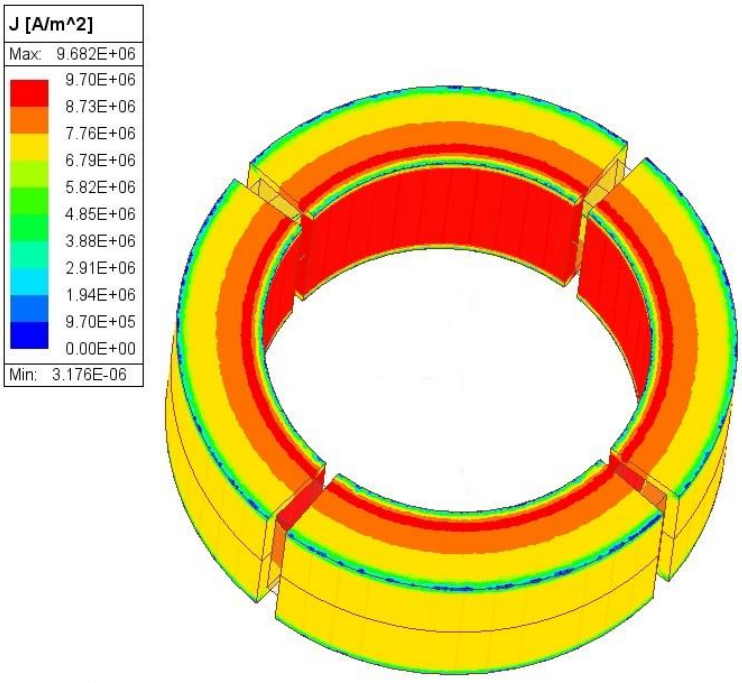
Şekil 5.18. Manyetik akı hesaplayıcı

Akım yönü ve büyüklüğü torkun da yönünü ve büyüklüğünü belirlemektedir. Akım değişiminin tork üzerine etkisi Şekil 5.19'da verilmiştir.



Şekil 5.19. Farklı akımlarda torkun değişimi

Torkun değişiminin akımla doğru orantılı olduğu ve negatif yönlü akımda aynı büyüklükte ancak zıt yönde tork elde edildiği görülmüştür. Manyeto statik analizde motorda ayrıca sargılar için akım yoğunluğu gözlenmiştir. Akım yoğunluğunun stator iç çevrede sargıların olduğu alanda olduğu görülmüş yine bu alan da manyetik alan enerjisinin diğer bölgelere göre daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Sargıların kutuba bakan yüzeyindeki tarafın, kuvveti ve torku belirlediği ve akım yoğunluğunun hava soğutma ortamında sınırlar içinde kaldığı Şekil 5.20'de görülmüştür.



Şekil 5.20. Akım yoğunluğu dağılımı

AHP ve Ansys'de magnetostatik analizlerinden elde edilen sonuçlar yardımıyla belirlenen alternatifler arasında en iyi seçenek Çizelge 5.3'de verilen parametreler olduğu görülmüştür. Analitik hesaplamalarda sunulan denklemlerde bu parametreler yerine konduğunda Çizelge 5.4'deki değerler yaklaşık olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 5.3. Tasarım boyutlandırma parametreleri

Tasarım Parametresi	Değeri
Stator dış çapı (Do)	88,9 mm
Stator iç çapı (Di)	70 mm
Rotor dış çapı (Ro)	64 mm
Rotor iç çapı (Ri)	26 mm
Mıknatıs kalınlığı (lm)	5 mm
Motor eksenel uzunluğu (La)	32 mm
Kutup sayısı (p)	4
Sarım sayısı (N)	580
Sargı yay açısı (θ_s)	85 derece
Kutup yay açısı (θ_r)	55 derece
Hava aralığı (lg)	3 mm
Mekanik açıklık (MC)	0,5 mm
Sabit çalışma bölgesi (θ_0)	$\pm$15 derece

Çizelge 5.4. Tasarım parametrelerinin analitik hesaplama ve Ansys sonlu eleman analiz sonuçları

	Analitik Hesaplama Sonuçları	Sonlu Eleman Analizleri	Hata
ϕ_M	0,771 mWb	0,813mWb	% 5,44
B_m	0,851 T	0,898 T	% 5,52
B_g	0,681 T	0,688 T	% 1,02
I	2A	2A	-
T_p	2,41 Nm	2,21Nm	% -8,29

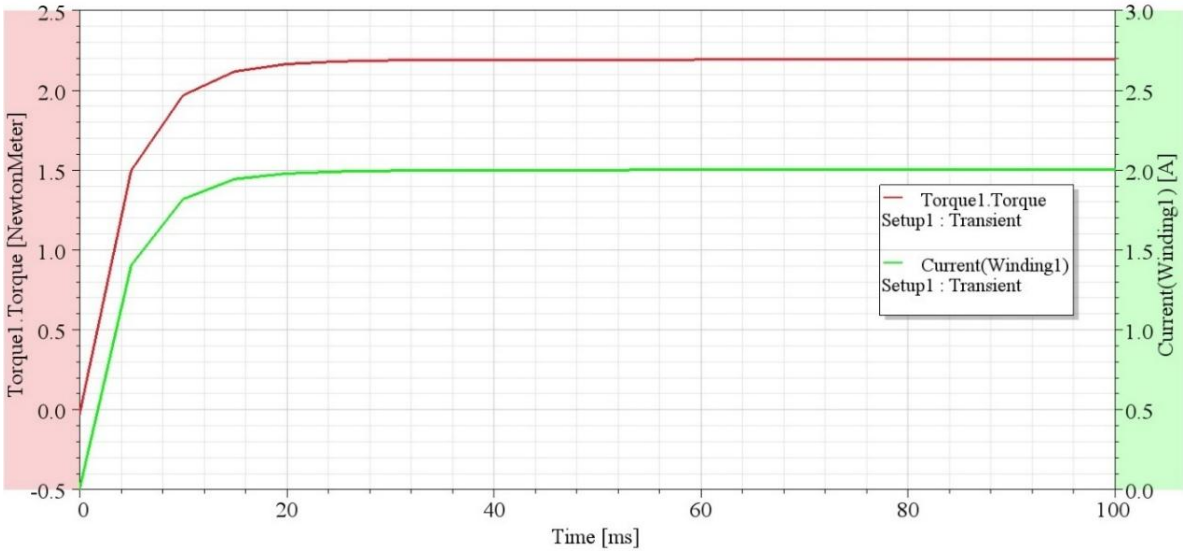
Analitik hesaplamalara bakıldığında Ansys manyetik analizde yapılan simülasyon sonuçları ile büyük oranda örtüştüğü görülmüştür.

5.4 Geçici Durum Analiz Süreci

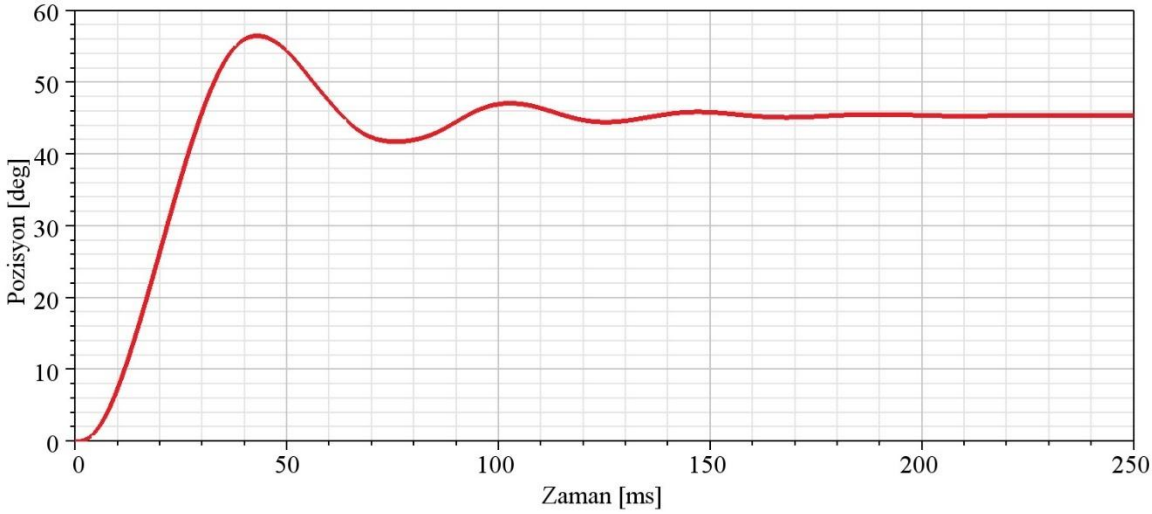
Manyetostatik analizlerde zaman değişkeni yoktur ve bu yüzden indüklenen gerilim de yoktur. Genellikle sabit akım geçen iletkenler ile kalıcı mıknatısların analizleri yapılır. Önceki bölümlerde de gösterildiği gibi manyetik akı yoğunlukları, manyetik alan şiddetleri, manyetik kuvvet ve tork, akım yoğunlukları, manyetik alan enerjileri vb. gibi parametreler manyetostatik analizler ile incelenir.

Ancak elektrik makinası tasarımlarında motorun dinamik davranışı, zamanla gösterdiği tepkiler ve kayıplarda incelenmelidir. Motorun akımının değişmesi, manyetik alan değişmesine, endüktif tepkilere, eddy akımlarına sebep olur. Manyetik alanın değişmeside indüklenen gerilimlerin değişmesine neden olur. Motorda anahtarlama elemanları ile yapılan kontrolde veya ilk enerji verildiğinde kararlı hale gelmesi süreci değişkenlik gösterir ve incelenmesi gerekmektedir. Bu yüzden motorun geçici durum analizleri yapılmalıdır.

Ansys Electronics'de tasarımı yapılan motor geçici durum analizlerine tabi olmuştur. Manyetik analizde sargılara sabit amper-tur sarım, bir başka deyişle sabit manyetomotor kuvvet atanırken, geçici durum analizde sarım sayısı belirleyip bu sarımdan geçen akım ataması yapılmıştır. Bu akım sabit akım kaynağından olabildiği gibi bir devre üzerinden de belirlenebilmektedir. Motorda sargı hesaplamaları önceki bölümlerde detaylı verilmiş olup sarım sayısı tek bobinde 580 olduğunda 0,40 mm kesit bakır için yaklaşık 64 m bakır kullanılmalıdır. Buradan sargı direnci yaklaşık 8,57 ohm olduğu anlaşılmaktadır.
Ansys Electronics'de geçici durum analizinde sargıların akım yönü için akım terminalleri karşılıklı sargılarda aynı yönde olacak şekilde belirlenmiş ve 70V DC besleme gerilimi ile enerjilendirilmiştir. Sargılardan 2A geçtiğinde akım ve tork eğrisi Şekil 5.21'de verilmiştir. Torkun akımı takip ettiği ve manyetostatikte ve analitik hesaplamalarda görülen değerleri doğruladığı görülmektedir.



Şekil 5.21. Geçici durum analizi: tork ve akım eğrisi



Şekil 5.22. Geçici durum analizi: pozisyon eğrisi

Geçici durum analizinde motion setup ile motor yüksüz durumda iken pozisyon testi yapılmış ve 0 dereceden 45 dereceye yaklaşık 150 ms'de ulaştığı Şekil 5.22'de görülmüştür.

Tasarımı yapılan LATM3500'ün Ansys simülasyon sonuçlarının benzer geometrideki literatür örnekleri ve endüstriyel ürünler ile karşılaştırması Çizelge 5.5'de verilmiştir. Bu sonuçlar ile birim hacimdeki tork miktarının alternatiflerinden daha yüksek olduğu simülasyon ortamında gösterilmiştir.

Çizelge 5.5. LATM3500 motorun birim hacim-tork yönünden karşılaştırması [2,15,44,45,81].

Ürün Adı	Kutup Sayısı	Tork Hassasiyeti (Nm/A)	Tepe Tork (Nm)	Dış Çapı (mm)	Motor Yükseklik (mm)
LATM3500	4	1,11	2,221	88,9	32
Ref 2	4	0,2	0,35	84	16
Ref 15	2	1,11	2,48	89,46	48
ICPE TQR-28	4	0,148	0,296	70	16
MOOG TD4094	6	0,339	1,016	103,98	23

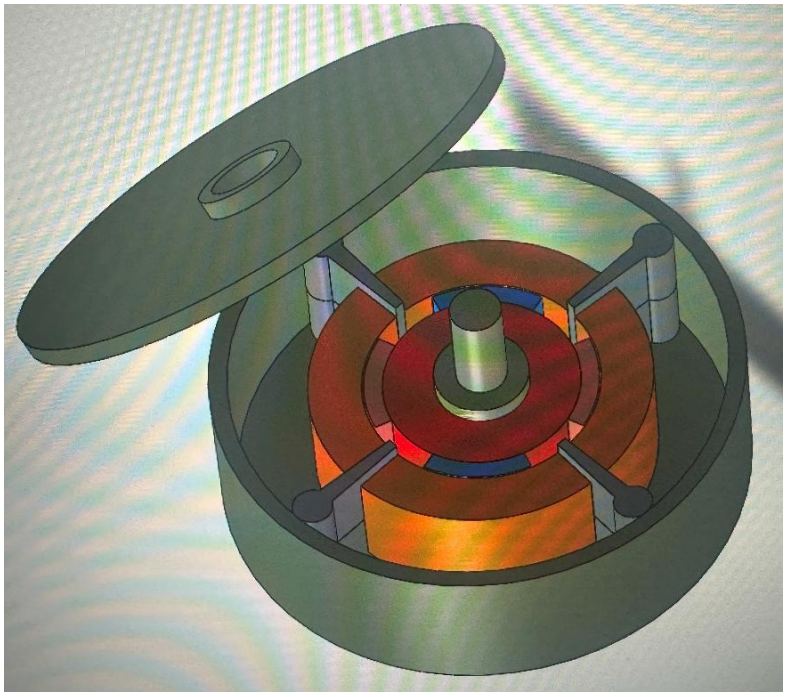
Manyetik analiz ve geçici durum analizleri analitik hesaplamaları doğrulamakta olup, prototip üretimini takiben ileriki bölümlerde gerçek zamanlı pozisyon denetimi detayları ile açıklanacaktır.

6. ÇERÇEVESİZ SINIRLI AÇILI ÇOK FAZLI TOROİDAL MOTORUN ÜRETİM AŞAMASI

6.1. Giriş

Bu bölümde matematiksel ve sonlu eleman analiz yöntemi aracılığıyla manyetik ve geçici durum analizleri sonrası geliştirilen sınırlı açılı toroidal motorun prototip sürecinden bahsedilecektir. Üretim aşamalarında önceki bölümlerde öngörülen parametreler ele alınmıştır. Tasarım sürecinde ise karşılaşılan zorluklar ve bu durumlar için yapılan çözümler gösterilmiştir.

Önceki bölümlerde tespit edilen parametreler ile LATM3500 motorun birim hacimde ürettiği tork miktarının alternatiflerine göre yüksek olması, motorun prototipini başlatmaya gerekçe olmuştur. Üretim sürecinde gözetilmek üzere motorun 3D katı çizimi Şekil 6.1'de verilmiştir. Şekil 6.1'den de görüleceği üzere stator üzerine toroidal sarımlı sargılar, stator ile eş-merkezde mil, rotor-mıknatıs montajı, sargılı statoru tutan gövde ve motoru kompakt ve taşınabilir hale sokmak için alt ve üst kapak gösterilmektedir.



Şekil 6.1. Motor katı görünüm

6.2. Prototip Süreci

6.2.1. Stator ve rotor

Motorda sargıları taşıyan bileşen statordur. Stator, manyetik eşdeğer devrede dolaşımdaki manyetik akıyı taşıyan ferromanyetik malzemedir. Bu malzeme için yüksek doygunlukta akı yoğunluğuna sahip, düşük histeresiz kayıpları ve düşük maliyet belirleyici olarak sayılabilir. Temin edilebilme ve üretim kolaylıkları açısından prototip için Çelik 1010 malzeme seçilmiştir. Bu malzeme düşük karbonlu bir çelik türü olup, makina imalatlarında sık rastlanılır. Düşük karbon oranı ile şekillenmesi kolay olup kaynaklanabilmektedir. Önceki bölümlerde manyetik analizlerde B-H eğrisindeki diz noktasındaki akı yoğunluğunun aşılmadığı geometriler de kesim yapılmıştır. Resim 6.1'de torna işlemi sonrası stator verilmiştir. Stator için 70 mm iç çap, 88.9 mm dış çap ve 27 mm yükseklik manyetik analizlerde belirtildiği gibi hazırlanmıştır.



Resim 6.1. Stator nüve

Akı yoğunluğunun geçtiği bir diğer malzeme rotordur. Stator için seçilen çelik 1010, rotor içinde tercih edilmiştir. Hareketin gözleneceği rotorda ağırlığın mümkün olduğunca küçük olması ve akı yoğunluğu dikkate alınarak mıknatısların montajına uygun bir şekilde kesim yapılmıştır. Rotor mıknatıslardan ve mıknatısları tutan ferromanyetik malzemeden (Resim 6.2) oluşur. Mıknatısı taşıyan rotorun hafif ve küçük olması hareketli kısımda serbestlik açısından verimli olsa da malzemenin doyuma gitmesi hava aralığında daha az manyetik akıya neden olur. Tüm bu durumlar gözetilerek rotor iç çap için önceki bölümlerde gösterilen

verilerden hareketle 26 mm iç çap, 64 mm dış çap, 32 mm yükseklikte rotor mili hazırlanmıştır.



Resim 6.2. Rotor

6.2.2. Sarım süreci

Motorda hareket başlangıcını sargılardan geçen akım oluşturmaktadır. Bu yüzden iletken seçimi ve sarım işlemi önemli etkenlerdendir. İletkenin yüksek iletkenlik oranı olması ve mekanik dayanımının iyi olması istenir. Kırılgan olmayıp esnek olması ve sıcaklık dayanımının iyi olması önemlidir. Sarım şeması oluşturulması sarım öncesi kolaylık sağlamaktadır. Prototip motor için 0.40 mm kesitinde bakır iletken kullanılacaktır.

LATM3500 için analitik ve manyetik hesaplamalarda sargı için ayrılan geometri, sarım sayısı ve akım tespit edilmiştir. Oluksuz 4 kutuplu tasarımda 4 ayrı bobinin simetrik sarılması amaçlanmıştır. Analitik hesaplamalarda bobin yay uzunluğunun (85 derece) motorun sabit tork çalışma bölgesine etki ettiği gözetilerek sarım işlemi gerçekleştirilmiştir. Ancak, motorun küçük boyutları nedeniyle sarımla ilgili bir takım zorluklar ortaya çıkmıştır.

Analitik hesaplamalarda hava aralığı ve mekanik açıklık hesaplamalarında sargı için 2.5 mm ayrılmıştır. Sargının stator malzemesi ile arasında izolasyonu sağlamak amaçlı kullanılan izolasyon bandı da düşünüldüğünde 1.7 mm-1.8 mm gibi bir kalınlık toplam sargı kalınlığı olarak ayrılmaktadır. Bu durumda Eş. 4.12’de ifade edilen sargı kalınlığı hesaplamasında katman sayısının 5 olacağı anlaşılmaktadır. Buradan hareketle bir bobin için 5 katmanlı sarım da yaklaşık 580 tur sarım sayısına ulaşılmaktadır. 0.40 mm bakır için yapılan bu

hesaplamalar sargının sarım makinelerinde boşluksuz, kayma olmadan robot sarım şeklinde sarılacağı durumda gerçekleşmektedir. Fakat bu boyutlarda motor için, bobinler arası simetrik ve eşit boşluklu sarıma yönelik sarım makinesi temin edilememiş olup, stator üzerine toroidal sarım elle gerçekleştirilmiştir. (Resim 6.3) Elle sarımda bobinler arası mesafeler eşit tutulmuş, ancak sınırlı alanda 4 katman sarım yapılabilmiştir. Sarım sayısı, sargıdan geçen akımla birlikte ampertur sarım olarak sargıların oluşturduğu manyetomotor kuvvetini belirlemektedir. Şekil 5.19'da verilen akımın değişiminin torka etkisinin doğrusal olduğu tespit edildiğinden katman sayısının azalması rotor açı-tork eğrisinde yalnızca tepe torkun değerinde değişime neden olacaktır. Eğrinin karakteristiğinde bir değişim olmayacaktır.

Sarım sonrası sargıların üzerine ikinci bir izolasyon kaplaması yerine, izolasyon verniği kullanılmıştır. Belli bir süre tüm verniğin sargılarda kalmasına müteakip yüksek ısıda fırında 2 saat bekletilmiş, sargıların izolasyonu ve dayanımı güçlendirilmiştir. Resim 6.4'de fırınlama sonrası sargılar gösterilmektedir. Sargı uçları toplam 8 adet çıkartılmış, sarım yönlerine göre ayrılmıştır.



Resim 6.3. Stator sarım süreci



Resim 6.4. LATM3500 için sargılı stator

6.2.3. Mıknatıslar ve rotor montajı

Mıknatıslar temelde elektromıknatıslar ve sabit mıknatıslar olmak üzere ikiye ayrılabilir. Elektromıknatıslar, mıknatısiyet özelliği manyetik geçirgen malzemede sarılı iletkenden akım geçmesi prensibine dayanır. Akımın kesilmesi ile mıknatıslık karakteristiği kaybolan mıknatıslardır. Diğer taraftan sabit mıknatıs manyetik alan etkisine bağımlı olmadan sürekli, sonsuz bir zaman için enerjisini tutan elektrik makinaları uyartımında kullanılan mıknatıslardır. Sabit mıknatıslar günümüzde ferrit mıknatıslar (seramik), Alnico mıknatıslar ve nadir toprak mıknatıslar olarak ayrılabilir. Ferrit mıknatıslar demir-oksit, baryum vb. maddelerden yapılır ve doğada bol bulunmaktadır. Ancak kalıcı akı yoğunluklarının düşük olması, ısıl dayanımının az olması gibi sebeplerle diğer mıknatıslardan dezavantajlı durumdadır. Bir diğer mıknatıs alüminyum, nikel ve cobalttan oluşan Alnico'dur. Yüksek sıcaklık, yüksek manyetik özellikleri gibi üstün yönleri var iken düşük koersif kuvvet olması negatif özelliğidir. Son olarak nadir toprak elementli mıknatıslardan en çok karşılaşılan mıknatıslar NdFeB ve SmCo'dır. Bu mıknatısların manyetik özellikleri diğer iki tip mıknatıslara göre oldukça yüksektir. Çizelge 6.1'de mıknatısların karşılaştırmalı özellikleri verilmiştir. Sabit mıknatıslardan NdFeB birim hacimde enerji üretimi ve manyetik özelliği üstünlüğü ile daha sık kullanılmaktadır. SmCo'ya göre tek dezavantajı yüksek sıcaklıkta

çalışma uygulamalarında demanyetizasyon riski daha yüksektir. Ancak çalışmanın Çizelgede belirtilen sıcaklıklarda olmaması, motorun boyutunun küçük olması sebebi ve boyut avantajı ile NdFeB seçilmiştir.

Çizelge 6.1. Mıknatısların karakteristikleri

	B_r (T)	H_c (kA/m)	$(BH)_{max}$(kj/m^3)	Birim enerji başına fiyat ($/J)	Curie Sıcaklığı (°C)	Maksimum çalışma sıcaklığı (°C)
NdFeB	1,20	870	200-290	3,5	310	140
SmCo	0,97	750	130-190	8,5	720	250
Alnico	1,1	130	70-85	4	830	500
Seramikler	0,4	240	27-35	0,5	450	300

Manyetik analizlerde de NdFeB mıknatıslardan en güçlü manyetik etkiye sahip N52 mıknatıs ele alınmış, en ideal geometri analizlerde ortaya çıkarılmıştır. Mıknatıs üretimi ve işçiliği ülkemizde yapılamadığından yurtdışından N52 mıknatıs, tasarım ölçülerinde yay şeklinde temin edilmiştir.



Resim 6.5. N52 Mıknatıs

Resim 6.5'de gösterilen mıknatıslar çok yüksek çekim gücüne sahip olup aynı zamanda ince yapısı nedeniyle kırılgan olduğu için işçilik özenle yapılmıştır. 4140 çelik malzemeden yapılmış rotor mili ve rotora N52 mıknatıs özel yapıştırıcıyla simetrik olarak yapıştırılmıştır. Kutup yönleri karşılıklı mıknatıslarda aynı, komşu mıknatıslar birbirine zıt polaritede konumlandırılmıştır. Resim 6.6'da rotor mıknatıslarla birlikte tamamen hazır halde gösterilmektedir.



Resim 6.6. Rotor, mil ve mıknatısların montajı

6.3. Motor Prototip Sonucu

LATM3500 bileşenleri ayrı ayrı üretildikten sonra motorun bir araya getirilmesine geçilmiştir. Stator ve rotorun eş merkezli yapısı ve yüksek güçlü mıknatıslardan dolayı motoru bir araya getirme işçiliği zahmetli bir süreçtir. Hava aralığındaki eşit ve küçük mekanik açıklıklar stator-rotor montajında dikkat edilmelidir. Motorda rotor serbest durumda iken sargılı stator sabittir. Bunun için bobinler arası boşluklarda statorda kaynak yerleri oluşturulmuş ve alüminyum gövdeye soğuk lazer kaynak yapılmıştır. Resim 6.7'de sargılı stator-alüminyum gövde ve alt kapak gösterilmiştir.



Resim 6.7. Alüminyum gövde ve sargılı stator montajı

Alt kapağa rotor montajı da ayrı olarak test edilmiş rulman bağlantı elemanları montajı tamamlanmıştır. Resim 6.8 ve Resim 6.9'da kapaklar ve rotor montajı gösterilmiştir. Alüminyum kapaklar motorda sonrası için işlem kolaylığı sağlamış, olası durumlarda sargıya veya mıknatısa müdahale imkanı vermiştir. Kapaklarda ayrıca motor prototip sonrası olabilecek mekanik işçilik için pay bırakılmış motor miline dışardan enkoder bağlantısına uygun hazırlanmıştır.



Resim 6.8. LATM3500 motor alt kapak ve rotor montajı



Resim 6.9. LATM3500 motor üst kapak

Son olarak motorda bağlantılar tamamlanmış kapaklar kapatılmış prototip üretimde karşılaşılan zorluklar ve problemlere çözüm yöntemlerinden bahsedilmiştir. Motor sürücü testlerine hazır hale getirilmiştir. Aşağıda Resim 6.10'da prototipi tamamlanan LATM3500'in enkoder montajı öncesi son hali gösterilmiştir.



.
Resim 6.10. LATM3500 prototip son görünüş

7. ÇERÇEVESİZ SINIRLI AÇILI ÇOK FAZLI TOROİDAL MOTORUN KONTROL SÜRECİ

7.1 Giriş

Analitik hesaplamalar, manyetik analizler ve prototip süreçlerinin tamamlanmasını takiben, motorun hassas bir denetime ihtiyacı vardır. Bu amaçla matematiksel modelleme oluşturulmuştur.

Eş. 3.3 ve Eş. 3.4'de kısaca değinilen elektriksel ve mekanik eşitlikler aşağıdaki gibi tekrar ifade edilmiştir.

Elektriksel eşitlik;

$$V = L\frac{dI}{dt} + RI + K_e\omega \tag{7.1}$$

Boşta çalışmada mekanik eşitlik;

$$J_m\ \frac{d\omega}{dt} + B_v\omega = K_tI \tag{7.2}$$

olarak bulunur. Eş. 7.1 ve Eş. 7.2'de J_m rotorun eylemsizlik momenti, B_v viskoz sürtünme katsayısı, ω rotorun açısal hızı, θ rotorun pozisyonu, K_e ters EMK sabiti, R sargı direnci, L sargı endüktansı, V uygulanan gerilim olup, eşitliklerden Laplace dönüşümü ile akım çekilirse;

$$I(s) = \frac{V(s)-K_esθ(s)}{(R+Ls)} \tag{7.3}$$

$$K_tI(s)=J_m\ s^2\ \theta(s)+ B_vs\ \theta(s) \tag{7.4}$$

$$K_t\ \left[\frac{V(s)-K_esθ(s)}{(R+Ls)}\right] = \theta(s)[J_m\ s^2 + B_vs\ ] \tag{7.5}$$

olarak bulunur. Buradan rotor pozisyonu çekilirse;

$$\theta(s) = \frac{K_t}{J_m s^2 + B_v s} \frac{(V(s) - K_e s\theta(s))}{(R + Ls)} \tag{7.6}$$

tespit edilir. Giriş gerilimi ile rotor pozisyonunun transfer fonksiyonu;

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{LJ_m s^3 + (RJ_m + B_v L)s^2 + (K_e K_t + RB_v)s} \tag{7.7}$$

olarak belirlenir [68-71,79]. Açısal hızın giriş gerilimine göre transfer fonksiyonu ise;

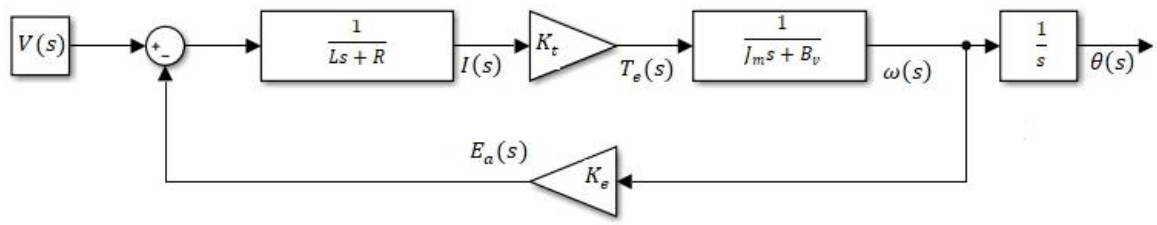
$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{LJ_m s^2 + (RJ_m + B_v L)s + K_e K_t + RB_v} \tag{7.8}$$

şeklinde ifade edilir. K_t tork sabitidir.

Çizelge 7.1. LATM3500 Motor parametreleri

Parametre	Değeri
R	4,25 ohm
L	85 mH
K_e	0,571Vs/rad
J_m	0,442x10-3kg.m2 (Nms2/rad)
B_v	1,368x10-3 N-m-s/rad
K_t	0,571Nm/A

Motorun boşta çalışması durumunda blok şeması Şekil 7.1'deki gibi olmaktadır. Yük de çalışma durumunda ise $T_L(s)$ negatif olarak $T_e(s)$ ye eklenerek blok oluşturulur.



Şekil 7.1. LATM3500 rotor pozisyonu transfer fonksiyonu blok şeması

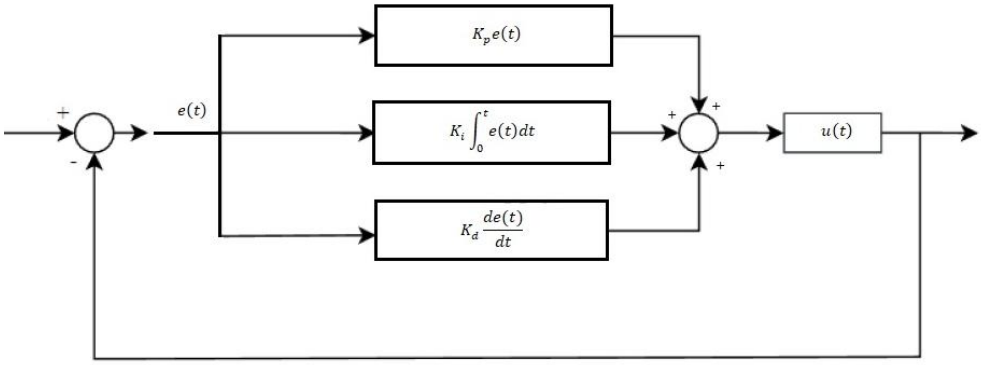
7.2. Sistemin Kontrolü

Bir sistemin veya motorun çıktısının, hız, tork veya konum olması istenebilir. Ancak denetimsiz durumda motor enerjilendirildiğinde hedeflenen sonuç ortaya çıkmaz. Bunun sebebi motorun taşıdığı yükün değişmesi, sargılardan akan akımın davranışının değişmesi, sürtünme veya çevresel etkenler olabilir. Bazen motordan alınan çıktıdan yola çıkarak (geri besleme ile) bazen de geri beslemesiz kontrol ile motorun hedeflenen işi yapması sağlanır. Sürekli kontrolde geri bildirim gerekli olup, motorun hedeflenen görevini hedeflenen sürede ve mümkün olan en az enerji ile verimli gerçekleştirmesi için iyi bir kontrol sistem gereklidir.

Denetleyicinin basit, tutarlı ve anlaşılır olması gerekmektedir. Lineer olmayan durumlara karşı çeşitli kontrol teknikleri kullanılmaktadır. PID, bulanık mantık, yapay sinir ağları ile denetimler elektrik makinalarında rastlanılmaktadır. Son yıllarda özellikle yapay zekanın her alanda olması, gelişmiş ileri düzeyde kontrol sistemlerini beraberinde getirmiştir.

Tez çalışmasında ele alınan ve tasarımı yapılan LATM3500 için daha basit ve yaygın kullanılan PID denetim (oransal-integral-türev) oluşturulmuştur. PID denetimde K_p oransal kazanç, K_i integral kazancı ve K_d türevsel kazançtır. P kontrol, PI kontrol, PD kontrol ve PID kontrol olarak ayrı ayrı kullanılabilmektedir. Yalnız P kontrol en basit olanıdır. Burada çıkış sinyali ile referans sinyal farkından elde edilen hata değeri bir K_p katsayısı ile çarpılarak çıkışa uygulanır. P kontrolünün devreye girmesi, sistemin yükselme süresinin azalmasına neden olur ancak bozucu etkilerin olması (gecikme ve ölü zaman gibi) durumunda P kontrolörü osilasyona sebep olmaktadır. Sistemin kararsız davranışından kurtulmak amacıyla gelecekteki hataları öngörebilen D kontrolör kullanılmaktadır. Çıkış değerinin değişiminin takibi ve hata sinyalindeki ani değişimlerden kaynaklı çıkışdaki ani değişimleri önlemek için kullanılmaktadır. Kp bileşeni yüksek hata durumlarında sistemi hızla hedefe yaklaştırırken bazen hatanın küçük olduğu durumla bir etki gösterememektedir. Bu yüzden integral bileşeni devreye girmektedir. Bu katsayı ile geçmiş hataların toplamından esinlenerek küçük hatalar biriktirilir ve hedefe ulaşılması sağlanır. Tüm bileşenlerin devrede olduğu kontrol sistemde PID denetimde hatanın kullanılarak çıkış üretilmesi aşağıdaki denklem ve şekildeki gibi olmaktadır [10, 72].

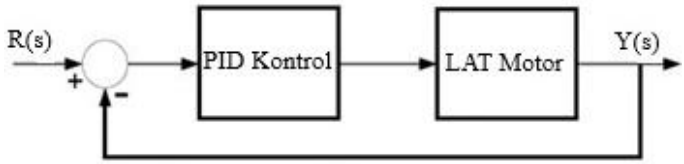
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{7.9}$$



Şekil 7.2. Motor kontrolü için PID denetim blok şeması

Eş. 7.1'den ifadenin transfer fonksiyonu;

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{7.10}$$

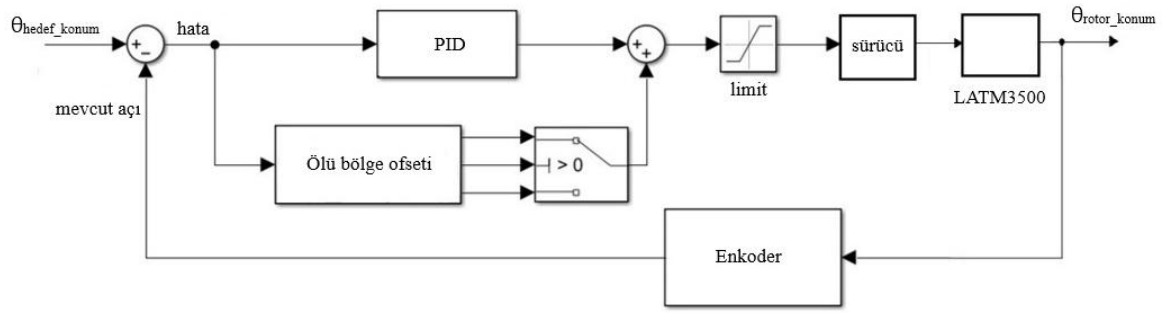


Şekil 7.3. PID denetimle motor kontrolü

Şekil 7.3'de motor bloğunun PID denetim ile kontrolü gösterilmiştir. Motordan beklenen görevin en iyi şekilde ifası için PID denetimin parametreleri doğru tespit edilmelidir. Bunun için Ziegler-Nichols yöntemi, deneme yanılma yöntemi ve bazı paket programlar bulunmaktadır. Tasarımı yapılan motorda fabrikasyon sürecinde de karşılaşılan bazı durumlar motorun lineer olmayan davranışını artırmaktadır. Örneğin sargılardaki bir miktar asimetrik yapı, rotor-stator montajında eş-merkezli yapıdaki küçük kaymalar bunlara örnek olmaktadır. Bunlardan dolayı kontrol parametrelerini doğru belirlemek çok önemlidir.

7.3. Pozisyon Kontrolü

LATM3500 için öncelikle pozisyon denetimi hazırlanmıştır. İleriki başlıklarda detayları bahsedilecek olan enkoderden pozisyon bilgisi alınarak açı değerine dönüştürülür ve referans açı ile karşılaştırıldıktan sonra hata değeri tespiti yapılmalıdır. Bu hata değeri PID katsayılarından geçirilip toplandığında çıkış değeri elde edilmektedir. Bu değerin pozitif veya negatif olması, büyük veya küçük olması çıkışın istenen yere ne kadar yakın olduğu hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 7.4. PID denetimli pozisyon kontrolü

Şekil 7.4'de gösterilen blok şemada hedef konuma girilen değer yakalanmaya çalışılmıştır. LATM3500'ün modellemesinde ihmal edilen bazı durumlar sebebiyle motor performansında lineer olmayan davranışlar bulunmaktadır. Rotorun ilk hareketi için gereken besleme gerilimi ile hedefe yaklaşınca ve hedefte istenen gerilimler farklıdır. PID parametrelerini tespit etmek amacıyla yapılan bazı yaklaşımlarda motorun hedef konuma ulaşabilmesi için taban bir çıkış gerektiği görülmüştür. Ölü bölge ofseti diye adlandırılan bir sabit değer hatanın büyük olduğu durumda devreye giren, hatanın bir kademe azaldığı durumda devreden çıkan ancak daha küçük bir sabit olarak devreye giren sistem düşünülmüştür. Hatanın belli toleranslar dahilinde kaldığı durumda tamamen ortadan kalkıp denetimi yalnızca PID'ye bırakan sistem tasarlanmıştır. Bu sayede motorun ilk hareketinde hızlı olmasını, hedefe yaklaşırken kademeli olarak azalması ve sonradan devreden çıkarak PID denetimle daha hassas konum aramaları sağlanmıştır.

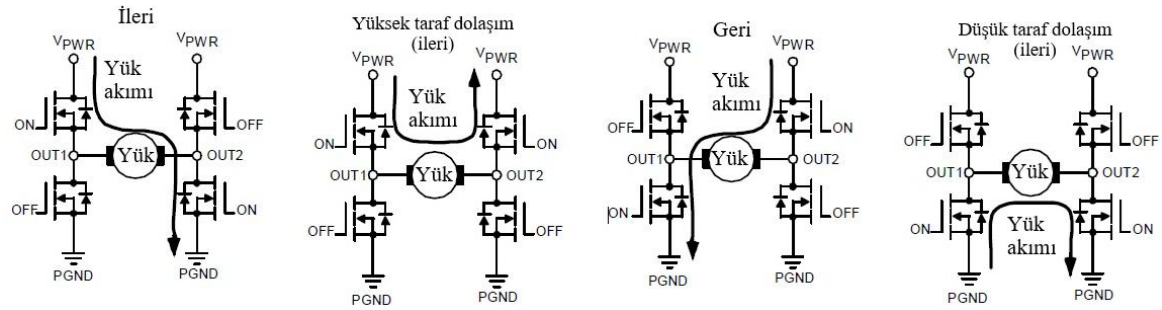
Çizelge 7.2. LATM3500 PID konum denetimi parametreleri

PID Parametreleri	Değeri
Kp	6,2
Ki	0,02
Kd	0,35

7.4. Enerjilendirme

7.4.1. H köprü

DC motorlarda akım yönünün ve hızının kontrol edilmesi amacıyla H köprüler sıklıkla kullanılmaktadır. H köprülerde yüksek frekanslar da kolay iletime geçebilen eleman olması sebebiyle anahtar eleman olarak genelde mosfet kullanılır. Doğru anahtarlama ile motor kontrolü hassas bir şekilde ayarlanabilmektedir. Mosfetlerin diyotları (body-diode) gerilim dalgalanmasını önleme, endüktansda biriken enerjinin boşaltılmasında kullanılmaktadır [73].



Şekil 7.5. H-köprü çalışma durumları [73]

H köprü de ileri ve geri çalışma (saat yönünde veya saat yönünün tersi yönde) anahtarlama elemanlarının çapraz şekilde açılması veya kapanması ile oluşur. Şekil 7.5'de de görüleceği üzere motorun ileri ve geri yönde çalışması için çapraz olarak Mosfetlerin ON durumu gösterilmiştir. Bir diğer çalışma durumu ise Mosfetlerin yüksek taraf (üst kol) da ON durumu olup alt tarafta OFF durumunda olması veya tersi durumdur. Bu durum yüksek taraf dolaşım modu veya düşük taraf dolaşım modu olarak tanımlanabilir. Yüksek taraf dolaşım modunda alt koldaki Mosfet kapandığında (OFF durumu) motor bobininde depolanan enerji yüksek

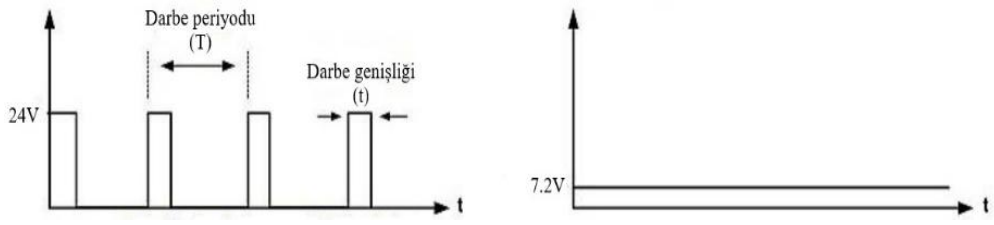
taraf diodları üzerinde dolaşıma geçip kaynağa geri döner. Yavaş frenleme modudur. Düşük taraf dolaşım modunda ise depolanan enerji toprağa geri döner ve güçlü fren etkisi gösterir.

Tez kapsamında tasarımı yapılan LATM3500'de 4 adet bobin bulunmaktadır. Karşılıklı sarımlar birbirine seri bağlanıp, motor dışına 4 adet uç çıkartılmıştır. Bir çift bobinin seri bağlantı uçları A+ A- dir. Diğer seri bağlanmış bobinlerin ise bağlantı uçları B+, B- dir. A sargı çiftine bir H köprü sürücü, B sargı çiftine ise ayrı bir H köprü sürücü tasarımı yapılmıştır. Aynı kaynaktan 2 kanallı H köprü çıkış olan sürücü ile motor beslenmiştir. Bu sayede sargı çiftlerine farklı polaritede ve büyüklükte gerilimler verilebilmekte ve kontrol sistemi için daha geniş çalışma alanı sunulabilmektedir.

7.4.2. PWM uygulaması

DC motor kontrolünde motorun hızını veya konumu kontrol etmek, uygulanan gerilimi kontrol etmektir. Hız kontrol uygulamasında çoğunlukla PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) yaklaşımı tercih edilmiştir. Bir yüke verilecek gücün ortalama değeri PWM kullanılarak kontrol edilebilmektedir. Yukarıda bahsedilen H köprüsü üzerinden PWM kullanılarak motora istenilen polaritede ve genlikte gerilim verilmektedir. Anahtarlama elemanlarının aç kapa hızları ve kayıpları PWM çalışmada dikkate alınmalıdır. Çünkü yüke verilen gerilim, anahtarın ne kadar süre açık olduğu ile ilgilidir. Görev döngüsü (duty-cycle) yüzde olarak belirtilir ve anahtarlamanın açık olduğu sürenin PWM periyoduna oranıdır. Örneğin; Şekil 7.6'da görüldüğü gibi 24V besleme kaynağından motora %30 görev döngüsünde PWM uygulandığında sargı uçlarına ulaşan gerilim, anahtarlama kayıpları ihmal edildiğinde 7,2 V olmaktadır.

$$Duty\ cycle\ (\%) = \frac{darbe\ genişliği\ süresi}{darbe\ periyodu} x100 \tag{7.11}$$

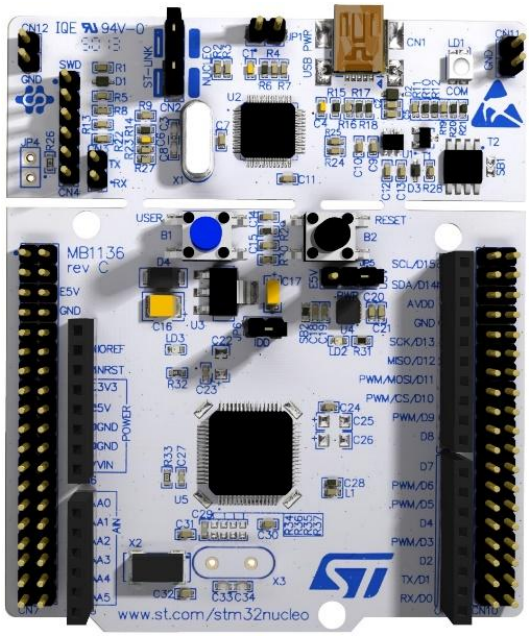


Şekil 7.6. PWM zamanlama gösterimi

Motora uygulanan gerilimin genliğinin yanı sıra önemli bir diğer durum PWM frekansıdır. Düşük frekansda çalışan motorlarda gürültü oluşmasıyla birlikte tork da dalgalanmalar oluşmaktadır. Ancak PWM frekansı 20 kHz üzerinde motorun daha sessiz çalışması, torkda daha az dalgalanma ve tepki süresi kısaldığı için hassas kontrol gözlenir. Yüksek frekansda çözünürlüğü artmış PWM'de akım değişimleri motorun bobinlerine daha sık enerji vererek daha pürüzsüz olur. Fakat çok sık anahtarlama ısınmayı ve dolayısıyla kayıpları da artırmaktadır.

7.5. Mikrodenetleyici

LATM3500 kontrol sürecinde yukarıdaki başlıklarda hesaplamaları verilen süreç, gerçek ortamda mikrodenetleyiciler yardımıyla sağlanmaktadır. Gömülü sistemlerde, motor kontrol uygulamalarında öncelikle verinin işlenmesi gerekmektedir. Bu veri sensörlerden gelen sıcaklık, basınç, uzaklık, açı olabilir. Analog ve dijital sinyallerin okunup işlenmesi işlemini yapar. Matematiksel hesaplamalar, analizler çok hızlı gerçekleşir [74]. Elektronik bileşenler ile çeşitli haberleşme protokolü UART, SPI, I2C..vb gibi kullanarak bağlantı kurar. Anlık sonuç beklenen gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılır. Düşük tüketimli olup endüstride, sağlık cihazlarında, otomasyonda, IoT, motor kontrolünde, vb. çoğu alan da kullanılmaktadır.



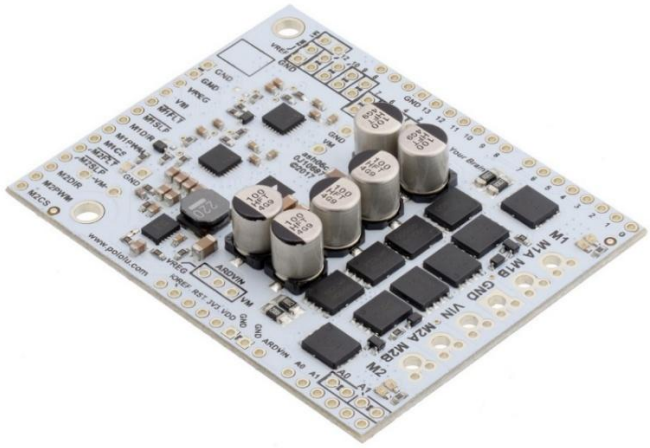
Resim 7.1. STM32F401Re [75]

Tez çalışmasında LATM3500 için mikrodenetleyici olarak STM32F401 seçilmiştir. ST Microelectronics tarafından üretilen bir mikrodenetleyicidir. ARM Cortex-M4 çekirdekli mikrodenetleyici gömülü sistemlerde kullanılır. Çalışma hızı 84 MHz olup çok sayıda dijital giriş çıkışa sahiptir. Bu sayede, çeşitli sensör ve donanımları kontrol etmek, eş zamanlı hesaplamalar yapmak için elverişlidir. Motor kontrolünde PWM çıkışlı uygulamalarda yüksek PWM üreteçlerine sahip olduğundan kullanışlıdır. 84 Mhz ile yüksek performansı PWM için hassas ayarlama yapmaya imkan tanır. Ayrıca ölü zaman ekleme özelliği bulunmaktadır. Geniş çevre birim desteği ile haberleşme protokollerinden SPI, I2C, USART, USB desteklemekte ve motor sürücü entegreleri, enkoderler vb elemanlar ile hızlı haberleşme yapabilmektedir. Ayrıca düşük güç tüketimi ile taşınabilir cihazlar gibi düşük güç uygulamalarında çalışabilmektedir [75,80].

7.6. Motor Sürücü Kartı

Tasarımı yapılan prototipi hazırlanan LATM3500 motorun PWM tekniği ile H köprü üzerinden sürülmesinde Pololu Co. tarafından üretilmiş yüksek güç çift kanal motor sürücü (G2-24v18) kartı temin edilmiştir. Resim 7.2'de de özellikleri verilen sürücü kart, motorun her bir sargısına uygulanan gerilimin kontrol edilmesini sağlayan mosfetlerden oluşur. Mosfetlerin anahtarlanmasını kontrol etmek için kontrolör kartından gelen PWM komutlarıyla çalışılması prensibine dayanır. Motor sargılarına DC gerilimin uygulanmasını ve besleme geriliminin polaritesini tersine çevirerek motorun her iki yönde hareket kabiliyeti edinmesini sağlar. Bu olay MOSFET anahtarlama kontrolüdür.

Bu kart DC motorlar, step motorlar servo motorlar gibi iki yönlü motorların hız, pozisyon ve tork kontrolünde kullanılmaktadır. Aynı anda 2 ayrı DC motoru kontrol edebildiği gibi tek bir motoru 2 ayrı çıkıştan da kontrol edebilir. 100 kHz gibi yüksek frekanslarda PWM ile çalışmaya müsaade eden bu kart da çalışma aralığı da 40V'a kadar izin vermektedir. Tasarımda faz sargılarını ayrı ayrı kontrol edebilme imkanı vermiştir. Robotik projeler, IoT cihazlar ve endüstriyel uygulamalarda rastlanılmaktadır.



Resim 7.2. Pololu G2 Yüksek Güç Çift Kanal Motor Sürücü 24v18 [76]

Pololu Çift Kanal G2-24V18 özellikleri başlıca aşağıdaki gibidir.

- Geniş çalışma aralığı: 6,5V-40V
- Lojik gerilim aralığı : 1,8V- 5,5V
- Motor kanal sayısı :2
- Kanal başına maksimum sürekli akım : 18A
- 100kHz e kadar PWM frekansı ayarlaması, (ultrasonik ve sessiz çalışıma uygun)
- 20mV/A oranında akım algılama (H köprü sürülmede)
- Motor beslemede ters gerilim koruma
- Kısa devre koruma,
- Düşük gerilim kapatma
- Ağırlık : 19g
- Boyutlar: 2,56” x 2,02”

7.7. Enkoder

Enkoderler genel olarak hareketten elektriksel sinyal üreten elektromekanik cihaz olarak isimlendirilebilir. Bu sinyallerin oluşması manyetik veya optik yolla olabilmektedir. Manyetik enkoderler manyetik alan değişimini okuyan sensörler vasıtasıyla çalışır, optik enkodere göre çevresel etkilere daha dayanımlıdır ancak düşük çözünürlük sunar. Optik enkoderler ise, ışığın geçtiği veya geçemediği bir diskin hareket halinde iken ışığın değişken şekilde geçmesi ve ışık değişimlerinin sensör aracılığıyla algılanması prensibine dayanır. Bunun yanı sıra motorlarda dönme hızını ve yönünün tespitinde kullanılan hal etkili

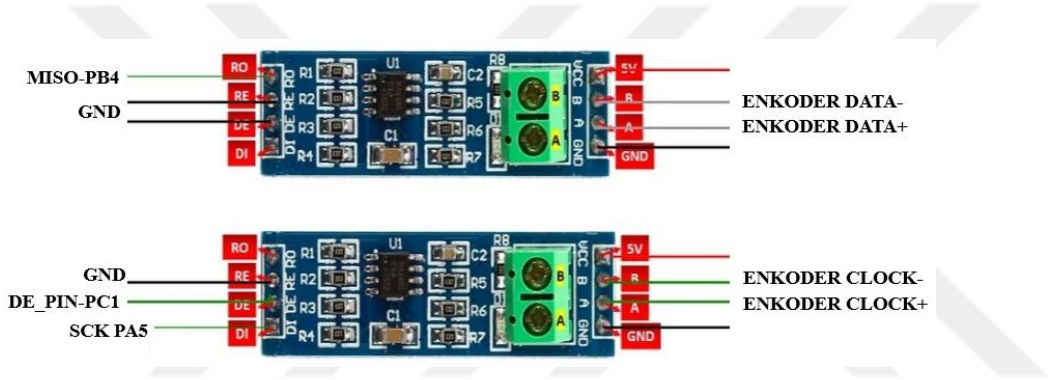
enkoderler, artımlı (incremental) enkoderler ve mutlak (absolute) enkoderler endüstride kullanılmaktadır. Artımlı enkoderler başlangıçta enerji verildiğinde bulunduğu konumu 0 olarak belirleyip üzerine işlem yapma prensibi vardır. Motor miline bağlanan artımlı enkoderlerde pozisyon kontrolü yapılabilir. Döner harekette kare sinyal üreterek mevcut konuma yönelik sayma işlemi yapar ve bilgi verir. Başlangıç noktası belirlemede referans kaynağa ihtiyaç duyması mutlak enkoderlere göre eksi yönüyken, mutlak enkoderlere göre ucuz olması artı yönüdür. Mutlak (absolute) enkoderler her bir pozisyona özel kod üretmesi, gerçek pozisyonu tam olarak göstermesi, hassasiyet gerektiren uygulamalarda tercih edilme nedenidir. Enerji kesilmesinde mevcut konumunu korur. Bu tür enkoderlerde dönen bir disk üzerinde aynı merkezde halka şeklinde düzenlenmiş optik desenler bulunur. Her halka ikili bir biti temsil eder ve diskin tüm pozisyonları için ayrı kod oluşur. Kod çözme işlemi ayrıca hesaplanmalıdır. Çözünürlükleri çok yüksektir. Diğer enkoderlere göre maliyetli ve daha karmaşık yapıya sahiptir. Mutlak enkoderin haberleşme işlemleri genellikle BiSS-C (Bidirectional Synchronous Serial - Continuous) veya SSI (Synchronous Serial Interface) seri haberleşme protokolleri ile gerçekleşmektedir. SSI'da tek yönlü ve daha kısa mesafe ve daha düşük hızda haberleşme sağlanırken, Biss-C de çift yönlü haberleşme daha yüksek hız, daha uzun mesafe avantajları vardır. Biss-C protokolünde hata kontrolü, çoklu veri performansı daha üstündür. Bu yüzden hassas pozisyonlama işlemlerinde daha sık tercih edilmektedir.



Resim 7.3. Biss-C Mutlak (Absolute) Enkoder [77]

Resim 7.3'de motor için temin edilen Biss-C Mutlak enkoder gösterilmiştir. Boyutu oldukça küçük olup 16 bit çözünürlükte 10 Mhz haberleşme hızına kadar okuma yapabilen enkoder, bir kaplin aracılığıyla LATM3500'e montajı yapılmıştır. Motor milindeki hareketleri yüksek

hızda ve doğru değerde yakalaması amaçlanmıştır. Montajı yapılan Biss-C mikro enkoderin 6 adet bağlantı uçları vardır. Bunlardan ikisi besleme gerilimi ve toprak ucudur. Diğer iki uç pozitif ve negatif data çıkışlardır. Son ikili ise pozitif ve negatif clock girişleridir. Biss C enkoderler genellikle diferansiyel iletişim kullanır, bu yüzden veri ve clock ikilidir. Ancak STM32F401'de enkoderin SPI ile haberleşmesi için bu diferansiyel sinyalleri tek uçlu sinyale dönüşümüne ihtiyaç vardır. Bu yüzden data için ayrı, clock için ayrı olmak üzere iki adet MAX485 entegre kullanılmıştır. Data için kullanılan MAX485'den STM32F401 kartın MOSI pinine, clock için kullanılan MAX485'den STM32F401 kartın SCK pinine bağlantı yapılmıştır. Enkoder, MAX485 ve STM32F401 ortak toprak bağlantısı ile birlikte besleme gerilimleri sağlanmıştır. Resim 7.4'de bağlantı uçları ile birlikte gösterim verilmiştir.



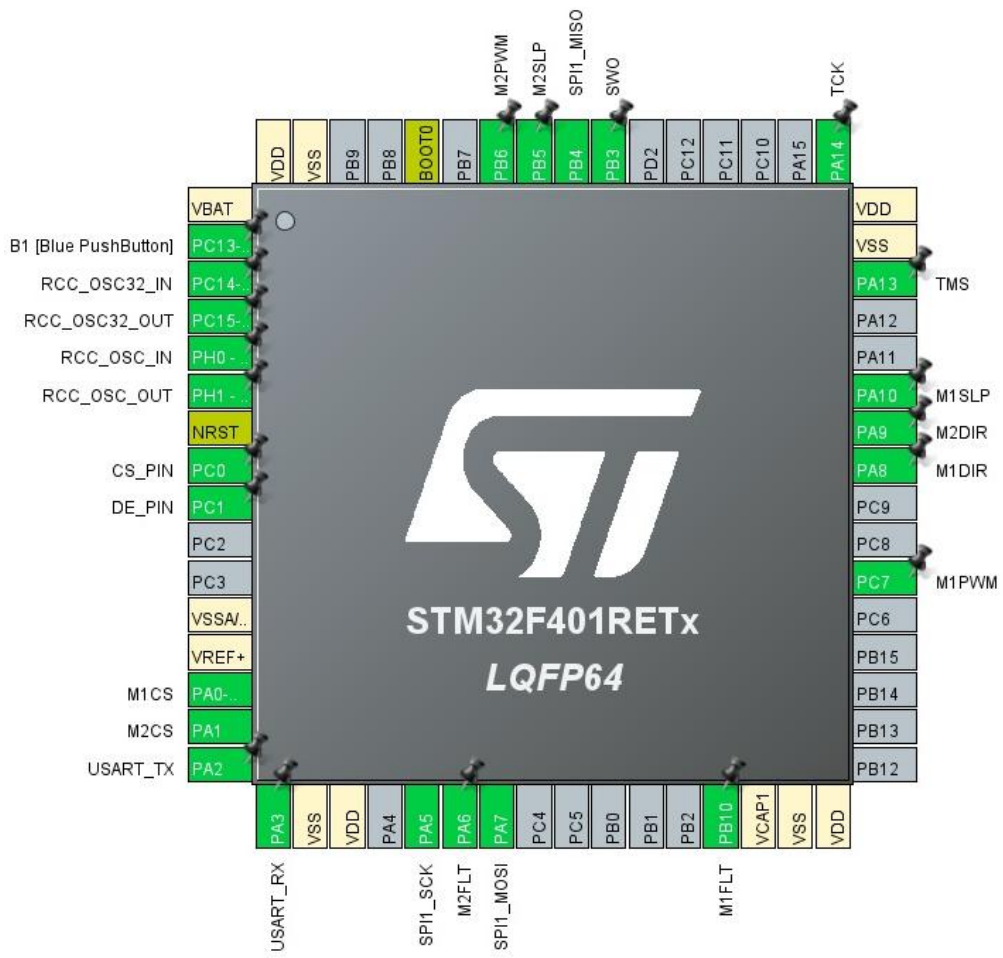
Resim 7.4. MAX485 entegresi

7.8. STM32Cube IDE Yazılım Uygulaması

Tasarımı yapılan motorun diğer donanımlarla birlikte uyumlu çalışması ve STM32F401Re kartına uygulanacak işlemler için STM32Cube Ide programı kullanılmıştır. STM32Cube IDE Eclipse tabanlı geliştirme ortamıdır. C veya C++ dili desteklenmesiyle mikrodenetleyicilere program yazılabilmektedir. Mikrodenetleyicinin (GPIO, UART, SPI, I2C, PWM, ADC, DMA, TIMER vb.) çevresel pinleri konfigüre edilebilmektedir. Kod derlemek, mikrodenetleyiciye kod yüklemek, gerçek zamanlı hata ayıklama, adım adım çalıştırabilmek, register ve memory kontrol edebilmek gibi özellikleri vardır. Otomatik oluşturulan C dosyaları ile kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır.

Şekil 7.7'de mikrodenetleyicinin pin organizasyonu gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere SPI haberleşme için, SCK, MOSI ve MISO pinleri seçimi yapılmıştır. LATM3500 sürme de H köprü çalıştırılmasında kullanılmak üzere M1PWM ve M2PWM pinleri ayrı

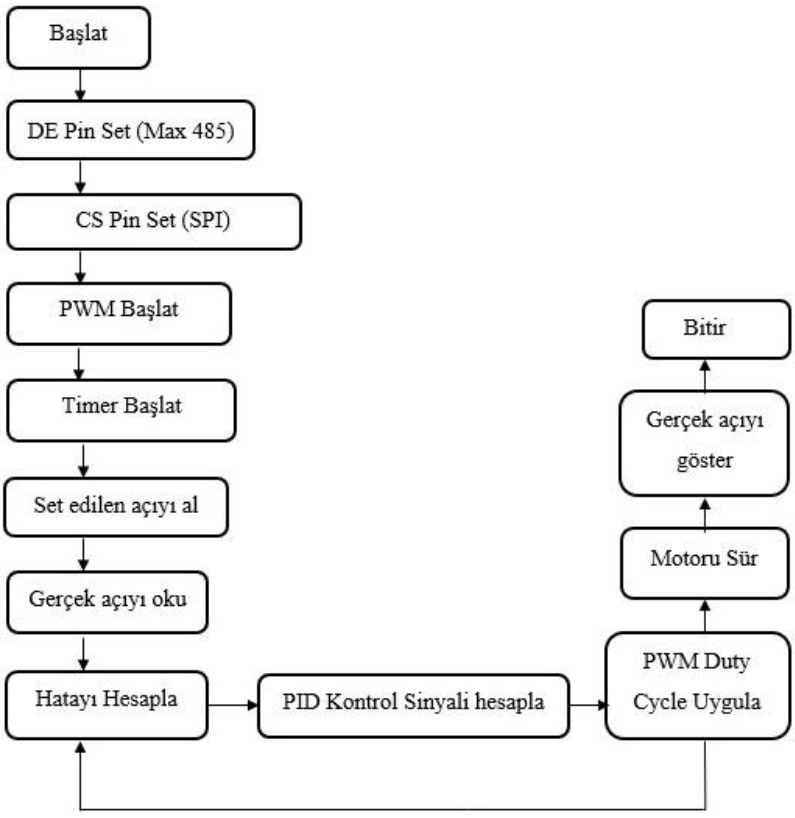
timer olarak seçilmiştir. Motorda aynı polaritede beslenen bir sargı grubu M1PWM üzerinden çalışırken, diğer sargı grubu M2PWM üzerinden ayrı timerlarla beslenmiştir. M1DIR ve M2DIR, GPIO çıkış olarak seçilmiş olup H köprü de M1PWM ve M2PWM yönlerini kontrol etmek amacıyla oluşturulmuştur. M1PWM'in kontrol ettiği sargı M1DIR reset olduğunda bir yönde enerjilenirken, M1DIR set olduğunda diğer yönde enerjilenir. M2PWM ve M2DIR da aynı mantıkla çalışmaktadır. Pololu G2 24V18 kartı için Datasheet'de belirtilen hata algılama durumlarını kontrol etmek amacıyla M1FLT ve M2FLT pinleri GPIO giriş olarak atanmıştır. Motor sürücü kartının algıladığı yüksek akım, sıcaklık veya gerilim problemlerinde kartı düşük tüketim ve uyku moduna almak için M1SLP ve M2SLP pinleri GPIO çıkış olarak tanımlanmıştır. M1CS ve M2CS ADC olarak seçilmiş olup sürücü kartının 20 mV/A hassasiyetle dahili akım ölçme işlemi gerçekleştirilmiştir. CS pin ve DE pinleri ise sırasıyla SPI ve MAX485 veri alışverişi başlatabilmek için GPIO çıkış olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.7. STM32F401 Pin Konfigürasyonu gösterimi [79]

Pin konfigürasyonun tamamlanmasıyla motor kontrol için yazılım işlemi Şekil 7.8'de verilen iş akışı ile gerçekleştirilmiştir. Dışarıdan girilen açı değerinin yakalanması ve orda salınımsız durması istenmektedir. Şekil 7.8'de görüldüğü gibi program başlatıldıktan sonra ilgili değişkenlerin atanması yapılıp, PWM ve timer başlatılır. Enkoderden açı okuması sürekli olup, PID döngüsü belli periyotlarla güncellenecek şekilde yazılım oluşturulmuştur. PID kontrol kesmesi için farklı bir Timerde 2 khz olarak belirlenmiş ve her 0,5 ms de PID kontrol döngüsü gerçekleşmektedir. Dışardan girilen açı, gerçekte okunan açı ile kesme aralıklarında karşılaştırılır. Oluşan hata değeri ile PID kontrol sinyali hesaplanır. Hatanın pozitif veya negatif durumuna göre M1DIR ve M2DIR set reset konumu belirlenir. Hata belli bir eşiğe gelene kadar ileri besleme kazancı ve sabit ölü bölge offseti eklemesi yapılır. Motorun sargılarına uygulanan PWM değeri 20 kHz olarak belirlenmiş olup, sayıcı periyodu (ARR-Auto reload register) değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır [79].

$$PWM_{freq} = \frac{84.000.000}{(Prescaler+1).(ARR+1)} \tag{7.12}$$



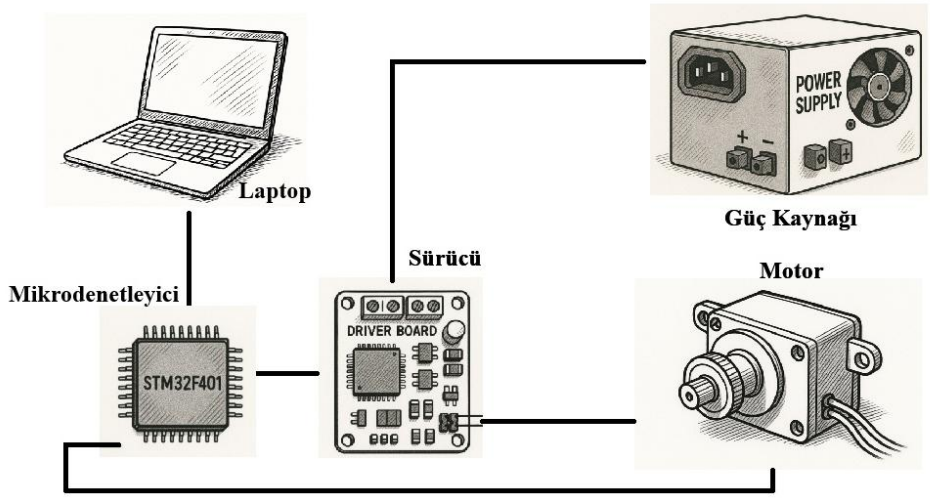
Şekil 7.8. STMCube Ide yazılım akış özeti

20 kHz PWM ve prescaler (PSC) değeri 1 seçildiğinde 2099 olarak ARR ataması yapılmıştır. PID kontrol sinyali ile oluşan değer, yukarıda hesaplanan ARR'ye göre belli duty cycle oranında motora uygulanmıştır. Rotor konumunun belli eşiğe gelene kadar PID kontrol sinyali sürekli güncellenmektedir. Hata belli bir eşiğe geldiğinde PWM çıkışı min_pwm büyüklüğünde tutma değeri ile frenleme yapılmıştır.

8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE KARŞILAŞTIRMA

8.1. Test Sisteminin Kurulumu

4 kutuplu LATM3500 için test düzeneği Şekil 8.1'deki gibi oluşturulmuştur. Şekilden görüleceği üzere STMCube Ide yazılımını içeren bilgisayar aracılığıyla STM32F401 mikrodenetleyici kontrol edilmektedir. STM32F401 hem motoru denetlemek üzere sürücü kartını kontrol etmekte, hem de motor miline kaplin aracılığıyla bağlanan enkoderi kontrol etmektedir. Enkoderdan alınan pozisyon bilgisi STM32F401'e doğrudan bağlanmayıp iki adet MAX485 transceiver (alıcı-verici) aracılığıyla bağlanmaktadır. Enkoderden alınan rotor konum açısı verisi mikrodenetleyicide incelenmektedir. Motor sürücüsüne verilen besleme gerilimi H köprülerde ilgili sargılar enerjilendirilerek motora ulaşmaktadır. Motorun ilk konum bilgisi enkoderden alındıktan sonra set edilen konuma ulaşması yazılım kontrolünde olmaktadır.



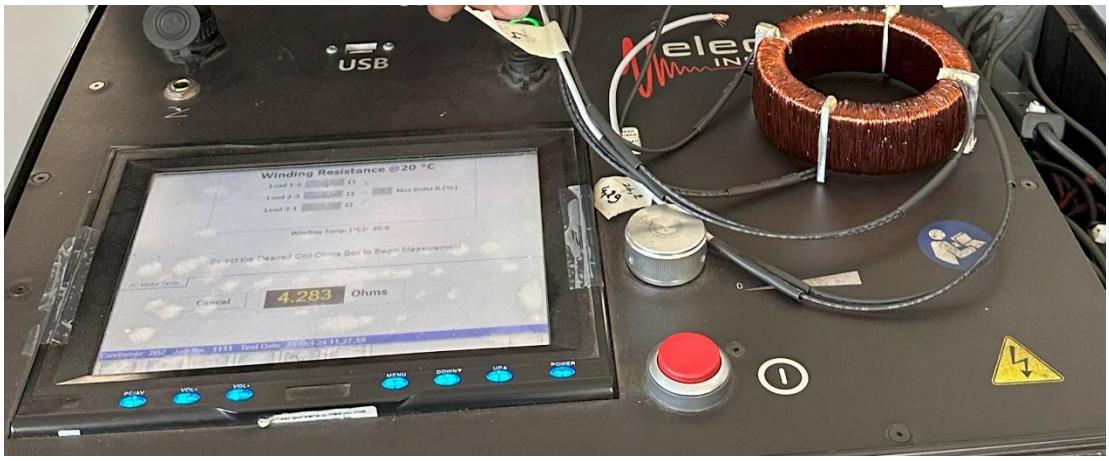
Şekil 8.1. Deney düzeneği modeli

Blok modeli verilen deney düzeneği, aşağıdaki Resim 8.1'de gösterildiği gibi test edilmek üzere hazırlanmıştır. Resim 8.1'de görüldüğü deney seti, LATM3500 motor, elektronik kartların bulunduğu bir kutu, güç kaynağı ve bilgisayardan oluşmuştur. Motor bloğunda enkoder, kaplin bağlantıları tamamlanmış, enkoder miline 3d yazıcı ile oluşturulmuş açı gösterge ibresi ve motor yüzeyinde açı ölçeği oluşturulmuştur.



Resim 8.1. Deney Düzeneği

Motor sürücüsü ve STM mikrodenetleyici geliştirme kartı birbirine uyumlu olduğu için pin bağlantısı kutu içinde direkt kart üzerine yapılmıştır. Ayarlanabilir güç kaynağında 24 V belirlenmiş, yazılım kontrolleri yapılmıştır. Motorun hareket esnasında olabilecek titreşimleri önlemek için motor bloğu altına kauçuk malzeme sabitlenmiştir.



Resim 8.2. Sargı direnç ölçümü

Motorda bulunan sargıların direnç ölçümleri yapılmıştır. Resim 8.2'de yüksek hassasiyetli analizörle yapılan ölçümlerde sargı başına 4,28 ohm direnç tespit edilmiştir. Sarımların dengeli olduğu, kaçak ve kısa devre durumu olmadığı görülmüştür. Ayrıca, Resim 8.3'deki durumda sargıların endüktansı farklı frekans değerlerinde kontrol edilmiş ve 85 mH değerinde tespit edilmiştir.



Resim 8.3. Sargı endüktans ölçümü

8.2. Çalışma Deneyi

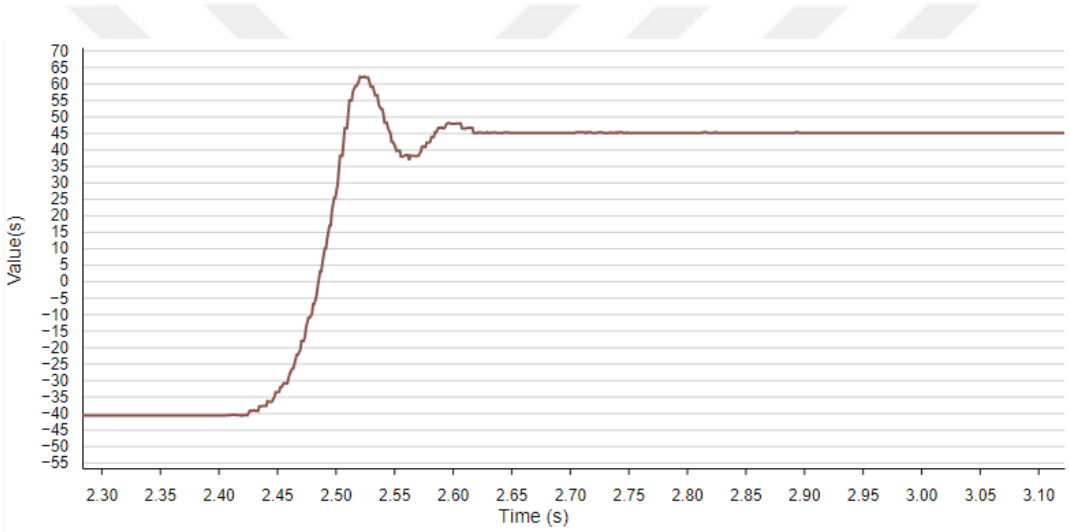
Motor testleri genelde boşta ve yük altında yapılmaktadır. LATM3500'de amaç hassas konum denetimi olduğundan boşta çalışma testlerine ağırlık verilmiştir. Boşta çalışmada ataletin düşük olduğu çalışma ortamında titreşimin daha fazla olması, kontrolün tam da bu noktada devreye girip hassasiyeti yakalaması planlanmaktadır.

8.2.1. Denetimsiz çalışma

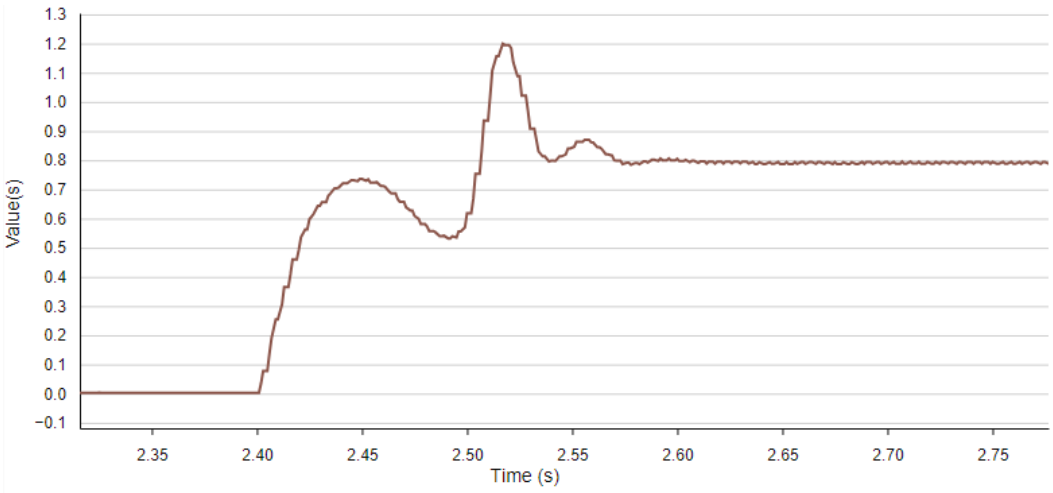
Öncelikle motor boşta ve denetimsiz çalışarak motorun çalışma bölgesinde rotorun tepkisi gözlenmiştir. Denetimsiz çalışmada motor -45° den +45° ye 90° hareket etmektedir. 24 V

besleme geriliminde 20 kHz PWM frekansında farklı oranda duty-cycle motorun sargılarına uygulanarak rotorun açısının değişimi esnasında akımı ve hızı gösterilmiştir.

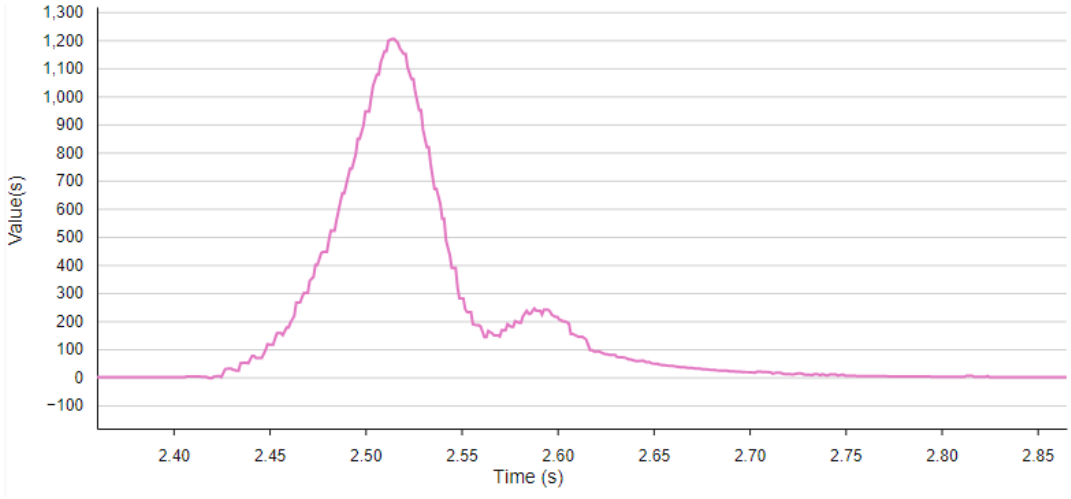
Motorun sınır bölgelerinde -45° ve +45° bölgelerinde tam ortada motor hareket etmemektedir. Bu değerin saat yönü veya saat yönünün tersi yönüne bir miktar yönelmesi, motorun o yönde hareketini sağlamaktadır. Boşta ve denetimsiz çalıştırmada tüm karşılaştırmaların tutarlı olması amacıyla motor başlangıç noktası -40,77° seçilmiştir. Motordan verileri anlık izlemek adına STM32Cube Monitör ile St-link aracılığıyla bağlantı kurulmuştur. Şekil 8.2'de %80 duty oranı ile H köprülü motor sürücüsü üzerinden besleme durum gösterilmiştir.



Şekil 8.2. Pozisyon değişimi (%80 duty)

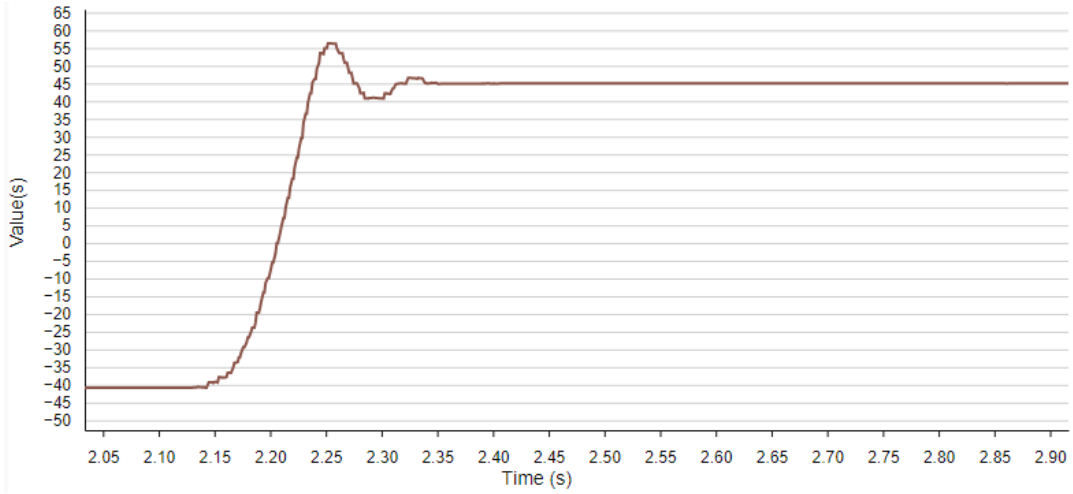


Şekil 8.3. Akım değişimi (%80 duty)

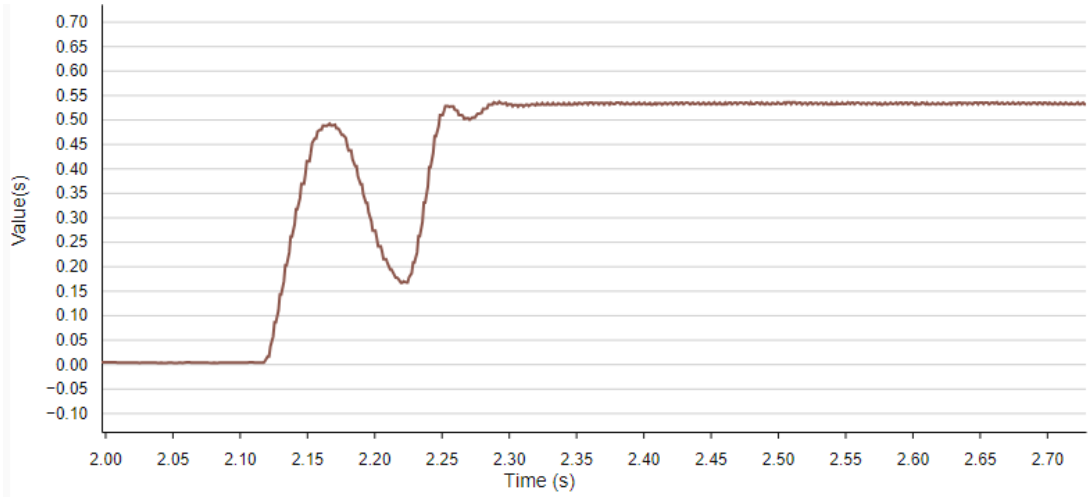


Şekil 8.4. Hız değişimi (%80 duty)

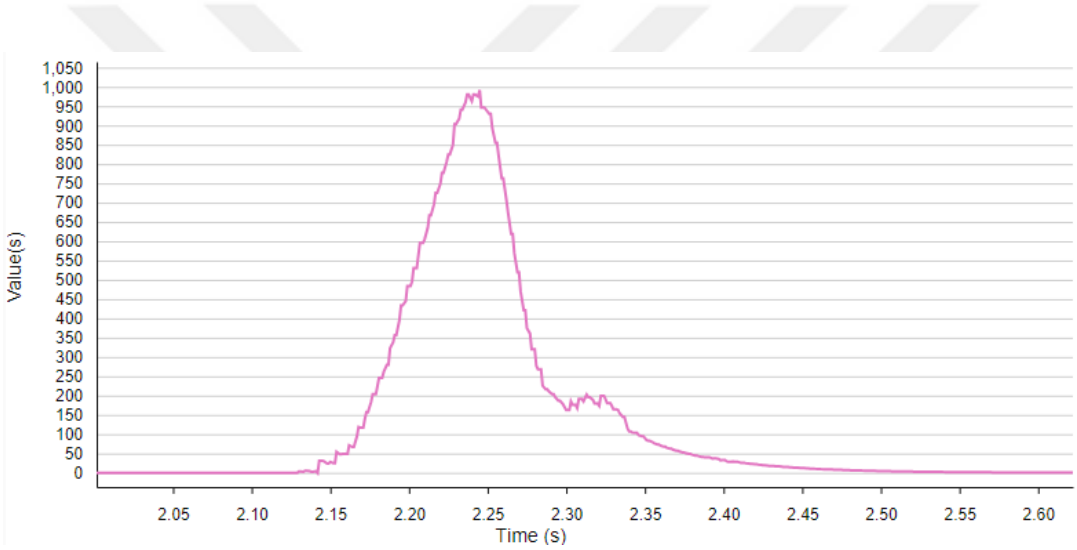
Şekillerden anlaşılacağı üzere, motor -40,77° den +44,92° ye hareketini 193 ms'de gerçekleştirmiştir. Motorun harekete geçtiği an ile akımın uygulandığı an arasında 20 ms'lik bir gecikme görülmüş akımın dalga formu, bir sargı çifti için Şekil 8.3'de verilmiştir. Bu esnada kaynaktan çekilen akım 1,73 A gözlenmiştir. Motorun hareket esnasında zamana göre hız değişimi Şekil 8.4'de verilmiş olup, yaklaşık 1200 derece/saniye (20,94 rad/s) tepe hıza ulaşmış, sınır değeri bir miktar aşıp yavaşlayarak sıfırlanmıştır.



Şekil 8.5. Pozisyon değişimi (%50 duty)



Şekil 8.6. Akım değişimi (%50 duty)

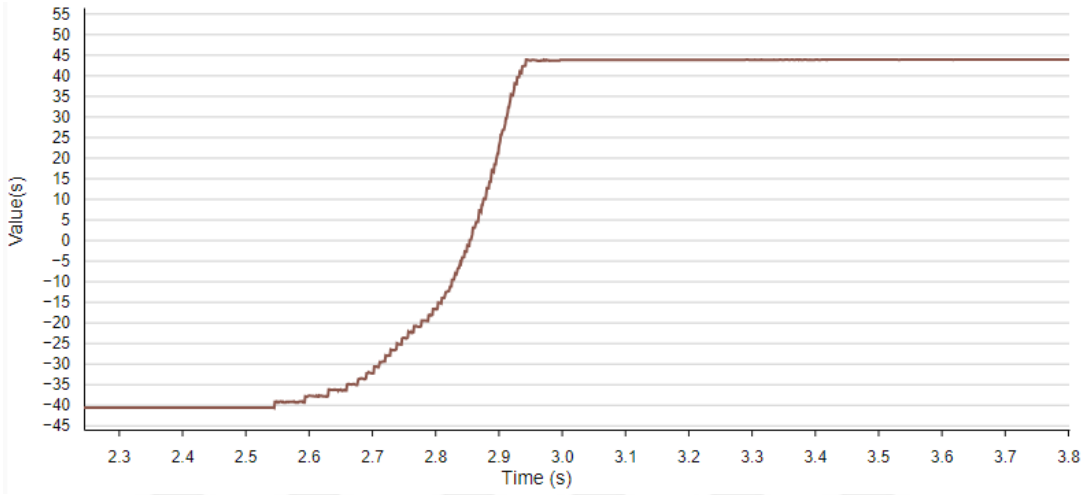


Şekil 8.7. Hız değişimi (%50 duty)

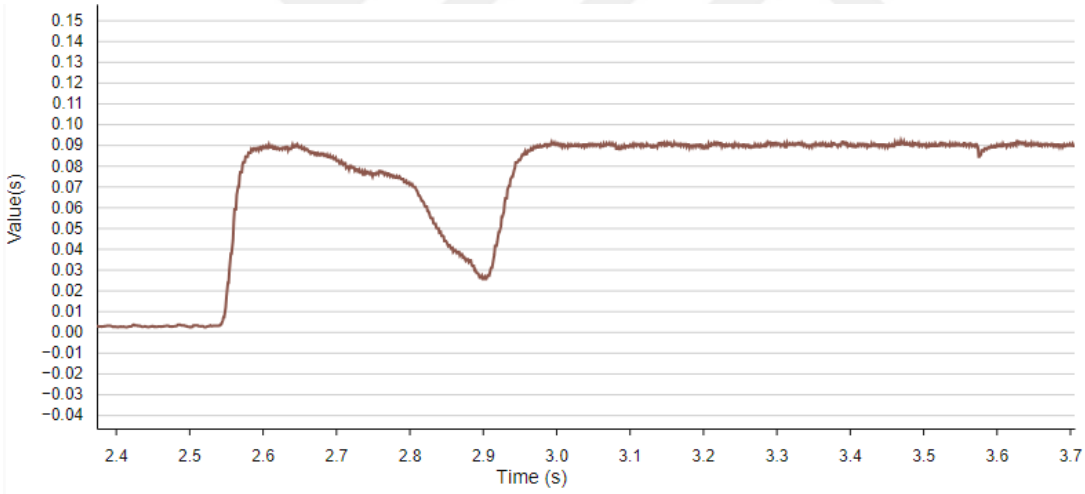
Motora uygulanan PWM'in %50 lik duty olması durumunda konum, akım ve hız tepkileri Şekil 8.5, Şekil 8.6 ve Şekil 8.7'de gösterilmiştir. -40,77° den başlanılarak yapılan harekette +44,92° ye yaklaşık 200 ms'de ulaşılmıştır. Önceki testle benzer şekilde akım okunmaya başladıktan 20 ms sonra motor harekete başlamıştır. Motorda ulaşılan maksimum hız ise yaklaşık 1000 derece/saniye (17.45 rad/s) olup daha sonra azalarak sıfırlanmıştır. Hareket sonunda besleme kaynağından çekilen akım 1,17 A'dir.

Motorun aşma olmadan salınımsız bir şekilde hareketini gözlemlemek amacıyla %22,8 duty oranında PWM ile test edilmiş ve konum, akım ve hız değerleri Şekil 8.8, Şekil 8.9 ve Şekil 8.10'da görülmüştür. Bu durumda yapılan testte motor -40,77° den +43,74° ye 397ms de ulaşmıştır. Önceki testlere göre toplamda 1 derece daha az mesafeyi daha yavaş olarak

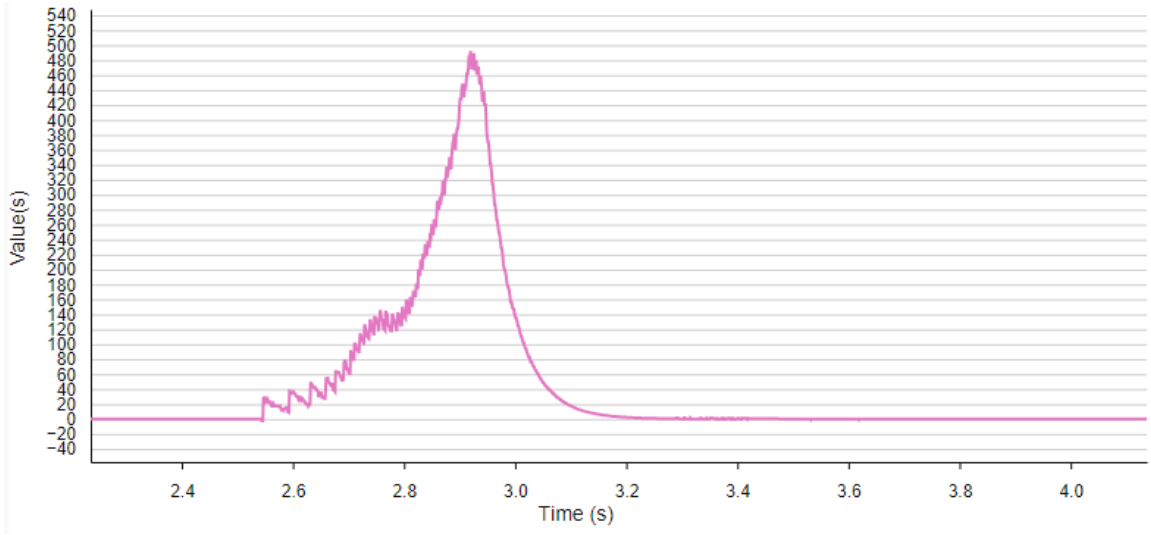
tamamlamaktadır. Hız grafiği incelendiğinde tepe hızın 500 derece/saniye (8,72 rad/s) olduğu görülmüş ve bu hızın %63'lük kısmı 323 ms'de geçildiği anlaşılmıştır.



Şekil 8.8. Pozisyon değişimi (%22,5 duty)



Şekil 8.9. Akım değişimi (%22,5 duty)

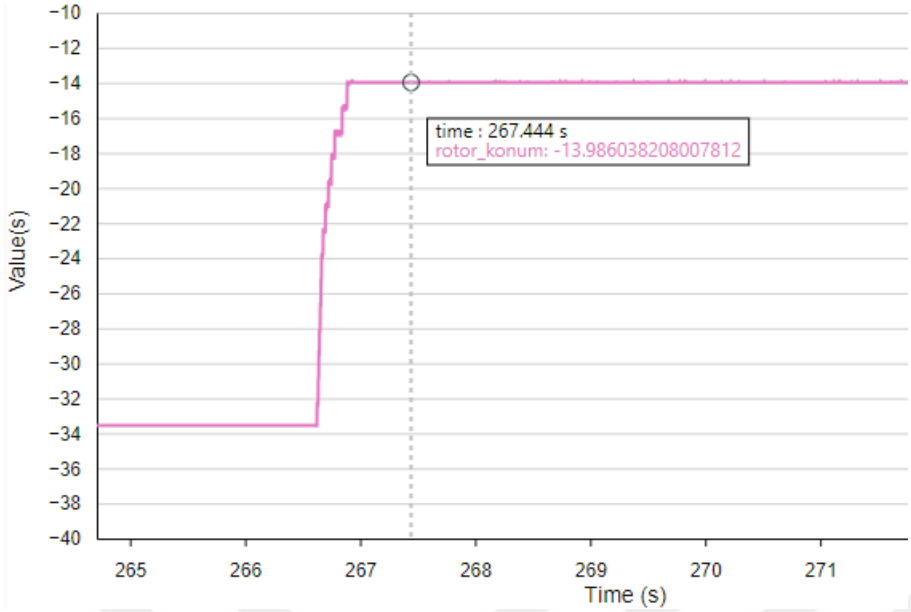


Şekil 8.10. Hız değişimi (%22,5 duty)

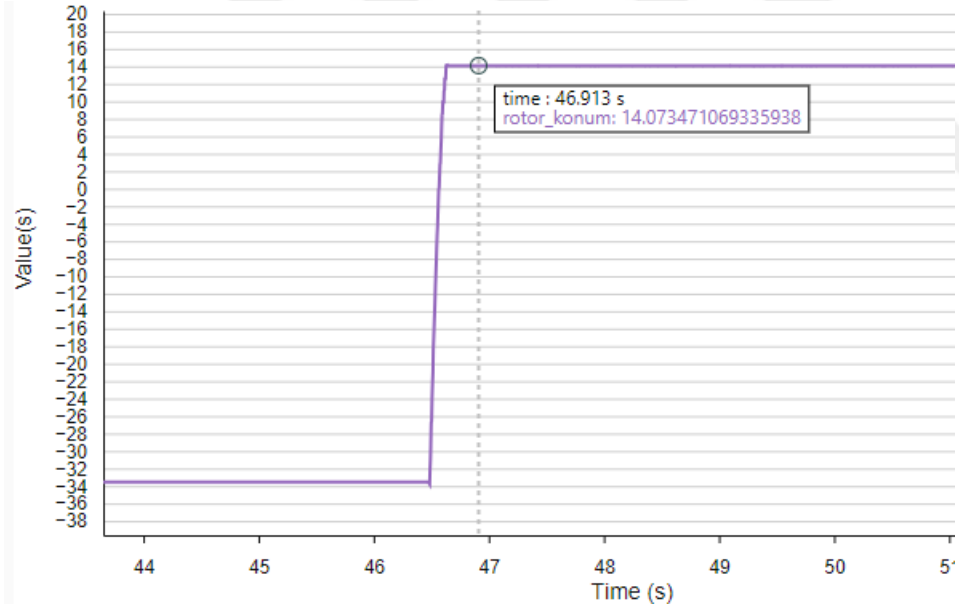
Kontrolcü olmadan doğrudan besleme gerilimini belli oranlarda motora uygulanması ile motorun yönelme performansları gösterilmiştir. Buradan hareketle motorun aktüatör olarak belirli kademelerde ileri geri çalışmaya müsait olduğu sonucuna varılmıştır.

8.2.2. PID pozisyon denetimli çalışma

LATM3500'de çalışma bölgesinde sabit tork bölgesinde gezinti açısı boyunca konum denetimi yapılmıştır. Motorun istenen konumu hassas ve titreşimsiz yakalaması, yakaladığı anda vuruntu, titreşim olmadan hedeflenen konumda kalması gözlenmiştir. Bunun için STMCube Ide yazılım programı aracılığıyla konum için PID denetimi yapılmıştır. 1 dereceyi yaklaşık 200 parçaya bölebilme kabiliyetine sahip 16 bitlik BissC mutlak enkoderden alınan konum bilgisi referans konumla karşılaştırılır ve bulunan hata değeri PID denetiminden geçirilerek hatanın polaritesine göre ilgili sargılar enerjilendirilmek üzere motora çıkış gerilimi uygulanır. 0,5 ms kesme periyodu ile hatanın anlık değeri izlenerek PID denetimi sağlanmıştır. Motora dışardan girilecek farklı açılarla ile rotorun tepkisi aşağıdaki gibi gözlenmiştir.

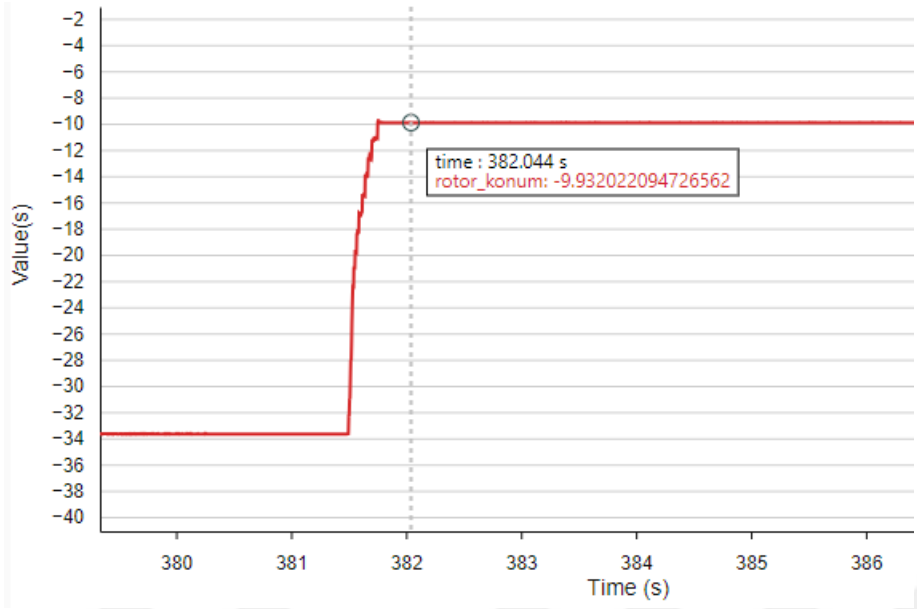


(a) -14°

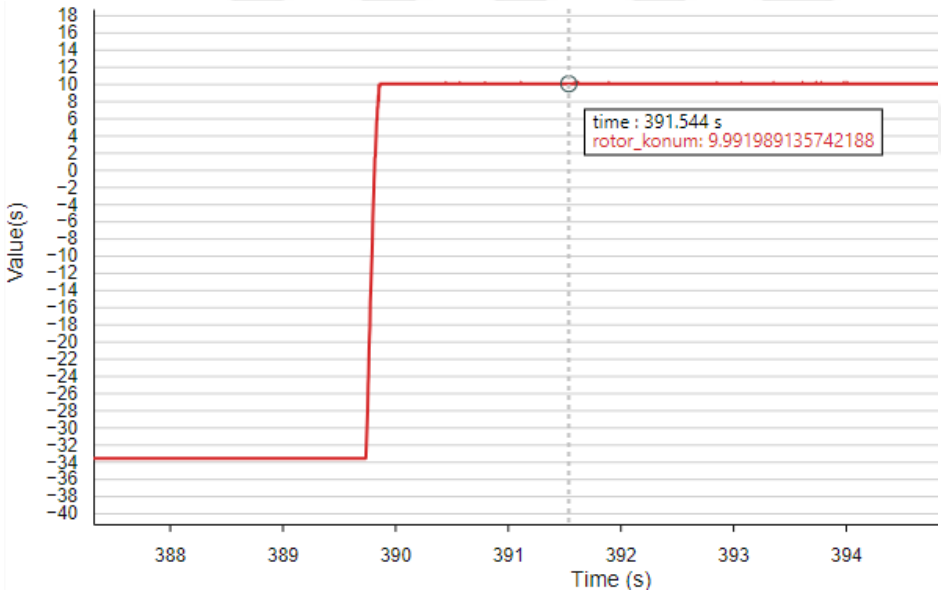


(b) +14°

Şekil 8.11. Hedef konum: (a) -14°, (b) +14° olduğu durum

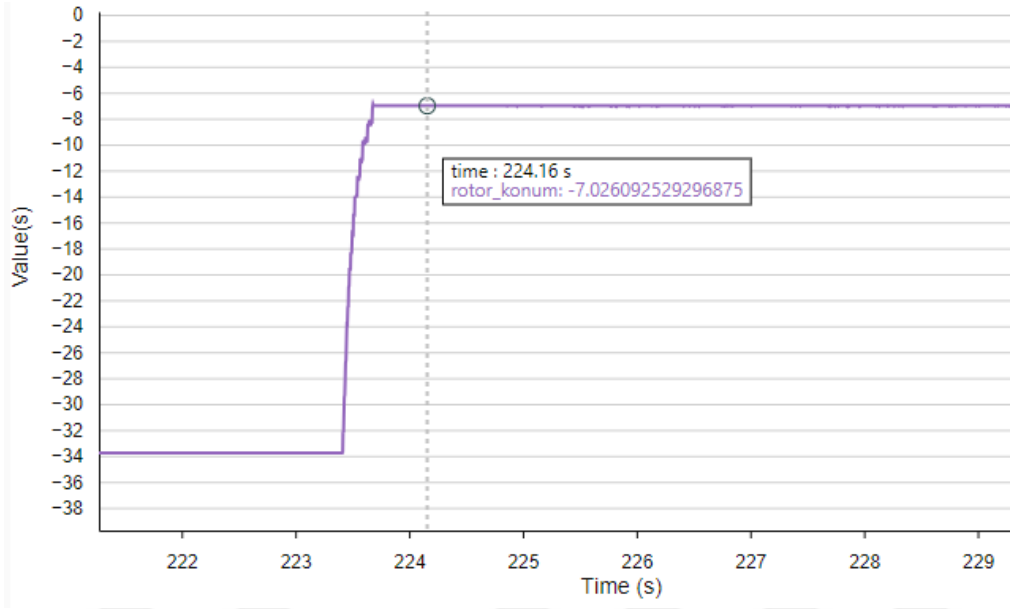


(a) -10°

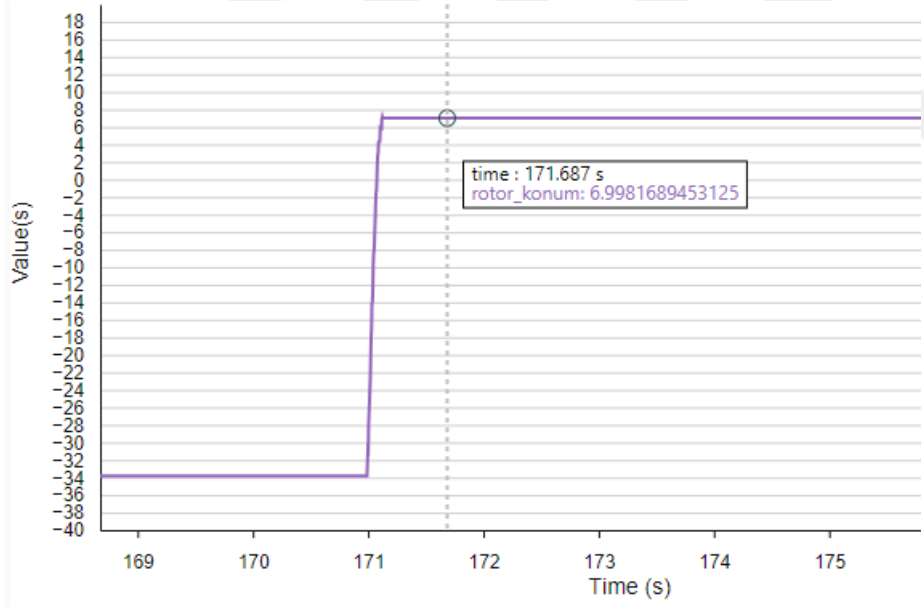


(b) +10°

Şekil 8.12. Hedef konum: (a) -10°, (b)+10° olduğu durum

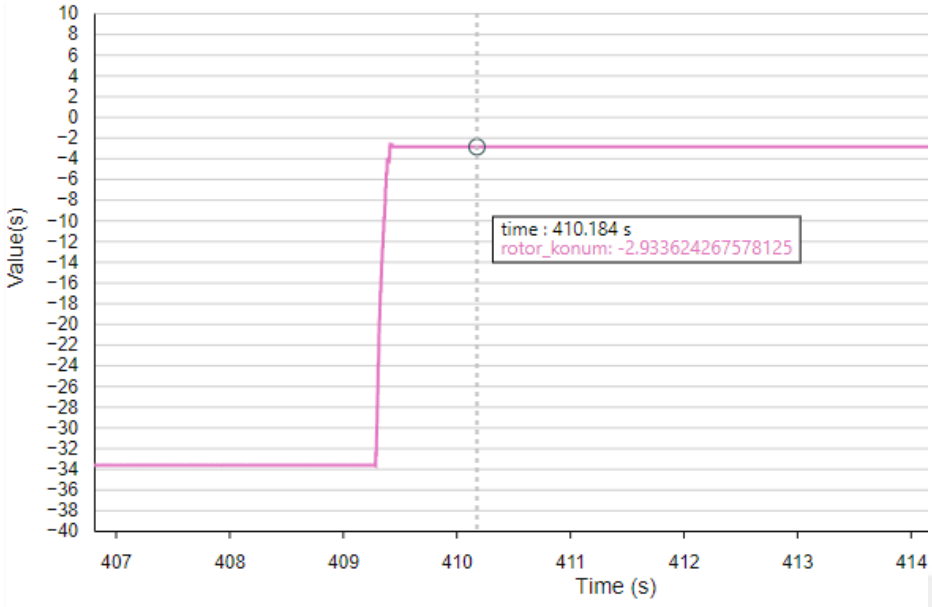


(a) -7°

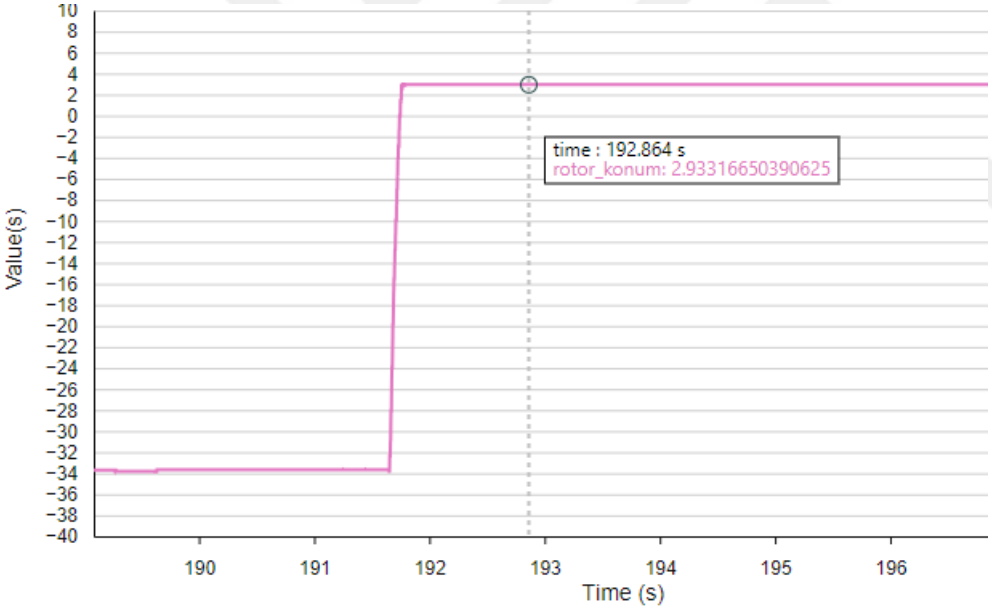


(b) +7°

Şekil 8.13. Hedef konum: (a) -7°, (b) +7° olduğu durum

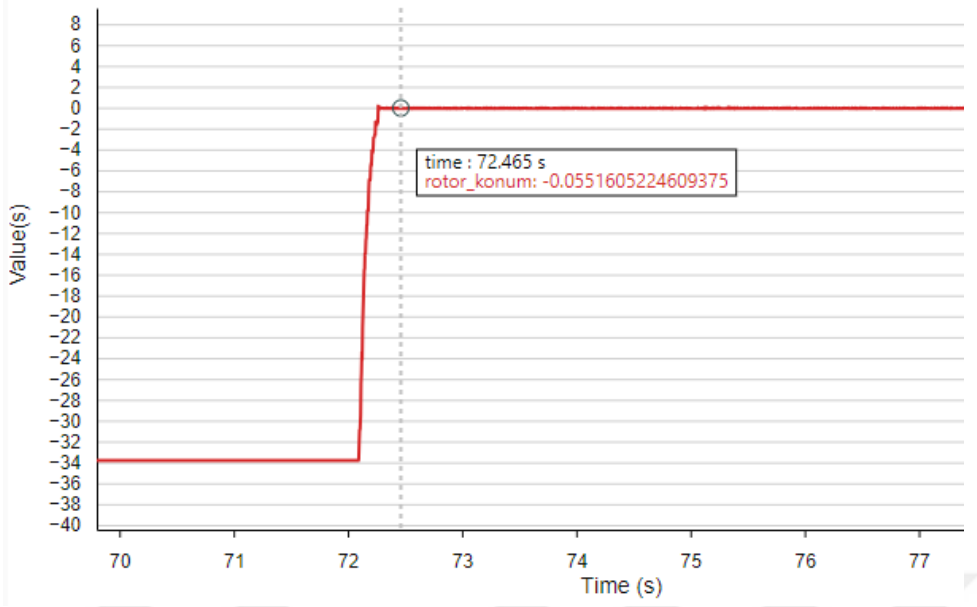


(a) -3°



(b) +3°

Şekil 8.14. Hedef konum: (a) -3°, (b) +3° olduğu durum



Şekil 8.15. Hedef konum: 0°

Çizelge 8.1. Test Sonuçları

Mevcut Konum (derece)	Hedef Konum (derece)	Rotor Konum (derece)	Hata (derece)
-33.70	-14	-13.98	0.02
-33.70	-10	-9,93	0.07
-33.70	-7	-7.02	0.02
-33.70	-3	-2,93	0.07
-33.70	0	-0.055	0.055
-33.70	3	2,93	0.07
-33.70	7	6.99	0.01
-33.70	10	9.99	0.01
-33.70	14	14.07	0.07

Motorun belirli açılara ulaşması ile ilgili yapılan testlerin konum zaman eğrileri yukarıdaki şekillerde ve Çizelge 8.1'de verilmiştir. Motorun istenen açı değerlerine aşma olmadan hızlı bir şekilde ulaştığı, 0.1 derecenin altında konum doğruluğu ve konumda titreşimsiz bir şekilde sabit kaldığı görülmüştür.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında savunma sanayi, uzay uygulamaları, sağlık ve diğer özel endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere toroidal sarımlı 4 kutuplu sınırlı açılı tork motoru tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Motorun kullanım alanının sınırlarına ve gereksinimlerine özel tasarımlar için en baştan en sona kadar prototip üretim imalatı aşamaları açıklanmıştır. Motorun denetimsiz ve denetimli kullanım senaryoları sunulmuş, denetimli çalışmada gerekli olan sürücü tasarımı oluşturulmuştur. Deneysel karşılaştırmalar da motorun performansını belirleyen bileşenlerden stator, rotor, mıknatıs, hava aralığı, sargı sayısı, sargı tipi, sargı geometrisi, mekanik boşluklar, tüm eksenel ve radyal mesafeler, kalınlıkların değişiminin tork-akım oranı, tork doğrusallığı ve sabit tork bölgesine etkisi eş zamanlı izlenmiştir. Motorun analitik hesaplamalarla ortaya çıkarılan denklemler ve parametreler simülasyon ortamında doğrulanmıştır. Böylece motorun bileşenlerindeki geometrik değişimin ve kutup sayısının değişmesinin tork ve manyetik akı yoğunluğu değerlerine etkisi simülasyon yapmadan öngörülebildiği ortaya çıkmıştır. Kullanım alanı için önceden belirlenen sınırlar dahilinde olabilecek en iyi tasarım oluşturulmuş ve nihai tasarımda motorun çalışma bölgesinde (-15° ile +15° arasında) %95 doğrusallık elde edilmiştir. Tepe tork değerinin %80 ve üzerinin referans alındığı durumda ise daha geniş çalışma bölgesi (-23° ile +23° arasında) tespit edilmiştir. Analitik hesaplamaların Ansys Electronics'de simülasyon ortamında doğrulamasının elde ettiği gösterge, motorun birim hacimdeki tork değerlerinin, benzer geometrideki üretici motorları ve literatürdeki ele alınan motorlardan %37 daha yüksek olduğu kıyaslama tablosunda gösterilmiştir. Prototip aşamaları, motorun küçük boyutları nedeniyle bazı zorluklarla tamamlanmıştır. Analitik hesaplamalar ve simülasyon neticesinde elde edilen tasarım ile prototip üretimde oluşturulan motorun sarım sayısı ve hava aralığı mesafesi tam anlamıyla eşit olmamış, elle sarım ve montajdan kaynaklı bir miktar fark oluşmuştur. Sarım sayısı 580 tur sarımdan 400 tur sarıma, rotor-stator arası mekanik açıklık ise 0,5 mm'den yaklaşık 1 mm'ye üretim kolaylığı için çekilmiştir. Tasarım iyileştirme aşamalarında bu parametrelerin değişiminin torka ve manyetik akı yoğunluğu değerine etkisinin doğrusal olduğu, dolayısıyla çalışma bölgesine bir etkisi olmayıp tepe tork da orantılı azalma olacağı gösterilmiştir. Sürücü tasarımı ve oluşturulan yazılımla denetimsiz ve denetimli çalışmayı başarı ile geçmiş, sabit tork çalışma bölgesinde konum denetiminde 0,1 derecenin altında hassas konum doğruluğu

yakalanmıştır. Sonuç olarak, kullanım amacına ve alanına özel, doğrudan tahrikli yeni tasarımlar için kılavuz oluşturulmuştur.

LATM3500 motorun tasarım ve uygulama aşamaları aşağıdaki gibi özetlenmektedir.

- Endüstriyel sınırlamalar ve gereksinimler belirtilerek dış sınırlar ve kutup sayısı belirlenmiştir.
- Analitik hesaplamalar motorun elektriksel ve manyetik eşdeğer devre modeli analiz edilmiş, manyetik akılar, manyetik akı yoğunlukları ve tork hesaplamaları yapılmıştır.
- Tasarım boyutlandırma aşamaları belirtilmiş hava aralığı, kaçak akılar, kutup ve sargıların hesaplamaları gösterilmiştir.
- Sınırlamalar dahilinde en iyi tasarımı tespit etmek için simülasyon aşamalarında denenmek üzere Analitik hiyerarşi metodu ile belli tasarımlar seçilmiştir.
- Ansys Electronics'de motorun tüm bileşenlerinin kendi içinde ve diğer bileşenler ile birlikte eş zamanlı değişiminin performansa etkisi simülasyonda gösterilmiştir. Manyetik analiz ve geçici durum analizi ile nihai tasarım oluşturulmuştur.
- Prototip üretim safhasında tedarik edilen ürünler tanıtılmış ve montaj aşamaları sunulmuştur.
- Motorun denetimi ile ilgili süreçler analitik olarak verilmiş, kontrol aşamaları için gerekli elemanlar tanıtılmış yazılım süreci gösterilmiştir.
- Testler için kurulum yapılmış, motorun denetimsiz ve denetimli boşta çalışma performans sonuçları karşılaştırılmış ve sunulmuştur.

Tüm tasarım ve üretim sürecinde karşılaşılan zorluklar ve gelecek çalışmalarda yapılacak yeniliklere ışık tutması açısından bazı önemli durumlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Tasarlanan motorda hem manyetik analiz sürecinde hem de kontrol sürecinde motorun lineer olmayan durumları tespit edilerek yeni parametreler oluşturulup analiz edilmelidir.
- Lineer olmayan durumlarda yapılacak analizler ile motorun kontrolü daha verimli hale getirebilir. Tez çalışmasında yapılan PID denetim, motorda her konumda aynı etkiyi göstermediğinden daha dinamik ve akıllı kontrol algoritmaları geliştirilebilir. Kapsamlı

yazılımla ve çözünürlüğü daha yüksek enkoder desteği ile mikron düzeyde hassasiyet yakalanabilir.

- Denetimsiz çalışma testlerinde ortaya çıkan hız profilleri düşünülerek farklı hızlar da hız denetimi bulanık mantık, yapay sinir ağı, genetik algoritma vb. yöntemlerle yapılabilir.
- Motorun boyutlarının çok daha küçük olduğu durumlar için yüksek tork ve hassasiyet amacıyla robot cihazlarla sarım yapılabilir.
- Tasarlanan motorun yüksek tork performansı için yüksek akımda çalışmaya elverişliliğine yönelik kapsamlı termal analiz yapılmalı, bu analizlere göre soğutma sistemi veya mekanik tasarımlar geliştirilmelidir.

KAYNAKLAR

1. Widdowson, G. P., Howe, D., Evison, P. R. (1991). Computer-aided optimization of rare-earth permanent magnet actuators. *Computation in Electromagnetics*, 93-96.

2. Krishna, PM. ve Kannan, N. (1996). *Brushless DC limited angle torque motor*. In Proceedings of the 1996 international conference on power electronics, drives and energy systems for industrial growth. 1, 511–516.

3. Zhang, Y., Smith, I. R. ve Kettleborough, J. G. (1999). Performance evaluation for a limited-angle torque motor. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 4(3) 335-339.

4. Chunyang, D., Tiecai, L. ve Zhengcai, C. (2003). *Accurate tracking control of a limited angle torque motor*. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2, 744-748.

5. Tsai, C.C., Lin, S.C., Huang, H.C. ve Cheng, Y.M. (2009). Design and control of a brushless DC limited angle torque motor with its application to fuel control of small-scale gas turbine engines. *Mechatronics*, 19(1), 29–41.

6. Bencheikh, N., Letty, R.L.ve Claeyssen, F. (2010). Limited angle torque actuator for fine angular positioning.

7. Ahmed, F.F., Laghrouche, S., El Bagdouri, M. (2010). Pancake Type DC Limited Angle Torque Motor: Modeling and Identification, Application to Automobile Air Path Actuators, 6th IFAC Symposium Advances in Automotive Control Munich, Almanya, 431-436.

8. Ahmed, F.F., Laghrouche, S., El Bagdouri, M. (2010). *Nonlinear modeling of Pancake DC Limited Angle Torque Motor based on LuGre friction model*. 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille, Fransa, 1-6.

9. Radu, O. ve Adochiei, I. (2011). Limited Angle Torque Motors Having High Torque Density, Used in Accurate Drive Systems. Acta Polytechnica. 51, 75-83.

10. Jagadeeshwaran, A., Padma, S., Vijay Shankar, S., Periyasamy, V.M. ve Selvakumar, P. (2013). Development of Limited Angle Brushless Torque Motor Control Drive for Scan Mirror Mechanism. *International Journal of Engineering and Technology*, 5, 3907-3913.

11. Hekmati, P. ve Mirsalim, M. (2013). Design and Analysis of a Novel Axial-Flux Slotless Limited-Angle Torque Motor With Trapezoidal Cross Section for the Stator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28 (4), 815-822.

12. Roohnavazfar, M., Houshmand, M., Nasiri-Zarandi, R. ve Mirsalim, M. (2014). Optimization of design parameters of a limited angle torque motor using analytical hierarchy process and axiomatic design theory, Production & Manufacturing Research, 2 (1), 400-414.

13. Jibin, Z., Guodong, Y., Yongxiang, X., Xia, C., Yong, L., ve Qian, W. (2014). Development of a Slotless Limited-Angle Torque Motor for Reaction Wheels Torque Measurement System. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50 (11), 1-4.

14. Li, X., Wu, S., Jiao, Z., Wang, T., Li, W. ve Jiu, C. (2015). *Design and analysis of a Limited angle torque motor with Dual Halbach Arrays*. 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Busan, Kore, 401-406.

15. Zarandi, R. N., Mirsalim, M. ve Cavagnino, A. (2015). Analysis, optimization, and prototyping of a brushless DC limited-angle torque-motor with segmented rotor pole tip structure. *IEEE Trans. Ind. Electron* 62 (8), 4985–4993.

16. Chen, S.L., Kamaldin, N., Teo, T.J., Liang, W., Teo, C.S., Yang, G. ve Tan, K.K. (2015). Toward comprehensive modeling and large-angle tracking control of a limited-angle torque actuator with cylindrical Halbach. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 21 (1), 431–442.

17. Guodong, Y., Jibin, Z., Yongxiang, X., Qian, W., Baochao, W., ve Junlong, L. (2015). Estimation of Maximum Angular Operation Range for Permanent-Magnet Slotted Limited-Angle Torque Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51 (11), 1-5.

18. Zou, J.B., Yu, G.D., Xu, Y.X., Li, J.L. ve Wang, Q. (2015). *Design and analysis of a permanent magnet slotted limited-angle torque motor with special tooth-tip structure for torque performance improvement*. IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), 246-247.

19. Zou, J., Yu, G., Xu, Y., Wei Y. ve Wang, Q. (2016). Development of a Limited-Angle Torque Motor With a Moving Coil. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52 (7), 1-5.

20. Ionică, I., Modreanu, M., Boboc, C. ve Morega, A. (2016). *Tridimensional modeling for a DC, Limited Angle, Torque Motor of size 16*. 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romanya, 235-239.

21. Wu, S., Zhao, X., Li, X., Luk, P.C.K. ve Jiao, Z. (2016). Preliminary Design and Optimization of Toroidally Wound Limited Angle Servo Motor Based on a Generalized Magnetic Circuit Model. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52 (9), 1-9.

22. Jagadeeshwaran, A., Vijayshankar, S., Kannan, N. ve Aravind, C.V. (2016). Limited angle BLDC for scan mirror application in space satellite system. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 31(6), 24-32.

23. Wu, S., Zhao, X., Jiao, Z., Luk, P.C.K. ve Jiu, C. (2017). Multi-Objective Optimal Design of a Toroidally Wound Radial-Flux Halbach Permanent Magnet Array Limited Angle Torque Motor, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64 (4), 2962-2971.

24. Hekmati, P., Yazdanpanah, R., Mirsalim, M. ve Ghaemi, E. (2017). Radial-Flux Permanent-Magnet Limited-Angle Torque Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64 (3), 1884-1892.

25. Lee, E.C., Kwon, S.O., Lee, H.Y., Jang, S.G. ve Hong, J.P. (2017). *Effects of rotor pole angle on torque characteristics of a limited-angle torque motor*. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 1-6.

26. Guodong, Y., Yongxiang, X., Jibin, Z. ve Guan, W. (2017). Analysis and Experimental Validation of Dynamic Performance for Slotted Limited-Angle Torque Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(11), 1-5.

27. Krishnan, S., Sreejith, M.R., S. K. A., Ravichandran, M.H., H. A. ve V. T. Sadasivan Achari. (2018). *A Comparative Design Approach of a Novel Wide Angle Torque Motor for Pointing Mechanism for Space Application. 2018* IEEE International Conference on Power *Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Chennai, Hindistan, pp. 1-5.

28. Yu, G., Yongxiang, X., Zou, J., Xiao, L. ve Lan, H. (2019). Development of a Radial-Flux Slotted Limited-Angle Torque Motor With Asymmetrical Teeth for Torque Performance Improvement. *IEEE Transactions on Magnetics*, 55 (7), 1-5.

29. Li, Y., Ma, P., Wang, Q. ve Zhao, M. (2020). Analysis, Modeling, and Verification of Limited Angle Torque Motors With Irregular Slot Numbers for Performance Improvement. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35 (2), 1004-1013.

30. Yu, G., Xu, Y., Zou, J., Xiao, L. ve Zheng, B. (2020). Modeling and Analysis of Limited-Angle Torque Motor Considering Nonlinear Effects. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 6 (4), 1457-1465.

31. Zhou, Y., Li, D., Huang, L. ve Qu, R. (2020). *Design of A Limited-Angle Torque Motor with Magnetic Zero-Returner for Aviation Fuel Valve*. 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg, İsveç, 654-660.

32. Lee, H.-Y., Yoon, S.-Y., Kwon, S.-O., Shin, J.-Y., Park, S.-H. ve Lim, M.-S. (2021). A Study on a Slotless Brushless DC Motor with Toroidal Winding. *Processes*, *9*(11), 1881.

33. Ma, P., Wang, Q., Li, Y., Jiang, S. ve Zhao, M. (2021). Research on Torque Ripple Suppression of the Slotted Limited Angle Torque Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57(2), 1-6.

34. Yu, H., Yu, G., Xu, Y. ve Zou, J. (2021). Torque Performance Improvement for Slotted Limited-Angle Torque Motors by Combined SMA Application and GA Optimization. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57(2), 1-5.

35. Pengcheng, M., Wang, Q., Li, Y., Jiang, S., Zhao, M. ve Feng, Z. (2021). Operational range extension method for limited-angle torque motors with irregular slot numbers. IET Electric Power Applications. 15, 1-9.

36. Zhan, H., Xu, Y., He, H., Wu, D., Chen, W. ve Xu, D. (2022). *Operation Anlysis and Torque Performance optimization of a Novel Self-aligning Limited-Angle Vibration Torque Machine*. IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Nangjing, Çin, 4969-4974.

37. Chen, Q., Sheng, H., Jiang, S. (2022). Integrated Physical Modeling and Optimal Control Method of Limited-Angle Torque Motor in Fuel Metering Apparatus. Micromachines, 13 (6), 949.

38. Zhang, Y., Smith, I.R., Kettleborough, J.G. (1999). Accurate Tracking Control of a Limitted Angle Torque Motor. Electric Machine and Power System, 27, 1191-1199.

39. Smith, K.J., Graham, D.J. ve Neasham, J.A. (2015). Design and optimization of a voice coil motor with a rotary actuator for an ultrasound scanner. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 62(11),7073–7078.

40. Andrei, M.I. ve Modreanu, N.M. (2014). Numeric modelling of a two-channel limited angle torque motor, EEA – Electrotehnică, Electronică, Automatică, ELECTRA Publishing House, 62(1), 26-31.

41. Kwon, S.O. (2014). Study on the characteristic analysis of limited angle torque motor. KIEE.

42. Ahmed, F.S., Laghrouche, S. ve Bagdouri, M. (2008). Analysis, modeling, identification and control of pancake DC torque motors: Application to automobile air path actuators, *Mechatronics*, 22, 195–212.

43. İnternet: Cedrat Techmologies, Web: https://cedrat-technologies.com/wp-content/uploads/2023/03/Limited_Angle_Torque_Actuators.pdf, Son Erişim Tarihi: 01/05/2025.

44. Internet: Moog, Web: https://www.moog.com/products/motors-servomotors/brushless-motors/limited-rotation-motors.html, Son Erişim Tarihi: 01/05/2025.

45. Aydin, A. ve Saygın, A. (2024). Four Pole Limited Angle Toroidal Motor Magnetic Design. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji,* 12(4), 809-818.

46. Yazdanpanah, R. (2021). Torque Ripple Analysis of the Slotted LATM. *2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, Nairobi, Kenya, 1-4.

47. Yazdanpanah, R. (2022). Analytical study, design, and optimization of radial-flux PM limited-angle torque motors. *Scientia Iranica*, *29*(4), 1975-1982.

48. Strahan, R. J. (1998). *Energy Conversion by Permanent Magnet Machines and Novel Development of the Single Phase Symchronous Permanent Magnet Motor,* Phd. Thesis, University of Canterbury, Yeni Zelanda.

49. Fitzgerald, A.E., Kingsley, C. ve Umans, S. (2003). *Electric Machinery* (Sixth Edition), Boston: McGraw Hill.

50. Zarandi, R.N., Kelk, H.M., Toorani, F. ve Farahmandzad, H. (2011). Comprehensive Design of a Toroidally-Wound Limited Angle Torque Motor, in *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.),* 6 (1), 198-206.

51. Hrabovcová, V., Lipták, M., Rafajdus, P. (2010). Magnetic Circuit Optimization for a Switched Reluctance Generator. *IREE,* 5(4), 1571-1579.

52. Sizov, G.Y., Yeh, C.C. ve Demerdash, N.A.O. (2009). Magnetic equivalent circuit modeling of induction machines under stator and rotor fault conditions. *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Miami, FL, USA, 119-124.

53. Bolton H.R. ve Shakweh, Y. (1990). Performance prediction of Laws' relay actuator. *Proc. Inst. Elect. Eng.*, 137(1), 1-13.

54. Mizia, J., Adamiak, K., Easham, A.R. ve Dawson, G.E. (1988). Finite element force calculation: Comparison of methods of electronic machines. *IEEE Trans. Magn.* 24, 447–454.

55. Mittle V.N. ve Mittal, A. (2002). *Design of Electrical Machines*. New Delhi, India: N.C. Jain.

56. Hanselman, D. Brushless Permanent Magnet Motor Design, 2nd ed.; The Writer's Collective: Cranston, RI, USA, 2003; pp. 67–72.

57. Habil, M. (2023). *Adaptive Control System of Slotless DC Linear Motor*. Doctor of Philosophy, Cardiff University.

58. Ayçiçek, E. (2012). *Vuruntu Momenti Azaltılmış Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

59. Wang, M., Li, D. ve Qu, R. (2023). Analysis of an Axial-Flux Slotted Limited-Angle Torque Motor with Quasi-Halbach Array for Torque Performance Improvement. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 7(3), 266-274.

60. Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology, 15 (3) 234–281.

61. Aydin, M., Zhu, Z.Q., Lipo, T. ve Howe, D. (2007). Minimization of Cogging Torque in Axial-Flux Permanent-Magnet Machines: Design Concepts. Magnetics, *IEEE Transactions* on. 43. 3614 - 3622.

62. Ocak, C. (2013). *Elektrikli Araçlar İçin Üç Kademeli Yeni Bir Fırçasız DA Motoru Tasarımı, Analizi ve Uygulaması,* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi.

63. Fenercioğlu, A., Tarımer, İ. (2007). Bir Manyetik Sistemin Maxwell 3D Alan Simulatörü ile Statik Manyetik Analizinin Çözüm Süreçleri, *Selçuk Teknik Dergisi,* 6 (3) 221-240.

64. Jianning, J. (1993). *The Finite Element Method in Electromagnetics*. New York : John Wiley&Sons Inc.

65. Singh, V.P., Marwaha, S. Singh, A.K. (2017). Design and Analysis of Permanent Magnet Brushless DC Motor for Solar Vehicle using Ansys Software International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181 6(4).

66. Pyrhonen, J., Jokinen, T. ve Hrabovcova, V. (2008). *Design of rotating electrical machines, in Front Matter*, Hoboken, NJ, USA: Wiley.

67. Üstün, Ö. (2000). *Sürekli Mıknatıslı Baskılı Devre Endüvili Doğrusal Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarımı*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

68. Smith, I.R., Kettleborough, J.G. ve Zhang, Y. (1999). Simplified modelling and dynamic analysis of a Laws' relay actuator, *Mechatronics*, 9 (5), 463–475.

69. Patrascoiu, N. (2005). Modeling and Simulation of the DC Motor Using Matlab and LabVIEW*, Int. J. Engng Ed., 21(1), 49-54.

70. Kiruthika, A., Rajan, A.A. ve Rajalakshmi, P. (2013). *Mathematical modelling and speed control of a sensored brushless DC motor using intelligent controller*. 2013 IEEE International Conference ON Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICECCN), Tirunelveli, Hindistan, 211-216.

71. Rathore, N.S., Chauhan, D.P.S. ve Singh, V.P. (2015). *Tuning of PID controller for position control of DC servo motor using Luus-Jaakola Optimization*. 2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4), Indore, Hindistan, 1-5.

72. Ristiana, R., Mardiati, R., Kusumandari, D.E., Simbolon, A.I., Amri, M.F. ve Wibowo, J.W. (2022). *Position Control of a DC Servo Multi-motor for Lower-Limb Exoskeletons*. 2022 8th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Yogyakarta, Endonezya, 1-6.

73. İnternet : Pololu Co. Web: https://www.pololu.com/docs/0J55, Son Erişim Tarihi: 01/05/2025.

74. Zhang, X. (2023). *Design and implementation of fuzzy PID DC motor control system based on STM32*. 2023 IEEE International Conference on Control, Electronics and Computer Technology (ICCECT), Jilin, Çin, 1129-1131.

75. İnternet: ST Microelectronics, Web: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f401re.html Son Erişim Tarihi: 01/05/2025.

76. İnternet: Pololu Co. Web: https://www.pololu.com/product/2518 Son Erişim Tarihi: 01/05/2025.

77. İnternet: FENAC Teknoloji, Web: https://www.fenac.com.tr/tr/urun/fnc-as16s-serisi-mutlak-ssI-bIss-minyatur-enkoder

78. İnternet: ST Microelektronics, Web: https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html

79. Meena, D.K. ve Chahar, S. (2017). *Speed control of DC servo motor using genetic algorithm. 2017* International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC), Indore, Hindistan, 1-7.

80. Pop, A. A. (2022). Incremental Encoder Speed Acquisition Using an STM32 Microcontroller and NI ELVIS. *Sensors*, *22*(14), 5127.

81. İnternet: ICPE, Web: https://www.icpe.ro/special-electric-machines/brushless-torque-motors/ Son Erişim Tarihi: 01/05/2025.



Gazili olmak ayrıcalıktır