KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜŞÜK GÜÇLÜ ELEKTRİKLİ TAŞIT UYGULAMALARINDA KULLANILMAK ÜZERE EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI NÜVESİZ BİR DİSK MOTOR TASARIMI, ÜRETİMİ VE DOĞRULAMASI

BARIŞ AKYÜZ

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜŞÜK GÜÇLÜ ELEKTRİKLİ TAŞIT UYGULAMALARINDA KULLANILMAK ÜZERE EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI NÜVESİZ BİR DİSK MOTOR TASARIMI, ÜRETİMİ VE DOĞRULAMASI

BARIŞ AKYÜZ

Yrd. Doç. Dr. Metin AYDIN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Zafer BİNGÜL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. Emin YILDIRIZ
Jüri Üyesi, Düzce Üniversitesi

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

Tezin Savunulduğu Tarih: 11.07.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışması süresince her zaman yön gösteren ve vizyon katan değerli danışmanım Sn. Doç. Dr. Metin AYDIN'a teşekkür ederim. Ayrıca vermiş olduğu fikirler ve desteklerinden dolayı Sn. Mehmet GÜLEÇ ve Sn. Yücel DEMİR'e teşekkür ederim.

Tez çalışmasının prototip üretimi, test düzeneğinin oluşturulmasında destek veren Sn. Oğuzhan OCAK ve test çalışmalarında desteğinden dolayı Sn. Ersin YOLAÇAN'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca, maddi manevi her türlü destekleriyle her zaman yanımda olan, aileme ve eşime teşekkür ederim.

Haziran – 2016 Barış AKYÜZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET ix
ABSTRACT x
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLENDİRME 3
2. EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI NÜVESİZ MOTORLAR 6
2.1. Giriş 6
2.2. Eksenel Akılı Motor 7
2.3. Eksenel Akılı Motorların Sınıflandırılması 8
2.4. Nüvesiz Motorların İncelenmesi 12
2.5. Eksenel Akılı Motorların Tasarımı 14
2.6. Halbach Dizgisi 16
2.7. Motor Verimi ve Kayıplar 18
2.7.1. Bakır kayıplar 19
2.7.2. Girdap kayıpları 19
2.7.3. Rulman kayıpları 20
2.7.4. Hava sürtünme kayıpları 20
2.7.5. Mekanik ve girdap kayıplarının ölçülmesi 21
3. EASM MOTOR MANYETİK MODELLEME VE REFERANS MOTORUN İNCELENMESİ 22
3.1. Giriş 22
3.2. Referans Motorun Özellikleri 22
3.3. Manyetik Modellemeye Giriş 25
3.4. Referans Motorun Manyetik Modeli 28
3.5. Sonlu Elemanlar Analizi 33
3.6. Referans EASM Motor Sonlu Elemanlar Analizi 36
3.7. Sonuçlar 39
4. TASARLANAN EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI NÜVESİZ MOTORUN ANALİZLERİ 40
4.1. Tasarım Kriterleri 40
4.2. Ön Boyutlandırma ve Kutup Sayısı Optimizasyonu 41
4.3. Tasarlanan EASM Motorun Manyetik Modellemesi 43
4.4. Tasarlanan Motorun Sonlu Elemanlar Analizi 44
5. EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI NÜVESİZ DİSK MOTORUN ÜRETİMİ VE DOĞRULAMASI 48
5.1. Giriş 48
5.2. Rotor Üretimi 48
5.3. Stator Üretimi 50
5.4. Motorun Birleştirilmesi 52

5.5. Deney Düzeneği 52
5.6. Deneysel Sonuçlar 53
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 57
KAYNAKLAR 58
EKLER 61
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 65
ÖZGEÇMİŞ 66

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Otomotiv uygulamalarında tekerlek içi motor tasarımı 3
Şekil 1.2. Avrupa yol ulaşım araştırma danışma kurulu yol haritası 4
Şekil 1.3. Lohner-Porsche Mixte Hybrid aracında..... 4
Şekil 2.1. NdFeB maliyet değişimi 6
Şekil 2.2. EASM ve RASM akı yolları 7
Şekil 2.3. Eksenel akılı motorların sınıflandırılması..... 8
Şekil 2.4. Eksenel akılı motor yapıları a) tek rotor, tek stator yapısı
b) çift rotor nüveli stator yapısı c) çift rotor, nüvesiz stator yapısı
d) çift rotor çıkık sargılı stator yapısı e) tek rotor, çift stator yapısı 9
Şekil 2.5. Tek rotor çift stator manyetik akı şekilleri a) N-N mıknatıs dizilimi
b) N-S mıknatıs dizilimi..... 10
Şekil 2.6. Tek stator çift rotor manyetik akı şekilleri a) N-S mıknatıs dizilim
b) N-N tipi mıknatıs dizilimi..... 11
Şekil 2.7. Çok katmanlı eksenel akılı motor topolojileri
a) N-N mıknatıs dizilimi b) N-S mıknatıs dizilimi 12
Şekil 2.8. Mıknatıs yerleşimi a)çıkık kutuplu mıknatıs
b) gömülü kutuplı mıknatıs 12
Şekil 2.9. Nüvesiz EASM jeneratör 70 kW, 3000 rpm 13
Şekil 2.10. Sürekli mıknatıslı motorların tasarım süreçleri 14
Şekil 2.11. Halbach dizilimi 17
Şekil 2.12. Farklı açılarda yönlendirilmiş mıknatıs dizileri
a) 90° yönlendirme b) 60°yönlendirme c) 45° yönlendirme..... 18
Şekil 3.1. Referans motor boyutları 23
Şekil 3.2. Referans motor stator..... 23
Şekil 3.3. Stator sargıları a) Seri bağlantı b) Paralel bağlantı 24
Şekil 3.4. Referans motor rotor ve mıknatıs yapısı a) rotor b)mıknatıs yapısı 24
Şekil 3.5. Hall-efekt sensör ve çıkış sinyalleri..... 24
Şekil 3.6. Elektrik ve manyetik eşdeğer devresi 26
Şekil 3.7. EASM motor için iç, dış ve ortalama yarıçap bilgileri 28
Şekil 3.8. Kaçak akılar a) hava aralığı kaçak akıları b) mıknatıslar arası
kaçak akılar 29
Şekil 3.9. Mıknatıs manyetik modeli 31
Şekil 3.10. Referans motorun manyetik modeli..... 31
Şekil 3.11. SEA akı değişim değerleri 32
Şekil 3.12. Hava aralığı B(T) değerleri..... 33
Şekil 3.13. Sonlu elemanlar modeli a) 2D model b) 3D model 34
Şekil 3.14. Dairenin sonlu elemanlar ile çevrenin hesaplanması a) daire
gösterimi b)orta yoğunluklu sonlu eleman yaklaşımı c)yüksek
yoğunluklu sonlu eleman yaklaşımı..... 34
Şekil 3.15. Referans motor stator ve rotor modelleri..... 36
Şekil 3.16. Referans motor tam modeli..... 37
Şekil 3.17. Referans motor mesh yapısı..... 37
Şekil 3.18. Referans motor momentinin kontrol açısına göre değişimi..... 38

Şekil 3.19. Referans motoru çıkış momenti değişimi 38
Şekil 3.20. Referans motor moment akım ilişkisi 39
Şekil 3.21. Referans motor zıt EMK analizi 39
Şekil 4.1. Tasarlanacak EASM motorun moment-hız karakteristiği 41
Şekil 4.2. Moment yoğunluğu-kutup sayısı grafiği 41
Şekil 4.3. Güç yoğunluğu-kutup sayısı değişimi 42
Şekil 4.4. Ağırlık-kutup sayısı değişimi 42
Şekil 4.5. Moment, ağırlık oranına göre kutup sayısı değişimi 42
Şekil 4.6. Hava aralığı B(T) değerleri 44
Şekil 4.7. Mesh yapısı 45
Şekil 4.8. Zıt EMK faz-faz arası ve faz gerilim dalga şekli 46
Şekil 4.9. FFT Analizi 46
Şekil 4.10. Eksenel akılı motor momentinin kontrol açısına göre değişimi 47
Şekil 4.11. N44H Moment grafiği 47
Şekil 4.12. N44H Moment-Akım ilişkisi 47
Şekil 5.1. Rotor için kullanılan mıknatıslar 48
Şekil 5.2. Trapedozial üretilmiş N ve S kutuplu mıknatıslar 49
Şekil 5.3. Üretimi yapılan rotor plakaları 49
Şekil 5.4. Eksenel akılı motor için üretimi yapılan rotor 49
Şekil 5.5. Motor mili 50
Şekil 5.6. Stator üretimi 50
Şekil 5.7. Kılavuz üzerinde sarım işlemi bitmiş stator sargısı 51
Şekil 5.8. Stator üretimi a) kalıp içindeki stator b) üretilmiş stator 51
Şekil 5.9. Motor deney düzeneği 52
Şekil 5.10. Zıt EMK test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması 54
Şekil 5.11. Zıt EMK test ve simülasyon sonuçlarının FFT analizi 54
Şekil 5.12. 3 Faz için zıt EMK ölçümleri 55
Şekil 5.13. Test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması 55
Şekil 5.14. 8 Arms değeri ile moment çıkış grafiği 56

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Referans Motor Özellikleri 22
Tablo 3.2. Manyetik ve elektrik devre elemanları benzetim modeli..... 25
Tablo 3.3. Kutup-kutup arası manyetik akı..... 32
Tablo 3.4. İki mıknatıs arası oluşan manyetik akıların karşılaştıtılması..... 33
Tablo 4.1. Tasarlanan EASM teknik özellikleri..... 40
Tablo 4.2. Optimum motor parametreleri 43
Tablo 4.3. Kutup-kutup arası manyetik akı..... 43
Tablo 4.4. İki mıknatıs arası oluşan manyetik akıların karşılaştırtılması 44
Tablo 4.5. Modellenen parçaların tetra sayısı 45
Tablo 4.6. Mıknatıs özellikleri 45
Tablo 5.1. Deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması 55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

P_R : Motor çıkış gücü, (W)
η : Verim
m : Motor faz sayısı
K_p : Güç dalga katsayısı
E_{pk} : EMF tepe değer, (V)
I_{pk} : Faz akımı tepe değeri, (A)
K_e : EMF faktörü
N_t : Faz başına sarım sayısı
B_g : Hava aralığı akı yoğunluğu, (T)
f : Besleme frekansını, (kHz)
p : Kutup çifti
D_0 : Motor dış çapı, (mm)
D_i : Motor iç çapı, (mm)
λ : Motor çap oranı
A_t : Toplam elektriksel yükleme, (V)
K_ϕ : Rotor elektriksel yüklemesinin, stator yüklemesine oranı
m_1 : Stator faz sayısı
K_i : Akım dalga faktörün
K_p : Elektriksel güç dalga faktörü
P_{elec} : Elektrik kayıplarının toplamı, (W)
P_{rot} : Mekanik kayıpların toplamı, (W)
P_{cu} : Bakır kayıpları, (W)
P_e : Girdap kayıpları, (W)
P_{fr} : Rulman kayıpları, (W)
P_{wind} : Hava sürtünme kayıpları, (W)
τ : Motor momenti, (Nm)
ω_m : Motor mili dönme hızı, (rad/sn)
R_1 : Sargı direnci, (Ω)
N : Faz başına sargı sayısı
l_{av} : Sargının ortalama uzunluğu, (mm)
a_p : paralel iletken sayısını
A : Kesit alanı, (mm^2)
σ_{cu} : Bakır iletkenlik katsayısı, ($m/\Omega\ mm^2$)
ρ_{cu} : Bakırın özgül kütlesi, (kg/mm^3)
m_{con} : Stator iletkeninin sargı sonları ve yalıtım malzeme hariç kütlesi, (kg)
B_g : Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu, (T)
k_{fb} : Rulman sürtünme katsayısını
m_r : İki rotorun mıknatıslar dahil kütlesini, (kg)
m_{sh} : Şaft dahil stator kütlesini, (kg)
R_{out} : Dış yarıçap, (mm)
R_{in} : İç yarıçap, (mm)
R_{ave} : Ortalama yarıçap, (mm)

R_e : Reynolds sayısı
R_{sh} : Şaftın dış yarıçapı (mm)
v : Gerilim, (V)
i : Akım, (A)
E : Elektrik alan şiddeti, (V/m)
J : Akım yoğunluğu, (A/m^2)
σ : İletkenlik, (S/m)
$\mathcal{F}$: Magneto Motor Kuvvet, (A-t)
ϕ : Akı, (Wb)
$\Re$: Relüktans, (A-t/Wb)
H : Manyetik alan şiddeti, (A-t/m)
B : Manyetik akı yoğunluğu, (T)
μ : Geçirgenlik, (H/m)
μ_0 : Havanın manyetik geçirgenliğini, (Hm^{-1})
g_1 : Ana relüktansın takip ettiği hava aralığı uzunluğu, (mm)
g_2 : Kaçak relüktansın takip ettiği hava aralığı uzunluğu, (mm)
w_{g1} : ana relüktansın genişliği, (mm)
w_{g2} : kaçak relüktansın genişliği, (mm)
$R_{m,n}$: İki mıknatıs arasında oluşan relüktans, (A-t/Wb)
$g_{m1,2}$: iki mıknatıs arası oluşan relüktansın hava aralığı uzunluğunu, (mm)
$w_{m,1}$: Relüktans genişliğini, (mm)
$R_{r,n}$: Rotor destek çemberinin eşdeğer manyetik direnci, (Ω)
l_r : Akı yolu uzunluğu, (mm)
w_r : Rotor destek çember kalınlığını, (mm)
ϕ_m : Sürekli mıknatıs akısı, (Wb)
R_{pm} : Sürekli mıknatıs direnci, (Ω)

Kısaltmalar

EA : Elektrikli Araç
EASM : Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı
EMK : Elektro Motor Kuvvet
NdFeB : Neodyum – Demir – Bor
RASM : Radyal Akılı Sürekli Mıknatıslı
SEA : Sonlu Elemanlar Analizi
SM : Sürekli Mıknatıs
SMSM : Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

DÜŞÜK GÜÇLÜ ELEKTRİKLİ TAŞIT UYGULAMALARINDA KULLANILMAK ÜZERE EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI NÜVESİZ BİR DİSK MOTOR TASARIMI, ÜRETİMİ VE DOĞRULAMASI

ÖZET

Bu çalışma, bir eksenel akılı motor referans alınarak daha küçük uygulamalara uygun şekilde daha düşük güçlü ve kompakt motor tasarımı yapılmıştır. Referans motora ait rotor, stator, sargı yapıları detaylıca incelenmiş ve motor sonlu elamanları analizleri ile doğrulanmıştır. Elde edilen bilgiler ışığında daha düşük güç gerektiren uygulamalar için boyutlandırma çalışmaları yapılmış ve genel motor yapısı belirlenmiştir. Tasarımı yapılan eksenel akılı motor sonlu elemanlar analiz programı ile modellenerek çıkış değerleri elde edilmiştir. Tasarımın doğrulanmasından sonra prototip üretim gerçekleştirilmiştir ve laboratuvar ortamında oluşturulan deney düzeneği ile test edilmiştir. Test sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Disk Motor, Eksenel Akılı Motor Tasarımı, Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Motor, Motor Test Düzeneği, Sonlu Elemanlar Analizi.

DESIGN, MANUFACTURING AND VALIDATION OF A CORELESS AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET MOTOR FOR LOW POWERED ELECTRIC VEHICLE APPLICATIONS

ABSTRACT

In this study, an axial flux machine was taken as reference to redesign for low powered and compact applications. Rotors, stator, and winding of reference motor was examined in detail and the design was validated with 3-D finite element analysis. With the acquired knowledge, motor sizing work was done and motor structure was determined for low-powered applications. New motor was analytically modelled and analysis with 3-D finite element program. After the design validation prototype production was realized and designed motor was tested in laboratory conditions. Finally prototype motor design 3-D finite element analysis and test results was compared.

Key words: Disk Motor, Axial Flux Motor Design, Axial Flux Permanent Magnet Motor, Motor Test Setup, Finite Element Analysis.

GİRİŞ

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı (EASM) motorlar elektromanyetik tasarım olarak radyal akılı sürekli mıknatıslı motorlar (RASM) ile aynı yapıda olsa da mekanik tasarım, termal analizleri ve üretim metotları olarak daha farklı ve zor bir konumdadır. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorlar mekanik tasarımlarından dolayı disk motor olarak da adlandırılmaktadırlar. EASM motorlar enerji verimliliği ve kompakt yapısı sayesinde artık birçok uygulamada kullanılmaktadır. Fan, pompa, mekanik işleme tezgâhları, robotlar ve özel araçların yarışmalarında çok fazla karşımıza ürün olarak çıkarken, binek ve ticari araç uygulamalarında hatta hava taşıtlarının itiş sistemleri üzerinde testleri ve uygulamaları yapılmaya başlanmıştır [1]. Araç uygulamalarında tekerlek devir değerleri, radyal akılı bir motorun devir değerinden düşük olduğu için bir dişli kutusu kullanılması ya da yüksek moment düşük devir yapısına sahip elektrik motor geliştirilmesi gerekmektedir. Bu hem mekanik konumlandırmayı hem de maliyeti arttırmaktadır. Eksenel akılı motorlarda yüksek güç-ağırlık oranı, rotor yüzeyi düzlemsel (planar) olması sayesinde çok kutuplu bir tasarım ile bu tür düşük hızlı, direk sürüşlü uygulamalar da istenen sonuçlar daha az hammadde kullanımı ile sağlanabilir, aynı zamanda EASM makinalar, konvansiyonel elektrik motorlarına göre daha düşük gürültü ve titreşim seviyelerine sahiptir.

Bu tezde yapılmış olan çalışmalar 6 başlık altında toplanmıştır, bu başlıklarda yapılan çalışmalar aşağıda açıklanmıştır.

Bölüm 1'de disk motorlar için genel bilgilendirme yapılmıştır. Dünyada yapılmış olan disk ve eksenel akılı motorlara örnekler verilmiştir. Literatür araştırmasında dikkat çeken konular hakkında bilgi paylaşılmıştır.

Bölüm 2'de Eksenel akılı motor tipleri hakkında ayrıntılı bilgiler paylaşılmış örnek uygulamalar ve Eksenel akılı motorların avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir. Nüvesiz motor yapıları üzerine bilgi verilmiştir.

Bölüm 3’de Referans motor hakkında bilgiler verilmiş. Motor üzerinden yapılan ayrıntılı analizler gerçekleşmiştir. Öncelikli olarak referans motorun manyetik eşdeğer devresi çıkarılmış ve sonlu elemanlar analizi ile bu çıkan değerler arasında kıyaslama yapılmıştır. Referans motorun sonlu elemanlar analizi doğrultusunda motor çıkış değeri incelenmiştir.

Bölüm 4’de verilen kriterler doğrultusunda disk motor tasarımına gidilmiştir. Tasarım girdileri belirlenmiş, ön boyutlandırma sonrasından nihai tasarımın sonlu elemanlar analizleri yapılmış ve motor çıkış değerlerine ulaşılmıştır.

Bölüm 5’de Tasarlanan motorun prototip üretimi doğrulaması hakkında bilgiler verilmiştir, motor üretiminde kullanılan malzemeler, metotlar ve parçalar anlatılmıştır. Prototip motor testleri ve deney düzeneği hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Test sonuçları ve simülasyon sonuçları arasında karşılaştırma yapılmıştır.

Bölüm 6’da elde edilen sonuçlar özetlenmiş, çalışma hakkında genel değerlendirme yapılmıştır. Bu çalışma sonrası geliştirilmesi gereken noktalar üzerine düşüncelere yer verilmiştir.

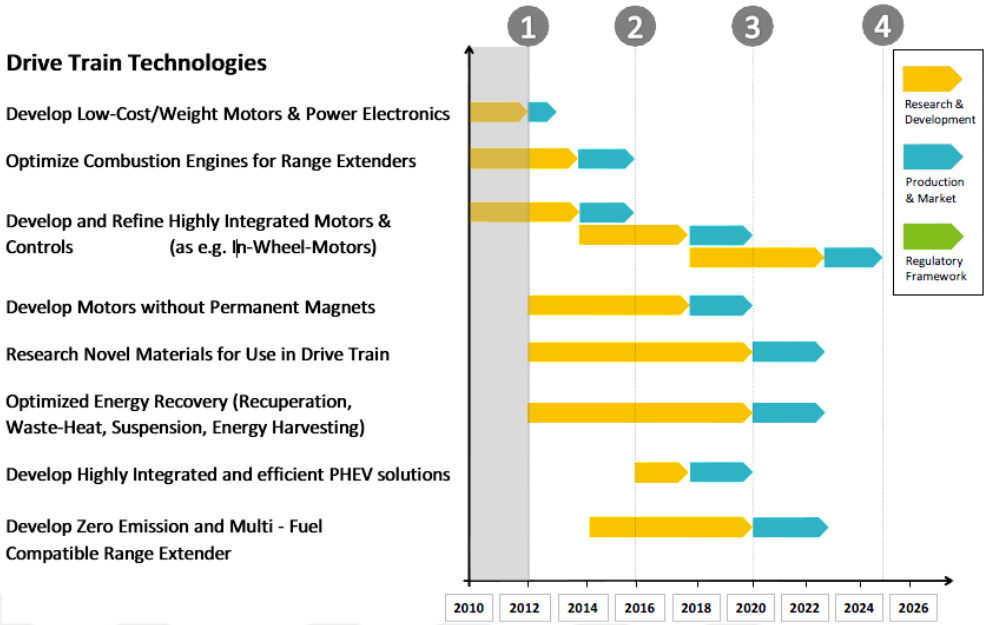
1. GENEL BİLGİLENDİRME

Eksenel akılı motorlar (disk motorlar) yapısal avantajı ile elektrikli araç uygulamalarında tekerlek içine yerleştirilebilir ve bu tasarım ile direk sürüş sayesinde önemli ölçüt olarak enerji verimliliği açısından büyük önem arz etmektedir. Otomotiv sektöründe tekerlek içi motor (In-Whell motor) yapısı elektrikli motosikletlerde kullanılmakla beraber artık birçok otomotiv uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır [2] (Şekil 1.1).



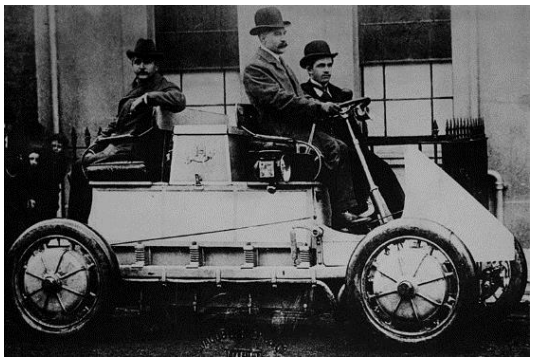
Şekil 1.1. Otomotiv uygulamalarında tekerlek içi motor tasarımı

Tekerlek içi motor yapılarının gelecekte kullanılması ve geliştirilmesi üzerine Avrupa Yol Ulaşım Araştırma Danışma Kurulu tarafından hazırlanan kara yolu araçlarının elektrifikasyonunu kapsayan stratejik yol haritalarında tekerlek içi motorların 2022 yılında üretimi ve pazarda yer bulması hedeflenmiştir (Şekil 1.2) [3].



Şekil 1.2. Avrupa yol ulaşım araştırma danışma kurulu yol haritası [3]

Tekerlek içi motorun araçlarda kullanımı güç aktarım sistemindeki bir çok kayıpları elimine etmesi ve yüksek verim sağlamasıdır, elimine edilen aktarma parçaları sayesinde araç içi kullanım hacmi arttırılabilir veya daha küçük araç tasarımlarına imkan verebilir. Tekerlek içi motorları üzerine birçok araştırma yapılmaya başlamış olsa da ilk defa 1884 yılında patenti alınmıştır [4]. Pratik olarak Şekil 1.3'de görülen tasarlanmış ilk elektrikli araçlardan biri olan Lohner-Porsche Mixte Hybrid aracında kullanılmıştır [5].



Şekil 1.3. Lohner-Porsche Mixte Hybrid aracında [5]

Bu çalışmanın amacı iki rotor tek stator mimarisine sahip nüvesiz eksenel akılı bir senkron motor tasarımıdır. Motor tasarımı ve optimizasyonunun yanında üretimi de gerçekleştirilmiş ve doğrulanmıştır. Motor tasarımında uygulama için optimum hız ve

moment ihtiyaçlarına göre verimli çalışacağı bölge içinde motor tasarımı yapılacaktır. Tasarımda parametrik çalışmalar da yapılarak optimum malzeme kullanımına gidilecek ve yüksek güç yoğunluğu hedeflenecektir.

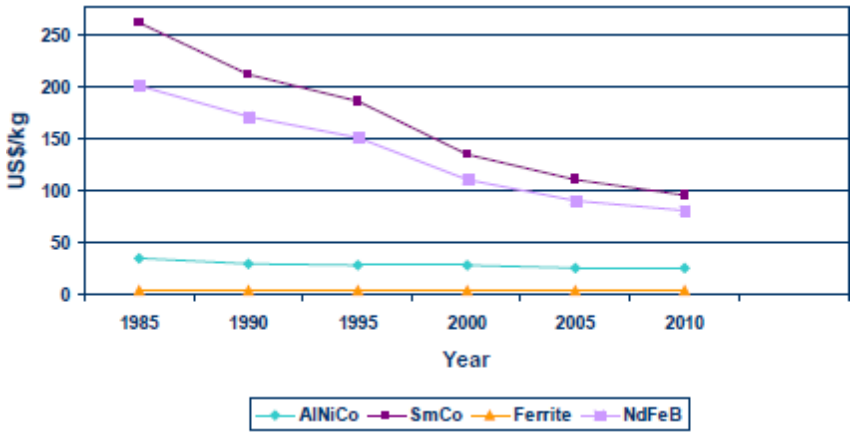
Bu çalışma kapsamında referans motora ait analizler yapılmış ve tasarlanacak olan motor için gerekli olan moment ve hız ihtiyaçlarına göre ön tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Ön tasarımda yapılan analizler sonucunda belirlenen noktalarda detaylı sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır ve en iyi sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen motor tasarımı için gerekli olan mekanik tasarım yapılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Son tasarım doğrultusunda prototip üretime gerçekleştirilmiş, üretilen prototip performans testleri yapılmıştır. Son olarak test verileri ile simulasyon verileri karşılaştırılmıştır.

2. EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI NÜVESİZ MOTORLAR

2.1. Giriş

Güç elektroniği ve enerji verimliliği konuları önemi artması ile uygulamaya yönelik topoloji tasarımları konvansiyonel uygulamaların önüne geçmeye başlamıştır. Eksenel akılı motorların ilk prototipi 1831 yılında üretilen Faraday diski olmuştur [6]. Faraday tarafından geliştirilen eksenel akılı yapı uygulamalarda çok yer bulamamıştır. Sürekli mıknatıslı malzeme teknolojisinin gelişmesi ile eksenel akılı motor çalışmaları daha geniş bir yer bulmaktadır. Günümüzde ise uygulamaya yönelik olan motor tasarımları ön plana çıkmaktadır.

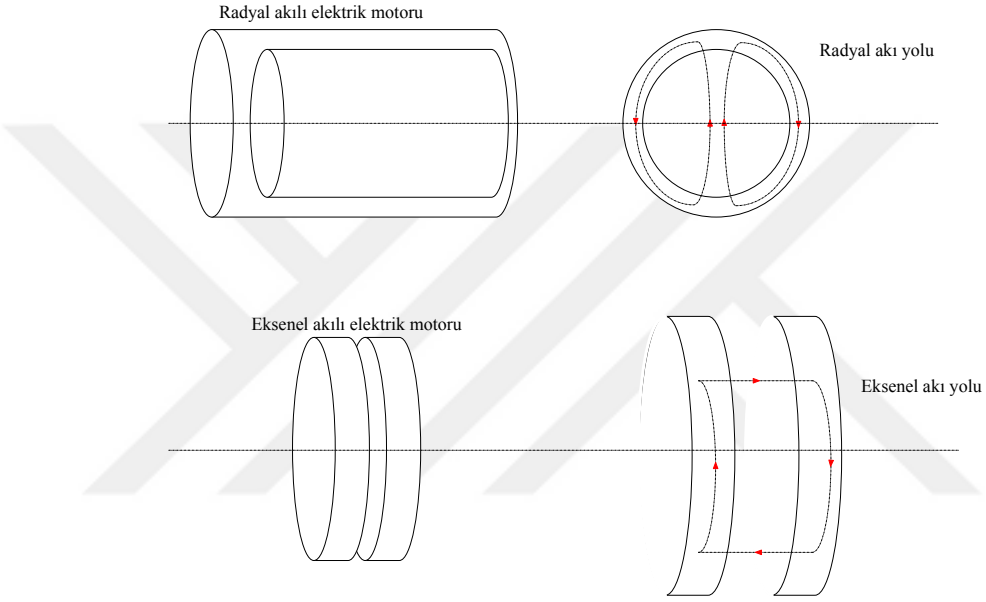
Mıknatıslı uyartım pratik olarak ilk defa 1830'ların başında kullanılmış olsa da, çok düşük manyetik kalitesi yüzünden yer bulamamıştır. 1931 de Alnico'nun keşfi, 1950'lerde Barrium ferrit ve 1983 de nadir toprak elementlerinden üretilen NdFeB (neomidyum-ferrite-boron) ile motor uygulamalarında sürekli mıknatıs gerçekçi bir şekilde yer bulmaya başlamıştır [6] . Keşfinin ilk zamanlarında 250$/kg olan fiyatı günümüzde uzak doğuda 20$/kg ye kadar düşmüştür (Şekil 2.1) [7]. Bunun sayesinde birçok farklı uygulamada kullanım alanı bulmaya başlamıştır.



Şekil 2.1. NdFeB maliyet değişimi [7]

2.2. Eksenel Akılı Motor

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı (EASM) makineler incelediğimizde; Şekil 2.2'de görüldüğü gibi z ekseni ile aynı doğrultuya sahiplerdir. Bundan dolayı manyetik devre radyal akılı sürekli mıknatıslı (RASM) dan farklı olarak eksenel düzlemde kendini tamamlar. Statorun iç çapı (*Di*) dış çapına (*Do*) arasındaki radyal uzunluk motorun etkin kısmıdır. Eksenel akının geçtiği yüzey dış yarıçap ve iç yarıçap arasındaki simit şeklindeki bölümün hava aralığına bakan yüzeylerinde moment üretimi olmaktadır.

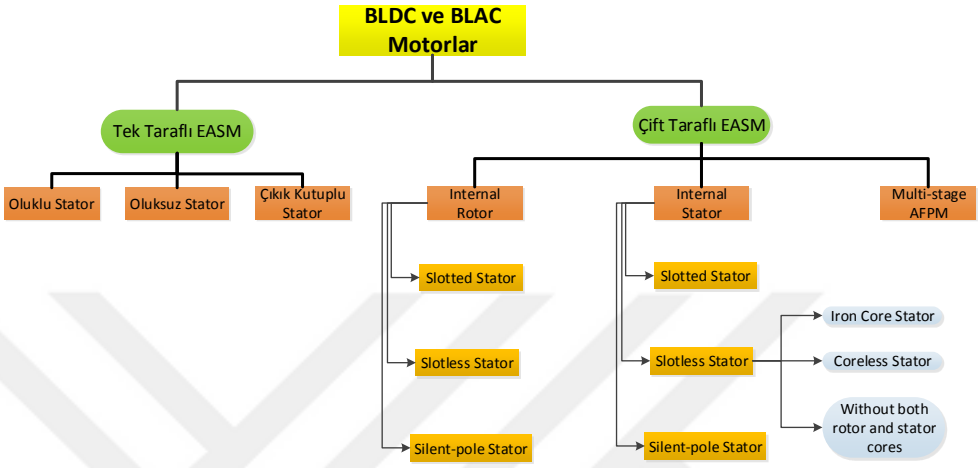


Şekil 2.2. EASM ve RASM akı yolları

EASM aynı zamanda disk motor olarak da bilinirler ve isminden de anlaşıldı gibi manyetik akı yolu rotor ekseninden doğru geçerken, bu RASM için hava aralından radyal olarak geçmektedir. Kompakt yapıları, yüksek moment ve düşük hız özellikleri sayesinde, silindirik radyal akılı sürekli mıknatıslı (RASM) makinenin iyi bir alternatifidir. EASM motorlar elektrikli araç uygulamaları, pompalar, fanlar, santrifüjler, robotlar ve endüstriyel ekipmanların tahrikinde kullanılmaktadır. Daha büyük çapta tasarlanabilen rotor ile eylemsizlik momenti sayesinde volan kullanılan örnekleri karşımıza çıkmaktadır [8] . EASM makineler küçük ve orta ölçekte güç üretiminde de kullanılabilmektedirler. Çok kutuplu yapılabilmelerinden dolayı bu makineler elektromekanik çekiş sürücüleri, rüzgar türbinleri gibi düşük hız uygulamaları için de uygundur.

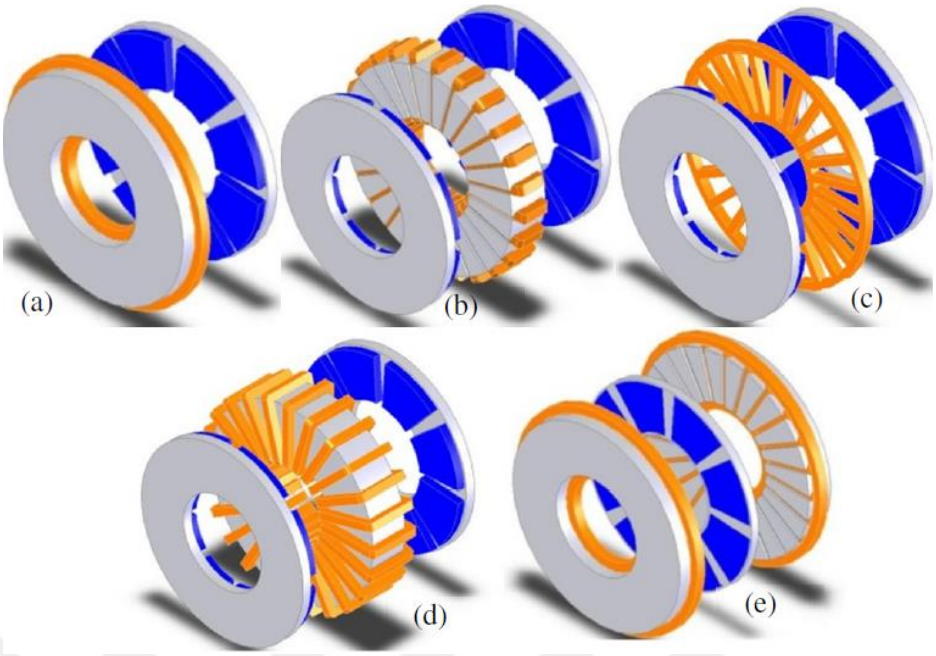
2.3. Eksenel Akılı Motorların Sınıflandırılması

Eksenel akılı motorları stator yapısına göre sınıflandırma sınıflandırıldığı gibi rotor ve statorun mekanik yerleşimine göre de sınıflandırılmaktadır. Şekil 2.3'de topoloji ve geometrilerine göre sınıflandırma yapıları görülmektedir.



Şekil 2.3. Eksenel akılı motorların sınıflandırılması

Tek taraflı eksenel akılı motor tasarımı (Şekil 2.4 a) bir stator ve bir rotordan oluşmaktadır. Rotor ve stator arasında düşük manyetik akı yüzünden düşük bir moment üretimine sahiptir. Tek taraflı tasarımda stator ve rotor arasında oluşan eksenel kuvvet çift taraflı tasarıma göre daha az olacaktır. Motor momenti etkin yarıçapı büyütülerek sağlanabilir fakat bu da eksenel akılı motorların avantajı olan kompakt yapıya uygun bir mekanik çözüm olmayacaktır. Stator yapısı oluklu, oluksuz veya çıkık kutuplu olabilir.

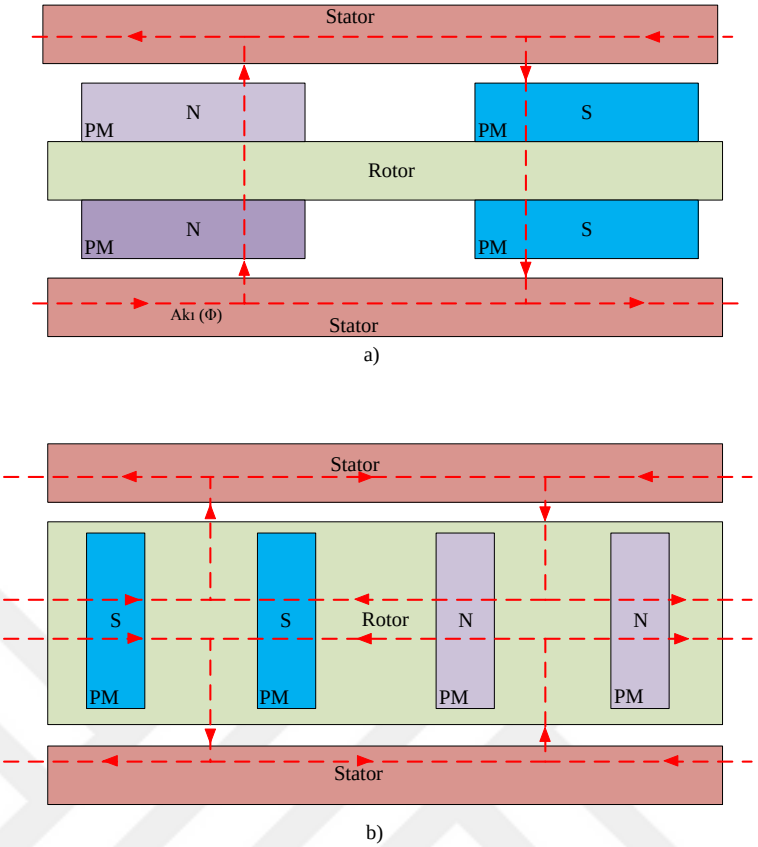


Şekil 2.4. Eksenel akılı motor yapıları a) tek rotor, tek stator yapısı b) çift rotor nüveli stator yapısı c) çift rotor, nüvesiz stator yapısı d) çift rotor çıkık sargılı stator yapısı e) tek rotor, çift stator yapısı [9]

Çift taraflı eksenel yapı moment kalitesi yönünden daha iyi bir çözümdür. Bu tür yapılarda iki statorlu ya da iki rotorlu olarak tasarlanabilirler. (Şekil 2.4 b , Şekil 2.4 c, Şekil 2.4 d). Bu yapıda eksenel manyetik kuvvetlerin dengede olduğu da unutulmamalıdır.

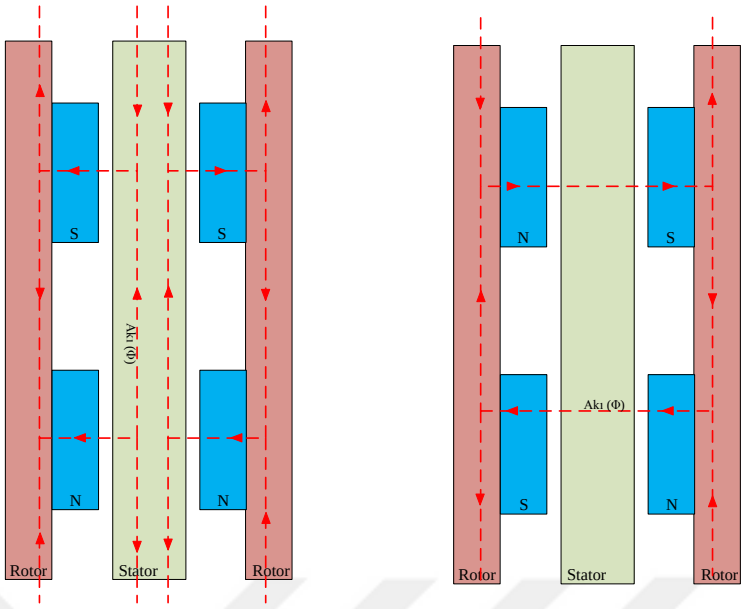
İki stator tek rotor yapılarda rotor iki stator arasına yerleştirilmiştir. (Şekil 2.4.e) Rotor yapısı oluşturulurken akı yapısına göre malzeme kullanılması gerekmektedir.

Manyetik akı eğer iki stator arasında süreklilik sağlıyorsa mıknatıslar ferromanyetik bir malzeme (Demir mıknatıs desteği) sabitlenmeleri gerekmektedir (Şekil 2.5.a). Aynı eksenel yöndeki manyetik akı iki stator için faklı bir devre oluşturuyorsa mıknatıslar ferromanyetik olmayan bir malzeme ile sabitlenmelidir (Şekil 2.5.b). Rotorun iki statora olan hava aralığı eşit olmak zorundadır aksi halde eksenel kuvvetler arasında eşitsizlik çıkabilir, bu eşitsizlik uzun vadede mekanik sorunlar çıkarabilir. Çift stator yapısı çok daha fazla iletken gerektirecektir ve girdap kayıplarını artıracaktır. Stator yapısı tek taraflı eksenel akılı motorlar gibi oluklu, oluksuz veya çıkık kutuplu olabilir.



Şekil 2.5. Tek rotor çift stator manyetik akı şekilleri a) N-N mıknatıs dizilimi b) N-S mıknatıs dizilimi

Çift rotor tek stator yapılarda genellikle rotor mıknatıs destekleri ferromanyetik malzeme seçilirler (Şekil 2.6). Bunun sebebi manyetik akı devresini ferromanyetik malzeme üzerinden geçirerek akı yolunu tamamlamaktır. Hallbach dizilimi yapılan rotorlarda bu destek malzemesi ferromanyetik olmayabilir. N-N yapılı mıknatıs dizilimi olması halinde mıknatıslar birbirlerine ters yönlendirilmiş olacaktır (Şekil 2.6.a). Bu yapıda manyetik akı devresini stator merkezinden dönerek tamamladığı için merkezde ferromanyetik malzeme olmalıdır. Stator sargıları bu malzeme üzerindeki dişlere sarılarak oluklu yapı oluşturulabilir yada toroid sargı yapısı ile oluksuz yapılabilir, oluksuz yapılmasının nüve üzerinde bir sargı katmanı oluşturacağı için hava aralığını artmasına sebep olacaktır.



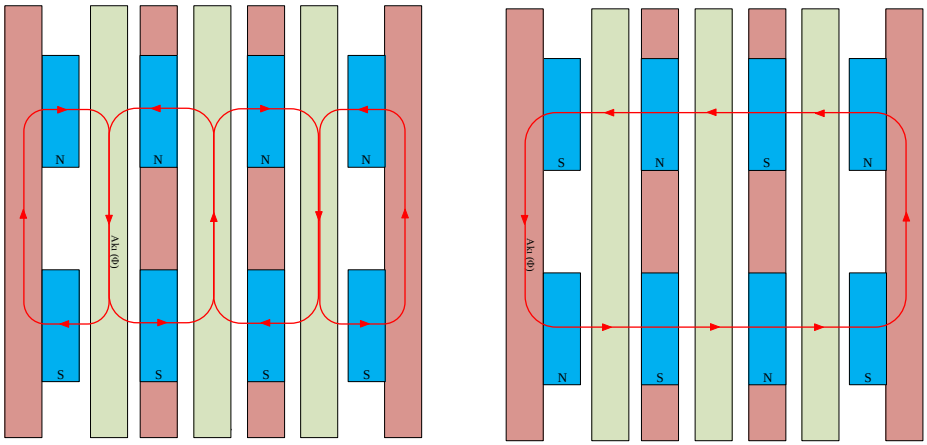
a) b)

Şekil 2.6. Tek stator çift rotor manyetik akı şekilleri a) N-S mıknatıs dizilim b) N-N tipi mıknatıs dizilimi

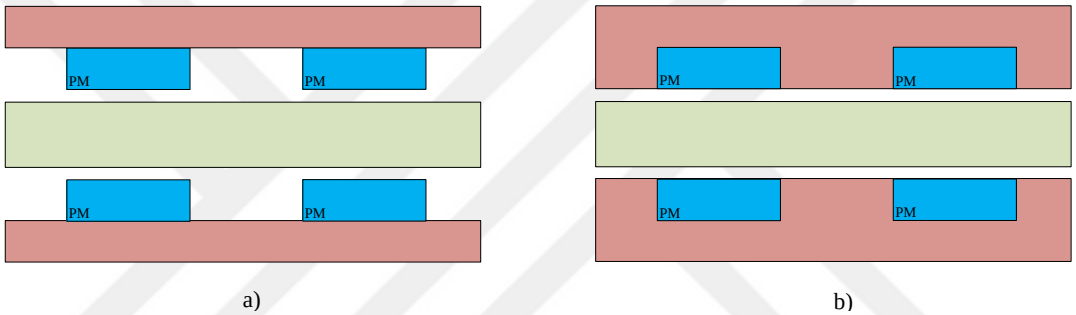
Diğer bir dizilim şekli olan N-S tipi uygulamalarda mıknatıslar aynı eksenel doğrultuda konumlandırılmışlardır (Şekil 2.6.b). Manyetik akı eksenel düzlem üzerinden devresini tamamlar. Çok katmanlı eksenel akılı motorlar ise birden fazla motorun aynı aks üzerine yerleştirilmesi ile oluşturulur. Bu motor yapısında eklenen motorlar N-N veya N-S tipi olacak şekilde düzenlenebilirler.

Şekil 2.7'de görüldüğü gibi çok katmanlı eksenel akılı motor yapılarında N-N yapısı olması halinde manyetik akı yolları rotor sayısı kadar döngü yapmakta, N-S yapısı olması halinde manyetik akı eksenel olarak bütün motor kalınlığını almakta ve tek bir çevrim olmaktadır.

Mıknatısların rotor desteğine konumlandırılması yönünden incelenirse çıkık veya gömülü yapılar mevcuttur (Şekil 2.8). Bu çalışmada üretim avantajları ve performans isterleri düşük moment ve hızda gerçekleşeceği için çıkık yapı seçilmiştir.



Şekil 2.7. Çok katmanlı eksenel akılı motor topolojileri a) N-N mıknatıs dizilimi b) N-S mıknatıs dizilimi



Şekil 2.8. Mıknatıs yerleşimi a)çıkık kutuplu mıknatıs b) gömülü kutuplı mıknatıs

2.4. Nüvesiz Motorların İncelenmesi

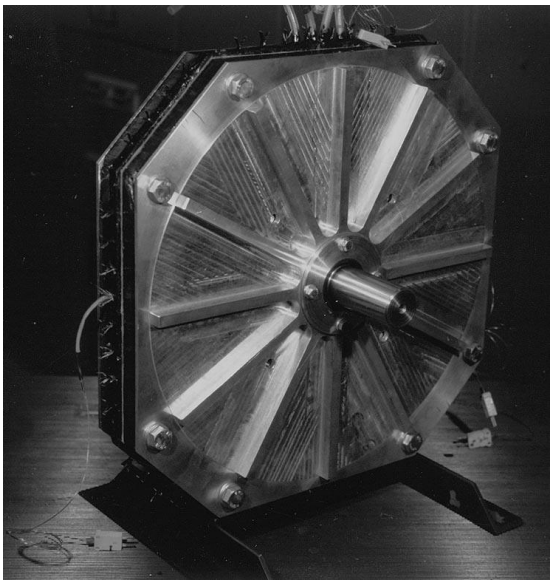
Nüvesiz stator yapısı çift rotor tek stator yapılarında kullanılmaktadır (Şekil 2.4.c). Üretim yapısını kolaylaştırmak için trepozadial sarılmış birden fazla stator sargısı içermekte ve sargıların bir arada tutmak için kompozit malzeme kullanılmaktadır. Nüveli bir yapıya sahip olan stator doğrudan nüvesiz bir yapıya çevrilebilir, nüveli yapıda kullanılan "oluk" yerine "sargı kenarı" terimi kullanılabilir [6]. Nüvesiz EASM yapının belli başlı avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Nüvesiz yapılı bir statorda stotor sargıları çelik laminasyon veya SMC gibi ferromanetik bir yapı içine olmadığından stator-rotor arasın da herhangi bir vuruntu kuvveti olmayacak ve vuruntu momentide oluşmayacaktır.
- Nüvesiz yapı sayesinde normal nüveli motorda oluşan histeriz ve girdap kayıpları mevcut değildir.
- Verimleri nüveli motorlara göre daha yüksek tasarlanabilir.

- Akım-moment ilişkisi doğrusal bir yapıdadır ve rotor nüvesine bağlıdır.
- Stator endüktansının düşük olması bir artı kabul edilebilir.
- Zıt-EMK sinyalinin olabildiğince sinüzodial ve düşük harmonikli tasarlanması mümkündür.
- Stator ferromanyetik malzeme içermediğinden stator tarafında manyetik doyum olmayacaktır [10].

Bu avantajlara karşı olarak hava aralığında istenen manyetik akı yoğunluğunun elde edileblmesi için kullanılan sürekli mıknatıs oranı ve kalınlığı artırılmalıdır.

Nüvesiz stator yapısı birçok farklı uygulamada kullanılmıştır. Çok katmanlı nüvesiz motor, yüksek verim ve ağırlık avantajı sayesinde starosferik insansız hava aracının doğrudan itiş motorları için önerilmiştir [11-12]. Hallbach dizgili rotor destek çemberini ferromanyetik malzeme olmayan EASM yüksek verimi sayesinde güneş arabaları için tasarlanmıştır [13]. Nüvesiz EASM'ler geniş hız yelpazesinde tasarlanabildiği için bir çok farklı doğrudan sürüş uygulamalarında kullanılmışlardır. Örneğin düşük hız uygulaması olarak rüzgar türbinlerinde kullanılmışlardır [14-15]. EASM'ler orta hız aralığı için otomotiv uygulamalarında jeneratör olarak tasarımları bulunmaktadır [16-17]. Yüksek hızlı uygulamalarda EASM'ler gaz türbini çıkışlarına direk entegre edilerek yapılan sistemlerde havacılık ve otomotiv çalışmalarında yer bulmuştur [18-21].



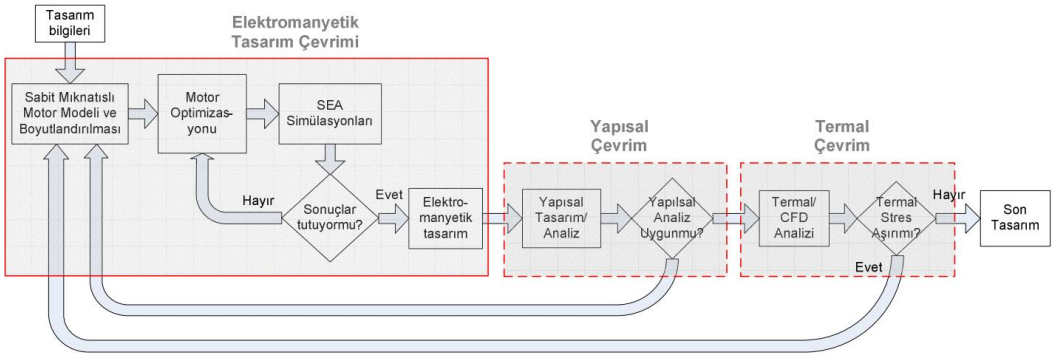
Şekil 2.9. Nüvesiz EASM jeneratör 70 kW, 3000 rpm [21]

Nüvesiz yapının en büyük dezavantajını üretim şeklidir. Stator tarafında herhangi bir metal destek malzemesi olmadığı için üretimde sargıların uygun bir kılavuz ile düzenlenmesi ve epoksi malzeme ile kaplanarak üretilmesi gerekmektedir. Stator üretimi sırasında motor çalıştırılma koşullarında termal olarak sürekli gözlemlenmesi için stator üretiminde sıcaklık sensörü sargıları arasına yerleştirilmelidir. Stator kompozit bir malzeme içine gömüldüğü için seçilen reçinenin yüksek ısıl iletkenliğe sahip olması gerekmekte, motor termal analizi veya testleri mutlaka yapılmalıdır.

Stotor yapısında verimi yükseltmek ve demir kayıplarını azaltmak için nüvesiz tasarlanmıştır ve bakır içinde girdap kayıplarını azaltmak için litz kablosu kullanılan uygulamalar mevcuttur fakat burada dikkat edilmesi gereken nokta litz kablosuun motor maliyetine etkisi olmalıdır (Şekil 2.9) [21].

2.5. Eksenel Akılı Motorların Tasarımı

Eksenel akılı motor tasarımı süreci ile SM motorlar ile aynı aşamalarda gerçekleşmektedir. Diğer motor tiplerinde olduğu gibi manyetik devre analizi ile başlamaktadır. Tasarlanacak olan motorun çalışacağı kriterler doğrultusunda ön boyutlar belirlenir. Tasarım kriterleri arasında motor gücü, çalışacağı hızlar istenen verim maliyet gibi birçok parametre düşünülmesi gerekmektedir. SM motor tasarım süreçleri EA motorlar içinde tekrarlanması gerekmektedir. Şekil 2.10 ‘da gösterildiği gibi motor tasarımında elektromanyetik, yapısal ve termal olmak üzere 3 aşama bulunmaktadır [22] .



Şekil 2.10. Sürekli mıknatıslı motorların tasarım süreçleri [22]

Gelen tasarım bilgileri doğrultusunda manyetik devre üzerinden bir model oluşturulur, oluşturulan model üzerinden kriterler ve kısıtlamalar üzerine bir optimizasyon

yapıldıktan sonra ön tasarım çalışması ortaya çıkar. Bu ön tasarım çalışması (SEA) elektromanyetik problem çözümü yapabilen 2D veya 3D programlar Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ile performans eğrileri çıkartılır. Analiz çıktıları isterleri karşılamıyorsa yeniden devre modeli ve optimizasyon adımları tekrar incelenmelidir. Elektromanyetik tasarım çalışmalarını geçen tasarım yapısal analiz adımına geçebilir. Genel kullanımları direk sürüş olan EA motorlar için yapısal analiz çalışmaları önem arz etmektedir. Yapısal analiz aşamasını geçen motor tasarımı termal analiz programları kullanılarak ısıl analizleri yapılır. Bu adımı geçemeyen tasarım için tekrar elektromanyetik tasarım tekrarlanmalıdır. SM motor tasarım süreçlerinin tüm aşamaları bitirildiğinde nihai tasarım elde edilir.

Uygulamaya göre motor topolojisi belirlendikten sonra motor tasarımı için denklemler oluşturulmalı ve motor boyutlandırma problemleri çözümlenmelidir. Bu çalışmada seçilen motor tipi yüzey mıknatıslı yapılarla aynı olduğu için önceden geliştirilmiş ve doğruluğu ispatlanmış genelleştirilmiş motor boyutlandırma denklemleri kullanılmıştır [23]. Bu denklemler sayesinde motor boyutları isterler ve kısıtlar dahilinde optimize edilebilmekte maliyet, verimlilik ve ağırlık eksenlerinde tasarımlar incelenebilmektedir.

Stator endüktansı ve direncinin ihmal edildiği motorlar için motor çıkış gücü;

$$P_R=\eta m K_p E_{pk} I_{pk} \tag{2.1}$$

şeklinde ifade edilir. Burada; η motor verilimi, m faz sayısını , E_{pk} hava aralığı faz EMF'si tepe değeri, I_{pk} faz akımı tepe değerini temsil etmektedir (2.1). K_p değeri elektriksel güç dalga katsayısı olup, motor EMF ve akım dalga şekline bağlı bir parametredir.

EASM'lar için hava aralığı EMF tepe değer Denklem (2.2) verilmiştir

$$E_{pk}=K_e N_t B_g \frac{f}{p}(1-\lambda^2)D_0^2 \tag{2.2}$$

Denklemde K_e EMF faktörü, N_t faz başına sarım sayısı, B_g hava aralığı akı yoğunluğu, f besleme frekansını, p kutup çifti, D_0 motor dış çapı olarak tanımlanmıştır. λ değeri motor çap oranı olup Denklem (2.3) ile açıklanmıştır.

$$\lambda=\frac{D_i}{D_o} \tag{2.3}$$

D_i motor iç çapını tanımlamaktadır.

Faz akımı tepe değeri Denklem (2.4) ile verilmiştir;

$$I_{pk}=\frac{1}{1+K_\phi}K_i A_T \pi \frac{1+\lambda}{2}\frac{D_o}{2m_1 N_t} \tag{2.4}$$

Burada A_T toplam elektriksel yükleme, $K_\phi$rotor elektriksel yüklemesinin, stator yüklemesine oranı olarak verilmiş olup, EASM'ların rotor sargısı olmadığı için K_ϕ=0 alınmalıdır.

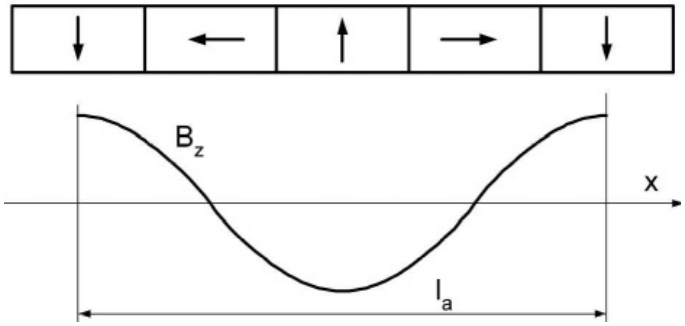
Yukarıdaki denklemlerin birleştirilmesi ile EASM'ler için çıkış gücü aşağıdaki denklem ile elde edilebilir;

$$P_R=\frac{m}{m_1}\frac{\pi}{2}K_e K_i K_p \eta B_g A \frac{f}{p}(1-\lambda^2)\frac{1+\lambda}{2}D_o{}^3 \tag{2.5}$$

Denklem (2.5)'de P_R anma gücü, m motor faz sayısın, m_1 stator faz sayısını, $K_i$akım dalga faktörünü, K_p elektriksel güç dalga faktörünü, η elektrik motoru verimini, B_g hava aralığı akı yoğunluğu, *A* toplam elektriksel yükleme, D_o motor dış çapı olarak tanımlanmıştır [24].

2.6. Halbach Dizgisi

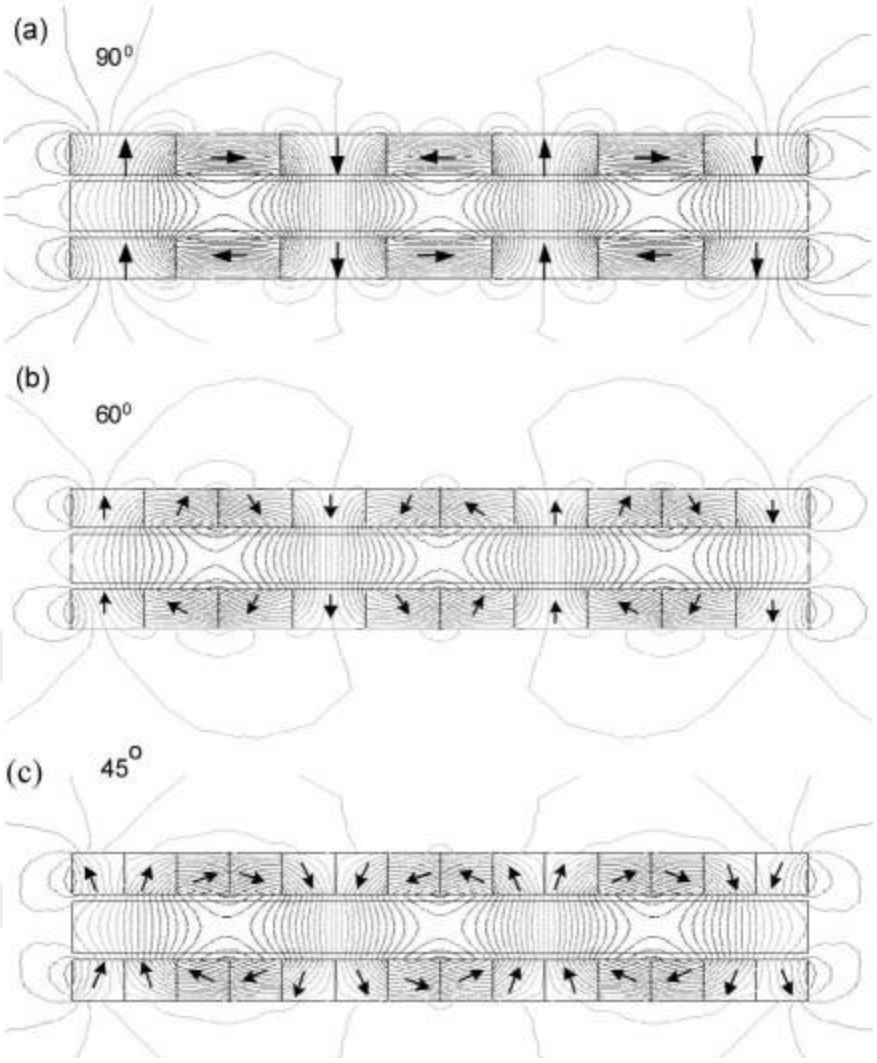
Çift taraflı rotor ve nüvesiz eksenel akılı motorların sürekli mıknatıslı halbach dizgisinden oluşturulabilir. Halbach dizilimde Şekil 2.11 da görüldüğü gibi sürekli mıknatısın magnetizasyonu vektörünün yönlendirilmiştir [6].



Şekil 2.11. Halbach dizilimi [6]

Bu yapının avantajları şunlardır;

- Normal dizilime göre hava aralığı arasındaki manyetik alan daha güçlü olduğu için motor verimi yükselecektir.
- Bu dizilimde manyetik devre direk mıknatıslar üzerinden tamamlanabileceği için mıknatısları tutan bir destek çemberi ferromanyetik olmayan bir malzeme olabilir (alüminyum, karbon fiber vs.) genel olarak bu destek çemberi için çelik kullanılmaktadır, alternatif malzemelerin kullanımı rotorun hafifletilmesine katkı sağlayacaktır.
- Manyetik alan normal dizlime göre daha çok sinosiodal yapmak mümkündür.
- Halbach diziliminde kaçak akından oluşan kayıplar çok daha azdır. [6]



Şekil 2.12. Farklı açılarda yönlendirilmiş mıknatıs dizileri a) 90° yönlendirme b) 60°yönlendirme c) 45° yönlendirme[6]

Halbach diziliminde mıknatıslanma açısı 45° , 60° veya 90° şeklinde düzenlenebilir (Şekil 2.12). Açı dereceleri azalması ile dalga boyu için gerekli olan yönlendirilmiş mıknatıs sayısının arttırılması gerekmektedir, motor performansını arttıran bir etki olsa da maliyet ve üretim yöntemlerini zorlaştırmaktadır.

2.7. Motor Verimi ve Kayıplar

Motor kayıpların kaynakları elektriksel ve mekanik olarak Denklem (2.6) iki kısımda incelenebilir. Elektriksel kayıplar; bakır kayıpları, girdap kayıplarıdır. Mekanik kayıplar ise dönme ile oluşan rulman kayıpları ve hava sürtünme kayıplarıdır.

$$P_{loss}=P_{elec}+P_{rot} \tag{2.6}$$

$$P_{loss}=P_{cu}+P_e+P_{fr}+P_{wind} \tag{2.7}$$

P_{elec} elektrik kayıplarının toplamını, P_{rot} mekanik kayıpların toplamını, P_{cu} bakır kayıplarını, P_e girdap kayıplarını, P_{fr} rulman kayıplarını, P_{wind} hava sürtünme kayıplarını ifade etmektedir Denklem (2.7).

Motor mekanik çıkış gücü Denklem (2.8) ile hesaplanabilir.

$$P_{out}=\tau\cdot\omega_m \tag{2.8}$$

τ motor momenti, ω_m motor mili dönme hızını ifade etmektedir. Motor verimi Denkem (2.9) ile bulunabilir.

$$\eta=\frac{P_{out}}{P_{out}+P_{loss}} \tag{2.9}$$

2.7.1. Bakır kayıplar

Bakır kayıpları nüvesiz motor için en büyük yüzdeyi oluşturmaktadır. Bakır kayıpları için Denklem (2.10) ile hesaplanabilir;

$$P_{cu}=m_1\cdot R_1\cdot I_a^2 \tag{2.10}$$

Bu kaybın hesaplanması için normal koşullarda sargı direncinin ve akımın bilinmesi gerekmektedir. Stator için sargı direnci Denklem (2.11) ile bulunabilir;

$$R_1=\frac{N\cdot l_{av}}{a_p\cdot A\cdot\sigma_{cu}} \tag{2.11}$$

Denklemde, N faz başına sargı sayısını, l_{av} sargının ortalama uzunluğunu, a_p paralel iletken sayısını, A iletkenin kesit alanını, σ_{cu} bakır'ın iletkenlik katsayısı ifade etmektedir [25].

2.7.2. Girdap kayıpları

Girdap kayıpları nüveli motorların statorları lamineli olduğu için ve manyetik akı bir nüveden geçer ve kaçak akılar önemsenmeyecek kadar azdır. Nüvesiz stator

tasarımlarında iletken hava aralığı arasındaki manyetik akı içeresindedir. Sürekli mıknatıslar hareketi ile stator sargıları alternatif akım üretir ve bu girdap akımlarının indüklenmesine sebep olur. Girdap kayıpları frekansın ve iletken çapının bir fonksiyonu olduğu için bu parametrelerin artışı ile artmaktadır [6] ;

$$P_e=\frac{\pi}{4}\frac{\sigma_{cu}}{\rho_{cu}}\cdot f^2\cdot d\cdot m_{con}\cdot B_{mg}^2 \tag{2.12}$$

Denklem (2.12) ile girdap kayıpları hesaplanabilir, denklemde σ_{cu} bakırın iletkenlik katsayısını, ρ_{cu} bakırın özgül kütlesini, f stator akımının frekansını, d iletken yarıçapını, m_{con} stator iletkeninin sargı sonları ve yalıtım malzeme hariç kütlesini, B_{mg} hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu ifade etmektedir. Girdap kayıpları analitik olarak hesaplanabildiği gibi test ile de ölçülebilir

2.7.3. Rulman kayıpları

Düşük boyutlu makineler için rulman kayıpları Denklem (2.13) ile hesaplanabilir;

$$P_{fr}=0{,}06k_{fb}(m_r+m_{sh})\cdot n \tag{2.13}$$

k_{fb} rulman sürtünme katsayısını, m_r iki rotoun mıknatıslar dahil kütlesini, m_{sh} şaft dahil stator kütlesini ifade etmektedir. Rulman sürtünme katsayısı seçilen rulmanın teknik bilgileri arasında verilmektedir [26].

2.7.4. Hava sürtünme kayıpları

Rüzgâr sürtünme kayıpları hesaplanırken dış yarıçapa göre Reynolds sayısı Denklem (2.14) da gösterildiği hesaplanmalıdır;

$$R_e=\rho\frac{R_{out}\cdot v}{\mu} \tag{2.14}$$

Denklem (2.14)'de ρ havanın öz kütlesini, R_{out} dış yarıçapı, $v=2\pi R_{out}n$ dış yarıçapa göre doğrusal hızı, μ havanın dinamik viskozitesini ifade etmektedir. Sürüklenme katsayısı Reynolds sayısı kullanılarak Denklem (2.15) ile hesaplanabilir [29];

$$c_f = \frac{3,87}{\sqrt{R_e}} \tag{2.15}$$

Yukarıdaki katsayıların belirlenmesi ile dönen bir disk için hava sürtünme katsayısı Denklem (2.16) ile hesaplanabilir;

$$P_{wind} = \frac{1}{2} c_f (2\pi n)^3 \left(R_{out}^5 + R_{sh}^5\right) \tag{2.16}$$

R_{sh} şaftın dış yarı çapını ifade etmektedir.

2.7.5. Mekanik ve girdap kayıplarının ölçülmesi

Motor mekanik ve girdap kayıplarının ölçümü test ile ölçümü yapılabilir. Tasarlanan motorun stator ölçüleri ile eş bir sahte stator üretilir ve aynı mekanik boyutlara sahip olan bu sahte stator motora montajı yapılır. Bu statorun diğeri ile aynı boyutlarda olmasının önemi mekanik kayıpların doğru bir şekilde ölçülmesi için önemlidir. Öncelikle gerçek stator ile belirlenen hızlarda motor sürülerek moment ölçümü yapılır, ölçüm alınan hızlar ve moment bilgileri kayıt edilir. Bu ölçümlerdeki değerler hem mekanik kayıpları hem de girdap kayıplarının toplamını içerir [13].

Aynı ölçümler sahte stator takılarak istenen hızlarda dönmesi için gerekli moment deney düzeneğindeki step motor ile uygulanır bu moment ve hız değerlerinde, hava sürtünmesi ve rulman kayıplarının toplamı olan sadece mekanik kayıpları içermektedir. Gerçek stator ile yapılan ölçümlerden sahte statorla yapılan ölçümler çıkarılarak motorda oluşan girdap kayıpları değerine ulaşılabilir. Girdap kayıpları stator sargılarının paralel veya seri bağlanmasına göre farklı durumlar içinde ölçülebilir [13].

3. EASM MOTOR MANYETİK MODELLEME VE REFERANS MOTORUN İNCELENMESİ

3.1. Giriş

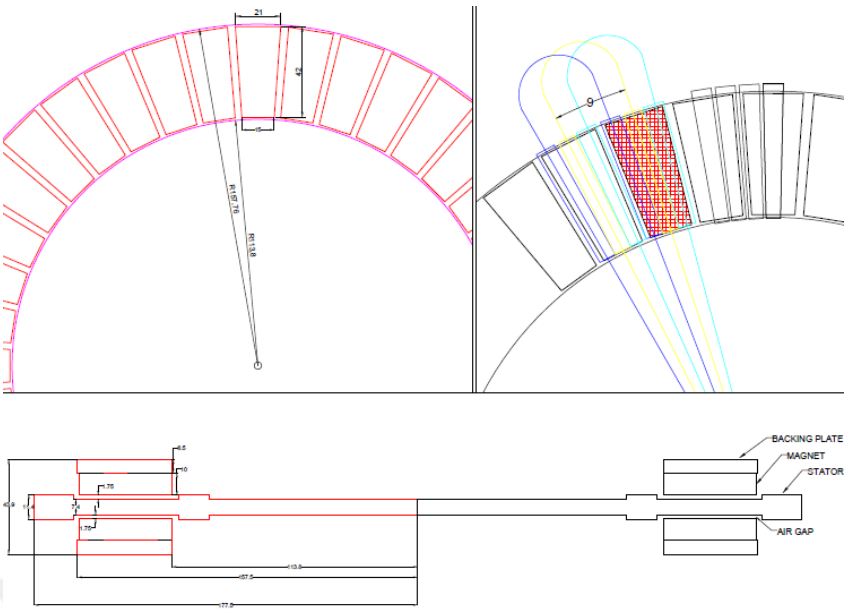
Bu kısımda referans eksenel akılı motor üzerine çalışmalar yapılmıştır. Referans motora ait teknik bilgiler verilmiş ve motor boyutları ve kullanılan malzemeler doğrultusunda modelleme yapılmıştır. Referans motorun manyetik eş değer devresi oluşturulmuş ve manyetik analizleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Son olarak sonlu elemanlar analizleri çalışmaları doğrultusunda çıkış değerleri incelenmiştir. Bu sayede nüvesiz motorların doğru bir şekilde modellenebileceği gösterilmiştir.

3.2. Referans Motorun Özellikleri

Referans motor 1800 Watt güce 111 rad/s açısal hıza sahip iki rotor 40 kutuplu nüvesiz statora sahip eksenel akılı bir motordur (Tablo 3.1). Motor özellikleri Şekil 3.1 de belirtilmiştir. Referans motorun stator yapısı nüvesiz reçine içerisinde sabitlenmiş bir yapıdadır (Şekil 3.2).

Tablo 3.1. Referans Motor Özellikleri

Özellik	Değer
Kutup Sayısı	40
Faz sayısı	3
Ağırlık, (kg)	10,9
Hava aralığı, (mm)	2
Faz direnci, (Ohm)	0,0757
RMS faz akımı, (A)	13,9
Toplam kayıp, (W)	48,6
Çıkış gücü, (W)	1800
Motor Verimi, (%)	97,4
Maksimum hız, (rad/s)	300
Maksimum moment, (Nm)	50,2

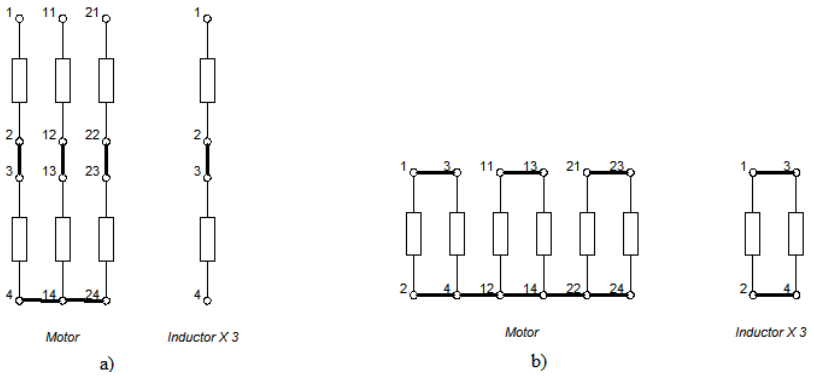


Şekil 3.1. Referans motor boyutları



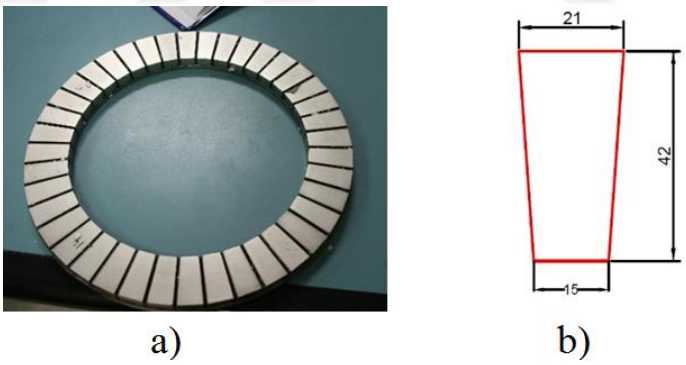
Şekil 3.2. Referans motor stator

Her faz için iki adet iletken kullanılmıştır ve bu iletkenler uygulamaya göre kendi aralarında seri veya paralel olarak düzenlenebilmektedir. Şekil 3.3'de gösterildiği gibi uygulama yüksek ivmelenme ve moment gereksinimi duyuyor ise paralel bağlantı, yüksek hız gereksinimi var ise seri bağlantı uygun yapılmaktadır.

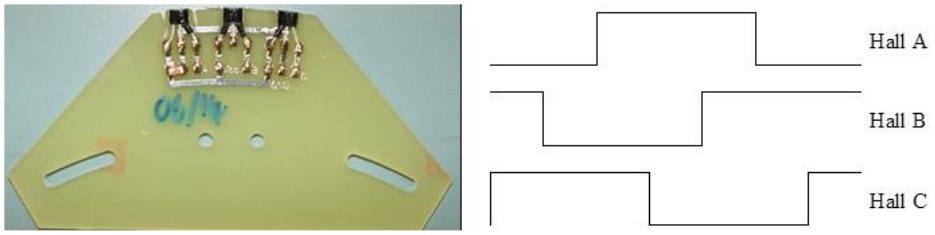


Şekil 3.3. Stator sargıları a) Seri bağlantı b) Paralel bağlantı

Referans motorun rotor 40 kutuptan oluşmaktadır. Çelik rotor destek halkası üzerine mıknatıslar yapıştırılmıştır. Mıknatıslar N-S olarak düzenindedir (Şekil 3.4 a) ve nadir toprak materyali olan neomidyum (NdFeB) kullanılmıştır. Mıknatıs boyutları Şekil 3.4.b 'de gösterilmiştir. Rotor destek çemberi hem manyetik akının eksenel yolunu oluşturmakta hem de mıknatısları tutan bir görev üstlenmektedir. Hall-effect sensörü motor kontrolü için gerekli olan pozisyon bilgisini vermektedir. Ardada gelen 3 mıknatısın merkezine gelecek şekilde 18° açıklık ile Şekil 3.5.a'daki gibi konumlandırılmıştır, sensörlerin çıkış sinyali Şekil 3.5.b'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Referans motor rotor ve mıknatıs yapısı a) rotor b)mıknatıs yapısı



Şekil 3.5. Hall-efekt sensör ve çıkış sinyalleri

3.3. Manyetik Modellemeye Giriş

Elektrik motorlarında moment üretimi için gerekli olan aktif alandaki elektromanyetik kuvvet değeridir. Bundan dolayı aktif alanda oluşan manyetik kuvvetin hesaplanması önemli bir noktadır. Bu hesaplamalar manyetik eşdeğer devre modeli çıkararak yada sonlu elemanlar analizleri ile yapılabilir. Bu bölümde manyetik eşdeğer çıkartma yöntemi ve bunun sonlu elemanlar analiz yöntemi ile karşılaştırılması yapılmıştır. Manyetik eşdeğer devre modeli çıkarılırken devre analiz yöntemleri kullanılır, manyetik alanın oluştuğu akı yolu elektrik devresi gibi modellenerek hesaplanabilir. Manyetik eş değer devrelerde akı kaynağı sürekli mıknatıslar veya bobinler olurken direnç değerleri akının geçtiği malzeme veya hava aralığıdır ve akı bu yollar üzerinden geçerek kendi yolunu tamamlar [27].

Manyetik devre analiz metodu oluşan manyetik akının elektrik devre analizine benzetimi ile değerleri hesaplama üzerine kurulmuştur. Bu metot ile uzun süre alabilecek analizlerin kısa çözümleri yapılarak oluşacak olan zaman kaybının önüne geçilebilir ya da ön kriterler oluşturulabilir. Manyetik devre benzetimi yapılırken elektrik devre analizinde kullanılan Ohm kanunu referans alınır ve bu doğrultuda benzetim yapılır. Bu analizlerde elektrik devrelerinde direnç olarak kullanılan kavram yerine manyetik direnç olan relüktans kullanılır ve malzeme özelliklerine göre hesaplanması gerekmektedir. Elektrik devrelerinden kullandığımız elektromotor kuvvet değerinin (EMK) yerini manyeto motor kuvvet (MMK) kavramı almaktadır. Tablo 3.2'de manyetik devre ye karşılık gelen elektrik devre elemanlarının benzetimleri gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Manyetik ve elektrik devre elemanları benzetim modeli

Elektriksel	Manyetik
Gerilim (v), [V]	MMF ($\mathcal{F}$), [A-t]
Akım (i), [A]	Akı (ϕ), [Wb]
Direnç (R), [ohm]	Relüktans ($\Re$), [A-t/Wb]
Elektrik alan şiddeti (E), [V/m]	Manyetik alan şiddeti (H), [A-t/m]
Akım yoğunluğu (J), [A/m2]	Manyetik akı yoğunluğu (B), [T]
İletkenlik (σ), [S/m]	Geçirgenlik (μ), [H/m]

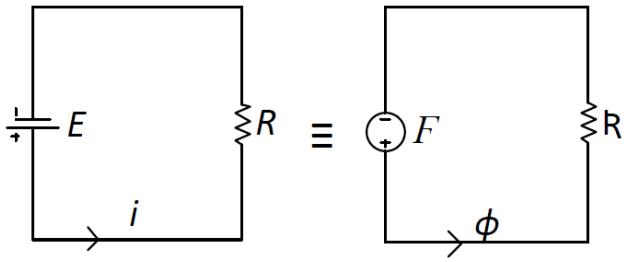
Tablo 3.2'de verilen benzetim modelinde gerilim manyetiksel olarak manyeto motor kuvvetine, akım manyetik akıya ve elektriksel direnç de manyetik dirence yani relüktans olarak benzetimleri yapılmıştır. Denklem (3.1)'de manyeto motor kuvvet denklemi verilmiştir.

$$MMK = \phi\Re \tag{3.1}$$

Manyeto motor kuvveti aynı elektrik devrelerindeki gerilim denklemi gibi devreden akan akı ve devrenin gösterdiği direncin çarpılmasıyla bulunur. Manyeto motor kuvvetinin kaynağı ise manyetik devrede akıyı oluşturan fiziksel bir kuvvettir ve bobin sarım sayısı ile bobinden geçen akımın çarpılmasıyla elde edilir. Denklem (3.2)'de manyeto motor kuvvet denklemi gösterilmiştir.

$$MMK = Ni \tag{3.2}$$

Denklem (3.2)'de N sarım sayısını, i ise bobinden geçen akımı ifade etmektedir. Şekil 3.6'de elektrik ve manyetik eşdeğer devreleri gösterilmiştir. Eşdeğer devrede elektriksel olarak akım manyetik eşdeğeri olarak akı, elektriksel gerilim manyetik eşdeğer olarak MMK, elektriksel direnç ise manyetik direnç olarak benzetim yapılmaktadır.



Şekil 3.6. Elektrik ve manyetik eşdeğer devresi

Manyetik devrede akan akı manyetik kaynağın fiziksel parametrelerine ve devreyi oluşturan malzemelere bağlıdır. Akı yolundaki malzemelerin gösterdiği direnç akının değerini direkt olarak etki eder ve bu manyetik dirence relüktans denir. Relüktans malzemenin geçirgenliğine, akı yolunun uzunluğuna ve akının aktığı malzemenin kesit alanına bağlıdır. Denklem (3.3)'de relüktans formülü verilmiştir.

$$\Re = \frac{1}{\mu}\frac{l}{A} \tag{3.3}$$

Denklem (3.3)'de μ geçirgenliği, l akı yolunun uzunluğunu, A ise akı yolundaki kesit alanıdır. Denklemden anlaşılacağı üzere manyetik direnç malzemenin manyetik özelliklerine ve fiziksel boyutlarına bağlıdır. Manyetik eşdeğer devre ile hesaplanan diğer değerler ise manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddetidir. Manyetik alanda iki temel vektörden meydana gelmektedir. Bunlardan bir tanesi manyetik alan şiddeti H öteki ise manyetik akı yoğunluğu B'dir. Manyetik akı yoğunluğu manyetik alan şiddeti ile geçirgenliğin çarpılmasıyla oluşur ve manyetik yataklarda kullanılan sac malzemelerinde doğrusal olmayan bir ilişki içeresindedir. Manyetik geçirgenlik ise μ sembolü ile ifade edilir. Eşdeğer manyetik devre modellerinde geçirgenlik ferromanyetik malzemenin doğrusal bölgesinde olduğu varsayılarak kabul edilir ve bu şekilde hesaplamalar yapılır. Manyetik yataklarda kullanılan malzemelerin B-H eğrilerinin bu yüzden olabildiğince doğrusal olması istenir. Bu şekilde daha kararlı ve doğru analitik hesaplamalar yapmak mümkün olacaktır. Manyetik akı yoğunluğu ise manyetik geçirgenlik ile manyetik alan şiddetinin çarpılmasıyla bulunur. Denklem (3.4)'de manyetik akı yoğunluğunun denklemi verilmiştir.

$$B = \mu H \tag{3.4}$$

Denklem (3.2) ve Denklem (3.4)'de verilen eşitlik temel olarak Ampere yasasına dayanmaktadır. Ampere yasasına göre üzerinden akım geçen bir iletkenin çevresinde bir manyetik alan oluşur ve manyetik alan iletken geçen akım ile doğru orantılıdır. Bu yasa Maxwell'in denklemlerinin bir tanesinin temelini oluşturmaktadır. Ampere yasası Denklem (3.5)'de verilmiştir.

$$\int_c B dl = \mu_0 i \tag{3.5}$$

Denklem (3.5)'e bakıldığında belirli bir sınır koşullarına sahip bir uzayda toplam manyetik akı yoğunluğu, havanın manyetik geçirgenliği ile geçen akımın çarpılmasıyla bulunur. Denklemde μ_0 havanın geçirgenliğini ifade etmektedir ve değeri $4\pi 10^{-7}$ Hm^{-1}'dir. Denklem (3.5)'deki manyetik geçirgenliği denklemden kaldırırsak Amper yasası Denklem (3.6)'daki gibi ifade edilmektedir.

$$\int_c H dl = Ni \tag{3.6}$$

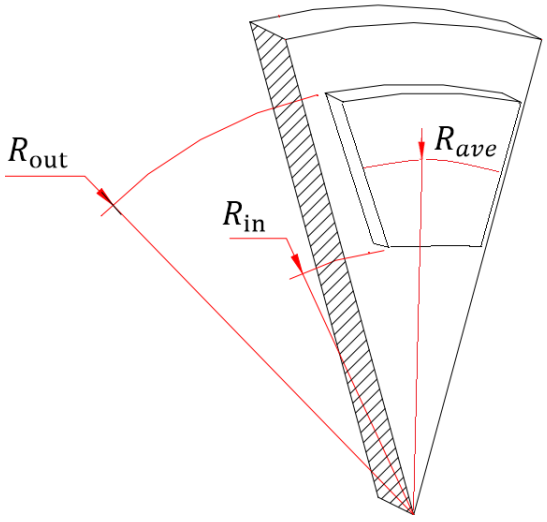
Denklem (3.6) kapalı bir akı yolundaki toplam manyetik alan şiddeti sınır koşullarındaki bobin sarım sayısı ile bobinlerden geçen akımın çarpımına eşittir. Bu denklem ayrıca manyeto motor kuvvetin tanımını da yapmaktadır [27].

3.4. Referans Motorun Manyetik Modeli

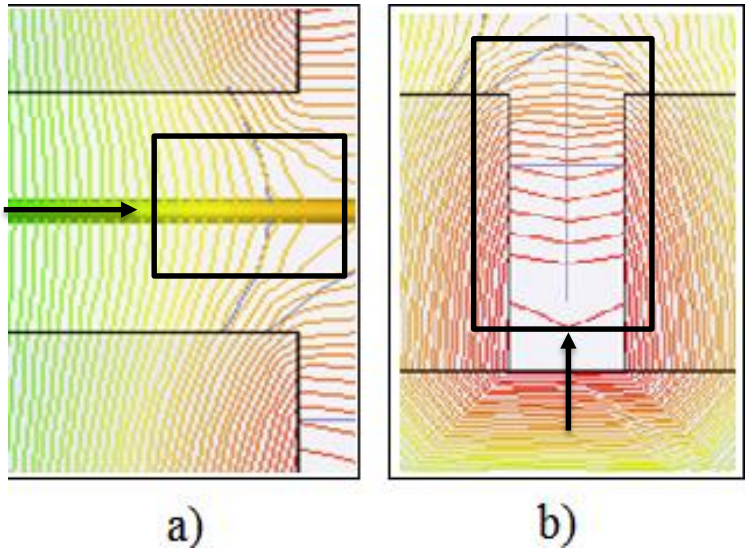
Referans motor manyetik devresi incelerken iki kutup arası oluşan manyetik devre yüksüz halde dikkate alınmıştır. Tek kutup için incelenen manyetik devre çalışmasında karşılıklı iki rotor arası manyetik alan incelendiği gibi aynı rotor üzerindeki iki mıknatıs arasındaki kacak akılarda incelenmiştir. Modelleme yapılırken bazı şartlar belirlenmiştir ortalama yarıçap, R_{ave} Denklem (3.7) formülü kullanarak hesaplanmış ve iki kutup arası mesafeyi kapsayacak şekilde θ ekseni için 18° kesit alınmıştır. Phi ekseni için alınan kesit R_{ave},d değer modelleme için kullanılan katmanın uzunluğudur.

$$R_{ave}=\frac{1}{2}(R_{out}+R_{in}) \tag{3.7}$$

Burada R_{in} mıknatısın iç yarıçapını,R_{out} ise mıknatısın dış yarıçapını ifade etmektedir. Hava aralığında oluşan manyetik akı modellemesi iki aşamadan oluşmaktadır; birinci aşama iki rotor arası ana manyetik akı ve iki rotor arası kaçak akının modellemesi (Şekil 3.8 a), ikinci kısım ise aynı rotor üzerinde bulunan iki mıknatıs arasında meydana gelen kısa devre ana akısı ve kısa devre kacak akısıdır (Şekil 3.8 b).



Şekil 3.7. EASM motor için iç, dış ve ortalama yarıçap bilgileri



Şekil 3.8. Kaçak akılar a) hava aralığı kaçak akıları b) mıknatıslar arası kaçak akılar

Hava aralığında oluşan ana ve kacak manyetik direnç $R_{g,n}$ ile ifade edilmiştir. Denklem (3.8) ve Denklem (3.9) ile hava aralığında oluşan manyetik eşdeğer devredeki relüktans formülleri verilmiştir.

$$R_{g,1}=\frac{1}{\mu_0}\frac{g_1}{w_{g1}d} \tag{3.8}$$

$$R_{g,2}=\frac{1}{\mu_0}\frac{g_2}{w_{g2}d} \tag{3.9}$$

Burada μ_0 havanın geçirgenliğini ifade etmektedir ve değeri $4\pi10^{-7}$ Hm^{-1}'dir. g_1 ve g_2 ana ve kaçak relüktansın takip ettiği hava aralığı uzunluğudur. Relüktansların oluştuğu alanı hesaplamak için w_{g1} ve w_{g2} ana ve kaçak relüktansın genişliğini d ise belirlenen katman uzunluğudur.

Şekil 3.8b'de gösterilen iki mıknatıs arasında oluşan relüktans $R_{m,n}$ ile ifade edilmiştir. Denklem (3.10) ve Denklem (3.11) ile relüktans model eşdeğer devre formülleri verilmiştir.

$$R_{m,1}=\frac{1}{\mu_0}\frac{g_{m1}}{w_{m,1}d} \tag{3.10}$$

$$R_{m,2}=\frac{1}{\mu_0}\frac{g_{m2}}{w_{m,2}d} \tag{3.11}$$

Denklem (3.10) ve Denklem (3.11)' de yer alan g_{m1} ve g_{m2} değerleri iki mıknatıs arası oluşan relüktansın hava aralığı uzunluğunu, $w_{m,1}$ ve $w_{m,2}$ değerleri relüktans genişliğini temsil etmektedir.

Rotor destek çemberinin eşdeğer manyetik direnci $R_{r,n}$ ile ifade edilmiştir ve Denklem (3.12)'de formülü verilmiştir.

$$R_{r,n}=\frac{1}{\mu_0\mu_r}\frac{l_r}{w_r d} \tag{3.12}$$

Denklem (3.12)'de yer alan μ_r rotor destek çemberi için kullanılan malzemenin geçirgenliğini, l_r akının izlediği mesafeyi, w_r ise destek çember kalınlığını ifade etmektedir.

Sürekli mıknatıs bir manyetik akı kaynağı olarak modellenmiş ve sürekli mıknatıs üzerinde oluşan relüktans manyetik kaynağa paralel olarak bağlanmıştır. Sürekli mıknatıs tarafından meydana gelen akı ϕ_m, relüktansı ise R_{pm} olarak gösterilmiştir. Denklem (3.13) ve Denklem (3.14) relüktans ve sürekli mıknatıs akı formülleridir.

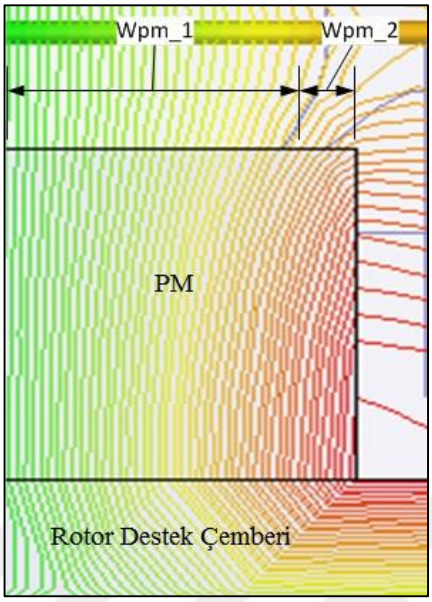
$$R_{pm}=\frac{1}{\mu_0\mu_m}\frac{l_m}{\frac{w_{pm}}{2}w_d} \tag{3.13}$$

$$\phi_m=B_r w_{pm} w_d \tag{3.14}$$

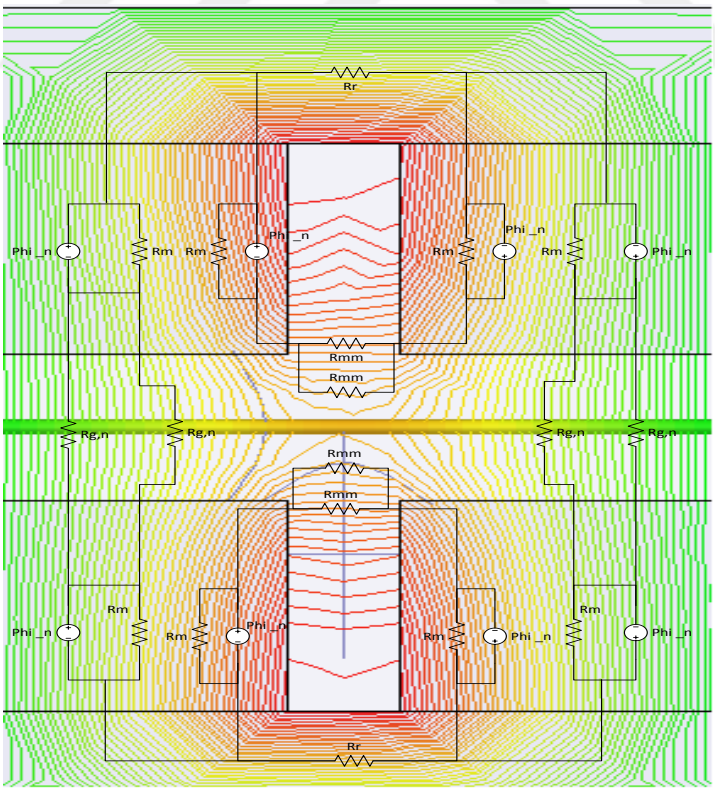
Mıknatısın manyetik modellemesinde aktif olarak karşı rotora akı sağlayan ile kaçak akıya sebep olan kısım olarak ikiye ayrılmıştır (Şekil 3.9). Aynı rotor destek çemberi üzerinde bulunan diğer mıknatıs ile arasında oluşan kaçak akıya sebep olan kısım moment üretimine etkisi olmayıp verimi olumsuz etkilemektedir.

Eksenel akılı motor manyetik modeli oluştururken problemi basitleştirmek için mıknatıs çifti modellenmiştir. Relüktans ve akı modelleri kullanarak Şekil 3.10' deki gibi mıknatıs çifti modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan manyetik model analitik olarak

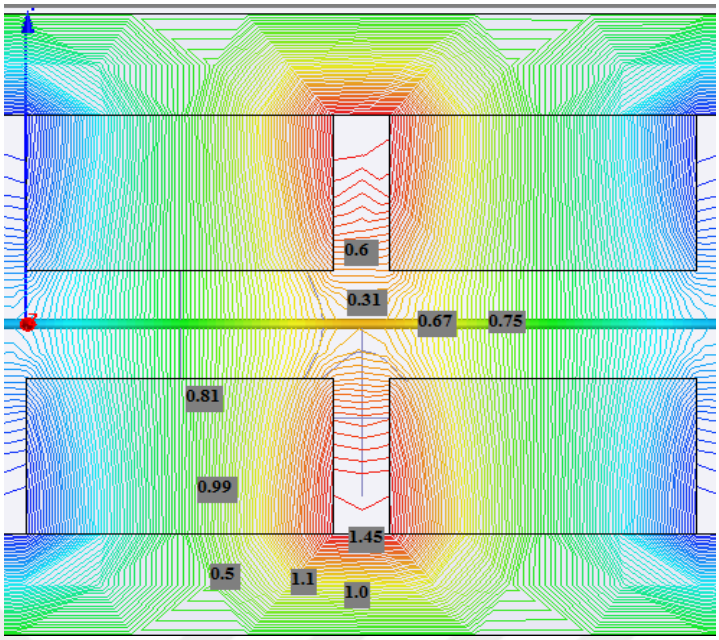
çözümü yapılmıştır. Analitik sonuçlar ile bölüm 3.5 sonlu elemanlar analiz bölümünde incelenen sonuçlar (Şekil 3.11) karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.9. Mıknatıs manyetik modeli



Şekil 3.10. Referans motorun manyetik modeli

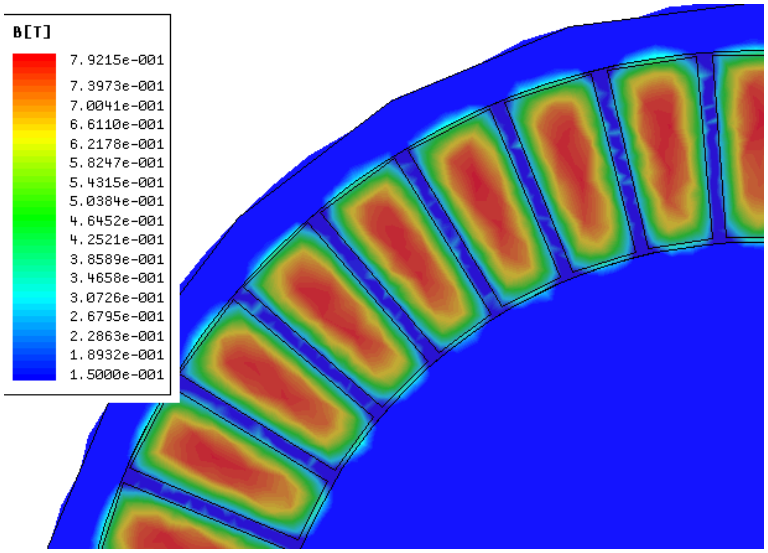


Şekil 3.11. SEA akı değişim değerleri

Öncelikli olarak moment üretimde etkili olan iki rotor arası oluşan ana manyetik akı ve kaçak manyetik akı değerleri incelenmiştir. Tablo 3.3'de görüldüğü gibi analitik çözüm sonuçları ile SAE sonuçları (Şekil 3.12) incelendiğinde iki değer arasındaki hata oranın en fazla %1,74 olduğu gözlemlenmiştir. Hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğunun iki çözüm için birbirine yakın çıkması özellikle ön boyutlandırma çalışmalarında girdi olarak kullanılan hava aralığı akı yoğunluğu (Bg) değerinin SAE gibi kapsamlı bir çalışma yapmadan daha hızlı sonuç almak için avantaj sağlamaktadır.

Tablo 3.3. Kutup-kutup arası manyetik akı

	Ana Manyetik Akı	Kaçak Manyetik Akı
SEA	0,758 T	0,689 T
Analitik Çözüm	0,745 T	0,677 T
Hata	%1,71	%1,74



Şekil 3.12. Hava aralığı B(T) değerleri

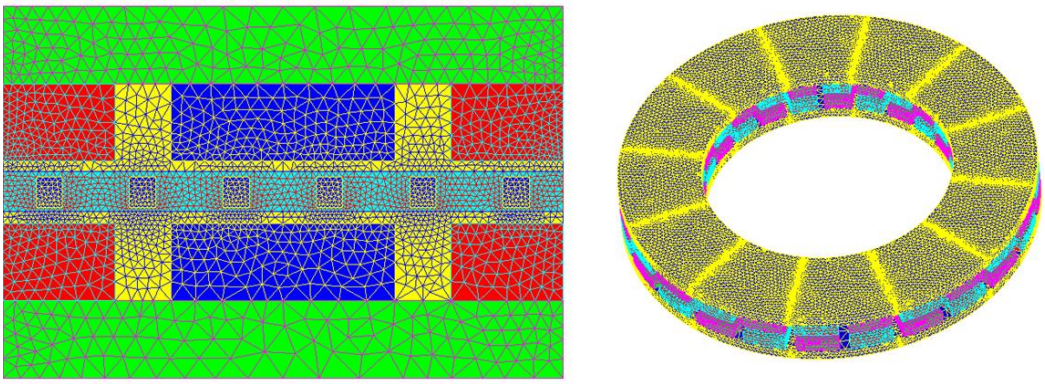
Benzer karşılaştırma Tablo 3.4'de görüldüğü gibi aynı rotor destek çemberi üzerinde bulunan mıknatıslar arasında oluşan akı yoğunluğu için incelediğimizde manyetik model ile SAE değerleri arasında %16,2 değerinde hata gözlemlenmiştir.

Tablo 3.4. İki mıknatıs arası oluşan manyetik akıların karşılaştırılması

	Ana Manyetik Akı	Kaçak Manyetik Akı
SEA	0,604 T	0,313 T
Analitik Çözüm	0,524 T	0,262 T
Hata	%13,2	%16,2

3.5. Sonlu Elemanlar Analizi

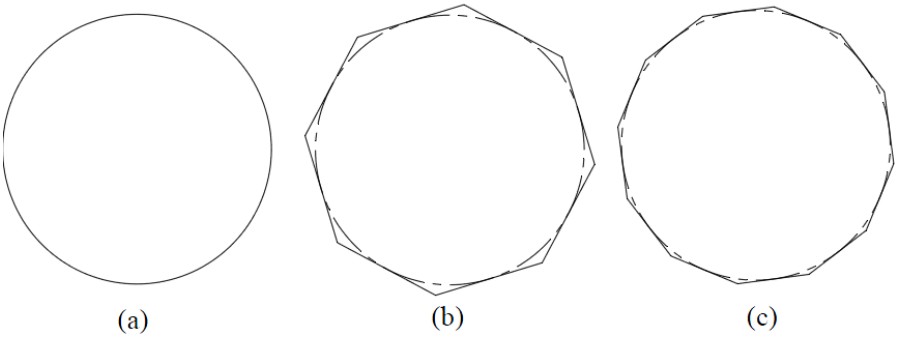
Sonlu elemanlar analizi karmaşık problemlerin çözümde kullanılan etkin sayısal çözümlerinden biridir. İlk defa uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilen bu metot şuan birçok mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır.



a) b)

Şekil 3.13. Sonlu elemanlar modeli a) 2D model b) 3D model

Sonlu elemanlar metodunda amaç karmaşık problemleri basite indirgeyerek çözüme ulaşmaktır. Yapılan indirgeme kesin sonuca ulaşmak yerine yaklaşık olan sonucu sunmaktadır. Sonlu elemanlar analizinin temelini kısmi diferansiyel denklemler ile ifade edilebilen problemleri çözmek gelmektedir. Sonlu elemanlar analizinin temeli karmaşık bir sistemi basite indirgeyerek birbirine bağlı sonlu elemanlar çözümlemek gelmektedir. Şekil 3.14'de bir dairenin sonlu elemanlar yöntemi ile çevresinin hesaplanması gösterilmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 3.14. Dairenin sonlu elemanlar ile çevrenin hesaplanması a) daire gösterimi b)orta yoğunluklu sonlu eleman yaklaşımı c)yüksek yoğunluklu sonlu eleman yaklaşımı [27]

Şekil 3.14'de bir dairenin çevresini sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi gösterilmiştir. Bilindiği gibi daire sonsuz sayıda çizginin birleşmesiyle oluşmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde amaç daireyi sonlu bir elemana dönüştürerek analiz etmektedir. Eğer sonlu elemanları oluşturan ağ yapısı az tanımlanır ise Şekil 3.14 (b)'deki gibi bir modelleme yapılmakta ve hata oranı fazla ve gerçekten uzak bir sonuç elde edilmektedir. Fakat bu az ağ yapısı daha az işlem sağlamakta ve analizin hızlı

olmasını sağlamaktadır. Ağ yapısı yoğun olacak şekilde tanımlanırsa ise Şekil 3.14 (c)'deki gibi bir modelleme yapılmakta ve hata oranı çok az, gerçeğe çok yakın bir analiz sağlanmaktadır. Fakat bu durumda işlem yükü olarak fazla ve zaman harcanan bir analiz olmaktadır. Bu yöntemde ilgili bölge sonlu elemanlara ayrılmakta ve bu bölgelerde ilgili yaklaşık denklemler uygulanmaktadır. Eğer bölgeler arası ağ yapısı fazla ise hassasiyet fazla olmakta ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmektedir. Eğer ağ yapısı az olursa gerçekten uzak fakat zaman olarak hızlı bir analiz gerçekleşmektedir.

SEA elektromanyetik sistemlerin çözümünde sıkça kullanılmaktadır. Elektrik motorlarının tasarımı, modellenmesi, hız, moment, güç ve zıt EMK vb. değerlerin elde edilmesinde güvenle kullanılmaktadır. Elektromanyetik SE analizi Maxwell denklemlerine dayanmaktadır. Maxwell'in düzenlediği ve elektromanyetik sistemlerin temelini oluşturan bu dört denklem sonlu elemanlar analizinde kullanılarak elektromanyetik sistemlerin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Maxwell'in düzenlendiği bu dört denklem sırasıyla verilmiştir;

$$\nabla \cdot D = p \tag{3.15}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{3.16}$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{3.17}$$

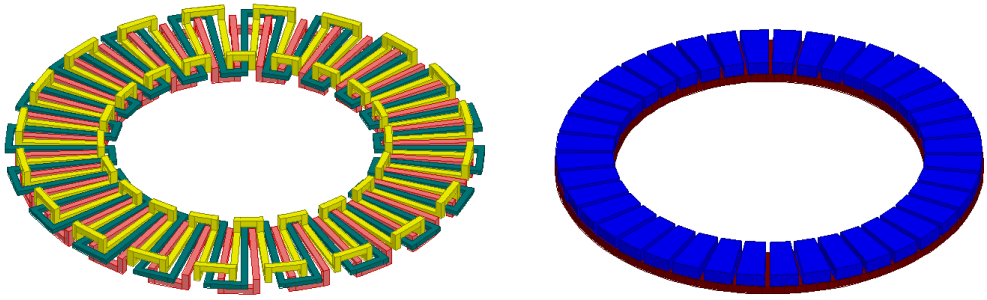
$$\nabla \times H = J_i + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{3.18}$$

Denklem (3.15) Gauss yasasını ifade etmektedir. Gauss yasasına göre herhangi bir kapalı yüzeyden geçen elektrik akı yoğunluğu yüzeyden geçen net yükün elektrik geçirgenliğine bölünmesiyle elde edilmektedir. Denklem (3.16) Gauss yasasının manyetizma için düzenlenmiş halidir. Buna göre kapalı bir yüzeyden geçen net manyetik akı yoğunluğu sıfırdır. Kapalı bir yüzeye giren manyetik akı çizgileri ile çıkan akı çizgileri birbirine eşittir. Denklem (3.17) ise Faraday yasasını ifade etmektedir. Faraday yasasına göre kapalı bir düzlemdeki manyetik akı yoğunluğunun zamana göre değişimi o düzlemde indüklenen EMK'ya eşittir. Denklem (3.18) ise Maxwell'in düzenlemesiyle birlikte Amper yasasının genelleştirilmiş şeklini ifade

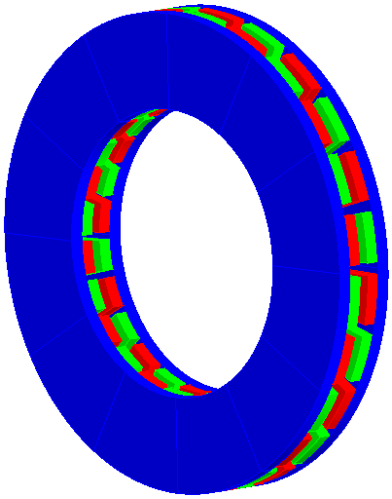
etmektedir. Amper yasası temel olarak manyetik alan ile elektrik alan arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Değişken elektrik alan ile akımlar tarafından oluşturulan manyetik alanın oluşumunu tanımlamaktadır. Maxwell'in düzenlediği bu dört denklem elektromanyetizmanın temelini oluşturmaktadır. Maxwell düzenlediği bu denklemler ile elektrik ve manyetik alanların birbirleri ile olan etkileşimini ve bu alanların madde üzerinde olan etkilerini açıklamıştır. SEA bu dört temel denklem ağ yapıları ve sınıf koşulları arasında hesaplanarak manyetik eşdeğer devre modeline göre çok daha hassas bir biçimde sonuçlar elde edilmektedir.

3.6. Referans EASM Motor Sonlu Elemanlar Analizi

Referans motor için yapılan SAE çalışmalarında motor Şekil 3.1 de alınan ölçüler doğrultusunda referans motorun modelleri sonlu elemanlar analiz programında düzenlenmiştir. Modelleme çalışmalarında rotor ve mıknatıs modellemeleri hızlı bir şekilde gerçekleşmiş, nüvesiz stator yapısında kaynaklı olarak nispeten daha fazla zaman almıştır. Nüvesiz statorun mekanik olarak üretim yapısı olduğu için modellemesi zaman almıştır (Şekil 3.15). Stator yapısı nüvesiz olduğu için 120 adet slot gelecek şekilde stator modellemesi yapılmıştır. Modelleme de eksen takımları X ve Y yükseklik ve genişliğe göre ayarlanmış Z ekseni ise eksenel akının doğrultusuna göre konumlandırılmıştır (Şekil 3.16).

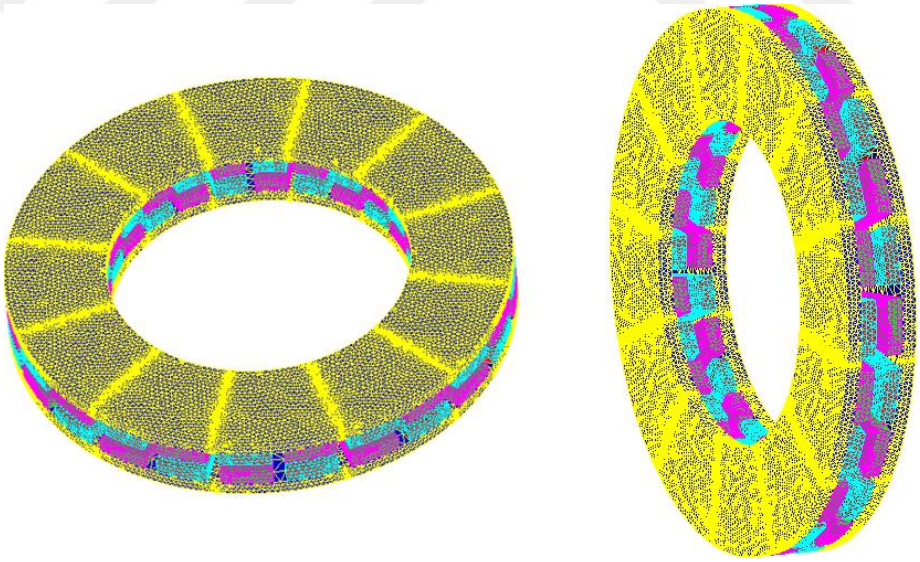


Şekil 3.15. Referans motor stator ve rotor modelleri



Şekil 3.16. Referans motor tam modeli

Modele ait ağ yapısı Şekil 3.17'de görüldüğü gibi yoğun bir şekilde yapılmıştır. Hava aralığının ağ yapısı elektromanyetik enerji dönüşümü gerçekleştiği için kritik önem arz etmektedir. Bu bölge için eksenel akılı motor yapısında iki farklı parçadan oluştuğu ve geniş bir alana yayıldığı için modelleme yapılırken stator ve rotorlar arasına ek katmanlar eklenerek ağ yoğunluğu arttırılmıştır.

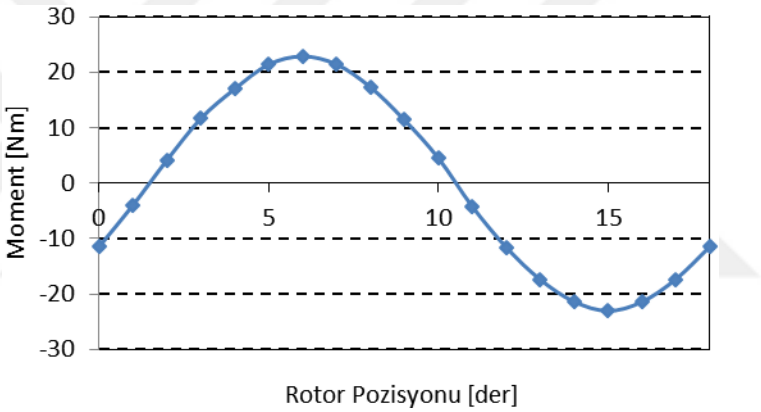


Şekil 3.17. Referans motor mesh yapısı

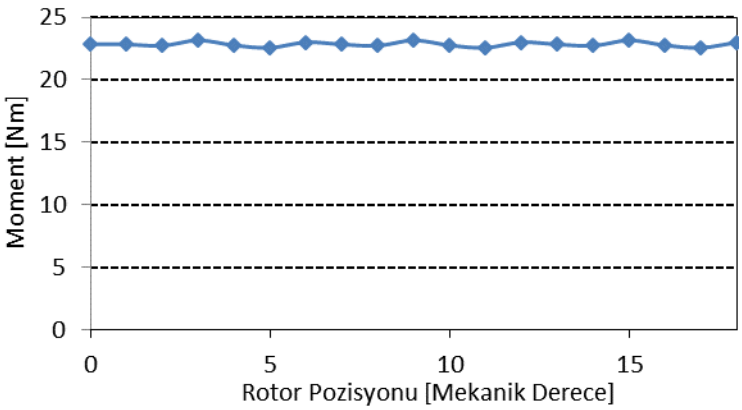
Motorun en yüksek moment noktasını bulmak için motor sargılarına sürekli sabit akım uygulanarak moment değişimi incelenmiştir (Şekil 3.18). Bu analiz yaparken rotorun en yüksek moment değeri veren motor kontrol açısını bulmak ve bulunan açı sabitlenerek elektrik alanı ile beraber çevirmektir. Yapılan analizde en yüksek moment

değeri veren noktanın 6 derece noktası olduğu belirlenmiştir. Rotorlar en yüksek moment veren konuma getirilerek elektriksel alan ile beraber çevrilmiştir ve moment çıkış değeri elde edilmiştir (Şekil 3.19). 13,9 Arms faz akımı uygulanan motor için ortalama 22,5 Nm moment elde edilmiştir. Çıkış momenti dalgalanmasının ortalama momente göre %2,6 değerindedir. Referans motor moment akım grafiği için farklı akımlar karşılığında çıkış moment değerleri Şekil 3.20 da gözükmektedir. Moment katsayısı 1,25 Nm/Arms elde edilmiştir.

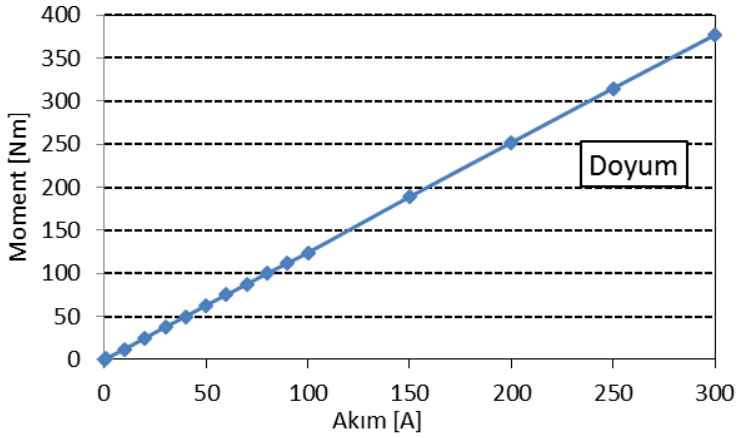
Referans motor için yapılan diğer bir analizde zıt EMK analizidir. Zıt EMK hat gerilimi elde etmek için rotor nominal hızında çevrilir ve fazlar arası oluşan gerilim incelenir. Yapılan zıt EMK analizinde 400 rpm ile rotor döndürülmüş ve dalga değişimi elde edilmiştir (Şekil 3.21).



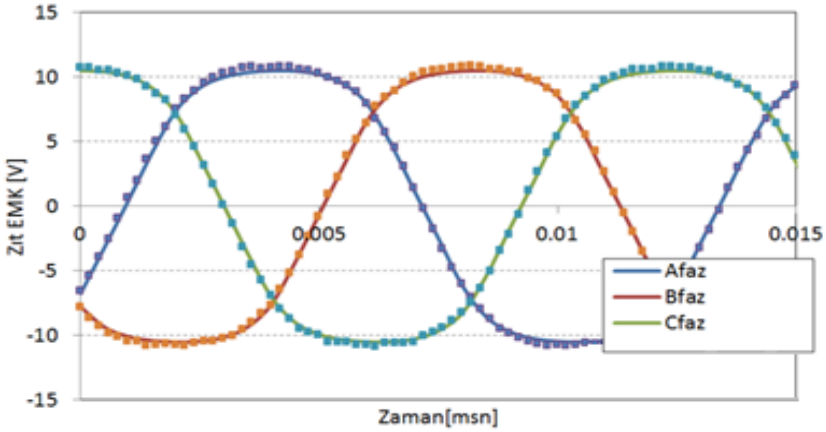
Şekil 3.18. Referans motor momentinin kontrol açısına göre değişimi



Şekil 3.19. Referans motoru çıkış momenti değişimi



Şekil 3.20. Referans motor moment akım ilişkisi



Şekil 3.21. Referans motor zıt EMK analizi

3.7. Sonuçlar

Bu bölümde yapılan çalışmalar doğrultusunda referans motorun öncelikle manyetik devre modeli oluşturulmuş ve SEA'ile sonuçlar ile kıyaslanarak doğrulanmıştır, bu model sayesinde yeni tasarlanacak motor için aynı model sadece boyutlar değiştirilerek kullanılabilmiştir. Bölüm 3 içinde aynı zamanda EASM motorların SEA'lerini tecrübe etmek için üretilmiş bir tasarım kullanılarak modellemesi yapılmış ve analizler doğrultusunda motor özellikleri karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışmalar yeni tasarım başlamadan önemli bir tecrübe birikimi sağlamıştır.

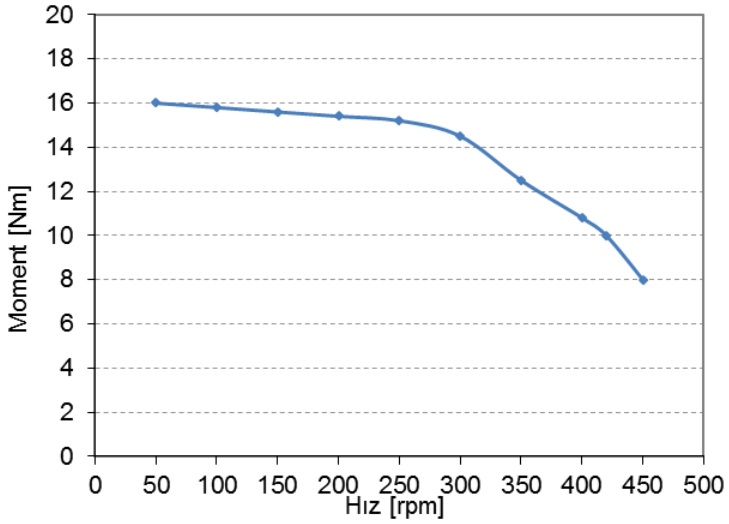
4. TASARLANAN EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI NÜVESİZ MOTORUN ANALİZLERİ

4.1. Tasarım Kriterleri

Tasarlanacak olan EASM motorun çalışacağı uygulama yaklaşık 250-270 kg bir aracın tahriğini sağlaması hedef alınmıştır. Tasarımda kullanacak ana kriterlerden moment ve hız grafiği Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Uygulama için gerekli olan maksimum ve nominal moment ve hız isterleri belirlenmiş ve bu doğrultuda uygulama hız moment karakteristiği çıkarılmıştır. Araç kalkış süresince yuvarlanma direnci exponansiyel olarak azalmakta fakat kalkış için gerekli olan moment ihtiyacı 16 Nm belirlenmiştir. Araç için istenen maksimum hız ise 9,6 m/s olarak belirlenmiştir. Nominal olarak 8,2 m/s hızda gitmesi istenmektedir (Tablo 4.1). Motor tasarımına etki edecek diğer bir kısıtlama ise mekanik tasarımdır. Motor tekerlek cantının içinde kapsüle edileceği göz önüne alınırsa, motor hacminin optimum tutulması ve eksenel ölçünün uygun seçilmesi gerekmektedir.

Tablo 4.1. Tasarlanan EASM teknik özellikleri

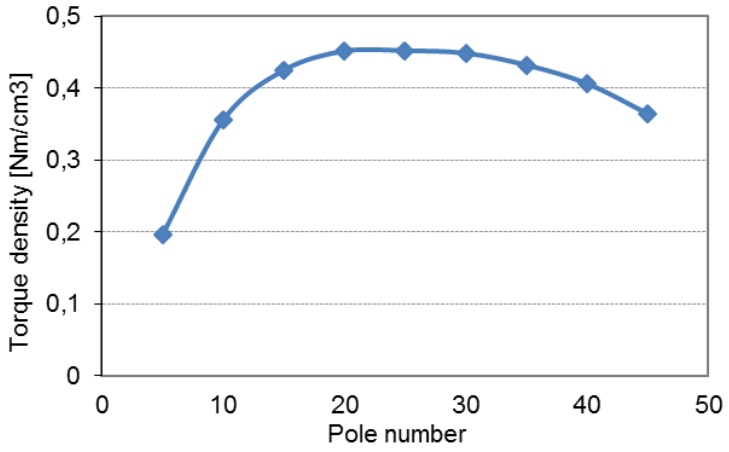
Teknik Özellikler	
Nominal Moment (Nm)	16
Nominal Hız	41,88rad/s (400 rpm)
Pmax=T ω	670 W
Faz sayısı	3
DC Bara Gerilimi	50 V dc



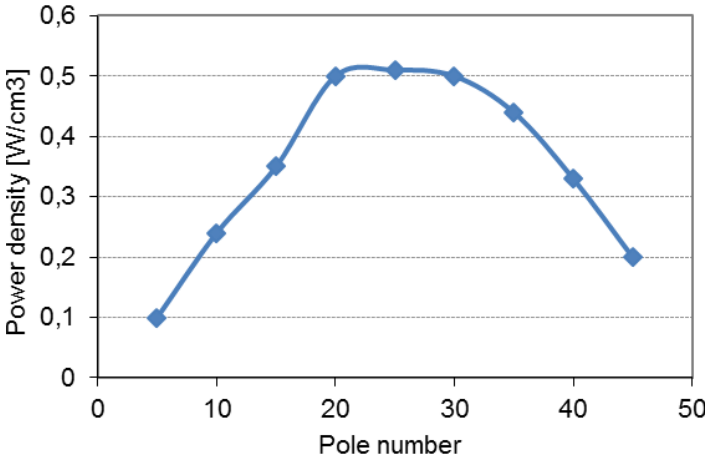
Şekil 4.1. Tasarlanacak EASM motorun moment-hız karakteristiği

4.2. Ön Boyutlandırma ve Kutup Sayısı Optimizasyonu

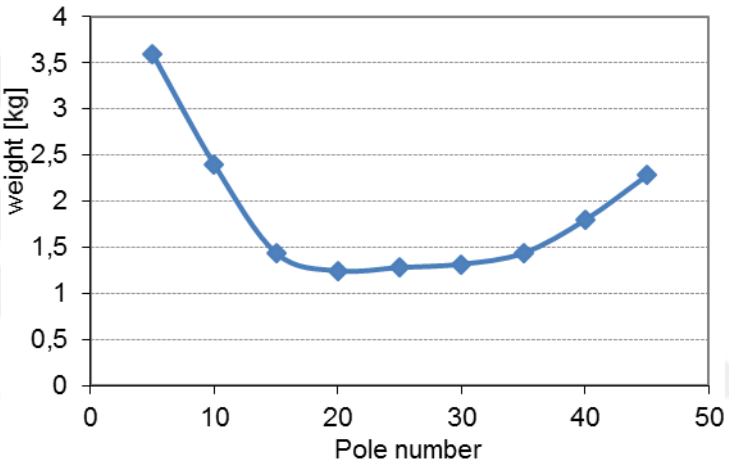
Tasarım kriterleri ve üretim kısıtları doğrultusunda Bölüm 2'de verilen boyutlandırma denklemleri ile motor ön boyutlandırma çalışmalarına geçilmiştir. Tasarlanacak olan motor belirlenen lastik çapına uyması için, optimizasyon çalışmalarında motorun radyal ölçüsünü belirleyen kutup sayısı ana tasarım kriteri olarak seçilmiştir. Boyutlandırma denklemi doğrultusunda yapılan bilgisayar çözümleri ile güç yoğunluğu ve moment yoğunluğu değişiminin kutup sayısına göre değişimi Şekil 4.2 , Şekil 4.3 aşağıdaki şekiller elde edilmiştir. Yukarıda yapılan çalışmaya benzer olarak motor ağırlığı ve moment/ağırlık oranının kutup sayısına göre değişimi için de yapılmıştır, bu çalışmalar ile motor ağırlığı hakkında ön bilgi edilebilmiş ve motor ağırlığı/moment arasındaki ilişki belirlenmiştir.



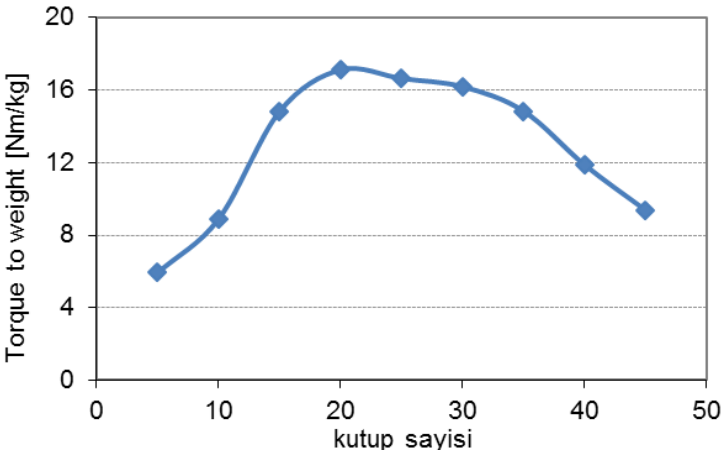
Şekil 4.2. Moment yoğunluğu-kutup sayısı grafiği



Şekil 4.3. Güç yoğunluğu-kutup sayısı değişimi



Şekil 4.4. Ağırlık-kutup sayısı değişimi



Şekil 4.5. Moment, ağırlık oranına göre kutup sayısı değişimi

Yapılan optimizasyon çalışmaları doğrultusunda motor boyut ve performansları için değerler Tablo 4.2 özetlenmiştir.

Tablo 4.2. Optimum motor parametreleri

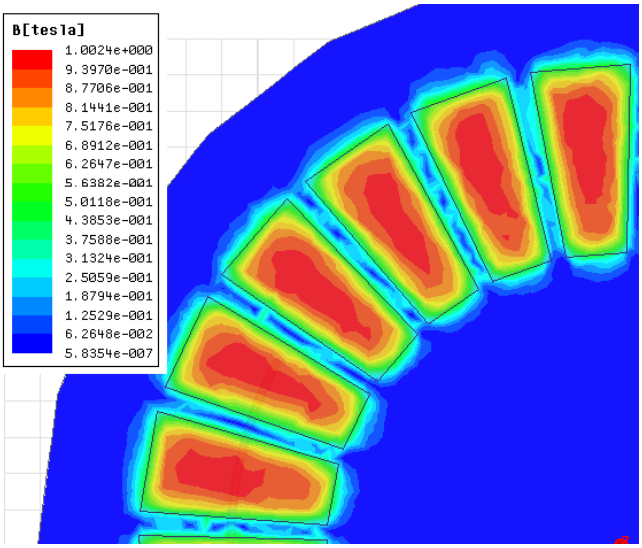
Optimum güç yoğunluğu	0,52 W/kg
Optimum moment yoğunluğu	0,45 Nm/cm3
Optimum kutup sayısı	24
Optimum motor ağırlığı	1,27 kg

4.3. Tasarlanan EASM Motorun Manyetik Modellemesi

Bölüm 3 de oluşturulan referans motorun manyetik eşdeğer devresi kullanılarak tasarlanan motorun analitik çözümleri yapılmıştır. Eş değer devre önceki bölümde doğrulandığı için tasarlanan motorun boyutsal verilerine göre değiştirilerek model koşturulmuştur. Tablo 4.3'de görüldüğü gibi bir önceki çalışmadakine benzer hata oranı gözlemlenmiştir. SAE sonuçları (Şekil 4.6) ile karşılaştırdığımızda ana manyetik akı için hata oranı %2,04 iken kaçak manyetik akı için bu oran %2,57 olarak bulunmuştur.

Tablo 4.3. Kutup-kutup arası manyetik akı

	Ana manyetik akı	Kaçak manyetik akı
SEA	0,978 T	0,855 T
Analitik Çözüm	0,956 T	0833 T
Hata	%2,04	%2,57



Şekil 4.6. Hava aralığı B(T) değerleri

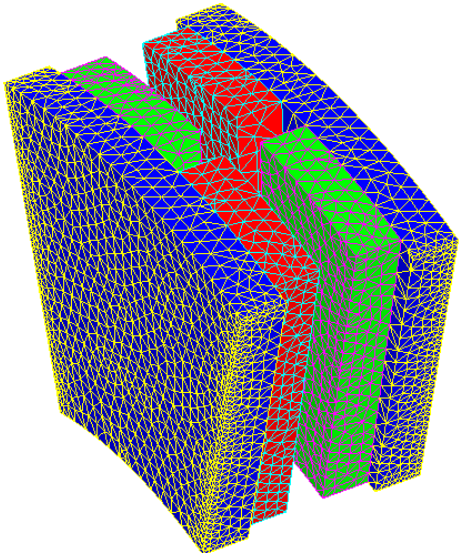
Referans motor için yapılan rotor destek çemberi üzerinde iki mıknatıslar arasında oluşan akı yoğunluğu analizi içinde Tablo 4.4'de gösterilen değerler elde edilmiştir. SAE sonuçları ile karşılaştırıldığında Bölüm 3'de yapılan karşılaştırmaya benzer şekilde hata oranı %15 üzerinde elde edilmiştir.

Tablo 4.4. İki mıknatıs arası oluşan manyetik akıların karşılaştırılması

	Ana Manyetik Akı	Kaçak Manyetik Akı
SEA	0,539 T	0,407 T
Analitik Çözüm	0,457 T	0,326 T
Hata	%15,2	%19,9

4.4. Tasarlanan Motorun Sonlu Elemanlar Analizi

Optimal değerleri elde edilen boyutlar doğrultusunda 3D sonlu eleman analizleri için motor modeli oluşturulmuştur. Analizler de istenen doğruluğu ve kaliteyi yakalayabilmek mıknatıs ve hava aralığı ağ element sayısı arttırılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde toplam ağ element sayısı 138029 adeti bulmuştur (Şekil 4.7). Tablo 4.5'de gösterildiği gibi mıknatıs, stator ve rotor destek çemberi için element sayıları verilmiştir.



Şekil 4.7. Mesh yapısı

Tablo 4.5. Modellenen parçaların tetra sayısı

Komponent	Tetra Sayısı
Tek Rotor	7428
Stator (A Fazı)	3179
Mıknatıs (1. Mıknatıs)	733

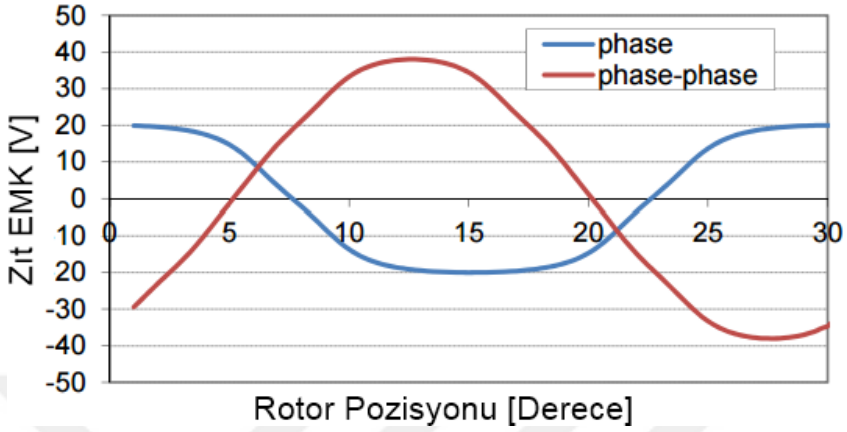
Tasarlanan eksenel akılı motor için yüklü ve yüksüz analizler stator sargılarına 13,9Arms akım uygulanarak yapılmıştır. Yüksüz analiz sonucu en yüksek moment noktası ve kontrol açısı belirlenmiştir. Belirlenen kontrol açısı doğrultusunda yüklü analizler yapılmış ve moment çıkışı incelenmiştir. Analizler N44H tipi mıknatıs ile yapılmış olmasına rağmen Tablo 4.6'de teknik özellikleri verilen N30UH ve N33UH tipi mıknatıslar içinde moment çıkış eğrileri elde edilmiştir.

Tablo 4.6. Mıknatıs özellikleri [28]

NdFeB	Br		Coercivity (HcB)		Coercivity (HcJ)		Energy product (BHmax)		Max. oper. temp
	T	KGs	kA/m	KOe	kA/m	KOe	kJ/m³	MGOe	°C
N30 UH	1,08-1,14	10,8-11,4	804-844	10,1-10,6	>1989	>25	223-247	28-31	<180
N33 UH	1,14-1,18	11,4-11,8	820-876	10,3-11,0	>1989	>25	247-263	31-33	<180
N44H	1,33-1,35	13,3-13,5	956-1035 1	12,0-13,0	>1353	>17	342-358	43-45	<120

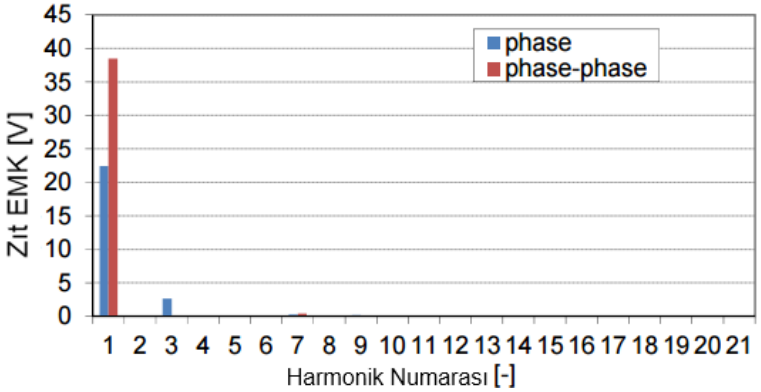
Zıt EMK analizinde rotor 400 rpm hız ile çevrilerek stator sargılarında oluşan fazlar arası ve faz gerilimi incelenmiştir (Şekil 4.8). Elde edilen Zıt EMK harmonik

dağılımını incelemek için FFT analizi yapılmıştır. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi faz geriliminde 3. harmonik gözlemlenirken faz-faz arası oluşan zıt EMK'da sadece temel harmoniğin mevcut olduğu, diğer harmoniklerinse olmadığı görülmektedir.

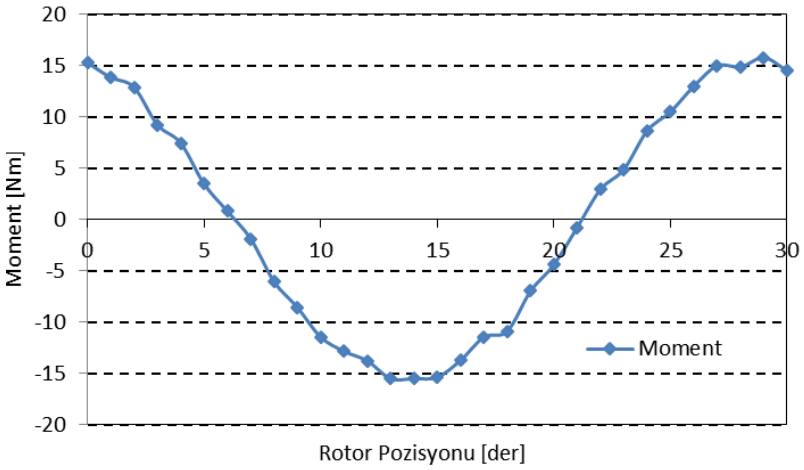


Şekil 4.8. Zıt EMK faz-faz arası ve faz gerilim dalga şekli

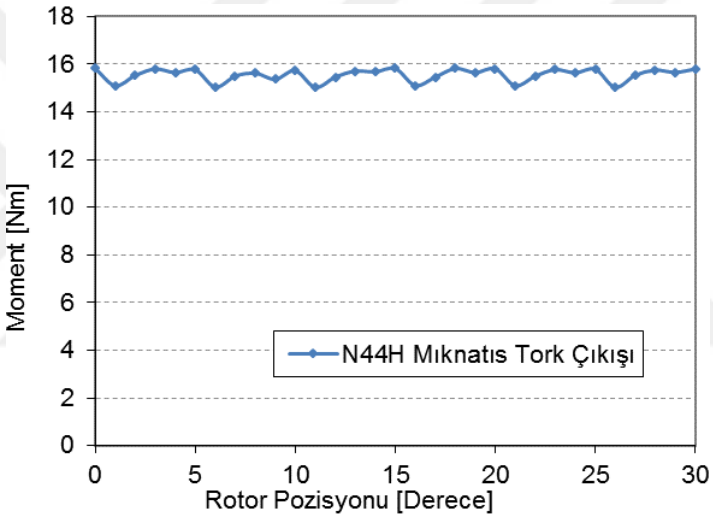
Tasarlanan motorun en yüksek momentini bulmak için rotor sargılarına sürekli akım uygulanmış ve rotorlar birer derece döndürülerek moment değişimi incelenmiştir (Şekil 4.10). Yukarıda yapılan analiz sonucu motorun en yüksek moment veren açı değeri tespit edilmiştir. Edilen noktada rotor sabitlenerek elektrik alan kontrol açısı ile birlikte çevrilerek moment çıkışı elde edilmiştir (Şekil 4.11). Bu analizde N44H tipi mıknatıs değerleri kullanılmıştır. Analizde ortalama moment değeri 15,55 Nm ve dalga oranı % 5,08 elde edilmiştir. N44H tipi mıknatıs ile yapılan moment-akım ilişkisi analizinde çalışması Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Analiz sonuçları doğrultusunda moment katsayısı 1,11 Nm/Arms elde edilmiştir. Yüklü motor analizleri sonucunda N44UH mıknatıs değerleri ile istenen moment değerlerine yaklaşıldığı için bu mıknatısın kullanılmasına karar verilmiştir.



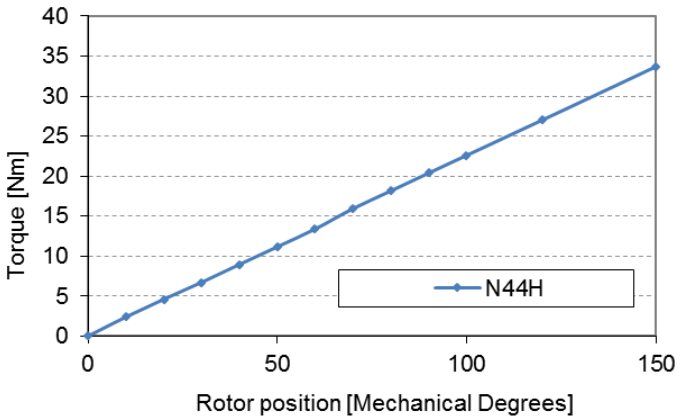
Şekil 4.9. FFT Analizi



Şekil 4.10. Eksenel akılı motor momentinin kontrol açısına göre değişimi



Şekil 4.11. N44H Moment grafiği



Şekil 4.12. N44H Moment-Akım ilişkisi

5. EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI NÜVESİZ DİSK MOTORUN ÜRETİMİ VE DOĞRULAMASI

5.1. Giriş

Bu bölümde eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorun tasarım çıktıları doğrultusunda üretiminin nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Üretim süresince çekilen fotoğraflar rotor, stator üretimini ve mekanik birleştirmeyi gösteren fotoğraflar aşama aşama anlatılmıştır.

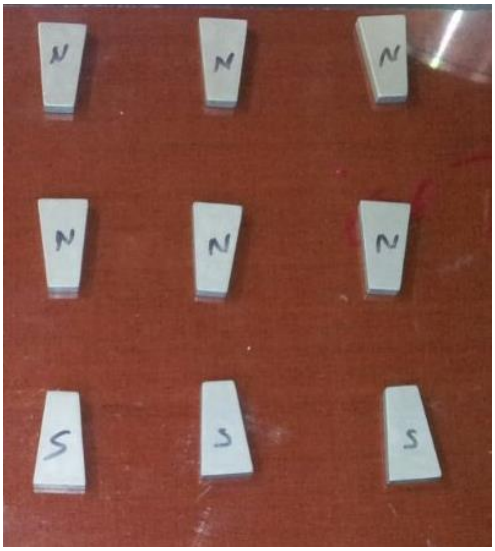
5.2. Rotor Üretimi

Çift taraflı eksenel akılı yapıya sahip olan motor topolojisi için iki adet rotor üretimi yapılmıştır. Rotor üretimin de 24'er adet 90 derece yönlendirilmiş N ve S kutuplu mıknatıs satın alınmıştır (Şekil 5.1). Mıknatıslar tasarımda belirlenen boyutlar doğrultusunda özel olarak trapedozial olarak üretilmiştir (Şekil 5.2).

Rotor Üretimi için öncelikle mıknatısların yapıştırılacağı rotor plakaları üretimi yapılmıştır (Şekil 5.3). Mıknatısların rotor plakalarına N-S sırasına uygun ve kontrolü yapıştırılması için Şekil 5.3 görüldüğü gibi mıknatıs boyutlarında yuvalar dikey işleme merkezi ile işlenmiştir. İşlenen yuvalara öncelikle N kutuplu mıknatıslar yapıştırılmış ve ardından S kutuplu mıknatıslar yapıştırılarak iki çift rotor elde edilmiştir (Şekil 5.4). Üretilen rotorlardan birincinin merkezine motor mili montajı yapılmıştır.



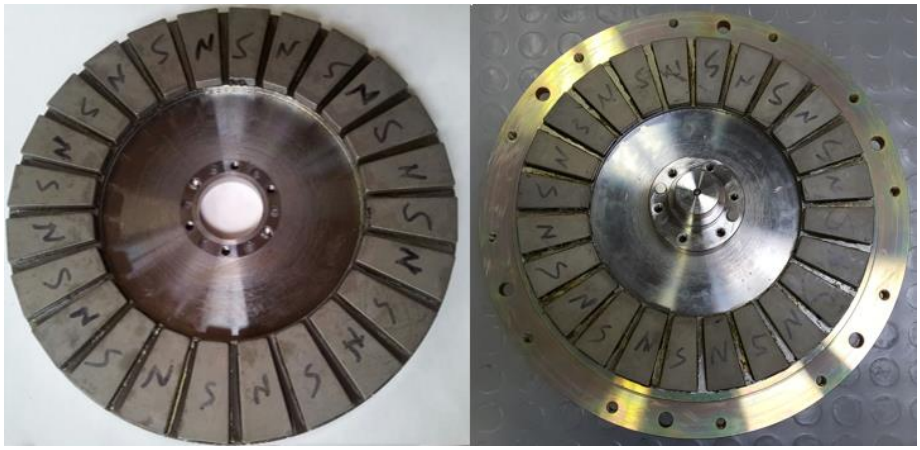
Şekil 5.1. Rotor için kullanılan mıknatıslar



Şekil 5.2. Trapedozial üretilmiş N ve S kutuplu mıknatıslar



Şekil 5.3. Üretimi yapılan rotor plakaları



Şekil 5.4. Eksenel akılı motor için üretimi yapılan rotor

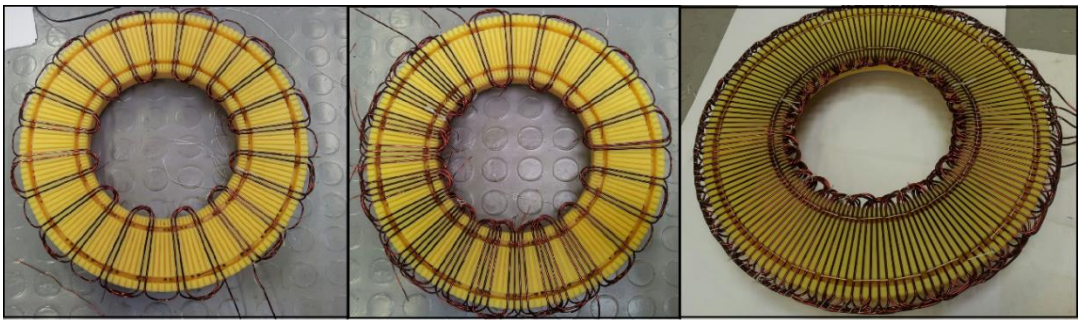
Motor mili eksenel akılı motorun rotor-stator-rotor dizgisi arasındaki hava aralıklarını sabitlemek ve rulmanların yataklanması için yüksek hassasiyetle torna CNC ile işlenmiştir (Şekil 5.5).Rulman yataklarını sabitlemek için motor mil üzerine segman kılavuzları açılmıştır. Motor mili komponentlerin pozisyonlamasının yanı sıra eksenel akılı motorun tahrik edeceği sisteme bağlantı noktalarını oluşturmaktadır.



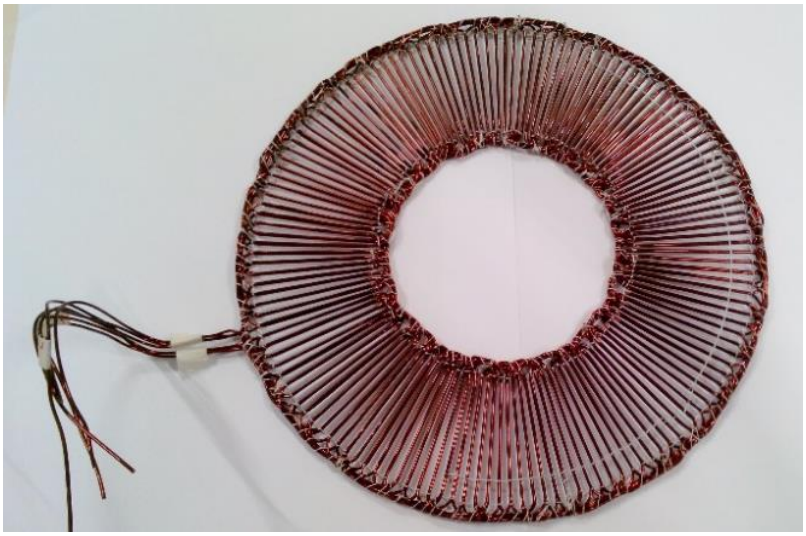
Şekil 5.5. Motor mili

5.3. Stator Üretimi

Nüvesiz olan statorun üretimi için öncelikle sargılar için kestamit malzemesi kullanılarak 72 oluklu bir kalıp oluşturulmuştur (Şekil 5.6). Kestamit kalıbın amacı oluşturulacak stator için gerekli olan sargıların pozisyonlarını destekleyecek şekilde üretiminin sağlamaktır. Stator sargıları kalıp üzerinde sarım işlemi bittikten sonra kalıptan ayrılır (Şekil 5.7). Üretilen bu stator manyetik ve iletken olmayan bir tutucu olan reçine ile kapsüle edilmesi gerekmektedir.

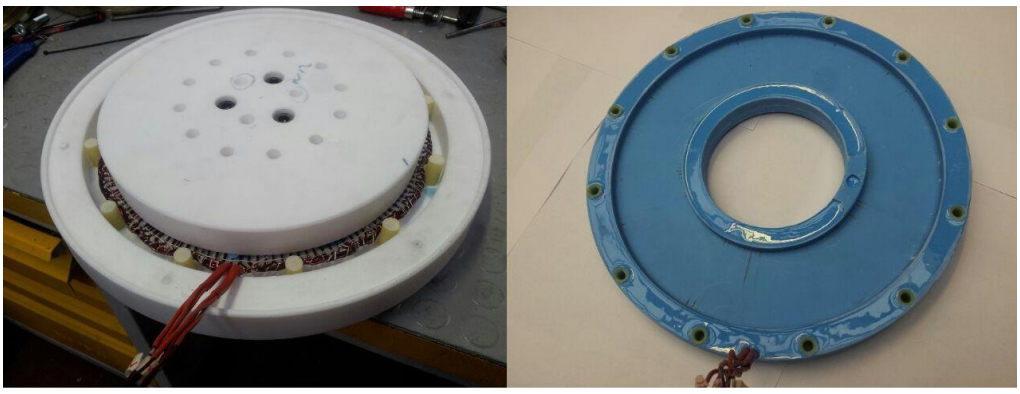


Şekil 5.6. Stator üretimi



Şekil 5.7. Kılavuz üzerinde sarım işlemi bitmiş stator sargısı

Stator sargılarının reçine içine alınması için stator mekanik boyutlarına uygun reçine kalıbı üretilmiştir (Şekil 5.8 a). Üretilen kalıp iki parçadan oluşmuştur Stator üretilen bu iki kalıp arasına yerleştirilmiş ve bağlantı noktaları için 30° açılarla 12 adet bağlantı yuvası eklenmiştir. Kalıp içerisine uygun oranda reçine ve sertleştirici karışımı enjekte edilmiştir. Reçine kürleşmesi bittikten sonra kalıplar ayrılarak reçineye kapsüle olmuş stator yapısı elde edilmiştir. Son işlem olarak bağlantı yuvaları için eklenen insertlere diş açılarak bağlantı noktaları oluşturulmuştur (Şekil 5.8 b).



a) b)

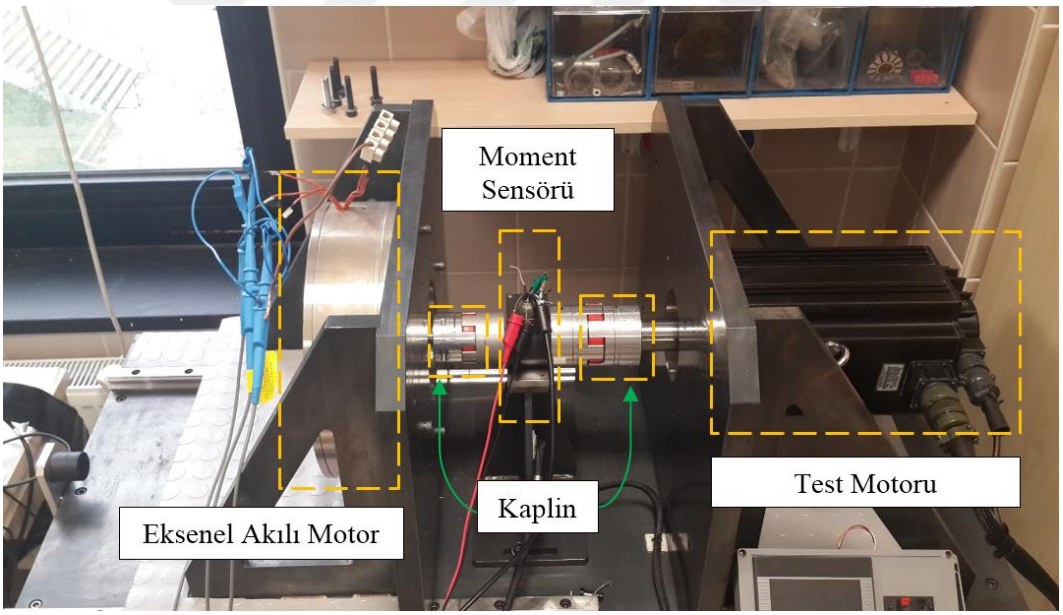
Şekil 5.8. Stator üretimi a) kalıp içindeki stator b) üretilmiş stator

5.4. Motorun Birleştirilmesi

Prototip motor için iki adet rotor, bir adet stator, stator rulmanlarının yataklanacağı motor mili ve statorları tutan destek çemberlerinden iki adet üretilmiştir. Motor montajında öncelikle stator motor mili üzerine sabitlenmesi gerçekleştirilmiş ve arkasından birinci rotor rulmanı ile motor miline geçirilmiştir, ikinci rotor montajı yapılırken birinci rotor ile arasında oluşabilecek manyetik kuvvet iş kazasına sebebiyet vermemesi için azami dikkat gösterilmiş ve olabildiğince yumuşak bir şekilde ikini rotorun motor miline yataklanması sağlanmıştır.

5.5. Deney Düzeneği

Prototip olarak üretilen eksenel akılı motorun testlerini yapmak için Şekil 5.9'de gösterilen deney düzeneği oluşturulmuştur. Deney düzeneğinde eksenel akılı motor, test motoru, iki adet kaplin, moment sensör ve bağlantı parçaları bulunmaktadır.



Şekil 5.9. Motor deney düzeneği

Deney düzeneği ile yüklü motor testleri ve zıt EMK'nın elde edilmesi için testler yapılmıştır. Test düzeneği vuruntu momenti testi yapma kabiliyetine sahiptir fakat statorda ferromanyetik malzeme olmadığı için bu test yapılmasına gerek olmamıştır. Zıt EMK testi için eksenel akılı motor yüksüz durumda iken motor yüksek hızda çevrilerek fazlar arasında zıt EMK gerilimi elde edilir. Diğer test ise motor çıkış momentini elde etmek için yapılan yüklü durum testidir. Burada motorun yüklenmesi

için yük olarak step motoru kullanılmıştır. Prototip motor çevrildiğinde step motor kontrollü şekilde yüklenerek ters yük oluşturur bu yük iki kaplin arasında bulunan moment sensörü ile ölçülerek farklı hız ve yük değerleri için motor moment-hız karakteristiği çıkarılmaktadır.

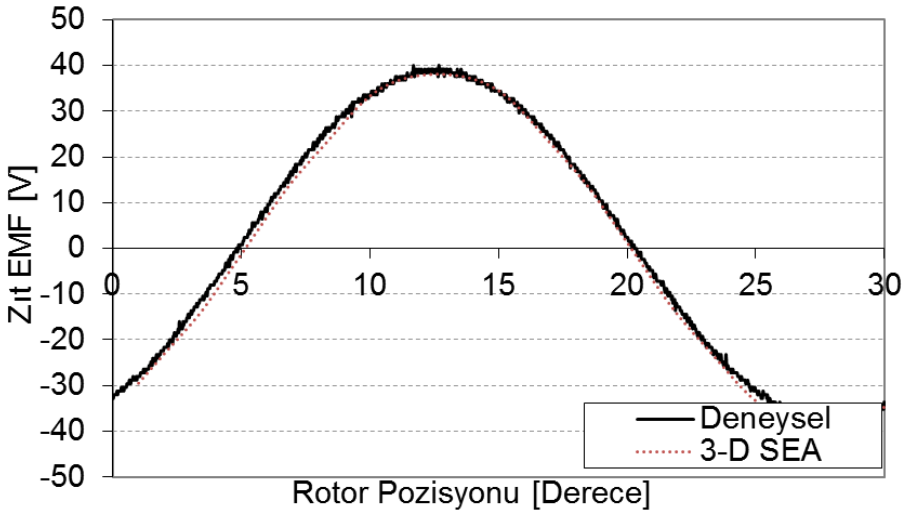
5.6. Deneysel Sonuçlar

Deney düzeneği ilk olarak zıt EMK testi yapılmıştır. Step motor 400 rpm hızla çevrilmiş ve terminaller arasında elde edilen hat gerilimi osilaskop ile ölçülmüştür. Ölçülen veriler ile SEA sonuçları Şekil 5.10'de karşılaştırılmıştır.Şekil 5.10'de görüldüğü gibi zıt EMK simülasyon ve deneysel sonuçların dalga formları birbiri üzerinde ve yüksek doğrulukta çıkmıştır. Ölçümü yapılan zıt EMK sonuçlarının FFT analizi incelendiğinde SEA çözümlerinde elde edilen sonuçlar ile birebir örtüştüğü gözlemlenmiştir.

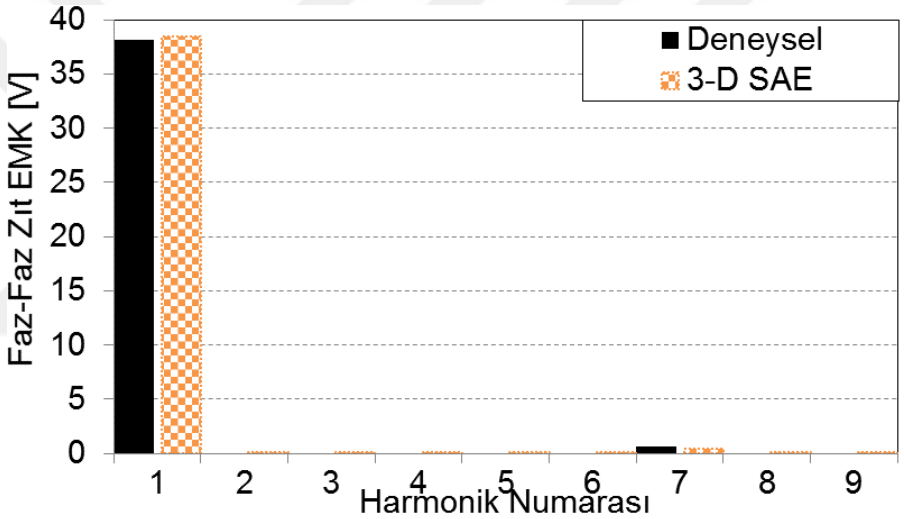
Son olarak deney düzeneği ile yüklü durum testi yapılmıştır. Motor sürücü sorunlarından dolayı motor moment ölçümü için sabit akım metodu seçilmiştir. Bu metot ile fazlara uygulanan akım değerlerinin toplamı sıfır olmalıdır. A fazı 13,9A, B fazı -27,8 A, C fazı 13,9 A ile sabit olarak beslenmiştir ve dinamo olarak kullanılan servo motoru dönme rejiminde çalıştırılmıştır. Bir başka değişle statik test çalışması yapılmıştır. Yapılan testte sonuçları kaplinler arasında bulunan moment sensörü ile ölçülmüş ve değerler kayıt edilmiştir Şekil 5.13'de görüldüğü gibi test sonuçları ile simülasyon sonuçları arasında fark bulunmaktadır. Test sonuçları için ortalama ölçülen moment değeri 14,79Nm çıkmıştır. Simülasyon ve test verisi arasında %3,4'lük kabul edilebilir bir fark tesbit edilmiştir.

Tablo 5.1'de deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.

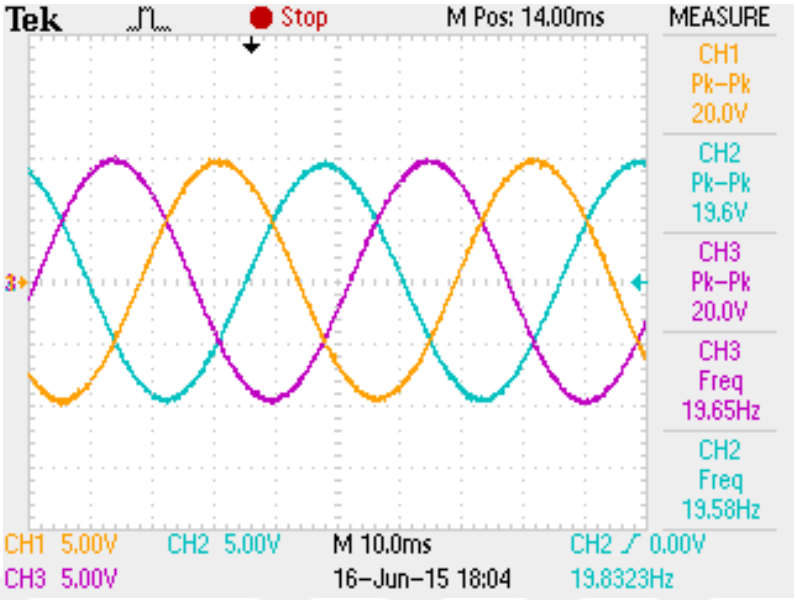
Son olarak Şekil 5.14'de motor 8 Arms değer ile çalıştırılmış ve 8,4 Nm ortalama tork elde edilmiştir. Ölçülen değer ve teorik değer arasındaki hata farkı %4,5 bulunmuştur. Bu hatanın ölçüm ve üretim kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



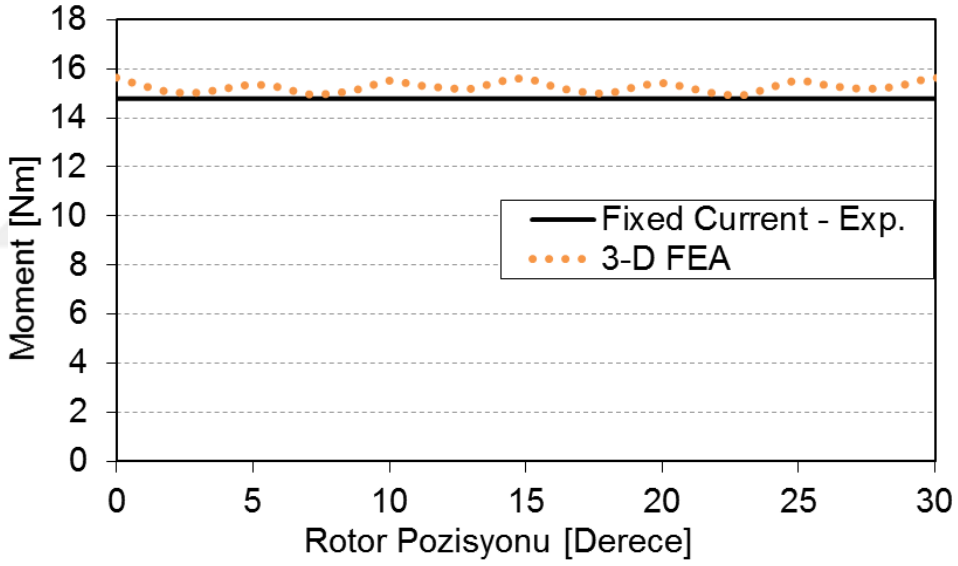
Şekil 5.10. Zıt EMK test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.11. Zıt EMK test ve simülasyon sonuçlarının FFT analizi



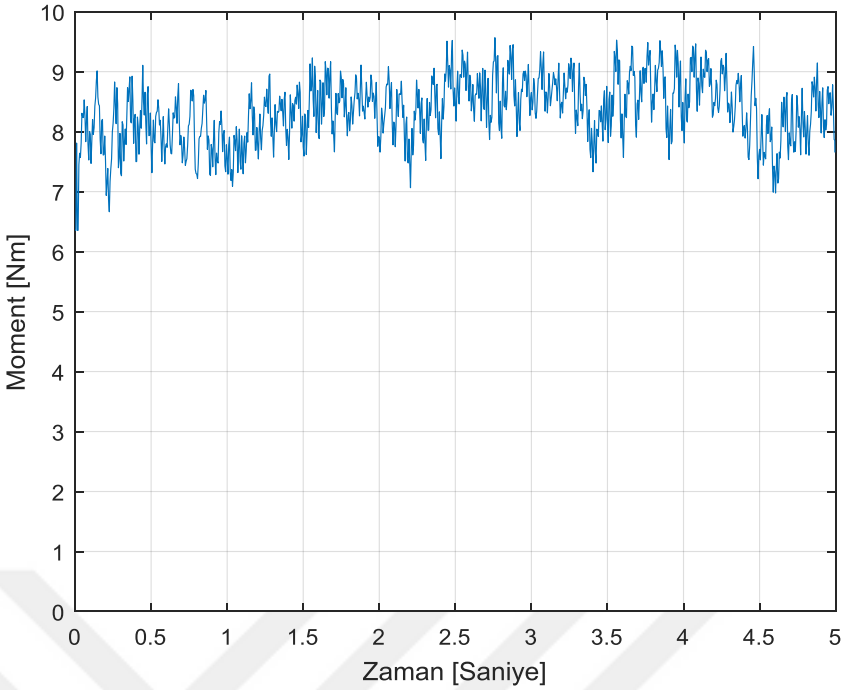
Şekil 5.12. 3 Faz için zıt EMK ölçümleri



Şekil 5.13. Test ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Tablo 5.1. Deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

	Ort. Moment Değeri	Dalgalılık Oranı	K_T [Nm/A_{rms}]
Deneysel	14,79Nm	N/A	1,06
3D SEA	15,33Nm	%4,55	1,03
Fark	%3,4	N/A	%2,8



Şekil 5.14. 8 Arms değeri ile moment çıkış grafiği

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorların uygulama alanlarından bahsedilmiş, gelec farklı topolojileri özetlenmiş, sınıflandırma ve yapılarından bahsedilmiştir. Nüvesiz disk motorlara ağırlık verilerek literatür incelemesi yapılmıştır. Motor denklemleri detaylı şekilde anlatılmış ve teorik altyapı irdelenmiştir.

Referans olarak ele alınan motor sadece analiz amaçlı değil nüvesiz bir motor nasıl üretilebilir gözü ile incelenmiş ve üretim metotları üzerine düşünülmüştür. Özellikle stator yapısı üzerine bir kaç farklı metot düşünülse de en son kılavuz kullanma yöntemi seçilmiştir. Referans motorun mekanik özelliklerinden yola çıkılarak analiz için modeli oluşturulmuş ve analizleri detaylıca yapılmıştır. Analizler ve motor teknik bilgileri yüksek oranda paralellik sergilermiş ve tasarlanacak ve üretilecek özgün disk motor için önemli girdiler oluşturmuştur.

Uygulama için nüvesiz disk motor tasarımı için belirlenen isterler dahilinde ön boyutlandırma çalışmaları yapılmış, manyetik model oluşturulmuş, detaylı sonlu elemanlar analizi 3D FEA kullanılarak tamamlanmıştır. Motorun SAE analizleri sonucu isterlerin karşılandığını göstermiştir.Tasarımı yapılan eksenel akılı nüvesiz senkron motor, incelenen referans motor gözlemleri ve literatür araştırmaları ile üretimine geçilmiş ve başarılı bir şekilde üretilmiştir. Son olarak deney düzeneği üzerine performans testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar ile simülasyon çalışmaları arasında uyum görüşmüştür.

Gelecek çalışmalarda özellikle girdap kayıplarını azaltmak için stator üretiminde litz kablosu kullanılabilir. Bunun dışında hava aralığı akı yoğunluğu arttırmak ve stator destek çemberini ferromanyetik olmayan daha hafif bir malzeme (ör: Alüminyum) kullanabilmek için rotor mıknatıs dizisinde manyetik akısı uygun yönlendirilmiş mıknatıslar kullanılarak hall-bach dizisi ile üretilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Bojoi R., Cavagnino A., Miotto A., Tenconi A., Vaschetto S., Radial flux and Axial Flux PM Machines Analysis for More Electric Engine Aircraft Applications, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE*, DOI: 10.1109/ECCE.2010.5618110.

[2] Ellims M., Monkhouse H., Lyon A., ISO 26262: Experience Applying Part 3 to an in-Wheel Electric Motor, *System Safety, 6th IET International Conference* , DOI: 10.1049/cp.2011.0250.

[3] The European Road Transport Research Advisory Council, European Roadmap Electrification of Road Transport 2nd Edition, *The European Road Transport Research Advisory Council*, 2012.

[4] Adams W., Electric Motor, 1884, U.S. Patent No: US300827 A., *U.S. Patent and Trademark Office.*

[5] Parcelle A. L., Electro Motor Traction Wheel, 1890, U.S. Patent No: US433180 A., *U.S. Patent and Trademark Office*.

[6] Gieras J. F., Wang R. J., Kamper M. J., *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Springer, Netherlands, 2008.

[7] http://www.usmagneticmaterials.com/articles-and-pp.htm. (Ziyaret Tarihi: 01 Nisan 2015).

[8] http://www.gkn.com/ landsystems/ brands/ hybrid-power/ media/downloads/ Brochures/Downloads/GKN-Hybrid-Power-Brochure.pdf (Ziyaret Tarihi: 01 Mayıs 2015).

[9] Aydin M., Gulec M., Reduction of Cogging Torque in Double-Rotor Axial-Flux Permanent-Magnet Disk Motors: A Review of Cost-Effective Magnet-Skewing Techniques With Experimental Verification, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, DOI: 10.1109/TIE.2013.2276777.

[10] Batzel T. D., Lee K. Y., Slotless Permanent Magnet Synchronous Motor Operation without a High Resolution Rotor Angle Sensor, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, DOI: 10.1109/60.900494.

[11] Hill-Cottingham R. J, Coles P. C., Eastham J. F., Profumo F., Tenconi A., Gianolia G., Multi-disc axial flux stratospheric aircraft propeller drive, *Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE*, DOI: 10.1109/IAS.2001.955753.

[12] Hill-Cottingham R. J, Coles P. C., Eastham J. F., Profumo F., Tenconi A., Gianolia G., Novel axial flux machine for aircraft drive: design and modeling, *Magnetics Conference, 2002. INTERMAG Europe 2002. Digest of Technical Papers. 2002 IEEE International*, DOI: 10.1109/INTMAG.2002.1001367.

[13] Lovatt H. C., Ramsden V. S., Mecrow B. C., Design of an in-wheel Motor for a Solar-Powered Electric Vehicle, *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, DOI: 10.1049/cp:19971074.

[14] Bumby J. R., Martin R., Axial-Flux Permanent-Magnet Air-Cored Generator for Small-Scale Wind Turbines, *IEE Proceedings-Electric Power Applications* , DOI: 10.1049/ip-epa:20050094.

[15] Chan T. F., Lai L. L., An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, DOI: 10.1109/TEC.2006.889546.

[16] Wang R.-Jie, Kamper M. J., Van der Westhuizen K. , Gieras J. F., Optimal Design of a Coreless Stator Axial Flux Permanent-Magnet Generator, *IEEE Transactions on Magnetics*, DOI: 10.1109/TMAG.2004.840183.

[17] Javadi S., Mirsalim M., A Coreless Axial-Flux Permanent-Magnet Generator for Automotive Applications, *IEEE Transactions on Magnetics*, DOI: 10.1109/TMAG.2008.2004333.

[18] Pullen K. R., Etemad M. R., Fenocchi A., The High Speed Axial Flux Disc Generator-Unlocking the Potential of the Automotive Gas Turbine, *Machines and Drives for Electric and Hybrid Vehicles (Digest No: 1996/152), IEE Colloquium on* , DOI: 10.1049/ic:19960900.

[19] El-Hasan T. S., Luk P. C. K, Bhinder F. S., Ebaid M. S., Modular Design of High-Speed Permanent-Magnet Axial-Flux Generators, *IEEE Transactions on Magnetics* , DOI: 10.1109/20.908897.

[20] El-Hassan T., Luk P. C., Magnet Topology Optimization to Reduce Harmonics in High Speed Axial Flux Generators, *Magnetics Conference, 2003. INTERMAG 2003. IEEE International*, DOI: 10.1109/INTMAG.2003.1230861.

[21] Caricchi F., Crescimbini F., Honorati O., Bianco G. L.,Santini E., Performance of Coreless-Winding Axial-Flux Permanent-Magnet Generator with Power Output at 400 Hz, 3000 r/min, *IEEE Transactions on Industry Applications*, DOI: 10.1109/28.739003.

[22] Aydın M., Özel Uygulamalar İçin DC ve AC Sürekli Mıknatıslı Motorların Optimum Elektromanyetik Tasarımı, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 26-30 Kasım 2008.

[23] Huang S., Aydin M., Lipo T. A., A Direct Approach to Electrical Machine Performance Evaluation: Torque Density Assessment and Sizing Optimization, *15th International Conference on Electrical Machines*, Belgium, 25-28 Ağustos 2002.

[24] Aydın M., Ocak O., Albaş G. Ç., Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Doğrudan Sürüşlü Beyaz Eşya Uygulamalarında Kullanımı, *EMO Bilimsel Dergi,* 2012, **3**(2), 7-11.

[25] Dubar C., *Design of an Axial Flux Machine*, Chalmers, Göteborg, 2011.

[26] Nasrin L., Improved Version of Energy Efficient Motor for Shell Eco Marathon, Yüksek Lisans Tezi. NTNU, Elektroteknik Enstitüsü, Tronheim, 2011.

[27] Güleç M., Klasik ve Sürekli Mıknatıslı Manyetik Yatakların Manyetik Eşdeğer Devre ve 2B Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi ile Modellenmesi ve Analizi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 323164.

[28] http://www.euromagnete.com, (Ziyaret Tarihi: 07 Mayıs 2016).

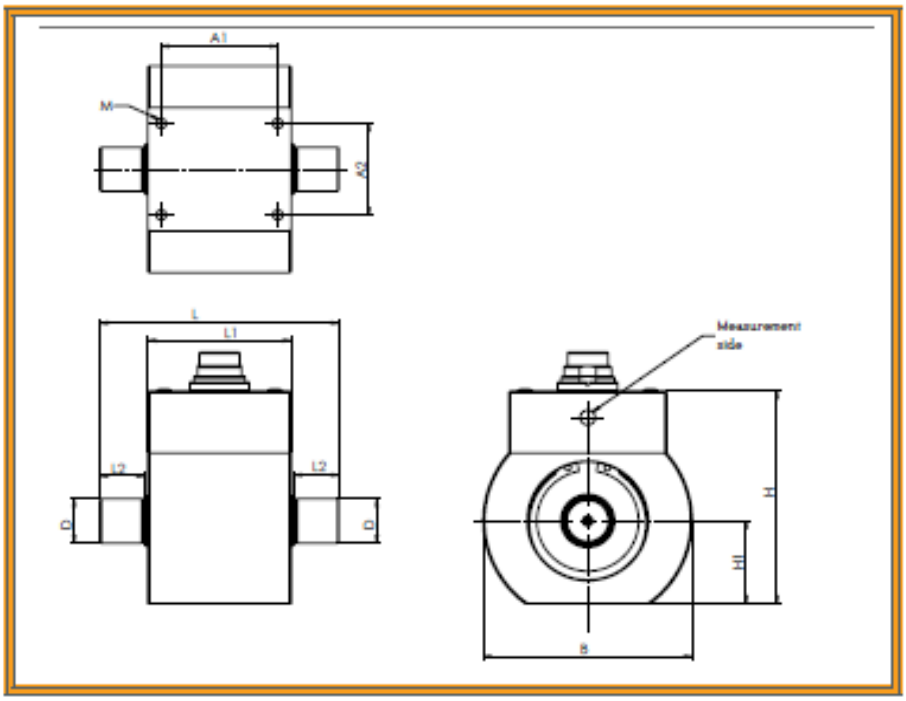
[29] http://tr.wikipedia.org/wiki/Reynolds_say%C4%B1s%C4%B1. (Ziyaret Tarihi: 08 Mayıs 2016).

EKLER

Ek-A

Moment Sensörü Özellikleri

Mechanical Dimensions:



Size	I	II	III
Measurement range: [Nm]	5/10/20	50/100/200	500/1000
Dimensions:			
L [mm]	80	90	120
Ø B [mm]	70	75	105
H [mm]	72	77,5	97,5
H1 ± 0,05 [mm]	28	30	40
Ø D g6 [mm]	15	24	40
L1	48	52	65
L2	15	18	26
A1	39	42	50
A2	31	35	55
M	M4 x 6 tief	M4 x 6 tief	M5 x 10 tief
	General tolerances DIN 2768 - m		
Weight ca.: [g]	550	850	2400
Max. speed[1/min]	22000	16000	9000

ETH messtechnik gmbh Hagstrasse 10 D-74417 Gschwend Tel.: +49(0)7970-930-0 Fax: -50 www.eth-messtechnik.de info@eth-messtechnik.de
technical changes reserved

Technical Data:

Supply voltage:	11,5 to 30V DC	Option speed:	(n)
Current consumption:	ca. 200mA	Output:	Open- Collektor
Rise time 10-90%	1ms	Internal Pull Up:	4,7kΩ (5 V level)
Limit frequency –3dB	1kHz	External Pull Up:	24 V max / 20mA
Voltage output:	0 to ±5V	Pulses / rev:	60
Internal resistance:	100 Ω		
Current output:	10 ± 8mA		
Burden at UB=12V	250 Ω		
Burden at UB=24V	500 Ω	**Ordering example :**	
Ripple:	< 100mVss		
Nonlinearity:	<0,3%	**DRBK10-n**	
Hysteresis:	<0,3%	Torque transducer measurement range 10 Nm	
Deviation at zero point:	≤ ± 100mV/ ±200µA	Option speed detection	
Max. Measuerment fault:	0,5% (bez. a. d. Endwert)		
Operating temperature:	0–60°C	**Available accessories :**	
Compensated temperature:	5-45°C	Measurement cable, Couplings, Evaluation device	
Temperature fault:			
Zero point:	0,05%/K		
Sensitivity:	0,02%/K		
Mechanical overload:	100%		
Internal protection:	IP 40 DIN 40050		
Connection:	12pin connector		

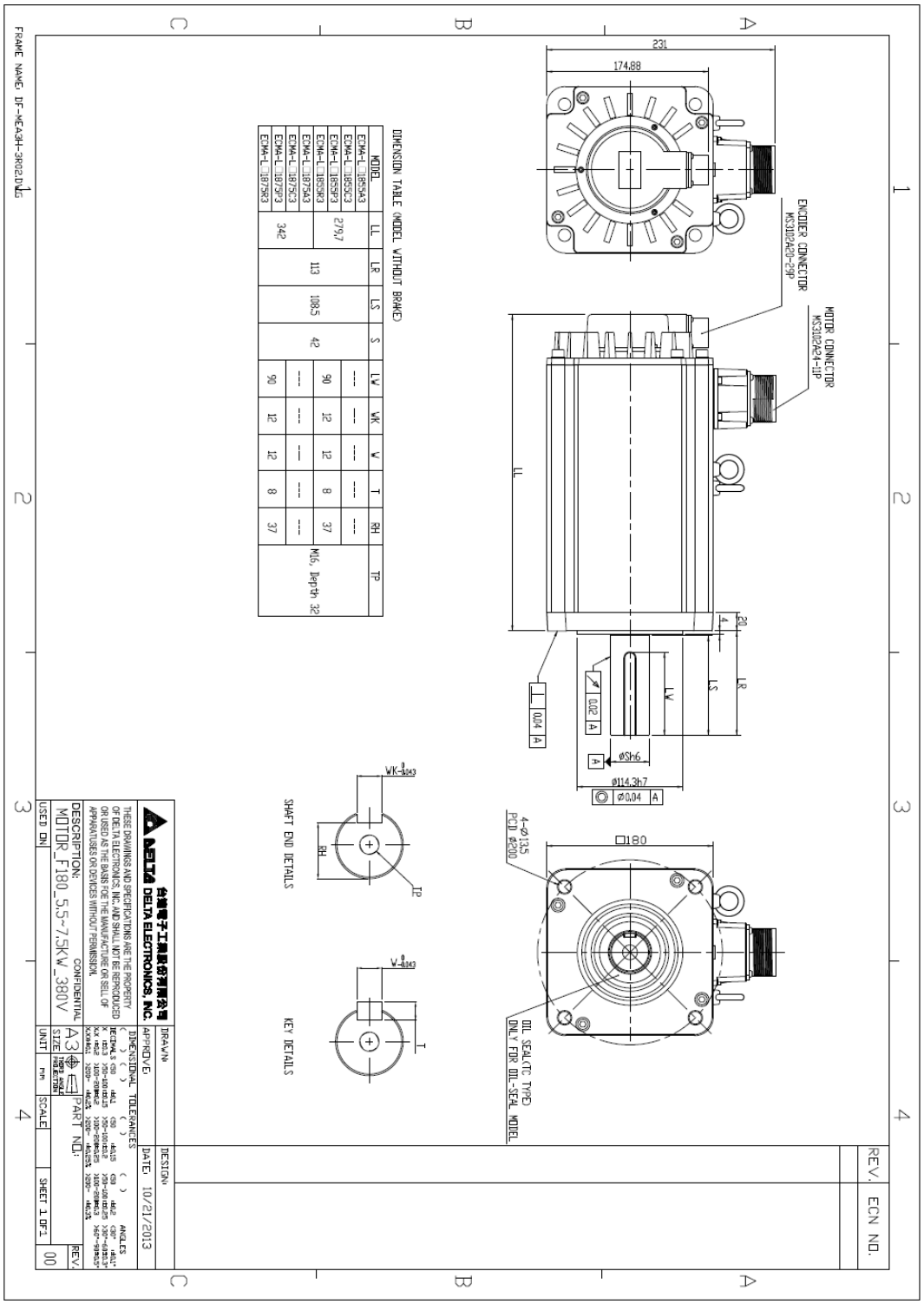
The values for axial and radial load refer to the non-fixed housing

Size	Measure-ment range [Nm]	Spring constant C [Nm/rad]	Mass moment of inertia J [g•cm²]			Maximum axial load [N]	Maximum radial load [N]
			Total	Drive side	Measure-ment side		
I	5	1100	134	116	18	930	25
	10	2700	135	117	18	930	45
	20	5400	136	117	19	930	90
II	50	20 x 10^3	398	292	106	1580	210
	100	36 x 10^3	405	296	109	1580	420
	200	52 x 10^3	424	305	119	1580	845
III	500	290 x 10^3	3350	1879	1471	3920	1420
	1000	420 x 10^3	3519	1963	1556	3920	2875

ETH mess technik gmbh Hagstrasse 10 D-74417 Gschwend Tel.: +49(0)7971-9310-0 Fax: -50 www.eth-messtechnik.de info@eth-messtechnik.de
Technical changes reserved

Ek-B

Step Motor Özellikleri



MODEL	LL	LR	LS	S	LW	WK	W	T	RH	TP
ECMA-L□1855A3	279.7	113	108.5	42	---	---	---	---	---	M16, Depth 32
ECMA-L□1855C3					---	---	---	---	---	
ECMA-L□1855F3					90	12	12	8	37	
ECMA-L□1855K3					---	---	---	---	---	
ECMA-L□1875A3	342				---	---	---	---	---	
ECMA-L□1875C3					---	---	---	---	---	
ECMA-L□1875P3					90	12	12	8	37	
ECMA-L□1875R3					---	---	---	---	---	

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] Aydin M., Gulec M., Demir Y., **Akyuz B.**, Yolacan E., Design and Validation of a 24-Pole Coreless Axial Flux Permanent Magnet Motor for A Solar Powered Vehicle, *International Conference on Electrical Machines*, Lozan, 04-07 September 2016.

[2] Hartavi A. E., Gol M., Akyuz B., A Comparative Study of Different Electric Drive Systems and Their Effects on Drive Cycle Performance of an Electric City Bus, *EVS28 Kintex*, Kore, 3-6 May 2015.

[3] Hartavi A. E., Gol M., **Akyuz B.**, Impact Assessment of Electric City Bus Parameters on Driving Range over Various Drive Cycles, *International Conference on Automotive Technology*, İstanbul, 17 October 2014.

[4] Sert E., Orhan B., Dileroglu S., **Akyuz B.**, G. Kaynar, Measurments of Auxiliary System For Vehicle Energy Management *Ulusal Otomatik Kontrol Toplantısı*, Kocaeli, 11-13 Eylül 2014.

ÖZGEÇMİŞ

Barış Akyüz, Ağustos 1985, K. Maraş doğumludur. İlköğretimini K. Maraş'ta, Orta ve lise öğrenimini Muğla'da tamamladı. 2003 yılında kazandığı Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliğini bölümünden 2008 yılında mezun oldu.2011 yılında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır. 2010-2012 yılları arasında Yonca Onuk J.V. 'de Ar-Ge mühendisi olarak çalışmıştır. 2012 yılında Anadolu Isuzu Otomotiv A.Ş. şirketinde Uzman Ar-Ge mühendisi olarak çalışmaya başlamış ve halen devam etmektedir.