



PLANET REDÜKTÖRLÜ SPOKE TİPİ FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTOR

TASARIMI VE ANALİZİ

MUHAMMED MAHBUB İBİŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

PROF.DR. AHMET FENERCİOĞLU

Mart - 2022

Her hakkı saklıdır

T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**PLANET REDÜKTÖRLÜ SPOKE TİPİ FIRÇASIZ DOĞRU AKIM
MOTOR TASARIMI VE ANALİZİ**

MUHAMMED MAHBUB İBİŞ

TOKAT
2022

Her hakkı saklıdır



Bu tez çalışması;

KSB Pompa Armatür Sanayi ve Ticaret A.Ş tarafından ARGEP1808-32 nolu proje ile desteklenmiştir.

Muhammed Mahbub İbiş tarafından hazırlanan “**Planet Redüktörlü Spoke Tipi Fırçasız Doğru Akım Motor Tasarımı Ve Analizi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 22 MART 2022 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa EKER

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mücahit SOYASLAN

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

ONAY

.....
Prof. Dr. Mehmet GÜNEŞ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü
---/---/20--

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

MUHAMMED MAHBUB İBİŞ

MART, 2022

ÖZET

PLANET REDÜKTÖRLÜ SPOKE TİPİ FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTOR TASARIMI VE ANALİZİ

İbiş, Muhammed Mahbub

Yüksek Lisans, Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet Fenercioğlu

Mart 2022, xv + 110 sayfa

Günümüzde, yüksek verimli, uzun ömürlü olması, yüksek başlangıç performansları ve kompakt yapıları nedeniyle Fırçasız Doğru Akım Motorları (FDAM) birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında vana uygulamalarında kullanılmak üzere planet redüktörlü, 12/10 oluk kutup kombinasyonuna sahip spoke tip bir FDAM tasarımı yapılmıştır. Mıknatıs hacimi ve vurunu torkunun daha düşük olması nedeniyle spoke tip rotor yapısında neodyum mıknatıs tercih edilmiştir. Planet dişli sistemler ise geleneksel dişli kutuları ile kıyaslandığında hız, küçük hacim, yüksek yük paylaşımı ve tork ağırlık oranı gibi birçok avantajı vardır. Planet dişli sistemler kompakt dişli kombinasyonu nedeniyle küçük hacimlerde daha yüksek verime sahiptir. Bundan dolayı bu çalışmada planet redüktör tercih edilmiştir. Öngörülen FDAM'ın elektriksel ve manyetik parametrelere göre Sonlu Elemanlar Analizleri(SEY) yapılarak tasarım doğrulanmıştır. Tasarım ve modelleme sürecinde, motor hızı, yük torku, mekanik ve elektriksel güç, kayıplar, manyetik akı ve akım yoğunlukları dikkate alınmıştır. Tasarımı doğrulanan 10 kutuplu, neodyum mıknatıslı motorun ve planet redüktörün prototip imalatı yapılmıştır. İmalatlarda stator ve rotor laminasyonları M400-50A saclardan lazerle kesilmiştir. Nd35SH mıknatıslar kullanılmıştır. Gövde ve kapaklar talaşlı imalatlar ile üretilmiş ve bobinajı elde yapılmıştır. Motor serbest milli olarak test sistemine bağlanarak yüklenme testleri yapılmıştır. Testlerde sürücü olarak TI geliştirme kiti kullanılmıştır ve DA kaynaktan beslenerek farklı yüklerde test edilmiştir. Motorun analiz ve test sonuçlarına göre etiket değerleri belirlenmiştir. Buna göre besleme gerilimi 200 VDA, mekanik güç 400W, hız 1800 d/d, tork 2,12 Nm ve maksimum motor test

verimi % 75 dir. Uygulama tarafında 1/9 tahvil oranında kullanılan planet redüktör ile çıkış torku yaklaşık 19 Nm ve hız 200 d/d olarak vanada görev yapabilecek bir ürün elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Spoke Tipi, BLDC Motor, Sonlu Elemanlar Yöntemi



ABSTRACT

DESIGN AND ANALYSIS OF PLANETARY REDUCTOR SPOKE TYPE BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR

İbiş, Muhammed Mahbub

Master's Thesis, Department of Mechatronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Fenercioğlu

March 2022, xv + 110 page

Today, Brushless Direct Current Motors (FDAM) are widely used in many applications due to their high efficiency, long life, high starting performance and compact structure. In this thesis, a spoke type FDAM design with planetary reducer and 12/10 corrugated pole combination was made to be used in valve applications. Neodymium magnet was preferred in the spoke type rotor structure due to the lower magnet volume and knocking torque. Planetary gear systems have many advantages compared to conventional gearboxes such as speed, small volume, high load sharing and torque-to-weight ratio. Planetary gear systems have higher efficiency in small volumes due to the compact gear combination. For this reason, planetary reducer is preferred in this study. The design was verified by making Finite Element Analyzes according to the electrical and magnetic parameters of the predicted FDAM. During the design and modeling process, motor speed, load torque, mechanical and electrical power, losses, magnetic flux and current densities were taken into account. Prototype manufacturing of a 10-pole neodymium magnet motor and planetary reducer, whose design has been verified, has been made. In manufacturing, stator and rotor laminations are laser cut from M400-50A sheets. Nd35SH magnets are used. The body and covers are produced by machining and the winding is made by hand. Loading tests were carried out by connecting the motor to the test system as a free shaft. TI development kit was used as a driver in the tests and it was tested at different loads by being fed from a DC source. Nameplate values were determined

according to the analysis and test results of the engine. Accordingly, the supply voltage is 200 VDC, the mechanical power is 400W, the speed is 1800 rpm, the torque is 2.12 Nm and the maximum motor test efficiency is 75%. With the planetary gearbox used in the application side with a ratio of 1/9, a product that can function in the valve with an output torque of approximately 19 Nm and a speed of 200 d/d has been obtained.

Keywords: Spoke Type, BLDC Motor, Finite Element Method



ÖNSÖZ

Lisans eğitimim ve yüksek lisans çalışmam boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen, bu çalışmada katkıları ile birlikte yön veren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU'NA sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Eğitim hayatım boyunca varlığı ve desteğini esirgemeyen aileme, özellikle kardeşim Merve İBİŞ'e, bu çalışmada bilgi birikimlerini bana aktarmaya çalışan Sayın Yusuf AVŞAR ve Mustafa EKER hocama, çalışmanın uygulama aşamasına dökülmesinde desteklerini esirgemeyen KSB Pompa firmasının Genel Müdür'ü Sayın Sinan ÖZGÜR'e, piyasadaki bilgi ve tecrübelerini bana aktaran Sayın Onur ÜZER ve Cihad EKİN'e sonsuz teşekkür ederim.

MUHAMMED MAHUB İBİŞ

MART, 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	3
3. GENEL BİLGİLER.....	7
3.1. Elektrik Motoru Nedir?	7
3.1.1. Manyetizma	8
3.1.2. Elektrik motorlarının sınıflandırılması	10
3.2. Fırçasız Doğru Akım Motoru (FDAM).....	11
3.2.1. FDAM'ın sınıflandırılması	12
3.2.2. FDAM'ın yapısı.....	14
3.2.3. FDAM çalışma prensibi	22
3.2.4. FDAM'da kullanılan mıknatıs tipleri	23
3.2.5. FDAM'da kullanılan sensör tipleri.....	26
4. MATERYAL ve YÖNTEM	30
4.1. FDAM'ın Matematiksel Modellenmesi.....	30
4.2. Spoke Tipi FDAM Tasarımı	39
4.2.1. Tasarım akışı	39
4.2.2. Giriş parametrelerinin seçilmesi.....	40
4.2.3. Tork, güç ve hız değerlerinin bulunması	41
4.2.4. Oluk-Kutup sayısının seçilmesi.....	43
4.2.5. Motor ölçülerinin belirlenmesi	45
4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi	56
4.3.1. Simulasyon yazılımı: ANSYS Maxwell.....	56
4.3.2. Maxwell RMXprt modeli	57
4.4. Spoke Tipi 10 Kutuplu FDAM'ın Prototip Üretimi	60
4.4.1. Silisyumlu elektriksel sac temini ve işlenmesi.....	60
4.4.2. Lazer kaynak ve paketlenme	62
4.4.3. Sarım işlemi.....	62
4.4.4. Mıknatıs temini ve rotor paketinin hazırlanması.....	65
4.4.5. Motor gövdesi ve rotor milinin işlenmesi	67
4.4.6. Kapak ve stator çakma aparatının işlenmesi	69

4.4.7. Planet redüktör sisteminin tasarımı ve imalatı	70
4.4.8. Motorun son görünüşü.....	76
4.5. Deneysel Çalışmalar	78
4.5.1. Test düzeneği için fişktür hazırlanması	78
4.5.1. Test düzeneği.....	78
5.1. Tasarım Sonuçları.....	80
5.2. Analiz Sonuçları.....	80
5.2.1. RMxpirt yazılımı ile analiz sonuçları	80
5.2.2. Sonlu elemanlar metodu ile analiz sonuçları.....	82
5.3. Deneysel Sonuçlar	90
6. TARTIŞMA ve SONUÇ	92
7. KAYNAKLAR	95
8. EKLER	97
9. ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
ε	İndüklenen elektro manyetik kuvvet
N	Sarım sayısı
$d\Phi_B$	Manyetik akıdaki değişim
B	Manyetik alan şiddeti(yoğunluk)
Φ	Manyetik akı
t	Zaman
m	Metre
m_o	Modül
d/d	Dakikadaki devir sayısı
Nm	Newton – metre
%	Yüzde
V_h	Hall voltajı
R_h	Hall-etkisi katsayısı
I	Akım
thc	Sensör kalınlığı
i_a	A faz akımı
i_b	B faz akımı
i_c	C faz akımı
R_a	A fazı stator sargı direnci
R_b	B fazı stator sargı direnci
R_c	C fazı stator sargı direnci
L_a	A fazı stator sargı indüktansı
L_b	B fazı stator sargı indüktansı
L_c	C fazı stator sargı indüktansı
E_a	İndüklenmiş voltaj (a fazı)
E_b	İndüklenmiş voltaj (b fazı)
E_c	İndüklenmiş voltaj (c fazı)
ω	Açısal hız
M	Tork

M_m	Motor torku
M_y	Yük torku
M_e	Ortak endüktans
k	Motor sabiti
k_a	A fazı için motor sabiti
k_b	B fazı için motor sabiti
k_c	C fazı için motor sabiti
θ	Rotor pozisyon açısı
J	Atalet momenti
J_m	Motor atalet momenti
J_y	Yük atalet momenti
B_m	Motor katsayısı
B_y	Yük katsayısı
D_{si}	Stator iç çapı
D_{s0}	Stator dış çapı
h_{sb}	Stator boyunduruk kalınlığı
R_{s1}	Oluk boyunduruk yarıçapı
h_{s2}	Oluk yüksekliği
h_{s1}	Oluk dış ucu yarıçapı
h_{s0}	Dış ucu kalınlığı
B_{s0}	Oluk açıklığı
w_{sd}	Stator dış genişliği
D_{ri}	Rotor iç çapı
D_{ro}	Rotor dış çapı
g	Hava aralığı kalınlığı
h_m	Mıknatıs kalınlığı
λ_{oluk}	Stator oluk adımı
α_m	Mıknatıs adım açısı
l_m	Mıknatıs uzunluğu
L_p	Motor paket boyutu
Ψ	Psi
TRV	Birim rotor hacmi başına tork

C_o	Çıkış katsayısı
N_d	Diş sayısı
N_P	Minimum dişli sayısı
N_G	Maximum dişli sayısı
$\emptyset$	Basınç açısı
k_d	Tam derinlikli diş sabiti
Hz	Frekans



Kısaltmalar**Açıklama**

FDAM

Fırçasız Doğru Akım Motoru

2B

İki Boyutlu

3B

Üç Boyutlu

EMK

Elektro Motor Kuvvet

DA

Doğru Akım

AA

Alternatif Akım

SMSM

Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

CAD

Bilgisayar Destekli Tasarım

SEY

Sonlu Elemanlar Yöntemi

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. Elektrik makineleri enerji dönüşümü (Gieras, 2017)	7
Şekil 3.2. Motorun ve generatörün enerji dönüşüm blok diyagramı (Gieras, 2017)	7
Şekil 3.3. Sağ el kuralı	8
Şekil 3.4. Sağ el kuralı ile manyetik kuvvetin gösterimi (Gieras, 2017)	9
Şekil 3.5. Elektrik motorlarının sınıflandırılması (Yıldırım, 2015)	10
Şekil 3.6. FDAM'ın demonte görünümü (Anonim, 2018)	11
Şekil 3.7. FDAM ve SMSM zıt EMK dalga formları (Erdem, 2011)	12
Şekil 3.8. En yaygın FDAM yapıları (Hanselman, 2003)	14
Şekil 3.9. İçten rotorlu motorlarda rotor çeşitleri (Gieras ve Wing, 2000)	15
Şekil 3.10. İç mıknatıslı rotor yapıları (Gieras ve Wing, 2000)	16
Şekil 3.11. Yüzey mıknatıslı rotor yapısı (Gieras ve Wing, 2000)	16
Şekil 3.12. Merkezden uzaklaştırılmış mıknatıslı rotor yapısı (Gieras ve Wing, 2000)	17
Şekil 3.13. Yüzeye gömülü mıknatıslı rotor yapısı (Gieras ve Wing, 2000)	17
Şekil 3.14. Spoke tipi rotor yapısı (Gieras ve Wing, 2000)	18
Şekil 3.15. Asimetrik gömülü mıknatıslı rotor yapısı (Gieras ve Wing, 2000)	18
Şekil 3.16. Çift katmanlı iç mıknatıslı rotor yapısı	19
Şekil 3.17. Dıştan rotorlu motor yapısı (Hanselman, 1994)	20
Şekil 3.18. Eksenel akı motor yapıları (Hanselman, 1994)	21
Şekil 3.19. Lineer motor yapısı (Hanselman, 1994)	21
Şekil 3.20. FDAM'ın çalışma prensibi (Anonim, 2020)	22
Şekil 3.21. Çeşitli mıknatıslara ait mıknatıslığı yok etme karakteristikleri (Özçira, 2013)	24
Şekil 3.22. Hall etkili sensör çalışma prensibi	27
Şekil 3.23. Çeşitli hall-etkili sensörler	28
Şekil 3.24. Enkoderlerin genel yapısı	29
Şekil 3.25. Bir enkoderin FDAM'da uygulanması	29
Şekil 3.26. $\pi/6 < \theta_e < \pi/2$ aralığı için iletim eşdeğer devresi	31
Şekil 3.27. $\pi/6 < \theta_e < \pi/2$ aralığı için iletim eşdeğer devresi	31
Şekil 3.28. 1800 d/d 2 Nm'lik motorunun vana entegrasyonu	42
Şekil 3.29. Kutup-faz başına oluk sayıları ve sargı faktörü oranları (Soyaslan,2020)	43
Şekil 3.30. Oluk-kutup sayılarının EKOK değerleri (Soyaslan,2020)	44
Şekil 3.31. Oluk-kutup sayılarının EBOB değerleri (Soyaslan,2020)	45
Şekil 3.32. C_o için hazırlanan değerler (Gürdal,2015)	46
Şekil 3.33. M400-50A silisli sacın B-H egrisi	47

Şekil 3.34. M400-50A silisli sacın farklı frekans aralığındaki kayıpları.....	48
Şekil 3.35. Tane yönlendirilmiş silisli sacların manyetik özellikleri (Soyaslan,2020)	49
Şekil 3.36. N35SH mıknatısın B-H eğrisi.....	50
Şekil 3.37. Stator oluk tipi ve kullanılan parametreler	51
Şekil 3.38. İçten rotorlu motorun geometrik ölçüleri	53
Şekil 3.39. FDAM'ın mıknatıs ölçüleri	53
Şekil 3.40. Stator oluk alanının ve ölçülerinin gösterimi	55
Şekil 3.41. ANSYS Maxwell programı arayüzü.....	57
Şekil 3.42. ANSYS Maxwell programı makine tipleri	58
Şekil 3.43. ANSYS Maxwell RMxprrt FDAM modeli.....	58
Şekil 3.44. M400-50A silisli sacın stator paketi için CAD çizimi	61
Şekil 3.45. Lazer kesim yapılan stator silisli sacı	61
Şekil 3.46. Lazer kaynak yapılarak paketlenmiş sarıma hazır stator.....	62
Şekil 3.47. Motor sargı yalıtım malzemesi	63
Şekil 3.48. FDAM sarım şeması	63
Şekil 3.49. Sarım şemasına göre sargıları yapılmış stator ve uç uzantı ölçümü64	
Şekil 3.50. Sarımı tamamlanmış stator	64
Şekil 3.51. N35SH mıknatıs	65
Şekil 3.52. M400-50A silisli sacın rotor paketi için CAD çizimi.....	65
Şekil 3.53. Lazer kesim yapılan rotor silisli sacı	66
Şekil 3.54. Lazer kaynak yapılarak paketlenmiş rotor.....	66
Şekil 3.55. Rotor mil CAD tasarımı	67
Şekil 3.56. Rotor paketine sıkı geçirilmiş rotor mili.....	67
Şekil 3.57. Motor gövdesi.....	68
Şekil 3.58. Motor gövdesi rulman yatağı ve iç kesit	68
Şekil 3.59. Motor kapakları a) yuvarlak kapak tasarımı b) kare kapak tasarımı	69
Şekil 3.60. Stator çakma aparatı	69
Şekil 3.61. Basit planet dişli sistemi	70
Şekil 3.62. 1800 d/d 2 Nm'lik motorunun vana entegrasyonu	71
Şekil 3.63. 1800 d/d 2 Nm'lik motorun A-B-C modülüne entegrasyonu.....	71
Şekil 3.64. Planet dişli genel diş boyutları.....	73
Şekil 3.65. 1/9 aktarma oranına sahip planet redüktör	74
Şekil 3.66. Planet redüktör giriş şaftı burulma analizi.....	74
Şekil 3.67. Redüktör ve motor entegrasyonu 3B modeli	75
Şekil 3.68. Planet redüktör kutusu ve motor entegrasyonu	75
Şekil 3.69. İndüksiyon fırını ile motor gövdesinin ısıtılması	76
Şekil 3.70. Statorun motor gövdesine geçirilmesi	76
Şekil 3.71. Rotorun gövdeye geçirilmesi ve sargıların son hali	77
Şekil 3.72. FDAM'ın solidworks çizimi ve üretimi yapılmış son hali	77
Şekil 3.73. Test düzeneği için motor test fikstürü	78
Şekil 3.74. Test düzeneği	78
Şekil 3.75. Test sistemi diyagramı	79
Şekil 3.76. TI- C2000 sistem ara yüzü.....	79
Şekil 3.77. Maxwell analiz akış diyagramı	80
Şekil 3.78. 2B FDAM modeli	81
Şekil 3.79. Motor hızına göre motor DA kaynak akımının değişimi	81

Şekil 3.80. Motor hızına göre motor akımının değişimi	82
Şekil 3.81. FDAM Sürme Devresi	83
Şekil 3.82. Elektromanyetik tork ve mil yük torku.....	84
Şekil 3.83. Maxwell 2B ile motor hız grafiği	84
Şekil 3.84. Motor faz akımları	85
Şekil 3.85. DA bara akımı	85
Şekil 3.86. Nüve kayıpları	86
Şekil 3.87. Bakır kayıpları	86
Şekil 3.88. FDAM direnç ölçümü.....	87
Şekil 3.89. Spoke tipi FDAM'ın farklı noktalardan manyetik akı yoğunluklarının incelenmesi	88
Şekil 3.90. Spoke tipi FDAM'ın manyetik alan çizgileri	89
Şekil 3.91. Spoke tipi FDAM'ın manyetik alan çizgileri	89
Şekil 3.92. Test sonuçları verim karşılaştırma grafiği	91

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No

Sayfa

Çizelge 3.1. FDAM ve SMSM arasındaki farklar (Erdem, 2011).....	13
Çizelge 3.2. Rotor pozisyonuna bağlı değişim aralıkları.....	31
Çizelge 3.3. Aktuatör üreticilerine göre kullanılan vana tipleri	40
Çizelge 3.4. Aktuatör üreticilerine göre elektriksel açıdan genel kriterler	41
Çizelge 3.5. Motor hız,tork bilgilerine göre açma-kapama süreleri	41
Çizelge 3.6. Ön görülen spoke tipi FDAM için tasarım girdileri	42
Çizelge 3.7. Ön görülen spoke tipi FDAM için tasarım girdileri	44
Çizelge 3.8. Spoke tipi rotorun tasarım girdileri	47
Çizelge 3.9. Spoke tipi rotorun mıknatıs bilgileri.....	50
Çizelge 3.10. Stator tasarım girdileri	51
Çizelge 3.11. Stator sarım parametreleri	52
Çizelge 3.12. FDAM ölçülerinin açıklamaları.....	54
Çizelge 3.13. Menülere göre tablo değerleri.....	59
Çizelge 3.14. Planet dişli tasarım parametreleri	73
Çizelge 3.15. Test sisteminde yer alan cihazlar	79
Çizelge 3.16. FDAM direnç değerleri	87
Çizelge 3.17. FDAM’da kayıplar	87
Çizelge 3.18. FDAM’ın farklı noktalardan manyetik akı yoğunlukları	88
Çizelge 3.19. Sonlu elemanlar analiz sonuçları	90
Çizelge 3.20. Test sonuçları.....	91
Çizelge 3.21. FDAM etiket değerleri.....	94

1. GİRİŞ

Derin bir geçmişe sahip elektrik motorları, sanayi devriminin gelişmesi ile birlikte insan kas gücünün kullanılmasına karşılık endüstride yerini aldı. İnsan hayatını kolaylaştırmak, daha rahat ve konforlu bir yaşam sağlamak için hayatın birçok alanında makineler kullanılmaktadır. Bu makinelerinin büyük bir çoğunluğu elektrik motoru ile çalışmaktadır. Günümüzde elektrik makineleri birçok yaşamsal ürünün elektrikleştirilmesiyle oldukça yaygın hale gelmiştir. Akademik alanda ve endüstriyel alanda elektrik makinelerinin yaygın hale gelmesi önemli çalışmaları da beraberinde getirmiştir. Robotlardan elektrikli araçlara, sanayi 4.0 ve nesnelerin interneti gibi yeni teknoloji akımları da elektrik makinelerinin alanına girmektedir. Bu nedenle Türkiye’de elektrik makineleri tasarımı ve araştırma geliştirme faaliyetleri oldukça gelişime açıktır. Aynı zamanda, sanayide genel olarak düşük verimli elektrik motorlarının kullanılması teknolojinin gelişmesi ile beraber yerini verimli motorlara bırakmaktadır (Çetin, 2018).

Mıknatıs teknolojinin gelişmesiyle birlikte ilk ticari sabit mıknatıslı motor 1930’larda tanıtıldı. Bu motorda kullanılan mıknatıs materyali ise AlNiCo mıknatıs olarak adlandırılmaktadır. 1950’lerde ferrit mıknatısların keşfiyle elektrik motorlarında bu mıknatısların kullanımı artmıştır. Ancak ferrit mıknatısların düşük enerji yoğunluğuna sahip olmasından ötürü küçük güçlü motorlar dışında kullanılmamıştır. 1990’lı yıllarda ise nadir toprak mıknatıslarının geliştirilmesiyle elektrik motorlarında mıknatıs kullanılması yaygınlaşmasını sağlamıştır (Özçira, 2013).

Elektrik motorlarının endüstriyel uygulamalarda oldukça fazla yer bulması ile beraber maliyet, enerji verimliliği ve üretim metotları bakımından değerlendirmek önemli bir hal alıyor. Günümüz piyasasına baktığımızda iki grup altında incelenmiş çeşitli motor türleri bulunmaktadır. Bu motor türleri ise AA ve DA motorlar olarak isimlendirilir. Nikola Tesla’nın icadı olan alternatif akım motorları piyasada çok yaygın hale gelerek kullanılmaya başlansa da basit tasarım ve kolay bakım gibi avantajlara sahip olmasına rağmen, tork ve hız kontrol kolaylığı basit tahrik devrelerinden ötürü DA motorlarda dikkat çekmektedir.

Doğru akım motorlarını da kendi arasında iki sınıfa ayırdığımızda fırçalı ve fırçasız doğru akım motorları olarak isimlendirilir. Fırçalı doğru akım motorlarında fırça ve kollektörden kaynaklanan verim kaybı sebebiyle bu tür kayıpların bulunmadığı Fırçasız Doğru Akım Motorları (FDAM) ortaya çıkmıştır. Günümüzde güç elektroniği konusundaki gelişmeler ile diğer elektrik makinelerine göre daha az anahtarlama elemanın kullanılması, hacimlerinin ve ağırlıklarının az, moment yoğunluklarının ve moment/ağırlık oranlarının fazla, verimlerinin yüksek olmasından dolayı yüksek moment ve değişken hızlı uygulamalarda FDAM tercih edilmektedir.

Gerçekleştirilen bu tez çalışması toplam 6 bölümden oluşmaktadır. “Giriş” Bölümü olan Bölüm 1’de tez çalışmasının konusuna dair genel bir giriş yapılarak kısaca elektrik motorları hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 2 “Kaynak Özetleri” bölümüdür. Bu bölümde, gerçekleştirilen birçok araştırma ve çalışmalar doğrultusunda elde edilen bilgiler ile elektrik motorlarının sınıflandırılması ve sabit mıknatıslı FDAM’ın detaylı açıklamaları yer almakla birlikte bu motorlar ile ilgili literatürde gerçekleştirilen spoke tip FDAM ile ilgili çalışmalar üzerinde durulmuştur.

“Genel Bilgiler” olan Bölüm 3’te tasarlanan FDAM’ın yapısına, çıkartılmış olan matematiksel modeline ve kullanılan parametrelere yer verilmiştir.

Bölüm 4’te “Materyal ve Yöntem” başlığı altında, FDAM’ın tasarım sürecinden bahsedilmiştir.

Bölüm 5’te ise “Bulgular” başlığında FDAM’ın tasarım süreci, yapılan analizler sonucunda doğrulanmış ve elde edilen moment, akı, manyetik alan enerjisi, çıkış gücü gibi değerler göz önüne alınarak 12/10 olmak üzere spoke tipi rotor incelenmiştir. Ayrıca prototipi yapılan 12/10 spoke tipi FDAM’ın test verilerine de değinilmiş ve bilime ışık olması adına akademik yorumlara yer verilmiştir.

6. bölüm olan “Tartışma ve Sonuç” kısmında ise çalışmalar sonucunda elde edilen tüm sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde FDAM'ın spoke rotor tipi ile ilgili daha önceden yapılmış çalışmalara yer verilmiş ve kısaca anlatılmıştır.

2004 yılında yapılan bir çalışmada yüzey mıknatıslı rotor tipine sahip bir FDAM ile spoke tip olarak isimlendirilen FDAM kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslamada en önemli kriter olarak tork karakteristiği göz önüne alınmıştır. Spoke tipi motorların anlık akım ve tork karakteristiği sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda spoke tipi FDAM'ın diğer FDAM'a göre daha iyi tork karakteristiğine sahip olduğu anlaşılmış ve vurgulanmıştır. Ayrıca spoke tip rotorda yapılan akı bariyerlerinde optimizasyon ile tork karakteristiğine dalgalanmalar en aza indirilmeye çalışılmış ve yeni birkaç spoke tipi rotor tasarımı önerilmiştir (Lee ve ark., 2004).

2007 yılında yapılan bir makalede ise spoke tipi FDAM'da yapılan iki boyutlu(2B) sonlu elemanlar metodu kullanılarak tork dalgalanması ve zıt EMK dalga formunda bulunan harmoniklerin azaltılması ile ilgili çalışmalar anlatılmıştır. Bu harmonikleri azaltmak için eksantrik yüzeylerden düzgün yüzeylere doğru yeni bir spoke tipi rotor tasarımı önerilmektedir. Önerilen spoke tipi yeni rotor tipinde mıknatıs ile stator dişleri arasında hava boşluğu tasarımsal olarak eksantrik bir yüzey tasarımı önerilerek bitişik stator dişleri arasındaki kayıplar azaltılmış ve bu tasarım manyetik akının artmasına pozitif yönde etkili olmuştur. 2B sonlu elemanlar metodu ile yapılan ilk model kıyaslanmış yapılan kıyaslama sonucunda tork dalgalanması ve ortalama torkun iyi sonuçlara sahip olduğu gözlenmiştir (Hwang ve ark., 2007).

2012 yılında yapılan bir bilimsel çalışmada ise neodyum sürekli mıknatıs kullanmadan yeni bir tasarım ile FDAM tasarımı önerilmiştir. Yapılan bu yeni tasarımda neodyum mıknatısındaki fiyat artışları göz önüne alınarak alternatif bir ferrit sürekli mıknatısı kullanılabileceği öngörülmüştür. Öngörülen spoke tipi tasarımlarda manyetik akı yoğunluğunu en üst düzeye çıkarmak için ek ilave yardımcı sürekli mıknatıs kullanılması önerilmiş ve analiz edilerek açıklanmıştır. Ayrıca neodyum yerine ferrit mıknatıs kullanılması durumunda mıknatıs hacmindeki artış oranını belirlemek ve tork yoğunluğunu iyileştirmek adına bir hesaplama yöntemi önerilmiş, sonlu elemanlar yöntemi ile bu durum doğrulanmıştır (Kim ve ark., 2012).

2013 yılında yayınlanmış olan bir bilimsel yazıda dört kutuplu sürekli mıknatıslı motor için farklı rotor topolojileri üzerinde durulmuş ve her topolojide minimum miktarda mıknatısla maksimum tork miktarını bulmak için çeşitli analizler yapılmıştır. Her rotor topolojisinin avantaj ve dezavantajları üzerinde durularak tork miktarı, tork yoğunluğu ve manyetik akı oranları karşılaştırılmıştır. Yapılan her konfigürasyonda statorun aynı altı oluklu rotorun ise dört kutuplu olmasına dikkat edilmiştir. Yapılan çalışmalar doğrultusunda sürekli mıknatıslı motorların hacmini ve maliyeti düşürmek adına içten rotorlu tipler üzerinde durularak yüzey mıknatıslı motorlara göre spoke tip ve diğer rotor konfigürasyonlarda yüksek akı ve tork sağladığı görülmüştür (Ghahfarokhi ve Faiz, 2013).

2013 yılına ait bilimsel bir yazıda düşük voltajlı yüksek akım uygulamaları için spoke tipi motorda bazı tasarım sorunlarından bahsedilerek ilk motor tasarımından sonra motor tork kalitesinin iyileştirmek adına yapılan sonlu eleman analizleri üzerinde durulmuştur. Yapılan optimizasyon çalışmaları ile prototip bir motor üretilerek test edilmiş ve analiz sonuçları deneysel olarak doğrulanmıştır. Yapılan detaylı tasarım ve analiz sonucunda spoke tipi motorda hava aralığı optimizasyonu ile mıknatısların açılı olarak yerleştirilmesi ile rotordaki etkiler incelenerek 2B sonlu elemanlar analiz sonuçları ve prototip motorun yüksüz deneysel sonuçların arasında bir uyum olduğu gözlenmiştir (Demir ve ark., 2013).

2014 yılında yapılan bir çalışmada ise derin kuyu dalgıç pompasında kullanılmak için tasarlanan spoke tipi FDAM'ın 2B ve 3B sonlu elemanlar analizi yapılarak asenkron motorlarına göre düşük güç uygulamalarında verimliliklerin az olmasının sebebiyle spoke tipi FDAM'ın düşük güç uygulamalarında yüksek verimlilikten dolayı tercih edilebileceğini kanıtlamak istemişlerdir. Ancak yıllar geçtikçe neodyum mıknatıstaki fiyat artışları düşük maliyetli ferrit mıknatıslı FDAM tasarımı ilgi çekmekte olup bu makalede de ferrit mıknatıslı spoke tipi bir FDAM önerilmiştir. Tasarımı yapılan motorun 2B ve 3B sonlu elemanlar analizindeki sonuçları doğrulamak için Mıknatıs yazılımı kullanılmıştır. Tasarım esnasında FDAM'ın derinkuyu dalgıç pompasında kullanılacak olması boyutsal olarak dezavantajlarına rağmen düşük dişli torkuna sahip olması ile birlikte %88'lik bir verimle 2880 d/d 4,25 Nm torka sahip olduğu analizler sonucunda bulunmuştur. Sonuç itibarıyla spoke tipi ferrit FDAM'ın diğer motorlara göre düşük güç uygulamalarında verimli olduğu doğrulanmıştır (Sashidhar ve Fernandes, 2014).

2015 yılında makale olarak sunulan bir çalışmada ise spoke tipi 12 oluklu 8 kutuplu ve 12 oluklu 10 kutuplu iki kombinasyon üzerinden farklı rotor topolojileri üzerinden neodyum ve ferrit mıknatıslarla yapılmış olan sürekli mıknatıslı motor tasarımları incelenmiştir. Yapılan tasarım optimizasyonları ise sonlu eleman yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan analizle birlikte toplam malzeme maliyeti, güç kayıpları ve tork dalgalanması optimizasyon hedefi olarak ele alınmıştır. Sistematik bir karşılaştırma ile farklı rotor topolojileri için tablolar oluşturularak belirlenen hedefler doğrultusunda kıyaslamalar yapılmıştır. 6 farklı tip içeren bu çalışmada aynı derecedeki neodyum mıknatıslı motorlara göre %40'a varan düşük maliyetli ferrit mıknatıslı spoke tipi motorun daha yüksek verimlilik elde edilebildiği görülmüştür. 12 oluklu 8 kutuplu kombinasyonun 12 oluklu 10 kutuplu tasarıma göre daha maliyetli ve daha yüksek tork dalgalanmasına rağmen düşük kayıplar için optimum tasarımlar sağlayabileceği yapılan analizler ve kıyaslamalı tablolar ile doğrulanmıştır (Zhang ve ark., 2015).

2016 yılında gerçekleştirilen spoke tipi üzerine yapılan bir çalışmada ise mekanik mukavemette bir bozulma olmaksızın, daha yüksek tork kapasitesi ve daha iyi üretilebilirliğin elde edilebildiği, yeni alternatif hava aralığı bariyerlerine sahip spoke tipi bir motor önerilmiştir. Ayrıca, yeni spoke tipi tasarımdaki kaçak akı özellikleri ve tork kapasitesi gibi parametreler üç boyutlu(3B) sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Ayrıca, tek kutuplu sızıntı akısını ve uç şaftın mıknatıslanmasını azaltmak için kademeli bir rotor önerilmektedir. Yapılan analizler doğrultusunda prototip bir motor üretilerek deneysel veriler analiz sonuçları ile doğrulanmıştır (Ge ve ark., 2016).

2019 yılında spoke rotor topolojisine sahip FDAM performansına ilişkin yayınlanan bir makalede ise, fiziksel mıknatısların konfigürasyonu nedeniyle önemli 3B sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde rotor sızıntı etkilerine tasarım süreçlerinde dikkat etmek gerektiğinden bahsetmişlerdir. Bununla birlikte, 3B sonlu eleman yöntemi kullanılıyorsa, farklı çalışma koşullarında motor davranışının hızlı bir şekilde değerlendirilmesinin pratik olmayacağını, rotor sızıntı (leakage) etkilerini kolayca hesaplama adına matematiksel bir metot önerilmiştir. Rotor sızıntı etkileri, eşdeğer bir düzeltme faktörü kullanılarak 2B simülasyonlara dahil edilmiştir. 2B modifiye edilmiş model kullanılarak elde edilen sonuçlar önce 3B simülasyonlarla karşılaştırılmış ve daha

sonra deneysel sonuçlar ile mükemmel bir uyum göstermiş ve 2B modifiye edilmiş modelin arkasındaki mantığın doğruluğunu kanıtlamıştır (Volpe ve ark., 2019).

2020 yılında yapılan bir çalışmada ise, yüksek performanslı motorların maliyetini düşürmek adına, ferrit ve nadir toprak mıknatıslarının karışımıyla farklı rotor konfigürasyonları önerilmektedir. Dolar başına torkun karşılaştırılması açısından, eşit olmayan mıknatıs uzunluklarına sahip spoke tipi, diğer topolojilere göre bir avantaja sahip olduğu ve önerilen spoke tipi motor tasarımının, performans kaybı olmaksızın motor maliyetini düşürmek için potansiyel bir aday olabileceği yapılan analizler ve kıyaslamalar ile doğrulanmıştır (Ma ve ark., 2020).

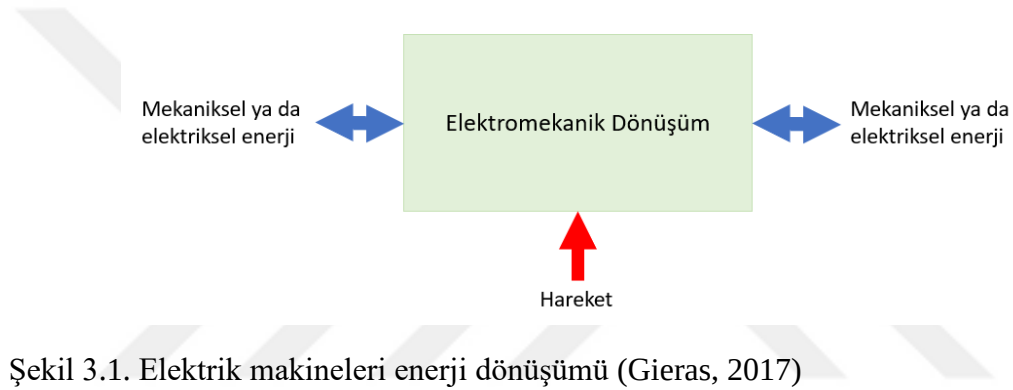
2020 yılında yapılan başka bir çalışmada ise, hava aralığındaki geçirgenliği değiştirerek ve manyetik akı yoğunluğunu artırarak güç performansını iyileştirmek için spoke tipi sabit mıknatıslı senkron motor için yeni bir rotor şekli önerilmiştir. Rotor kama şeklindeki bir bariyerin uygulanması, rotorun doymuş manyetik akı yoğunluğuna sahip alanlarında relüktans değişikliğine neden olur ve bu da hava boşluğundaki geçirgenliği değiştirir. Ek olarak, manyetik akı hava boşluğuna iletilerek hava boşluğu manyetik akı yoğunluğu kuvvetini arttırabilir. Bu çalışmada, hava boşluğu manyetik akı yoğunluğunu ve torku maksimize etmek için kama şeklindeki bir bariyer kullanılmış, böylece torku olumsuz etkileyen manyetik akı yoğunluğu doyumu ortadan kaldırılmıştır. Bu kama şeklindeki bariyer aynı zamanda endüktansları da değiştirir. Bu bariyerin uygulanması, hava boşluğu geçirgenliğinin yanı sıra d ekseni ve q ekseni endüktanslarını değiştirdiği ve sonuç olarak torku % 4,4 artırdığı gözlemlenmiştir. Daha sonra kama şeklindeki bariyerlere sahip spoke tipi motorun prototipi üretilmiş ve uygun koşullar altında test ortamı hazırlanmıştır. Yapılan bu deneysel sonuçlar ile 2B sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilen tasarım sonuçları kıyaslanarak bahsi geçen konu doğrulanmıştır (Jang ve ark., 2020).

Yukarıda yapılan kaynak taramaları sonucunda spoke tipi FDAM tasarımı ve analizi için bir çalışma gerçekleştirilmesine karar verilmiş ve bu doğrultuda yapılan rotor tipi ile ilgili tasarım detayları ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır.

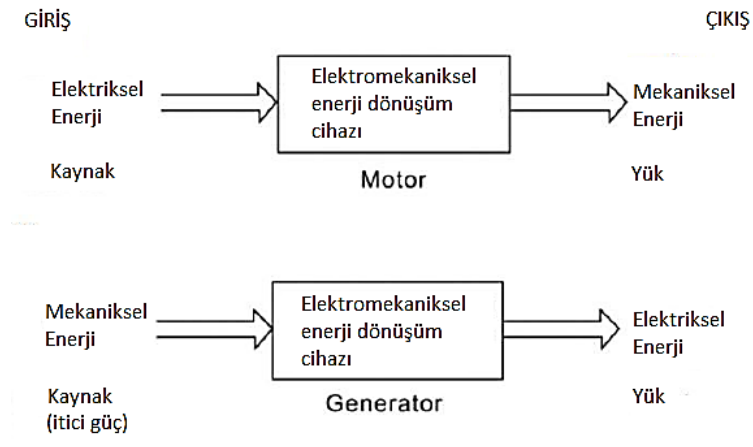
3. GENEL BİLGİLER

3.1. Elektrik Motoru Nedir?

Elektrik makineleri Şekil 3.1’de gösterildiği gibi mekanik enerjiyi elektrik enerjisine, elektrik enerjisini de mekanik enerjiye dönüştüren makinelerdir. Enerjiyi manyetik bir biçimde depolamaları gerekir. Yani elektrik makineleri bir diğer adıyla elektrik motorları, elektromanyetik indüksiyon yasasına göre enerjiyi dönüştüren elektrik ve manyetik devreler sistemidir.



Bir elektrik motoru, bir tür elektromekanik enerji dönüştürme cihazıdır. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirir. Bu durumun tam tersi ise generatör olarak adlandırılmaktadır.



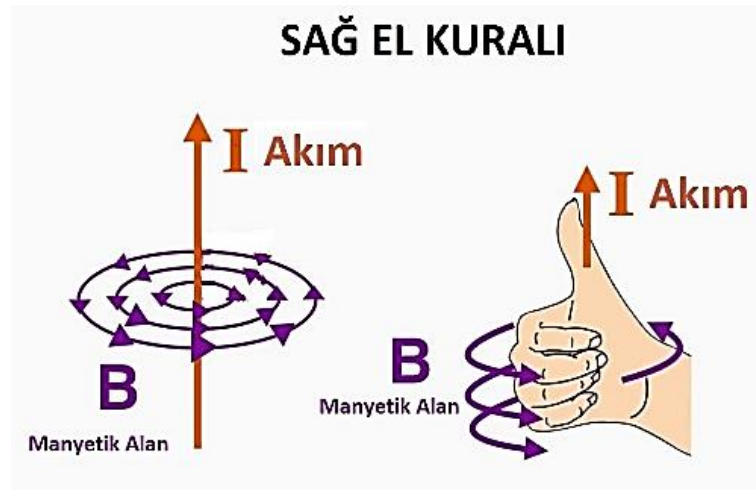
Şekil 3.2. Motorun ve generatörün enerji dönüşüm blok diyagramı (Gieras, 2017)

Elektrik motorları genel olarak sabit olan bir stator ve hareketli bir parça olan rotordan meydana gelmektedir. Elektrik motorlarının daha yakından tanımak için öncelikle manyetizma konusunu bilmek gerekir.

3.1.1. Manyetizma

Elektrik motorlarında, manyetik çekirdek malzemeleri akı yoğunluğunun ve manyetik alanın en önemli olduğu birkaç özellik ile tanımlanır. Doğada bulunan bazı maddeler de yapı gereği bu özelliklere sahip olması ile birlikte birbirlerine karşı itme ve çekme kuvveti uygularlar. Bu maddelere örnek verilmesi gerekirse demir, kobalt ve nikelden söz edilebilir. Manyetik ekirdek malzemelerinin kuzey ve güney olarak adlandırılan iki kutbu bulunur. Kuzey kutbundan güney kutbuna doğru hareket eden manyetik alan çizgileri kutuplar arasında asla kesişmezler.

18. yy’ da Hans Christian Oersted, iletken den geçen akımın sadece ısı yaymadığını etrafında bir manyetik alan oluşturduğunu keşfetmiş ve şekil 3.3’te görüldüğü gibi sağ el kuralı ile manyetik alanın yönü belirlenmiştir (Yıldırım, 2015).



şekil 3.3. Sağ el kuralı

Sağ el kuralı ile belirlenen yani bir telden geçen akım, manyetik alan oluşturur ve bu Ampere yasası olarak isimlendirilir. Ayrıca bobin etrafında zamana bağlı olarak değişen manyetik alan bobinde gerilim meydana getirir bu ise Eşitlik 3.1’ de gösterildiği gibi Faraday yasası olarak adlandırılır.

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi B}{dt} \quad (3.1)$$

Faraday yasasında yer alan (–) işareti ise Lenz Yasası’ndan gelmektedir. Lenz’e göre manyetik alanda ki değişimden ötürü indüklenen akım, kendisine zıt bir yönde manyetik alan oluşturacak şekilde hareket etmektedir.

Yapılan bu çalışmalar ile bir manyetik alanda üzerinden akım geçirilen iletken telin manyetik kuvvete maruz kaldığı keşfedilerek Şekil 3.4’te gösterildiği üzere yeni sağ el kuralı oluşturulmuştur.

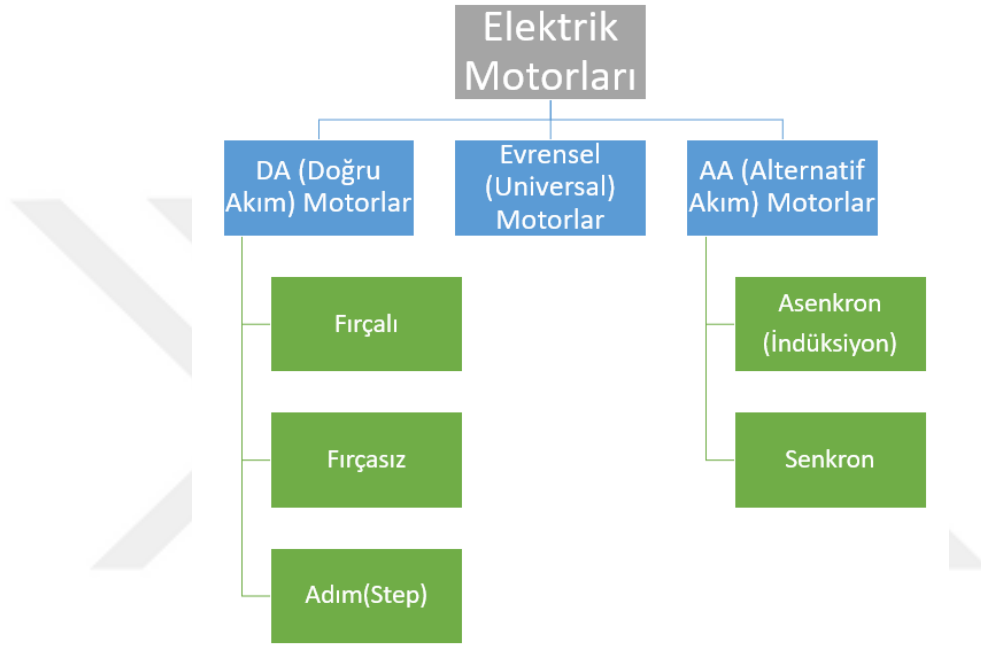


Şekil 3.4. Sağ el kuralı ile manyetik kuvvetin gösterimi (Gieras, 2017)

Elektrik motorlarındaki hareketin oluşması manyetik alan ve akımın sayesinde gerçekleşen manyetik kuvvet tarafından meydana gelmektedir. Sağ el kuralına göre manyetik alan, akım ve kuvvet ilişkisinden çıkarım yapılmak istenirse bu durumun generatörler için de manyetik kuvvet ve manyetik alan sayesinde akımın meydana geldiği söylenebilir. Sonuç olarak sistemsal ve yapısal olarak benzerlikler gösterdiğinden dolayı her elektrik motorunun bir generatör ve her generatörün bir elektrik motoru olduğunu dile getirebiliriz. Enerjinin dönüşümü göz önüne alındığında generatörler mekanik enerjiyi elektrik enerjisine, elektrik motorları ise elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürürler.

3.1.2. Elektrik motorlarının sınıflandırılması

Şekil 3.5’deki sınıflandırmaya göre elektrik makineleri AA ve DA olarak gerilim tipine göre ikiye ayrılmaktadır. Şekil 3.5’e göre elektrik makineleri kendi arasında da farklı özelliklere göre sınıflandırılmaktadır.



Şekil 3.5. Elektrik motorlarının sınıflandırılması (Yıldırım, 2015)

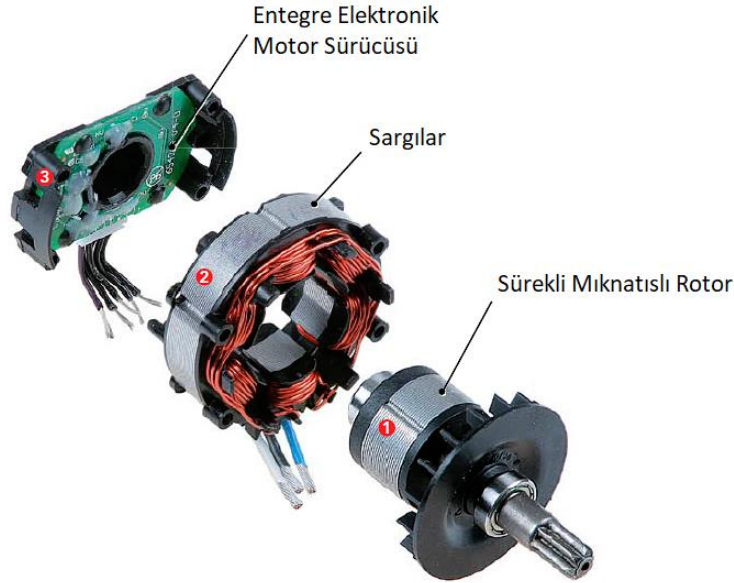
DA motorların avantajları incelendiğinde, hem geçici hem de kararlı durumda iyi bir performans göstermekte ve bu tip motorların kontrolü daha kolay gerçekleştirilmektedir. Ayrıca düşük hızlarda yüksek momentler elde edilebilir. DA motorların dezavantajlarına bakıldığında ise; verimlerinin düşük, bakım maliyetleri yüksek, fırçalar/kollektörlerinin çabuk yıpranması ve aşırı yük kapasitesinin zayıf olmasından dolayı sanayide asenkron motorlara yönelmelere sebep olmuştur (Kül, 2015).

AA motorlar kendi arasında asenkron ve senkron motorlar olarak ikiye ayrılır. Asenkron motorları adını çalışma hareketinden alan ve sanayide yoğun olarak kullanılan bir motor türüyken senkron motorlar ise stator yapıları asenkron motorlara benzeyen rotor yapısı farklı olan bir motor tipidir.

3.2. Fırçasız Doğru Akım Motoru (FDAM)

Akademik anlamda asenkron, senkron, üniversal ve da motorlar gibi klasik elektrik makinaları üzerine yapılan çalışmalar belli bir doygunluğa ulaştıktan sonra araştırmalar genelde özel elektrik makinalarına üzerine yoğunlaşmıştır. Özel elektrik makinalar kategorisine giren bir diğer makine modeli ise DA motorlar altında yer alan FDAM'dır.

Fırçasız bir motor, adından da anlaşılacağı gibi, rotor bobinlerine bağlantı için geleneksel DA motorlarda veya senkron AA makinelerde gerekli olduğu gibi fırçaları, bilezik veya mekanik kollektörleri olmayan bir motordur. Elektronik komütasyon ile çalışır. Modern FDAM yapısı, Şekil 3.6'da gösterilen sabit mıknatıslı senkron motor olarak bilinen AA motora çok benzerdir. Armatür sargıları statorun bir parçasıdır ve rotor bir çift veya daha fazla mıknatıstan oluşur. FDAM'da sargılar, çok fazlı bir AA motordakilere benzerdir ve en geleneksel ve verimli motor, bir dizi üç fazlı sargıya sahiptir ve iki kutuplu uyarma ile çalıştırılır (Kenjo ve ark., 1985).



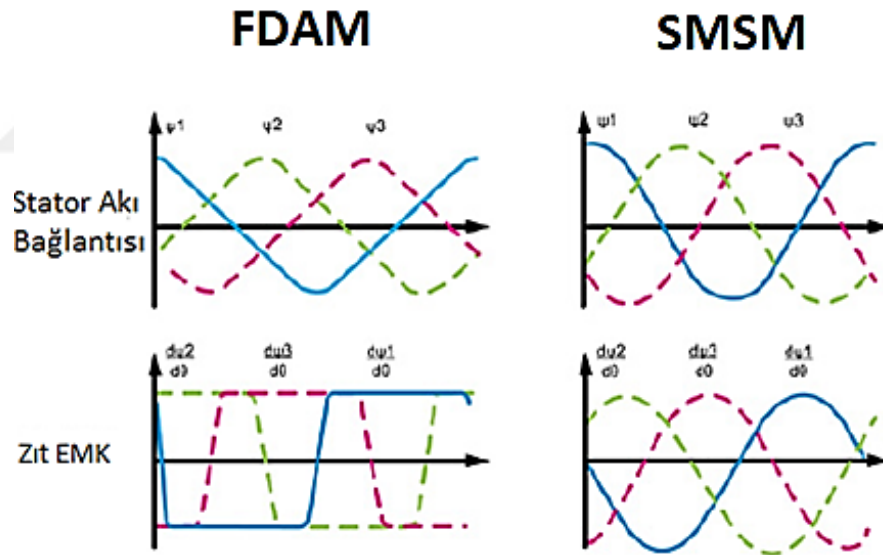
Şekil 3.6. FDAM'ın demonte görünümü (Anonim, 2018)

FDAM günümüzde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Bu motorlar yüksek verim, kontrol kolaylığı, yüksek moment ve düşük hacim gibi avantajlara sahip olsa da rotor

mıknatısları, harici güç elektroniği ve uygun çalışma için rotor konum bilgisi gerektirdiğinden motor tasarımından maliyeti artırmaktadır (Bal, 2006).

3.2.1. FDAM'ın sınıflandırılması

FDAM'ı indüklenen zıt elektromotor kuvveti (EMK) dalga şekline göre, FDAM veya Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) olarak sınıflandırılır. FDAM ve SMSM arasındaki temel farklar, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi zıt EMK dalga şekli ve stator akı dağılımlarıdır. SMSM için ideal EMK dalga şekli sinüzoidaldir, böylece sinüzoidal akımlarla etkileşim çok düşük bir tork dalgalanmasıyla beraber sabit tork üretir. Bununla birlikte, FDAM trapezoidal zıt EMK dalga şekillerine sahiptir ve bazı dalgalanmalarla torklar oluşturmuştur. Her ikisinin de statorda uyarma sargıları ve rotor üzerinde sürekli mıknatıslar vardır (Erdem, 2011).



Şekil 3.7. FDAM ve SMSM zıt EMK dalga formları (Erdem, 2011)

SMSM'de rotor üzerindeki mıknatısların manyetik alanı altında sinüzoidal akı değişimi yaratmak için stator sargıları hava boşluğu etrafında 120 derece açı farkı ile dağıtılır. Uyarma faz akımı, rotorun açisal konumu faz akımları ile senkronize olacak şekilde bir uyum içinde üretilir. Bu tip motorlarda sürüş, her biri bir faz için kullanılan üç akım ve konum algılama bileşenine sahip inverter yardımıyla sağlanır. Konum algılama daha fazla doğruluk gerektirdiğinde bile daha karmaşık hale gelir.

FDAM’da ise rotorun pozisyonu için sadece bir elektrik periyodunda komütasyonların algılanması ve nötr hatta sadece bir akım algılama elemanının yeterliliği, sürüşte dikkat çekici avantaj ve kolaylık sağlar. Bu aynı zamanda, çok hassas sensörlere ihtiyaç duyulmaması nedeniyle maliyeti de olumlu yönde etkileyecektir. Dahası, FDAM’ın yapıları nedeniyle kayıpları rotordan ziyade stator üzerinde olmaktadır. Isı daha kolay dağıtıldığı için bu bir avantaj haline gelir. Ayrıca SMSM motorlara kıyasla bazı dalgalanmalarla yüksek tork özelliklerine sahiptirler.

Sonuç itibarıyla, Trapezoidal tip dalga şekline sahip sürekli mıknatıslı motorlara fırçasız doğru akım motoru denir. FDAM’ın çalışma yapısı DA motorlara benzemekle beraber sadece fırça ve kolektör düzeneğinin sırasıyla sargılara enerji verme işlemi, elektronik sürücü devreler yardımı ile yapılmaktadır.

Sinüzoidal tip dalga şekline sahip sürekli mıknatıslı motorlar ise senkron motor olarak adlandırılırlar. Sinüzoidal gerilim üç faz sargılarına verilerek motor çalıştırılır. Ancak döner alanın ve rotor alanının birbirine kilitlenmesi gerekir. FDAM’a göre moment çıkışı daha düzgün olmakla beraber bu motor yapısı yüksek hızlarda çıkabilir.

Ayrıca FDAM ve SMSM arasındaki farkı daha iyi anlamak adına yapılan kıyaslama Çizelge 3.1’de verilmiştir (Erdem, 2011).

Çizelge 3.1. FDAM ve SMSM arasındaki farklar (Erdem, 2011)

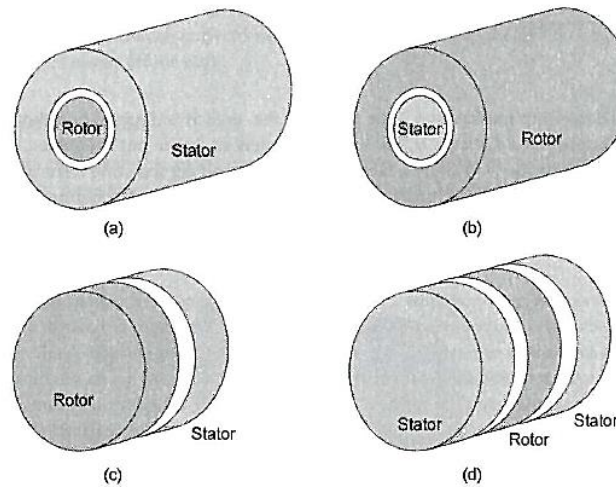
	FDAM	SMSM
Makine Tipi	Senkron makine	Senkron Makine
Besleme Voltajı	Doğru akım ile beslenir	Sinüzoidal akım ile beslenir
İndüklenen EMK	Trapezoidal zıt EMK	Sinüzoidal zıt EMK
Akı Varyasyonları	Her 60 derecede stator akı konumu değiştirme	Sürekli stator akı pozisyonu değişimi
Sürme Biçimi	Aynı anda sadece iki faz uyarılı	Aynı anda üç fazın uyarıtımı mümkün
Tork Çıkışı	Anahtarlamalarda tork dalgalanması var	Anahtarlamalarda tork dalgalanması azdır
Harmonikler	Duyulabilir aralıkta düşük dereceli akım harmonikleri var	Sinüzoidal uyarılıma nedeniyle harmonik daha az
Kayıplar	Harmonikler nedeniyle daha yüksek çekirdek kayıpları ve daha az anahtarlama kaybı	Aynı anahtarlama frekansında daha düşük çekirdek kaybı ve daha yüksek anahtarlama kayıpları
Kontrol	Kontrol algoritmaları nispeten basittir	Kontrol algoritmaları matematiksel olarak yoğundur

3.2.2. FDAM'ın yapısı

FDAM'ı kendi arasında gruplamak gerekirse performansı artırmak adına bugüne kadar farklı tasarımlar yapılmıştır. Bu da tasarımı yapılan motorlarda farklı yapı tipleri oluşmasına neden olmuştur. Çeşitli FDAM motor yapıları ise aşağıda görülmek üzere 3 ana gruba ayrılabilir,

- Radyal Akılı Motor
 - İçten Rotorlu
 - Dıştan Rotorlu
- Eksenel Akılı Motor
- Lineer Motor

En yaygın motor şekli, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi silindiriktir. Bu motor şekli ve diğerleri iki ana parça içerir. Hareketsiz veya sabit parçaya stator denir. Hareketli veya dönen parçaya rotor denir. Çoğu silindirik motorda rotor, Şekil 3.8.a'da gösterildiği gibi statorun içinde görünür. Bu yapı popülerdir, çünkü hareketsiz statoru dışarıya yerleştirmek, motoru çevresine takmayı kolaylaştırır. Ayrıca, rotoru statorun içine hapsedmek, hareketli rotoru çevresinden korumak için doğal bir kalkan sağlar. Diğer yapıları baktığımızda ise Şekil 3.8.b'de hareketsiz stator bu sefer iç kısımda rotor ise dış kısma yerleştirilmiştir. Geri kalan iki farklı yapı ise eksenel akılı motorlarda farklı rotor stator yapısını gösteren şekillerdir.



Şekil 3.8. En yaygın FDAM yapıları (Hanselman, 2003)

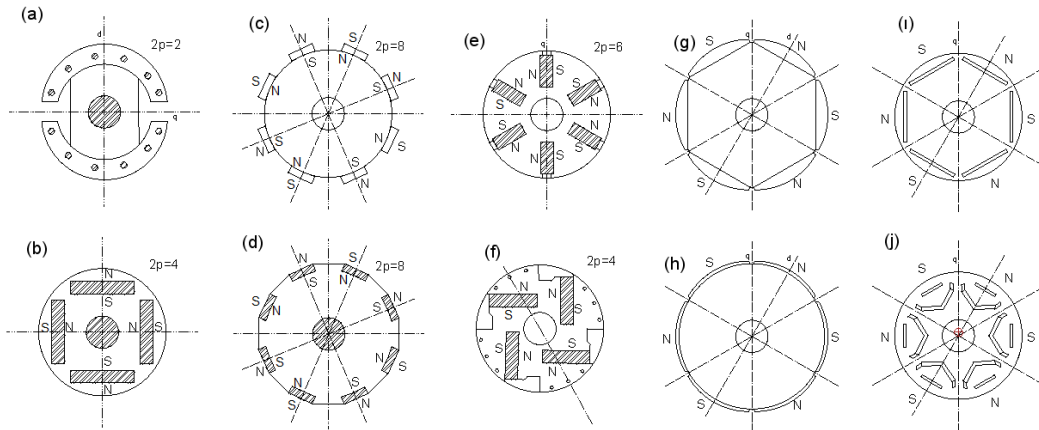
Radyal Akılı Motor

Radyal akılı motor yapısı elektrik makinelerinde geleneksel motor yapısı olarak isimlendirilmektedir. Elektrik makinelerinin ilk buluşundan günümüze kadar hakim olan motor türünden biridir. Silindirik bir motor yapısı ile beraber rotor yapısındaki farklılıklardan dolayı içten rotorlu ve dıştan rotorlu olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

İçten Rotorlu

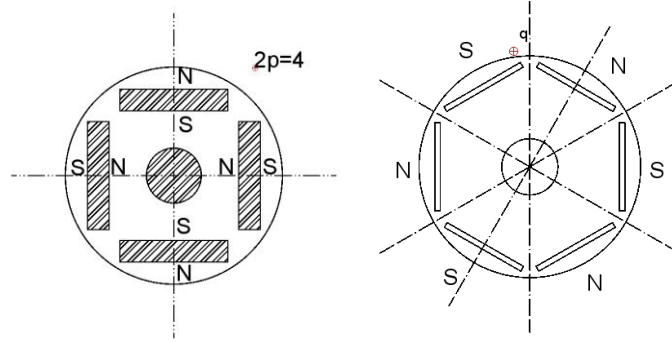
İçten rotorlu motorlarda rotorlar Şekil 3.10'da gösterildiği gibi statorun içinde görünür. Sargılar hareketsiz stator kısmına ve mıknatıslar dönen kısım olan rotora yerleştirilir. İç rotor yapısı genellikle çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Bu yapı, rotora doğal bir koruma sağlar ve motorun çevreye montajını kolaylaştırır. Dahası, dahili rotor motorları, sürücü işlevselliği açısından harici olanlardan daha uygundur. İç rotorlar düşük atalet momentine sahip olduğundan, bu tip motorlarda hızlı dönüş hızlarına ulaşmak ve hızlı yön değişimi daha kolaydır.

Literatürde çeşitli iç rotor yapıları mevcuttur. Şekil 3.9'da bunlardan sadece birkaçı gösterilmektedir. Her rotor ve mıknatıs yapısının hem avantajları hem de dezavantajları vardır. Yay şeklindeki mıknatısa sahip geleneksel rotor yapısı Şekil 3.9.a'da verilmiştir. Mıknatıs sinterleme yerine yapıştırma işlemi ile üretildiğinde Şekil 3.9.b'de gösterildiği gibi üretilir. Daha fazla akı konsantrasyonu isteniyorsa, çözelti Şekil 3.9.c'de gösterilen mıknatıs olabilir. Daha yüksek hızlı motor uygulamaları için, Şekil 3.9.d'deki rotor yapısı iyi bir alternatif olabilir, çünkü mıknatıslar rotorun içine gömülüdür, bu yüzden frenleri çok zorlaşır (Hanselman, 2003).



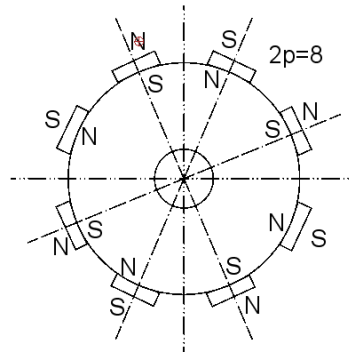
Şekil 3.9. İçten rotorlu motorlarda rotor çeşitleri (Gieras ve Wing, 2000)

İç Mıknatıslı Rotor; Şekil 3.10'da da görüldüğü üzere dikdörtgen mıknatıslar tamamen katı bir rotor yapısında olduğu için bu yapı yüksek hızlı çalışma için faydalıdır. İç sabit mıknatıslı rotorlar dikdörtgen mıknatısların kullanımını desteklerken, rotor yüzeyindeki ferromanyetik malzemenin varlığı hava boşluğu endüktansını önemli ölçüde artırır (Miller ve Hendershot, 1994).



Şekil 3.10. İç mıknatıslı rotor yapıları (Gieras ve Wing, 2000)

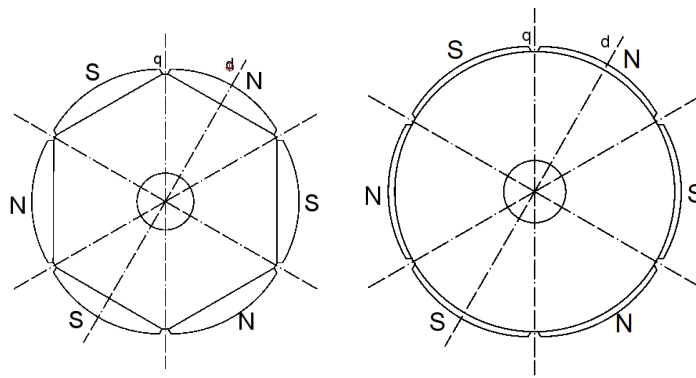
Yüzey Mıknatıslı Rotor; Şekil 3.11'de de görüldüğü üzere dikdörtgen mıknatısların kenarları radyal yerine paralel, tabanın ise düz olduğu rotor çeşididir. Yani rotor laminasyonu dış çevresinin yüzeyine monte edilmiş mıknatısları göstermektedir. Bu yapı rotor laminasyonlarının bir kısmı gibi başka herhangi bir ortamın kesilmesi olmadan doğrudan hava boşluğuna baktığı için en yüksek hava boşluğu ile akış yoğunluğunu sağlar. Bu tür bir yapının dezavantajları ise , rotor laminasyonlarına mıknatıslar tam olarak oturmadıkları için düşük yapısal bütünlük ve daha düşük mekanik sağlamlıktır. Bu yüzden bu yapının yüksek hızlarda çalıştırılması istenmez (Hanselman, 1994).



Şekil 3.11. Yüzey mıknatıslı rotor yapısı (Gieras ve Wing, 2000)

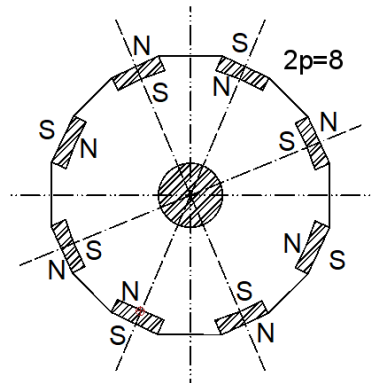
Yüzey Mıknatıslı Rotor; Oval mıknatısların kenarları radyal yerine paralel, tabanın ise düz olduğu rotor çeşididir. Yani rotor laminasyonu dış çevresinin yüzeyine monte edilmiş mıknatısları göstermektedir. Esas olarak imalat nedenleriyle ortaya çıkar. Bu şekiller, dikdörtgen bir mıknatıs malzemesi bloğuyla başlanarak kolayca oluşturulur.

Yüzey Mıknatıslı Rotor (Merkezden Uzaklaştırılmış Mıknatıslar); Şekil 3.12’de gösterilen oval mıknatısların kenarları paralel yerine radyaldır, tabanın ise oval olduğu rotor çeşididir (Miller, 1989).



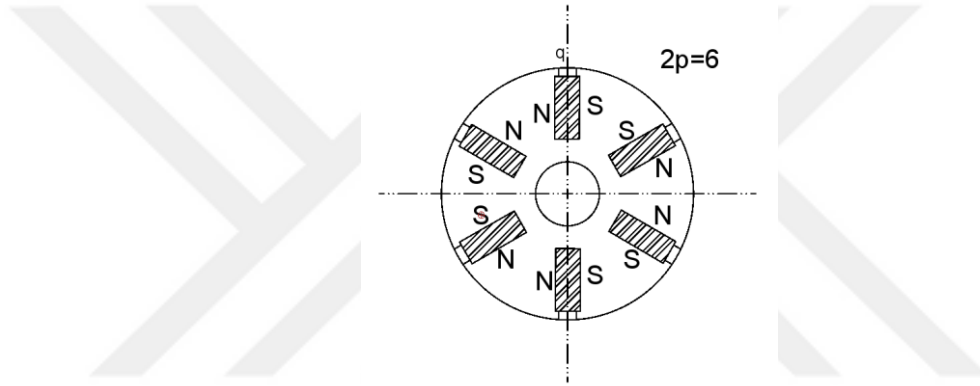
Şekil 3.12. Merkezden uzaklaştırılmış mıknatıslı rotor yapısı (Gieras ve Wing, 2000)

Yüzeye Gömülü Mıknatıslı Rotor; Şekil 3.13’te görülen bu yapı rotor laminasyonlarının dış çevresinin oluklarına yerleştirilen ve rotorun düzgün silindirik bir yüzeyini sağlayan mıknatısları gösterir. Bir önceki yapıya göre mekanik olarak yüzeye gömülü olması sağlamlığını arttırmaktadır.



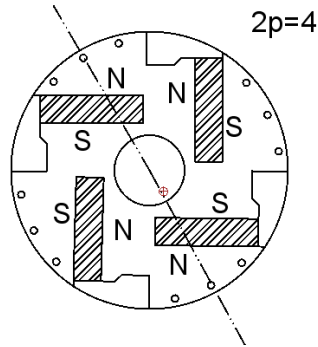
Şekil 3.13. Yüzeye gömülü mıknatıslı rotor yapısı (Gieras ve Wing, 2000)

Simetrik Olarak Dağıtılmış Gömülü Mıknatıslı Rotor (Spoke); Şekil 3.14'te görülen bu yapıda sırasıyla mıknatısların rotor laminasyonlarının ortasına radyal ve çevresel doğrultulardaki yerleşimini göstermektedir. Bu rotor yapısı mekanik olarak sağlamdır ve bu nedenle yüksek hızlı uygulamalar için uygundur. Bu düzenlemenin imalatı, yüzeye monte veya gömülü mıknatıs rotorlarından daha karmaşıktır. Bu konfigürasyon, ferrit mıknatıs için yüzey alanı rotor yüzey alanından daha büyük olduğu için akı konsantrasyonunu artırır. Bu rotor tipi, ferrit mıknatıs malzemesinden daha iyi performans elde etmek için yararlıdır ve dikdörtgen blok mıknatıslar ile kullanma avantajına sahiptir (Hanselman, 2003).



Şekil 3.14. Spoke tipi rotor yapısı (Gieras ve Wing, 2000)

Asimetrik Olarak Dağıtılmış Gömülü Mıknatıslı Rotor; Şekil 3.15'de SIEMENS'e atanan 1173178 sayılı Alman Patentine göre, Siemosyn olarak da adlandırılır. Mıknatıslar radyal olarak mıknatıslanır. Kafes sarımı sayesinde, motor kendiliğinden çalışır ve herhangi bir dönüştürücü olmadan doğrudan 50 Hz veya 60 Hz şebekesine takılabilir (Şebeke kalkışlı SMSM) (Hanselman, 1994).



Şekil 3.15. Asimetrik gömülü mıknatıslı rotor yapısı (Gieras ve Wing, 2000)

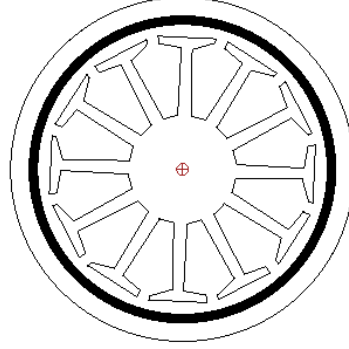
Şekil 3.16. Çift katmanlı iç mıknatıslı rotor yapısı



Motor ısısının çoğu rotorda üretildiğinden, onu dönen eleman yapmak ve statoru sabit tutmak, performans üzerinde çok önemli birkaç etkiye sahiptir:

- 19

- Motor verimliliği ve boyut / çıkış ilişkileri, endüksiyon tipi motorlardan daha iyidir.

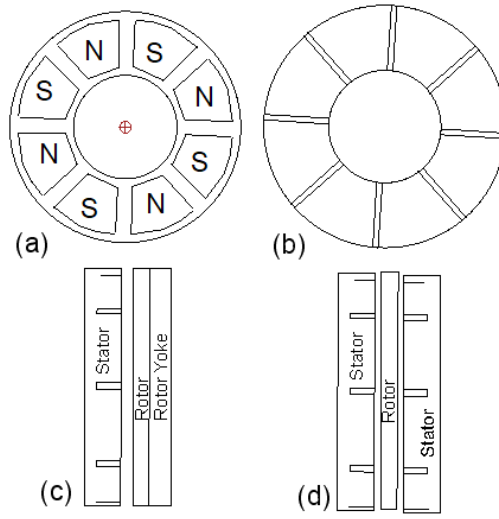


Şekil 3.17. Dıştan rotorlu motor yapısı (Hanselman, 1994)

Eksenel Akılı Motor

Eksenel akı motorlarının tarihi, ilk AA endüksiyon makinesinin icadıyla başlar. Michael Faraday, 1882 yılında eksenel akı yapısına sahip ilk ilkel makineyi geliştirmiştir. O zamandan beri motor teknolojilerinde sağlanan gelişmeler, eksenel akı motorlarının imalatında yaşanan zorluklar nedeniyle sektörü daha fazla radyal akı motorlarına yoğunlaşmaya itmektedir. Bu zorluklar şu şekilde sayılabilir. İlk olarak, stator yapısı, çevresel laminasyon nedeniyle yüksek maliyetli ve çok zaman alan bir üretim süreci gerektirir. Bu sorun, lamine levhaların zımbalama makinesi ile istiflenmesiyle kolayca çözülür. Eksenel akı motorunun bazı örnekleri Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

Dönme hareketi, sarımların ve manyetik alanın yönünün değiştirilmesi ile elde edilebilir. Radyal akı motorlarında, sargılar eksenel yön boyunca yönlendirilir ve akı radyal yönde akar. Düz görünüşleri nedeniyle, eksenel akı motorlarına gayri resmi olarak yassı motorlar denir. Eksenel akı motor paketi için, Şekil 3.18.d'de gösterilen konstrüksiyon, Şekil 3.18.a, b ve c'de gösterilenlere göre daha fazla avantaja sahiptir. Bunun nedeni, rotor üzerindeki mıknatısların her zaman dengesiz kuvvetlerle sonuçlanan hava boşluğunu azaltmaya çalışmasıdır (Hanselman, 1994).

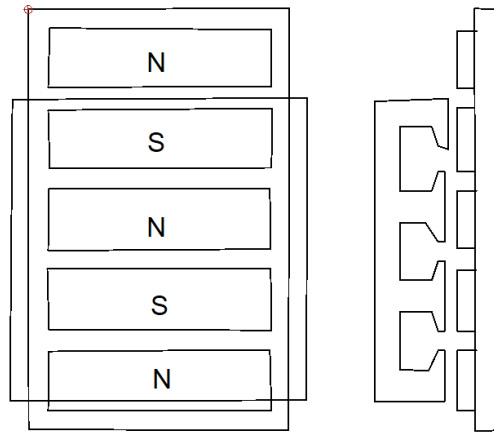


Şekil 3.18. Eksenel akılı motor yapıları (Hanselman, 1994)

Lineer Motor

Birçok uygulamada, istenen hareket dönme değil doğrusaldır. Bir iletim, dönme hareketini doğrusal harekete dönüştürmek için kullanılabilirken, geri tepme ve ataletin en aza indirilmesi gereken uygulamalarda, doğrudan doğrusal hareket oluşturulursa daha yüksek performans elde edilebilir.

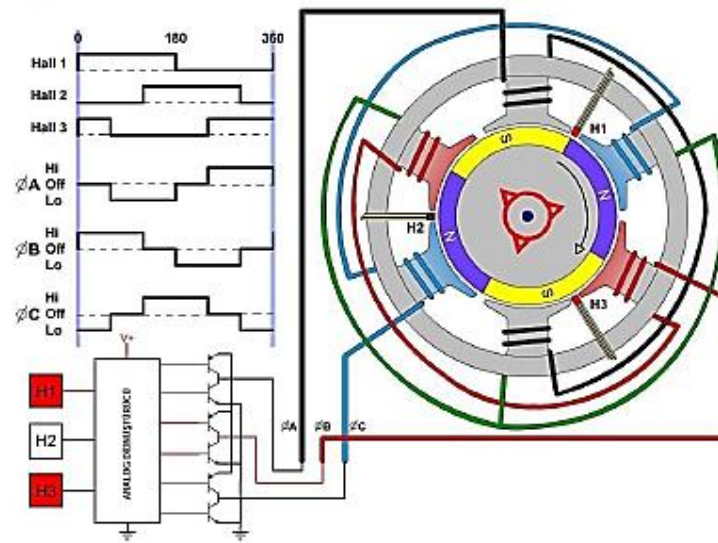
En basit lineer motor, Şekil 3.19’da gösterildiği gibi bobinler içeren dişli bir bölüm ile alternatif polarite mıknatıslarının tekrarlayan bir dizisiyle eşleşir. Bu konfigürasyon yüksek kuvvet yoğunluğuna sahiptir, ancak doğal olarak çok yüksek çekici kuvvet gösterir (Hanselman, 1994).



Şekil 3.19. Lineer motor yapısı (Hanselman, 1994)

3.2.3. FDAM çalışma prensibi

Bir FDAM nasıl çalıştığını açıklamak için, üç fazlı FDAM daha genel kurallar içerdiğinden, tek fazlı olanlar yerine üç fazlı yapıların kullanılması daha anlaşılırdır. FDAM'ın çalışma prensibi açısından üç faz ve tek faz arasındaki fark, üç fazda yalnızca faz ve bileşenlerin üç katına çıkarılmasıdır. Üç fazlı bir FDAM klasik asenkron motorlar gibi direkt olarak güç kaynağına bağlanarak çalışmazlar. Bundan dolayı Şekil 3.20'de gösterildiği gibi bir sürücü sistemine ihtiyaç duymaktadır. Motorun dönmesini sağlamak için bobinlere önceden tanımlanmış sırayla enerji verilir, bu da motorun bir yönde, örneğin saat yönünde dönmesini sağlar. Motor, sıralamayı ters sırada çalıştırarak ters yönde çalışır. Sıranın, bobinlerdeki akım akışının yönünü ve dolayısıyla bireysel bobinler tarafından üretilen manyetik alanı tanımladığı anlaşılmalıdır. Akımın yönü, bobin tarafından üretilen manyetik alanın yönünü belirler. Manyetik alan, rotorun sürekli mıknatıslarını çeker ve iter. Bobinlerdeki akım akışını ve dolayısıyla manyetik alanların polaritesini doğru anda - ve doğru sırada - değiştirerek, motor döner. Rotoru döndürmek için bobinlerden geçen akım akışının değişmesi, komütasyon olarak adlandırılır. Üç fazlı bir FDAM'ın altı komütasyon durumu vardır. Komütasyon dizisindeki altı durumun tümü gerçekleştirildiğinde, dönüşe devam etmek için dizi tekrarlanır. Sıra, tam bir elektriksel dönüşü temsil eder (Erdem, 2011).



Şekil 3.20. FDAM'ın çalışma prensibi (Anonim, 2020)

FDAM için, komütasyon kontrolü elektronik tarafından yapılır. Komütasyonu kontrol etmenin en basit yolu, motorun içindeki bir dizi konum sensöründen gelen çıktılara göre komütasyon yapmaktır. Genellikle Hall sensörleri kullanılır. Hall sensörleri, komütasyonun değiştirilmesi gerektiğinde çıkışlarını değiştirir. İlerleyen bölümlerde FDAM’da kullanılan sensör tiplerine değinilecektir.

3.2.4. FDAM’da kullanılan mıknatıs tipleri

FDAM’da kullanılan mıknatıs tipleri dört ana sınıfa ayrılır;

- Neodyum (NdFeB veya NIB)
- Samaryum Kobalt (SmCo)
- Alnico
- Seramik veya Ferrit

Erdem (2011)’in yapmış olduğu çalışmada mıknatıslar hakkında bilgi veren ortak terimler ise aşağıda detaylarıyla açıklanmıştır.

Br: Mıknatısın üretebileceği maksimum akı olan Gauss (Tesla) cinsinden artık manyetik akı yoğunluğunun ölçüsüdür.

H_c: Oersted'deki (A / m) zorlayıcı manyetik alan gücünün ölçüsü veya mıknatısın bir dış alan tarafından manyetikliğini kaybettiği noktadır.

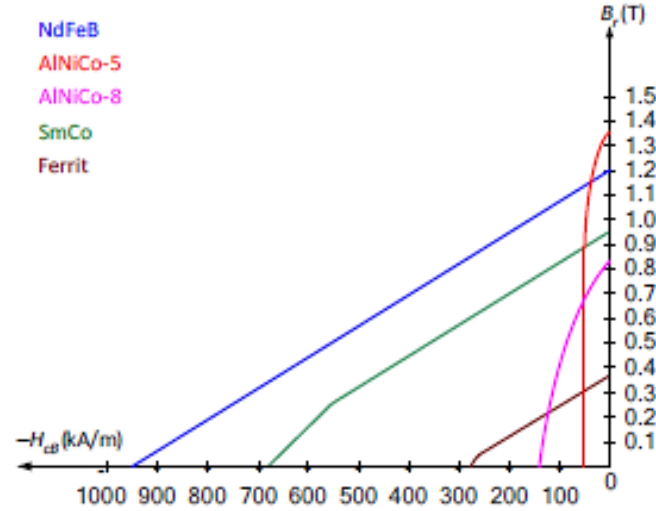
BH_{max}: Genel enerji yoğunluğunun bir terimidir. Sayı ne kadar yüksekse, mıknatıs o kadar güçlüdür.

B_r T katsayısı: Santigrat derece başına % cinsinden B_r sıcaklık katsayısıdır. Bu size manyetik akının sıcaklığa göre nasıl değiştiğini söyler. -0.20, sıcaklık 100 °C artarsa manyetik akısının % 20 azalacağı anlamına gelir.

T_{max}: Mıknatısın çalıştırılması gereken maksimum sıcaklıktır. Sıcaklık bu değerin altına düştükten sonra, o sıcaklığa ulaşmadan önceki gibi davranmaya devam edecektir (°C).

T_{curie}: Mıknatısın manyetikliğini kaybettiği Curie sıcaklığıdır. Sıcaklık bu değerin üstüne çıktıktan sonra, o sıcaklığa ulaşmadan önceki gibi davranmayacaktır. Eğer mıknatıs T_{max} ve T_{curie} arasında iyileştirilirse, tam olarak olmasa da bir şekilde iyileşir (°C)

Aşağıda günümüzde kullanılmakta olan belli başlı mıknatıs malzemelere ilişkin tipik değerler Şekil 3.21'de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Çeşitli mıknatıslara ait mıknatıslığı yok etme karakteristikleri (Özçira, 2013)

Neodyum Mıknatıs (NdFeB - NIB)

Neodyum mıknatıs (ayrıca NdFeB, NIB veya Neo mıknatıs olarak da bilinir), en yaygın kullanılan nadir toprak mıknatısı türü, $Nd_2 Fe_{12} B$ tetragonal kristalini oluşturmak için neodyum, demir ve bor alaşımından yapılmış sürekli bir mıknatıstır. 1982 yılında "General Motors" ve "Surritomo Special Metals" tarafından geliştirilen neodyum mıknatıslar, yapılan en güçlü mıknatıs türüdür ve manyetikliğini gidermeleri zordur.

Bu mıknatıslar daha yüksek bir manyetik güce sahiptir, ancak kolayca oksitlenir ve düşük sıcaklık direncine sahiptir. Korozyon direncini artırmak için yüzey işleme geliştirilmiştir.

Samaryum Kobalt (SmCo)

1970'lerde geliştirilen samaryum kobalt mıknatısı, samaryum ve kobalt alaşımından yapılmış bir tür koruyucu toprak mıknatısıdır. Genellikle üretilen ikinci en güçlü mıknatıs çeşididir. Neodyum mıknatıslardan daha az güçlüdürler, ancak daha yüksek sıcaklık derecelerine sahiptirler. Kırılgandırlar ve çatlama ve ufalanmaya eğilimlidirler. Samaryum-Kobalt mıknatısları, 16 MegaGauss-Oersted (MGOe) ile 32 MGOe arasında değişen maksimum enerji ürünlerine (BHmax) sahiptirler.

Alnico

Alnico mıknatıslar, mıknatısın özelliklerini geliştirmek için az miktarda başka elementler eklenmiş alüminyum, nikel ve kobalttan oluşan bir kompozitten yapılmıştır. 1970'lerde nadir toprak mıknatıslarının geliştirilmesinden önce, bunlar en güçlü mıknatıs tipiydi. Bu ailedeki alaşımların diğer ticari isimleri Alni, Alcomax, Hycomax, Columax ve Ticonal'dır. Alnico alaşımlarının bileşimi tipik olarak % 8-12 Al, % 15-26 Ni, % 5-24 Co, % 6'ya kadar Cu, % 1'e kadar Ti'dir ve denge Fe'dir.

Alnico mıknatıslar, kutuplarında 1500 Gauss (0,15 Tesla) veya Dünya'nın manyetik alanının gücünün yaklaşık 3000 katı kadar yüksek manyetik alan kuvveti üretir. Bazı alnico markaları izotropiktir ve kendi yönünde verimli bir şekilde mıknatıslanabilir. Alnico 5 ve alnico 8 gibi diğer tipler anizotropiktir ve her biri tercih edilen bir mıknatıslanma yönüne veya yönelimine sahiptir. Anizotropik alaşımlar genellikle izotropik tipte tercih edilen bir yönelimde daha büyük manyetik kapasiteye sahiptir. Alnico'nun remanansı (B_r) 12000 G'yi (1,2 T) aşabilir, zorlayıcılığı (H_c) 1000 Oersted'e (80 k A / m) kadar çıkabilir, enerji ürünü (BH_{max}) 5,5 MGOe'ye (44 TA / m) kadar çıkabilir. Bu alnico mıknatısın kapalı manyetik devrelerde güçlü bir manyetik akı üretebileceği, ancak manyetikleşmeye karşı nispeten küçük bir dirence sahip olduğu anlamına gelir.

Alnico alaşımları, maksimum çalışma sıcaklığı normalde yaklaşık 538 °C ile sınırlı olmasına rağmen, 800 °C civarında herhangi bir manyetik malzemenin en yüksek Curie sıcaklıklarından bazılarına sahiptir.

Alnico mıknatıslar, döküm ve sinterleme işlemleri ile üretilmektedir. Sinterleme üstün mekanik özellikler sunarken, döküm daha yüksek enerjili ürünler (5.5 MGOe'ye kadar) sağlar ve karmaşık şekillerin tasarımına izin verir.

Ferrit

Ferrit olarak da bilinen seramik mıknatıslar, demir oksit ve baryum veya stronsiyum karbonat kompozitinden yapılır. Bu malzemeler kolaylıkla temin edilebilir ve daha düşük maliyet nedeniyle istenirse sürekli mıknatıs yapımında kullanılan diğer malzeme türlerinden daha düşük maliyetlidir. Seramik mıknatıslar presleme ve sinterleme

kullanılarak yapılır. Bu mıknatıslar kırılmandır ve taşlama gerekiyorsa elmas diskler gerektirir. Bu mıknatıslar da farklı derecelerde yapılır. Seramik -1, tüm yönlerde eşit manyetik özelliklere sahip izotropik bir kalitedir. Seramik sınıfları 5 ve 8 anizotropik kalitelerdir. Anizotropik mıknatıslar, baskı yönünde mıknatıslanır. Anizotropik yöntem, 3,5 MGOe'ye varan değerlerde seramik mıknatıslar arasında en yüksek enerji ürününü sağlar. Seramik mıknatıslar iyi bir manyetik güç dengesine, manyetikliği gidermeye karşı direnç ve ekonomikliğe sahiptir. Günümüzde en çok kullanılan mıknatıslardır.

Ferritler ayrıca manyetik özelliklere göre yumuşak ve sert ferritler olabilir:

Yumuşak Ferritler: Transformatörlerde veya elektromanyetik kütlemelerde kullanılan ferritler nikel, çinko ve / veya manganez bileşiklerini içerir. Düşük bir zorlayıcılığa sahiptirler ve "yumuşak ferritler" olarak adlandırılırlar. Düşük zorlayıcılık, malzemenin manyetizasyonunun çok fazla enerji dağıtmadan (histerezis kayıpları) yönü kolayca tersine çevirebileceği anlamına gelirken, malzemenin yüksek direnci çekirdekte girdap akımları sunar.

Sert Ferritler: Bunun tersine, sürekli ferrit mıknatıslar, mıknatıslamadan sonra yüksek bir zorlayıcılığa ve yüksek kalıntıya sahip olan sert ferritlerden yapılır. Bunlar demir ve baryum veya stronsiyum oksitten oluşur. Ayrıca manyetik akıyı iyi iletirler ve yüksek manyetik geçirgenliğe sahiptirler. Bu, sözde seramik mıknatıslar demirinden daha güçlü manyetik alana sahiptirler. Ucuzdurlar ve buzdolabı mıknatısları gibi ev ürünlerinde yaygın olarak kullanılırlar. Maksimum manyetik alan yaklaşık 0,35 Tesla'dır ve manyetik alan gücü H yaklaşık 30 ila 60 kA / m'dir.

3.2.5. FDAM'da kullanılan sensör tipleri

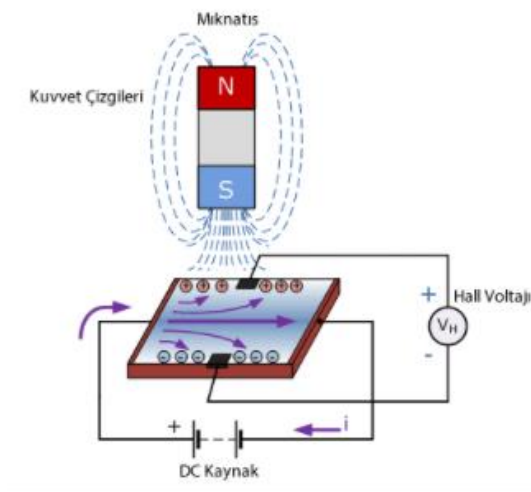
FDAM, bir seferde hangi sargıya enerji verilmesi gerektiğini belirlemek için rotor konumunu algılaması gerekir. Bu soruna çözüm getirmek için ağırlıklı olarak sensörlü veya sensörsüz seçenekler gibi iki alternatif sunulmaktadır. Mikroelektronik ve entegre devrelerde gelişmeler sağlandığı için sensörsüz çözümlerin önemi azalmaya başlıyor. Küçük sensörlerin bile günümüz teknolojisiyle daha düşük maliyetle üretilmesi mümkündür. Motor yapısının içine sensör yerleştirmenin imkansız olduğu durumlarda sensörsüz çözümler alternatif olur. Sensörlü çözümlerde rotor konumunun tespiti hall

etkili sensörleri, kodlayıcılar ve çözücüler gibi konum sensörleri ile sağlanır. Her sensörün kendi avantajları ve dezavantajları vardır. Doğrusallık, hassasiyet, boyut, giriş / çıkış sinyallerinin türü gibi bazı faktörler, istenen uygulamalar için hangi sensörün uygun olduğunun seçiminde baskın hale gelir. Aşağıdaki satırlarda, Erdem (2011)'in çalışmasında da bahsettiği üzere yaygın olarak kullanılan üç konum sensörü kısaca açıklanacaktır.

Hall-Etkili Sensör

Dr. Edwin Hall, 1879'da doktora için çalışırken hall etkisini keşfetti. Deneyler başarılıydı, ancak 70 yıldan fazla bir süredir teorik fizik alanı dışında hiçbir uygulama bulunamadı. Bununla birlikte, 1950'lerde yarı iletken malzemelerin ortaya çıkmasıyla, hall etkisi teorisinin kullanıldığı uygulamalar yaygınlaştı. Bir süre sonra, hall etkisi teorisinin, düşük maliyetle seri üretimde üretilmesi daha kolay olan katı hal paketinde uygulanması mümkün hale geldi.

Hall etkisi sensörünün teorisi, yarı iletken bir tabaka malzemeden geçen bir akımın harici olarak uygulanan manyetik alanla etkileşimine dayanmaktadır. Hall eleman manyetik alana maruz kaldığında, üniform olarak geçen akım Lorentz kuvveti tarafından bozulur. Bu etkileşim nedeniyle çıkışın terminalinde bir gerilim indüklenir. Bu çalışma prensibi Şekil 3.22'de gösterilmektedir.



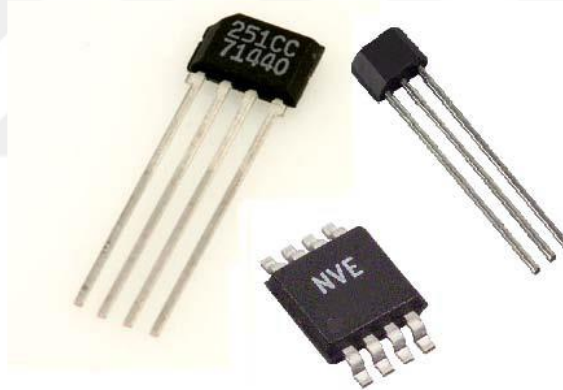
Şekil 3.22. Hall etkili sensör çalışma prensibi (Anonim, 2015)

Hall Etkili sensörler dijital veya lineer çıkış verebilirler. Lineer sensörler sensör önündeki manyetik alana bağlı olarak çıkış voltajı üretirler. V_h Hall Voltajı aşağıda yer alan Eşitlik 3.2 ile ifade edilir.

$$V_h = R_h \left(\frac{I_x B}{t h c} \right) \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte V_h Hall Voltajını, R_h hall-etkisi katsayısını, I sensörden geçen akımı, $t h c$ sensör kalınlığını ve B ise manyetik akı yoğunluğunu ifade etmektedir. Analog veya lineer sensörler manyetik alana şiddetine göre artan ve azalan sürekli çıkış voltajı verir.

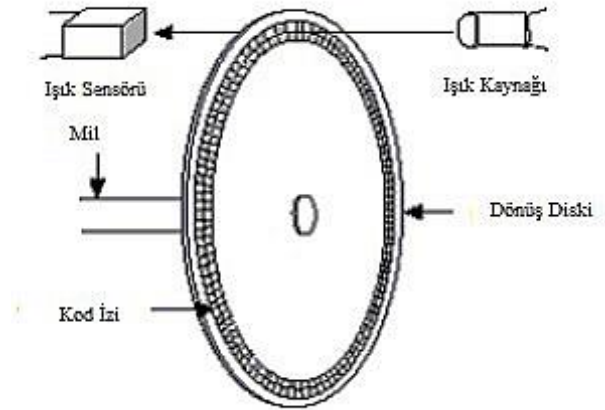
Dijital sensörler ise bipolar ve unipolar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bipolar sensörlerin çalışması için pozitif bir manyetik alana S kutbuna, S kutbunun etkisini ortadan kaldırmak için ise N kutbuna ihtiyaç duymaktadır. Unipolar sensörde ise bu durum tam tersidir. Şekil 3.23’de farklı hall etkili sensörler görülmektedir.



Şekil 3.23. Çeşitli hall-etkili sensörler

Enkoder

Enkoderler, doğrusal veya döner yer değiştirmeyi dijital veya darbe sinyallerine dönüştüren elektromekanik bir cihazdır. En popüler enkoder türü, dönen bir disk, bir ışık kaynağı ve bir foto dedektörden (ışık sensörü) oluşan optik enkoderdir. Dönen şaft üzerine monte edilen disk, elektronik olarak diske kodlanmış opak ve şeffaf sektörlere sahiptir. Disk döndükçe, bu modeller fotoğraf dedektörüne yayılan ışığı keserek bir dijital veya pals sinyal çıkışı oluşturur. En basit hali ile bir enkoderin genel yapısı Şekil 3.24’te gösterilmektedir.



Şekil 3.24. Enkoderlerin genel yapısı

Artımlı bir enkoder, dönüşündeki her artımlı adım için bir darbe üretir. Artımlı enkoder mutlak pozisyon vermemesine rağmen, kabul edilebilir bir fiyata yüksek çözünürlük sağlayabilir. Örneğin, takometre kodlayıcı olarak adlandırılan tek bir kod izine sahip artımlı bir kodlayıcı, frekansı yer değiştirmenin hızını gösteren bir darbe sinyali üretir. Bununla birlikte, tek-kanal kodlayıcı yönü göstermiyor. Yön, iki kanallı veya karesel bir kodlayıcı belirlemek için iki dedektör ve iki kod izi kullanır.

Enkoderler, yüksek çözünürlükleri (26 bit tek dönüş kadar), mükemmel açısal doğruluğu, zorlu ortamlarda çalışması ve yüksek güvenilirliği nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tek sınırlayıcı koşullar yüksek maliyetleri ve düşük mekanik dayanımlarıdır. Şekil 3.25’de tipik bir uygulama örneği olarak enkoderli FDAM görülmektedir.



Şekil 3.25. Bir enkoderin FDAM'da uygulanması

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde tasarımı yapılacak olan FDAM'ın kriterleri belirlenecek ve bu belirlenen parametreler ile beraber yüksek tork oranına sahip redüktörsüz spoke tipi elektrik motorunun tasarımı yapılacaktır.

FDAM motoru tasarımı için ANSYS Maxwell programı kullanılacak ve program ile beraber detaylar incelenecektir. Elde edilen bilgiler ışığında spoke tipi rotora sahip model oluşturulacaktır. Sonlu elemanlar yöntemi ve analizler ile beraber motor tasarımı tamamlanacaktır. Motor tasarımı sonrası prototip üretim adına yapılan çalışmalar detayları ile aktarılacaktır. Prototip üretimi yapılan FDAM'ın testlerinin yapılması adına bir test fikstürü tasarlanacak ve test aşamasına geçilecektir.

4.1. FDAM'ın Matematiksel Modellenmesi

Bu bölümde, FDAM'ın matematiksel bir modeli geliştirilmiştir. Bu matematiksel model, kutup sayısı, sarım şekli, rotor şekli ve elektronik anahtarlardan bağımsızdır. Modelde motorun doymamış alanda çalıştığı ve elektronik anahtarların ideal olduğu düşünülmektedir. Sistem modeli 4. mertebedir ve değişkenler üç fazlı akımlar ve motor hızıdır. Rotor konumuna bağlı olarak, her rotor konumu için diferansiyel denklemler elde edilir.

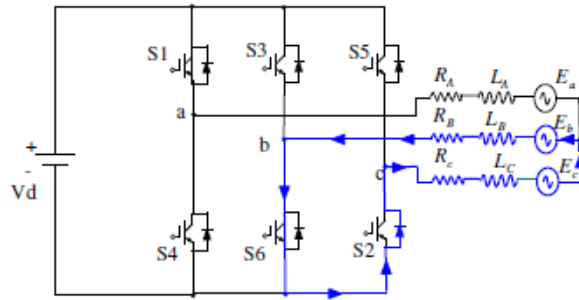
Matematiksel modeli geliştirmek için her rotor konumu için komütasyon ve iletim diferansiyel denklemleri elde edilir. Komütasyon ve iletim eşdeğer devresini tanımlarken, sistemin matematiksel modeli için diferansiyel denklemler türetilmiştir. Eşitlik 3.9 ve 3.82 arasında matematik model için yer alan diferansiyel denklemler görülmektedir.

Çizelge 3.2'de, bir elektrik dönüşü için rotor konumuna göre komütasyon aralıkları verilmiştir.

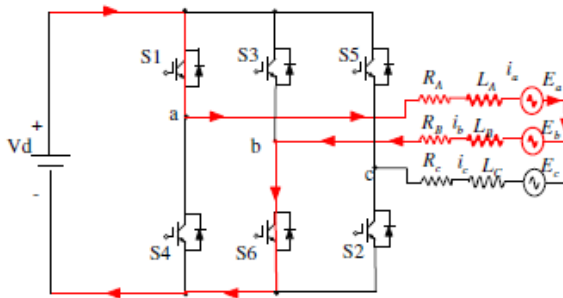
Çizelge 3.2. Rotor pozisyonuna bağlı değişim aralıkları

Rotor Pozisyon	İletimdeki Anahtar Çifti	Eşitlik Numarası
$\frac{\pi}{6} < \theta_e < \frac{\pi}{2}$	S1-S6	(3.3)
$\frac{\pi}{2} < \theta_e < \frac{5\pi}{6}$	S1-S2	(3.4)
$\frac{5\pi}{6} < \theta_e < \frac{7\pi}{2}$	S3-S2	(3.5)
$\frac{7\pi}{6} < \theta_e < \frac{3\pi}{2}$	S1-S6	(3.6)
$\frac{3\pi}{2} < \theta_e < \frac{11\pi}{6}$	S3-S4	(3.7)
$\frac{11\pi}{6} < \theta_e < \frac{\pi}{6}$	S5-S4	(3.8)

Burada S5-S6 iletim adımından S1-S6 adımına geçiş, sistemin matematiksel modelini geliştirmek adına analiz edilecektir. Rotor $\frac{\pi}{6} < \theta_e < \frac{\pi}{2}$ aralığında konumlandırıldığında sırasıyla iletim (kırmızı ok) ve komütasyon (mavi ok) zamanlarını göstermektedir. Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’de görüldüğü gibi C fazının iletimi tamamlandıktan sonra A fazı iletimi başlatılır. Bu rotor konumundaki komütasyon devresi, C fazı akım eşdeğer devresinin kapatılmasına karşılık gelir. Bu eşdeğer devre, C fazı akımı sıfır olana kadar geçerlidir.



Şekil 3.26. $\frac{\pi}{6} < \theta_e < \frac{\pi}{2}$ aralığı için iletim eşdeğer devresi



Şekil 3.27. $\frac{\pi}{6} < \theta_e < \frac{\pi}{2}$ aralığı için iletim eşdeğer devresi

$$i_a + i_b + i_c = 0, R = R_A = R_B = R_C, L = L_A = L_B = L_C \quad (3.9)$$

$$0 = Ri_c + (L + M_e) \frac{di_c}{dt} + E_c - E_b - Ri_b - (L + M_e) \frac{di_b}{dt} \quad (3.10)$$

$$V_d = Ri_a + (L + M_e) \frac{di_a}{dt} + E_a - E_b - Ri_b - (L + M_e) \frac{di_b}{dt} \quad (3.11)$$

Eşitlik 3.9'dan, Eşitlik 3.10'daki C faz akımının yeri değiştirilerek,

$$\frac{di_a}{dt} = -2 \frac{di_b}{dt} - \frac{1}{(L + M_e)} [2Ri_b + Ri_a - E_c + E_b] \quad (3.12)$$

elde edilir. A faz akımının türevsel ifadesi için Eşitlik 3.11 değiştirilerek,

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [-V_d - 3Ri_b + E_a + E_c - 2E_b] \quad (3.13)$$

elde edilir. Bu denklem, B faz akımının türevsel ifadesi Eşitlik 3.12 değiştirilerek,

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [2V_d - 3Ri_a + E_b + E_c - 2E_a] \quad (3.14)$$

elde edilir. Yıldız düğüm noktası denkleminde,

$$\frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt} + \frac{di_c}{dt} = 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [-V_d - 3Ri_c + E_a + E_b - 2E_c] \quad (3.16)$$

C faz akımının türevsel ifadesi elde edilir.

C faz akımı sıfır olduktan sonra, Şekil 3.26 eşdeğer devresi geçerli olacaktır. S1-S6 anahtarlarının iletimi sırasında C faz akımı sıfır olduğundan yıldız düğüm noktası Eşitlik 3.17 ile ifade edilir.

$$i_a + i_b = 0 \quad (3.17)$$

Şekil 3.27 eşdeğer devresine bakıldığı zaman, eğer A faz akımı B faz akımına bağlı olarak yazılırsa,

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{2(L + M_e)} [-V_d - 2Ri_b + E_a - E_b] \quad (3.18)$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{2(L + M_e)} [V_d - 2Ri_a + E_b - E_a] \quad (3.19)$$

eşitlikleri elde edilir. 3.18 ve 3.19 eşitlikleri FDAM sisteminin $\frac{\pi}{6} < \theta_e < \frac{\pi}{2}$ elektriksel rotor pozisyonu aralığı için faz akım denklemleri olarak tanımlanır.

Sistemin matematiksel modelini tamamlamak için mekanik taraf için diferansiyel denklemlerin yazılması gerekmektedir. Mekanik diferansiyel denklemler tüm iletim adımları için aynıdır ve aşağıdaki şekilde verilmiştir,

$$M_m - M_y = \frac{d\omega}{dt} + B_\omega \quad (3.20)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{(J_m - J_y)} [M_m - M_y - (B_m - B_y)]\omega \quad (3.21)$$

FDAM anlık tork değeri Eşitlik 3.22 ile ifade edilmiştir.

$$M(t) = k_a i_a + k_b i_b + k_c i_c \quad (3.22)$$

Diğer iletim adımları için elektriksel ve mekanik denklemler aynı yöntem kullanılarak elde edilebilir.

$\frac{\pi}{2} < \theta_e < \frac{5\pi}{6}$ rotor pozisyonu aralığı için komütasyon denklemleri,

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [V_d - 3Ri_a + \omega(k_b + k_c - 2k_a)] \quad (3.23)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [V_d - 3Ri_b + \omega(k_a + k_c - 2k_b)] \quad (3.24)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [-2V_d - 3Ri_c + \omega(k_a + k_b - 2k_c)] \quad (3.25)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [k_a i_a + k_b i_b + k_c i_c - M_y] \quad (3.26)$$

$\frac{\pi}{2} < \theta_e < \frac{5\pi}{6}$ rotor pozisyonu aralığı için iletim denklemleri,

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{2(L + M_e)} [V_d - 2Ri_a + \omega(k_c - k_a)] \quad (3.27)$$

$$i_b = 0 \quad (3.28)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{2(L + M_e)} [-V_d - 2Ri_c + \omega(k_a - k_c)] \quad (3.29)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [k_a i_a + k_c i_c - M_y] \quad (3.30)$$

$\frac{5\pi}{6} < \theta_e < \frac{7\pi}{6}$ rotor pozisyonu aralığı için komütasyon denklemleri,

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [-V_d - 3Ri_a + \omega(k_b + k_c - 2k_a)] \quad (3.31)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [2V_d - 3Ri_b + \omega(k_a + k_c - 2k_b)] \quad (3.32)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [-V_d - 3Ri_c + \omega(k_a + k_b - 2k_c)] \quad (3.33)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [k_a i_a + k_b i_b + k_c i_c - M_y] \quad (3.34)$$

$\frac{5\pi}{6} < \theta_e < \frac{7\pi}{6}$ rotor pozisyonu aralığı için iletim denklemleri,

$$i_a = 0 \quad (3.35)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{2(L + M_e)} [V_d - 2Ri_b + \omega(k_c - k_b)] \quad (3.36)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{2(L + M_e)} [-V_d - 2Ri_c + \omega(k_b - k_c)] \quad (3.37)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [k_b i_b + k_c i_c - M_y] \quad (3.38)$$

$\frac{5\pi}{6} < \theta_e < \frac{3\pi}{2}$ rotor pozisyonu aralığı için komütasyon denklemleri,

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [-2V_d - 3Ri_a + \omega(k_b + k_c - 2k_a)] \quad (3.39)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [V_d - 3Ri_b + \omega(k_a + k_c - 2k_b)] \quad (3.40)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [V_d - 3Ri_c + \omega(k_a + k_b - 2k_c)] \quad (3.41)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [k_a i_a + k_b i_b + k_c i_c - M_y] \quad (3.42)$$

$\frac{5\pi}{6} < \theta_e < \frac{7\pi}{6}$ rotor pozisyonu aralığı için iletim denklemleri,

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{2(L + M_e)} [-V_d - 2Ri_a + \omega(k_b - k_a)] \quad (3.43)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{2(L + M_e)} [V_d - 2Ri_b + \omega(k_a - k_b)] \quad (3.44)$$

$$i_c = 0 \quad (3.45)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [k_a i_a + k_b i_b - M_y] \quad (3.46)$$

$\frac{3\pi}{2} < \theta_e < \frac{11\pi}{6}$ rotor pozisyonu aralığı için komütasyon denklemleri,

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [-V_d - 3Ri_a + \omega(k_b + k_c - 2k_a)] \quad (3.47)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [-V_d - 3Ri_b + \omega(k_a + k_c - 2k_b)] \quad (3.48)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [2V_d - 3Ri_c + \omega(k_a + k_b - 2k_c)] \quad (3.49)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [k_a i_a + k_b i_b + k_c i_c - M_y] \quad (3.50)$$

$\frac{3\pi}{2} < \theta_e < \frac{11\pi}{6}$ rotor pozisyonu aralığı için iletim denklemleri,

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{2(L + M_e)} [-V_d - 2Ri_a + \omega(k_c - k_a)] \quad (3.51)$$

$$i_b = 0 \quad (3.52)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{2(L + M_e)} [-V_d - 2Ri_c + \omega(k_b - k_c)] \quad (3.53)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [k_a i_a + k_c i_c - M_y] \quad (3.54)$$

$\frac{11\pi}{6} < \theta_e < \frac{\pi}{6}$ rotor pozisyonu aralığı için komütasyon denklemleri,

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [V_d - 3Ri_a + \omega(k_b + k_c - 2k_a)] \quad (3.55)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [-2V_d - 3Ri_b + \omega(k_a + k_c - 2k_b)] \quad (3.56)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{3(L + M_e)} [V_d - 3Ri_c + \omega(k_a + k_b - 2k_c)] \quad (3.57)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [k_a i_a + k_b i_b + k_c i_c - M_y] \quad (3.58)$$

$\frac{11\pi}{6} < \theta_e < \frac{\pi}{6}$ rotor pozisyonu aralığı için iletim denklemleri,

$$i_a = 0 \quad (3.59)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{2(L + M_e)} [-V_d - 2Ri_b + \omega(k_c - k_b)] \quad (3.60)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{2(L + M_e)} [-V_d - 2Ri_c + \omega(k_b - k_c)] \quad (3.61)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [k_b i_b + k_c i_c - M_y] \quad (3.62)$$

Sistemin matematiksel modelini tamamlamak için, her iletim adımı için her fazda indüklenen EMK'yı ifade etmek gerekir. Yıldız noktası referans noktası olarak kabul edilirse, indüklenen gerilimin anlık değeri motor sabitinin, açısal rotor hızının ve rotor

konumunun fonksiyonudur. Motor sabiti, FDAM’da rotor konumuna bağlıdır. Bu konseptte, birim hız için faz sargılarında indüklenen gerilim, genel matematiksel model ifadesine uygun olarak geliştirilir.

A fazı için motor sabiti değişimi:

$$0 < \theta_e < a \quad k_a = \frac{k\theta_e}{a} \quad (3.63)$$

$$0 < \theta_e < (a + \beta) \quad k_a = k \quad (3.64)$$

$$(a + \beta) < \theta_e < (\pi + a) \quad k_a = \frac{-k(\theta_e - \pi)}{a} \quad (3.65)$$

$$(\pi + a) < \theta_e < (\pi + a + \beta) \quad k_a = -k \quad (3.66)$$

$$(\pi + a + \beta) < \theta_e < 2\pi \quad k_a = \frac{k(\theta_e - 2\pi)}{a} \quad (3.67)$$

B fazı için motor sabiti değişimi:

$$0 < \theta_e < \frac{2\pi}{3} - a \quad k_b = -k \quad (3.68)$$

$$\frac{2\pi}{3} - a < \theta_e < \frac{5\pi}{3} - a - \beta \quad k_b = \frac{k(\theta_e - \frac{2\pi}{3})}{a} \quad (3.69)$$

$$\frac{5\pi}{3} - a - \beta < \theta_e < \frac{5\pi}{3} - a \quad k_b = k \quad (3.70)$$

$$\frac{5\pi}{3} - a < \theta_e < \frac{8\pi}{3} - a - \beta \quad k_b = \frac{-k(\theta_e - \frac{5\pi}{3})}{a} \quad (3.71)$$

$$\frac{8\pi}{3} - a - \beta < \theta_e < 2\pi \quad k_b = -k \quad (3.72)$$

C fazı için motor sabiti değişimi:

$$0 < \theta_e < \frac{\pi}{3} - a \quad k_c = k \quad (3.73)$$

$$\frac{\pi}{3} - a < \theta_e < \frac{4\pi}{3} - a - \beta \quad k_c = \frac{-k(\theta_e - \frac{\pi}{3})}{a} \quad (3.74)$$

$$\frac{4\pi}{3} - a - \beta < \theta_e < \frac{4\pi}{3} - a \quad k_c = -k \quad (3.75)$$

$$\frac{4\pi}{3} - a < \theta_e < \frac{7\pi}{3} - a - \beta \quad k_c = \frac{k(\theta_e - \frac{4\pi}{3})}{a} \quad (3.76)$$

$$\frac{7\pi}{3} - a - \beta < \theta_e < 2\pi \quad k_c = k \quad (3.77)$$

Ayrıca FDAM'da tork üretimini anlamak için ise, stator sargılarında indüklenen değişken gerilimin karakteristiklerini anlamak gerekir.

Sadece bir bobinde indüklenen manyetik akı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$\Psi = (\pi r l) B_m \left(-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.78)$$

Bobinde indüklenen değişken gerilim ise,

$$e = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{\pi r l B_m \omega_r}{\pi/2} = 2B_m l r \omega_r \quad (3.79)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r, \theta_e = p\theta_r \quad (3.80)$$

Eşitlik 3.80 ile ifade edilir. Stator sargılarındaki toplam EMK ise,

$$E = 2NB_m l r \omega_r \quad (3.81)$$

ile ifade edilir ve FDAM tarafından üretilen tork aşağıda analitik olarak verilir.

$$M_{total} = \frac{k_a i_a + k_b i_b + k_c i_c}{\omega_r}, M_{total} - M_y = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (3.82)$$

4.2. Spoke Tipi FDAM Tasarımı

Bu bölümde referans alacağımız Bölüm 3.2.2’de anlatıldığı gibi FDAM’ın yapılarından biri olan spoke tipi rotor yapısının üzerinde durularak iki farklı model oluşturulacaktır. Normalde yüksek hızlı uygulamalar için uygun olan bu yapı ile düşük hız yüksek tork uygulaması adına bir tasarım gerçekleştirilecektir. Ayrıca yapısı gereği dikdörtgen blok mıknatıs kullanılmasına olanak sağladığından tasarım esnasında mıknatıs yapısı dikdörtgen blok olarak tercih edilecektir.

4.2.1. Tasarım akışı

Tasarım aşamasına geçmeden aşağıdaki adımlar dikkate alınarak motor modeli adına belirlemeler yapılacaktır.

- Giriş Parametrelerinin Seçilmesi
- Tork,güç ve hız değerlerinin hesaplanması
- Oluk-Kutup Sayısının Seçilmesi
- Motor Ölçülerinin Belirlenmesi

Tasarımı yapılacak olan motor vana aktuatör uygulamalarında kullanılması planlandığından yüksek tork ve düşük hız beklenmektedir. Ayrıca ileride seri üretim düşünüldüğünden hali hazırda bulunan motor üretim hattına uyması adına mekanik ölçüler bu doğrultuda belirlenecektir.

ANSYS RMxpert Design programı ile farklı modeller belirlenecektir. Belirlenen bu modeller kendi arasında kıyaslanacak ve alternatif bir model belirlenecektir. Belirlenen alternatif model ile beraber mıknatıs ölçülerinde optimizasyon çalışmaları yapılarak parametrik çözümler yapılacaktır.

Tasarım aşamaları tamamlandıktan sonra Maxwell 2B yazılımı ile elektromanyetik bileşenler incelenecektir.

4.2.2. Giriş parametrelerinin seçilmesi

Bölüm 4.2.1’de anlatıldığı üzere bazı parametrelerin tasarım aşamasına geçilmeden belirlenmesi gerekmektedir. Bundan dolayı tasarımı yapılacak motorun vana aktuatör uygulanmalarında kullanılması düşünüldüğünden vana aktuator tiplerine ait tork,hız ve açma-kapama gibi sürelerin bilinmesi gerekmektedir.

Referans olarak piyasada hali hazırda satışı olan aktuator firmaları araştırılmış olup gate,globe ve gate vanaya göre aktuator yapılarının değiştiği gözlenmiştir. Çizelge 3.3’de vana aktuator üreticileri ve kullanılan vana tipleri çıkarılmıştır.

Çizelge 3.3. Aktuatör üreticilerine göre kullanılan vana tipleri

Aktuatör Üreticileri	Kullanılan Vana Tipi	Tek Tip Motor
Sancak	Kelebek	Uygun Değil
Rotork IQTF Full Turn	Kelebek, Gate,Globe	Uygun Değil
Valworx 5616	Kelebek	Uygun Değil
Assured Automation B Series	Kelebek	Uygun Değil
AOX-L	Gate, Globe	Uygun Değil
Riekor TS Fail Safe	Kelebek, Gate, Globe	Uygun Değil
Bernard Controls FQ Range	Kelebek	Uygun
Bernard Controls SQ Range	Kelebek	Uygun Değil
Ebro Armaturen E65-E210	Kelebek	Uygun Değil
El Torque	Kelebek	Uygun Değil

Yukarıda yer alan çizelgede kullanılan vana tipine göre farklı model aktuatörlerin üretildiği ve vana çapı artıkça tek tip bir motor ile sürülebilirliğinin uygun olmadığı görülmüştür.

Pazar araştırması bittikten sonra üreticilerin üretmiş oldukları aktuatörlerde elektriksel açıdan genel kriterlere bakılmıştır. Bu kriterler ile beraber tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken sıcaklık, güç bağlantısı ve motor çalışma sınıfı gibi kriterler bulunmuştur.

Çizelge 3.4. Aktuatör üreticilerine göre elektriksel açıdan genel kriterler

Aktuatör Üreticileri	Ortam Sıcaklığı	Güç Bağlantısı	Motor Sınıfı
<i>Sancak</i>	(-30 C)- (60 C)	24V-240V AA or DA	-
<i>Rotork IQTF Full Turn</i>	(-50 C)- (70 C)	24V DA - 240V/AA/1-380V/AA/3	S4
<i>Valworx 5616</i>	(-20 C)- (70 C)	24V-240V AA or DA	S2(on/off)
<i>Assured Automation B Series</i>	(-20 C)- (70 C)	24V-240V AA or DA	-
<i>AOX-L</i>	(-30 C)- (70 C)	220V AA 1 faz 3 faz opsiyonel	S2(on/off) - S4
<i>Riekor TS Fail Safe</i>	(-40 C) - (65 C)	24V DA	S2(on/off) - S4
<i>Bernard Controls FQ Range</i>	(-40 C) - (65 C)	24V-240V AA or DA	S2(on/off) - S4
<i>Bernard Controls SQ Range</i>	(-20 C)- (70 C)	24V-240V AA or DA	S2(on/off) - S4
<i>Ebro Armaturen E65-E210</i>	(-20 C)- (70 C)	110V/AA/1 - 480V/AA/3	S2(on/off) - S4
<i>El Torque</i>	(-25 C)- (70 C)	110V/AA/1 - 240V/AA/1	S2(on/off)

4.2.3. Tork, güç ve hız değerlerinin bulunması

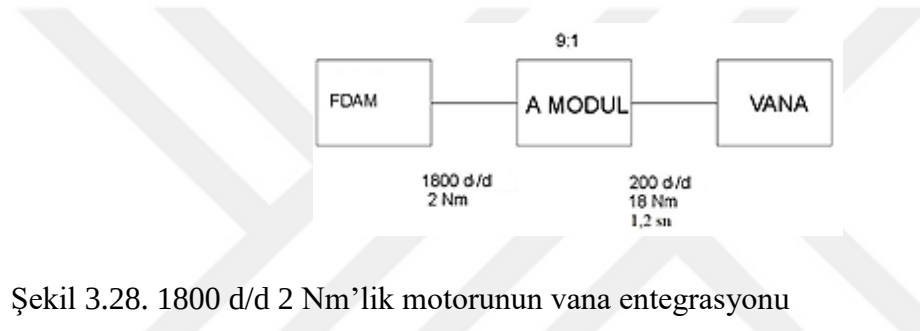
Motor tasarımına geçmeden motor hız ve tork bilgilerinin belirlenmesi adına piyasada mevcut satışı olan ve aktuatörlerde kullanılan motor bilgilerine göre Çizelge 3.5 oluşturulmuştur. Bu çizelge aracılığı ile piyasada ki örnekler derinlemesine incelenmiş olup kullanılan motorların hız ve tork bilgileri öğrenilerek Çizelge 3.5'e aktarılmıştır.

Çizelge 3.5. Motor hız,tork bilgilerine göre açma-kapama süreleri

		Motor Çıkış Torku		
Motor Çıkış Hızı	Hız (d/d)	2 Nm	4 Nm	6 Nm
		18 Nm	36 Nm	54 Nm
	1000	2 sn	2 sn	2 sn
	1500	1.5sn	1.5 sn	1.5 sn
	1800	1.2sn	1.2sn	1.2sn
	2500	0.8 sn	0.8 sn	0.8 sn
	3000	0.7 sn	0.7 sn	0.7 sn
	3500	0.6 sn	0.6 sn	0.6 sn

Yukarıda yer alan çizelgeye göre motor çıkış torklarının 2,4 ve 6 Nm olarak gruplandırıldığı görülmektedir. Bu grupta biçimi redüktörsüz bir motorun ürettiği torku ifade etmektedir. İlgili grupta altında yer alan diğer tork değerleri ise 1/9 oranına sahip planet dişli modüllerini ifade etmekte ve bu tork oranlarına istinaden 1000 d/d ve 3500 d/d aralığındaki elektrik motorları kullanılması durumunda elektrikli aktuatörlerin açma-kapama sürelerini göstermektedir.

Şekil 3.28’de ise 1800 d/d 2 Nm’lik redüktörsüz elektrik motoruna eklenen A modülünün yani planet redüktörün endüstriyel vanaya adapte edilmesi durumunda tork,hız ve açma-kapama süresi görülmektedir.



Şekil 3.28. 1800 d/d 2 Nm’lik motorunun vana entegrasyonu

Ayrıca FDAM’da tork üretimini anlamak adına yapılan hesaplamalar Bölüm 4.1’de anlatılmıştır.

Motor hız ve tork bilgilerini belirledikten sonra vana uygulamalarında kullanılan elektrik motorlarının güç bilgileri için Çizelge 3.6 oluşturulmuştur. Aşağıda yer alan çizelge ile beraber yukarıda yer alan bilgiler ışığında bu tez çalışmasında 1800 d/d 400W gücünde 2 Nm’lik spoke tipi rotor yapısına sahip redüktörsüz bir FDAM tasarımı yapılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 3.6. Ön görülen spoke tipi FDAM için tasarım girdileri

		Motor Çıkış Torku		
Motor Çıkış Hızı	Hız (d/d)	2 Nm	4 Nm	6 Nm
	1000	210 Watt	420 Watt	630 Watt
	1500	320 Watt	630 Watt	950 Watt
	1800	400 Watt	770 Watt	1140 Watt
	2500	530 Watt	1050 Watt	1570 Watt
	3000	630 Watt	1250 Watt	1885 Watt
	3500	740 Watt	1500 Watt	2200 Watt

4.2.4. Oluk-Kutup sayısının seçilmesi

Bir elektrik motoru tasarımı yaparken oluk-kutup oranının doğru seçilmesi elektrik motorunda performansı etkilemektedir. Oluk-kutup oranı yanlış seçilmesi durumunda oluk ve sargıların oransız yerleşiminden ortaya çıkan dengesiz manyetik kuvvetler meydana gelmektedir. Eşitlik 3.83’de kutup-faz başına düşen oluk sayısı görülmektedir.

$$q = \frac{N_{oluk}}{p \cdot n_f} \quad (3.83)$$

Yukarıda yer alan eşitliğe göre N_{oluk} oluk sayısını, p kutup sayısını, n_f ise faz sayısını göstermektedir. Kutup-faz başına düşen oluk sayısının birden küçük olmasıyla birlikte bu çeşit motorlara kesirli oluk sargılı motorlar denmektedir. Üretilen motorun sargı faktörü en önemli kıstaslardan biridir. Faz sargılarındaki etkin olan sarımlar sargı faktörü olarak isimlendirilmektedir. Bu faktör değeri yüksek olduğunda akım yoğunluk değeri düşük olmaktadır. Bundan dolayı ek kayıplar, üretilen harmonikler ve ısınma azalmaktadır. Şekil 3.29’da kutup-faz başına oluk sayıları ve sargı faktörü değerleri gösterilmiştir. Şekil 3.29’a bakıldığında motorun sargı faktörünün q değerinin 0.5 veya daha az olduğu, yani kutup fazı başına düşen oluk sayısının istenilen yüksek düzeyde olduğu görülebilir. Şekil 3.29’daki satırların başındaki değerler q değerlerini, alttaki değerler ise k_{sf} değerlerini göstermektedir.

		q, k_{sf}																				
Notak/p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42		
6	0.5 .866		0.25 .866				0.125 .866		0.1 .866				0.07 .866		0.062 .866				0.05 .866			
9		0.5 .866	0.375 .945	0.3 .945	0.25 .866						0.125 .866	0.115 .945	0.107 .945	0.1 .866						0.07 .866		
12			0.5 .866	0.4 .966		0.285 .966	0.25 .866								0.125 .866	0.117 .933		0.105 .933	0.1 .866			
15				0.5 .866		0.357 .951	0.31 .951		0.25 .866										0.125 .866			
18					0.5 .866	0.42 .902	0.375 .945		0.3 .945	0.27 .902	0.25 .866											
21						0.5 .866	0.437 .870		0.35 .953	0.318 .953		0.269 .89	0.25 .866									
24							0.5 .866		0.4 .966	0.36 .958		0.307 .95	0.285 .966		0.25 .866					0.19 .943		
27		$q \geq 1$						0.5 .866	0.45 .877	0.36 .958	0.375 .945	0.346 .954	0.321 .954	0.3 .945	0.281 .915	0.264 .877	0.25 .866					
30									0.5 .866	0.45 .874		0.384 .936	0.357 .951		0.312 .951	0.294 .936		0.263 .874	0.25 .866			
33										0.5 .866		0.423 .903	0.392 .928		0.343 .954	0.323 .954		0.289 .928	0.275 .903			
36											0.5 .866	0.46 .867	0.428 .902	0.4 .966	0.375 .945	0.35 .953		0.315 .953	0.3 .945	0.285 .966		
			Tasarımı uygun olmayan kombinasyonlar																$k_{sf} \leq 0.866$			

Tasarımı uygun olmayan kombinasyonlar $k_{sf} \leq 0.866$

Şekil 3.29. Kutup-faz başına oluk sayıları ve sargı faktörü oranları (Soyaslan,2020)

Çizelge 3.7. Ön görülen spoke tipi FDAM için tasarım girdileri

Oluk-Kutup Oranı	Mıknatıs Tipi	Sargı Faktörü	Verim (%)
12/14	NdFe35	0.966	81.08
12/10	NdFe35	0.966	82.35
12/14	Y30 (Ferrit)	0.966	75.40
12/10	Y30 (Ferrit)	0.966	73.24

Çizelge 3.7’de görüldüğü gibi mıknatıs tipi ve oluk kutup oran sargı faktörü aynı olsa da verimi etkilemektedir. Motorları tasarlarken, kullanılan oluk-kutup oranının yüksek bir sargı katsayısı olduğunu hesaba katmak gerekir. Ayrıca kutup sayısı mıknatıs sayısını belirlediğinden, kutup sayısı belirlenirken motorun maliyeti göz önünde bulundurularak seçim yapılmalıdır.

Ayrıca bir motor tasarımında dikkat edilmesi gereken etken vuruş momentidir. Rotordaki mıknatısların sağladığı uyarma akısı ile statordaki relüktans arasındaki eylem sonucu vuruş momenti oluşmaktadır. Oluk sayısı ve kutup sayısının en küçük ortak katı (EKOK) ile vuruş momenti frekansı orantılıdır. Motorun vuruş momentinin düşük olması için Şekil 3.30’daki EKOK değeri büyük olan oluk-kutup oranı seçilmelidir.

EKOK (N _{oluk} , p)																				
N _{oluk} \p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
6	12		24				48		60				84		96				120	
9		18	72	90	36						72	234	252	90						126
12			24	60		84	48								96	204		228	120	
15				30		210	240		60										120	
18					36	126	144		180	198	72									
21						42	336		420	462		546	588							
24							48		120	264		312	168		96					168
27								54	540	594	216	702	756	270	864	918	108			
30									60	330		390	420		480	510		570	120	
33										66		858	924		1056	1122		1254	1320	
36											72	468	252	180	288	612		684	360	252

Tasarımı uygun olmayan kombinasyonlar

$k_{sf} \leq 0.866$

Şekil 3.30. Oluk-kutup sayılarının EKOK değerleri (Soyaslan,2020)

Oluk ve kutup sayılarının en büyük ortak böleni (EBOB), sargı dizilimindeki simetri sayısını ifade etmektedir. EBOB değeri motor simetrisini ve radyal kuvvetleri ifade ettiğinden bu değer çift sayı olduğu zaman motordaki net radyal kuvvetleri düşük

çıkmaktadır. EBOB değeri bir olduğu zaman dengesiz manyetik kuvvetler oluşmaktadır. Bundan dolayı net radyal kuvvetlerin düşük olması adına oluk-kutup sayılarının EBOB’u çift olan tasarımlar seçilmelidir. Şekil 3.31’de EBOB değerleri görülmektedir.

EBOB (N _{oluk} , p)																				
N _{oluk} \p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
6	2		2				2		2				2		2				2	
9		3	1	1	3						3	1	1	3						3
12			4	2		2	4								4	2		2	4	
15				5		1	1		5										5	
18					6	2	2		2	2	6									
21						7	1		1	1		1	7							
24							8		4	2		2	4		4					6
27								9	1	1	3	1	1	3	1	1	9			
30									10	2		2	2		2	2		2	10	
33										11		1	1		1	1		1	1	
36											12	2	4	6	4	2		2	4	6

Tasarımı uygun olmayan kombinasyonlar

$k_{sf} \leq 0.866$

Şekil 3.31. Oluk-kutup sayılarının EBOB değerleri (Soyaslan,2020)

Bu bölümde bahsedildiği üzere sargı faktörü yüksek olan bir oran seçilmiştir. Verilen bilgilere göre prototip motorun boyutları dikkate alınarak oluk/kutup oranının 12/10 ve NdFe35 mıknatıslı bir motor olmasına karar verilmiştir. Böylelikle q değeri 0.4, k_{sf} değeri 0.966, EKOK değerinin 60, EBOB değerinin ise 2 olduğu görülmektedir.

4.2.5. Motor ölçülerinin belirlenmesi

Motor tasarımı açısından, motorun stator ve rotor ölçüleri, kutup-oluk oranının belirlenmesi ve mıknatıs ölçüleri gibi birçok parametrenin belirlenmesinde motorun kullanım alanı önem arz etmektedir. Bu sebeple tork kullanılarak çıkış eşitliğinin en basit biçimi Eşitlik 3.84 ile ifade edilir.

$$M = C_0 D_{ro}^2 L_p \quad (3.84)$$

Eşitlikte C_o çıkış katsayısını, D_{ro} rotor çapını ve L_p motor paket uzunluğunu ifade etmektedir. C_o elektriksel ve manyetik yüklemelerin çarpımı ile bulunur. Şekil 3.32’de C_o için hazırlanan değerler görülmektedir. Benzer olarak kullanılan bir diğer katsayı ise birim rotor hacmi başına tork (TRV) olarak ifade edilir. Bu katsayısı C_o ile orantılıdır ve aralarındaki ilişki Eşitlik 3.85 ve Eşitlik 3.86 ile ifade edilir (Gürdal,2015).

	σ, C_o ve TRV ’nin tipik değerleri				
	σ		C_o		TRV
	kN/m ²	lbf/in ²	kNm/m ³	lbf-in/in ³	kNm/m ³
Tamamen kapalı küçük motorlar	0,7 – 3,5	0,1 – 0,5	1 – 5,5	0,15 – 0,8	2,5 – 7
Tam-Hp endüstriyel motorlar	3,5 – 14	0,5 – 2	5,5 – 20,7	0,8 – 3	7 – 30
Yüksek performanslı servomotorlar	7 – 21	1 – 3	10,3 – 34,5	1,5 – 5	15 – 50
Hava taşıtı makinaları	14 – 35	2 – 5	20,7 – 51,7	3 – 7,5	30 – 75
Büyük sıvı soğutmalı makinalar	70 – 105	10 – 15	103 – 1379	15 – 200	100 – 205

Şekil 3.32. C_o için hazırlanan değerler (Gürdal,2015)

$$TRV = \frac{M}{\frac{\pi}{4} D_{ro}^2 L_p} \quad (3.85)$$

$$C_o = \frac{\pi}{4} TRV \quad (3.86)$$

Eşitlik 3.85 kullanılarak TRV katsayısı bulunur. Burada rotor çapı ve paket uzunluğu Yusuf Avşar’ın hazırlamış olduğu program sayesinde parametreler otomatik olarak hesaplanmıştır. Motor torku 2Nm, D_{ro} 0.0495 m, L_p ise 0.05 m olarak alındığında $TRV = 20.785 \text{ kNm/m}^3$ olarak bulunur. Eşitlik 3.86 ile TRV yerine koyularak $C_o = 16.32 \text{ kNm/m}^3$ elde edilir. Bu değerler alınarak Şekil 3.32 ile Motorun tam-hp endüstriyel motor olarak baz alınabileceği görülmektedir.

Eşitlik 3.84 ile motor torku ve C_o değerleri yerine yazıldığında bu değerler ispatlanmış olur. Stator ve rotordan oluşan elektrik motorlarında fiziksel ölçüler bu iki ana parçadan oluşmaktadır.

Stator çapının tahmini ise D_{ro}/D_{so} ’nin oranı ile yapılmaktadır. Bu oran 0.4 ve 0.7 gibi geniş bir aralık üzerinde değişebilir ve çoğu motor tasarımı 0.5 ile 0.55 civarındadır (Gürdal,2015).

Stator çapının ölçüleri firmada bulunan motor sarım makinası ve üretim hattı göz önünde bulundurularak stator fikstürün dış çapı stator ölçünün belirlenmesinde ana kriter

olmuştur. D_{so} 0.088m olarak sabit olarak tutulduğunda ve motor tasarım kriterimiz 0.55 olarak baz alındığında rotor çapı $D_{ro} = 0.088 \times 0.55 = 0.0484$ m olur. Bu da yaklaşık olarak rotor dış çapının ölçüsünü vermektedir.

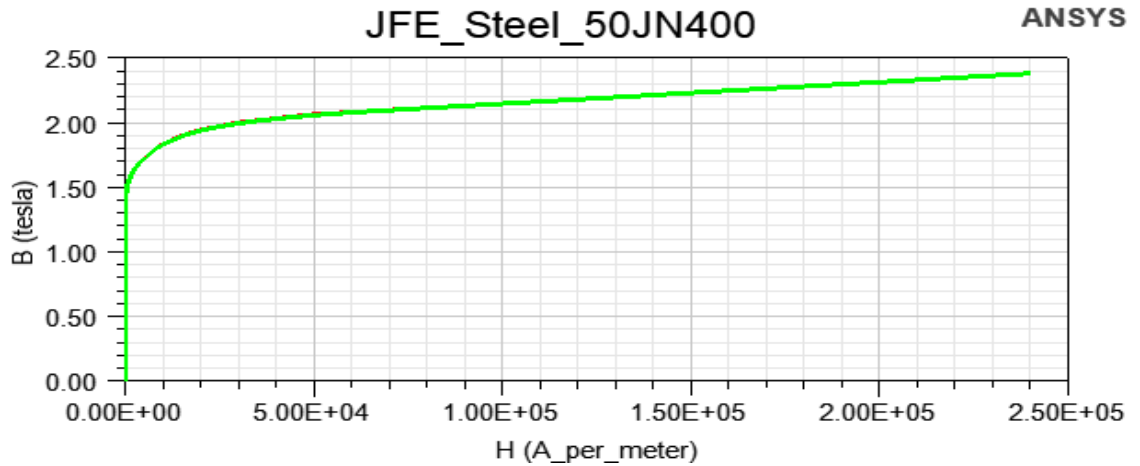
Rotor parametreleri

Spoke tip rotorlu tasarımı gerçekleştirilen motorun rotor geometrik ölçüleri ve malzeme bilgisi Çizelge 3.8’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.8. Spoke tipi rotorun tasarım girdileri

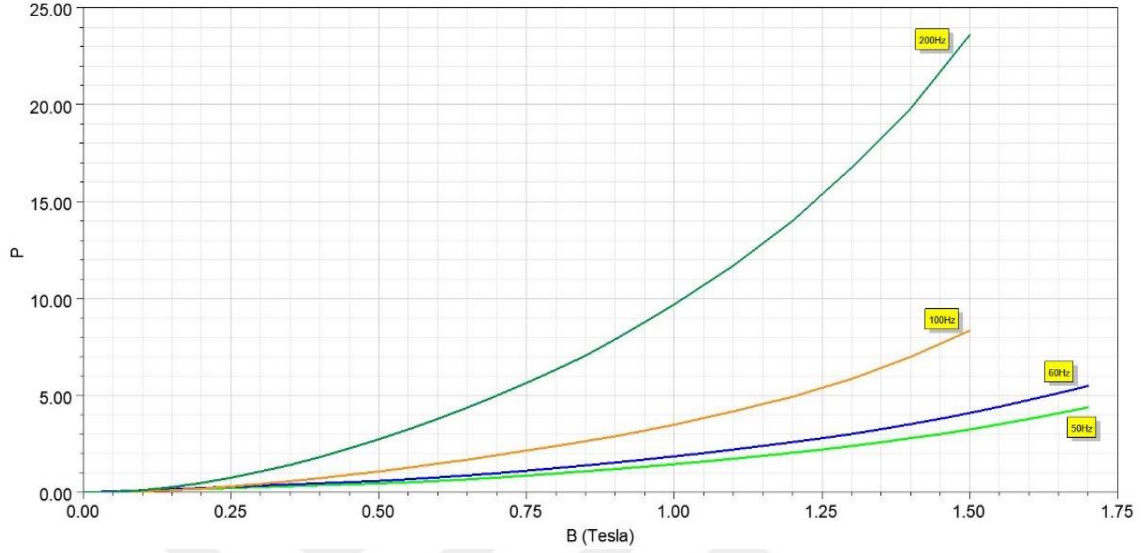
Özellikleri	Değerleri / Tipi
Dış Çap	49.5mm
İç Çap	25 mm
Uzunluk	50 mm
Sac Tipi	M400-50A
İstifleme Faktörü	0.95

Burada istifleme faktörü adı verilen değer sac laminasyonunu temsil etmektedir. Rotorda kullanılan malzeme 0.5 mm olacak şekilde ince kesilmiştir. Bu değer üretici firma teknik dokümanlarından alınabilir. M400-50A silisli sacın manyetik özellikleri ise Şekil 3.33’de gösterilmiştir.



Şekil 3.33. M400-50A silisli sacın B-H egrisi

M400-50A silisli sacın farklı frekans aralığındaki toplam kayıpları ise 3.34’de gösterilmiştir.



Şekil 3.34. M400-50A silisli sacın farklı frekans aralığındaki kayıpları

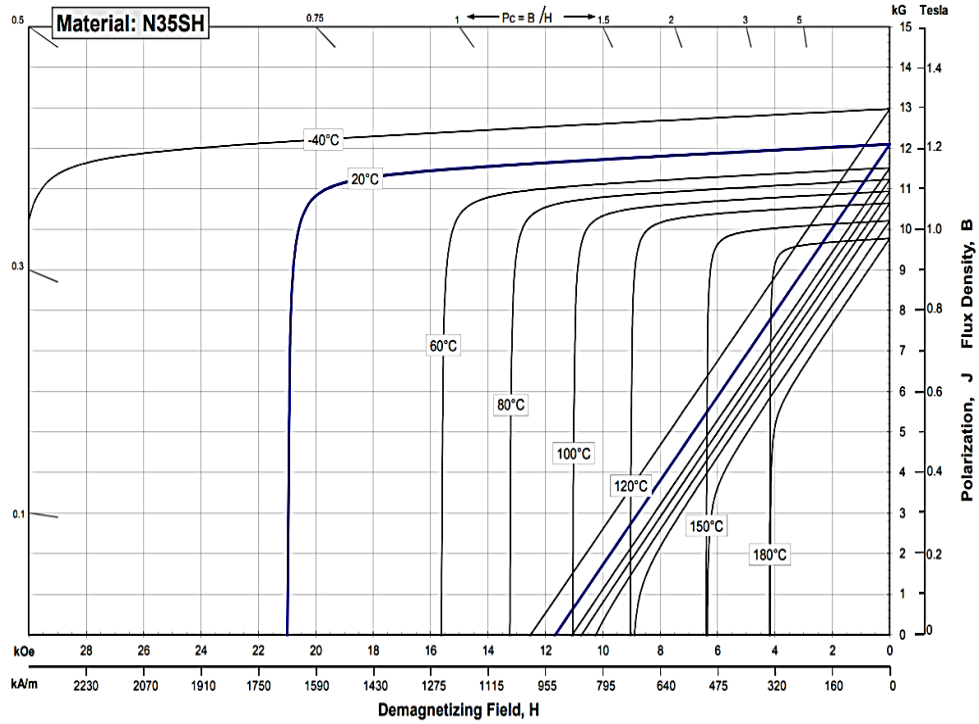
Farklı tipteki silisli sacların 50 Hz aralığındaki toplam kayıpları, manyetik polarizasyonu ve yoğunluk bilgileri ise 3.35’de gösterilmiştir.

Cinsi	Saç kalınlığı	50 Hz'deki Maksimum Spesifik Toplam Kayıp		50 Hz'deki minimum manyetik polarizasyon			Yoğunluk
		$\hat{B}=1.5T$	1.0T*	$\hat{H}=2500$	5000	10000 A/m	
		W/kg	W/kg	T	T	T	
M210-35A	0.35	2.10	0.90	1.49	1.60	1.70	7.60
M230-35A	0.35	2.30	0.95	1.49	1.60	1.70	7.60
M235-35A	0.35	2.35	0.95	1.49	1.60	1.70	7.60
M250-35A	0.35	2.50	1.00	1.49	1.60	1.70	7.60
M270-35A	0.35	2.70	1.10	1.49	1.60	1.70	7.65
M300-35A	0.35	3.00	1.20	1.49	1.60	1.70	7.65
M330-35A	0.35	3.30	1.30	1.49	1.60	1.70	7.65
M230-50A	0.50	2.30	1.00	1.49	1.60	1.70	7.60
M250-50A	0.50	2.50	1.05	1.49	1.60	1.70	7.60
M270-50A	0.50	2.70	1.10	1.49	1.60	1.70	7.60
M290-50A	0.50	2.90	1.15	1.49	1.60	1.70	7.60
M310-50A	0.50	3.10	1.25	1.49	1.60	1.70	7.65
M330-50A	0.50	3.30	1.35	1.49	1.60	1.70	7.65
M350-50A	0.50	3.50	1.50	1.50	1.60	1.70	7.65
M400-50A	0.50	4.00	1.70	1.53	1.63	1.73	7.70
M470-50A	0.50	4.70	2.00	1.54	1.64	1.74	7.70
M470-50HP	0.50	4.70	2.20	1.63	1.71	1.81	7.70
M530-50A	0.50	5.30	2.30	1.56	1.65	1.75	7.70
M530-50HP	0.50	5.30	2.30	1.63	1.71	1.81	7.80
M600-50A	0.50	6.00	2.60	1.57	1.66	1.76	7.75
M700-50A	0.50	7.00	3.00	1.60	1.69	1.77	7.80
M800-50A	0.50	8.00	3.60	1.60	1.70	1.78	7.80
M310-65A	0.65	3.10	1.25	1.49	1.60	1.70	7.60
M330-65A	0.65	3.30	1.35	1.49	1.60	1.70	7.60
M350-65A	0.65	3.50	1.50	1.49	1.60	1.70	7.60
M400-65A	0.65	4.00	1.70	1.52	1.62	1.72	7.65
M470-65A	0.65	4.70	2.00	1.53	1.63	1.73	7.65
M530-65A	0.65	5.30	2.30	1.54	1.64	1.74	7.70
M600-65A	0.65	6.00	2.60	1.56	1.66	1.76	7.75
M600-65HP	0.65	6.00	2.60	1.63	1.72	1.82	7.80
M700-65A	0.65	7.00	3.00	1.57	1.67	1.76	7.75

Şekil 3.35. Tane yönlendirilmiş silisli sacların manyetik özellikleri (Soyaslan,2020)

Laminasyon yöntemi ile 0.5 mm lik saclar 50 mm lik uzunluğa ulaşabilmek 100 adet sac kendi arasında birleştirilerek yapılması planlanmış ve rotor için istifleme faktörü 0.95 olarak alınmıştır.

Rotor kısmında bir diğer husus ise kullanılacak olan mıknatıs tipidir. Tasarımda kullanılacak mıknatıs Neodyum N35SH'ye ait B-H grafiği Şekil 3.36'da gösterilmiştir.



Şekil 3.36. N35SH mıknatısın B-H eğrisi

Spoke tipi rotorda kullanılan mıknatısa ait detay bilgiler ise Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Spoke tipi rotorun mıknatıs bilgileri

Özellikleri	Değerleri / Tipi
Mıknatıs Tipi	N35SH
Mıknatıs Kalınlığı	3.5 mm
Mıknatıs Uzunluğu	10 mm
Mıknatıs Adeti	10

Stator parametreleri

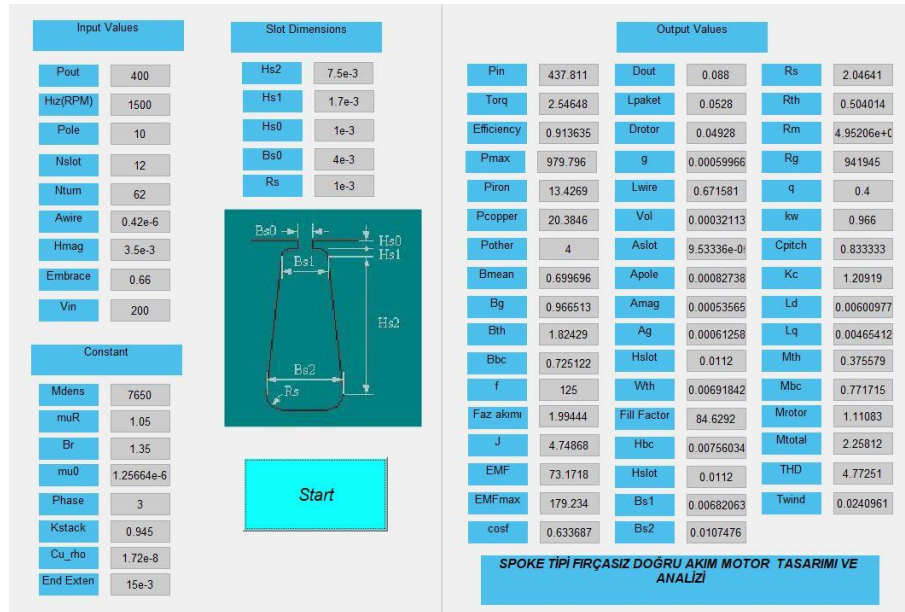
Spoke tip rotorlu tasarımı gerçekleştirilen motorun stator geometrik ölçüleri ve malzeme bilgisi Çizelge 3.10’da belirtilmiştir. Ayrıca statorda bir önemli husus ise oluk tipinin belirlenmesi ve ölçülerinin hesaplanarak çıkartılmasıdır. Burada oluk tipi belirlenmiş ve hazır bir arayüz kullanılarak oluk girdilerinde kullanılan parametreler otomatik olarak hesaplanmıştır. Daha sonra bu hesaplanan parametreler ANSYS Maxwell programına aktarılmıştır.

Çizelge 3.10. Stator tasarım girdileri

Özellikleri	Değerleri / Tipi
Dış Çap	80 mm
İç Çap	50.5 mm
Uzunluk	50 mm
Sac Tipi	M400-50A
İstifleme Faktörü	0.95
Eğim Genişliği	0
Oluk Tipi	4

Statora ait oluklarda eğimi göstermek için eğim genişliği kullanılmaktadır. Eğim genişliği ile beraber farklı tasarımlar oluşturulabilir. Tasarımı yapılan motorda stator oluklarında kaykı olmayacağından bu değer 0 olarak baz alınmıştır.

Bu motor tasarımında ANSYS Maxwell programında 4 olarak belirtilen stator oluk tipi seçilmiş ve oluk tipine göre Yusuf Avşar'ın¹ hazırlamış olduğu program sayesinde otomatik olarak hesaplanan parametreler Şekil 3.37'de detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.37. Stator oluk tipi ve kullanılan parametreler

¹ Yusuf Avşar Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda doktora öğrencisidir.

Çizelge 3.11. Stator sarım parametreleri

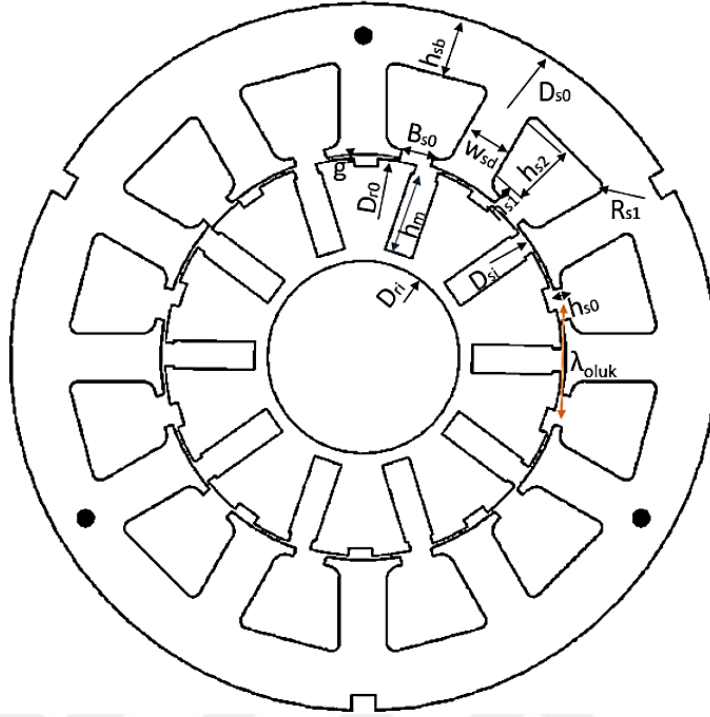
Özellikleri	Değerleri / Tipi
Sarım Katmanı	2
Bağlantı Tipi	Yıldız
Paralel Sarım Sayısı	1
Sarım Tipi	Tam Kalıp
Sipir Sayısı	62
Sargı Adımı	1
Tel Sayısı	2 Telli
Tel Çapı	0.45 mm
Oluk Doluluk Oranı	0,66

Tabloyu detaylı olarak incelediğimizde bağlantı tipinin tam kalıp sargı ve sarım katmanının ise 2 olarak seçildiği görülmektedir. Sipir sayısı, sarım katmanı 2 olarak seçildiğinden toplam sarımın 2 katına karşılık gelir.

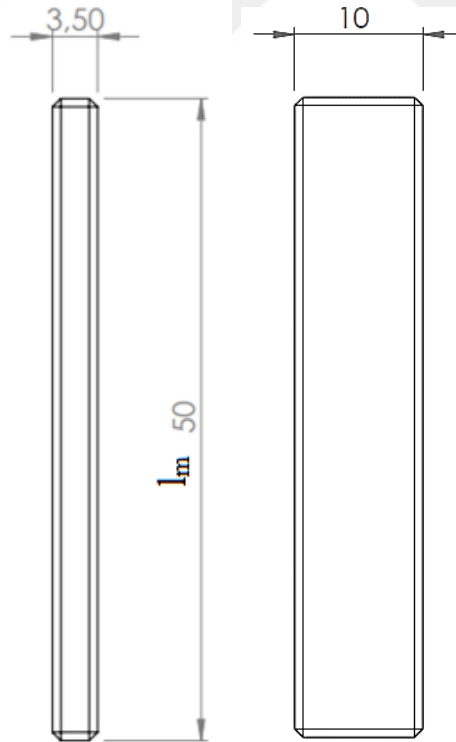
Oluk doluluk oranına baktığımız zaman bir olukta bulunan toplam sipir sayısının ve yalıtkan malzeme hacminin toplamının oluk toplam hacmine oranının 0.66 olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.11 dışındaki parametreler sonraki bölümlerde detaylandırılacaktır.

FDAM'ın geometrik ölçüleri Şekil 3.38'de, mıknatıs ölçüleri Şekil 3.39'da ve bu değerlerin açıklamaları ise Çizelge 3.12'te paylaşılmıştır.



Şekil 3.38. İçten rotorlu motorun geometrik ölçüleri



Şekil 3.39. FDAM'ın mıknatıs ölçüleri

Çizelge 3.12. FDAM ölçülerinin açıklamaları

Değişken	Açıklaması
D_{si}	Stator iç çapı
D_{so}	Stator dış çapı
h_{sb}	Stator boyunduruk kalınlığı
R_{s1}	Oluk boyunduruk yarıçapı
h_{s2}	Oluk yüksekliği
h_{s1}	Oluk dış ucu yarıçapı
h_{s0}	Dış ucu kalınlığı
B_{s0}	Oluk açıklığı
w_{sd}	Stator dış genişliği
D_{ri}	Rotor iç çapı
D_{ro}	Rotor dış çapı
g	Hava aralığı kalınlığı
h_m	Mıknatıs kalınlığı
λ_{oluk}	Stator oluk adımı
α_m	Mıknatıs adımı açısı
l_m	Mıknatıs uzunluğu
L_p	Motor paket boyu

Manyetik malzemenin doyuma girmemesi önemli motor tasarım parametrelerinden biridir. B-H eğrisinin büküm alanında çalışmak, motorun en iyi şekilde ve verimli çalışmasını sağlar. Stator dişlerindeki ve boyunduruğundaki akı yoğunluğunun optimum çalışma bölgesinin sınırları içinde olması istenmekte ve doyuma girmemesi arzu edilir. Stator dişindeki akı yoğunluğunun tepe değeri Eşitlik 3.87’de paylaşılmıştır (Soyaslan,2020).

$$B_{sd} = B_g \frac{\lambda_{oluk}}{w_{sd}} = \frac{h_m}{h_m + g\mu_r} \frac{\pi D_{so}/N_{oluk}}{w_{sd}} \quad (3.87)$$

Stator boyunduruğundaki akı, toplam kutup akısının yarısıdır. Buna göre stator boyunduruğundaki akı Eşitlik 3.88 ile elde edilir. Bu nedenle manyetik eşdeğer devrede yer alan tüm parametreler analitik olarak elde edilir (Soyaslan,2020).

$$B_{sb} = \frac{B_g A_g}{2h_{sb} L_p} B_r \quad (3.88)$$

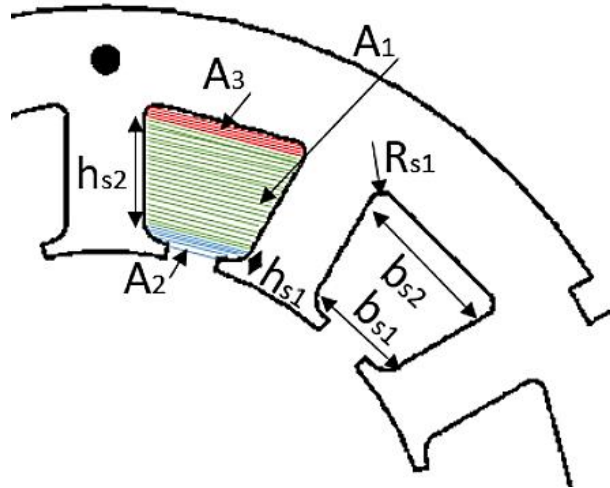
Tek bir telin kesit alanı Eşitlik 3.89’da gösterildiği gibi elde edilir. Eşitlikteki D_{tel} seçilmiş olan tel çapını temsil eder. Eşitlik 3.90’da ise kullanılacak paralel tel sayısına göre A_i iletken kesit alanı formülü verilmiştir. Eşitlikteki n_{tel} ifadesi iletken tel sayısını ifade eder. Çift katmanlı oluk sargısındaki A_i iletken kesit alanı; oluk doluluk faktörü k_{dol} , oluk alanı A_{oluk} ve tur sayısına göre Eşitlik 3.91’deki eşitlik ile bulunur. Oluk alanını bulmak için A_1 , A_2 ve A_3 bölgelerinin toplamı olacak şekilde Eşitlik 3.92 ile hesaplanır, oluk ölçüleri Şekil 3.40 ile ifade edilir. A_2 ve A_3 alanları bulunurken, köşe yuvarlakları alan hesabına dahil edilmemiştir (Soyaslan,2020).

$$A_{tel} = \frac{\pi D_{tel}^2}{4} \quad (3.89)$$

$$A_i = A_{tel} n_{tel} \quad (3.90)$$

$$A_i = \frac{0.5 A_{oluk} k_{dol}}{N_t} \quad (3.91)$$

$$A_{oluk} = (h_{s2}(b_{s1}+b_{s2})/2) + ((b_{s1}+h_{s1}) h_{s1}) + ((b_{s2}+R_{s1}) R_{s1}) \quad (3.92)$$



Şekil 3.40. Stator oluk alanının ve ölçülerinin gösterimi

Bir bobinde yer alan iletken uzunluğu L_i Eşitlik 3.93 kullanılarak hesaplanabilir. Eşitlikte yer alan N_t bir fazdaki tur sayısını, L_{su} statordan taşmış olan sargı sonu uzunluğunu, S_p

oluk sayısı cinsinden bobin adımını, N_{oluk} toplam oluk sayısını, h_s ise toplam oluk uzunluğunu göstermektedir. Fazların birbirine seri bağlanması esnasındaki iletken uzunluğu L_{is} oluğun ortasından seçilmiş ve Eşitlik 3.94 ile bulunmuştur. Eşitlikte yer alan N_{bobin} ifadesi oluk sayısının faz sayısına bölünmesiyle bulunmaktadır. Eşitliklere göre, toplam faz direnci Eşitlik 3.95'deki şekilde bulunmaktadır. Bu değer iletkenin oda sıcaklığındaki direnç değeridir, farklı sıcaklıklarda çalışma sırasındaki faz direnci Eşitlik 3.96'daki formül ile bulunur. Eşitlikte yer alan T değeri ortam sıcaklığını ifade etmektedir (Soyaslan,2020).

$$L_i = 2N_t(L_p + L_{su} + [S_p/N_{oluk}(D_{so} - h_s/2)\pi] \quad (3.93)$$

$$L_{is} = \frac{N_{bobin}S_p}{N_{oluk}} \left(D_{so} - \frac{h_s}{2} \right) \pi + 2N_{bobin}L_{su} \quad (3.94)$$

$$R_s = 1.72 * 10^{-8} \frac{N_{bobin}L_i + L_{is}}{A_i} \quad (3.95)$$

$$R'_s = R_s \frac{234.5 + T}{234.5 + 25} \quad (3.96)$$

4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Yapılacak olan FDAM tasarımında sonlu elemanlar yöntemi en çok tercih edilen ve karmaşık özel problemlerin çözümü için kullanılan bir sayısal yöntem olarak açıklanabilir. Çok fazla tercih edilmesinin nedeni ise program üzerinden sadece giriş parametrelerini değiştirilerek karmaşık özel problemlerin çözümünün yapılabilmesidir. Bu yöntemdeki amaç özel problemleri basite indirgeyerek yaklaşık olsa bile sonuca ulaşmaktır.

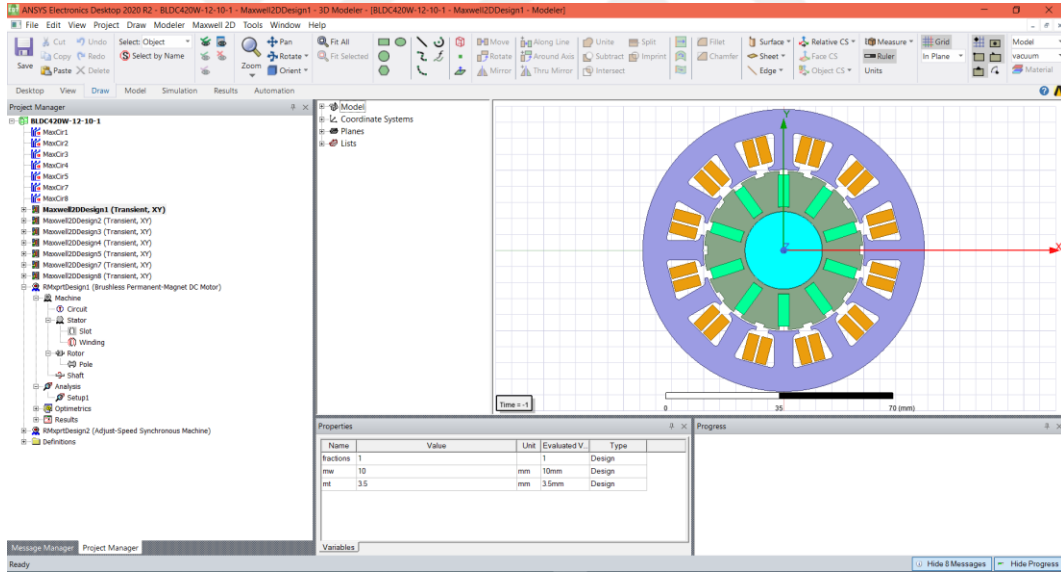
4.3.1. Simulasyon yazılımı: ANSYS Maxwell

Maxwell ile elektromekanik bileşenlerin doğrusal olmayan, geçici hareketini ve bunların tahrik devresi ve kontrol sistemi tasarımı üzerindeki etkilerini kesin olarak tanımlayabilirsiniz. Maxwell'in gelişmiş elektromanyetik alan çözücülerinden yararlanarak ve bunları entegre devre ve sistem simülasyon teknolojilerine sorunsuz bir şekilde bağlayarak, donanımda bir prototip oluşturmada çok önce elektromekanik sistemlerin performansını anlayabilirsiniz.

Maxwell, endüstriyel bileşenlerde düşük frekanslı elektromanyetik alanların güvenilir simülasyonunu sunar. Kuvvet, tork, kapasitans, endüktans, direnç ve empedans dahil olmak üzere alan parametrelerini doğru bir şekilde çözmek için 3B/2B manyetik geçici, AA elektromanyetik, manyetostatik, elektrostatik, DA iletimi ve elektrik geçici çözücülerini içerir.

Maxwell uygulama alanları; Elektrik motorları, güç elektroniği, kablosuz şarj simülasyonu, güç trafoları, manyetik aktuatörler, manyetik sensörler, indüksiyon ısıtma gibi olarak sıralanabilir.

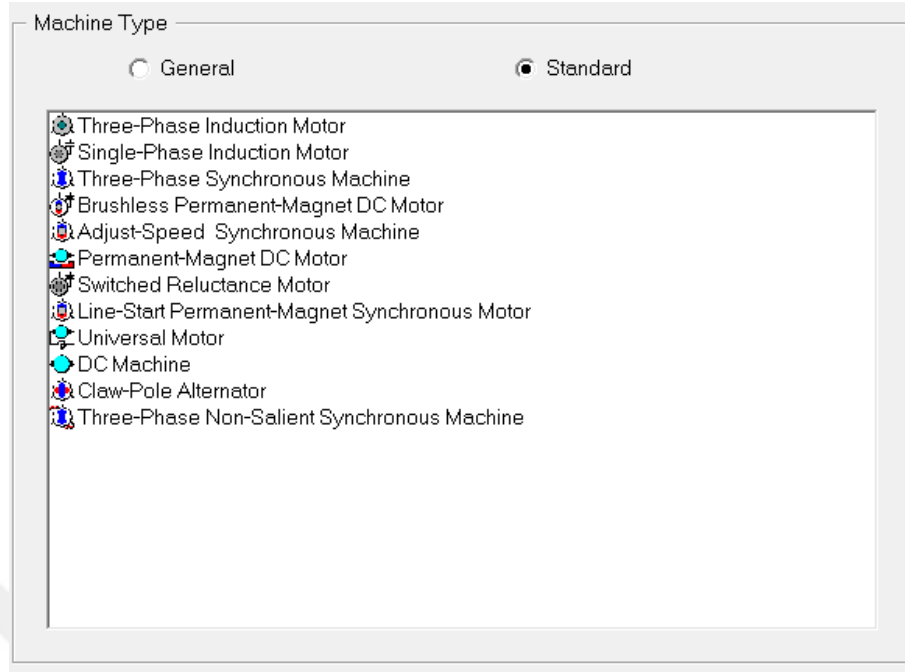
Bu tez çalışmasında tasarımı yapılacak elektrik motorunun tasarım analizleri ve analitik modelleri ANSYS Maxwell programı ile yapılmıştır. Şekil 3.41’de ANSYS Maxwell programının ara yüzü görülmektedir. Bir FDAM tasarımı yaparken ilk olarak analitik model oluşturulur ve diğer tasarım aşamalarına geçilir. Diğer bölümler de ise ilgili detaylar açıklanacaktır.



Şekil 3.41. ANSYS Maxwell programı arayüzü

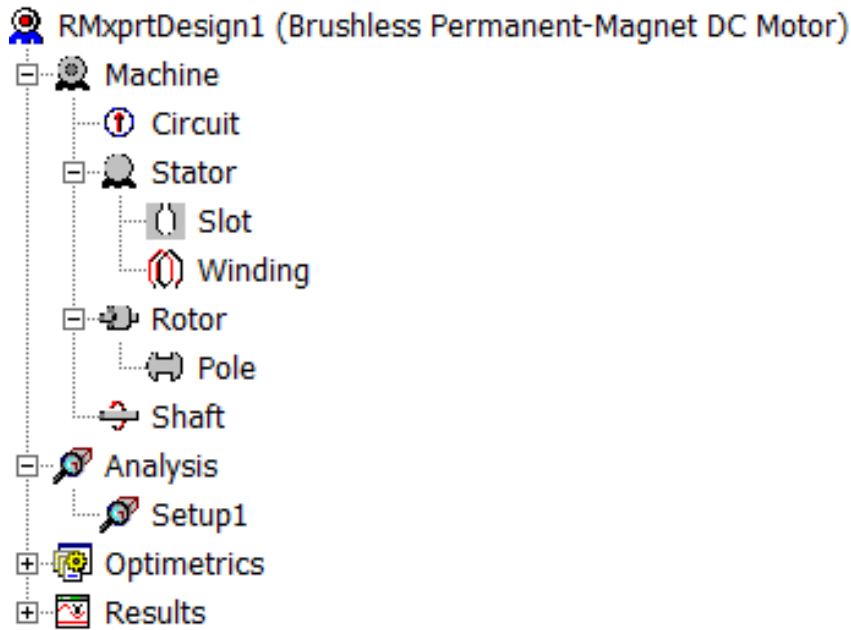
4.3.2. Maxwell RMxprt modeli

ANSYS Maxwell programı ara yüzünden ‘RMxprt’ menüsü seçilir. Bu seçilen ekran üzerinden Şekil 3.42’de görülen farklı motor tipleri seçilerek proje dosyası başlatılabilir. Burada yer alan motor tipleri tek ve üç fazlı indüksiyon motorları, üç faz senkron motorlar, FDAM , sürekli mıknatıslı doğru akım motorları, relüktans motorlar gibi hazır model dosyaları bulunmaktadır.



Şekil 3.42. ANSYS Maxwell programı makine tipleri

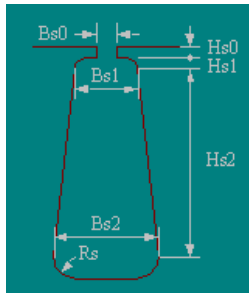
Bu tez çalışmasında tasarımı yapılacak elektrik motorunun tasarım analizleri için en uygun model FDAM'dır. 'RMxprrt' menüsü üzerinden uygun model seçildikten sonra Şekil 3.43'de görülen küçük menüler açılır. Bu küçük menülerde kendi içerisinde ayrı tablolardan oluşur. Bu tablolara girilen parametreler, Çizelge 3.13'de gösterilmiştir.



Şekil 3.43. ANSYS Maxwell RMxprrt FDAM modeli

Çizelge 3.13. Menülere göre tablo değerleri

Menüler	Parametreler	Değer
Genel	Etkin	İşaretli
	İşlem Tipi	Motor
	Yük Tipi	Sabit Güç
	Nominal Çıkış Gücü	400W
	Nominal Voltaj	200V
	Nominal Hız	1000d/d
	Çalışma Sıcaklığı	40 Derece
Motor	Makine Tipi	FDAM
	Kutup Sayısı	10
	Rotor Pozisyonu	İçten Rotorlu
	Sürtünme Kaybı	3W
	Rüzgar Kaybı	2W
	Nominal Hız	1000d/d
	Kontrol Tipi	DA
	Devre Tipi	Y3
Devre	Tetik Açısı	0
	Tetik Darbe Genişliği	120
	Diyot Kaybı	0
	Transistör Kaybı	0
Stator	Dış Çapı	88mm
	İç Çapı	50.5mm
	Uzunluk	50mm
	İstifleme Faktörü	0.95
	Sac Tipi	M400-50A
	Oluk Sayısı	12
	Oluk Tipi	4
	Kaykı genişliği	0
Oluk	Otomatik Sarım	İşaretsiz
	Paralel Dış	İşaretli
	Dış Genişliği	6mm
	Hs0	1mm
	Hs1	1.7mm
	Hs2	7.5mm
	Bs0	4mm
	Rs	1mm



Sargı	Sarım Katmanı	2
	Bağlantı Tipi	Tam Sargı
	Paralel Sarım Sayısı	1
	Sipir Sayısı	124
	Bobin Aralığı	1
	Tel Sayısı	2
	Tel Çapı	0.45mm
Son/İzolasyon	Uç Uzantı	10.5mm
	İç Taban Çapı	0mm
	Uç İç Çapı	0mm
	Uç Boşluğu	0mm
	Oluk Astarı	0mm
	Kama Kalınlığı	0mm
	Katman İzolasyonu	0.5mm
	Doluluk Oranı	0.75
Rotor	Dış Çap	49.5mm
	İç Çap	25 mm
	Uzunluk	50 mm
	Sac Tipi	M400-50A
	İstifleme Faktörü	0.95
	Kutup Tipi	4
Kutup	Mıknatıs Tipi	N35SH
	Mıknatıs Kalınlığı	3.5mm
	Mıknatıs Uzunluğu	10mm
Mil	Manyetik Mil	İşaretsiz

4.4. Spoke Tipi 10 Kutuplu FDAM'ın Prototip Üretimi

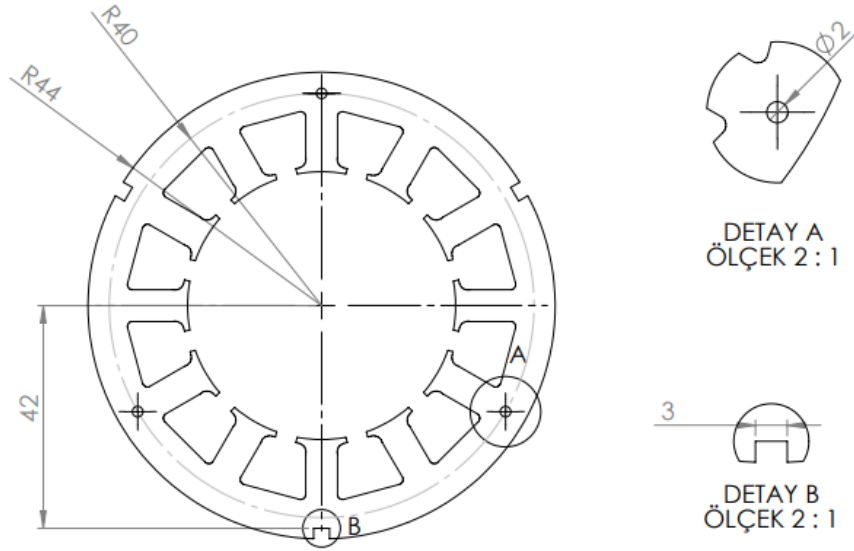
Bu bölümde spoke tipi FDAM üretim ve imalat zorluğu gibi etmenler göz önünde bulundurulduğunda prototip imalat esnasında gözlenen üretim aşamaları anlatılacak ve dikkat edilmesi gereken konular üzerinde durulacaktır.

4.4.1. Silisyumlu elektriksel sac temini ve işlenmesi

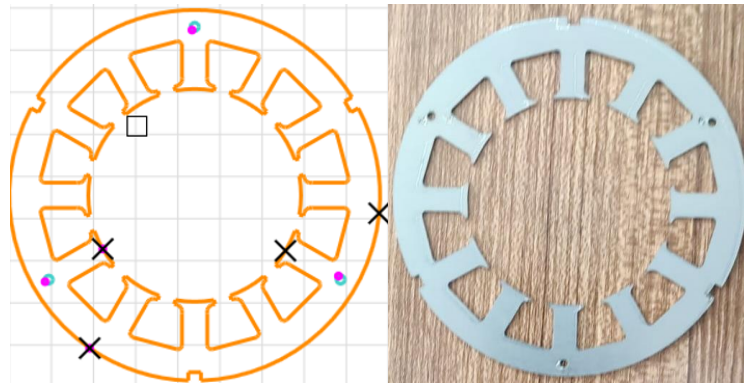
Bir elektrik motorunda manyetik alanı rahatlıkla oluşturmak adına silisli elektrik saclar kullanılmaktadır. Bu silisli saclar 0.3, 0.5 mm vb kalınlıklarda olabilir. Silisli elektrikli sacların motor tasarımında belirlenen ölçülere gelmesi için belirlenmiş kalınlıktaki saclar

farklı birleştirme metodları ile bir paket haline getirilir. Tasarımı yapılmış motor da stator ve rotor tarafında M400-50A tipinde silisli elektrik sacı kullanılmıştır. Bölüm 4.2.5’de kullanılan sac tipinin farklı frekans aralığında kayıpları ve manyetik özellikleri gösterilmiştir.

ANSYS Maxwell programı ile tasarlanmış olan laminasyonların işlenmesi için mevcut tasarım Solidworks programı ile CAD verisine dönüştürülmüştür. Şekil 3.44’de görülen teknik çizim tedarikçi firmaya iletilmiştir. Tedarikçi firma üzerinden silisli sac Şekil 3.45’de görülen başlangıç noktası ile lazer kesim yapılarak adet bazlı 0.5 mm kalınlığında kesilmiş ve silisli sacın işleme fazı tamamlanmıştır. Stator sacın ölçüm raporları Ek:1’de verilmiştir.



Şekil 3.44. M400-50A silisli sacın stator paketi için CAD çizimi



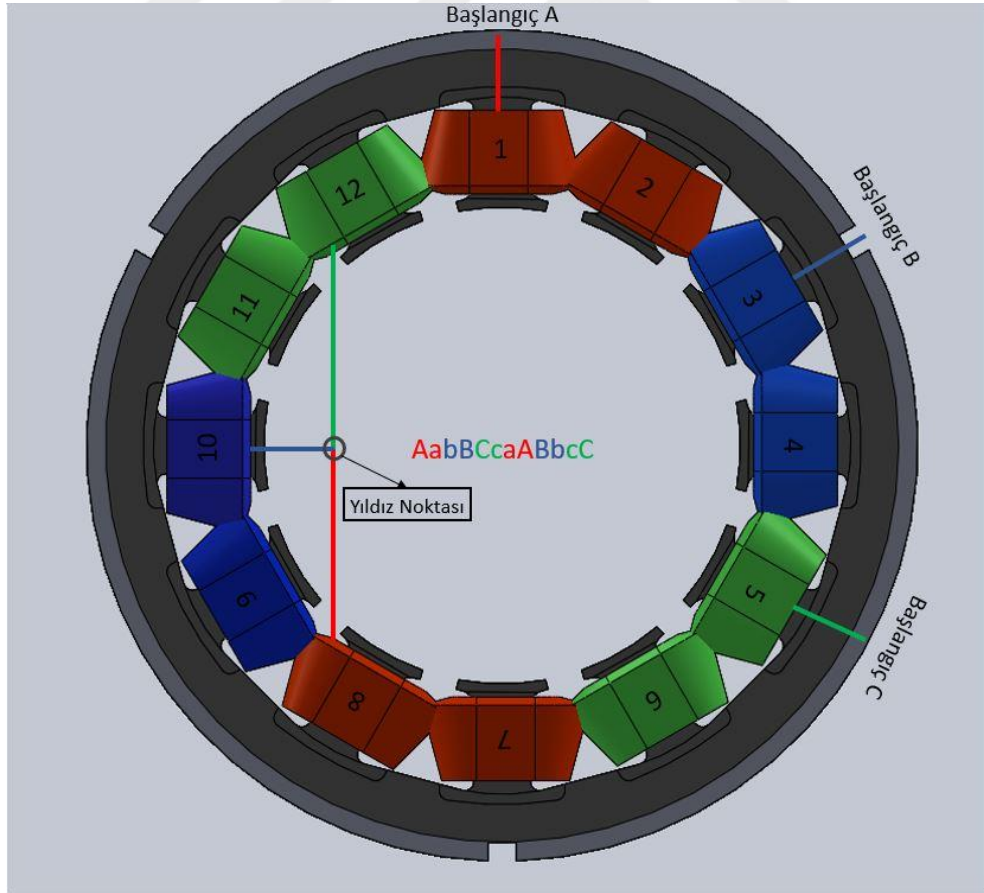
Şekil 3.45. Lazer kesim yapılan stator silisli sacı

sağlamak için bir diğer husus ise izolasyon vernikleridir. Şekil 3.47’de sarım esnasında oluklarda kullanılan yalıtım malzemesi görülmektedir.



Şekil 3.47. Motor sargı yalıtım malzemesi

İletken malzeme öncesi Şekil 3.48’de görülen sarım şeması ve Çizelge 3.13’de yer alan sargı özellikleri dikkate alınarak sarım işlemine başlanır.



Şekil 3.48. FDAM sarım şeması

Stator tarafında oluk yalıtımı yapıldıktan sonra iletken malzeme seçimi yapılır. Bu tasarımda bakır tel kullanılmıştır.Şekil 3.49’da sarım aşamasındaki stator ve sarım sonrası uç uzantı dediğimiz ölçü kumpas ile ölçülmektedir. Sargı uç uzantı motor direncini etkilediğinden analizler esnasında kontrol edilmelidir.



Şekil 3.49. Sarım şemasına göre sargıları yapılmış stator ve uç uzantı ölçümü

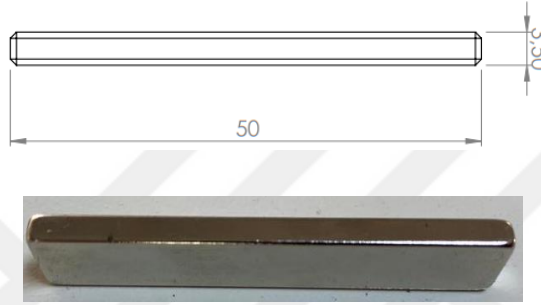
Şekil 3.50’de sarım işlemi tamamlanmış olan stator tekrardan izolasyon verniği ile kaplanır. Daha sonra kablo uçları çıkartılan stator hazır hale getirilir.



Şekil 3.50. Sarımı tamamlanmış stator

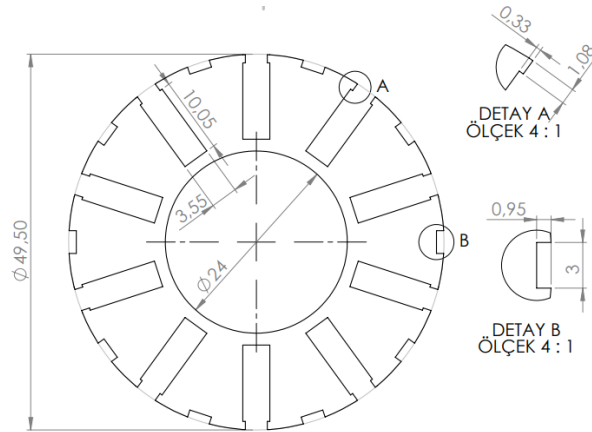
4.4.4. Mıknatıs temini ve rotor paketinin hazırlanması

Tasarımı yapılmış bir elektrik motorunda en kritik nokta bir mıknatısın üretilmesi aşamasıdır. Bu konuda Türkiye’de üretim yapan firma bilgimiz dahilinde yoktur. Tasarımı yapılmış FDAM için belirlenen ölçüler ve özellikteki mıknatıslar yurt dışından getirtilmiştir. Bölüm 3.2.4’de FDAM’da kullanılan mıknatıs tipleri hakkında açıklama yapılmış olup tasarımı yapılmış motorda Şekil 3.51’de görülen N35SH mıknatıs kullanılmıştır.

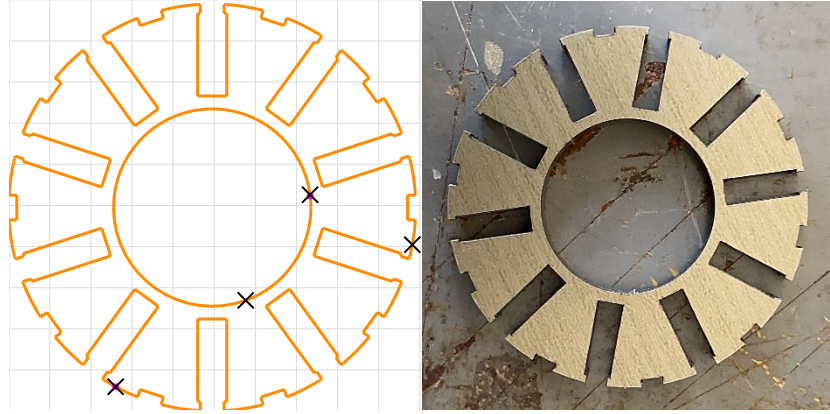


Şekil 3.51. N35SH mıknatıs

Rotor paketi hazırlanmadan önce M400-50A silisli sac rotor paketi mevcut ölçülere göre lazer kesim yapılmıştır. ANSYS Maxwell programı ile tasarlanmış olan laminasyonların işlenmesi için mevcut tasarım Solidworks programı ile CAD verisine dönüştürülmüştür. Şekil 3.52’de görülen teknik çizim tedarikçi firmaya iletilmiştir. Tedarikçi firma üzerinden silisli sac Şekil 3.53’de görülen başlangıç noktası ile lazer kesim yapılarak adet bazlı 0.5 mm kalınlığında kesilmiş ve silisli sacın işleme fazı tamamlanmıştır. Rotor sacın ölçüm raporları Ek:2’de verilmiştir.

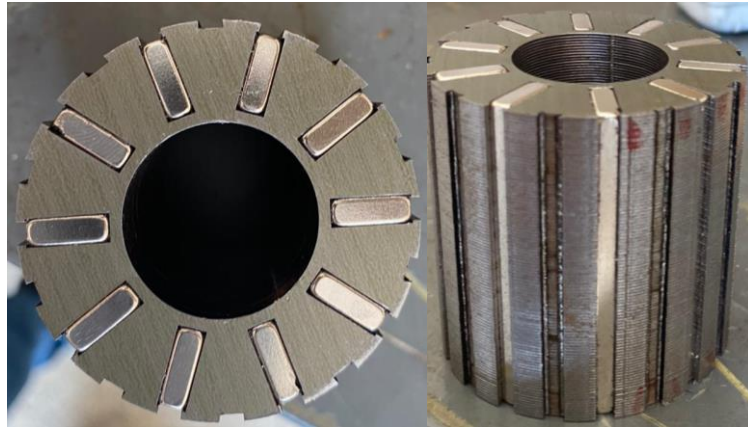
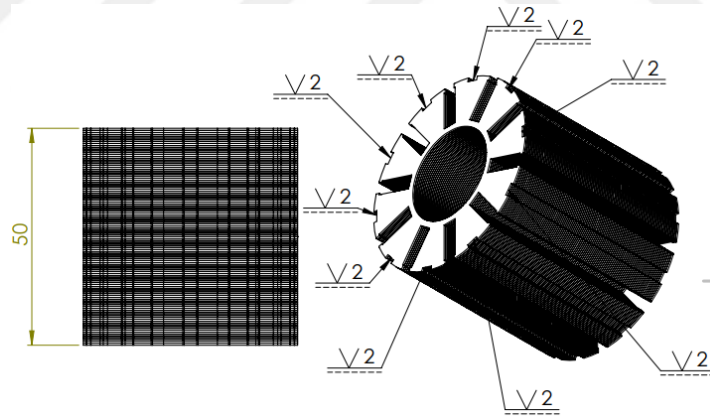


Şekil 3.52. M400-50A silisli sacın rotor paketi için CAD çizimi



Şekil 3.53. Lazer kesim yapılan rotor silisli sacı

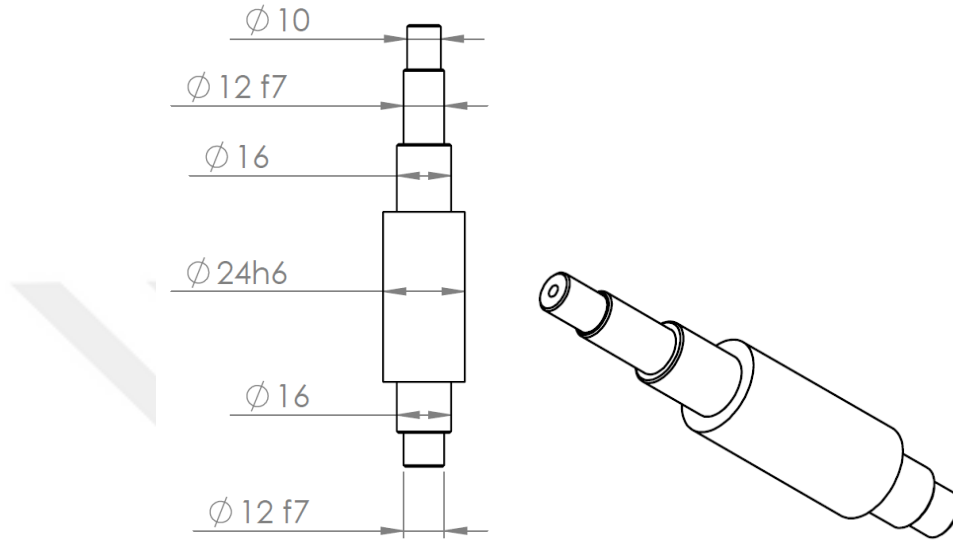
İşleme fazı biten saclar için bir sonraki aşama lazer kaynak ile paketleme fazının oluşturulmasıdır. Laminasyonlar onar adetli gruplara ayrılarak CAD verisinde belirtilen kaynak noktaları üzerinden lazer kaynak yapılır. Daha sonra bu gruplar kendi arasında lazer kaynak olacak şekilde birleştirilir ve Şekil 3.54’de görüldüğü gibi mıknatıslar yuvaya geçirildikten sonra rotor paketi de hazırlanmış olur.



Şekil 3.54. Lazer kaynak yapılarak paketlenmiş rotor

4.4.5. Motor gövdesi ve rotor milinin işlenmesi

Rotor paketi tamamlandıktan sonra rotorun manyetik alanın etkisi ile dönmesi adına Şekil 3.55’de görülen bir mil tasarımı yapılmış ve üretilmiştir. Rotor milinin uygunluk sertifikası ve ölçüm raporu Ek:3’de verilmiştir



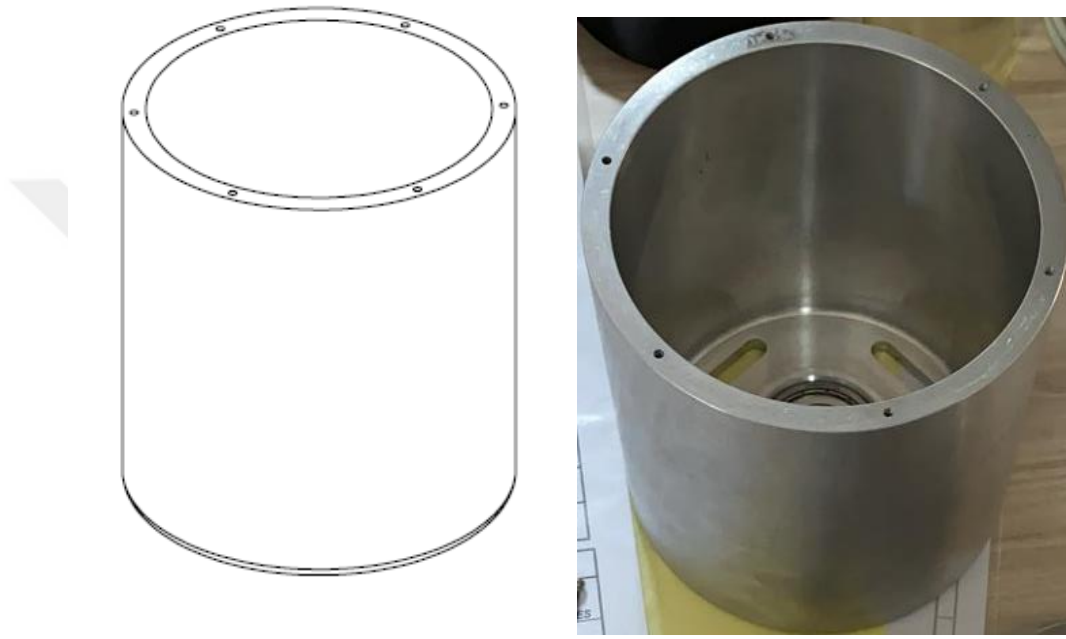
Şekil 3.55. Rotor mil CAD tasarımı

Şekil 3.56’da ise rotor paketine sıkı geçirilmiş rotor mili ve rotor paketi görülmektedir.

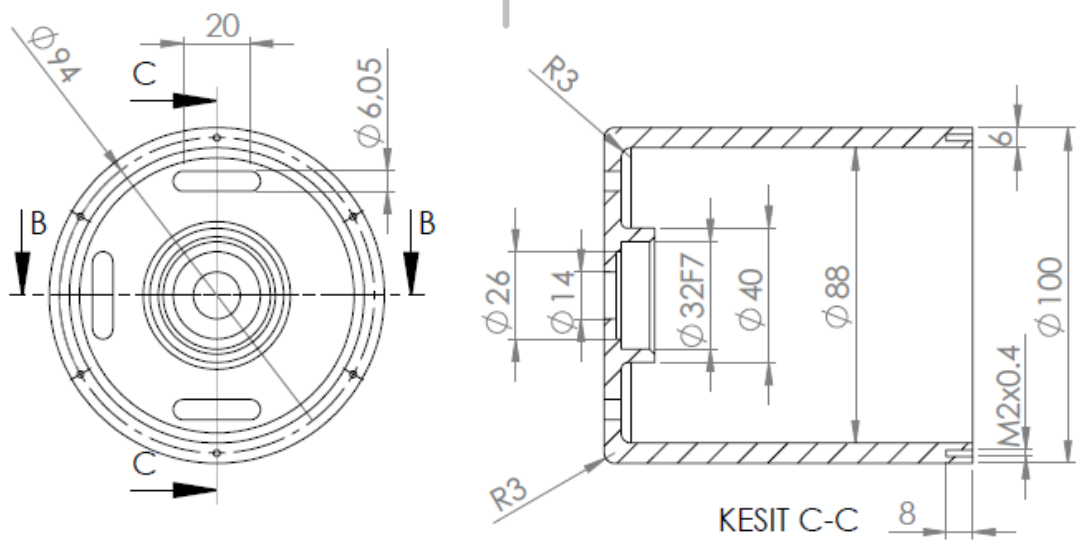


Şekil 3.56. Rotor paketine sıkı geçirilmiş rotor mili

Stator ve rotor paketlerinin tek bir yapı içerisinde durması için Şekil 3.57’de görülen bir motor gövdesi tasarlanmıştır. Bu motor gövdesi Alüminyum malzemeden yapılmıştır. Şekil 3.58’de ayrıca rotor milinin oturacağı bir rulman yatağı ile milin eş merkezliliği sağlanmaya çalışılmıştır. Motor gövdesinin uygunluk sertifikası ve ölçüm raporları Ek:4’de verilmiştir.



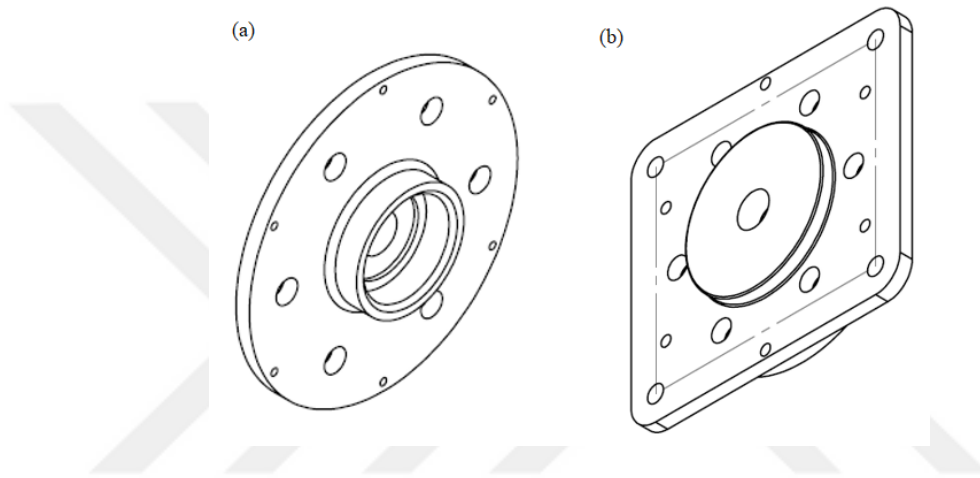
Şekil 3.57. Motor gövdesi



Şekil 3.58. Motor gövdesi rulman yatağı ve iç kesit

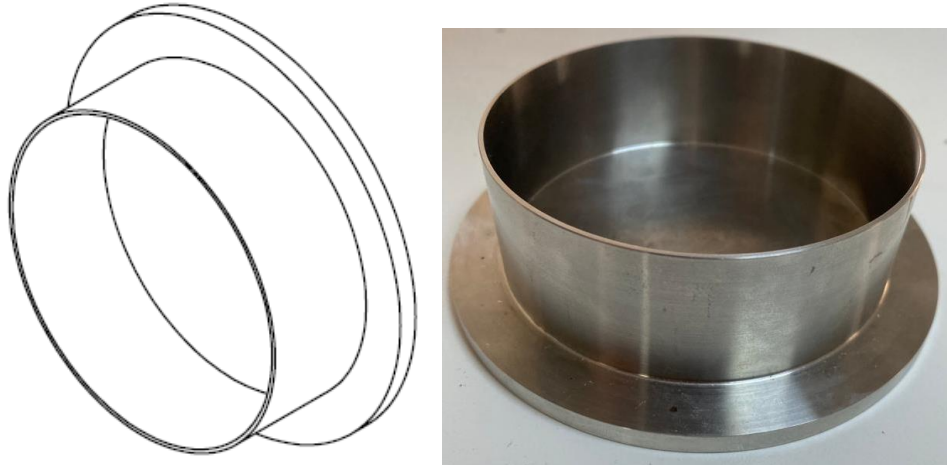
4.4.6. Kapak ve stator çakma aparatının işlenmesi

Diğer mekanik parçalardan biri ise motor kapağıdır. şekil 3.59’da görülen 2 adet motor kapağı üretimi yapılmıştır. Bu kapaklardan şekil 3.59.a’daki yuvarlak tasarım planet dişli modüllere rahat entegre olması içindir. Yuvarlak motor kapağı sertifikası ve ölçüm raporları Ek:5’de verilmiştir. şekil 3.59.b’deki kare tasarımı kapak ise mevcut motor testlerinin tamamlanması için tasarlanmış ve üretilmiştir. Kare motor kapağı teknik resmi Ek:6’da verilmiştir.



şekil 3.59. Motor kapakları a) yuvarlak kapak tasarımı b) kare kapak tasarımı

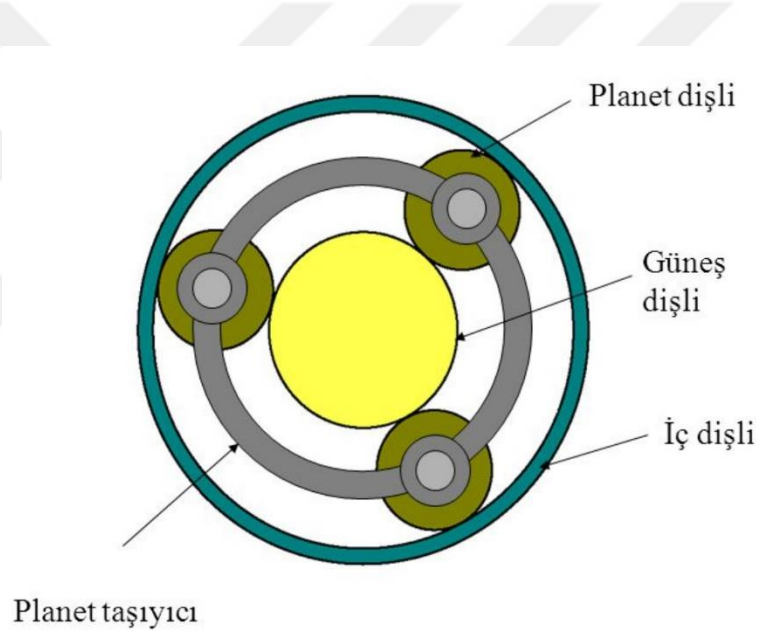
Bir diğer parçamız ise motor gövdesine stator paketinin oturtulması için yapılmıştır. şekil 3.60’da stator çakma aparatı görülmektedir. Bu parça ile beraber stator motor gövdesine oturtulmaktadır. Bu işlem için indüksiyon prensibi kullanılmaktadır.



şekil 3.60. Stator akma aparatı

4.4.7. Planet redüktör sisteminin tasarımı ve imalatı

Planet dişli sistemler Şekil 3.61’de görüleceği üzere merkezde bir güneş dişlisi, etrafında iç dişli ve güneş dişlisi ile iç dişlisi arasında yer alan birkaç planet dişlisinden oluşur. Planet dişli sistemler kompakt dişli kombinasyonu nedeniyle küçük hacimlerde daha yüksek verime sahiptir. Yüksek verimlilik planet dişli sistemlerinin rüzgar türbinlerinde, otomobillerde, robotlarda v.b alanlarda tercih edilme sebebidir. Fakat planet dişli sistemlerinin bir çok avantajı olmasına rağmen, üretim maliyetlerinin fazla olması ve uygulamalarda hala gürültü titreşim problemleri olması planet dişli sistemlerinin teorik bir araştırma konusu olarak kalmayacağını ve büyük pratik uygulama değerine de sahip olduğu göstermektedir.



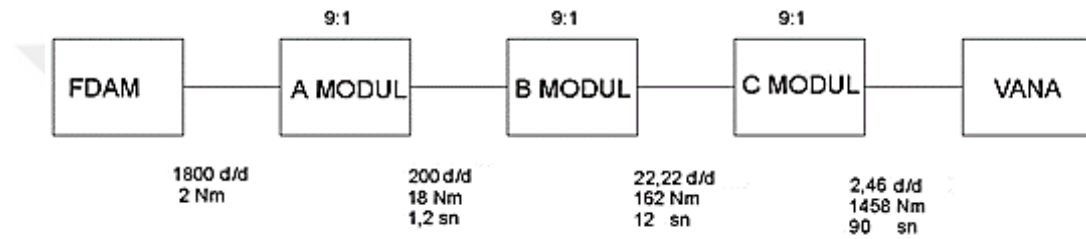
Şekil 3.61. Basit planet dişli sistemi

Diğer mekanik parçalardan biri olan planet dişli sistemleri, ülkemizde pek fazla üretici tarafından devreye alınmış bir dişli sistemi değildir. Ülkemizdeki hemen tüm redüktör üreticilerinin temel ürün gamında planet dişli oldukça az yer bulabilmektedir. Oysa ki, bu tür dişli sistemleri küçük hacimlerde yüksek indirgeme oranları verebilmektedirler. Bu tez çalışmasında planet dişli sisteminin Solidworks programı kullanılarak 3B kavramsal modeli oluşturulmuştur.

Tasarımı yapılacak olan planet dişli sistemi üç ayrı modülde (A - B - C) değişik tork ve hız giriş çıkış gereksinimlerine sahip, birbirleri ile doğrudan bağlanabilecek şekilde

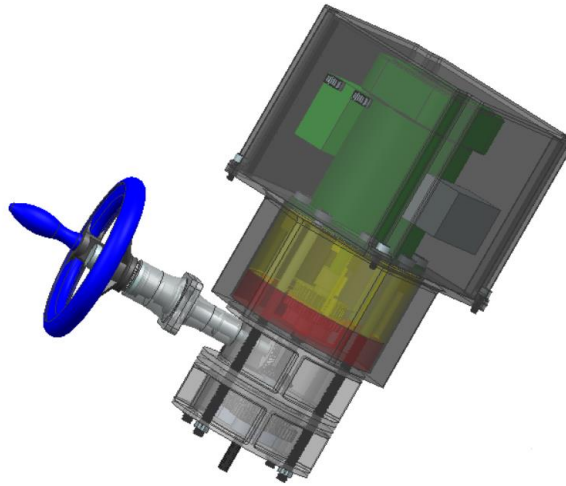
modüler yapı tasarımı içermektedir. Bu modüller, düşük kapasiteli vanalar için tek modül (A), orta kapasiteli vanalar için iki modül (A-B) ve yüksek kapasiteli vanalar için üç modül (A-B-C) şeklinde konfigürasyonlar ile ihtiyacı karşılayabilecektir. Tüm modüller A modülü üstüne yerleştirilebilecek olan tek tip bir motordan sürülecektir. Yapılacak olan bu çalışmada ise sadece A modülü ve vana entegrasyonu üzerine çalışma yapılacaktır.

Şekil 3.62’de ise 1800 d/d 2 Nm’lik redüktörsüz elektrik motoruna eklenen planet dişli sistemine A-B-C modüllerinin endüstriyel vanalara adapte edilmesi durumunda tork,hız ve açma-kapama süresi görülmektedir.



Şekil 3.62. 1800 d/d 2 Nm’lik motorunun vana entegrasyonu

Şekil 3.63’de ise 1800 d/d 2 Nm’lik redüktörsüz elektrik motoruna eklenen A-B-C modüllerinin endüstriyel vanaya adapte edilmesi için oluşturulan Solidworks çizimi görülmektedir.



Şekil 3.63. 1800 d/d 2 Nm’lik motorun A-B-C modülüne entegrasyonu

Model oluşturulmadan ilk önce dişli tipinin seçimi önemli kriterlerden biridir. Dişli tiplerini gruplamak gerekirse piyasada sık olarak kullanılan dişli tiplerini düz, helisel, konik ve sonsuz dişliler olarak dört grupta incelenebilir.

İmalat yönteminin kolay, maliyetinin düşük olması ve eksenel yönde kuvvet aktarmamasından dolayı tasarlanacak olan planet dişli sisteminde düz dişli tipi kullanılacaktır.

Dişli tipi belirlendikten sonra dişli sayılarının hesabının yapılması gerekmektedir. Bir düz pinyon ve dişlideki en az diş sayısı, bire bir dişli oranı titreşim girişimi olmadan N_p olarak belirtilir. Düz dişliler için bu diş sayısı, eğer birden fazla diş kontak halindeyse N_p aşağıdaki denkleme göre belirlenir.

$$N_p = \frac{2k_d}{(1 + 2m)\sin^2\phi} (m + \sqrt{m^2 + (1 + 2m)\sin^2\phi}) \quad (3.97)$$

Yani tam derinlikli dişler için $k_d = 1$, saplama dişler için 0.8, basınç açısı ϕ , m_o ise maksimum diş sayısının minimum diş sayısına oranı olarak belirtilir. Belirli bir pinyona sahip maksimum dişli sayısı N_G olarak ifade edilir. Maksimum dişli sayısını hesaplamak için ise aşağıdaki denklem kullanılır.

$$N_G = \frac{N_p^2 \sin^2\phi - 4k_d^2}{4k_d - 2N_p \sin^2\phi} \quad (3.98)$$

$$m_o = \frac{N_G}{N_p} \quad (3.99)$$

Yukarıdaki formüllere göre hesaplanan diş sayıları ise,

$$N_p = \frac{2k_d}{(1 + 2m_o)\sin^2\phi} (m_o + \sqrt{m_o^2 + (1 + 2m_o)\sin^2\phi}) \quad (3.100)$$

$$N_p = \frac{2x1}{(1 + 2x2)\sin^2 20^\circ} (2 + \sqrt{2^2 + (1 + 2x2)\sin^2 20^\circ}) \quad (3.101)$$

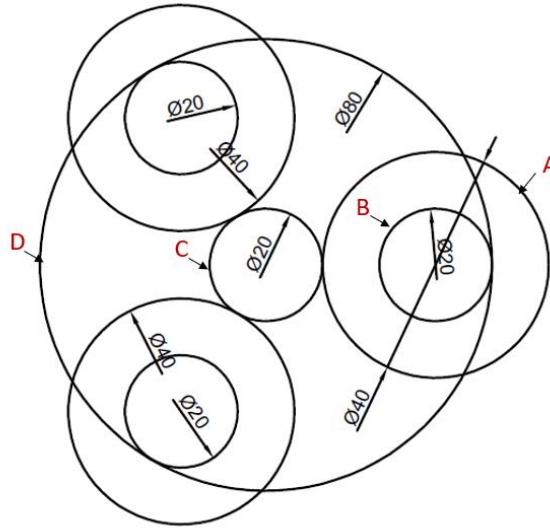
$$N_p = 14,17 = 15 \quad (3.102)$$

$$N_G = \frac{N_p^2 \sin^2\phi - 4k_d^2}{4k_d - 2N_p \sin^2\phi} \quad (3.103)$$

$$N_G = \frac{15^2 x \sin^2 20^\circ - (4x1)^2}{4x1 - 2x15x \sin^2 20^\circ} \quad (3.104)$$

$$N_G = 45,48 = 46 \quad (3.105)$$

Hesaplar sonucunda çıkan diş sayılarına baktığımızda minimum dişli sayısı 15, maksimum dişli sayısı ise 46 olarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan sınırlar içerisinde kalmak şartı ile genel diş boyutlarındaki tasarım Şekil 3.64’de parametreler ise Çizelge 3.14’de gösterilmiştir.



Şekil 3.64. Planet dişli genel diş boyutları

Çizelge 3.14. Planet dişli tasarım parametreleri

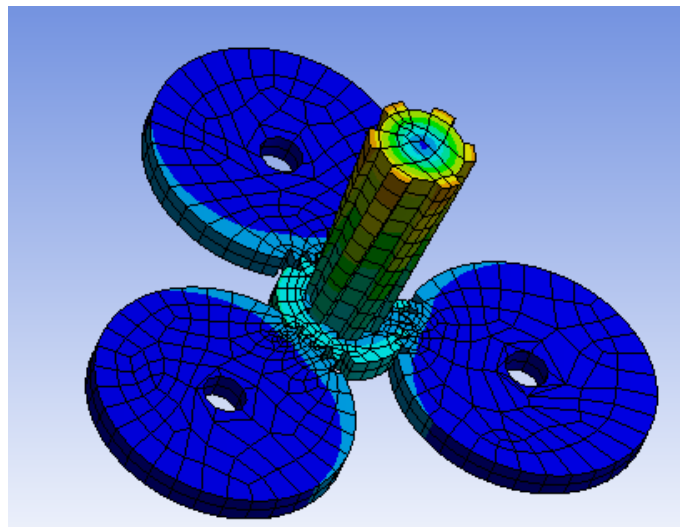
<i>Parça İsmi</i>	<i>Parça Gösterimi</i>	<i>Diş Sayısı /N_d</i>	<i>Diş Kalınlığı /mm</i>	<i>Modul/m_o</i>	<i>Basınç Açısı /ϕ</i>
<i>Güneş Dişi</i>	<i>C</i>	20	15	1	20
<i>Birincil Planet Dişli</i>	<i>A</i>	40	15	1	20
<i>İkincil Planet Dişli</i>	<i>B</i>	20	15	1	20
<i>İç Dişli</i>	<i>D</i>	80	15	1	20

İç dişlinin güneş dişlide 1/9 oranı sağlaması için belirlenen değerler dahilinde 4 kat olarak alınmıştır. Yapılan hesaplamalar ve tasarım parametreleri çıkarıldıktan sonra bu çalışmalar Şekil 3.65’de görüldüğü üzere Solidworks programı ile 3B olarak hazırlanmıştır.



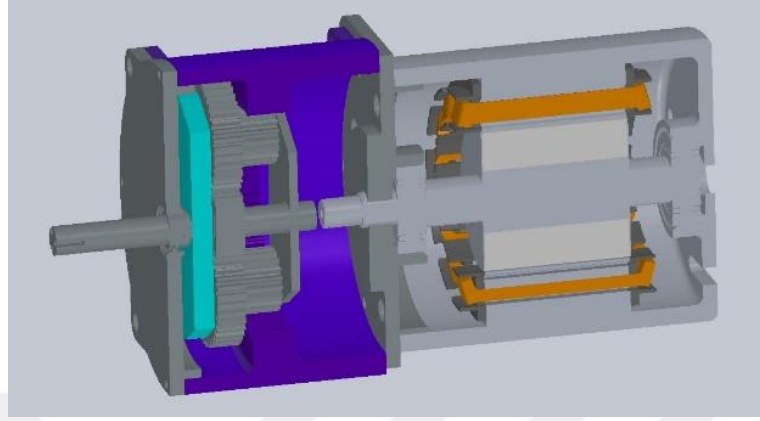
Şekil 3.65. 1/9 aktarma oranına sahip planet redüktör

Daha sonra Şekil 3.66’da planet dişliler üzerinde yapılan burulma analizi ile beraber giriş şaftı üzerindeki dayanım ve esneme miktarlarının tespit edilmesini sağlanarak ve tasarım iyileştirmesi için bir girdi oluşturulmuştur.



Şekil 3.66. Planet redüktör giriş şaftı burulma analizi

Şekil 3.67’de planet redüktör kutusu ve entegre edilmiş motorun Solidworks CAD modeli görülmektedir.



Şekil 3.67. Redüktör ve motor entegrasyonu 3B modeli

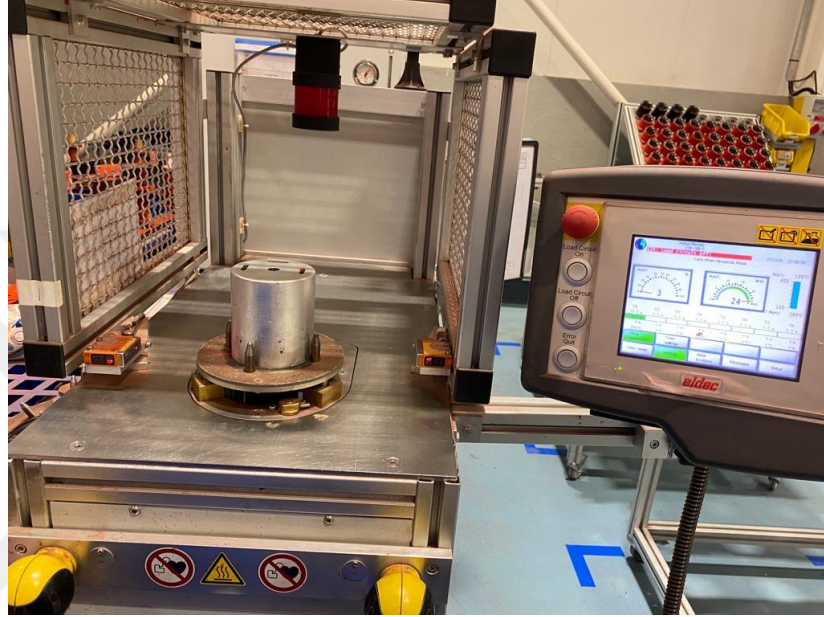
Tasarım ve analiz çalışmaları ile beraber ölçüleri belirlenmiş ve tasarımı tamamlanmış planet redüktörün CAD dosyası 3B imalat yapılan firmaya gönderilmiştir. Şekil 3.67’de ise 3B imalatı gerçekleştirilen planet redüktör kutusu ve motor entegrasyonu görülmektedir.



Şekil 3.68. Planet redüktör kutusu ve motor entegrasyonu

4.4.8. Motorun son görünüşü

Tüm parçalar işlendikten sonra sarımı tamamlanmış stator, stator çakma aparatı ile beraber motor gövdesine geçirilir. Bu esnada Şekil 3.69'da yer alan indüksiyon fırını kullanılarak üretimi tamamlanmış motor gövdesi fırın içindeki yuvaya oturtturulur ve sıcaklık 260 dereceye ayarlanır.



Şekil 3.69. İndüksiyon fırını ile motor gövdesinin ısıtılması

Motor gövdesi yeterli sıcaklığa ulaştıktan sonra Şekil 3.70'de stator çakma aparatı ile stator gövdeye geçirilmiş olur.



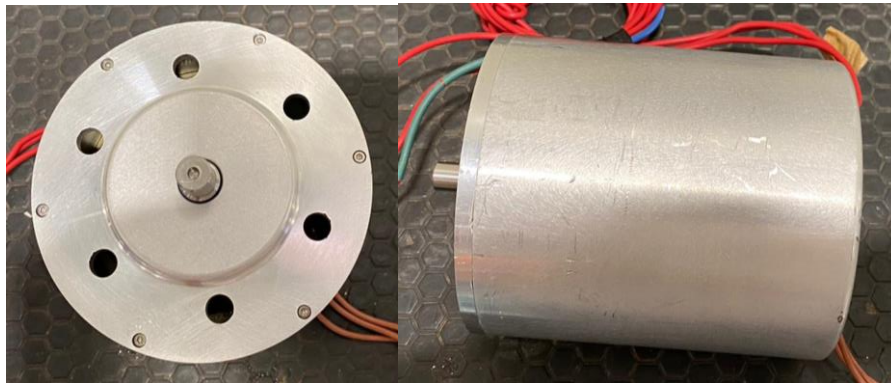
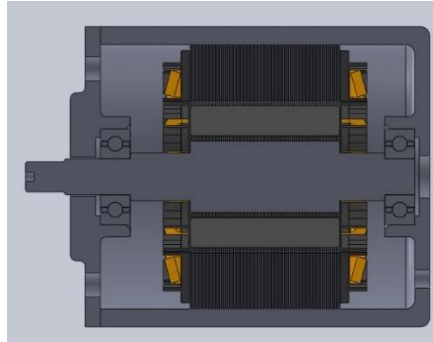
Şekil 3.70. Statorun motor gövdesine geçirilmesi

Daha sonra Şekil 3.71’de rotor gövdeye geçirilir. Yataklamaların düzgün yapılması için rulman yataklarına sıkı geçecek şekilde rotor miline 2 adet 62012ZR model FAG marka rulman sıkı geçirilmiştir.



Şekil 3.71. Rotorun gövdeye geçirilmesi ve sargıların son hali

Yataklamalar yapıldıktan sonra üst kapak kapatılması ile birlikte motorun son hali ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.72’de tasarımı yapılmış FDAM’ın Solidworks 3B Cad çizimi ve motorun son hali gösterilmiştir.



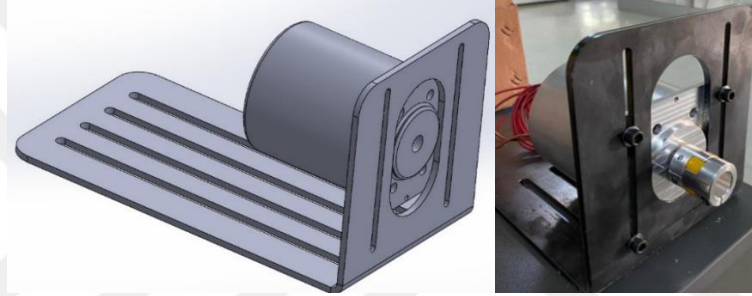
Şekil 3.72. FDAM’ın solidworks çizimi ve üretimi yapılmış son hali

4.5. Deneysel Çalışmalar

Bir FDAM'ın prototip üretimi yapıldıktan sonra yük testleri için eddy akımı frenleri, dinamometreler ve yükleme motorları gibi farklı metotlar kullanılmaktadır. Prototip üretimi yapılan motor dinamofren test düzeneği ile yük testleri yapılmıştır.

4.5.1. Test düzeneği için fikstür hazırlanması

Prototip üretimi yapılmış FDAM'ın eş merkezli olarak kaplin vasıtası ile test düzeneğine uygun bir şekilde bağlanması gerekmektedir. Bundan dolayı motorun dikey ve yatay yönde test düzeneğine kolayca bağlanması için bir fikstür tasarımı yapılmıştır. Şekil 3.73'de tasarımı yapılan test fikstürü ve motor bağlantısı görülmektedir.



Şekil 3.73. Test düzeneği için motor test fikstürü

4.5.1. Test düzeneği

Test düzeneğinin amacı, üretilen prototip motoru uygun koşullarda yükleme yaparak motorun parametrelerini elde etmektir. Bu karakteristik özellikleri elde etmek için Şekil 3.74'de yer alan test sistemi kullanılmıştır.



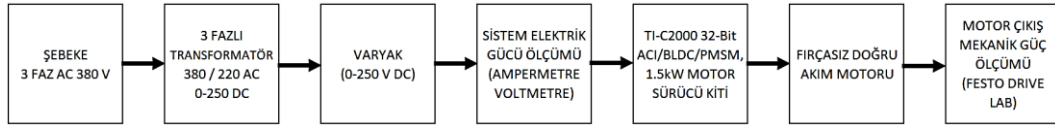
Şekil 3.74. Test düzeneği

Çizelge 3.15’de test sisteminde kullanılan cihazların genel tanımları görülmektedir.

Çizelge 3.15. Test sisteminde yer alan cihazlar

Numara	Cihaz İsmi
1	3 FAZLI TRANSFORMATÖR 380 / 220 AA
2	VARYAK (0-250 V DA)
3	UNI-T UT61C (Akım Ölçümü İçin)
4	FLUKE 115 (Gerilim Ölçümü İçin)
5	TI - C2000 32-Bit ACI/BLDC/SMSM, 1.5kW MOTOR SÜRÜCÜ KİTİ
6	FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU
7	MOTOR ÇIKIŞ MEKANİK GÜÇ ÖLÇÜMÜ (FESTO DRIVE LAB)

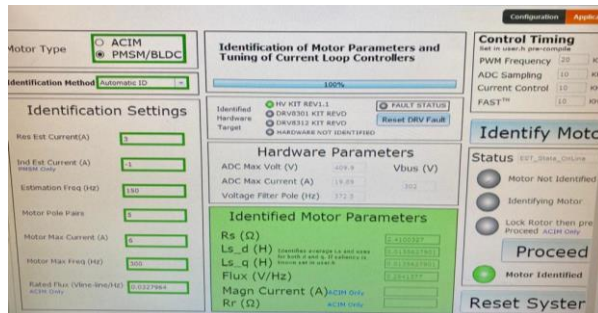
Yukarıda yer alan çizelgede ki cihazlara göre ölçüm sonuçlarını alabilmek için Şekil 3.75’de yer alan test sistem diyagramı kullanılmıştır.



Şekil 3.75. Test sistemi diyagramı

Test sisteminde yapılan elektriksel ölçümler sürücünden önce yapıldığı için test sonuçları sürücü ve motor birlikte sisteme ait değerlerdir.

Ölçüm sonuçlarını alabilmek bir diğer husus ise FDAM’ın sisteme tanıtılması gerekmektedir. TI – C2000 motor sürücü kitinin kullandığı ara yüz ise Şekil 3.76’da gösterilmiştir. Mevcut ara yüz aracılığı ile FDAM sisteme tanıtılır ve motor parametreleri belirlenmiş olur.



Şekil 3.76. TI- C2000 sistem ara yüzü

5. BULGULAR

Bu bölümde tasarımı yapılacak olan FDAM'ın kriterleri belirlenecek ve bu belirlenen parametreler ile beraber yüksek tork oranına sahip redüktörsüz spoke tipi elektrik motorunun tasarımı sonlu elemanlar analiz ve test sonuçları verilecektir.

FDAM motoru tasarımı için ANSYS Maxwell programı kullanılmış ve program ile beraber detaylar incelenmiştir. Elde edilen bilgiler ışığında spoke tipi rotora sahip model oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi ve analizler ile beraber motor tasarımı tamamlanmıştır. Prototip üretimi yapılan FDAM'ın testleri yapılarak performansı doğrulanmıştır.

5.1. Tasarım Sonuçları

Analitik olarak modellenen on kutuplu spoke tipi FDAM'ın tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz aşamaları tamamlanarak tasarım doğrulanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Bu aşamaların detayları ise alt başlıklarda anlatılmıştır.

5.2. Analiz Sonuçları

Belirlenen parametrelere göre tasarımı yapılan motorun nümerik analizleri ANSYS RMXprt ile FEM tabanlı analizleri 2 boyutlu olarak ANSYS Maxwell yazılımları ile yapılmıştır. Yapılan çalışmanın akış diyagramı Şekil 3.77'de gösterilmiştir.

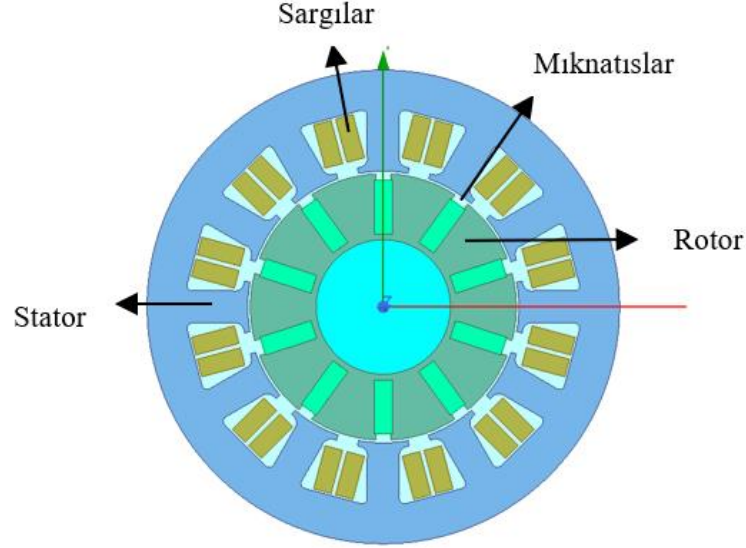


Şekil 3.77. Maxwell analiz akış diyagramı

5.2.1. RMXprt yazılımı ile analiz sonuçları

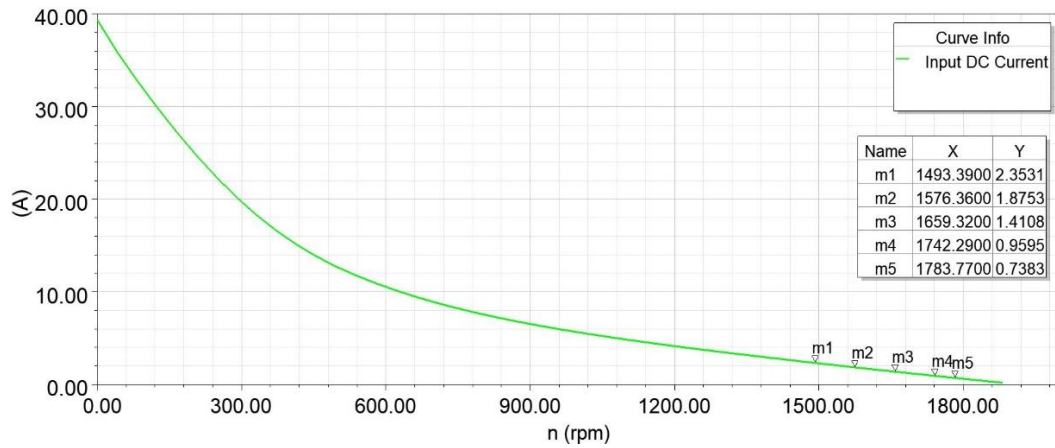
Tüm boyutlandırma ve optimizasyon çalışmalarının sonunda verim ve diğer çıkış parametrelerinin istenilen seviyelerde kalmasını sağlamak için parametrik çözümler yapılarak 400 W motor modeli çıkarılmıştır.

400W motor için oluşturulan 10 kutuplu 12 oluklu spoke tipi FDAM ANSYS Maxwell 2B geometrisi Şekil 3.78’de görülmektedir.



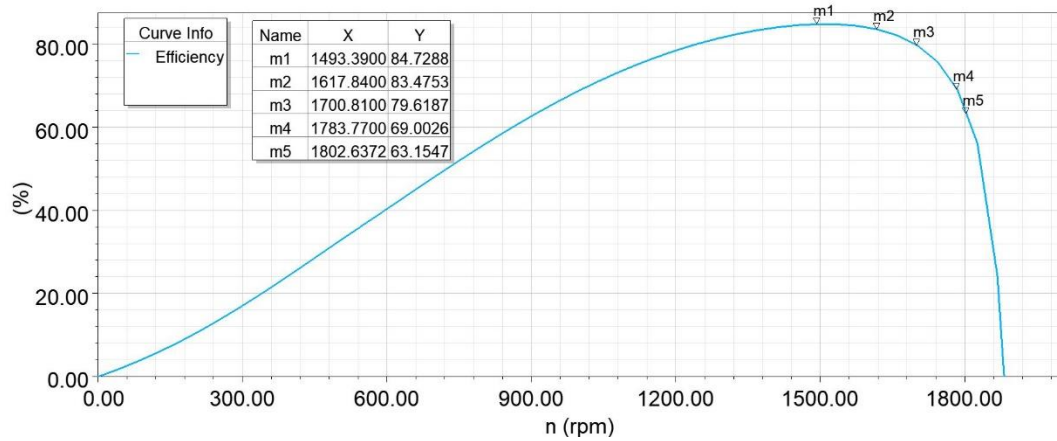
Şekil 3.78. 2B FDAM modeli

Şekil 3.79’da motor hızındaki değişime bağlı olarak Maxwell RMxprt elde edilen motor akımındaki değişim grafiği ve farkı noktalardan alınan hıza göre akım değerleri görülmektedir.



Şekil 3.79. Motor hızına göre motor DA kaynak akımının değişimi

Şekil 3.80’de ise motor hızındaki değişime bağlı olarak Maxwell RMxprt elde edilen spoke tipi motorun farklı noktalardan alınan hız değerlerine göre verim değerleri ve hız-verim grafiği gösterilmektedir.

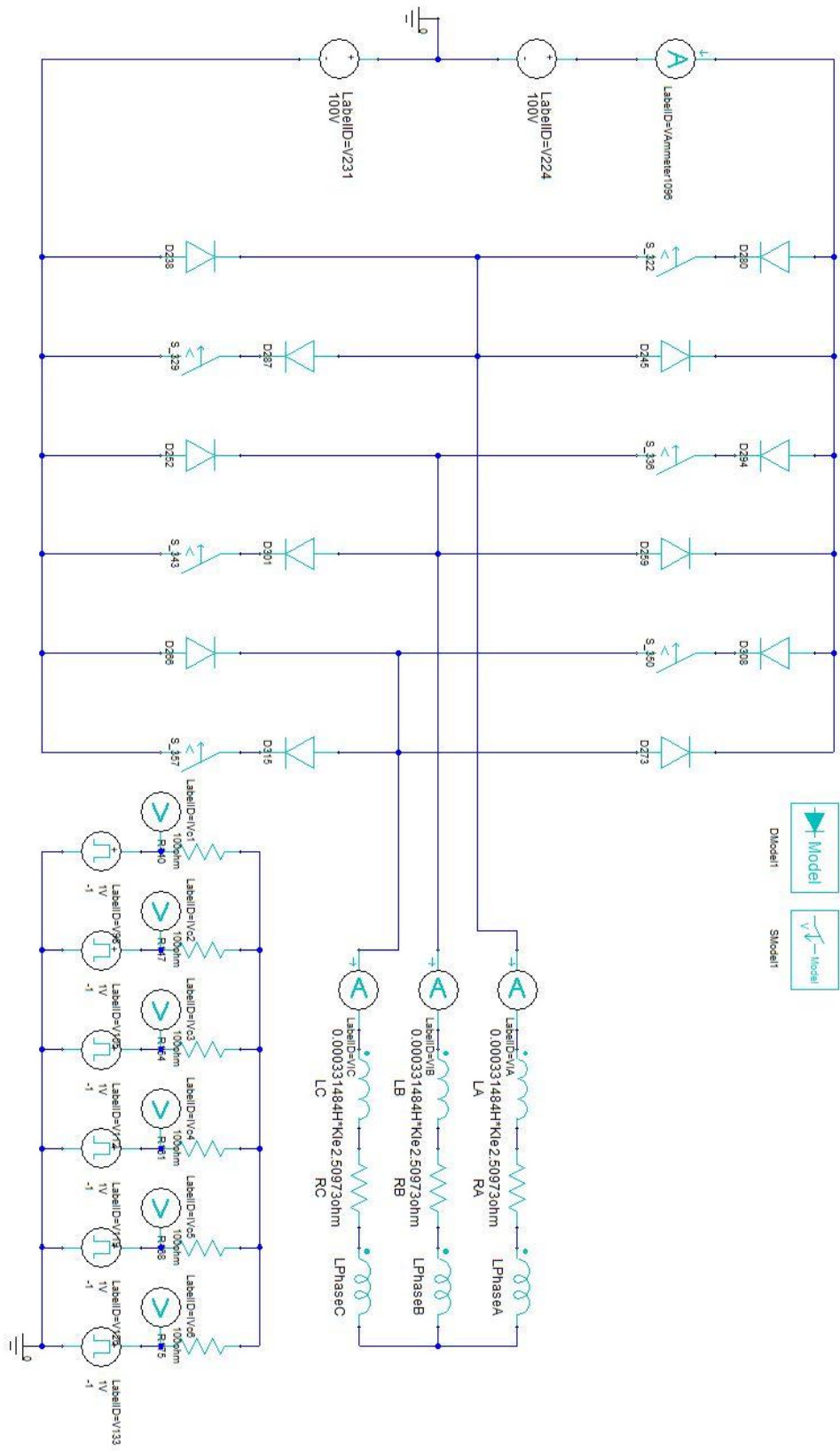


Şekil 3.80. Motor hızına göre motor akımının değişimi

5.2.2. Sonlu elemanlar metodu ile analiz sonuçları

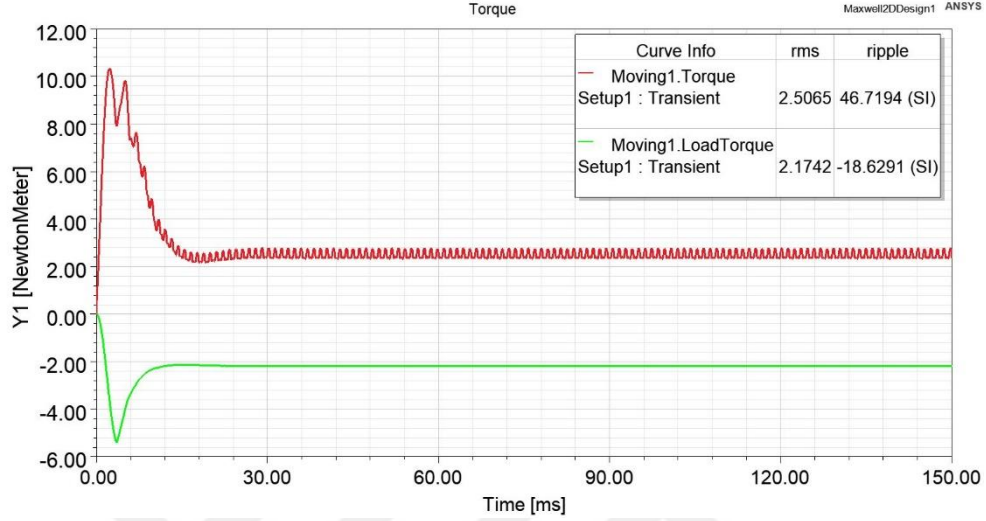
FDAM’da sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizlerin tamamlanması için nümerik olarak tasarımı netleştirilen model Maxwell 2B’ye transfer işlemi gerçekleştirilerek tork, hız, akım, güç, manyetik parametrelerin grafikleri incelenmiştir.

Şekil 3.81’de ANSYS programı ile oluşturulan sürme devresi görülmektedir. Motora uygulanan anma gerilimi (DA kaynak gerilimi) 200 V DA’dır. Sonlu elemanlar yönteminin doğruluğunu kanıtlamak adına geçici durum analizleri ile belirlenen zaman aralıklarında motor gerçek zamanlı durumdaymış gibi analiz edilir. Sürme devresi ile beraber 0 ve 200ms aralığında çalıştırılarak motorun manyetik akı yoğunluğu, faz akımları, hız, tork, kayıplar gibi parametreler grafiksel olarak gösterimi mümkün hale gelir.



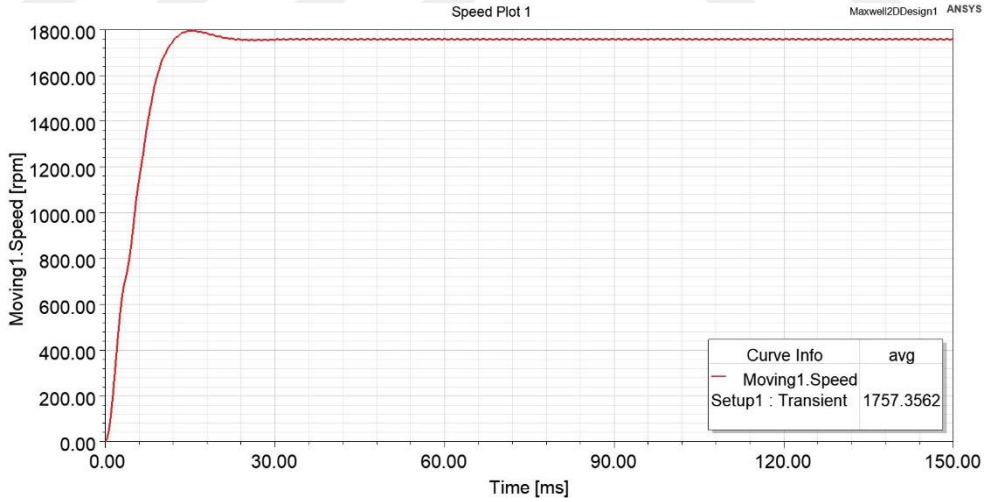
Şekil 3.81. FDAM Sürme Devresi

Şekil 3.82’de gösterilen grafiğe göre elektromanyetik tork 2.50 Nm, şaftta aktarılan mekanik gücü belirleyen mil yük torku ise 2.17 Nm’dir. Mil yükündeki tork dalgalanması ise 18,6 Nm olarak bulunmuştur.



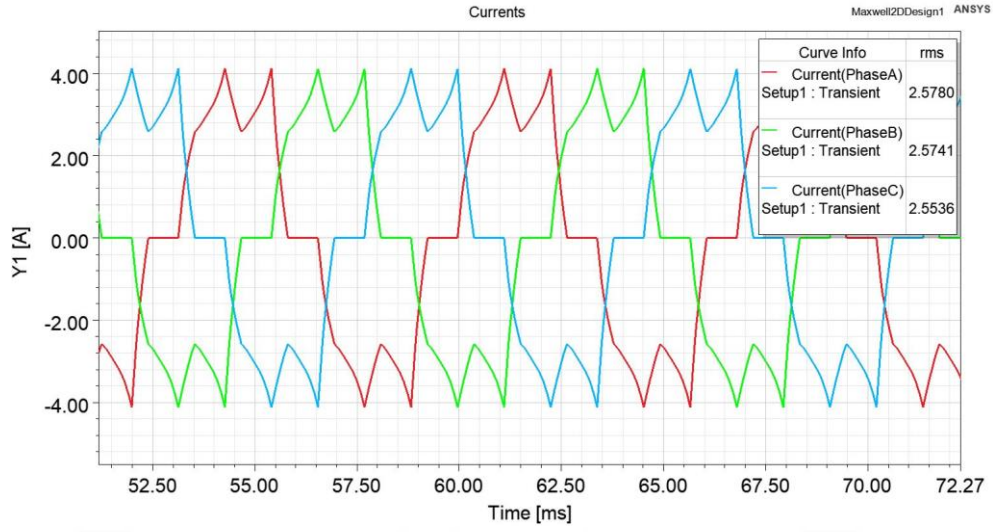
Şekil 3.82. Elektromanyetik tork ve mil yük torku

Şekil 3.83’de motor hızı ise 1757.35 d/d olarak görülmektedir.



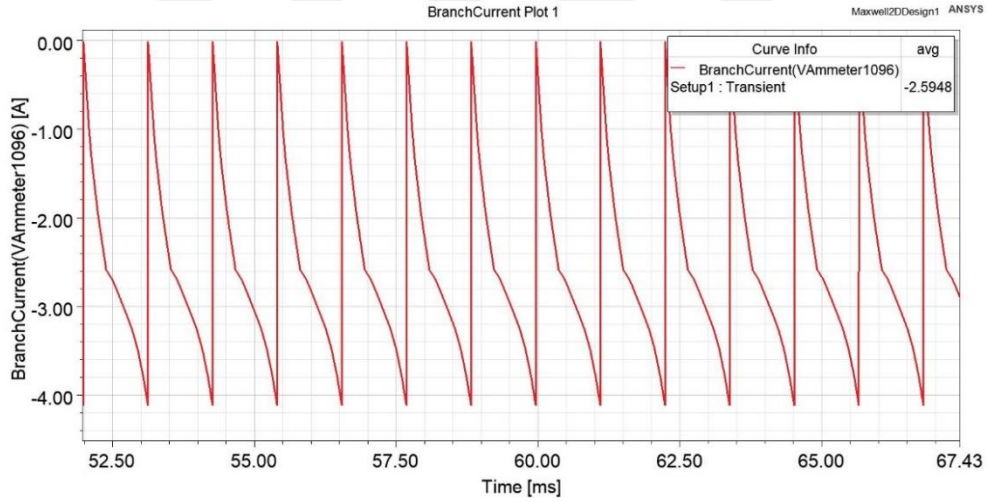
Şekil 3.83. Maxwell 2B ile motor hız grafiği

Şekil 3.84’de gösterilen grafikte ise her bir faz üzerinde yer alan faz akımları görülmektedir. Yaklaşık olarak her bir faz daki etkin(rms) değer 2,57 amperdir. Bir FDAM belirtilen voltaj değerinde çalıştırıldığında motorun çekeceği akım yüke bağlıdır. Yük artıkcı motorun çektiği akımda artar. Mevcut grafiğe göre 400W motorun sabit anma yükünde çektiği etkin (rms) akım değeri görülmektedir.



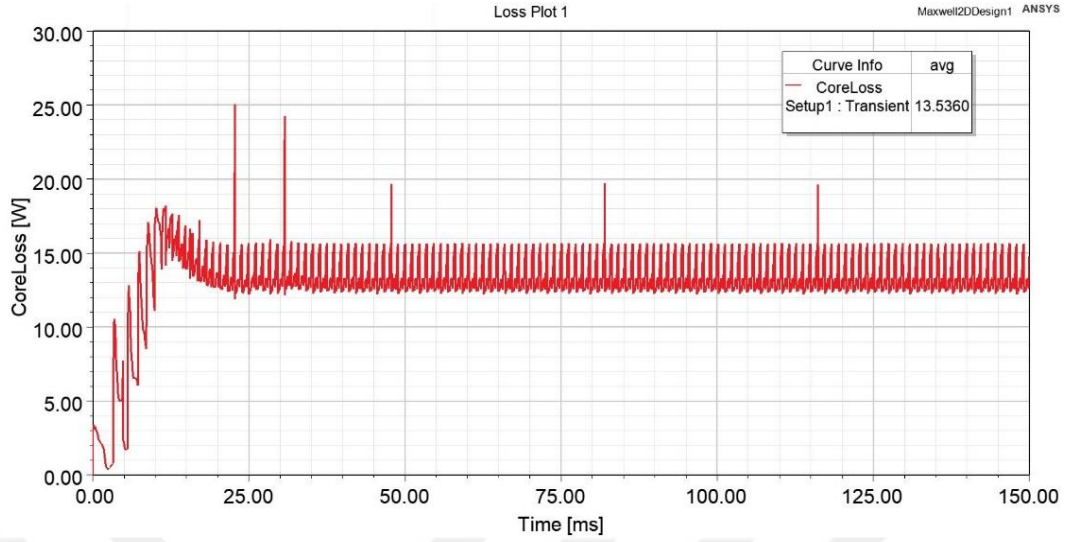
Şekil 3.84. Motor faz akımları

Şekil 3.85’de yer alan grafikte 52ms ve 67ms arasında görülen DA bara akımı ise 2,59 A’dir.



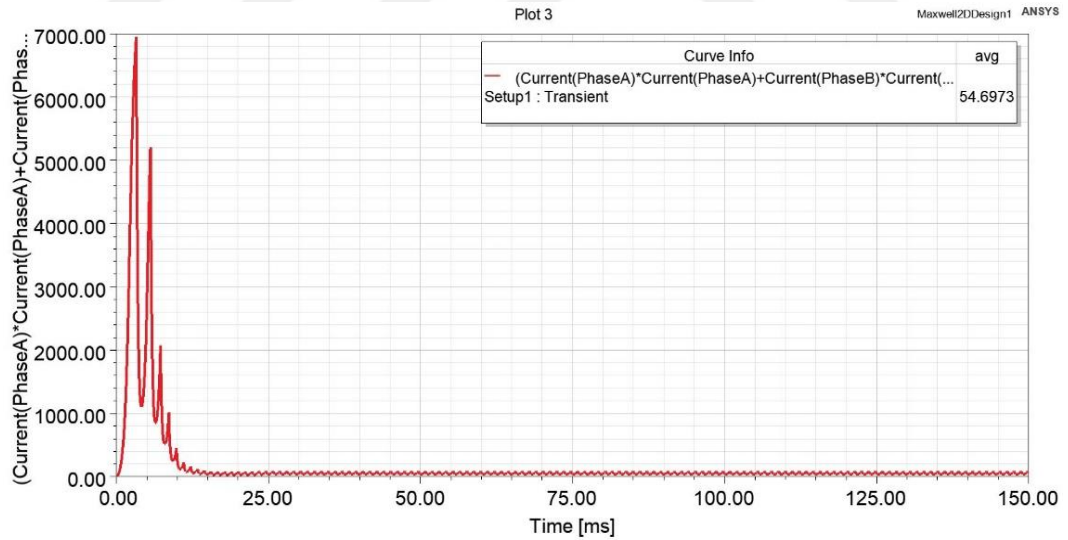
Şekil 3.85. DA bara akımı

FDAM’da nüve kayıpları, demir kayıpları ve diğer kayıplar olmak üzere 3 tip kayıp vardır. Analiz sonuçlarında tüm kayıplar dikkate alınarak kayıpların minimuma indirilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı kayıpların gerçeğe yakın doğrulukta tahmin edilmesi büyük önem arz etmektedir. Yapılan analizler sonucunda ise Şekil 3.86’da nüve kayıpları grafiğe göre nüve kayıpları 13.53 W olarak görülmektedir. Nüve kayıplarının minimize edilmesi için, kullanılan sacların watt/kg kayıpları düşük olan saclardan seçilmiştir.



Şekil 3.86. Nüve kayıpları

FDAM’da yer alan faz sargılarındaki kayıplar bakır kayıpları olarak adlandırılmaktadır. Bakır kayıpları sargıların iç dirençleri dolayısıyla meydana gelmektedir. Şekil 3.87’e göre bakır kayıpları ise 54.69 W olarak görülmektedir.



Şekil 3.87. Bakır kayıpları

Motor faz-faz arası direnç değerleri Şekil 3.88’de görüldüğü üzere hassas bir multimetre ile ölçülmüş ve bu değerler Çizelge 3.16 ile not edilmiştir. Oda sıcaklığında direnç ölçüldüğünde ortalama yıldız bağlı iki sargının direnci 4.661 ohm dur. Motorumuz yıldız bağlı olduğundan tek faz için 2.331 ohm luk bir direnç değeri anlamına gelmektedir. Maxwell RMXprt de ise armatür faz direnci 40 derece sıcaklık için 2.50973 ohmdur.



Şekil 3.88. FDAM direnç ölçümü

Çizelge 3.16. FDAM direnç değerleri

Direnç Ölçümü (DA 20°C)	
A-B faz sargıları direnci	4.652 ohm
B-C faz sargıları direnci	4.637 ohm
A-C faz sargıları direnci	4.695 ohm
Ortalama Faz direnci	2.331 ohm
DA Direnç (40°C)	2.509 ohm
AA Direnç (150 Hz deri etkisi x1,1)	2.760 ohm

Yukarıdaki tabloya göre ölçüm ile Maxwell RMXprt kıyaslandığında değerler yaklaşık olarak birbirine yakındır. Ortalama her bir fazdaki akım değeri ise 2,57 amperdir. Eşitlik 3.94’de yer alan formül ile hesaplama yaptığımızda DA dirence göre 49,71 W bir bakır kaybı bulunmuştur. AA Direnç normal çalışma koşullarında 2,76 ohmdur ve bakır kaybı 54,68 ohmdur. DA direnç ve AA direnç değerine göre sonuçlar arasında 4,97 W lık bir fark olduğu görülmektedir.

$$Bakır Kayıpları = 3 \times I^2 R \quad (3.106)$$

Çizelge 3.17. FDAM’da kayıplar

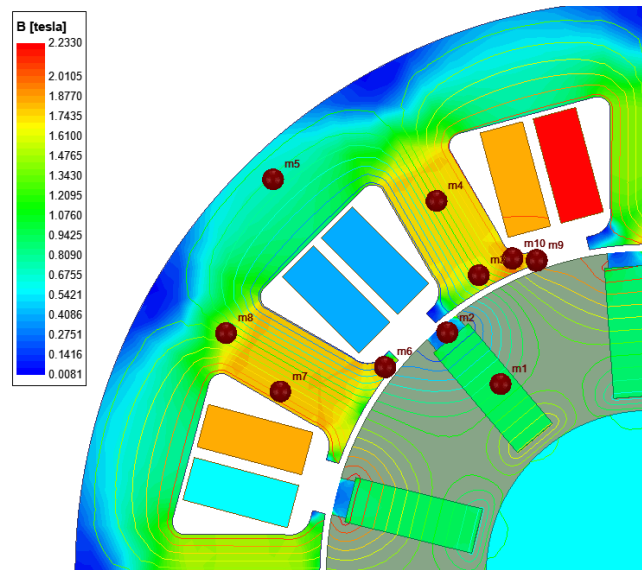
Nüve Kayıpları(W)	13.53
Bakır Kayıpları(W)	54.69
Diğer Kayıplar(W)	~15 (Sürtünme,vantilasyon ve mekanik)
Mekanik Güç(W)	400
Elektrik Güç(W)	483.20
P_{mek} + kayıplar	
Elektrik Güç(W) P=VI	518.80

Çizelge 3.17’de yer alan değerlere göre toplam kayıplar ile beraber çıkış gücü giriş gücüne bölünerek %82.78’lik bir motor verimi elde edilmiştir. Ayrıca giriş gücü sürücü dahil olarak gerilim ve akım çarpımından 518.80 W olarak hesaplanabilir. Sistem verimi için çıkış gücü sürücü dahil giriş gücüne bölünerek %77.1’lik bir sistem verimi elde edilmektedir.

Spoke tipi FDAM’ın manyetik akı analizi sonucunda Şekil 3.89’da farklı noktalardan ölçüm sonuçlarına bakılarak doyum noktaları Çizelge 3.18 ile incelenmiştir.

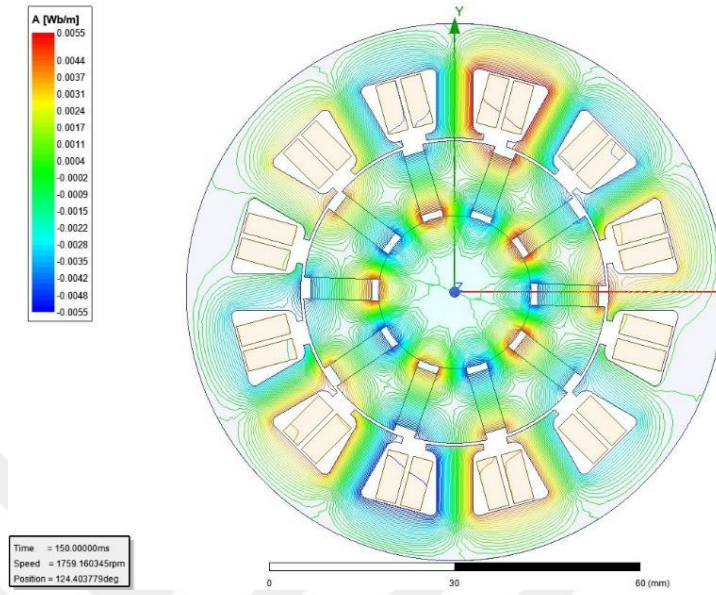
Çizelge 3.18. FDAM’ın farklı noktalardan manyetik akı yoğunlukları

Nokta	B(Tesla)
m1	0.925
m2	0.270
m3	1.582
m4	1.737
m5	0.697
m6	1.611
m7	1.787
m8	1.554
m9	1.436
m10	1.960



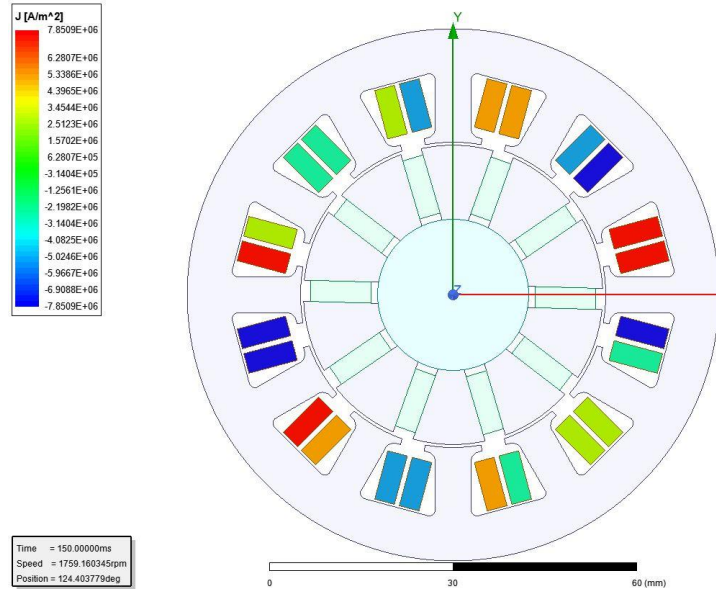
Şekil 3.89. Spoke tipi FDAM’ın farklı noktalardan manyetik akı yoğunluklarının incelenmesi

Modelin manyetik alan çizgileri Şekil 3.90’da görülmektedir.



Şekil 3.90. Spoke tipi FDAM’ın manyetik alan çizgileri

150ms deki akım yoğunluğu ise Şekil 3.91’de görülmektedir.



Şekil 3.91. Spoke tipi FDAM’ın manyetik alan çizgileri

Manyetik alan çizgileri 10 kutup oluşumunu göstermektedir. Sargılardaki 150ms de akım yoğunluğu 7.85 A/mm²’dir. Motor S3 kesintili çalışma modunda çalışacağı için motor rejim sıcaklığına ulaşmayacaktır.

5.3. Deneysel Sonuçlar

Tasarımı yapılan FDAM'ın ile yük altında yapılan sonlu elemanlar analiz sonuçları Çizelge 3.19'da görülmektedir.

Çizelge 3.19. Sonlu elemanlar analiz sonuçları

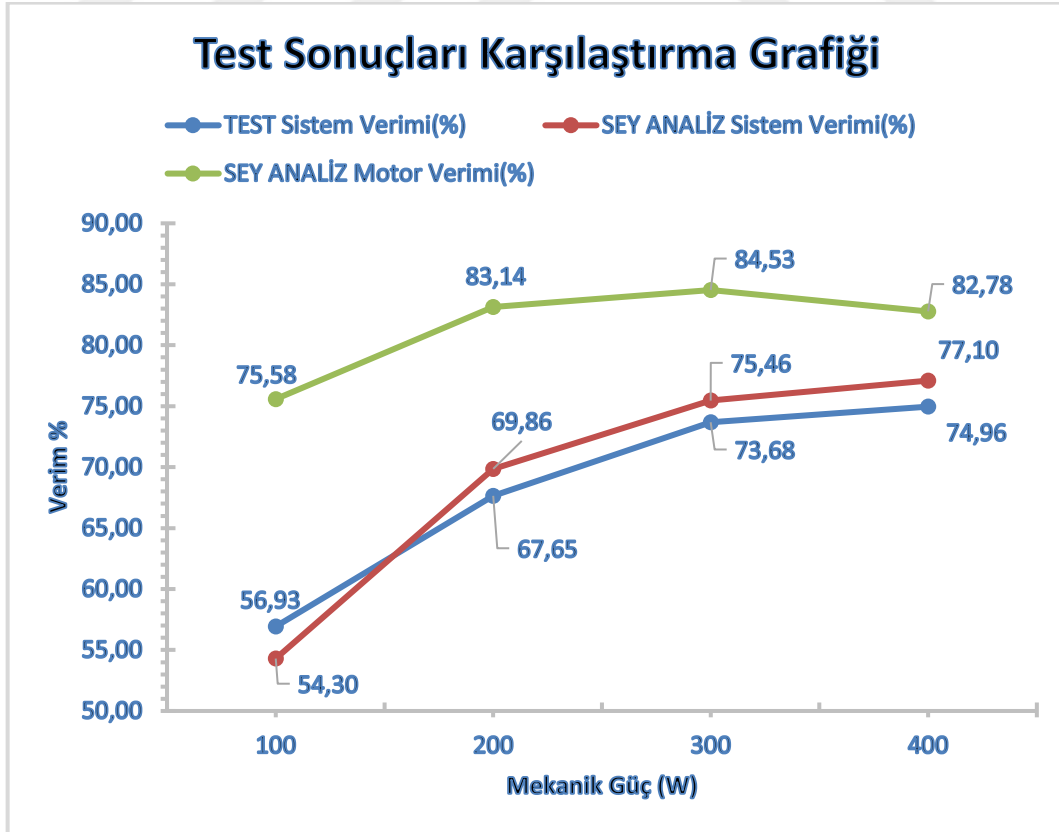
Yük durumu (%)	%0	%25	%50	%75	%100	%125
P_{mek} Mekanik Güç (W)	0	100	200	300	400	500
Elektromanyetik Tork (Nm)	0.40	0.83	1.34	1.88	2.50	3.17
Yük Torku (Nm)	0	0.47	0.99	1.56	2.18	2.84
Hız (d/d)	2135	2031	1934	1844	1757	1677
Faz akımı (A)	0.38	0.80	1.31	1.89	2.57	3.35
Kaynak akımı (A)	0.45	0.92	1.43	1.99	2,59	3.26
Kaynak Gerilimi (V)	200	200	200	200	200	200
Nüve kayıpları (W)	12.22	12.34	12.56	12.97	13.53	13.98
Bakır Kayıpları (W)	1.22	4.94	12.94	27	54.69	92.92
Faz Direnci (AA-40 °C ohm)	2.76	2.76	2.76	2.76	2.76	2.76
Mekanik Kayıplar (W)(Sürtünme vb)	15	15	15	15	15	15
P_{elk} Giriş Gücü (Sürücü dahil) (W)	90	184	286	398	518.80	652
P_{elk} Giriş Gücü P_{mek}+ P_{kayıplar} (W)	28.44	132.19	240.32	355.29	483.20	621.90
Sistem Verimi (Sürücü dahil)	Boşta Çalışma	54.30	69.86	75.46	77.10	76.69
Motor Verimi (%)	Boşta Çalışma	75.78	83.14	84.53	82.78	80.40
Motor çalışma sıcaklığı 40 °C						

Test düzeneği ile uygun koşullar altında yapılan test sonuçları Çizelge 3.20'de görülmektedir.

Çizelge 3.20. Test sonuçları

Yük durumu (%)	%0	%25	%50	%75	%100
P_{mek} Mekanik Güç (W)	0	99.06	201.59	299.16	400.30
Yük Torku (Nm)	0	0.52	1.06	1.58	2.12
Hız (d/d)	1822	1820	1817	1809	1804
Kaynak akımı (A)	0.09	0.87	1.49	2.03	2.67
Kaynak Gerilimi (V)	200	200	200	200	200
P_{elk} Giriş Gücü (W) (Sürücü dahil)	18	174	298	406	534
Sistem Verimi % (Sürücü dahil)	Boşta Çalışma	56.93	67.65	73.68	74.96
Motor test sıcaklığı 40 °C - 45°C					

Yapılan test sonuçlarına göre sonlu elemanlar ve test sistemi verim karşılaştırma grafiği ise Şekil 3.92’de görülmektedir.



Şekil 3.92. Test sonuçları verim karşılaştırma grafiği

6. TARTIŞMA ve SONUÇ

FDAM'ın tasarım, analiz ve prototip üretim aşamasında gerçekleştirilen adımları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

-Öncelikle motor tasarımında öngörülen motor parametreleri belirlenerek analitik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Geometrik parametreler ve ölçüler sırayla incelenerek motorun performansını artırmak için uygun değerlerin seçilmesi sağlanarak boyutlar belirlenmiştir.

-Belirlenen analitik değerlerin doğruluğunu kanıtlamak için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Ansys Maxwell programı ile motorun iki boyutlu ve geçici durum analizleri incelenmiştir.

-Yapılan analiz sonuçlarına göre spoke tipi rotor topolojisine sahip FDAM'ın NdFeB mıknatıs ile düşük hız yüksek tork uygulamalarında kullanılabileceği analiz sonuçlarına göre yorumlanmıştır.

-Yapılan analizler ve görsellere göre oluk dış uçlarında 1.9 T olarak manyetik doyum oluşmuştur. Oluk dışlarında, boyundurukta ve rotordaki akı yoğunluğu dağılımlarına göre doyum oluşmamıştır.

-Sargılardaki ortalama akım yoğunluğu ise 7,18 A/mm²'dir. Bu akım yoğunluğuna göre motorun S1 modda çalışması uygun değildir. Fakat uygulama kapsamında S3 modda çalışacaktır. 400W 1800 d/d olarak ön görülen motor tasarımı FEM analizi ile doğrulanarak 10 kutuplu bir spoke tipi FDAM'ın analiz sonuçlarına göre %82,78 verim ile çalışabileceği izlenmiştir. Test sonuçlarında ise sürücü ile birlikte tam yükteki maksimum sistem verimi yaklaşık %75'tir. Sürücü kayıpları da dikkate alındığında motorun maksimum %75 verimle çalışabileceği performans olarak doğrulanmıştır.

-Yapılan prototip aşamalarında mekanik tasarımların ülkemizde CNC tezgahları ile işlenmesinin mümkün olduğu fakat mıknatısın bulunabilirlik ve üretebilirlik açısından ülkemizin zayıf olduğu anlaşılmıştır.

-FDAM'da bir diğer husus ise motor sürücü konusunun bu motorlar için önemli olduğu mümkün mertebede kolay bulunabilirlik açısından hall-etkili sensörlerin kullanılmasının motor kontrolünü kolaylaştıracağı anlaşılmıştır.

-FDAM'da giriş besleme geriliminin genelde yüksek tutulmayıp düşük tutulması gerektiği 200VDA gerilimin ara gerilim olması sürücü bulunabilirliğini sınırlandırmıştır. Bundan dolayı yüksek gerilim seçeneklerinde DA bara geriliminin 310VDA veya düşük gerilim seçeneklerinde 24VDA ve 72VDA gerilim aralığında seçilmesi yaygın kullanım açısından daha uygun olacağı değerlendirilmiştir.

-Asenkron motorlara göre boyutlarının küçük olması ve istenen tork güç değerlerini vermesi ev elektroniği alanında da FDAM'ın kullanılabileceği görülmektedir.

-FDAM'a soğutma açısından baktığımızda rotorunda herhangi bir sargı olmaması motorun daha kolay soğutulmasını sağlamaktadır.

-Planet redüktör kısmında yapılan dişliler modül 1 olarak seçilmiştir. Türkiye'de yer alan üreticilerde modül 1 azdırma çakısının bulunmaması hazır pinyon dişli yapının kullanılmasına sebep olmuştur. Üretim kısmında hassas üretim yapılamadığından 3B imalat yöntemi tercih edilmiştir.

-Mevcut tasarım ile vana için piyasada bulunan elektriksel aktüatörler karşılaştırıldığında planet redüktör yapı ile y eksenine doğru bir büyüme olduğu görülmüştür.

-Sadece tek tip bir motor ve 1/9 oranında planet redüktör yapı ile DN50-DN150 arasında kelebek, globe ve gate vanalar için tek bir yapı elde edilmiştir. Çünkü yapılan pazar analizine göre bu aralıklar için farklı tipte ve motor sınıfında ürünler yer aldığından elektrikli aktüatör seçimi karmaşık bir hal almaktadır.

-Ayrıca planet redüktörlerde çelik malzemenin yapılan burulma analizleri ile ısıtılma işleminden geçmesi gerektiği ve ısıtılma işlem sonrası dayanım kuvvetleri artacağından kullanım ömrünün artacağı değerlendirilmiştir.

-Planet redüktör çalışmasında titreşimlerden dolayı ses oldukça fazla olmaktadır. Sistemin daha stabil çalışması için çelik imalat sonrası gres yağ ile doldurulması gerekmektedir.

Tasarlanan FDAM'ın etiket değerleri ise Çizelge 3.21'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.21. FDAM etiket değerleri

Motor Tipi	Spoke Tipi FDAM
İşletme Türü	S3
Koruma Sınıfı	IP40
Motor Besleme Voltajı	200VDA
Anma Akımı	2.6 A
Anma Gücü	400W
Devir	1800 d/d
Tork	2.12Nm
Maksimum Motor Test Verimi	%75

Motor etiket değerlerine göre 1800 d/d 2,12 Nm’lik FDAM’a eklenen A modülünün endüstriyel vanaya adapte edilmesi durumunda mevcut hızın 1/9 oranında düşeceği ve hızın 200 d/d olacağı, mevcut torkun 19 Nm ve açma-kapama süresinin 1,2 sn olacağı matematiksel olarak tahmin edilmiştir.

Motor etiket değerleri ve analiz sonuçlarına göre tork istenen endüstriyel uygulamalarda tasarlanmış olan FDAM’ın kullanılabileceği açıkça görülmektedir.

Gelecek çalışmalara baktığımız zaman,

- Prototip motor için optimizasyon çalışmaları yapıp motor verimini artırmak adına hem akademik hem de seri üretim adına mekanik açıdan çalışmalar yapılabilir.
- Üretilen prototip motor vana sistemlerine takılıp test edilebilir.
- Prototip motor için sürücü konusu çalışılıp entegre motor sürücüsü çalışması yapılabilir.
- Spoke tip rotor için seri üretime uygun bir üretim hattı çalışması yapılabilir.

FDAM’ın kullanım alanlarına baktığımızda geniş bir yelpaze bizi karşılamaktadır. Bunlar aşağıda yer alan öngörülen uygulama alanları ile sıralanabilir,

- Endüstriyel uygulamalarda: Pompa, vana, fan, servo sistemler, otomasyon sistemleri vb
- Evsel uygulamalarda: Bulaşık makineleri, çamaşır makineleri, elektrikli süpürgeler vb
- Otomotiv alanında: Elektrikli araçlar , fan, silecek motorları vb
- Taşıma ve ulaşım alanında: Asansör, yürüyen merdiven vb
- Savunma alanında: Tanklar, Füze sistemleri vb
- Havacılık alanında: Roket, uydular vb
- Tıp ve sağlık alanında: Yapay kalp motorları, dişçilik aletleri vb

7. KAYNAKLAR

- Anonim, 2020. BLDC motor control. BLDC motor operation. <https://www.pantechsolutions.net/blog/bldc-motor-control/> (18.04.2021).
- Anonim, 2018. Working And Construction Of The Brush-less DC Motor.Engineermind, <https://engineermind.in/2018/01/working-and-construction-of-the-brush-less-dc-motor/> (26.01.2022).
- Anonim, 2015. Hall Effect (Hall Etkisi) ve Hall Effect Sensörü. <https://www.elektrikce.com/> (30.05.2015).
- Bal, G., 2006. Özel Elektrik Makinaları. Seçkin Yayıncılık, s. 127-153, Sıhhiye, Ankara.
- Bodur, A., 2010. Elektrik Motorları (1) AC Motorlar ve Sürücüler.(E-Pub), TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, Ankara
- Çetin, E., 2018. Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor Tasarımı, Manyetik Analizi ve Prototip Üretimi. (Doktora Tezi), Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Demir, Y., Ocak, O. ve Aydın, M., 2013. Design, Optimization and Manufacturing of A Spoke Type Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Low Voltage-High Current Servo Applications. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 9-14.
- Erdem, K., 2011. Design and Implementation of Permanent Magnet Brushless DC Motor. (M.Sc. Thesis), İstanbul Technical University , Institute Of Science And Technology, İstanbul.
- Ge, X., Zhu, Z.O., Li, J. ve Chen, J., 2016. Design, A Spoke-Type IPM Machine With Novel Alternate Airspace Barriers and Reduction of Unipolar Leakage Flux by Step-Staggered Rotor. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol52, No.6, 4789-4797.
- Gedik, D. B., 2018. IE4 Verim Sınıfı Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Ghahfarokhi, P.S. ve Faiz, J., 2013. Design of Four Pole Permanent Magnet Motor With Different Rotor Topologies. Journal of Electromotion, 20, 1-7.
- Gieras, F.J., 2017. Electrical Machines Fundamentals of Electromechanical Energy Conversion. CRC Press, 1-4p, New York, USA.
- Gieras, F.J., Wing M., 2000. Permanent Magnet Motor Technology: Design and Application. CRC Press, 169-213p, New York, USA.
- Gürdal, O., 2015, Elektrik Makinalarının Tasarımı. Bursa Orhangazi Üniversitesi Yayınları, 225-229s, Bursa
- Hanselman, D., 2003, Brushless Permanent Magnet Motor Design(Second Edition). Magna Physics Publishing, Electrical and Computer Engineering University of Maine Orono, 117-124p, ME 04469 USA.
- Hanselman, D., 1994, Brushless Permanent Magnet Motor Design. Mc Gram Hill, Electrical and Computer Engineering University of Maine Orono, 103-123p, ME 04469 USA.
- Hwang, K.Y., Rhee, S.B., Yang, B.Y. ve You, D.W., 2007. Rotor Pole Design in Spoke-Type Brushless DC Motor by Response Surface Method. IEEE Transactions on Magnetics, Vol43, No.4, 1833-1836.

- Jang, H., Oh, S.T., Park, Y., Kim, H., Jang, I.S. ve Lee, J., 2020. Design and Analysis of a Novel Rotor Shape to Improve Power Performance. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol30, No.4.
- Kenjo, T. ve Nagamori, S., 1985. Permanent Magnet and Brushless DC Motor. Clarendon Press, 58p, Oxford, New York.
- Kim, H.W., Kim, K.T., Kim, B.W., Hur, J. ve Jo, Y.S., 2012. Design of New Spoke Type Brushless DC Motor for Neodymium Permanent Magnet Free. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 978-1, 133-137.
- Krishnan, R., 2010. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, CRC Press, 34p, Virginia, USA.
- Kül, S., 2015. Doğrudan Yol Vermeli Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Tasarım Optimizasyonu. (Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Lee, B.K., Kang, G.H., Hur, J. ve You, D.W., 2004. Design of Spoke Type BLDC Motors with High Power Density for Traction Applications. IEEE Industry Applications Conference, 39th IAS, 1068-1074.
- Ma, Q., El-Refaie, A. ve Lequesne, B., 2020. Low-Cost Interior Permanent Magnet Machine With Multiple Magnet Types. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol56, No.2, 1452-1463.
- Miller, T.J.E., 1989, Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives, Oxford Science Publications, 54-58p, University of Glasgow, New York.
- Miller, T.J.E., ve Hendershot, J.R., 1994, Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Oxford Science Publications, 94-107p, University of Glasgow, New York.
- Ocak, C., 2013. Elektrikli Araçlar İçin Üç Kademeli Yeni Bir Fırçasız DA Motoru Tasarımı, Analizi ve Uygulaması. (Doktora Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özçira, S., 2013. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Doğrudan Moment Kontrolünün DSP Tabanlı Yeni Bir Algoritma Geliştirilerek Gerçekleştirilmesi. (Doktora Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sashidhar, S. ve Fernandes, B.G., 2014. A Low-cost Semi-Modular Dual-Stack PM BLDC Motor for a PV based Bore-well Submersible Pump. International Conference on Electrical Machines, 24-30.
- Soyaslan, M., 2020. Asansör Tahrik Sistemleri İçin Dıştan Rotorlu Sürekli Mıknatıslı Bir Senkron Motor Tasarımı (Doktora Tezi), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.
- Volpe, G., Marignetti, F., Roggia, S., Popescu, M. Ve Goss, J., 2019. Design, Modified 2D Model for 3D Rotor Magnet Leakage Effects in PM Spoke Machines. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol55, No.3, 3087-3096.
- Yıldırım, C., 2015. PIC Tabanlı Fırçasız DC Motor Tasarımı. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zhang, P., Gennadi, Y.S., Lonel, D.M. ve Demerdash, N.A.O., 2015. Establishing the Relative Merits of Interior and Spoke-Type Permanent-Magnet Machines With Ferrite or NdFeB Through Systematic Design Optimization. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol51, No.4, 2940-2948.
- Zubayer, M., 2011. Design Analysis of Line Start Interior Permanent Magnet Synchronous Motor. (Master These), Memorial University of Newfoundland.

8. EKLER

Ek 1: Stator Sac Ölçüm Raporları

BRONZ OTOMASYON										ÖLÇÜ KONTROL FORMU															
Müşteri/Tedarikçisi : KSB					Parça Adı: 420W BLOC Motor					İş Emir/İrsaliye No:					Revizyon No: REV 0					Tarih: 04.05.2021					
Parça No : STATOR LAMINATION										Ortam sıcaklığı (°C): 20°															
Operasyon		Tolerans		Sınıf		Müayene Aracı Kodu		Müayene Aracı		Karakter, Boyut, Ölçülük (mm)		+ tolerans		- tolerans		1 nolu parça		2 nolu parça		3 nolu parça		4 nolu parça		5 nolu parça	
Sıra	Operatör	Ölçüm	Değer	Ölçüm	Değer	Ölçüm	Değer	Ölçüm	Değer	Ölçüm	Değer	Ölçüm	Değer	Ölçüm	Değer	Ölçüm	Değer	Ölçüm	Değer	Ölçüm	Değer	Ölçüm	Değer	Ölçüm	Değer
1	Sac Lazer	Δ2	ISO2768F	OC-FR001	Faro Kol	44.00	-0.040	43.990	-0.010																
2	Sac Lazer	Δ2	ISO2768F	OC-FR001	Faro Kol	40.00	-0.040	39.990	-0.010																
3	Sac Lazer	Δ2	ISO2768F	OC-FR001	Faro Kol	2.00	0.050	2.016	0.016																
4	Sac Lazer	Δ2	ISO2768F	OC-FR001	Faro Kol	3.00	0.050	3.006	0.006																
5																									
6																									
7																									
8																									
9																									
10																									
11																									
12																									
13																									
14																									
15																									
16																									
17																									
18																									
19																									
20																									

PARÇA KONTROL FREKANSLARI									
ADDET SAYISI	1-25	26-50	51-151	151-280	281-500	501-1200	1201-3200	3201-10000	
KONTROL	3	13	20	32	50	80	125	200	
GGZ KONTROL	ÇAPAK	ÇAPAK	PAS/OKSİT	PAS/OKSİT	ÇİZİK / DEFORMASYON	BUKUM YONU			
	☐ VAR	☒ YOK	☐ VAR	☒ YOK	☐ VAR	☒ YOK	☐ UYGUN	☒ UYGUN	

Onaylayan:	ALAKTÜRK
Tarih:	04.05.2021
Δ2	

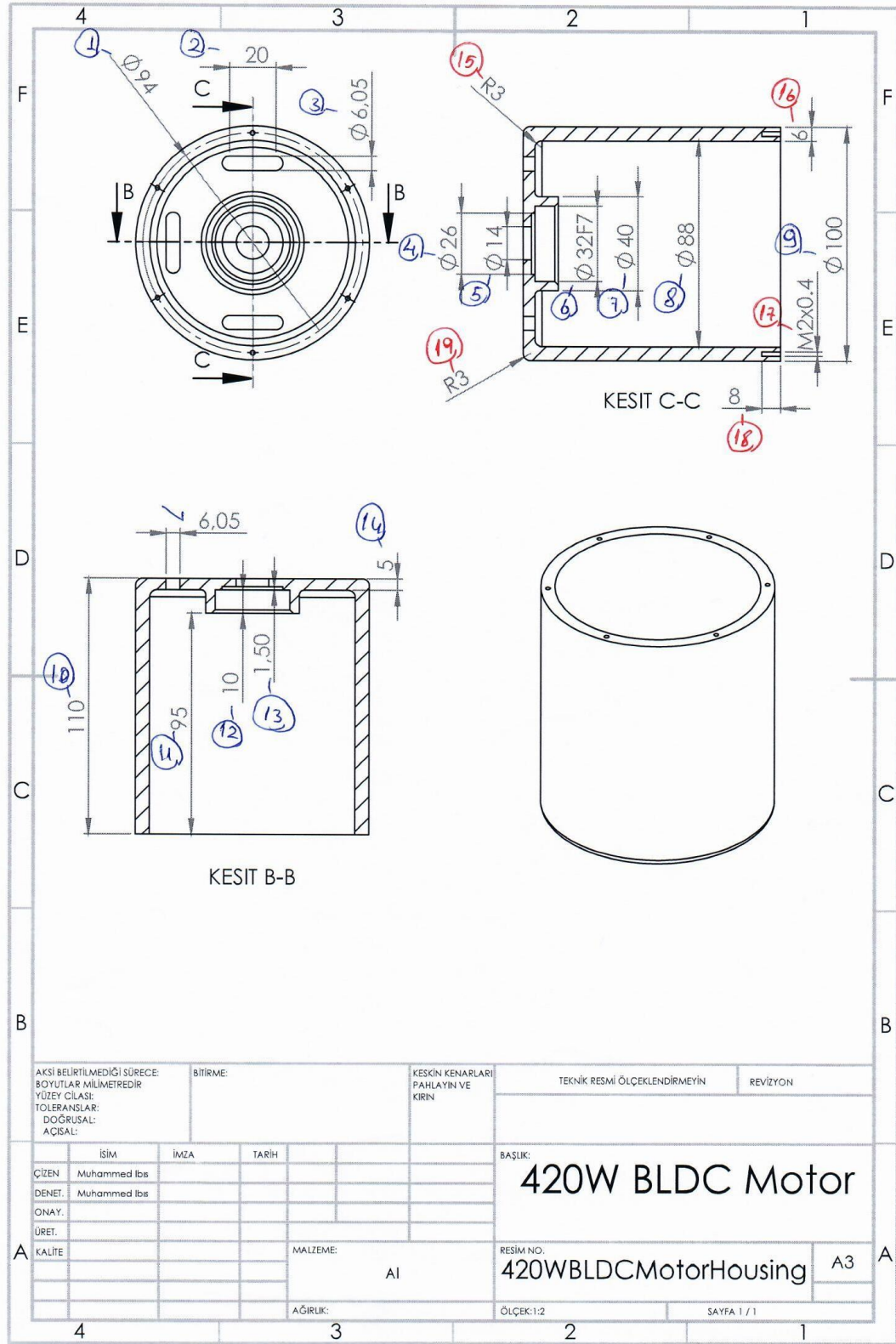
Ek 2: Rotor Sac Ölçüm Raporları

		ÖLÇÜ KONTROL FORMU												
Müşteri/Tedarikçi Adı : KSB		İş Emri/İrsaliye No:		Tarih: 04.05.2021										
Parça Adı: 420W BLDC Motor		Revizyon No: REV 0		Ölçü kontrol rapor no:										
Parça No : ROTOR LAMINATION		Ürün/Numune Adedi: 1 ADET		Ortam sıcaklığı (°C): 20°										
Sıra	Operasyon	Operatör	Tolerans Sınıfı	Muayene Aracı Kodu	Muayene Aracı	Karakter, Boyut, Özellik (mm)	Öngörülen	+ tolerans	- tolerans	1 nolu parça	2 nolu parça	3 nolu parça	4 nolu parça	5 nolu parça
1	Sac Lazer	A2	ISO2768F	OC.FR001	Faro Kol	49,50	49,50	0,040	-0,040	49,525	0,025			
2	Sac Lazer	A2	ISO2768F	OC.FR001	Faro Kol	24,00	24,00	0,040	-0,040	23,985	-0,015			
3	Sac Lazer	A2	ISO2768F	OC.FR001	Faro Kol	3,55	3,55	0,050	-0,050	3,528	-0,022			
4	Sac Lazer	A2	ISO2768F	OC.FR001	Faro Kol	10,05	10,05	0,100	-0,100	10,074	0,024			
5	Sac Lazer	A2	ISO2768F	OC.FR001	Faro Kol	3,00	3,00	0,050	-0,050	2,980	-0,020			
6	Sac Lazer	A2	ISO2768F	OC.FR001	Faro Kol	0,95	0,95	0,050	-0,050	0,980	0,030			
7	Sac Lazer	A2	ISO2768F	OC.FR001	Faro Kol	0,33	0,33	0,050	-0,050	0,380	0,050			
8	Sac Lazer	A2	ISO2768F	OC.FR001	Faro Kol	1,08	1,08	0,050	-0,050	1,120	0,040			
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														
19														
20														
PARÇA KONTROL FREKANSIARI														
ADET SAYISI		1-25	26-50	51-151	151-280	281-500	501-1200	1201-3200	3201-10000					
KONTROL		3	13	20	32	50	80	125	200					
GÖZ KONTROL		ÇAPAK		PAS/OKSİT		ÇİZİK / DEFORMASYON		BÜKÜM YÖNÜ						
		☐ VAR	☒ YOK	☐ VAR	☒ YOK	☐ VAR	☒ YOK	☐ UYGUN	☒ UYGUN					
Onaylayan:		ALİ AKTÜRK												
Tarih:		04.05.2021												
		Δ1												

Ek 3: Rotor Mili Uygunluk Sertifikası ve Ölçüm Raporu

Ek 4: Motor Gövdesi Uygunluk Sertifikası ve Ölçüm Raporları





Ek 5: Yuvarlak Motor Kapağı Uygunluk Sertifikası ve Ölçüm Raporları



Ek 6: Kare Motor Kapağı Teknik Resmi

