T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ASANSÖR TAHRİK SİSTEMLERİ İÇİN DIŞTAN ROTORLU SÜREKLİ MIKNATISLI BİR SENKRON MOTOR TASARIMI

DOKTORA TEZİ

Mücahit SOYASLAN

Enstitü Anabilim Dalı	**:**	**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı	**:**	**Prof. Dr. Osman ELDOĞAN**
Ortak Danışmanı	**:**	**Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU**

Ocak 2020

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ASANSÖR TAHRİK SİSTEMLERİ İÇİN DIŞTAN ROTORLU SÜREKLİ MIKNATISLI BİR SENKRON MOTOR TASARIMI

DOKTORA TEZİ

Mücahit SOYASLAN

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 31/01/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. **Osman ELDOĞAN** **Jüri Başkanı**	**Prof. Dr.** **Ali Fuat BOZ** **Üye**	**Prof. Dr.** **Yılmaz UYAROĞLU** **Üye**
Prof. Dr. **Mehmet BAYRAK** **Üye**	**Dr. Öğr. Üyesi** **Barış BORU** **Üye**	

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Mücahit SOYASLAN

31/01/2020

TEŞEKKÜR

Öncelikle doktora tez çalışmalarımda bana her türlü desteği veren ve yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Osman ELDOĞAN'a, elektrik motor tasarımı alanına girmeme öncülük eden, takıldığım her noktada yardımına başvurduğum, bu tezin oluşmasında büyük katkıları olan ortak danışmanım Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU'na, tez süreçlerinde değerli fikirlerini aldığım Prof. Dr. Ali Fuat BOZ'a ve Dr. Öğr. Üyesi Barış BORU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Motor tasarımı süreçlerinde birbirimize birçok katkımız olan Öğr. Gör. Yusuf AVŞAR'a, termal analizler konusunda desteğini aldığım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa EKER'e, deney düzeneğinin kurulmasında fikirlerini aldığım Oğuzhan OCAK'a, ABC algoritması konusunda beraber çalıştığımız Arş. Gör. Nurdoğan CEYLAN'a, veri toplama düzeneğinde yardımını aldığım Arş. Gör. M. Salih SARIKAYA'ya, üretim süreçlerinde yardımlarını esirgemeyen Hasan TAHAL'a, Serkan DÖNMEZ'e ve Yusuf MEYVACI'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasına verdiği desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a (Proje No: 218M615), Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (Proje No: 2017-50-02-017) ve TOLCE firmasına teşekkür ederim. Ayrıca 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Bursu Programı kapsamındaki desteğinden dolayı TÜBİTAK BİDEB'e teşekkür ederim. Kullanılan yazılımlar konusundaki desteklerinden dolayı Sakarya Üniversitesi'ne, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi'ne ve Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Bugünlere gelene kadar eğitimime katkı sunan tüm öğretmenlerime, hayatım boyunca desteklerini benden esirgemeyen annem Gülsen SOYASLAN ve babam Muammer SOYASLAN'a, yaşadığım her süreçte sabırla yanımda duran, yoğun olduğum zamanlarda çocuklarımıza hem annelik hem de babalık yapan sevgili eşim Esin SOYASLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR ..... **i**
İÇİNDEKİLER ..... **ii**
KISALTMALAR ..... **iv**
SİMGELER ..... **vi**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **xii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvi**

BÖLÜM 1.
GİRİŞ **1**
1.1. Asansör Sistemleri 3
1.2. Tezin Kapsamı ve Amacı 10

BÖLÜM 2.
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **14**
2.1. Sektörde Yer Alan Dıştan Rotorlu SMSM Ürünleri 15
2.2. Dıştan Rotorlu SMSM Alanındaki Patent Çalışmaları 20
2.3. SM Motorlar İle İlgili Diğer Çalışmalar 31
2.3.1. SM motorlar ile ilgili modelleme çalışmaları 31
2.3.2. Doğrudan tahrikli SM motor çalışmaları 38
2.3.3. Oluk-kutup oranı ve vuruntu momenti çalışmaları 40
2.3.4. İçten rotorlu ve dıştan rotorlu SM motorların karşılaştırma çalışmaları 43
2.3.5. Mukavemet ve trafik hesapları ile ilgili çalışmalar 44

BÖLÜM 3.
MATERYAL VE YÖNTEM **47**
3.1. SMSM'lerin Özellikleri ve Sınıflandırılması 47
3.1.1. İçten ve dıştan rotorlu SMSM'ler 50
3.1.2. Stator ve Sargılar 52
3.1.3. Rotor 58
3.1.4. Sürekli (Kalıcı-Daimi) Mıknatıslar 59

3.2. Manyetik Devre Modeli 64
3.2.1. Eektromanyetik alanın oluşumu 64
3.2.2. SMSM'nin manyetik devre modeli 67
3.3. Zıt Elektromotor Kuvveti 70
3.4. Çıkış Gücü ve Elektromanyetik Tork 71
3.5. Carter Katsayısı 72
3.6. Mıknatıs Kesit Alanı ve Hava Aralığı Kesit Alanı 73
3.7. Stator Dişi ve Stator Boyunduruğu Relüktansı 73
3.8. Dıştan Rotorlu SMSM'de Kullanılan Ölçülerin Gösterimi 74
3.9. Manyetik Devrenin Çözülmesi 76
3.10. Eşdeğer Elektrik Devre Modeli 77
3.10.1. İndüktans değerlerinin hesaplanması 81
3.11. Motor Kayıpları 84
3.11.1. Bakır kayıpları 84
3.11.2. Demir kayıpları 84
3.11.3. Mekanik kayıplar ve diğer kayıplar 85
3.12. Oluk-Kutup Oranının Seçimi 86
3.13. Vuruntu Momenti 90
3.14. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Optimum Tasarımı 95
3.14.1. Sezgisel optimizasyon algoritmaları 98
3.14.2. Yapay Arı Kolonisi (ABC) Algoritması 99
3.15. Deney Düzeneğinin Tasarımı 103

BÖLÜM 4.
BULGULAR ve TARTIŞMA 106
4.1. ABC Algoritması İle Optimizasyon Sonuçları 106
4.2. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) Analizleri 109
4.3. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Yapısal Analiz Sonuçları 118
4.3.1. Kasnak mili eğilme ve burulma analizi 120
4.3.2. Rotor burulma analizi 124
4.3.3. Stator mili burulma analizi 126
4.4. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Termal Analiz Sonuçları 127
4.5. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Üretilmesi 130
4.6. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Test Sonuçları 132
4.6.1. Dıştan rotorlu SMSM'nin zıt EMK testi 133
4.6.2. Dıştan rotorlu SMSM'nin yüklü çalışma testleri 134
4.7. Dıştan Rotorlu SMSM'nin İçten Rotorlu SMSM İle Karşılaştırılması 137

BÖLÜM 5.
SONUÇLAR VE ÖNERİLER 140
KAYNAKLAR 144
EKLER 157
ÖZGEÇMİŞ 178

KISALTMALAR

ABC : Artificial Bee Colony (Yapay Arı Kolonisi)
AC : Alternating Current (Alternatif Akım)
AlNiCo : Aluminum Nickel Cobalt
AYK : Alan Yönlendirmeli Kontrol
BLAC : Brushless Alternating Current (Fırçasız Alternatif Akım)
BLDC : Brushless Direct Current (Fırçasız Doğru Akım)
CE : Conformite European (Avrupa Normlarına Uygunluk)
CNC : Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Nümerik Kontrol)
DC : Direct Current (Doğru Akım)
DEA : Differential Evolution Algorithm (Diferansiyel gelişim algoritması)
DMK : Doğrudan Moment Kontrolü
EF1 : Dans alanında dans ederek besin kaynağının yeri ve miktarı hakkında diğer arılara bilgi paylaşımında bulunan arı
EF2 : Bilgi paylaşımında bulunmadan besin kaynağından nektar getirmeye devam eden arı
EMK : Elektromotor Kuvveti
EN : European Standard
FFT : Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
FMC : FMincon (Çok değişkenli fonksiyonların minimumunu bulan fonksiyon)
GM : Gömülü Mıknatıslı
GSA : Gravitational Search Algorithm (Yerçekimsel arama algoritması)
IEC : International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
Kg : Kilogram
kW : Kilo Watt

MEPT : Maximum Efficiency Per Torque (Tork başına maksimum verimlilik)
MMK : Manyetomotor Kuvveti
MPa : Mega Pascal
NdFeB : Neodymium Iron Boron (Neodimyum Demir Boron)
N : Newton
Nm : Newton metre
N/m^2 : Newton/$metre^2$
PI : Proportional-Integral (Oransal-İntegral)
PMAC : Permanent Magnet Alternating Current (Sürekli Mıknatıslı Alternatif Akım)
RPM : Round Per Minute (dakikadaki devir sayısı)
SEA : Sonlu Elemanlar Analizi
SEY : Sonlu Elemanlar Yöntemi
SM : Sürekli Mıknatıslı
SN : Besin kaynaklarının sayısı
SmCo : Samarium Cobalt
SMSM : Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
SPWM : Sine-wave Pulse Width Modulation (Sinus dalgası darbe genişlik modülasyonu)
SVPWM : Space Vector Pulse Width Modulation (Vektör uzayı darbe genişlik modülasyonu)
THB : Toplam Harmonik Bozulmaları
TS : Türk Standardı
UF : Besin kaynağını terk eden ve dans alanında gözcü olan arı
YAK : Yapay Arı Kolonisi (ABC)
YM : Yüzey Mıknatıslı
2D : 2 dimensional (2 boyutlu)

SİMGELER

A : Amper

A_g : Hava aralığı kesit alanı

A_i : İletken kesit alanı

A_m : Mıknatıslanma yönüne dik olan mıknatıs kesit alanı

A_{oluk} : Oluk alanı

A_{tel} : Telin kesit alanı

α_{ka} : Kutup aralığı (embrace)

α_k : Kutup adımı açısı

α_m : Mıknatıs adımı açısı

B : Manyetik akı yoğunluğu

$\hat{B}$: Manyetik akı yoğunluğunun tepe değeri

B_g : Hava aralığı akı yoğunluğu

$\bar{B}_g$: Ortalama hava aralığı akı yoğunluğu

b_{np} : Oluk ve kutup sayısının en büyük ortak böleni

B_p : Bobinin açısal uzunluğunun bir kutba oranı

B_r : Artık mıknatıslanma değeri

B_{s0} : Stator dişlerindeki açıklık

B_m : Mıknatıs akı yoğunluğu

B_{sd} : Stator dişlerindeki akı yoğunluğu

C// : Termal Genleşme Katsayısı (Mıknatıslanma yönüne paralel)

C^ : Termal Genleşme Katsayısı (Mıknatıslanma yönüne dik)

C_ϕ : Akı konsantrasyon faktörü

$cos\ \varphi$: Güç faktörü

d : yoğunluk

D : Karar değişkenleri sayısı

D_{irul} : Rulman iç çapı

D_o : Motor dış çapı

D_{ri} : Rotor iç çapı

D_{ro} : Rotor dış çapı

D_{si} : Stator iç çapı

D_{so} : Stator dış çapı

D_{tel} : Tel çapı

E : Elastisite (Young) Modülü

E_0 : İndüklenen EMK

E_z : Faz başına EMK'nın rms değeri

$\hat{E}_z$: İndüklenen zıt EMK kuvvetinin tepe değeri

f : Çalışma frekansı

f_i : İyileştirme sayacı

F_{mmk} : Mıknatıslar tarafından üretilen manyetomotor kuvveti

F_{rul} : Rulmana etikyen kuvvet

ϕ : Manyetik akı

ϕ_g : Hava aralığı manyetik akısı

ϕ_l : Sızıntı akısı

ϕ_r : Sürekli mıknatıs akı kaynağı

Ψ_M : Mıknatıs akısı

g : Hava aralığı kalınlığı

g' : Carter katsayısıyla düzeltilmiş hava aralığı kalınlığı

H : Manyetik alan şiddeti

$\hat{H}$: Manyetik alan şiddetinin tepe değeri

Hz : Hertz

Hv : Vickers sertliği

H/m : Henry/metre

h_m : Mıknatıs kalınlığı

h_{sb} : Stator boyunduruk kalınlığı

h_{s2} : Oluk yüksekliği

h_{s1} : Oluk diş ucu yarıçapı

h_{s0} : Diş ucu kalınlığı

h_s : Toplam oluk yüksekliği

I : Faz akımının RMS değeri

i_d, i_q : Faz direnci üzerinden akan akımlar

J : Akım yoğunluğu

k_c : Carter katsayısı

k_{dol} : Doluluk faktörü

k_e : Eddy kayıp katsayısı

k_h : Histerisis kayıp katsayısı

kJ : Kilojoule

K_l : Sızıntı akısı faktörü

k_{np} : Kutup sayısı ve oluk sayısının en küçük ortak katı

$k_{pür}$: Pürüzlülük katsayısı

K_r : Relüktans faktörü

k_{rul} : Rulman kayıp katsayısı

k_{sf} : Sargı faktörü

k_t : Tork sabiti

k_{yf} : Yığılma faktörü

k_z : Zıt EMK sabiti

L_{bs} : Sargı sonu indüktansı

l_c : Nüvenin yol uzunluğu

L_{1bs} : Sargı sonu toplam uzunluğu

L_d : d ekseni indüktansı

L_i : Bir bobindeki iletken uzunluğu

L_{is} : Seri bağlı fazlar arasındaki uzunluk

L_{it} : İletkenin toplam uzunluğu

L_{ki} : Bobinler arasındaki karşılıklı indüktans

l_{m} : Bir mıknatısın uzunluğu

L_m : Mıknatıslanma indüktansı

L_{oluk} : Oluk kaçak indüktansı

$L_{öi}$: İletkenin öz indüktansı

L_p : Motorun paket boyu

L_q : q ekseni indüktansı

L_{su} : Sargı sonu uzunluğu

λ : Termal iletkenlik

λ_{bs} : Kaçak manyetik geçirgenlik

λ_{δ} : Bölünme oranı

λ_{s} : Stator bölünme oranı

λ_{oluk} : Oluk adımı

M_d : Toplam demir kütlesi

M_{sd} : Stator dişlerinin toplam kütlesi

M_{sb} : Stator boyunduruğunun kütlesi

m/s : metre/saniye

μ : Manyetik geçirgenlik

μ_0 : Boşluğun manyetik geçirgenliği

μ_r : Mıknatısın bağıl manyetik geçirgenliği

N : Sarım sayısı

N_{bobin} : Oluk sayısı/Faz sayısı

n_f : faz sayısı

N_t : Bir fazdaki toplam tur sayısı

n_{tel} : İletken tel sayısı

N_{oluk} : Oluk sayısı

η : Verim

θ : Rotor konumu

θ_e : Rotorun elektriksel açısal konumu

p : Kutup sayısı

P - $P_M - P_{çıkış}$: Çıkış gücü

$P_E - P_{giriş}$: Elektriksel giriş gücü

$P_{bakır}$: Bakır kayıpları

P_{demir} : Demir kayıpları

P_{rul} : Rulman kayıpları

$P_{rüz}$: Rüzgar kayıpları

P_c : Manyetik iletkenlik katsayısı

pT : Kaçak iletkenlik katsayısı

q : Kutup-faz başına düşen oluk sayısı

ρ : İletken özgül direnci

ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu

σ_b : Basma dayanımı

$\sigma_ç$: Çekme dayanımı

σ_e : Eğilme dayanımı

r : Elektriksel direnç

R_c : Demir kaybı direnci

R_g : Hava aralığı relüktansı

R_l : Sızıntı akısı relüktansı

R_m : Mıknatıs relüktansı

R_r : Rotor relüktansı

R_s : Faz direnci

R_s' : Farklı sıcaklıklardaki faz direnci

R_{s1} : Oluk boyunduruk yarıçapı

R_{sd} : Stator dişi relüktansı

R_{sb} : Stator boyunduruğu relüktansı

S_p : Oluk sayısı cinsinden bobin adımı

S5 : Elektrikli frenle aralıklı periyodik görev çevrimi

T : Tesla

T_R : Nominal tork

$T_{maks.}$: Maksimum tork

T_{mk} : Fourier katsayısı

U : Fazlar arası gerilim

W : Watt

ω_m : Mil açısal hızı

ω_R : Anma hızı

$\omega_{maks.}$: Maksimum hız

w_{sd} : Stator diş genişliği

w_{s1} : Sargı sonu dönüş uzunluğu

X_q : q ekseni reaktansı

x_j^{max} : j. karar değişkeninin üst sınırı

x_j^{min} : j. karar değişkeninin alt sınırı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Şekil 1.8'deki askı tiplerinin özellikleri 8
Tablo 1.2. Karşılaştırma motorunun etiket değerleri 11
Tablo 1.3. Tezden beklenen yaygın etki tablosu 13
Tablo 2.1. Asansör sistemleri ile ilgili ulusal patentler 20
Tablo 2.2. Asansör sistemleri ile ilgili uluslararası patentler 22
Tablo 3.1. Uyartım akımlarına ve zıt EMK şekillerine göre SM motorların sınıfı 48
Tablo 3.2. Tane yönlendirilmemiş silisli saçların manyetik özellikleri 52
Tablo 3.3. Sinterlenmiş NdFeB mıknatısların manyetik özellikleri 60
Tablo 3.4. Sinterlenmiş NdFeB mıknatısların fiziksel özellikleri 62
Tablo 3.5. Dıştan rotorlu SMSM'nin ölçülerinin açıklamaları 75
Tablo 3.6. ABC algoritmasının temel işlem basamakları..... 101
Tablo 3.7. ABC algoritmasının detaylı akış diyagramı 102
Tablo 4.1. Motor parametrelerinin sonuç değerleri..... 107
Tablo 4.2. Dıştan Rotorlu SMSM'nin parametreleri..... 108
Tablo 4.3. Dıştan rotorlu SMSM'nin etiket değerleri 109
Tablo 4.4. Motor parçalarının maruz kaldığı gerilmeler 119
Tablo 4.5. Motor sargılarının izolasyon sınıfları 128
Tablo 4.6. Dıştan rotorlu SMSM'nin faz dirençleri 132
Tablo 4.7. Dıştan rotorlu SMSM'nin test sonuçları 136
Tablo 4.8. Dıştan rotorlu SMSM'nin ve karşılaştırma motorunun test sonuçları 137
Tablo 4.9. Karşılaştırma motorunun ve dıştan rotorlu SMSM'nin bilgileri..... 138

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması 2
Şekil 1.2. Teagle isimli asansör..... 4
Şekil 1.3. Elisha Graves Otis'in asansör üzerindeki güvenlik deneyi..... 4
Şekil 1.4. İlk elektrikli asansör sistemi 5
Şekil 1.5. Makine daireli ve Makine dairesiz asansör sistemleri 6
Şekil 1.6. Dişlili ve dişlisiz asansör motoru örnekleri 7
Şekil 1.7. Kayış tahrikli asansör sistemleri 7
Şekil 1.8. Asansörlerdeki askı tipleri..... 8
Şekil 1.9. En sık kullanılan 1:1 ve 2:1 askı tipleri 9
Şekil 1.10. Karşılaştırma motoru olarak kullanılan içten rotorlu SMSM 11
Şekil 2.1. Ziehl Abegg-ZAsyn asansör motoru parçaları..... 16
Şekil 2.2. Ziehl Abegg-ZAsyn dıştan rotorlu asansör motoru 17
Şekil 2.3. Swiss Traction-Z44 blok frenli ve disk frenli asansör motorları 17
Şekil 2.4. Swiss Traction blok frenli ve disk frenli asansör motorları 18
Şekil 2.5. Leroy Somer Z Range dıştan rotorlu SMSM ve teknik resmi 18
Şekil 2.6. Ningbo Xinda Elevator Mini 6 ve Diana 1 modelleri 19
Şekil 2.7. Otis SkyMotion 800 tipi dıştan rotorlu SMSM ve teknik resmi..... 19
Şekil 2.8. Sabit mıknatıslı boru tip rotorlu senkron motor..... 21
Şekil 2.9. Asansörlerde kullanılan bir kaplin sistemi..... 21
Şekil 2.10. Makine dairesiz asansörde dişlisiz tahrik motoru montajı..... 21
Şekil 2.11. Dıştan rotorlu soğutucu çubuklu dişlisiz asansör tahrik sistemi 25
Şekil 2.12. Konum bilgisini özel bir rotor dişli parçasından alan tahrik sistemi 25
Şekil 2.13. İç ve dış rotorlu çift yönlü stator dişlerine sahip asansör motoru 26
Şekil 2.14. İç ve dış rotorlu iki taraflı tahrik kasnağı bulunan asansör motoru 26
Şekil 2.15. Mıknatısları kademeli yerleştirilmiş dıştan rotorlu senkron motor 27
Şekil 2.16. Dış çapı rotor çapından bağımsız olarak seçilebilen bir tahrik kasnağının montajını sağlayan destek yapısı..... 27
Şekil 2.17. İki statoru ve bir adet rotoru bulunan asansör tahrik motoru tasarımı..... 28
Şekil 2.18. Mil içerisinden hava soğutması olan tahrik mekanizması tasarımı 28
Şekil 2.19. Dıştan rotorlu asansör tahrik motorunun mıknatıslarının yataklaması için özel bir rotor tasarımı 29
Şekil 2.20. Dıştan rotorlu asansör tahrik motorunun ayrık üretilen stator dişleri için bir birleştirme aparatı 29
Şekil 2.21. Dıştan rotorlu asansör tahrik motorunun ayrık üretilen stator dişlerine bobinlerin sarılması ve dişlerin birleştirilerek statorun oluşturulması 29
Şekil 3.1. SMSM'lerin rotor topolojileri..... 48
Şekil 3.2. SM motorların sinüsoidal ve trapezoidal zıt EMK dalga şekilleri 49
Şekil 3.3. SM motorların tork-hız karakteristiği 50
Şekil 3.4. İçten ve dıştan rotorlu motor topolojileri 51

Şekil 3.5. M530-50A tipi silisli saçın B-H grafiği 53
Şekil 3.6. M530-50A tipi silisli saçın 50 Hz'deki demir kayıpları 54
Şekil 3.7. Lazer ile kesilmiş silisli saçlar ve bu saçlara uygulanan işlemler..... 55
Şekil 3.8. Üretilen prototip motorun çift katmanlı konsantre sarım şeması 56
Şekil 3.9. Çift katmanlı sarım yapılmış stator paketi..... 57
Şekil 3.10. Rotor ve mıknatısların rotor üzerine yapıştırılma aşamaları..... 59
Şekil 3.11. Sürekli mıknatısların sıcaklık-maksimum enerji çarpanı grafiği 62
Şekil 3.12. N45SH tipi sürekli mıknatısın manyetik özellikleri 63
Şekil 3.13. Prototip motorda kullanılan N45SH tipi eğri mıknatıslar..... 63
Şekil 3.14. Manyetik alan yönünün sağ el kuralı ile gösterilmesi 65
Şekil 3.15. Bobindeki ve nüvedeki akım ve manyetik akı 65
Şekil 3.16. Dıştan rotorlu SMSM'de manyetik akının izlediği yol..... 67
Şekil 3.17. SMSM'nin manyetik eşdeğer devresi 68
Şekil 3.18. Manyetik eşdeğer devrenin sadeleştirilmesi 69
Şekil 3.19. Dıştan rotorlu SMSM'nin motor ölçüleri 74
Şekil 3.20. Dıştan rotorlu SMSM'nin mıknatıs ölçüleri 75
Şekil 3.21. Hava aralığı akı yoğunluklarının dalga şekilleri 76
Şekil 3.22. SMSM'nin d-q eşdeğer elektrik devre modeli..... 78
Şekil 3.23. SMSM'nin vektör kontrol modundaki elektrik faz diyagramı 79
Şekil 3.24. Oluk alanının ve ölçülerinin gösterimi 80
Şekil 3.25. Çift katmanlı sargı oluğundaki üst ve alt sargı katmanları 82
Şekil 3.26. Stator sargıları ve sargı sonu ölçüleri..... 83
Şekil 3.27. Kutup-faz başına oluk sayısı ve sargı faktörü değerleri 87
Şekil 3.28. Oluk ve kutup sayısı kombinasyonlarının en küçük ortak katları 89
Şekil 3.29. Oluk ve kutup sayısı kombinasyonlarının en büyük ortak bölenleri 89
Şekil 3.30. Vuruntu momentini azaltma yöntemleri 90
Şekil 3.31. Mıknatıs adımının ve kutup adımının gösterimi..... 91
Şekil 3.32. Vuruntu momenti-Hava aralığı pozisyonu grafikleri..... 93
Şekil 3.33. İndüklenen gerilimlerin FFT grafikleri..... 94
Şekil 3.34. Kutup aralığı değeri 0.78 olan motorun vuruntu momenti grafiği..... 95
Şekil 3.35. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Tasarım Algoritması 96
Şekil 3.36. Arıların besin arama ve kovana getirme davranışları 100
Şekil 3.37. Deney düzeneği..... 104
Şekil 3.38. Kurulmuş deney düzeneği 104
Şekil 3.39. Matlab Simulink'te hazırlanmış veri toplama ekranı..... 105
Şekil 4.1. ABC algoritması ile verimin iyileştirilmesi 107
Şekil 4.2. Dıştan rotorlu SMSM'nin kesit görünüşü..... 108
Şekil 4.3. Dıştan rotorlu SMSM'nin ağ yapısı..... 110
Şekil 4.4. Dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik akı yoğunluğu 111
Şekil 4.5. Dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik alan kuvveti 112
Şekil 4.6. Dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik vektör potansiyeli 113
Şekil 4.7. Dıştan rotorlu SMSM'nin elektrik akım yoğunlukları 113
Şekil 4.8. Dıştan rotorlu SMSM'nin giriş gerilimi grafiği..... 115
Şekil 4.9. Dıştan rotorlu SMSM'nin akım grafiği..... 115
Şekil 4.10. Dıştan rotorlu SMSM'nin indüklenen gerilim grafiği 116
Şekil 4.11. Dıştan rotorlu SMSM'nin çıkış torku grafiği..... 117
Şekil 4.12. Dıştan rotorlu SMSM'nin hız grafiği..... 117
Şekil 4.13. Dıştan rotorlu SMSM'nin verim grafiği 118

Şekil 4.14. Dıştan rotorlu SMSM'nin nihai katı modeli 119
Şekil 4.15. Dıştan rotorlu SMSM'nin kesit görünüşü..... 120
Şekil 4.16. Kasnak mili ağ (mesh) yapısı ve uygulanan kuvvet 121
Şekil 4.17. Eğilme etkisinde kasnak milinin von Mises gerilmesi analiz sonuçları 121
Şekil 4.18. Eğilme etkisindeki kasnak milinin yer değiştirme analiz sonuçları 122
Şekil 4.19. Kasnak mili ağ yapısı ve uygulanan burulma momenti 122
Şekil 4.20. Burulma etkisinde kasnak milinde oluşan von Mises analiz sonuçları.. 123
Şekil 4.21. Burulma etkisinde kasnak milinde oluşan yer değiştirme 123
Şekil 4.22. Dıştan rotorlu SMSM'nin ilk iki tasarım denemesi..... 124
Şekil 4.23. Rotor ağ yapısı ve uygulanan burulma momenti 125
Şekil 4.24. Burulma etkisindeki rotorda oluşan von Mises gerilmesi..... 125
Şekil 4.25. Burulma etkisindeki rotorda oluşan yer değiştirme analiz sonuçları..... 125
Şekil 4.26. Stator mili ağ yapısı ve uygulanan burulma momenti 126
Şekil 4.27. Burulma etkisindeki stator milinde oluşan von Mises gerilmesi 126
Şekil 4.28. Burulma etkisindeki stator milinde oluşan yer değiştirme 127
Şekil 4.29. Termal analizlerde kullanılan ağ yapısı 128
Şekil 4.30. Termal analiz sonuçları 129
Şekil 4.31. Dıştan rotorlu SMSM'nin montaj resimleri..... 131
Şekil 4.32. Dıştan rotorlu SMSM'nin ölçüleri..... 131
Şekil 4.33. Kasnak mili ve stator mili..... 132
Şekil 4.34. İndüklenen zıt EMK'nın SEY ve deneysel sonuç grafikleri..... 133
Şekil 4.35. Motorun yüklenmesi esnasında kaydedilen tork verisi örneği 134
Şekil 4.36. SEY analizlerindeki farklı yükleme değerleri..... 135
Şekil 4.37. SEY analizlerinde farklı yüklerdeki çekilen akım değerleri 135
Şekil 4.38. Dıştan rotorlu SMSM'nin test ve SEY sonuçlarına göre elde edilen tork-akım grafikleri..... 136
Şekil 4.39. Dıştan rotorlu SMSM'nin ve içten rotorlu karşılaştırma motorunun tork-akım grafikleri..... 137

ASANSÖR TAHRİK SİSTEMLERİ İÇİN DIŞTAN ROTORLU SÜREKLİ MIKNATISLI BİR SENKRON MOTOR TASARIMI

ÖZET

Bu tezde, asansör tahrik sistemleri için dıştan rotorlu sürekli mıknatıslı bir senkron motorunun (SMSM) tasarımı, modellenmesi ve prototip üretimi yapılmıştır. Asansör tahrik sistemlerinde genellikle içten rotorlu ve redüktörlü asenkron motorlar kullanılmaktadır. Son zamanlarda dişlisiz (gearless) SMSM'lerin yaygınlaşması ile tahrik sistemlerindeki verimler artmış ve hareket organlarındaki maliyetler ciddi oranda düşmüştür.

Tez kapsamında gerçekleştirilen dıştan rotorlu motor tasarımı sayesinde, içten rotorlu dişlisiz asansör tahrik motorlarına göre daha yüksek verim değerlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Karşılaştırma motoru olarak sektörde satışı gerçekleştirilen, ayrıntılı analiz ve test sonuçları literatürde yer alan, 4 kW gücünde içten rotorlu bir SMSM seçilmiştir. Tasarlanan ve üretimi yapılan motor verileri karşılaştırma motoru ile kıyaslanmış ve anma değerlerinde %12.17 verim artışı elde edilmiştir.

Dıştan rotorlu SMSM'nin rotorundaki dönme hareketi mile indirgenmiş ve piyasada seri üretimi yapılan tahrik kasnaklarına ve fren mekanizmalarına uygun yeni bir motor tasarımı elde edilmiştir. Dıştan rotorlu SMSM'nin tasarım aşamalarında, elektromanyetik analiz yazılımı ile yapay arı kolonisi (ABC) algoritması kullanılarak motor performans verileri iyileştirilmiştir. Bu bağlamda, ilk olarak motorun analitik tasarımı yapılmış, daha sonra ise sonlu elemanlar metodu ile elektromanyetik, yapısal ve termal analizleri gerçekleştirilmiştir.

Sunulan doktora tezindeki dıştan rotorlu SMSM'nin ticarileşmesi durumunda, ülkemizin asansör motorları alanındaki rekabet gücüne katkı sağlanması hedeflenmektedir. Aynı çerçeve boyutlarına sahip içten ve dıştan rotorlu asansör tahrik motorlarının karşılaştırıldığı bu tez çalışmasının, motor tasarımı ve asansör tahrik sistemleri konusunda çalışacak araştırmacılara fayda sağlaması beklenmektedir.

Anahtar kelimeler: Asansör tahrik motoru, Senkron motor, Dişlisiz motor, Dıştan rotorlu motor, Elektrik motor tasarımı.

DESIGN OF AN EXTERNAL ROTOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR FOR ELEVATOR TRACTION SYSTEMS

SUMMARY

The design, modelling and prototype production of an external rotor permanent magnet synchronous motor (PMSM) for elevator traction systems was carried out in this thesis study. Inner rotor and gear structures are generally used for elevator traction systems. Efficiency has increased with the use of gearless PMSMs and the cost of moving mechanisms has decreased considerably.

It is aimed with the external rotor motor design put forth within the scope of the thesis to obtain higher efficiency values than those of inner rotor gearless elevator traction motors. An inner rotor PMSM available in the market with 4 kW power has been selected for comparison the detailed analysis and test results of which can be found in literature. An increase in efficiency of 12.17% was obtained in the nominal values as a result of the comparison between the data for the manufactured motor and the motor used for comparison.

The rotational movement of the external rotor PMSM has been reduced to the shaft and a new motor design has been obtained that fits the traction pulleys and brake mechanisms in the market. The motor performance was improved during the design stages of the external rotor PMSM by using artificial bee colony (ABC) algorithm with electromagnetic analysis software. In this context, firstly the analytical design of the motor was made, and then electromagnetic, structural and thermal analyses were carried out via the finite element method.

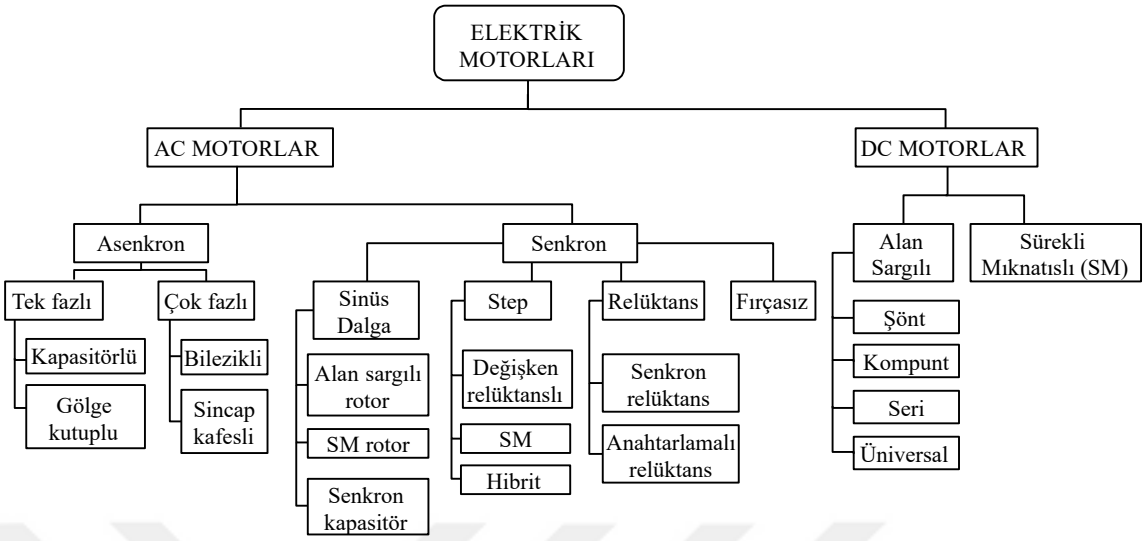
It is aimed to contribute to the competitiveness of our country in the field of elevator motors in the event that the external rotor PMSM presented within in the PhD thesis is commercialized. This study, which compares internal and external rotor elevator traction motors with the same frame dimensions, is expected to contribute to the studies of researchers who will work on motor design and elevator traction systems.

Keywords: Elevator traction motor, Synchronous motor, Gearless motor, External rotor motor, Electrical motor design.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin mekanik enerjiye çevrildiği sistemlere elektrik motoru, mekanik enerjinin ise elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistemlere generatör (dinamo) denilmektedir. Bu sistemlerin tümü ise elektrik makinaları olarak adlandırılmaktadır. Elektrik motorları günümüz dünyasında her alanda karşımıza çıkmaktadır. Elektronik elemanların ve kontrol birimlerinin hızla gelişmesi yeni tip motorların üretilmesini zorunlu kılmıştır. Sürekli (kalıcı-daimi) mıknatıs teknolojisindeki ilerlemeler motor tasarımı ve üretimine yeni ufuklar açmıştır. Sürekli mıknatıslı motorlar verimli, ucuz ve seri üretime uygun hale geldiklerinden motor teknolojisinde sıklıkla kullanılmaktadır (Yıldız, 2009).

Teknolojinin gelişimi ile elektrik motorlarındaki çeşitlilik de gün geçtikçe artmıştır. Elektrik motorlarında besleme gerilimine, rotor yapılarına veya stator yapılarına göre farklı sınıflandırmalar yapılabilmektedir (Aydın, 2012). Besleme gerilimine göre, alternatif akım (AC) veya doğru akım (DC) kaynağı ile beslenen motorlar olarak iki temel sınıf bulunmaktadır. DC motorlar alan sargılarının türüne göre sınıflandırılırken, AC motorlar asenkron ve senkron olarak ikiye ayrılmaktadır. Asenkron motorlarda senkron hızdan bir kayma bulunurken, senkron motorlarda motor milinin mekanik hızı ile elektromanyetik alan hızı aynıdır. Senkron motorlardaki manyetik alan kuvveti uyarma sargıları veya sürekli mıknatıslar ile üretilmektedir. Bu tezin de konusu olan sürekli mıknatıslı senkron motorlarda (SMSM) manyetik alan kuvveti rotor üzerine veya içine yerleştirilmiş mıknatıslar sayesinde ortaya çıkmaktadır. Literatürde SMSM terimi yerine Fırçasız AC Motor (BLAC), Sürekli Mıknatıslı AC Motor (PMAC) veya Sürekli Mıknatıslı Servo Motor terimleri de kullanılmaktadır (Murphy, 2012). Şekil 1.1'de elektrik motorlarının genel bir sınıflandırması gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması (Kuphaldt, 2007; Avnet Silica Company, 2009)

SMSM'lerin fırçalı DC motorlara ve asenkron motorlara göre birçok üstünlüğü bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- Daha iyi hız-tork karakteristiği
- Yüksek dinamik cevap
- Yüksek verim
- Uzun çalışma ömrü
- Sessiz çalışma özelliği
- Daha yüksek devir aralığı

Ek olarak motor boyutuna göre alınan tork değeri daha yüksektir ve bu sebeple alan ve ağırlığın önemli bir etken olduğu uygulamalarda SMSM'ler daha kullanışlı olmaktadır (Bulgan, 2014). Buna karşın SMSM'lerin iki temel dezavantajı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi motor kontrolünün sağlanması için gerekli olan kontrol kartı maliyeti, ikincisi ise rotorlarda yer alan mıknatısların maliyetidir (Yedamale, 2003). Bahsi geçen dezavantajlar, sistem kurulum maliyetleri açısından sorun teşkil etse de uzun vadede sağladığı avantajlar ile SMSM'ler diğer motorlara göre üstünlük göstermektedir.

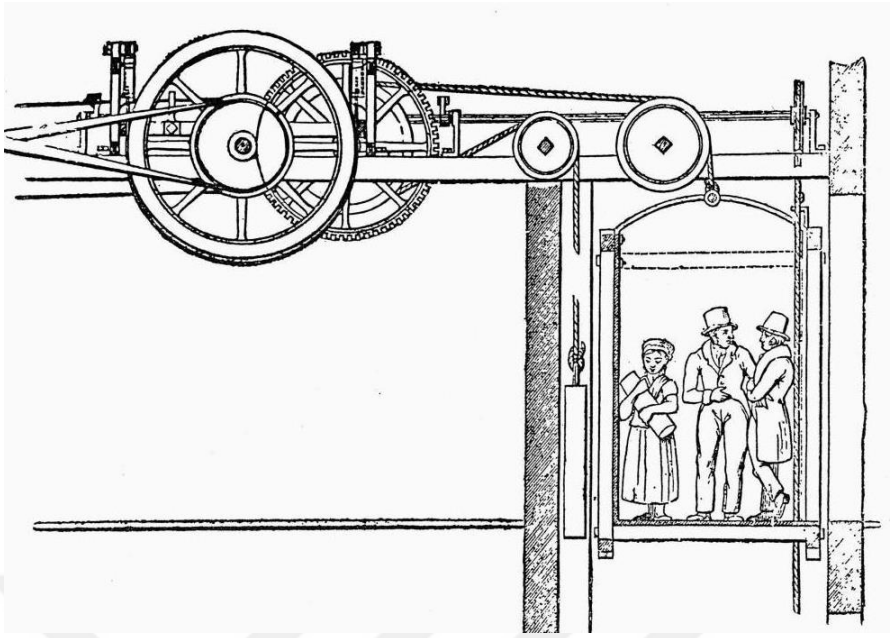
Bu tezde asansör tahrik motoru olarak kullanılacak dıştan rotorlu bir SMSM tasarımı üzerinde durulmuştur. Tez konusu motor için dıştan rotorlu SMSM veya prototip motor

terimleri kullanılırken, karşılaştırma motoru için içten rotorlu SMSM terimi de kullanılmıştır.

1.1. Asansör Sistemleri

Günümüzde dikey mimarinin ve kargo taşımacılığının bir vazgeçilmezi olarak karşımıza çıkan asansör sistemlerinin tarihi milattan önceki dönemlere kadar uzanmaktadır. Romalı mimar Vitruvius'un eserlerinde belirtildiğine göre tarihteki bilinen ilk asansör M.Ö. 236 yılında Arşimet tarafından yapılmıştır (“Elevator”, 2017). Sonraki dönemlerde, bazı kaynaklara göre asansörlerin hayvan veya insan gücüyle kenevir halatlar kullanılarak çekilen kabinlerden oluştuğu belirtilmiştir. 11. yy.’da Endülüs'te yaşayan matematikçi ve gökbilimci olan Ibn Khalaf Al-Muradi’nin Fikirlerin Neticesindeki Sırlar Kitabı’nda (Kitab al-asrar fi nata’ij al-afkar), kale duvarlarını yıkmak için bir koçbaşının asansöre benzer bir kaldırma düzeneği ile nasıl yükseltildiği anlatılmaktadır (Lisa ve diğ., 2008). 17. Yüzyıla gelindiğinde asansör prototiplerinin İngiltere ve Fransa’daki saraylarda kurulduğu tespit edilmiştir. Yolcu taşınmasında kullanılan ilk asansör, Fransa’da bulunan Versay Sarayında 1743 yılında kurulan ve insan gücüyle manuel olarak hareket ettirilen “uçan sandelye” olarak da anılan asansördür (Ertürk, 2008).

19. yy.’da daha çok yük taşımacılığı için kullanılan asansör sistemlerinde buhar gücünden yararlanılmaya başlanmış ve 1823 yılında Londra’da yaşayan Burton ve Hormer adlı iki mimar “yükselen oda” adını verdikleri turistik bir merkez kurmuştur. Bu asansör sistemi ile gelen müşterileri Londra’nın merkezinde belirli bir yüksekliğe çıkararak şehrin izlenmesine olanak sağlamışlardır. 1835 yılında İngiltere'deki Frost ve Stutt firmaları ekstra güç için bir karşı ağırlığın kullanıldığı, buhar makinesi miline bağlı bir kayışla tahrik edilen "Teagle" isimli yenilikçi bir asansör geliştirmiştir (Şekil 1.2). Buhar makinası ile çalışan asansörler şehirlerde buhar borusu şebekelerinin yapılmasına öncü olmuş ve böylelikle buharlı asansörler yaygınlaşmıştır. Basınçlı buhar şebekeleri hidrolik asansörler için de temel oluşturmuştur. 1846'da Sir William Armstrong tarafından Tyneside limanında kargo yüklemesinde kullanılmak üzere hidrolik bir vinç icat edilmiştir. Pascal yasasının kullanıldığı bu sistemler ile buharlı sistemlere göre çok daha büyük güçler elde edilmiştir (“Elevator”, 2017).



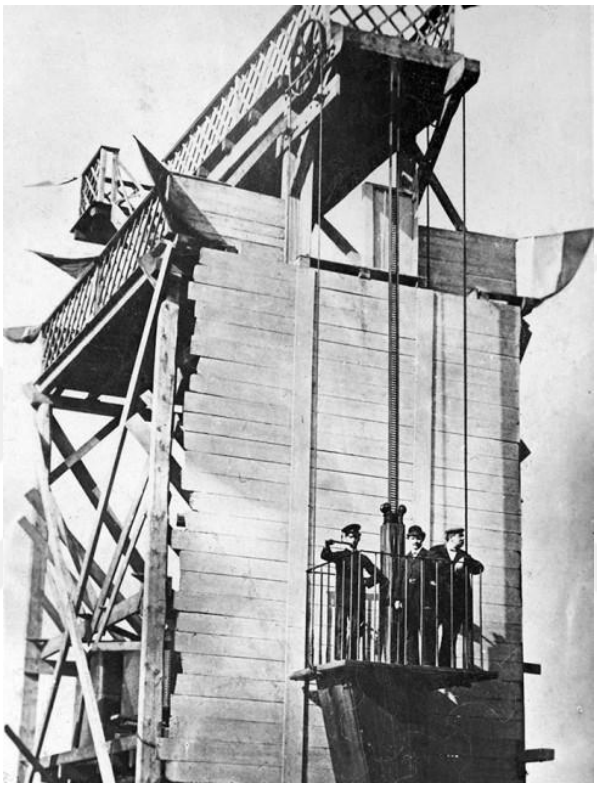
Şekil 1.2. Teagle isimli asansör (“The Teagle Elevator”, 2005)

Elisha Graves Otis, 1854 yılında düşmeye karşı emniyet düzeneği olan ilk güvenlik tertibatlı asansörü New York’ta kurmuştur. Otis’in seyirciler önünde bizzat halatı keserek asansörün güvenliğini ispatladığı gösteri Şekil 1.3’te gözükmektedir. Bu gösteri insanların asansörlere olan güvenini artırmıştır. Modern anlamdaki ilk yolcu asansörü yine Otis tarafından 1857 yılında New York’ta bir iş merkezine kurulmuştur.



Şekil 1.3. Elisha Graves Otis’in asansör üzerindeki güvenlik deneyi (“Elevator”, 2017)

1867 yılında ilk “güvenli hidrolik asansör” Leon Edoux tarafından Paris’te sergilenmiş olup “ascenseur” olarak adlandırılmıştır. İlk elektrikli asansör ise 1880 yılında Werner Von Siemens tarafından Almanya’da icat edilmiştir (“Electric Elevator”, 2019). Kabin altına yerliştirilmiş bir elektrik motoru ve dişli sisteminin tahrik ettiği asansörün kabin hızı saatte 1,8 km’yi bulmuştur.

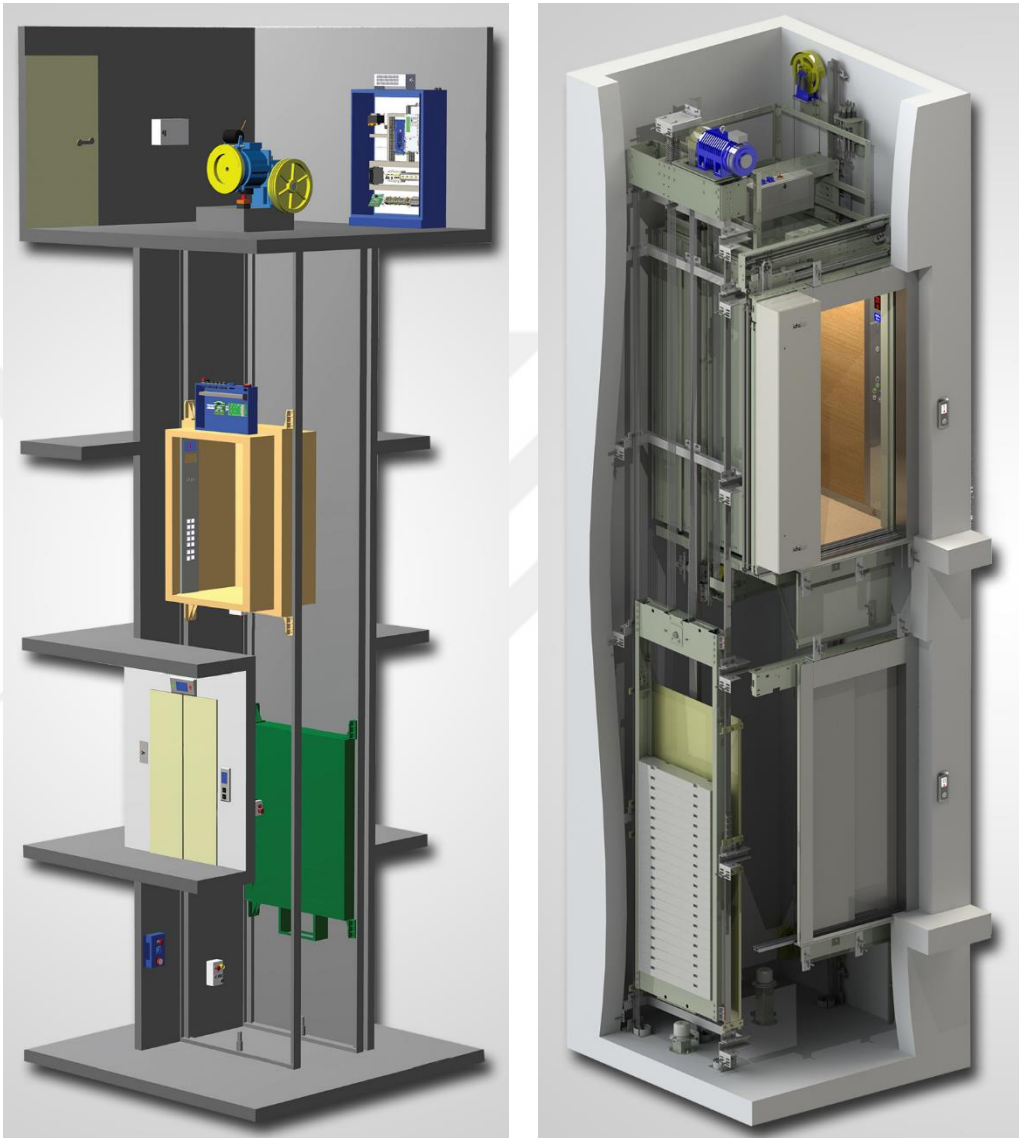


Şekil 1.4. İlk elektrikli asansör sistemi (“Electric Elevator”, 2019)

1900 yılında Fransız De Bueren, redüktörsüz (dişlisiz-gearless) asansör makinasının, 1904 yılında ise Otis firması redüktörsüz ve tahrik kasnaklı asansörün kurulumunu yapmıştır. Tahrik kasnaklarındaki oluklar ile halatlar arasındaki basınç hesaplamları Hymans, Hellborn ve Prof. Donadt tarafından yapılan araştırmalar ile günümüze kadar ulaşmıştır (Feyrer, 2007; İmrak ve Gerdemeli, 2000). Elektrik ve elektronik alanlarındaki gelişmeler ile asansörler sarsıntısız, kolay kullanılabilir, son derece güvenli ve hızlı sistemler haline gelmiştir.

Günümüzde başlıca 4 farklı asansör tipi bulunmaktadır. Bunlar elektrikli asansörler, hidrolik asansörler, pnömatik asansörler ve maglev asansörlerdir. En sık kullanılan asansör sistemleri elektrikle tahrik edilen dişlili (geared) veya dişlisiz (gearless) asansör

sistemleridir. Bu sistemler makine daireli veya makine dairesiz asansörler olarak da anılmaktadır. Şekil 1.5'te makine daireli ve makine dairesiz asansör sistemleri gösterilmiştir.

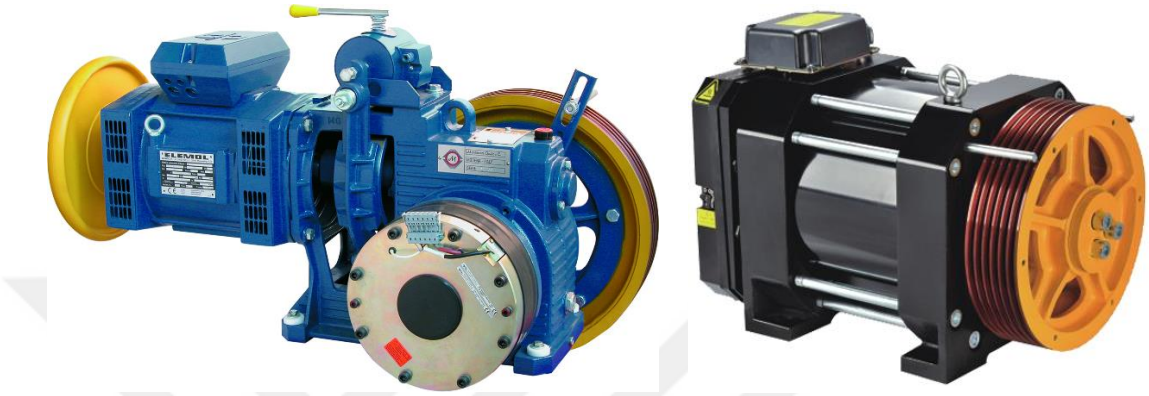


a) b)

Şekil 1.5. a) Makine daireli ve b) Makine dairesiz asansör sistemleri (Aksöz Asansör, 2019)

Dişlili asansörlerde asenkron motorlar kullanılırken dişlisiz asansör sistemlerinde SMSM'ler kullanılmaktadır. Dişlisiz asansör sistemlerindeki tahrik motorları düşük hızlı ve yüksek torkludur. Bu motorlarda tahrik kasnağı motor milinin ucuna direkt olarak bağlanmaktadır. Motor mili ile kasnak arasında herhangi bir redüktör mekanizması yoktur. Dişlisiz asansör sistemlerinin hızları günümüzde 20 m/s'ye kadar

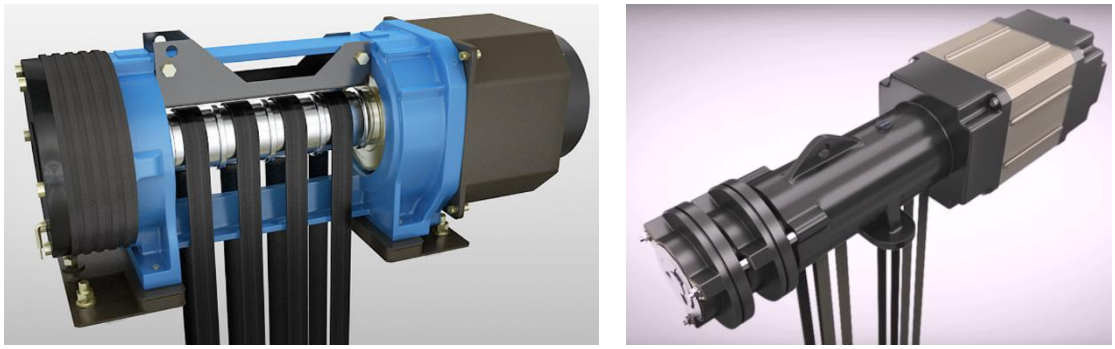
ulaşabilmektedir. Dişlili asansör motorlarının başlangıç maliyetleri dişlisiz asansör motorlarına göre daha düşük, fakat bakım maliyetleri daha yüksektir. Enerji verimliliği açısından ise dişlisiz motorların üstünlüğü bulunmaktadır. Şekil 1.6'da dişlili ve dişlisiz asansör motoru örnekleri gösterilmiştir.



a) b)

Şekil 1.6. Dişlili ve dişlisiz asansör motoru örnekleri: a) Montanari Giulio (2014), b) Sag Motor (2016)

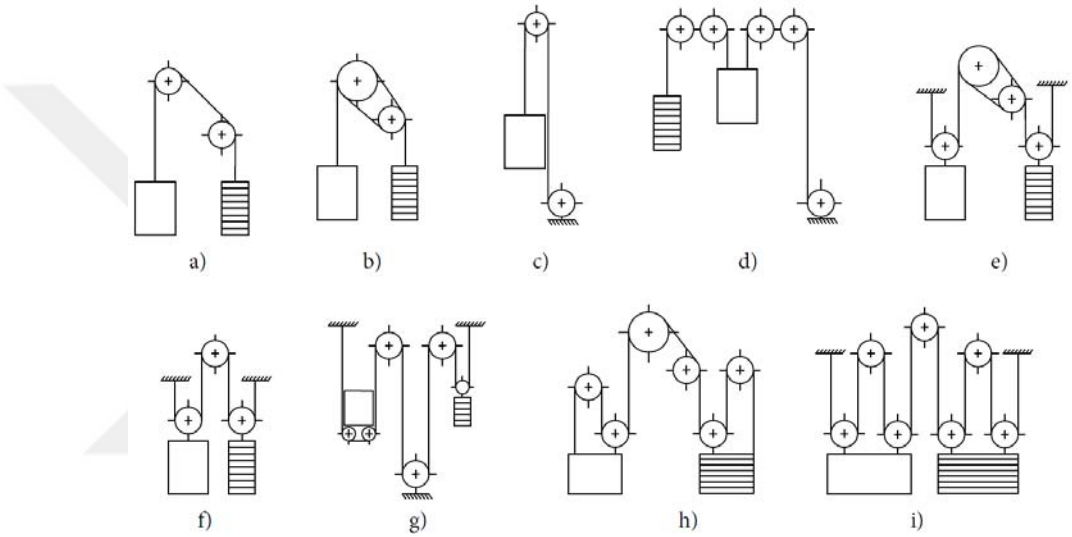
Son zamanlarda dişlisiz motorlarda halat yerine kayışlı sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Otis-Gen2, Schindler-Suspension Traction Media, Kone-UltraRope ve ülkemizde de Akar-Beltsys sistemleri kayışlı asansörlere örnek olarak verilebilir ("Traction Elevators", 2018; Akar Beltsys, 2015). Kayışlı asansörler ile motor tahrik kasnaklarının çapları azalmış, daha yumuşak ve sessiz seyahatlar elde edilmiş ve enerji verimliliği daha da artmıştır. Şekil 1.7'de kayış tahrikli asansör sistemlerinin bazı örnekleri gözükmektedir.



a) b)

Şekil 1.7. Kayış tahrikli asansör sistemleri: a) Otis-Gen2 (2019), b) Jardine Schindler (2015)

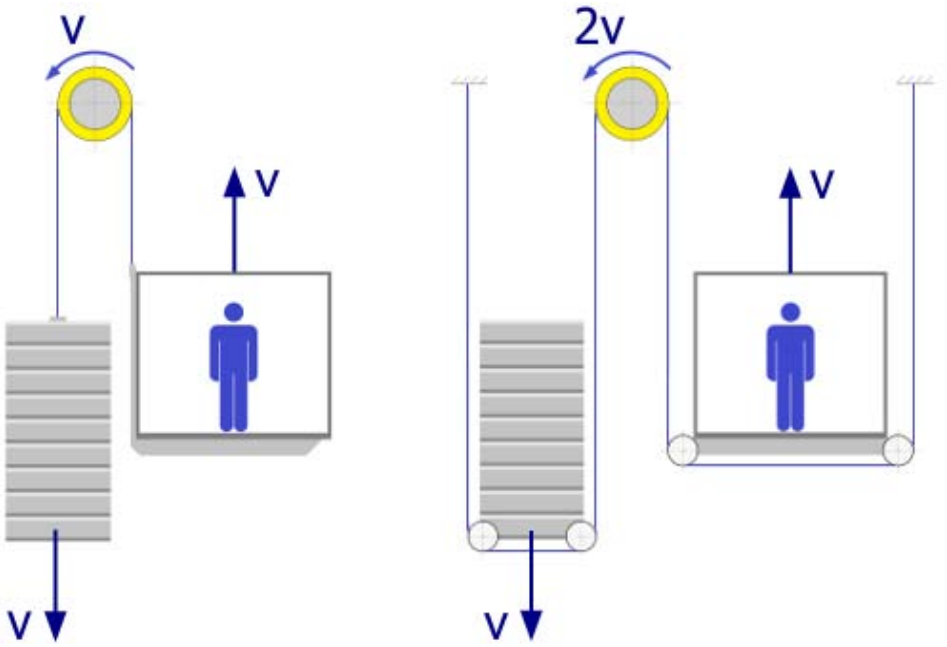
Asansör sistemlerinde taşınacak yüklere ve seçilecek motora göre farklı askı tipleri uygulanmaktadır. Şekil 1.8'de kabin ve karşı ağırlığın birbirine nasıl bağlanabileceğini gösteren farklı askı tipleri, Tablo 1.1'de bu askı tiplerinin özellikleri, Şekil 1.9'da ise en çok kullanılan 1:1 ve 2:1 askı tiplerinin bağlantı şekilleri ve buna bağlı olarak kabin, kasnak ve karşı ağırlık hızları gözükmektedir. İstenilen kabin hızına bağlı olarak farklı askı tiplerinde dişlisiz motorun hızı da değişmektedir. Dolayısıyla askı tipi seçimi motor tasarımı açısından önemli bir parametredir. Dişlisiz asansör sistemlerinde en sık kullanılan askı tipi 2:1'dir.



Şekil 1.8. Asansörlerdeki askı tipleri (Jeff Holmes, 2018)

Tablo 1.1. Şekil 1.8'deki askı tiplerinin özellikleri (Jeff Holmes, 2018)

Şekil	Askı Tipi	Askı metodu	Kullanım alanı
a	1:1	Yarım sargı (Tek sargı)	Orta boyutlu ve düşük hızlı asansörlerde
b	1:1	Tam Sargı (Çift sargı)	Yüksek hızlı asansörlerde
c	1:1	Tambur sargı	Ev tipi asansörlerde
d	1:1	Tambur Sargı	Küçük boyutlu ve düşük hızlı asansörlerde
e	2:1	Tam sargı	Yüksek hızlı asansörlerde
f	2:1	Yarım sargı	Nakliye asansörlerinde
g	2:1	Yarım sargı	Makine dairesiz asansörlerde
h	3:1	Yarım sargı	Büyük boyutlu nakliye asansörlerinde
i	4:1	Yarım sargı	Büyük boyutlu nakliye asansörlerinde



a) b)

Şekil 1.9. En sık kullanılan a) 1:1 ve b) 2:1 askı tipleri (Jeff Holmes, 2018)

Dişlisiz asansör sistemlerinde karşı ağırlık, kabin ağırlığı ile beyan (anma) yükünün yarısını dengeleyecek şekilde seçilmelidir. Karşı ağırlık sayesinde kabinin tamamen dolu olduğu durumlarda bile motora binen yük ve dolayısıyla motorun üretmesi gereken tork miktarı azalmaktadır. Böylelikle motorun harcadığı enerji miktarı da düşmektedir.

Dişlisiz motorlarda asenkron motorlardaki dişli mekanizmasının ortadan kalkması ile aynı tahrik gücü gereksinimi için %40-%50 oranlarında daha düşük güçlü motor seçilebilmektedir. Böylelikle daha düşük güçlü dişlisiz motorlar ile asenkron motorlarla aynı hız ve taşıma kapasitesine sahip sistemler kurulabilmektedir. Dişlisiz asansör tahrik motorlarının, geleneksel asenkron motorlara göre en önemli üstünlüğü de bu enerji tasarrufudur (Duru ve diğ., 2005).

Dişlisiz asansör motorlarında yıllar içinde birçok farklı tasarım piyasaya sürülmüştür. Bu tasarımların çoğu içten rotorlu ve radyal akılı motor yapısını benimserken, bazı tasarımlar dıştan rotorlu veya eksenel akılı olarak da üretilmiştir. Tez kapsamında çalışılan radyal akılı motorların sınıflandırması, Bölüm 3'te ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

1.2. Tezin Kapsamı ve Amacı

Elektrikli motor üretimi, enerji bağımlılığımızın azalması ve yerli üretim imkanlarının artırılması açısından ülkemiz için öncelikli bir alan durumundadır. Günümüze kadar ülkemizde 570.000'in üzerinde asansör tesis edilmiş olup bunların büyük bir bölümü halen çalışmaktadır (Asansör Sektörü Raporu, 2018). Yerli üreticiler gün geçtikçe üretim miktarlarını artırsa da, tahrik motorlarının büyük bir bölümü yurtdışından ithal edilmektedir. Sektörde hala verimliliği düşük olan asenkron motorların sıklıkla kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, sektörün yerli imkanlarla üretilecek yüksek enerji verimliliği olan dişlisiz motorlara fazlasıyla ihtiyacı vardır. Ülkemizde Akar Asansör (2014), Akış Asansör (2017), Jupa Asansör (2019), EMF Motor (2017), Arkel (2018) gibi bazı yerli firmalar dişlisiz motor üretimi gerçekleştirmektedir. Fakat dıştan rotorlu motorun seri üretimini yapan bir firma tespit edilememiştir. Tez kapsamında üretilen dıştan rotorlu SMSM ile yerli imkanlarla, yüksek enerji verimliliğine sahip olan özgün bir tasarım elde edilmiştir. Üretilen motorun asansör sistemlerinde kullanılması ile dışa bağımlılığın azaltılması hedeflenmektedir. Dıştan rotorlu SMSM'nin tasarımı esnasında yapılan optimizasyon, parametrik çözüm çalışmaları, sonlu elemanlar analizleri (SEA), yapısal/termal analizler, mekanik iyileştirmeler ve prototip üretimi ile motor tasarımı ve uygulaması konularında güncel literatüre katkıda bulunulmuştur.

Elektrikli motor üretimi, Teknoyatırım Destek Programı'na ve Stratejik Ürün Destek Programı'na göre orta-yüksek teknolojili sektörler sınıfı içinde bulunmaktadır (Teknoyatırım Alanları, 2018). Ayrıca 2017 yılındaki "Öncelikli Alanlar Araştırma Teknoloji Geliştirme Ve Yenilik Projeleri Destekleme Programı" kapsamındaki Servo Motor Teknolojileri çağrısına ve 2011 yılındaki "Ulusal Enerji Ar-Ge ve Yenilik Stratejisi" raporuna göre elektrikli motor üretimi teknolojik yatırım yapılabilir alanlar arasında yer almıştır. Bu durum, elektrik motoru tasarımı ve üretiminin ülkemiz için öncelikli bir alan olduğunu göstermektedir.

Elektrik motorlarının tasarım çalışmaları yıllardır üreticiler ve araştırmacılar tarafından sıklıkla üzerinde durulan bir konu olmuştur. Yapılan çalışmalarda; farklı motor topolojileri araştırıldığı gibi, bilinen bir motor yapısı için minimum hacimde en iyi tork ve verim değerlerini elde etmek en önemli araştırma konusu olmuştur. Yapılan tez

çalışmasının literatüre ve endüstriye anlamlı bir katkısı olması adına, piyasada satışı gerçekleştirilen 4 kW gücündeki içten rotorlu AKAR SMT 140 AC-15 (Akar-SMT Serisi, 2015) tipi motor karşılaştırma motoru olarak seçilmiştir. Bu motorun tüm analiz ve deneysel test sonuçları Bakhtiarzadeh (2017) ve Ergene ve diğ. (2018)'in yaptığı çalışmalarda mevcuttur. Karşılaştırma motorunun tüm sonuçlarının literatürde yer alması, farklı bir motorun incelenmesi ve test edilmesi ile geçirilecek zaman kayıplarını ortadan kaldırmıştır. Tez konusu olan dıştan rotorlu SMSM, karşılaştırma motoru ile aynı fiziksel sınırlara (motor uzunluğu ve motor çapı) sahiptir. Böylelikle aynı boyutlarda, aynı çıkış gücüne ve çıkış torkuna sahip içten ve dıştan rotorlu motorların performans verileri deneysel sonuçlara göre karşılaştırılmıştır. Akar SMT 140 AC-15 motoru Şekil 1.10'da, etiket değerleri ise Tablo 1.2'de paylaşılmıştır. Tez sonucunda beklenen yaygın etkiler ise Tablo 1.3'te gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Karşılaştırma motoru olarak kullanılan içten rotorlu SMSM (Bakhtiarzadeh 2017)

Tablo 1.2. Karşılaştırma motorunun etiket değerleri (Ergene ve diğ., 2018)

AKAR - Dişlisiz Asansör Tahrik Motoru			
Tip	SMT140AC-15	Frekans	21.2 Hz
Seri No	15-0729	Ağırlık	145 Kg
Yük	630 Kg	Kutup Sayısı	16
Hız	1 m/s	Gerilim	360 V
Süspansiyon	2:1	Güç	4 kW
cos φ	1	Akım	13 A
İzolasyon sınıfı	IP 54	Devir sayısı	159.2 rpm
Üretim Yılı	2015	Moment	240 Nm
Enkoder tipi	ECN1313	Bağlantı şekli	Yıldız

Literatürde, dıştan rotorlu SMSM'nin elektriksel tasarım çalışmalarının genellikle tek veya kısıtlı sayıdaki parametrenin optimizasyonunu içeren çalışmalar olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, motorun elektriksel tasarımı esnasında yapılan optimizasyon çalışmaları kapsamında oluk-kutup oranı, sargı teli kalınlığı, stator oluk ölçüleri, kutup aralığı gibi performansa etki eden parametreler incelenmiştir. Performansı etkileyecek stator diş ucu kalınlığı (h_{s0}), oluk diş ucu yarıçapı (h_{s1}), oluk yüksekliği (h_{s2}), stator boyunduruk kalınlığı (h_{sb}), stator diş genişliği (w_{sd}) ve statorun bir fazındaki tur sayısı (N_t) yapay arı kolonisi (ABC) algoritması ve elektromanyetik analiz yazılımı kullanılarak optimize edilmiştir. Yapılan literatür araştırmalarına göre, dıştan rotorlu SMSM'lerin optimizasyon çalışmalarında ABC algoritması ilk defa test edilmiştir. Dıştan rotorlu motorda; güç, motorun rotorundan kasnağa doğrudan iletilmiş ve böylelikle redüktörlü aktarma organlarındaki mekanik kayıpların önüne geçilmiştir. Dıştan rotorlu SMSM'nin rotorundaki dönme hareketi flanşlı bir mil ile kasnağa aktarılmıştır. Gerçekleştirilen tasarım ile hem halatlı hem de kayışlı motor olarak kullanılabilecek özgün bir mekanik tasarım elde edilmiştir. Literatür araştırmalarında buna benzer bir tasarıma rastlanamamış ve asansör sistemlerindeki dıştan rotorlu tahrik motorlarında bu şekilde bir hareket aktarma sistemi ilk defa bu tez kapsamında uygulanmıştır.

Tezin hedefleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Dıştan rotorlu SMSM'nin analitik modelini elde etmek,
- Yapay arı kolonisi (ABC) algoritması ile dıştan rotorlu SMSM'nin performansını iyileştirmek,
- Yeni bir asansör motoru tasarımı ortaya koymak,
- Asansör sistemleri için 630 kg taşıma kapasiteli, yüksek verimli dıştan rotorlu bir SMSM üretmek,
- Yapılacak tüm benzetim çalışmalarını deneysel olarak doğrulamak,
- Üretilen motorun performans değerlerini piyasadaki muadil bir içten rotorlu SMSM ile karşılaştırmak,
- Dıştan rotorlu asansör motorları konusunda ayrıntılı bir çalışma yaparak literatüre katkı sağlamak,
- Bu alanda çalışan yerli firmalar ile anlaşarak katma değeri yüksek elektrik motorlarını üretmek ve ülkemizin küresel çaptaki rekabet gücünü artırmak,

- Elde edilen sonuçları indeksli dergilerde ve konferanslarda yayınlamak,
- En az bir adet patent başvurusu yapmak.

Tablo 1.3. Tezden beklenen yaygın etki tablosu

Yaygın Etki Türleri	Öngörülen/Beklenen Çıktı, Sonuç ve Etkiler
Bilimsel/Akademik	Bu tez kapsamında elde edilen sonuçların, indeksli dergilerde yayınlanması ve konferanslarda sunulması, ayrıca en az bir adet patent başvurusunun yapılması hedeflenmektedir.
Ekonomik/Ticari/Sosyal	Tezin çıktılarıyla alakalı asansör sistemleri konusunda üretim yapan yerli firmalar ile görüşmeler yapılacaktır. Elde edilen çıktıların anlaşmaya varılan firmalar ile paylaşılması ve katma değeri yüksek elektrik motorlarının imalatının yapılması ile ülkemizin küresel çaptaki rekabet gücünün artırılması ve cari açığın azaltılması amaçlanmaktadır.
Araştırmacı Yetiştirilmesi ve Yeni Proje(ler) Oluşturma	Kurulan test düzeneği ve üretilen prototip motor ile bundan sonraki motor tasarımı ve üretimi çalışmalarına alt yapı oluşturulması hedeflenmektedir.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tez konusu olan dıştan rotorlu SMSM tasarımı ve üretimi fikri; asansör sistemleri konusunda yapılan ayrıntılı literatür araştırmaları ve sektör görüşmeleri sonucu ortaya çıkmıştır. Asansör tahrik sistemlerinde kullanılan motorların verimlilikleri araştırılmış ve düşük verimliliği olan asenkron motorların kullanımının yaygın olduğu tespit edilmiştir. Ülkemizdeki elektriğin %30 kadarlık bir kısmı binalarda kullanılmaktadır. Binalarda tüketilen enerjinin ise %2-%10 kadarı asansör sistemleri tarafından kullanılmaktadır (Küçükçalık, 2016). Dolayısıyla ülke çapında kullanılan elektriğin %0.6-%3'ü asansör sistemleri tarafından kullanılmaktadır. Asansör sistemlerinde enerji verimliliğine etki eden en önemli parametrelerden biri tahrik motorudur. Redüktörlü asenkron motorların yerine aynı kapasitede sürekli mıknatıslı redüktörsüz senkron bir motor kullanılması durumunda, %30-%50 kadar enerji tasarrufu yapılabilmektedir (Duru ve diğ., 2005; Küçükçalık, 2016). Sonuç olarak; ülke çapında kullanılan elektriğin yaklaşık %0.5-1'lik kısmı redüktürlü asenkron motorları sebebiyle israf edilmektedir. Kurulu sistemlerdeki asenkron motorların tümünün değiştirilmesi mümkün olmadığından, motor arızası sebebiyle değiştirilmesi gereken veya yeni kurulacak asansör sistemlerindeki tahrik motorlarının SMSM tipi olması ülkemizin bundan sonraki yıllarda yapacağı enerji tasarrufu açısından çok elzemdir.

27 adet Avrupa Birliği ülkesinde 2010 yılı itibariyle 4.8 milyon asansör kullanılmaktadır (Rüger ve diğ., 2014). Almanya özelinde ise bu sayı 650 bindir. Almanya'daki toplam enerji kullanımının yaklaşık %4-%8'i binalarda ve % 0.5-%0.8'i ise asansörler tarafından kullanılmaktadır (Hirzel ve diğ., 2010). Bu oranların ülkemizdeki oranlara göre düşük olduğu gözükmektedir. Bu da Almanya'daki asansör sistemlerinde enerji verimliliği yüksek motorların kullanıldığını, ülkemizde ise enerji verimliliği düşük motorların kullanımının yaygın olduğunu göstermektedir.

Henüz yaygın olmasa da SMSM tipi motorlar asansör tahrik sistemlerinde kullanılmaya başlanmış ve bu motorların çoğu içten rotorlu motor yapısına sahiptir. Bu motorlarda asansör halatlarının geçirildiği kasnağın motor miline kamalı olarak direkt bağlandığı gözlenmiştir. Bu tez çalışmasında; içten rotorlu motor yapısının yerine dıştan rotorlu yapıya sahip bir motor verimlilik kıstası dikkate alınarak tasarlanmış ve prototip üretimi yapılmıştır. Asansör sistemlerinin ilk kalkışlarındaki hızlanma ivmesinin yüksek olması istendiğinden kaldırma motorlarının da yüksek torklu olması istenmektedir. Gerçekleştirilen dıştan rotorlu motor tasarımı sayesinde yüksek verimli ve yüksek torklu bir asansör tahrik motoru elde edilmiştir.

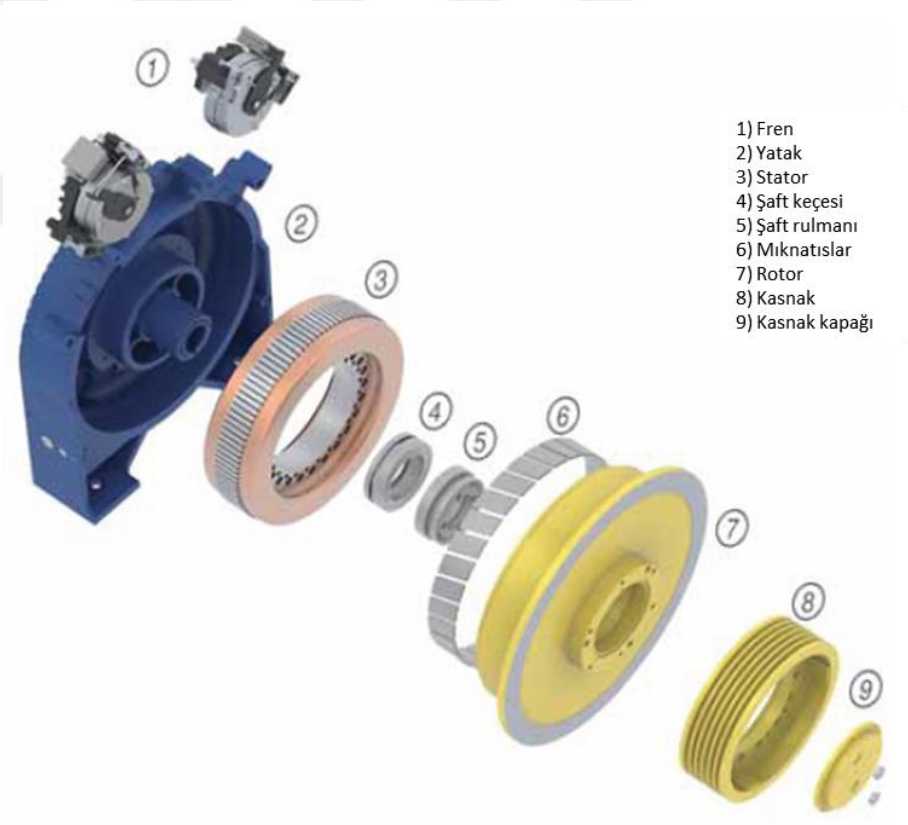
Literatürdeki asansör sistemleri için tasarlanmış dıştan rotorlu SMSM ile ilgili yayınlar, patentler ve ürünler araştırılmıştır. Dıştan rotorlu SMSM tasarımı ile ilgili yayın çalışmaları bulunsa da asansör sistemlerine özel olarak yapılmış sadece bir yayına rastlanmıştır (Rüger ve diğ., 2014). Diğer yayınların ise dıştan rotorlu SMSM'nin çıkış performansını artırmaya yönelik genellikle kısıtlı sayıdaki parametre optimizasyonunu amaç edinen çalışmalar olduğu gözlenmiştir.

Bölüm 2.1 ve 2.2'de dıştan rotorlu SMSM ile ilgili ürünler, patentler, bunların birbirinden farkları karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve ardından dıştan rotorlu asansör tahrik motorları için bir sınıflandırma yapılmıştır. Bölüm 2.3'te ise SM motorlar hakkında yapılan tezler ve yayınlar ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.1. Sektörde Yer Alan Dıştan Rotorlu SMSM Ürünleri

Asansör motorları alanında çalışan birçok firma detaylı bir şekilde araştırılmış ve dıştan rotorlu SMSM konusunda ürünleri bulunan firmalar belirlenmiştir. Asansör kaldırma mekanizmalarında dıştan rotorlu SMSM ürünü bulunan başlıca firmalar Ziehl-Abegg (2017), Swiss Traction (2016), Leroy Somer (2017), Ningbo Xinda Elevator (2017) ve Otis (2016) olarak tespit edilmiştir.

Ziehl Abegg firmasının ZAsyn modelinde; statoru motor gövdesine sabitlenmiş, rotoru ise döner yapıda olan ve 400 mm ile 680 mm arasında boyutlara sahip kasnakların rotora sabitlendiği, 2500 kg'a kadar taşıma kapasitesi olan dıştan rotorlu bir SMSM tasarımı gözlenmiştir. Bu motorun tasarım yapısı Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de paylaşılmıştır. Motor mıknatıslarının kaykılı olduğu gözükmektedir. Motorun gövdesinin statora yatak yapılması ve diğer tarafta rotorun bir kapak olarak kullanılması motorun karakteristik bir özelliğidir. Rotora bağlanan kasnak sayesinde dönme hareketi rotor ile birlikte kasnağa iletilmektedir. Yük tipine göre iki veya üç disk fren rotor üzerinden durdurma işlemini gerçekleştirmektedir. Motorun kasnak çapı 400 mm'den başlamaktadır ve halat kalınlıkları 8 ile 16 mm arasındadır. Kasnak çaplarının yüksek olması ve 3m/s'ye kadar çıkan asansör kabini seyahat hızları motorun yüksek binalar için tasarlandığını göstermektedir.

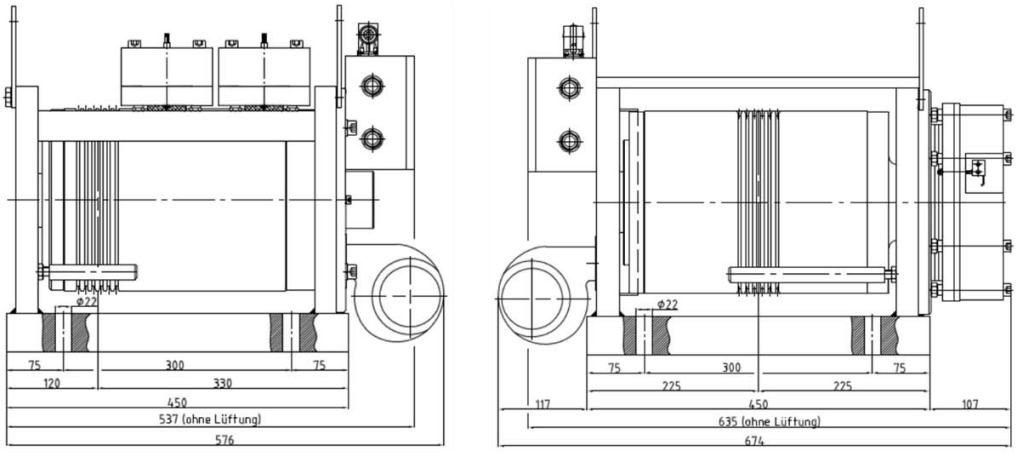


Şekil 2.1. Ziehl Abegg-ZAsyn asansör motoru parçaları (Ziehl-Abegg, 2017)



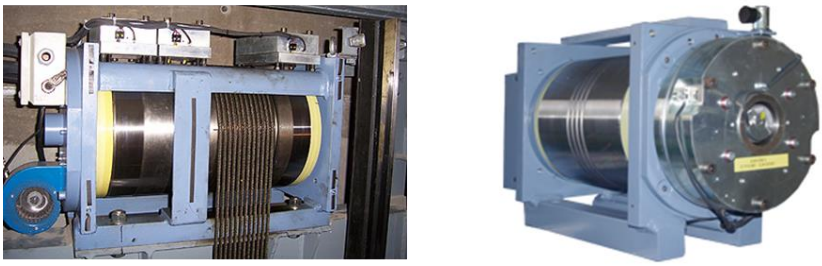
Şekil 2.2. Ziehl Abegg-ZAsyn dıştan rotorlu asansör motoru (Ziehl-Abegg, 2017)

Asansör tahrikinde kullanılan dıştan rotorlu SMSM üreticisi olan bir diğer firma Swiss Traction, tamamen dişlisiz asansör motorları üretimi üzerine yoğunlaşmıştır. Firma 2017'in sonunda PARTZSCH grup bünyesine geçmiştir. 5 tona kadar taşıma kapasitesine sahip dıştan rotorlu motorları ile çeşitli patentleri bulunan firmanın motor yapısı incelendiğinde, harici bir kasnağın bulunmadığı ve halatların rotor üzerinde açılan kanallara geçirildiği gözlenmiştir. Bu tasarım şekli Swiss Traction firmasının dıştan rotorlu motorlarının en belirgin karakteristik özelliğidir. 180 mm ile 645 mm arasında değişen kasnak boyutları yani rotor çapları mevcuttur. Motorun fren sistemi blok şeklinde veya disk fren şeklinde olup motorun rotoruna radyal olarak veya eksenel olarak baskı yapmaktadır. Şekil 2.3'te Swiss Traction firmasına ait dıştan rotorlu SMSM'nin teknik resimleri, Şekil 2.4'te ise motorun resimleri gösterilmiştir.



a) b)

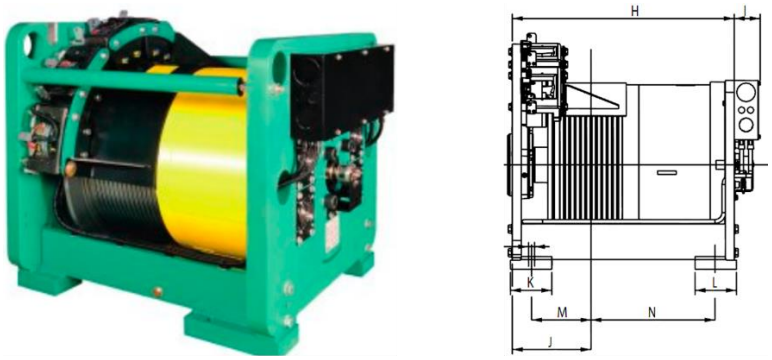
Şekil 2.3. Swiss Traction-Z44 blok frenli (a) ve disk frenli (b) asansör motorlarının teknik resimleri (Swiss Traction, 2016)



a) b)

Şekil 2.4. Swiss Traction blok frenli (a) ve disk frenli (b) asansör motorları (Swiss Traction, 2016)

Dıştan rotorlu ve harici kasnağı bulunmayan bir diğer SMSM firması Leroy Somer'dir. Swiss Traction firmasının motor yapısına benzer bir tasarım Leroy Somer Z range motor serisinde de kullanılmıştır. Asansör yük halatları motorun gövdesinde açılmış kanallara geçirilmiş ve motorun frenlemesi rotora sürten eksenel disk fren sistemi ile gerçekleştirilmektedir. Swiss Traction motorlarında bulunan blok fren sistemi Leroy Somer Z range motorlarında bulunmamaktadır. Sadece 530 mm kasnak çapına (yani rotor çapına) sahip olan Leroy Somer Z range motorları, 5 ton taşıma kapasitesi ve 5 m/s asansör kabini seyahat hızlarına ulaşabilmektedir. Yüksek hız ve taşıma kapasiteleri sebebiyle yüksek katlı binalara ve hastanelere yönelik bir asansör tipidir. Şekil 2.5'te asansör tahrikinde kullanılan Leroy Somer Z range serisi dıştan rotorlu SMSM gösterilmiştir.



a) b)

Şekil 2.5. (a) Leroy Somer Z Range dıştan rotorlu SMSM ve (b) teknik resmi (Leroy Somer, 2017)

Dıştan rotorlu SMSM ürün çeşitliliği bir hayli fazla olan ve bu alanda bazı patentleri bulunan Ningbo Xinda Elevator firmasının Mini 6 modelindeki dıştan rotorlu SMSM'si, Ziehl Abegg firmasının Z-Asyn modeli ile benzer tasarıma sahiptir fakat frenleme sistemi disk fren yerine blok frenleme şeklindedir. Mini 6 modeli Şekil 2.6.(a)'da gösterilmiştir.

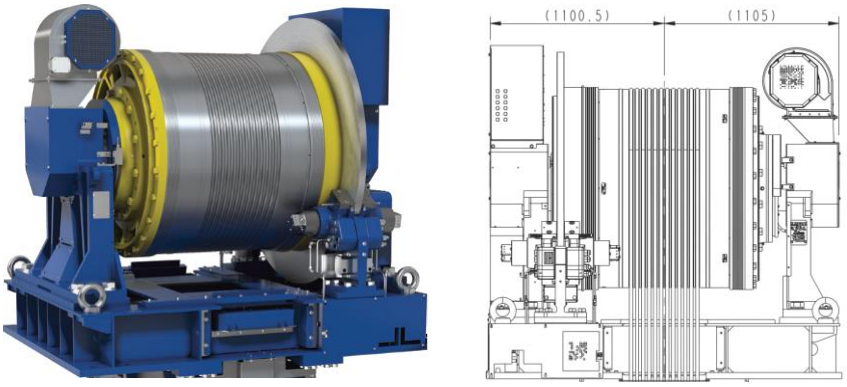
Bir başka model olan Diana 1 serisi dıştan rotorlu SMSM ise, Swiss Traction firmasındaki blok frenli SMSM modelleri ile aynı yapıya sahiptir. Harici bir kasnak bulunmayan Diana 1 modelinde, blok frenli Swiss Traction SMSM'sinde olduğu gibi frenleme sistemi halat kanallarının yanından rotor gövdesine radyal olarak uygulanan blok fren mekanizması ile sağlanmaktadır. Ningbo Xinda Elevator firmasının Diana 1 modeli Şekil 2.6.(b)'de gösterilmiştir.



a) b)

Şekil 2.6. Ningbo Xinda Elevator (a) Mini 6 ve (b) Diana 1 modelleri (Ningbo Xinda Elevator, 2017)

Yapılan araştırmalar sonucu asansör tahrik sistemlerinde kullanılan dıştan rotorlu SMSM üretimi yapan son firma Otis Elevator firmasıdır. Otis'in Sky Motion serisi asansör motorlarında asansör seyahat hızları 15 m/s'lere kadar çıkabilmektedir. Frenleme esnasında mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülmekte bu enerji kullanılan sürücü sayesinde bina şebekesine verilmektedir. 600 m yükseklikteki binalarda kullanılan, 514 kW güce ve 775 kN kasnak yükleme kapasitesine sahip olan SkyMotion 800 modeli Şekil 2.7'de gösterilmiştir. İncelenen motorlar içerisindeki en yüksek hıza sahip olan dıştan rotorlu asansör motoru Otis firmasına aittir.



a) b)

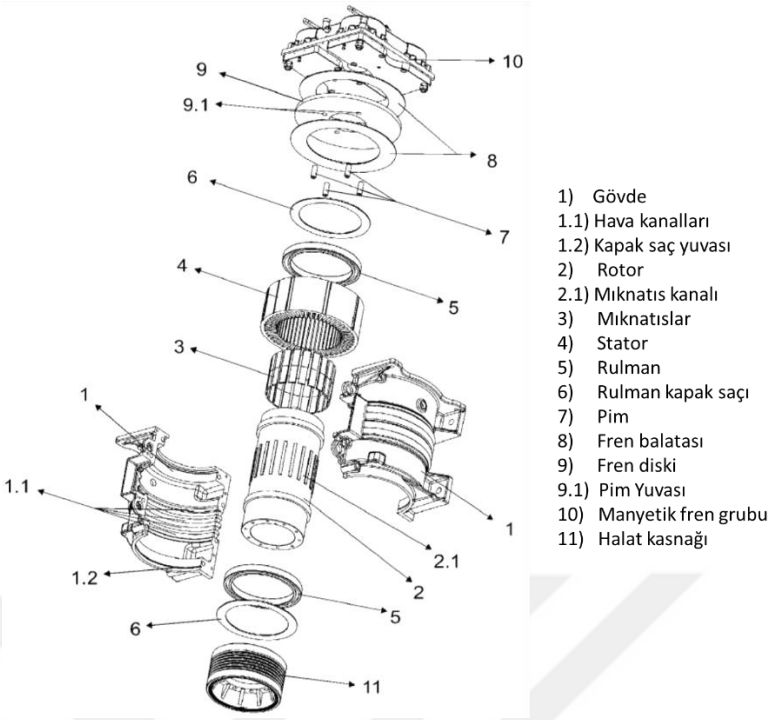
Şekil 2.7. (a) Otis SkyMotion 800 tipi dıştan rotorlu SMSM ve (b) teknik resmi (Otis, 2016)

2.2. Dıştan Rotorlu SMSM Alanındaki Patent Çalışmaları

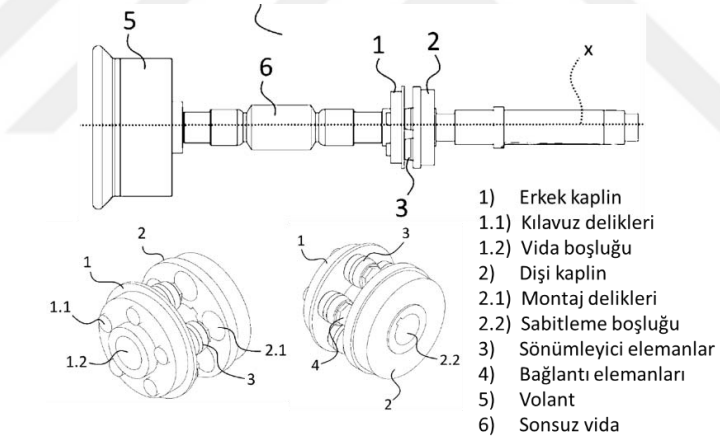
Ulusal patent araştırması sonucu, asansör sistemlerinde kullanılan dıştan rotorlu SMSM tasarımı ve analizi hakkında herhangi bir patent tespit edilememiştir. Asansör kaldırma sistemleri ile ilgili bazı ulusal patentler bulunmaktadır fakat bunların hiç birinde dıştan rotorlu SMSM'nin elektriksel olarak tasarımı üzerine bir çalışma yoktur. Yapılan çalışmalar montaj tipleri, bağlantı elemanları ve mekanik iyileştirmeler üzerinedir. Sadece 2015/14894 (Akış, 2015) başvuru numaralı patent çalışmasında içten rotorlu bir senkron motorun rotoru ile ilgili bir tasarım mevcuttur. Tablo 2.1'de asansör sistemleri ile ilgili ulusal patentlerden ve kısaca patent içeriklerinden bahsedilmiştir. Şekil 2.8'de sabit mıknatıslı boru tip rotorlu senkron motor, Şekil 2.9'da asansörlerde kullanılan bir kaplin sistemi, Şekil 2.10'da ise makine dairesiz asansörde dişlisiz tahrik motorunun kuyu içine montaj tipi isimli patentler paylaşılmıştır.

Tablo 2.1. Asansör sistemleri ile ilgili ulusal patentler

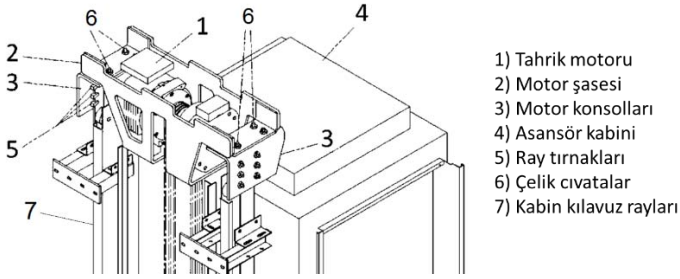
Patent Başvuru No	Patent İsmi	Patent İçeriği
2015/14894	Sabit Mıknatıslı Boru Tip Rotorlu Senkron Motor (Akış, 2015)	Buluş; asansör tahriki için geliştirilmiş içten rotorlu sabit mıknatıslı senkron motor ile ilgilidir. Rotor boru tipindedir ve kasnak direkt rotora bağlıdır. Rulman rotoru üstten sarmaktadır ve gövdeye yataklama yapılmıştır. Mil kullanılmamıştır.
2011/05511	Alüminyum Alaşımlı Asansör Tahrik Makinesi Ve Motor Gövdesi (Kan, 2011)	Asansör motor gövdesi ve tahrik makinesi alüminyum alaşımlı malzemeden döküm yapılarak üretilmiş ve federler ile güçlendirilmiştir. Böylelikle hafif ve uzun ömürlü bir tasarım yapıldığı belirtilmektedir.
2016/19591	Asansörlerde Kullanılan Bir Kaplin Sistemi (Dede, 2016)	Buluş, asansörlerde kullanılan ve redüktör ile motorun birleştirilmesini sağlayan bir kaplin sistemi ile ilgilidir. Buluşun mevcut kaplin sistemlerindeki kırılma, titreşim, deformasyon gibi etkileri engelleyeceği belirtilmiştir.
2015/03607	Makine Dairesiz Asansörde Dişlisiz Tahrik Motorunun Kuyu İçine Montaj Tipi (Latif, R. 2015)	Buluş, makine dairesi bulunmayan binalarda dişlisiz senkron tahrik motorunun özel çelik bir şase sistemi ile asansörün iki adet kabin kılavuz rayının üzerine monte edilmesi ile ilgilidir. Böylelikle motor tahrik sisteminin ağırlığı raylara binmekte ve betona bağlı problemlerin önüne geçilmesi beklenmektedir.



Şekil 2.8. Sabit mıknatıslı boru tip rotorlu senkron motor (Akış, 2015)



Şekil 2.9. Asansörlerde kullanılan bir kaplin sistemi (Dede, 2016)



Şekil 2.10. Makine dairesiz asansörde dişlisiz tahrik motorunun kuyu içine montaj tipi (Latif, R. 2015)

Uluslararası patent çalışmaları incelendiğinde, asansör sistemlerinde kullanılan dıştan rotorlu SMSM'ler hakkında yirmiye yakın patent tespit edilmiştir. Bunlardan bazıları motorun statoru, rotoru veya mıknatısları ile alakalı yenilikler içerirken bazıları da bağlantı elemanları ve şekilleri, hareket aktarma sistemleri, fren mekanizmaları vb. gibi konularda yenilikler içermektedir. Tablo 2.2'de asansör sistemlerinde kullanılan dıştan rotorlu SMSM'ler ile ilgili uluslararası patentlerden ve içeriklerinden bahsedilmiştir. Şekil 2.11-2.21 arasında ise bahsedilen patentlerin daha kolay anlaşılmasını sağlayacak patent resimleri paylaşılmıştır. Şekilerdeki patent numaralarının orijinal halleri değiştirilmemiş ve önemli görülen parçalar numaraları gösterilerek belirtilmiştir.

Tablo 2.2. Asansör sistemleri ile ilgili uluslararası patentler

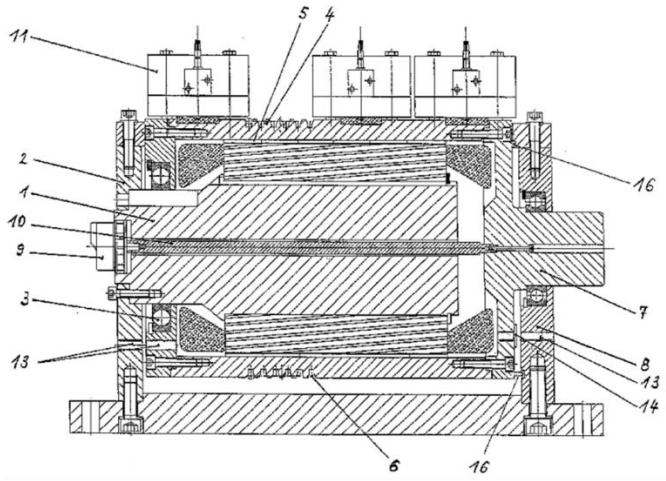
Patent Başvuru No	Patent İsmi	Patent İçeriği
WO2005054108A1	Gearless, compact drive system comprising an external rotor (Swiss Traction Ag, 2005)	Buluşun amacı, bilinen tahrik sistemlerinden daha küçük bir dış çapa sahip olan ve tahrik sisteminin klasik elemanlara olan ihtiyacını ortadan kaldıran ve daha basit bir yapıya sahip olan dıştan rotorlu bir tahrik sistemi sunmaktır. Buluşa göre sistem, tahrik elemanı ve halatlar üzerindeki aşınmayı en aza indirmektedir ve ek bir hava soğutma sistemi buluşun karakteristik özelliğidir. Buluşun bir diğer özelliği, harici rotor tahrik sisteminin üretiminde malzeme tasarrufu ve işçilik zaman tasarrufu sağlamasıdır (Şekil 2.11).
EP 1642858 B1	Elevator tractor (Ningbo Xinda Elevator, 2011)	Buluşun, sökülebilir yatak yapısı ile seri üretimi kolaylaştırdığı ve sürükleme bağlantıları ile farklılık yarattığı belirtilmiştir. Rotor uç kapağında rotor kutupları ile aynı sayıda olan bir dişli bulunmakta ve böylelikle rotor hızı, stator ve rotor manyetik konumu pahalı enkoderlere gerek kalmadan frekans dönüştürücüsüne bilgi olarak iletilmektedir. Tambur, rotor ve fren sistemi kompakt bir yapıda olup üretimi ve maliyeti uygundur (Şekil 2.12).
FR2852162A1	Electrical machine e.g. synchronous motor, for electrical vehicle, has stator with teeth, where each tooth supports individual coil, and rotors with magnets that have same polarity sides arranged with respect to common polar unit (Leroy Somer, 2005)	Motorda hem dış hem de iç rotor bulunmaktadır. İç ve dış rotorlar birbirine bağlıdır, aynı kutup sayısına sahiptir ve beraber hareket etmektedir. Stator dişleri hem iç tarafa hem de dış tarafa dönüktür. Yalıtkan bir destek ile stator ve bobinler bir arada tutulmaktadır (Şekil 2.13).

Tablo 2.2. (devam) Asansör sistemleri ile ilgili uluslararası patentler

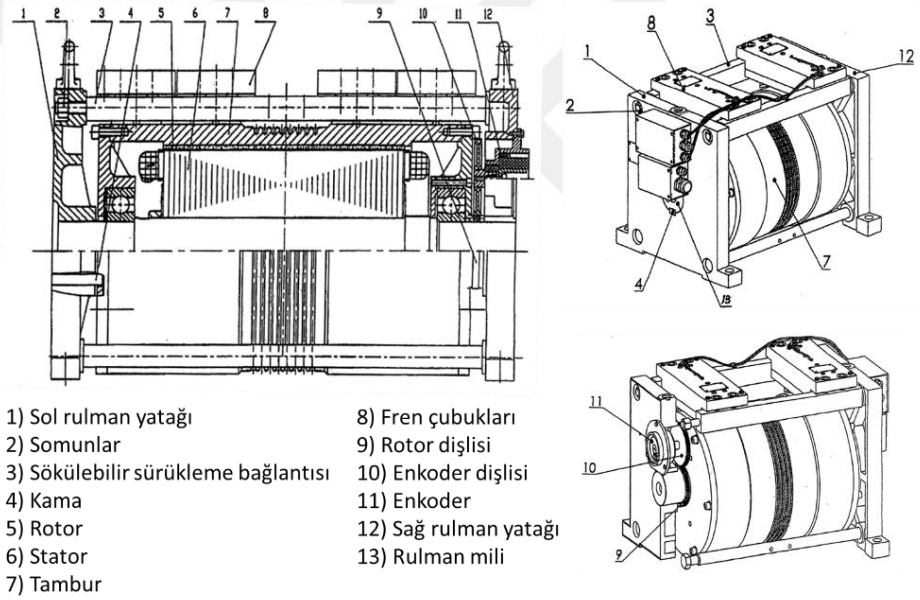
Patent Başvuru No	Patent İsmi	Patent İçeriği
CN 104118788 A	Outer rotor type permanent- magnet strong-driving gearless traction machine (Changshu Canon, 2016)	Buluş, hem iç hem de dış rotora sahip, ortada bir statoru olan ve hem sağ tarafta hem de sol tarafta tahrik kasnakları bulunan güçlü bir dişlisiz asansör tahrik motoru ile ilgilidir. İç ve dış rotorlar birlikte hareket ederek güç yoğunluğunu artırmaktadır. Sistemin durdurulması, rotora orta taraftan etki eden iki adet radyal blok fren mekanizması ile yapılmaktadır (Şekil 2.14).
CN104539070 A	Outer rotor tractor for elevator (Braun Elevator, 2015a)	Buluş, stator için montaj kolaylığı sağlayan ve düşük maliyetli bir ara kademe elemanının mekanik tasarımı ile ilgilidir. Ara kademe elemanı, en az 3 dışbükey yüzeyden ve eşit dağılımı 3 eşit iç bükey yüzeyden oluşmaktadır. Dışbükey yüzey ve içbükey yüzey arasındaki aralık nedeniyle, stator göbeği, düz anahtar ve ayar vidası olmaksızın tahrik makinesinin maksimum çıkış torku altında dönmeyecek şekilde sabitlenmektedir.
CN104539098 A	Outer rotor permanent magnet synchronous tractor for elevator (Braun Elevator, 2015b)	Buluş, dıştan rotorlu bir asansör tahrik makinesinde fren mekanizmasının doğru ve rijit olarak montajının yapılması ile ilgilidir. Fren sistemi dış bükümlüdür ve motorun dış tamburunda fren sistemine karşılık gelecek iç bükümlü bir yüzey bulunmaktadır.
JP2013236542 A	Outer Rotor Permanent Magnet Rotary Electric Machine, And Elevator Device Using The Same (Hitachi, 2014)	Buluşun amacı, dıştan rotorlu, tork dalgalanması ve gürültüsü az olan, küçük boyutlu, hafif, yüksek verimli ve düşük fiyatlı, eksantrik sabit mıknatıslı bir elektrik motoru ve asansör aparatı sunmaktır. Mıknatıs kutup sayısı P, stator çıkık kutup sayısı S, P ve S'nin en büyük ortak böleni M, en küçük ortak katı N kabul edilirse; N 3'e eşittir veya büyüktür ve N/M oranı 13'e eşittir veya daha büyüktür ve çıkık kutupların manyetik kutup genişliği stator kutup aralığının % 44 ile %54'ü arasındadır.
JP2014147191 A	Permanent magnet outer rotor synchronous motor (Clean Craft KK, 2014)	Buluş, dıştan rotorlu senkron motorlarda vuruntu momentini azaltmak için mıknatıslara kademeli bir şekilde kaykı verilmesini sağlayan, manyetik olmayan malzemeden yapılmış bir konumlandırma mekanizması ile ilgilidir (Şekil 2.15).
US4960186 A	Elevator hoist apparatus with an outer rotor motor (Mitsubishi Electric, 1990)	Buluş, dıştan rotorlu bir asansör tahrik düzeneği ile ilgilidir. Buluş ile dış çapı rotor çapından bağımsız olarak seçilebilen bir tahrik kasnağının montajını sağlayan destek yapısı tasarlanmıştır. Böylelikle dış rotor çapı küçük ve hafif olan, istenilen ölçüde bir kasnağın seçilebildiği bir motor tasarımı mümkün olmuştur (Şekil 2.16).

Tablo 2.2. (devam) Asansör sistemleri ile ilgili uluslararası patentler

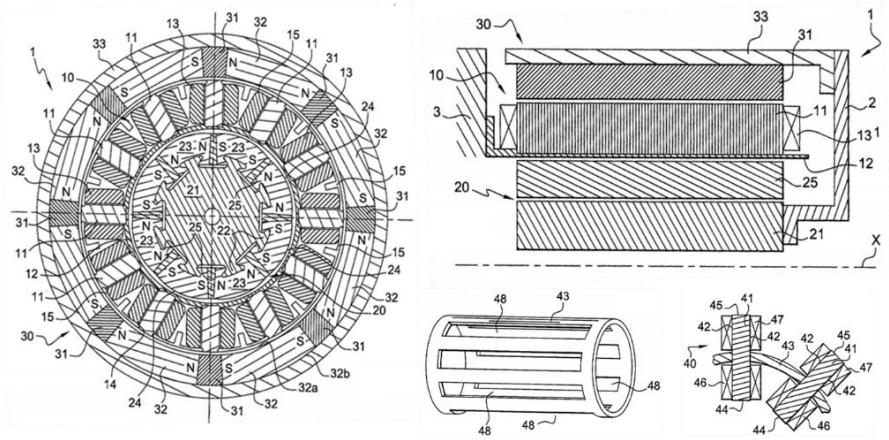
Patent Başvuru No	Patent İsmi	Patent İçeriği
EP1278288 A2	Outer rotor motor (Ziehl Abegg AG, 2004)	Buluş, dıştan rotorlu bir motorda stator bobin uçlarının otomatik olarak bağlanmasını sağlayacak bir düzenek ile ilgilidir.
FR2915033 A1	Electric turning machine e.g. motor, for elevator, has stator placed inside of another stator, and rotor arranged between stators (Leroy Somer, 2009)	Buluş; iki statoru, statorların arasında bir adet rotoru bulunan, kutup parçaları arasında dairesel olarak yerleştirilmiş trapez şeklinde mıknatısları olan asansör tahrik motoru tasarımı ile ilgilidir. Kullanılan rotor sayesinde mıknatıslar tutkal veya kasnak olmadan sabitlenebilmektedir (Şekil 2.17).
CN102471028 A	Elevator machine with external rotor and motor within traction sheave (Otis Elevator, 2015)	Buluş; asansörler için bir tahrik makinesinde, kaldırma halatının bağlantısı için en az bir oluk bulunan döner bir tahrik kasnağı, kasnağın iç yüzeyinde bir rotor, sabit bir oyuk şaft ve şafta bağlı stator ile ilgilidir. Mil ve rotor arasında rulmanlar bulunmaktadır. Fren mekanizması kasnağa eksenel olarak etki eden disk frenlerden oluşmaktadır. Bir adet kontrol kutusu mile monte edilmiştir ve milin içindeki oyuktan stator kabloları gelmektedir. Oyuk şaftın içinden statora hava soğutması yapılmaktadır (Şekil 2.18).
CN201742191 U	Motor rotor of permanent magnet synchronous traction machine (Ningbo Huaxia, 2011)	Buluş; asansör tahrik mekanizmalarında kullanılan motor rotoruna mıknatısların takılmasını ve rahatça çıkarılmasını sağlayan bir yataklama elemanı ve aparatları ile ilgilidir. Buluş sayesinde, mıknatıslar tutucu plakaya geçirilmekte, ardından da toplu bir şekilde rotor gövdesine monte edilmektedir (Şekil 2.19).
KR20040110131 A	Stator Structure Of Thin Winch For Elevator, Comprising Plural Core Pin Combining Bodies (Hyundai Elevator, 2005)	Buluş; asansör tahrik motorundaki statorun üretim maliyetini düşürmek ve bakım performansını artırmak için ayrık üretilen stator dişlerini birleştirmeye yarayan parçaların tasarımı ve montajı ile ilgilidir (Şekil 2.20).
CN203645513 U	Split combined stator for outer-rotor permanent-magnet synchronous traction machine (Shenyang Bluelight, 2014)	Buluş, dıştan rotorlu senkron bir tahrik makinesinde sarım girme zorluğu olan durumlarda parçalara bölünmüş bir stator ve stator dişlerini birleştiren montaj elemanları ve bu parçaların montaj yapısı ile alakalıdır. Dolayısıyla KR20040110131 A numaralı patent ile benzerlikleri bulunmaktadır (Şekil 2.21).



Şekil 2.11. Dıştan rotorlu soğutucu çubuklu dişlisiz asansör tahrik sistemi (Swiss Traction Ag, 2005)

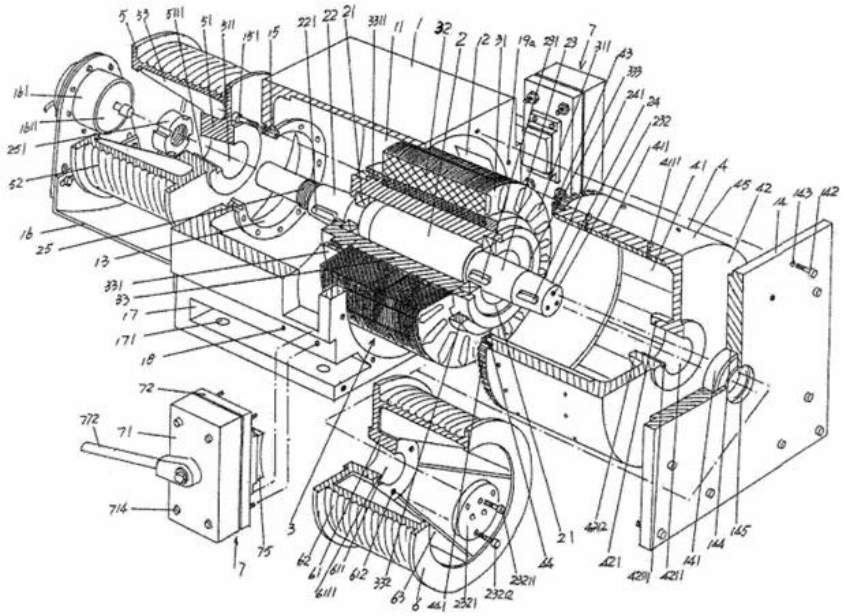


Şekil 2.12. Konum bilgisini özel bir rotor dişli parçasından alan dıştan rotorlu asansör tahrik sistemi (Ningbo Xinda Elevator, 2011)

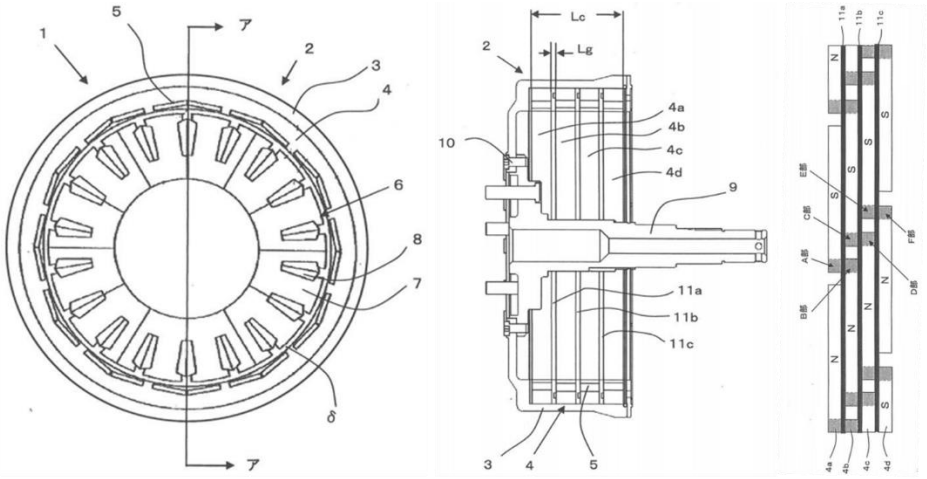


1) Motor	14) Çentik	25) İç rotor mıknatısı	43) Yalıtkan destek
2) Bağlantı elemanı	15)Plastik ara parça	30) Dış rotor	44-45) Diş uçları
3) Şasi	20) İç rotor	31) Dış rotor mıknatısı	46-47) Bobinler
10) Stator	21) Şaft	32) Dış kutup	48) Açıklık
11) Diş	22) Çubuk	40) Stator	
12) Destek parçası	23) İç kutup	41) Stator dişi	
13) Bobin	24) Kavisli yüzey	42) Radyal kenar	

Şekil 2.13. İç ve dış rotorlu çift yönlü stator dişlerine ve bobinlere sahip asansör motoru (Leroy Somer, 2005)

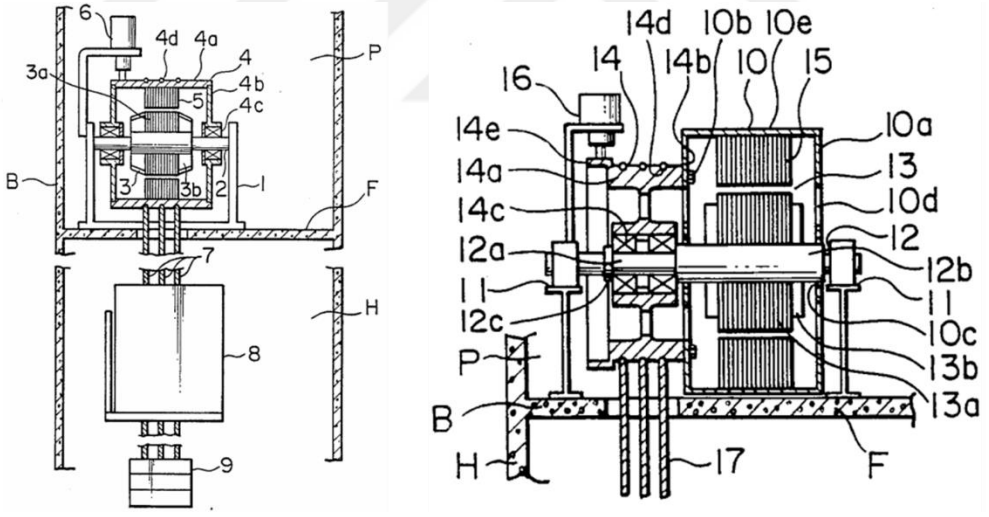


Şekil 2.14. İç ve dış rotorlu iki taraflı tahrik kasnağı bulunan güçlü bir asansör tahrik motoru (Changshu Canon, 2016)



1) Motor
2) Dış rotor
3) Motor boyunduruğu
4) Rotor nüvesi
4a, 4b, 4c, 4d) Mıknatıs bölümleri
5) Mıknatıslar
6) Stator
7) Stator dişi
8) Bobin
9) Motor mili
10) Cıvata
11a, 11b, 11c) Manyetik olmayan malzeme
Lg) Man. olmayan malzemenin genişliği
Lc) Toplam rotor genişliği

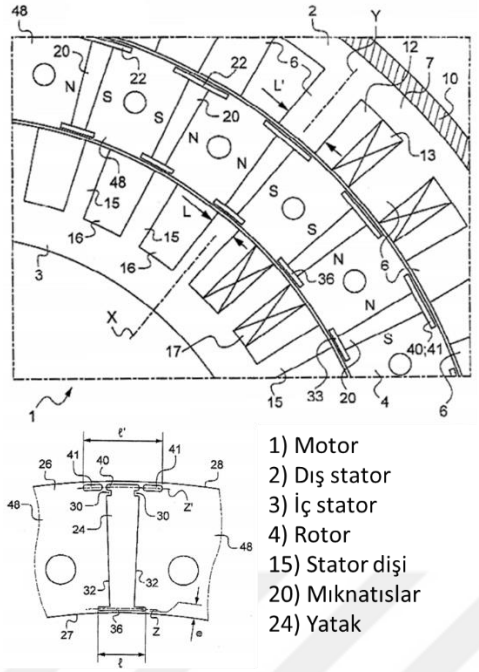
Şekil 2.15. Mıknatısları kademeli yerleştirilmiş dıştan rotorlu senkron motor tasarımı (Clean Craft KK, 2014)



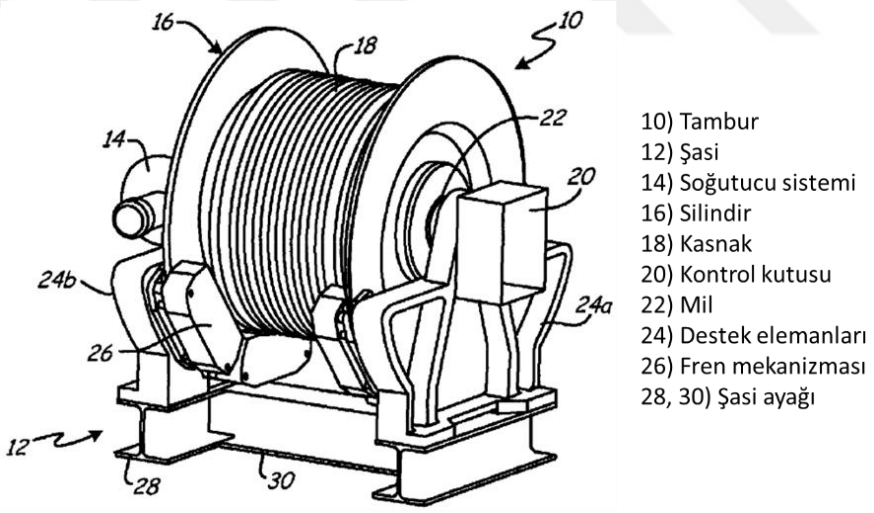
Buluşun önceki hali **Buluş**

1) Kaide
2) Destek elemanı
3) Stator
4) Kasnak
5) Rotor
6) Fren mekanizması
7) Halatlar
8) Asansör kabini
9) Karşı ağırlık
10) Ana gövde
11) Kaide
12) Destek elemanı
13) Stator
14) Kasnak montajı
15) Rotor
16) Fren mekanizması
B: Bina
H: Asansör kuyusu
P: Asansör odası
F: Zemin

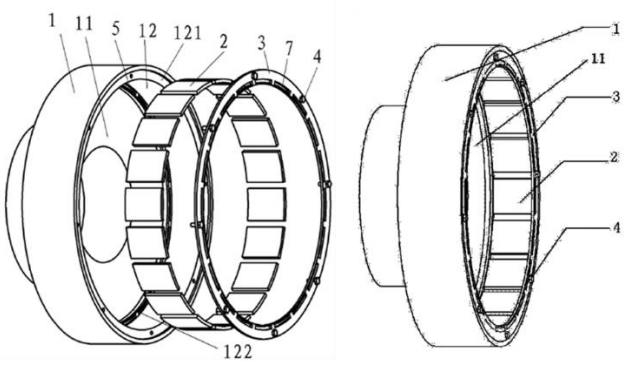
Şekil 2.16. Dış çapı rotor çapından bağımsız olarak seçilebilen bir tahrik kasnağının montajını sağlayan destek yapısı (Mitsubishi Electric, 1990)



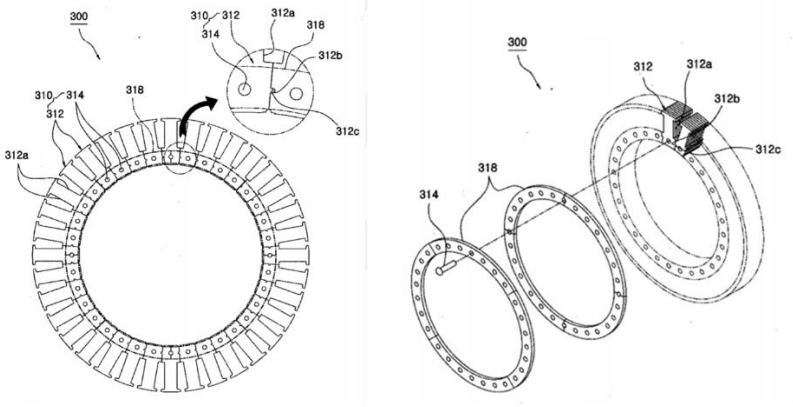
Şekil 2.17. İki statoru, statorların arasında bir adet rotoru bulunan asansör tahrik motoru tasarımı (Leroy Somer, 2009)



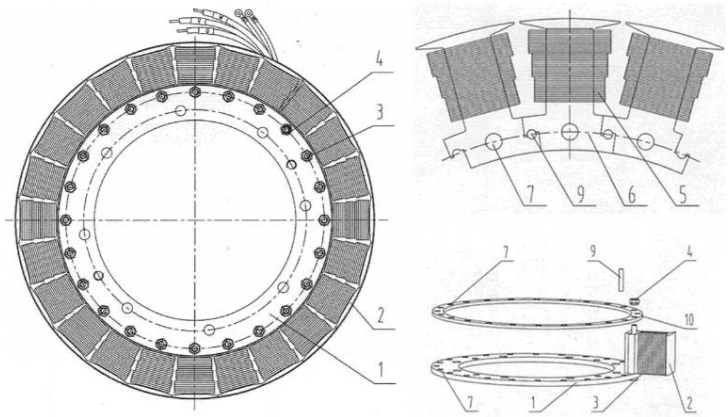
Şekil 2.18. Mil içerisinden hava soğutması olan dıştan rotorlu asansör tahrik mekanizması tasarımı (Otis Elevator, 2015)



Şekil 2.19. Dıştan rotorlu asansör tahrik motorunun mıknatıslarının yataklaması için özel bir rotor tasarımı (Ningbo Huaxia, 2011)



Şekil 2.20. Dıştan rotorlu asansör tahrik motorunun ayrık üretilen stator dişleri için bir birleştirme aparatı (Hyundai Elevator, 2005)



Şekil 2.21. Dıştan rotorlu asansör tahrik motorunun ayrık üretilen stator dişlerine bobinlerin sarılması ve dişlerin birleştirilerek statorun oluşturulması (Shenyang Bluelight, 2014)

Tespit edilen uluslararası patentlerin çoğu, sektörde ürünü bulunan firmaların çalışmalarından oluşmaktadır. Bu tasarımların bazılarında kasnaklar rotor üzerinde iken (Ningbo Xinda Elevator, 2011; Otis Elevator, 2015) bazılarında kasnak yan tarafta (Changshu Canon, 2016; Mitsubishi Electric, 1990) bulunmaktadır. Fren mekanizmaları ise blok (Swiss Traction Ag, 2005; Ningbo Xinda Elevator, 2011; Changshu Canon, 2016) veya disk (Otis Elevator, 2015) yapılı olarak karşımıza çıkmaktadır. Leroy Somer'in (2005) patentinde çift yönlü dişlere sahip bir stator ve hem içte hem de dışta rotoru bulunan bir motor tasarlanmıştır. İç ve dış rotorlar birbirine bağlıdır, aynı kutup sayısına sahiptir ve beraber hareket etmektedir. Yalıtkan bir destek ile stator ve bobinler bir arada tutulmaktadır. Bu tasarımın amacı motorun güç yoğunluğunu artırmaktır. Buna benzer bir tasarım, Changshu Canon'da (2016) da bulunmaktadır ve farklı olarak hem sağ hem de sol tarafta tahrik kasnakları vardır. Böylelikle tahrik halatları sağdan ve soldan bağlanmakta ve yüksek güçlü bir asansör sistemi ortaya çıkmaktadır. Güç artırma amaçlı bir diğer tasarımda; içte ve dışta stator ve statorların arasında ise bir rotor bulunmaktadır (Leroy Somer, 2009). Vuruntuyu azaltmak için mıknatısların kademeli yerleştirildiği (Clean Craft KK, 2014), ısınma problemlerini çözmek için mil içinden (Otis Elevator, 2015) veya soğutucu çubuklu (Swiss Traction Ag, 2005) soğutma sistemlerinin bulunduğu tasarımlar tespit edilmiştir. Mıknatısların yataklanması için özel aparatların kullanıldığı (Hyundai Elevator, 2005) veya stator dişlerinin ayrık üretilerek bir aparatla birleştirildiği (Shenyang Bluelight, 2014) tasarımlar da montaj açısından getirilen bazı yeniliklerdir.

Literatürdeki çalışmalara göre, SMSM tipi asansör tahrik sistemleri için aşağıdaki sınıflandırma yapılabilir:

- Rotor yapısına göre; İçten rotorlu, dıştan rotorlu olan,
- Fren yapısına göre; Disk frenli (tekli veya çoklu), blok frenli (tekli veya çoklu),
- Kasnak yapısına göre; Harici kasnaklı, rotorunda kasnak olukları bulunan yani rotoru kasnak olan,
- Soğutma sistemine göre; Hava soğutmalı, sıvı soğutmalı, soğutma sistemi olmayan,
- Stator-rotor yapısına göre; Tek stator-tek rotoru olan, çift stator-çift rotoru olan, çift statoru-tek rotoru olan,

- Kasnak sayısına göre; Tek kasnaklı, çift kasnaklı,
- Mıknatısların yataklamasına göre; Mıknatısları için yataklama bulunan, yataklama olmayan,
- Stator yapısına göre; Stator paketi tek parça olan, stator dişleri ayrık olarak üretilen ve birleştirilen,
- Kaldırma tahrik yapısına göre; Halatla tahrik edilen, kayışla tahrik edilen.

2.3. SM Motorlar İle İlgili Diğer Çalışmalar

Bu bölüme kadar, özellikle dıştan rotorlu asansör motorları hakkında yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Bu bölümde ise dıştan rotorlu SM motorlar, içten rotorlu SM motorlarla karşılaştırma çalışmalarını da içerecek şekilde incelenmiştir. Literatürde yer alan modelleme, yazılım ve deneysel çalışmalar ve elde edilen sonuçlar irdelenmiş ve SM makine tasarımı konularında dikkat edilecek hususlar ortaya konmuştur. Ayrıca asansör trafik, mukavemet ve analitik hesaplarıyla alakalı çalışmalara da yer verilmiştir.

2.3.1. SM motorlar ile ilgili modelleme çalışmaları

SM motorların tasarım aşamaları uzun zamanlar alan yorucu süreçlerden oluşmaktadır. Tasarımcılar bu süreçleri kısaltmak için çeşitli modeller üzerinde çalışmışlardır. Analitik modeller, SEA modellerine göre daha kısa çözüm süreleri sunduğu için özellikle tercih edilmektedir. Tasarlanacak motorların kullanıldığı alana ve üretim imkanlarına göre performans öncelikleri değişmektedir. Kimi uygulamalarda verim birinci amaç iken, kimi uygulamalarda titreşimsiz bir motor birinci amaçtır. Buna göre tasarımcıların yoğunlaştıkları tasarım parametreleri de değişmektedir. Analitik modeller ile temel motor geometrileri belirlendikten sonra sonlu elemanlar yöntemi (SEY) analizleri ile hassas doğrulama çalışmaları yapılmaktadır. Böylelikle analitik modeller ve SEY modelleri de karşılaştırılmaktadır.

SMSM'lerin performanslarının tahmin edilebilmesi için eşdeğer devre parametrelerinin seçiminin kritik bir önemi vardır (Rahman, 1987). Rahman, yüzey mıknatıslı radyal ve eksenel akılı SMSM'lerin manyetik ve elektrik eşdeğer devre çözümlerini yapmış ve

analitik sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Tahmin edilen relüktans değerleri ile deneysel olarak elde edilen değerler neredeyse birebir örtüşmüştür.

Meier (2002), yüzey mıknatıslı SMSM'ler için Matlab yazılımını kullanarak bir analitik tasarım programı geliştirmiştir. Eşdeğer relüktans devre modeli ile statorun farklı bölgelerindeki akı dağılımlarını tahmin eden ve demir kayıplarının hesaplanmasına olanak sağlayan programın doğruluğu Flux 2D (2019) yazılımının SEA simülasyonları ile kanıtlanmıştır.

Heikkila (2002), çıkık kutuplu ve çıkık kutuplu olmayan SMSM'lerde hava aralığı akısının, akı yoğunluğunun, endüktans ve tork değerlerinin analitik olarak nasıl elde edildiği üzerine durduğu çalışmada vuruntu momentini azaltmaya yarayan yöntemleri de ayrıntılı olarak incelemiştir. Prototip motorda üretiminin kolay olması, mıknatısların yapıştırma problemlerinin olmaması ve dikdörtgen mıknatısların kullanılabilmesi sebebiyle V tipi gömülü mıknatıslı rotor yapısını kullanmıştır.

Stening (2006), 5.5 Nm anma torkuna, 10000 rpm anma hızına ve %50 stator oluk doluluğuna sahip, endüstriyel bir kesicide kullanılacak yüzey mıknatıslı SMSM tasarımının analitik olarak optimizasyonu üzerine çalışmıştır. Bakır kayıplarının minimize edilmesinin ana amaç olarak kabul edildiği, termal özelliklerin bilhassa dikkate alındığı ve motor hacminin bir kısıt olduğu çalışmada, su soğutması sayesinde düşük çalışma sıcaklıkları elde edilmiş ve Matlab ortamında üretilen analitik model Flux 2D yazılımının SEA simülasyonları ile doğrulanmıştır.

Meier (2008), içten ve dıştan rotorlu SMSM'lerin karşılaştırması, tasarım optimizasyonları, motor üretim süreçleri ve sarım aşamaları üzerine ayrıntılı bir çalışma yapmıştır. Üretilen prototip motorun test sonuçlarına göre analitik ve SEA modelleri doğrulanmıştır. Elde edilen analitik model web tabanlı Emetor (2008) uygulamasında halen kullanılmaktadır.

Strous (2010), radyal akılı konsantre sargılı SM makineler için analitik modeller geliştirmiştir. Elde edilen modelleri SEA yöntemini kullanarak doğrulamıştır. Analitik modelleri kullanarak, seçilen tasarım kriterlerine göre en uygun makine geometrilerini

bulmak için bir optimizasyon rutini geliştirilmiştir. Akı yoğunluğu dağılımı, direnç, endüktans, bakır kayıpları, demir kayıpları ve mıknatıs kayıplarının modellendiği çalışmada yüzey mıkantıslı (YM) ve gömülü mıknatıslı (GM) makine tasarımları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu YM makinelerin GM makinelere göre daha küçük ve hafif çözümler sunduğu fakat eğri yapılı mıknatıslar sebebiyle daha yüksek maliyetlerinin olabileceği belirtilmiştir. GM makinelerde düz yapılı mıknatısların statordan daha uzağa yerleştirilmesinin mıknatıs kayıplarını düşüreceğini fakat akı sızıntıları sebebiyle verim kayıplarının ortaya çıkacağını tespit etmiştir.

Topaloğlu ve Gürdal (2010), çıkık kutuplu senkron bir hidrogeneratörün tasarım optimizasyonunda ikinci dereceden hassasiyet analizi temelli nümerik bir yaklaşım kullanarak ilk tasarım değerlerine göre ortalama % 15 verim iyileşmesi elde etmişler ve geliştirilen yaklaşım sayesinde boyutsal parametrelerin alt ve üst odak noktalarını belirleyerek çözüm uzayını daraltmışlardır.

Boughrara ve diğ. (2010), analitik ve numerik konform dönüşümü ve Matlab Schwarz-Christoffel araç kutusunu kullanarak dıştan rotorlu SMSM'lerin manyetik alanını ve torkunu elde etmişler ve kompleks hava aralığı manyetik geçirgenliğini hesaplayabilmek için oluksuz tasarımlar üzerinde çalışmışlardır. Kullanılan metodun mıknatıs ve stator diş ölçülerinin elde edilmesinde SEY'e göre daha kısa sürede sonuç verdiği belirtilmiştir.

Şahin (2010), literatürdeki SM makinelerin performans hesaplamalarında kullanılan yöntemleri araştırmış ve yüksek doğruluğa sahip bir model geliştirmiştir. Motor performansına etki eden motor ölçüleri ve malzeme özellikleri ile alakalı optimizasyon tabanlı bir analitik denklem takımı geliştirmiştir. Modelden elde edilen değerler ile test sonuçlarını karşılaştırmış ve geliştirilen analitik modelin doğruluğunu kanıtlamıştır. Geliştirilen analitik model tork-hız, güç-hız ve akım-hız gibi motor karakteristiklerini görmek için Matlab ortamına uyarlanmıştır. Hem analitik modelin elde edildiği hem de bu modelin yazılımla uygulamasının gerçekleştirildiği çalışma, SM makinelerin davranışlarının belirlenmesi açısından önemli bir etkiye sahiptir.

Bulgan (2014), Şahin'in SM makineler için geliştirdiği Matlab tabanlı yaklaşımı daha da geliştirerek SM motorların analizinde kullanılan Microsoft Visual Studio tabanlı bir

analiz aracı üzerine çalışmıştır. Bu araç sayesinde makine boyutları ve elektriksel limitler dahilinde motorun manyetik ve elektriksel eşdeğer devre çözümleri elde edilebilmekte ve performans grafikleri çizdirilebilmektedir. Programda kullanılan algoritmaların akış diyagramları ile paylaşıldığı çalışmada, üretilmiş bir motorun verileri program verileri ile karşılaştırılmış ve oluşan hata oranları tartışılmıştır.

Martinez (2012), çalışmasında Shell Eco Maraton'da kullanılmak üzere içten rotorlu bir SMSM tasarımı üzerine çalışmıştır. En uygun kutup-oluk oranları araştırılmış ve dengesiz manyetik etki yaratabilecek tasarımlardan uzak durulmuştur. SMSM'nin manyetik ve elektriksel modeline göre analitik bir model geliştirilmiş ve en uygun motor ağırlığına göre optimum motor ölçüleri elde edilmiştir. Elde edilen motor tasarımının FEMM® (Meeker, 2011) yazılımı ile SEA simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, düşük hızlı ve düşük frekanslı uygulamalarda demir kayıplarının bakır kayıplarına göre ihmal edilebilir olduğunu tespit etmiştir.

Hung (2012), dıştan rotorlu, yüzey mıknatıslı, çift katmanlı ve konsantre (toplu) sargılı bir SM makine tasarlamıştır. Yüksek tork yoğunluğuna sahip, düşük maliyetli ve yüksek verimli bir tasarım elde etmek için SM makinenin tasarım optimizasyonunda analitik, statik ve dinamik SEA ve hibrit modelleri geliştirmiştir. Vuruntu momentini minimize etmek için oluk-kutup kombinasyonlarının seçildiği dört aşamalı bir işlem önermiştir. Oluk açıklığının elektromanyetik tork, rotor eddy akımları, stator demir kayıpları, akı ve gerilim üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Carraro (2012), gömülü tip ve yüzey mıknatıslı SMSM'lerin karşılaştırmasını sunarak analitik modellerini ayrıntılı olarak incelemiş ve rotor limit ölçülerinde stator ve mıknatıs kalınlığı boyutlandırma sonuçlarının yüksek doğruluğa sahip olduğunu kanıtlamıştır. Ayrıca Matlab yazılımını kullanarak analitik hesaplamaları bir program döngüsü ile elde etmiştir.

Xuan ve diğ. (2012), dıştan rotorlu, konsantre sargılı bir SMSM'de oluk açıklığının akı dağılımı, iç gerilim, tork ve eddy akımı kayıpları üzerindeki etkisini araştırmıştır. Analitik tasarım ve SEY tasarımları ile Carter faktörü denklemlerini de dikkate alarak yapılan küçük oluk açıklığına sahip simülasyon sonuçlarını ölçüm sonuçları ile karşılaştırmışlar

ve değerlerin örtüştüğünü görmüşlerdir. Ayrıca analitik hesaplamalarda stator diş uçlarındaki kaçak akıların hesaba katılmaması sebebiyle iç gerilimlerin SEY analizlerinde hesaplananlardan farklı çıktığını belirtmişlerdir.

Chu ve diğ. (2013), motor hacmine göre maksimum torkun optimize edildiği dıştan rotorlu bir SMSM'nin analitik modelini bölünme oranını (split ratio) dikkate alarak sunmuşlardır. Dıştan rotorlu SMSM'de bölünme oranı (λ_δ), stator dış çapının (D_{so}) motor dış çapına (D_o) bölümü ile bulunmaktadır. Stator bölünme oranı (λ_s) ise stator dış çapının stator iç çapına bölünmesi ile bulunmaktadır. Elde edilen optimum analiz sonuçlarına göre 54 oluklu-60 kutuplu dıştan rotorlu bir motorun prototip üretimini gerçekleştirmişler ve deneysel verilerle analitik ve SEY hesaplama sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucu bulunan değerlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Hava aralığı akı yoğunluğunun, oluk-kutup sayılarının, oluk ve diş şekillerinin, sargı sonlarının, rotor boyunduruğunun ve iç çapının optimum sonuçlara etkisinin de araştırıldığı çalışma sonucunda; ortalama hava aralığı akı yoğunluğunun ($\bar{B}_g$) statordaki maksimum akı yoğunluğunun (B_{sd}) yarısından az olduğu durumlarda maksimum torkun elde edildiğini belirtmişlerdir.

Mutluer (2013), SMSM tasarımı için Matlab yazılımını kullanarak bir program geliştirmiştir. Program ile motorun ön analitik tasarımı yapay zeka teknikleri kullanılarak yapılabilmekte, elde edilen değerler ile faz akımları, çıkış gücü, hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, gerilim ve harmonik grafikleri çizdirilebilmektedir. Tasarım optimizasyonunda verim denklemi amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Mıknatıs kalınlığı, hava aralığı genişliği, stator ağız yüksekliği, stator diş genişliği, stator dış çapı, stator oluk yüksekliği, stator ağız açıklığının stator oluk genişliğine oranı değişken parametreler olarak; rotor dış çapı, rotor paket boyu, mıknatısların elektriksel açı genişliği ise sabit parametreler olarak seçilmiştir. Mutluer, optimizasyon sürelerini hızlandırmak için çözüm uzayını sekiz farklı parametre (Stator diş genişliği, stator oluk kalınlığı, mıknatıs ağırlığı, motor ağırlığı, sargı sıcaklığı, rotor ve stator boyunduruğundaki maksimum manyetik akı yoğunluğu, stator dişindeki maksimum manyetik akı yoğunluğu) ile sınırlandırmıştır. Yapılan analizler sonucu motor verimi ile stator oluk genişliği, mıknatıs kalınlığı ve stator dış çapı arasında doğru orantı; stator diş genişliği, stator ağız genişliği, stator ağız açıklığının stator oluk genişliğine oranı ve hava aralığı

genişliği arasında ise ters orantı olduğu tespit edilmiştir. Verim ile en yüksek ilişkisi olan parametrelerin hava aralığı genişliği, mıknatıs kalınlığı ve stator diş genişliği olduğu görülmüştür.

Parasiliti ve diğ. (2014) kontrollü rastgele arama algoritmasını (Controlled Random Search Algorithm) ve sonlu elemanlar yazılımını kullanarak iç rotor çapını, mıknatıs kalınlığını, stator oluk yüksekliğini, oluk genişliğini, sargı tur sayısını ve tel kalınlığını optimize etmiştir (Cirio ve diğ., 2002; Parasiliti ve diğ., 2012). Optimizasyon işlemini yaparken; verimin %60'dan büyük olmasını, sargı doluluk oranının % 25'i geçmemesini, stator dişlerindeki ve rotor boyunduruğundaki maksimum akı yoğunluğunun 1.7 Tesla'yı geçmemesini ve stator boyunduruğundaki akı yoğunluğunun ise 1.6 Tesla'yı geçmemesini sınır koşulları olarak seçmiştir. Analiz ve deneysel sonuçlar; tasarlanan ve prototip üretimi yapılan dıştan rotorlu, kesirli oluklu, konsantre sargılı SM BLDC motorun yüksek verimli ve düşük tork dalgalanmasına sahip bir motor olduğunu göstermiştir.

Çağan (2015), uydu uygulamasında kullanılmak üzere dıştan rotorlu fırçasız bir doğru akım motorunu güç, verim, birim ağırlık başına ve birim hacim başına düşen tork gibi performans parametrelerini dikkate alarak tasarlamıştır. İki kutuplu ve altı kutuplu tasarımların analitik performans verilerini Ansys Maxwell (2019) yazılımının SEA modülü ile elde ettiği sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Eylemsizlik etkisinin yüksek olmasının istendiği uygulamalarda iki kutuplu tasarımın, yüksek verim ile birlikte kütle veya hacim başına düşen tork değerinin yüksek olmasının istendiği uygulamalarda ise altı kutuplu tasarımın daha uygun olduğu sonucunu elde etmiştir. Analitik model denklemlerine göre Matlab ortamında bir program geliştirmiş ve kayıplar, verim, akım, zıt EMK gibi çeşitli performans parametrelerini hesaplamıştır.

Ilka ve Alinejad-Beromi (2015), arı algoritması kullanarak içten rotorlu bir SMSM'nin geometri optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında mıknatıs hacmini azaltırken tork ve verim değerlerini artırmayı hedefleyen iki farklı amaç fonksiyonu kullanmışlardır. Her iki amaç fonksiyonunda da mıknatıs hacmi azalırken tork ve verim ters orantılı olarak sonuç vermiştir. Dolayısıyla tasarımcının verim veya tork ifadelerinden hangisinin öncelikli olduğuna karar vererek amaç fonksiyonunu seçmesi

gerekmektedir. Arı algoritması; genetik algoritma ve parçacık sürü optimizasyonu teknikleri ile karşılaştırılmış ve arı algoritmasının daha üstün sonuçlar verdiği doğrulanmıştır.

Guo ve diğ. (2016a, 2016b), SMSM'lerdeki kayıpların tahmini için hem temel kayıpları hem de harmonik kayıpları dikkate alan yeni bir analitik kayıp modeli geliştirmiştir. Geliştirilen analitik kayıp modeline göre MEPT (maximum efficiency per torque-tork başına maksimum verimlilik) isimli bir verimlilik optimizasyonu kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Stratejiye göre, d-ekseni akı zayıflatma tekniği kullanarak temel ve harmonik kayıplar birlikte optimize edilebilmektedir. Analitik modelin zor olmasından dolayı çözüm kümesini daraltan altın oran arama metodu uygulanmıştır. Sonuç olarak MEPT kontrolün SPWM'nin (sine-wave pulse width modulation-sinus dalgası darbe genişlik modülasyonu) ve SVPWM'in (space vector pulse width modulation-vektör uzayı darbe genişlik modülasyonu) dinamik performansında herhangi bir azalmaya sebep olmadan SMSM'nin verimliliğini artırdığı gözlenmiştir.

Moayed ve diğ. (2016), dıştan rotorlu bir SMSM'yi mıknatıs, hava aralığı, oluk açıklığı ve oluk bölgeleri gibi alt alanlara bölerek motorun 2 boyutlu analitik modelini elde etmişlerdir. İlk önce manyetik akı yoğunluğu dağılımını, ardından zıt elektromotor kuvvetini, vuruntu momentini, elektromanyetik torku, öz ve karşılıklı endüktansı ve dengelenmemiş manyetik kuvvetleri hesaplamışlardır. İlk defa öne sürülen bu analitik modeli doğrulamak için SEY'i ve 12 oluklu 14 kutuplu bir motorun deneysel verilerini karşılaştırmışlar ve sonuçların birbiri ile uyuştuğunu tespit etmişlerdir.

Karnavas ve diğ. (2017), bir atık su artıma tesisindeki redüktörlü asenkron motorun yerine kullanılabilecek dıştan rotorlu bir SMSM motorun tasarımını çok amaçlı optimizasyonu hedefleyerek gerçekleştirmiştir. Bunun için motor geometrisiyle alakalı on iki parametreyi genetik algoritma, örüntü tarama algoritması ve FMC (FMincon-çok değişkenli fonksiyonların minimumunu bulan fonksiyon) metotları ile optimize etmişlerdir. Optimizasyonun amaç fonksiyonu için toplam motor ağırlığı, toplam mıknatıs ağırlığı ve bakır kayıpları değişkenlerini farklı oranlarda ağırlık katsayısı olarak belirlemişlerdir. Amaç fonksiyonu ise maksimum verim, minimum toplam motor ağırlığı ve minimum toplam mıknatıs ağırlığı olarak seçilmiştir. Dıştan rotorlu motor

topolojisinde yapılan optimizasyon sonuçlarına göre toplam motor ağırlığı 22.10 kg ile 52.48 kg, toplam mıknatıs ağırlığı 2.14 kg ile 5.30 kg, motor verimi ise %71.40 ile %89.05 değerleri arasında değişmiştir. Karşılaştırılan üç optimizasyon yönteminden genetik algoritmanın diğerlerine göre üstün olduğu görülmüştür.

Mutluer (2017), yüzey mıknatıslı, 12/10 oluk kutup oranına sahip, konsantre ve çift katmanlı sargı yapısına sahip, dıştan rotorlu bir SMSM'yi diferansiyel gelişim algoritması (DEA-differential evolution algorithm) kullanarak maksimum verimi amaç fonksiyonu seçerek modellemiştir. Mıknatıs kalınlığı, hava aralığı genişliği, stator oluk yüksekliği, oluk genişliği, stator diş ucu kalınlığı, rotor iç çapı ve stator ağız açıklığı genişliğinin stator oluk genişliğine oranı optimizasyon parametreleri olarak seçilmiştir. Genetik algoritma ve diferansiyel dönüşüm algoritmasının sonuçlarının karşılaştırıldığı çalışmada en iyi verim değerlerini diferansiyel dönüşüm algoritması vermiştir.

SMSM'lerin optimum kontrolüyle alakalı literatürde birçok çalışma mevcuttur. SMSM'lere uygulanan kontrol yöntemlerine örnek olarak doğrudan moment kontrolü (DMK), alan yönlendirmeli kontrol (AYK) ve V/F kontrol yöntemleri verilebilir. Erken (2014) diğer kontrol yöntemleriyle kıyaslandığında daha düşük moment dalgalılığına sahip AYK yöntemiyle hız ve momentteki dalgalanmayı azaltmaya çalışmıştır. Yolaçan (2012) dSpace DS1104 kontrol kartını kullanarak SM senkron bir motorun gerçek zamanlı hız kontrolünü vektör kontrol yöntemini kullanarak gerçekleştirmiştir.

2.3.2. Doğrudan tahrikli SM motor çalışmaları

Doğrudan tahrikli motorlar, yükün bir redüktör kullanılmadan direkt olarak motor çıkış miline bağlandığı motorlardır. Bu tezde tasarlanan asansör motoru da doğrudan tahrikli dişlisiz bir asansör motorudur. Doğrudan tahrikli motorlar endüstride sıklıkla kullanılmakta ve bu alanda birçok çalışma bulunmaktadır. Genellikle düşük hızlı olarak tasarlanan doğrudan tahrikli motorlarda yüksek torklar üretilmektedir. Libert (2004), bir dişli sisteminin olmadığı, 50 rpm hızında ve 4.4 kW gücünde doğrudan sürüşlü bir SM motor tasarımı üzerine çalışmıştır. Yüksek kutup sayısına sahip konsantre sargı yapısının kullanıldığı motor tasarımında yüksek sargı faktörü ile rotor kayıpları azalmış, dağınık

sargı yapısına göre daha hafif bir motor elde edilmiş, motordaki gürültü ve titreşimler minimize edilmiştir.

Cicalé ve diğ. (2012), doğrudan sürüşlü asansörler için tanecikleri yönlendirilmiş silisli saçların kullanıldığı, düşük hızlı ve yüzey mıknatıslı SMSM'ler üzerine çalışmışlardır. Gieras'ın (2009) sunduğu motor ölçülendirme prosedürlerini kullanarak motorun temel ölçülerini elde etmişler ve 16 kutuplu, 54 oluklu kesirli sargı yapısına sahip 4 kW'lık bir motorun prototip üretimini gerçekleştirmişlerdir. Vuruntu momenti harmoniklerini azaltmak için rotor saçlarına kaykı verilmiş ve mıknatıslar 5 kademe olarak kaykılı yerleştirilmiştir. Prototip üretimi yapılan motora deney düzeneğindeki motor freni yardımıyla yükleme yapılmış, motor hızı PI (Oransal-İntegral) denetleyici ile kontrol edilmiştir. Motorun tork bilgisi torkmetreden, sıcaklık bilgisi Pt100 sensöründen, elektriksel giriş gücü ise dijital wattmetre'den okunmuş ve analiz sonuçları ile deneysel sonuçların örtüştüğü görülmüştür.

Dresden Teknik Üniversitesi'nden Rüger ve diğ. (2014) ve Swiss Traction GmbH firmasının ortak olarak yürüttüğü çalışmada; enerji verimliliği yüksek, malzeme açısından ekonomik, emniyetli ve farklı sistemlere uyarlanabilir bir motor tasarımı amaçlanmıştır. Bunun için fiyatları gün geçtikçe artan mıknatısların maliyetini azaltmayı ve statordaki sargı yoğunluğunu artırmayı hedeflemişlerdir. Mıknatıs maliyetlerini düşürmek için motor paket uzunluğunu azaltmışlardır. Sargı yoğunluğunu artırmak için öncelikle stator oluk alanını artıracak stator diş yapısını paralelden trapezoidale çevirmişlerdir. Böylelikle daha geniş sargı alanı elde etmişler ve stator sargılarının tur sayısını artırabilmişlerdir. Karşılaştırdıkları motorun paket boyunun yarısına sahip olan test motorunun performans özellikleri deney düzeneği ile elde edilmiş ve verim açısından istenen iyileşmenin elde edilemediği tespit edilmiştir.

Puri ve diğ. (2017), dikey eksenli bir rüzgar türbininde verimliliği artırmak için dişli ile tahrik edilen generatörün yerine doğrudan tahrik edilen 500 KVA, 3.3 kV, 3-fazlı ve 600 rpm hızında içten ve dıştan rotorlu SM generatör tasarımı üzerine çalışmışlardır. Makine tasarımında yerçekimsel arama algoritmasının (Gravitational Search Algorithm-GSA) parçacık sürü optimizasyonu ile hibrit edildiği optimizasyon yöntemini kullanarak motor ağırlığını minimize etmeyi amaç edinmişlerdir. Yapılan tasarımlar sonucunda; dıştan

rotorlu SMSM'nin içten rotorlu SMSM'ye göre daha yüksek verim iyileşmesi sunduğu, sıcaklık artışının ve stator dişlerindeki akı yoğunluğunun daha düşük olduğu ve makine ağırlığının %32 azaldığı gözlenmiştir.

Bakhtiarzadeh (2017) ve Ergene ve diğ. (2018) yaptığı çalışmalarda Akar firmasının 4 kW'lık SMT 140 AC-15 tipi asansör motorunu incelemişler ve bu motorun akım-moment ve akım-verim gibi ilişkilerini hem simülasyon hem de test sonuçları ile doğrulamışlardır. Yaptıkları testler sonucu Akar SMSM'in ortalama verimini %74.2 olarak elde etmişler ve motorun performans grafiklerini paylaymışlardır. Ürettikleri prototip motorda Akar motorun dış çapında, paket boyunda ve oluk sayısında bazı değişiklikler yaparak motor veriminde iyileştirme yapmışlardır. Prototip motorda Akar motorun stator dış çapını 242 mm'den 262 mm'ye çıkarmışlar, paket uzunluğunu 150 mm'den 120 mm'ye düşürmüşler, mıknatıs tipini N38SH yerine N45SH kullanmışlar ve hava aralığını 1 mm'den 0.5 mm'ye düşürmüşlerdir. Mıknatıs tipindeki değişiklik ile hava aralığı akı yoğunluğu değerini 0.85 T yerine 0.9 T ile güncellemişlerdir. Prototip üretimini yaptıkları 54/16 oluk kutup oranına sahip motorun Akar motor ile karşılaştırması sonucu verim değeri %3 artmış, toplam hacim %5 azalmış, toplam motor ağırlığı %25 azalmıştır.

Bu tez çalışmasında, Bakhtiarzadeh ve Ergene'nin çalışmalarında paylaştığı Akar SMSM'nin verilerinden yararlanılmıştır. Tüm analiz ve test sonuçlarının paylaşılmış olması, piyasada yer alan herhangi bir motorun verilerini elde etmek için geçirilecek zamanı ortadan kaldırmıştır. Karşılaştırma motoru olarak Bakhtiarzadeh ve Ergene'nin incelediği Akar SMT 140 AC-15 tipi motor seçilmiştir.

2.3.3. Oluk-kutup oranı ve vuruntu momenti çalışmaları

Titreşimsiz ve sessiz tasarımlar için SM motorlardaki tork dalgalanmalarının ve vuruntu momentinin minimize edilmesi gerekmektedir. En uygun oluk-kutup oranının seçiminin vuruntu momenti üzerinde önemli etkileri vardır. Oluk sayısı cinsinden bobin adımı değeri (S_p) de önemli bir motor karekteristiği olup, değişen uygulamalardaki oluk-kutup oranına göre farklı bobin adımları kullanılmaktadır. Bobin adımının fazla olduğu tasarımlar uzun adımlı sargı, bobin adımının genellikle bir olduğu sargılar ise kısa adımlı sargılar olarak adlandırılmaktadır. Çınar (2008), elektrikli taşıtlarda teker içine

yerleştirilen dıştan rotorlu anahtarlamalı relüktans bir motorun tasarımını uzun adımlı sargı yapısını kullanarak tasarlamıştır. Kısa adımlı sargı yapısıyla uzun adımlı sargı yapısını karşılaştırmış ve nominal yükteki momentteki dalgalılık değerlerinin uzun adımlı sargıda daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Sonuç olarak, uzun adımlı sargı yapısına sahip dıştan rotorlu anahtarlamalı relüktans motorlarda dalgalılık kontrolü yapılmadan kullanımın uygun olmadığı tespit edilmiştir.

Aydın (2012), endüstride kullanılan fırçasız SM servo motorların sınıflandırılması, tipleri, avantajları ve dezavantajları ile alakalı bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada farklı tiplerdeki SM servo motorların birbirlerinden farkları, motorlarda kullanılan malzeme tipleri, motor tasarımı esnasındaki aşamalar ve kullanılan yazılımlar ayrıntılı olarak paylaşılmıştır. Tork kalitesine etki eden vuruntu momenti ve tork dalgalanması konularının araştırıldığı çalışma, SM servo motorları ile alakalı önemli bir kaynak olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tanç (2015), elektrikli bir bisiklet için 250 W çıkış gücüne ve 200 rpm anma hızına sahip, 36 oluklu, 34 kutuplu dıştan rotorlu fırçasız bir DC motor tasarımı ve prototip üretimi üzerine çalışmıştır. Konsantrik sargılı motorlardaki momentlerin daha yüksek, moment dalgalanmasının ise daha düşük olması sebebiyle motor tasarımında kesirli oluk sargı tipi seçilmiştir. ANSYS Maxwell RMxprt modülü ile çeşitli motor geometrileri tasarlanmış ve elde edilen optimum motor tasarımı ANSYS Maxwell elektromanyetik analizleri ile doğrulanmıştır. Generatör olarak çalıştırılan bir makinenin ve tork sensörünün bulunduğu deney düzeneği ile değişken yükler altında motor performansı test edilmiş ve üretilen prototip motorun karakteristik eğrileri elde edilmiştir.

Salminen (2004) ve Gündoğdu (2012) kesirli oluk sargı yapısına sahip SMSM'leri incelemişlerdir. Salminen, hangi oluk-kutup oranının daha yüksek çıkış torkuna sahip olduğunu bulabilmek için farklı kesirli oluklu motorlar üzerinde çalışmıştır. Kesirli oluğa sahip makinelerde sargı faktörünün çıkış torkunu muhakkak etkilemediğini, oluk sayısının tek olduğu veya $N_{oluk} \approx 2p$ (oluk sayısı=2*kutup sayısı) olduğu durumlarda dengesiz bir manyetik çekim kuvvetinin ortaya çıktığını tespit etmiştir. Mıknatıs ve makine ölçülerinin sabit tutulduğu durumlarda; oluk sayısının sabit tutulup kutup sayısının artırılması çıkış torkunu düşürmüştür. Tam aksine oluk sayısının artırılıp, kutup

sayısının sabit tutulduğu durumlarda ise çıkış torku artmıştır. Oluk ve kutup sayıları düşük olduğunda, yüzey mıknatıslı motorlar aynı çerçeve boyutlarına sahip gömülü mıknatıslı motorlardan daha yüksek çekme kuvvetleri üretmektedir. Yetiş (2017) ve Yetiş ve diğ. (2018), NdFeB ve SmCo gibi mıknatıslara göre maliyeti oldukça düşük olan ferrit mıknatısları kullanmıştır. 630 kg yolcu taşıma kapasitesine sahip gömülü tip SMSM tasarımını MotorSolve (2017) yazılımını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Farklı oluk-kutup oranlarına sahip motor yapılarını ve parametrik optimizasyon yöntemlerini kullandıkları çalışmalar sonucunda, yüzey mıknatıslı motor topolojisine göre %60 daha az maliyetli, %5 daha az tork dalgalanmasına sahip, fakat verimi % 7 daha düşük olan bir motor elde etmişlerdir.

Karnavas ve diğ. (2015), hafif elektrikli araçlar için konsantre sargılı, dıştan rotorlu bir SMSM tasarımı üzerine çalışmışlardır. Oluk kutup oranı 54/48 ve 63/60 olan iki farklı motor topolojisi üzerinde yaptıkları tasarım çalışmaları sonucu, oluk kutup oranı 54/48 olan tasarım daha hafif iken 63/60'lık tasarım daha iyi batarya ömrü ile daha uzun araç menzili sunmuştur.

SMSM'ler yüksek hızlarda çalışırken veya dıştan rotorlu motor yapısı kullanıldığında, tork dalgalanması rotorun ataleti ile absorbe edilebilmektedir (Wang ve diğ., 2005). Fakat düşük hızlara inildiğinde rotorun dalgalanma eğilimi hızın kararlılığını ve hassasiyetini daha fazla etkilemektedir. Diş etkisi olarak da anılan vuruntu momenti, mıknatıslar ve stator dişleri arasındaki etkileşimin teğetsel bileşeninden oluşmaktadır. Özellikle düşük hızlardaki motor kontrolünde, vuruntu momenti titremeye ve gürültüye sebep olmaktadır. Ortaya çıkan tork dalgalanmasını azaltmak için endüklenen elektromotor kuvvetindeki ve akımdaki harmoniklerin azaltılması gerekmektedir. Bunun için kutup-faz başına düşen oluk sayısı (q) artırılabilir, kısa adımlı stator sargı tipi seçilebilir, statordaki ve uyarma alanındaki akımın ideal sinüsoidal sinyale yaklaşması sağlanabilir (Wang ve diğ., 2005). Wang ve diğ. 45 oluklu, 12 kutuplu ve 0.8 sargı faktörüne sahip SMSM'yi üretip test etmişler ve hem düşük hızlarda hem de yüksek hızlarda yumuşak çalışan, gürültüsü ve titreşimi az olan, yüksek verimli bir asansör motoru elde etmişlerdir.

Li ve diğ. (2008), SMSM'lerdeki mıknatısların üst yüzeylerinin silindirik şekilde üretilmesinin toplam harmonik bozulmaları (THB) azaltılabileceğini öne sürmüşlerdir.

Maxwell yazılımını kullanarak, THB'yi %1'in altında tutacak şekilde kutup sayısına, rotor ölçüsüne ve mıknatıs kalınlığına göre mıknatıstaki silindiriklik çapını optimize etmişler ve ürettikleri prototip motorlarda analiz sonuçlarının doğruluğunu ispat etmişlerdir.

2.3.4. İçten rotorlu ve dıştan rotorlu SM motorların karşılaştırma çalışmaları

Tarımer ve Ocak (2009), yüzey mıknatıslı içten rotorlu ve dıştan rotorlu SM makine topolojilerini tork, ağırlık, makine dış çapı, makine uzunluğu, toplam hacim, üretilen güç ve verim kriterlerini baz alarak ANSYS Maxwell RMxprt modülünü kullanarak karşılaştırmıştır. Karşılaştırma sonucunda; dıştan rotorlu SM makinelerinin içten rotorlu SM makinelere göre daha hafif ve az maliyetli olduğunu, içten rotorlu SM makinelerin ise verim ve çıkış güçlerinin daha fazla ve sıcaklık yoğunluklarının daha az olduğunu tespit etmişlerdir.

Reichert ve diğ. (2009), maksimum torku elde etmek için içten rotorlu ve dıştan rotorlu SM motor topolojilerini ölçeklendirme kanuna göre karşılaştırmıştır. Bunun için ilk önce hem içten rotorlu hem de dıştan rotorlu motorun analitik denklemlerini çıkarmışlar ve Maxwell 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi analizleri ile denklemleri doğrulamışlardır. Analitik tork denklemlerine göre; stator alanının toplam motor alanına oranının %53'ü geçtiği durumlarda dıştan rotorlu motorun daha avantajlı olduğunu, %84'ü geçtiği durumlarda ise içten rotorlu motorun ürettiği torkun iki katı kadar tork elde edildiğini tespit etmişlerdir. Sargı alanı ve hava aralığı çapının motor çapına oranını inceledikleri çalışmada, manyetik olarak doyuma ulaşılmadıkça analitik denklemlerin tork tahmininde doğru sonuçlar verdiğini kanıtlamışlardır. İçten rotorlu motor yapısında stator alanının motor alanına oranının 1:2 olduğu durumda maksimum tork değerlerine ulaşıldığını, dıştan rotorlu motor yapısında ise ihtiyaç duyulan manyetik alanı oluşturacak yeterli alan rotora bırakıldıktan sonra stator alanının maksimum olacak şekilde seçilmesinin tork değerlerini artıracağını belirtmişlerdir.

Bonthu ve diğ. (2015), içten ve dıştan rotorlu senkron relüktans motor topolojilerini karşılaştırmışlar ve dıştan rotorlu motor yapısının daha geniş stator alanına müsaade ettiğini, dolayısıyla sargılar için daha fazla alan elde edildiğini belirtmişlerdir. Bu durum

motorun çıkış torkunu içten rotorlu motora göre arttırmış ve aynı zamanda tork dalgalanması da azalmıştır.

Arslan (2014) yüksek hızlı ve yüzey yerleştirmeli bir SM generatörün tasarımını, üretimini ve testlerini gerçekleştirmiştir. Ansys Maxwell yazılımı ile yaptığı analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile karşılaştırmasını yapmış, analiz ve test verilerinin uyumlu olduğunu tespit etmiştir. Yüzey yerleştirmeli SM makinanın matematiksel modeli ve boyutlandırma denklemlerinin de anlatıldığı çalışmada, kayıpların önceden tahmin edilmesini sağlayan eşitlikler elde edilmiştir.

2.3.5. Mukavemet ve trafik hesapları ile ilgili çalışmalar

Asansör sistemleriyle alakalı literatürde farklı çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalarda trafik hesapları, mukavemet hesapları, karşı ağırlık hesapları, dinamik hesaplar gibi konular çalışılmıştır. Bir binadaki yolcu trafiği gelen, giden ve katlar arası trafik olarak üçe ayrılmaktadır. Siikonen (1997) yaptığı çalışmada ALT simülatörü kullanarak bu trafiği optimize eden bir model geliştirmiştir. TMS9000 kontrol sisteminin kullanıldığı çalışmada, haftanın her günü yolcuların trafik bilgisi sistem tarafından öğrenilmektedir. Sistem farklı katlarda ve farklı yönlerde trafiğin yoğun olduğu saatlerde çağrı sürelerinde ve yolcu bekleme sürelerinde %35-40'lık bir iyileşme sağlamıştır. Kocaman (2012) ise çift katlı asansörlerin analitik modelini, tasarımını ve yolcu trafiğini simülasyon çalışmaları ile birlikte incelemiştir.

Jordaan (2014) makine öğrenmesi ve yapay sinir ağları yardımıyla asansörlerdeki yolcu trafik kontrolünü amaç edinmiştir. Yapay zekaya sahip kontrolör vasıtasıyla insan müdahalesi olmadan kontrol parametrelerinin değiştirilmesini ve gerçek bir asansör sistemine uygulanmasını amaçlamıştır. Bunun için bekleme süreleri ve güç tüketimi verileri makine öğrenmesi ile değerlendirilmiş ve akıllı bir asansör kontrol sistemi elde edilmiştir.

Onur (2006), normal çalışma koşulları altında kabine binen yüklerin asansör karkas elemanları üzerinde oluşturduğu gerilme ve yer değiştirme değerlerini analitik ve sonlu elemanlar yöntemleri ile incelemiştir. Asansörlerin hesap, tasarım ve yapım kuralları (TS

1812) standardına göre kabin üst ve alt kirişindeki yer değiştirme değerinin kiriş boyunun binde birini aşmaması gerekmektedir. Onur'un yaptığı SEA'lara göre üst ve alt kirişlerdeki deformasyonlar bu değerin çok altında çıkmıştır.

Kaya (2006), asansörlerin Avrupa Standartlarına uygun şekilde üretilip üretilmediğini ve CE (Conformite European) işaretlemesinin detaylarını araştırmıştır. Yaptığı çalışmada asansörlerin mukavemet hesaplarını ve asansörlerdeki CE standartları ile ilgili uygulamaları detaylı olarak sunmuştur. Sonuç olarak ülke çapında CE standartlarının yeteri kadar bilinmediğini ve uygulamalarda bazı eksiklikler olduğunu tespit etmiştir.

Asansör sistemlerinde paraşüt fren sisteminin devreye girmesi sonucu güvenlik tertibatları yüksek gerilmelere ve frenleme ivmelerine maruz kalmaktadır (Bedir, 2007). Güvenlik tertibatlarının gerilme ve fren ivmeleri 30.10.2014 tarihli TS EN 81-20 standardında belirtilen güvenlik kurallarına uygun olmalıdır. Bedir (2007), modern paraşüt sistemlerini, kılavuz rayları ve regülatörleri incelemiş, SEA, analitik ve deneysel metotlarla silindir tipi ani frenlemeli güvenlik tertibatının analizlerini gerçekleştirmiştir. SEA ile elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar arasında montaj, üretim hataları ve ek sürtünmeden kaynaklandığı düşünülen %4.5-%7 arasında farklar oluşmuştur. Sonuç olarak, SEA metodunun asansör güvenlik sistemleri tasarımında yeterli sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Asansör sistemlerinde karşı ağırlık kabin ve içindeki yükleri dengelemek için kullanılmaktadır. Ertürk (2008) karşı ağırlığın hangi yüklere maruz kalabileceğini, buna göre karşı ağırlığın dayanıklılığını maliyet kısıtını da dikkate alarak incelemiştir. Tasarım ve analizlerde SolidWorks ve CosmosWorks yazılımlarından yararlanmış ve 6 mm saç kalınlığına sahip karşı ağırlığın mekanik frenleme esnasında en dayanıklı tasarım olduğunu tespit etmiştir.

Özel (2011), asansörlerdeki taşıyıcı elemanlar olan askı kirişlerinin dinamik yükler altındaki gerilme ve yer değiştirmelerini Ansys Workbench yazılımı yardımıyla incelemiştir. Yazılım ile elde ettiği gerilme ve yer değiştirme değerleri analitik yöntemle elde edilen değerlerle genellikle örtüşmüştür. Özel, güvenlik sınırları içinde kalacak şekilde sistemde optimizasyon yapmış ve üst askı kirişinin UPN100 olan profilini UPN65

ile, alt askı kirişinin UPN100 olan profilini UPN50 ile, yan kirişlerin UPN65 olan profilini ise UPN50 ile değiştirerek sistemin tümünün ağırlığını 33.89 kg aşağı çekmiştir.

Bayraktar (2015), elektrik motor üretiminde kullanılan silisli saçların lazer, su jeti, tel erezyon ve kesme kalıbı gibi farklı yöntemlerle kesilmesinin motor performansı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Yapılan testler sonucu en yüksek verim değeri tel erezyon ile kesilen saç paketleri ile elde edilmiştir. Tel erezyon yöntemini sırasıyla kesme kalıbı, lazer ve su jeti ile kesilen saç paket verimleri takip etmiştir. Bayraktar, en yüksek verim tel erezyonda olmasına rağmen seri üretimin yapılacağı durumlarda daha az maliyetli olan kesme kalıbı yönteminin, özel amaçlı prototip motor üretimlerinde ise lazer veya tel erezyon yöntemlerinin seçilmesinin daha avantajlı olacağını belirtmiştir.

Yapılan çalışmalar, motor tasarımının elektriksel ve mekaniksel birçok aşamasının olduğunu göstermektedir. En uygun motor tasarımının elde edilebilesi için motorun modelinin elde edildiği, ardından ise çeşitli simülasyon ve benzetim yazılımları ile tasarımların doğrulandığı gözlenmiştir. Optimizasyon çalışmalarındaki amaç fonksiyonlarının, motor tasarımında hangi alanlara yoğunlaşılacağına karar vermede önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Seçilen amaç fonksiyonuna göre, bazı dezavantajlı performans kriterlerinin hedefe ulaşmak üzere yok sayıldığı gözlenmiştir. Asansör sistemleri için tasarlanan tahrik motorları üzerindeki maksimum statik ve dinamik yüklere göre mukavemet hesaplarının dikkatlice yapılması gerektiği, düşük vuruntu momentlerine sahip konforlu motorların elde edilebilmesi için çıkış torklarındaki dalgalanmaların minimize edilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Literatür ışığında elde edilen bilgiler doğrultusunda, motor tasarım aşamalarına geçilmiş ve doğrudan sürüşlü, dıştan rotorlu bir SMSM asansör motorunun tasarımı ve prototip üretimi yapılarak simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca, üretilen prototip motor sektörde satışı gerçekleştirilen içten rotorlu bir SMSM ile karşılaştırılmıştır. Yapılan literatür araştırmalarına göre bu tez, dıştan rotorlu SMSM asansör motorları alanında yapılan ilk tez olma özelliğine sahiptir.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde SMSM'lerin özellikleri, farklı topolojileri, kullanılan malzemeler ve özellikleri, analitik hesaplamaları, manyetik ve elektrik eşedeğer devre modelleri, kayıpları, tasarım süreçleri ve deney düzeneğinin özellikleri yer almaktadır. En uygun oluk-kutup ve kutup aralığı oranları üzerinde özellikle durulmuştur. Bu konuların literatürle ilişkileri ve tasarlanan motorda seçilen en uygun oluk-kutup ve kutup aralığı oranları ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Ardından stator oluk ve dişlerinin optimum tasarımında kullanılan ABC algoritması anlatılmıştır. Elde edilen tüm sonuçlara göre dıştan rotorlu SMSM'nin geometrik değerleri ise Bölüm 4'te paylaşılmıştır. Üretimi yapılan dıştan rotorlu SMSM, ticari bir ürünle karşılaştırıldığı için bazı motor ölçüleri sabit tutulmuş ve tüm tasarım süreçleri bu doğrultuda yürütülmüştür.

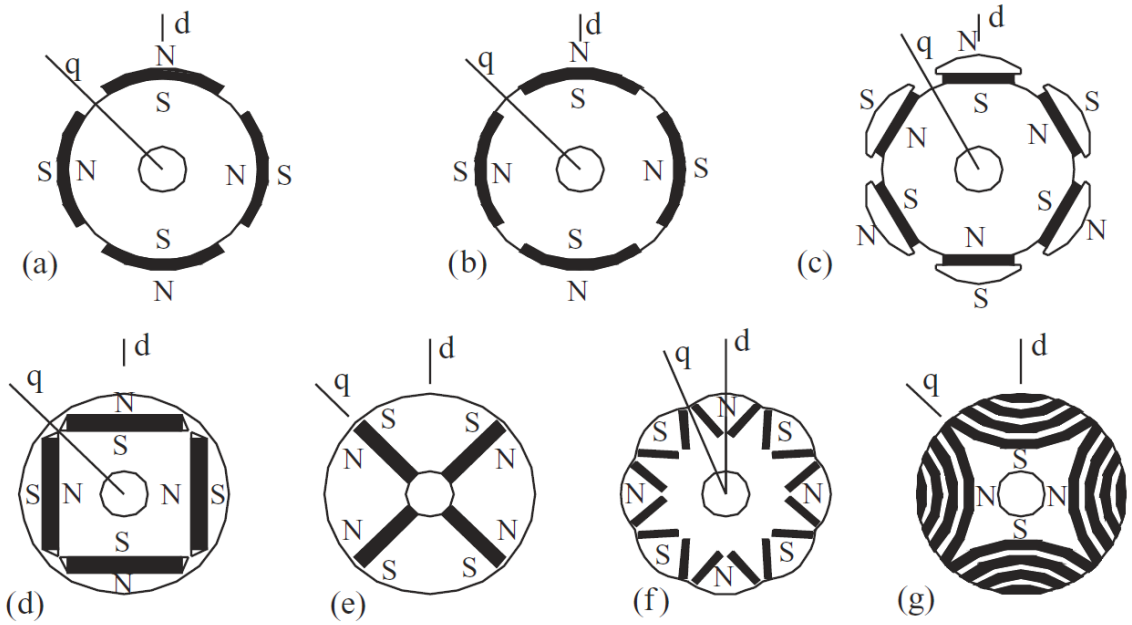
3.1. SMSM'lerin Özellikleri ve Sınıflandırılması

SMSM'lerin çalışma prensibi asenkron motorlardan önce sunulmasına rağmen, AlNiCo mıknatısların enerji yoğunluklarının düşük olması nedeniyle ilk zamanlarda kullanım alanı küçük boyutlu ve düşük güçlü uygulamalarla sınırlı kalmıştır. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip nadir toprak elementlerinin bulunmasından itibaren, yani 1970'li yıllardan sonra yüksek güç yoğunluğuna sahip SMSM'ler üretilmeye başlanmıştır (Heikkila, 2002). SM motorları yüksek verimli, uzun ömürlü, sessiz, tork-hız karakteristiklerinin ve birim hacim başına üretilen tork miktarlarının yüksek olması gibi avantajları sayesinde endüstride sıklıkla tercih edilmeye başlamışlardır.

Literatürde SM motorların farklı sınıflandırmaları mevcuttur. SM motorlar mıknatısların rotordaki yerleşimine göre yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı olarak iki ana gruba ayrılmakla birlikte Şekil 3.1'de en çok kullanılan rotor topolojileri ayrıntılı olarak verilmiştir. Yüzey mıknatıslı motorlarda kutup başına kullanılan mıknatıs miktarı ve

dolayısıyla üretilen tork miktarı da artmıştır. Mıknatıs kullanımının artması aynı zamanda motor maliyetlerini de belli ölçülerde artırmaktadır (Aydın, 2012). Yüzey mıknatıslı motorlarda akı, mıknatıs üzerinden doğrudan hava aralığına ve statora geçerken, gömülü mıknatıslı motorlardaki akı ilk önce mıknatıslardan rotor nüvesine geçmektedir.

SM motor katagorisinde temelde AC ve DC olmak üzere iki tip motor yer almaktadır. Bunlar SMSM ve BLDC motorlar olarak bilinmektedir. SM motorlar akı yoğunluğu dağılımı ve uyartım akımlarının şekillerine göre sinüsoidal ve dikdörtgensel olmak üzere iki katagoride incelenebilmektedir. SMSM'lerin akı yoğunluğu, uyartım akımları ve zıt EMK şekilleri sinüsoidal iken BLDC'lerin dikdörtgenseldir (Aydın, 2012). Tablo 3.1'de uyartım akımlarına ve zıt EMK şekillerine göre SM motorların sınıflandırması gösterilmiştir.

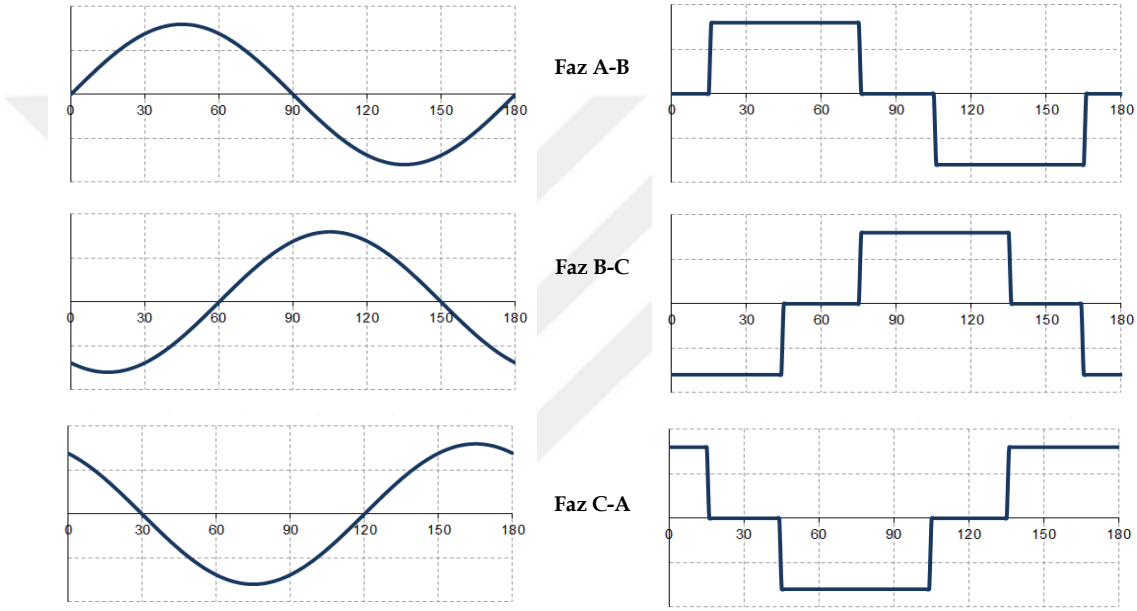


Şekil 3.1. SMSM'lerin rotor topolojileri a) Yüzey mıknatıslı b) Yüzeye gömülü c) Kutup çarıklı d) Teğetsel gömülü mıknatıslı e) Radyal gömülü mıknatıslı f) V diziliminde kutup başına iki mıknatıslı g) SM senkron relüktans rotor (Pyrhonen ve diğ., 2013)

Tablo 3.1. Uyartım akımlarına ve zıt EMK şekillerine göre SM motorların sınıflandırması (Aydın, 2012)

	SMSM	**BLDC**
Faz uyartım akımları	Sinüsoidal	Trapezoidal
Akı yoğunluğu	Sinüsoidal	Kare
Faz zıt EMK'sı	Sinüsoidal	Trapezoidal
Güç ve Tork	Sabit	Sabit

Tablo 3.1'de belirtilen sinüsoidal ve trapezoidal zıt EMK dalga şekillerinin faz grafikleri Şekil 3.2'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Zıt EMK dalga şekillerine benzer olarak, SM motorların besleme akımlarının dalga şekilleri de kullanılan sürücüler vasıtasıyla sinüoidal veya trapezoidal olarak üretilmektedir. SM motorlar akı tiplerine göre radyal akılı veya eksenel akılı olarak sınıflandırılmaktadır. Eksenel akılı motorlardaki mıknatıs hacimlerinin büyük olması maliyetleri artırmaktadır. Endüstrideki birçok uygulama radyal akılı motor tipine sahiptir ve bu tez çalışmasında da radyal akılı bir motor tasarlanmıştır. Bu yüzden eksenel akılı motorlar üzerinde durulmamıştır.

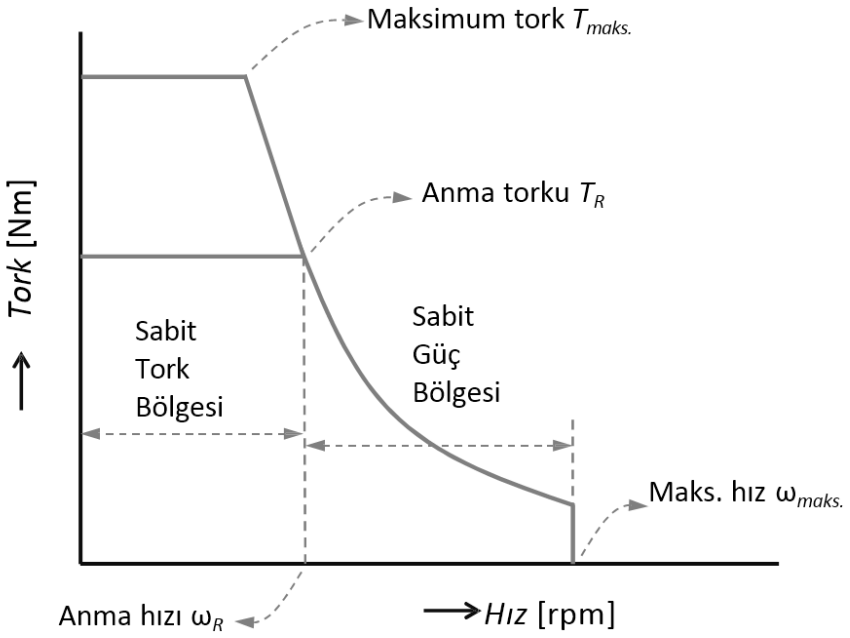


Şekil 3.2. SM motorların (a) sinüsoidal ve (b) trapezoidal zıt EMK dalga şekilleri (Aydın, 2012)

SM motorlarda anma (nominal) torku (T_R) ve maksimum tork ($T_{maks.}$) olmak üzere iki temel tork parametresi vardır. Ayrıca anma hızı (ω_R) ve maksimum hız ($\omega_{maks.}$) olmak üzere iki temel hız paremetresi bulunmaktadır. SM motorların tork-hız karekteristiği Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Anma hızına kadar olan bölge sabit tork bölgesi, anma hızı ile maksimum hız arasında kalan bölge ise sabit güç bölgesi olarak adlandırılmaktadır. SM motorlar anma torkuna kadar olan sabit tork bölgesinde herhangi bir termal problemle karşılaşılmadan yüklenebilmektedir. Sabit güç bölgesinde ise çıkış torku düşme eğilimindedir ve hız artışına bağlı olarak çıkış gücü sabit kalmaktadır. SM motorların bir diğer önemli bir parametresi motorun aşırı yük kapasitesini gösteren maksimum yük

noktasıdır ve bu parametre özellikle kalkış anında motorun daha yüksek tork ürettiğini göstermektedir (Aydın, 2012).

Bir diğer SM motor sınıflandırması motorların kullanım alanlarına göre yapılmaktadır. Bu sınıflandırmada sabit yüklü, değişken yüklü ve konum kontrollü uygulamalarda kullanılan motorlar olarak üç grup yer almaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında, değişken yüklerde asansör kabinini sabit hızla hareket ettirecek bir asansör tahrik motoru çalışılmıştır.



Şekil 3.3. SM motorların tork-hız karakteristiği (Aydın, 2012)

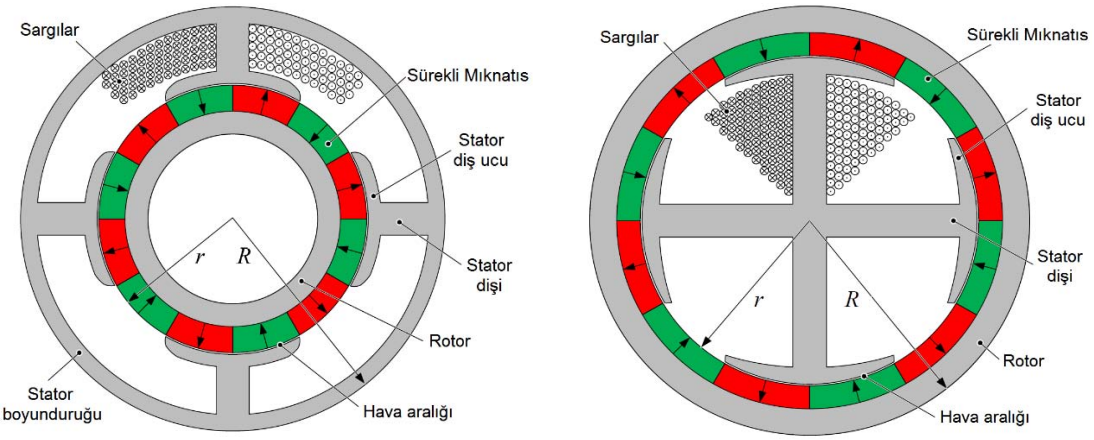
3.1.1. İçten ve dıştan rotorlu SMSM'ler

SMSM'lerin dönen kısımları rotor (endüvi-armatür), sargıların yer aldığı kısımları ise stator (endüktör) olarak adlandırılmaktadır. Geleneksel motorların çoğu içten rotorlu motor yapısına sahip iken teker içi motorlar, fan motorları ve rüzgar türbinleri dıştan rotorlu motor yapısına sahiptir. İçten rotorlu motorlarda hareket enerjisi, rotordan bağlı olduğu mile ve milden de kayış, kasnak, zincir, dişli vb. gibi hareket iletim elemanları ile yüke aktarılmaktadır. Dıştan rotorlu motor uygulamalarında ise rotor doğrudan hareketin iletileceği birime bağlanmakta ve herhangi bir hareket aktarma elemanına ihtiyaç duyulmamaktadır. Rotor montajı teker içi motorlarda doğrudan tekerlek jantına, fanlarda doğrudan pervaneye, rüzgar türbininde ise doğrudan kanatlara yapılmaktadır. Böylelikle

bu sistemler kompakt bir yapıya kavuşmakta ve hareket aktarma elemanlarından kaynaklanan enerji kayıpları ve ek maliyetler ortadan kaldırılmaktadır. Şekil 3.4'te içten ve dıştan rotorlu motor topolojileri gösterilmiştir. İçten ve dıştan rotorlu motorların birbirine göre bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Dıştan rotorlu motor yapısının sunduğu avantajlar şöyle sıralanabilir (Allied Motion, 2016):

- Yüksek ataletlidirler ve vuruntu momentleri çok düşük seviyededir.
- Hava boşluğu yarıçapının büyük olması, yüksek çıkış torklarının elde edilmesini sağlar.
- Hareket birimi rotora doğrudan monte edilebilir ve kompakt bir yapı ortaya çıkar.
- Yüksek atalet, daha kararlı düşük hız performansı sağlar.
- Yüksek moment, düşük vuruntu ve alçak çalışma sesleri dolayısıyla sessiz ortamlar için idealdir.
- Dıştan rotorlu tasarımlar, aynı performans seviyesi için içten rotorlu tasarımlardan eksenel olarak daha kısadır. Dolayısıyla dıştan rotorlu tasarımlar içten rotorlu tasarımlardan genellikle %15 daha hafiftir (Meier, 2008).
- Stator dişleri dışarı doğru baktığından sargılar içten rotorlu tasarımlara göre daha kolay sarılabilmektedir (Martinez, 2012).

Bahsi geçen avantajların yanı sıra dıştan rotorlu motor yapısının bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Dıştan rotorlu tasarımların ısınma oranı, bakır kayıpları ve akı yoğunluğu daha fazladır.



Şekil 3.4. İçten ve dıştan rotorlu motor topolojileri (Reichert ve diğ., 2009)

3.1.2. Stator ve Sargılar

SMSM'lerde stator, makinanın sabit yani duran kısmıdır. Stator, sargıların sarıldığı paketlenmiş ve preslenmiş çelik saç nüvelerden meydana gelmektedir (Yıldız, 2009). Saç nüveler silisli yapıdadır. Bu sayede manyetik kayıplar minimuma indirgenir ve saçların manyetik özellikleri maksimum seviyeye çıkarılmış olur. Tablo 3.2'de tane yönlendirilmemiş silisli saçların manyetik özellikleri paylaşılmıştır.

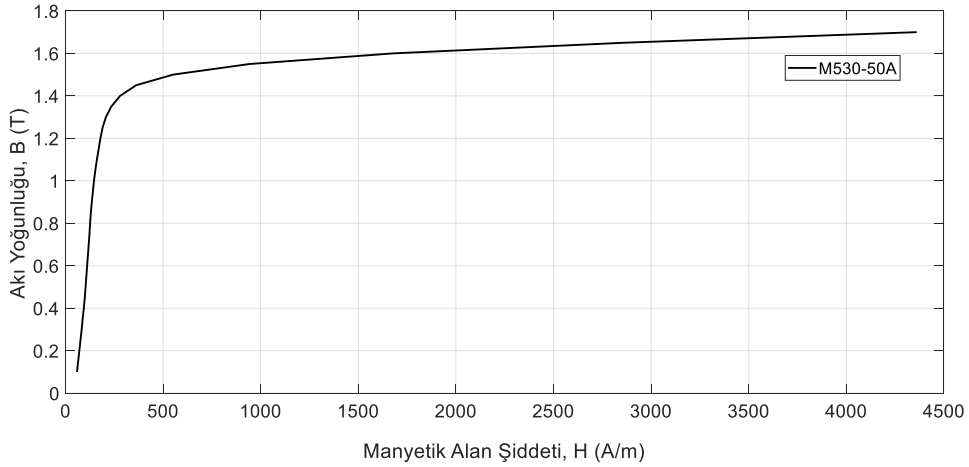
Tablo 3.2. Tane yönlendirilmemiş silisli saçların manyetik özellikleri (Cogent Steel, 2016)

Cinsi	Saç kalınlığı	50 Hz'deki Maksimum Spesifik Toplam Kayıp		50 Hz'deki minimum manyetik polarizasyon			Yoğunluk
		$\hat{B}$=1.5T	1.0T*	$\hat{H}$=2500	5000	10000 A/m	
		W/kg	W/kg	T	T	T	kg/dm^3
M210-35A	0.35	2.10	0.90	1.49	1.60	1.70	7.60
M230-35A	0.35	2.30	0.95	1.49	1.60	1.70	7.60
M235-35A	0.35	2.35	0.95	1.49	1.60	1.70	7.60
M250-35A	0.35	2.50	1.00	1.49	1.60	1.70	7.60
M270-35A	0.35	2.70	1.10	1.49	1.60	1.70	7.65
M300-35A	0.35	3.00	1.20	1.49	1.60	1.70	7.65
M330-35A	0.35	3.30	1.30	1.49	1.60	1.70	7.65
M230-50A	0.50	2.30	1.00	1.49	1.60	1.70	7.60
M250-50A	0.50	2.50	1.05	1.49	1.60	1.70	7.60
M270-50A	0.50	2.70	1.10	1.49	1.60	1.70	7.60
M290-50A	0.50	2.90	1.15	1.49	1.60	1.70	7.60
M310-50A	0.50	3.10	1.25	1.49	1.60	1.70	7.65
M330-50A	0.50	3.30	1.35	1.49	1.60	1.70	7.65
M350-50A	0.50	3.50	1.50	1.50	1.60	1.70	7.65
M400-50A	0.50	4.00	1.70	1.53	1.63	1.73	7.70
M470-50A	0.50	4.70	2.00	1.54	1.64	1.74	7.70
M470-50HP	0.50	4.70	2.20	1.63	1.71	1.81	7.70
M530-50A	0.50	5.30	2.30	1.56	1.65	1.75	7.70
M530-50HP	0.50	5.30	2.30	1.63	1.71	1.81	7.80
M600-50A	0.50	6.00	2.60	1.57	1.66	1.76	7.75
M700-50A	0.50	7.00	3.00	1.60	1.69	1.77	7.80
M800-50A	0.50	8.00	3.60	1.60	1.70	1.78	7.80
M310-65A	0.65	3.10	1.25	1.49	1.60	1.70	7.60
M330-65A	0.65	3.30	1.35	1.49	1.60	1.70	7.60
M350-65A	0.65	3.50	1.50	1.49	1.60	1.70	7.60
M400-65A	0.65	4.00	1.70	1.52	1.62	1.72	7.65
M470-65A	0.65	4.70	2.00	1.53	1.63	1.73	7.65
M530-65A	0.65	5.30	2.30	1.54	1.64	1.74	7.70
M600-65A	0.65	6.00	2.60	1.56	1.66	1.76	7.75
M600-65HP	0.65	6.00	2.60	1.63	1.72	1.82	7.80
M700-65A	0.65	7.00	3.00	1.57	1.67	1.76	7.75

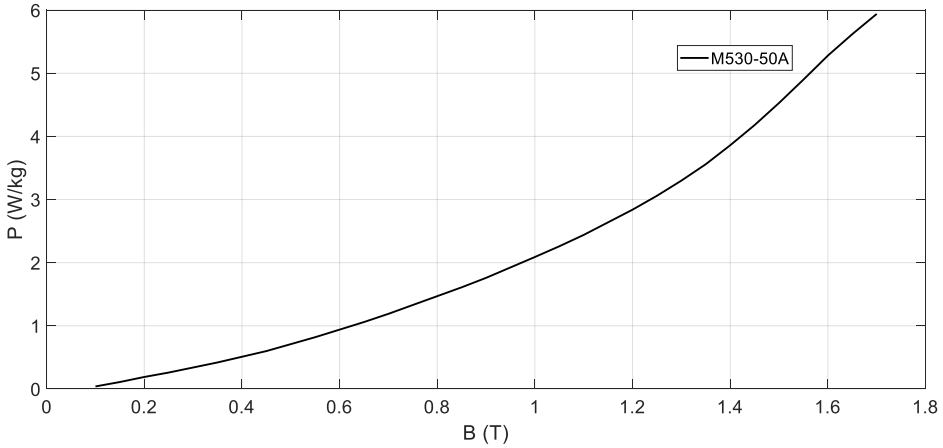
M800-65A	0.65	8.00	3.60	1.60	1.70	1.78	7.80
M600-100A	1.00	6.00	2.60	1.53	1.63	1.72	7.60
M700-100A	1.00	7.00	3.00	1.54	1.64	1.73	7.65
M800-100A	1.00	8.00	3.60	1.56	1.66	1.75	7.70
M1000-100A	1.00	10.00	4.40	1.58	1.68	1.76	7.80

* $\hat{B}$ manyetik polarizasyonun tepe değerini Tesla cinsinden, $\hat{H}$ ise manyetik alan şiddetinin tepe değerini A/m cinsinden temsil etmektedir.

M250-M350 aralığındaki kg başına watt kaybı düşük olan saçlar araştırılmış fakat prototip üretim için uygun olan levha formunda saçlardan bulunamamıştır. Tespit edilen firmaların (Doguş kalıp, Doğusan Metal, Celsac, Sermetalsac, Arena Metal) genellikle rulo formundaki saçları seri üretim yapan firmalara sattıkları gözlenmiştir. Bu tez çalışmasındaki prototip motor için levha formunda tedarik edilebilen silisli saçlar M530-50A olmuştur. M250-M350 aralığındaki saçlar yerine M530 tipi saç kullanılması kg başına kayıpları yaklaşık 3 W arttırmıştır. M530-50A tipi silisli saçın manyetik özelliklerini gösteren B-H grafiği Isovac (2018) firmasından alınan değerlere göre çizdirilmiş ve Şekil 3.5'te paylaşılmıştır. Şekil 3.6'da ise M530-50A tipi silisli saçın 50 Hz'deki demir kayıpları grafiği Watt/Kg cinsinden verilmiştir. Eğrinin büküm bölgesinden sonraki bölümü doyum bölgesi olarak adlandırılmakta ve bu bölgede manyetik alan şiddeti ne kadar artırılırsa artırılsın akı yoğunluğunda bir değişim olmamaktadır. Bu yüzden motorların optimum çalışma noktası, B-H eğrisinin büküm bölgesidir.



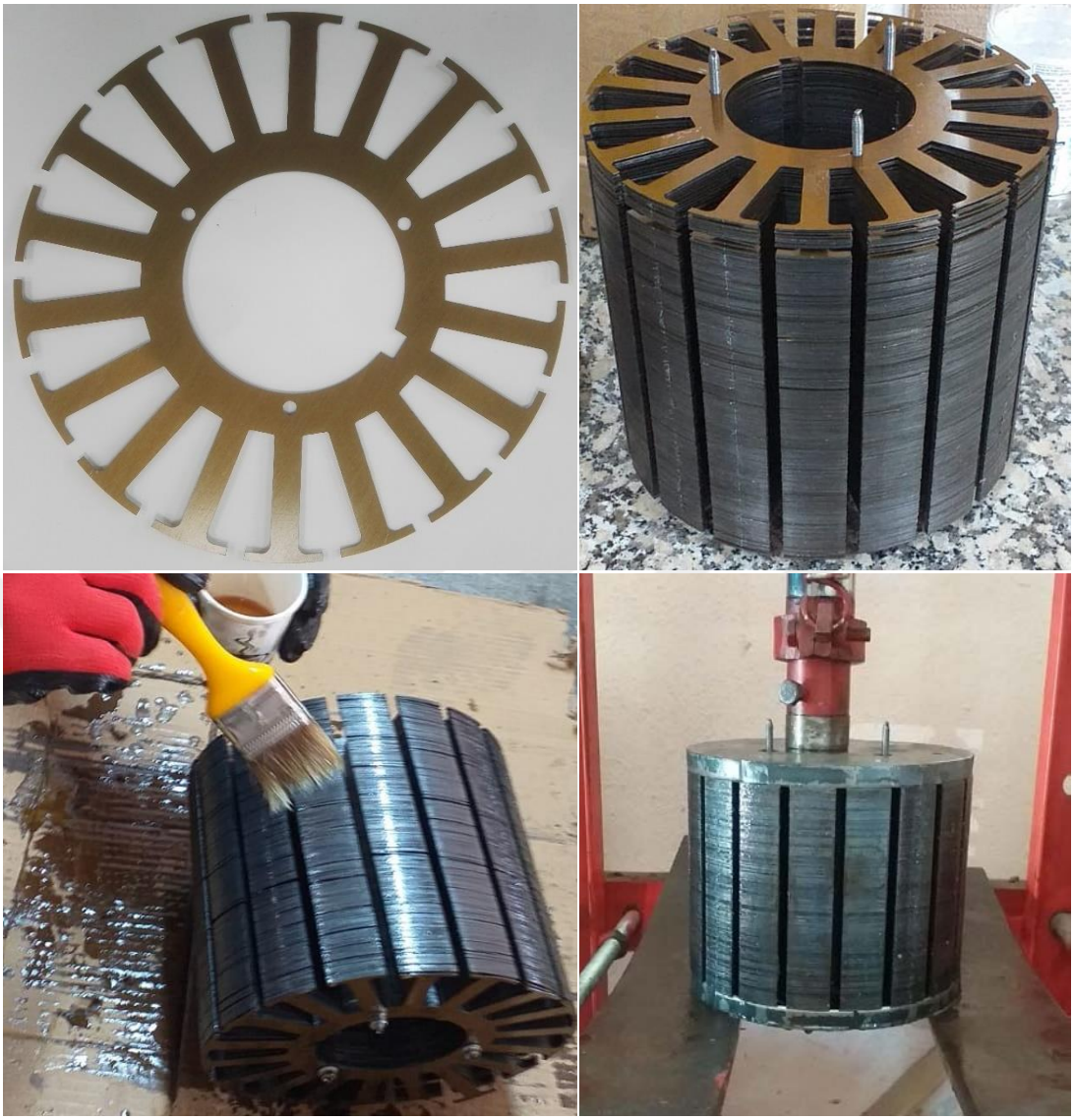
Şekil 3.5. M530-50A tipi silisli saçın B-H grafiği



Şekil 3.6. M530-50A tipi silisli saçın 50 Hz'deki demir kayıpları

Saç nüveler özel kesme kalıplarıyla, lazerle, tel erezyonla veya su jeti yöntemiyle kesilerek istenilen oluk şeklini alırlar (Bayraktar, 2015). Ardından nüveler preslenerek sabitlenir ve SMSM'nin statoru üretilmiş olur. Saç kalınlıkları gerilim frekansı, nüve kayıpları ve maliyetler dikkate alınarak hesaplanmaktadır (Yan, 2009). Preslenmiş saçların uzunluğu makinanın elektromanyetik boyutunu belirlemektedir. Statorun oluk sayısı faz sayısına, sargı sayısına ve rotor kutup sayısına bağlı olarak seçilmektedir. Vuruntu momentini minimize etmek için genellikle kesirli bir oluk/kutup oranı tercih edilmektedir (Hemati, 1992; Yedemale, 2003). SMSM'lerin sargıları asenkron motorlarda olduğu gibi üçgen (Δ) veya yıldız (Y) bağlanabilir (Yan, 2009). Üçgen bağlantı şekli düşük hızlarda düşük tork gereksinimi olan yerlerde kullanılırken, yıldız bağlantı şekli düşük hızlarda yüksek tork gereksinimi olan yerlerde tercih edilmektedir (Gambhir ve Jha, 2013).

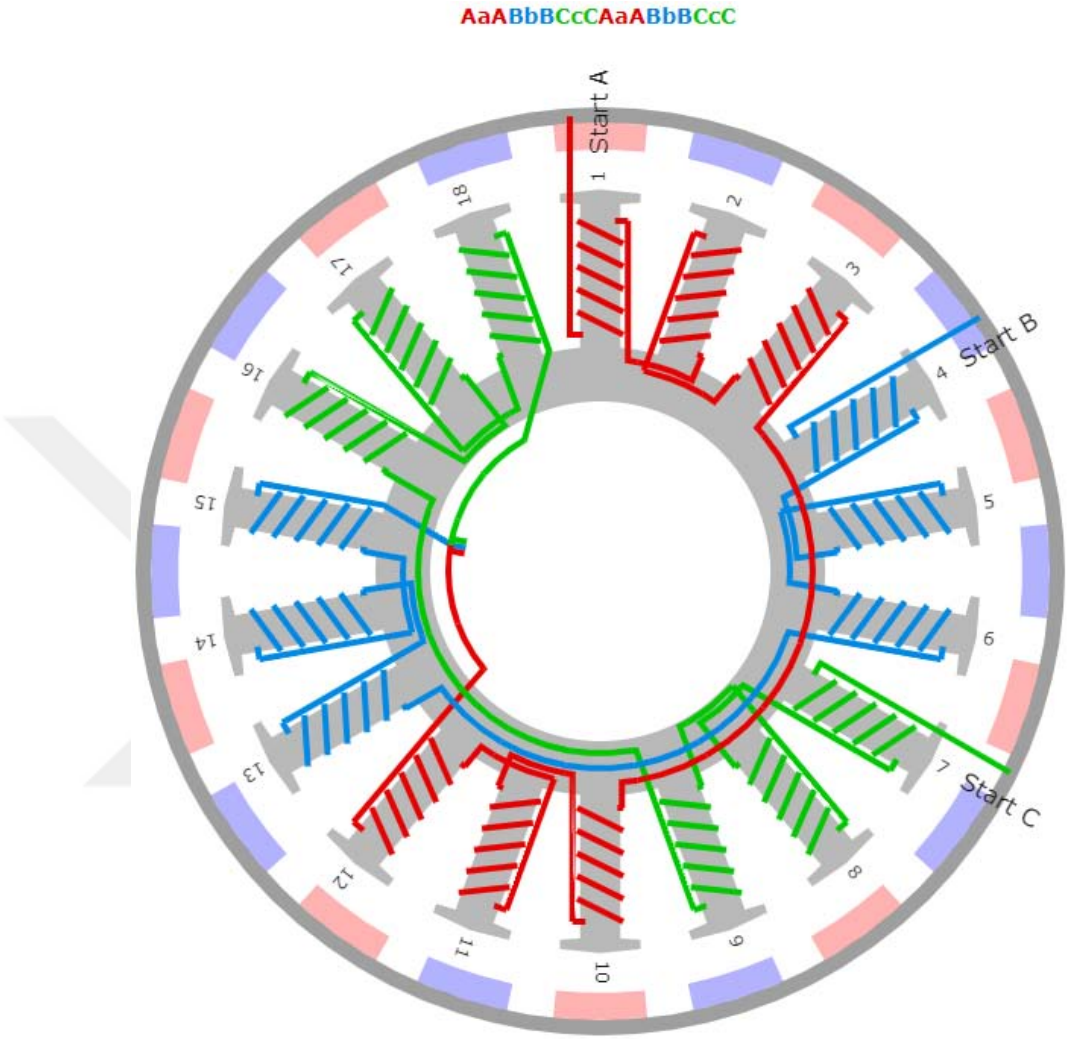
Bu tez çalışması kapsamında, saç nüveler daha az maliyetli olan ve istenilen derecede yüzey hassasiyetlerini verebilen lazer yöntemi ile kesilmiştir. Kesilen nüve parçaları millerden geçirilerek toplanmıştır. Ardından verniklenip preslendikten sonra, stator paketi son halini almıştır. Şekil 3.7'de lazerle kesilmiş silisli saçlar ve bu saçlara uygulanan işlemler gösterilmiştir. M530-50A tipi silisli saç Ansys Maxwell yazılımında tanımlı olmadığından, analizlerde BH eğrisi ve Watt/kg kaybı bu malzemeye çok yakın olan JFE Steel 50JNE470 tipi malzeme kullanılmıştır (Ek 1: JFE steel 50JNE470 B-H eğrisi). Malzemelerin kayıp değerleri birbirine çok yakın olduğundan bu değişikliğin sonuçlarda anlamlı bir etkisinin olmaması beklenmektedir.



Şekil 3.7. Lazer ile kesilmiş silisli saçlar ve bu saçlara uygulanan işlemler

Uygulama ihtiyacına göre sargılar tek fazlı ya da çok fazlı olarak stator üzerine sarılır. Sarım katmanları tek veya çift olabilir. Herhangi iki sargının birer kenarlarının bir oluğa geldiği sarım şekli çift katmanlı sarımdır. Sargıların kendi aralarında uygun şekilde eşleştirilmesi ile faz grupları meydana gelir. Oluşturulan faz grupları seri veya paralel şekillerde bağlanarak yıldız, üçgen ve zigzag bağlantılı faz sargıları oluşturulmuş olur. Sarılmış olan sargıların oluk dışlarında kalan kısımları birbirlerinden yalıtılır. Hem yalıtımı güçlendirmek, hem de yapısal dayanıklılık sağlamak için sarılmış olan sargılar verniklenerek fırınlanmaktadır (Yan, 2009). Prototip motorda, düşük hızda yüksek tork üretmeye olanak sağlayan yıldız bağlantı uygulanmış ve yüksek güç yoğunluğu ile daha düşük tork dalgalanmaları elde edebilmek için çift katmanlı konsantre sarım yapılmıştır.

Şekil 3.8'de prototip motorun Niessen (2013)'in tasarladığı sargı şeması aracı kullanılarak türetilmiş sarım şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Üretilen prototip motorun çift katmanlı konsantre sarım şeması (Niessen, 2013)

Sarım işlemi yapılırken sargı yönlerine dikkat edilmelidir. Sağ elin dört parmağı akım yönünü gösterirken başparmak stator dişlerindeki akı yönünü göstermektedir. Örneğin 1 numaralı stator dişindeki akı yönü statorun içine doğru iken, 2 numaralı dişteki akı yönü statorun dışına doğrudur. Manyetik alan kuvvetinin düzgün ve sıralı bir şekilde üretilebilmesi için birbirini izleyen stator dişlerindeki akı yönlerinin zıt yönlerde olması gerekmektedir. Bu yüzden stator sargılarının da bu doğrultuda yapılması gerekmektedir. Hatalı sarım işlemleri sonucu akı yönleri istenilen yönlerde olmayacak ve motorun dönüşünde problemler ortaya çıkacaktır. Bu yüzden sargı yönleri motorun düzgün

çalışabilmesi için en önemli adımlardan biridir. Şekil 3.9'da stator paketinin çift katmanlı sarım aşamaları gözükmektedir. Her bobindeki sargı uçları Şekil 3.8'deki sarım yönlerine dikkat edilerek birleştirilmiş ve sarım işlemi sonucunda 3 faz için 6 adet sargı ucu elde edilmiştir. Yıldız bağlantı olması için motor sargılarının birer ucu kısa devre yapılmış ve diğer uçlar da sürücü çıkışına bağlanmıştır.



Şekil 3.9. Çift katmanlı sarım yapılmış stator paketi

3.1.3. Rotor

SMSM'nin rotoru üzerinde sürekli mıknatıslar bulunmakta ve mıknatıs sayıları yani kutup sayıları uygulama yerine göre değişebilmektedir. Kutup sayısının artırılması daha yüksek tork üretilmesini sağlarken maksimum hızın düşmesine sebep olmaktadır. İçten rotorlu tasarımlarda, özellikle yüksek hızlarda rotor üzerindeki mıknatısların merkezkaç kuvvetiyle yerlerinden çıkma tehlikesi bulunmaktadır. Bu yüzden yüksek hızlarda çalışacak içten rotorlu yapılarda yüzey mıknatıslı yerine yüzeye gömülü veya gömülü mıknatıslı rotor yapısı tercih edilmektedir. Dıştan rotorlu SMSM tasarımlarında mıknatıslar dış taraftaki rotorun iç yüzeyinde yer almaktadır. Böylelikle içten rotorlu motorlarda karşımıza çıkan merkezkaç etkisiyle savrulma riski ortadan kalkmış olmaktadır. İçten rotorlu tasarımlarda sargıların ısısı statordan motor gövdesine geçebilmekte ve böylelikle motor ısısı gövdeden dışarı atılmaktadır. Dıştan rotorlu motorlarda stator iç tarafta bulunduğundan, eğer ek bir soğutma sistemi yoksa sargılardaki ısının uzaklaştırılması mümkün olamamaktadır. Bu durum stator sargılarının ısınmasına sebep olmakta ve motorun ısı dağılım oranını düşürmektedir. Stator sargılarının konumu nedeniyle, dıştan rotorlu tasarımlar daha düşük çalışma devirlerinde ve daha düşük nominal akımlarda çalıştırılırlar. Buna karşın dıştan rotorlu motor yapısının en büyük avantajı düşük vuruntu momentleridir (Gambhir ve Jha, 2013).

Rotor statorda olduğu gibi genellikle silisli saçlar kullanılarak üretilmektedir. Fakat özellikle dıştan rotorlu tasarımlarda silisli saçlar yerine tek parça bir rotor yapısı da kullanılabilmektedir. Prototip motorun rotorunda dayanımı yüksek olan, orta karbonlu AISI 1050 çelik malzemesi CNC torna ile işlenmiş ve mıknatıslar rotorun içine çeşitli sabitleme aparatları kullanılarak istenilen açıklık oranlarında yerleştirilmiştir. 150 mm paket uzunluğunu karşılamak üzere 50 mm'lik mıknatıslardan 3 sıra dizilmiştir. Buna göre 20 kutuplu prototip motorda toplam 60 adet mıknatıs kullanılmıştır. Şekil 3.10'da rotorda kullanılan aparatlar ve mıknatısların yerleşimleri gösterilmiştir. Mıknatıslar arasındaki boşlukların aynı oranda olabilmesi için rotor gövdesine karşılıklı aparatlar tutturulmuş ve belirlenen deliklerden çubuklar uzatılmıştır. Böylelikle prototip motordaki mıknatıslar tasarlanan boşluklarda ve nizami bir şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Rotor ve mıknatısların rotor üzerine yapıştırılma aşamaları

3.1.4. Sürekli (Kalıcı-Daimi) Mıknatıslar

Sürekli mıknatıslar elde edildikleri malzemeler, çalışma performansları ve maliyetleri gibi çeşitli kısıtlara göre sınıflara ayrılır. Sürekli mıknatıs malzemeler kimyasal kompozisyonlarına göre üç ana grupta incelenebilir (Yıldız, 2009). Bunlar seramik ferritler, metal ve nadir toprak mıknatıslarıdır. Çelik sürekli mıknatıslar, ilk yapılan metal mıknatıslardandır. Daha sonra değişik alaşımlarla Olatin-Kobalt, Bakır-Nikel, Demir-Kobalt-Vanadyum mıknatıslar yapılmıştır. Bu sınıf mıknatıslar genelde Nikel,

Alüminyum ve Kobalt'ın alaşımları ile yapılırlar ve ferrit mıknatıslara göre daha pahalıdırlar. Metal mıknatıslar içerisinde en uygun mıknatıslar AlNiCo (Aluminyum-Nikel-Kobalt) mıknatıslardır. Ferrit mıknatıslar toz metalürjisi yöntemiyle üretilmekte ve seramik yapılarından dolayı sert ve kırılgan olmaktadırlar (Ayçiçek, 2009).

Nadir toprak mıknatısları son 35 yıldır gelişim göstermiştir. Bu mıknatısların AlNiCo ve Ferrit mıknatıslardan 5 veya 10 kat daha fazla enerjiye sahip olmaları daha yaygın kullanılmalarına olanak sağlamıştır. Sert manyetik ferritli nadir toprak mıknatısları, sürekli mıknatıs uygulamalarında oldukça yaygın kullanılmaktadır. Bu mıknatıslar iki alt gruba ayrılabilir (Ayçiçek, 2009). Birincisi kobalta dayalı toprak mıknatıslar (SmCo-Samaryum Kobalt), ikincisi demire dayalı toprak mıknatıslar (NdFeB-Neodimyum Demir Boron)'dır.

SmCo alaşımlı kalıcı mıknatıslar birçok uygulamada elektromıknatısların yerine geçmiştir. Fakat maliyet bakımdan hala elektromıknatıslardan pahalıdır. Daha ucuz bir nadir toprak mıknatıs çeşidi ise NdFeB'dir. NdFeB tipi sürekli mıknatıslar en yaygın olarak kullanılan mıknatıs çeşididir. NdFeB mıknatıslar üretim yöntemlerine göre üç şekilde sınıflandırılabilir. Bunlar; sinterleme, polimer bağlama ve ısı deformasyonudur (Ayçiçek, 2009). Neodimyum mıknatısların kullanım sıcakları tiplerine göre farklılık göstermektedir. Tablo 3.3'te sinterlenmiş NdFeB mıknatısların manyetik özellikleri gösterilmiştir. Mıknatısların ortam sıcaklığı kullanım sıcaklığının üzerine çıkarsa mıknatıslarda kararsız bir durum ortaya çıkar ve manyetik özelliklerini kaybederler. Bir kez manyetik özelliğini kaybeden mıknatıs, tekrar oda sıcaklığına gelse bile artık işlevini yerine getiremez. Tablo 3.4'te NdFeB mıknatısların fiziksel özellikleri gözükmektedir.

Tablo 3.3. Sinterlenmiş NdFeB mıknatısların manyetik özellikleri (MMC Magnetics, 2017)

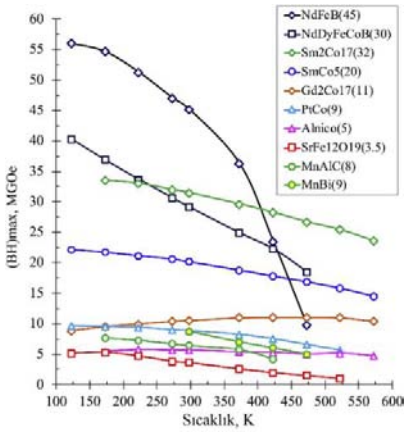
Sınıfı	Ürettiği Maksimum Enerji		Artık Mıknatıslanma		Artık Mıknatıslanma Giderici Kuvvet (Zorlayıcı Kuvvet)				Sıcaklık Katsayısı		Curie Sıcaklığı	Maksimum Çalışma Sıcaklığı
	$(BH)_{max}$		B_r		H_c		H_{ci}		B_d	H_d	T_c	T_w
	MGOe	kJ/m^3	kG	mT	kOe	kA/m	kOe	kA/m	%/°C	%/°C	°C	°C
N27	25-29	199-231	10.50	1050	>10.0	>796	>12.0	>955	-0.12	-0.60	310	80
N30	28-31	223-247	11.00	1100	>10.2	>812	>12.0	>955	-0.12	-0.60	310	80
N33	31-33	247-263	11.50	1150	>10.5	>836	>12.0	>955	-0.12	-0.60	310	80
N35	33-36	263-287	12.00	1200	>10.9	>868	>12.0	>955	-0.12	-0.60	310	80
N38	36-39	287-310	12.40	1240	>11.3	>899	>12.0	>955	-0.12	-0.60	310	80

N40	38-41	302-326	12.70	1270	>11.4	>907	>12.0	>955	-0.12	-0.60	310	80
N42	40-43	318-342	13.00	1300	>11.5	>915	>12.0	>955	-0.12	-0.60	310	80
N45	43-46	342-366	13.50	1350	>11.6	>923	>12.0	>955	-0.12	-0.60	310	80
N48	46-49	366-390	14.00	1400	>11.6	>923	>12.0	>955	-0.12	-0.60	310	80
N50	48-51	382-406	14.30	1430	>10.3	>820	>12.0	>955	-0.12	-0.60	310	80
N52	50-53	398-422	14.50	1450	>10.3	>820	>11.0	>877	-0.12	-0.60	310	80
N30M	28-31	223-247	11.00	1100	>10.2	>812	>14.0	>1114	-0.12	-0.59	320	100
N33M	31-33	247-263	11.50	1150	>10.5	>836	>14.0	>1114	-0.12	-0.59	320	100
N35M	33-36	263-287	12.00	1200	>10.9	>868	>14.0	>1114	-0.12	-0.59	320	100
N38M	36-39	287-310	12.40	1240	>11.4	>907	>14.0	>1114	-0.12	-0.59	320	100
N40M	38-41	302-326	12.70	1270	>11.6	>923	>14.0	>1114	-0.12	-0.59	320	100
N42M	40-43	318-342	13.00	1300	>12.0	>955	>14.0	>1114	-0.12	-0.59	320	100
N45M	43-46	342-366	13.50	1350	>12.5	>995	>14.0	>1114	-0.12	-0.59	320	100
N48M	46-49	366-390	14.00	1400	>12.9	>1027	>14.0	>1114	-0.12	-0.59	320	100
N50M	48-51	382-406	14.30	1430	>13.1	>1043	>14.0	>1114	-0.11	-0.58	320-350	100
N30H	28-31	223-247	11.00	1100	>10.2	>812	>17.0	>1353	-0.11	-0.58	320-350	120
N33H	31-34	247-271	11.50	1150	>10.5	>836	>17.0	>1353	-0.11	-0.58	320-350	120
N35H	33-36	263-287	12.00	1200	>10.9	>868	>17.0	>1353	-0.11	-0.58	320-350	120
N38H	36-39	287-310	12.40	1240	>11.4	>907	>17.0	>1353	-0.11	-0.58	320-350	120
N40H	38-41	302-326	12.70	1270	>11.6	>923	>17.0	>1353	-0.11	-0.58	320-350	120
N42H	40-43	318-342	13.00	1300	>12.0	>955	>17.0	>1353	-0.11	-0.58	320-350	120
N45H	43-46	342-366	13.50	1350	>12.5	>999	>17.0	>1353	-0.11	-0.58	320-350	120
N48H	46-49	366-390	14.00	1400	>12.9	>1027	>17.0	>1353	-0.11	-0.55	340-360	120
N30SH	28-31	223-247	11.00	1100	>10.2	>812	>20.0	>1592	-0.11	-0.55	340-360	150
N33SH	31-34	247-271	11.50	1150	>10.6	>844	>20.0	>1592	-0.11	-0.55	340-360	150
N35SH	33-36	263-287	12.00	1200	>11.0	>876	>20.0	>1592	-0.11	-0.55	340-360	150
N38SH	36-39	287-310	12.40	1240	>11.4	>907	>20.0	>1592	-0.11	-0.55	340-360	150
N40SH	38-41	302-326	12.70	1270	>11.8	>939	>20.0	>1592	-0.11	-0.55	340-360	150
N42SH	40-43	318-342	13.00	1300	>12.4	>987	>20.0	>1592	-0.11	-0.55	340-360	150
N45SH	43-46	342-366	13.50	1350	>12.6	>1003	>20.0	>1592	-0.11	-0.51	350-380	150
N28UH	26-29	207-231	10.60	1060	>9.6	>764	>25.0	>1990	-0.11	-0.51	350-380	180
N30UH	28-31	223-247	11.00	1100	>10.2	>812	>25.0	>1990	-0.11	-0.51	350-380	180
N33UH	31-34	247-271	11.50	1150	>10.8	>860	>25.0	>1990	-0.11	-0.51	350-380	180
N35UH	33-36	263-287	12.00	1200	>11.3	>899	>25.0	>1990	-0.11	-0.51	350-380	180
N38UH	36-39	287-310	12.40	1240	>11.5	>915	>25.0	>1990	-0.11	-0.51	350-380	180
N40UH	38-41	302-326	12.70	1270	>11.8	>939	>25.0	>1990	-0.11	-0.51	350-380	180
N28EH	26-29	207-231	10.70	1070	>9.8	>780	>30.0	>2388	-0.11	-0.51	350-380	200
N30EH	28-31	223-247	11.10	1110	>10.2	>812	>30.0	>2388	-0.11	-0.51	350-380	200
N33EH	31-34	227-271	11.50	1150	>10.8	>860	>30.0	>2388	-0.11	-0.51	350-380	200
N35EH	33-36	263-287	12.00	1200	>11.1	>884	>30.0	>2388	-0.11	-0.51	350-380	200
N38EH	36-39	287-310	12.40	1240	>11.5	>915	>30.0	>2388	-0.11	-0.51	350-380	200
N28AH	26-29	207-231	10.70	1070	>9.8	>780	>35.0	>2786	-0.11	-0.51	350-380	220
N30AZ	28-31	223-247	11.10	1110	>10.2	>812	>35.0	>2786	-0.11	-0.51	350-380	220
N33AH	31-34	227-271	11.50	1150	>10.8	>860	>35.0	>2786	-0.11	-0.51	350-380	220
N35AH	33-36	263-287	12.00	1200	>11.1	>884	>35.0	>2786	-0.11	-0.51	350-380	220

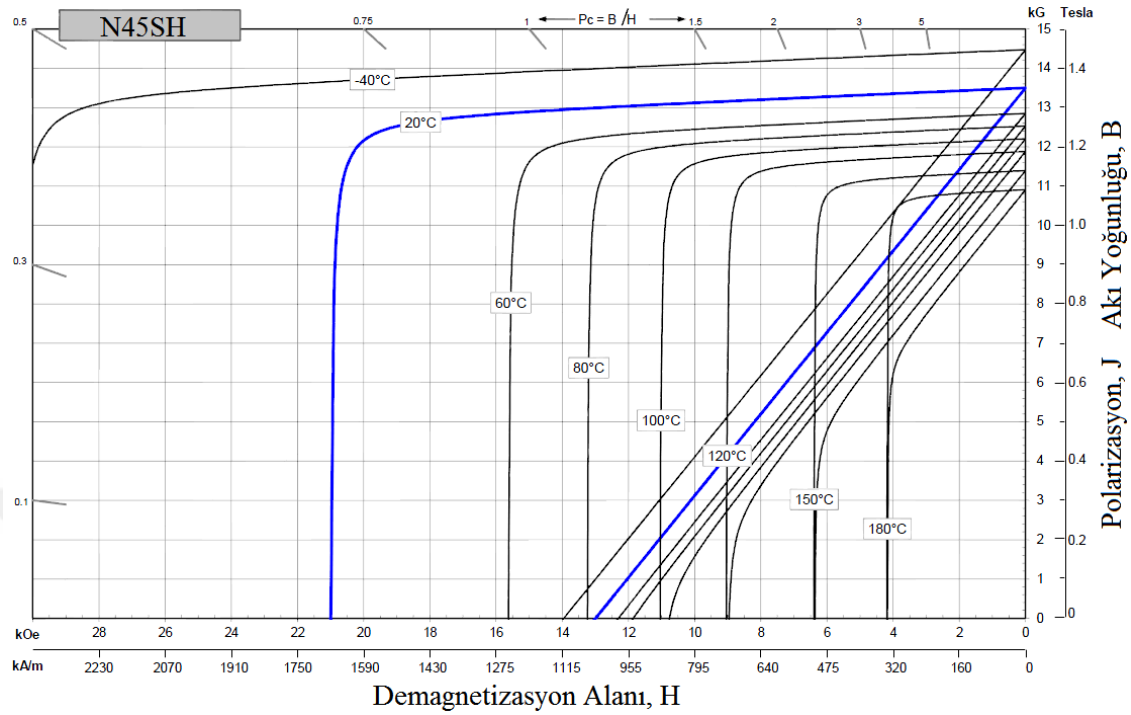
Tablo 3.4. Sinterlenmiş NdFeB mıknatısların fiziksel özellikleri (Advanced Magnets, 2019)

Karekteristik	Simge	Birim	Değer
Yoğunluk	d	g/cm^3	7.3-7.5
Vickers Sertliği	Hv	MPa	500-650
Basma Dayanımı	σ_b	N/mm^2	1000-1100
Çekme Dayanımı	$\sigma_ç$	N/mm^2	80-90
Eğilme Dayanımı	σ_e	N/mm^2	200-400
Termal Genleşme Katsayısı (Mıknatıslanma yönüne paralel)	C//	$10^{-6}/°C$	3-4
Termal Genleşme Katsayısı (Mıknatıslanma yönüne dik)	C^	$10^{-6}/°C$	1-3
Elektriksel Direnç	r	μ Ω.cm	110-170
Termal İletkenlik	λ	W/(m·°C)	8-10
Elastisite (Young) Modülü	E	GPa	150-200

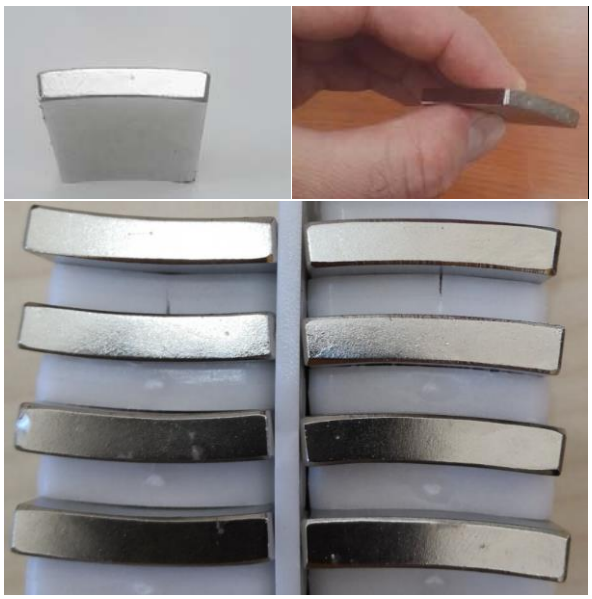
Sürekli mıknatısların yüksek enerjili ve optimum boyutlarda olması indüklenen EMK'yı artırır, çekilen hat akımını düşürür, rotorun termal yükünü azaltır, güç faktörünü yükseltir, şebekeden çekilen giriş gücünü düşürür ve motorun maksimum çıkış gücünü artırır (Eker, 2017). Bu tez çalışmasında, sürekli mıknatısların hem maksimum çalışma sıcaklıkları hem de maksimum enerji çarpanı ($(BH)_{max}$) değişkenleri dikkate alınmış ve 5 mm kalınlığında, Ni-Cu-Ni (Nikel-Bakır-Nikel) alaşımı ile kaplanmış N45SH tipi sinterlenmiş NdFeB mıknatısların kullanılmasına karar verilmiştir. N45SH tipi mıknatısların demagnetize olmadan çalışabilecekleri maksimum sıcaklık 150 °C, maksimum enerji çarpanları ise 342-366 kJ/m^3 aralığındadır. Yüksek enerjili mıknatısların kullanılması ile motor veriminde artış elde edilmiştir. Şekil 3.11'de farklı tiplerdeki mıknatısların sıcaklığa göre maksimum enerji çarpanı miktarları, Şekil 3.12'de N45SH tipi sürekli mıknatısın manyetik özellikleri, Şekil 3.13'de ise prototip motor için tasarlanan ölçülerde ve özelliklerde tedarik edilmiş olan mıknatıslar gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Sürekli mıknatısların sıcaklık-maksimum enerji çarpanı grafiği (Cui ve diğ., 2018)



Şekil 3.12. N45SH tipi sürekli mıknatısın manyetik özellikleri (Arnold Magnetic, 2017)



Şekil 3.13. Prototip motorda kullanılan N45SH tipi eğri mıknatıslar

3.2. Manyetik Devre Modeli

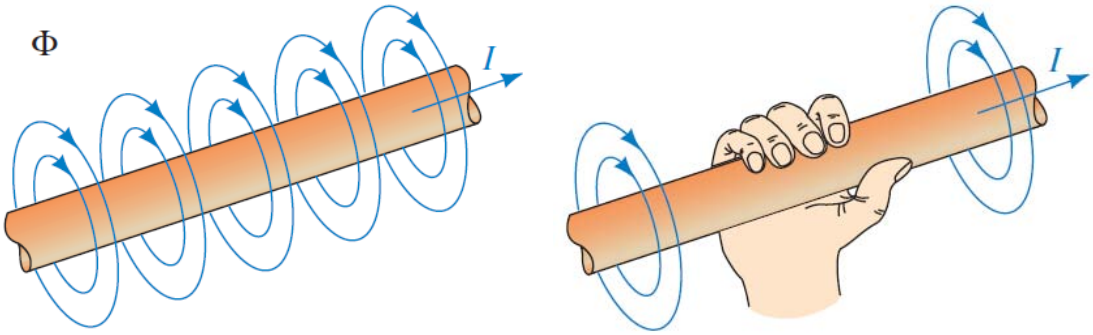
SMSM'nin manyetik devre modeline geçmeden önce manyetik alanın nasıl oluştuğunun bilinmesi gerekmektedir. Manyetik alan; motorlar, generatörler ve transformatörlerdeki enerji dönüşümünün temelini oluşturmaktadır. Manyetik alanın bu makinalarda nasıl kullanıldığını tanımlayan dört temel ilke aşağıdaki gibidir (Chapman, 2017);

- Akım taşıyan bir iletken tel etrafında bir manyetik alan oluşmaktadır (Amper Yasası).
- Manyetik alan içerisinde bulunan ve içinden akım geçen bir iletkende bir kuvvet indüklenir (Biot-Savart Yasası). Motor çalışmanın temeli bu maddeye dayanmaktadır.
- Manyetik alan içerisinde hareket eden bir iletkende gerilim indüklenir. Generatör çalışmanın temelidir.
- Zamanla değişen bir manyetik alanın etkisinde kalan bobinde bir gerilim indüklenir. Bu ilke ise transformatörlerin temelini oluşturmaktadır.

3.2.1. Eektromanyetik alanın oluşumu

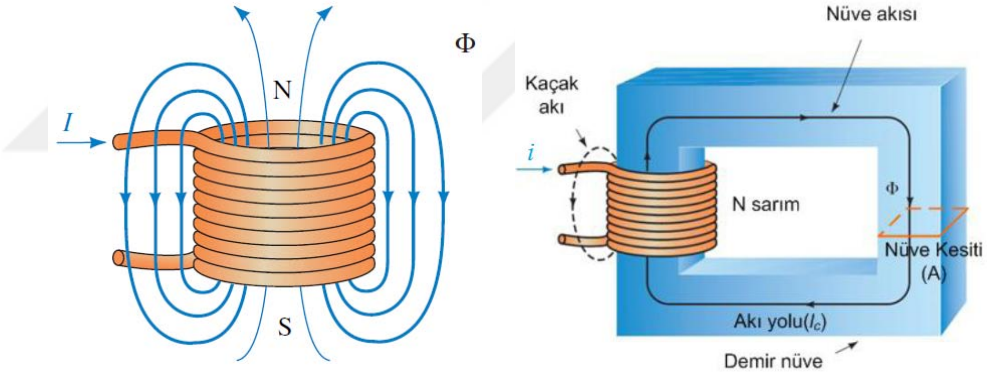
Manyetik alan kavramının daha iyi anlaşılabilmesi için bir mıknatısın manyetik özelliği bilinen bir demire yaklaştırıldığındaki davranışı incelenebilir. Demire yaklaştırılan mıknatıs, belirli bir mesafeye geldiğinde demir parçasını kendisine çekmektedir. Bu çekme işlemi demire etkiyen kuvvet aracılığıyla olmaktadır. Bu kuvvet manyetik alan olarak, manyetik alanın yönünü göstermek için kullanılan kuvvet çizgileri ise manyetik akı (Φ) olarak tanımlanmaktadır ("Elektrik Makinelerinin Temelleri", 2017).

İçinden akım geçen iletken bir tel etrafında oluşan manyetik alanın büyüklüğü, geçen akım miktarı ile doğru orantılıdır. Manyetik alanın yönü Şekil 3.14'te gösterilen sağ el kuralı ile bulunur. Başparmak akımın yönünü gösterirken, diğer dört parmak manyetik alanın yönünü göstermektedir.



Şekil 3.14. Manyetik alan yönünün sağ el kuralı ile gösterilmesi (“Elektrik Makinelerinin Temelleri”, 2017)

Eğer iletken tel bobin şeklinde sarılırsa, toplam manyetik alan iletkenden geçen manyetik alanlarının toplamına eşit olmaktadır. Bu bobin bir nüve etrafına sarılırsa, manyetik akı sarıldığı nüve üzerinden devresini tamamlamaktadır. Şekil 3.15’te bir bobin ve nüvedeki manyetik akı çizgileri gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Bobindeki ve nüvedeki akım ve manyetik akı (“Elektrik Makinelerinin Temelleri”, 2017)

İletken bir tel etrafında oluşan manyetik alanı ifade eden Amper Yasası denklem 3.1 ile ifade edilmektedir (Chapman, 2017). Burada H, I_{net} akımı tarafından üretilen manyetik alan şiddetini, l manyetik akı yolunun uzunluğunu temsil etmektedir. SI birim sisteminde I akım birimi amper (A), H manyetik alan şiddetinin birimi ise amper-tur/metre (At/m)’dir.

$$\oint H \times dl = I_{net} \tag{3.1}$$

Şekil 3.15'te dikdörtgen bir nüvenin bir bacağına sarılmış *N* sarım sayısına sahip bir bobin gözükmektedir. Nüve malzemesi, demir veya ferromanyetik malzemelerin karışımından oluşan metallerden yapılmış ise iletken bobin tellerinin ürettiği manyetik alan tamamen nüvenin içerisinde kalmaktadır. Böylece denklem 3.1'deki *dl* integrasyonun yol uzunluğu nüvenin yol uzunluğu olan l_c'ye eşit olmaktadır. Bobindeki sargı tellerinden geçen *i* akımı integrasyon yolunu N defa kestiğinden dolayı I_{net}, Ni olmaktadır (Chapman, 2017). Bu durumda Amper yasası denklem 3.2'deki şeklini almaktadır. Buradaki *H*, manyetik alan şiddeti vektörünün genliğidir.

$$H\, l_c = Ni \tag{3.2}$$

Manyetik akı yoğunluğu, manyetik alana dik bir alandan geçen akı miktarıdır ve *B* harfi ile gösterilmektedir. Manyetik akı yoğunluğunun birimi Wb/m^2 veya Tesla'dır. Bir malzemedeki manyetik akı yoğunluğu, malzemenin manyetik geçirgenliğinin (μ) manyetik alan şiddeti ile çarpılması sonucu elde edilir ve denklem 3.3 ile gösterilmiştir. Malzemelerin manyetik geçirgenliği boşluğun manyetik geçirgenliği ile karşılaştırılarak belirlenir ve birimi Henry/metre (H/m)'dir. Boşluğun manyetik geçirgenliği μ_0 'ın değeri $4\pi x10^{-7}$ H/m'dir. Denklem 3.2'deki *H* çekilip, denklem 3.3'te yerine yazılırsa, manyetik akı yoğunluğunun genliği denklem 3.4'teki şekilde elde edilir.

$$B = \mu H \tag{3.3}$$

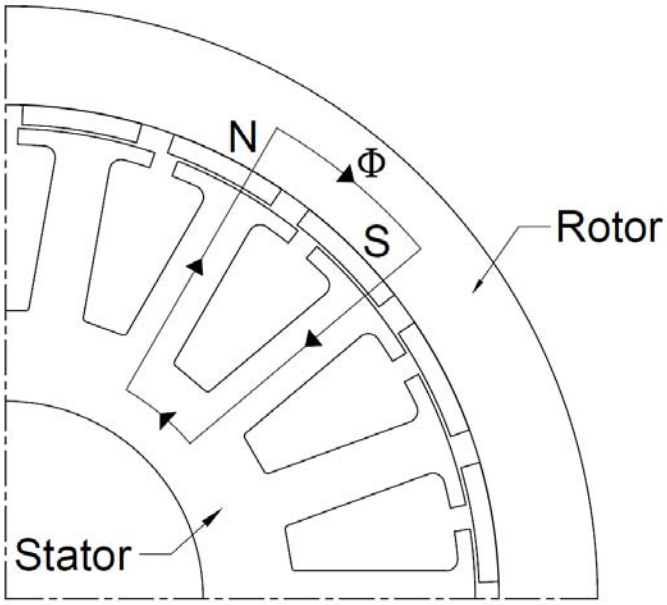
$$B = \frac{\mu Ni}{l_c} \tag{3.4}$$

Sargılardaki *i* akımından kaynaklanan toplam akı, belirlenen *A* alanındaki akı yoğunluğunun sabit olduğu durumda denklem 3.5'teki şekilde ifade edilir.

$$\phi = \frac{\mu NiA}{l_c} \tag{3.5}$$

3.2.2. SMSM'nin manyetik devre modeli

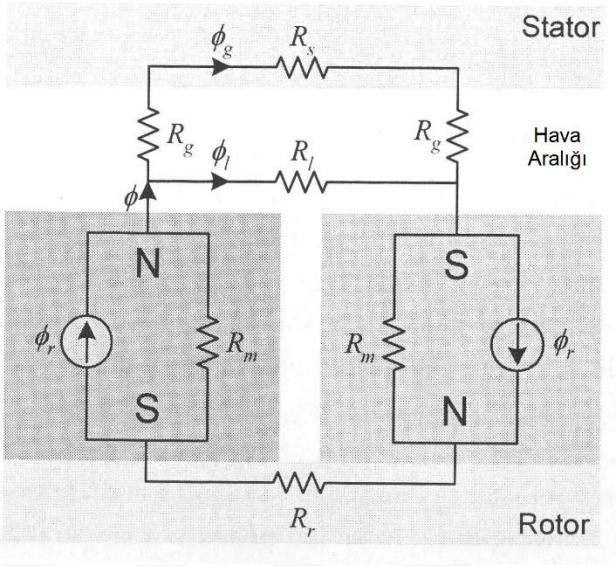
Dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik devresi, manyetik akı Φ'nin bir stator nüvesinden hava aralığına, mıknatısa, rotora, diğer mıknatısa, tekrar hava aralığına ve son olarak da diğer stator nüvesine geçmesi ile tamamlanmaktadır. Şekil 3.16'da dıştan rotorlu SMSM'de manyetik akının izlediği yol gösterilmiştir. Burada, yan yana olan mıknatısların magnetizasyon yönlerinin (manyetik polaritelerinin) N-S, S-N olarak sıralı bir şekilde gittiğine dikkat edilmelidir. Bir elektrik motorunun tasarlanması esnasında, motorun manyetik devresinin modeli dikkate alınmalıdır (Çağan, 2015). Bu adım, gerekli olan hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun ve çalışma noktasının (sürekli mıknatısın demagnetizasyon eğrisi ile yük eğrisinin kesişimi) bulunması için büyük öneme sahiptir.



Şekil 3.16. Dıştan rotorlu SMSM'de manyetik akının izlediği yol

Dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik eşdeğer devresi Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Sürekli mıknatıslar kendi içlerinde akı oluşturdukları için akı kaynağı olarak modellenmiş ve ϕ_r ile gösterilmiştir. Mıknatıs relüktansı R_m, manyetik polariteye dikkat edilerek gösterilmiştir. Rotor ve statorun relüktansları sırasıyla R_r ve R_s, hava aralığı relüktansı ise R_g olarak gösterilmiştir. Akı, mıknatıslardan hava boşluğuna, ordan da stator vasıtasıyla diğer kutba ulaşır. Bir mıknatıstan diğerine doğru akan sızıntı akısı relüktansı ise R_l olarak

modellenmiştir. Mıknatıs akısı ϕ, hava aralığı akısı ϕ_g ve sızıntı akısı ϕ_l 'dir (Hanselman, 2003). Hava aralığı kalınlığı ise g ile gösterilmektedir.

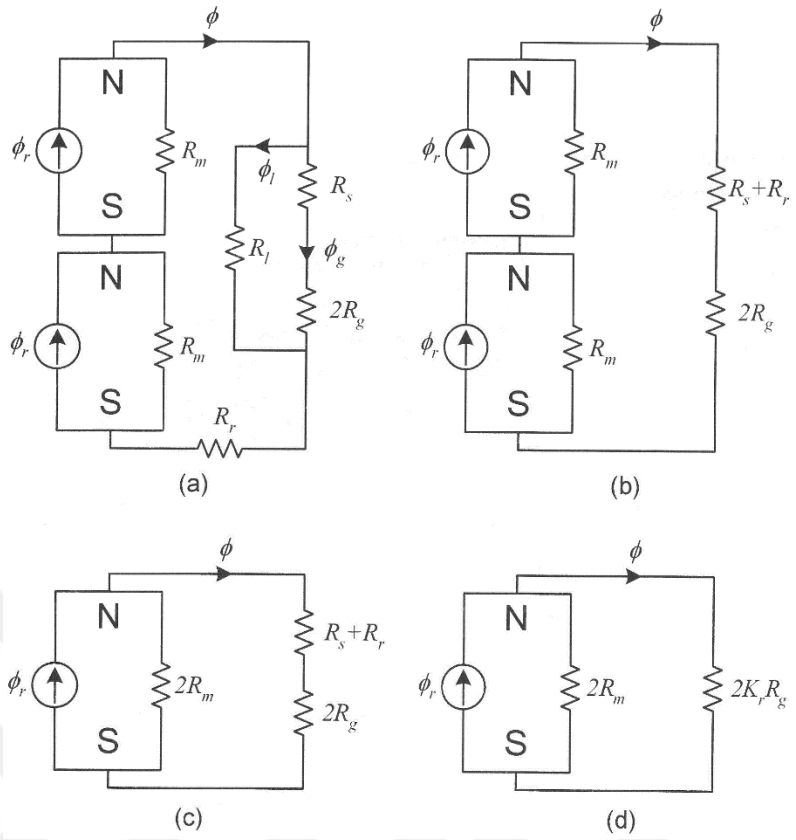


Şekil 3.17. SMSM'nin manyetik eşdeğer devresi (Hanselman, 2003)

Zıt EMK kuvveti belirlenmeden önce SMSM'nin manyetik eşdeğer devresi, hava aralığı akı yoğunluğu olan B_g'yi elde etmek için çözülmelidir. Şekil 3.17'deki devre, daha kolay bir çözüm yapılabilmesi için Şekil 3.18'deki adımlar izlenerek sadeleştirilebilir. Sadeleştirme işleminde, R_l sızıntı akı relüktansı çok küçük ve analitik olarak elde edilmesi zor bir değer olduğundan (Hanselman, 2003), bu değerin yerine, hava aralığı akısı denklem 3.6'daki gibi K_l sızıntı faktörü ile çarpılmıştır. Sızıntı faktörünün değeri 1'den çok az küçüktür, yani neredeyse 1'e yakındır.

$$\phi_g = K_\iota \phi \tag{3.6}$$

K_r, kaçak demir kayıplarını hesaba katmak için hava aralığı relüktansını çok küçük bir miktar artıran relüktans faktörüdür. K_l ve K_r'nin analitik yöntemlerle bulunması zor olmakta ve bu değerler genellikle tasarımcının deneyimlerine göre belirlenmektedir (Hanselman, 2003).



Şekil 3.18. Manyetik eşdeğer devrenin sadeleştirilmesi (Hanselman, 2003)

Manyetik eşdeğer devrenin en sade hali olan Şekil 3.18 (d)'deki mıknatıs akısı ϕ, denklem 3.7'deki gibi ifade edilebilir. Mıknatıs ve hava aralığı relüktansları olan R_m ve R_g'nin sırasıyla denklem 3.8 ve denklem 3.9'daki gibi olduğu bilinmektedir. Bu denklemlerdeki h_m mıknatıs kalınlığını, A_m mıknatıslanma yönüne dik olan mıknatıs kesit alanını, μ_r mıknatısın bağıl manyetik geçirgenliğini, μ_0 ise boşluğun manyetik geçirgenliğini temsil etmektedir. g' Carter katsayısıyla düzeltilmiş hava aralığı kalınlığını ($g.k_c$), A_g ise hava aralığı kesit alanını ifade etmektedir (Hanselman, 2003).

$$\phi = \frac{2R_m}{2R_m + 2K_rR_g}\phi_r = \frac{1}{1 + K_r\dfrac{R_g}{R_m}}\phi_r \tag{3.7}$$

$$R_m = \frac{h_m}{\mu_R\mu_0 A_m} \tag{3.8}$$

$$R_g = \frac{g'}{\mu_0 A_g} \tag{3.9}$$

Verilen eşitliklere göre hava aralığı akısı denklem 3.10'daki gibi yazılabilmektedir. Akı konsantrasyon faktörü denklem 3.11'de, mıknatıs akı yoğunluğu denklem 3.12'de, hava aralığı manyetik akı yoğunluğu denklem 3.13'te, manyetik iletkenlik katsayısı ise denklem 3.14'te verilmiştir (Hanselman, 2003).

$$\phi_g = K_l\phi = \frac{K_l}{1 + K_r \frac{\mu_R g A_m}{h_m A_g}} \phi_r \tag{3.10}$$

$$C_\phi = \frac{A_m}{A_g} \tag{3.11}$$

$$B_m = \frac{\phi_r}{A_m} \tag{3.12}$$

$$B_g = \frac{\phi_g}{A_g} \tag{3.13}$$

$$P_c = \frac{h_m}{g C_\phi} \tag{3.14}$$

Tüm denklemler düzenlenirse, hava aralığından geçen hava aralığı akı yoğunluğu B_g denklem 3.15'teki gibi yazılabilmektedir. Eğer bir SMSM denklem 3.15'teki hava aralığı akı yoğunluğuna göre tasarlanacaksa; K_l sızıntı akısı faktörü 0.9 ile 1.0 arasında, K_r relüktans faktörü 1.0 ile 1.2 arasında, akı konsantrasyon faktörü $C_\emptyset$ ise 1.0 olarak alınabilir. Bu durumda değiştirilebilecek tek parametre manyetik iletkenlik katsayısı P_c olacaktır. Yani mıknatısların ve hava aralığının kalınlıkları, motor tasarım aşamasında önemli bir role sahiptir (Çağan, 2015).

$$B_g = \frac{K_l C_\phi}{1 + K_r \frac{\mu_R}{P_c}} B_m \tag{3.15}$$

3.3. Zıt Elektromotor Kuvveti (EMK)

SMSM'lerde üretilen zıt EMK gerilimi; motor sabiti, kutup sayısı, hız aralığı, tork-hız karakteristiği, bara gerilimi, akım dalga şekli gibi motor özelliklerini barındırdığından motorun tanımlanması konusunda birçok bilgi içermektedir. Dolayısıyla zıt EMK'nın

analitik olarak ifade edilmesi durumunda motorun analitik modeli rahatlıkla çıkarılabilir (Şahin, 2010). Sinüsoidal akı dağılımına sahip bir SMSM için, k_{yf} yığılma faktörünün (stacking factor) ve k_{sf} sargı faktörünün dahil edildiği zıt EMK gerilimi ifadesi denklem 3.16'da paylaşılmıştır (Bu denklemdeki gerilim zıt EMK'nın tepe değeridir). Bu tez çalışmasında, silisli saçların paketlenmesi esnasındaki istifleme katsayısı olan yığılma faktörü k_{yf} 0.95 olarak alınmıştır. İstenilen paket boyuna ulaşılması esnasında, silisli saçların arasında kalan boşluklardan dolayı bu faktörün kullanılması gerekmektedir. Yapılan üretim çalışmalarında k_{yf} değerinin 0.95 civarında olduğu tespit edilmiştir. Sargı faktörü ise 18/20 oluk-kutup oranına sahip prototip motor için Şekil 3.27'den 0.945 olarak alınmıştır.

$$\hat{E}_z = \frac{p}{2}\,\omega_m N_t \phi_g k_{yf} k_{sf} \tag{3.16}$$

Denklem 3.16'daki p kutup sayısını, ω_m milin açısal hızını, N_t bir fazdaki toplam tur sayısını, ϕ_g daha önce de belirtildiği üzere kutup hava aralığı akısını temsil etmektedir. ϕ_g hava aralığı akısı ifadesinin ortalama hava aralığı akı yoğunluğu ($\bar{B}_g$) ile hava aralığı kesit alanının (A_g) çarpımına eşit olduğu bilinmektedir. Denklem 3.16'daki indüklenen zıt EMK gerilimi milin dönme hızıyla doğru orantılıdır ve Denklem 3.17'deki gibi EMK sabiti k_z ile daha kolay ifade edilebilmektedir (Şahin, 2010). Böylelikle indüklenen zıt EMK kuvvetinin tepe değeri denklem 3.18'deki gibi yazılabilmektedir.

$$k_z = \sqrt{3}\frac{p}{2} N_t \bar{B}_g A_g k_{yf} k_{sf} \tag{3.17}$$

$$\hat{E}_z = k_z \omega_m \tag{3.18}$$

3.4. Çıkış Gücü ve Elektromanyetik Tork

SMSM'lerde milden alınan çıkış gücünün motora verilen elektriksel güce oranı verimi vermektedir. Dolayısıyla çıkış gücü parametresi motor karakteristiği açısından önemlidir. Motor çıkış gücünün ifadesi watt cinsinden denklem 3.19 ile verilmektedir (Şahin, 2010). Denklemde yer alan E_z faz başına EMK'nın rms değerini ($\hat{E}_z/\sqrt{2}$), I ise faz rms akımını temsil etmektedir.

$$P = 3E_z I \tag{3.19}$$

Bu ifade mıknatısların oluşturduğu hava aralığı akısının değişmediği sadece q-ekseni akımının uyarıldığı vektör kontrol modunda geçerlidir (Şahin, 2010). Çıkış gücüne ve çıkış milindeki açısal hıza (rad/s) bağlı olarak üretilen tork ifadesi denklem 3.20'deki gibi ifade edilmektedir. Denklem 3.20, daha önceki denklemler kullanılarak denklem 3.21'deki gibi daha açık olarak yazılabilir. Bu denklemden tork sabiti k_t değeri denklem 3.22'deki gibi çekilir. Denklem 3.21'den açıkça görüleceği gibi, motor milindeki çıkış torku faz akımının rms değeri olan I ile doğru orantılıdır ve alan uyarma akımı değişmedikçe çıkış torku da değişmemektedir. Bu denklemlerdeki tork, güç ve akım değerlerinin tümü anma değerleri olup motor etiketinde yazılı olan değerlerdir.

$$T_R = \frac{P}{\omega_m} \tag{3.20}$$

$$T_R = 3\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{p}{2}N_t \bar{B}_g A_g k_{yf} k_{sf} I \tag{3.21}$$

$$k_t = 3\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{p}{2}N_t \bar{B}_g A_g k_{yf} k_{sf} \tag{3.22}$$

3.5. Carter Katsayısı

Stator diş uçlarındaki açıklıklar, hava aralığının düzensiz olmasına ve akı saçaklarının oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durum hava aralığı relüktansında bir artışa sebep olmaktadır (Bulgan, 2014). Carter (1900), hava aralığındaki relüktans artışını analitik olarak hesaplamaya yarayan bir model geliştirmiştir. Bu model oluk açıklığının hava aralığı kalınlığına oranını dayanmakta ve dıştan rotorlu SMSM için denklem 3.23 ile gösterilmektedir.

$$k_c = \frac{\pi D_{so}/N_{oluk}}{\pi D_{s0}/N_{oluk} - \frac{B_{s0}^2}{B_{s0} + 5g}} \tag{3.23}$$

Denklemdeki $\pi D_{s0}/N_{oluk}$ ifadesi uzunluk cinsinden oluk adımını, D_{s0} statorun dış çapını, B_{s0} stator dişleri arasındaki açıklığı, N_{oluk} motorun oluk sayısını, g ise hava aralığı kalınlığını temsil etmektedir. k_c değeri ile g değerinin çarpılması sonucu denklem 3.24'teki düzeltilmiş hava aralığı kalınlığı g' elde edilmektedir.

$$g' = gk_c \tag{3.24}$$

3.6. Mıknatıs Kesit Alanı (A_m) ve Hava Aralığı Kesit Alanı (A_g)

Mıknatıslanma yönüne dik olan mıknatıs kesit alanı A_m denklem 3.25 kullanılarak hesaplanmaktadır. Kesit mıknatısın tam ortasından alınmıştır. Hava aralığı kesit alanı A_g, stator dış çapı ile karşısındaki mıknatıs yüzeyi arasında kalan, mıknatıs adımı açısının taradığı hava aralığı kesitini temsil etmektedir. Bu alan hesaplanırken akı saçaklarının genişliği de hesaba katılmalıdır. Bu genişlik hava aralığı kalınlığının 2 katı olacak şekilde denkleme eklenmektedir. Hava aralığı kesit alanı A_g, hava aralığının tam ortasından geçen yay çapı dikkate alınarak denklem 3.26'daki gibi elde edilmektedir. Hem A_m hem de A_g hesaplanırken motorun paket boyu L_p kullanılmıştır. Üretilen prototip motorda 3 sıra mıknatıs kullanıldığından motorun paket boyu 3.l_m olmaktadır. Denklemlerde kullanılan mıknatıs adımı açısı α_m, radyan cinsinden mekanik açı değeridir.

$$A_m = \alpha_m\left(\frac{D_{so}}{2} + g + \frac{h_m}{2}\right)L_p \tag{3.25}$$

$$A_g = \left[\alpha_m\left(\frac{D_{so}}{2} + \frac{g}{2}\right) + 2g\right]L_p \tag{3.26}$$

3.7. Stator Dişi ve Stator Boyunduruğu Relüktansı

Yüksek güçlü motorlarda motor hacmi her zaman minimum seviyerlerde tutulmak istenmektedir. Bu motorların tasarımı yapılırken, manyetik geçirgenliği sonsuz olarak düşünülen stator relüktansının da manyetik devre hesabına katılması gerekir (Şahin, 2010). Stator dişinin ve ve stator boyunduruğunun relüktansları denklem 3.27 ve 3.28 ile verilmiştir. μ_{ss} değişkeni stator silisli saçlarının manyetik geçirgenliğini, λ_{oluk} oluk

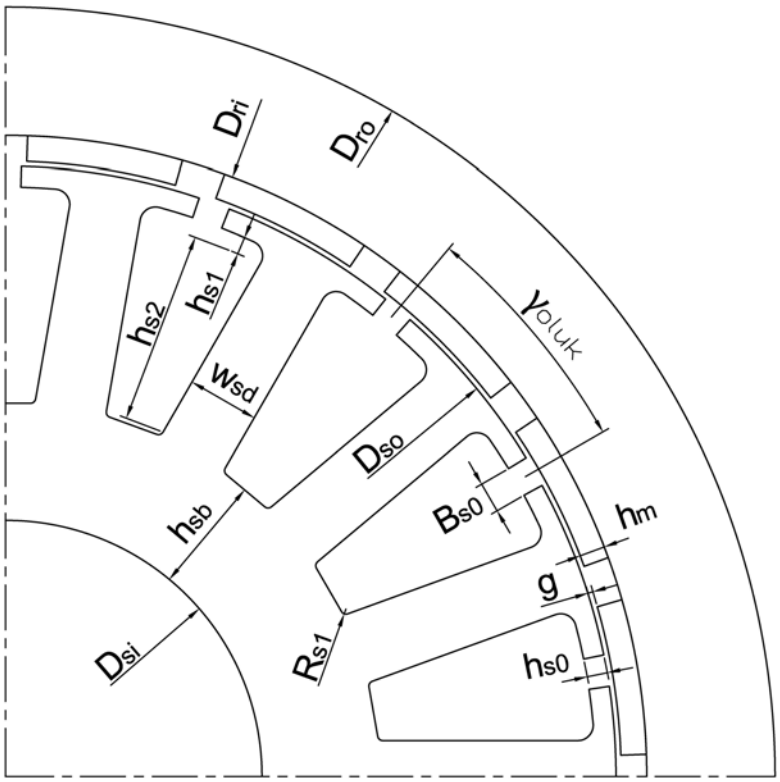
adımını, p kutup sayısını, D_{si} stator iç çapını, w_{sd} stator diş genişliğini, h_{sb} stator boyunduruk kalınlığını, h_{s0}, h_{s1}, h_{s2} ve R_{s1} ise stator diş uzunluklarını Şekil 3.19'da gösterildiği şekilde temsil etmektedir. Denklem 3.28'deki boyunduruk çapı, boyunduruğun tam ortasından geçecek şekilde alınmıştır.

$$R_{sd} = \frac{h_{s0} + h_{s1} + h_{s2} + R_{s1}}{\mu_{ss}\mu_0(w_{sd}L_p)} / \lambda_{oluk} \tag{3.27}$$

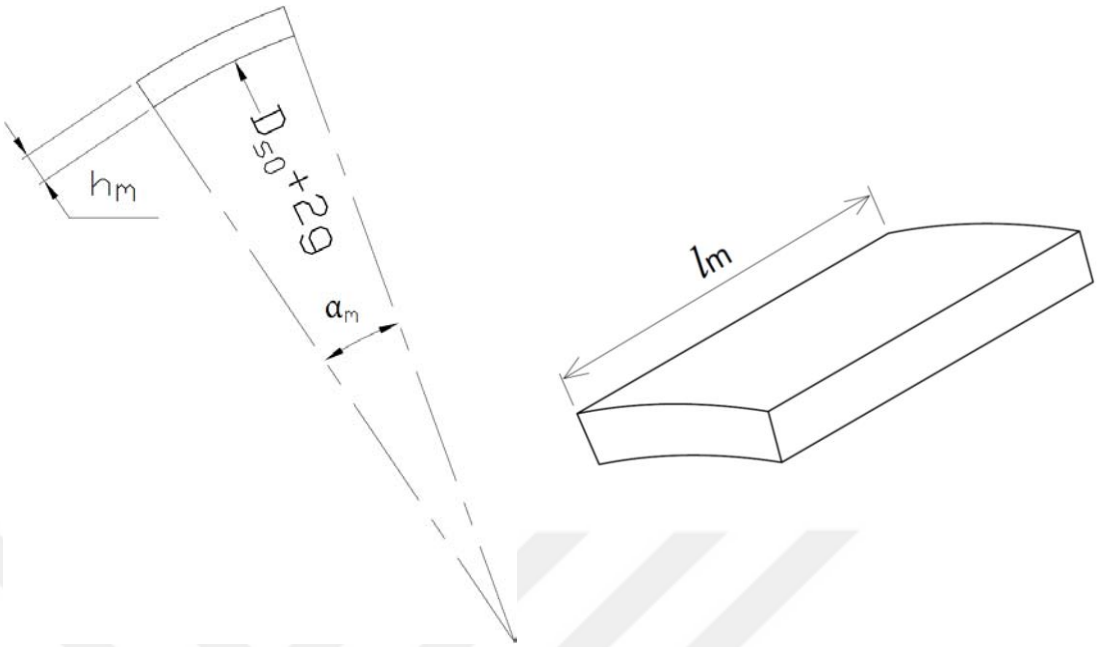
$$R_{sb} = \frac{\pi(D_{si} + h_{sb})/p}{\mu_{ss}\mu_0(h_{sb}L_p)} \tag{3.28}$$

3.8. Dıştan Rotorlu SMSM'de Kullanılan Ölçülerin Gösterimi

Dıştan rotorlu SMSM'nin geometrik ölçüleri Şekil 3.19'da, mıknatıs ölçüleri Şekil 3.20'de ve bu değerlerin açıklamaları ise Tablo 3.5'te paylaşılmıştır. Tez içerisinde kullanılan geometrik değişkenler ve anlamları Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Tablo 3.5'ten yararlınılarak daha iyi anlaşılabilir.



Şekil 3.19. Dıştan rotorlu SMSM'nin motor ölçüleri



Şekil 3.20. Dıştan rotorlu SMSM'nin mıknatıs ölçüleri

Tablo 3.5. Dıştan rotorlu SMSM'nin ölçülerinin açıklamaları

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

3.9. Manyetik Devrenin Çözülmesi

Manyetik devre modelinde yer alan ifadelere göre akı yoğunlukları rahatlıkla hesaplanabilmektedir. Mıknatıslar tarafından üretilen manyetomotor kuvveti (MMK), manyetik devredeki toplam MMK düşümüne eşittir. Hava aralığının relüktansı, stator relüktansından çok yüksek olduğundan, stator saçlarındaki MMK düşümü hava aralığındaki MMK düşümüne göre ihmal edilebilir olmaktadır (Bulgan, 2014). Manyetik devreye göre MMK ifadesi F_{mmk} denklem 3.29'daki şekilde yazılabilmektedir.

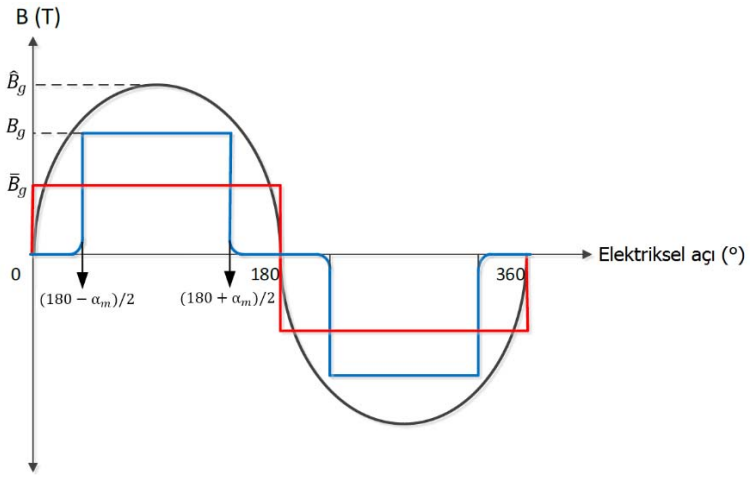
$$F_{mmk} = \phi_g R_g = (\phi_r - \phi_g) \cdot (R_m + R_l) \tag{3.29}$$

Hava aralığı akı yoğunluğu B_g denklem 3.30, hava aralığı ortalama akı yoğunluğu $\bar{B}_g$ denklem 3.31, hava aralığı akı yoğunluğu tepe değeri $\hat{B}_g$ denklem 3.32 ile son hallerini almıştır. Hava aralığı akı yoğunluklarının dalga şekilleri Şekil 3.21'de gösterilmiştir.

$$B_g = \frac{A_m/A_g}{1 + R_g/R_m} B_r \tag{3.30}$$

$$\bar{B}_g = \frac{A_g}{A_m} B_g = \frac{\alpha_m \left(\frac{D_{so}}{2} + \frac{g}{2}\right) + 2g}{\alpha_m (\frac{D_{so}}{2} + g + \frac{h_m}{2})} B_g \tag{3.31}$$

$$\hat{B}_g = \frac{h_m}{h_m + g\mu_r} B_r \tag{3.32}$$



Şekil 3.21. Hava aralığı akı yoğunluklarının dalga şekilleri (Bulgan, 2014)

Manyetik malzemenin doyuma girmemesi önemli bir motor tasarım kriteridir. B-H eğrisinin büküm bölgesinde çalışmak, motorların en iyi verimde çalışmasını sağlar. Stator dişlerindeki ve boyunduruğundaki kısımlarda akı yoğunluklarının da optimum çalışma bölgesi sınırları içinde olması istenmekte ve doyuma girmemesi istenmektedir. Stator dişindeki akı yoğunluğunun tepe değeri denklem 3.33'te paylaşılmıştır (Şahin, 2010).

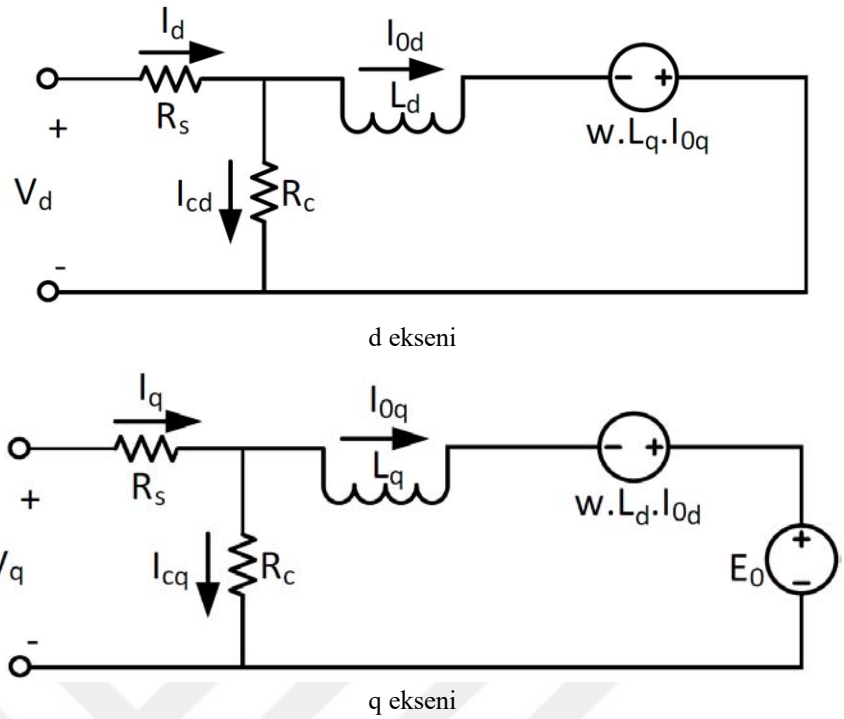
$$B_{sd} = \hat{B}_g \frac{\lambda_{oluk}}{w_{sd}} = \frac{h_m}{h_m + g\mu_r} \frac{\pi D_{so}/N_{oluk}}{w_{sd}} B_r \tag{3.33}$$

Stator boyunduruğundaki akı, toplam kutup akısının yarısı kadardır. Buna göre stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu denklem 3.34 ile elde edilmektedir. Böylelikle manyetik eşdeğer devrede yer alan tüm parametreler analitik olarak elde edilmiş olmaktadır.

$$B_{sb} = \frac{B_g A_g}{2 h_{sb} L_p} \tag{3.34}$$

3.10. Eşdeğer Elektrik Devre Modeli

Dıştan rotorlu SMSM'nin analitik modelinin elde edilebilmesi için eşdeğer elektrik devrede yer alan tüm paremetrelerin analitik olarak elde edilmesi gerekmektedir. SMSM'lerin çalışma davranışları senkron motorlarla benzerdir. Her iki motorda stator sargıları yer almakta, fakat senkron motorların rotorundaki alan sargılarının görevini SMSM'lerde mıknatıslar yerine getirmektedir. Mıknatısların yerleşiminden dolayı çıkık kutuplu rotorlarda olduğu gibi d ve q olmak üzere iki eksen oluşmaktadır. Dolayısıyla SMSM'ler, d ve q eksenlerine bağlı olarak iki elektrik devresi ile modellenirler. Devrelerde bakır ve demir kayıplarını temsil eden dirençler, zıt EMK'yı modellemek için ise bir indüktans ve bir gerilim kaynağı bulunmaktadır. Bu iki eksenli model, SMSM'nin doğrusal çalışma bölgesinde harmoniklerin sargı faktörlerinin dikkate alınmadığı, manyetik malzemlerin isotropik olduğu ve doyuma girmediği durumlarda geçerli olmaktadır (Bulgan, 2014). SMSM'nin eşdeğer elektrik devre modeli Şekil 3.22'de verilmiştir.



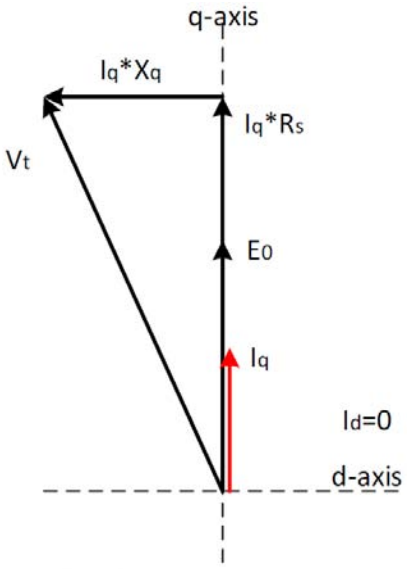
Şekil 3.22. SMSM'nin d-q eşdeğer elektrik devre modeli

Eşdeğer elektrik devrenin çözülebilmesi için denklem 3.35 ve 3.36'daki d-q eksenleri devrelerinin çözülmesi gerekmektedir. Denklemerde yer alan R_s ifadesi faz direncini, i_d ve i_q faz direncinden akan akımları, L_d ve L_q indüktansları, I_{0d} ve I_{0q} indüktanslar üzerinden akan akımları, Ψ_M mıknatıs akısını, ω_m ise çıkış milinin rad/s cinsinden hızını temsil etmektedir (Şahin, 2010).

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{dI_{0d}}{dt} - \omega_m L_d i_q \tag{3.35}$$

$$V_q = R_s i_q L_q \frac{dI_{0q}}{dt} + \omega_m L_d i_d + \omega_m \Psi_M \tag{3.36}$$

SMSM'lerin vektör kontrol modunda, d-ekseninden akım akmamakta ve bütün ölçümler q-ekseni ile ilgili olmaktadır. d-ekseni akımı i_d'nin 0 olduğu durumda faz diyagramı Şekil 3.23'teki gibi elde edilmektedir (Bulgan, 2014). Faz diyagramındaki X_q, indüktans ve frekans değerleri ile hesaplanan q-ekseni reaktansını, V_t terminal gerilimini, E_0 indüklenen EMK'yı temsil etmektedir. V_t değeri denklem 3.37'de verilmiştir.



Şekil 3.23. SMSM'nin vektör kontrol modundaki elektrik faz diyagramı

$$V_t = \sqrt{(I_q R_s + E_0)^2 + (I_q X_q)^2} \tag{3.37}$$

Denklemdeki faz relüktansı R_s değeri denklem 3.38'deki gibi hesaplanmaktadır. L_{it} iletkenin toplam uzunluğunu *metre* cinsinden, A_i iletkenin kesit alanını m^2 cinsinsen, ρ ise iletkenin özgül direncini *ohm.m* cinsinden temsil etmektedir. İletken kesit alanı, stator oluğu doluluk oranı ve sargı şemasına dikkat edilerek akım yoğunluğu sınırlarını aşmayacak şekilde seçilmektedir. İletken, tek tel kullanılarak sarılacağı gibi birden fazla telin paralel bir şekilde sarılmasıyla da oluklara yerleştirilebilir. Tek damarlı kalın bir telin sargı sonlarında dönüşlerinin zor olması sebebiyle aynı kalınlığa karşılık gelen ince paralel teller ile daha rahat bir sarım işlemi yapılabilmektedir. Bu yüzden özellikle SMSM'lerde ve BLDC'lerde paralel tellerle sarım işlemi gerçekleştirilmektedir.

$$R_s = \rho \frac{L_{it}}{A_i} \tag{3.38}$$

Tek telin kesit alanı A_{tel} denklem 3.39'daki şekilde elde edilmektedir. Denklemdeki D_{tel} seçilen tel kalınlığını temsil etmektedir. Denklem 3.40'ta ise kullanılacak paralel tel sayısına göre A_i iletken kesit alanı formülü paylaşılmıştır. Denklemdeki n_{tel} değeri iletken tel sayısını göstermektedir. Çift katmanlı oluk sargısında A_i iletken kesit alanı; oluk doluluk faktörü k_{dol}, oluk alanı A_{oluk} ve tur sayısına göre denklem 3.41'deki şekilde

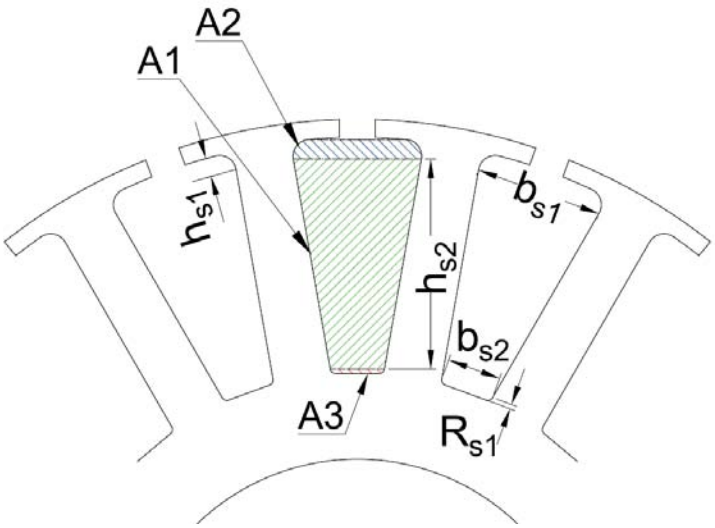
hesaplanabilmektedir. Oluk alanının hesabı sırasıyla A_1, A_2 ve A_3 bölgelerinin toplamı olacak şekilde denklem 3.42'de, oluk ölçüleri ise Şekil 3.24'te gösterilmiştir. A_2 ve A_3 alanları hesaplanırken, köşe yuvarlatmalarının olduğu alanlar hesaba dahil edilmemiştir.

$$A_{tel} = \frac{\pi D_{tel}^2}{4} \tag{3.39}$$

$$A_i = A_{tel} \cdot n_{tel} \tag{3.40}$$

$$A_i = \frac{0.5 \cdot A_{oluk} k_{dol}}{N_t} \tag{3.41}$$

$$A_{oluk} = (h_{s2}(b_{s1} + b_{s2})/2) + ((b_{s1} - h_{s1})h_{s1}) + ((b_{s2} - R_{s1})R_{s1}) \tag{3.42}$$



Şekil 3.24. Oluk alanının ve ölçülerinin gösterimi

Bir bobindeki iletken uzunluğu L_i denklem 3.43 ile hesaplanabilmektedir. Denklemdeki N_t bir fazdaki tur sayısını, L_{su} statordan taşan sargı sonu uzunluğunu, S_p oluk sayısı cinsinden bobin adımını, N_{oluk} toplam oluk sayısını, h_s ise toplam oluk uzunluğunu ifade etmektedir. Diğer ifadeler daha önce belirtildiğinden tekrar edilmemiştir. Fazların birbirine seri bağlanması esnasındaki iletken uzunluğu L_{is} ise oluğun ortasından olacak şekilde seçilmiş ve denklem 3.44 ile gösterilmiştir. Denklemde yer alan N_{bobin} ifadesi oluk sayısının faz sayısına bölünmesiyle elde edilmektedir. Elde edilen denklemlere göre, toplam faz direnci denklem 3.45'teki şekilde düzenlenebilmektedir. Bu değer iletkenin oda sıcaklığındaki direnç değeri olup, farklı sıcaklıklarda çalışma esnasında faz direnci denklem 3.46'daki formülle bulunmaktadır. Denklemdeki T değeri ortam sıcaklığıdır.

$$L_i = 2N_t\left(L_p + L_{su} + \left[S_p/N_{oluk}(D_{so} - h_s/2)\pi\right]\right) \tag{3.43}$$

$$L_{is} = \frac{N_{bobin}S_p}{N_{oluk}}(D_{so} - h_s/2)\pi + 2N_{bobin}L_{su} \tag{3.44}$$

$$R_s = 1.72 \cdot 10^{-8}\frac{N_{bobin}L_i + L_{is}}{A_i} \tag{3.45}$$

$$R_s' = R_s\frac{234.5 + T}{234.5 + 25} \tag{3.46}$$

3.10.1. İndüktans değerlerinin hesaplanması

Bir sargının indüktansı; oluk kaçak indüktansı (L_{oluk}), sargı sonu indüktansı (L_{bs}) ve mıknatıslanma indüktansı (L_{md} - L_{mq}) olarak üç başlık altında incelenebilmektedir (Lipo, 2017). Sargıdaki toplam indüktans değeri denklem 3.47 ve 3.48'deki olduğu gibi bahsedilen üç farklı indüktans değerinin toplamına eşittir. d ve q eksenlerindeki mıknatıslanma indüktansları L_{md} ve L_{mq} farklı olduğundan d ve q eksenlerindeki toplam indüktanslar L_d ve L_q da birbirirnden farklı olmaktadır.

$$L_d = L_{oluk} + L_{bs} + L_{md} \tag{3.47}$$

$$L_q = L_{oluk} + L_{bs} + L_{mq} \tag{3.48}$$

Çift katmanlı sargı yapısına sahip motorlarda oluk kaçak indüktansının iki bileşeni olmaktadır. Bunlar her iletkenin öz indüktansı $L_{öi}$ ve bobinler arasındaki karşılıklı indüktans L_{ki}'dir. Buna göre oluk indüktansı L_{oluk} denklem 3.49'daki şekilde elde edilir. Öz indüktans ve karşılıklı indüktans değerleri ise denklem 3.50 ve 3.51 ile elde edilmektedir (Lipo, 2017). Denklemlerdeki *pT*, *pB* ve *pTB* değişlenleri spesifik oluk iletkenlik katsayıları, B_p ise bobinin açısal uzunluğunun bir kutba oranını veren bobin adımı değeridir.

$$L_{oluk} = L_{öi} + L_{ki} \tag{3.49}$$

$$L_{öi} = \frac{3N_t^2 L_p}{N_{oluk}} (pT + pB + 2 \cdot pTB \cdot (3B_p - 2)) \tag{3.50}$$

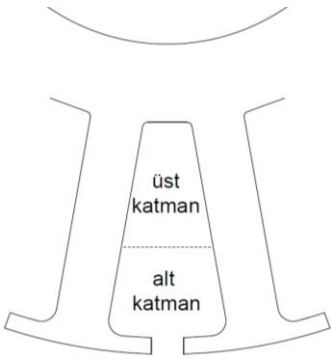
$$L_{ki} = \frac{3N_t^2 L_p}{N_{oluk}} \cdot pTB \cdot 3(1 - B_p) \tag{3.51}$$

Oluğun sırasıyla üst, alt ve toplamındaki iletkenler için hesaplanan *pT*, *pB* ve *pTB* kaçak iletkenlik katsayıları denklem 3.52, 3.53 ve 3.54'te verilmiştir (Lipo, 2017; Bulgan, 2014). Bu hesaplamalar yapılırken oluk içindeki sargıların Şekil 3.25'teki gösterilen üst ve alt bölgelerde konumlandığı varsayılmıştır. Bu bölgelerin alanları birbirine eşit kabul edilmiştir.

$$pT = \frac{1}{2}\mu_0 \left(0.623 + \frac{h_{s0}}{b_{s0}}\right) + \frac{1}{3}\mu_0 \frac{R_{s1} + h_{s2}/2}{1.25 \cdot b_{s2}} \tag{3.52}$$

$$pB = \mu_0 \left(\frac{h_{s0}}{b_{s0}} + 2\frac{h_{s2}/2}{b_{s1} + b_{s2}}\right) \tag{3.53}$$

$$pTB = \mu_0 \left(\frac{h_{s0}}{b_{s0}} + \frac{h_{s2}/2}{b_{s1} + b_{s2}}\right) \tag{3.54}$$



Şekil 3.25. Çift katmanlı sargı oluğundaki üst ve alt sargı katmanları

Sargı sonu indüktansı (L_{bs}) çift katmanlı sarım yapısına sahip prototip motor için denklem 3.55'teki şekilde yazılabilmektedir (Gieras, 2009). Denklemde yer alan L_{1bs} sargı sonunun toplam uzunluğu olup denklem 3.56 ile elde edilir. Sargı sonlarının, oluk ortasından diğer oluğa dönüş yaptığı kabul edilerek w_{s1} değeri denklem 3.57'deki gibi bulunur. Kaçak

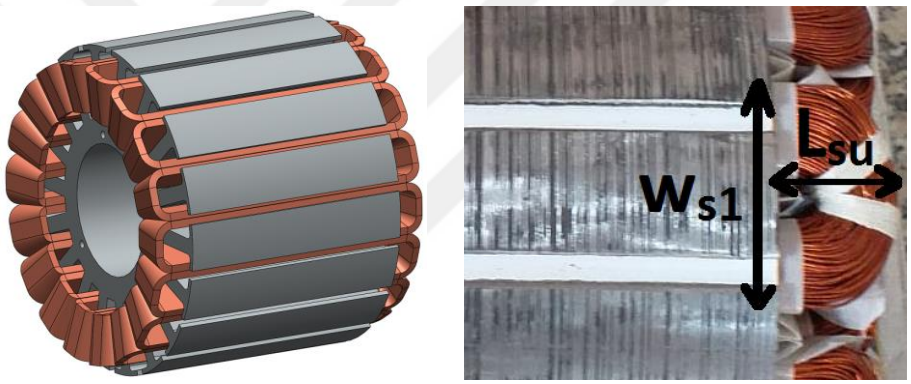
manyetik geçirgenliği λ_{bs} ise denklem 3.58'deki formül ile elde edilmektedir. Denklemde yer alan q değeri, kutup-faz başına oluk sayısını vermektedir.

$$L_{bs} = 4 \cdot \mu_0 \frac{N_t^2}{p} L_{1bs} \lambda_{bs} \tag{3.55}$$

$$L_{1bs} = 2 \cdot L_{su} + w_{s1} \tag{3.56}$$

$$w_{s1} = \pi (D_{so} - h_s/2) \frac{S_p}{N_{oluk}} \tag{3.57}$$

$$\lambda_{bs} = 0.34 \cdot q \left(1 - \frac{2}{\pi} \frac{w_{s1}}{L_{1bs}}\right) \tag{3.58}$$



Şekil 3.26. Stator sargıları ve sargı sonu ölçüleri

Mıknatıslanma indüktansı L_m'nin genel hali denklem 3.59 ile elde edilmektedir. Mıknatısların yerleşimine göre, akının doğrudan mıknatıs üzerinden geçtiği d ekseni ile akının rotordan geçtiği kaudratik eksendeki (q ekseni) mıknatıslanma indüktansları olan L_{md} ve L_{mq} değerleri, prototip motor yüzey mıknatıslı olduğundan birbirine eşit olarak alınmıştır. Dolayısıyla denklem 3.47 ve 3.48'de verilen L_d ve L_q indüktansları da birbirine eşit olarak elde edilmektedir.

$$L_m = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{p} \cdot (N_{oluk} \cdot k_{sf})^2 \cdot \frac{\mu_0 A_g}{g'} \tag{3.59}$$

3.11. Motor Kayıpları

SM elektrik motorlarında temel olarak dört tip kayıp vardır. Bunlar bakır kayıpları, demir kayıpları, mekanik kayıplar ve diğer kayıplardır. Bu kayıplar için çeşitli modeller geliştirilmiştir. Motor tasarımı yapılırken tüm kayıplar dikkate alınmalıdır. Özellikle verim değerinin amaç fonksiyonu olarak alındığı optimizasyon çalışmalarında, kayıpların minimize edilmesi gerekmektedir. Bunun için de kayıpların gerçeğe yakın doğrulukta tahmin edilmesi büyük önem arz etmektedir.

3.11.1. Bakır kayıpları

SMSM'lerin faz sargılarındaki kayıplar bakır kayıpları olarak adlandırılmaktadır. Bakır kayıpları sargıların iç dirençleri dolayısıyla meydana gelmektedir. Sargı direncini düşürmek için bakır telin kesit alanı artırılabilir. Telin kesit alanının artırılması faz başına tur sayısını azaltacak ve motorun istenen gücü üretememesine sebep olacaktır. Dolayısıyla motor sargıları tasarlanırken, istenen gücün elde edilebileceği ve akım yoğunluğu sınır değerlerini aşmayan en uygun tel kalınlığını seçmek gerekmektedir. Bakır kayıpları faz direnci ve faz akımının rms değerine göre denklem 3.60 ile elde edilmektedir (Hung, 2012). Verilen denklem, faz sargılarının oda sıcaklığında olduğu durumda geçerli olup, farklı sıcaklıklarda çalışılması durumunda denklem 3.46'daki faz direnci formulü kullanılmalıdır.

$$P_{bakır} = 3 \cdot I^2 \cdot R_s \tag{3.60}$$

3.11.2. Demir kayıpları

Demir kayıplarının minimize edilebilmesi için, kullanılan silisli saçların watt/kg kayıpları düşük olan saçlardan seçilmesi gerekmektedir. Rotorun tek parça olarak kullanıldığı tasarımların eddy kayıpları, silisli saçların kullanıldığı tasarımlara göre daha yüksektir. Demir kayıpları; eddy ve histerisis kayıplarına bağlı olarak, sinusoidal akı yoğunluğuna sahip motorlar için denklem 3.61'deki şekilde watt cinsinden elde edilmektedir (Deng, 1999). Silisli saçların ince seçilmesi eddy kayıplarını azaltmakta fakat saç maliyetlerini artırmaktadır. Denklemde yer alan k_h histerisis kayıp katsayısı, k_e eddy kayıp katsayısı, f çalışma frekansı, $\hat{B}$ akı yoğunluğunun tepe değeri, M_d ise toplam demir kütlesidir.

$$P_{demir} = (k_h f \hat{B}^2 + k_e f^2 \hat{B}^2) \cdot M_d \tag{3.61}$$

Akı yoğunluğu, statorun dişlerinde ve boyunduruğunda farklı tepe değerlerine ulaşmaktadır. Buna göre denklem 3.61, denklem 3.62'deki şekilde tekrar düzenlenebilir. Denklemde yer alan $\hat{B}_{sd}$ değeri stator dişindeki akı yoğunluğunu, $\hat{B}_{sb}$ değeri stator boyunduruğundaki akı yoğunluğunu, M_{sd} stator dişlerinin toplam kütlesini, M_{sb} ise stator boyunduruğunun kütlesini temsil etmektedir. Demir kaybı bulunduktan sonra eşdeğer devredeki demir kaybı direnci R_c denklem 3.63'teki gibi kolaylıkla bulunabilir.

$$P_{demir} = \left(k_h f \hat{B}_{sd}^2 + k_e f^2 \hat{B}_{sd}^2\right) \cdot M_{sd} + \left(k_h f \hat{B}_{sb}^2 + k_e f^2 \hat{B}_{sb}^2\right) \cdot M_{sb} \tag{3.62}$$

$$R_c = \frac{(V_q - I_q R_s)^2}{P_{demir}} \tag{3.63}$$

3.11.3. Mekanik kayıplar ve diğer kayıplar

Mekanik kayıplar sürtünme ve rüzgar kayıpları olarak iki kısımda incelenebilmektedir. Sürtünme kayıplarının minimize edilebilmesi için iyi yataklanmış, yüksek hassasiyete sahip rulmanların kullanılması ve hareket sistemlerinin iyi montajlanması gerekmektedir. Oluşabilecek montaj hataları, motorun titreşimli çalışmasına ve mekanik kayıpların artmasına sebep olacaktır. Sürtünme kayıplarının çoğu rulmanlarda gerçekleşirken, rüzgar kayıpları rotor yüzeyi ve havanın sürtünmesi sebebiyle oluşmaktadır. Dolayısıyla rotor yüzeyi arttıkça rüzgar kayıpları artmaktadır. Rulman tipi, rulman çapı, rotor hızı, motor yükü ve kullanılan yağlar rulman kayıpları üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Dutta, 2013). Rulman kayıpları denklem 3.64 ile, rüzgar kayıpları ise denklem 3.65 ile elde edilmektedir (El-Refaie ve Jahns, 2005). Denklemlerdeki ω_m rotor hızını, k_{rul} rulman kayıp katsayısını, F_{rul} rulmanlara etkileyen kuvveti, D_{irul} rulman iç çapını, k_t tork katsayısını, $k_{pür}$ pürüzlülük katsayısını, ρ_{hava} havanın yoğunluğunu, D_{ri} rotorun hava ile temas eden yüzeyinin çapını, L_p ise rotor uzunluğunu temsil etmektedir. Bu denklemler kullanılmak istenmezse, senkron motorlar için mekanik kayıpların çıkış gücünün %1-3'ü arasında olduğu kabul edilebilir (Hargreaves ve diğ., 2012). Motordaki diğer kayıplar, mıknatıslardaki eddy akımı kayıplarından ve akı dalgalanmalardan kaynaklanmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan mıknatıslar N45SH tipinde olup yüksek artık mıknatıslanma ve zorlayıcı kuvvet değerlerine sahiptirler. Yüksek dereceli (grade)

mıknatıslarda eddy akımları indüklenmeyeceğinden (Şahin, 2010), mıknatıs kayıpları dolayısıyla diğer kayıplar ihmal edilmiştir. Diğer kayıplar için çeşitli formüller geliştirilmiş olmakla birlikte, çıkış gücünün yaklaşık % 0.75'i diğer kayıplar olarak hesaba katılabilir (Gieras, 2009).

$$P_{rul} = 0.5 \cdot \omega_m k_{rul} F_{rul} D_{irul} \tag{3.64}$$

$$P_{rüz} = 0.03125 \omega_m^3 \pi k_t k_{pür} \rho_{hava} D_{ri}^4 L_p \tag{3.65}$$

3.12. Oluk-Kutup Oranının Seçimi

Yüksek performanslı bir motor elde etmek için en önemli parametrelerden biri oluk-kutup oranıdır. Bu oranı belirlerken, dengesiz manyetik kuvvetlerin olmamasına dikkat edilmelidir. Denklem 3.66'da sunulan kutup-faz başına oluk sayısı (q) doğru seçilmediğinde, oluk ve sargıların asimetrik yerleşiminden kaynaklanan belirgin dengesiz manyetik kuvvetler ortaya çıkmaktadır (Tanç, 2014). Denklem 3.66'teki N_{oluk} oluk sayısını, p kutup sayısını, n_f ise faz sayısını göstermektedir.

$$q = \frac{N_{oluk}}{p \cdot n_f} \tag{3.66}$$

Bir motordaki kutup-faz başına düşen oluk sayısı birden küçükse bu tip motorlar kesirli oluk sargılı motorlar olarak adlandırılmaktadır. q değerinin 1/2 ile 1/3 arasında olduğu tasarımlar, genellikle yüksek performans üretmekte, vuruntu momentleri düşük olmakta ve yüksek sargı faktörü (k_{sf}) değerlerine sahip olmaktadır (Salminen, 2004). Üretilecek motorun sargı faktörü temel bileşenin yüksek olması gerekmektedir. Sargı faktörü, faz sargılarındaki etkin olan sarımlar olarak tanımlanmaktadır. Sargı faktörü değeri yüksek olduğunda akım yoğunluğu değeri daha düşük olmakta, böylelikle ısınma, ek kayıplar ve üretilen harmonikler azalmaktadır. Şekil 3.27'de kutup-faz başına oluk sayısı ve sargı faktörü değerleri farklı oluk-kutup kombinasyonları için paylaşılmıştır. Şekil 3.27 incelendiğinde, kutup-faz başına oluk sayısı olan q değeri 0.5 ve daha küçük olan motorların sargı faktörlerinin istenilen yüksek seviyelerde olduğu görülmüştür. Şekil 3.27'denin satırlarında üstte yer alan değerler q değerlerini, altta yer alan değerler ise k_{sf} değerlerini göstermektedir.

	q, k_{sf}																			
N_{oluk}\p	**4**	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**	**16**	**18**	**20**	**22**	**24**	**26**	**28**	**30**	**32**	**34**	**36**	**38**	**40**	**42**
6	0.5 **.866**		0.25 **.866**				0.125 **.866**		0.1 **0.866**				0.07 **0.866**		0.062 **0.866**				0.05 **0.866**	
9		0.5 **.866**	0.375 **.945**	0.3 **.945**	0.25 **.866**						0.125 **0.866**	0.115 **0.945**	0.107 **0.945**	0.1 **0.866**						0.07 **0.866**
12			0.5 **.866**	0.4 **.966**		0.285 **0.966**	0.25 **0.866**								0.125 **0.866**	0.117 **0.933**		0.105 **0.933**	0.1 **0.866**	
15				0.5 **.866**		0.357 **0.951**	0.31 **0.951**		0.25 **0.866**										0.125 **0.866**	
18					0.5 **.866**	0.42 **0.902**	0.375 **0.945**		0.3 **0.945**	0.27 **0.902**	0.25 **0.866**									
21						0.5 **0.866**	0.437 **0.870**		0.35 **0.953**	0.318 **0.953**		0.269 **0.89**	0.25 **0.866**							
24							0.5 **0.866**		0.4 **0.966**	0.36 **0.958**		0.307 **0.95**	0.285 **0.966**		0.25 **0.866**					0.19 **0.943**
27								0.5 **0.866**	0.45 **0.877**	0.36 **0.958**	0.375 **0.945**	0.346 **0.954**	0.321 **0.954**	0.3 **0.945**	0.281 **0.915**	0.264 **0.877**	0.25 **0.866**			
30									0.5 **0.866**	0.45 **0.874**		0.384 **0.936**	0.357 **0.951**		0.312 **0.951**	0.294 **0.936**		0.263 **0.874**	0.25 **0.866**	
33										0.5 **0.866**		0.423 **0.903**	0.392 **0.928**		0.343 **0.954**	0.323 **0.954**		0.289 **0.928**	0.275 **0.903**	
36											0.5 **0.866**	0.46 **0.867**	0.428 **0.902**	0.4 **0.966**	0.375 **0.945**	0.35 **0.953**		0.315 **0.953**	0.3 **0.945**	0.285 **0.966**

q ≥ 1

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

Şekil 3.27. Kutup-faz başına oluk sayısı (q) ve sargı faktörü (k_{sf}) değerleri (Tanç, 2014)

Motor akı dağılımının ve moment yoğunluğunun yüksek olması için, oluk ve kutup sayıları mümkün olduğunca birbirine yakın tutulmaya çalışılır. Dengesiz manyetik kuvvetlerin ortaya çıkmaması için faz başına düşen oluk sayısının (N_{oluk}/n_f) çift olması gerekmektedir. Buna göre, oluk ve kutup sayıları arasında denklem 3.67'deki gibi bir oran en uygun motor tasarımlarını vermektedir.

$$N_{oluk} = p \pm 2 \tag{3.67}$$

Tek katlı sargı yapısına sahip motorların demir kayıpları çift katlı sargı yapısına sahip motorlara kıyasla daha yüksektir ve sargı başları daha uzundur. Motorlarda çift katlı sargı kullanımı, eddy akımı kayıplarını, moment dalgalanmalarını, MMK ve EMK'nın uzay harmonik bileşenlerini azaltır (Bianchi ve diğ., 2006; El-Refaie ve diğ., 2008). Yüksek verimliliği ve vuruntu momentlerinin azlığı sebebiyle bu tez çalışmasında çift katlı sargı yapısı tercih edilmiştir.

Motor tasarımında dikkat edilmesi gereken bir diğer faktör vuruntu momentidir. Vuruntu momenti farklı bir başlık altında incelenecek olsa da, bu bölümde oluk-kutup oranı ile ilişkisinden bahsedilecektir. Vuruntu momenti, rotordaki sürekli mıknatısların sağladığı uyarma akısı ile statorun manyetik direnci arasındaki etkileşimden meydana gelmektedir (Dosiek ve Pillay, 2007). Vuruntu momenti frekansı, kutup sayısı ve oluk sayısının en küçük ortak katı (EKOK) olan k_{np} ile orantılıdır (Cros ve Viarouge, 2002). Motorun vuruntu momentinin düşük olması için, Şekil 3.28'deki EKOK (N_{oluk}, p) değeri büyük olan bir oluk/kutup kombinasyonu belirlenmelidir.

Motorun oluk ve kutup sayılarının en büyük ortak böleni (EBOB), sargı dizilimindeki simetri sayısını temsil etmektedir (Meier, 2008). Bu değer, motor simetrisinin ve radyal kuvvetlerin göstergesi olup çift sayı olduğunda motor net radyal kuvveti düşük olmaktadır. EBOB (N_{oluk}, p) değerinin bir olduğu durumlarda (genellikle $N_{oluk} = p \pm 1$ olduğu durumlarda) dengesiz manyetik kuvvetler ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla net radyal kuvvetlerin düşük olması için, oluk/kutup sayılarının EBOB'u olan b_{np}'nin çift sayı olduğu tasarımlar seçilmelidir (El-Refaie ve Jahns, 2005). Şekil 3.29'da EBOB (Noluk, p) değerleri gösterilmiştir. Verilen bilgiler ışığında, prototip motorun boyutları

da dikkate alınarak oluk/kutup oranının 18/20 olmasına karar verilmiştir. Böylelikle q değeri 0.3, k_{sf} değeri 0.945, EKOK değeri 180, EBOB değeri ise 2 olmaktadır.

EKOK (N_{oluk}, p)

N_{oluk}\p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
6	12		24				48		60				84		96				120	
9		18	72	90	36						72	234	252	90						126
12			24	60		84	48								96	204		228	120	
15				30		210	240		60										120	
18					36	126	144		180	198	72									
21						42	336		420	462		546	588							
24							48		120	264		312	168		96					168
27		q ≥ **1**						54	540	594	216	702	756	270	864	918	108			
30									60	330		390	420		480	510		570	120	
33										66		858	924		1056	1122		1254	1320	
36											72	468	252	180	288	612		684	360	252

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

Şekil 3.28. Oluk ve kutup sayısı kombinasyonlarının en küçük ortak katları (Tanç, 2014)

EBOB (N_{oluk}, p)

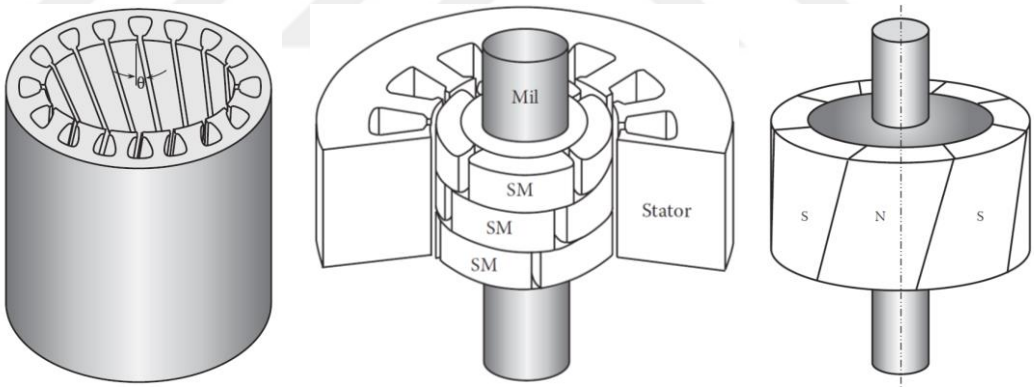
N_{oluk}\p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
6	2		2				2		2				2		2				2	
9		3	1	1	3						3	1	1	3						3
12			4	2		2	4								4	2		2	4	
15				5		1	1		5										5	
18					6	2	2		2	2	6									
21						7	1		1	1		1	7							
24							8		4	2		2	4		4					6
27		q ≥ **1**						9	1	1	3	1	1	3	1	1	9			
30									10	2		2	2		2	2		2	10	
33										11		1	1		1	1		1	1	
36											12	2	4	6	4	2		2	4	6

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

Şekil 3.29. Oluk ve kutup sayısı kombinasyonlarının en büyük ortak bölenleri (Tanç, 2014)

3.13. Vuruntu Momenti

Asansör sistemlerinde konforlu seyahatler elde etmek için, tahrik motorlarının titreşim ve gürültüsü minimum değerlere düşürülmelidir. Motorlardaki titreşim ve gürültünün en önemli nedeni, vuruntu momenti ve tork dalgalanmalarıdır. Çıkış torkunun kalitesi ve düzgünlüğü, vuruntu momentinin ve zıt EMK harmoniklerinin azaltılması ile iyileştirilmektedir (Islam ve diğ., 2007). Düzgün çıkış torkları elde etmek için farklı teknikler üzerinde çalışılmıştır (Jahns ve Soong, 1996). İlk temel teknikte, ideal trapez veya sinüzoidal dalga formları elde etmek için motorun geometrik tasarımına dikkat edilmektedir. İkinci temel teknik, makinenin veya invertörün ideal olmayan özelliklerinin modifiye edilmesi için uyarma akımı dalga formlarının aktif olarak kontrol edilmesini amaç edinmektedir. Statora veya mıknatıslara kaykı verilmesi (skewing), mıknatısların kademeli olarak yerleştirilmesi (step skewing methods) vuruntu momentini minimize etmek için kesin çözümlerdir, fakat bu yöntemler pahalı ve üretimde bazı zorlukları olan süreçlerdir. Bu yöntemler Şekil 3.30'da gösterilmiştir (Tong, 2014).



a) b) c)

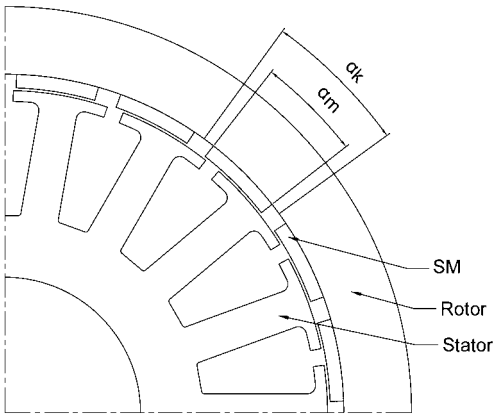
Şekil 3.30. Vuruntu momentini azaltma yöntemleri: a) statora kaykı verilmesi, b) Mıknatısların kademeli yerleştirilmesi, c)Mıknatıslara kaykı verilmesi

Vuruntu momentinin tahmini için konform dönüşümlerden elde edilen analitik çözüm tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiş ve vuruntu momenti sadece hava aralığından değil, oluk bölgesinden de elde edilmiştir (Lin ve diğ., 2009). Lin ve diğerlerinin elde ettikleri sonuçlar SEY sonuçları ile uyumluluk göstermiş ve analitik yaklaşımın doğruluğu kanıtlanmıştır. Literatürde mıknatısların kademeli yerleştirilmesi, herringbone yöntemiyle ve klasik yöntemlerle denenmiş ve herringbone yönteminin daha fazla

vuruntu momenti ve zıt EMK harmoniği ürettiği tespit edilmiştir. Buna karşılık mıknatısların klasik olarak kademeli yerleştirilmesi veya mıknatısların kaydırılması (shifting of magnets) ile tüm EMK harmoniklerinin ve vuruntu momentinin ortadan kaldırılabileceği görülmüştür (Dosiek ve Pillay, 2007; Fei ve Zhu, 2013; Yokoi ve Higuchi, 2014; Kim ve diğ., 2016).

Maliyeti yüksek olan ve uygulama zorluğu bulunan yöntemlerin yanında oluk/kutup sayısının, oluk açıklığının ve kutup aralığı değerinin optimum seviyede seçilmesi ile vuruntu momenti ve tork dalgalanmaları minimize edilebilmektedir (Sargazi ve diğ., 2014; Ocak ve diğ., 2016; Öztürk ve diğ., 2017). Bu tez çalışmasında vuruntu momentinin ve tork dalgalanmalarının minimize edilmesi için kesirli sargı yapısına sahip bir SMSM en uygun kutup aralığı (α_{ka}) bulunarak tasarlanmıştır. Kutup aralığı (embrace) değeri, Şekil 3.31'de gösterilen mıknatıs adımı açısının (α_m) kutup adımı açısına (α_k) oranı ile elde edilmekte ve denklem 3.68 ile gösterilmektedir.

$$\alpha_{ka} = \frac{\alpha_m}{\alpha_k} \tag{3.68}$$



Şekil 3.31. Mıknatıs adımının ve kutup adımının gösterimi

Vuruntu momentinin stator dişleri ile mıknatıslar arsındaki etkileşimden meydana geldiği, temel vuruntu momenti denklemi olan 3.69'dan rahatlıkla anlaşılmaktadır (Dosiek ve Pillay, 2007). Denklemde $\emptyset_g$ mıknatıslardan hava aralığına doğru geçen akıyı, Rg hava aralığı relüktansını, θ ise rotor konumunu temsil etmektedir (Hanselman, 2003). Eğer R_g rotor dönüşü esnasında değişim göstermezse, türev sıfır olmakta ve bu durumda vuruntu momenti de sıfır olmaktadır.

$$T_{cog} = -\frac{1}{2}\emptyset_g^2 \frac{dR_g}{d\theta} \tag{3.69}$$

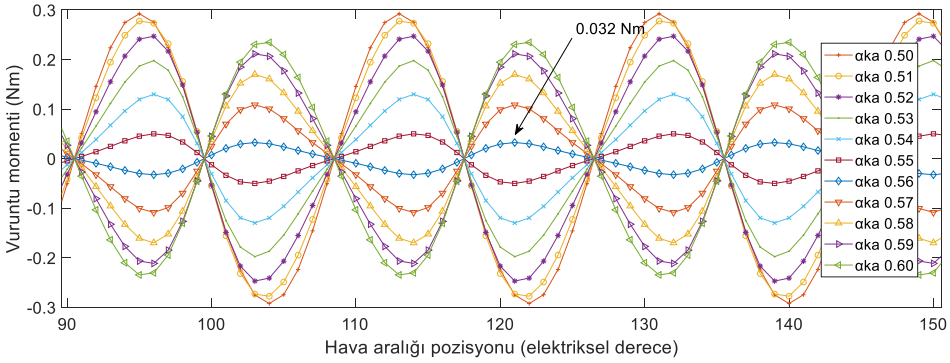
Hava aralığı relüktansı rotorun dönüşü esnasında periyodik olarak değişmektedir. Hava aralığı relüktansının değişimine bağlı olarak, vuruntu momenti de denklem 3.70'teki şekilde Fourier serisi olarak periyodik değişim göstermektedir (Gieras, 2004). Denklemdeki T_{mk} Fourier katsayısını, k_{np} oluk ve kutup sayılarının EKOK'unu, k ise bir tam sayıyı temsil etmektedir.

$$T_{cog} = \sum_{k=1}^{\infty} T_{mk}\, sin(k_{np} k\theta) \tag{3.70}$$

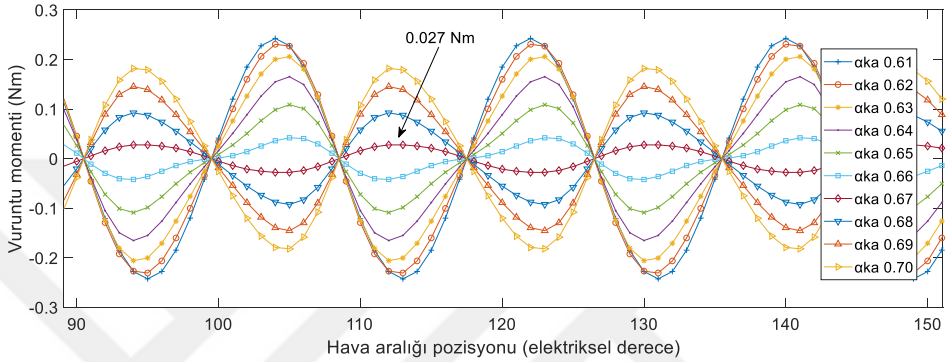
Vuruntu momenti hesabında rotorun mekanik açısal konumunun yerine elektriksel konumunu kullanan bir diğer yöntem denklem 3.71'de verilmiştir (Lu ve diğ, 2006). Denklemdeki θ_e rotorun elektriksel açısal konumunu, h_m mıknatıslanma yönüne dik mıknatıs kalınlığını, p kutup sayısını, B_r ise H=0'daki artık mıknatıslanma değerini temsil etmektedir. Denkleme göre vuruntu momentinin tepe değeri kutup sayısı, artık mıknatıslanma değeri, mıknatıs kalınlığı, rotorun elektriksel derecesine göre manyetik akı yoğunluğu ile doğru orantılı iken havanın manyetik geçirgenliği ve mıknatısın manyetik bağıl geçirgenliği ile ters orantılıdır.

$$T_{cog} = \frac{1}{2}\frac{p}{2} B_r \frac{h_m}{\mu_0 \mu_r} \frac{d\phi_g}{d\theta_e} \tag{3.71}$$

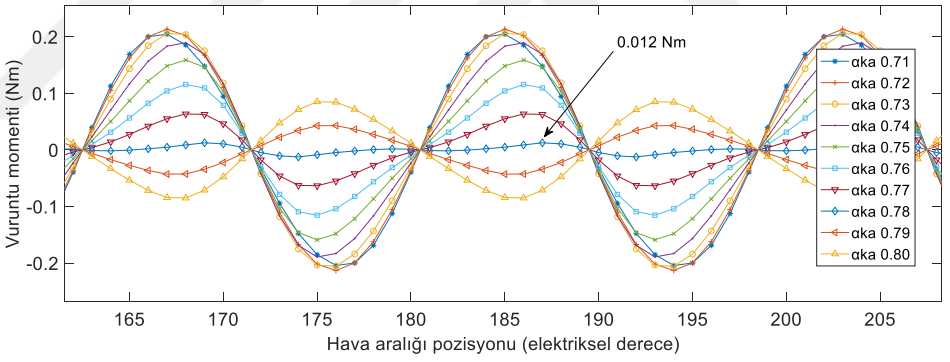
Kutup aralığı değerleri 0.5 ve 0.9 arasında 0.01 aralıklarla değiştirilerek parametrik çözümler yapılmış ve Ansys RMxprt ve Maxwell 2D SEY analizleri ile vuruntu momenti ve zıt EMK'nın FFT (Fast Fourier Transform) grafikleri elde edilmiştir. Şekil 3.32'de vuruntu momentinin 0.5 ve 0.9 kutup aralığındaki tüm değerleri için grafikleri paylaşılmıştır (Soyaslan ve diğ., 2019). Minimum vuruntu momentinin elde edildiği 4 adet kutup aralığı değeri (0.56, 0.67, 0.78, 0.88) SEY analizleri için seçilmiştir. Seçilen değerlerdeki vuruntu momentleri sırasıyla 0.032 Nm, 0.027 Nm, 0.012 Nm ve 0.047 Nm'dir.



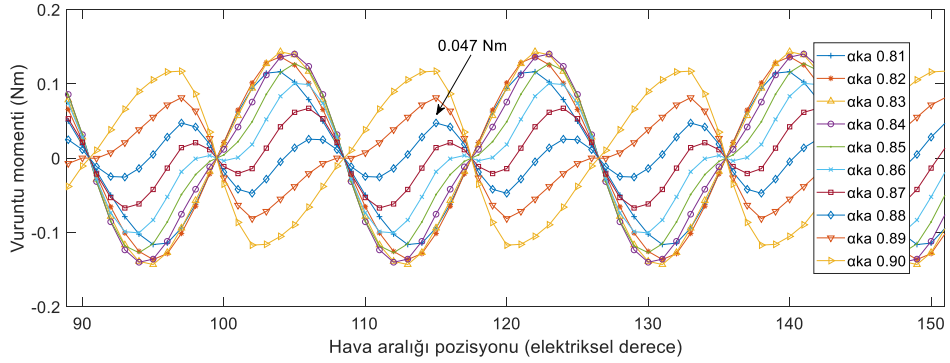
a)



b)

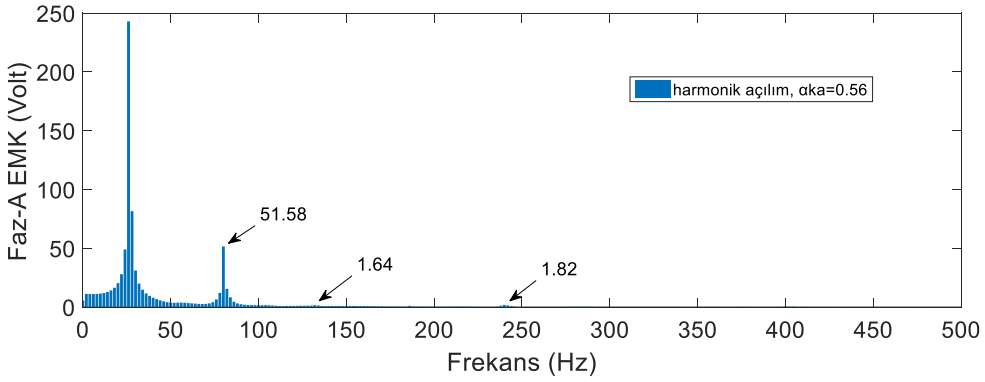


c)

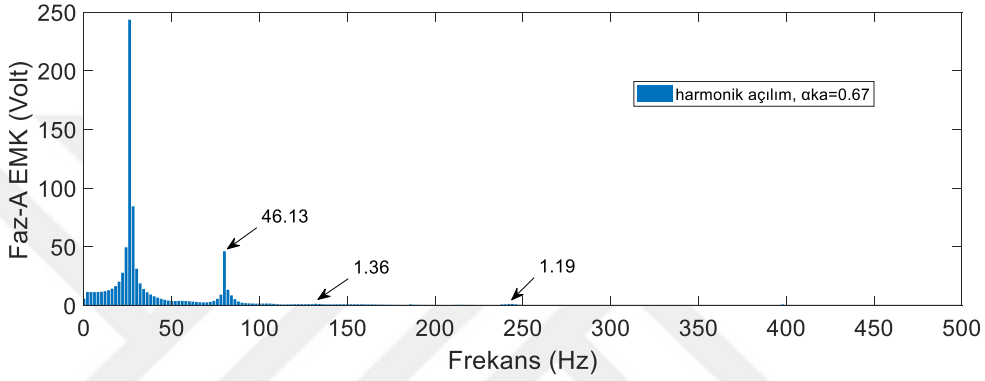


d)

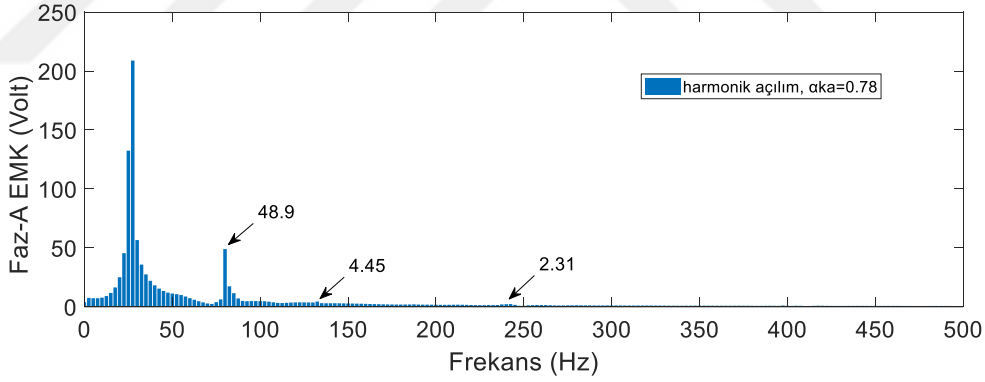
Şekil 3.32. Vuruntu momenti-Hava aralığı pozisyonu grafikleri: Kutup aralığı a) 0.5-06, b) 0.6-0.7, c) 0.7-0.8, d) 0.8-0.9



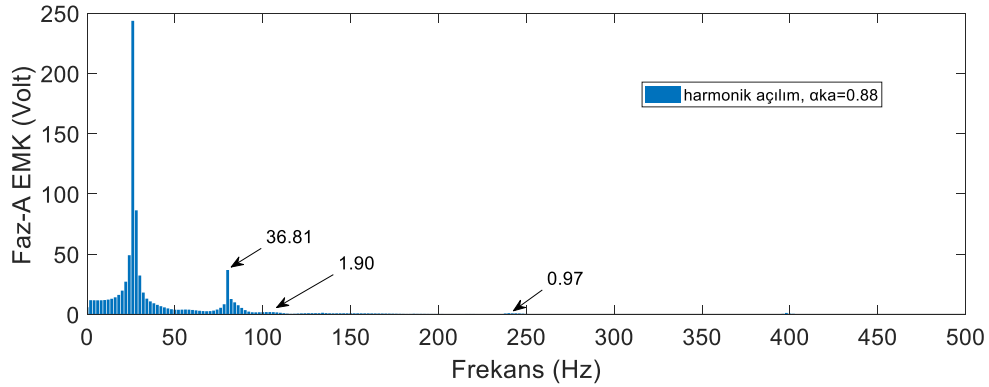
a)



b)



c)

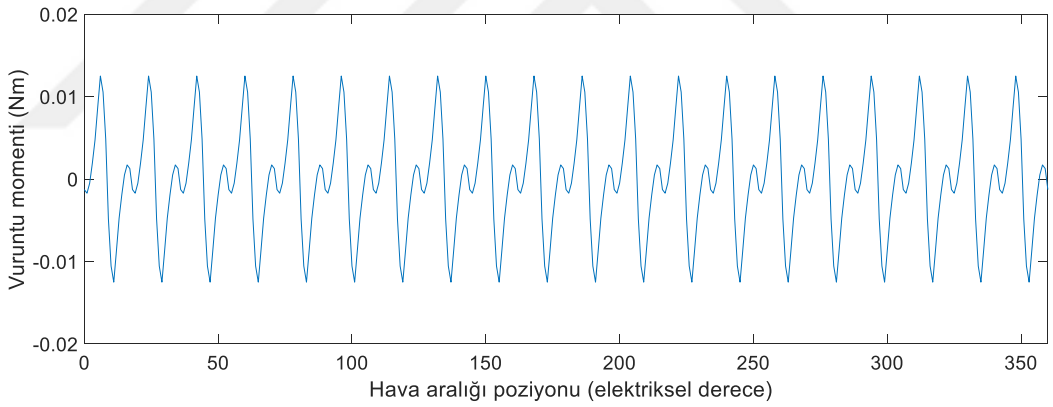


d)

Şekil 3.33. İndüklenen gerilimlerin FFT grafikleri: Kutup aralığı; a) 0.56, b) 0.67, c) 0.78, d) 0.88

Elde edilen vuruntu momenti değerlerine göre, 2D SEY analizleri gerçekleştirilmiş, indüklenen faz gerilimleri üzerinde FFT analizi yapılmış ve grafikler Şekil 3.33'te paylaşılmıştır. 0.56, 0.67, 0.78 ve 0.88 kutup aralığı değerleri için temel harmonik değerleri motorun çalışma frekansı olan 26.53 Hz'deki değerlerdir.

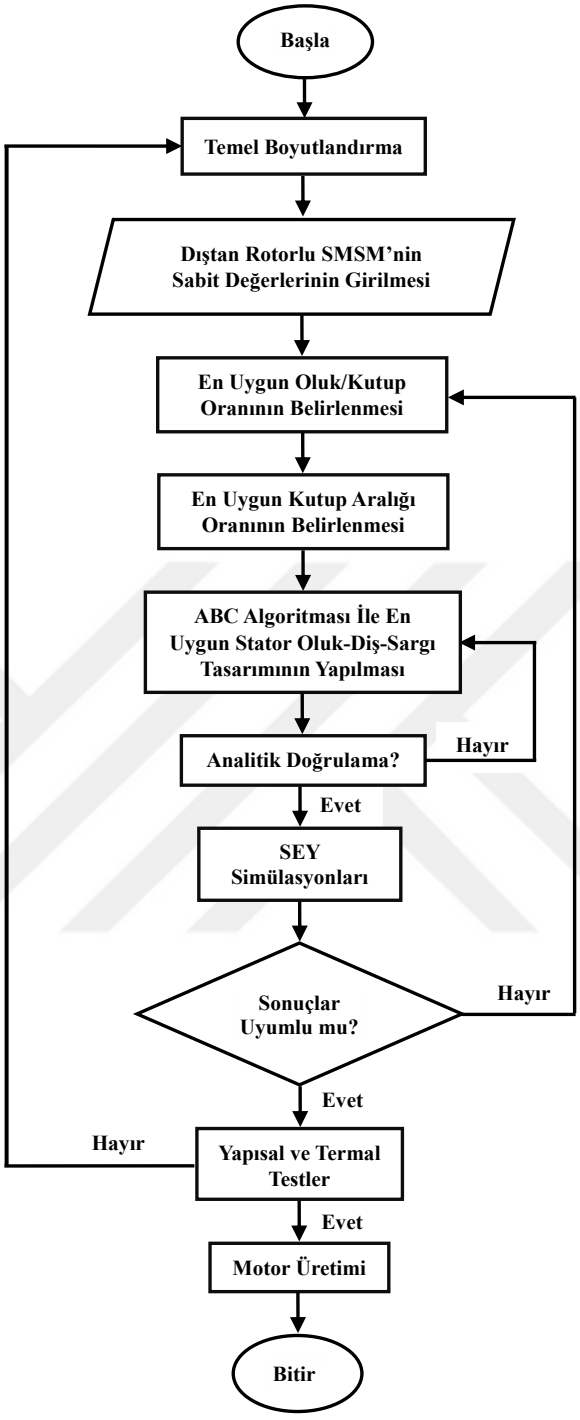
En baskın olan harmoniklerin düşük frekanslı harmonikler olduğu bilindiğinden, minimum tork dalgalanması elde edebilmek için düşük frekanslı harmonik değerlerine dikkat edilmelidir. Şekil 3.33 incelendiğinde, 3. harmoniklerin (frekans=79.59 Hz) sırasıyla 51.8 V, 46.13 V, 48.9 V ve 36.81 V olarak elde edildiği görülmektedir. Bu değerlerdeki tork dalgalanmalarının ise sırasıyla 7.4 Nm, 7.3 Nm, 10.8 Nm ve 19.8 Nm olduğu görülmüştür (Soyaslan ve diğ., 2019). Vuruntu momentleri, harmonik değerleri ve tork dalgalanmaları incelendiğinde en uygun kutup aralığı değerinin 0.78 olmasına karar verilmiş ve motor tasarımına bu değer üzerinden devam edilmiştir. Şekil 3.34'te 0.78 kutup aralığı değerine sahip motorun vuruntu momenti grafiği paylaşılmıştır.



Şekil 3.34. Kutup aralığı değeri 0.78 olan motorun vuruntu momenti grafiği

3.14. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Optimum Tasarımı

Motor tasarımında kabul görmüş başlıca tasarım süreçleri ön analitik tasarım, SEY tasarımı, yapısal ve termal tasarım ile doğrulama aşamalarıdır. Motor tasarımı temel olarak bu aşamaların etrafında şekillense de, süreçleri kısaltan ve uygun sonuçların daha hızlı elde edilmesini sağlayan çeşitli optimizasyon yöntemleri de sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında izlenen tasarım süreçleri Şekil 3.35'te paylaşılmıştır.



Şekil 3.35. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Tasarım Algoritması

İlk önce motor tasarım bilgisine ve literatürdeki çalışmalara dayanarak istenen çıkış torkuna ve gücüne uygun yaklaşık motor ölçüleri belirlenmektedir. Bu ölçüler belirlenirken tasarım sınırları ve varsa sabit değerler dikkate alınmaktadır. Ardından en uygun oluk-kutup oranı ve kutup aralığı oranları sırasıyla amaca uygun bir şekilde seçilir.

Bu tez çalışmasında tasarlanan motorun asansör sistemlerinde kullanılacak olması sebebiyle, en önemli amaçlardan biri titreşimsiz ve vuruntu momenti düşük bir motor elde etmektir. Dolayısıyla oluk-kutup ve kutup aralığı oranları bu doğrultuda seçilmiştir. Ardından ABC algoritması ile stator sargılarının, dişlerinin ve oluklarının optimum tasarım sürecine geçilmiştir. Bu aşamada, belirlenen sınır değerler içinde amaç fonksiyonuna ulaşmak için optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Elde edilen en iyi analitik sonuçlara göre Ansys Maxwell yazılımında SEY analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçların uyumluluğu karşılaştırılmıştır. Bu aşamayı geçen tasarım en son termal ve yapısal testlere tabi tutulmuş ve motorun nihai tasarımı elde edilmiştir.

Optimizasyon çalışmaları motor tasarımında önemli bir yere sahiptir. Literatürdeki optimizasyon yöntemlerin incelenmesi sonucu; genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu, diferansiyel evrim algoritmaları, hibrit algoritmaları vb. gibi yöntemler kullanılarak SMSM'lerde tek amaçlı veya çok amaçlı optimizasyon çalışmaları farklı motor parametreleri için test edilmiştir.

Genetik algoritmalar ile yapılan optimizasyon çalışmalarında; motor verimi, elektromanyetik performans, termal performans ve malzeme maliyetleri tekli (Cho ve diğ., 2003) ve çoklu (Sooriyakumar ve diğ., 2010) hedef fonksiyonları olarak seçilmiştir. Sarım sayısı, stator iç çapı, stator diş genişliği, stator boyunduruk genişliği, mıknatıs kalınlığı ve mıknatıs genişliği gibi parametreler optimizasyon parametreleri olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmaların çoğunda; ön analitik tasarımlar, ardından genetik algoritmalar ile optimizasyon çalışmaları ve en sonunda elde edilen optimum sonuçlara göre sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir (Mutluer, 2017). Vuruntu momenti optimizasyonu çalışmalarında; mıknatıs şekilleri (Özoğlu, 2017), stator diş yapıları (Putek, 2016), sağa veya sola kaydırmalı oluk tasarımları (Dajaku ve Gerling, 2014), kutup aralıkları, mıknatıs kalınlıkları (Hemmati ve diğ., 2013) vb. gibi parametrelerde yenilikler yapılarak ve farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak iyileştirmeler yapılmıştır. Ayrıca Halbach mıknatıs dizilimlerinin kullanıldığı çalışmalarda düşük vuruntu momentleri ve dalgalanmaları elde edilmiştir (Wang ve diğ., 2015; Güler, 2013; Liu ve diğ., 2015). Parametre tanımlamasında ise sıklıkla parçacık sürü optimizasyonu (Xue ve diğ., 2017; Liu ve diğ., 2011) metodu kullanılmıştır. Diferansiyel evrim

algoritmaları (Ouyang ve diğ., 2006) genetik algoritmalara benzer olarak tek ve çok amaçlı motor optimizasyon çalışmalarında kullanılmıştır.

Literatür araştırmaları sonucu; yapay arı kolonisi (ABC) algoritmasının (Karaboğa ve Baştürk, 2007) içten rotorlu bir SMSM'nin verim optimizasyonunda (Mutluer ve Bilgin, 2016) kullanıldığı tespit edilmiş ve olumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür. ABC algoritmasının dıştan rotorlu bir SMSM tasarımında daha önce hiç kullanılmadığı gözlenmiş ve bu yöntemin tez kapsamında tasarlanan motorun parametre optimizasyonunda test edilmesine karar verilmiştir.

3.14.1. Sezgisel optimizasyon algoritmaları

Karşılaşılan optimizasyon problemlerinin çoğu matematiksel formül yardımıyla çözülemezler. Klasik yöntemlerle gerçekleştirilen çözümler uzun sürebilir ve buna rağmen bulunan sonuçlar, hedeflenen sonuçlar olmayabilir. Bu tarz problemlere çözüm aranırken doğal yaşantılardan esinlenilen sezgisel (heuristic) yöntemler geliştirilmiş ve böylelikle en iyi sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır (Gülcü, 2006). Sezgisel yöntemlerde gerçek hayattaki problemin matematiksel modeli yani formülü bir kıstas olarak kabul edilmekte ve en iyi çözüm en kısa sürede elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu algoritmalar her zaman en mükemmel sonucu garanti etmez fakat ne kadar kısa sürede ne kadar iyi bir sonuca ulaşabiliyorsa o derece etkili bir algoritma olarak kabul edilir (Saim, 2016). Bu algoritmalarda elde edilen sonuçların klasik yöntemlerde olduğu gibi her zaman aynı sonucu üreteceğinin garantisi yoktur (Akça, 2011). Sezgisel yöntemler, çözüm zamanının kısa olması ve farklı problemlere uygulanabilir olması nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak çözümün garanti edilememesi ve birçok parametrenin uygun şekilde tasarlanmasının gerekliliği bu yöntemlerin dezavantajı olarak nitelendirilmektedir (Özsağlam, 2009). İyi bir sezgisel yöntemin içerisinde 4 temel unsur bulunmaktadır (Ong ve Huang, 1989):

- Çözüm en iyiye yakın olmalı,
- En iyi çözümden uzaklaşma olasılığı düşük olmalı,
- İşlem süresi uygun olmalı,
- Bellek ihtiyacı küçük olmalı.

Sezgisel optimizasyon algoritmaları, içerisinde iki tip algoritmayı barındırmaktadır. Bunlar gelişime dayalı algoritmalar ve sürü zekası temelli algoritmalardır. Gelişime dayalı bir algoritma olan genetik algoritma, sezgisel algoritmaların temelini oluşturmaktadır. Sürü halinde yaşayan arı, kuş, karınca, balık, termit gibi canlıların yaşantısından esinlenilerek geliştirilen algoritmalar ise sürü zekası temelli optimizasyon algoritmalarıdır (Akça, 2011). Aşağıda sezgisel algoritmaların sınıflandırması gözükmektedir:

Gelişime Dayalı Optimizasyon Algoritmaları:

- Tavlama Benzetimi Algoritması,
- Tabu Arama Algoritması,
- Genetik Algoritma.

Sürü Zekası Temelli Optimizasyon Algoritmaları:

- Parçacık Sürü Optimizasyonu,
- Karınca Kolonisi Algoritması,
- Arı Kolonisi Algoritması,
- Yapay Arı Kolonisi Algoritması.

3.14.2. Yapay Arı Kolonisi (ABC) Algoritması

Arı kolonilerinin kovan etrafında uçarak birbirlerine bilgi aktarmaları, karıncaların geçtikleri yollara kimyasal madde (feromon) bırakarak diğer karıncalara bilgi aktarmaları, kuş ve balık sürülerinin konum ve hızlarını ayarlayarak topluca hareket etmeleri sürü zekasını temel teşkil eden zeki davranışlardır (Karaboğa ve Akay, 2007). Arıların besin arama ve kovana getirme davranışları Şekil 3.36'da gösterilmiştir. A ve B bölgeleri bulunmuş besin kaynaklarıdır.

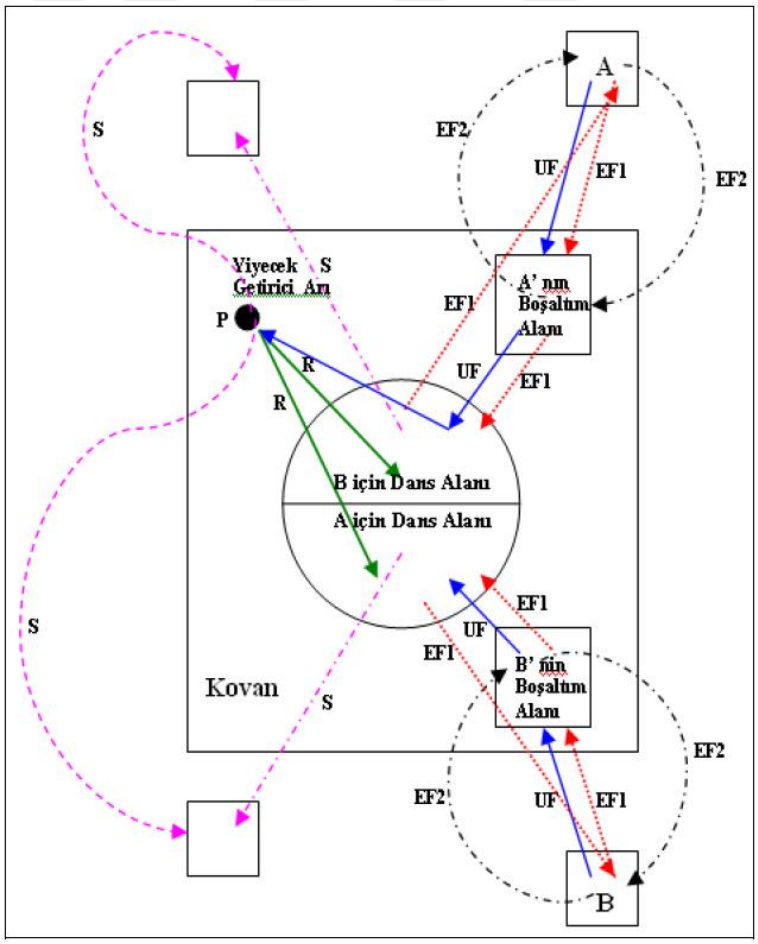
Başlangıçta görevi belli olmayan ve besin kaynağı bilgisinden yoksun arı, besin aramaya başlayacaktır. Bu arı için iki durum vardır: Birinci durum; S harfi ile gösterilen bu arı, kaşif arı olabilir ve besin aramaya başlayabilir. İkinci durum; R ile gösterilen bu arı, dans eden arıları izleyerek tarif edilen besin kaynaklarına giden bir gözcü arı olabilir. Besin kaynaklarına giden arılar, buldukları kaynaklardan kovana nektar getirmeye başlarlar.

Böylece bu arılar işçi arı haline gelmiş olurlar. Nektarı kovana getiren arı için de üç seçenek vardır (Akay, 2009):

i) Bilgi paylaşımında bulunmadan besin kaynağından nektar getirmeye devam edebilir. Bu arı EF2 ile gösterilmiştir.

ii) Kaynağa geri dönmeden önce dans alanında dans ederek besin kaynağının yeri ve miktarı hakkında diğer arılara bilgi paylaşımında bulunur ve diğer arıları bulduğu kaynağa yönlendirebilir. Bu arı EF1 ile gösterilmiştir.

iii) Besin kaynağını terk ederek dans alanında gözcü arı olabilir ve dans eden diğer arıları izler. Bu arı UF ile gösterilmiştir.



Şekil 3.36. Arıların besin arama ve kovana getirme davranışları (Akay, 2009)

Yapay Arı Kolonisi (ABC), bal arılarının bilgi paylaşımı amacıyla yaptıkları danslardan ve yiyecek aramak için sürü halinde gösterdikleri zeki davranışlardan esinlenerek geliştirilen, sürü zekası temelli sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır. Esinlenilen arı kolonisi modelinde üç farklı arı grubu bulunmaktadır. Bu arılar işçi arılar, gözcü arılar ve kâşif arılar olarak adlandırılır. İlk kabul olarak koloninin yarısı işçi arılar, yarısı da gözcü arılar olarak seçilmiştir. İkinci kabul ise, her bir nektar (besin) kaynağı için sadece bir işçi arı bulunmakta, yani her bir nektar sadece bir işçi arı tarafından alınmaktadır. Dolayısıyla işçi arıların sayısı nektar kaynağı sayısına eşittir. Kolonideki diğer arılar tarafından besin kaynağı tüketilen işçi arı, kâşif arıya dönüşür ve yeni bir kaynak aramaya başlar (Karaboğa, 2005). Yiyecek kaynaklarının yerleri problemin olası çözümlerine, kaynaklardaki nektar miktarı ise çözümün uygunluğuna yani kalitesine karşılık gelmektedir. Dolayısıyla yapay arı en fazla nektara sahip kaynağın yerini bulmaya çalışmakta ve uzaydaki çözümlerden problemin minimumunu ya da maksimumunu veren noktayı yani çözümü bulmaya çalışmaktadır. ABC algoritmasının temel işlem basamakları Tablo 3.6'daki gibidir (Karaboğa, 2014):

Tablo 3.6. ABC algoritmasının temel işlem basamakları

Adımlar	İşlemler
Adım 1	İşçi arılar tarafından olası çözümleri temsil eden başlangıç yiyecek kaynakları üretilir.
REPEAT	Koşul sağlanana kadar (istenilen elde edilene kadar) aşağıdaki adımlar tekrar edilir.
Adım 2	Tüm işçi arılar besin kaynağı bölgelerine gönderilir.
Adım 3	Olasılıksal seleksiyonda kullanılacak olasılık değerleri işçi arılar tarafından gelen bilgilere göre hesaplanır.
Adım 4	Gözcü arılar olasılık değerlerine göre besin kaynağı bölgelerini seçer.
Adım 5	Bazı kaynaklar terk edilir (bırakılır) ve kaşif arılar üretilir.
Adım 6	Şimdiye kadar bulunan en iyi besin kaynağı hafızada tutulur.
UNTIL	Çevrim sayısı = Maksimum çevrim sayısı

ABC algoritmasında besin arama sürecinin her çevrimi üç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar; başlangıç besin kaynağı bölgelerinin üretilmesi, görevli arıların besin kaynağı bölgelerine gönderilmesi ve tükenen besin kaynaklarının bırakılarak kâşif arıların üretilmesidir. Kâşif arı sayısı, limit parametresi ile kontrol edilir. Bir besin kaynağını temsil eden çözüm belli sayıda denemelerden sonra hala iyileştirilemiyorsa; bu kaynakta

besin kalmadığı ve kaynağın tükendiği varsayılır ve kaynak terkedilir. Böylece bu kaynağa giden işçi arı kâşif arıya dönüşür. Kaynağın besininin tükenip tükenmediği her besin kaynağı için tutulan çözüm geliştirilememe sayacı ile kontrol edilir (Sağ, 2015). ABC algoritmasının detaylı akış diyagramı kullanılan denklemler ile birlikte Tablo 3.7'de paylaşılmıştır (Mutluer & Bilgin, 2016; Karaboğa, 2014). ABC algoritması kullanılarak elde edilen tasarım sonuçları ise Bölüm 4'te paylaşılmıştır.

Tablo 3.7. ABC algoritmasının detaylı akış diyagramı

START

i. İşçi arılar tarafından olası çözümleri temsil eden başlangıç yiyecek kaynakları (başlangıç popülasyonu) denklem 3.72 ile üretilir ve popülasyonun çözüm sayaçları sıfırlanır. (iyileştirilememe sayacı, $f_i = 0$)

$$x_{ij} = x_j^{min} + rand\ (0,1)(x_j^{max} - x_j^{min}) \begin{cases} i = 1, \dots, SN \\ j = 1, \dots, D \\ SN, besin\ kaynaklarının\ sayısı \\ D, karar\ değişkenleri\ sayısı \\ x_j^{max}, j.karar\ değişkeninin\ üst\ sınırı \\ x_j^{min}, j.karar\ değişkeninin\ alt\ sınırı \end{cases} \quad (3.72)$$

ii. Denklem 3.73'teki gibi limit değeri hesaplanır.

$$limit = (SN * D)/2 \quad (3.73)$$

iii. Amaç fonksiyonu (f_i) kullanılarak popülasyonun uygunluk değeri ($fitness_i$) denklem 3.74'teki gibi hesaplanır (Yani besin kaynaklarının kalitesi hesaplanır).

$$fitness_i = \begin{cases} 1/(1 + f_i), f_i \geq 0 \\ 1/abs(f_i), f_i < 0 \end{cases} \quad (3.74)$$

REPEAT

FOR i=1 to SN DO

iv. Denklem 3.75 kullanılarak x_i kaynağının işçi arısı için yeni besin kaynağı üretilir ve uygunluk değeri hesaplanır (İşçi arıları besin kaynaklarına gönder).

$$v_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \begin{cases} i, k = 1, \dots, SN \\ j = 1, \dots, D \\ SN\ besin\ kaynağı\ sayısı \\ D\ parametre\ sayısı \\ \varphi_{ij} = [-1,1] \\ v_{ij} = \begin{cases} x_j^{min}, v_{ij} < x_j^{min} \\ v_{ij}, x_j^{min} < v_{ij} < x_j^{max} \\ x_j^{max}, x_j^{max} < v_{ij} \end{cases} \end{cases} \quad (3.75)$$

v. v_i ve x_i arasında aç-gözlü seçimi yapılır.

vi. If $fitness_{v_i} < fitness_{x_i}$, $f_i = 0$; if not $f_i = f_i + 1$

END

vii. Besin kaynaklarının kalitesine yani fitness değerine göre gözcü arılar için olasılık değeri denklem 3.76'daki gibi hesaplanır ($t = 0,\ \ i = 1$).

$$p_i = \frac{fitness_i}{\sum_{j=1}^{SN} fitness_j} \tag{3.76}$$

REPEAT

IF $random < p_i$ THEN

viii. Adım iii, iv ve v'i tekrarla, then $t = t + 1$

END IF

UNTIL $t = SN$

IF $max\{failure\} > limit$ THEN

ix. x_i'yi denklem 3.72 ile elde edilen rasgele bir çözüm (kaşif arı) ile değiştir.

END IF

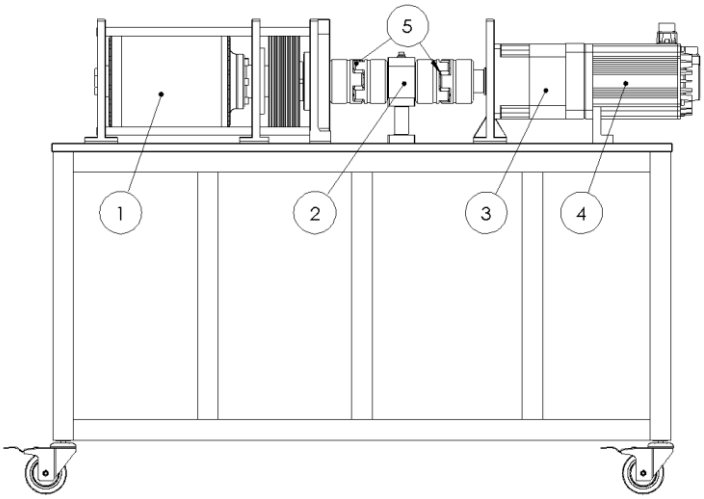
x. Optimum sonucu hafızada tut.

UNTIL (çevrim sayısı = maksimum iterasyon sayısı)

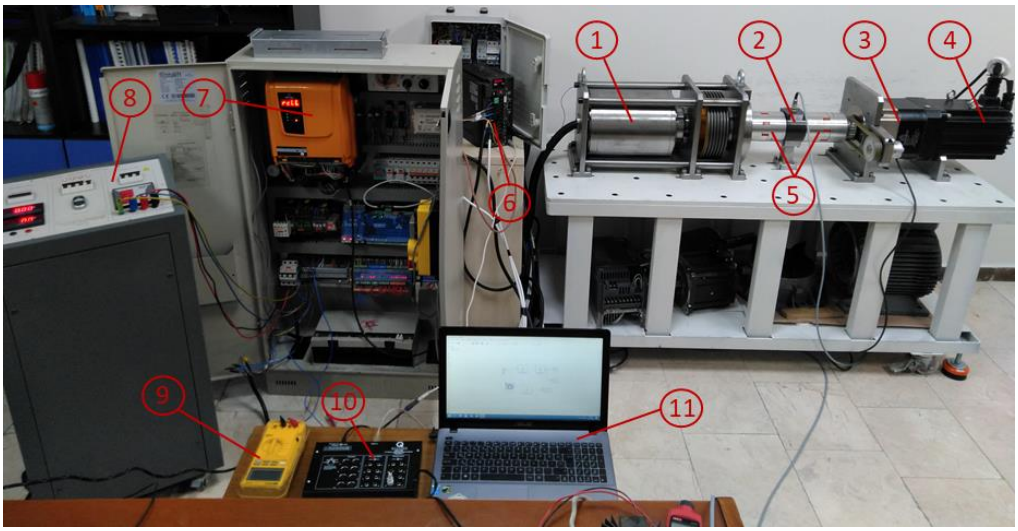
3.15. Deney Düzeneğinin Tasarımı

Üretilen prototip motorun testlerinin yapılabilmesi için bir deney düzeneği tasarımı yapılmıştır. Deney düzeneğinin amacı, üretilen prototip motoru uygun koşullarda yükleyerek motorun karakteristik özelliklerini elde etmektir. Üretilen motora yükleme yapmak için eddy akımı frenleri, dinamometreler veya yükleme motorları gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Üretilen motorun anma torku olan 240 Nm değerine uygun dinamometreler araştırılmış ve fiyatlarının çok yüksek olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık yükleme işleminin farklı bir servo motor ve redüktör grubu ile yapılmasına karar verilmiştir. Yükleme işlemi esnasında motor milindeki çıkış torkunu ölçebilmek için bir torkmetre kullanılmıştır. Kullanılan yükleme motoru 5.5 kW'lık DELTA-ECMA-L11855R3 serisi bir motor olup sürücüsü ise DELTA-ASD-A2-5543-M'dir (Ek 2: Yükleme Motoru ve Sürücüsü). Uygun hız ve tork değerlerini elde edebilmek için yükleme motoruyla birebir uyumlu LIMING SB 180-010-P2 serisi planet redüktör kullanılmıştır (Ek 3: Redüktör). Böylelikle prototip motoru anma hızı olan 159.2 rpm'de 240 Nm yükleyebilecek deney düzeneği elde edilmiştir. Tork değerlerinin yüksek doğruluk ve hassasiyette ölçülebilmesi için maksimum ölçüm kapasitesi 500 Nm olan Eth-Messtechnik firmasının DRBK-500 tipi tork sensörü tercih edilmiştir (Ek 4: Eth-

Messtechnik DRBK-500 tipi tork sensörü). Deney düzeneğinin şeması Şekil 3.37'de, kurulan deney düzeneği ise Şekil 3.38'de paylaşılmıştır. Üretilen prototip motoru sürmek için Arkel Arcode tipindeki sürücü kullanılmıştır (Ek 5: Arkel Arcode sürücü ve özellikleri). Konum ve hız geribildirimi için Fenac FNC SC2048 tipindeki mutlak enkoder, motor freni olarak Mayr Roba-twinstop 250 tipi fren tercih edilmiştir (Ek 6: Fenac FNC SC2048 enkoder ve özellikleri, Ek 7: Mayr Roba-twinstop 250 motor freni ve özellikleri). Yükleme motorunun ve üretilen prototip motorun millerinin tork sensörü ile bağlantılarının yapılmasında ise pilot delikli GS48 tipi Kulkarni marka kaplin kullanılmıştır (Ek 8: Kulkarni GS48 tipi kaplinler).

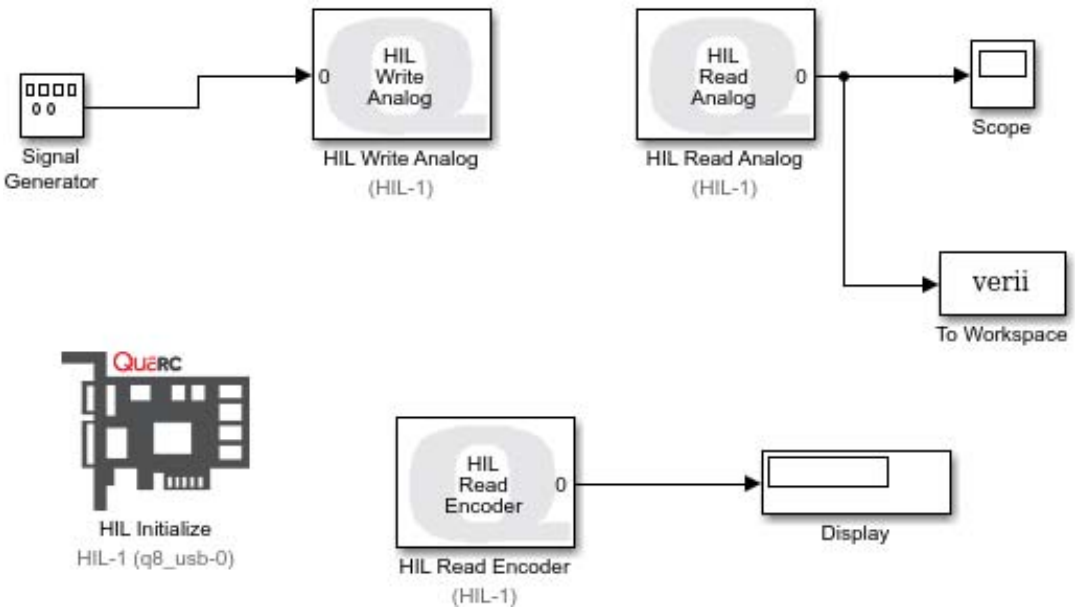


Şekil 3.37. Deney düzeneği; 1) Prototip motor, 2) Tork sensörü, 3) Redüktör, 4) Yükleme motoru, 5) Kaplinler



Şekil 3.38. Kurulmuş deney düzeneği; 1) Prototip motor, 2) Tork sensörü, 3) Redüktör, 4) Yükleme motoru, 5) Kaplinler, 6) Yükleme motoru sürücüsü, 7) Prototip motor sürücüsü, 8) Güç kaynağı ve güç analizörü, 9) Avometre, 10) Veri toplama kartı, 11) Bilgisayar

Prototip motorun çektiği akım bilgisi ise Hewlett Packard 971A tipi bir avometre yardımıyla izlenmiştir (Ek 9: Hewlett Packard 971A tipi avometre). Avometre, prototip motor sürücüsünün çıkışındaki bir faza bağlanmış ve bu fazdan motorun çektiği akım bilgisi gerçek zamanlı olarak görülmüştür. Sürücü çıkışındaki fazların akım değerleri arasında çok küçük farklar olduğundan sadece bir faz bilgisinin izlenmesi yeterli görülmüştür. Prototip motor sürücüsünün giriş gerilimleri Yıldırım Elektronik firmasının ayarlı AC gerilim kaynağı üzerinden 220 V RMS değerine ayarlanmış ve sürücünün güç faktörü (cos φ) değeri Entes EPM-06 güç analizörü üzerinden izlenmiştir (Ek 10: Yıldırım Elektronik ayarlı güç kaynağı ve Entes güç analizörü). Tork sensöründen gelen veriler, Quanser Q8-USB tipi veri toplama kartı yardımıyla Matlab Simulink (2019) yazılımı üzerinden kaydedilmiştir (Ek 11: Quanser Q8-USB veri toplama kartı). Şekil 3.39'da Simulink'te hazırlanmış veri toplama ekranı gösterilmiştir. Zıt EMK deneyleri esnasında prototip motorun ürettiği gerilimin dalga şeklinin ve genliğinin izlenmesi gerekmektedir. Bu işlem için OWON SDS 7072 tipi bir osiloskop kullanılmıştır (Ek 12: OWON SDS 7072 tipi osiloskop). Osiloskopta elde edilen gerilim grafiği kaydedilmiş ve zıt EMK dalga şekli Matlab yazılımı ile çizdirilmiştir.



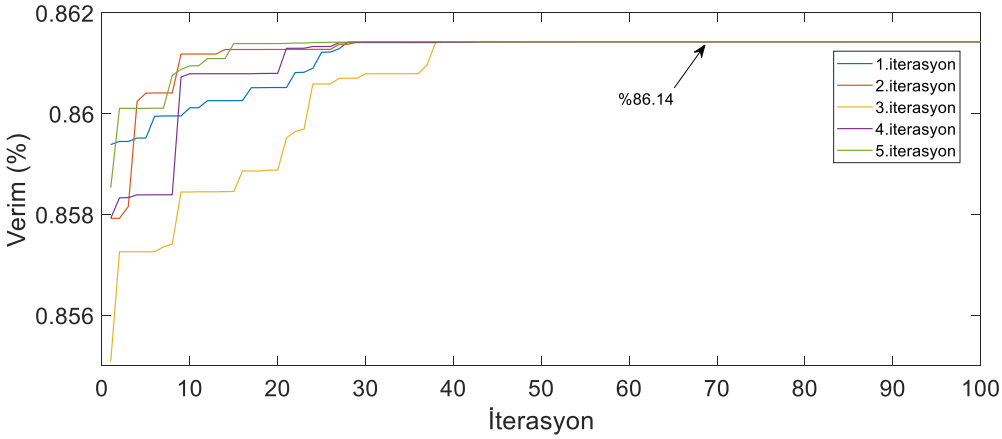
Şekil 3.39. Matlab Simulink'te hazırlanmış veri toplama ekranı

BÖLÜM 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde dıştan rotorlu SMSM'nin optimizasyon, elektromanyetik, yapısal, termal analiz sonuçları ve üretilen prototip motorun test sonuçları paylaşılmıştır. Tasarım süreçlerinde dikkat edilen kıstaslar ve izlenen adımlar bu bölümde ayrıntılı olarak sunulmuştur. Oluk-kutup oranı ve kutup aralığı oranlarının elde edilmesi konuları Bölüm 3'te irdelendiği için, bu bölümde doğrudan optimum tasarım sonuçlarına göre yapılan analiz sonuçlarına geçilmiştir. Ayrıca analiz sonuçları ve test düzeneğinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Karşılaştırma motoru ile üretilen prototip motorun verileri karşılaştırılmış ve üretilen motorun üstünlükleri ve zayıflıkları ortaya konmuştur.

4.1. ABC Algoritması İle Optimizasyon Sonuçları

Motor tasarımında parametre optimizasyonu önemli bir yere sahiptir. Dıştan rotorlu SMSM'nin bazı parametreleri karşılaştırma motoru ile aynı olacak şekilde sabitlenmiş, diğer parametreleri ise amaç fonksiyonu olarak seçilen verim değerini en yüksek seviyede elde etmek üzere optimize edilmiştir. İlk önce tasarımcı bilgisi ile ön bir motor tasarımı yapılmış, ardından ABC algoritması ile parametrelerin hesaplanması sağlanmıştır. Elde edilen tasarımlar karşılaştırılmış ve ANSYS Maxwell yazılımının da yardımıyla motor parametrelerinin nihai değerlerine karar verilmiştir. Optimizasyondaki değişken parametreler stator diş ucu kalınlığı (h_{s0}), oluk diş ucu yarıçapı (h_{s1}), oluk yüksekliği (h_{s2}), stator boyunduruk kalınlığı (h_{sb}), stator diş genişliği (w_{sd}) ve statorun bir fazındaki tur sayısı (N_t) olarak seçilmiştir. Seçilen parametrelerin değişimlerine göre stator dişlerindeki akı yoğunluğunun (B_{sd}) 1.7 Tesla'yı, doluluk faktörü (k_{dol}) değerinin 0.57'yi ve akım yoğunluğu (J) değerinin 6.5 A/mm^2'yi (Pyrhonen ve diğ., 2013) geçmemesi istenmiştir. Optimizasyon işlemleri Matlab ortamında gerçekleştirilmiş ve verimin en yüksek değerine yakınsadığı iterasyonlar Şekil 4.1'de çizdirilmiştir.



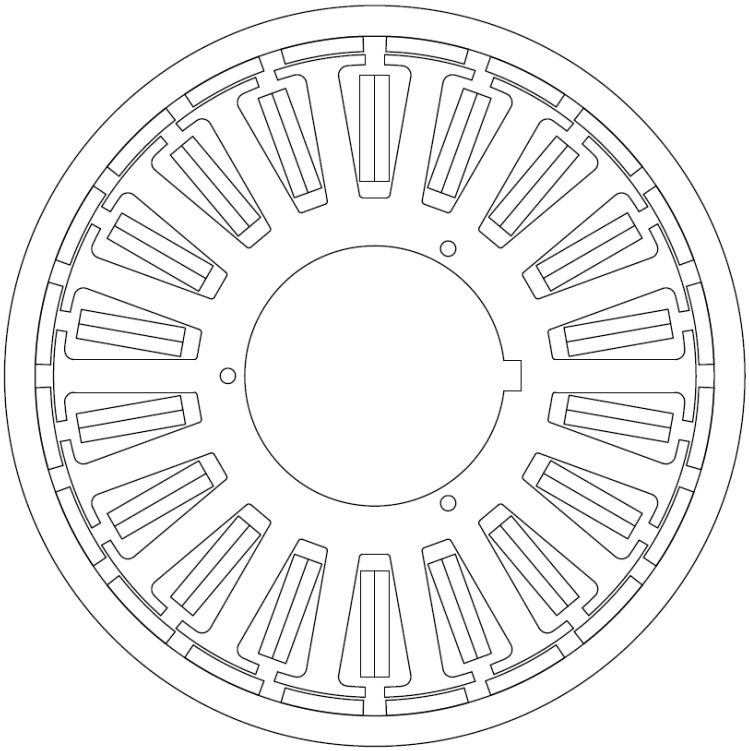
Şekil 4.1. ABC algoritması ile verimin iyileştirilmesi

Optimizasyon sonucunda verim değeri %86.14 değerine kadar çıkarılabilmiştir. Optimizasyona sokulan parametrelerin ve kısıtların ön tasarım, ABC algoritması ve nihai tasarım değerleri Tablo 4.1'de paylaşılmıştır. Tabloda yer alan değerler analitik çözüm değerleri olup SEY sonuçları Bölüm 4.2'de gösterilmiştir. ABC algoritmasının çözüm işlemlerinde kullanılan kodlar Ek 13'te paylaşılmıştır.

Tablo 4.1. Motor parametrelerinin sonuç değerleri

Parametre ve kısıtlar	Ön tasarım	ABC algoritması	Nihai tasarım
h_{s0}	4.3	3.0	3.3
h_{s1}	2.4	3.0	3.1
h_{s2}	35	40	39.2
h_{sb}	21	17.4	15.9
w_{sd}	12.7	10	10.7
N_t	100	105	105
B_{sd}	1.24	1.67	1.58
k_{dol}	0.57	0.57	0.57
J	5.93	5.4	4.85
Verim	83.97	86.14	87.13

Üretilen dıştan rotorlu SMSM'nin kesit görünüşü Şekil 4.2'de, nihai parametreleri Tablo 4.2'de, etiket değerleri ise Tablo 4.3'te paylaşılmıştır. Tablo 4.1'de gösterilen %87.13 nihai tasarım verim değeri SEY simülasyonlarında %86.3 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2. Dıştan rotorlu SMSM'nin kesit görünüşü

Tablo 4.2. Dıştan Rotorlu SMSM'nin parametreleri

	Parametre	Değeri	Birimi
Motor Özellikleri	Rotor tipi	Dıştan rotorlu	-
	Kutup sayısı, p	20	-
	Motor çıkış gücü, P	4	kW
	Frekans, f	26.53	Hz
	Gerilim, V	380	V
	Nominal hız, ω_m	159.2	rpm
	Nominal akım, I	7.18	A (rms)
	Nominal tork, T_R	240	Nm
	Motor paketi uzunluğu, L_p	150	mm
	Oluk sayısı, N_{oluk}	18	-
Rotor	Rotor dış çapı, D_{ro}	242	mm
	Rotor iç çapı, D_{ri}	222	mm
	Rotor malzemesi	AISI 1050	-
	Hava aralığı kalınlığı, g	1	mm
Mıknatıs	Mıknatıs kalınlığı, h_m	5	mm
	Mıknatıs uzunluğu, l_m	50	mm
	Mıknatıs tipi	N45SH	-
	Mıknatısın bağıl manyetik geçirgenliği, μ_r	1.05	-
	Artık mıknatıslanma değeri, B_r	1.35	T
	Kutup aralığı (embrace), α_{ka}	0.78	-
	Mıknatıs adımı açısı, α_m	14.04	°
	Kutup adımı açısı, α_k	18	°

Tablo 4.2. (devam) Dıştan Rotorlu SMSM'nin parametreleri

	Parametre	Değeri	Birimi
Sargılar	Bağlantı şekli	Y	-
	Sargı tipi	Konsantre	-
	Sargı katman sayısı	2	-
	Bir stator fazındaki tur sayısı, N_t	105	-
	Paralel tel sayısı, n_{tel}	3	-
	Tel kalınlığı, D_{tel}	0.8	mm
	Oluk sayısı cinsinden bobin adımı, S_p	1	-
	Statordan taşan sargı sonu uzunluğu, L_{su}	25	mm
Stator Özellikleri	Kutup-faz başına düşen oluk sayısı, q	0.3	-
	Stator iç çapı, D_{si}	85	mm
	Stator dış çapı, D_{so}	210	mm
	Silisli saç kalınlığı	0.5	mm
	Saç yığılma faktörü, k_{yf}	0.95	-
	Saç malzemesi	M530-50A	-
	Sargı faktörü, ksf	0.945	-
	Stator boyunduruk kalınlığı, h_{sb}	15.9	mm
	Oluk boyunduruk yarıçapı, R_{s1}	1	mm
	Diş ucu kalınlığı, h_{s0}	3.3	mm
	Oluk diş ucu yarıçapı, h_{s1}	3.1	mm
	Oluk yüksekliği, h_{s2}	39.2	mm
	Toplam oluk yüksekliği, h_s	43.3	mm
	Oluk açıklığı, B_{s0}	6.5	mm
	Stator diş genişliği, w_{sd}	10.7	mm

Tablo 4.3. Dıştan rotorlu SMSM'nin etiket değerleri

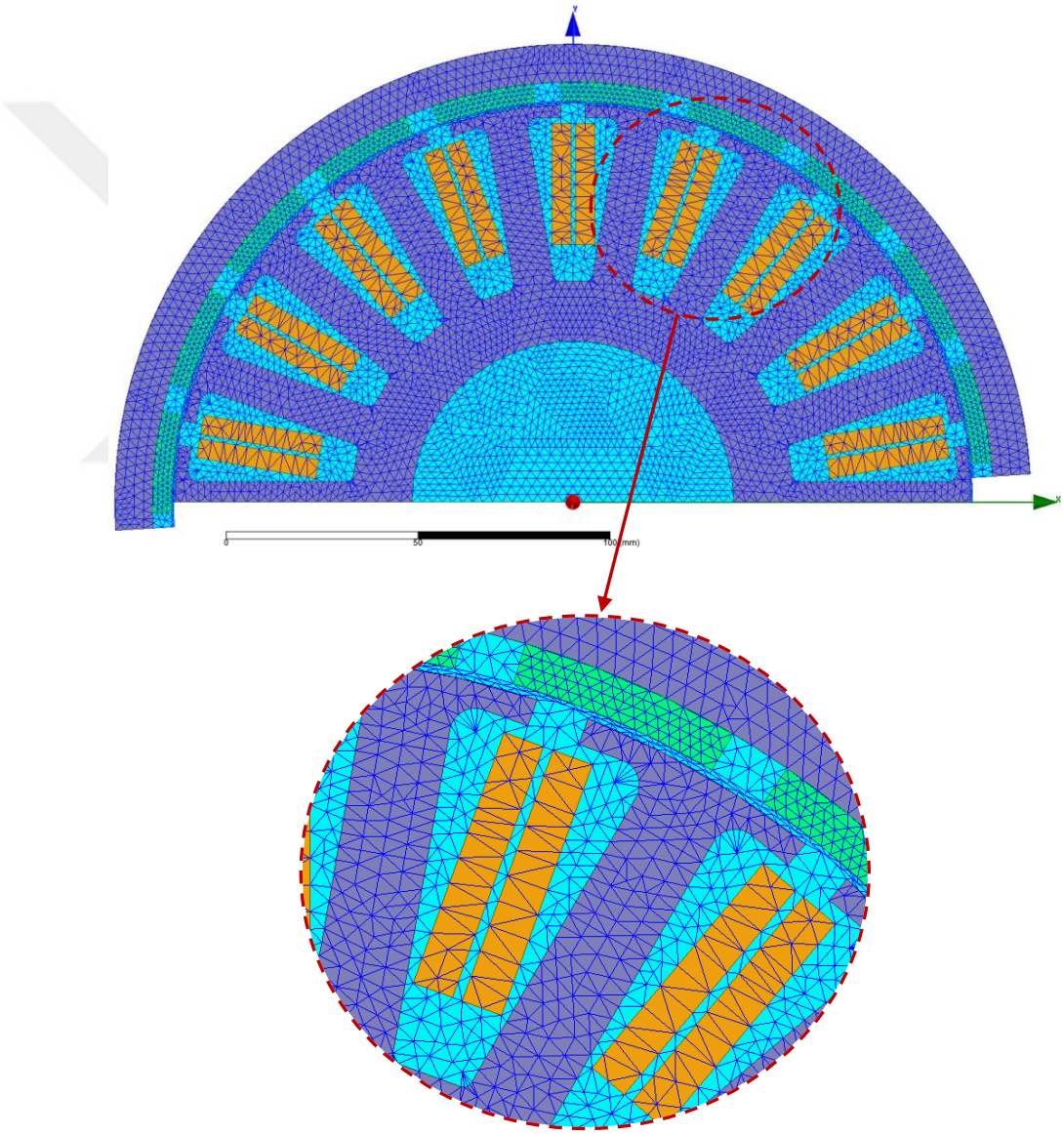
SYSLN-630-1 – Dıştan Rotorlu Dişlisiz Asansör Tahrik Motoru			
Frekans	26.53 Hz	Kutup Sayısı	20
Gerilim	380 V	Güç	4 kW
Yük	630 Kg	Anma Akımı	7.18 A*
Kabin Hızı	1 m/s	Motor Devri	159.2 rpm
Süspansiyon	2:1	Moment	240 Nm
cos φ	1	Fren tipi	Mayr Roba-twinstop
Bağlantı şekli	Yıldız	Motor Ağırlığı	141 Kg
Üretim Yılı	2019	Enkoder tipi	FNC SC2048

*Tablo 4.7'nin son iki satırından lineer interpolasyonla elde edilmiştir.

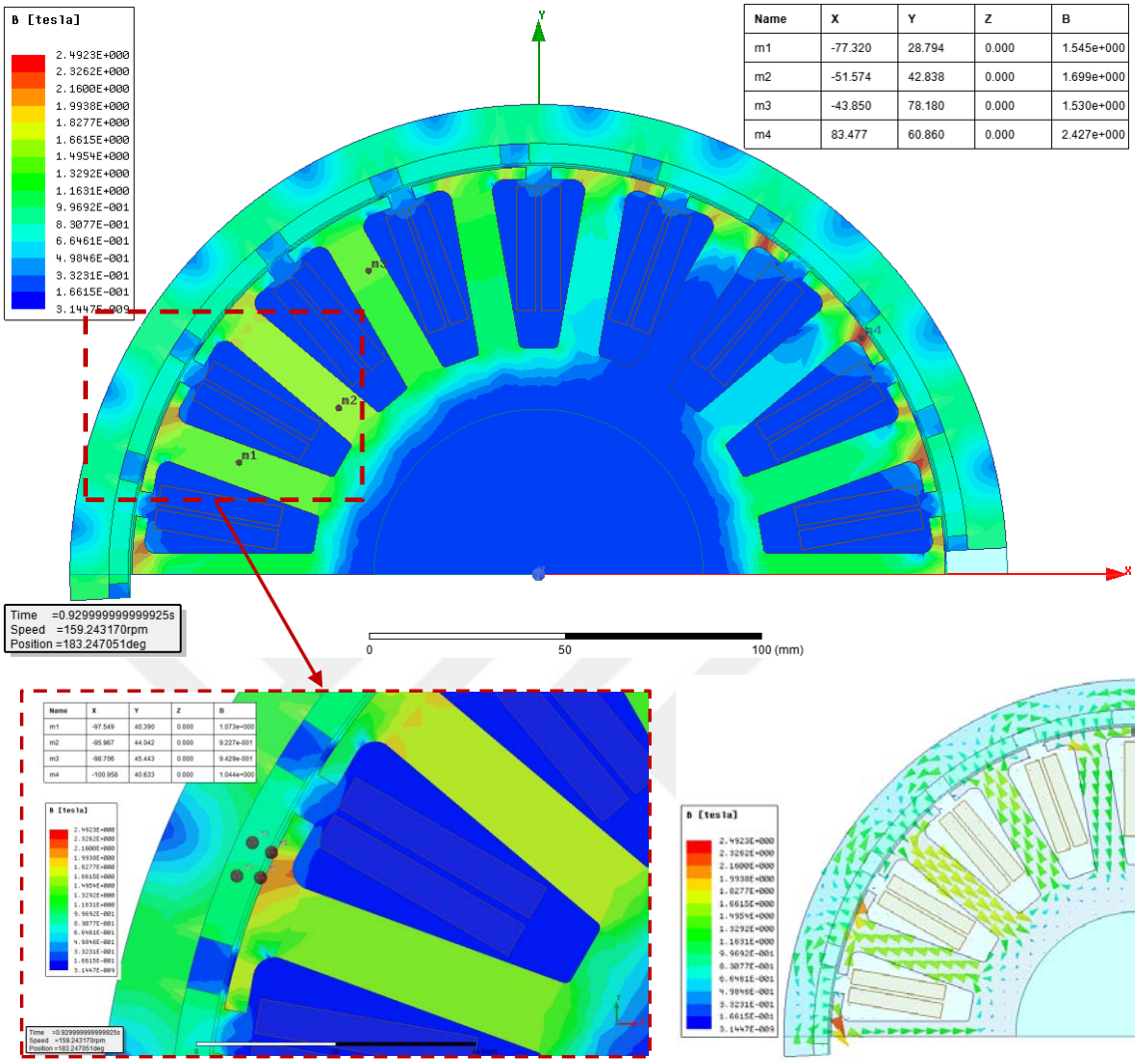
4.2. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) Analizleri

Optimizasyon sonuçlarına göre elde edilen parametre değerleri ile motor performansı analitik olarak elde edilmiştir. Elde edilen analitik sonuçların SEY ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması gerekmektedir. Bu bölümde, optimum analitik değerlerin elde edildiği dıştan rotorlu SMSM tasarımı SEY analizlerine tabii tutulmuştur. Bunun için

ANSYS Maxwell 2D modulü ile 0-1 saniye aralığında geçici durum analizleri yürütülmüştür. Motor sıfır hızdan anma hızına kadar hızlandırılarak tam yükleme yapılmıştır. Daha hızlı analiz yapabilmek adına motorun yarım modeli kullanılmıştır. Motorun ağ yapısı Şekil 4.3'te paylaşılmıştır. Motor geoemetrisinde boylamasına bir farklılık olmadığı için 2 boyutlu SEY analizleri yeterli görülmüştür. Ayrıca 3 boyutlu analizler yapılmamıştır. Yapılan SEY analizleri sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4.4 ile 4.8 arasında paylaşılmıştır.



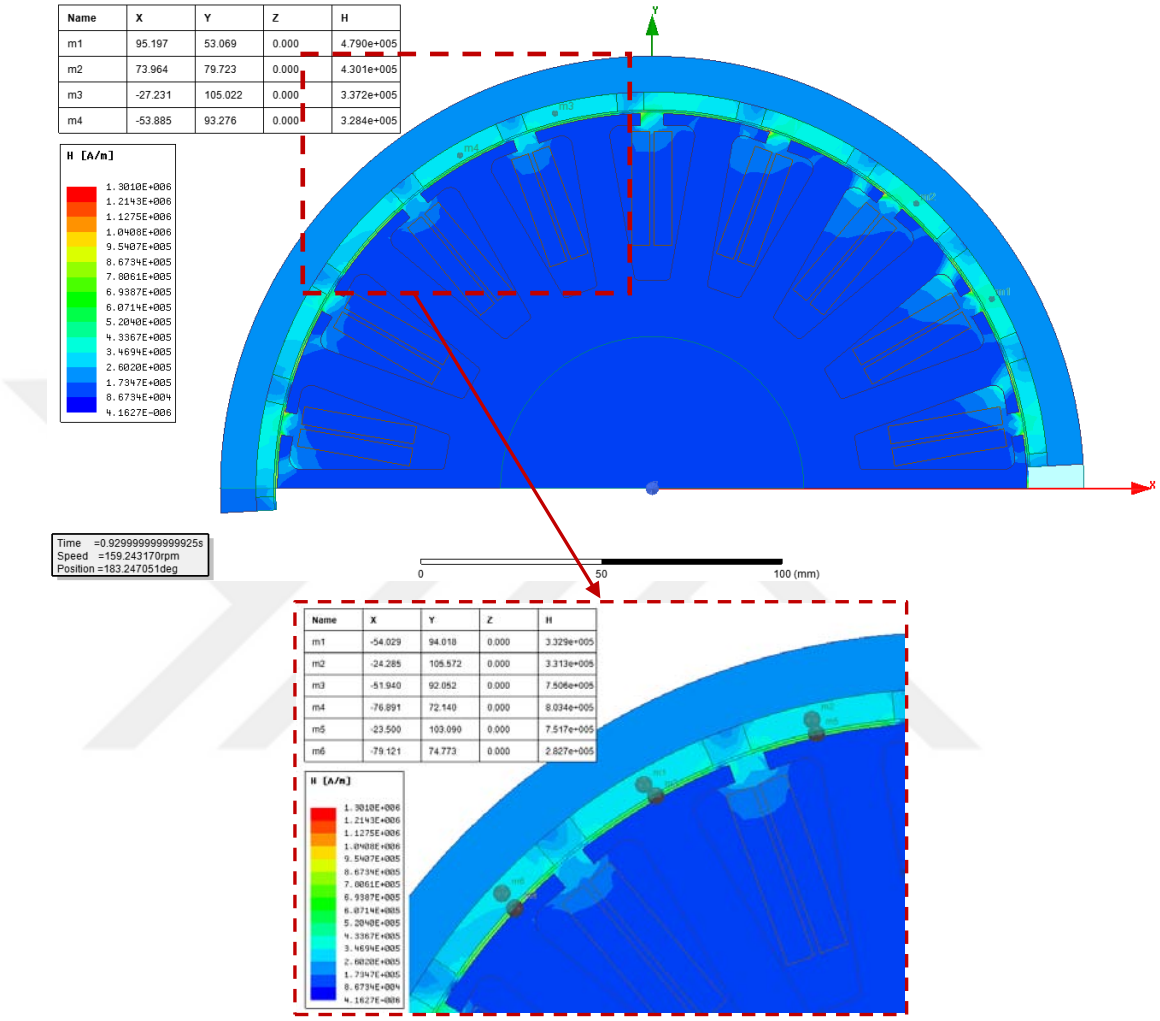
Şekil 4.3. Dıştan rotorlu SMSM'nin ağ yapısı



Şekil 4.4. Dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik akı yoğunluğu (B:Tesla)

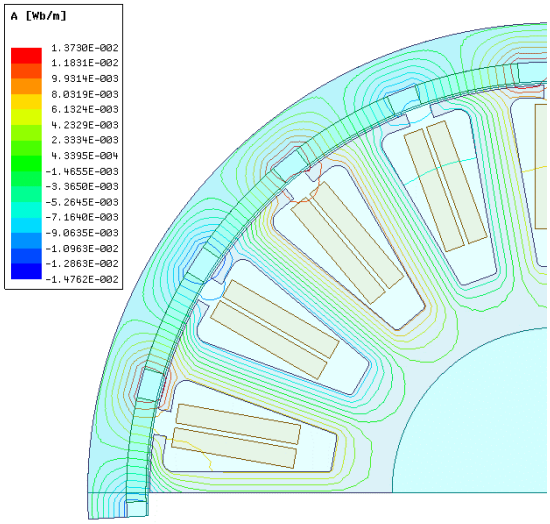
Şekil 4.4'te dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik akı yoğunluğu dağılımı hem genlik hem de vektör olarak gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, stator dişlerindeki manyetik akı yoğunluğunun ortalama değerinin 1.5-1.6 Tesla olduğu, stator dişlerinin ucunda ise 2 Teslayı aşan değerlerin olduğu gözükmektedir. Stator dişlerindeki manyetik akı yoğunlukları kullanılan silisli saçların doyma noktasının altındadır. Diş uçlarındaki akı yoğunlukları, özellikle köşe dönüşlerinde yüksek değerlere ulaşmış ve göz ardı edilebilir seviyededir. Uyarılmış fazların olduğu bölgelerde stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu 0.9-1.0 Tesla iken, rotorda 1.0-1.3 Tesla civarındadır. Hava aralığı ve mıknatıs akı yoğunluklarının ise 0.92 ile 1.05 Tesla aralığında olduğu görülmektedir. Elde edilen

sonuçlar, motorun tam yükte çalışması esnasında doyuma girilmediğini ve B-H eğrisinin büküm bölgesi civarında çalışıldığını göstermektedir.

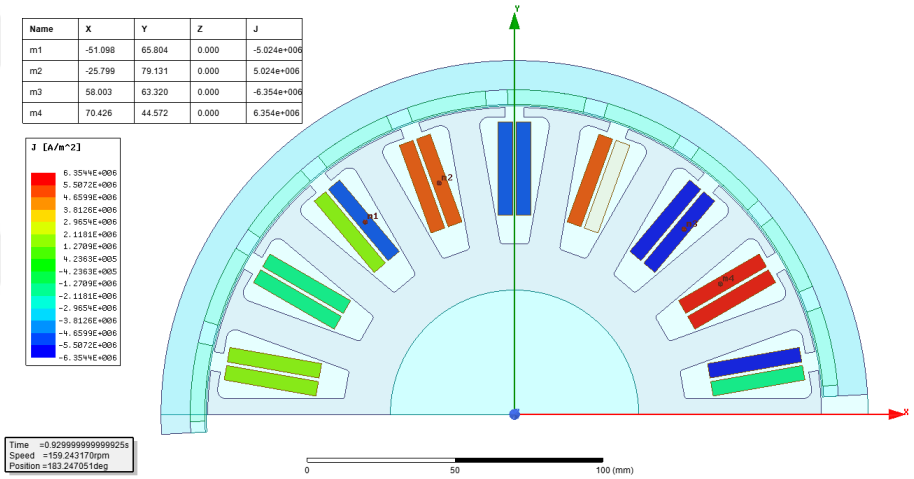


Şekil 4.5. Dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik alan kuvveti (H:A/m)

Şekil 4.5'te dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik alan kuvveti A/m cinsinden, Şekil 4.6'da ise manyetik vektör potansiyeli Wb/m (T-m) cinsinden gösterilmiştir. Manyetik alan kuvveti, mıknatısların kuvvetinin etkili olduğu bölgede yoğunlaşmış ve hava aralığında ortalama $7.5x10^5$ A/m değerlerinde iken mıknatıslar üzerinde ortalama $3.3x10^5$ A/m değerlerindedir. Şekil 4.6'daki akı çizgilerinin stator, hava aralığı, mıknatıs ve rotor üzerinden düzgün bir şekilde geçtiği görülmektedir. Az da olsa kaçak akılar olsa da genellikle düzgün bir dağılım mevcuttur.



Şekil 4.6. Dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik vektör potansiyeli (A:Wb/m)



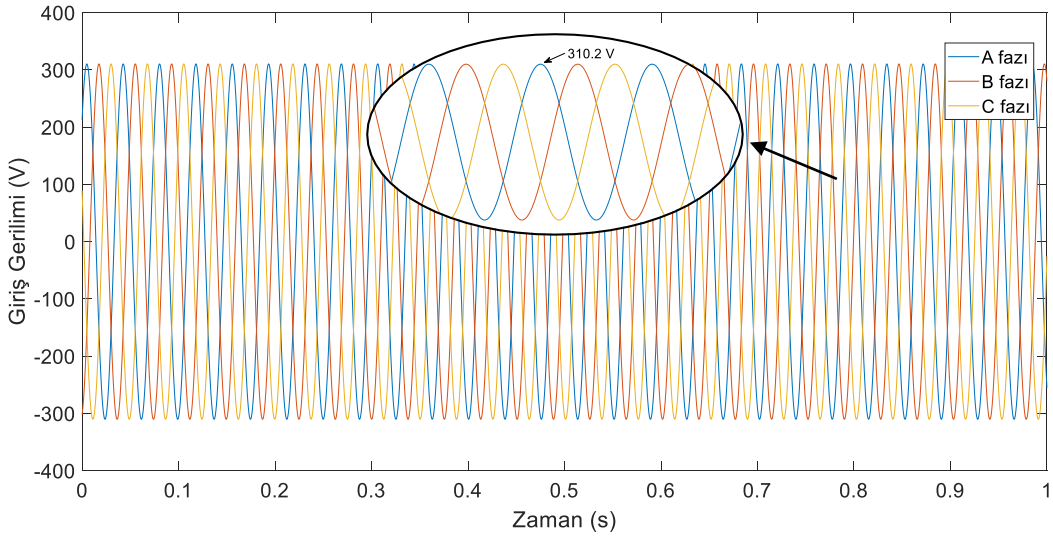
Şekil 4.7. Dıştan rotorlu SMSM'nin elektrik akım yoğunlukları (J:A/m^2)

Motor tasarımında akım yoğunluğu (*J*) en önemli tasarım kriterlerinden biridir. Akım yoğunluğu, sargılardan geçen faz akımı RMS değerinin iletkenin kesit alanına bölünmesiyle bulunur. Herhangi bir soğutma sisteminin kullanılmadığı SMSM'lerdeki akım yoğunluğu değerini Lipo (2017) 5 A/mm^2, Pyrhonen ve diğ. (2013) ise 4-6.5 A/mm^2 olarak belirtmişlerdir. Bu değerler motorların sürekli görev çevrimleri için geçerlidir. Tez konusu olan asansör motorları ise genellikle S5 (Elektrikli frenle aralıklı periyodik görev) görev çevrimine sahiptir. Asansör motorlarındaki S5 görev çevriminde, motorun yüklü kullanım süresinin toplam çevrim süresine oranı %40'tır. Dolayısıyla bu motorların akım yoğunluğu değerleri literatürde belirtilen değerlerden daha fazla olabilmektedir. Her ne

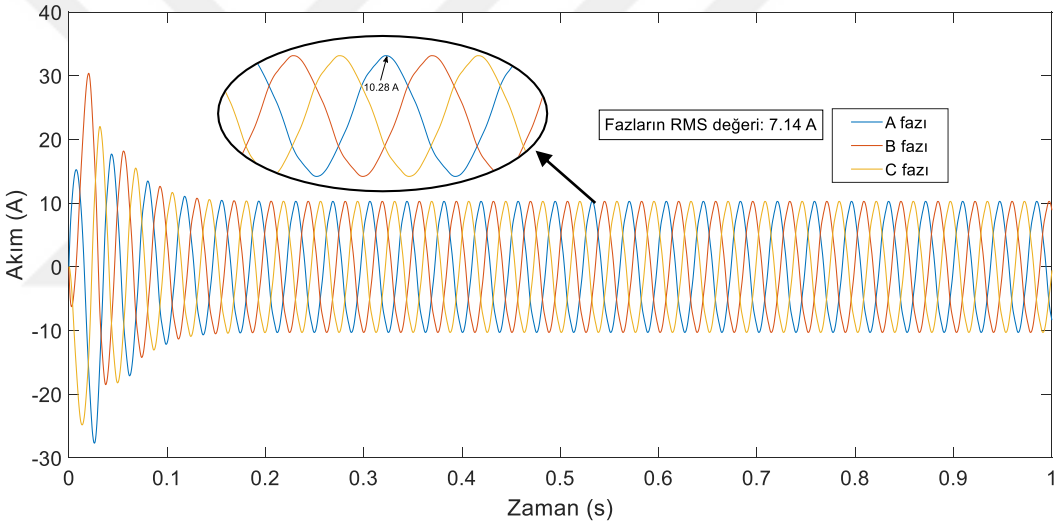
kadar böyle bir avantaj söz konusu olsa da, sargıları iç tarafta yer alan dıştan rotorlu SMSM, akım yoğunluğu değeri 6.5 A/mm^2'yi geçmeyecek şekilde tasarlanmıştır.

İletken kesit alanının küçük olması akım yoğunluğunu artırırken, sargı dirençlerini de yükseltmekte, dolayısıyla bakır kayıplarını da artırmaktadır. Sınırları geçen akım yoğunluğu, motor içindeki ısı yoğunluğunun yükselmesine ve motor sargılarının yanmasına sebep olabilmektedir. İletken kesit alanın büyük seçilmesi durumunda akım yoğunlukları ve bakır kayıpları azalmaktadır. Büyük kesitli iletkene bağlı olarak tur sayısı da azalmakta ve istenen verimli çalışma bölgelerine ulaşılamamaktadır. Bu yüzden iletken kesit alanının seçimi akım yoğunluğu sınır değerlerini aşmayacak kadar büyük ve optimum tur sayılarını elde edecek kadar küçük şekilde seçilmelidir.

Bu tez çalışmasında, denklem 3.41'deki formül kullanılarak iletken tel kesit alanı bulunmuştur. Denklemdeki A_{oluk}, denklem 3.42'den 734.46 mm^2 olarak hesaplanmış ve oluklardaki izolasyon kağıdının hesaba katılması için bu değer k_{yal} yalıtım faktörü (0.95) ile çarpılmıştır. Böylelikle nihai oluk alanı 697.72 mm^2 olmuştur. Doluluk faktörü k_{dol} %57 alınarak çözüm yapılmış ve iletken kesit alanı 1.893 mm^2 olarak bulunmuştur. k_{dol} değerinin ne olacağına bobinajcıda yapılan denemeler sonucu karar verilmiştir (Ek 14: Maksimum sargı doluluk oranın deneysel olarak belirlenmesi). İletken kesit alanı yüksektir ve tek damarlı bir telin sarılabilmesi için uygun değildir. Dolayısıyla daha önce de bahsedildiği gibi paralel teller ile iletken oluşturulmuştur. Fazla sayıda tel kullanılması sarım işlemini kolaylaştırırken, teller arasındaki boşluklar oluk alanının verimli kullanılabilmesini engellemektedir. Bu yüzden kolay sarılabilecek optimum paralel tel sayısının seçilmesi, oluk alanının en verimli şekilde kullanılmasını sağlayacaktır. İletken kesit alanı 1.893 mm^2 için en uygun paralel tel sayısı 3 olarak seçilmiştir. Paralel tel sayısı 3 olduğu için bir telin kesit alanı 0.631 mm^2, tel kalınlığı ise 0.896 mm olarak elde edilmiştir. Bu değere iletken telin üzerindeki izolasyon kalınlığı da dahildir. İzolasyon kalınlığı 0.1 mm olarak düşülmüş ve tel kalınlığının nihai değeri D_{tel} 0.8 mm olarak seçilmiştir. Böylelikle akım yoğunluğu J değerleri, Şekil 4.7'den de görüleceği gibi 5-6.5 A/mm^2 değerleri arasında elde edilmiş ve soğutma sistemi olmayan prototip motorun güvenli bir şekilde çalışması garanti altına alınmıştır.



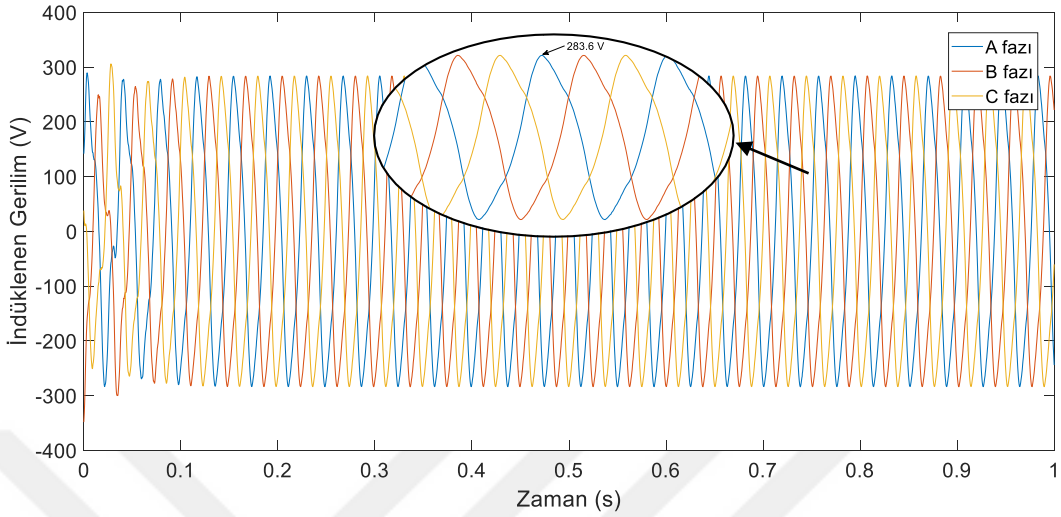
Şekil 4.8. Dıştan rotorlu SMSM'nin giriş gerilimi grafiği



Şekil 4.9. Dıştan rotorlu SMSM'nin akım grafiği

Şekil 4.8'de dıştan rotorlu SMSM'nin gerilim grafiği, Şekil 4.9'da ise akım grafiği paylaşılmıştır. Motor besleme geriliminin faz-nötr arası tepe değerinin 310.2 V, faz akımının tepe değerinin ise 10.28 A olduğu gözükmektedir. Simülasyon sonucu elde edilen faz gerilimi ve faz akımının RMS değerleri ise 219.3 V ve 7.14 A'dir. Akımın dalga şekli tam sinüsoidal olmadığından RMS değeri, tepe değerinin doğrudan $\sqrt{2}$ katı olarak hesaplanamamaktadır. Motorun kalkış anında, faz akımları kısa süreliğine 30 A seviyelerine çıkmakta fakat kalkıştan 0.1 s sonra anma akımı seviyelerine düşmektedir. Kalkış anındaki akım değerlerinin yüksek olması, durağan durumdan yüklü duruma

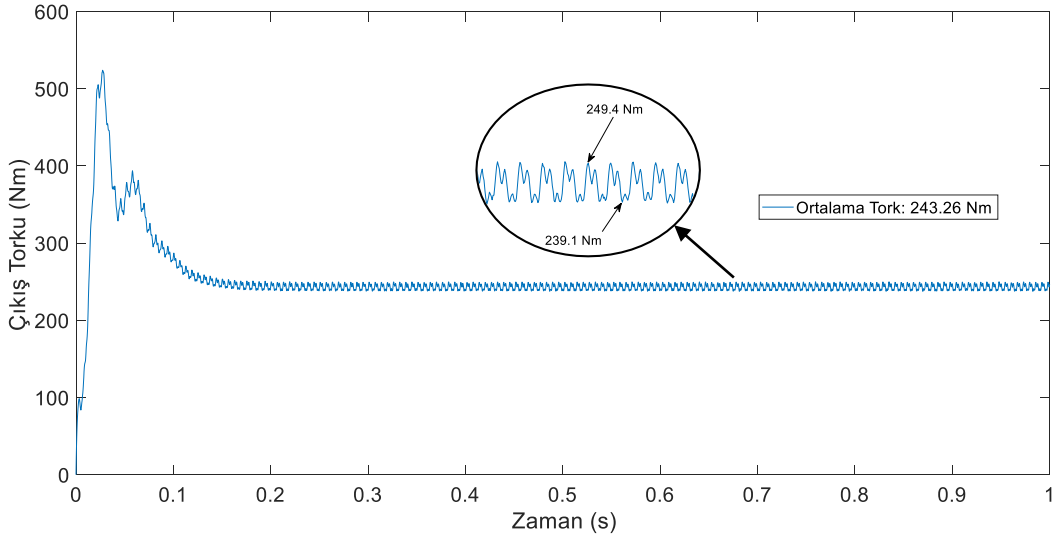
geçen motorlar için beklenen bir durumdur ve kısa süreliğine gerçekleşen bu durum bir problem teşkil etmemektedir.



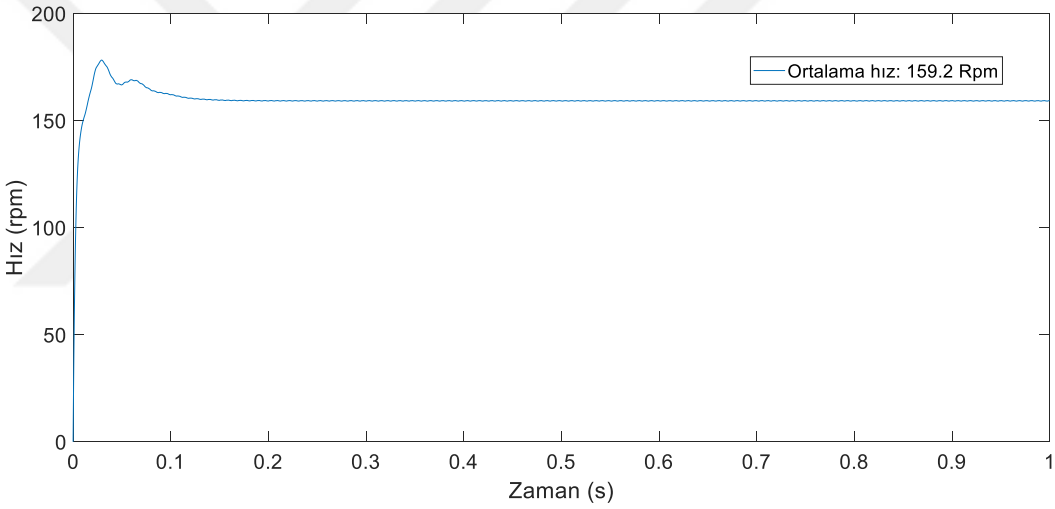
Şekil 4.10. Dıştan rotorlu SMSM'nin indüklenen gerilim grafiği

Tork dalgalanmaları düşük olan ve dengeli sargı dağılımlarına sahip SMSM'lerde indüklenen zıt EMK gerilimlerinin düzgün sinüsoidal dalga şekillerine sahip olması beklenmektedir (Zöhra, 2019). Düzensiz zıt EMK'ya sahip bir motorun hava aralığı akı dağılımının da düzensiz olduğu ve dolayısıyla çıkış torklarının da dalgalı olduğu gözlenmektedir. Şekil 4.10'da tasarlanan dıştan rotorlu SMSM'de indüklenen zıt EMK gerilim grafiği gösterilmiştir. Zıt EMK geriliminin tepe değeri 283.6 V olarak elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde, birbiri arasında 120° faz farkı olan ve tam sinüsoidal dalga şekline yakın bir zıt EMK geriliminin olduğu gözükmektedir.

İlk yapılan analizlerdeki mıknatıslar, Ansys Maxwell yazılımının kütüphanesinde bulunan N35 tipinde, stator saçları ise M1924G tipinde malzemelerden seçilmişti (Soyaslan ve diğ., 2019). Daha sonrasında gerçek test verilerine daha yakın sonuçlar elde edebilmek için, yazılımın kütüphanesinde bulunmayan N45SH tipi mıknatıslar tanımlanmıştır. Stator saçları için ayrıca yeni malzeme tanımlanması yapılmamış ve prototip motorda kullanılan saçlara yakın değerlere sahip olan yazılım kütüphanesindeki JFE Steel 50JNE470 tipi malzeme seçilmiştir. Yapılan bu değişiklikler sonucu, ilk analizlerde elde edilen veriler ile nihai analiz verileri arasında az da olsa farklılıklar gözlenmiştir.



Şekil 4.11. Dıştan rotorlu SMSM'nin çıkış torku grafiği



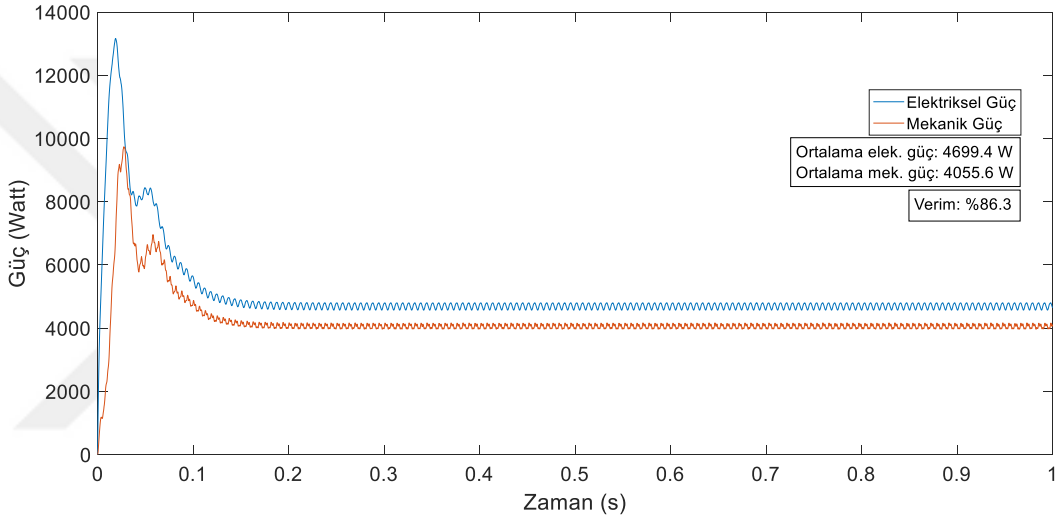
Şekil 4.12. Dıştan rotorlu SMSM'nin hız grafiği

Şekil 4.11'de tam yük altındaki prototip motorun çıkış torkunun simülasyon sonuçları gözükmektedir. Çıkış torkunun ortalama değeri 243.26 Nm iken, tork dalgalanmasının çıkış torkuna oranı ise %4.23'tür. Bu boyutlardaki bir motor için tork dalgalanması değeri oldukça düşüktür ve bu durum motorun konforlu çalışması açısından çok önemlidir. Şekil 4.12'de tam yük altındaki motor milinin hız grafiği paylaşılmıştır. Motor hızı kalkıştan itibaren 0.2 s içerisinde anma hızına oturmaktadır. Anma değerlerindeki çıkış torku ve mil hızının (rad/s) çarpımı, motorun mekaniksel anma gücünü vermektedir. Denklem 3.20 kullanıldığında motorun çıkış gücü (P_M) 4055.5 W olarak elde edilmektedir. Çıkış gücü Şekil 4.13'te mekanik güç olarak gösterilmiştir. Bölüm 3'te anlatılan tüm kayıplarla

çıkış gücü toplandığında ise motorun elektriksel giriş gücü (P_E) elde edilmektedir. Giriş gücü P_E, denklem 4.1 ile hesaplanmaktadır. Denklemde yer alan U fazlar arası gerilimi, I bir fazdan çekilen akımın RMS değerini, $cos\ \varphi$ ise güç faktörünü temsil etmektedir. Çıkış ve giriş güçlerinin oranı denklem 4.2'de gözüktüğü gibi motorun verimini (η) vermektedir.

$$P_E = \sqrt{3} * U * I * cos\ \varphi \tag{4.1}$$

$$\eta = \frac{P_M}{P_E} \tag{4.2}$$



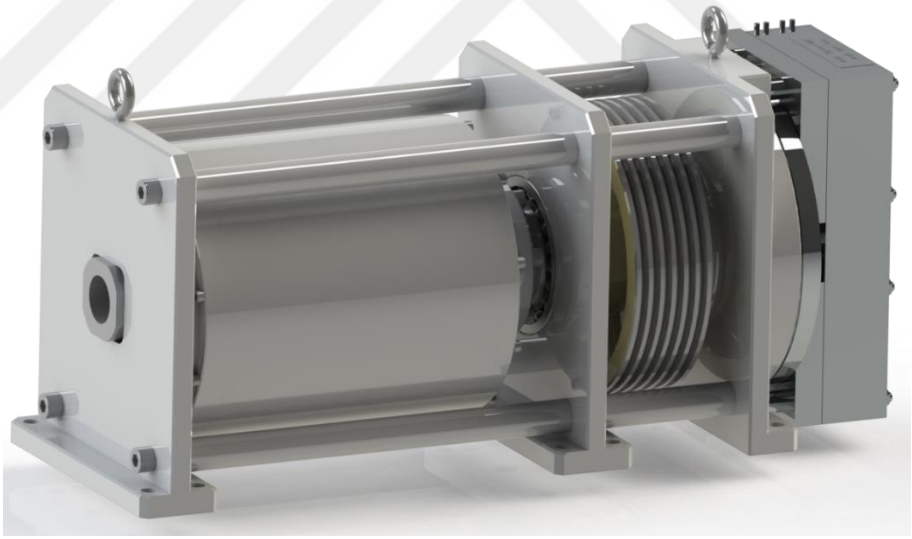
Şekil 4.13. Dıştan rotorlu SMSM'nin verim grafiği

Şekil 4.13'te prototip motorun simülasyon sonuçlarına göre elde edilen elektriksel giriş gücü ve mekanik çıkış gücü gösterilmiştir. Motorun ortalama mekaniksel çıkış gücü 4055.5 W, şebekeden çektiği elektriksel gücün ortalama değeri 4699.4 W'a oranlandığında motor verimi %86.3 olarak elde edilmektedir.

4.3. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Yapısal Analiz Sonuçları

Dıştan rotorlu SMSM'nin tasarım aşamalarından bir diğeri motor mukavemetinin ve deformasyon miktarlarının ölçüldüğü yapısal testlerdir. Nihai katı modeli Şekil 4.14'teki gibi oluşturulan prototip motorun, üretim aşamasına geçmeden önce yük altındaki davranışları doğrulanmalıdır. Bunun için farklı dinamik ve statik etkilere maruz kalan motor parçalarının sonlu elemanlar analizlerinin yapılması gerekmektedir. Yüksek hızla

dönen, yüksek güçlü ve değişken hızlı elektrik motorlarında yüksek atalet kuvvetleri oluşabilmekte ve kritik hızlara yaklaştıkça motordaki titreşimler artmaktadır (Hong ve diğ., 2013). Düşük hızla dönen motorlarda ise dönme hızı kritik hızdan çok daha düşük olmakta ve rotor ataletleri de buna bağlı olarak düşük seviyelerde seyretmektedir. Dolayısıyla düşük hızlarda dönen elektrik motorlarında dinamik etkilere bağlı bir problem oluşmamaktadır (Tong, 2014; Boyce, 2011). Tasarlanan prototip motorun anma hızı 159.2 rpm gibi düşük bir değer olduğundan ve üretilen motor değişken hızlarda çalışmayacağından dinamik analizlerin yapılmasına ihtiyaç duyulmamıştır. Motor tasarımları sorunsuz olsa bile, motorun dönen kısımlarında üretimden kaynaklanan balans bozuklukları olabilmektedir. Bu bozukluklar, tüm üretim bittikten sonra balans ayarı yapılarak çözülmektedir. Motor parçalarının maruz kaldığı gerilmeler Tablo 4.4'te gösterilmiştir. Bu gerilmeler altında parçaların dayanımı, deformasyon miktarı ve akma sınırları içinde kalıp kalmadığı Solidworks Simulation (2018) yazılımı kullanılarak yürütülen SEY analizleri ile test edilmiştir.

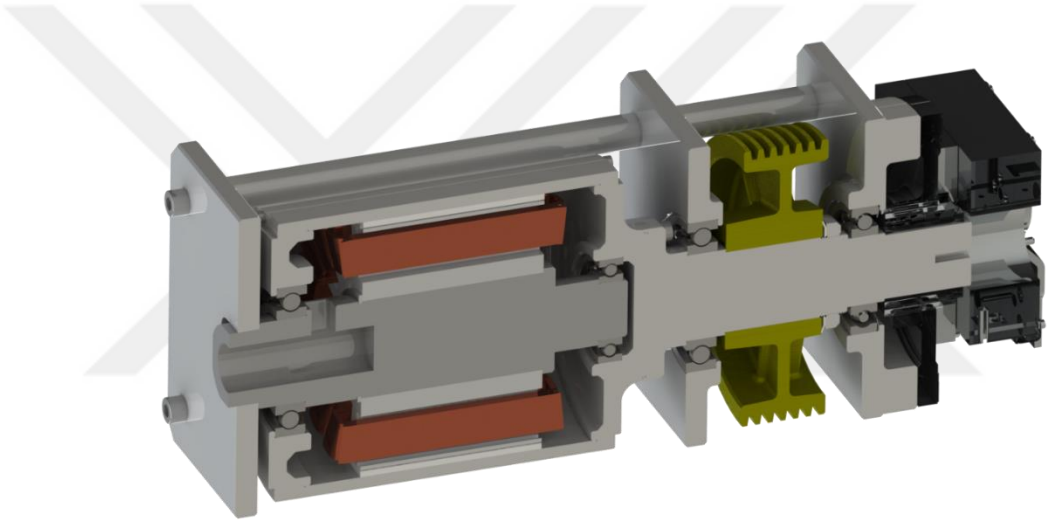


Şekil 4.14. Dıştan rotorlu SMSM'nin nihai katı modeli

Tablo 4.4. Motor parçalarının maruz kaldığı gerilmeler

Motor Parçası	Elemanı Zorlayan Etki Tipi
Kasnak Mili	Eğilme+Burulma
Stator Mili	Burulma
Rotor	Burulma
Motor Şasisi	Eğilme+Burulma

Şekil 4.15'te dıştan rotorlu SMSM'nin üst kesit görünüşü gösterilmiştir. Bu şekil motor parçalarının konumlarının görülmesi ve çalışma mantığının anlaşılması açısından önemlidir. Kasnak, diğer dıştan rotorlu motorlarda olduğu gibi rotor üzerine açılmış kanallar kullanılarak oluşturulmamıştır. Standart bir kasnak, rotor tamburundan flanşlı bir mil yardımıyla tahrik edilmektedir. Dıştan rotorlu asansör motorlarında buna benzer bir hareket aktarma sistemine daha önce literatürde rastlanmamıştır. Bu sistemin halatlı motor yerine kayışlı motor yapısına dönüştürülebilmesi de mümkündür. Halat kasnağının kayışlı motor kasnağı ile değiştirilmesi suretiyle, dıştan rotorlu motor kayışlı bir asansör motoruna dönüşebilmektedir. Bu tasarım, yapılan literatür araştırmalarına göre ilk defa bu tez kapsamında öne sürülmüştür.



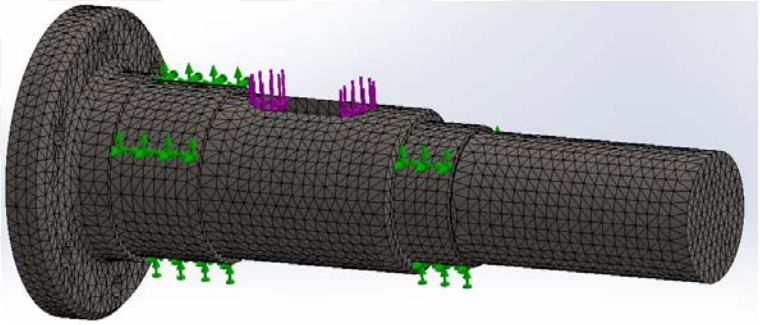
Şekil 4.15. Dıştan rotorlu SMSM'nin kesit görünüşü

4.3.1. Kasnak mili eğilme ve burulma analizi

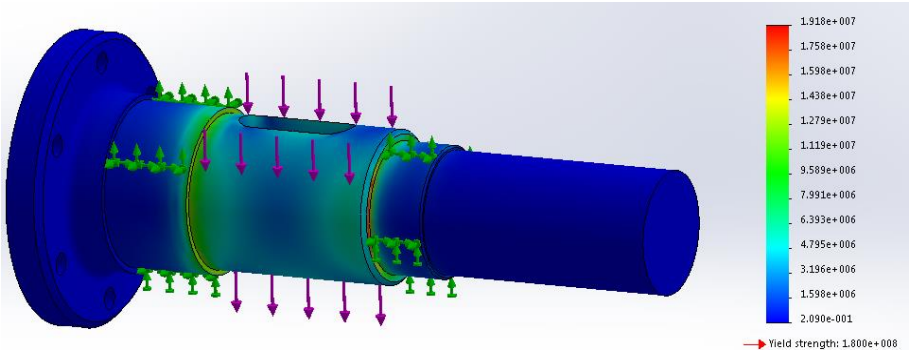
Kasnak üzerindeki halatlara bağlı olan asansör kabini, karşı ağırlık ve yolcu ağırlıkları kasnak milinde eğilme momenti etkisi yapmaktadır. Ayrıca kasnak mili, yükü döndürmeye zorladığından üzerinde burulma momenti oluşmaktadır. Dolayısıyla kasnak milinin hem burulma hem de eğilmeye karşı zorlandığında nasıl bir tepki vereceği SEY analizleri ile test edilmiştir. Dıştan rotorlu SMSM'nin prototipinin üretiminde rotor, mil ve şasi elemanları için orta karbonlu çeliklerden AISI 1050 malzemesi kullanılmıştır. Motorun seri üretime geçmesi durumunda, daha az maliyetli olan düşük karbonlu çeliklerden AISI 1010 malzemesinin kullanılmasının daha uygun olacağı düşünüldüğünden, yapılan SEY analizleri AISI 1010 malzemesine göre yapılmıştır. AISI

1010 çeliğinin akma dayanımı AISI 1050 çeliğine göre daha düşüktür. Dolayısıyla SEY analizlerinde güvenli sonuçlar alınması halinde prototip motorun çok daha güvenli olacağı aşikardır. Malzeme özellikleri Ek 15'te paylaşılmış olan AISI 1010 çeliğinin akma dayanımı 180 MPa'dır (Matweb, 2019). Bu özellikler sıcak haddelenmiş çelik için geçerli olup, soğuk haddelenmiş çeliklerde akma dayanımı değerleri daha yüksektir.

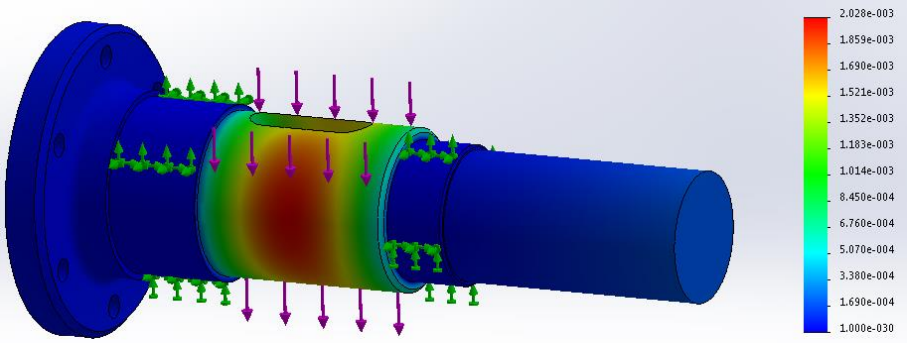
Eğilme gerilmesi için kasnak milinin ağ yapısı ve uygulanan kuvvet Şekil 4.16'da, von Mises gerilme sonuçları Şekil 4.17'de, yer değiştirme sonuçları Şekil 4.18'de verilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen şekillerde deformasyon skalası 1 olarak seçilmiştir. Dolayısıyla deformasyon miktarları büyültülmemiş ve olduğu gibi gösterilmiştir. Şekillerde yer alan renk skalalarından maksimum gerilme ve yer değiştirme noktaları kolaylıkla tespit edilmektedir.



Şekil 4.16. Kasnak mili ağ (mesh) yapısı ve uygulanan kuvvet (25000 N)



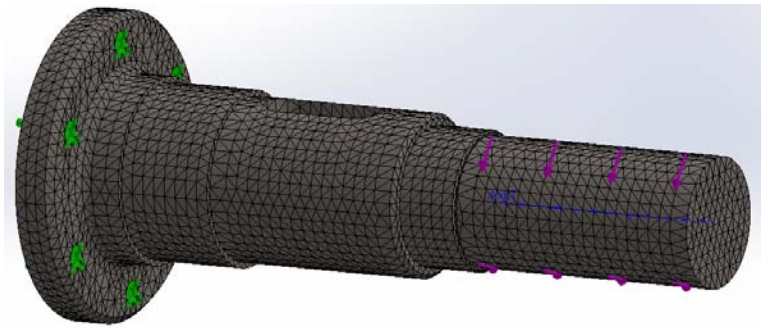
Şekil 4.17. Eğilme etkisindeki kasnak milinin von Mises gerilmesi analiz sonuçları (N/m^2)



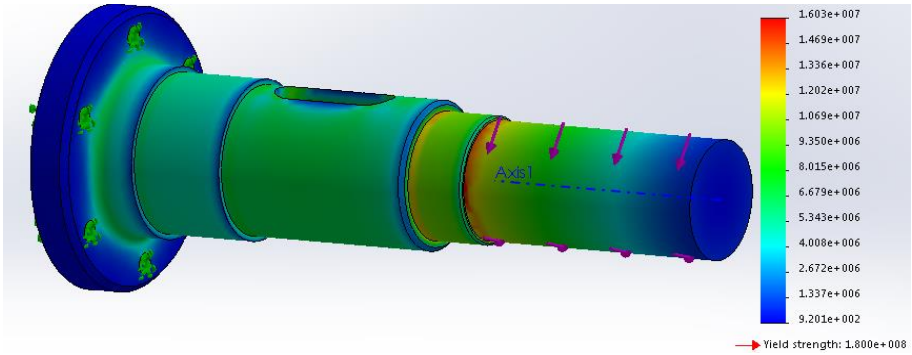
Şekil 4.18. Eğilme etkisindeki kasnak milinin yer değiştirme analiz sonuçları (mm)

Analiz sonuçları incelendiğinde; 25 kN'luk kuvvet altında kasnak miline etki eden maksimum von Mises gerilmesi 19.18 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer malzemenin akma sınırı olan 180 MPa'nın çok altındadır ve malzeme uygulanan yük altında 9,38 kat güvenlidir. Malzemenin maksimum yer değiştirmesi ise 2,028 μm'dir ve bu değer de oldukça düşük bir değerdir. Dolayısıyla maksimum eğilme yükü altında kasnak mili güvenli bölgede çalışmaktadır.

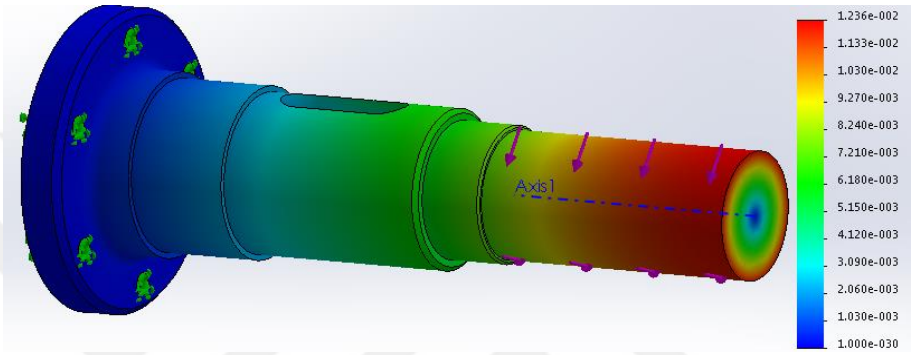
Kasnak miline, motorun maksimum çıkış torku olan 240 Nm'lik bir burulma momenti uygulanmıştır. Kasnak milinin rotor sağ kapağı ile cıvata birleşim noktaları sabit noktalar olarak alınmış ve burulma momenti kasnak milinin ucundan uygulanmıştır. Uygulanan burulma momenti etkisi altındaki kasnak milinin ağ yapısı Şekil 4.19'da, von Mises gerilme sonuçları Şekil 4.20'de, yer değiştirme sonuçları ise Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Kasnak mili ağ yapısı ve uygulanan burulma momenti (240 Nm)



Şekil 4.20. Burulma etkisindeki kasnak milinde oluşan von Mises gerilmesi analiz sonuçları (N/m^2)

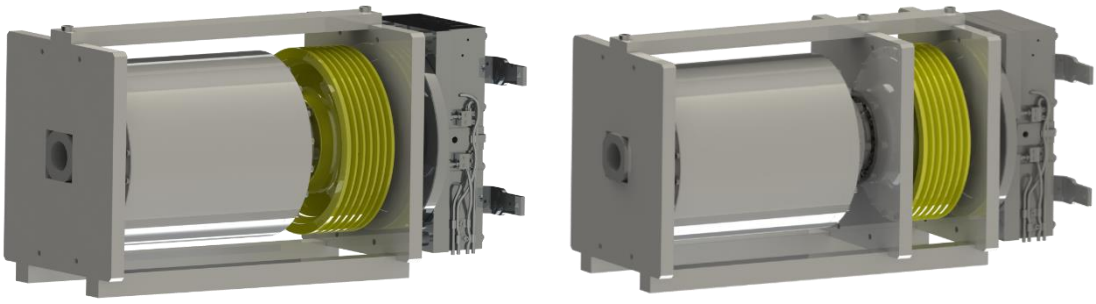


Şekil 4.21. Burulma etkisindeki kasnak milinde oluşan yer değiştirme analiz sonuçları (mm)

Uygulanan 240 Nm'lik burulma momenti etkisi altında kasnak milindeki maksimum von Mises gerilmesi 16.03 MPa olarak elde edilmiştir. Burulma etkisi düşünüldüğünde, malzemenin kayma akma dayanımı dikkate alınmaktadır. Bu değer de eğilme akma dayanımının yaklaşık 0.58 katıdır (Shear Strength, 2007). Bu durumda malzemenin kayma akma sınırı 104.4 MPa olmaktadır. Böylelikle kasnak mili burulma momenti etkisi altında 6.51 kat güvenli çıkmıştır. Yapılan tasarım hesaplarında emniyet katsayısı 5 olarak alınmıştır (Asansörlerin hesap, tasarım ve yapım kuralları: TS1812, 1988). Seçilen emniyet katsayısından 1.51 kat daha fazla güvenli çıkan kasnak milinde az da olsa iyileştirme yapılabilir. Deformasyon analizlerine göre mildeki maksimum yer değiştirme milin uç noktalarında ve 12.36 µm gibi oldukça düşük bir değer olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla maksimum burulma momenti altında kasnak mili güvenli bölgede çalışmaktadır.

4.3.2. Rotor burulma analizi

Dıştan rotorlu SMSM'nin dönen kısmı rotordur ve üzerinde mıknatıslar yer almaktadır. Dönme hareketi rotordan kasnak miline aktarılmaktadır. Motor tasarımı yapılırken farklı geometriler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Şekil 4.22'de ortada yer alan sabitleme plakasının bulunmadığı ilk tasarım denemesinde, rotor üzerine radyal yükler etkimekteydi. Bu yükler altında rotor geometrisinde oluşan nispeten yüksek gerilmelerin ortadan kaldırılması ve simetrik bir yük dağılımının elde edilebilmesi için kasnağın sol tarafına da bir sabitleme plakasının konulmasına karar verilmiştir. Ayrıca ilk tasarım denemelerinin yapısal analizlerinde (özellikle burulma analizinde) sabitleme plakalarını birleştiren dikdörtgensel parçalarda oluşan gerilmelerin azaltılması için, motorun nihai modelinin kafes yapıda olmasına karar verilmiştir. Dolayısıyla ikinci tasarım çalışmasındaki birleştirme parçalarının geometrisi ve konumları da değiştirilmiştir. Şekil 4.14'te gösterilen nihai tasarımda kasnak mili iki adet sabitleme plakası arasında bulunduğundan, kasnak üzerindeki yüklerin rotora bir etkisi olmamaktadır. Bu tasarım sayesinde kasnağın sağ ve sol tarafındaki plakalar ile simetrik bir yük dağılımı elde edilmiştir. Ayrıca kafes yapısı sayesinde motorun burulma etkisi altındaki deformasyonu da minimize edilmiştir.

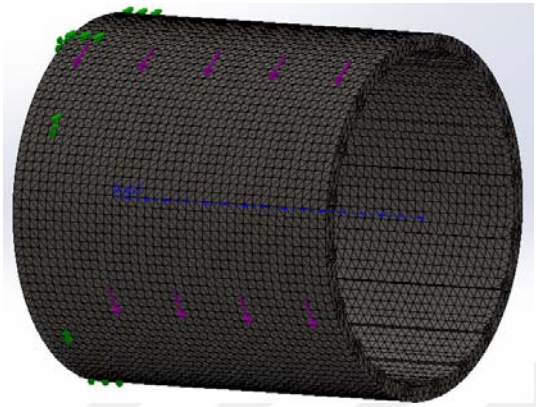


a) b)

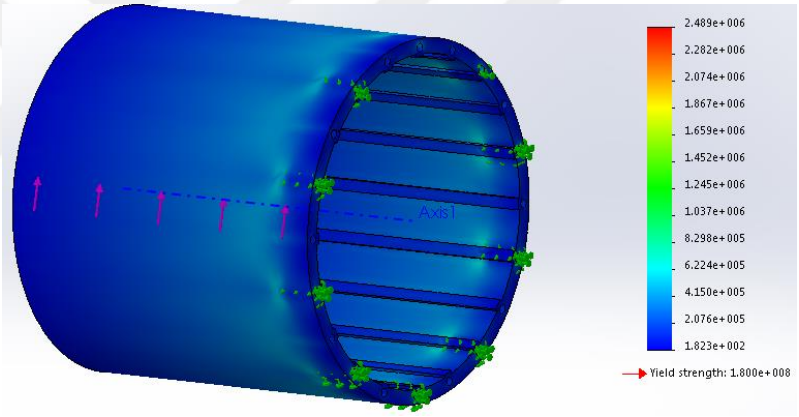
Şekil 4.22. Dıştan rotorlu SMSM'nin ilk iki tasarım denemesi, a) Orta sabitleme plakası olmayan b) Orta sabitleme plakası olan, dikdörtgen birleştirme profilli

Şekil 4.23'te rotora uygulanan burulma momenti (240 Nm) ve sabitleme noktaları gözükmektedir. Rotor sol tarafta yer alan cıvata bağlantılarından sabitlenmiş ve gövdesine bir burulma momenti uygulanmıştır. Yükü döndürmeye çalışan rotorda özellikle motorun kalkması ve durması anında yüksek burulma momentleri oluşmaktadır. Yapılan analizler ile rotora maksimum çıkış torku kadar burulma momenti uygulanmış

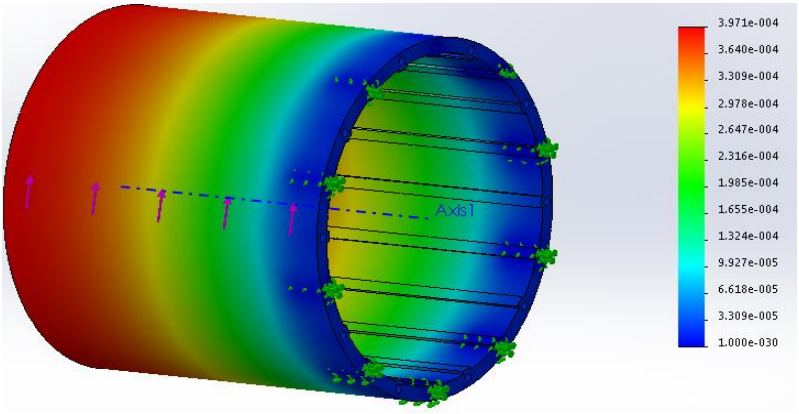
ve böylelikle en kötü senaryo test edilmiştir. Analizler rotorda bulunan mıknatıs kanalları varken gerçekleştirilmiştir. Prototip motorun üretim aşamasında rotor içine açılan mıknatıs kanallarına ihtiyaç duyulmamıştır.



Şekil 4.23. Rotor ağ yapısı ve uygulanan burulma momenti (240 Nm)



Şekil 4.24. Burulma etkisindeki rotorda oluşan von Mises gerilmesi analiz sonuçları (N/m^2)

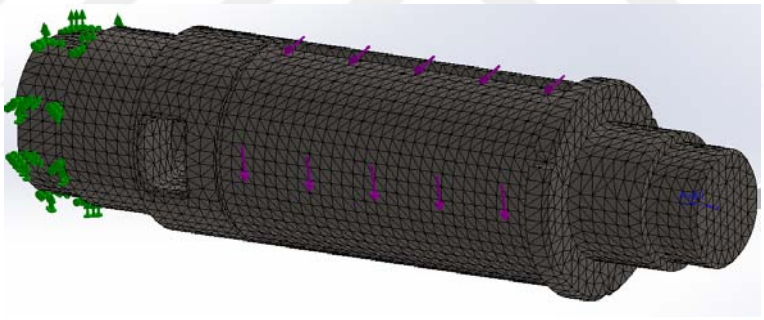


Şekil 4.25. Burulma etkisindeki rotorda oluşan yer değiştirme analiz sonuçları (mm)

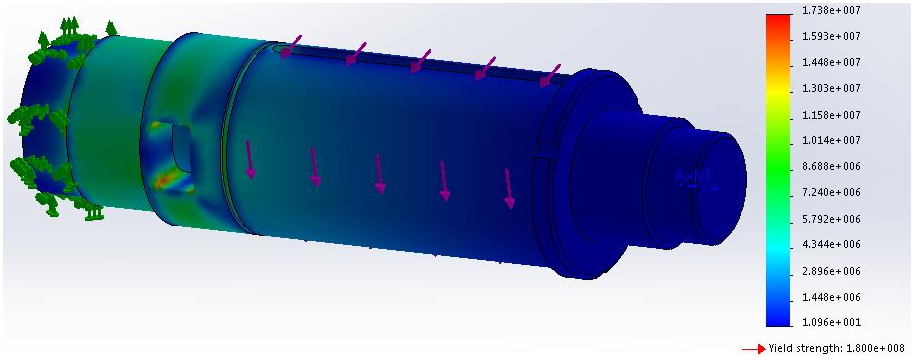
Şekil 4.24'te görüldüğü gibi uygulanan 240 Nm'lik kuvvet altında, rotordaki maksimum von Mises gerilmesi 2.48 MPa olarak elde edilmiştir. Şekil 4.25'te ise maksimum yer değiştirme değeri 0.39 µm olarak elde edilmiştir. Kullanılan AISI 1010 çeliğinin kayma akma sınırı baz alındığında, rotorun fazlasıyla güvenli olduğu gözükmektedir. Güvenlik katsayısının çok yüksek çıkması, seri üretimin düşünülmesi durumunda kapak bağlantıları da hesaba katılarak rotor kalınlığının bir miktar düşürülebileceğini göstermektedir.

4.3.3. Stator mili burulma analizi

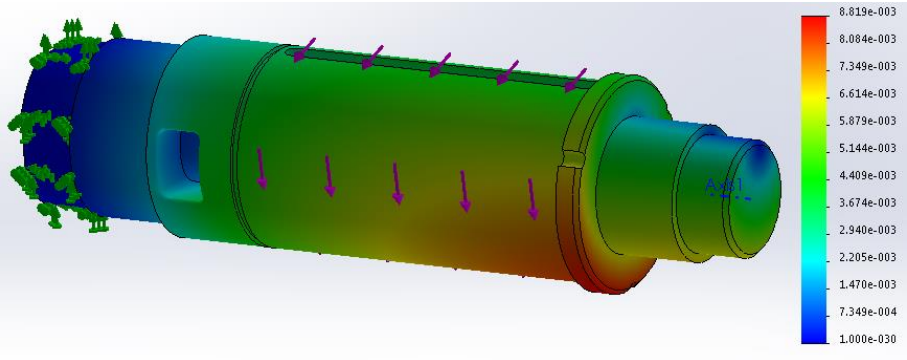
Stator mili sabit olduğundan dönme yönüne ters yönde burulma kuvvetine maruz kalmaktadır. Stator miline ayrıca statorun kendi ağırlığı yük etkisi yapmaktadır fakat stator ve sargıların toplam ağırlığı yaklaşık 28 kg gibi düşük bir değer olduğundan bu bölgede eğilme gerilmesine bakmaya gerek yoktur. Stator mili analiz sonuçları Şekil 4.26 ve Şekil 4.28 arasında paylaşılmıştır.



Şekil 4.26. Stator mili ağ yapısı ve uygulanan burulma momenti (240 Nm)



Şekil 4.27. Burulma etkisindeki stator milinde oluşan von Mises gerilmesi analiz sonuçları (N/m^2)



Şekil 4.28. Burulma etkisindeki stator milinde oluşan yer değiştirme analiz sonuçları (mm)

Analiz sonuçları incelendiğinde; 240 Nm'lik döndürme momenti altında stator miline etki eden maksimum von Mises gerilmesi 17.38 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer malzemenin kayma akma sınırı olan 104.4 MPa'nın çok altındadır ve malzeme uygulanan yük altında 6 kat güvenlidir. Malzemenin maksimum yer değiştirmesi ise 8,819 µm'dir ve bu değer de oldukça düşük bir değerdir.

4.4. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Termal Analiz Sonuçları

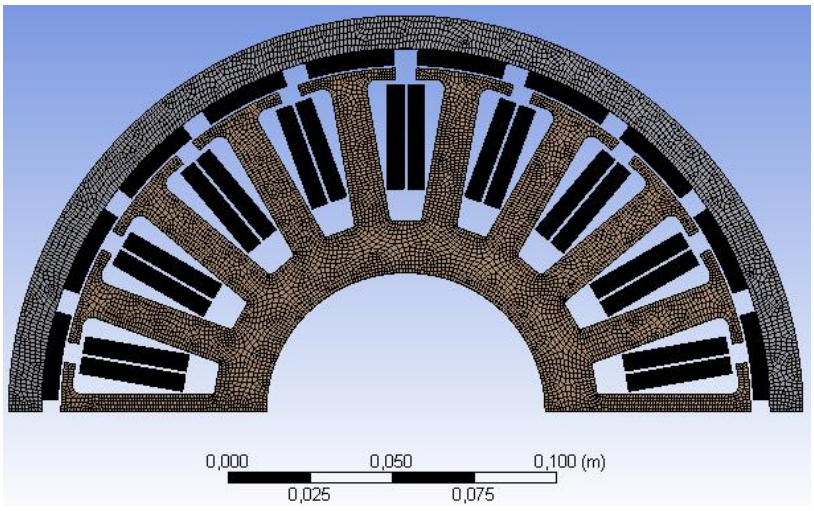
Dıştan rotorlu SMSM'nin tasarım aşamalarının sonuncusu motor elemanlarının ulaşabilecekleri maksimum sıcaklıkların gözlendiği termal testlerdir. Bu testler özellikle motor sargılarındaki ve mıknatıslarındaki sınır değerlerin aşılıp aşılmadığının gözlenmesi açısından önemlidir. Motor sargılarının izolasyonları için IEC 60034 standartlarına göre bazı sınırlar belirlenmiştir. Tablo 4.5'te motor sargılarının izolasyon sınıfları paylaşılmıştır. Son zamanlarda teknolojideki gelişmeler ile motorlarda en çok kullanılan sargı izolasyon sınıfı F olmuştur (Toshiba, 2011). Örneğin ortam sıcaklığının 40 °C kabul edildiği durumda, F sınıfı izolasyona sahip motor sargılarının izin verilen maksimum çalışma sıcaklığı 155 °C olmaktadır (40°C+105°C+10°C). Bu sıcaklık, tam yükteki izin verilen sıcaklık artışı ile ortam sıcaklığının ve kızgın nokta toleransının toplamına eşittir. Yapılan analizlerde, motorun F sınıfı izolasyon sargılarına sahip olduğu kabul edilmiştir. Prototip motorda kullanılan N45SH tipi mıknatısların demagnetize olmadan çalışabilecekleri maksimum sıcaklık değeri ise 150 °C'dir. Dolayısıyla yapılan termal analizlerde sargıların sıcaklığının 155 °C'yi, mıknatısların ise 150 °C'yi geçmemesi gerekmektedir.

Tablo 4.5. Motor sargılarının izolasyon sınıfları (Toshiba, 2011)

Sıcaklık İzolasyon Sınıfı	İzin Verilen Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	Tam Yükte İzin Verilen Sıcaklık Artışı* (°C)	Kızgın Nokta Toleransı (°C)
A	105	60	5
B	130	80	10
F	155	105	10
H	180	125	15

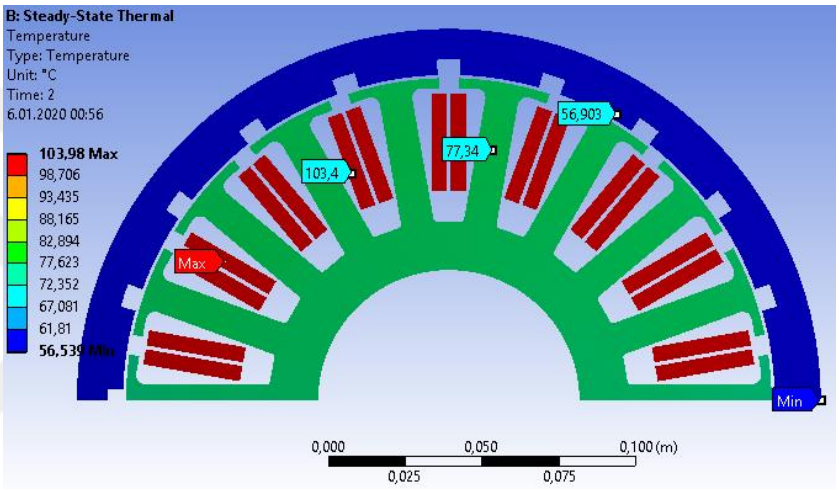
* Ortam Sıcaklığı 40°C kabul edilerek verilmiştir.

Elektrik motorlarında akımın geçtiği sargılar, sıcaklık değerlerinin en yüksek olduğu bölümlerdir. Mıknatısların sargılar ile direkt bir temasının olmamasından ve rotor ile birlikte dönmesinden dolayı stator sargılarına göre sıcaklıkları daha düşük seviyelerde olmaktadır. Dolayısıyla termal analizlerdeki stator sargılarının maksimum sıcaklığı aynı zamanda motorun içinde oluşacak maksimum sıcaklığı verecektir. Daha önce de bahsedildiği üzere tez konusu olan dıştan rotorlu asansör motoru S5 görev çevrimine sahiptir ve motorun yüklü kullanım süresinin toplam çevrim süresine oranı %40'tır. Buna rağmen termal analizlerde, tam yük altında motorun kalıcı duruma geçtiği andaki sıcaklık verileri dikkate alınmıştır. Termal analizler, Ansys Maxwell ile Ansys Workbench programlarının bağlantısı kurularak gerçekleştirilmiştir. Ansys Maxwell 2D modülünde elde edilen sonuçlar Ansys Workbench kısmına aktarılmış ve Steady-State Thermal modülü ile Maxwell modülü bağlantısı yapılmıştır. Ardından malzemelerin termal özellikleri tanımlanmıştır. Temas eden yüzeyler için kontak tanımlamaları yapılmış, ısı üretimleri ve ağ yapısı Maxwell dosyasından aktarılmıştır. Şekil 4.29'da termal analizde kullanılan ağ yapısı gözükmektedir.

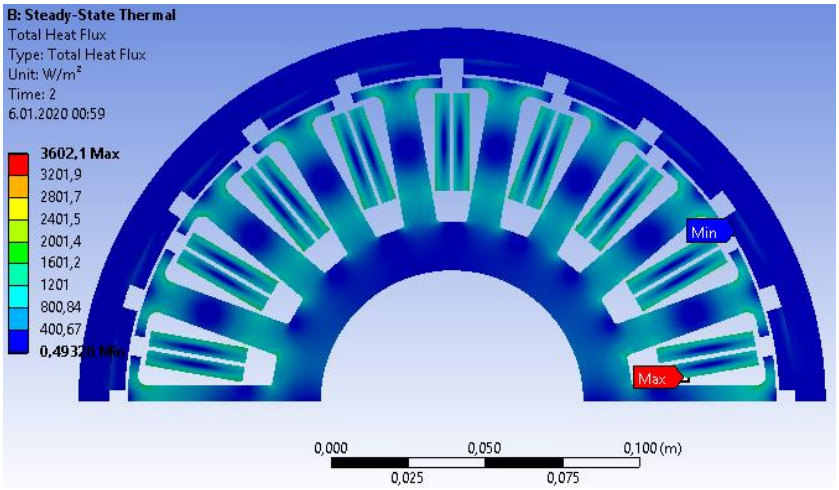


Şekil 4.29. Termal analizlerde kullanılan ağ yapısı

Motor dışına doğru olan ısı yayılımı ve ısı üreten stator sargılarının ısı yayılım tanımlamaları yapılmış ve ortam sıcaklığı 40 °C girilerek analiz gerçekleştirilmiştir. Tam yük altında motor sıcaklığı kalıcı duruma geçmiş ve termal analizlerde Şekil 4.30'daki sonuçlar elde edilmiştir. Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, sargıların sıcaklığı 103.4 °C, mıknatısların sıcaklığı ise 56.903 °C olarak elde edilmiştir. Motorun sürekli tam yükte değil de S5 görev çevriminde çalıştığı düşünüldüğünde ise sargıların yaklaşık 83.21 °C sıcaklığa sahip olması beklenmektedir. Dolayısıyla motor sürekli çalışma modunda dahi termal yönden güvenli çalışma bölgesindedir.



a)



b)

Şekil 4.30. Termal analiz sonuçları: a) Sıcaklık dağılımı, b) Toplam ısı akısı

Yapılan analizler sonucunda; dıştan rotorlu SMSM hem elektromanyetik, hem yapısal hem de termal yönden tüm analizlerden başarılı olmuştur. Dolayısıyla prototip motorun üretilmesi açısından bir sorun tespit edilmemiştir.

4.5. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Üretilmesi

Bölüm 3'te stator, rotor, mıknatıslar ve sargıların üretim aşamaları ayrıntılı olarak verilmişti. Bu bölümde ise motorun montajından, kullanılan kasnak, miller ve rulmanlardan bahsedilmiştir. Prototip motorun üretimi aşamalarında CNC freze ve torna işlemleri uygulanmıştır. Böylelikle tüm parçalar yüksek hassasiyette işlenmiştir (Ek 16: Üretilen Parçalar ve Montaj Resimleri). Şekil 4.15'te kesit görünüşü verilen prototip motor 3 adet sabitleme plakası, 1 adet stator mili, 1 adet kasnak mili, 4 adet rulman, 1 adet rotor gövdesi, 2 adet rotor kapağı, 1 adet kasnak, 4 adet uzun silindirik profil, 4 adet kısa silindirik profil ve plakaların alt birleştirme aparatlarından oluşmaktadır. Kullanılan rulmanların ikisi 6215, diğerleri ise 6210 ve 6212 tipi FAG marka rulmanlardır. Kasnağın sağ ve sol tarafında yer alan, statik ve dinamik yüklerin asıl etkileyeceği rulmanların biri 6215 diğeri ise 6212 tipi rulmanlardır. Kullanılan rulmanların statik yük sınırları sırasıyla 49 kN ve 36 kN, dinamik yük sınırları 68.9 kN ve 55.3 kN, limit hızları ise 5300 rmp ve 6300 rpm'dir. Bu değerler anma hızı 159.2 rpm ve maksimum statik yükü 25 kN olan prototip motor için güvenli bölge sınırları içindedir.

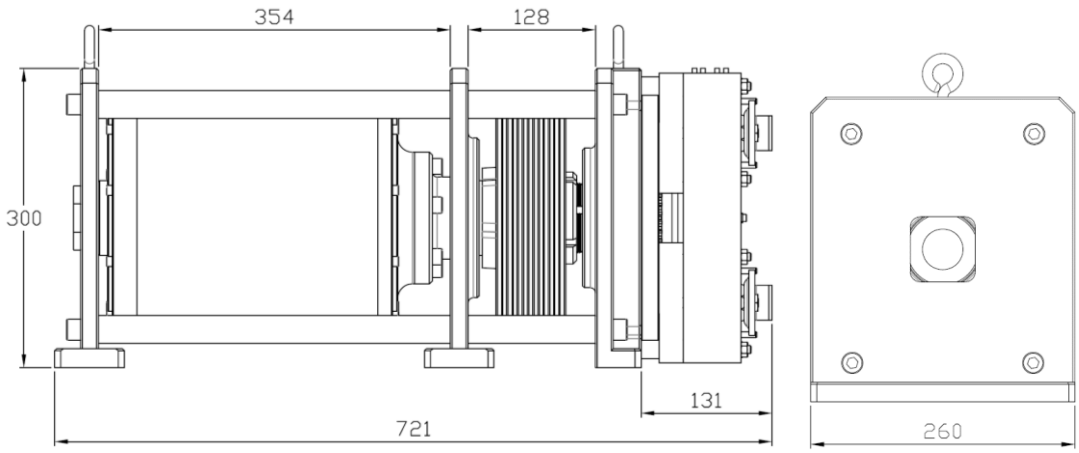
Kasnağın kama ile bağlandığı kasnak mili hem eğilmeye hem de burulmaya maruz kalmaktadır. Mile etkiyen maksimum moment altında, kasnak mili için çap hesabı yapıldığında kasnak milinin çapı 43.35 mm olarak elde edilmiştir (Kayma emniyet gerilmesi 15 N/mm^2, etkiyen maksimum moment ise 240 Nm alınarak işlem yapılmıştır). Çapı 70 mm olarak üretilen kasnak mili, eğilme etkisi altında 9.38 kat, burulma etkisi altında 6.51 kat güvenli çıkmıştır (Bölüm 4.3.1). Kasnak mili aynı zamanda rotor kapağına bağlanan bir flanş görevi de görmektedir.

Stator mili ise rotor gövdesinin ve statorun yataklanması için kullanılmıştır. Sol sabitleme plakasına kare profil ile sabitlenmiş ve hareketsiz bir şekilde durmaktadır. Stator milinin sol orta kısmından bir delik açılmış ve stator sargıları bu delikten dışarı çıkarılmıştır. Motorda kullanılan kasnak, 6 oluklu standart 240 mm'lik bir kasnaktır. Kasnak, mile

kama bağlantısı yapılarak bağlanmış, KM14 ve MB14 emniyet somunu ve pulu ile sabitlenmiştir (Ek 17: Kasnak, emniyet somunu ve pulu). Şekil 4.31'de montaj aşamaları ve freni ile birlikte prototip motorun son hali paylaşılmıştır. Dıştan rotorlu SMSM'nin prototipi özgün, rijit ve yüksek mukavemetli bir yapıya sahip olarak üretilmiştir. Şekil 4.32'de motorun sınır ölçüleri gösterilmiştir. Şekil 4.33'te ise üretilen kasnak mili ve stator mili paylaşılmıştır.



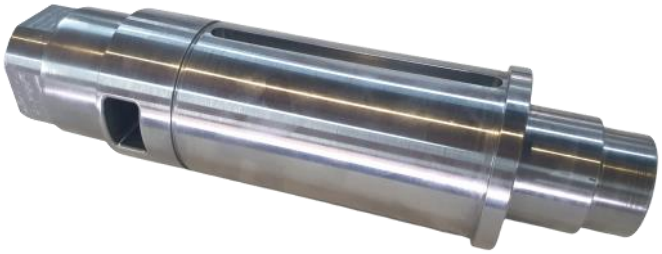
Şekil 4.31. Dıştan rotorlu SMSM'nin montaj resimleri



Şekil 4.32. Dıştan rotorlu SMSM'nin ölçüleri



a)



b)

Şekil 4.33. a) Kasnak mili ve b) Stator mili

4.6. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Test Sonuçları

Bu bölümde dıştan rotorlu SMSM'nin test sonuçları paylaşılmış ve bu sonuçlar SEY analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan testlerde motorun zıt EMK gerilimleri ve farklı yüklerde çektiği akımlar incelenmiştir. Böylelikle motorun anma torkunda ve anma hızında ne kadar verimle çalıştığı elde edilebilmiştir. Motorun boşta çalışması esnasında 0.2 A (rms) akım çektiği gözlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre boşta çalışma faz akımı 0.11 A (rms) olarak elde edilmiştir. Boşta çalışma esnasında analiz sonuçları ile test verileri arasında çıkan fark beklenen bir durumdur. Bunun sebebi motordaki mekanik ve rüzgar sürtünmelerinden kaynaklı yük etkisidir. Boşta çalışma deneyinden sonra zıt EMK ve yüklü çalışma testlerine geçilmiştir. Üretilen prototip motorun fazlarının dirençleri analiz ve test verilerine göre Tablo 4.6'da gösterilmiştir.

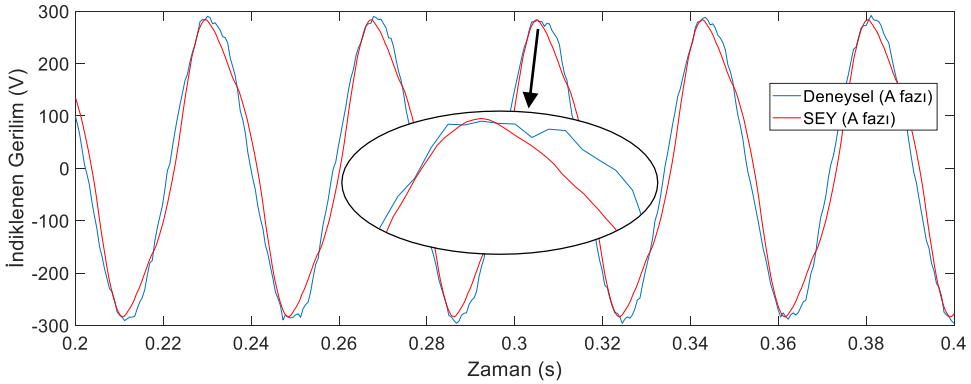
Tablo 4.6. Dıştan rotorlu SMSM'nin faz dirençleri

Stator sargısı	Analiz Sonucu (Ω)	Deneysel Ölçüm Sonucu (Ω)
1. faz	3.28	3.3
2. faz	3.28	3.3
3. faz	3.28	3.3

Tork sensörünün maksimum ölçüm hatası, veri föyünde tam skalanın % 0.5'i olarak verilmiştir. Tam skalası 0-500 Nm olan tork sensörünün düşük tork değerlerindeki tork hatalarının da yüksek olması beklenmektedir. Vuruntu momenti değerleri, motorun çok düşük hızlarda döndürülmesi esnasında ölçülmektedir. Analiz sonuçlarında, prototip motordaki vuruntu momenti 0.012 Nm gibi çok düşük bir değer olarak elde edilmiştir. Bu kadar küçük vuruntu momenti değerlerinin deney düzeneğinde kullanılan tork sensörü ile ölçümünün mümkün olmamasından dolayı vuruntu momentinin test verileri izlenememiştir.

4.6.1. Dıştan rotorlu SMSM'nin zıt EMK testi

Üretilen elektromanyetik tork ile zıt EMK arasında doğrudan bir ilişki olduğu için bu test büyük bir öneme sahiptir. Motorun istenen tork değerlerini üretip üretmeyeceği, oluşabilecek tork dalgalanmalarının genliği ve motorun hava aralığı akı yoğunluğu değerlerinin tahmini zıt EMK testleri ile yapılabilmektedir. Testten önce üretilen prototip motorun sargı uçları sürücüden ayrılmış ve yükleme motoru ile kaplin bağlantısı yapılmıştır. Böylelikle prototip motor generatör olarak çalıştırılmıştır. Yükleme motoru prototip motorun anma hızı olan 159.2 rpm'e kadar hızlandırılmış ve prototip motorun faz uçlarında indüklenen gerilim değerleri osiloskop ile kaydedilmiştir. Şekil 4.10'daki zıt EMK SEY grafiği ile deneysel verilerden elde edilen zıt EMK grafiği Şekil 4.34'de üst üste çizdirilmiştir. Tüm fazların değerleri birbirine yakın olduğu için sadece A fazının grafiği paylaşılmıştır.

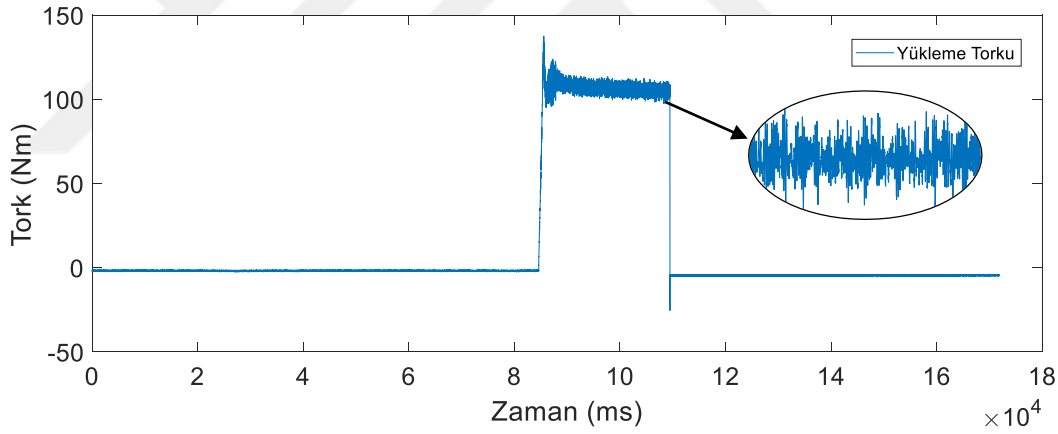


Şekil 4.34. İndüklenen zıt EMK'nın SEY ve deneysel sonuç grafikleri

Şekil 4.34 incelendiğinde, indüklenen gerilimin SEY sonuçlarının test sonuçları ile örtüştüğü görülmüştür. İndüklenen gerilimin tepe değeri SEY analizlerinde 283.6 V iken test sonuçlarında 286.3 V olarak elde edilmiştir.

4.6.2. Dıştan rotorlu SMSM'nin yüklü çalışma testleri

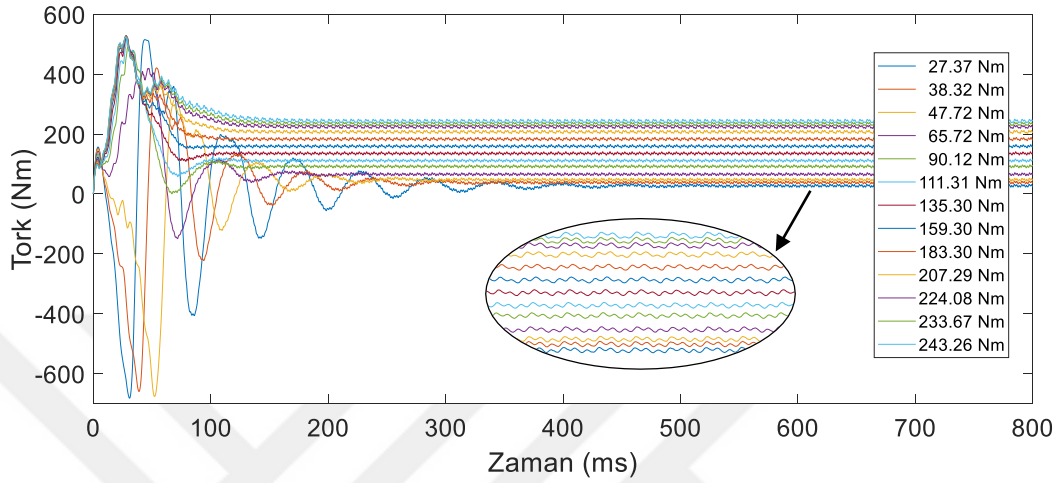
Üretilen prototip motorun yüklü çalışma testleri, motor milinin yükleme motoru mili ile bağlantısının yapılması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Mil bağlantıları kaplinler yardımıyla yapılmış ve millerin arasına bir tork sensörü bağlanmıştır. Böylelikle prototip motorun hangi tork değerlerinde yüklendiği veri toplama kartı vasıtasıyla kaydedilmiştir. Şekil 4.35'te motorun yüklenmesi esnasında kaydedilen bir tork verisi örneği paylaşılmıştır. Tork verisi ile birlikte prototip motor sürücüsünün giriş gerilimleri, motor tarafından çekilen faz akımları ve güç faktörü (cos φ) değerleri her farklı yükleme aşamasında kaydedilmiştir.



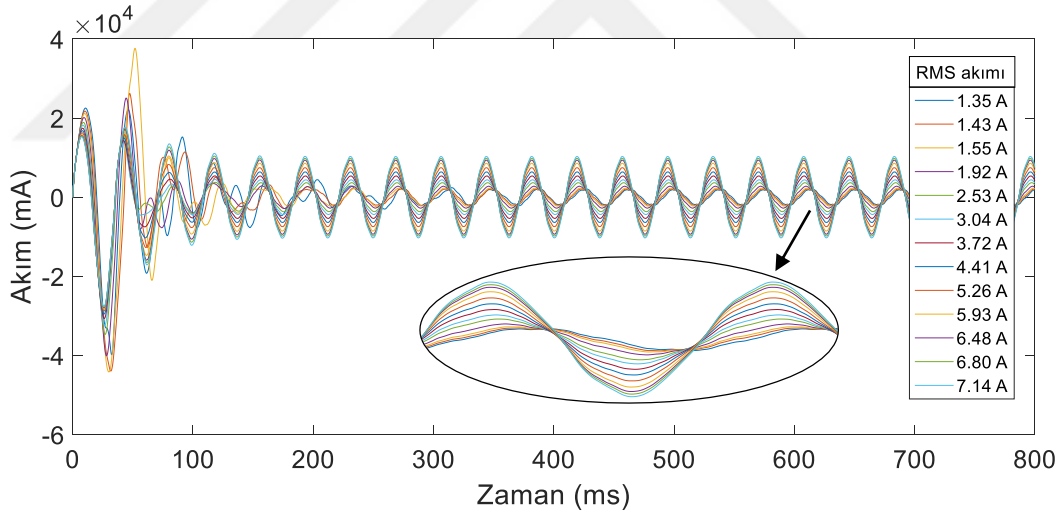
Şekil 4.35. Motorun yüklenmesi esnasında kaydedilen tork verisi örneği

Yüklü çalışma deneylerinin tümü, motorun anma hızı olan 159.2 rmp'de gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki bazı çalışmalarda üretilen prototip motorların kademeli olarak yüklendiği gözlenmiştir. Ancak tez kapsamında üretilen prototip motorun asansör sistemlerinde kullanılacak olması ve yüklerin motor freninin açık duruma geçmesinden sonra doğrudan motora etkileyecek olması dolayısıyla, yükleme işlemleri Şekil 4.35'te gösterildiği gibi kademesiz ve doğrudan uygulanmıştır. Böylelikle gerçek çalışma koşulları yapılan yükleme testleri ile simüle edilebilmiştir.

Yükleme sonuçlarının SEY analizlerinde elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilmesi için analizlerde farklı oranlarda yüklemeler yapılmıştır. Şekil 4.36'da SEY analizlerindeki farklı tork yükleme grafikleri, Şekil 4.37'de ise bu yükleme değerlerinde motorun bir fazından çekilen akım değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.36. SEY analizlerindeki farklı yükleme değerleri



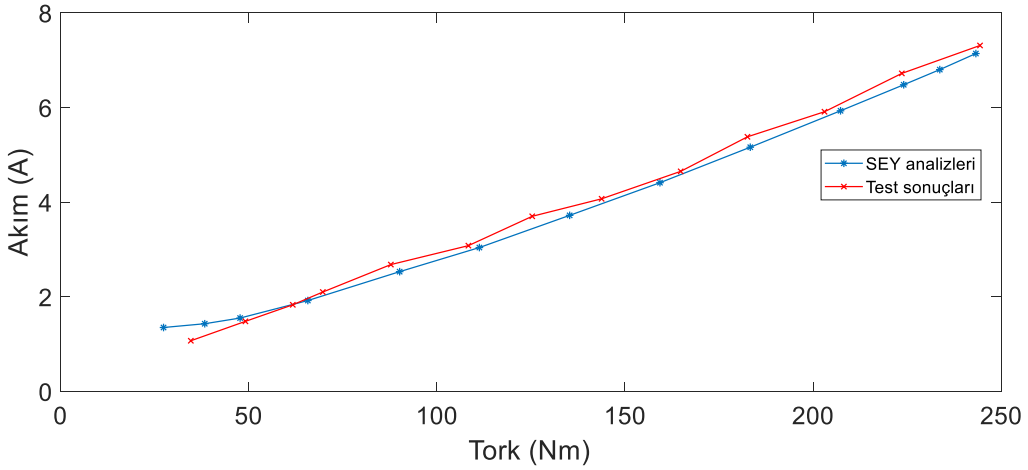
Şekil 4.37. SEY analizlerinde farklı yüklerdeki çekilen akım değerleri (A fazı-RMS değerleri)

Analiz sonuçlarına göre, motorun 243.26 Nm yüklemedeki verim değeri %86.3 olarak elde edilmiştir. Testler esnasında, dıştan rotorlu SMSM 34.62 Nm'den 244.36 Nm'ye kadar yüklenmiştir. Yükleme işlemleri için farklı bir elektrik motoru kullanılmış ve bu motor tork modunda çalıştırılarak prototip motora yükleme yapılmıştır. Yapılan yükleme işlemleri sonucunda tork sensöründen elde edilen tork değerleri, motor sürücüsünden çekilen akım değerleri (rms) ve güç analizöründeki cos φ değerleri Tablo 4.7'de gösterilmiştir.

Tablo 4.7. Dıştan rotorlu SMSM'nin test sonuçları

Tork (Nm)	Akım (A)	Cos φ
34,62	1,07	0,95
49,13	1,48	0,96
61,72	1,83	0,96
69,70	2,10	0,97
87,78	2,68	0,98
108,39	3,08	0,98
125,35	3,70	0,98
143,80	4,07	0,99
164,81	4,65	1,00
182,55	5,38	1,00
203,03	5,91	1,00
223,58	6,72	1,00
244,36	7,31	1,00

Tüm fazlardan çekilen akım değerlerinin birbirine yakın olması sebebiyle Tablo 4.7'de sadece A fazının akım değerleri paylaşılmıştır. Sürücü girişindeki gerilim değerleri (rms) ise, güç analizöründen 220 V, 223 V ve 221 V olarak izlenmiştir. Güç faktörü (cos φ) değeri motorun düşük yükleme değerlerinde 0.95 iken, yükleme oranı arttıkça 1'e ulaşmıştır. Şekil 4.38'de, SEY analizlerinde ve test sonuçlarında elde edilen tork ve akım değerleri üst üste çizdirilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere, dıştan rotorlu SMSM'nin analiz sonuçları ile test sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür. Test sonuçlarına göre 244.36 Nm yüklemedeki verim değeri %84.67 olarak elde edilmiştir. Böylelikle anma torku civarında, SEY analizlerindeki ve testlerdeki verim değerleri arasında %1.63'lik bir fark oluşmuştur. Ortaya çıkan bu verim farkının, motorun üretimi esnasında oluşan ek sürtünme kayıplarından ve stator sargılarındaki uzunluk farklarından dolayı meydana geldiği düşünülmektedir.



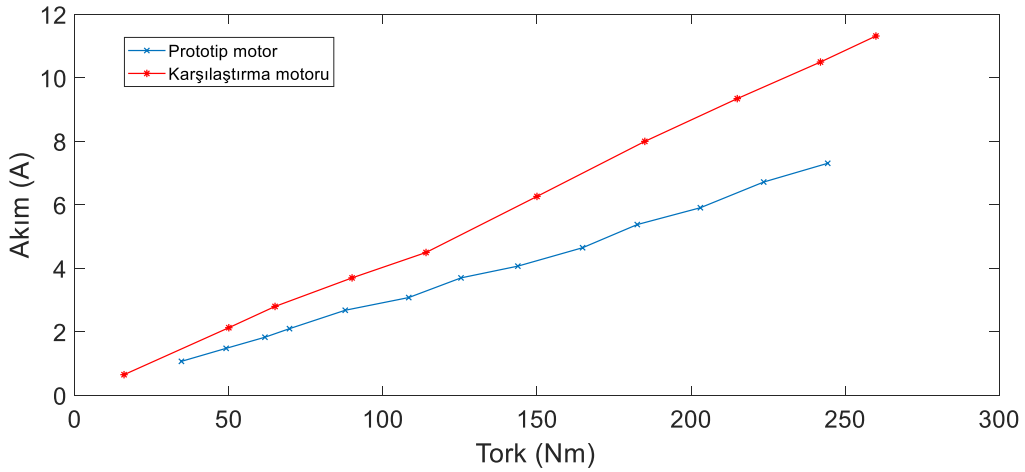
Şekil 4.38. Dıştan rotorlu SMSM'nin test ve SEY sonuçlarına göre elde edilen tork-akım grafikleri

4.7. Dıştan Rotorlu SMSM'nin İçten Rotorlu SMSM İle Karşılaştırılması

Yapılan tez çalışmasının en önemli hedeflerinden biri, tasarlanan ve prototip üretimi yapılan dıştan rotorlu SMSM'nin sektörde satışı gerçekleştirilen içten rotorlu bir SMSM ile karşılaştırılmasıdır. Karşılaştırma motorunun testler sonucu elde edilen tüm bilgileri Ek 18'de paylaşılmıştır (Ergene ve diğ., 2018). Daha doğru bir karşılaştırma yapılabilmesi için, içten ve dıştan rotorlu motorların analiz sonuçları değil, test sonuçları karşılaştırılmıştır. Böylelikle üretilmiş motorlar üzerinden, gerçek verilerin karşılaştırılması mümkün olmuştur. Karşılaştırma için seçilen içten rotorlu SMSM'nin ve prototip üretimi yapılan dıştan rotorlu SMSM'nin test sonuçlarından elde edilen tork-akım değerleri Tablo 4.8'de ve Şekil 4.39'da gösterilmiştir.

Tablo 4.8. Dıştan rotorlu SMSM'nin ve içten rotorlu karşılaştırma motorunun test sonuçları

Dıştan rotorlu SMSM		İçten rotorlu SMSM	
Tork (Nm)	Akım (A)	Tork (Nm)	Akım (A)
34,62	1,07	16	0,65
49,13	1,48	50	2,13
61,72	1,83	65	2,8
69,70	2,10	90	3,7
87,78	2,68	114	4,5
108,39	3,08	150	6,266
125,35	3,70	185	8
143,80	4,07	215	9,347
164,81	4,65	242	10,5
182,55	5,38	260	11,32
203,03	5,91	295	13
223,58	6,72	-	-
244,36	7,31	-	-



Şekil 4.39. Dıştan rotorlu SMSM'nin ve içten rotorlu karşılaştırma motorunun tork-akım grafikleri

Dıştan rotorlu SMSM'nin ve içten rotorlu karşılaştırma motorunun tork-akım verileri karşılaştırıldığında, dıştan rotorlu SMSM'nin içten rotorlu karşılaştırma motoruna göre aynı tork değerlerine daha düşük akımlar çekerek ulaştığı görülmektedir. Bu durum üretilen dıştan rotorlu SMSM'nin daha yüksek verim değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Ergene ve diğ. (2018), içten rotorlu karşılaştırma motorunun anma torku civarındaki (242 Nm) verimini %72.5 olarak elde etmişlerdir. Prototip üretimi yapılan dıştan rotorlu SMSM'nin anma torku civarıdanki (244.36 Nm) verimi ise %84.67 olarak elde edilmiştir. Bu verilere göre, üretilen dıştan rotorlu SMSM'nin verim değeri, içten rotorlu karşılaştırma motorundan %12.17 daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca analiz sonuçlarına göre içten rotorlu karşılaştırma motorunun vuruntu momenti 2 Nm olarak belirtilmiştir (Ergene ve diğ., 2018). Dıştan rotorlu SMSM'nin ise vuruntu momenti analiz sonuçlarına göre 0.012 Nm olarak elde edilmiştir. İçten rotorlu karşılaştırma motorunun ve prototip üretimi yapılan dıştan rotorlu SMSM'nin bazı önemli değerleri Tablo 4.9'da paylaşılmıştır.

Tablo 4.9. İçten rotorlu karşılaştırma motorunun ve dıştan rotorlu SMSM'nin bilgileri

	Dıştan rotorlu SMSM	İçten rotorlu karşılaştırma motoru
Verim, %	84.67	72.50
Vuruntu Momenti, Nm	0.012	2
Motor dış çapı, mm	242	242
Motor paketi uzunluğu, mm	150	150
Hava aralığı kalınlığı, mm	1	1
Mıknatıs kalınlığı, mm	5	5
Stator ağırlığı, kg	16.74	16.64*
Rotor ağırlığı, kg	8.17	8.44*
Bakır ağırlığı, kg	11.18	9.89
Mıknatıs ağırlığı, kg	2.95	2.4

* Ergene ve diğ. (2018)'nin verdiği ölçülere göre Ansys Maxwell'de tasarlanan karşılaştırma motorunun stator ve rotor net ağırlıklarıdır.

Dıştan rotorlu SMSM'nin sınır ölçüleri, içten rotorlu karşılaştırma motorunun sınır değerleriyle aynıdır. Üretilen prototip motorun, bakır ve mıknatıs ağırlıkları karşılaştırma motorundan daha ağırdır. Dıştan rotorlu motorun rotor çapı daha büyük olduğundan, rotor üzerine yerleşen mıknatısların ağırlığının içten rotorlu motordakinden fazla olması normaldir. Bakır ağırlıklarının ağır olmasının sebebi ise, daha yüksek verim değerlerinin

elde edilebilmesi için maksimum oluk alanının elde edilmiş olması ve oluk doluluk faktörünün olabildiğince yüksek tutulmasıdır. Bakır ve mıknatıs ağırlıklarının fazla olması dıştan rotorlu SMSM'nin üretim maliyetleri açısından bir dezavantaj gibi gözükse de, sağladığı %12.17'lik verim artışıyla bu maliyetleri kısa sürede karşılayacaktır.

Dıştan rotorlu SMSM tüm mekanik aksamları ile birlikte düşünüldüğünde, eksenel uzunluğu karşılaştırma motorundan daha fazladır. Bunun sebebi ise, kasnağın dengeli bir yük dağılımı ve daha emniyetli rijit bir yapıya kavuşması için iki plakanın arasına konulmasıdır. Bu tasarım sayesinde kasnak yükü rulmanlara simetrik bir şekilde dağılmış ve bu yüklerin motor gövdesine olabilecek etkileri ortadan kaldırılmıştır.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında asansör tahrik sistemleri için dıştan rotorlu sürekli mıknatıslı bir senkron motorunun (SMSM) tasarımı, modellenmesi ve prototip üretimi yapılmıştır. Yapılan literatür araştırmalarında, dıştan rotorlu asansör tahrik motorları ile alakalı herhangi bir tez çalışmasına rastlanmamıştır. Dolayısıyla, bu çalışma dıştan rotorlu asansör tahrik motorları ile alakalı yapılmış ilk tez olarak literatüre önemli bir katkı sağlamıştır. Sektörde yer alan birçok dıştan rotorlu asansör tahrik motoru ve ilgili patentler ayrıntılı olarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Özellikle dıştan rotorlu SMSM'ler ile ilgili yapılan yayın, tez vb. gibi çalışmalar başlıklar altında irdelenmiştir. Karşılaştırma motoru olarak sektörde satışı gerçekleştirilen, ayrıntılı analiz ve test sonuçları literatürde yer alan, 4 kW gücünde içten rotorlu bir SMSM seçilmiştir. Tez kapsamında gerçekleştirilen dıştan rotorlu motor tasarımı sayesinde, karşılaştırma motoru olarak seçilen içten rotorlu dişlisiz asansör tahrik motoruna göre %12.17 daha fazla verim elde edilmiştir.

Dıştan rotorlu SMSM'nin rotorundaki dönme hareketi mile indirgenmiş ve piyasada seri üretimi yapılan tahrik kasnaklarına ve fren mekanizmalarına uygun yeni bir motor tasarımı elde edilmiştir. Kasnak, diğer dıştan rotorlu motorlarda olduğu gibi rotor üzerine açılmış kanallar kullanılarak oluşturulmamıştır. Standart bir kasnak, rotor tamburundan flanşlı bir mil yardımıyla tahrik edilmiştir. Dıştan rotorlu asansör motorlarında, buna benzer bir hareket aktarma sistemine daha önce literatürde rastlanmamıştır. Bu sistemin halatlı motor yerine kayışlı motor yapısına dönüştürülebilmesi de mümkündür. Halat kasnağının kayışlı motor kasnağı ile değiştirilmesi suretiyle, dıştan rotorlu motor kayışlı bir asansör motoruna dönüşebilmektedir. Bu tasarım, literatür araştırmalarına göre ilk defa bu tez kapsamında öne sürülmüştür.

Dıştan rotorlu SMSM'nin tasarım aşamalarında, elektromanyetik analiz yazılımı ile yapay arı kolonisi (ABC) algoritması kullanılarak motor performans verileri iyileştirilmiştir. Bu bağlamda, ilk olarak motorun analitik tasarımı yapılmış, daha sonra ise sonlu elemanlar metodu ile elektromanyetik, yapısal ve termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde içten rotorlu SMSM'lerin ayrıntılı analitik modelleri yer almaktadır. Bu tez çalışmasında içten rotorlu SMSM'lerin analitik modelleri dıştan rotorlu SMSM'ye uyarlanmış ve dıştan rotorlu SMSM'nin analitik denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler kullanılarak girilen parametre değerlerine göre istenilen sonuçları hesaplayan bir program yazılmıştır. ABC algoritması ile yapılan optimizasyonlarda değişken parametreler; stator diş ucu kalınlığı (h_{s0}), oluk diş ucu yarıçapı (h_{s1}), oluk yüksekliği (h_{s2}), stator boyunduruk kalınlığı (h_{sb}), stator diş genişliği (w_{sd}) ve statorun bir fazındaki tur sayısı (N_t) olarak seçilmiştir. Seçilen parametrelerin değişimlerine göre stator dişlerindeki akı yoğunluğunun (B_{sd}) 1.7 Tesla'yı, doluluk faktörü (k_{dol}) değerinin 0.57'yi ve akım yoğunluğu (J) değerinin 6.5 A/mm^2'yi geçmemesi istenmiştir. Optimizasyon sonucu elde edilen parametre değerlerine ANSYS Maxwell yazılımı yardımıyla nihai halleri verilmiştir.

Analitik modele göre dıştan rotorlu SMSM'nin ayrıntılı SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, motorun tam yükte çalışması esnasında doyuma girmediğini ve B-H eğrisinin büküm bölgesi civarında çalışıldığını göstermiştir. S5 (Elektrikli frenle aralıklı periyodik görev: motorun yüklü kullanım süresinin toplam çevrim süresine oranı %40) görev çevrimine sahip olan dıştan rotorlu SMSM'nin akım yoğunluğu, 5-6.5 A/mm^2 değerleri arasında elde edilmiş ve özel bir soğutma sistemi olmayan prototip motorun güvenli bir şekilde çalışması garanti altına alınmıştır. Yapılan yükleme simülasyonlarında, tork dalgalanmasının çıkış torkuna oranı %4.23, verim ise %86.3 olarak elde edilmiştir. Bu değerler dıştan rotorlu SMSM'nin konforlu bir seyahat sunacağını göstermektedir. Tüm SEY analizleri başaralı olduktan sonra motorun yapısal testlerine geçilmiştir.

Yapısal testlerde dıştan rotorlu SMSM'nin kasnak mili, rotoru ve stator mili hem eğilme hem de burulma etkisi altında izlenmiştir. Kasnak mili 25 kN'luk eğilme kuvveti altında 9,38 kat, 240 Nm'lik burulma momenti etkisi altında ise 6.51 kat güvenli çıkmıştır. Dıştan rotorlu SMSM'nin nihai tasarımında kasnak mili iki adet sabitleme plakası arasında

bulunduğundan, kasnak üzerindeki yüklerin rotora ve stator miline bir etkisi olmamaktadır. Bu tasarım sayesinde kasnağın sağ ve sol tarafındaki plakalar ile simetrik bir yük dağılımı elde edilmiştir. Ayrıca kafes yapısı sayesinde motor şasisinin burulma etkisi altındaki deformasyonu da minimize edilmiştir. Dolayısıyla rotor ve stator mili üzerinde sadece burulma etkisi bulunmaktadır. 240 Nm'lik burulma momenti altında, maksimum von Mises gerilmeleri rotor ve stator milinde sırasıyla 2.48 MPa ve17.38 MPa olarak elde edilmiştir. Böylelikle burulma etkisi altında stator mili 6 kat, rotor ise 42 kat güvenli çıkmıştır. Güvenlik katsayısının çok yüksek çıkması, seri üretimin düşünülmesi durumunda, kapak bağlantılarını da hesaba katarak rotor kalınlığının bir miktar düşürülebileceğini göstermektedir. Ancak rotor ve kapakların montajının yapıldığı rotor üzerinde bulunan vida yuvaları düşünüldüğünde, rotorun et kalınlığında yapılabilecek değişim minimum seviyelerde olacaktır.

Termal analizlerde motor dışına doğru olan ısı yayılımı ve ısı üreten stator sargılarının ısı yayılım tanımlamaları yapılmış ve ortam sıcaklığı 40 °C girilerek tam yük altında analizler gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, sargıların sıcaklığı 103.4 °C, mıknatısların sıcaklığı ise 56.903 °C olarak elde edilmiştir. Motorun S5 görev çevriminde çalıştığı düşünüldüğünde ise sargıların yaklaşık 83.21 °C sıcaklığa sahip olması beklenmektedir. Dolayısıyla motor sürekli çalışma modunda dahi termal yönden güvenli çalışma bölgesindedir. Mıknatıslarda oluşan sıcaklık değerlerinin düşük çıkması, motorun seri üretim aşamalarında SH faktörüne sahip mıknatısların rahatlıkla H faktörlü mıknatıslarla değiştirilebileceğini göstermektedir.

Tüm analizlerden başarılı olan dıştan rotorlu SMSM'nin üretim aşamalarında CNC freze, lazer kesim ve torna işlemleri uygulanmıştır. Mıknatıslar, tasarımda karar verilen kutup aralığı değerine göre özel olarak ürettirilmiştir. Sargılar çift katmanlı olacak şekilde sarılmış, mıknatıslar ise rotor üzerine uygun aralıklarla yapıştırılmıştır. Dıştan rotorlu SMSM'nin prototipi standart bir kasnak ve fren ile özgün, rijit ve yüksek mukavemetli bir yapıya sahip olarak üretilmiştir.

Kurulan deney düzeneği ile yapılan yükleme testlerinde, indüklenen zıt EMK geriliminin SEY sonuçları ile örtüştüğü görülmüştür. İndüklenen gerilimin tepe değeri SEY analizlerinde 283.6 V iken test sonuçlarında 286.3 V olarak elde edilmiştir. Yüklü çalışma

deneylerinin tümü, motorun anma hızı olan 159.2 rmp'de gerçekleştirilmiştir. Yükleme torku, gerçek çalışma koşullarının daha iyi simüle edilebilmesi için kademesiz ve doğrudan uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre verim değeri %84.67 olarak elde edilmiştir. Böylelikle anma torku civarında, SEY analizlerindeki ve testlerdeki verim değerleri arasında %1.63'lik bir fark oluşmuştur. Ortaya çıkan bu verim farkının, motorun üretimi esnasında oluşan ek sürtünme kayıplarından ve stator sargılarındaki uzunluk farklarından dolayı meydana geldiği düşünülmektedir.

Test sonuçlarına göre; prototip üretimi yapılan dıştan rotorlu SMSM'nin anma torku civarıdanki %84.67 olan verim değeri, içten rotorlu karşılaştırma motorunun anma torku civarındaki %72.5 olan verim değerinden %12.17 daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca analiz sonuçlarına göre içten rotorlu karşılaştırma motorunun 2 Nm olarak belirtilen vuruntu momenti, dıştan rotorlu SMSM'nin analiz sonuçlarına göre 0.012 Nm olarak elde edilmiştir. Böylelikle aynı sınır ölçülerinde, içten rotorlu asansör motoruna göre daha konforlu ve daha verimli bir tasarım ortayı çıkmıştır. Tez kapsamında üretilen dıştan rotorlu SMSM'nin ticarileşmesi durumunda, ülkemizin asansör motorları alanındaki rekabet gücüne katkı sağlaması ve bu alanda çalışacak araştırmacılar için faydalı olması beklenmektedir.

Gelecek çalışmalarda;

- ABC algoritmasının performansı arttırılabilir ve yeni motor tasarımlarında istenilen parametreler değiştirilirek daha yüksek performans değerlerine ulaşılabilir.
- Deney düzeneğinde kullanılan asansör motoru sürücüsünün kullanımı kısıtlı olduğundan, endüstriyel bir servo motor sürücüsü kullanılarak daha farklı deneyler gerçekleştirilebilir.
- Üretilen prototip motor, asansör test kulelerine takılarak test edilebilir.
- Firmalarla istişare edilerek mekanik tasarımda seri üretime yönelik bazı iyileştirmeler yapılabilir.

KAYNAKLAR

ABC Algoritması, (2009). Software: Matlab Code V2. Erişim: 13 Ekim 2018, https://abc.erciyes.edu.tr/software.htm

Advanced Magnets, (2019). Typical Physical and Chemical Properties of Some Magnetic Materials. Erişim: 20 Ekim 2019, http://www.advancedmagnets.com/custom-magnets/

Akar Asansör, (2014). Dişlisiz asansör motorları. Erişim: 13 Eylül 2019, http://www.akarasansor.com/

Akar-SMT Serisi, (2015). Akar-SMT serisi dişlisiz asansör motoru. Erişim: 11 Mayıs 2019, http://www.akarasansor.com/Assets/Documents/SMT140AC_katalog.pdf.

Akar Beltsys, (2015). Akar-Beltsys® Kayışlı Dişlisiz Sistem. Erişim: 9 Temmuz 2019, http://www.akarasansor.com/sayfalar.asp?LanguageID=1&cid=3&id=192

Akay, B. (2009). *Nümerik Optimizasyon Problemlerinde Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony) Algoritmasının Performans Analizi* (Doktora Tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Akça, M. R. (2011). *Yapay Arı Kolonisi Algoritması Kullanılarak Gezgin Satıcı Probleminin Türkiye'deki İl Ve İlçe Merkezlerine Uygulanması* (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Akış Asansör, (2017). Dişlisiz Asansör Makinaları. Erişim: 13 Eylül 2019, http://www.akisasansor.com.tr/anasayfa

Akış, F. (2015). Sabit mıknatıslı boru tip rotorlu senkron motor, *Türk Patent No. 2015/14894.*

Aksöz Asansör, (2019). Makine daireli ve makine dairesiz asansörler. Erişim: 9 Temmuz 2019, http://www.aksoz.com.tr/asansorler

Allied Motion, (2016). Outer rotor brusshless DC motors, technology overview. Erişim: 11 Mayıs 2017, http://www.koshindenki.com/img/file/KinetiMax_TechnologyOvr_R3(scrn).pdf

Ansys Maxwell, (2019). Electromagnetic field simulation software. Erişim: 15 Aralık 2019, https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell

Arkel, (2018). Senkron asansör motorları. Erişim: 3 Temmuz 2019, https://www.arkel.com.tr/senkron-asansor-motorlari

Arkel Arcode, (2014). Tümleşik Asansör Kontrol Üniteleri. Erişim: 18 Eylül 2019, https://www.arkel.com.tr/media/1432/arkel_catalog_web.pdf

Arnold Magnetic, (2017). Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets-N45SH. Erişim: 21 Ekim 2019, https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N45SH-151021.pdf

Arslan, S. (2014). *Yüksek Hızlı Kalıcı Mıknatıslı Generatör Tasarımı Ve Analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Asansör Sektörü Raporu, (2018). Erişim: 05 Mayıs 2019, https://www.tasiad.org.tr/wp-content/uploads/2018/11/Asans%C3%B6rSekt%C3%B6rRaporu2018.pdf

Avnet Silica Comp., (2009). *Motor Topologies and Drives*, Motor Control Workbook, 9.

Aydın, M. (2012). Brushless Permanent Magnet Servomotors, İçinde: Editör: Küçük, S. *Serial and Parallel Robot Manipulators: Kinematic Dynamics Control and Optimization*, First Edition, InTech, Rijeka, pp. 275-294.

Ayçiçek, E. (2009). Sürekli Mıknatıs Teknolojisi ve Enerji Verimliliği Açısından Önemi. Erişim adresi (20 Aralık 2016): https://www.elektrikport.com/makale-detay/surekli-miknatis-teknolojisi-ve-enerji-verimliligi-acisindan-onemi-engin-aycicek/4129#ad-image-0

Bakhtiarzadeh, H. (2017). *Design of permanent magnet synchronous motor for elevator application* (Master's Thesis). Istanbul Technical University, Graduate School Of Science Engineering And Technology, İstanbul.

Bayraktar, Ş. (2015). *Farklı Kesme Yöntemleri İle Üretilen Silisli Sac Paketlerinin Elektrik Makinalarının Performansı Üzerine Etkisi* (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Bedir, S. (2007). *Çift Yönlü Asansör Fren Bloklarının Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Analizi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Bianchi, N., Bolognani, S., Pre, M. D., & Grezzani, G. A. G. G. (2006). Design considerations for fractional-slot winding configurations of synchronous machines. *IEEE transactions on industry applications*, 42(4), 997-1006.

Bonthu, S. S. R., Choi, S., Gorgani, A., & Jang, K. (2015). Design of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor with external rotor architecture. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)* (pp. 220-226).

Boughrara, K., Ibtiouen, R., Zarko, D., Touhami, O., & Rezzoug, A. (2010). Magnetic field analysis of external rotor permanent-magnet synchronous motors using conformal mapping. *IEEE transactions on magnetics*, 46(9), 3684-3693.

Boyce, M.P. (2011). *Gas turbine engineering handbook*. 4th Edition, Elsevier.

Bulgan, D. (2014). *A Software for Analysis of Permanent Magnet AC Motors* (Master's Thesis). Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.

Braun Elevator, (2015a). Outer rotor tractor for elevator, *China Patent No. CN104539070 A.*

Braun Elevator, (2015b). Outer rotor permanent magnet synchronous tractor for elevator, *China Patent No. CN104539098 A.*

Carraro, E. (2012). *Design of a Permanent Magnet Synchronous Motor according to FreedomCAR specifications* (Master's thesis). University of Padova, Department of Electrical Engineering, Padova.

Carter, F. W. (1900). Note on air gap and interpolar induction. *Journal of Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Part 146, Vol.29, pp.925-933.

Changshu Canon, (2016). Outer rotor type permanent-magnet strong-driving gearless traction machine, *China Patent No. CN 104118788 A.*

Chapman S.J., (2017). *Elektrik Makinalarının Temelleri* (Akın E., Orhan A. Çeviri), Çağlayan Yayıncılık, ss. 8-15.

Cho, D. H., Kim, J. K., Jung, H. K., & Lee, C. G. (2003). Optimal design of permanent-magnet motor using autotuning niching genetic algorithm. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39(3), 1265-1268.

Chu, W., Zhu, Z., & Shen, Y. (2013). Analytical optimisation of external rotor permanent magnet machines. *IET Electrical Systems in Transportation*, 3(2), 41-49.

Cicalé, S., Albini, L., Parasiliti, F., & Villani, M. (2012). Design of a permanent magnet synchronous motor with grain oriented electrical steel for direct-drive elevators. *IEEE XXth International Conference on Electrical Machines* (pp. 1256-1263).

Cirio, L., Lucidi, S., Parasiliti, F. & Villani, M. (2002). A global optimization approach for the synchronous motors design by finite element analysis. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 16(1-2), 13–27.

Clean Craft KK, (2014). Permanent magnet outer rotor synchronous motor, *Japan Patent No. JP2014147191 A.*

Cogent Steel, (2016). Non-grain oriented electrical steel magnetic properties. Erişim: 13 Aralık 2017, https://cogent-power.com/cms-data/downloads/Cogent%20NO%20brochure%202016.pdf

Cros, J., & Viarouge, P. (2002). Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17(2), 248-253.

Cui J., Kramer M., Zhou L., Liu F, Gabay A., Hadjipanayis G., Balasubramanian B. & Sellmyer D., (2018). Current progress and future challenges in rare-earth-free permanent magnets. *Acta Materialia*, 158, 118–137.

Çağan, N. (2015). *Desıgn of an Outer-Rotor Brushless DC Motor For Control Moment Gyroscope Applications* (Master's Thesis). Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Ankara.

Çınar, M. A. (2008). *Elektrikli taşıtın tekerlek tahriği için geliştirilen dış rotorlu anahtarlı relüktans motor tasarımı ve analizi* (Doktora Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Dajaku, G., & Gerling, D. (2014). New methods for reducing the cogging torque and torque ripples of PMSM. *IEEE 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC)* (pp. 1-7).

Dede, M. (2016). Asansörlerde Kullanılan Bir Kaplin Sistemi, *Türk Patent No. 2016/19591.*

Deng, F. (1999). An improved iron loss estimation for permanent magnet brushless machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(4), 1391-1395.

Dosiek, L., & Pillay, P. (2007). Cogging torque reduction in permanent magnet machines. *IEEE Transactions on industry applications*, 43(6), 1565-1571.

Duru, H.T., Demiröz, R., Toktaş, Y. (2005). Asansör Sistemlerinde Doğrudan Tahrik ve Mıknatıs Uyarmalı Senkron Motor Kullanılarak Enerji Verimliğilinin Yükseltilmesi, *I. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli.

Dutta, R., Chong, L., & Rahman, F. (2013). Analysis and experimental verification of losses in a concentrated wound interior permanent magnet machine. *Progress In Electromagnetics Research*, 48, 221-248.

Eker, M. (2017). *Şebeke Yolvermeli Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı* (Doktora Tezi). Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.

Electric Elevator, (2019). The world's first electric elevator, Erişim: 8 Temmuz 2019, https://new.siemens.com/global/en/company/about/history/news/electric-elevator.html

Elektrik Makinelerinin Temelleri, (2017). Ders Notu. Erişim: 29 Ekim 2019, http://web.harran.edu.tr/assets/uploads/other/files/elk._mak._temelleri_DERS_NOTU.pdf

Elevator, (2017). Wikipedia içinde. Erişim: 8 Temmuz 2019, https://en.wikipedia.org/wiki/Elevator.

El-Refaie, A. M., & Jahns, T. M. (2005). Optimal flux weakening in surface PM machines using fractional-slot concentrated windings. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(3), 790-800.

El-Refaie, A. M., Zhu, Z. Q., Jahns, T. M., & Howe, D. (2008). Winding inductances of fractional slot surface-mounted permanent magnet brushless machines. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1-8).

Emetor, (2008). Electric motor winding calculator, Erişim: 30 Temmuz 2019, https://www.emetor.com/windings/

EMF Motor, (2017). SQML Dişlisiz Asansör Motoru Kataloğu. Erişim Adresi (12 Aralık 2019): https://www.emfmotor.com/sqml-gearless-lift-motor.html

Ergene, L. T., Polat, A., Bakhtiarzadeh, H. (2018). Design of a permanent magnet synchronous motor used in elevators, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture Of Gazi University*, 33(2), 725-737.

Erken, F. (2014). *Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Moment Dalgalanmalarının Azaltılması* (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Ertürk, A.S. (2008). *Asansör Karşı Ağırlık Tasarımı Ve Gerilme Analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Eth-Messtechnik, (2016). Torque Transducer DRBK + DRBK-A. Erişim: 9 Ağustos 2019, https://www.eth-messtechnik.de/_datenblaetter/datasheet_torque-sensor_DRBK-DRBK-A.pdf

Fei, W., & Zhu, Z. Q. (2013). Comparison of cogging torque reduction in permanent magnet brushless machines by conventional and herringbone skewing techniques. *IEEE Transactions on energy Conversion*, 28(3), 664-674.

Fenac, (2019). FNC SC2048 Series, SinCos motorfeedback, Absolute encoders. Erişim: 3 Aralık 2019, https://www.fenac.com.tr/img/pdf/fnc-sc2048-serisi-pdf-72547.pdf

Feyrer, K. (2007). *Wire ropes*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s:198.

Flux 2D, (2019). Altair Flux™, Electromagnetic, Electric, and Thermal Analysis. Erişim: 15 Aralık 2019, https://www.altair.com/flux/

Gambhir, R. and Jha, A. K. (2013). Brushless DC Motor : Construction and Applications, *The International Journal Of Engineering And Science*, vol. 2, no. 5, pp. 72–77.

Gieras, J. F. (2004). Analytical approach to cogging torque calculation of PM brushless motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(5), 1310-1316.

Gieras, J. F. (2009). *Permanent magnet motor technology: design and applications.* CRC press.

Guo, Q., Zhang, C., Li, L., Zhang, J., & Wang, M. (2016a). Maximum efficiency per torque control of permanent-magnet synchronous machines. *Applied Sciences*, 6(12), 425.

Guo, Q., Zhang, C., Li, L., Zhang, J., Liu, J., & Wang, T. (2016b). Efficiency optimization control of permanent-magnet synchronous machines for electric vehicle traction systems. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (pp. 1-5).

Gülcü, A., (2006). *Yapay Zeka Tekniklerinden Genetik Algoritma ve Tabu Arama Yöntemlerinin Eğitim Kurumlarının Haftalık Ders Programlarının Hazırlanmasında Kullanımı* (Yüksek Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bil. Enstitüsü, İstanbul.

Güler, F. (2013). *Halbach Dizilimlerinin Fırçasız Doğru Akım Motoruna Uygulanması* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bil. Enstitüsü, İstanbul.

Gündoğdu, T. (2012). *Development Of Salient-Pole Synchronous Machines By Using Fractional Slot Concentrated Winding Technique & Additional Permanent Magnets* (Master's Thesis). Istanbul Technical Universıty, Graduate School of Science Engineering and Technology, İstanbul.

Hanselman, D. C. (2003). *Brushless permanent magnet motor design*. 2nd Edition, The Writers' Collective.

Hargreaves, P. A., Mecrow, B. C., & Hall, R. (2012). Calculation of iron loss in electrical generators using finite-element analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(5), 1460-1466.

Heikkila, T. (2002). *Permanent Magnet Synchronous Motor For Industrial Inverter Applications, Analysis And Design* (PhD thesis). Lappeenranta University of Technology, Graduate School of Electrical Engineering, Lappeenranta.

Hemati, N., Leu, M.C. (1992). A Complete Model Characterization of Brushless DC Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28, 1, pp. 172-180.

Hemmati, S., ShokriKojoori, S., Ghobadi, R., & Ghiasi, M. I. (2013). A practical approach to cogging torque reduction in a permanent magnet synchronous motor using non-dominated sorting genetic algorithm. *IEEE 4th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)* (pp. 88-92).

Hitachi, (2014). Outer Rotor Permanent Magnet Rotary Electric Machine, And Elevator Device Using The Same, *Japan Patent No. JP2013236542 A.*

Hirzel, S., Fleiter, T. & Rosende, D. (2010). Elevators and escalators in Germany from an energy perspective. Fraunhofer ISI. Erişim: 10 Ağustos 2019, http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-1331371.pdf

Hong, D. K., Woo, B. C., Jeong, Y. H., Koo, D. H., & Ahn, C. W. (2013). Development of an ultra high speed permanent magnet synchronous motor. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, *14*(3), 493-499.

Hung, V. X. (2012). *Modeling of Exterior Rotor Permanent Magnet Machines with Concentrated Windings* (PhD thesis). Delft University of Technology, Power Electronics and Electric Machines Programme, Delft.

Hyundai Elevator, (2005). Stator Structure Of Thin Winch For Elevator, Comprising Plural Core Pin Combining Bodies And Connection Plates Divided Into Plural Numbers, *Korea Patent No. KR20040110131 A.*

Ilka, R., & Alinejad-Beromi, Y. (2015). Geometry optimization of five-phase permanent magnet synchronous motors using Bees algorithm. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 11(4), 345-353.

Isovac, (2018). Electrical Steel, isovac 530-50A. Erişim: 29 Ekim 2019, https://www.voestalpine.com/division_stahl/content/download/32777/347273/file/DB_isovac_530-50A_E_280715.pdf

Islam, R., Husain, I., Fardoun, A., & McLaughlin, K. (2007). Permanent magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction. *IEEE Industry Applications Annual Meeting* (pp. 1552-1559).

İmrak, C. E. ve Gerdemeli, İ. (2000). *Asansörler ve Yürüyen Merdivenler*. Birsen Yayınevi, İstanbul.

Jupa Asansör, (2019). Dişlisiz asansör makinaları. Erişim: 13 Eylül 2019, http://www.jupa.com.tr/

Jahns, T. M., & Soong, W. L. (1996). Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives-a review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 43(2), 321-330.

JardineSchindler, (2015). Schindler 3300 AP elevator [Video]. Erişim: 9 Temmuz 2019, https://www.youtube.com/watch?v=f5IlBR_YATs.

Jeff Holmes, (2018). What is meant when an elevator has a roping ratio of 2:1? What other possible ratios exist?. Erişim: 9 Temmuz 2019, https://www.quora.com/What-is-meant-when-an-elevator-has-a-roping-ratio-of-2-1-What-other-possible-ratios-exist.

Jordaan, E. A. B. (2014). *Intelligent Elevator Control Based On Adaptive Learning And Optimisation* (Master's Thesis). University of Stellenbosch, Department of Electrical and Electronic Engineering, Stellenbosch.

Kan, A. (2011). Alüminyum alaşımlı asansör tahrik makinesi ve motor gövdesi, *Türk Patent No. 2011/05511.*

Kaya, M. (2006). *CE Kapsamında Asansörlerin İncelenmesi Ve Hesapları* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Karaboğa, D., (2005). An Idea Based On Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. (Technical Report TR06), Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department.

Karaboğa, D. & Baştürk, B. (2007). A powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm. *Journal of Global Optimization*, Volume:39, Issue:3, pp:459-171, ISSN:0925-5001, doi: 10.1007/s10898-007-9149-x.

Karaboğa, D., & Akay, B. (2007). Artificial bee colony (ABC) algorithm on training artificial neural networks. *IEEE 15th Signal Processing and Communications Applications, SIU 2007* (pp. 1-4).

Karaboğa, D. (2014). *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*. Nobel Yayıncılık, İstanbul.

Karnavas, Y. L., Chasiotis, I. D., & Amoutzidis, S. K. (2015). Design Considerations and Analysis of In-Wheel Permanent Magnet Synchronous Motors for Electric Vehicle Applications using FEM. *17th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering.*

Karnavas, Y. L., Chasiotis, I. D., Korkas, C. D., & Amoutzidis, S. K. (2017). Modelling and multiobjective optimization analysis of a permanent magnet synchronous motor design. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 30(6), e2232.

Kim, S. A., Choi, G. D., Lee, J., & Cho, Y. H. (2016). Optimal rotor shape design of 3-step skew spoke type BLAC motor to reducing cogging torque. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 51(s1), S135-S145.

Kocaman, M. (2012). *Product Design Assembly Application, Traffic Design And Simulation On Double Deck Elevator Systems* (Master Thesis). Istanbul Technical Universıty, Graduate School Of Science Engineering And Technology, Istanbul.

Kuphaldt, T. R. (2007). *Lessons In Electric Circuits*. Volume II–AC, pp. 410.

Küçükçalık, M. M. (2016). Asansörlerde Enerji Sınıflandırılması ve Verimliliği Artırmak İçin Alınabilecek Tedbirler, *Asansör Sempozyumu*, İzmir.

Latif, R. (2015). Makine Dairesiz Asansörde Dişlisiz Tahrik Motorunun Kuyu İçine Montaj Tipi, *Türk Patent No. 2015/03607.*

Leroy Somer, (2005). Electrical machine e.g. synchronous motor, for electrical vehicle, has stator with teeth, where each tooth supports individual coil, and rotors with magnets that have same polarity sides arranged with respect to common polar unit, *French Patent No. FR2852162A1.*

Leroy Somer, (2009). Electric turning machine e.g. motor, for elevator, has stator placed inside of another stator, and rotor arranged between stators, where rotor includes permanent magnets arranged circumferentially between polar parts, *French Patent No. FR2915033 A1.*

Leroy Somer, (2017). Gearless for elevators-Z range. Erişim: 14 Aralık 2017, www.emersonindustrial.com/en-EN/leroy-somer-motors-drives/downloads/Pages/catalogues.aspx.

Li, Y., Xing, J., Wang, T., & Lu, Y. (2008). Programmable design of magnet shape for permanent-magnet synchronous motors with sinusoidal back EMF waveforms. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(9), 2163-2167.

Libert, F. (2004). *Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-Speed Direct-Driven Mixer* (Undergraduate Thesis). KTH Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering-Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm.

Lin, D., Ho, S. L., & Fu, W. N. (2009). Analytical prediction of cogging torque in surface-mounted per. mag. motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(9), 3296-3302.

Lipo, T. A. (2017). *Introduction to AC Machine Design*. IEEE Press, John Wiley & Sons.

Lisa, M., Taddei, M., Zanon, E. (2008). *The Books of Secrets - Ibn Khalaf Al-Muradi*, Yayıncı: Leonardo3, ISBN-10: 8860480132.

Liu, G., Shao, M., Zhao, W., Ji, J., Chen, Q., & Feng, Q. (2015). Modeling and analysis of halbach magnetized permanent-magnets machine by using lumped parameter magnetic circuit method. *Progress In Electromagnetics Research*, 41, 177-188.

Liu, W., Liu, L., Chung, I. Y., & Cartes, D. A. (2011). Real-time particle swarm optimization based parameter identification applied to permanent magnet synchronous machine. *Applied Soft Computing*, 11(2), 2556-2564.

Lu, K., Rasmussen, P. O., & Ritchie, E. (2006). An analytical equation for cogging torque calculation in permanent magnet motors. *Proceedings of the 17th International Conference on Electrical Machines,* Chania, Crete, Greece.

Martinez, D. (2012). *Design of a Permanent-Magnet Synchronous Machine with Non-Overlapping Concentrated Windings* (Master's Thesis). KTH Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering-Electrical Energy Conversion, Stockholm.

Matlab Simulink, (2019). Simulation and Model-Based Design. Erişim: 10 Mart 2019, https://www.mathworks.com/products/simulink.html

Matweb, (2019). AISI 1010 Steel, hot rolled bar, 19-32 mm (0.75-1.25 in) round or thickness. Erişim: 22 Mayıs 2019, http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=7573afc5e06c4a518c01efba4690182c

Mayr Roba-twinstop, (2015). The doubled safety brakes for elevator drives. Erişim: 11 Mayıs 2019, https://www.mayr.com/synchronisation/documentations/p_q8012_v00_en_ 09_10_2015.pdf

Meeker, D. (2011). FEMM-Finite Element Method Magnetics. Erişim: 6 Haziran 2019, http://www.femm.info/wiki/HomePage

Meier, S. (2002). *Theoretical design of surface-mounted permanent magnet motors with field-weakening capability* (Master's Thesis). KTH Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering-Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm.

Meier, F. (2008). *Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications* (PhD Thesis). KTH Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering-Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm.

Mitsubishi Electric, (1990). Elevator hoist apparatus with an outer rotor motor, *U.S. Patent No.US4960186 A.*

MMC Magnetics, (2017). Typical Magnetic Properties of Sintered NdFeB Magnets. Erişim: 13 Ocak 2018, www.mmcmagnetics.com/ourproducts/main_NdFeB.htm

Moayed-J. H., Rahideh, A., & Mardaneh, M. (2016). 2-D analytical model for external rotor brushless PM machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(3), 1100-1109.

Montanari Giulio, (2014). PENTA 830: concentrate of versatility & extremely compact gear, Erişim: 9 Temuz 2019, https://www.montanarigiulio.com/en/azienda/

MotorSolve, (2017). Brushless DC and PMAC Motor Design Software. Erişim: 2 Ağustos 2019, https://www.mentor.com/products/mechanical/motorsolve /bldc/

Murphy, J. (2012). What's the Difference Between AC Induction, Permanent Magnet, and Servomotor Technologies?. Erişim: 11 Haziran 2019, https://www.machinedesign.com/motors-drives/article/21831709/whats-the-difference-between-ac-induction-permanent-magnet-and-servomotor-technologies

Mutluer, M. (2013). *Yapay Zekâ Tekniklerini Kullanarak Yüksek Verimli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı* (Doktora Tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Mutluer, M. & Bilgin, O. (2016). An intelligent design optimization of a permanent magnet synchronous motor by articial bee colony algorithm. *Turkish Journal of Elec Eng & Comp Science*, 24: pp:1826-1837.

Mutluer, M. (2017). Design of external rotor permanent magnet synchronous motor based on genetic algorithm and differential evolution algorithm. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 5(4), 242-246.

Niessen, F. (2013). Winding Scheme Calculator. Erişim: 31 Ekim 2019, http://www.bavaria-direct.co.za/scheme/calculator/

Ningbo Huaxia, (2011). Motor rotor of permanent-magnet synchronous traction machine, *China Patent No. CN201742191 U.*

Ningbo Xinda Elevator, (2011). Elevator tractor, *Europe Patent No. EP 1642858 B1.*

Ningbo Xinda Elevator, (2017). Gearless Traction Machine, Erişim: 14 Aralık 2017, www.xinda-elevator.com/gearless-traction-machine/.

Ocak, C., Tarimer, I., Dalcali, A., & Uygun, D. (2016). Investigation effects of narrowing rotor pole embrace to efficiency and cogging torque at PM BLDC motor. *TEM Journal*, 5(1), 25.

Otis-Gen2, (2019). Gen2® modernization. Erişim: 9 Temmuz 2019, https://www.otis.com/en/us/modernization/gen2-modernization/.

Otis Elevator, (2015). Elevator machine with external rotor and motor within traction sheave, *China Patent No. CN102471028 A.*

Otis, (2016). SkyMotion™ 800 Machine. Erişim: 12 Temmuz 2019, https://files.otis.com/otis/en/us/contentimages/SkyMotion%20800%20Machine.pdf.

Ong, H. L. and Huang, H. C., (1989). Asymptotic expected performance of some TSP heuristics. *European Journal of Operational Research*, 43: 231–238.

Onur, Y. A. (2006). *Asansör kabin çerçevelerinin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi ve gerilme analizi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ouyang, W., Zarko, D., & Lipo, T. A. (2006). Permanent magnet machine design practice and optimization, *IEEE 41st IAS Annual Meeting of the Industry Applications Conference* (Vol. 4, pp. 1905-1911).

Özel, C. (2011). *Asansör Ve Taşıyıcı Elemanlarının Değişik Dinamik Çalışma Koşullarında Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Simülasyonları* (Yüksek Lisans Tezi). Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Özoğlu, Y. (2017). New magnet shape for reducing torque ripple in an outer-rotor permanent-magnet machine. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25(5), 4381-4397.

Özsağlam, M. Y. (2009). *Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritmasının Gezgin Satıcı Problemine Uygulanması ve Performansının İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Öztürk, N., Dalcalı, A., Celik, E., & Sakar, S. (2017). Cogging torque reduction by optimal design of PM synchronous generator for wind turbines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28), 17593-17600.

Parasiliti, F., Villani, M., Lucidi, S., & Rinaldi, F. (2012). Finite-element-based multiobjective design optimization procedure of interior permanent magnet synchronous motors for wide constant-power region operation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(6), 2503-2514.

Parasiliti, F., Villani, M., & Castello, M. (2014). PM Brushless DC Motor with exterior rotor for high efficiency household appliances. *IEEE International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 623-628).

Puri, V., Chauhan, Y. K., & Singh, N. (2017). A comparative design study and analysis of inner and outer rotor permanent magnet synchronous machine for power generation in vertical axis wind turbine using GSA and GSA-PSO. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 23, 136-148.

Putek, P. A. (2016). Mitigation of the cogging torque and loss minimization in a permanent magnet machine using shape and topology optimization. *Engineering Computations*, 33(3), 831-854.

Pyrhonen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova, V. (2013). *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons.

Quanser, (2019). Q8-USB Data Acquisition Device, Erişim: 11 Ağustos 2019, https://www.quanser.com/products/q8-usb-data-acquisition-device/

Rahman, M. (1987). Analytical models for exterior-type permanent magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 23(5), 3625-3627.

Reichert, T., Nussbaumer, T., & Kolar, J. W. (2009). Torque scaling laws for interior and exterior rotor permanent magnet machines. *IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG)*.

Rüger, F., Eberhardt, H.D., Hofmann, W. & Milthaler, K. (2014). Energy efficient electrical drives with permanent magnets synchronous external rotor motors for elevator applications. Erişim: 25 Ağustos 2019, https://www.lift-report.de/index.php/en/42-archive-2014-issue-3/58-energy-efficient-electrical-drives-with-permanent

Saim, B. (2016). Sezgisel Optimizasyon Algoritmaları (Heuristic algorithms). Erişim: 10 Haziran 2018, https://www.bilalsaim.com/sezgisel-optimizasyon-algoritmalari-heuristic-algorithms-h1632

Sag Motor, (2016). Permanent Magnets Synchronous (PMS) Gearless Tracction Machine Catalogue. Erişim: 9 Temmuz 2019, http://sagmotor.com/en/catalogo/.

Sağ, T. (2015). *Sürü Zekâsı Kullanarak Renkli Görüntü Segmentasyon Tekniklerinin Geliştirilmesi* (Doktora Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Salminen, P. (2004). *Fractional Slot Permanent Magnet Synchronous Motors For Low Speed Applications* (PhD Thesis). Lappeenranta University of Technology, Department of Electrical Engineering, Lappeenranta.

Sargazi, M., Esmaili, M., Jafarboland, M., & Khajavi, M. (2014). Effect of pole embrace on the cogging torque and unbalanced magnetic forces of BLDC motors. *IEEE 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)* (pp. 826-830).

Shear Strength, (2007). Strength of a material or component against the type of yield or structural failure. Erişim: 10 Aralık 2018, https://en.wikipedia.org/wiki/Shear_strength.

Shenyang Bluelight, (2014). Split combined stator for outer-rotor permanent-magnet synchronous traction machine, *China Patent No. CN203645513 U.*

Siikonen, M. L. (1997). *Planning and Control Models for Elevators in High-Rise Buildings*, Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory, Research Reports.

Solidworks Simulation, (2018). Structural analysis tool that use Finite Element Analysis. Erişim: 11 Mayıs 2018, https://www.solidworks.com/product/solidworks-simulation

Sooriyakumar, G., Perryman, R., & Dodds, S. J. (2010). Design optimisation for permanent magnet synchronous motors using genetic algorithm. *IEEE 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010* (pp. 1-6).

Soyaslan, M., Avşar, Y., Fenercioğlu, A. & Eldoğan, O. (2019). Cogging Torque Reduction in External Rotor PM Synchronous Motors by Optimum Pole Embrace. *IEEE 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, Ankara.

Stening, A. (2006). *Design and optimization of a surface-mounted permanent magnet synchronous motor for a high cycle industrial cutter* (Master's Thesis). KTH Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering- Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm.

Strous, T. D. (2010). *Design of a permanent magnet radial flux concentrated coil generator for a range extender application* (Master's Thesis). Delft University of Technology, Department of Electrical Sustainable Energy, Delft.

Swiss Traction Ag, (2005). Gearless, compact drive system comprising an external rotor, *PCT Patent No: WO200505410 8A1.*

Swiss Traction, (2016). Swiss Traction Germany GmbH. Erişim: 14 Aralık 2017, www.swisstraction.de/english/home.html

Şahin, İ. (2010). *Measurement Of Brushless DC Motor Characteristics and Parameters and Brushless DC Motor Design* (Master's Thesis). Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Ankara.

Tanç, G. (2014). *Elektrikli Bisikletler İçin Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarımı Ve Üretimi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Tarımer, İ. & Ocak, C. (2009). Performance comparision of internal and external rotor structured wind generators mounted from same permanent magnets on same geometry. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 92(4), 65-70.

Teknoyatırım Alanları, (2018). KOBİ Teknoyatırım Destek Programı Teknoloji Alanları Tablosu. Erişim: 11 Temmuz 2019, https://www.kosgeb.gov.tr/Content/Upload/Dosya/kobi-teknoyatirim/Teknoloji_Alanlar %C4%B1_Tablosu.pdf

The Teagle Elevator, (2005). The earliest known power-driven passenger hoist controlled from the car line engraving American 19th Century. Erişim: 8 Temmuz 2019, https://www.newegg.com/p/2NM-0084-2J1M2.

Toshiba, (2011). Toshiba – Tosbec Power Products – Application Guideline #5: Temperature Rise - Insulation Life – Tips. Erişim: 14 Aralık 2018, http://www.landbelectric.com/download-document/71-motor-temperature-rise.html

Topaloğlu, İ., & Gürdal, O. (2010). Elektromanyetik Tasarım Programı Kullanılarak Elektrik Makinelerinin Tasarımında Boyut Optimizasyonu İçin Geliştirilmiş İkinci Dereceden Hassasiyet Analizi Temelli Nümerik Bir Yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(2).

Tong W. (2014). *Mechanical Design of Electric Motors*. CRC Press, Radford, Virginia.

Traction Elevators, (2018). Erişim: 9 Temmuz 2019, https://elevation.fandom.com/wiki/Traction_elevators#cite_note-1.

TS1812, 1988. Asansörlerin hesap, tasarım ve yapım kuralları (Elektrikle çalışan insan ve yük asansörleri için). Erişim: 8 Haziran 2018, https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/StandardAra.aspx

Wang, J. H., Tan, F. W., & Jin, R. L. (2005). Research on low-speed gearless permanent magnet synchronous motor for elevator drive. *IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems* (Vol. 1, pp. 454-459).

Wang, H. T., Fang, S. H., Guo, B. C., & Lin, H. Y. (2015). A new Halbach arc permanent magnet synchronous motor with three-dimensions air gap used on large telescope. *IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)* (pp. 478-479).

Xuan, H. V., Lahaye, D., Polinder, H., & Ferreira, J. A. (2012). Influence of stator slotting on the performance of permanent-magnet machines with concentrated windings. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(2), 929-938.

Xue, Z., Li, H., Zhou, Y., Ren, N., & Wen, W. (2017). Analytical Prediction and Optimization of Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent Magnet Machines With Modified Particle Swarm Optimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(12), 9795-9805.

Yan, G. (2009). *Fırçasız Doğru Akım Motor Analizi ve Sürücü Devre Tasarımı* (Yüksek Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yedamale, P. (2003). *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. Microchip Technology Application Note-AN885, 1-20.

Yetiş, H. (2017). *Dişlisiz asansör sistemleri için ferrite tabanlı gömülü mıknatıslı senkron makine tasarımı* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yetiş, H., Meşe, E., & Biyikli, M. (2018). Design and Comparison of Ferrite Based IPM and NdFeB Based SPM Synchronous Motors for Gearless Elevator Systems. *IEEE XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 635-641).

Yıldız, T. (2009). *Fırçasız doğru akım motorlarının modellenmesi ve kontrolü* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Yokoi, Y., & Higuchi, T. (2014). Selective elimination of EMF harmonics with stepped skewing for ripple torque reduction in surface-mounted permanent magnet motors. *IEEJ Journal of Industry Applications*, 3(6), 463-469.

Yolaçan, E. (2012). *Küçük Güçlü Yüzey Mıknatıslı Ve Dahili Mıknatıslı Senkron Motorlara Vektör Kontrol Yönteminin Deneysel Olarak Uygulanması* (Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

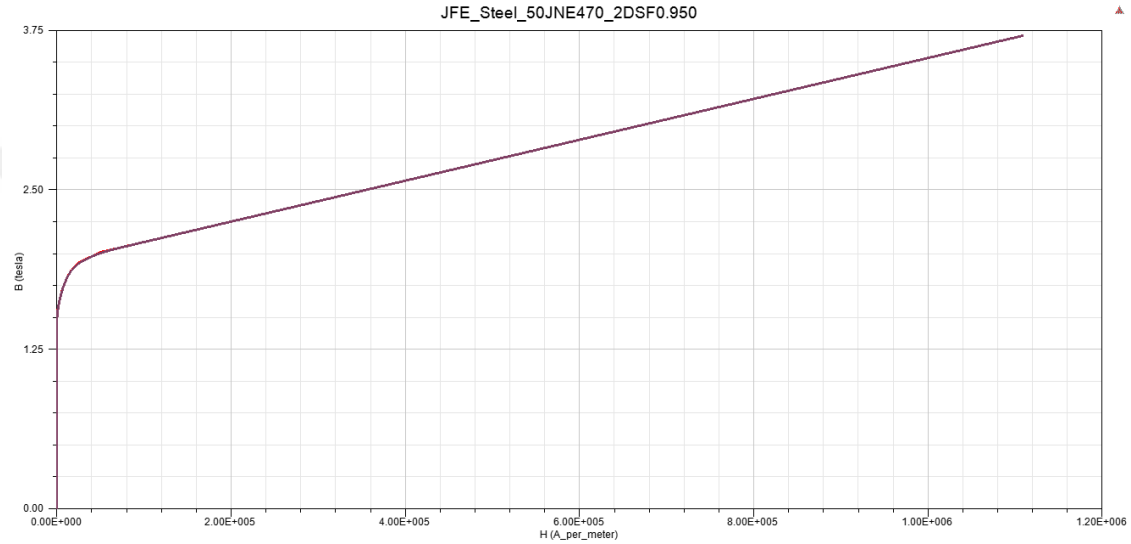
Ziehl Abegg AG, (2004). Outer rotor motor, *Europe Patent No. EP1278288 A2.*

Ziehl-Abegg-Zasyn, (2017). Elevator motors, ZAsyn. Erişim Adresi (14 Aralık 2017): www.ziehl-abegg.com/de/en/product-range/drive-technology/elevator-motors/zasyn/.

Zöhra, B. (2019). *Şebeke Kalkışlı Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Prototip Üretimi* (Doktora Tezi). Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.

EKLER

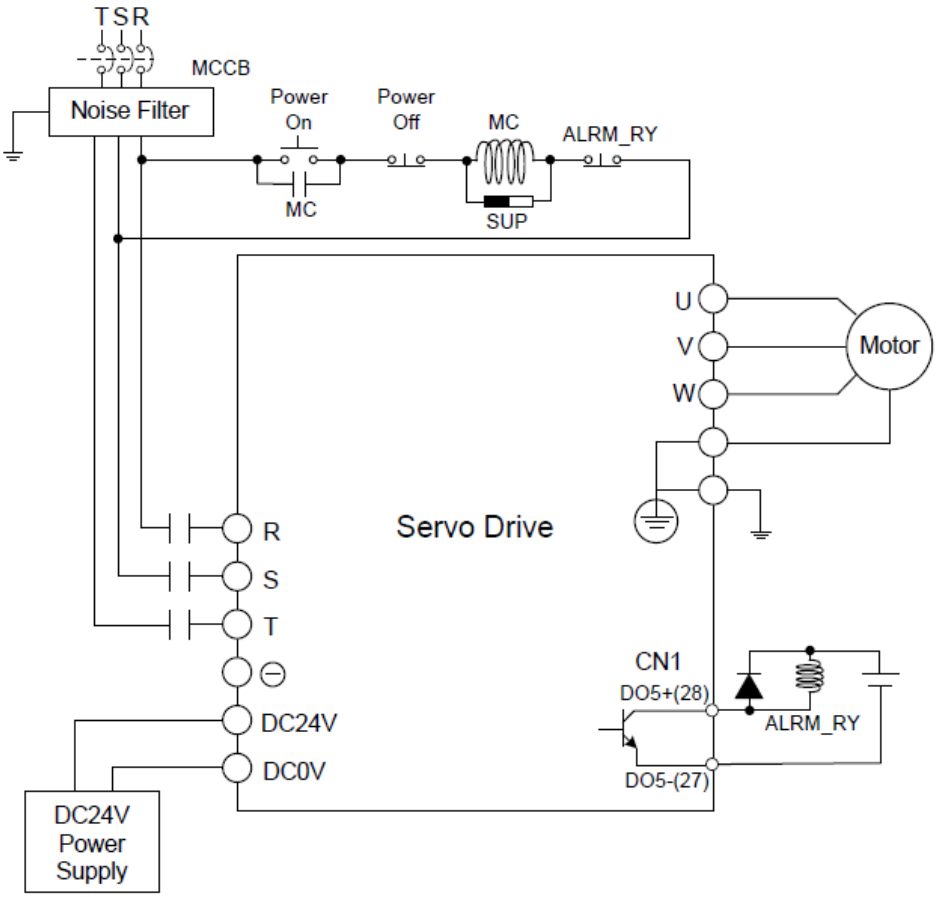
Ek-1: JFE Steel 50JNE470 B-H eğrisi

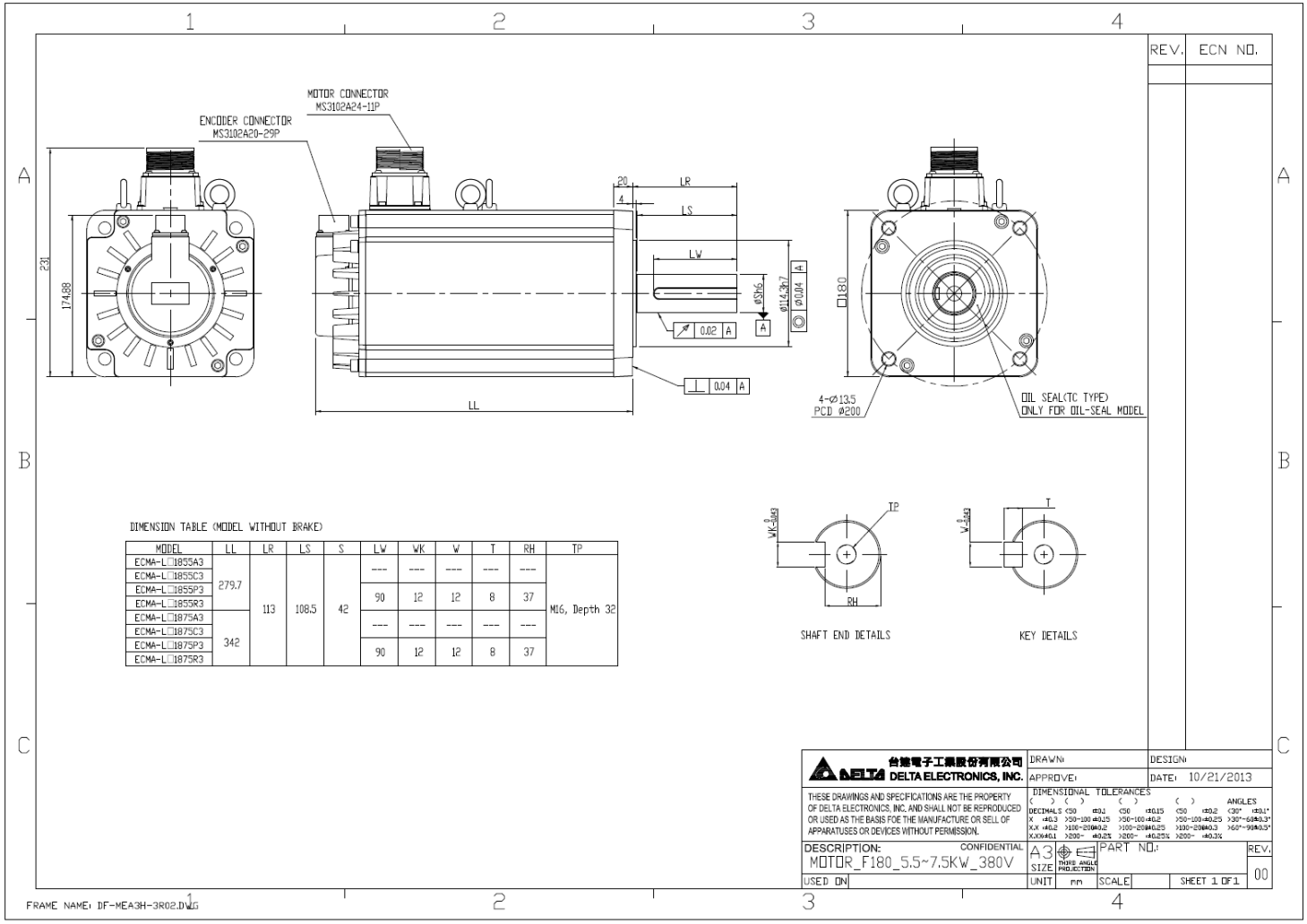


Ek-2: Yükleme Motoru ve Sürücüsü



■ Wiring Method of Three-phase Power Supply (suitable for all series of 400V servo drive)



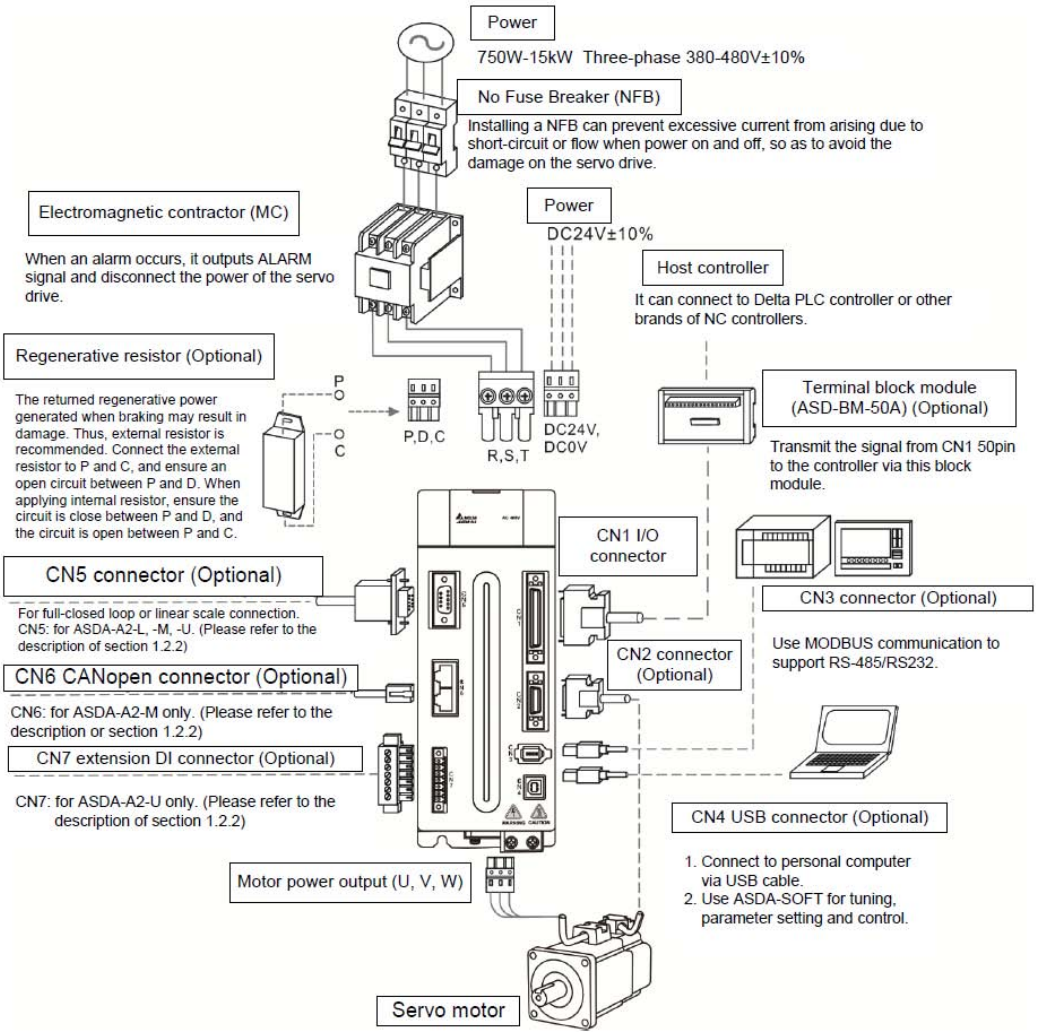


DIMENSION TABLE (MODEL WITHOUT BRAKE)

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□1855P3					90	12	12	8	37	
ECMA-L□1855R3										
ECMA-L□1875A3	342				---	---	---	---	---	
ECMA-L□1875C3										
ECMA-L□1875P3					90	12	12	8	37	
ECMA-L□1875R3										

Connections - 400V series

Connecting to Peripheral Devices



Ek-3: Redüktör

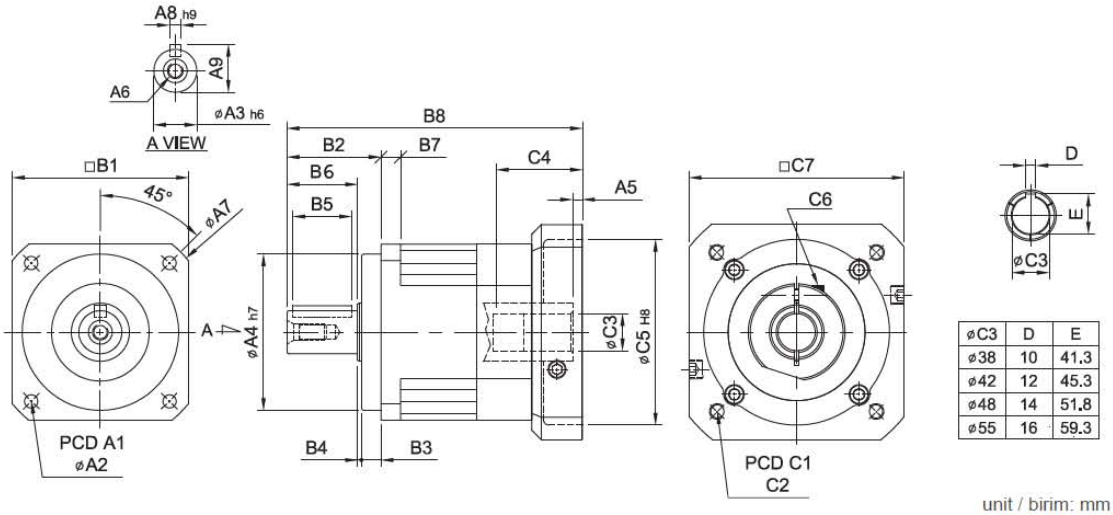
SERVOBOX



MODEL : SB

1-Stage / Kademe

RATIO / ÇEVRİM : 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10



øC3	D	E
ø38	10	41.3
ø42	12	45.3
ø48	14	51.8
ø55	16	59.3

unit / birim: mm

	Model / Code	44	62	90	120	142	180	220
A	A1	50	70	100	130	165	215	250
	A2	4.5	5.5	6.8	9	11	13	17
	A3	13	16	22	32	40	55	75
	A4	35	50	80	110	130	160	180
	A5	5	6	9、23.5	10、20	10	11.5、13.5	12.5、14.5
	A6	M4 x P0.7	M5 x P0.8	M8 x P1.25	M10 x P1.5	M12 x P1.75	M14 x P2.0	M16 x P2.0
	A7	58	80	116	148	186	238	288
	A8	5	5	6	10	12	16	20
	A9	15	18	24.5	35	43	59	79.5
B	B1	44	62	90	120	142	180	220
	B2	26	36	48	65	92	106	139
	B3	5	7	10	12	15	20	30
	B4	1	1	2	3	3	4	5
	B5	15	20	30	40	65	70	90
	B6	20	28	36	50	74	82	104
	B7	5	8	10	12	15	16	20
	B8	95	115、123	164.5、179	205、215	260.5	323.5	367.5
C	C1	46、60、63	70、75、90	90、100、115、145	115、145、165	145、165、200	200、215、265	200、265、300
	C2	M3、M4、M5	M4、M5、M6	M5、M6、M8	M6、M8、M10	M8、M10、M12	M10、M12、M16	M12、M16
	C3	8、9、11	14、19	19、22、24	24、28、32	28、32、35	38、42、48、55	42、48、55
	C4	26	33.5、41.5	59、73.5	67、77	84.5	114.5、116.5	117.5、119.5
	C5	30、40、50	50、60、70	70、80、95、110	95、110、130	110、130、180	114.3、180、230	114.3、230、250
	C6	M4 x P0.7	M5 x P0.8	M6 x P1.0	M8 x P1.25	M10 x P1.5	M10 x P1.5	M10 x P1.5
	C7	46、55	64、70、80	92、110、130	122、130、150	146、150、190	182、200、250	222、250、265

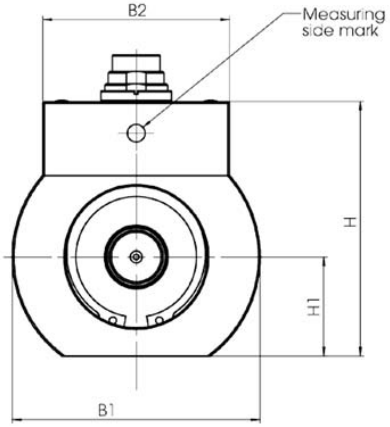
Model No.		Unit/Birim	Ratio Çevrim	44	62	90	120	142	180	220
Nominal output torque / Nominal Çıkış Torku	T_{2N}	Nm	3	19	59	165	335	625	1,206	2,030
			4	16	51	146	300	555	1,069	1,804
			5	16	48	160	333	618	1,189	2,010
			6	15	45	151	311	583	1,118	1,911
			7	15	45	149	309	573	1,108	1,870
			8	14	43	143	298	553	1,070	1,824
			9	13	44	145	278	516	993	1,694
			10	14	43	141	294	549	1,059	1,779
Max. Acceleration Torque / Max.İvmelenme Torku	T_{2B}	Nm	3 ~ 10	1.8 Times of Rated Output Torque / 1,8 x Nominal Çıkış Torku						
Max. Output Torque / Max.Çıkış Torku	T_{2NOT}	Nm	3 ~ 10	3 Times of Rated Output Torque / 3 x Nominal Çıkış Torku						
Rated Input Speed / Nominal Giriş Devri	n_{1N}	rpm	3 ~ 10	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	2,000
Max. Input Speed / Max.Giriş Devri	n_{1B}	rpm	3 ~ 10	6,000	6,000	6,000	5,000	5,000	4,000	3,000
Backlash Ps / Min.Boşluk Oranı		arcmin	3 ~ 10	-	-	≦ 1	≦ 1	≦ 1	≦ 1	≦ 1
Backlash P0 / Düşük Boşluk Oranı		arcmin	3 ~ 10	≦ 3	≦ 3	≦ 3	≦ 3	≦ 3	≦ 3	≦ 3
Backlash P1 / Azaltılmış Boşluk Oranı		arcmin	3 ~ 10	≦ 5	≦ 5	≦ 5	≦ 5	≦ 5	≦ 5	≦ 5
Backlash P2 / Standart Boşluk Oranı		arcmin	3 ~ 10	≦ 7	≦ 7	≦ 7	≦ 7	≦ 7	≦ 7	≦ 7
Torsional Rigidity / Burulma Direnci		Nm/arcmin	3 ~ 10	3	6	14	27	60	140	240
Max. Radial Force / Max. Radyal Yük	F_{2rB}	N	3 ~ 10	380	1,180	3,200	6,800	9,300	15,600	51,000
Max. Axial Force / Max. Aksiyel Yük	F_{2aB}	N	3 ~ 10	190	590	1,600	3,400	4,650	7,800	25,500
Service Life / Hizmet Ömrü	L_H	hr	3 ~ 10	S5 Döngüsel Çalışma: >30,000 (S1 Sürekli Çalışma: >15,000 saat) S5 Cycle Operation: >30,000 (S1 Continuous Operation: >15,000 hrs)						
Efficiency / Verim	η	%	3 ~ 10	≧ 97						
Operating Temperature / Çalışma Sıcaklığı		℃	3 ~ 10	– 25° C ~ + 90° C						
Lubrication / Yağlama			3 ~ 10	Synthetic Grease / Sentetik Gres						
Protection Class / Koruma Sınıfı			3 ~ 10	IP65						
Mounting Position / Montaj Pozisyonu			3 ~ 10	Any / Her Yönde						
Noise Level / Ses Seviyesi		dB	3 ~ 10	≦ 56	≦ 58	≦ 60	≦ 63	≦ 65	≦ 67	≦ 70
Weight / Ağırlık ±3%		Kg	3 ~ 10	0.6	1.28	3.6	8	14.3	28.3	42.5

■ Mass Moments of Inertia / Atalet Ağırlık Momenti ($kg.cm^2$)

Ratio / Çevrim	44	62	90	120	142	180	220
3	0.03	0.16	0.61	3.25	9.21	28.98	59.61
4	0.03	0.14	0.48	2.74	7.54	23.67	54.37
5	0.03	0.13	0.47	2.71	7.42	23.29	53.27
6	0.03	0.13	0.45	2.65	7.25	22.75	51.72
7	0.03	0.13	0.45	2.62	7.14	22.48	50.97
8	0.03	0.13	0.44	2.58	7.07	22.59	50.84
9	0.03	0.13	0.44	2.57	7.04	22.53	50.63
10	0.03	0.13	0.44	2.57	7.03	22.51	50.56

Ek-4: Eth-Messtechnik DRBK-500 tipi tork sensörü





DRBK-500 tipi tork sensörün teknik bilgileri

Besleme Gerilimi:	11,5 to 30 V DC
Akım Tüketimi:	yaklaşık 200 mA
Yükselme zamanı 10-90 %:	1 ms
Limit frekansı –3 dB:	1 kHz
Çıkış gerilimi:	0 V - ± 5 V arasında
Dahili direnç:	100 Ω
Çıkış Akımı:	10 ± 8 mA maks. yükleme 500 Ω
Dalgalanma:	< 50 mVss
Doğrusalsızlık:	< 0,3 %
Histerezis:	< 0,3 %
Sıfır noktasında sapma:	≤ ± 100 mV / ± 200 µA
Maks. Ölçüm hatası:	0,5 % (tam skalanın)
Çalışma sıcaklığı:	0 - 60 °C
Isıya dayanıklı aralık:	5 - 45 °C
Sıcaklık hatası	
Sıfır nokta:	0,05 % / K
Duyarlılık:	0,02 % / K
Mekanik aşırı yükleme:	100 %
Dahili koruma:	IP 40 DIN 40050
Bağlantı:	12pin- konnektör

(Eth-Messtechnik, 2016)

Ek-5: Arkel Arcode Sürücü ve Özellikleri



ARCODE Özellikler / *Features*		
Motor Kontrolü / *Motor Control*	Senkron & Asenkron Makine	*Gearless & Geared Machine*
Giriş Gerilimi (L1,L2,L3) / *Power Input (L1,L2,L3)*	AC 3 Ph., 320-420V, 50/60 Hz AC 3 Ph., 200-240V, 50/60 Hz	
Modeller / *Models*	ARCODE 14, 17 , 26 , 35 , 50 , 75 A	
Hız / *Speed*	4 m/s'ye kadar	*Up to 4 m/s*
Grup Çalışma / *Group Operation*	8 asansöre kadar	*Up to 8 lifts*
Durak Sayısı / *Number of Floors*	64 durağa kadar	*Up to 64 floors*
Haberleşme Protokolü / *Communication Protocol*	CANbus	
Enkoder Opsiyonları / *Encoder Options*	5V TTL, 10-30V HTL, EnDat, SSI, SinCos, BISS	
Güvenlik Devresi Gerilimi / *Safety Circuit Voltage*	48 VAC - 230 VAC	

(Arkel Arcode, 2014)

Ek-6: Fenac FNC SC2048 enkoder ve özellikleri



Features

- **Compact robust motor integration design**
- **1Vpp / 1PPR accurate position information**
- **2048 PPR sin cosine accurate speed information**
- **Installation diameter 65mm**
- **1:10 taper shaft**
- **IP67 protection class**

Technical data - mechanical design

Dimensions (flange)	ø56 mm
Clamp mounting diameter	65 mm
Protection DIN EN 60529	IP 67
Operating speed	≤10000 rpm
Starting torque	≤0.03 Nm (IP 67)
Materials	Housing : Aluminium Flange : Aluminium Shaft : Stainless steel
Shaft specs	Taper shaft Ø 9.25 Taper 1:10
Operating temperature	-40...+110 °C
Storage temperature	-40 °C up to +120 °C
Weight approx.	250 g
Approval	CE

Technical data - electrical ratings	
Voltage supply	4.75VDC to 5.5VDC
Protection:	Output short circuit protection. Reverse polarity protection
Consumption w/o load	≤120 mA (5 VDC)
Interface, Output	Sine cosine / 1 Vpp
Resolution (steps/turn)	2048
Absolute accuracy	±0.17°
Absolute angle error	0.087°
Output frequency	500 kHz (max.)
Output circuit	1 Vpp incremental Sin/Cos differential driver

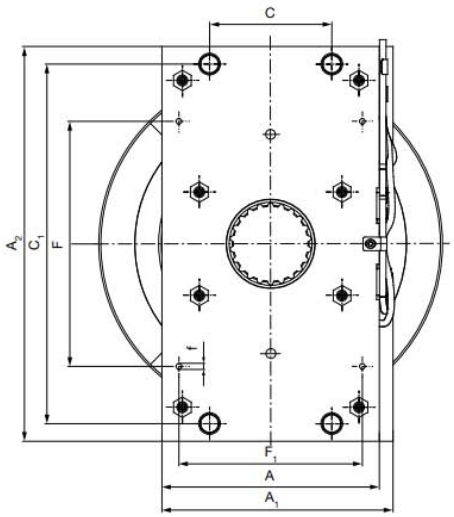
(Fenac, 2019).

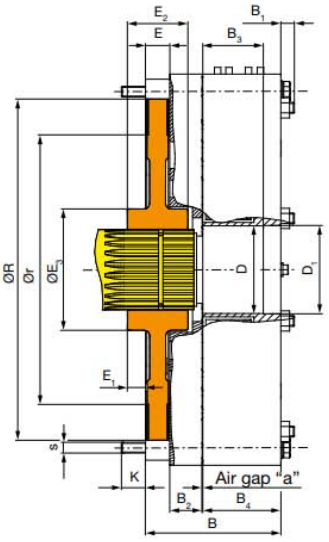
Ek-7: Mayr Roba-twinstop 250 motor freni ve özellikleri



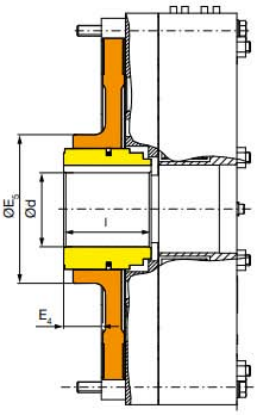








Design for splined motor shaft



Hub design

Dimensions			Size		
			200	250	350
Design [1]	splined motor shaft		60 x 2.5 x 22	65 x 3 x 20	65 x 3 x 20
			65 x 3 x 20	60 x 2.5 x 22	-
			90 x 3 x 28	90 x 3 x 28	90 x 3 x 28
	Hub	d [4]	56	56	56
		d_{max}	60	60	60
A			160	160	200
A_1			170	170	210
A_2			290	290	300
B			90.6	100.6	100.6
B_1			12	12	12
B_2			24.1	24.1	24.1
B_3			35	45	45
B_4			48	58	58
C			90	90	120
C_1			264	264	272
D			65	65	65
D_1			65.5	65.5	65.5
E			18	18	18
E_1			5	13.5	17
E_2			41	45	52
E_3			90	110	110
E_4			28	28	28
E_5			110	110	110
F			180	180	200
F_1			135	135	185
f			4 x M5 (8 deep)	4 x M5 (8 deep)	4 x M5 (8 deep)
K			18	18	17
l			65	65	65
r			180 / 200 [2]	200	208
R			235 / 253 [2]	253	273
s			4 x M8	4 x M8	4 x M10

Technical Data				Size		
				200	250	350
Nominal braking torque [3]	Type 8012.0_ _ _3	M_{nom}	[Nm]	2 x 200	2 x 250	2 x 350
Increased braking torque without overexcitation	Type 8012.1_ _ _3	M	[Nm]	-	2 x 280	2 x 410
reduced braking torque	Type 8012.2_ _ _3	M	[Nm]	2 x 160	2 x 230	2 x 300
		M	[Nm]	-	2 x 185	2 x 250
Electrical nominal power	Type 8012.0_ _ _3	P_{20}	[W]	2 x 63	2 x 79	2 x 82
Weight (without hub)			[kg]	23.7	26.8	34.6
Maximum speed		n_{max}	[rpm]	1000	1000	1000
Nominal air gap (Tolerance + 0,2/-0,05)		a	[mm]		0.45	

(Mayr Roba-twinstop, 2015)

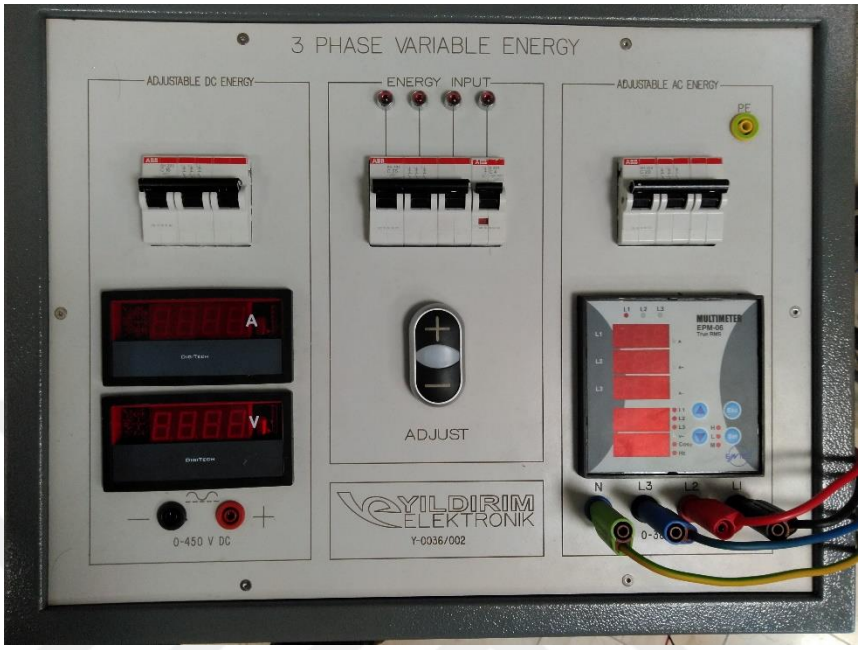
Ek-8: Kulkarni GS48 tipi kaplinler



Ek-9: Hewlett Packard 971A tipi avometre



Ek-10: Yıldırm Elektronik ayarlı güç kaynağı ve Entes güç analizörü

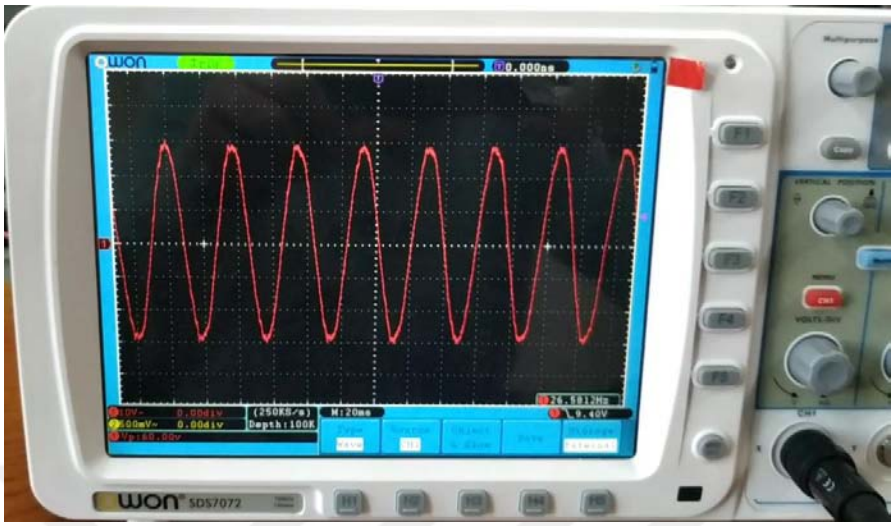


Ek-11: Quanser Q8-USB veri toplama kartı



(Quanser, 2019)

Ek-12: OWON SDS 7072 tipi osiloskop



Ek-13: ABC algoritması kodları

(ABC Algoritması, 2009)

```
%/* ABC Algoritması */
clear all
close all
clc
NP=50;
FoodNumber=NP/2;
limit=100;
maxCycle=250;
%/* spesifik değişkenler*/
objfun='test1';
D=9;
ub=[0.0035 0.0035 0.040 0.018 0.013  105  1.7 0.57 6.5];
lb=[0.0030 0.0030 0.033 0.014 0.010  100  1.6 0.55 4];
runtime=1;
GlobalMins=zeros(1,runtime);
for r=1:runtime
Range = repmat((ub-lb),[FoodNumber 1]);
Lower = repmat(lb, [FoodNumber 1]);
Foods = Lower + rand(FoodNumber,D) .* Range;
ObjVal=feval(objfun,Foods);
Fitness=calculateFitness(ObjVal);
trial=zeros(1,FoodNumber);
BestInd=find(ObjVal==min(ObjVal));
BestInd=BestInd(end);
GlobalMin=ObjVal(BestInd);
GlobalParams=Foods(BestInd,:);
iter=1;
while ((iter <= maxCycle)),
```

```
%%%İŞÇİ ARI SAFHASI%%%
    for i=1:(FoodNumber)
        Param2Change=fix(rand*D)+1;
        neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;
            while(neighbour==i)
                neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;
            end;
       sol=Foods(i,:);
       sol(Param2Change)=Foods(i,Param2Change)+(Foods(i,Param2Change)-
Foods(neighbour,Param2Change))*(rand-0.5)*2;
        ind=find(sol<lb);
        sol(ind)=lb(ind);
        ind=find(sol>ub);
        sol(ind)=ub(ind);
        ObjValSol=feval(objfun,sol);
        FitnessSol=calculateFitness(ObjValSol);
       if (FitnessSol>Fitness(i))
            Foods(i,:)=sol;
            Fitness(i)=FitnessSol;
            ObjVal(i)=ObjValSol;
            trial(i)=0;
        else
            trial(i)=trial(i)+1;
       end;

    end;

prob=(0.9.*Fitness./max(Fitness))+0.1;

%%% GÖZCÜ ARI SAFHASI%%%
i=1;
t=0;
while(t<FoodNumber)
    if(rand<prob(i))
        t=t+1;
        Param2Change=fix(rand*D)+1;
        neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;
            while(neighbour==i)
                neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;
            end;

       sol=Foods(i,:);
       sol(Param2Change)=Foods(i,Param2Change)+(Foods(i,Param2Change)-
Foods(neighbour,Param2Change))*(rand-0.5)*2;

        ind=find(sol<lb);
        sol(ind)=lb(ind);
        ind=find(sol>ub);
        sol(ind)=ub(ind);

        ObjValSol=feval(objfun,sol);
        FitnessSol=calculateFitness(ObjValSol);

       if (FitnessSol>Fitness(i))
            Foods(i,:)=sol;
            Fitness(i)=FitnessSol;
            ObjVal(i)=ObjValSol;
            trial(i)=0;
        else
```

```
            trial(i)=trial(i)+1;
        end;
    end;

    i=i+1;
    if (i==(FoodNumber)+1)
        i=1;
    end;
end;
          ind=find(ObjVal==min(ObjVal));
          ind=ind(end);
          if (ObjVal(ind)<GlobalMin)
          GlobalMin=ObjVal(ind);
          GlobalParams=Foods(ind,:);
          end;

%%%KAŞİF ARI SAFHASI%%%
ind=find(trial==max(trial));
ind=ind(end);
if (trial(ind)>limit)
    trial(ind)=0;
    sol=(ub-lb).*rand(1,D)+lb;
    ObjValSol=feval(objfun,sol);
    FitnessSol=calculateFitness(ObjValSol);
    Foods(ind,:)=sol;
    Fitness(ind)=FitnessSol;
    ObjVal(ind)=ObjValSol;
end;
fprintf('İter=%d ObjVal=%g\n',iter,GlobalMin);
iter=iter+1;
end
GlobalMins(r)=GlobalMin;
end;
save all

function ObjVal = test1(Chrom,Foods);
%%%DIŞTAN ROTORLU SMSM'NİN SABİT DEĞİŞKENLERİ%%%
P=4000; %anma çıkış gücü, W
p=20; %kutup sayısı
V=380; %faz-faz arası gerilimin RMS değeri, V
f=26.533; %çalışma frekansı, Hz
Wm=159.2; %anma hızı, rpm
Tr=240; %anma torku, Nm
Lp=0.15; %paket uzunluğu, m
Noluk=18; %oluk sayısı
Bs0=0.0065; %oluk açıklığı, m
Dro=0.242; %rotor dış çapı, m
Dri=0.222; %rotor iç çapı, m
Dsi=0.085; %stator iç çapı, m
Dso=0.210; %stator dış çapı, m
kyf=0.95; %saç yığılma faktörü
ksf=0.945; %sargı faktörü
q=Noluk/(p*3); %kutup faz başına düşen oluk sayısı, [oluk
sayısı/(kutup sayısı*faz sayısı)]
g=0.001; %hava aralığı kalınlığı, m
hm=0.005; %mıknatıs kalınlığı, m
Mo=1.256637*10^(-6); %boşluğun manyetik geçirgenliği
Mss=4000; %laminasyon saçlarının bağıl geçirgenliği
Mr=1.05; %mıknatısın bağıl manyetik geçirgenliği
```

```
Br=1.35; %artık mıknatıslanma değeri
Alka=0.78; %kutup aralığı (embrace)
Alm=0.245044; %mıknatıs adımı açısı, radyan, (14.04°)
Alk=0.314159; %kutup adımı açısı, radyan, (18°)
Sp=1; %oluk sayısı cinsinden bobin adımı
Lsu=0.025; %statordan taşan sargı sonu uzunluğunu, m
Loluk=1; %stator oluk adımı, oluk sayısı cinsinden
kyal=0.95; %oluklardaki izolasyon kağıdının hesaba katılması için
kullanılan katsayı
ntel=3; %Paralel tel sayısı
dsac=7780; %stator saçlarının yoğunluğu, kg/m^3
Rs1=0.001; % Oluk boyunduruk yarıçapı, m

Alang=(Alm*(Dso/2+g/2)+2*g)*Lp; %Hava aralığı kesit alanı, m^2
Alanm=Alm*(Dso/2+g+hm/2)*Lp; %mıknatıs kesit alanı, m^2
Rm=hm/(Mr*Mo*Alanm); %mıknatıs relüktansı, A.t/Wb
Rl=10*Rm; %sızıntı akı relüktansı
kc=(pi*Dso/Noluk)/((pi*Dso/Noluk)-Bs0^2/Bs0+5*g); %Carter katsayısı
g1=kc*g; %Carter katsayısı ile düzeltilmiş hava aralığı kalınlığı
Rg=g1/(Mo*Alang); %hava aralığı relüktansı, A.t/Wb

    Dim=size(Chrom,9);
   [Nind,Nvar] = size(Chrom);

 hs0 = Chrom (:,1:Nvar-8);
 hs1 = Chrom (:,2:Nvar-7);
 hs2 = Chrom (:,3:Nvar-6);
 hsb = Chrom (:,4:Nvar-5);
 Wsd = Chrom (:,5:Nvar-4);
 Nt  = Chrom (:,6:Nvar-3);
 Bsd = Chrom (:,7:Nvar-2);
 kdol= Chrom (:,8:Nvar-1);
 J   = Chrom (:,9:Nvar);

Rsd=((hs0+hs1+hs2+Rs1)./(Mss*Mo).*(Wsd*Lp))./Loluk; %Stator dişi
relüktansı
hs=hs0+hs1+hs2+Rs1; %toplam oluk yüksekliği
hsb=Dso./2-Dsi./2-hs; %stator boyunduruğunun kalınlığı
Rsb=(pi.*(Dsi+hsb)./p)./((Mss.*Mo).*(hsb.*Lp)); %stator boyunduruğu
relüktansı
Bm=((1+Rg./Rl)/(1+Rg./Rm)).*Br; %mıknatıs akı yoğunluğu
Bg=((Alanm./Alang)./(1+Rg./Rm)).*Br; %hava aralığı akı yoğunluğu
Akutup=(pi.*(Dso+2.*g).*Lp)./p; %kutup alanı, m^2
Bgort=(Alang./Akutup).*Bg; %hava aralığı ortalama akı yoğunluğu
Bgtepe=hm./(hm+g.*Mr).*Br; %hava aralığı akı yoğunluğu tepe değeri
Bsd=Bg.*((pi.*(Dsi./Noluk))./(Wsd)); %stator diş akı yoğunluğu
Bsb=(Bg.*Alang)./(2.*hsb.*Lp); %stator boyuduruğundaki akı yoğunluğu
bs1=(pi.*(Dso-2.*(hs0+hs1))./Noluk)-Wsd; %oluk üstü genişliği, m
Alanoluk=kyal*((hs2.*(bs1+bs2)./2)+((bs1-hs1).*hs1)+((bs2-Rs1).*Rs1));
%oluk alanı,A1+A2+A3, m^2
Ai=0.5.*Alanoluk.*kdol./Nt; %izolasyon dahil iletken kesit alanı, m^2
Ainet=Ai.*0.7966; %iletken kesitinin izolasyon hariç net alanı, m^2
(ntel sayısına göre 0.7966 çarpanı değişmektedir!)
Atel=Ai./ntel; %paralel tel sayısına göre bir telin kesit alanı, m^2
Dtel=sqrt((Atel./pi).*4)-0.0001; %iletkendeki bir telin çapı, m
(izolasyon kalınlığı çıkarılmıştır!)
Nbobin=Noluk./3; %oluk sayısı/faz sayısı
Li=2.*Nt.*(Lp+Lsu+((Sp./Noluk).*Dso.*pi)); %Bir bobindeki iletken tel
uzunluğu, m
```

```
Lis=((Nbobin.*Sp)./Noluk).*(Dso).*pi+2.*Nbobin.*Lsu; %fazların
birbiriyle seri bağlanma uzunluğu
Rs=(1.72.*(10^-8)).*(Nbobin.*Li+Lis)./Ainet; %toplam faz direnci, ohm
I=Tr./(2.12.*p.*Nt.*2.*Bgort.*Alang*ksf.*(1./kyal)); %bir fazın rms
değeri, A
J=I/Ainet*10.^6; %akım yoğunluğu
Pbakir=3.*I.^2.*Rs; %bakır kayıpları
Msd=Noluk.*hs.*Wsd.*Lp.*dsac; %stator dişlerinin toplam kütlesi, kg
Msb=((pi.*(Dsi./2+hsb).^2)-(pi.*(Dsi./2).^2)).*Lp.*dsac; %stator
boyunduruğunun toplam kütlesi, kg
kh=0.0406193; %histerisis kayıp katsayısı, yazılımdan çekildi
ke=0.0016211; %eddy kayıp katsayısı, yazılımdan çekildi
Pdemir=(kh.*f.*Bsd.^2+ke.*f^2.*Bsd.^2)*Msd+(kh.*f.*Bsb.^2+ke.*f^2.*Bsb
.^2).*Msb; %watt cinsinden demir kayıpları
Pdiger=P.*0.025; % diğer kayıplar ve mekanik kayıpların motorun toplam
çıkış gücünün %2,5'i kadar olduğu kabul edilmiştir.
Verim=P/(P+Pbakir+Pdemir+Pdiger); %Motorun verimi
ObjVal= -(P./(P+Pbakir+Pdemir+Pdiger)); %Motorun verimi

 end
```

Ek-14: Maksimum sargı doluluk oranının deneysel olarak belirlenmesi



Ek-15: AISI 1010 çeliğinin özellikleri

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.87 g/cc	0.284 lb/in³	Typical for steel

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	95	95	
Hardness, Knoop	113	113	Converted from Brinell
Hardness, Rockwell B	55	55	Converted from Brinell
Hardness, Vickers	98	98	Converted from Brinell
Tensile Strength, Ultimate	325 MPa	47100 psi	
Tensile Strength, Yield	180 MPa	26100 psi	
Elongation at Break	28 %	28 %	in 50 mm
Reduction of Area	50 %	50 %	
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi	Typical for steel
Bulk Modulus	160 GPa	23200 ksi	Typical for steel
Poissons Ratio	0.29	0.29	Typical For Steel
Machinability	55 %	55 %	Based on AISI 1212 steel. as 100% machinability. Group I bar, rod, and wire products machinability can be improved by cold drawing.
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi	Typical for steel

Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.0000143 ohm-cm	0.0000143 ohm-cm	condition unknown

(Matweb, 2019)

Ek-16: Üretilen Parçalar ve Montaj Resimleri



Ek-17: Kasnak, Emniyet Somunu ve Pulu





Ek-18: Karşılaştırma Motorunun Deneysel Sonuçları

Karşılaştırma motoruna ait farklı yük akımları için elde edilen deneysel sonuçlar (Ergene ve diğ., 2018)

Akım [A]	Moment [Nm]	Pçıkış [W]	Pgiriş [W]	Verim [%]	cos φ *
0,65	16	266,736	334,5	77,42	0,825
2,13	50	833,55	1128,9	73,84	0,85
2,8	65	1083,615	1484	73,02	0,85
3,7	90	1500,39	1961	76,5	0,85
4,5	114	1900,494	2385	79,68	0,85
6,266	150	2500,65	3320,98	75,3	0,85
8	185	3084,135	4240	72,7	0,85
9,347	215	3584,265	4953,91	72,35	0,85
10,5	242	4034,382	5565	72,5	0,85
11,32	260	4334,46	5999,6	72,24	0,85
13	295	4631,5	6604	70,131	0,814
			Ortalama:	74.158	-

*Giriş gücü hesabına ($P_{giriş} = \sqrt{3} * U * I * cos\ \varphi$) göre elde edilen güç faktörü değeridir (Karşılaştırma motorunun faz-faz arası gerilim değeri U=360 V'tur).

Karşılaştırma motoruna ait genel bilgiler (Ergene ve diğ., 2018)

Özellik	60 oluklu Akar SMSM
Oluk sayısı	60
Her oluktaki sarım sayısı	40
Hava aralığı akı yoğunluğu [T]	0,85
Hava aralığı genişliği [mm]	1
Stator dış çapı [mm]	242
Rotor çapı [mm]	168
Motor uzunluğu [mm]	150
Rotor hacmi [m3]	0,003325
Toplam hacim [m3]	0,006899
Bakır ağırlığı [kg]	9,89
Mıknatıs ağırlığı [kg]	2,4
Stator çelik ağırlığı [kg] *	66
Rotor çelik ağırlığı [kg] *	30
Toplam ağırlık [kg]	108,29

* Ergene ve diğerlerinin verdiği stator ve rotor ağırlıklarının net ağırlıklar değil, hurdası ile birlikte üretim esnasında harcanan (consumption) toplam ağırlıklar olduğu düşünülmektedir. Aksi halde motor gövdesi, milleri, kapakları, motor freni ve kasnak ile birlikte motor ağırlığının etiketinde yazan değerin çok daha üstünde çıkması gerekmektedir.

ÖZGEÇMİŞ

Mücahit Soyaslan, 1986 yılında Edirne'nin Lalapaşa ilçesinde doğdu. İlkokul eğitimini Çömlekakpınar İlköğretim Okulu'nda, ortaokul eğitimini Edirne Anadolu Lisesi'nde, lise eğitimini ise Edirne Süleyman Demirel Fen Lisesi'nde tamamladı. 2005 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında mezun oldu. Aynı yıl Gaziosmanpaşa Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak işe başladı ve yüksek lisansını 2012 yılında tamamladı. 2013 yılında Sakarya Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Akabinde doktora eğitimine Sakarya Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde devam etti. Halen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.