



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA PROGRAMI

**KAYIŞLI ASANSÖR SİSTEMLERİ İÇİN TÜMLEŞİK
MEKANİZMALI SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTOR
TASARIMI VE UYGULAMASI**

DOKTORA TEZİ

Yusuf AVŞAR

Danışman: Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU

TOKAT- 2023



Çalışmayı Destekleyen Kuruluş Bilgileri

“Bu tez çalışması Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Projeler Birimi tarafından 2021/02 proje numarası ile desteklenmiştir”

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU danışmanlığında hazırlamış olduğum “Kayışlı Asansör Sistemleri için Tümlleşik Mekanizmalı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Uygulaması” adlı Doktora tezinin bilimsel etik değęrlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

23/06/2023

Yusuf AVŞAR



Teşekkür

Çalışma süresince akademik ve sosyal tecrübelerini benden esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU'na, tez süreçlerinde değerli fikirlerini ve yardımlarını aldığım Prof. Dr. Mehmet AKAR'a ve Doç. Dr. Zafer DOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresince ve motor deneylerinde desteklerinin esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Mücahit SOYASLAN'a, tezin şekillenmesinde desteğini aldığım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa EKER'e, Arş. Gör. Mustafa ÖZSOY'a ve Arş. Gör. Emre GÖZÜAÇIK'a, üretim süreçlerinde yardımlarını esirgemeyen Serkan DÖNMEZ'e ve Hasan TAHAL'a teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim ve çalışma hayatımda desteğini biran bile esirgemeyen sevgili eşim Eda AVŞAR'a, bu süreçte zamanımı ayıramadığım kızım Beril'e, hayatımın her anında yanımda olan annem Fadime ve babam Ömer AVŞAR'a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

ÖZET

KAYIŞLI ASANSÖR SİSTEMLERİ İÇİN TÜMLEŞİK MEKANİZMALI SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTOR TASARIMI VE UYGULAMASI

Yusuf AVŞAR

Doktora, Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU

Haziran, 2023 165 sayfa

Asansör tahrik makinelerinde yaygın olarak asenkron motorlar ve bu motorlara akupple şekilde dişlili redüktörler kullanılmaktadır. Bu sistemler düşük enerji verimliliğine sahiptir. Ayrıca büyük hacimli olmalarından dolayı makine dairelerine ihtiyaç duyarlar. Son yıllarda, nadir toprak elementli mıknatısların yaygınlaşması ve sürücü teknolojilerindeki gelişmeler, sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM) asansör tahrik makinelerinde kullanımını yaygınlaştırmıştır. SMSM'ler, redüktör kullanmaksızın doğrudan tahrik yöntemiyle çalışmaktadır. Asansör taşıyıcıları yaygın olarak çelik halatlardır. Ancak asansörlerde kullanılan çelik halatların çaplarından dolayı, kasnak çapları en az 240 mm olabilmektedir. Bu durum tasarlanacak SMSM'nin düşük hız ve yüksek tork gerektirmektedir. Tek parça halinde çelik halatların kullanılması yerine yassı bir kılıf içinde daha düşük çaplara sahip çelik halat özlü kayışlar kullanılmaktadır. Bu sayede kasnak çaplarını 100 mm çapa kadar düşürülebilmektedir. Kayışlı asansör tahrik sistemleri halatlı sistemlere göre daha az gürültülü, yüksek kabin konforlu seyahat imkânı sağlayan, daha verimli ve güncel bir konudur. Bu tez çalışmasında, kayışlı asansör tahrik makinesi için 8 kişilik, 630 kg kabin taşıma kapasitesinde, 1 m/s kabin hızında, 4.5 kW gücünde ve 107.4 Nm anma torkuna sahip makine şasisi kullanılmadan doğrudan raya montajlı yeni bir SMSM tasarımı, analizleri ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Geleneksel yöntemlerin aksine, motorun asansör taşıma sistemi ile entegrasyonu doğrudan raylar üzerine sağlanmıştır. IE4 verim sınıfında, düşük tork dalgalanmasına sahip, raya montajlı olarak gerçekleştirilen, makine şasi konstrüksiyonu gerektirmeyen, sistemin toplam ağırlığını dengeli şekilde taşıyıcı ve karşı ağırlık kılavuz raylarına dağıtabilen, düşük hacim ve kütleye sahip, döküm yerine plaka saclardan lazer kesim yöntemi ile üretilen, minimum talaşlı imalat kullanımı sağlayan bir asansör makine tasarımı ortaya çıkarılmıştır. SMSM'nin analitik hesaplamaları, elektriksel ve manyetik modellemesi, mekanik tasarıma göre ortaya çıkan hacim kısıtlamalarını dikkate alarak gerçekleştirilmiştir. Asansör tahrik motorlarında dikkate alınması gereken en önemli iki kriter, yüksek verimlilik sağlaması ve yolcu konforudur. Bu hedefler doğrultusunda, verimliliği %91'in üzerinde ve tork dalgalanması %1'in altında olan bir tasarım öngörülmüştür. Elde edilen değerlere dayanarak ve sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak, stator oluk açığı, mıknatıs kalınlığı, kutup /mıknatıs oranı, stator dış kalınlığı ve hava aralığı değerleri için genetik algoritma (GA) ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tork dalgalanmasını azaltmak için optimize edilmiş tasarımın mıknatıslarına adımlı kaykı uygulanmıştır. Sonuçlara göre, %0.61 tork dalgalanması ve

%90.97 verimlilik ile 18/20 oluk/kutup kombinasyonuna sahip SMSM tasarımı elde edilmiştir. Termal analizler ile, motorun farklı bileşenlerinin ortalama sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Tam yük altındaki S1 çalışmaya göre termal rejim durumunda sargılar 116°C, stator nüvesi 84°C, mıknatıslar 76°C ve rotor 75°C sıcaklığa ulaştığı gözlemlenmiştir. Motor, termal açıdan güvenli bir bölgede çalıştığı kanıtlanmıştır. Asansör tahrik makinesi tasarımının, asansör kuyusuna uygun şekilde yerleştirilmesine yönelik 3 boyutlu (3B) katı modellemesi gerçekleştirilmiştir. Belirlenen statik yüklere göre motor gövde, mil ve stator dişlerinde SEY ile yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Üretim aşamalarına geçilmeden önce 3B olarak prototip asansör makinesine uygun kuyu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Raya montajlı asansör tahrik makinesinin kuyu içindeki kılavuz rayları ve bağlantı konsollarındaki yüklerin etkileri incelenmiştir. Makine bileşenleri ve kuyu tasarımına yönelik SEY ile gerçekleştirilen yapısal analizlerde güvenlik katsayısı 5'in üzerinde olduğu belirlenmiştir. Yapısal olarak doğrulanan tasarımın üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen prototip makine, üzerinde yükleme motoru bulunan bir test düzeneği ile zıt Elektromotor Kuvvet (EMK), vuruğu momenti ve performans deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, verimlilik değeri %89.98 ve vuruğu momenti tepeden tepeye (pk2pk) 0.78 Nm olarak ölçülmüştür. Sinüs şeklinde zıt EMK elde edilmiştir. Böylece deney sonuçları, SEY analiz çözümlerini doğrulamıştır.

Anahtar Kelimeler: Asansör Tahrik Makineleri, Kayışlı Asansör Tahrik Makineleri, Dişlisiz Makine, Sabit Mıknatıslı Senkron Motor, Asansör Sistemleri, Sonlu Elemanlar Analizi.

ABSTRACT

DESIGN AND APPLICATION OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR WITH INTEGRATED MECHANISM FOR BELT LIFT SYSTEMS

Avşar, Yusuf

Doctorate Thesis, Division of Mechatronics Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU

June, 2023 165 page

Induction motors and geared reducer systems coupled to these motors are widely used in elevator drive machines. These systems have low energy efficiency. They also need engine rooms due to their large volume. In recent years, the widespread application of rare earth element magnets and developments in drive technologies have led to the expansion of permanent magnet synchronous motors (SMSM) in elevator drive machines. SMSMs operate with a direct drive method without the use of a gearbox. Elevator carriers are most commonly steel ropes. However, due to the diameter of the steel ropes used in elevators, sheave diameters can be at least 240 mm. This situation leads to low speed and high torque requirements of the SMSM to be designed. In recent years, steel wire rope belts with smaller diameters in a flat shell have been used instead of using steel wire ropes in one piece. In this way, reducing the pulley diameters by 100 mm is possible. Belt elevator drive systems are a new and recent concept that is less noisy and more efficient than rope systems, providing high cabin comfort. In this thesis, the design, analyses, and production of a new SMSM for a belt elevator drive machine for eight persons, 630 kg cabin payload, one m/s cabin speed, 4.5 kW output power, and 107.4 Nm rated torque has been carried out directly on the rail without using the machine chassis. Unlike conventional methods, the integration of the motor with the elevator transport system is provided directly on the rails. An elevator machine design in IE4 efficiency class, with low torque ripple, mounted on the rail, not requiring machine chassis construction, able to distribute the total weight of the system to the carrier and counterweight guide rails in a balanced way, low volume and mass, produced by laser cutting method from plate sheets instead of casting, providing minimum machining usage has been revealed. Analytical calculations and magnetic modelling of the SMSM have been carried out, considering the volume constraints concerning the mechanical design. The two most important criteria to be considered in elevator drive motors are high efficiency and passenger comfort. These objectives considered a design with efficiency above 91% and torque ripple below 1%. Based on the obtained values and using the finite element method (FEM), the stator slot opening, magnet thickness, embrace ratio, stator tooth thickness, and air gap values were optimized by genetic algorithm (GA). In addition, the stepped slide was applied to the magnets of the optimized design to reduce torque ripple. According to the results, an SMSM design with an 18/20 slot/pole combination with 0.61% torque ripple and 90.97% efficiency was obtained. By thermal analyses, the average temperature values of different components of the motor were determined. In S1

operation under full load, it was observed that the windings reached 116°C , the stator core 84°C , the magnets 76°C and the rotor 75°C in the thermal regime. The motor has been proven to operate in a thermally safe region. Three-dimensional (3D) solid modelling of the design of the elevator drive machine has been carried out for its proper placement in the elevator shaft. Structural analyses were performed on the motor casing, shaft, and stator teeth according to the determined static loads. Before proceeding to the production stages, the shaft design suitable for the prototype elevator machine was carried out in 3D. The effects of the loads on the guide rails and connection brackets of the rail-mounted elevator drive machine in the shaft were investigated. The structural analyses performed with FEM for machine components and shaft design showed that the safety coefficient was above 5. The manufacturing of the structurally verified design was carried out. The manufactured prototype motor has been tested with a test rig with a loading motor, and the opposite EMF, cogging torque, and performance tests have been carried out. According to the test results, the efficiency value was 89.98%, and the cogging torque was 0.78 Nm peak to peak (pk2pk). Thus, the experimental results confirmed the FEM analysis solutions. A sinusoidal opposite EMF was obtained.

Keywords: Elevator Drive Machines, Belt Elevator Drive Machines, Gearless Machine, Permanent Magnet Synchronous Motor, Elevator Systems, Finite Element Analysis.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xxii
1 GİRİŞ	1
1.1 Tezin Kapsamı ve Amacı.....	5
2 LİTERATÜR ÖZETLERİ ve KURAMSAL TEMELLER	8
2.2 Asansör Sistemleri	9
2.2.1 Asansörlerin Sınıflandırılması.....	9
2.2.2 Elektrikli Asansör Kuyu Bileşenleri.....	13
Asansör kuyu boşluğu.....	14
Makina dairesi.....	14
Asansör kabini	14
Karşı ağırlık	15
Hız regülatörü	15
Mekanik fren veya paraşüt tertibatı	16
Kaydırıcılar (Patenler)	16
Tamponlar	16
Asansör kontrol Panosu	17
Askı elemanı	17
Tahrik kasnağı.....	17
Kılavuz ray ve bağlantı elemanları	17
2.3 Elektrikli Asansör Motorları.....	19
2.4 Asansör Aktarma Elemanları.....	26
2.5 Raya Montajlı Asansörler Hakkında Alınan Patentler	27
3 MATERYAL ve YÖNTEM.....	33
3.1 Elektrikli Asansör Makineleri	33
3.1.1 Dişlili ve Dişlisiz Asansör Makineleri	33
3.1.2 Halatlı ve Kayışlı Asansör Makineleri	35
3.2 Sabit Mıknatıslı Senkron Motor.....	40
3.2.1 Stator.....	42
3.2.2 Rotor	45
3.2.3 Sabit Mıknatıslar	47
Asansör Tahrik Sistemleri için YM İçten Rotorlu SMSM'ler.....	49
3.2.4 Sargılar	51

3.3 SMSM'nin Tasarım Parametreleri	53
3.3.1 Oluk/Kutup Kombinasyonunun Belirlenmesi	53
3.3.2 Vuruntu Momenti ve Tork Dalgalanmaları	55
3.3.3 SMSM'nin Ölçülendirmesi	57
Çıkış Eşitlikleri	58
SMSM'nin Boyutlandırması	60
Carter Katsayısı.....	63
3.3.4 SMSM'nin Manyetik Devre Modeli	63
3.3.5 SMSM'nin Elektriksel Devre Modeli	68
Faz İndüktans Hesaplamaları.....	70
Zıt Elektromotor Kuvveti (EMK), Elektromanyetik Güç ve Tork	72
Clarke-Park Dönüşümleri	73
3.3.6 Motor Kayıpları ve Verim	74
3.3.7 Analitik Hesaplamaların Gerçekleştirilmesi.....	75
3.4 Analiz ve Optimizasyon Yöntemleri	77
3.4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi	78
3.4.2 Optimizasyon Yöntemleri	79
3.4.3 Genetik Algoritma	80
3.5 Asansör Tahrik Makinesinin Statik Yük ve Malzemelerinin Belirlenmesi	80
3.5.1 Statik Yüklerin Belirlenmesi	80
3.5.2 Rulman Seçimi	83
3.5.3 Asansör Tahrik Makinesinin Malzeme Seçimi	84
3.5.4 Kayış ve Kasnak Seçimi	84
3.5.5 Fren ve Enkoder Seçimi	86
3.6 Test Düzenekinin oluşturulması	86
3.6.1 Test Koşullarının Belirlenmesi	87
3.6.2 Test için kullanılan ölçüm cihazlarının seçimi	88
3.6.3 Vuruntu momenti testi	89
3.6.4 Zıt EMK testi	90
3.6.5 Performans testleri	90
4 BULGULAR ve TARTIŞMA.....	92
4.1 Farklı Oluk/Kutup Kombinasyonlarının Karşılaştırması	93
4.1.1 12/10 Optimizasyon ve Analizleri	95
4.1.2 12/14 Optimizasyon ve Analizleri	98
4.1.3 18/16 Optimizasyon ve Analizleri	101
4.1.4 18/20 Optimizasyon ve Analizleri	104
4.1.5 24/22 Optimizasyon ve Analizleri	107
4.1.6 24/26 Optimizasyon ve Analizleri	110
4.2 Optimizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi	113
4.3 SMSM'nin Kaykısı ile Tork Dalgalanmasının Azaltılması	114
4.4 SMSM'nin Vuruntu Torku SEY analizleri	118
4.5 SMSM'nin Değişken Yüklerdeki SEY Analizi.....	119

4.6 3B SMSM'nin SEY Analizi.....	121
4.7 SMSM'nin Termal Analizi.....	123
4.7.1 Demagnetizasyon.....	125
4.8 Nihai Tasarım Modellerinin Oluşturulması.....	127
4.9 Asansör Tahrik Makinesinin Yapısal Analizleri	128
4.9.1 Asansör Makinesinin Gerilme Analizi	128
4.9.2 Makine Milinin Eğilme ve Burulma Analizi	130
4.9.3 Stator Dişlerindeki Burulma Analizi	132
4.9.4 SMSM'nin Boyutlandırılması	133
4.9.5 Maliyet Hesabı.....	134
4.10Asansör Makinesinin Kuyu Montaj Tasarımının Oluşturulması	135
4.10.1 Asansör Tahrik Makinesi Kuyu Montajının Statik Analizleri ..	136
4.11Asansör Makinesinin Üretimi ve Montajı	138
4.12SMSM'nin Deneysel Çalışması.....	141
4.12.1 Boşta çalıştırma ve direnç değerlerinin ölçülmesi.....	141
4.12.2 Zıt EMK testi	142
4.12.3 Vuruntu Momenti Testi	143
4.12.4 Performans test sonuçlarının SEY sonuçları ile karşılaştırılması.....	143
5 SONUÇLAR	146
6 KAYNAKLAR	153
ÖZGEÇMİŐ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
ω_m	Açısal hız
C_ϕ	Akı konsantrasyon faktörü
j	Akım yoğunluğu
pB	Alt oluk iletkenlik katsayısı
T	Anma torku
L_{wire}	Bir bobin için sargı uzunluğu
N_{coil}	Bir fazdaki bobin sayısı
S_{pitch}	Bobin adımı
C_{pitch}	Bobinin açısal uzunluğu
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği
k_c	Cartel katsayısı
T_c	Curie sıcaklığı
f	Çalışma frekansı
P_{out}	Çıkış gücü
L_{md}	d eksenli mıknatıslanma indüktansı
i_d	d eksenindeki akım
V_d	d eksenindeki gerilim
L_d	d eksenindeki indüktans
P_o	Dağılma yük kayıpları
P_{iron}	Demir kayıpları
K	Dinamik faktör
C	Dinamik yük sayısı
h_{s2}	Dış ucu kalınlığı
g'	Düzeltilmiş hava aralığı kalınlığı
k_e	Eddy kayıp sabiti
P_{cop}	Elektriksel kayıplar
P_v	Elektriksel kayıplar
T_{em}	Elektromanyetik tork

ΔtR	Enerjisiz ve dinlenme halindeki zaman
C_o	Esoson sabiti
I_{rms}	Faz akımı rms değeri
R_s	Faz direnci
n_f	Faz sayısı
P_{in}	Giriş gücü
S	Güvenlik faktörü
g	Hava aralığı
B_g	Hava aralığı akı yoğunluğu
Φ_g	Hava aralığı akısı
A_g	Hava aralığı kesit alanı
$\hat{B}_g$	Hava aralığı maksimum akı yoğunluğu
$\bar{B}_g$	Hava aralığı ortalama akı yoğunluğu
R_g	Hava aralığı relüktansı
n_d	Hız (dev/dakika)
n_s	Hız (dev/saniye)
k_h	Histerezis kayıp sabiti
D_t	İletken çapı
A_t	İletken kesit alanı
A_t	İletken kesit alanı
ρ	İletkenin özgül direnci
E_0	İndüklenen EMK
W_c	Kabin ağırlığı
L_{slot}	Kaçak indüktans
λ_{bs}	Kaçak manyetik geçirgenliği
W_f	Karkas ağırlığı
L_{slm}	Karşılıklı indüktans
D_{kasnak}	Kasnak çapı
R_k	Kasnak radyüsü
F_{bmax}	Kasnak üzerindeki maksimum yük
Q	Kaşıma kapasitesi

w_k	Kayış genişliği
S_f	Kayış güvenlik faktörü
θ_{skew}	Kayk1 açısı
α_k	Kutup adımı açısı
N_p	Kutup sayısı
A_{pole}	Kutup yüzey alanı
q	Kutup-faz başına düşen oluk sayısı
W_m	Makine ağırlığı
M_{cs}	Makine kabin tarafı ağırlık
T_{cs}	Makine kabin tarafı uygulanan toplam yük
M_{cw}	Makine karşı ağırlık tarafı ağırlık
T_{cw}	Makine karşı ağırlık tarafı uygulanacak toplam yük
BH_{max}	Maksimum enerji yoğunluğu
Q'	Maksimum taşıma kapasitesi
M_{dens}	Malzeme yoğunluğu
Φ	Manyetik akı
PC	Manyetik iletkenlik katsayısı
P_m	Mekanik kayıpları
α_m	Mıknatıs adımı açısı
B_r	Mıknatıs akı yoğunluğu
h_{mag}	Mıknatıs kalınlığı
R_{mag}	Mıknatıs relüktansı
l_m	Mıknatıs uzunluğu
W_{mag}	Mıknatıs yay uzunluğu
Ψ_M	Mıknatıslanma akısı
H_{ci}	Mıknatıslanma giderici kuvvet
L_m	Mıknatıslanma indüktansı
B_{s0}	Oluk açıklığı
R_{s1}	Oluk boyunduruk yarıçapı
B_{s2}	Oluk dış genişliği
h_{s1}	Oluk dış ucu yüksekliği

B_{s1}	Oluk iç genişliği
N_{slot}	Oluk sayısı
h_{s0}	Oluk yüksekliği
B_{ort}	Ortalama akı yoğunluğu
T_{avg}	Ortalama tork
L_{sls}	Öz indüktans
L	Paket boyu
π	Pi sayısı
L_{mq}	d eksenî mıknatıslanma indüktansı
i_q	d eksenindeki akım
V_q	d eksenindeki gerilim
L_q	d eksenindeki indüktans
K_r	Relüktans faktörü
D_{ro}	Rotor dış çapı
D_{ri}	Rotor iç çapı
Φ_r	Rotor manyetik akısı
L_{pb}	Rulman başına düşen Yük
L_h	Rulman ömür değeri
p_o	Rulman ömür katsayısı
O_{wb}	Rulmanlara etki eden diğer yükler
ΔtP	Sabit yükte çalışma süresi
K_{fringe}	Saçaklanma faktörü
L_{con}	Sargı bağlantı uzunluğu
cw	Sargı doluluk oranı
k_w	Sargı faktörü
L_{end}	Sargı sonu kaçak indüktansı
I_{end}	Sargı sonu uzunluğu
θ	Sıcaklık
K_l	Sızıntı faktörü
ac	Spesifik elektriksel yükleme değeri
N_{turn}	Spir sayısı

B_{bc}	Stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu
A_{bc}	Stator boyunduruk alanı
h_{bc}	Stator boyunduruk kalınlığı
D	Stator dış çapı
A_{th}	Stator dış alanı
W_{th}	Stator dış genişliği
R_{th}	Stator dış relüktansı
B_{th}	Stator dişlerindeki akı yoğunluğu
B_{th}	Stator dişlerindeki akı yoğunluğu
$\hat{B}_{th}$	Stator dişlerindeki maksimum akı yoğunluğu
D_{si}	Stator iç çapı
k_{st}	Stator istifleme faktörü
μ_{st}	Stator manyetik geçirgenliği
A_{slot}	Stator oluk alanı
h_{slot}	Stator oluk yüksekliği
M_{bc}	Stator toplam boyunduruk laminasyon kütlesi
M_{th}	Stator toplam dış laminasyon kütlesi
W_s	Süspansiyon ağırlığı
T_{pk}	Tepeden tepeye tork değeri
X_q	Toplam indüktans
P_{loss}	Toplam kayıp
$A_{mag,}$	Toplam mıknatıs yüzey alanı
pTB	Toplam oluk iletkenlik katsayısı
h_{slot}	Toplam oluk yüksekliği
M_{rot}	Toplam rotor sac kütlesi
M_t	Toplam sac kütlesi
F_s	Toplam statik yük
T_r	Tork dalgalanması
Θ_{max}	Ulaşılan maksimum sıcaklık
pT	Üst oluk iletkenlik katsayısı
η	Verim

N_{period}	Vuruntu periyod sayısı
P	Yük
TC	Yük döngüsünün süresi
t	Zaman
E_{em}	Zıt elektromotor kuvveti
$\widehat{E_{em}}$	Zıt elektromotor kuvveti tepe değeri



Kısaltmalar	Açıklama
2B	2 Boyutlu
3B	3 Boyutlu
AA	Alternatif Akım
ABC	Yapay Arı Kolonisi
AC-VVVF	Sürücülü Asenkron Redüktörlü
AKMT	Ardışık Kısıtlamasız Minimizasyon Tekniği
AlNiCo	Alüminyum-Nikel-Kobalt
$\cos \varphi$	Güç Faktörü
d/d	Dakikadaki devir sayısı
DA	Doğru Akım
EBOB	En Büyük Ortak Bölen
EMK	Elektromotor Kuvvet
GA	Genetik Algoritma
GM	Gömülü Mıknatıslı
GUI	Graphical User Interface (Grafiksel kullanıcı ara yüzü)
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
MBL	Minimum Kopma Yüğü
NdFeB	Neodyum Demir Bor
pk2pk	Peak two Peak (tepeden tepeye)
PMSM-VVVF	Sürücülü Senkron Redüktörsüz Makineleri
PU	Poliüretan
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SM	Sabit Mıknatıslı
SmCo	Samaryum Kobalt
SMSM	Sabit Mıknatıslı Senkron Motor
YM	Yüzey Mıknatıslı

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Kullanım amaçlarına göre asansörler	10
Şekil 2.2. Yapı ve tahrik sistemine göre asansörler	11
Şekil 2.3. Asansör kuyu görünümü.....	12
Şekil 2.4. Asansör sisteminin genel görünümü	13
Şekil 2.5. Kabin yapısı	15
Şekil 2.6. Karşı ağırlık	15
Şekil 2.7. Yönlendirme Patenleri	16
Şekil 2.8. Tampon türleri	16
Şekil 2.9. Kılavuz raylar	18
Şekil 2.10. Kılavuz ray, konsol ve bağlantı elemanları	19
Şekil 2.11. Sabit mıknatıslı boru tip rotorlu senkron motor	28
Şekil 3.1. Dişlili ve dişlisiz makineler	34
Şekil 3.2. Asansör tahrik makineleri.....	35
Şekil 3.3. Çelik halatlı sistemler	36
Şekil 3.4. Kayışlı sistemler	36
Şekil 3.5. Kayışlı asansör makineleri.....	37
Şekil 3.6. Halatlı ve kayışlı asansör makinaları karşılaştırması	38
Şekil 3.7. SMSM'lerin tork-hız karakteristiği	41
Şekil 3.8. JFE Steel 50JN350 tipi silisli sacın B-H grafiği.....	43
Şekil 3.9. JFE 50JN350 tipi silisli sacın demir kayıpları.....	43
Şekil 3.10. Stator laminasyonu	44
Şekil 3.12. Dıştan rotorlu SMSM topolojileri.....	46
Şekil 3.13. Sabit Mıknatısların Sınıflandırılması.....	47
Şekil 3.14. N45SH tipi sabit mıknatısın manyetik özellikleri	49
Şekil 3.15. Prototip motor için N45SH özelliğine sahip açılı mıknatıslar.....	49
Şekil 3.16. Konsantre sargı tipleri	51
Şekil 3.17. Sargı tipleri	52
Şekil 3.18. 18/20 oluk/kutup SMSM'nin stator sarım şeması ve görseli	53
Şekil 3.19. 3 kademeli adım kaykısı düzeni	56
Şekil 3.20. SMSM'nin ölçü gösterimi	57
Şekil 3.21. Spesifik elektriksel yükleme değeri	58
Şekil 3.22. Dr/D oranına göre tork değerleri	60
Şekil 3.23. Oluk alanı gösterimi	61
Şekil 3.24. SMSM'de manyetik akının izlediği yol.....	64
Şekil 3.25. SMSM'nin manyetik eşdeğer modeli	64
Şekil 3.26. Hava aralığı akı yoğunluklarının dalga şekilleri	68
Şekil 3.27. SMSM'nin d ve q eşdeğer elektrik devresi	69
Şekil 3.28. SMSM'nin vektör kontrol modundaki elektrik faz diyagramı	70
Şekil 3.29. Çift katmanlı sargıya ait oluk şeklinin üst ve alt sargı katmanları ..	71
Şekil 3.30. MATLAB GUI ara yüzü.....	76
Şekil 3.31. SEY eleman tipleri	79
Şekil 3.32. 2:1 Asansör süspansiyon sistemi	81
Şekil 3.33. Tasarlanan motorun kesit görünümü	83

Şekil 3.34. Kayış ve kasnak görünümü.....	86
Şekil 3.35. Fren ve enkoder	86
Şekil 3.36. Test düzeneğinin oluşturulması	87
Şekil 3.37. Çalışma döngüleri.....	88
Şekil 3.38. Vuruntu momenti deneyi.....	89
Şekil 3.39. Zıt EMK deneyi	90
Şekil 3.40. Asansör tahrik makinesinin yükleme test düzeneği	91
Şekil 4.1. Optimizasyon yapılan ölçüler	94
Şekil 4.2. 12/10 ön tasarımın analitik olarak belirlenmesi	95
Şekil 4.3. 12/10 verim ve tork dalgalanması optimizasyon sonuçları	96
Şekil 4.4. 12/10 optimizasyon sonrası analiz sonuçları	97
Şekil 4.5. 12/14 ön tasarımın analitik olarak belirlenmesi	98
Şekil 4.6. 12/14 verim ve tork dalgalanması optimizasyon sonuçları	99
Şekil 4.7. 12/14 optimizasyon sonrası analiz sonuçları.	100
Şekil 4.8. 18/16 ön tasarımın analitik olarak belirlenmesi	101
Şekil 4.9. 18/16 verim ve tork dalgalanması optimizasyon sonuçları	102
Şekil 4.10. 18/16 optimizasyon sonrası analiz sonuçları.	103
Şekil 4.11. 18/20 ön tasarımın analitik olarak belirlenmesi	104
Şekil 4.12. 18/20 verim ve tork dalgalanması optimizasyon sonuçları	105
Şekil 4.13. 18/20 optimizasyon sonrası analiz sonuçları	106
Şekil 4.14. 24/22 ön tasarım analitik belirlenmesi.....	107
Şekil 4.15. 24/22 verim ve tork dalgalanması optimizasyon sonuçları	108
Şekil 4.16. 24/22 optimizasyon sonrası analiz sonuçları.	109
Şekil 4.17. 24/26 ön tasarım analitik belirlenmesi.....	110
Şekil 4.18. 24/26 verim ve tork dalgalanması optimizasyon sonuçları	111
Şekil 4.19. 24/26 optimizasyon sonrası analiz sonuçları	112
Şekil 4.20. Oluk/kutup SEY analizlerin optimizasyon sonuçları	113
Şekil 4.21. ANSYS Maxwell tasarım gösterimi	114
Şekil 4.22. Adım kaybının verim ve tork dalgalanması üzerindeki etkisi ..	115
Şekil 4.23. 18/20 2 derece kaykılı tasarımın 2B SEY analiz sonuçları.....	116
Şekil 4.24. Kaykılı derecelerine göre oluşan vuruntu momenti.....	118
Şekil 4.28. 3B SMSM ve kaykılı mıknatıs görünümü	122
Şekil 4.29. 18/20 2 derece kaykılı tasarımın 3B SEY analiz sonuçları.....	122
Şekil 4.30. Termal analizlerde kullanılan ağ yapısı.....	124
Şekil 4.31. Termal analiz sonuçları	124
Şekil 4.32. Tam ve aşırı yüklemede mıknatısların akı yoğunluğu.....	126
Şekil 4.33. 3B Prototip makine tasarımı	127
Şekil 4.34. Makineye uygulanan ağ (mesh) yapısı	129
Şekil 4.35. Makinenin gerilmesi analiz sonuçları.....	129
Şekil 4.36. Motor şasisinin yer değiştirme analiz sonuçları	129
Şekil 4.37. Motor milinin gerilme analizi.....	130
Şekil 4.38. Motor milinin burulma analiz sonuçları	131
Şekil 4.39. Stator dişlerinin burulma analiz sonuçları	132
Şekil 4.40. 3B makine tasarımın ölçeklendirilmesi.....	133
Şekil 4.41. Asansör tahrik makinesinin 3B kuyu montaj tasarımı.....	135
Şekil 4.42. Kuyu tasarımı ağ görünümü	136
Şekil 4.43. Makina kuyu montajının gerilme analiz sonuçları	137
Şekil 4.44. Makina kuyu montajının yer değiştirme analiz sonuçları	138

Şekil 4.45. SMSM'nin parça resimleri	139
Şekil 4.46. Prototip motor montaj işlemleri.....	140
Şekil 4.47. Kayıklı rotor görünümü	141
Şekil 4.48. İndüklenen zıt EMK SEY ve deneysel sonuç grafikleri.....	142
Şekil 4.49. SEY ve deney sonuçlarının vurutu momenti grafiği	143
Şekil 4.50. SEY ve deneylerin yükleme-verimliliği grafiği	144
Şekil 4.51. SEY ve Deneylerin yükleme-akım grafiği	145
Şekil 4.52. SEY ve Deneylerin sonuçlarının-Cosφ grafiği.....	145



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge

Sayfa

Çizelge. 3.1. Dişlisiz halatlı ve kayışlı makinelerin performans verileri	38
Çizelge. 3.2. Kayışlı makine ile çelik halatlı karşılaştırması.	40
Çizelge. 3.3. Tane yönlendirilmemiş silisli sacların manyetik özellikleri	42
Çizelge. 3.4. Ticari olarak kullanılan mıknatısların özellikleri	47
Çizelge. 3.5.Çift katmanlı oluk/kutup kombinasyonlarının sargı faktörü	54
Çizelge. 3.6. Oluk/kutup kombinasyonlarına göre optimum kayk açısı.....	57
Çizelge. 3.7. SMSM'nin ölçülerinin açıklamaları	57
Çizelge. 3.8. SMSM'nin giriş değerleri	76
Çizelge. 3.9. SMSM'nin çıkış eşitlikleri.....	77
Çizelge. 3.10. Statik Yük Değeri	82
Çizelge. 3.11. Seçilen malzemelerin özellikleri	84
Çizelge. 3.12. Kayış özellikleri	85
Çizelge. 3.13. Günlük yolculuk sayısı	88
Çizelge. 3.14. Test sistemi parçaları	91
Çizelge 4.1. Optimizasyon değerleri.....	94
Çizelge 4.2. 12/10 optimizasyon verileri	95
Çizelge 4.3. 12/10 optimizasyon sonrası analiz sonuçları	96
Çizelge 4.4. Şekil 4.4.-d'nin işaret bölgeleri ve değerleri	97
Çizelge 4.5. 12/14 optimizasyon verileri	98
Çizelge 4.6. 12/14 ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları.....	99
Çizelge 4.7. Şekil 4.7.-d'nin işaret bölgeleri ve değerleri	100
Çizelge 4.8. 18/16 optimizasyon verileri	101
Çizelge 4.9. 18/16 ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları.....	102
Çizelge 4.10. Şekil 4.10.-d'nin işaret bölgeleri ve değerleri	103
Çizelge 4.11. 18/20 optimizasyon verileri	104
Çizelge 4.12. 18/20 ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları.....	105
Çizelge 4.13. Şekil 4.13.-d'nin işaret bölgeleri ve değerleri	106
Çizelge 4.14. 24/22 optimizasyon verileri	107
Çizelge 4.15. 24/22 ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları.....	108
Çizelge 4.16. Şekil 4.16.-d'nin işaret bölgeleri ve değerleri	109
Çizelge 4.17. 24/26 optimizasyon verileri	110
Çizelge 4.18. 24/26 ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları.....	111
Çizelge 4.19. Şekil 4.19.-d'nin işaret bölgeleri ve değerleri	112
Çizelge 4.20. Optimizasyon sonuçlarının karşılaştırması.....	113
Çizelge 4.21. Şekil 4.23.-d'nin işaret bölgeleri ve değerleri	116
Çizelge 4.22. Motor parametreleri	117
Çizelge 4.24. Motor sargılarının izolasyon sınıfları	123
Çizelge 4.25. Termal analiz sonuçları	124
Çizelge 4.26. Asansör makinesi montaj parçaları.....	127
Çizelge 4.27. Yaklaşık olarak SMSM'nin seri üretim maliyet hesabı.....	134
Çizelge 4.29. 3B kuyu montaj parça isimleri.....	135
Çizelge 4.30. Malzeme özellikleri	136
Çizelge 4.31. SMSM'nin faz dirençleri	141

Çizelge 4.32. Prototip motorun SEY ve deney sonuçları	144
Çizelge 5.1. Prototip motorun SEY ve deney sonuçları	152



1 GİRİŞ

Günümüzde dikey mimari yapıların yaygınlaşması, asansör sistemlerinin önemini her geçen gün artırmaktadır. Asansör sistemleri ve teknolojileri, bugün ve gelecekte vazgeçilmez bir yer edinmiştir. Ülkemizde yeni yapılacak yapılar için, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın 2018 tarihli 30492 sayılı imar planına göre, kat adedi 3 olan binalarda asansör yeri bırakılmalı, 4 ve daha fazla katlı olan binalarda ise asansör tesis etmek zorunlu hale gelmiştir. Daha az katlı yapılarda da asansör tesisi kurulabilir(T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018).

Asansör sistemlerinde tahrik makineleri açısından dört ana tip asansör bulunmaktadır. Bunlar elektrikli, hidrolik, pnömatik ve manyetik levitasyon (maglev) asansörleridir. En yaygın kullanılan asansör sistemleri, elektrik enerjisi ile çalışan sistemlerdir.

Ülkemizdeki yapılarda bulunan asansör sistemlerinin elektrik tüketimindeki payı yaklaşık olarak %2-4 arasındadır (Küçükçalık, 2016; T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2020). Bu enerji tüketiminde kayıp enerjinin önemli bir kısmı düşük verimli motorların kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Elektrik enerjisi ile çalışan asansör tahrik makineleri incelendiğinde geçmişten günümüze gelen ve hala aktif olarak kullanılan asenkron motorlar ve bu motorlara hızı düşürmek için akuple edilmiş dişlili redüktör sistemleri (dişlili makine) kullanılmaktadır. Asenkron motorların düşük verimliliği ve redüktör kaynaklı kayıplar göz önünde bulundurulduğunda, enerji verimliliği yönünden istenmeyen bir durum oluşmaktadır. Dişlili makine ile tasarlanan bir asansör sistemi hacimsel olarak boyutlarının büyük olması nedeni ile ek makine dairesi ihtiyacı doğurmaktadır. Bu da yapılardaki aktif kullanım alanında kayıplara yol açmaktadır.

Nadir toprak elementli mıknatısların yaygınlaşması ve sürücü teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde SMSM'lerin asansör tahrik makinelerinde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Asansör tahrik makinesi olarak kullanılan SMSM'ler redüktör kullanımına gerek duymadan, doğrudan tahrik yöntemi ile çalışmaktadır.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığının 2020 yılında yayınladığı “Kamu Binalarının Enerji Verimli Yenilemesine Yönelik Rehber” çalışmasında, Günümüzde değişken gerilim ve frekans kontrollü (VVVF) redüktörsüz, sabit mıknatıslı sistemler en verimli tahrik sistemleri olarak kullanılması gerektiğini vurgulamıştır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2020). Yeni yapılacak olan veya yenilenen asansör sistemlerinde, verimi en az %85 olan elektrik motorları ve/veya değişken hız sürücülerin kullanılması zorunlu hale gelmiştir (Dinçer ve Rüstemli, 2011).

SMSM’ler asansör tahrik motoru olarak kullanılmasının diğer motor yapılarına göre sağladığı avantajlar şu şekilde sıralanabilir, (Duru ve Demiröz, 2008)

- SMSM, asenkron motorlara göre çok daha etkili bir şekilde tork ve hız kontrolü sağlar. Bu sayede, hız-zaman eğrisi tüm yük koşullarında büyük bir doğrulukla izlenir ve kat hizalamasında mükemmel bir hassasiyet elde edilir.
- Duruş ve kalkışlar asenkron motorlara göre daha yumuşak gerçekleşir. Bu sayede, halat-kasnak arasındaki sıyrılmalar en az düzeyde tutulur ve bu da halat ve kasnak aşınmalarının klasik sistemlere göre daha düşük olmasını sağlar.
- Dişli grubunun tamamen ortadan kalkması, asansör sistemlerinde bakım ve onarım gereksinimini büyük ölçüde azaltır. Dişlisiz sistemlerde periyodik yağ değişimi, yetersiz yağlama nedeniyle ortaya çıkabilecek sorunlar, ses ve vibrasyon problemleri ve bu nedenlere bağlı arızalar tamamen ortadan kalkar.
- Dişlisiz tahrik sistemlerinin enerji tasarrufu açısından, dişlili makinelere göre %40-%50 oranında daha küçük motor gücü seçilebilir.
- Motorun küçülmesi ile sürücü, şalter, makine freni, kablo ve diğer bileşenlerin de aynı oranda küçülmesine olanak sağlar. Böylelikle, sistem boyutlarının ve ağırlığının azalması ile enerji tüketiminin düşürülmesine katkıda bulunur.
- Dişlisiz tahrik makineleri, sürücünün izin vermesi koşuluyla, dengelenmemiş ağırlığın seyir yönünde etki etmesi durumunda oluşan frenleme enerjisinin şebekeye geri beslenebilmesi ve bu sayede net enerji tüketiminin daha da düşürülmesine olanak sağlar.
- Dişlili makinelere göre makine ağırlıkları ve hacimleri azaldığından makine dairesi yerine SMSM ile tasarlanmış makineyi doğrudan kuyu içi montaj imkânı sunar. Buda binalarda kullanım alanını olumlu yönde artırır

SMSM ve alan sargılı senkron makineler kıyaslandığında, SMSM’lerde alan uyarım sargıları yerine rotorda mıknatısların bulunması sayesinde alan uyarım için elektrik enerjisine ihtiyaç duymazlar ve uyarım kayıpları olmaz. Buda verimliliğin önemli ölçüde artmasını sağlar (Gieras, 2010).

SMSM’lerin kullanımına yönelik dezavantajlar arasında, günümüzde nadir toprak elementlerinden elde edilen yüksek enerji yoğunluğuna sahip Neodyum-Demir-Bor (NdFeB) mıknatıs fiyatlarındaki dalgalanmalar en başta gelmektedir.

Asansör tahrik sisteminde kullanılan dişlili asenkron makineler ve dişlisiz SMSM makinelerinin ana taşıyıcı elemanı olarak çelik halatlar kullanılmaktadır. Bu çelik halatlar TS EN 81-1 standardına göre çelik halat çapı en az 8 mm olmalıdır. Aynı standarda göre tahrik kasnağı çelik halat kasnağının 40 katı olmalıdır (TS EN 81-1, 2011). Buna göre SMSM için kullanılacak kasnak çapı 320 mm olması gerekmektedir. Ancak son zamanlarda özel sertifika ve risk analizleri yapılmak koşulu ile 240 mm kasnak çapları yaygın olarak kullanılmaktadır (Demiröz ve ark., 2015).

Kasnak çapının düşürülmesi, motor anma hızında artışa ve aynı taşıma kapasitesi ve kabin hızına sahip motorların üretmesi gereken anma torkunun düşmesine imkân tanır. Örneğin kasnak çapları 320 mm ve 240 mm olan iki motor için, 240 mm kasnağa sahip olan motorun hızı 1.33 kat artmaktadır. Tork ise aynı oranda düşmektedir. İhtiyaç duyulan anma torkundaki düşüş motor performansında artışa neden olmaktadır. SMSM’lerde tork değerlerinin düşmesi motor çekirdeğindeki hacim başına düşen tork gereksiniminin azalmasına neden olacaktır. Bu durum, aynı taşıma kapasitesine sahip kabinlerde daha küçük motor çekirdek hacimlerinin kullanılabilmesine olanak sağlar. Motor torkunun düşmesi ise mildeki burulmaları azaltacaktır. TS EN 81-20 standardına göre elektromanyetik fren kabin taşıma kapasitesinin %25 fazlası olan yükü durdurabilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı elektromanyetik frenlerde tork değerinin motorun anma torkunun 2 katı olması tercih edilir. Tork değerindeki azalma daha düşük frenleme torkuna sahip fren seçimlerine imkân tanımaktadır (Fenercioğlu ve ark., 2022).

Çelik halatlardan dolayı kasnak çaplarının büyümesi asansör tahrik makinelerinin performanslarını düşürmektedir. Son yıllarda ise tek parça halinde çelik halatların kullanılması yerine yassı bir kılıf içinde daha düşük çaplara sahip çelik halatlı kayışlar

kullanılmaktadır. Bu kayışların içerisinde bulunan halat çapları 2-2.5 mm'dir. Bu sayede kasnak çaplarını 100 mm kadar düşürülmesi mümkün hale gelmiştir.

Dünyada öncülüğünü Otis, Kone, Schindler, Thyssenkrupp gibi firmaların yaptığı bu kayışlı SMSM'li asansör makineleri ülkemizde AKAR, AKIŞ gibi asansör firmaları tarafından üretilmektedir.

OTİS tarafından üretilen kayışlı asansör makine katalogunda; Geleneksel halatlı sistemlere göre avantajlar aşağıdaki şekilde sıralamıştır;

- Kayışlı sistemlerin esnek yapısı daha düşük kasnak çapı ile tasarımlar yapmaya olanak sağlamaktadır.
- Bu sayede geleneksel tasarımlara göre %70 daha küçük sistemler elde edilir.
- Bu küçülme sayesinde makine dairesi gereksinimi ortadan kalkmaktadır. Bu da yapı maliyetini düşürür ve yapılardaki faydalı kullanım alanını artırır.
- Kayışlı tasarım sayesinde geleneksel dişlili motorlara göre %50'ye ve hidrolik sistemlere göre %55'e varan daha yüksek enerji verimliliği sağlanmaktadır.
- Çelik halatlar ile kasnak teması (metal teması) titreşime ve gürültüye neden olmaktadır. Kayış sisteminde bu temas olmadığından titreşim ve gürültüden arındırılmıştır. Bu sayede yüksek yolcu konforuna olanak sağlanmaktadır (Anonim, 2023b)

Kayışlı taşıyıcı elemanların yaygınlaşmasındaki en önemli engel, bu makinelerin halatlı makinelere göre 1.5-2 kat daha maliyetli olmasıdır. Yüksek maliyetin başlıca sebebi olarak nispeten yeni teknoloji olmasından dolayı kayış üretiminin yaygın olarak yapılmaması ve yurtdışından ithal edilmesi gösterilebilir. Bu dezavantaja rağmen sağladığı avantajlar ve teknolojik gelişmeler göz önünde bulundurulduğunda, günümüzde yüksek verimli kayışlı dişlisiz makine kullanımı yaygınlaşmaktadır.

Asansör sistemlerindeki gelişmeler ile dişlisiz kayışlı asansör tahrik makineleri, makine dairesi olmadan kuyu içerisine makine şasi üzerine yerleştirilebilmektedir. Kullanılan bu makine şasi konstrüksiyonları karmaşık ve maliyetlidir.

Üretilen kayışlı, dişlisiz tahrik makinelerindeki kasnaklar yekparedir. Kasnaklar, genellikle motor çekirdeği ve fren arasında veya fren ve motor çekirdeğinden sonra uç kısımda, geleneksel çelik halatlı yapılar gibi, yer almaktadır. Bu şekildeki tasarımlarda tahrik makinesini asansör kuyusu denge merkezine yerleştirmek, yükleri eşit olarak dağıtmak oldukça zordur.

Makine gövdeleri genellikle döküm olarak üretilmektedir. Gövde üretiminde döküm malzeme kullanmanın bazı avantajları vardır. Ancak döküm olarak üretilen malzemeler kırılğan ve ilk yatırım maliyetleri yüksektir. Bu açıdan asansör makineleri seri imalata uygun ürünler olsalar bile farklı boyut ve çeşitlilikleri mevcuttur. Bu durum asansör makinesi üreticileri için olumsuz bir bakış açısına neden olmaktadır. Döküm yöntemi yerine ilk maliyetleri daha düşük üretim yöntemlerine yönelmek bu kapsamda önem arz etmektedir.

1.1 Tezin Kapsamı ve Amacı

Bu tez çalışmasında kayışlı asansör tahrik makinesi için 8 kişilik, 630 kg kabin taşıma yükünde, 1 m/s kabin hızında, 4.5 kW gücünde ve 400 d/d hız, 107.4 Nm anma torkuna sahip makine şasisi kullanılmadan doğrudan raya montajlı yeni bir SMSM tasarımı, analizleri ve üretiminin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen tasarımdaki hedefler aşağıdaki gibidir.

- IEC 60034-30 standardına göre IE4 verim sınıfında, %1'nin altında tork dalgalanmasına sahip bir SMSM prototipi geliştirmek.
- Kayışlı asansör makinesini kuyu içindeki denge merkezine yerleştirerek, halatlı dişlisiz asansör motorlarındaki denge merkezinden kaynaklı konforsuz seyahatlerin önüne geçilmesini sağlamak.
- Kayışlı asansör motorunun kuyu içindeki ray üzerine montajı ile maliyetli ve karmaşık makine şasi konstrüksiyonlarını ortadan kaldırmak. Bu sayede motor üzerinde biriken asansör yüklerini binaya ve zemine düzgün bir şekilde iletmek.
- Motor ray üzerine dengeli bir şekilde konumlandırılacağından, frenleme esnasındaki kuvvetlerin düzgün dağılımını sağlamak.
- Halatların sürtünmesinden kaynaklı aşınmaların, titreşimlerin ve gürültülerin önüne geçmek.

- Hantal ve maliyetli döküm gövde yerine sac levhalardan üretilen gövde ile daha hafif ve kompakt yapılı bir motor üretimi sağlamak.
- Üretim aşamasında lazer kesim yöntemi kullanarak döküm yöntemini ortadan kaldırıp, talaşlı imalatı minimum düzeye indirerek, yatırım maliyetlerini düşürmek. Bu sayede asansör makinesi üretimin yaygınlaşmasını sağlamak.

Bu tez 5 aşamadan oluşmaktadır.

Giriş bölümünde yapılan çalışma hakkında genel bilgiler, tezin özgün yanı, hedefler ve ortaya çıkacak ürün hakkında bilgilendirme yapılmıştır.

Literatür özeti, asansör sistemlerin tarihçesi, asansörlerin sınıflandırılması, asansör sistemlerinin yapısı, asansör tipleri, kılavuz rayları, bağlantı elemanları ve asansör güvenlik bileşenleri hakkında genel bilgiler sunulmuştur. Asansör tahrik motorları üzerine yapılmış çalışmalar, halat ve kayış sistemleri üzerine yapılmış çalışmalar ve tezin konusu olan raya montajlı sistemler hakkında patent çalışmalarını içermektedir.

Materyal yöntem bölümünde, dişlili makineler, dişlisiz makineler, halat ile tahrik edilen asansör makineleri ve kayış ile tahrik edilen asansör makineleri hakkında bilgiler sunulmuştur. SMSM'lerin yapıları, farklı topolojiler, asansör tahrik makinelerinde kullanılacak stator, rotor, sargı ve mıknatıs gibi malzemelerin belirlenmesi, çıkış denklemleri, manyetik ve eşdeğer devre modellemeleri, kayıplar, analitik hesaplamalar, vuru momentini azaltmaya yönelik kayk çalışmaları ve oluk/kutup seçimi gibi konulara değinilmiştir. Asansör kuyusundaki statik yükler belirlenmiştir. Fren, enkoder, kayış ve kasnak seçimi, tasarım süreçleri ve deney düzeneklerinin özellikleri de bu bölümde ele alınmıştır. Yapısal ve elektromanyetik analizler için kullanılan SEY ve GA yöntemi gibi konular hakkında bilgiler sunulmuştur.

Bulgular ve tartışma bölümünde, materyal ve yöntem kısmında SMSM'nin analitik olarak elde edilen denklemleri MATLAB GUI ile bir ara yüz tasarlanarak farklı oluk/kutup kombinasyonlarına uygulanmıştır. Bu sayede motor için ön tasarımlar ve genel boyutlar ortaya koyulmuştur. Analitik olarak uygun görülen tasarım parametreleri ANSYS Maxwell 2B SEY analizleri ile 6 farklı oluk/kutup kombinasyonu için GA yöntemi ile optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimizasyon motorun boyutsal parametreleri

üzerinden yüksek verim ve düşük tork dalgalanması elde etmeye yönelik gerçekleştirilmiştir. Uygun bulunan en iyi tasarım için adım kaykısı yöntemi ile tork dalgalanması ve vuruş momentini düşürmeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen tasarımın değişken yükler altında sonuçları incelenmiştir. Ortaya çıkan tasarımın ANSYS Maxwell 3B SEY analizleri ile tasarım doğrulanmıştır. Motor tasarımında önemli bir etken olan termal analizler gerçekleştirilmiştir. Motor hacim ve kütle belirlendikten sonra tez hedefleri doğrultusunda asansör makine tasarımı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen tasarımda makine gövdesi ve parçalarına materyal yöntem kısmında belirlenen statik yüklere göre SEY analizleri ile statik yüklemeler yapılmıştır. Tezin hedeflerinden biri de tasarlanan asansör tahrik makinesinin ray üzerindeki montajı olduğundan, asansör kuyu tasarımı gerçekleştirilmiş ve elde edilen statik yüklemeler yapılmıştır. Bu statik yüklemeler ile asansör kuyusundaki bileşenler ve kılavuz rayların bu statik yüklere karşı dayanımı incelenmiştir. Elektromanyetik, termal ve yapısal olarak gerçekleştirilen SEY analizlerden güvenle çıkan asansör makinesinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Prototip üretimi gerçekleştirilen asansör tahrik makinesinin performans ve doğrulama testleri gerçekleştirilmiştir.

Sonuç bölümünde ise yapılan tasarım, analiz ve performans testlerine ait sonuçlar ele alınmıştır.

2 LİTERATÜR ÖZETLERİ ve KURAMSAL TEMELLER

Literatür özeti, asansör sistemlerin tarihçesi, asansörlerin sınıflandırılması, asansör sistemlerinin yapısı, asansör tipleri, kılavuz rayları, bağlantı elemanları ve asansör güvenlik bileşenleri hakkında genel bilgiler sunulmuştur. Asansör tahrik motorları üzerine yapılmış çalışmalar, halat ve kayış sistemleri üzerine yapılmış çalışmalar ve tezin konusu olan raya montajlı sistemler hakkında patent çalışmalarını içermektedir.

2.1 Asansör Sistemlerinin Tarihçesi

Günümüzde artan dikey mimarinin vazgeçilmez bileşenlerinden biri olan asansörlerin tarihsel ilerlemelerine bakarsak ilk asansör sistemleri halat ve kasnak kullanılarak çalıştırılıyordu. Halat üzerine bağlı platformu kasnaklar ile yukarı ve aşağı hareket ettirmektedir. Sanayi devrimi döneminde buhar gücü ile çalışan asansörler ortaya çıkmıştır. 19. yüzyılda hidrolik silindirler su veya hidrolik yağ kullanılarak asansörün hareketi sağlanıyordu. 20. yüzyılın başlarında elektrik motorları kullanılarak dişli sistemler veya kasnaklar vasıtasıyla asansör hareketini sağlamaktaydı. Günümüzde kontrol sistemlerinin gelişmesi ile elektrikli motorlar yüksek katlı binalarda yaygın ve güvenilir olarak kullanılmaktadır.

Asansör sistemlerinin geçmişten günümüze gelene kadar önemli süreçleri şu şekilde sıralanabilir (Berber, 2016).

- 1743: Fransa'da dengeleyici bir kişisel asansör ortaya çıktı.
- 1835: İngiltere'de bir fabrikaya kayışla çalışan bir asansör kuruldu.
- 1846: İlk hidrolik endüstriyel asansör, su basıncı ile çalışan bir sistem olarak ortaya çıktı.
- 1852: Elisha Otis asansör sistemi üzerinde çalışmaya başladı.
- 20 Eylül 1853: Otis, kendi atölyesini açtı ve güvenli asansörünü tanıtmak için Crystal Palace Fuarı'nda bir gösteri düzenledi.
- 23 Mart 1857: Dünyanın ilk yolcu güvenlik asansörü, New York City'deki Broadway ve Broome Street'deki bir mağazada hizmete girdi. Bu asansör, buharla çalışan bir sistem tarafından güçlendirildi.

- 1889: İlk doğrudan bağlantılı elektrikli asansör makinesi üretildi. Bu elektrikli asansör makinesi genellikle yük taşımak için kullanıldı ve solucan dişli sistemine sahipti.
- 1903: Herhangi bir yükseklikteki binalarda kullanılmak üzere dişlisiz çekme elektrikli asansörler kullanılmaya başlandı.

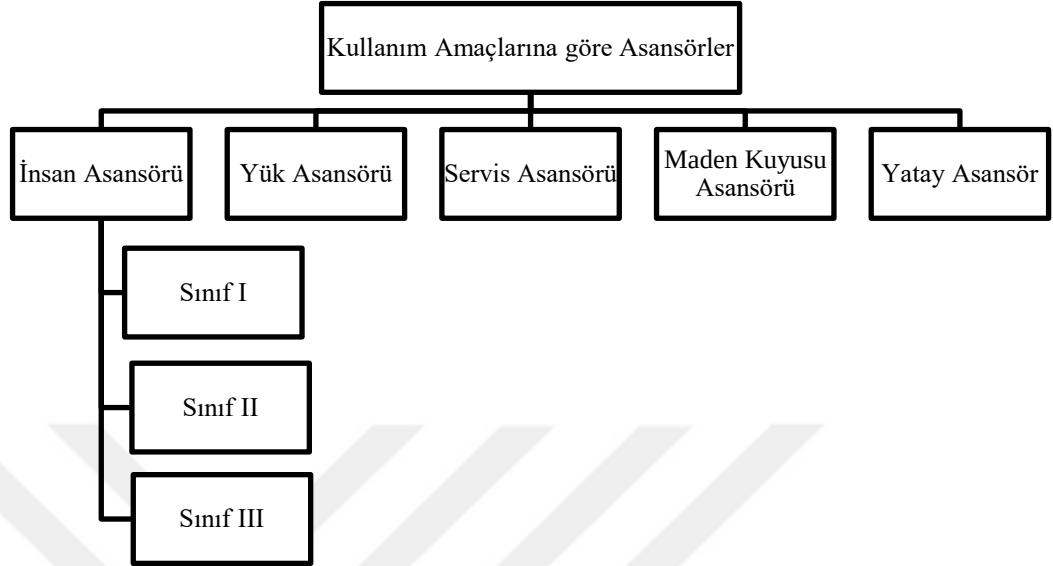
2.2 Asansör Sistemleri

Günümüzde artan yüksek bina inşaatı ihtiyacı nedeniyle, dikey taşımacılığa olan talep de büyümüştür. Bu talep dikey taşımacılık ve yüksek bina yapımı arasında karşılıklı etkileşimli bir büyüme yaratmıştır. Her iki sektör, daha ileri teknoloji, güvenlik ve konfor standartlarını geliştirerek büyümektedir. Dikey taşımacılık, 18. yüzyılın başlarında gelişmeye başlamış ve elektronik alanındaki ilerlemelerle daha konforlu ve güvenilir hale gelmiştir. Bugün, çok çeşitli kullanım alanları olan dikey taşıma araçları, günlük hayatın vazgeçilmez bir parçası olmuştur ve onlarsız şehir yapılaşması düşünülmemektedir (Savaş, 2011).

Asansörler, bir noktadan diğerine yolcu ve yük taşıma amacıyla oluşturulmuş sistemlerdir. İnsanlar ve yükler, ray kılavuzları aracılığıyla hareket eden kabin veya platformlar sayesinde, iki veya daha fazla durak arasında etkin bir şekilde taşınmaktadır. Yirmiden fazla asansör çeşidi mevcut olup, bu sistemler 100 yılı aşkın süredir yüksek katlı binalarda hizmet vermektedir. Yüksek katlı yapıların varlığı süresince, asansörler de sürekli yenilikler ve geliştirmelerle önemlerini koruyacaklardır (İmrak ve Gerdemli, 2000).

2.2.1 Asansörlerin Sınıflandırılması

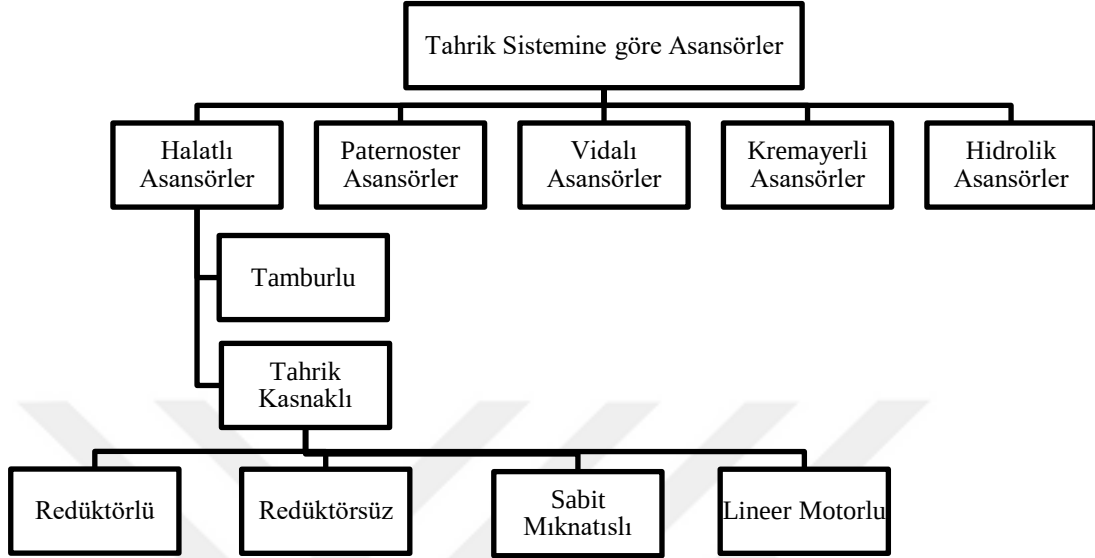
Asansör sistemleri incelendiğinde, kullanım amacına göre ve tahrik sistemine bağlı olarak gruplandırılabilir. Kullanım amacına göre asansörler, insan asansörleri, yük asansörleri, servis asansörleri, maden kuyusu asansörleri ve yatay asansörler olarak belirlenmektedir. Şekil. 2.1’de kullanım amacına göre asansörler yer almaktadır.



Şekil 2.1. Kullanım amaçlarına göre asansörler (İmrak ve Gerdemli, 2000)

İnsan asansörleri, kabin konforu ve kullanım kolaylığı göz önünde bulundurularak tasarlanmış olup, üç sınıfa ayrılır: Sınıf I, sadece insan taşımacılığına yönelik; Sınıf II, hem insanları hem de gerektiğinde yükleri taşıyabilen; Sınıf III ise özellikle sağlık tesislerinde kullanılmak üzere tasarlanmış asansörlerdir. Yük asansörleri, temel olarak yük taşıma amacıyla oluşturulmuş olup düşük hızlarda çalışan ve basit yapıya sahiptir. Servis asansörleri, bürolar, alışveriş merkezleri, bankalar ve kütüphaneler gibi çeşitli binalarda hizmet verir ve genellikle insan sığmayacak boyutlardadır. Maden kuyusu asansörleri, yerin derinliklerinde bulunan kömür ve maden cevherlerini taşımak amacıyla kullanılır ve aynı zamanda maden çalışanlarını taşıyabilir. Yatay asansörler ise, havaalanları, hastane ve üniversite gibi yerlerde insan taşımacılığına hizmet eder; bu sistemler, raylı yollar üzerine monte edilmiş ve saatte 2000 ila 25000 arasında yolcu taşıma kapasitesine sahiptir (Atay, 2013; İmrak ve Gerdemli, 2000; Savaş, 2011).

Yapı ve tahrik sistemine göre asansörler, halatlı asansörler, paternoster asansörler, kremayerli ve vidalı asansörler ve hidrolik asansörler olarak sınıflandırılmıştır (Savaş, 2011). Şekil. 2.2’de yapı ve tahrik sistemine göre asansörlerin sınıflandırılması gösterilmiştir.

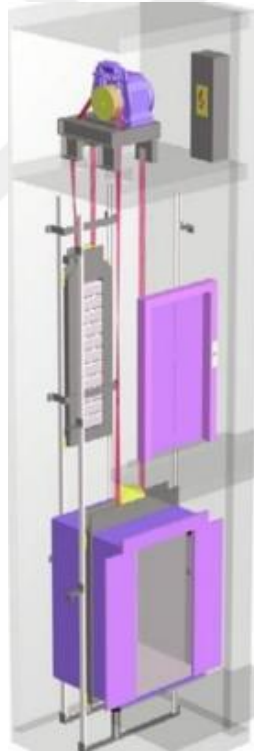


Şekil 2.2. Yapı ve tahrik sistemine göre asansörler (Savaş, 2011)

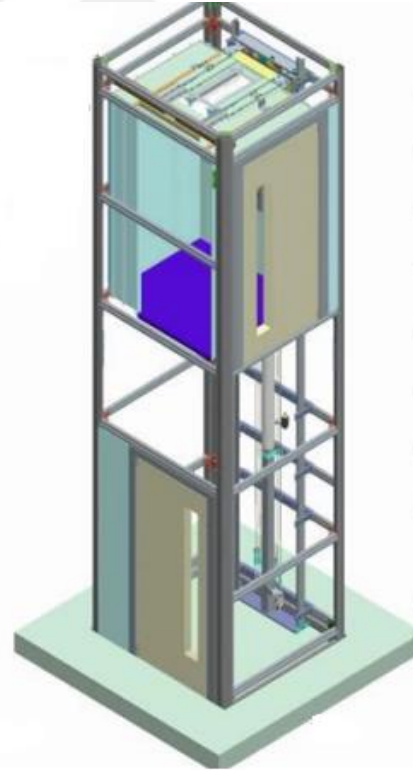
Halatlı asansörler, konvansiyonel asansör sistemleridir ve insanlar ile yüklerin katlar arasında taşınmasını sağlar. Çeşitli alt türleri bulunmaktadır, tamburlu asansörler, tahrik kasnaklı asansörler (redüktörlü ve redüktörsüz asansörler, sabit mıknatıslı motorlu asansörler ve lineer motorlu asansörler) olarak sınıflandırılabilir. Paternoster asansörler, sürekli hareket eden kabinlerin olduğu ve durmaksızın kullanılabilen sistemlerdir. Yüksek maliyet ve taşıma kapasiteleri ile karakterizedir. Kremayerli ve vidalı asansörler, vidalı milin dönmesiyle çalışır ve düşme riski olmayan güvenli bir yapıya sahiptir. Düşük kaldırma gücüne rağmen, montaj kolaylığı ve yükseklik ayarlarının yapılabilir olması nedeniyle şantiye ve geçici tesislerde tercih edilir. Hidrolik asansörler, hidrolik tahrik sistemlerini kullanarak çalışır ve hem yolcu hem de yük taşımacılığında yaygın olarak kullanılır. Yüksek yatırım maliyetlerine rağmen, düşük bakım maliyetleri ve esnek makine dairesi gereksinimleri nedeniyle birçok tesis için tercih edilir. Kullanım mesafesi 35 metre ile sınırlıdır (Savaş, 2011).

İlk asansör sistemlerinden başlayarak günümüze kadar çeşitli asansör tahrik yöntemleri geliştirilmiştir. Modern sistemlerde elektrikli ve hidrolik olmak üzere iki yaklaşım sıklıkla uygulanmaktadır (Demiröz ve ark., 2015).

Elektrikli asansörler, kabinin yükseltilmesi ve alçaltılması için çelik halat veya kayış gibi aktarım elemanları kullanarak elektrik motorlarından güç alır. Bu asansörlerde, bir motor ve halat veya kayış sistemi bulunur ve motorun hareketi, kabinin yukarı ve aşağı hareketini sağlar. Elektrikli asansörler, hız ve enerji verimliliği açısından hidrolik asansörler göre daha iyi performans sunar ve yüksek binalarda yaygın olarak kullanılır. Hidrolik asansörler, sıvı basıncı kullanarak kabinin yükselmesini ve alçalmasını sağlar. Bu tür asansörlerde, bir piston ve hidrolik sıvı ile dolu bir silindir bulunur. Asansör hareket etmeye başladığında, sıvı silindire pompalanır ve pistonu kaldırır, böylece kabin yükselir. Asansör inmek istediğinde, hidrolik sıvı kontrol valfi aracılığıyla yavaşça tahliye edilir ve kabin alçalır. Hidrolik asansörler, düşük ve orta yükseklikli binalarda kullanım için uygundur ve genellikle enerji verimliliği açısından daha düşük performans gösterir. Şekil. 2.3'te elektrikli ve hidrolik asansör kuyu yapıları gösterilmiştir.



a)

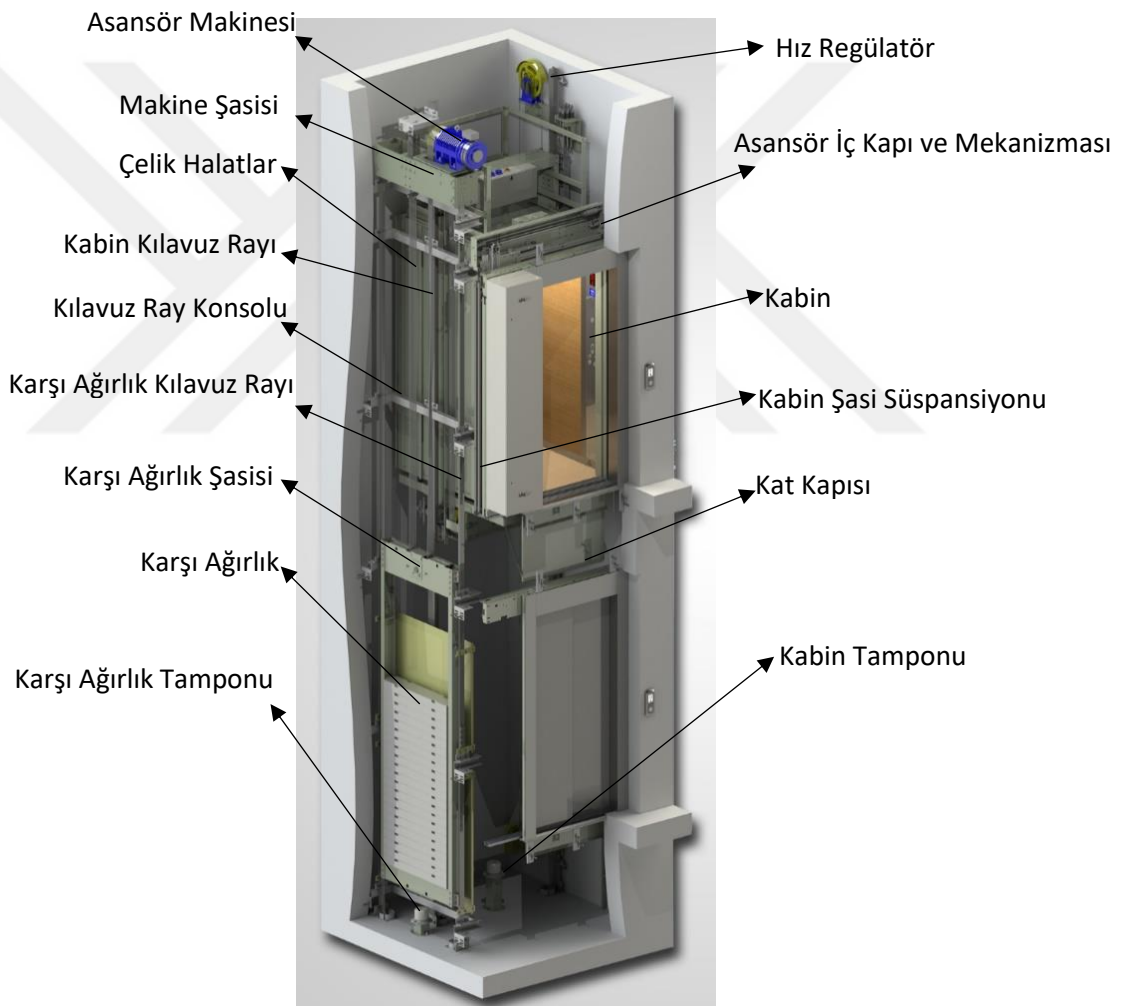


b)

Şekil 2.3. Asansör kuyu görünümü a) Elektrikli asansör b) Hidrolik asansör (Demiröz ve ark, 2015).

2.2.2 Elektrikli Asansör Kuyu Bileşenleri

Elektrikli asansörler, genel olarak asansör kuyusu, asansör makinası, makina şasisi, kontrol paneli, kabin, karşı ağırlık rayı, ray konsolu, kabin kılavuz rayı, karşı ağırlık şasisi, kabin tamponu, karşı ağırlık tamponu, hız regülatörü, mekanik fren veya paraşüt tertibatı, askı elemanı, karşı ağırlık ve kabin tamponları, patenler, tahrik kasnağı, kat kapısı ve kabin kapısı gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Şekil. 2.4'te makine dairesiz asansör bileşenlerini gösteren 3B tasarım yer almaktadır.



Şekil 2.4. Asansör sisteminin genel görünümü (Soyaslan, 2020)

İmrak ve Gerdemeli, 2000 yılında, “Asansörler ve Yürüyen Merdivenler” isimli kitabında asansör kuyu sistemi bileşenlerini kapsamlı olarak tanımlamıştır (İmrak ve Gerdemeli, 2000). Buna göre asansör kuyu bileşenleri aşağıda genel olarak anlatılmıştır.

Asansör kuyu boşluğu

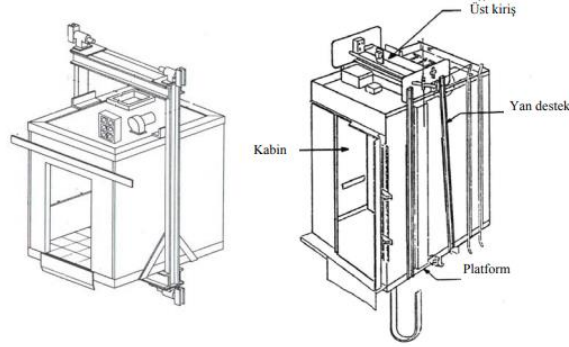
Asansör hızı ve kabin boyutlarına göre tasarlanan, kabin ve karşı ağırlığın düşey hareketlerini gerçekleştirdiği, yanmaya karşı dayanıklı duvarlarla çevrelenmiş bir alandır. Kabinin üst ve alt duraklarda bulunma durumlarına göre, üst ve alt kısımlarında belirli miktarda güvenlik boşlukları bulunmaktadır. Asansör boşluğu duvarları, tabandan tavana kadar tuğla, beton perde veya çelik yapı ile inşa edilmiş olmalıdır.

Makina dairesi

Asansör makinası, kontrol panelinin, ana şalter, saptırma makarasının ve hız regülatörü bulunduğu kapalı bir alandır. Makina dairesi, genellikle asansör boşluğu üzerinde yer alır. Makina dairesi, dış etkenlerden korunmalı, nemden uzak, en az 200 lüks ile aydınlatılmalıdır. Ek olarak iyi havalandırılan ve ortam sıcaklığının 5°C ila 40°C arasında olduğu bir kapalı alan olmalıdır. Bina kullanım özelliklerine ve makina dairesinin konumuna göre, ses ve titreşimleri emici şekilde tasarlanmalıdır.

Asansör kabini

Katlar arasında yük ve insanların taşınması için kullanılan, çelik profil iskeletli ve askı halatlarına bağlı yapıdır. Kabinler, çelik zemin ve taşıyıcı iskeletten oluşur. Kabin iskeleti, yan duvarlar ve tavanla kaplanarak kapalı bir hacim oluşturur. Kabinler, asansör trafiği ve taşıdıkları yük miktarı ve türüne göre şekillendirilir. Kabin, duvar ve tavan kalınlığı en az 2 mm sac olmalıdır ve en ve boy arasında en az 0.5 oranı bulunmalıdır. Kabin malzemesi olarak çeşitli malzemeler kullanılabilir, ancak temel nitelik olarak sağlam olmalı ve kolayca tutuşmamalıdır. Şekil 2.5'te genel kabin yapısı ve temel bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Kabin yapısı

Karşı ağırlık

Kabin ağırlığını ve yaklaşık %50'sini karşılayacak değerde seçilmelidir. Taşınması ve miktar ayarlaması kolay olması için, birbirine bağlanabilen dökme demir veya beton parçalar şeklinde yapılmıştır. Karşı ağırlık, çelik bir çerçeve, yardımcı ağırlıklar ve çelik çerçeveye monte edilmiş yönlendirme elemanlarından oluşur. Yardımcı ağırlıklar genellikle beton veya dökme demir imal edilir (İmrak ve Gerdemli, 2000). Şekil 2.6'da karşı ağırlık genel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Karşı ağırlık

Hız regülatörü

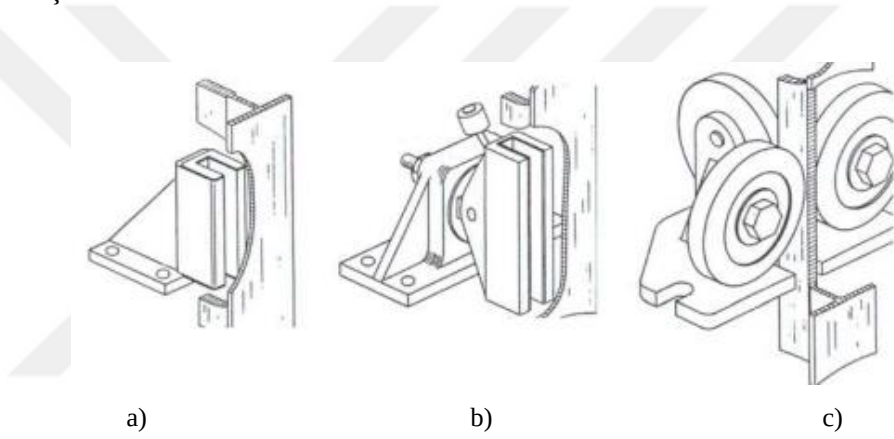
Asansörün iniş hız değerinin %25 oranında aştığında, paraşüt tertibatını harekete geçirir, paraşüt frenini etkinleştirir ve motor akımını keser. Hız regülatörü, asansör boşluğunun üst kısmında veya makina dairesinde bulunur. Regülatör halatı, kabinin hareketini regülatör kasnağına iletir. Aşırı hız durumunda sıkıştırılan bu halat, paraşüt mekanizmasının harekete geçmesini sağlar.

Mekanik fren veya paraşüt tertibatı

Mekanik fren halatın kopması veya iniş hızının aşırı derecede artması durumunda, asansörü kılavuz raylar üzerinde frenleyerek durduran sistemdir. Kabinin üst veya alt kirişlerine yerleştirilir. Paraşüt frenleri ise kabin süspansiyonuyla birlikte hareket eder.

Kaydırıcılar (Patenler)

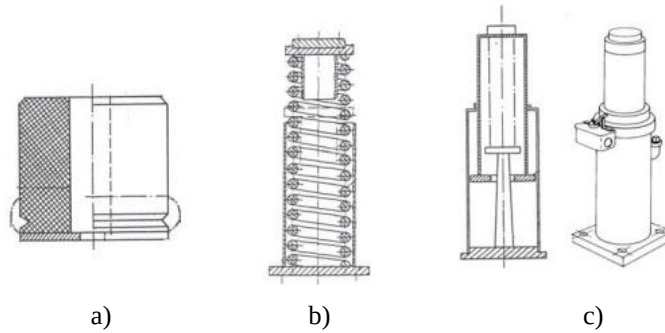
Kabin ve karşı ağırlık, kaydırıcılar (patenler) ile kılavuz rayına alt ve üst bölgelerinden ayrı ayrı yönlendiren ekipmanlardır. Şekil 2.7’de yönlendirmede kullanılan patenler gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Yönlendirme Patenleri a) kayan paten, b) döner paten, c) tekerlekli

Tamponlar

Asansör kuyusunun en alt kısmında kabin ve karşı ağırlık güvenlik ekipmanı olarak kullanılır. Arıza durumunda kabinin yumuşak çarpmasını sağlayan elastik, yay veya hidrolik elemanlar kullanılır.



Şekil 2.8. Tampon türleri a) Elastik tampon b) Yaylı tampon c) Hidrolik tampon

Asansör kontrol Panosu

Asansörlerin kolay, düzenli, rahat ve güvenli kullanımı için kontrol sistemleri uygulanır. Basma düğmeli kontrol, röleler ve anahtarlar aracılığıyla istenen hareketi gerçekleştirir. Basma düğmelerinin yerine, manyetik veya elektronik yöntemlerle dokunarak çalışan düğmeler de bulunmaktadır (Atay, 2013).

Askı elemanı

Asansörlerde, yük taşımak için sıklıkla çelik tel halatlar kullanılır. TS 1918/7 veya DIN 3058 Seale tipi halatlar, asansör uygulamalarında sıkça kullanılan seçeneklerdir. İnsan taşıyan asansörlerde, halat çapı en az 8 mm olacak şekilde en az iki adet halat bulunmalıdır. Çelik tel halatlar, zaman içinde meydana gelen aşınmalara rağmen ani kopma durumlarına karşı güvenli bileşenler olarak değerlendirilir (TS EN 81-1, 2011).

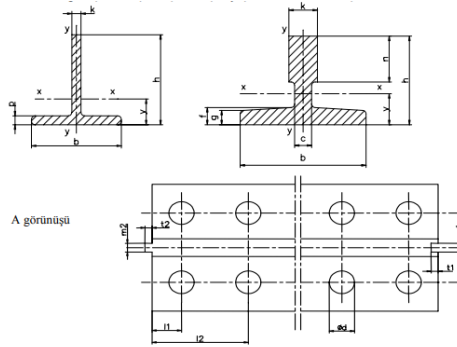
Tahrik kasnağı

Asansör motorunun şaftında alınan hareketi halatlara ileten ekipmanlardır. Çelik halatlı sistemlerde, tahrik kasnağı sürtünme prensibiyle işlev görmektedir. Bu nedenle, asansör standartları, tahrik kasnağı çapının halat çapının 40 katı olmasını gerektirmektedir. Örneğin, 8 mm halat çapı için 320 mm tahrik kasnağı çapı kullanılması zorunludur. Son zamanlarda, belirli sertifikasyonlara ve risk analizlerine dayanarak, 240 mm'lik kasnakların kullanılmasına izin verilmiştir. Bu durum, motor hızı açısından biraz rahatlama sağlamaktadır. Ancak, tam anlamıyla sorunu çözmek mümkün olmamıştır (Demiröz ve ark., 2015; TS EN 81-1, 2011). Kayışlı sistemler ile kasnak çapları 100mm ye kadar düşmektedir.

Kılavuz ray ve bağlantı elemanları

Asansör sisteminde kabin ve karşı ağırlığı dikey hareketlerde yönlendirmek, yatay hareketlerini en aza indirmek ve paraşüt düzeninin çalışması durumunda kabinin durdurulması amacıyla kullanılır. Kabin ve karşı ağırlığın düşey doğrultularını korur ve dönmesini engeller. Aynı zamanda, paraşüt düzeninin kabinin durdurulması için kullandığı elemanlar kılavuz raylardır. Genellikle soğuk çekme çelik T-profilleri tercih edilir. Karşı ağırlık için, gerilmiş yuvarlak profil çelik çubuktan veya açık profilden

yapılmış raylar kullanılabilir. Asansör kılavuz rayları ve bağlama pabuçları TS 4789 (4/1986) standardında ele alınmıştır. ISO 7465 standardında verilen soğuk çekilmiş ve işlenmiş raylar Şekil 2.9'da gösterilmiştir (İmrak ve Gerdemli, 2000).

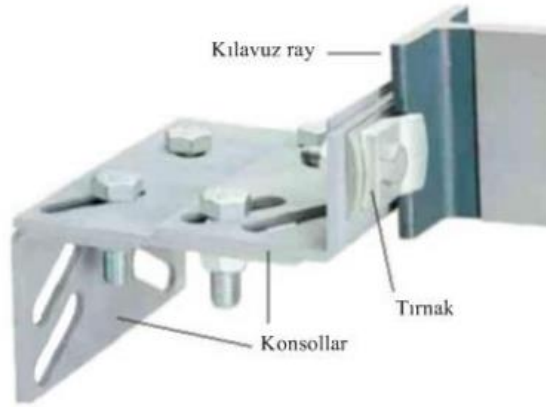


Şekil 2.9. Kılavuz raylar (İmrak ve Gerdemli, 2000)

Kılavuz raylarının başlıca görevleri şunlardır:

- Asansör kabininin ve karşı ağırlığın düzgün ve düşey hareketini sağlamak.
- Kabin ve karşı ağırlık arasındaki dengeyi korumak ve titreşimi önlemek.
- Kabin ve karşı ağırlığın özellikle acil durum frenlerinin devreye girdiği durumlarda güvenli bir şekilde durmasına yardımcı olmak.

Kılavuz rayları, genellikle T şeklinde çelik profilden üretilmektedir. Kılavuz raylarının boyutları ve şekilleri, asansörün taşıma kapasitesine, hızına ve diğer tasarım özelliklerine bağlı olarak değişir. Kılavuz rayları, asansör kuyu boşluğuna sabitlenir ve yapısal bir destek sağlar. Rayların düzgün ve paralel olması, asansörün düzgün çalışması ve konforlu bir yolculuk deneyimi için kritiktir. Şekil 2.10'da kılavuz ray, konsol ve bağlantı elemanları gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Kılavuz ray, konsol ve bağlantı elemanları (Atay, 2013)

TS EN 81-1'e göre kılavuz raylar E235B ve E275B olarak üretilir. Ray malzeme kodlarındaki “E” indisi, malzemenin elektro çelik olduğunu “235 ve 275” 16 mm kalınlığa kadar akma mukavemeti sınırının sırasıyla 235 N/mm² ve 275 N/mm² olduğunu. “B” ticari sunum kalitesini göstermektedir. Buna göre E235B çeliğinin çekme dayanımı, 340-470 N/mm², E275B çeliğinin çekme dayanımı ise 410-540 N/mm²'dir (Targıt, 2011).

Kılavuz ray bağlantı ekipmanları olan ray duvar konsolları St42 malzeme kullanılmaktadır. St42 malzemeler için akma mukavemeti 350 N/mm², tırnak cıvatalar CM45 malzemedan üretilmektedir. Cm45 malzemenin akma mukavemeti 530 N/mm² olarak belirlenebilir (Savaş, 2011).

2.3 Elektrikli Asansör Motorları

Asansör tahrik makinelerinde genellikle elektrik enerjisi ile çalışan sistemler tercih edilmiştir. Geçmişten bugüne kadar bu makinelerin işleyişinde aktif olarak asenkron motorlar ve bu motorların hızını azaltmak amacıyla eşleştirilmiş dişli redüktör sistemleri kullanılmaktadır. Ancak, asenkron motorların düşük verimliliği ve redüktörlerin neden olduğu enerji kayıpları göz önüne alındığında, enerji verimliliği açısından olumsuz bir durum söz konusu olmaktadır. Motor ve mıknatıs teknolojilerindeki ilerlemelerle birlikte, asansör sistemlerinde kullanılan motor çeşitliliği de literatürde artış göstermiştir. Son dönemlerde, SMSM tabanlı dişlisiz asansör tahrik sistemleri, sıklıkla incelenen ve tercih edilen konular arasında yerini almıştır.

Nadir toprak mıknatıslarındaki tedarik imkanının artması ve yâri iletken teknolojilerindeki gelişmeler ile SMSM'ler asansör tahrik makineleri için bir alternatif haline gelmiştir. SMSM'lerin asansör tahrik sistemlerinde redüktör gerektirmeden doğrudan tahrik yöntemi ile bağlanabilmesi, redüktörlerden kaynaklı kayıpların önlediği gibi aynı zamanda da düşük hacimler ile yüksek verim ve performans sunmaktadır. Literatürü inceldiğimizde asansör tahrik motoru olarak SMSM ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır.

1999 yılında Dae- Woong Chung ve ark. yüksek hızlı asansörler için sabit mıknatıslı motorlu yeni bir dişlisiz çekiş makinesi tahrik sistemi sunmuştur. Önerdikleri sistem ile yüksek verimlilik, daha fazla sürüş konforu ve minyatürleştirme gibi çeşitli iyileştirmeler sunmuşlardır. Çalışmalarında doğru akım (DA) bara gerilim regülasyonu, çift yönlü güç akışı ve azaltılmış giriş akımı harmonikleri ile kontrol edilebilir güç faktörü avantajları sağlaması açısından besleyici olarak 3 fazlı PWM doğrultucuyu tercih etmişlerdir. Sunulan sistemin sadece yüksek performanslı değil, aynı zamanda uzun ömürlü ve daha güvenilir olduğunu ifade etmişlerdir (Chung ve ark., 1999).

2001 yılında Ficheux ve ark. SIMINOR Ascenseurs ve Roma Üniversitesi tarafından ortaklaşa geliştirilen ve makine odası olmadan doğrudan sürücülü asansör sistemlerinde uygulama için eksenel akıllı SMSM tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Tasarlanan motor 5 kW, 95 d/d değerinde olup, mil yüksekliği 380 mm ve genel eksenel kalınlığı yaklaşık 80 mm'dir. Makine tasarımı, önerilen doğrudan tahrikli asansör düzenlemesi için benimsenen sıra dışı özelliklere ve orijinal üretim çözümlerine dayanmaktadır. Bu çalışmada prototip motorların başlıca boyutları ve özellikleri verilerek, prototip yapı üretilerek deneysel olarak sonuçlar da aktarılmıştır. (Ficheux ve ark., 2001).

2005 yılında Wang ve ark. düşük hızlı SMSM tasarımını üzerine çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada harmonik torkunun azaltılması, SMSM'lerin manyetik devre yapısı ilgili seçim ve asansör tahriki için düşük hızlı dişlisiz bir SMSM'nin SEY analizini önermişlerdir. Önerdikleri çalışmaları deneysel olarak da doğrulamışlardır. Motor az titreşim, düşük gürültü, sorunsuz çalışma, yüksüz kayıp, yüksek verimlilik ve 1 d/d gibi düşük bir hızda tam yüklü çalışma gibi avantajlara sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Tork

dalgalanmasını ve motorun titreşimini azaltmak için tasarım sürecinde önerdikleri yöntemlerin başarılı olduğunu aktarmışlardır (J. H. Wang ve ark., 2005).

2008 yılında Duru ve Demiröz, sabit mıknatıslı senkron motorların çalışma temellerini, kapalı çevrim hız denetimi tabanlı bir simülasyon ve farklı hızlarda SMSM tahrikli asansör sisteminin boyutlandırılmasını vermişlerdir. Ayrıca, asansörlerde kullanılan asenkron motorlar ile SMSM'leri karşılaştırmasını yapmışlardır. SMSM'lerin asenkron motorlara göre, etkin döndürme momenti, kat hizalamadaki kusursuz hassasiyeti, yumuşak kalkış ve duruş nedeni ile halat sıyırmalarının önlenmesi, yüksek enerji verimliliği, ses ve titreşim problemlerin azaltılması ve geleneksel asenkron motorlara kıyasla %40-%50 hacimde küçülme gibi avantajlara sahip olduğunu belirtmişlerdir (Duru ve Demiröz, 2008).

2012 yılında Cicalé ve ark. asansörlerin hareketinde kullanılmak üzere yüzeye monte mıknatıslı rotora sahip bir SMSM tasarım ve yapımını gerçekleştirmişlerdir. Uygulama gereksinimlerini karşılamak için tane yönelimli elektrik çeliği ile birlikte bir optimizasyon tasarım prosedürü kullanmışlardır. Tane yönelimli çeliğinin yüksek kalite performansı, düşük güçlü (4 kW), 16 kutuplu bir motor için bir stator çekirdeğinde uygun bir laminasyon kaykısı yöntemini kullanmışlar ve bir prototip gerçekleştirilmiş olup tipik çalışma koşullarında test etmişlerdir. Deneysel sonuçlar uygulama gereklilikleri ile uyumludur (Cicalé ve ark., 2012).

2016 yılında Anand ve Mahesh, makine ve değişken hızlı sürücünün gerçek sistem performansını göz önünde bulundurarak elektrikli sürücülerin ve sabit mıknatıslı makinelerin enerji tüketimini incelemişlerdir. Sabit mıknatıslı motorda, harmonik gürültüyü geleneksel endüksiyon motorlarının altındaki seviyelere bastırmak için optimum kontrol kullandıklarını, azaltılmış gürültü seviyeleri ve titreşim asansörlerde seyahat eden son kullanıcılar için daha konforlu bir seyahati ifade ettiklerini belirtmişlerdir. Geleneksel endüksiyon motoru için, kutup sayısı arttıkça güç faktöründe ve verimlilikte hızlı bir düşüş olması nedeniyle kompakt yapıda bir sınırlama olduğunu, ayrıca gerçek yükleme koşullarının bant genişliği altında asansörlerin optimizasyon kullanımını da incelemişlerdir (Anand ve Mahesh, 2016).

2016 yılında Küçükçalık çalışmasında, asansörlerde enerji sınıflandırması ve verimlilik üzerine yaptığı çalışmada elektrik motorlarının verimlilik üzerine sınıflandırmasını gerçekleştirmiştir. Tek hızlı asenkron redüktörlü, çift hızlı asenkron redüktörlü, sürücülü asenkron redüktörlü (AC-VVVF), sürücülü senkron redüktörsüz makineleri (PMSM-VVVF) düşük verimlilikten yüksek verimliliğe göre sıralanmıştır. Bu karşılaştırma seyahat akımları üzerine gerçekleştirilmiştir. Yapılan karşılaştırma sonunda PMSM-VVVF senkron redüktörsüz yapının aynı kapasitede diğer redüktörlü yapılara göre %30 daha verimli olduğunu göstermiştir (Küçükçalık, 2016).

2017 yılında Krasnov ve ark. SMSM'nin rotorunun mutlak açısal konumunu belirleyen yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma ile rotor konumunun hesaplanması hedeflenmiştir ve algoritmanın en büyük avantajının motor parametreleri olmadan çalışmasını ifade etmişlerdir. Akım genliklerinin sabitlenmesi ile seri gerilim darbeleri uygulayarak rotor başlangıç konumunun belirlenmesi yöntemi sunulmuştur. Rotorun açısal konumunun belirlenmesinde elde edilen doğruluk değerinin sınırlar içinde olduğunu ve ilk rotor konumunun belirlenmesi için geliştirilen prosedürün toplam süresi on saniyeden az olduğunu belirtmişlerdir. Basitlik ve algoritma verimliliği, SMSM rotorunun ilk konumunun belirlenmesi için simülasyon ile elde edilen sonuçlar, deney sonuçları ile doğrulamışlardır (Krasnov ve ark., 2017).

2017 yılında Kim ve ark. dişlisiz bir asansör tahrik motorunun titreşimini azaltmak amacıyla kutup oluklarının sayısını seçmek için geliştirilmiş bir yöntem sunmaktadır. Prototipin titreşim kaynağı radyal elektromanyetik kuvveti, analitik türetme yoluyla incelenmiştir. Bu çalışma için stator oluk etkisi de dahil olmak üzere armatür reaksiyonu ve sabit mıknatıs alanları içindeki veya arasındaki etkileşimlerden kaynaklanan radyal elektromanyetik kuvvetin titreşim mertebelerini ve frekanslarını incelemişlerdir. Sonuç olarak, tasarım sürecinde kutup/oluk kombinasyonlarının analitik yöntemle nasıl belirlendiğini göstermişler. Önerdikleri yöntem ile test edilen motorda meydana gelen titreşimde %77.27'lik bir iyileştirme yapılabildiği sonucuna ulaşmışlardır. Asansörde olduğu gibi titreşimin kullanıcı ve sistem üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğu uygulamalar için motorun kutup/oluk kombinasyonlarının seçilmesinde yardımcı olabildiğini ifade etmişlerdir (Kim ve ark., 2017).

2018 yılında Yetiş ve ark. Asansör tahrik makineleri için kullanılacak gömülü olarak yerleştirilen ferrit mıknatıs yapılı SMSM ile NdFeB mıknatıslı SMSM ile karşılaştırılmıştır. Ferrit mıknatıs içeren motor, tork dalgalanmasını azaltırken maliyeti ve ağırlığı en aza indirmek için farklı oluk/kutup kombinasyonları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Parametrik bir optimizasyon süreciyle, ferrit mıknatıslı motorunun tork dalgalanma oranı %5'in altına düşürülmüştür. Ayrıca, ferrit kullanımı sayesinde, mıknatıs maliyeti NdFeB motoruna kıyasla %60 azaltılmıştır (Yetiş ve ark., 2018).

2018 yılında Bakhtiarzadeh ve ark. yaptıkları çalışmada, 1 m/s doğrusal hız ile sekiz kişiyi kaldırabilen bir asansörde kullanılmak üzere SMSM incelemişlerdir. Kutup sayısı, yük, giriş gerilimi ve ana boyutlar (rotor ve statorun iç ve dış çapı ve uzunluğu) ortak olan 5 adet SMSM tasarlamış ve karşılaştırmasını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaların da stator sayısının ve stator sargısı yapısının etkilerini incelemişlerdir. SEY ile analiz edilen yapılarda indüklenen gerilim harmonikler ve tork çıkışı açısından sonuçlar kıyaslanmıştır. Sonuç olarak 36, 48, 54 ve 60 stator oluklu yapılardan hem verimlilik hem de dalgalanma açısından, 60 oluklu motor yapısını diğer tiplere göre daha avantajlı olduğunu göstermişlerdir (Bakhtiarzadeh ve ark., 2018).

2018 yılında Jae-Han Sim ve ark. ultra yüksek hızlı (61 m/s) asansör doğrudan tahrik uygulamaları için çözüm olarak üçlü üç fazlı yüzeye montajlı SMSM önermiş ve çoklu fiziksel tasarım prosedürünü açıklamıştır. Tasarım prosedürü ile sadece gerekli çıkış gücüne ulaşmaya değil, aynı zamanda yolcuların sürüş konforunu iyileştirmek için düşük frekanslı radyal titreşimi ve tork titreşimini azaltmayı da amaçlamıştır. Sargı faktörü, radyal kuvvetin frekansı ve boşluk sayısı, ivmelenme torku ve bitişik setler arasında optimum faz kayması gibi parametreleri göz önünde bulundurarak 20 elektriksel faz kayması derecesine sahip 144 oluklu ve 40 kutuplu kombinasyon seçilmiştir. Özel doğrulama ve ayrıntılı tasarım sonuçları detaylıca verilmiştir. Tasarlanan 144 oluklu ve 40 kutuplu optimum modelin prototip sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Sim ve ark., 2018).

2020 yılında Jyh-Wei Chen ve ark. asansör uygulamaları için SMSM'nin bir faz açısının kontrol stratejisini önermişlerdir. Asansörlerde hem hız hem de konum kontrolüne ihtiyaç duyulduğu için önerilen stratejide, beklenen rotor konumu, kontrol sistemi için bir geri besleme açısı olarak kullanılan bir referans açısı üretmesi için DSP kullanılmıştır. Bu

yöntemde rotor akı vektörü, enkoder tarafından toplanan gerçek rotor akı konumu ile karşılaştırmış ve açı farkı, akı üreten ve tork üreten akım bileşenlerini kontrol etmek için kullanılmıştır. Deney sonuçları, kontrol edilen hız eğrisinin geleneksel yönteme kıyasla kararlı ve hassas olduğunu göstermektedir. Bu yöntemin kullanıcılar için konfor sağladığını ifade etmişlerdir (Chen ve ark., 2020).

2020 yılında Soyaslan asansör tahrik sistemleri için dıştan rotorlu bir SMSM tasarım ve SEY analizleri ve prototip üretimini gerçekleştirmiştir. 4 kW gücündeki asansör makinesi, 1m/s kabin taşıma hızına ve 240 Nm anma torkuna sahiptir. 18/20 oluk kutup yapısına tasarlanan dıştan rotorlu SMSM yapay arı kolonisi (ABC) algoritması kullanılarak motor performansında iyileştirmeye gitmiştir. Elde ettiği SEY sonuçları ile prototipi üretilen dıştan rotorlu asansör tahrik makinesinin deney sonuçları uyushmaktadır (Soyaslan, 2020).

2021 yılında Rangarajan ve ark. yaptıkları çalışmada, düşük torklu/kısa shaftlı servo sürücüler için mevcut olan geleneksel aktif sönümleme şeması ile uygun bir kutup çiftinin artırılmasıyla sönümleme katsayısının uyarlanabilir hale getirildiği yeni bir aktif sönümleme şeması önermişlerdir. Kutup konumu, mevcut kontrolörün dinamikleri göz önünde bulundurularak makul bir durum belirlenmiştir. Önerdikleri kontrol şeması, 2:1 askı tabanlı SMSM tahrikli dişlisiz asansör sistemi için simülasyonlar aracılığıyla doğrulanmıştır (Rangarajan ve Agarwal, 2021).

2021 yılında Mirnikjoo ve ark. dişlisiz asansör sistemlerinde kullanılmak üzere yüzey mıknatıslı bir SMSM tasarlamış ve Taguchi optimizasyon yöntemi ile maksimum zıt EMK ve minimum vuruuntu momenti olmak üzere iki hedef göz önünde bulundurularak optimize etmişlerdir. Optimizasyonda ideal çözüme benzerliğe göre tercih sıralaması tekniğini kullanan bir karar verme algoritması kullanmışlardır. Kullanılan yöntemin etkinliği, SEY aracılığıyla elektromanyetik performans incelemesi ile değerlendirilmiştir. Önerilen optimum yüzey montajlı SMSM tasarımının vuruuntu momenti 0.61 Nm'de minimize edildiği, zıt EMK rms değerinin ise 219.33V'a eşit olduğu gösterilmiştir. Önerilen çok amaçlı tasarım yaklaşımının etkinliğinin doğrulanması simülasyon sonuçları ile teyit edilmiştir (Mirnikjoo ve ark., 2021).

2021 yılında Avşar ve ark. 4.5 kW gücünde 400 d/d nominal hızında kayış ile tahrikli asansör sistemleri için içten rotorlu SMSM'nin tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Asansör çekiş motorlarında göz önünde bulundurulması gereken iki önemli kriter olan, yüksek verimlilik ve yolcu konforunu sağlamak adına çalışma geliştirmişlerdir. SMSM'nin elektriksel ve manyetik modellemesi yapılmıştır. Elde edilen limit değerlerine dayanarak ve 2B SEY analizleri kullanılarak, oluk açıklığı, mıknatıs kalınlığı, mıknatıs alanı/kutup alanı, stator dış kalınlığı ve hava aralığı gibi parametrelerin GA yöntemi ile optimizasyon gerçekleştirmişlerdir (Avsar ve ark., 2021).

2022 yılında Rangarajan ve ark. yaptıkları çalışmada, kapalı çevrim kontrolör parametrelerinin ayarlanması, halatlı asansör sistemlerinde motor ve yük doğrudan değil, sonlu esnekliğe sahip metalik halatlar aracılığıyla birbirine bağlı olduğundan dolayı zahmetli bir süreç olduğunu ifade etmişlerdir. Bu tür sistemlerde açık çevrim hız kontrol tekniği olduğu için volt/frekans (v/f) tabanlı hız kontrolü kullanılmasının faydalı olacağını belirtmişler. Asenkron motor sistemlerinin aksine, SMSM tahrikli asansör sisteminin v/f kontrolü, sönümleme torku eksikliği nedeniyle kararsız hale gelebileceğini ve v/f kontrollü SMSM sürücüler için mevcut olan geleneksel aktif sönümleme teknikleri, yük torkunun dinamiklerini dikkate almadıkları için asansörler için kararlılık sağlayamayabileceğini ifade etmişlerdir. Çalışmalarında bu sorunu çözmek için SMSM'nin stator frekansının rotorun hızlanma torkundaki ve hız hatasındaki bozukluğun orantılı olarak modüle edildiği yeni bir aktif sönümleme şeması önermişlerdir. Bu şema, sistemi stabilize etmek, titreşimleri en aza indirmek ve referans yörünge takibini sağlamak için yalnızca iki kontrol kazanımının çevrimdışı ayarlanmasını içermektedir. Önerilen kontrol şemasının performansı MATLAB simülasyonları aracılığıyla doğrulanmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen şemanın sistemi stabilize edebildiğini, referans yörünge takibini başarabildiğini ve açık döngü v/f kontrolü altında bile yolcuların sürüş konforunu sınırlar içinde tutabildiğini göstermişler. Ayarlanması gereken parametre sayısı azaldığından, sistemin güvenilirliği artmakta ve asansörlerin devreye alınma süresi önemli ölçüde kısaldığını göstermişlerdir (Rangarajan ve Agarwal, 2022).

2.4 Asansör Aktarma Elemanları

Asansör sistemlerinde kullanılan motorlar kadar hareketin aktarılmasında kullanılan mekanik bileşenler de önem arz etmektedir. Motorda üretilen dönme hareketini asansörün hareket eksenine yani dikey eksene taşımak için güncel literatüre göre iki yöntem bulunmaktadır. Bunlar çelik halatlı taşıyıcılar ve bir kılıf içerisine yerleştirilmiş çelik halatlı (kayışlı) sistemlerdir.

2012 yılında Huaming Lei ve ark. asansörde kullanılan kayışların durumunu kontrol etmek için yeni bir yöntem önermektedir. Bu yöntem, kayışın içine yerleştirilmiş halatların elektrik direncini ölçerek çalışmaktadır. Kayışın aşınma ve yorulma seviyesini anlamak için bir model geliştirilmiş ve bu model, direnç değişikliklerini incelemektedir. Kayışın ne kadar dayanıklı olduğunu belirlerken, sıcaklık ve kayışın ne kadar çok hareket ettiği gibi faktörler de göz önünde bulundurulmuştur. Yaptıkları deneyler, bu yöntemin, asansör kayışının en riskli kısmını ve kayış boyunca diğer tüm bölümlerin durumunu etkili bir şekilde tahmin edebildiğini kanıtlamıştır (Lei ve ark., 2012).

2015 yılında Demiröz ve ark. dişlisiz halatlı ve kayışlı asansör makinelerinin karşılaştırmasını yapmıştır. Geleneksel çelik halatlı sistemlere kıyasla kayışlı sistemler daha iyi tahrik yeteneği, daha büyük taşıma kapasitesi, korozyona karşı koruma, uzun ömür, sessizlik ve konfor, az aşınma gibi avantajlarını ifade etmiştir (Demiröz ve ark., 2015).

2018 yılında Şahin dört kişilik bir elektrikli insan asansörünün askı halatının mukavemet ve ömür analizleri yapılmıştır. Monte Carlo Simülasyon yöntemi kullanılarak yapılan analizler sonucunda, halatın mukavemet ve ömür değişkenleri için uygun dağılım türleri belirlenmiştir. Analizler, belirsizlik koşullarını da dikkate alarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, askı halatındaki belirsizliklerin emniyet ve güvenlik açısından dikkate alınması gerektiğini göstermiştir (A. Şahin, 2018).

2020 yılında Oya ve ark. asansör kayışı arızalarının erken tespitine yönelik bir tasarım yaklaşımını sunmaktadır. Önerilen sistemleri, hataların varlığını ve yerini tespit etme amacıyla zaman-domain reflektometre tekniklerine dayanmaktadır. Önerilen deteksiyon

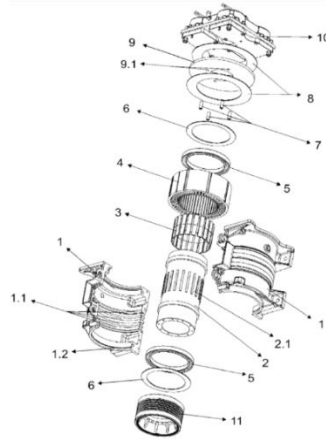
devresi kablonun empedans değişikliklerini ölçmektedir. Önerilen sistem asansöre bağlı düşük maliyetli bir veri toplama düzeneğidir (Oya ve ark., 2020).

2022 yılında Fenercioğlu ve ark. dişlili ve dişlisiz asansör mekanizmaları hakkında bilgiler sunmuşlardır. Asansörlerde kullanılan aktarma elemanları olan kayış ve çelik halatlı sistemler hakkında kapsamlı olarak ifade etmişlerdir. Ticari olarak kullanılan 800 kg taşıma kapasiteli halatlı ve kayışlı asansör makinelerinin karşılaştırmalarını yapmıştır. Kayışlı sistemlerin halatlı sistemlere göre avantajlarına değinmiştir (Fenercioğlu ve ark., 2022)

2023 yılında Soyaslan ve ark. çift taraflı bir kayışlı asansör çekiş motorunun detaylı tasarımı ve prototip üretimi yapmışlardır. Motorun hafif, kompakt ve döküm gövdeye ihtiyaç duymadan üretildiği ifade edilmiştir. Statik yükler, rulman ömrü, kayış ve kasnak seçimi gibi konular incelenmiştir. Ayrıca yapılan SEY analizleri sonucunda motorun istenen güvenlik sınırları içinde olduğu tespit edilmiştir. Üretilen prototip motor üzerinde yapılan testlerle tasarım doğrulanmıştır. Çalışma, kayışlı asansör motorlarının tasarım ve üretim süreçleri hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca, yeni bir perspektif sunarak döküm işlemleri olmadan ve yüklerin eşit dağılımını sağlayan kayış yerleşimleriyle asansör endüstrisine yeni bir yaklaşım sunduklarını ifade etmişlerdir (Soyaslan ve ark., 2023).

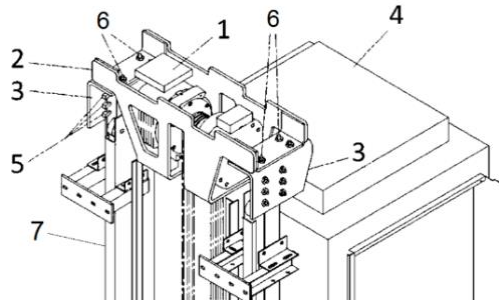
2.5 Raya Montajlı Asansörler Hakkında Alınan Patentler

Tezin konusu ile ilgili hem ulusal hem de uluslararası patent taramaları yapılmıştır. Yapılan araştırmalarda özellikle motor gövdesinin üretimi ve montajı konularını içeren patentlere yoğunlaşmıştır. Şekil 2.11’de gösterilen 2015/14894 başvuru numaralı patent çalışmasında içten rotorlu sabit mıknatıslı bir senkron motorun rotoru ile ilgili bir tasarım mevcuttur. Önerilen tasarımda rotor boru tipindedir ve kasnak direkt rotora bağlıdır. Rulman rotoru üstten sarmaktadır ve gövdeye yataklama yapılmıştır. Milin kullanılmadığı tasarımda, motor gövdesi döküm ile üretilmiş iki parçadan oluşmaktadır. Motorun üretimi için döküm yöntemine ve motorun montajı esnasında bir motor şasisine ihtiyaç duyulmaktadır (Akış, 2015).



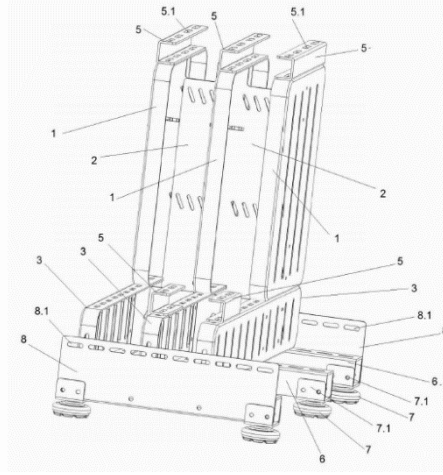
Şekil 2.11. Sabit mıknatıslı boru tip rotorlu senkron motor (Akış, 2015)

Şekil 2.12’de gösterilen 2015/03607 numaralı 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. Buluş ile motor tahrik sisteminin ağırlığının büyük bir bölümü raylara binmekte ve betona yapılan bağlantı problemlerinin önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. Ancak motorun raylar üzerine montajı ancak çelik motor şasisi ile mümkün olmaktadır (Latif, 2015).



Şekil 2.12. Makine dairesiz asansörde dişlisiz tahrik motorunun kuyu içine montaj tipi (Latif, 2015)

Şekil 2.13’teki 2018/17757 numaralı buluşta asansör motorunun üzerine konularak sabitlendiği farklı bir şasi tasarımı ele alınmıştır. Dikey destek gövdelerinin kenarları yekpare yapıda olduğundan önerilen tasarımın motorun çalışması esnasında ortaya çıkabilecek kuvvetlere karşı daha mukavemetli olacağı belirtilmiştir (Ekici, 2018).



Şekil 2.13. Asansör motorunun konumlandırması ve sabitlemesi amaçlı kullanılan şaside geliştirme (Ekici, 2018).

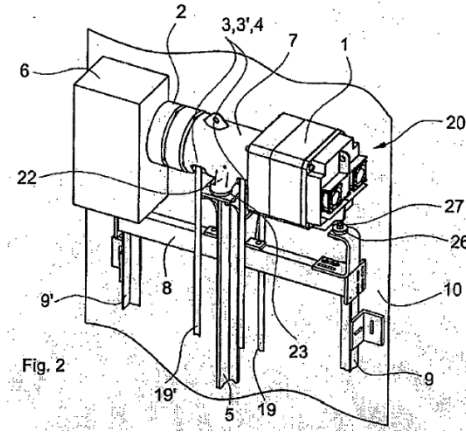
Uluslararası patent başvuruları incelendiğinde; bu alanda faaliyet gösteren firmaların patentlerinin çoğunlukta olduğu görülmüştür. Kayışlı asansör sistemleri ile ilgili ilk patent US1011423 numaralı patenttir. Bu patentte kabin ve karşı ağırlık, elektrik motoru ve kasnaklara bağlanan kayış sistemi ile hareket ettirilmektedir. Daha sonra üretilen birçok asansör tahrik sisteminde benzer yapı kullanılmıştır (Gale, 1911). İlk üretilen kayışların mukavemetlerinin düşük olması ve asansör yüklerinin artması sonucu kayış mekanizmaları yerini çelik halatlı asansör sistemlerine bırakmıştır. Ancak çelik halatlarda meydana gelebilecek kırılmaları önleyebilmek için tahrik kasnağı ile halat çapı arasında 40:1 oranının sağlanması zorunlu tutulmuştur (TS EN 81-1, 2011). Günümüzde yapılan risk analizleri sonucu, kullanılabilecek en küçük kasnak çapı 240 mm'dir. Dolayısıyla bu çaplar direkt tahrikli dişlisiz asansör motorlarında daha düşük hızlarda daha yüksek anma torklarının elde edilmesini zorunlu kılmıştır. Yüksek hızlarda düşük torklar ile aynı yükleri hareket ettirebilmek için kasnak çaplarının daha da düşürülmesi gerekmektedir. Uygun ve sertifikalandırılmış, çelik özlü, kauçuk malzemeden yapılmış kayışların ticarileşmesi sonucu halatlardaki kırılma problemleri ortadan kaldırılmış ve kasnak çapları daha düşük değerlere çekilebilmiştir (Kone, 2013). Bu sayede aynı yükleri hareket ettirecek motor boyutları da küçülmüştür. Şekil 2.14'te asansör tahrik sistemlerinde kullanılan kayışın içyapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Asansör tahrikinde kullanılan kayışın içyapısı (Demiröz ve ark., 2015)

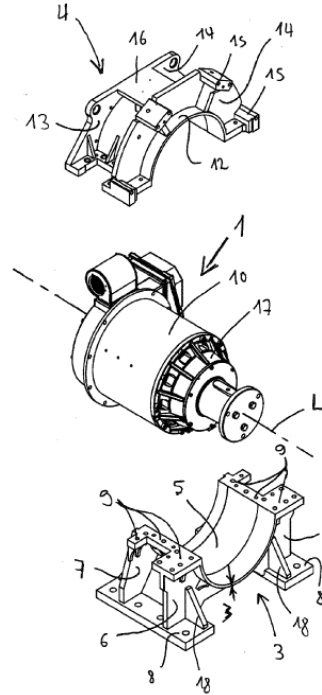
US2003/0121729A1 (Heinz G, 2003), US2011/0000746A1 (Huikko R. P., 2008) ve 2010/04005 numaralı patentlerde öne sürülen asansör tahrik sistemleri için yüksek taşıma kapasiteli kayışlar; halat kalınlığından daha geniş, V şekilli uzunlamasına oluklara sahip olup epoksi, polyester, fenoik ve vinil ester reçineleri ile karıştırılarak oluşturulmaktadır. Kayışla tahrik edilen sistemlerin en önemli avantajlarından bir diğeri ise halat ağırlıklarından daha hafif olmalarıdır. Bu sayede özellikle yüksek binalarda halat ağırlığı yüzünden yaşanan problemlerin önüne geçilmekte ve 1000 m yükseklikteki binalarda dahi kayışlı tahrik sistemleri kullanılabilir. 800 metrelik bir binada halatlı sistemler ile kayışlı sistemlerinde harcanan enerji miktarları kıyaslandığında, kayışlı sistemlerde %40 daha az enerji harcandığı görülmüştür (Kone, 2013).

Şekil 2.15'te gösterilen EP1741661B1 numaralı patentte motor gövdesi döküm yöntemiyle üretilmekte ve gövdeden raya montaj yapılarak motor ağırlığının büyük bir bölümü raya aktarılmaktadır. Bu patentte motor gövdesi motor şasisi görevi üstlenmektedir. Önerilen tez de motor gövdesinin motor şasisi olarak kullanılması planlanmaktadır. Önerilen tezde üretilecek tümleşik sistemin bahsedilen patentten üstünlüğü ise motor gövdesinin üretimi esnasında döküm işlemine ihtiyaç duyulmayacak olmasıdır (Fischer, 2003).



Şekil 2.15. Bir asansör için tahrik tertibatı ve tahrik tertibatını takma yöntemi (Fischer, 2003)

Şekil 2.16'da gösterilen EP2871147A1 patentleri motor gövdesinde ve montajında yapılan yenilikleri içermektedir. EP2871147A numaralı patentte ise motor gövdesi modüler olacak şekilde 2 parça olarak üretilmektedir. 2015/14894 numaralı patentle benzerliği bulunan yapı için de bir motor şasine ihtiyaç duyulmakta ve gövdenin üretimi yine döküm yöntemiyle yapılmaktadır (Gessner R., 2013).



Şekil 2.16. boru şeklinde motorlu ve bölünmüş motor montajlı asansör (Gessner R., 2013).

Yapılan patent araştırması sonucu tekniğin bilinen durumları ortaya koyulmuştur. Kısaca özetlemek gerekirse;

- Asansör motorlarının çoğunun kuyu içine montajı için motor şasine ihtiyaç duyulduğu ve motor üretim süreçlerinde döküm yöntemi kullanıldığı görülmüştür.
- Kayışlı makineler 2013 yılından itibaren geliştirilen mukavemetli kayışlar ile sektörde kullanılmaya başlanmış olsa da hala halatlı motorların çok daha yaygın olduğu tespit edilmiştir.
- Motor şasisi olarak motor gövdesinin kullanıldığı bir adet patent tespit edilmiş ancak bu buluşta ürünün üretim süreçlerinde döküm yöntemine ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kayışlar tasarımda tek parça halinde akmaktadır.

Sonuç olarak; önerilen motor sistemi sayesinde, üretim süreçlerinde döküm yöntemine ihtiyaç duyulmayan ve motor gövdesinin aynı zamanda motor şasisi olarak da kullanılacağı bir tasarım ortaya konmuştur. Bu yönüyle, önerilen tez konusunun patentlenebilir olduğu öngörülmektedir.

3 MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, dişlili makineler, dişlisiz makineler, halat ile tahrik edilen asansör makineleri ve kayış ile tahrik edilen asansör makineleri hakkında bilgiler sunulmuştur. SMSM'lerin yapıları, farklı topolojiler, asansör tahrik makinelerinde kullanılacak stator, rotor, sargı ve mıknatıs gibi malzemelerin belirlenmesi, çıkış denklemleri, manyetik ve eşdeğer devre modellemeleri, kayıplar, analitik hesaplamalar, vuruş momentini azaltmaya yönelik kayk çalışmaları ve oluk/kutup seçimi gibi konulara değinilmiştir. Asansör kuyusundaki statik yükler belirlenmiştir. Fren, enkoder, kayış ve kasnak seçimi, tasarım süreçleri ve deney düzeneklerinin özellikleri de bu bölümde ele alınmıştır. Yapısal ve elektromanyetik analizler için kullanılan SEY analizleri, elektromanyetik analizler için kullanılan optimizasyon yöntemleri ve GA yöntemi gibi konular hakkında bilgiler sunulmuştur.

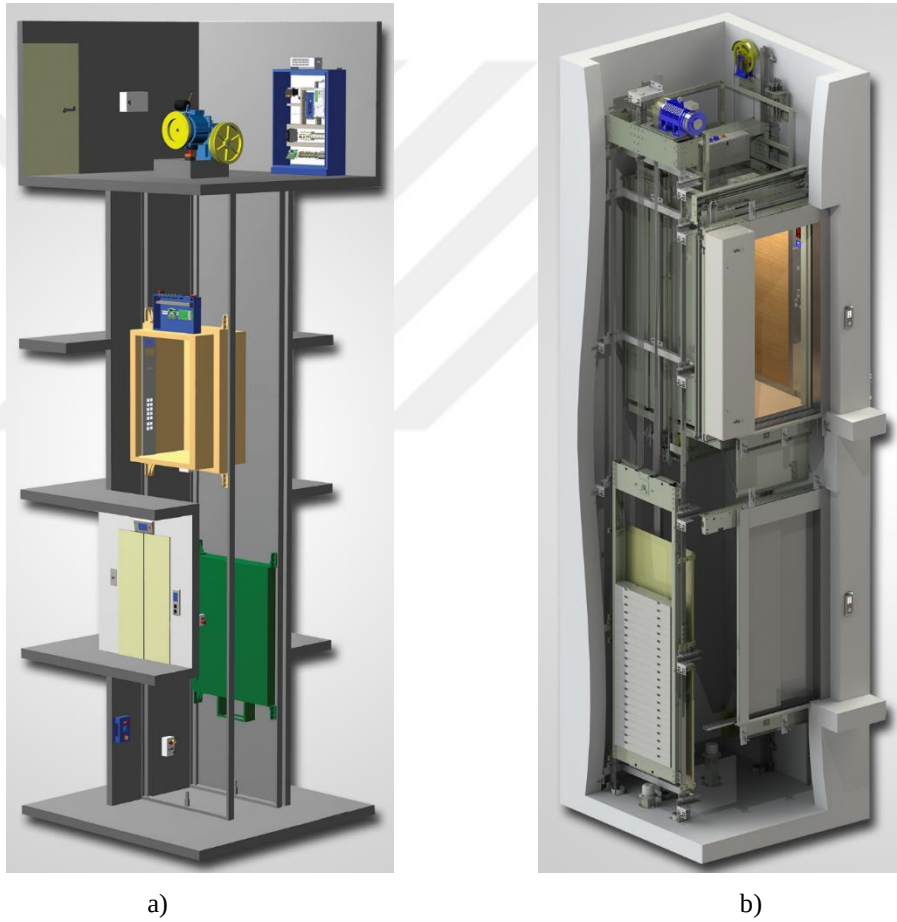
3.1 Elektrikli Asansör Makineleri

Asansörler tahrik makineleri için kullanılan elektrik motoru, tahrik kasnağı, motor freni ve enkoder gibi bileşenlere sahiptir. Tahrik yöntemine göre dişlili ve dişlisiz makineler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Her iki makine yapısında da çelik halatlar kullanılarak çekiş sağlanır.

3.1.1 Dişlili ve Dişlisiz Asansör Makineleri

Elektrikle çalışan dişli ve dişlisiz asansör sistemleri, günümüzde en yaygın kullanılan asansör türlerindendir. Dişli çekişli asansörler, şanzımana sahip motorlar kullanılmaktadır. Genellikle asenkron motorlarla bu işlev gerçekleştirilir. Dişliler, hareketi sağlayan halatları kontrol eden makaraya güç iletilmektedir. Dişlisiz çekiş sistemine sahip asansörler ise, hız düzenlemesi için ekstra bir dişli mekanizması gerektirmemektedir. Direkt sürücülü dişlisiz asansör motorları sayesinde motor verimliliği önemli ölçüde artmıştır. Bu tür motorlar, düşük hızlarda bile yüksek tork sağlama kapasitesine sahiptir (Demiröz ve ark., 2015). Dişli asansör sistemlerinin genel kullanımı göz önüne alındığında, bu tür sistemlerin makine odalarına ihtiyaç duyması binalar için ek maliyete ve alan kullanımına neden olmaktadır. Bununla karşılaştırıldığında, dişlisiz asansör sistemleri, ek makine dairelerinin gereksinimini

ortadan kaldırarak, çelik konstrüksiyonlar (makine şasisi) vasıtasıyla kılavuz raylara ve konsollara bağlantı imkânı sağlamaktadır. Bu yaklaşım, daha verimli ve ekonomik bir çözüm sunarak, asansör sistemlerinin modern yapılar ve yüksek katlı binalar için daha uygun hale gelmesine olanak tanımaktadır. Şekil 3.1'de, dişli ve dişlisiz asansör motorları ile makine dairesi ve makine dairesiz asansör sistemlerinin genel görünüşleri sunulmaktadır. Bu görsel karşılaştırma, her iki asansör sistemi arasındaki temel yapısal farklılıkları ve bileşenleri açıkça ortaya koymaktadır. Bu sayede, asansör sistemlerinin işleyişine ve binalar için uygunluklarına dair daha iyi bir anlayış elde edilebilir.



Şekil 3.11. Dişli ve dişlisiz makine daireleri a) Makine dairesi dişli ve b) Makine dairesiz dişlisiz asansör (Soyaslan, 2020)

Asenkron motorlar dişli asansörlerde tercih edilirken, dişlisiz asansör sistemlerinde ise SMSM'ler yaygın olarak kullanılmaktadır. Dişlisiz asansörlerde bulunan tahrik motorları yüksek torklu ve düşük hızlı özellikler gösterir. Bu tür motorlarda, tahrik kasnağı doğrudan motor milinin ucuna monte edilir ve kasnak ile motor mili arasında redüktör mekanizması bulunmaz. Modern dişlisiz asansör sistemleri, hızlarını 20 m/s'ye kadar

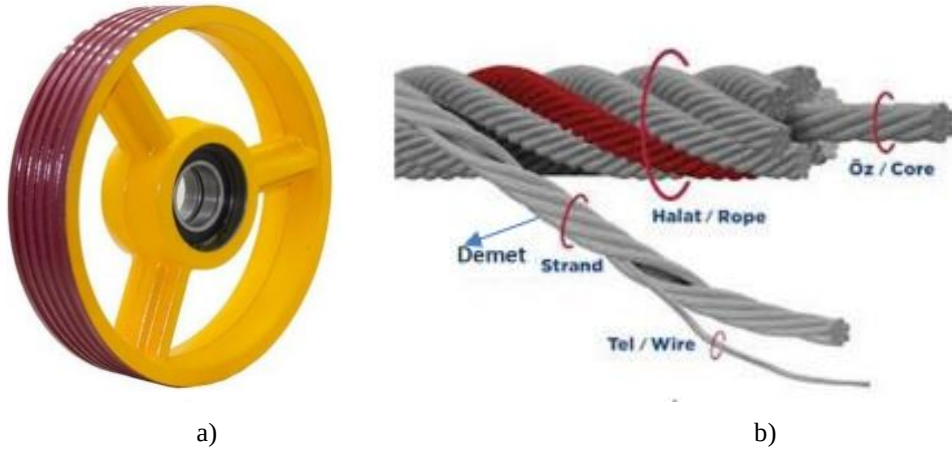
artırabilmektedir. Enerji verimliliği söz konusu olduğunda, dişlisiz makineler daha avantajlıdır (Soyaslan, 2020). Şekil 3.2’de dişlili ve dişlisiz asansör tahrik makinesi resimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Asansör tahrik makineleri a) Akış ZF102 dişlili asansör makinesi b) Akar SMT-200AC-15 dişlisiz makine

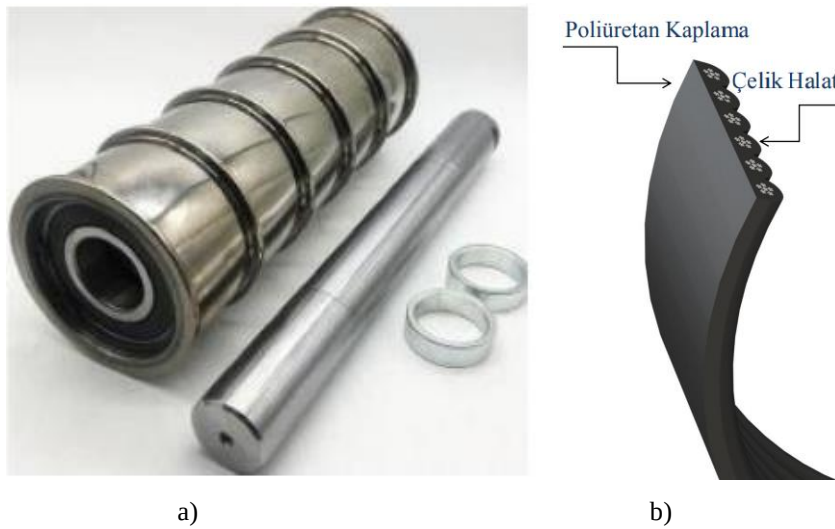
3.1.2 Halatlı ve Kayışlı Asansör Makineleri

Günümüzde elektrik ile çalışan dişlisiz asansörler halatlı veya kayışlı olarak iki gruba ayırabiliriz. Dişlisiz asansör motorlarında, asansör kabini ve karşı ağırlık halatlar veya kayışlarla bağlı makaralar tarafından hareket ettirilir. Halat ve kayış çekiş sistemlerini incelediğimizde halatlı asansörler, asansör kabini ve karşı ağırlığı taşımak için çelik halatlar kullanır. Bu halatlar, elektrik motoruna bağlı makaralar aracılığıyla hareket ederler. Halatlı asansörler, genellikle yüksek katlı binalarda kullanılır ve yüksek hız, kapasite, enerji verimliliği ve düşük bakım maliyeti gibi avantajlar sunar. Sürücü makarası (kasnak) ile halat çapı arasında 40:1 oranı esas alınarak, çelik halatlarda kırılma riski en aza indirgenir (Demiröz ve ark., 2015). En küçük çapta üretilen asansör halatları 8 mm çapında olduğundan, asansör sektöründe üretilen kasnaklar en az 320 mm çapında olmalıdır. Özel sertifikalar ve risk analizleri yapma koşulu ile 240 mm kasnaklar kullanılmaktadır. Bu kasnak çapları nedeniyle, asansör motorlarında yüksek tork gereksinimi ortaya çıkmaktadır (Fenercioğlu ve ark, 2022). Şekil 3.3'te, çelik halatlar ve bu halatların bağlandığı kasnaklı asansör makineleri gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Çelik halatlı sistemler a) Halat tahrik kasnağı b) Asansör çelik halatı

Günümüzde dişlisiz makinelerde, çekiş işlemini gerçekleştirmek için hem çelik halatlar hem de çelik özlü kauçuk veya poliüretan (PU) kaplamalı çelik halatlar (kayış) sistemleri kullanılabilmektedir (Demiröz ve ark, 2015). Bu sistemler, düşük çaplı çelik halatların yatay ekseninde toplanması ile oluşturulmuştur. Bu kasnaklar 100 mm çaplara kadar küçültülebilmektedir. Şekil 3.4'te kayış kasnağı ve kayış gösterilmektedir. Bu alternatif sistemler, asansör sektöründe daha düşük bakım gereksinimi ve sessiz çalışma gibi avantajlar sunarak, çelik halatların yerini almaya başlamıştır (Fenercioğlu ve ark., 2022).

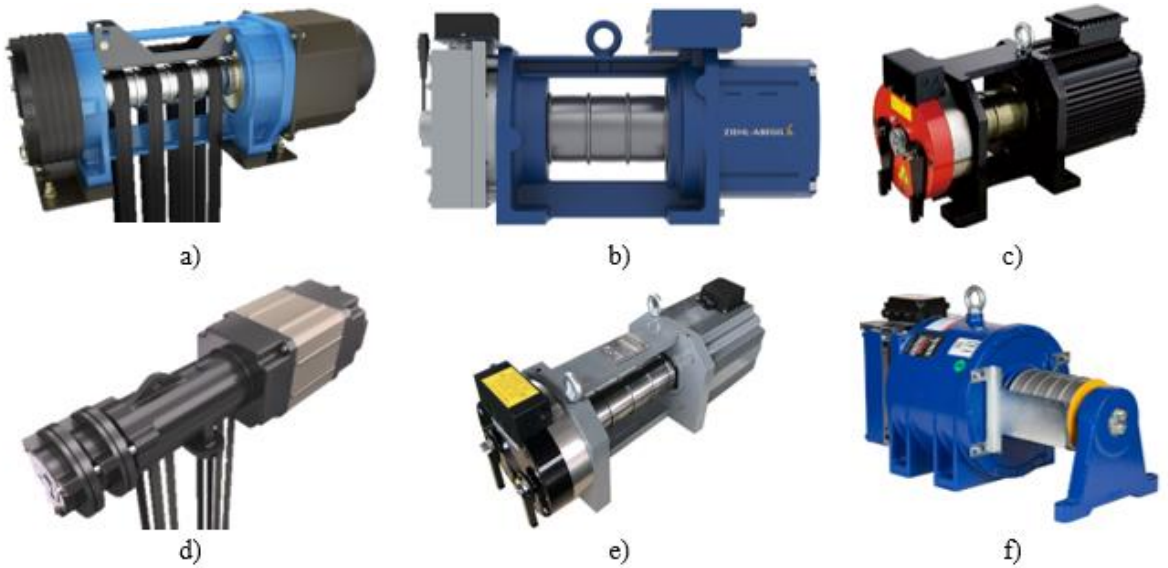


Şekil 3.14. Kayışlı sistemler a) Kayış kasnağı b) PU kaplamalı çelik halatlar

Kayışların geleneksel çelik halatlara göre avantajları

- Kayış ile tahrik kasnağı arasında yüksek sürtünmeden dolayı çelik halatlı sisteme oranla daha iyi tahrik özelliği sağlar.
- Tahrik kasnağının küçülmesi, aynı kabin taşıma kapasitesi ve kabin hızı için SMSM motorlarda yüksek hız düşük tork imkânı sunar.
- Kayışlı çelik halatlar kauçuk kaplı oldukları için hava ile temas etmez ve korozyona uğrama olasılıkları daha azdır.
- Çelik halatlarda olduğu gibi halat ile kasnaklar doğrudan temas hâlinde olmadığından daha uzun ömürlüdür.
- Çelik halatlar ile kasnak teması (metal teması) titreşime ve gürültüye neden olmaktadır. Kayış sisteminde bu temas olmadığından titreşim ve gürültüden arındırılmıştır. Bu sayede yüksek yolcu konforuna olanak sağlanmaktadır.
- Kayışların kasnak aşınmaları çelik halatlı sistemlere göre oldukça düşüktür.

Şekil 3.5'te ticari olarak kullanılan bazı dişlisiz kayış tahrikli makineleri gösterilmektedir. Genel olarak makine yapıları incelendiğinde kasnaklar motor bloğu ile fren bloğu arasında yer almaktadır. Bazı ürünler ise kasnaklar dişlisiz halatlı makinelere benzer olarak motor bloğunun hemen önünde yer almaktadır.



Şekil 3.15. Kayışlı asansör makineleri a) Otis-Gen2, (b) Ziehl-Abegg ZAtopx, c) Faxi 100A, d) Schindler 3300, e) Kisa KA100, f) Akış S200 K2

Fenercioğlu ve ark. 2022 yılında ticari olarak kullanılan 1 m/s ve 1.6 m/s kabin taşıma hızlarındaki halatlı ve kayışlı dişlisiz asansör makinelerin performans verilerini çıkarmıştır (Fenercioğlu ve ark., 2022). Şekil 3.6’da ticari olarak piyasada bulunan bazı dişlisiz halatlı ve kayışlı makineler gösterilmektedir. Çizelge 3.1’de halatlı ve kayışlı dişlisiz asansör makinelerin performans verileri yer almaktadır.



Şekil 3.16. Halatlı ve kayışlı asansör makinaları karşılaştırması a) Halatlı makinalar b) Kayışlı makinalar

Çizelge. 3.1. Dişlisiz halatlı ve kayışlı makinelerin performans verileri (Fenercioğlu ve ark., 2022).

Performans verileri	AKİŞ AK3		MONTANARI MGV25M		AKİŞ AK K2		FAXI 100A	
Yük (kg)	800							
Tahrik Türü	Halat				Kayış			
Kasnak Çapı (mm)	240		240		120		100	
Tork (Nm)	294		319		147		135	
Kutup Sayısı	20		16		20		16	
Ağırlık (kg)	210		180		190		130	
Fren gereksinimi (Nm)	600		650		300		300	
Kabin Hızı (m/s)	1	1.6	1	1.6	1	1.6	1	1.6
Motor Gücü (kW)	4.9	7.8	5.3	8.5	4.9	7.8	5.4	8.6
Hız (devir/dakika)	159.2	255	159.2	254.6	318	509	382	611
Faz Akımı (A)	13	19.6	16.5	22.3	12.2	19.6	11	18.3
Frekans (Hz)	26.66	42.44	21.2	34	53.05	84.88	50.9	81.5

Çizelge 3.1 incelendiğinde, halatlı makinelerde büyük kasnak çapları nedeniyle hızları düşüktür ve yüksek tork gereksinimine ihtiyaç duyarlar. Asansör makine frenleri, motor anma torkunun iki katı olarak belirlendiğinden daha yüksek hacimli ve maliyetli frenler tercih edilmelidir. Şirketler verimlilik bilgisi paylaşmamış olsa da Çizelge 3.1'de kayışlı makinelerin faz akımlarının halatlı makinelerden daha düşük olduğu görülebilir. Kayışlı makinelerde motor verimliliği %90'ın üzerinde olup, IE4 verimlilik sınıfına ulaşılabilir. Artan verimlilik, motor akımını düşürür ve bu sayede seçilecek elektronik sürücülerin boyutu da küçülebilir. Halatlı 800 kg kabin taşıma kapasitesine sahip ve 1 m/s kabin hızındaki MONTANARI marka motorun faz rms akımı 16.5 A iken, aynı şartlarda kayışlı FAXI marka motor için faz rms akımı 11 A'dır. Kayışlı makinelerde hızın yüksek olması nedeniyle frekans da yüksektir. FAXI 100A kayışlı makinenin kütlesi 130 kg olup, halatlı makinelerden MONTANARI'ye göre 50 kg, AKİŞ'a göre 80 kg daha hafiftir. Kayışlı makinelerde kütle ve rotor çapı küçüldüğü için atalet momenti de düşer. Hızlı çalışan motorlarda tork dalgalanması azalır ve bu sayede kayışlı makineler konforlu bir seyahat sağlar. Teknik performans açısından kayışlı sistemler halatlı sistemlere göre daha avantajlıdır. Maliyet açısından bakıldığında, kayışlı makinelerde torkun azalması nedeniyle daha düşük frenleme torkuna sahip frenler kullanılır. Frenlerin küçülmesi maliyet avantajı sağlar. Motor boyutlarının küçülmesi, kullanılan silisli sac, mıknatıs ve sargı teli gibi malzemelerin miktarını azaltır ve bu nedenle makine maliyeti düşer. Ancak, kayış maliyeti halat maliyetinin 1.5-2 katıdır. Ülkemizde asansör makinesi üreticileri genellikle halat tahrikli dişlili ve dişlisiz makineler üretir. Kayışlı makineler için araştırma, geliştirme, prototip ve düşük adetli üretim çalışmaları sürmektedir. Genellikle yurtdışından tedarik edilen sistemler kullanılmaktadır. Ancak, enerji verimliliği düzenlemeleri her geçen gün arttığı için önümüzdeki yıllarda kayışlı makinelerin kullanımının yaygınlaşması beklenmektedir (Fenercioğlu ve ark., 2022).

Demiröz ve ark. 2015 yılında, dişlisiz halatlı ve kayışlı asansör makinelerinin karşılaştırmasını yapmıştır. Çizelge 3.2'de STM140-20 kayışlı makine ile STM200-15 çelik halatlı asansör makinalarını karşılaştırmıştır (Demiröz ve ark., 2015).

Çizelge. 3.2. Kayışlı makine ile çelik halatlı karşılaştırması (Demiröz ve ark., 2015).

	SMT140BC-20 (Kayışlı)	SMT200AC-15 (Çelik Halatlı)
Taşıma Kapasitesi (kg)	1.000	1.000
Askı Oranı	2:1	2:1
Kabin Hızı (m/s)	1.60	1.60
Kayış-Halat Ağırlığı (kg)	54.0	105.6
Kasnak Ağırlıkları (kg)	8.0	35.0
Ağırlığı (kg)	150.0	255.0
Kasnak Çapı (mm)	120	240
Kayış Genişliği-Halat Çapı (mm)	25	6.5
Kayış / Halat Sayısı	5	10
Anma Torku (Nm)	173	327
Faz Akımı (A)	22.91	26.20
Verim (%)	95.29	90.59
Motor Hızı (d/d)	509.3	254.6
Frekans (Hz)	84.88	42.44
Çıkış Gücü (kW)	9.2	11.7

Çizelge 3.2 incelendiğinde, aynı kabin yükü ve hızında, kasnak çapı düşmesi ile makine ağırlığında önemli ölçülerde azalmalar görülmektedir. Daha düşük tork gereksiniminden dolayı kullanılacak makine frenleme değerleri de düşmektedir. Kayışlı sistemler motor hızının yükselmesi ile aynı çıkış gücünde daha yüksek motor verimleri elde edilmesine imkân vermektedir. Kayış sistemlerinin en büyük dezavantajı ise yaygınlaşmamasından dolayı mevcut kayış maliyetleridir. Ancak makine kütlesindeki azalma, düşük tork gereksinimi, yüksek verim performansı ve kabin içindeki sağladığı konfor dikkate alındığında gelecekteki asansör makinalarında çelik halatlı makine sistemlerinin yerini alması beklenmektedir.

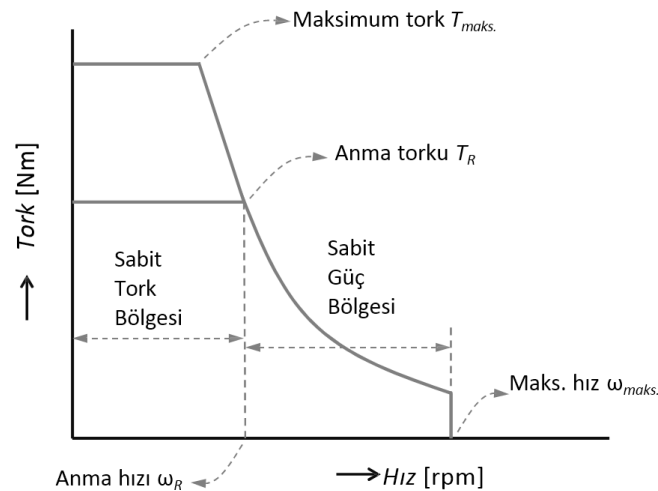
3.2 Sabit Mıknatıslı Senkron Motor

Bu bölümde, SMSM'lerin yapıları, asansörler için uygun topolojinin seçimi, SMSM'nin üretimi için kullanılacak malzemelerin belirlenmesi, oluk-kutup yapısının belirlenmesi, vuruğu momentini düşürmeye yönelik çalışmalar, motor parametreleri ve performans hesaplamaları yer almaktadır.

Senkron motorlar, stator ve rotor arasında manyetik bir senkronizasyonun sağlandığı elektrik motorlarıdır. SMSM'ler senkron motorlarda bulunan rotor sargıları yerine sabit mıknatıs (SM) kullanılması ile ortaya çıkmıştır. SMSM'ler genellikle daha yüksek verimlilik sunar. Çünkü kalıcı mıknatısların manyetik alanı nedeniyle demir kayıpları daha düşüktür ve enerjiyi daha verimli bir şekilde dönüştürebilirler. Ayrıca, senkron motorlarda rotorda oluşan rotor sargı kayıpları mevcuttur.

SM motorlar, düşük hızlı ve yüksek torklu uygulamalarda sıklıkla tercih edilen motor türleridir (Pyrhönen ve ark., 2013). Asansör tahrik sistemlerinde incelendiğinde, redüktör sistemine ihtiyaç duymadan SM motorların kullanıldığı görülmektedir. AlNiCo (Alüminyum Nikel Kobalt) mıknatısların enerji yoğunluklarının düşük olması nedeniyle, ilk SM motorlar küçük boyutlu ve düşük güçlü uygulamalarla sınırlıydı. Ancak, son dönemlerde nadir toprak elementleri ve güç elektroniği alanındaki gelişmeler, SMSM tasarımı, yapımı ve uygulaması için yeni olanaklar sunmuştur. Büyük güçlü SMSM'ler hem düşük hızlı sürücülerde hem de yüksek hızlı sürücülerde kullanılabilir (Gieras, 2010).

Asansör tahrik sistemleri için SM motorlar, sessiz çalışma, yüksek verim, uzun çalışma ömrü, hacim başına düşen yüksek tork değeri ve tork-hız karakteristiğinin yüksek olması gibi avantajları nedeniyle endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir (Soyaslan, 2020).



Şekil 3.17. SMSM'lerin tork-hız karakteristiği (Aydın, 2012)

3.2.1 Stator

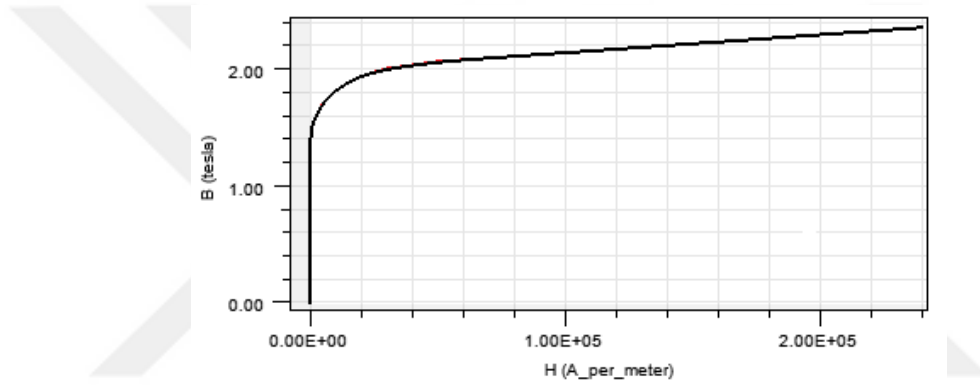
SMSM'ler stator sargıların sarıldığı sabit kısımdır. Silis kaplı çelik sacların paketlenip preslenmesi ile meydana gelmektedir. Çelik sacların silis ile kaplanmaları saclar arasındaki yalıtımı sağlamaktadır. Bu sayede çalışma esnasında oluşabilecek girdap akımlarını (Eddy akımları) minimum seviyelerde ve sacların manyetik özelliklerini maksimum seviyelerde kullanılmasına olanak sağlar (Yıldız, 2009). Çizelge 3.3'te tane yönlendirilmiş silisli sacların manyetik özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge. 3.3. Tane yönlendirilmemiş silisli sacların manyetik özellikleri (Soyaslan, 2020)

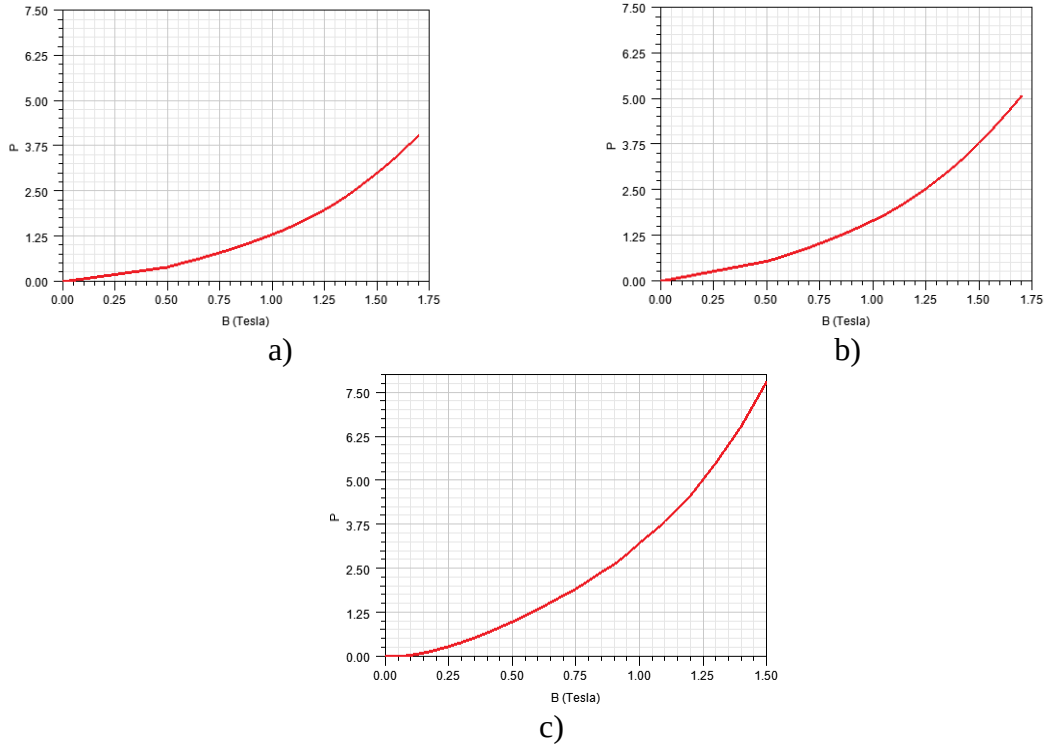
Malzeme	Sac kalınlığı	50 Hz'deki Maksimum Spesifik Toplam Kayıp		Yoğunluk
		$\hat{J}=1.5T$	1.0T*	
		W/kg	W/kg	kg/dm ³
M310-50A	0.50	3.10	1.25	7.65
M330-50A	0.50	3.30	1.35	7.65
M350-50A	0.50	3.50	1.50	7.65
M400-50A	0.50	4.00	1.70	7.70
M470-50A	0.50	4.70	2.00	7.70
M470-50HP	0.50	4.70	2.20	7.70
M530-50A	0.50	5.30	2.30	7.70
M530-50HP	0.50	5.30	2.30	7.80
M600-50A	0.50	6.00	2.60	7.75
M700-50A	0.50	7.00	3.00	7.80
M800-50A	0.50	8.00	3.60	7.80

Prototip motor için tedarik edilebilen demir kaybı yönünden en düşük silisli sac M330-50A olmuştur. Ancak M330-50A tipi silisli sac SEY analizlerinin gerçekleştirildiği ANSYS Maxwell yazılımında tanımlı değildir. Analizlerde BH eğrisi ve W/kg kaybı bu malzemeye çok yakın olan JFE_50JN350 tipi malzeme kullanılmıştır. JFE_50JN350 silisli sacın manyetik özelliklerini gösteren B-H eğrisi ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Şekil 3.9'da JFE_50JN350 tipi silisli sacın 50-60-100 Hz'deki demir kayıpları grafiği W/Kg cinsinden verilmiştir. JFE katalog verisinde 60 Hz çalışma frekansında 1T için 1.64 W/kg, 1.5 T için 3.75 W/kg olarak ifade edilmiştir. (Anonim, 2023a).

Manyetik alan şiddeti ve akı yoğunluğu arasındaki ilişkiyi ifade eden B-H eğrisi, bir manyetik malzemenin manyetik özelliklerini tanımlar. Eğrinin diz bölgesinden sonra gelen kısmı, doyum bölgesi olarak adlandırılır. Doyum bölgesinde akıma bağlı olarak manyetik alan şiddetinin, artışına karşılık akı yoğunluğundaki artışlar oldukça küçük olur. Bu nedenle, motorların optimum çalışma noktası, B-H eğrisinin diz bölgesidir. Yani, manyetik malzemenin doyum noktasının ötesine geçildiğinde manyetik akı yoğunluğunun performansa etkisi azalacaktır. Bu yüzden motorlar genellikle doyum noktasının hemen altında çalıştırılır, böylece manyetik malzemenin verimli bir şekilde kullanılması sağlanır.



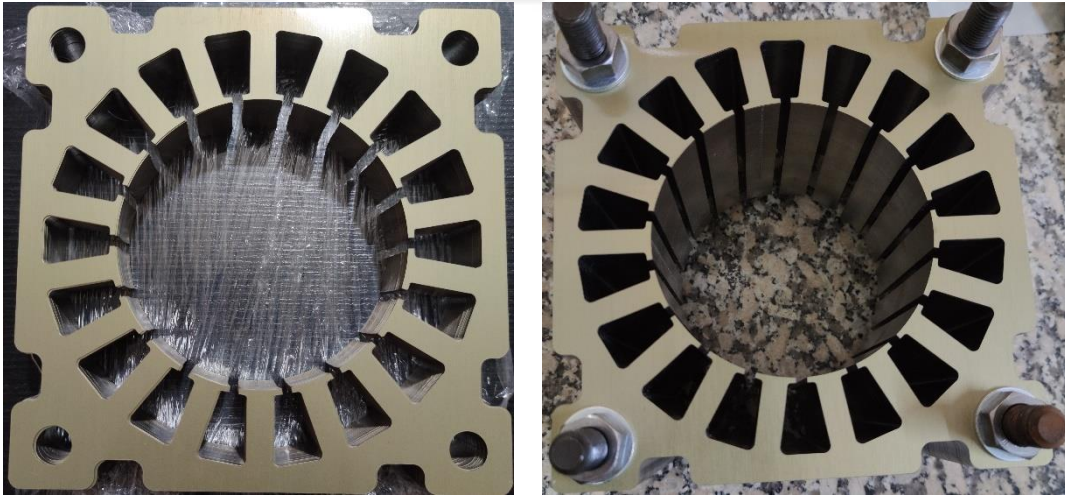
Şekil 3.18. JFE Steel 50JN350 tipi silisli sacın B-H grafiği



Şekil 3.19. JFE 50JN350 tipi silisli sacın demir kayıpları: a)50 Hz, b)60 Hz ve c)100 Hz

Silisli saclar, radyal yapıdaki motorlar için prototip imalatta yönelik olarak genellikle lazer ve tel erozyon gibi kesim yöntemleri kullanarak stator şekilleri elde edilir (Bayraktar, 2015). Kesilen saclar bir kalıp yardımı ile üst üste getirilerek aralarına vernikleme ile preslenmektedir. Böylelikle stator laminasyonu meydana gelmektedir. Bu vernikleme işlemi stator sacları arasındaki ses izolasyonu sağlamasına yardımcı olmaktadır. Kesim işlemi sırasında sacların arasında kalan çapaklar ve vernik nedeni ile saclar arasında boşluk oluşmaktadır. Bu nedenle stator saclarındaki kullanılabilir paket uzunluğu stator istifleme faktörü k_{st} olarak tanımlanmaktadır. k_{st} genelde (0.90-0.97) arasında olup 1'e yakın değerlerdir. k_{st} değerinin belirlenmesi motor performansını doğrudan etkilediği için önemlidir. Preslenmiş sacların uzunluğu motorun elektromanyetik boyutunu belirlemektedir.

Bu tez çalışmasında, stator sacları lazer yöntemi kesilmiştir. Çapak oluşumunu azaltmak amacı ile kesim işlemi sırasında karbondioksit yerine azot ile kesim yapılmıştır. Şekil 3.10'da stator sacları ve laminasyon paketi yer almaktadır. Yapılan çalışma sırasında etkin kullanılan alan, k_{st} değeri (istifleme katsayısı) 0.95 olarak hesaplanmıştır.



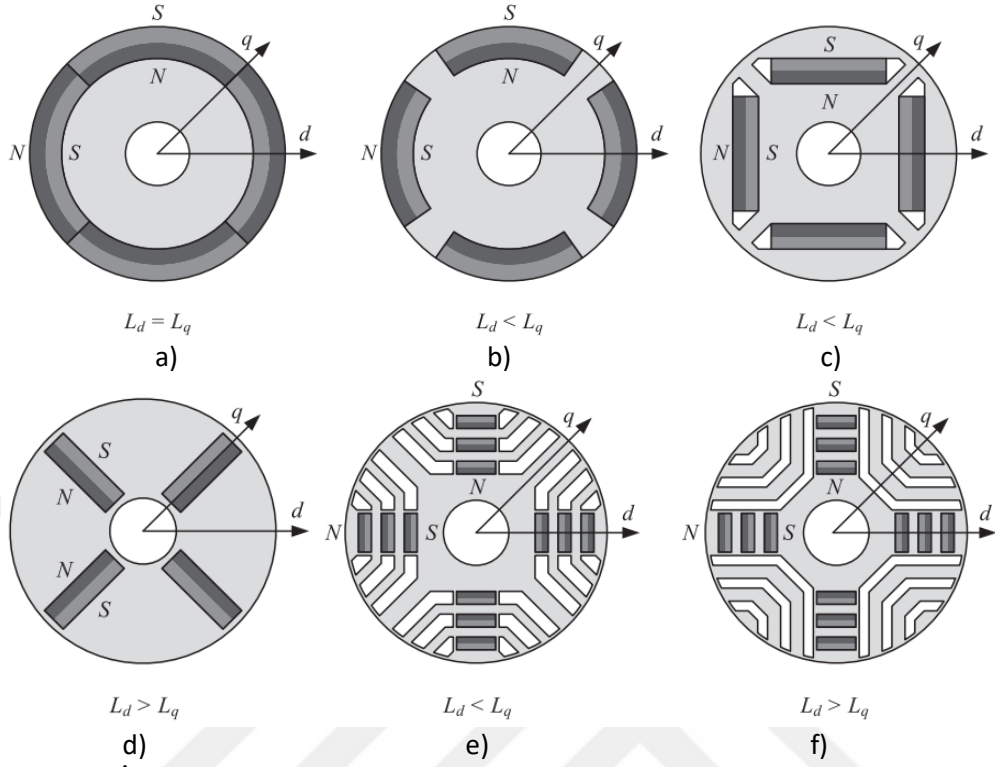
Şekil 3.20. Stator laminasyonu

3.2.2 Rotor

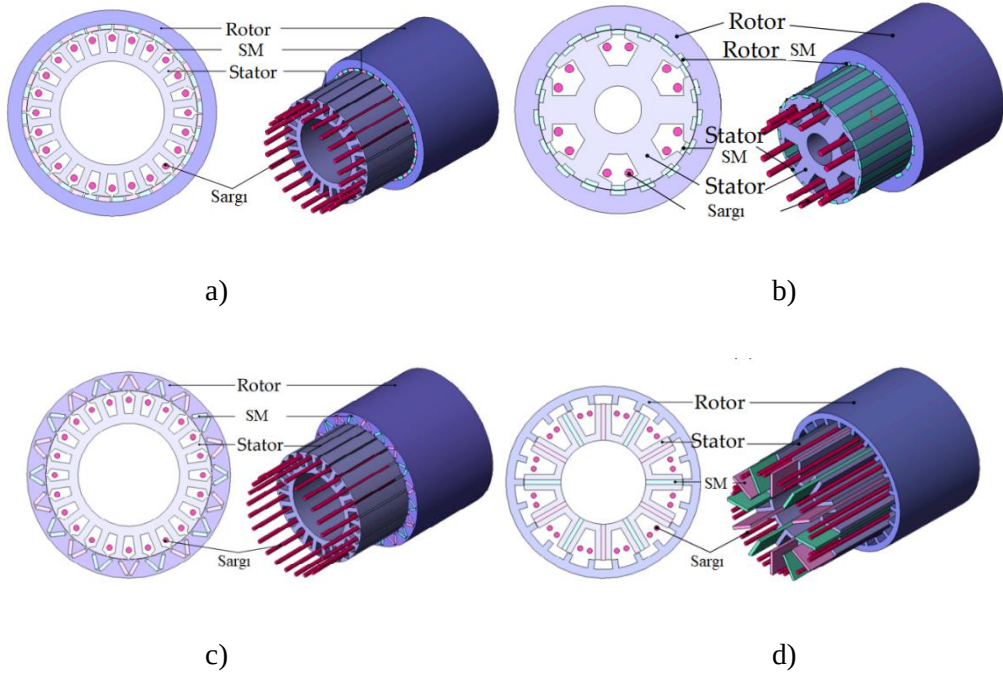
Rotor, SMSM'nin hareketli kısmıdır, mil üzerine yerleştirilmiş sac ve mıknatıslardan oluşur. Rotor üzerinde saf demir veya silisli saclardan yapılmış bir gövde bulunur. Sabit mıknatıslar bu gövde üzerine hava aralığında manyetik alanı oluşturabilmek için N-S kutupları oluşacak şekilde yerleştirilir (Akar, 2010). Bu mıknatıslar, motorun manyetik alanını sağlar ve stator sargılarından geçen akım ile etkileşime girerek motorun dönmesini sağlar. Sabit mıknatısların yüksek enerji seviyeleri ve uygun boyutları, motor performansını olumlu etkiler. Bu avantajlardan bazıları şunlardır: indüklenen EMK'nın artması, hat akımının azalması, rotorun termal yükünün azalması, güç faktörünün iyileşmesi, giriş gücünün azalması ve motorun maksimum çıkış gücünün artması sağlar (Eker, 2017).

Günümüzde, kalıcı mıknatıslı motorlar için en yaygın olarak tercih edilen yapı, mıknatısların rotor yüzeyinde yer aldığı rotor türüdür. Yüzey mıknatıslı (YM) motorlarda, mıknatıslar genelde radyal olarak manyetize olur. Düşük manyetik geçirgenlikle ($\mu_r = 1-1.2$) Neodyum Demir Bor (NdFeB) nadir toprak mıknatıslar kullanılır ve rotorun silindirik yapısından dolayı relüktans farkı oluşmadığı için d ve q eksenlerindeki senkron endüktansların eşit olduğu kabul edilebilir; bu durum, yüzey mıknatıs motorlarının tasarımında yardımcı olur. Motorun yapısı, mıknatısların rotor yüzeyine kolayca monte edilebilmesi nedeniyle hem ucuz hem de basittir. Gömülü mıknatıs motorları (GM), yuvalar içerisinde yer alan kalıcı mıknatıslardan oluşmaktadır (Salminen, 2004).

SMSM tasarımlarında içten ve dıştan olmak üzere iki farklı rotor topolojisi bulunmaktadır. Bunlar kendi aralarında mıknatısların dizilimlerine göre farklı yapıları mevcuttur. Şekil 3.11'de içten rotorlu YM veya GM yapıları yer almaktadır (Dianov ve ark., 2010). Şekil 3.12'de dıştan rotorlu yüzey veya gömülü mıknatıs yapıları yer almaktadır (Yao ve ark., 2018).



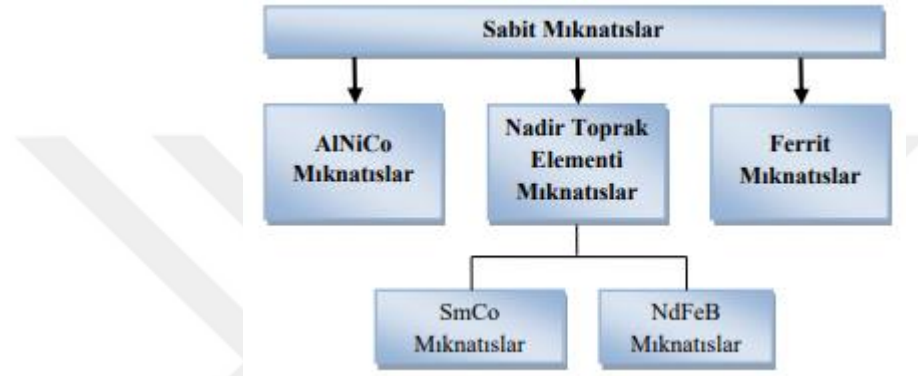
Şekil 3.21. İçten rotorlu SMSM topolojileri a) YM rotor, b) YM içe gömülü rotor, c) GM rotor, d) Gömülü radyal mıknatıslı rotor e) SM destekli senkron relüktans f) SM destekli senkron relüktans (Dianov ve ark., 2022)



Şekil 3.22. Dıştan rotorlu SMSM topolojileri a) YM rotor, b) YM içe gömülü rotor, c) V tipi GM rotor, d) gömülü radyal mıknatıslı rotor

3.2.3 Sabit Mıknatıslar

İlk endüstriyel yapay alaşımlı mıknatıs, 1935'lerde üretilen AlNiCo mıknatıslardır. 1960'lı yıllarda ferrit mıknatıslar ortaya çıkmış, 1975'lerde Samaryum Kobalt (SmCo) mıknatıslar geliştirilmiştir. 1984'te geliştirilen NdFeB mıknatıslar, endüstriyel mıknatıslar arasında en yüksek enerji yoğunluğuna sahip mıknatıslardır (Ünsal, 2022). Şekil 3.13'te ticari olarak kullanılan mıknatısların sınıflandırılması yapılmıştır.



Şekil 3.23. Sabit Mıknatısların Sınıflandırılması

SMSM'ler da ticari olarak üretilen mıknatısların özelliklerinin 20 °C – 30 °C aralığındaki sıcaklık değerlerinde elde edilen veriler Çizelge 3.4'te verilmiştir. Artık mıknatıslanma değeri (B_r), giderici kuvvet (H_{ci}), maksimum enerji yoğunluğu (BH_{max}), Curie sıcaklığı (T_c) ifade edilmektedir (Eklund ve Eriksson, 2019).

Çizelge. 3.4. Ticari olarak kullanılan mıknatısların özellikleri (Eklund ve Eriksson, 2019).

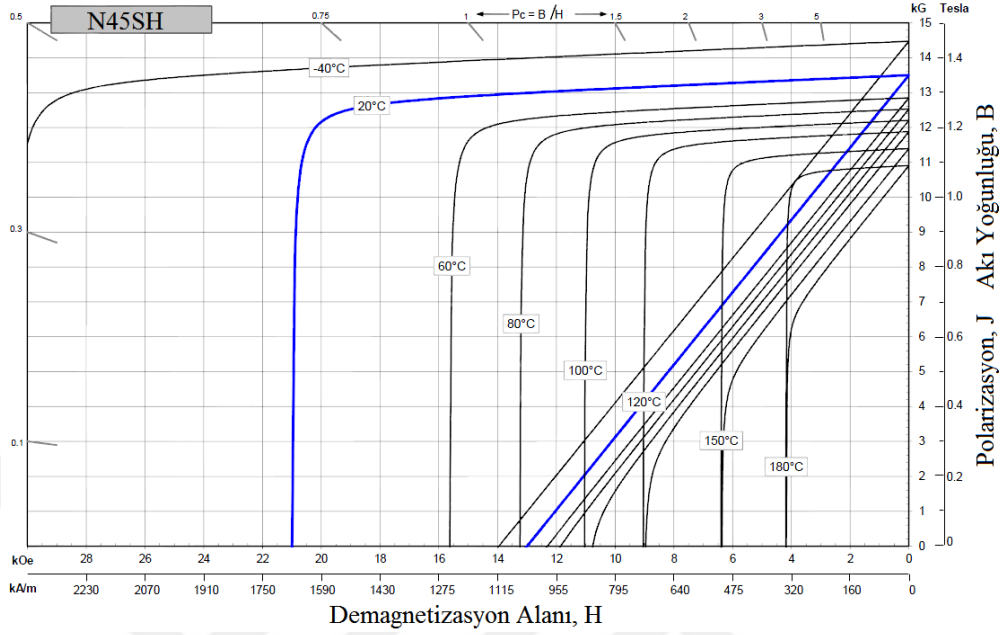
Mıknatıs Tipi	B_r [T]	H_{ci} [kA/m]	BH_{max} [kJ/m ³]	T_c [°C]
AlNiCo	0.55-1.37	38-151	10.7-83.6	900
Sert Ferrit	0.2-0.46	140-405	6.4-41.8	450
NdFeB	1.08-1.49	876-2710	220-430	300
SmCo	0.87-1.19	1350-2400	143-251	800

Asansörlerde kullanılacak SMSM tahrik motoru için dört farklı mıknatıs malzemesi olan AlNiCo, Ferrit, NdFeB ve SmCo dikkate alındığında:

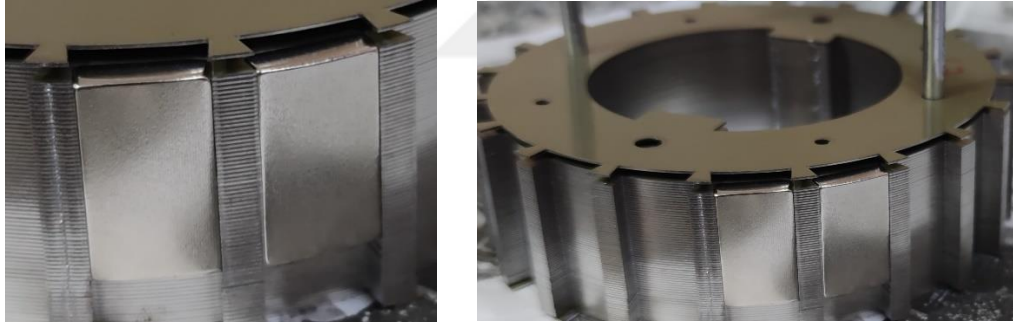
1. AlNiCo: Yüksek sıcaklık direnci ve mekanik mukavemet sunar, ancak enerji çarpanı düşüktür. Hassas uygulamalar için uygun olabilir, ancak asansörlerde yüksek performans beklenmektedir.
2. Ferrit: Düşük maliyetli ve düşük enerji çarpanlı bir seçenektir. Asansör motorlarında kullanılabilir, ancak daha büyük ve ağır motorlara yol açarak genel verimi düşürebilir.
3. NdFeB: Yüksek enerji çarpanı ve mükemmel manyetik özellikler sunar, bu da yüksek tork ve verimli motorlar sağlar. Fiyat dalgalanmaları ve sıcaklık hassasiyeti dezavantajları olsa da asansör tahrik motorları için en iyi performansı sunar. Asansör tahrik motorlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.
4. SmCo: NdFeB'lerden daha düşük enerji çarpanına sahip olmasına rağmen, yüksek sıcaklık direnci ve termal stabilite sunar. Yüksek sıcaklık koşullarında çalışan asansör motorları için iyi bir seçenek olabilir.

Asansörlerde kullanılacak SMSM tahrik motorları için en iyi seçenek NdFeB mıknatıslardır, çünkü yüksek tork ve verim sunarlar. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık koşullarında çalışması gereken motorlar için SmCo mıknatıslar da uygun bir seçenek olabilir. AlNiCo ve ferrit mıknatıslar, daha düşük enerji ürünleri ve belirli uygulamalar için uygunlukları nedeniyle, asansör tahrik motorları için daha az tercih edilir. Bununla birlikte Yetiş 2017 yılında isimli bir tez çalışmasında, ferrit mıknatıslar kullanarak düşük tork dalgalanmasına sahip asansör tahrik motoru tasarımı gerçekleştirmiştir (Yetiş, 2017).

Prototip motor tasarımında, manyetik akı yoğunluğu (B_r), maksimum enerji çarpanı ($(BH)_{max}$) ve maksimum çalışma sıcaklığı dikkate alınarak, NiCuNi (Nikel Bakır Nikel) alaşımlı kaplama ile N45SH tipi sinterlenmiş NdFeB mıknatıslar kullanılmıştır. N45SH mıknatıslar, 150°C sıcaklık değerine kadar demagnetize olmadan çalışabilen, manyetik akı yoğunluğu 20 °C sıcaklıkta 1.35 T ulaşan ve enerji çarpanları 342-366 kJ/m³ arasındadır. Şekil 3.14'te N45SH mıknatısın manyetik özellikleri paylaşılmıştır. Prototip motor için özel olarak tasarlanan ve üretilen mıknatıs resimleri Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.24. N45SH tipi sabit mıknatısın manyetik özellikleri (Anonim, 2022c)



Şekil 3.25. Prototip motor için N45SH özelliğine sahip açılı mıknatıslar

Asansör Tahrik Sistemleri için YM İçten Rotorlu SMSM'ler

Asansör tahrik motorları incelendiğinde sektörde hala aktif olarak asenkron motor ve bunlara bütünleşmiş redüktör sistemleri kullanılmaktadır. Nadir toprak malzemelerin daha ulaşılabilir olması ve yarı iletken teknolojilerindeki ilerlemeler ile paralel olarak, redüktör gereksinimi olmayan, yüksek performans ve verim gibi avantajları sayesinde dişlisiz asansör makinelerde SMSM'ler kullanımı yaygınlaşmaktadır.

SMSM'lerin rotor yapılarından dolayı, yüzey ve gömülü mıknatıslı olarak iki grupta sınıflandırabiliriz. Literatüre baktığımızda ve mevcut sektördeki asansör tahrik motorlarını incelediğimizde YM asansör motorlarının yaygın olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, asansör sistemlerine sağladığı avantajlardan dolayı YM rotor yapılarını tercih edilmiştir.

Asansör sistemlerine göre YM-SMSM'nin avantajları:

- Daha yüksek verim: YM motorlar, düşük hızlarda bile yüksek verim sağlar. Bu, enerji tüketiminin ve işletme maliyetlerinin azalmasına katkıda bulunur.
- Daha yüksek tork yoğunluğu: YM-SMSM, GM rotor yapılarına göre daha yüksek tork yoğunluğuna sahiptir. Bu, asansör sistemlerinde daha küçük ve hafif motorların kullanılmasına olanak tanır.
- Daha basit soğutma: Düşük hızlarda bile YM motorlar, daha etkili soğutma sağlar. Bu, motorun daha yüksek sıcaklık toleransı ve daha uzun ömürlü olmasına imkân tanır.
- Daha hızlı tepki süresi: YM motorlar, daha hızlı dinamik tepki süreleri sunar. Bu, asansörün daha hızlı hızlanması ve frenlemesine olanak sağlar, böylece yolcu konforunu artırmaktadır.

Asansör sistemlerine göre YM'li SMSM'nin dezavantajları:

- Kırılgan rotor yapıları: Mıknatısların rotorun dış yüzeyine yerleştirilmesi, onları mekanik hasarlara daha duyarlı hale getirir. Bu durum, düşük hızlarda daha az sorun yaratsa da uzun vadeli güvenilirlik ve dayanıklılık konusunda endişelere neden olabilir.
- Daha düşük maksimum hız: YM motorların merkezkaç kuvvetleri nedeniyle maksimum hızları, GM motorlara göre daha düşüktür.

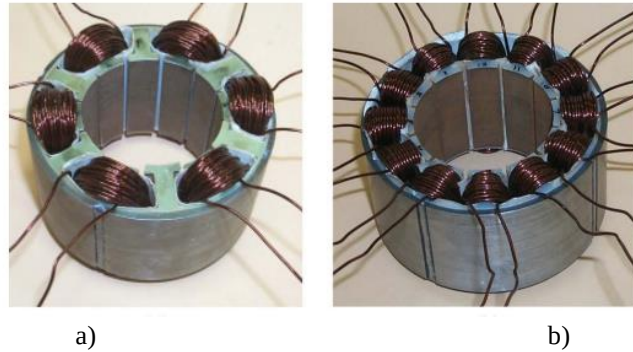
Dezavantajları değerlendirdiğimiz zaman yüzey mıknatısların mekanik hasarları azaltmak amacı ile mıknatıslar için rotor üzerine yuvalar eklenmiş YM rotor tipi tercih edilmiştir. Ek olarak maksimum hız değerinin düşük olması sabit hızlarda çalışacak asansör tahrik motorları için herhangi bir sorun olarak görülmemektedir.

Sonuç olarak, asansör tahrik sistemlerinde yüzeyi mıknatıslı SMSM kullanımının, enerji verimliliği, performans ve yolcu konforu gibi avantajları dikkate alındığında uygun bir seçenek olduğu görülmektedir.

3.2.4 Sargılar

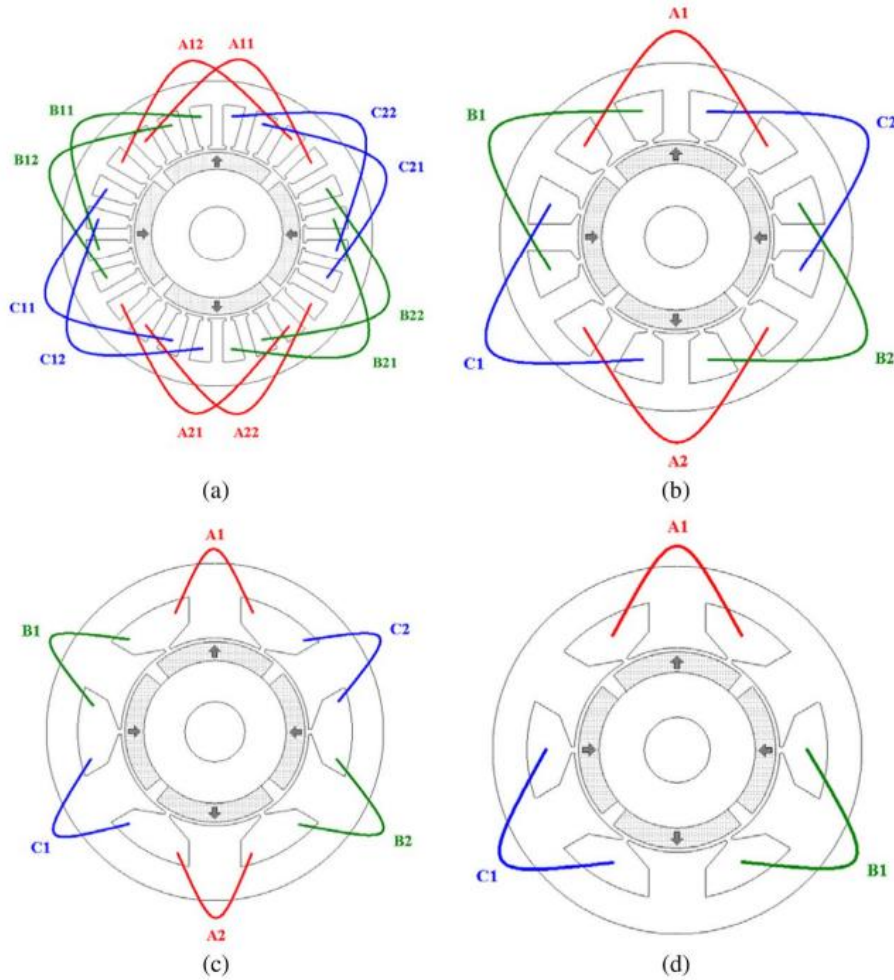
Stator oluk sayısı, rotor kutup sayısı, faz sayısı ve sargı sayısı arasında ilişki bulunmaktadır. Vuruntu momentini azaltmak için genellikle kesirli bir oluk/kutup kombinasyonları tercih edilir (Leu, 1992). SMSM’lerde, asenkron motorlardaki gibi sargılar üçgen veya yıldız şeklinde bağlanabilir (Yan, 2009). Düşük hızlarda ve düşük tork gerektiren uygulamalarda üçgen bağlantı tercih edilirken, düşük hızlarda yüksek tork gerektiren uygulamalarda yıldız bağlantısı kullanılır (Gambhir ve Jha, 2013).

SMSM’ler uygulama türlerine göre tek fazlı veya çok fazlı olabilir. Sarımlarda tek veya çok katmanlı sargı yöntemi kullanılır. Tek katmanlı sargılar, her stator yuvasında sadece bir sargı bulunan ve genellikle daha basit ve az karmaşık uygulamalar için kullanılan sargı türüdür. Tek katmanlı sargılar, üretimi ve bakımı daha kolay olmasına rağmen, genellikle düşük verim ve düşük performans sunarlar. Çift katmanlı sargılar, her stator yuvasında iki sargı bulunur ve daha yüksek performans ve daha iyi manyetik alan dağılımı sağlaması için kullanılan sargı türüdür. Tek katmanlı sargı yapılarında öz indüktans değerleri yüksektir. Bu sayede motor kısa devre akımı sınırlandırılır. Tek katmanlı sargılar sabit tork değişken hızlı uygulamalarda tercih edilir (EL-Refaie, 2010). Şekil 3.16’da tek ve çift katmanlı sargı yapıları gösterilmiştir.



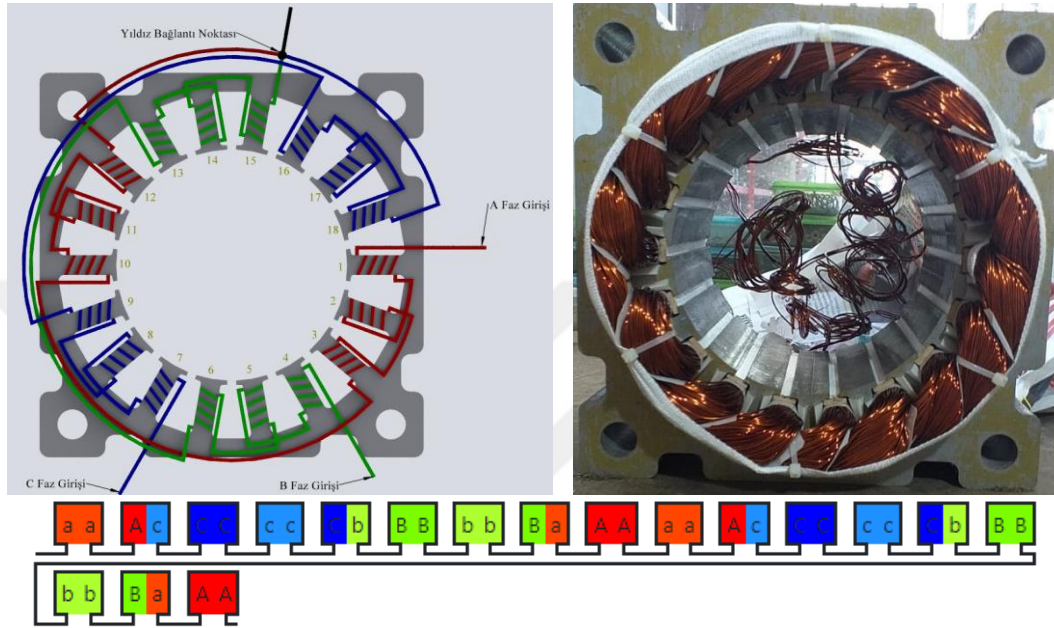
Şekil 3.26. Konsantre sargı tipleri; a) Tek katmanlı sargı b) Çift katmanlı sargı (EL-Refaie, 2010)

Oluk-kutup kombinasyonu seçiminde, sargı tipi önemli bir kısıt unsuru olarak kabul edilir. Konsantre sargının kullanılabileceği bir oluk-kutup kombinasyonunun tercih edilmesi istenir. Konsantre sargıların dağıtılmış sargılara göre kullanılmasının ana nedenleri, motor veriminin artırılması ve üretimin kolaylaştırılmasıdır. Konsantre sargılı motor tasarımında, birim hacim başına elde edilen moment değeri yüksek ve çıkış momentinin dalgalanması düşüktür. Sargı başı uzunlukları dağıtılmış sargılardan daha kısa olduğu için, oluklara yerleştirilen sargı miktarı azalır. İletken boylarının kısalmasıyla direnç azalır, bakır kayıpları düşer ve motor veriminin artırılması mümkün olur (Güneri, 2015). Şekil 3.17’de tek ve çift katlı, dağıtılmış ve konsantre sargı tipleri yer almaktadır.



Şekil 3.27. Sargı tipleri: a) Dağıtılmış çift katmanlı sargı b) Dağıtılmış tek katmanlı sargı c) Konsantre çift katmanlı sargı d) Konsantre tek katmanlı sargı (EL-Refaie, 2010).

Tez çalışmasında, birim hacim başına elde edilen tork değeri yüksek, çıkış tork dalgalanmasının düşük olması, motor verimliliği ve kolay üretim nedenleri ile çift katmanlı konsantre sargı yöntemi tercih edilmiştir. Şekil 3.18’de 18/20 oluk/kutup kombinasyonuna sahip SMSM’nin stator sarım şeması ve görseli verilmiştir.



Şekil 3.28. 18/20 oluk/kutup SMSM’nin stator sarım şeması ve görseli

3.3 SMSM’nin Tasarım Parametreleri

SMSM’nin elektromanyetik tasarımları bu bölümde ele alınmıştır. Oluk/kutup kombinasyonlarının belirlenmesi, vuruğu momenti ve tork dalgalanmaları, SMSM’nin çıkış eşitlikleri ve boyutlandırılması, manyetik ve elektriksel modelleme ve motor kayıpları bu bölümde ele alınmıştır.

3.3.1 Oluk/Kutup Kombinasyonunun Belirlenmesi

SMSM’lerde, oluk/kutup kombinasyonu önemli bir tasarım parametresidir. Bu kombinasyon, stator oluk sayısı ve rotor üzerindeki manyetik kutupların sayısını ifade eder. Oluk-kutup kombinasyonunun doğru seçilmesi, motorun gerilim ve akım dalga şekillerini iyileştirir, harmonikleri azaltır, motorun verimliliğini ve performansını artırır.

Oluk/kutup kombinasyonu, sargı faktörünün belirlenmesinde temel etkindir. Yüksek sargı faktörü, motorun verimliliğini ve performansını doğrudan etkileyen bir parametredir. Oluk-kutup kombinasyonunun doğru seçimi, demir kayıplarını ve yüksek

frekanslı harmoniklerin etkisini azaltarak motorun verimliliğini artırır. Doğru seçilmiş bir oluk/kutup kombinasyonu motor boyutları ve ağırlığını azaltarak daha kompakt ve hafif tasarımlara imkân vermektedir (Güneri, 2015; Tanç, 2014; J. Wang ve ark., 2008)

Oluk-kutup kombinasyonlarını incelediğimizde çok sayıda uygun yapı bulunmaktadır. Doğru yapıyı belirlemek için kutup-faz başına düşen oluk sayısı (q) belirlenmelidir. Eşitlik 3.1 de kutup-faz başına düşen oluk sayısı ifade edilmiştir. Oluk sayısı N_{slot} , kutup sayısı N_p ve faz sayısı n_f olarak ifade edilir (Tanç, 2014).

$$q = \frac{N_{slot}}{N_p \cdot n_f} \quad (3.1)$$

q değeri 1'den küçük ise kesirli oluk sargılı motor olarak ifade edilir. Oluk/kutup yapısı tercih edilirken q değerinin 1/2 ile 1/3 arasındaki tasarımlar yüksek performans, düşük vuruş momenti ve yüksek sargı faktörü değerlerine sahiptir (Soyaslan, 2020). Çizelge 3.5'te çift katmanlı sargı tipine göre sargı oluk/kutup kombinasyonlarının sargı faktörü değerleri gösterilmiştir.

Çizelge. 3.5. Çift katmanlı oluk/kutup kombinasyonlarının sargı faktörü (k_w) tablosu (Meier, 2008)

$N_{slot} \backslash N_p$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
6	0,866		0,866				0,866		0,866				0,866		0,866			
9		0,866	0,945	0,945	0,866						0,866	0,945	0,945	0,866				
12	q=1		0,866	0,933		0,933	0,866								0,866	0,933		0,933
15				0,866		0,951	0,951		0,866									
18		q=1			0,866	0,902	0,945		0,945	0,902	0,866							
21					0,866	0,87			0,953	0,953		0,89	0,866					
24			q=1				0,866		0,933	0,95		0,95	0,933		0,866	0,76		
27								0,866	0,877	0,915	0,945	0,954	0,954	0,945	0,915	0,877	0,866	
30				q=1					0,866	0,874		0,936	0,951		0,951	0,936		0,874
33										0,866		0,903	0,928		0,954	0,954		0,928
36					q=1						0,866	0,867	0,902	0,933	0,945	0,953		0,953
39												0,866	0,863		0,918	0,936		0,954
42						q=1							0,866		0,89	0,913		0,945
45														0,866	0,859	0,886		0,927
48							q=1								0,866	0,857		0,905
51																0,866		0,88
54								q=1									0,866	
57																		0,866
60									q=1									

Tasarımı uygun olmayan kombinasyonlar $k_w < 0.866$

Eşitlik 3.2’de oluk sayısı değeri kutup sayısından iki eksik veya iki fazla olan kombinasyonlar motorlar için yüksek akı dağılımları ve yüksek moment yoğunluklarına sahip makinelerdir (Soyaslan, 2020; J. Wang ve ark., 2008).

$$N_{slot} = N_p \pm 2 \quad (3.2)$$

Tek katmanlı sargı yapısına sahip motorlar, çift katmanlı sargı yapısına sahip motorlarla karşılaştırıldığında daha yüksek demir kayıplarına ve daha uzun sargı başlarına sahiptir. Motorlarda çift katmanlı sargıların kullanılması, eddy akımı kayıplarının, tork dalgalanmalarının ve elektromotor kuvvet (EMK) arasındaki uzay harmonik bileşenlerinin azalmasına katkıda bulunur (EL-Refaie, 2010).

Tez çalışmasında asansör sistemleri için kullanılabilecek çok fazla oluk kutup seçeneği mevcuttur. Asansör tasarımında kayış kasnakları motor çekirdeğinin iki tarafına yerleştirilmiştir. Böylesi bir tasarımda süspansiyon sistemi ve paraşüt frenlerin yerleşim yerlerinden dolayı için paket boyunun 120 mm’den büyük olması gerekmektedir. Bu nedenle motor çap ölçülerini büyültmesine neden olan yüksek oluk sayıları elenmiştir. Literatürden elde edilen bilgilere göre optimizasyon çalışmalarında kullanmak üzere oluk/kutup kombinasyonları arasından uygun yapıda bulunan 12/10, 12/14, 18/16, 18/20, 24/22 ve 24/26 oluk/kutup yapıları SEY analizleri için tercih edilmiştir.

3.3.2 Vuruntu Momenti ve Tork Dalgalanmaları

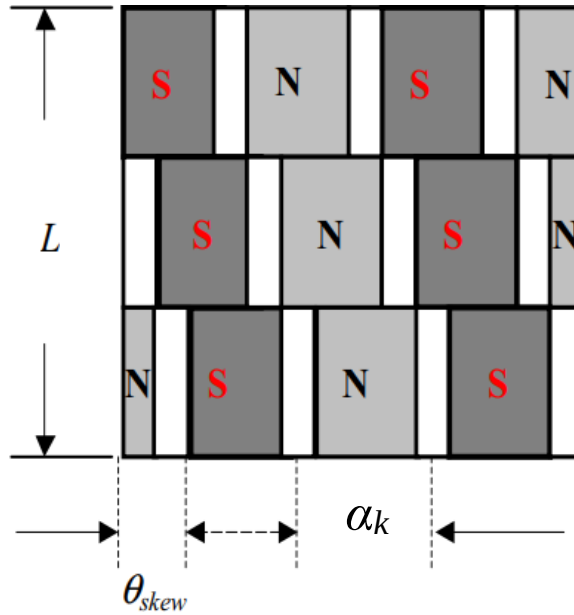
Asansör kabin içi seyahat sırasında konfor en önemli parametrelerden biridir. Konforu etkileyen faktörlerden biri de asansör makinesinde meydana gelen titreşim ve gürültülerdir. Asansör makinesi tasarımında bu titreşim ve gürültülerin minimum düzeye indirilmesi gerekmektedir. Kabin içi seyahat sırasında meydana gelen titreşim ve gürültülerin en önemli nedenlerinden biri de vuruntu momenti ve tork dalgalanmasıdır. Çıkış torkunun kalitesi ve düzgünlüğü vuruntu momenti ve tork dalgalanmasının minimum seviyeye indirilmesi ile sağlanır. Vuruntu momenti ve tork dalgalanmasını düşürmenin çeşitli yöntemleri mevcuttur. Tasarım çalışmasında, uygun oluk/kutup kombinasyonları seçimi ve stator ve rotor geometrisi üzerinde optimizasyon çalışmaları yaparak vuruntu momenti ve tork dalgalanmasını düşürmek mümkündür.

Tez çalışması sırasında elde edilen 12/10, 12/14, 18/16, 18/20, 24/22 ve 24/26 oluk/kutup yapıları üzerinde çalışılmıştır. Oluk ağzı açıklığı (B_{s0}), mıknatıs kalınlığı (h_{mag}), kutup aralığı (E_m), stator dış kalınlığı (W_{th}), ve hava aralığını (g) SEY ile optimize gerçekleştirilerek en düşük dalgalanmasına sahip bir tasarım amaçlanmıştır. Elde edilen tasarım üzerinde 1° - 20° derece arasında parametrik olarak mıknatıslar üzerinde kaykısı çalışması yapılarak tork dalgalanmasını düşürülmeye çalışılmıştır.

Kaykısı uygulaması, motorun tasarım aşamasında gerçekleştirilir. Stator dişlerinin veya rotor mıknatıslarının eksenel yön boyunca kaykısı verilmesi, motorun manyetik devresindeki harmoniklerin etkisini azaltır ve tork dalgalanmalarını düşürür. Eşitlik 3.3-3.4'de analitik olarak kaykısı açısı bulunabilir (Islam ve ark., 2009). Burada kaykısı açısı θ_{skew} , vuruntu periyot sayısı N_{period} , kutup sayısı N_p ve oluk sayısı N_{slot} en büyük ortak böleni $EBOB(N_p, N_{slot})$ olarak ifade edilir. Şekil 3.19'da rotor üzerindeki mıknatısların adım kaykısı gösterilmiştir. Çizelge 3.6'da optimum kaykısı açısı verilmiştir.

$$\theta_{skew} = \frac{360}{N_{slot}N_{period}} \quad (3.3)$$

$$N_{period} = \frac{N_p}{EBOB(N_p, N_{slot})} \quad (3.4)$$



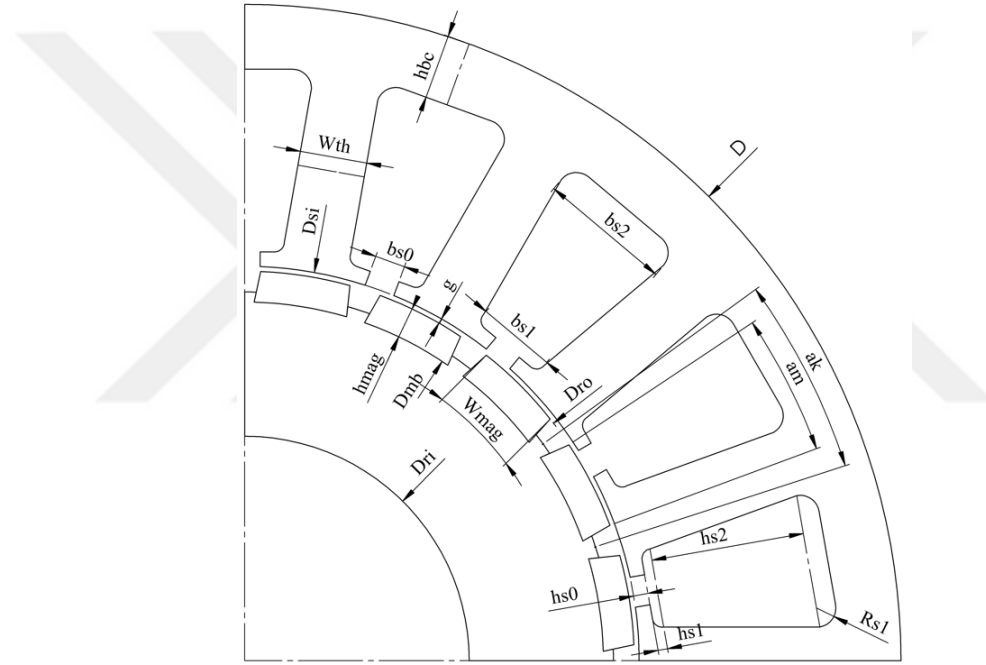
Şekil 3.29. 3 kademeli adım kaykısı düzeni (Islam ve ark., 2008)

Çizelge. 3.6. Oluk/kutup kombinasyonlarına göre optimum kaykı açısı

Oluk sayısı (N_{slot})	12	12	18	18	24	24
Kutup sayısı (N_p)	10	14	16	20	22	26
Vuruntu periyodu (N_{period})	5	7	8	10	11	13
Optimum kaykı açısı (θ_{skew})	6°	4.28°	0.44°	2°	1.36°	1.15°

3.3.3 SMSM'nin Ölçülendirmesi

SMSM'nin geometrik ölçüleri Şekil 3.20'de ve bu değerlerin açıklamaları ise Çizelge 3.7'de ifade edilmiştir.



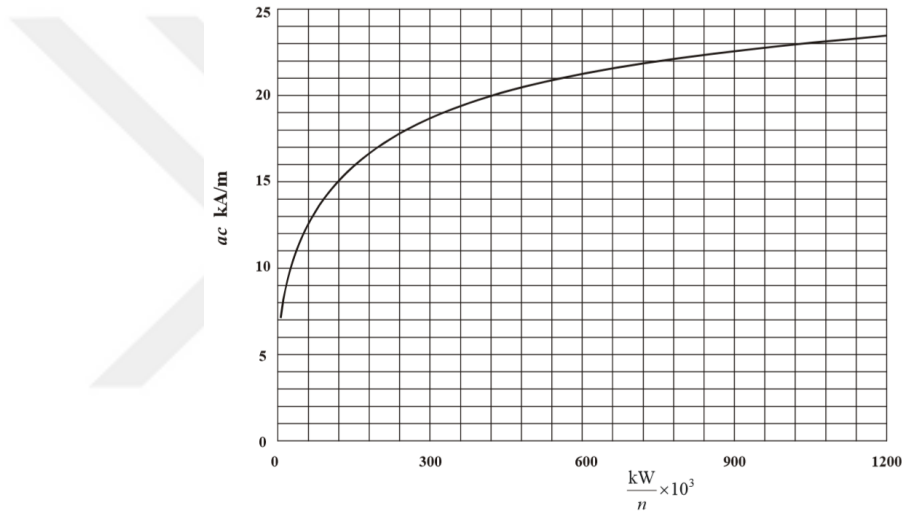
Şekil 3.30. SMSM'nin ölçü gösterimi

Çizelge. 3.7. SMSM'nin ölçülerinin açıklamaları

Değişken	Açıklaması	Değişken	Açıklaması
D	Stator dış çapı	h_{s2}	Oluk yüksekliği
D_{si}	Stator iç çapı	h_{s1}	Oluk dış ucu yüksekliği
D_{ro}	Rotor dış çapı	h_{s0}	Dış ucu kalınlığı
D_{ri}	Rotor iç çapı	B_{s0}	Oluk açıklığı
L	Laminasyon uzunluğu	B_{s1}	Oluk iç genişliği
α_m	Miknatis adımı açısı	B_{s2}	Oluk dış genişliği
α_k	Kutup adımı açısı	W_{th}	Stator dış genişliği
h_{mag}	Miknatis kalınlığı	g	Hava aralığı mesafesi
h_{bc}	Stator boyunduruk kalınlığı	N_p	Kutup sayısı
R_{s1}	Oluk boyunduruk yarıçapı	W_{mag}	Miknatis yay uzunluğu

Çıkış Eşitlikleri

Makinenin çıkışı, temel boyutlar, hız ve spesifik manyetik ve elektriksel yüklemeler arasındaki ilişkiyi tanımlayan denklem, çıkış denklemi olarak bilinir. Motorun hacim (D^2L) katsayısının belirlenmesinde rotor yüzeyinde meydana gelen teğetsel kuvvetin yanı sıra, faydalanma katsayısı olarak bilinen Esson sabiti, (C_0) kullanılabilmektedir. Burada, C_0 değerine ulaşmak için spesifik elektriksel yükleme değeri (ac) bulunmalıdır. Şekil 3.21’de saniye başına çekilen güçten spesifik yükleme değerine ulaşılabilir (Gürdal, 2015).



Şekil 3.31 Spesifik elektriksel yükleme değeri (Dalcı, 2013)

Gürdal’ın 2015 yılında yayınladığı “Elektrik Makinelerinin Tasarımı” isimli kitabından Alternatif akım (AA) motorların boyutlandırılmalarına yönelik kullanılan eşitlikler yer almaktadır. Eşitlik 3.5’de güç P , hız n_s (dev/saniye) olarak ifade edilir (Gürdal, 2015).

$$\frac{P}{n_s} \quad (3.5)$$

AC makineler için Esson sabiti, (C_0) hesaplanması;

$$C_0 = 1.11 B_{ort} ac k_w \times 10^{-3} \quad (3.6)$$

$$P = C_0 D^2 L n_s \quad (3.7)$$

$$D^2 L = \frac{C_0 n_s}{P} \quad (3.8)$$

Burada, P motor gücü (W), B_{ort} hava aralığındaki ortalama akı yoğunluğu (T), ac spesifik elektriksel yükleme (amper iletken/m), D ve L sırasıyla stator dış çapı ve nüve uzunluğu (m) olarak ifade edilir.

Makinanın stator saclarındaki maksimum akı yoğunluğu malzemenin doyuma giden akı yoğunluğunu aşmamalıdır. Maksimum akı yoğunluğu dişlerin en dar kısmında meydana gelir. Eğer kaçak akı ihmal edilirse yani hava aralığını geçen bütün akı hatlarının dişlerden geçtiği varsayılırsa, hava aralığı ortalama akı yoğunluğu B_{ort} ve dişlerin akı yoğunluğu B_{th} arasındaki ilişki hava aralığının iki yanındaki toplam akının eşlenmesi ile bulunabilir (Gürdal, 2015). Buna göre:

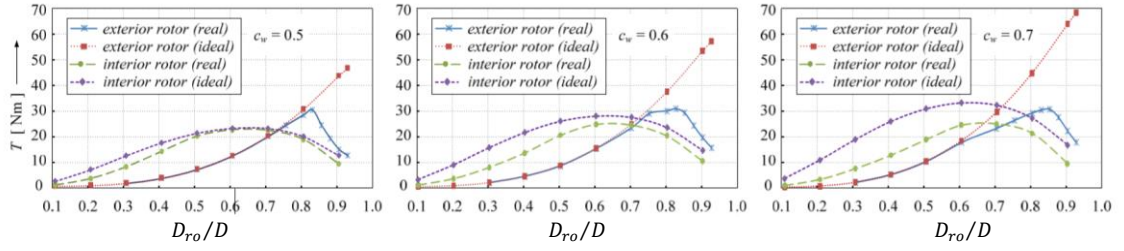
$$B_{ort}\pi DL = B_{th}W_{th}LN_{slot} \quad (3.9)$$

$$\frac{B_{th}}{B_{ort}} = \frac{\pi D}{W_{th}N_{slot}} \quad (3.10)$$

Burada, W_{th} en küçük diş genişliği ve N_{slot} dişlerin (olukların) sayısıdır. Dikdörtgen paralel kenarlı olukların ve sivriltilmiş dişlerin kullanıldığı makinalarda maksimum akı yoğunluğu stator dişinin hava aralığına yakın kısmında oluşur. Bu etki orta büyüklükte ve bazı küçük makinalarda daha çok göze çarpmaktadır ve sonuç olarak dişlerin akı yoğunluğunun, B_{th} hava aralığı ortalama akı yoğunluğu, B_{ort} oranı dişlerin en az genişlikte olduğu kısımda çok büyük olabilir. Bundan dolayı bu makinalar büyük makinalara göre daha düşük spesifik manyetik yükleme ile tasarlanırlar. B_{th}/B_{ort} oranı genelde standart 50 Hz frekanslı makinalarda 2.5 ve 3.5 arasındadır (Gürdal, 2015).

Çok düşük güçlü motorlar hariç mevcut uygulamalarda yüksek performans için kullanılan standart ölçülerle de D_{ro}/L oranının 1 civarında olduğu görülmektedir (Pyrhönen ve ark., 2013).

Doluluk oranına (c_w) olmak üzere, D_{ro}/D oranı en yüksek tork elde etmek için Reichert ve ark. 2009 çalışmasında 0.5-0.7 arası kabul etmiştir. Şekil 3.22’de D_{ro}/D oranına göre tork değerleri verilmiştir.



Şekil 3.32. D_{ro}/D oranına göre tork değerleri (Reichert ve ark., 2009)

Yüksek verimli motorlar elde edebilmek için D_{ro}/D oranını 0.5 olarak alınabilir. Bununla birlikte mıknatıs kalınlığı $h_{mag} = 4g$ olarak belirlenebilir (Boldea ve Tutelea, 2009).

Doğru bir motor tasarımı için motor hava aralığının hesaplanması da önemli bir husustur. Motor hava aralığı (g), manyetik devredeki akı yolu boyunca stator ile rotor arasındaki boşluktur. Hava aralığı, motor performansı ve verimliliği üzerinde etkilidir. Hava aralığı, motor çıkış gücü P ve kutup sayısına N_p bağlı olarak Eşitlik 3.10-3.11'deki gibi hesaplanabilmektedir (Zöhra, 2019).

$$g = \frac{0.2+0.01P^{0.4}}{1000} m; \quad N_p = 2 \quad (3.11)$$

$$g = \frac{0.18+0.006P^{0.4}}{1000} m; \quad N_p > 2 \quad (3.12)$$

SMSM'nin Boyutlandırması

Çıkış eşitlikleri ile SMSM'nin stator dış çapı D , rotor dış çapı D_{ro} , stator paket boyu L , hava aralığı g , mıknatıs kalınlığı h_{mag} ve stator diş kalınlıklarını W_{th} yaklaşık olarak belirlenmiştir. Buna göre SMSM'nin fiziksel ölçülendirmesi aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir (İ. Şahin, 2010). Şekil 3.23'te stator oluk alanı gösterimi yer almaktadır.

Hava aralığı kesit alanı A_g ,

$$A_g = (W_{mag} + 2g)L \quad (3.13)$$

Toplam mıknatıs yüzey alanı A_{mag} ,

$$A_{mag} = W_{mag}L \quad (3.14)$$

Stator dış alanı A_{th} ,

$$A_{th} = W_{th}L \quad (3.15)$$

Stator boyunduruk alanı A_{bc} ,

$$A_{bc} = h_{bc}L \quad (3.16)$$

Kutup yüzey alanı A_{pole} ,

$$A_{pole} = \frac{\pi D_{ro}L}{N_p} \quad (3.17)$$

Oluk iç genişliği B_{s1} ,

$$B_{s1} = \frac{(D_{si} + 2h_{s0})\pi}{N_{slot} - W_{th}} \quad (3.18)$$

Oluk dış genişliği B_{s2} ,

$$B_{s2} = \frac{(D_{si} + 2h_{s0} + 2h_{s2})\pi}{N_{slot} - W_{th}} \quad (3.19)$$

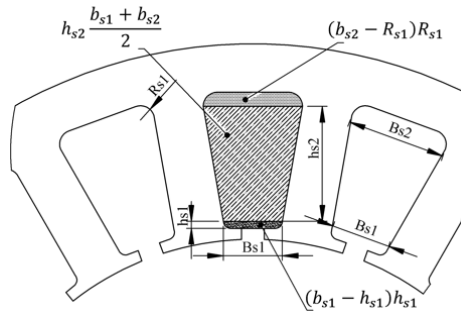
Oluk yüksekliği h_{slot} ,

$$h_{slot} = (h_{s0} + h_{s1} + h_{s2} + R_{s1}) \quad (3.20)$$

Stator boyunduruk yüksekliği h_{bc} ,

$$h_{bc} = \frac{D}{2} - \frac{D_{ro}}{2} - h_{slot} - g \quad (3.21)$$

Stator oluk alanı A_{slot} ,



Şekil 3.33. Oluk alanı gösterimi

$$A_{slot} = \left(h_{s2} \frac{b_{s1} + b_{s2}}{2} \right) + ((b_{s2} - R_{s1})R_{s1}) + ((b_{s1} - h_{s1})h_{s1}) \quad (3.21)$$

SMSM'nin kütle hesaplamasında, malzemenin özgül ağırlığı M_{dens} olarak ifade edilir. Buna göre;

Stator toplam dış laminasyonu kütlesi M_{th} ,

$$M_{th} = N_{slot} h_{slot} W_{th} L M_{dens} \quad (3.22)$$

Stator toplam boyunduruk laminasyonu kütlesi M_{bc} ,

$$M_{bc} = h_{bc} \pi L W_{th} (D - h_{bc}) M_{dens} \quad (3.23)$$

Toplam rotor sac kütlesi M_{rot} ,

$$M_{rot} = \left[\left[\left(\frac{D_{mb}}{2} \right)^2 \pi \right] - \left[\left(\frac{D_{ri}}{2} \right)^2 \pi \right] \right] M_{dens} \quad (3.24)$$

Toplam sac kütlesi M_t ,

$$M_t = M_{th} + M_{bc} + M_{rot} \quad (3.25)$$

Sarım hesaplamaları, faz dirençlerini ve sargının indüktanslarını bulmak için gerekmektedir. Burada iletken çapı D_t bir fazdaki bobin sayısı N_{coil} , bobin adımı S_{pitch} , sargı sonu uzunluk I_{end} ve ρ iletkenin özgül direncini ifade etmektedir.

İletken kesit alanı A_t ,

$$A_t = \frac{\pi D_t^2}{4} \quad (3.26)$$

Bir bobin için sargı uzunluğu L_{wire} ,

$$L_{wire} = 2 N_{turn} \left[L + I_{end} + \left(\frac{S_{pitch}}{N_{slot}} (D_{si} + h_{slot}) \pi \right) \right] \quad (3.27)$$

Sargı bağlantı uzunluğu L_{con} ,

$$L_{con} = \frac{S_{pitch} N_{coil}}{N_{slot}} (D - h_{slot}) \pi \quad (3.28)$$

Faz direnci R_s ,

$$R_s = \rho \frac{N_{coil}L_{wire}+L_{con}}{A_t} \quad (3.29)$$

Carter Katsayısı

Statorda diş uçlarındaki açıklıklar nedeni ile düzensiz hava aralığı meydana gelir. Hava aralığı relüktansında bir artışa neden olur (Soyaslan, 2020). (Carter, 1900), bu artışı analitik hesaplamalarda modellemek için bir katsayı belirlemiştir. Carter'ın katsayısı, oluk açıklığının hava aralığı uzunluğuna oranına bağlıdır. Stator üzerindeki Carter katsayısının hesaplanması, eşitlik 3.30 ile gösterilmektedir.

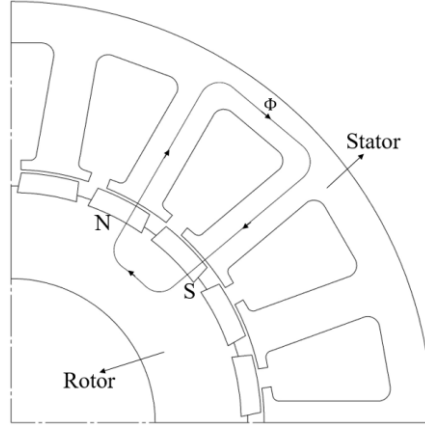
$$k_c = \frac{\pi D/N_{slot}}{\pi D_{sl}/N_{slot} - \frac{B_{s0}^2}{B_{s0}+5g}} \quad (3.30)$$

k_c katsayısı ile hava aralığı değerinin çarpılması sonucunda, eşitlik 3.31'deki düzeltilmiş hava aralığı kalınlığı g' elde edilmektedir.

$$g' = gk_c \quad (3.31)$$

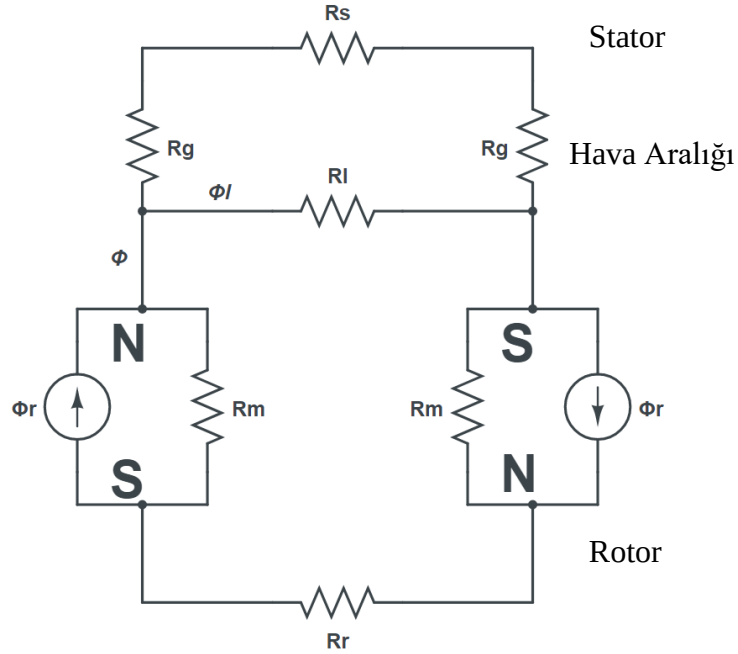
3.3.4 SMSM'nin Manyetik Devre Modeli

Manyetik devrede birbirine bitişik karşılıklı iki adet kutup (N ve S), stator ve rotor için üretilmiş nüveler ile tamamlanmaktadır (Pyrhönen ve ark., 2013). SMSM'lerde manyetik akı Φ , stator sargılarından başlayarak, stator çekirdeği, hava boşluğu, sabit mıknatıslar, rotor ve tekrar hava boşluğu üzerinden karşı stator çekirdeğine ulaşarak döngüsünü tamamlar (Soyaslan, 2020). Şekil 3.24'te SMSM'nin manyetik akının izlediği yol gösterilmiştir.



Şekil 3.34. SMSM’de manyetik akının izlediği yol

SMSM'nin manyetik eşdeğer devresi Şekil 3.25'te gösterilmiştir. Kalıcı mıknatıslar kendi içlerinde akı oluşturduğundan, akı kaynağı olarak modellenir ve Φ_r ile gösterilir. Mıknatısın endüktansı R_m ile gösterilir. Rotor ve statorun nüveleri sırasıyla R_r ve R_s ile gösterilir. Hava boşluğu endüktansı R_g ile gösterilir. Bir mıknatıstan diğerine akan sızıntı akı endüktansı R_l ile gösterilir. Mıknatıs akısı Φ , hava boşluğu akısı Φ_g ve sızıntı akısı Φ_l ile ifade edilir (Duane C. Hanselman, 2003).



Şekil 3.35. SMSM’nin manyetik eşdeğer modeli (Duane C. Hanselman, 2003)

Hava aralığı akısı Eşitlik 3.36'daki gibi ifade edilir. K_t sızıntı faktörü olup, değeri 1'den düşüktür. K_r , kaçak demir kayıplarını düzenlemek için hava aralığı direncini yavaşça artıran bir direnç faktörüdür. Bu değerlerin analitik yöntemlerle bulunması zordur. Genellikle tasarımcıya göre göre belirlenmektedir (Pyrhönen ve ark., 2013; Soyaslan, 2020).

$$\Phi_g = K_t \Phi \quad (3.32)$$

Şekil 3.25'teki manyetik akı olan Φ Eşitlik 3.33'teki gibi yazılabilir (Pyrhönen ve ark., 2013).

$$\Phi = \frac{2R_m}{2R_m + 2K_r R_g} \Phi_r = \frac{1}{1 + K_r \frac{R_g}{R_m}} \Phi_r \quad (3.33)$$

Mıknatıs ve hava aralığı relüktansları Eşitlik 3.34 ve 3.35'deki gibi olduğu bilinmektedir (İ. Şahin, 2010).

Mıknatıs relüktansı R_{mag} ,

$$R_{mag} = \frac{h_{mag}}{\mu_r \mu_0 A_{mag}} \quad (3.34)$$

Hava aralığı relüktansı R_g ,

$$R_g = \frac{g'}{\mu_0 A_g} \quad (3.35)$$

Yüksek güçlü motorlarda, motor hacminin minimum seviyelerde tutulması tercih edilir. Bu tür motorların tasarımında, stator relüktansı önemli bir faktördür. Stator relüktansının manyetik geçirgenliği, genellikle hesaplamalar için sonsuz olarak düşünülür. Ancak, daha doğru bir manyetik devre hesabı yapabilmek adına, stator relüktansının manyetik geçirgenliğinin de hesaba katılması gerekmektedir (İ. Şahin, 2010; Soyaslan, 2020). Bu sayede, motor tasarımında daha doğru ve optimize bir sonuç elde edilebilir. Stator dış relüktansı ve stator boyunduruk relüktansı Eşitlik 3.36-3.37 de ifade edilmiştir. Burada stator saclarının manyetik geçirgenliğini μ_{st} olarak ifade edilir.

Stator dış relüktansı R_{th} ,

$$R_{th} = \frac{h_{slot}}{\mu_{st}\mu_0 A_{th}} / S_{pitch} \quad (3.36)$$

Stator boyunduruk relüktansı R_{bc} ,

$$R_{bc} = \frac{\pi(D-h_{bc})}{\mu_{st}\mu_0 A_{bc}} / p \quad (3.37)$$

Hava akısı Eşitlik 3.38'deki gibi yazılabilmektedir (Pyrhönen ve ark., 2013).

Hava aralığı akısı Φ_g ,

$$\Phi_g = K_l \Phi = \frac{K_l}{1 + K_r \frac{\mu_{Rg} A_{mag}}{l_m A_g}} \Phi_r \quad (3.38)$$

Akı konsantrasyon faktörü C_ϕ ,

$$C_\phi = \frac{A_{mag}}{A_g} \quad (3.39)$$

Mıknatıs akı yoğunluğu B_r ,

$$B_r = \frac{\phi_r}{A_{mag}} \quad (3.40)$$

Manyetik iletkenlik katsayısı P_c ,

$$P_c = \frac{l_m}{g C_\phi} \quad (3.41)$$

Eğer denklemler düzenlenirse, hava aralığından geçen hava aralığı akı yoğunluğu Eşitlik 3.42'de belirtildiği gibi yazılabilir. SMSM'lerde hava aralığı akı yoğunluğuna göre tasarlanacaksa, aşağıdaki faktörler ve parametreler belirli aralıklarda seçilmelidir (Soyaslan, 2020):

1. Sızıntı akısı faktörü K_l : Bu değer 0.9 ile 1.0 arasında olmalıdır.
2. Relüktans faktörü K_r : Bu değer 1.0 ile 1.2 arasında olmalıdır.
3. Akı konsantrasyon faktörü C_ϕ : Bu değer 1.0 olarak alınmalıdır.

Bu koşullar altında, tasarımda değiştirilebilecek tek parametre manyetik iletkenlik katsayısı PC olacaktır. Dolayısıyla, mıknatısların ve hava aralığının kalınlıkları motor tasarım aşamasında önemli bir etkiye sahiptir (Çagan, 2015; Soyaslan, 2020).

Hava aralığı akı yoğunluğu B_g ,

$$B_g = \frac{K_l C_\phi}{1 + K_r \frac{\mu_R}{P_C}} B_r \quad (3.42)$$

Boldea'ya göre hava aralığı akı yoğunluğu B_g Eşitlik 3.43'teki gibi yazılabilmektedir. Saçaklanma faktörü K_{fringe} 0.1-0.2 arası alınabilir (Boldea ve Tutelea, 2009)

$$B_g = \frac{B_r}{1 + K_{fringe}} \cdot \frac{h_{mag}}{h_{mag} + g} \quad (3.43)$$

Şahin, 2010 yılındaki tez çalışmasında, hava aralığı akı yoğunluğunu, ortalama hava aralığı akı yoğunluğu, maksimum hava aralığı akı yoğunluğu, dışlerdeki akı yoğunluğu ve stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu Eşitlik 3.44-3.45'de belirlemiştir (İ. Şahin, 2010). Hava aralığı akı yoğunluklarının dalgaları Şekil 3.26'da gösterilmiştir.

Hava aralığı akı yoğunluğunu B_g ,

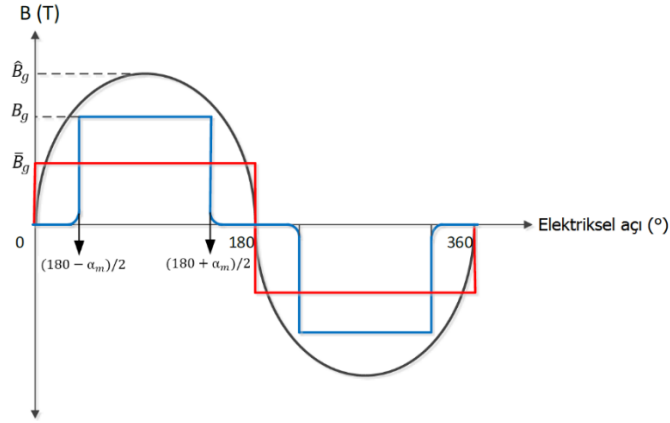
$$B_g = \frac{A_m/A_g}{1 + R_g/R_{mag}} B_r \quad (3.44)$$

Hava aralığı ortalama akı yoğunluğu $\bar{B}_g$,

$$\bar{B}_g = \frac{A_g}{A_{mag}} B_g \quad (3.45)$$

Hava aralığı akı yoğunluğu tepe değeri $\hat{B}_g$,

$$\hat{B}_g = \frac{h_{mag}}{h_{mag} + g \mu_r} B_r \quad (3.46)$$



Şekil 3.36. Hava aralığı akı yoğunluklarının dalga şekilleri (Bulgan, 2014)

Motor tasarımındaki önemli bir parametrede dişlerdeki akı yoğunluğudur. Seçilen çekirdek malzemenin B-H eğrisine göre diz bölgesinde çalışması, motorlar için en verimli çalışma koşullarını sağlar (Soyaslan, 2020).

Dişlerdeki akı yoğunluğu B_{th} ,

$$B_{th} = \frac{h_{mag}}{h_{mag} + g_{lr}} \frac{\pi D_{so}/N_{slot}}{w_{sd}} B_r \quad (3.47)$$

Stator boyunduruğundaki akı, toplam kutup akısının yarısı değerindedir. Bu bağlamda, stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu Eşitlik 3.48'deki hesaplanabilir (Soyaslan, 2020).

$$B_{bc} = \frac{\hat{B}_g A_g}{2 h_{bc} L} \quad (3.48)$$

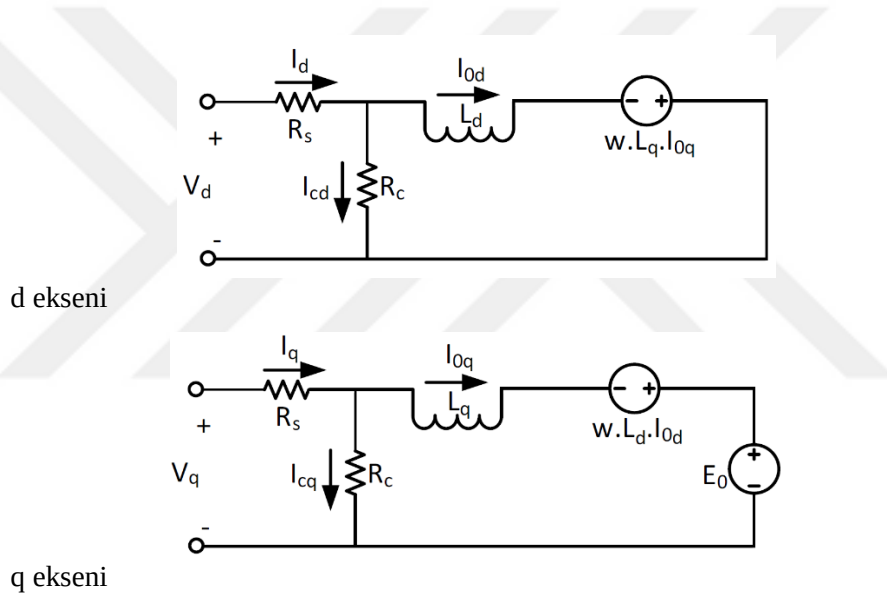
3.3.5 SMSM'nin Elektriksel Devre Modeli

SMSM'nin yapıları genellikle senkron motorlar ile benzerdir. İki yapı da 3 fazlı sargılara sahiptir. SMSM'lerde, senkron motorlarda rotordaki alan sargıları yerine mıknatıslar kullanılmaktadır. Mıknatısların yerleşimi nedeniyle d ve q eksenleri oluşmaktadır. SMSM'lerde d ve q eksenlerine göre 2 farklı elektriksel devre modellenir. Bu dönüşüm, motorun üç fazlı akım ve gerilim değerlerini iki doğrusal bağımsız bileşene (d ve q) dönüştürür. Bu dönüşüm sayesinde, SMSM'leri kontrol ve analiz etmek daha basitleştirilmiş hale gelir. Bu sayede stator sargıları ve rotoru birbirlerinden ayırabilir ve sargı başına düşen denklem sayısı azaltılabilir. Devrelerde, bakır ve demir kayıplarını

temsil eden dirençler bulunurken, zıt EMK'nın modellenmesi için bir indüktans ve bir gerilim kaynağı mevcuttur (Bulgan, 2014). Bu SMSM için;

- Doğrusal çalışma bölgesinde,
- Stator sargılarından sinüzoidal gerilim ve akım geçtiği,
- Harmoniklerin sargı faktörlerinin göz ardı edildiği,
- Manyetik malzemelerin izotropik olduğu ve doyuma ulaşmadığı durumlar için geçerlidir (Bulgan, 2014).

SMSM'nin elektriksel eşdeğer devre modeli Şekil 3.27'de gösterilmiştir.



Şekil 3.37. SMSM'nin d ve q eşdeğer elektrik devresi (Bulgan, 2014)

Yukarıdaki eş devre modeli denklem 3.49-3.51 göre ifade edilebilir.

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_{0d}}{dt} - \omega_m L_d i_q \quad (3.49)$$

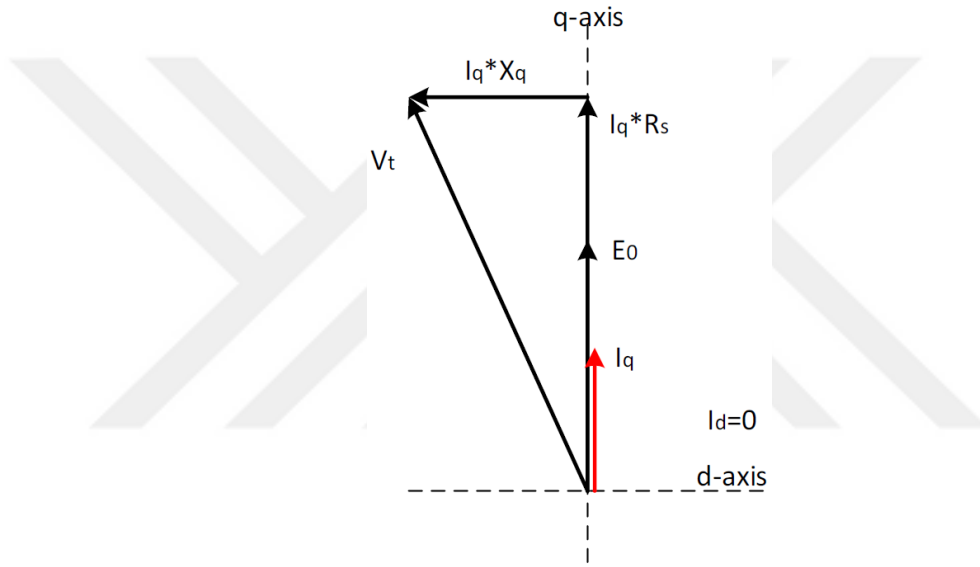
$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_{0q}}{dt} + \omega_m L_d i_d + \omega_m \Psi_M \quad (3.50)$$

$$T = \frac{3}{2} \frac{N_p}{2} [(i_q \Psi_M) + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3.51)$$

Burada, T anma torkunu, N_p kutup sayısı, R_s faz direncini, i_d ve i_q akımları, L_d ve L_q indüktansları, i_{0d} ve i_{0q} indüktanslar üzerinden akan akımları, Ψ_M mıknatıs akısını, ω_m rad/s cinsinden hızı ifade etmektedir (Bulgan, 2014). YM'li SMSM'lerde, mıknatısların rotorun yüzeyine yerleştirildiği yapıya sahiptir. Bu tür motorlarda, maksimum tork

oranını ve verimliliği sağlamak için i_d akımını sıfır olarak ayarlamak yaygın bir yöntemdir. Bu, motorun ağırlıklı olarak sadece i_d akımıyla (dönen alan eksenini boyunca) çalışacağı anlamına gelir. Dolayısıyla $i_d = 0$ kabul edilebilir (Boldea ve Tutelea, 2009).

Faz diyagramında X_q , indüktans ve frekans değerleri ile hesaplanan q-ekseni reaktansını, V_t terminal gerilimini, E_{em} indüklenen EMK'yı ifade etmektedir. V_t değeri denklem 3.52'de verilmiştir. SMSM'nin vektör kontrol modundaki elektrik faz diyagramı Şekil 3.28'de gösterilmiştir.



Şekil 3.38. SMSM'nin vektör kontrol modundaki elektrik faz diyagramı (Bulgan, 2014; Soyaslan, 2020)

$$V_t = \sqrt{(I_q R_s + E_0)^2 + (I_q X_q)^2} \quad (3.52)$$

Faz İndüktans Hesaplamaları

Faz indüktanslarının hesaplanmasında üç bileşen dikkate alınır. Bunlar, oluk kaçak indüktansı L_{slot} , sargı sonu kaçak indüktansı L_{end} ve mıknatıslanma indüktansı $L_{md} - L_{mq}$ olarak ifade edilir (Soyaslan, 2020).

$$L_d = L_{slot} + L_{end} + L_{md} \quad (3.53)$$

$$L_q = L_{slot} + L_{end} + L_{mq} \quad (3.54)$$

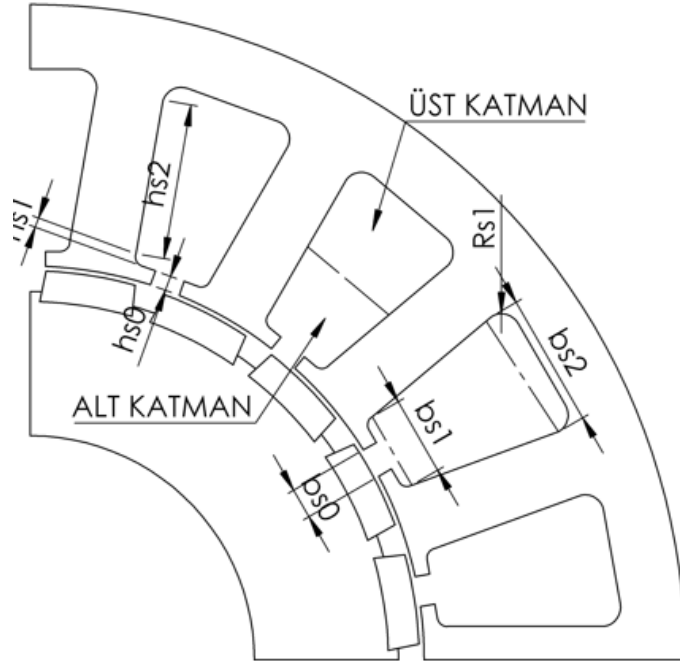
Çift katmanlı sargıya ait SM motorlarda, oluk kaçak indüktansının iki bileşeni bulunmaktadır. Bu bileşenler, her iletkenin öz indüktansı L_{sls} ve bobinler arasındaki karşılıklı indüktans L_{slm} olarak ifade edilir. Bu bağlamda, oluk indüktansı L_{slot} , Eşitlik 3.55 ile hesaplanabilir. Öz indüktans ve karşılıklı indüktans değerleri ise denklem 3.56 ve 3.57 kullanılarak elde edilir (Lipo, 2017). Denklemlerde yer alan pT , pB ve pTB değişkenleri, spesifik oluk iletkenlik katsayılarını temsil ederken, C_{pitch} değeri, bobinin açısıl uzunluğunun bir kutba oranını gösteren bobin adımıdır (Soyaslan, 2020).

$$L_{slot} = L_{sls} + L_{slm} \quad (3.55)$$

$$L_{sls} = \frac{3(N_{turn} N_{coil})^2 L}{N_{slot}} (pT + pB + 2 \cdot pTB \cdot (3C_{pitch} - 2)) \quad (3.56)$$

$$L_{slm} = \frac{3(N_{turn} N_{coil})^2 L}{N_{slot}} pTB 3(1 - C_{pitch}) \quad (3.57)$$

Bir bobindeki oluk sayısı N_{turn} , bir fazdaki bobin sayısı N_{coil} , oluk üst, alt ve toplam bölgelerindeki iletkenler için hesaplanan pT , pB ve pTB kaçak iletkenlik katsayıları, sırasıyla Eşitlik 3.58-3.60'ta ifade edilmiştir. Şekil 3.29'daki alt ve üst bölgelerde konumlandığını kabul edilmiştir (Bulgan, 2014; Lipo, 2017; Soyaslan, 2020).



Şekil 3.39. Çift katmanlı sargı yapısına ait oluk şeklinin üst ve alt sargı katmanları

$$pT = \frac{1}{2} \mu_0 \left(0.623 + \frac{h_{s0}}{b_{s0}} \right) + \frac{1}{3} \mu_0 \frac{R_{s1} + \frac{h_{s2}}{2}}{b_{s2}} \quad (3.58)$$

$$pB = \mu_0 \left(\frac{h_{s0}}{b_{s0}} + 2 \frac{h_{s2} - R_{s1}}{b_{s1} + b_{s2}} \right) \quad (3.59)$$

$$pTB = \mu_0 \left(\frac{h_{s0}}{b_{s0}} + \frac{h_{s2} - R_{s1}}{b_{s1} + b_{s2}} \right) \quad (3.60)$$

Sargı sonu indüktansı L_{end} çift katmanlı sarım yapısına sahip prototip motor için eşitlik 3.61'teki şekilde yazılabilmektedir (Gieras, 2010; Soyaslan, 2020). Sargı sonlarının, oluk ortasından diğer oluğa dönüş yaptığı kabul edilerek w_{c1} değeri eşitlik 3.62'deki gibi bulunur. Kaçak manyetik geçirgenliği λ_{bs} ise eşitlik 3.63'teki formül ile elde edilmektedir. Denklemden yer alan q değeri, kutup-faz başına oluk sayısını vermektedir (İ. Şahin, 2010; Soyaslan, 2020).

$$L_{end} = 4\mu_0 \frac{(N_{coil}N_{turn})^2}{N_p} I_{end} \lambda_{bs} \quad (3.61)$$

$$w_{c1} = \pi(D - h_{slot} - h_{bc}) \frac{S_{pitch}}{N_{slot}} \quad (3.62)$$

$$\lambda_{bs} = 0.34 \cdot q \left(1 - \frac{2}{\pi} \frac{w_{c1}}{L_{end}} \right) \quad (3.63)$$

Mıknatısların rotora yerleşimleri nedeniyle iki farklı eksen oluşur. Biri doğrudan mıknatıslar üzerinden geçen d eksenini diğeri ise akının rotordan geçtiği q eksenidir. YM rotor yapılarına sahip SMSM'lerde L_{md} ve L_{mq} değerleri bu çalışmada birbirine eşit olarak kabul edilmiştir (Boldea ve Tutelea, 2009). Böylelikle L_d ve L_q indüktansları da birbirine eşit olacaktır (İ. Şahin, 2010).

$$L_m = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{1}{N_p} (N_{slot} k_w)^2 \frac{\mu_0 A_{pole}}{g'} \quad (3.64)$$

Zıt Elektromotor Kuvveti (EMK) ve Elektromanyetik Tork

SMSM motorunu tanımlamanın en kolay yolu zıt EMK gerilimi dalga şeklini ölçmektir, çünkü üretilen zıt EMK'yi belirleyerek, test edilen motorun EMK ve tork sabitleri, kutup sayısı, hız aralığı ve tork-hız karakteristiği gibi birçok özelliği türetilir. Ayrıca zıt EMK'nın dalga şekli, bara gerilimi ve akım dalga şekli (sinüzoidal veya trapezoidal) gibi

motor sürücü gereksinimleri hakkında önemli bilgiler sağlar. Ayrıca, laminasyonlu stator paketi ve stator sargı şemasının etkilerini dikkate almak amacıyla bir istifleme faktörü k_{st} ve sargı faktörü k_w eklenmelidir (İ. Şahin, 2010).

Zıt Elektromotor Kuvveti E_{em} ,

$$E_{em} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{N_p}{2} N_{coil} N_{turn} \phi_g k_{st} k_w \omega_m \quad (3.65)$$

Elektromanyetik tork T_{em} ,

$L_d = L_q$ Eşit olduğu durumda ve her üç fazdaki akımlar dengelendiğinde, elektromanyetik tork T_{em}

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{N_p}{2} N_{coil} N_{turn} \phi_g k_{st} k_w i_q \quad (3.66)$$

i_q Akımını ters Clarke-Park dönüşümleri ile faz akımı olan I_{rms} akımına ulaşılabilir.

Clarke-Park Dönüşümleri

Clarke-Park dönüşümleri, Üç fazlı elektrik sistemlerinin analiz ve kontrolünü kolaylaştıran matematiksel dönüşümlerdir. En basit haliyle, Clarke Park dönüşümleri, üç fazlı akım ve gerilim değerlerini iki eksenli koordinat sistemine dönüştürür. Bu dönüşüm, üç fazlı sistemlerin kontrolünü ve analizini daha kolay ve etkili bir şekilde gerçekleştirmeye yardımcı olur. Burada S dönüştürülecek büyüklüğü (akım, gerilim veya akı) ifade etmektedir. θ rotor açısını ifade etmektedir (Fitzgerald ve ark., 2005).

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

Ters dönüşüm,

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

3.3.6 Motor Kayıpları ve Verim

Alternatif akım makinaları elektriksel güç alıp mekanik güç üretirler. Makine giriş gücünün P_{in} tamamı faydalı güce dönüşmez, daima kayıplar meydana gelir. Alternatif akım makinalarındaki kayıplar dört temel kategoride incelenir. Bunlar elektriksel kayıplar, nüve kayıpları, mekanik kayıplar ve dağılma yük kayıplarıdır (Chapman, 2017).

Elektriksel kayıplar P_{copper} , bakır kayıpları olarak da bilinen stator sargılarında meydana gelen omik ısı kayıplarıdır. Üç fazlı bir SMSM motor için stator bakır kayıpları eşitlik 3.69 de verilmiştir. Faz akımının rms değerini I_{rms} ve faz direncini R_s olarak ifade edilir.

$$P_{copper} = 3I_{rms}^2 R_s \quad (3.69)$$

Demir kayıpları P_{iron} , motorun silisli saclarında meydana gelen histerezis ve girdap (eddy) akımı kayıplarıdır. SMSM motorlarda demir kayıpları stator üzerinde meydana gelmektedir. Rotor üzerinde mıknatıslardan dolayı çok düşük bir kayıp meydana gelmektedir (Chapman, 2017). Statorda ise dişlerde ve boyundurukta meydana gelen kayıplar olarak ikiye ayırabiliriz (İ. Şahin, 2010). Buna göre demir kaybı P_{iron} , histerezis kayıp sabiti k_h , girdap akım kaybı k_e , f çalışma frekansı, dişlerdeki maksimum akı yoğunluğu $\hat{B}_{th}$, boyunduruktaki maksimum akı yoğunluğu $\hat{B}_{bc}$ olarak ifade edilir. Eşitlik 3.70'te demir kayıpları ifade edilmiştir.

$$P_{iron} = (k_h f \hat{B}_{th}^2 + k_e f^2 \hat{B}_{th}^2) M_{st} + (k_h f \hat{B}_{bc}^2 + k_e f^2 \hat{B}_{bc}^2) \cdot M_{bc} \quad (3.70)$$

Mekanik kayıpları P_m , iki çeşit olarak ele alabiliriz bunlar sürtünme ve rüzgâr kayıplarıdır. Sürtünme kayıpları makinedeki yataklardan, rulmanlardan ve mekanik parçalardan meydana gelen kayılardır. Rüzgâr kayıpları ise iç kısımdaki hava motor döner kısmında oluşan sürtünmeleri ifade etmektedir. Mekanik kayıplar genellikle demir kayıpları ile birlikte ele alınır. Motor boşta iken çalıştırıldığı durumda elektriksel olarak çekeceği güç motor için mekanik ve demir kayıplarını ifade etmektedir (Chapman, 2017). Bununla birlikte mekanik kayıplar motor çıkış gücünün %1-3 arası kabul edilebilir (Hargreaves ve ark., 2012).

Dağılma yük kayıpları P_o , ise diğer kayıplar olarak ifade edilebilir. Bu kayıpların herhangi bir hesaplaması yoktur ancak genel olarak tam yük altında toplam kayıpların %1'i olarak ifade edilir (Chapman, 2017).

P_{loss} , Toplam kayıpları ifade etmektedir.

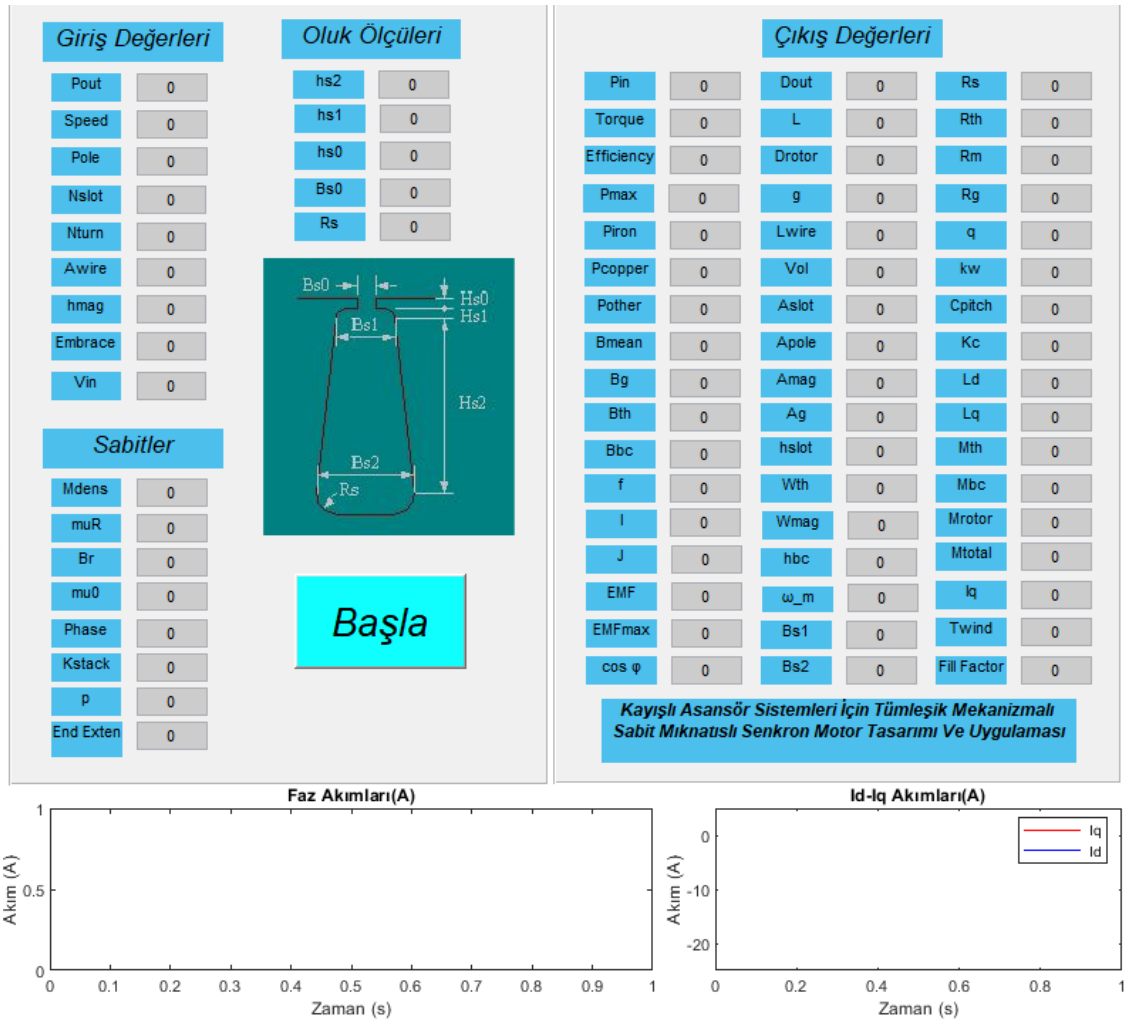
$$P_{loss} = P_{copper} + P_{iron} + P_m + P_o \quad (3.71)$$

Motor verimi Eşitlik 3.72'de ifade edilmiştir.

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} 100 \quad (3.72)$$

3.3.7 Analitik Hesaplamaların Gerçekleştirilmesi

Uygun bir SMSM tasarımının gerçekleştirilmesi ve farklı oluk/kutup kombinasyonlarının tasarımlarında sonuçları analitik olarak belirlemek amacı ile belirlenen eşitlik ve kabul değerleri MATLAB programı yardımı ile analitik modellemesi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analitik modelleme MATLAB'ın GUI uygulaması ile bir ara yüz hazırlanmış ve görselleştirilmiştir. Bu ara yüz sayesinde tasarlanan her model için akım, tork, kayıplar, verim, güç faktörü ($\cos \phi$) gibi SMSM tasarımda denklemlerden elde edilen verilerin belirlenmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca literatürden alınan genel kabul verileri kullanılarak, stator dış çapı, stator iç çapı, hava aralığı gibi motor hacmini ve sınırlarını belirleyen değerlerin oluşmasına yardımcı olmuştur. Şekil 3.30'da MATLAB GUI ara yüzünde hazırlanan analitik modelleme yer almaktadır. Şekil 3.30'da yer alan değerler, çizelge 3.8'de SMSM'nin giriş değerleri ve Çizelge 3.9'da SMSM'nin elde edilen çıkış eşitlikleri yer almaktadır.



Şekil 3.40. MATLAB GUI ara yüzü

Çizelge. 3.8. SMSM'nin giriş değerleri

İsim	Açıklama	Birim	İsim	Açıklama	Birim
P_{out}	Çıkış gücü	W	M_{dens}	Malzemenin Öz kütlesi	kg/m^3
$Speed$	Hız	Rpm	μ_{uR}	Mıknatısın manyetik geçirgenliği	H/m
$Pole$	Kutup sayısı	-	B_r	Artık mıknatıslanma değeri	T
N_{turn}	Spir sayısı	-	μ_{u0}	Boşluğun manyetik geçirgenliği	H/m
N_{slot}	Slot sayısı	-	$Phase$	Faz sayısı	-
A_{wire}	Tel kesiti alanı	m^2	K_{stack}	İstifleme faktörü	-
h_{mag}	Mıknatıs yüksekliği	m	p	Telin öz direnci (ρ)	$ohm.m$
Em	Mıknatıs oranı / Kutup oranı	-	$End\ ext$	Sargı sonu taşma uzunluğu	m
V_{in}	Giriş voltajı	V	h_{s0}	Diş ucu kalınlığı	m
B_{s0}	Oluk açıklığı	m	h_{s1}	Oluk diş ucu yüksekliği	m
R_s	Oluk radyüsü	m	h_{s2}	Oluk yüksekliği	m

Çizelge. 3.9. SMSM'nin çıkış eşitlikleri

İsim	Açıklama	Birim	İsim	Açıklama	Birim
P_{in}	Giriş gücü	W	D_{out}	Stator dış çapı	m
$Torque$	Mil Torku	Nm	L	Stator-Rotor paket boyu	m
$Efficiency$	Verim	-	D_{rotor}	Rotor dış çapı	m
P_{max}	Maksimum güç	W	g	Hava aralığı	m
P_{iron}	Demir kayıpları	W	L_{wire}	Tel uzunluğu	m
P_{copper}	Bakır kayıpları	W	Vol	Motor hacmi	m^3
P_{other}	Diğer kayıplar	W	A_{slot}	Oluk alanı	m^2
B_{mean}	Ortalama akı yoğunluğu	T	A_{pole}	Kutup alanı	m^2
B_g	Hava aralığı akı yoğunluğu	T	A_{mag}	Mıknatis alanı	m^2
B_{th}	Dişlerdeki akı yoğunluğu	T	A_g	Hava aralığı alanı	m^2
B_{bc}	Boyunduruktaki akı yoğunluğu	T	h_{slot}	Toplam Oluk yüksekliği	m
f	Frekans	Hz	W_{th}	Stator diş genişliği	m
I	Akım	A	W_{mag}	Mıknatis genişliği	m
j	Akım yoğunluğu	A/mm^2	h_{bc}	Stator boyunduruk yüksekliği	m
EMF	Elektromotor kuvvet	V	$Twid$	Rüzgâr torku	Nm
EMF_{max}	Maksimum elektromotor kuvvet	V	Kc	Karter katsayısı	-
$\cos \varphi$	Güç faktörü	-	Ld	d eksenli endüktansı	ohm
R_s	Sargı direnci	ohm	Lq	q eksenli endüktansı	ohm
R_{th}	Stator Diş direnci	ohm	M_{th}	Stator dişlerinin ağırlığı	kg
R_m	Mıknatis relüktansı	ohm	M_{bc}	Stator boyunduruk ağırlığı	kg
R_g	Hava aralığı relüktansı	ohm	M_{rotor}	Rotor ağırlığı	kg
q	Kutup-faz başına oluk sayısı	-	M_{total}	Toplam stator-rotor ağırlığı	kg
kw	Sargı faktörü	-	Iq	q eksen akımı	A
C_{pitch}	Bobin adımı	-	$Fill Factor$	Sargı doluluk oranı	%

3.4 Analiz ve Optimizasyon Yöntemleri

Analitik hesaplamalar ile doğrulanmış tasarımlar SEY ile de doğrulanması gerekmektedir. Bu kapsamda, elektromanyetik olarak yapılan çalışmalar için ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak 2B ve 3B SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan optimizasyonlar ANSYS Maxwell yazılımının modülü olan GA metodu ile gerçekleştirilmiştir. Termal analizler ANSYS Maxwell yazılımı ile entegrasyonu yapıp ANSYS Icepack yazılımı ile motor çözümlerine paralel olarak SEY ile analizler gerçekleştirilmiştir. Asansör makinesi ve asansör kuyu montaj tasarımları Solidworks yazılımı ile katı modellemesi gerçekleştirilmiştir. Yapısal analizler SEY yöntemi ile Solidworks Statik analiz modülünde gerçekleştirilmiştir.

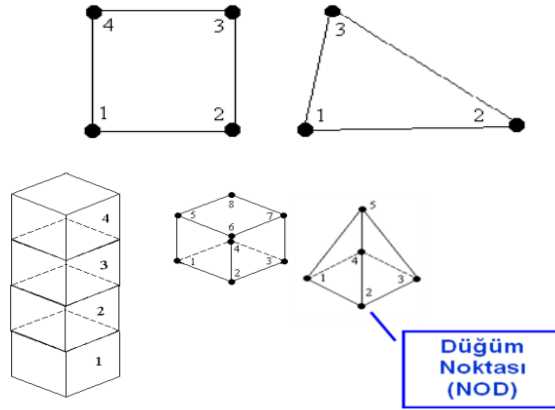
3.4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Mühendislik ve fizik problemlerinin çözümünde sıkça başvurulanan SEY, genellikle karmaşık sistemlerin analizinde kullanılır. Bu analizler arasında stres analizi, ısı transferi, akışkan dinamikleri, titreşimler ve manyetik alanların incelenmesi yapılmaktadır. Bu tip analizlerin uygulama alanları oldukça geniş olup, otomobiller, elektrik motorları ve çeşitli makineler gibi farklı yapılar üzerinde kullanılır (Arıkan, 2015; Eker, 2017; XIN GE, 2014).

SEY analizlerinin temel ilkesi, bir problemin daha küçük ve yönetilebilir parçalara ayrılması ve bu parçaların ayrı ayrı çözülmesidir. Bu yaklaşımın çıktısı, genellikle tam bir çözüm olmasa da tam çözüme oldukça yakın bir sonuçtur. Daha derinlemesine çözümlemeler ve ilave iyileştirmelerle, bu sonuç daha da kesinleştirilebilir (Eker, 2017; Sahin, 2001).

Sonlu Elemanlar Yöntemi, doğrusal olmayan problemler dahil olmak üzere çok geniş bir problem seti için uygulanabilir. Çözüm alanı, birbirine bağlı, basit ve küçük alt bölgelere veya "sonlu elemanlara" bölünür. Örneğin, elektromanyetik tasarımda, problem alanı daha küçük hacimlere veya alanlara bölünür. SEY'in geniş uygulama alanının bir nedeni, bilgisayar programı içindeki giriş verilerinin kolayca değiştirilebilmesi ve bu sayede çeşitli özel problemlerin çözülebilmesidir (Arıkan, 2015; Eker, 2017).

SEY, mühendislik ve matematikte yaygın olarak kullanılan bir hesaplamalı yöntemdir. Bu yöntem, karmaşık bir yapıyı daha basit 'sonlu elemanlar' veya 'parçalar' olarak adlandırılan bir diziye dönüştürür. Bu parçalar genellikle birbirine bağlı 2B üçgen ve dörtgenler veya 3B tetrahedronlar şeklinde tasvir edilir. Daha sonra bu elemanların birbirleri ve çevreleriyle nasıl etkileşime girdiği simüle edilir. Şekil 3.31'de SEY eleman tipleri verilmiştir.



Şekil 3.41. SEY eleman tipleri (Güler ve Şen, 2016)

3.4.2 Optimizasyon Yöntemleri

Elektrik makineleri tasarımında çeşitli optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu optimizasyon çeşitleri belirli (Deterministik) ve olasılıksal (Stokastik) yöntemler olarak ikiye ayrılır. Deterministik Yöntemler, problemleri adım adım çözen ve belirli bir sonuca ulaşan yöntemlerdir. Örnek olarak Ardışık Kısıtlamasız Minimizasyon Tekniği (AKMT) verilebilir. Bu ve diğer benzer yöntemler, optimum çözümü hızlı bir şekilde bulmayı amaçlar. Stokastik Yöntemler, rasgele veya olasılıklara dayanır, bu nedenle genellikle daha fazla hesaplama gerektirir. Olasılıksal optimizasyonlar, genetik algoritma (GA), simüle tavlama, parçacık sürü optimizasyonu ve diferansiyel evrim gibi yöntemler bu kategoriye girer. Bu tür yöntemler, yerel minimumlarda sıkışmayı önleme avantajına sahiptir ve genellikle geniş çözüm alanlarını arama konusunda daha etkilidirler (Duan ve Ionel, 2013).

Her iki tür yöntem de genellikle bir dizi tasarım değişkenini (örneğin, bir motorun çeşitli boyutları, şekilleri, malzemeleri vb.) optimize etmeye çalışır. Bu, genellikle enerji verimliliğini artırmak, maliyeti azaltmak, boyutu küçültmek veya belirli bir uygulama için motorun performansını en üst düzeye çıkarmak gibi hedeflere ulaşmak için yapılır.

3.4.3 Genetik Algoritma

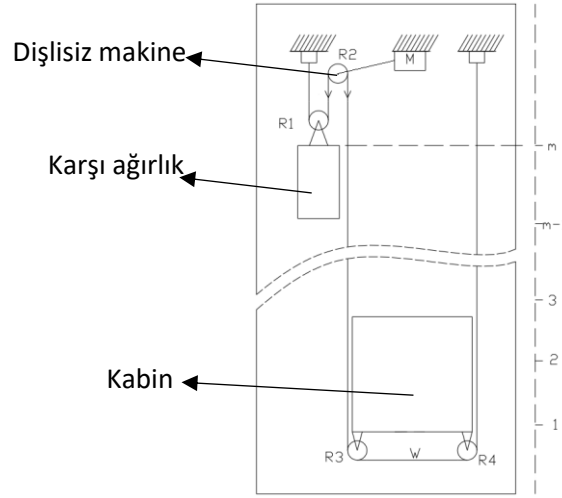
GA, evrim sürecini taklit ederek karmaşık optimizasyon problemlerin çözümü ile ilgilenir. Bu süreç, canlı organizmaların genetik ve doğal seçim mekanizmalarına dayanır. GA genellikle üç ana operasyon kullanır. Bunlar üreme, çaprazlama ve mutasyondur. Üreme, popülasyondaki en uygun bireylerin belirlenmesi ve sonraki nesillere aktarılması sürecidir. Çaprazlama, bu seçilmiş bireylerin genlerini karıştırarak yeni bir dizi gen oluşturur. Mutasyon ise bu yeni gen dizisinde rastgele değişiklikler yapar. Bu özellikler, GA'ların büyük ölçekli optimizasyon problemlerini çözme yeteneğini artırır. GA, yerel minimumlarda sıkışma olasılığını azaltır ve en iyi çözüm bulmayı hedefler. Bu, genellikle bir motorun verimliliğini en üst düzeye çıkarmak veya belirli bir uygulama için performansını optimize etmek için kullanılan bir yaklaşımdır (Łukaniszyn ve ark., 2004).

3.5 Asansör Tahrik Makinesinin Statik Yük ve Malzemelerinin Belirlenmesi

SMSM'nin elektromanyetik tasarımı tamamlandıktan sonra asansör makinesine uygun olarak statik yüklerin belirlenmesi gerekmektedir. Elde edilen statik yük değerlerine göre motor kapakları, rulmanlar, motor mili, kasnak gibi malzemeler belirlenmelidir. Fren, enkoder ve kayışların seçimi yük değerlerine göre yapılmalıdır. Belirlenen malzemelere göre 3B katı model tasarımı aşamalarına geçilmesi gerekmektedir.

3.5.1 Statik Yüklerin Belirlenmesi

SMSM'nin elektromanyetik ve termal analizlerinden uygun sonuçlar ile motorun temel boyutları elde edildikten sonra motor mil, kasnak, kapaklar ve rulmanlar üzerine uygulanacak toplam statik yük hesabı çıkarılmalıdır. Statik yük, bir cismin sabit bir konumda veya hareket halinde olsa bile, uyguladığı yükleri ifade eder. Asansör kuyularında da motorun, kabinin, rayların veya kayış ağırlığının tamamı statik yükleri ifade eder. Bu yükler asansör kuyusu üzerinden uygun şekilde binaya ve temele iletilmelidir. 2:1 süspansiyona sahip asansör kuyusundaki taşıma sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.32'de ifade edilmiştir. Asansör motorunun çalışması esnasında maksimum yük karşısında dayanımının ölçülmesi gerekmektedir. Buna göre tüm statik yük hesaplamaları Şekil 3.32'deki asansör süspansiyon sistemine göre tasarlanmıştır.



Şekil 3.42. 2:1 Asansör süspansiyon sistemi (Fenercioğlu ve ark., 2022)

Motorun tork, hız ve güç değerleri eşitlik 3.73-3.76 ifade edilir (Yetiş, 2017). Eşitlik 3.73'te T_{motor} motorun üreteceği nominal torku, r_k kasnak yarı çapını, g_y yerçekimi ivmesini ifade ederken, Eşitlik 3.74'te Q nominal yükü, W_c kabin ağırlığını, W_b denge ağırlığını, u süspansiyon türü için katsayıyı ifade eder. Doğrudan süspansiyon (1:1) için u değeri 1'dir. 2:1 süspansiyonlarda 2 alınmalıdır. η kuyu ve halat sistemi verimliliği, ω açısal hız (rad/s), v kabin hızı (m/s), n hız (d/d) olarak ifade edilir.

Motor nominal torku,

$$T_{motor} = \frac{r_k \times g_y \times (Q + W_c - W_b)}{u \times \eta} \quad (3.73)$$

$$\frac{Q}{2} = Q + W_c - W_b \quad (3.74)$$

Motor nominal hızı,

$$\omega = \left[u \times \left(\frac{v}{r_k} \right) \right] \quad (3.75)$$

$$n = \omega \left[\frac{60}{2 \times \pi} \right] \quad (3.76)$$

Motor parçalarına etki eden toplam statik yük (F_s) ve motor rulmanlarına binen toplam statik yük (T_{sl}) denklem (3.77-3.83) ile verilmiştir.

$$M_{cs} = Q' + W_c + W_s \quad (3.77)$$

$$M_{cw} = Q/2 + W_c + W_f \quad (3.78)$$

$$T_{cs} = \frac{M_{cs}}{2} \times g \quad (3.79)$$

$$T_{cw} = \frac{M_{cw}}{2} \times g \quad (3.80)$$

$$T_{sl} = T_{cs} + T_{cw} + O_{wb} \quad (3.81)$$

$$L_{pb} = \frac{T_{sl}}{4} \quad (3.82)$$

$$F_s = \left[\left(\frac{Q' + W_c + W_f}{2} + \frac{Q/2 + W_c + W_s}{2} \right) + O_{wb} \right] g \quad (3.83)$$

Burada nominal yük (Q), süspansiyon ağırlığı (W_s), karkas ağırlığı (W_f), kabin ağırlığı (W_c), makine kabin tarafının ağırlığı (M_{cs}), makine karşı ağırlık tarafının ağırlığı (M_{cw}), makine karşı ağırlık tarafındaki toplam yük (T_{cw}), makine kabini tarafındaki toplam yük (T_{cs}), rulman başına yük (ömür hesabı için) (L_{pb}), yerçekimi (g_y) olarak ifade etmektedir. Ayrıca mil, rotor, kasnaklar ve kayış ağırlıklarının toplam kuvveti (O_{wb}) de rulmanların üzerine binmektedir. F_s belirlenirken nominal yük değerinin 1.5 katı alınmıştır. Bunun sebebi deformasyon analizlerinin aşırı yüklemelere karşı yapılması gerektiğindendir. Ancak rulman ömür hesabında nominal yüklere göre işlem yapılması yeterlidir. Statik yükler Çizelge 3.10'da verilmiştir.

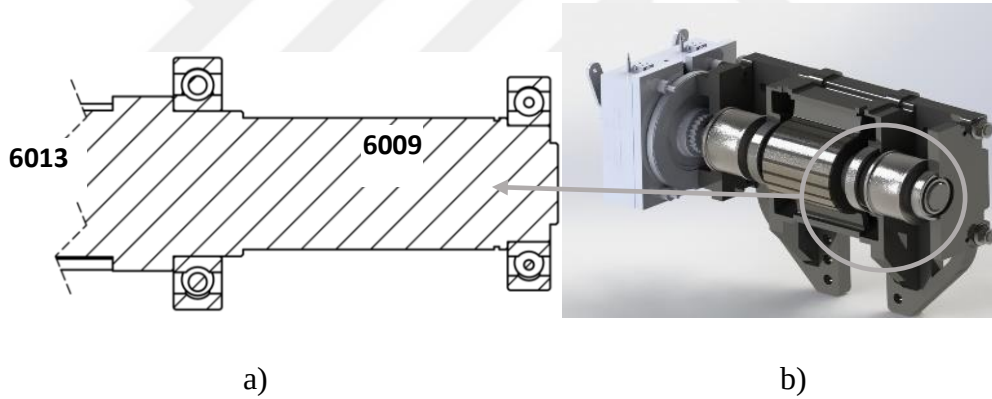
Çizelge. 3.10. Statik Yük Değeri

Statik Yük	Değeri	Sembol	Birim
Taşıma kapasitesi	630	Q	kg
Kapasite x 1,5	945	Q'	kg
Süspansiyon ağırlığı	136	W_s	kg
Karkas ağırlığı	107	W_f	kg
Kabin ağırlığı	700	W_c	kg
Makine kabin tarafı ağırlığı	1781	M_{cs}	kg
Makine karşı taraf ağırlığı	1122	M_{cw}	kg
Dinamik faktör	1	K	-
Güvenlik faktörü	5	S	-
Makine ağırlığı	102	V_m	kg
Rulmanlara etki eden diğer yükler	30	O_{wb}	kg
Rulman başına düşen yük	3247.11	L_{pb}	N
Makine kabin tarafına uygulanan toplam yük	8735.80	T_{cs}	N
Makine karşı ağırlık tarafı uygulanacak toplam yük	5503.41	T_{cw}	N
Toplam statik yük	14533.51	F_s	N
Yer çekimi kuvveti	9.81	g_y	N

Buna göre aldığımızda motor üzerine yaklaşık 15 kN statik bir yük uygulanmaktadır. Sistemin tasarımında 4 adet rulman kullanılması öngörüldüğü için rulman başına dik ekseninde 3.25 kN yük uygulanmaktadır.

3.5.2 Rulman Seçimi

Tasarlanan asansör motorunda, Şekil 3.33'te görüldüğü üzere 4 adet rulman kullanılmaktadır ve tasarımdan dolayı statik yük bu rulmanlara eşit olarak dağılmaktadır. Rulman seçimi eşitlik 3.84'e göre yapılmıştır. Burada n_s dönüş hızı d/d, C dinamik yük sayısı, F eşdeğer yük, p_o ömür katsayısını ifade etmektedir. Rulman başına gelen yüklere ve kapak kalınlıklarına göre kasnağın iki tarafı için SKF6009 ve SKF6013 tipi rulmanlar seçilmiştir. Katalog verilerinden 6009 ve 6013 tipindeki rulmanların C değeri sırasıyla 22.1 kN ve 31.9 kN olarak alınmıştır (Anonim, 2022a). p_o değeri bilyeli yatağa sahip rulmanlar için 3 alınmaktadır (Timken, 2017). Motorun devir sayısı n_s 400 d/d'dir.



Şekil 3.43. Tasarlanan motorun kesit görünümü a) Rulman yatakları b) 3B rulman görünümü

$$L_h = \frac{10^6}{60n_s} \left(\frac{C}{F} \right)^{p_o} \quad (3.84)$$

Değerler yerine konularak 3.84'e göre yapılan hesaplamalar sonucunda, 6009 ve 6013 tipi rulmanlar için sırasıyla 13137 ve 39510 saat ömür çıkmaktadır. Tasarlanan asansör tahrik makinesi S3 görev çevrimi ile çalışmaktadır ve makinenin yüklü kullanım süresinin toplam çevrim süresine oranı %40 olarak alınabilir (Anonim, 2010). Asansör motorunun günlük 4 saat tam yükte çalışacağı kabul edilir ise, elde edilen ömür hesaplarına göre 6009 ve 6013 tipi rulmanların sırasıyla yaklaşık 9.2 ve 27.4 yıl bakım gerektirmeden çalışabileceği gözükmemektedir. Bu değerler sürekli tam yükte çalışma durumunda ortaya

çıkan sonuçlardır. Asansörün uygulamada her zaman tam yükte çalışmayacağı düşünüldüğünde, rulman ömürlerinin daha fazla olması beklenmektedir.

3.5.3 Asansör Tahrik Makinesinin Malzeme Seçimi

Asansör tahrik makinesinin malzemelerinin belirlenmesinde, farklı tip asansör tahrik makinelerindeki kullanılan malzemeler incelenmiştir. Mil, kasnak ve bağlantı saplamaları yük altında çalışacak kısımlar olduğu için karbon oranı yüksek ıslah çeliği 42CrMo4 (4140) malzemeden seçilmiştir. 42CrMo4 çeliğinin akma mukavemeti 750 MPa olarak geçmektedir (Soyaslan ve ark., 2023) . Kapaklar ve bağlantı parçaları hem lazer ile kesime uygun hem de bu bölgelere uygulanan kuvvetlerin dik açılı olmasından dolayı imalat çeliği st37 seçilmiştir. St37 çeliğinin akma mukavemeti 235 MPa olarak geçmektedir. Kullanılan malzemelerin özellikleri Çizelge 3.11’de verilmiştir.

Çizelge. 3.11. Seçilen malzemelerin özellikleri (Soyaslan ve ark., 2023)

Özellik	42CrMo4	S235 (st37)	Birim
Elastikiyet Modülü	210000.0031	210000.0031	N/mm ²
Poisson Oranı	0.28	0.28	N/A
Yırtılma Modülü	79000	79000	N/mm ²
Kütle Yoğunluğu	7800	7800	N/m ³
Gerilme Mukavemeti	1000	360	N/mm ²
Akma Mukavemeti	750	235	N/mm ²
Termal Genişleme Katsayısı	1.1 e-05	1.1 e-05	1/K
Termal İletkenlik	14	14	W/ (m.K)
Özgül Isı	440	440	J/(kg.K)

3.5.4 Kayış ve Kasnak Seçimi

Kayış ve kasnak ölçüleri, üzerlerine gelen yükler hesaba katılarak belirlenmektedir. Kayışların %125 nominal yükte karşılaşılabileceği maksimum kuvvet F_{bmax} eşitlik 3.85 ile hesaplanmaktadır. Denklemdaki W_b değeri maksimum kuvvetin olduğu taraftaki kayış ağırlığını temsil etmektedir ve 20 kg olarak alınmıştır. Kayışların halat adedi (N) ve yarıçapı (d), kayış genişliği (w_k) ve Minimum Kopma Yüğü (MBL) değeri seçim aşamalarında kritik öneme sahiptir. MBL, bir anda kopmadan önce uygulanabilecek minimum yüğü temsil eder. Tasarlanan asansör makinesi 2 farklı kayışa sahip olduğu için tek bir kayış için hesaplanan güvenlik faktörü S_f eşitlik 3.86 ile ifade edilmektedir. EN81-20 normuna göre tasarlanan sistemdeki güvenlik katsayısının minimum 12 olması gerekmektedir (BRUGG Lifting, 2022). Yapılan hesaplamalara göre seçilecek düz

kayışın MBL değerinin en az 44.95 kN olması gerektiği belirlenmiştir. Buna göre kayış seçimi Çizelge 3.11’de BRUbelt 50kN olarak yapılmıştır. Seçilen statik yüklere göre kayışların güvenlik katsayısı 12.11 olarak belirlenmiştir.

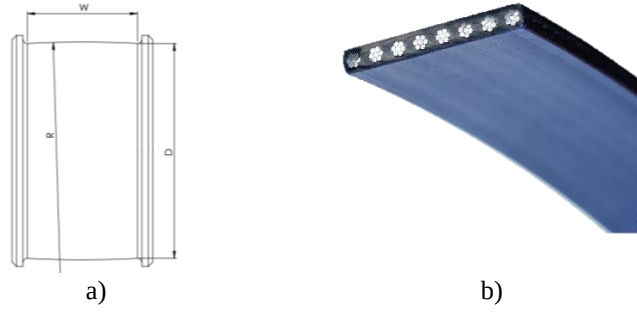
$$F_{bmax} = \left[\left(\frac{W_c + 1.25 \times Q}{2} \right) + W_b \right] g \quad (3.85)$$

$$S_f = \frac{MBL}{(F_{bmax}/2)} \quad (3.86)$$

Çizelge. 3.12. Kayış özellikleri (BRUGG Lifting, 2022)

Ürün Adı	Min. Kopma yükü (kN)	Kayış kesiti (mm x mm)	Halat Sayısı	Kayış ağırlığı
BRUGG Kayış 3.6kN	3.6	8 x 2.3	4	30
BRUGG Kayış 7.5kN	7.5	16 x 2.3	8	60
BRUGG Kayış 9kN	9	25 x 2.3	10	90
BRUGG Kayış 15kN	15	33 x 2.3	16	125
BRUGG Kayış 40kN	40	25 x 3.4	8	200
BRUGG Kayış 50kN	50	31 x 3.4	10	250
BRUGG Kayış 70kN	70	44 x 3.4	14	350
BRUGG Kayış 109kN	109	70 x 3.3	24	549
BRUGG Kayış 126kN	126	100 x 3.0	42	691
BRUGG Kayış 218kN	218	150 x 3.3	48	1136

Motor anma hızı ve kabin hızları arasındaki hesaplamalara göre kasnak çapı D_{kasnak} 100 mm olarak seçilmiştir. Kayışların montaj sırasında merkezden kaçık olması ve asansör motorunun çalışması sırasında kayışın kasnak üzerinde sağa-sola gezmesi gibi sorunlar ile karşılaşılmaktadır. Kayış gezmesi için 24 mm gibi bir değer alınmıştır. Böylelikle kayış genişliği w_k 31 mm ve güvenli kayış gezme genişliği 24 mm ile toplam 55 mm olmaktadır. Kasnakların yüzeyinde kayışların daha iyi hareket edebilmesi için kasnak radyüsü R_k oluşturulmaktadır. 100 mm kasnak çapı için R_k değeri 450 mm alınabilir (BRUGG Lifting, 2022). Kasnak kenarlarında ise kayışların kesilmesini ve kasnaktan dışarı çıkmasını önlemek için radyüslü bir yükselti oluşturulmaktadır. Ayrıca, optimum çekiş performansı için kasnak yüzeyinin pürüzlülüğü R_a 2-3 μ m olmalıdır. Şekil 3.34’te asansör makinesinde kullanılacak bir kasnağın teknik resmi ve 8 halatlı kayış kesiti verilmiştir.



Şekil 3.44. Kayış ve kasnak görünümü a) Kasnak teknik resmi, b) 8 halatlı kayış kesiti

3.5.5 Fren ve Enkoder Seçimi

Asansör makinalarındaki frenleme torku anma torkunun 2 katı olması gerekmektedir. Fren, asansör motorları için kullanılan en az 125 Nm x 2 tork yükleri frenleme özelliğine sahip, eksenel şekilde frenleme yapabilen ve fren diski olan “Mayr” marka “Robo-twinstop 125” olarak belirlenmiştir. Frenin üzerinde ayrıca enkoder bağlantı kısmı mevcuttur. Enkoder genellikle asansör makinalarında kullanılan “Fenac FNC SC2048” olarak tercih edilmiştir. Şekil 3.45’te fren ve enkoder görselleri paylaşılmıştır.

Fren:

- 630 kg – 125 Nm → Mayr Roba-twinstop size 125



Enkoder:

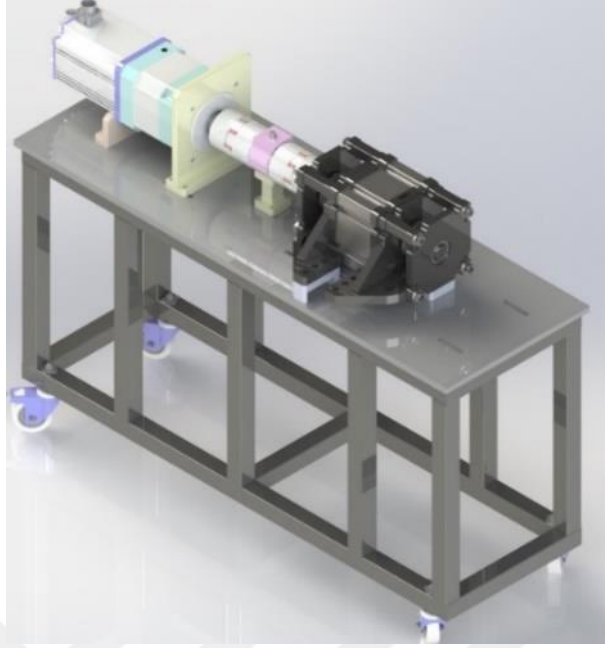
- Fenac FNC SC2048 Serisi enkoder



Şekil 3.45. Fren ve enkoder

3.6 Test Düzenineğin Oluşturulması

Elektromanyetik, termal ve yapısal olarak tasarımı SEY ile doğrulanan asansör makinesinin değişken güçlerde performans testleri, vuruşu moment, tork dalgalanması, akım, verim ve indüklenen zıt EMK değerlerini ölçülmesi amacı ile test sistemi tasarlanmıştır. Şekil 3.36’da test düzeneğinin 3B katı modellemesi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.46. Test düzeneğinin oluşturulması

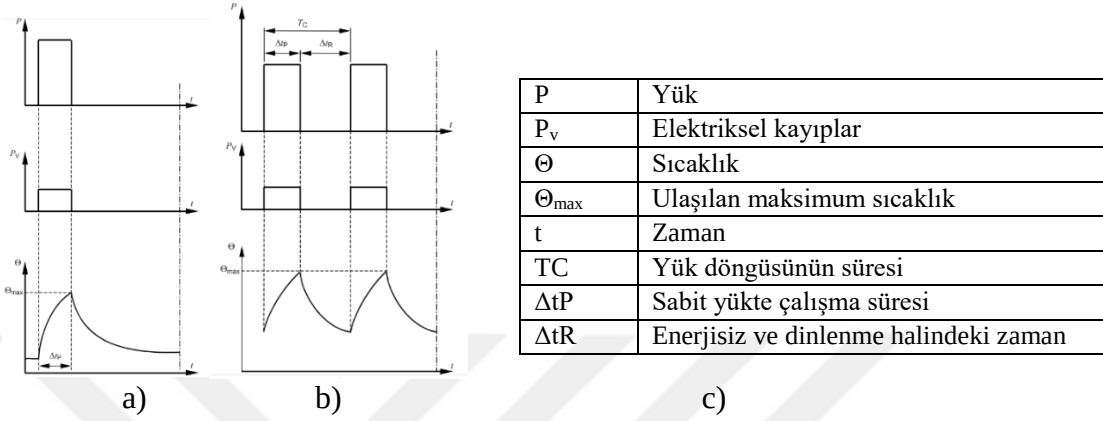
3.6.1 Test Koşullarının Belirlenmesi

Asansörlerin çalışma koşulları incelendiğinde motor testleri ile ilgili uygulanan bir standart belirtilmemiştir. 60034-2-1 tam olarak karşılamasa da testlerde dikkate alınmıştır. TS EN 81-50 test standartlarına göre asansör sisteminin güvenlik testleri yapılmaktadır (TS EN 81-50, 2014). Bu kapsamda da motora akuple olan fren testleri yapılmaktadır. Thssenkrupp, asansör makine etiket değerlerini belirlerken yüklenme testlerini ortam sıcaklığında yaptıklarını beyan etmektedir (Anonim, 2018).

Motor ile ilgili olarak IEC 60034-2-1 standardında belirtilen yüklenme oranlarına göre motor 6 yük noktasında (%25, %50, %75, %100, %115, %125) yüklenerek performans testleri yapılmış ve anma değerleri çıkarılmıştır (Anonim, 2014). Asansör motorları S3 görev çevrimi ve %40 görev döngüsü ile çalışmaktadır. S2 ve S3 çalışma grafiği Şekil 3.37’de yer almaktadır.

Thssenkrupp “Asansör performans ve görev uygulama kılavuzu” motorların çalıştırma standartları temel alınmıştır. Asansörler günün sabah iş başlangıç ve akşam iş bitiş saatlerinde yoğun trafikte çalışmaktadır. Bu yoğun trafikte motorun %40 görev döngüsü ile saate 120 kez start aldığı belirlenmektedir. Buna göre motor 12 saniye çalışıp 18 saniye beklediği kabul edilmektedir. Bu görev döngüsü ile S3 görev çevriminde

motordaki yük sabit değildir, kabinde taşıdığı ağırlığa göre motor yükü değişken olmaktadır. Yoğun saatlerin dışında ise periyodik bir çalışma olmadığından S2 görev çevriminde çalıştığı kabul edilebilir.



Şekil 3.47. Çalışma döngüleri a) S2 görev çevrimi b) S3 görev çevrimi c) çevrim açıklamaları (IEC 60034-1, 2010).

Asansör tahrik makineleri S3 veya S2 görev çevrimi ile çalıştığı kabul edildiğinden asansör motorlarının deney ve SEY analizleri ortam sıcaklığı esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

ISO-25745 “Asansörler için enerji hesabı ve standardı” ve Thssenkrupp’un “Asansör performans ve görev uygulama kılavuzu” yer alan düşük yük asansörlerin çalışma sıklığı 1 m/s hızındaki asansör motorlarında genellikle günde 200 seyahat olarak kabul edilmektedir (Anonim, 2020; ISO 25745-2:2015, 2015). Çizelge 3.13’te ISO-25745 standardına göre günlük yolculuk sayısı verilmiştir.

Çizelge. 3.13. Günlük yolculuk sayısı

Kullanım kategorisi	1	2	3	4	5	6
Kullanım yoğunluğu/sıklığı	Çok düşük	Düşük	Orta	Yüksek	Çok yüksek	Aşırı yüksek
Günlük sefer sayısı	50 (<75)	125 (75 ile <200)	300 (200 ile <500)	750 (500 ile <1000)	1500 (1000 ile <2000)	2500 (>2000)

3.6.2 Test için Kullanılan Ölçüm Cihazlarının Seçimi

Test sisteminden alınacak veriler, değişken güçlerde performans testleri, vuruğu momenti, tork dalgalanması, akım, verim ve indüklenen zıt EMK değerlerini ölçülmesi amacı ile kullanılan cihazlar;

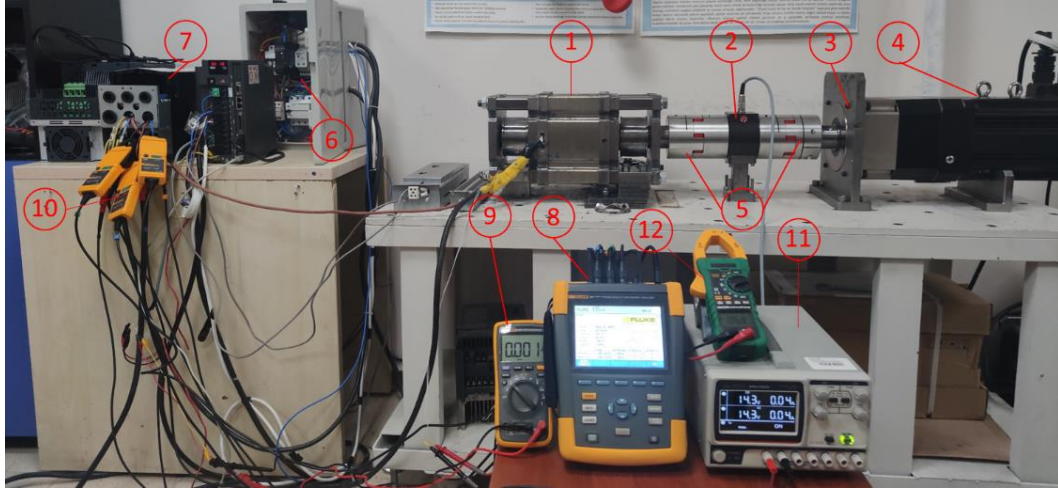
- Fluke 435 II Üç Fazlı Güç Kalitesi ve Enerji Analizörü
- Fluke 374 True-rms AC/DC Pens Metre
- Fluke 170 dijital Multimetre
- MS21158 AC/DC Pens Metre
- OWON SDS 7072 tipi osiloskop
- Quanser Q8-USB veri toplama kartı
- Eth-Messtechnik DRBK-500 tipi tork sensörü
- NCTE 2300-5-1-A-0-0 tork sensörü
- Sargı içi NTC-100 sıcaklık sensörü

3.6.3 Vuruntu Momenti Testi

Mevcut test düzeneğinde kullanılan 500 Nm’lik tork sensörü yerine daha düşük torkları ölçmek amacı ile (NCTE 2300-5-1-A-0-0) 5 Nm’lik tork sensörü kullanılmıştır. Aydın ve ark. 2020 yılındaki çalışmasında, vuruntu momentinin ölçümlerini 1 d/d hızında gerçekleştirmiştir (Aydın ve ark., 2020). Şekil 3.38’de vuruntu momentini ölçmek için oluşturulan deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.48. Vuruntu momenti deneyi



Şekil 3.50. Asansör tahrik makinesinin yükleme test düzeneği

Çizelge. 3.14. Test sistemi parçaları

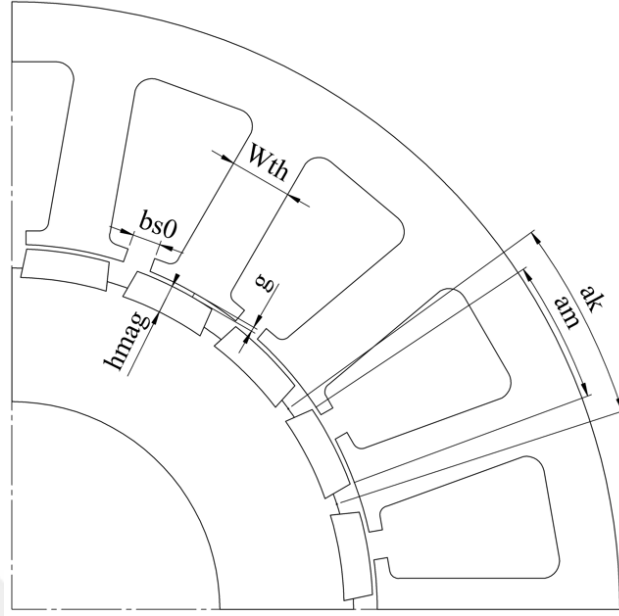
No	Parça adı	No	Parça adı
1	SMSM	7	Motor sürücüsü
2	Tork sensörü	8	Güç analizörü
3	Motor sabitleme plakası	9	Dijital multimetre
4	Yükleme Motoru	10	Güç analizörü pens tipi akım probu
5	Mil kaplini	11	Güç kaynağı
6	Elektrik paneli	12	Pens ampermetre

4 BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, SMSM'nin analitik tasarımından prototip testlerine kadar elde edilen sonuçlar verilmiştir. SMSM'nin analitik hesaplanması, MATLAB yazılımı ile literatürden elde edilen denklemler ve çıkış eşitlikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analitik modelleme MATLAB GUI yazılım uygulaması ile bir ara yüz hazırlanmış ve görselleştirilmiştir. Materyal ve yöntem kısmında belirlenen ve tasarım için uygun bulunan oluk/kutup kombinasyonları bu ara yüz yardımı ile optimizasyon öncesi ön tasarımları gerçekleştirilmiştir. Analitik olarak gerçekleştirilen ön tasarımlar SEY kullanılarak yüksek verim ve konfor parametrelerini sağlamak amacı ile belirlenen oluk/kutup kombinasyonlarına göre ANSYS Maxwell 2B modülündeki genetik algoritma yöntemi ile optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda uygun bulunan tasarım için vuruuntu momentini ve tork dalgalanmasını düşürmek amacı ile mıknatıslar üzerinde 1 derecelik açılar kullanılarak 0-20 derece arasında kayk çalışması yapılmıştır. Uygun bulunan tasarım için ANSYS Maxwell 3B modülünde çözümler doğrulanmıştır. ANSYS Icepack modülünde SMSM'nin termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Termal sonuçlara göre kullanılacak bakır tel sınıfı belirlenmiştir. Ortaya çıkan sınır ölçülerine göre tezin amaç ve hedefleri doğrultusunda, makine şasisi kullanılmadan kabin ve karşı ağırlık kılavuz raylarına doğrudan montajlı, yükü dengeli olarak dağıtılmasını sağlayan kayışlı bir asansör makinesinin mekanik 3B katı model tasarımları gerçekleştirilmiştir. Katı modelleme ile tasarımı ve montajı gerçekleştirilen tasarımın yapısal olarak burulma ve gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Statik yükleri gerçek anlamda görmek için asansör kuyusu tasarımı gerçekleştirilmiş ve SEY ile kuyu içindeki kılavuz rayların dayanımına yönelik yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Motorun üretimi gerçekleştirilmiş ve yükleme motoru yardımı ile zıt EMK, vuruuntu momenti ve performansa yönelik analiz doğrulama deneyleri yapılmıştır.

4.1 Farklı Oluk/Kutup Kombinasyonlarının Karşılaştırması

Bu çalışmada, materyal ve yöntem kısmında belirlenen $N_{slot} = N_p \pm 2$ olacak şekilde, sargı faktörü (k_w) yüksek ve motor ölçülendiresine uygun olan tasarımlar incelenmiştir. Yapılan literatür taramasında 12/10, 12/14, 18/16, 18/20, 24/22 ve 24/26 oluk/kutup oranlı tasarımlar belirlenmiştir. Her bir oluk/kutup kombinasyonu için literatürden elde edilen denklemler ve çıkış eşitlikleri kullanılarak MATLAB GUI’de ön tasarımlar elde edilmiştir. Sargı doluluk oranı yalıtım malzemeleri hesaplamalara dâhil edilerek %75 oranı aşmayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu oran yalıtım malzemeleri dâhil edilmediğinde yaklaşık olarak %45 seviyelerindedir. Sargı sonu taşma payları fiziksel olarak kontrol edilip 25 mm olarak belirlenmiştir. Stator dış çapı, rotor dış çapı, paket boyu gibi değerler literatürden elde edilen veriler ile belirlenmiştir. Analitik olarak elde edilen akım yoğunlukları 6.5 A/mm^2 geçmeyecek şekilde tasarlanmıştır. Optimizasyon öncesi analitik olarak %90 ve üzeri verim elde edilen ön tasarımlar kullanılmıştır. Daha sonrasında elde edilen tasarım üzerinden oluk ağzı açıklığı (B_{s0}), mıknatıs kalınlığı (h_{mag}), mıknatıs /kutup oranı (E_m), stator diş kalınlığı (W_{th}), ve hava aralığını (g) değerleri arasında SMSM’nin verimi ve asansör konforunda önemli bir parametre olan tork dalgalanmasını doğrudan etkileyen ölçüler GA yöntemi ile optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon ölçüler Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Optimizasyon hedefleri Çizelge 4.1’de ifade edilmiştir. Optimizasyon çalışmalarında SEY analizleri 0-180 ms zaman aralığında yapılmış olup ortalama değerler SMSM’nin rejime girdiği 160-180 ms zaman aralığında gerçekleştirilmiştir. Asansör motorları IEC 60034-1 “Dönen elektrik makineleri derecelendirme ve performans” standardına göre, S3 görev çevriminde çalıştığından dolayı SEY analizleri 25 °C sıcaklık baz alınarak gerçekleştirilmiştir. Mıknatıs sıcaklıkları 20 °C sıcaklık değerine göre SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucuna göre uygun görülen tasarımların çıkış torku, faz akımı ve güç grafikleri çizdirilmiştir. Elektrik akım yoğunluğu ve manyetik akı yoğunluğu görsel olarak verilmiş ve sonuç değerleri verilmiştir.



Şekil 4.1. Optimizasyon yapılan ölçüler

Çizelge 4.1. Optimizasyon değerleri

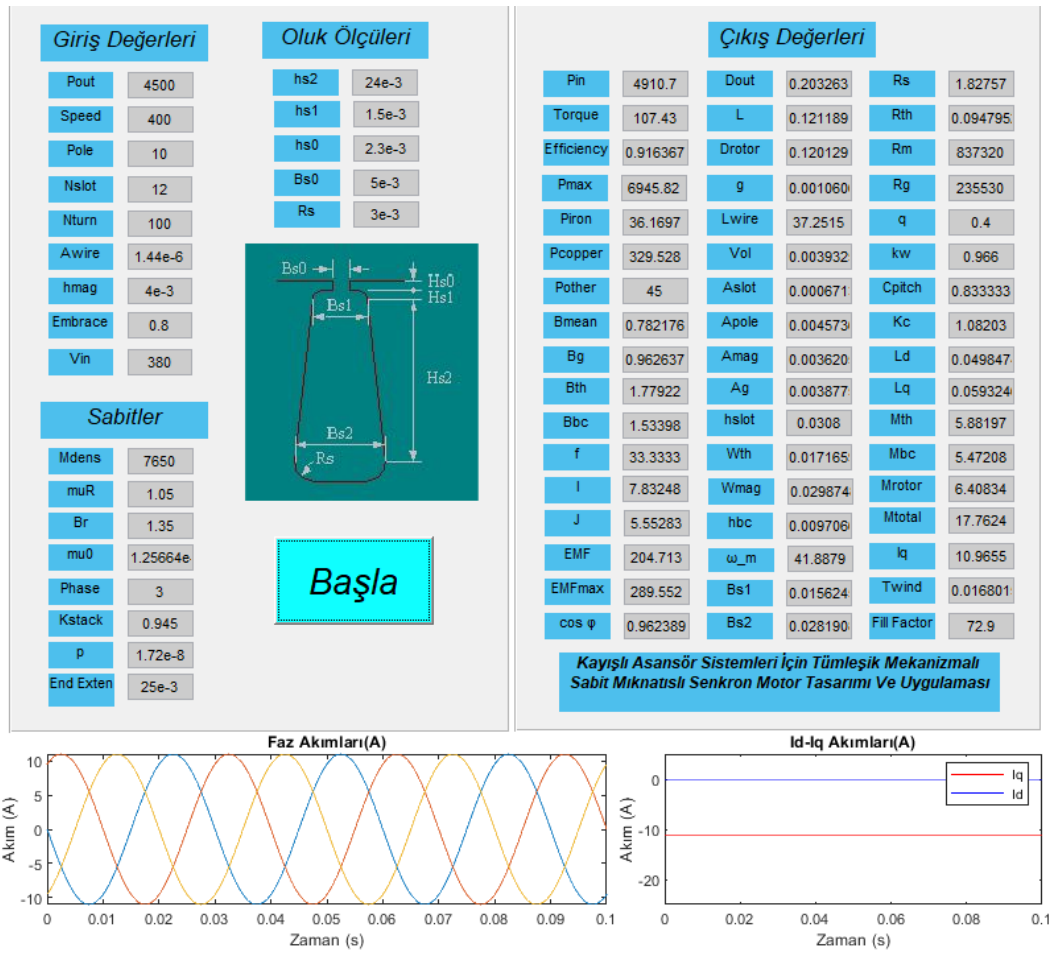
Optimizasyon	Hesaplanan	Hesaplama zamanı	Şartlar	Amaç	Birim
Genetik	Verim	0.16 s- 0.18 s	$\geq$	91	%
Algoritma	Tork Dalgalanması	0.16 s- 0.18 s	$\leq$	1	%

Yapılan çalışmada, SMSM'nin verim hedefi %91 üstünde ve tork dalgalanması %1'in altında olması hedeflenmiştir. Verim, SEY analiz sonuçlarında elde edilen bakır kaybı, demir kayıpları ve %1 olarak kabul edilen diğer kayıplar üzerinden hesaplanmıştır. Tork dalgalanması T_r , tepeden tepeye tork değeri T_{pk} ve ortalama tork T_{avg} olarak ifade edilir. Buna göre % olarak tork dalgalanması,

$$T_r = \frac{T_{pk}}{T_{avg}} 100 \quad (4.1)$$

4.1.1 12/10 Optimizasyon ve Analizleri

12/10 oluk/kutup kombinasyonuna sahip SMSM'nin optimizasyon öncesinde, elde edilen denklemler ve çıkış eşitlikleri kullanılarak analitik bir tasarım oluşturulmuştur. Analitik olarak hesaplanan tasarım MATLAB GUI ara yüzü ile görselleştirilmiştir. Analitik ön tasarım değerleri kullanılarak, verim ve tork dalgalanması iyileştirmek amacıyla Şekil 4.1'de gösterilen ölçülere SEY ile GA yöntemi ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2'de 12/10 ön tasarımın analitik hesaplamaları yer almaktadır. Çizelge 4.2'de 12/10 oluk/kutup kombinasyonuna ait SMSM'nin optimizasyon verileri gösterilmiştir.

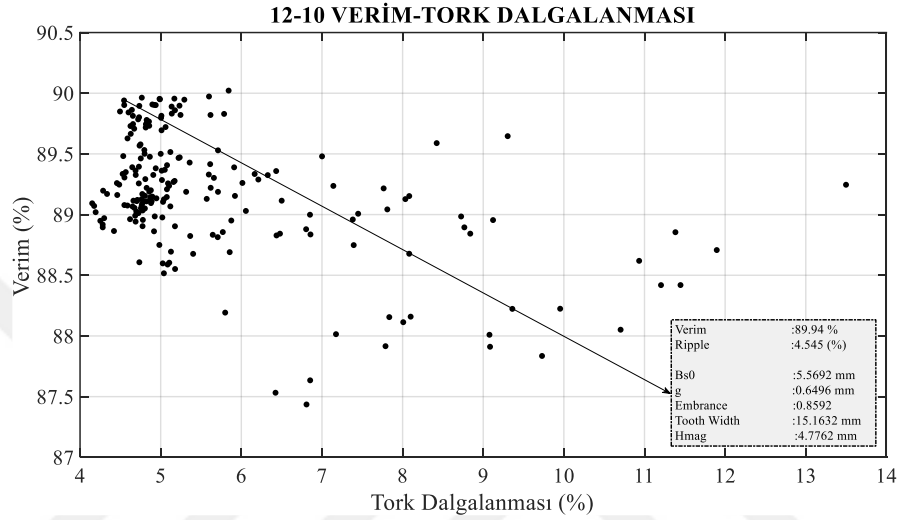


Şekil 4.2. 12/10 ön tasarımın analitik olarak belirlenmesi

Çizelge 4.2. 12/10 optimizasyon verileri

Değer	Başlangıç	Minimum	Maksimum	Optimizasyon sonuçları	Birim
B_{s0}	5	4	7	5.5692	mm
E_m	0.8	0.7	0.9	0.8592	-
h_{mag}	4	3.5	5	4.7762	mm
W_{th}	15	15	15.5	15.1632	mm
g	1	0.6	1	0.6496	mm

12/10 oluk/kutup kombinasyonuna sahip motor tasarımının verim ve tork dalgalanmasının GA yöntemi ile optimizasyon sonuçları belirlenmiştir. Elde edilen optimizasyon sonuçlarına göre en uygun tasarım verimin %89.94, tork dalgalanmasının %4.545 olduğu değerler belirlenmiştir. Şekil 4.3'te 12/10 tasarımının verim ve tork dalgalanmaları üzerindeki optimizasyon sonuçları gösterilmiştir.



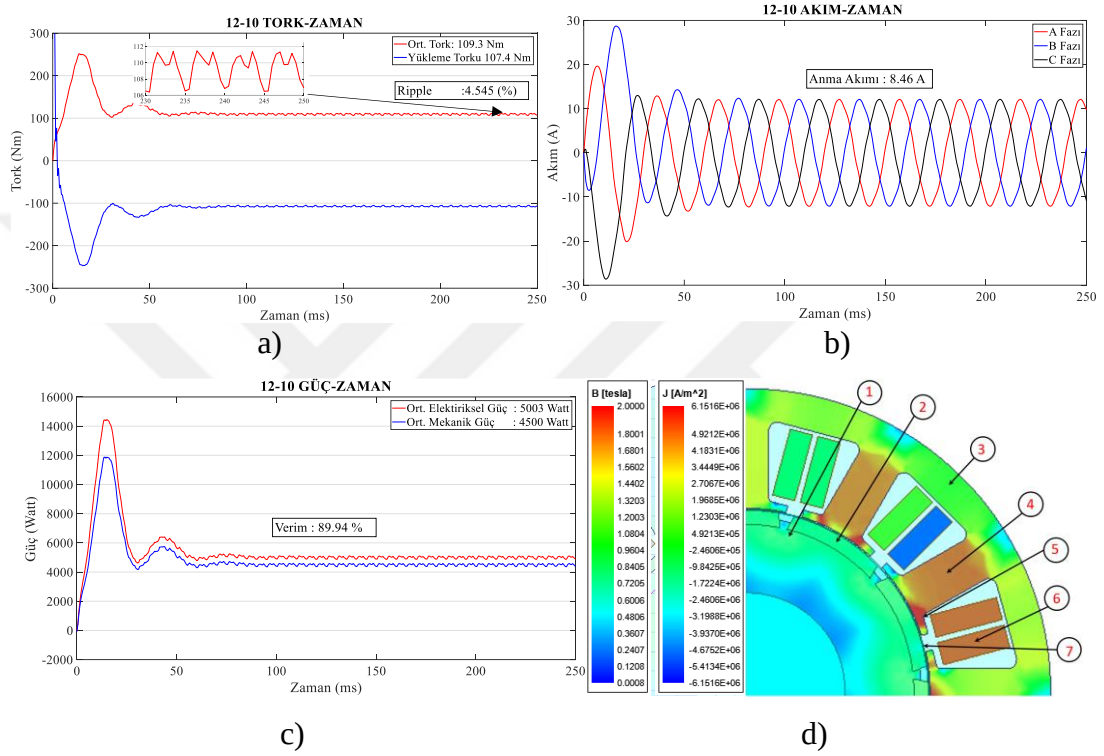
Şekil 4.3. 12/10 verim ve tork dalgalanması optimizasyon sonuçları

Yapılan optimizasyon sonuçlarına göre SMSM verimi ve tork dalgalanması optimizasyon hedeflerine ulaşamamıştır. Optimizasyon sonucuna göre elde edilen tasarımın ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları Çizelge 4.3'te karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.3. 12/10 optimizasyon sonrası analiz sonuçları

Parametre	ANSYS Rmxprt	2B SEY	Birim
Çıkış Gücü (P_{out})	4500	4500	Watt
Giriş Gücü (P_{in})	4969	5003	Watt
Faz akımı (I)	8.16	8.46	Amper
Demir kayıpları (P_{iron})	44.9	51.2	Watt
Bakır kayıpları (P_{copper})	378.9	406.84	Watt
Mekanik kayıplar (P_{mec})	45	45	Watt
Verim(η)	90.56	89.94	%
Tork dalgalanması (T_r)	-	4.545	%
Doluluk oranı	73	73	%
Akım yoğunluğu (J)	5.3	6.16	A/mm ²
Faz direnci (R_s)	1.89	1.89	Ω
Cos ϕ	0.93	0.90	-

12/10 oluk/kutup kombinasyonuna ait 2B SEY analizleri ile elde edilen tork, tork dalgalanması, akım, güç, verim, elektriksel akım yoğunluğu ve manyetik akı yoğunluğu gibi motor tasarım süreçlerindeki önemli bazı analiz sonuç grafikleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.4.-d'de belirtilen işaret bölge isimleri ve değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.



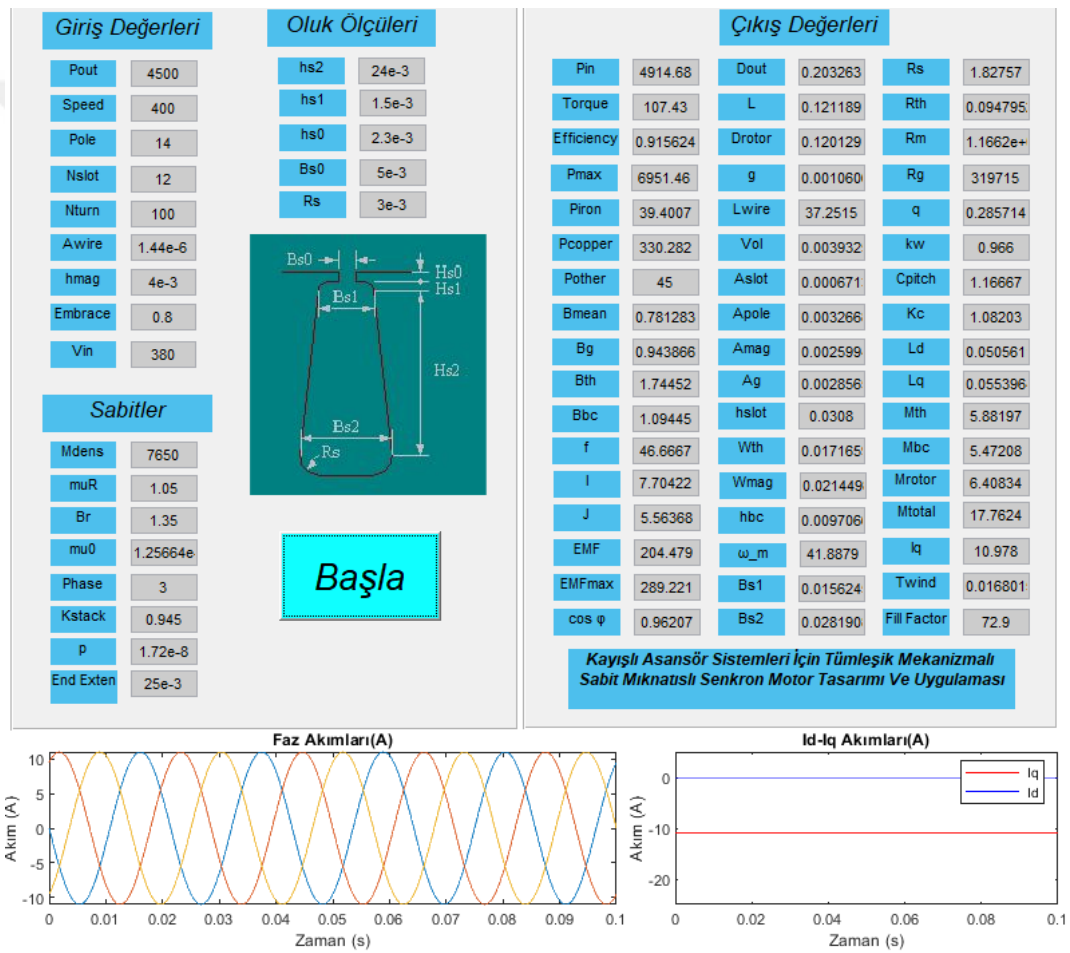
Şekil 4.4. 12/10 optimizasyon sonrası analiz sonuçları; a) Çıkış torku, b) Faz akımı c) Güç d) Elektrik akım yoğ. ve manyetik akı yoğ.

Çizelge 4.4. Şekil 4.4.-d'nin işaret bölgeleri ve değerleri

No	Bölge	Değer	Birim
1	Rotor	1.26	Tesla
2	Ortalama mıknatıs akısı	0.97	Tesla
3	Stator boyunduruğu	1.25	Tesla
4	Stator dişi	1.86	Tesla
5	Stator diş ucu	2.53	Tesla
6	Sargı	6.15	A/mm ²
7	Ortalama hava aralığı akısı	0.89	Tesla
* 0.25 saniyedeki verilerden alınmıştır.			

4.1.2 12/14 Optimizasyon ve Analizleri

12/14 oluk/kutup kombinasyonuna sahip SMSM'nin optimizasyon öncesinde, elde edilen denklemler ve çıkış eşitlikleri kullanılarak analitik bir tasarım oluşturulmuştur. Analitik olarak hesaplanan tasarım MATLAB GUI ara yüzü ile görselleştirilmiştir. Analitik ön tasarım değerleri kullanılarak, verim ve tork dalgalanması iyileştirmek amacıyla Şekil 4.1'de gösterilen ölçülere SEY ile GA yöntemi ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5'te 12/14 ön tasarımın analitik hesaplamaları yer almaktadır. Çizelge 4.5'te 12/14 oluk/kutup kombinasyonuna ait SMSM'nin optimizasyon verileri gösterilmiştir.

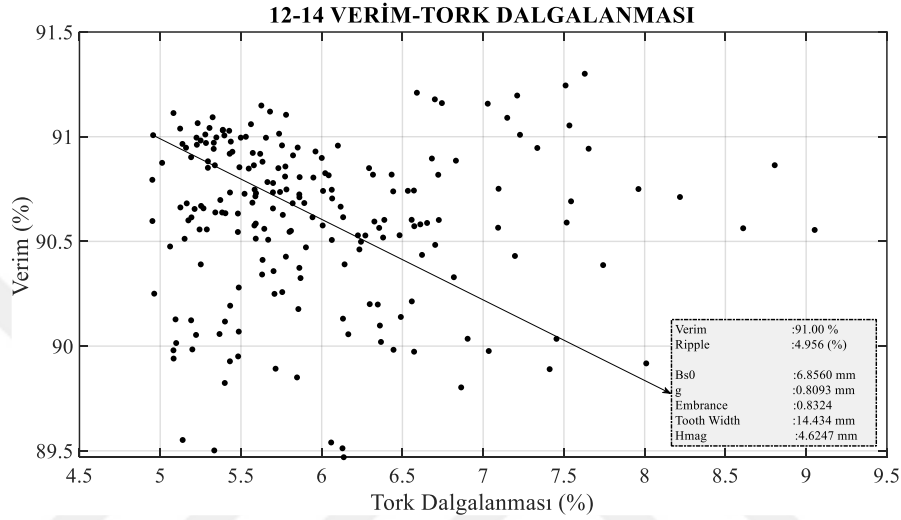


Şekil 4.5. 12/14 ön tasarımın analitik olarak belirlenmesi

Çizelge 4.5. 12/14 optimizasyon verileri

Değer	Başlangıç	Minimum	Maksimum	Optimizasyon sonrası	Birim
B_{s0}	5	4	7	6.856	mm
E_m	0.8	0.7	0.9	0.8324	-
h_{mag}	4	3.5	5	4.6247	mm
W_{th}	15	15	15.5	14.4348	mm
g	1	0.6	1	0.8094	mm

12/14 oluk/kutup kombinasyonuna sahip motor tasarımının verim ve tork dalgalanmasının GA yöntemi ile optimizasyon sonuçları belirlenmiştir. Elde edilen optimizasyon sonuçlarına göre en uygun tasarım verimin %91.00, tork dalgalanmasının %4.956 olduğu değerler belirlenmiştir. Şekil 4.6'da 12/14 tasarımının verim ve tork dalgalanmaları üzerindeki optimizasyon sonuçları gösterilmiştir.



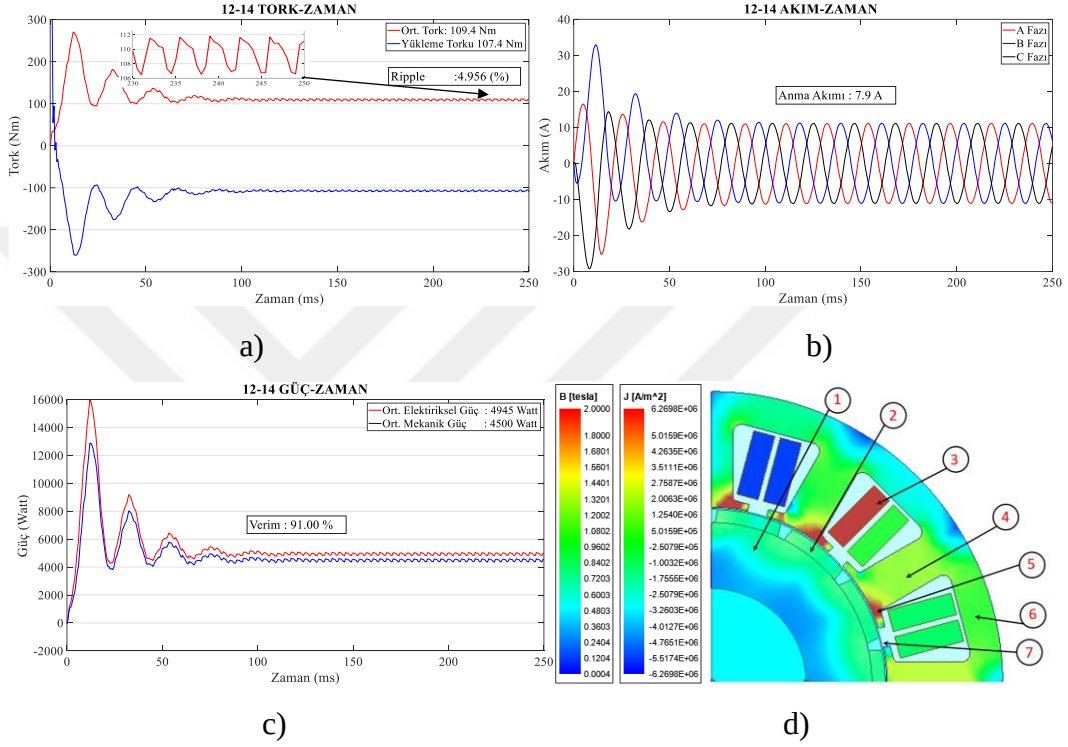
Şekil 4.6. 12/14 verim ve tork dalgalanması optimizasyon sonuçları

Yapılan optimizasyon sonuçlarına göre motor verimi istenilen hedefi sağlamış ancak tork dalgalanması optimizasyon hedeflerine ulaşamamıştır. Optimizasyon sonucuna göre elde edilen tasarımın ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları Çizelge 4.6'da karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.6. 12/14 ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları

Parametre	ANSYS Rmxprt	2B SEY	Birim
Çıkış Gücü (P_{out})	4500	4500	Watt
Giriş Gücü (P_{in})	4931	4945	Watt
Faz akımı (I)	7.74	7.9	Amper
Demir kayıpları (P_{iron})	44.1	48.4	Watt
Bakır kayıpları (P_{copper})	340.5	351.1	Watt
Mekanik kayıplar (P_{mec})	45	45	Watt
Verim(η)	91.2	91.0	%
Tork dalgalanması (T_r)	-	4.956	%
Doluluk oranı	73	73	%
Akım yoğunluğu (J)	5.03	5.86	A/mm ²
Faz direnci (R_s)	1.89	1.89	Ω
Cos ϕ	0.96	0.96	-

12/14 oluk/kutup kombinasyonuna ait 2B SEY analizleri ile elde edilen tork, tork dalgalanması, akım, güç, verim, elektriksel akım yoğunluğu ve manyetik akı yoğunluğu gibi motor tasarım süreçlerindeki önemli bazı analiz sonuç grafikleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Şekil 4.7.-d’de belirtilen işaret bölge isimleri ve değerleri Çizelge 4.7’de verilmiştir.



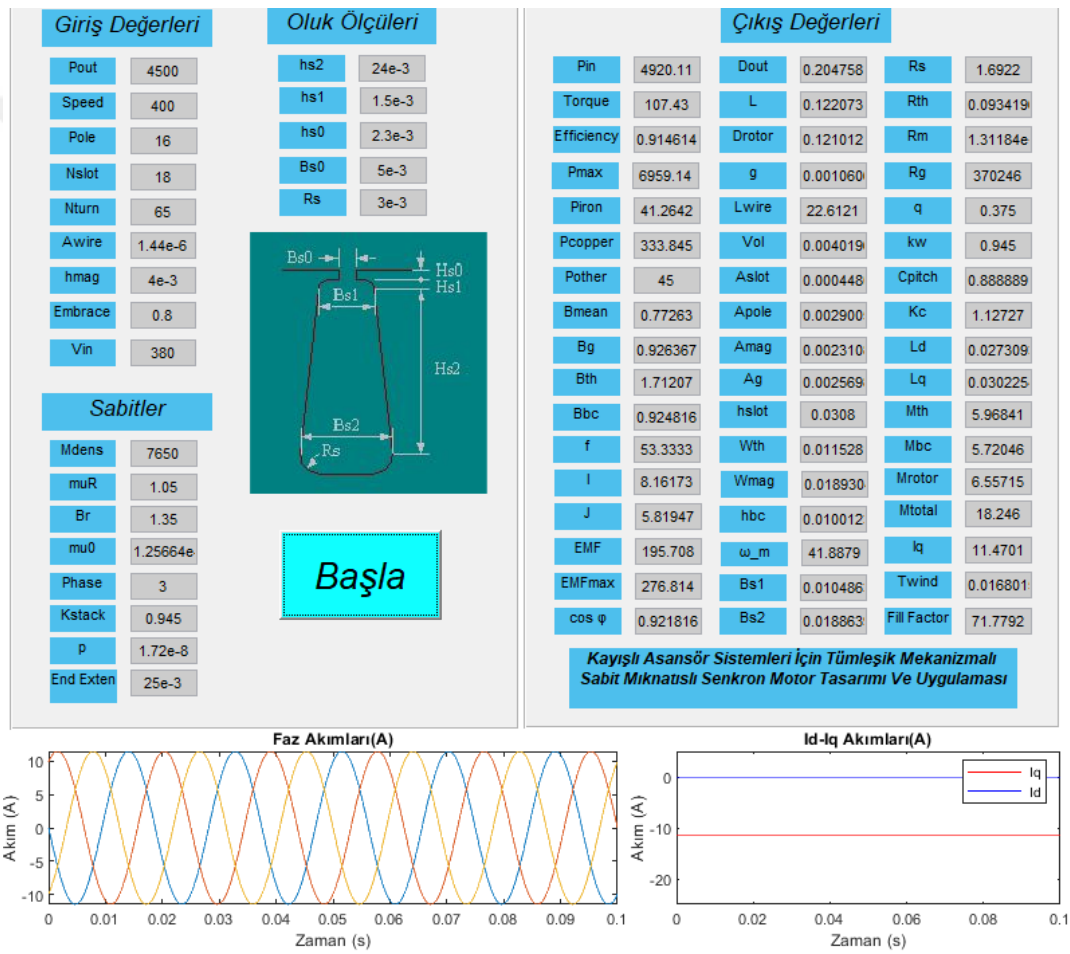
Şekil 4.7. 12/14 optimizasyon sonrası analiz sonuçları; a) Çıkış torku, b) Faz akımı c) Güç d) Elektrik akım yoğ. ve manyetik akı yoğ.

Çizelge 4.7. Şekil 4.7.-d’nin işaret bölgeleri ve değerleri

No	Bölge	Değer	Birim
1	Rotor	1.25	Tesla
2	Ortalama mıknatıs akısı	0.91	Tesla
3	Sargı	6.26	A/mm ²
4	Stator dişi	1.51	Tesla
5	Stator dişi ucu	2.45	Tesla
6	Stator boyunduruğu	1.08	Tesla
7	Ortalama hava aralığı akısı	0.85	Tesla
* 0.25 saniyedeki verilerden alınmıştır.			

4.1.3 18/16 Optimizasyon ve Analizleri

18/16 oluk/kutup kombinasyonuna sahip SMSM'nin optimizasyon öncesinde, elde edilen denklemler ve çıkış eşitlikleri kullanılarak analitik bir tasarım oluşturulmuştur. Analitik olarak hesaplanan tasarım MATLAB GUI ara yüzü ile görselleştirilmiştir. Analitik ön tasarım değerleri kullanılarak, verim ve tork dalgalanması iyileştirmek amacıyla Şekil 4.1'de gösterilen ölçülere SEY ile GA yöntemi ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8'de 18/16 ön tasarımın analitik hesaplamaları yer almaktadır. Çizelge 4.8'de 18/16 oluk/kutup kombinasyonuna ait SMSM'nin optimizasyon verileri gösterilmiştir.

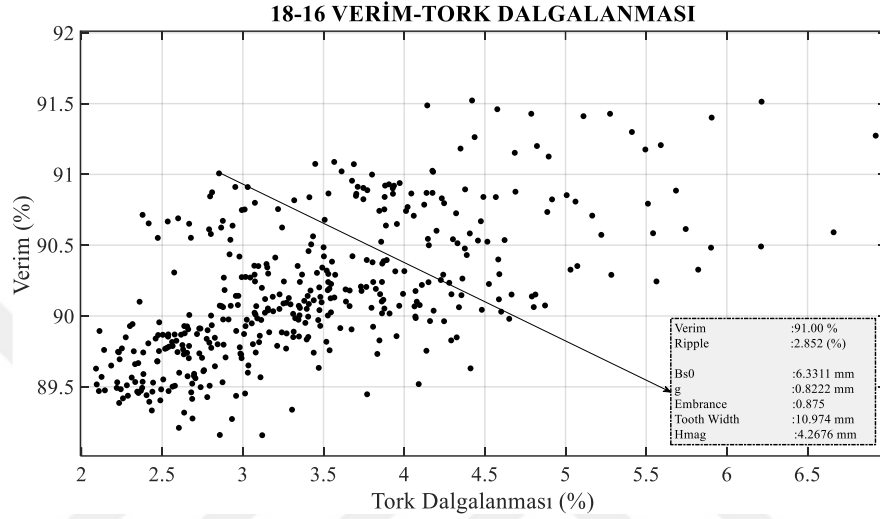


Şekil 4.8. 18/16 ön tasarımın analitik olarak belirlenmesi

Çizelge 4.8. 18/16 optimizasyon verileri

Değer	Başlangıç	Minimum	Maksimum	Optimizasyon sonrası	Birim
B_{s0}	5	4	7	6.3311	mm
E_m	0.8	0.7	0.9	0.8750	-
h_{mag}	4	3.5	5	4.2676	mm
W_{th}	10.7	10	11	10.974	mm
g	1	0.6	1	0.8222	mm

18/16 oluk/kutup kombinasyonuna sahip motor tasarımının verim ve tork dalgalanmasının GA yöntemi ile optimizasyon sonuçları belirlenmiştir. Elde edilen optimizasyon sonuçlarına göre en uygun tasarım verimin %91.00, tork dalgalanmasının %2.852 olduğu değerler belirlenmiştir. Şekil 4.9'da 18/16 tasarımının verim ve tork dalgalanmaları üzerindeki optimizasyon sonuçları gösterilmiştir.



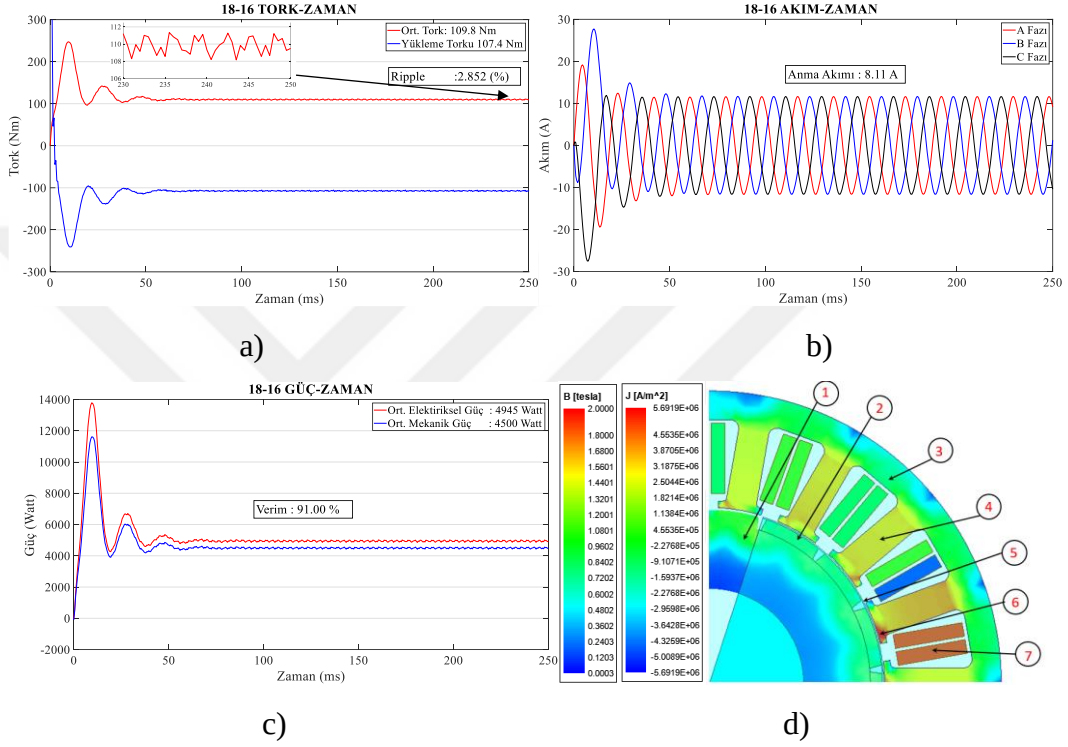
Şekil 4.9. 18/16 verim ve tork dalgalanması optimizasyon sonuçları

Yapılan optimizasyon sonuçlarına göre motor verimi istenilen hedefi sağlamış ancak tork dalgalanması optimizasyon hedeflerine ulaşamamıştır. Optimizasyon sonucuna göre elde edilen tasarımın ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları Çizelge 4.9'da karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.9. 18/16 ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları

Parametre	ANSYS Rmxprt	2B SEY	Birim
Çıkış Gücü (P_{out})	4500	4500	Watt
Giriş Gücü (P_{in})	4947	4945	Watt
Faz akımı (I)	8.19	8.11	Amper
Demir kayıpları (P_{iron})	57.6	61.6	Watt
Bakır kayıpları (P_{copper})	343.9	337.3	Watt
Mekanik kayıplar (P_{mec})	45	45	Watt
Verim(η)	90.97	91.00	%
Tork dalgalanması (T_r)	-	2.852	%
Doluluk oranı	73	73	%
Akım yoğunluğu (J)	5.03	5.8	A/mm ²
Faz direnci (R_s)	1.7	1.7	Ω
Cos ϕ	0.92	0.92	-

18/16 oluk/kutup kombinasyonuna ait 2B SEY analizleri ile elde edilen tork, tork dalgalanması, akım, güç, verim, elektriksel akım yoğunluğu ve manyetik akı yoğunluğu gibi motor tasarım süreçlerindeki önemli bazı analiz sonuç grafikleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Şekil 4.10.-d'de belirtilen işaret bölge isimleri ve değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir.



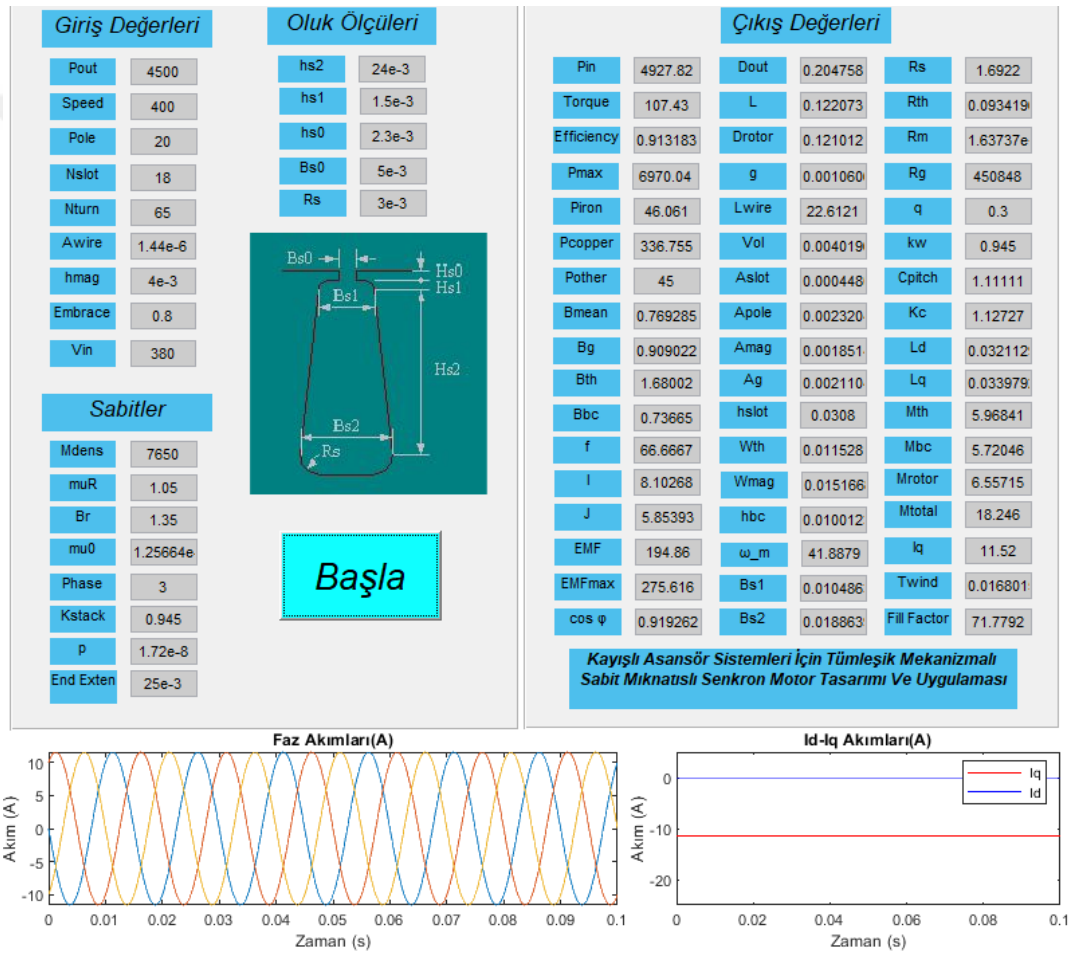
Şekil 4.10. 18/16 optimizasyon sonrası analiz sonuçları; a) Çıkış torku, b) Faz akımı c) Güç d) Elektrik akım yoğ. ve manyetik akı yoğ.

Çizelge 4.10. Şekil 4.10.-d'nin işaret bölgeleri ve değerleri

No	Bölge	Değer	Birim
1	Rotor	1.24	Tesla
2	Ortalama mıknatıs akısı	0.98	Tesla
3	Stator boyunduruğu	0.97	Tesla
4	Stator dişi	1.74	Tesla
5	Ortalama hava aralığı akısı	0.89	Tesla
6	Stator dış ucu	2.28	Tesla
7	Sargı	5.69	A/mm ²
* 0.25 saniyedeki verilerden alınmıştır.			

4.1.4 18/20 Optimizasyon ve Analizleri

18/20 oluk/kutup kombinasyonuna sahip SMSM'nin optimizasyon öncesinde, elde edilen denklemler ve çıkış eşitlikleri kullanılarak analitik bir tasarım oluşturulmuştur. Analitik olarak hesaplanan tasarım MATLAB GUI ara yüzü ile görselleştirilmiştir. Analitik ön tasarım değerleri kullanarak, verim ve tork dalgalanması iyileştirmek amacıyla Şekil 4.1'de gösterilen ölçülere SEY ile GA yöntemi ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.11'de 18/20 ön tasarımın analitik hesaplamaları yer almaktadır. Çizelge 4.11'de 18/20 oluk/kutup kombinasyonuna ait SMSM'nin optimizasyon verileri gösterilmiştir.

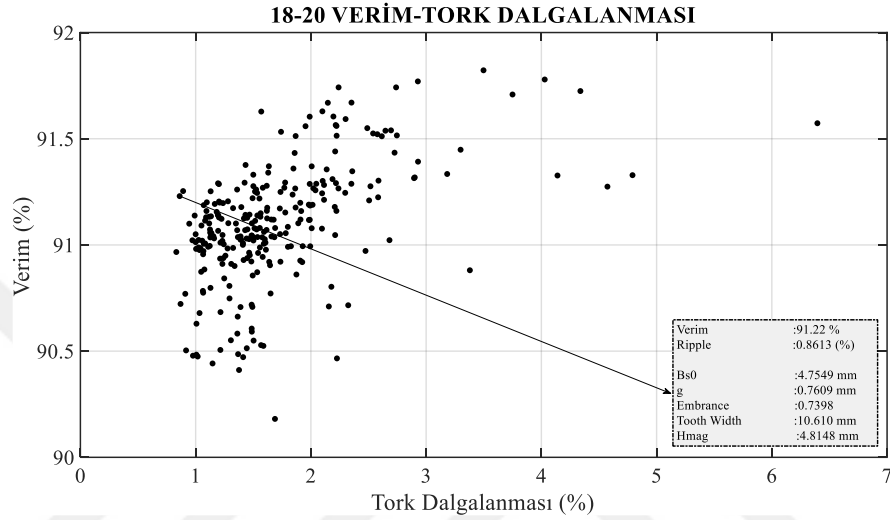


Şekil 4.11. 18/20 ön tasarımın analitik olarak belirlenmesi

Çizelge 4.11. 18/20 optimizasyon verileri

Değer	Başlangıç	Minimum	Maksimum	Optimizasyon sonrası	Birim
B_{s0}	5	4	7	4.7549	mm
E_m	0.8	0.7	0.9	0.7398	-
h_{mag}	4	3.5	5	4.8148	mm
W_{th}	10.7	10	11	10.610	mm
g	1	0.6	1	0.7609	mm

18/20 oluk/kutup kombinasyonuna sahip motor tasarımının verim ve tork dalgalanmasının GA yöntemi ile optimizasyon sonuçları belirlenmiştir. Elde edilen optimizasyon sonuçlarına göre en uygun tasarım verimin %91.22, tork dalgalanmasının %0.8613 olduğu değerler belirlenmiştir. Şekil 4.12’de 18/20 tasarımının verim ve tork dalgalanmaları üzerindeki optimizasyon sonuçları gösterilmiştir.



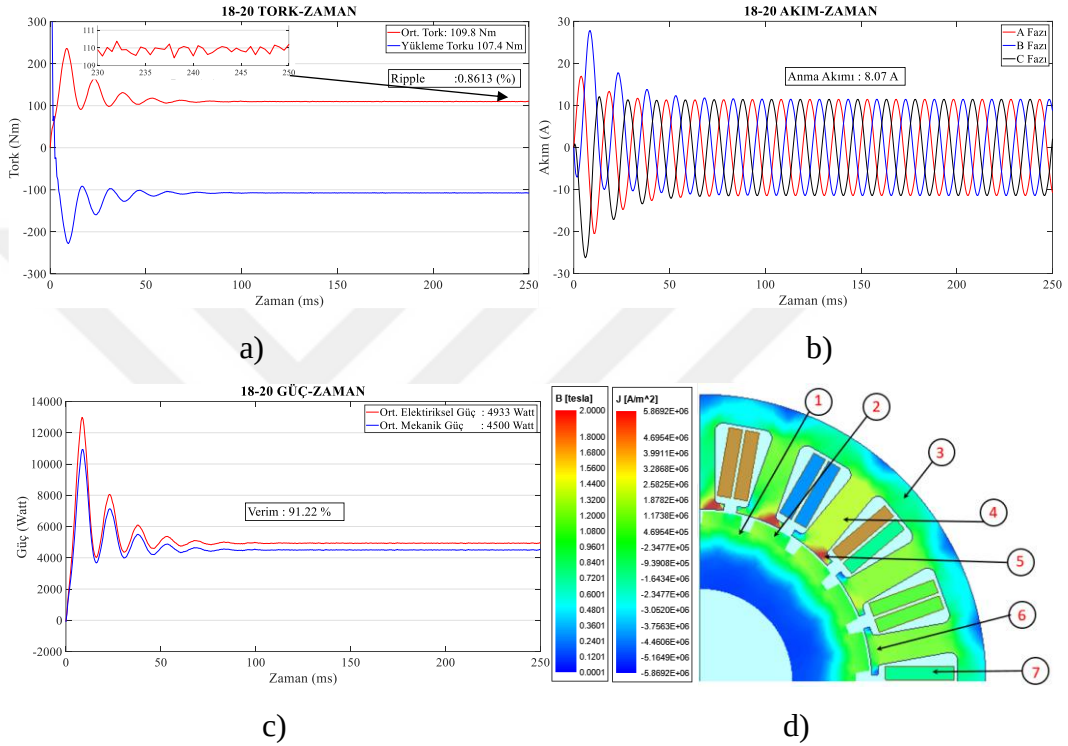
Şekil 4.12. 18/20 verim ve tork dalgalanması optimizasyon sonuçları

Yapılan optimizasyon sonuçlarına göre motor verimi ve tork dalgalanması istenilen hedefi sağlamıştır. Optimizasyon sonucuna göre elde edilen tasarımın ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları Çizelge 4.12’de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.12. 18/20 ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları

Parametre	ANSYS Rmxprt	2B SEY	Birim
Çıkış Gücü (P_{out})	4500	4500	Watt
Giriş Gücü (P_{in})	4895	4932	Watt
Faz akımı (I)	7.66	8.07	Amper
Demir kayıpları (P_{iron})	53.1	59.1	Watt
Bakır kayıpları (P_{copper})	295.5	327.9	Watt
Mekanik kayıplar (P_{mec})	45	45	Watt
Verim(η)	91.95	91.22	%
Tork dalgalanması (T_r)	-	0.8613	%
Doluluk oranı	72.8	72.8	%
Akım yoğunluğu (J)	4.7	5.86	A/mm ²
Faz direnci (R_s)	1.67	1.67	Ω
Cos ϕ	0.97	0.93	-

18/20 oluk/kutup kombinasyonuna ait 2B SEY analizleri ile elde edilen tork, tork dalgalanması, akım, güç, verim, elektriksel akım yoğunluğu ve manyetik akı yoğunluğu gibi motor tasarım süreçlerindeki önemli bazı analiz sonuç grafikleri Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Şekil 4.13.-d'de belirtilen işaret bölge isimleri ve değerleri Çizelge 4.13'te verilmiştir.



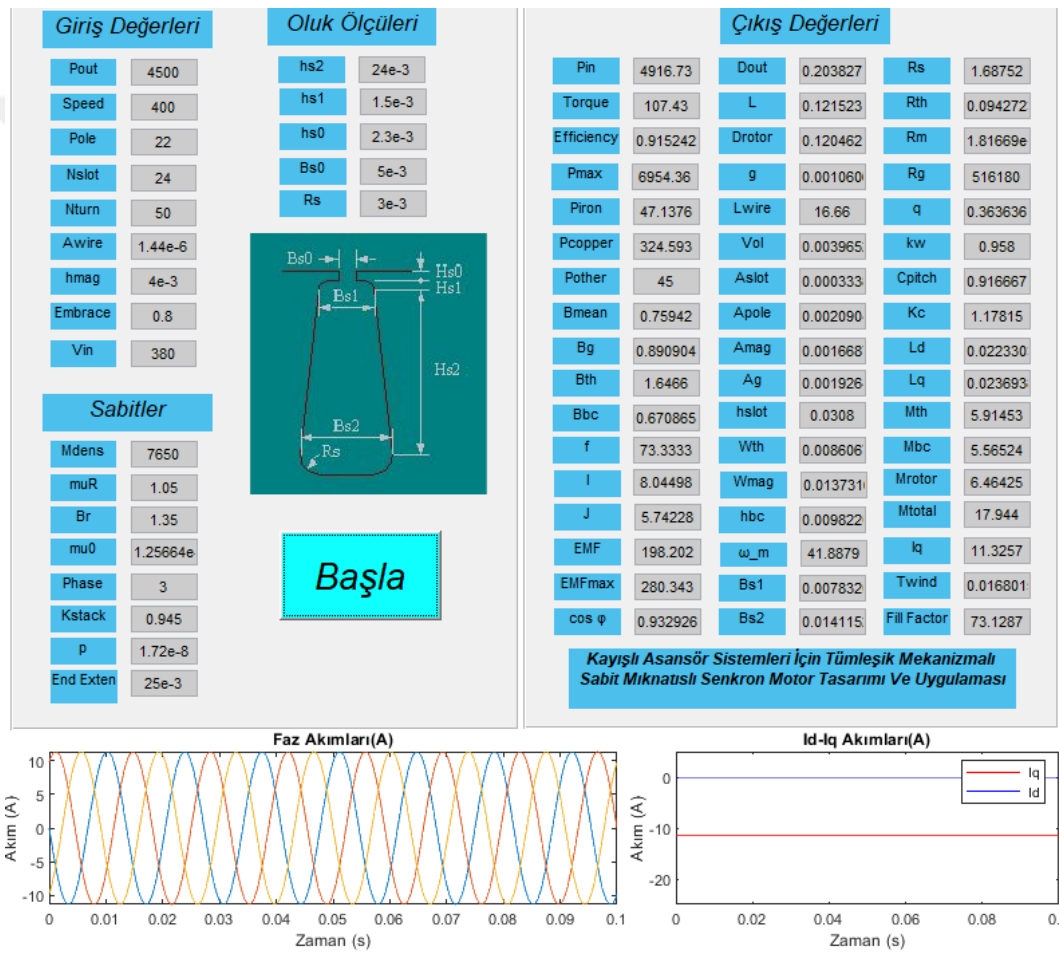
Şekil 4.13. 18/20 optimizasyon sonrası analiz sonuçları; a) Çıkış torku, b) Faz akımı c) Güç d) Elektrik akım yoğunluğu ve manyetik akı yoğunluğu.

Çizelge 4.13. Şekil 4.13.-d'nin işaret bölgeleri ve değerleri

No	Bölge	Değer	Birim
1	Rotor	1.15	Tesla
2	Ortalama mıknatıs akısı	0.91	Tesla
3	Stator boyunduruğu	0.85	Tesla
4	Stator dişi	1.52	Tesla
5	Ortalama hava aralığı akısı	0.80	Tesla
6	Stator diş ucu	2.29	Tesla
7	Sargı	5.86	A/mm ²
* 0.25 saniyedeki verilerden alınmıştır.			

4.1.5 24/22 Optimizasyon ve Analizleri

24/22 oluk/kutup kombinasyonuna sahip SMSM'nin optimizasyon öncesinde, elde edilen denklemler ve çıkış eşitlikleri kullanılarak analitik bir tasarım oluşturulmuştur. Analitik olarak hesaplanan tasarım MATLAB GUI ara yüzü ile görselleştirilmiştir. Analitik ön tasarım değerleri kullanılarak, verim ve tork dalgalanması iyileştirmek amacıyla Şekil 4.1'de gösterilen ölçülere SEY ile GA yöntemi ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.14'te 24/22 ön tasarımın analitik hesaplamaları yer almaktadır. Çizelge 4.14'te 24/22 oluk/kutup kombinasyonuna ait SMSM'nin optimizasyon verileri gösterilmiştir.

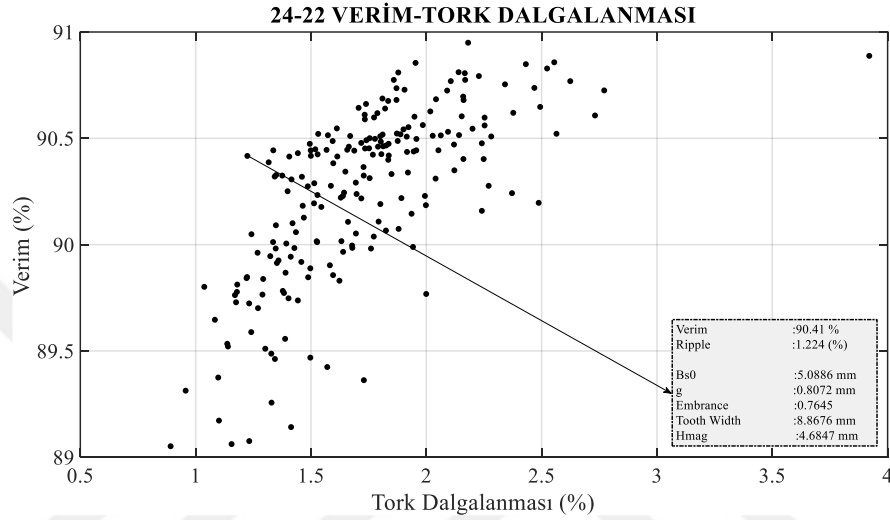


Şekil 4.14. 24/22 ön tasarım analitik belirlenmesi

Çizelge 4.14. 24/22 optimizasyon verileri

Değer	Başlangıç	Minimum	Maksimum	Optimizasyon sonrası	Birim
B_{s0}	5	4	5.5	5.0886	mm
E_m	0.8	0.7	0.77	0.7645	-
h_{mag}	4	3.5	5	4.6847	mm
W_{th}	9	8	9	8.8676	mm
g	1	0.6	1	0.8072	mm

24/22 oluk/kutup kombinasyonuna sahip motor tasarımının verim ve tork dalgalanmasının GA yöntemi ile optimizasyon sonuçları belirlenmiştir. Elde edilen optimizasyon sonuçlarına göre en uygun tasarım verimin %90.41, tork dalgalanmasının %1.224 olduğu değerler belirlenmiştir. Şekil 4.15'te 24/22 tasarımının verim ve tork dalgalanmaları üzerindeki optimizasyon sonuçları gösterilmiştir.



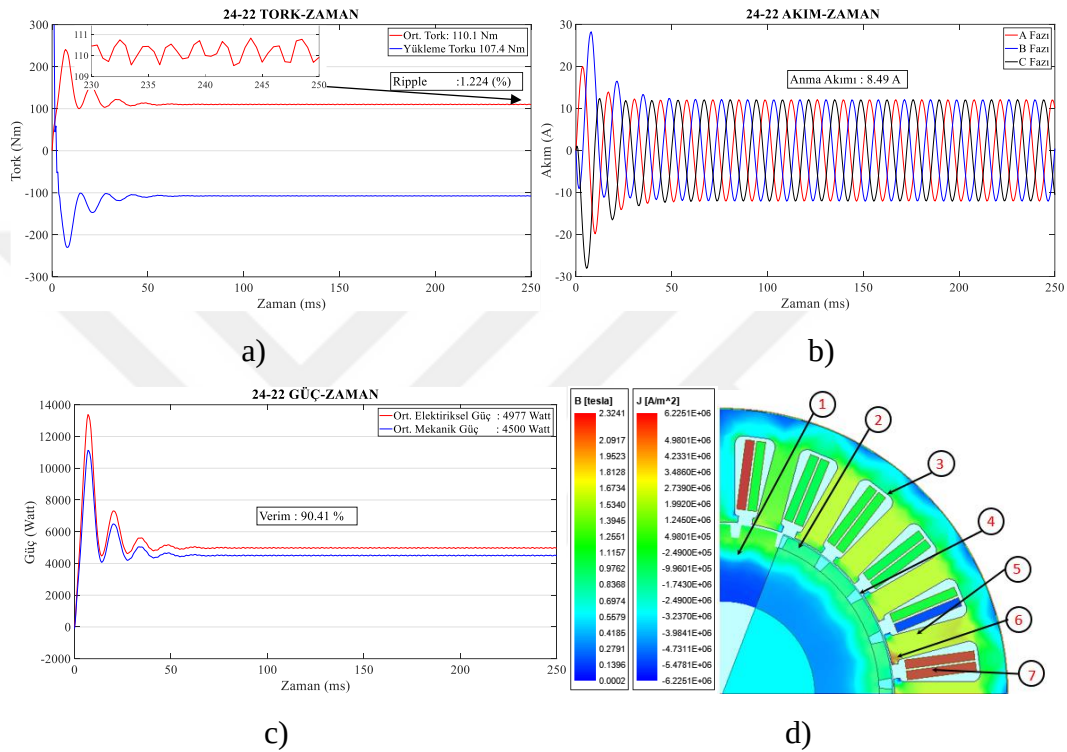
Şekil 4.15. 24/22 verim ve tork dalgalanması optimizasyon sonuçları

Yapılan optimizasyon sonuçlarına göre motor verimi ve tork dalgalanması optimizasyon hedeflerine ulaşamamıştır. Optimizasyon sonucuna göre elde edilen tasarımın ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları Çizelge 4.15'te karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.15. 24/22 ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları

Parametre	ANSYS Rmxprt	2B SEY	Birim
Çıkış Gücü (P_{out})	4500	4500	Watt
Giriş Gücü (P_{in})	49428	4977	Watt
Faz akımı (I)	7.88	8.49	Amper
Demir kayıpları (P_{iron})	71.6	71.3	Watt
Bakır kayıpları (P_{copper})	309.5	360.1	Watt
Mekanik kayıplar (P_{mec})	45	45	Watt
Verim(η)	91.3	90.41	%
Tork dalgalanması (T_r)	-	1.224	%
Doluluk oranı	73	73	%
Akım yoğunluğu (J)	5.11	6.22	A/mm ²
Faz direnci (R_s)	1.66	1.66	Ω
Cos ϕ	0.95	0.89	-

24/22 oluk/kutup kombinasyonuna ait 2B SEY analizleri ile elde edilen tork, tork dalgalanması, akım, güç, verim, elektriksel akım yoğunluğu ve manyetik akı yoğunluğu gibi motor tasarım süreçlerindeki önemli bazı analiz sonuç grafikleri Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Şekil 4.16.-d'de belirtilen işaret bölge isimleri ve değerleri Çizelge 4.16'da verilmiştir.



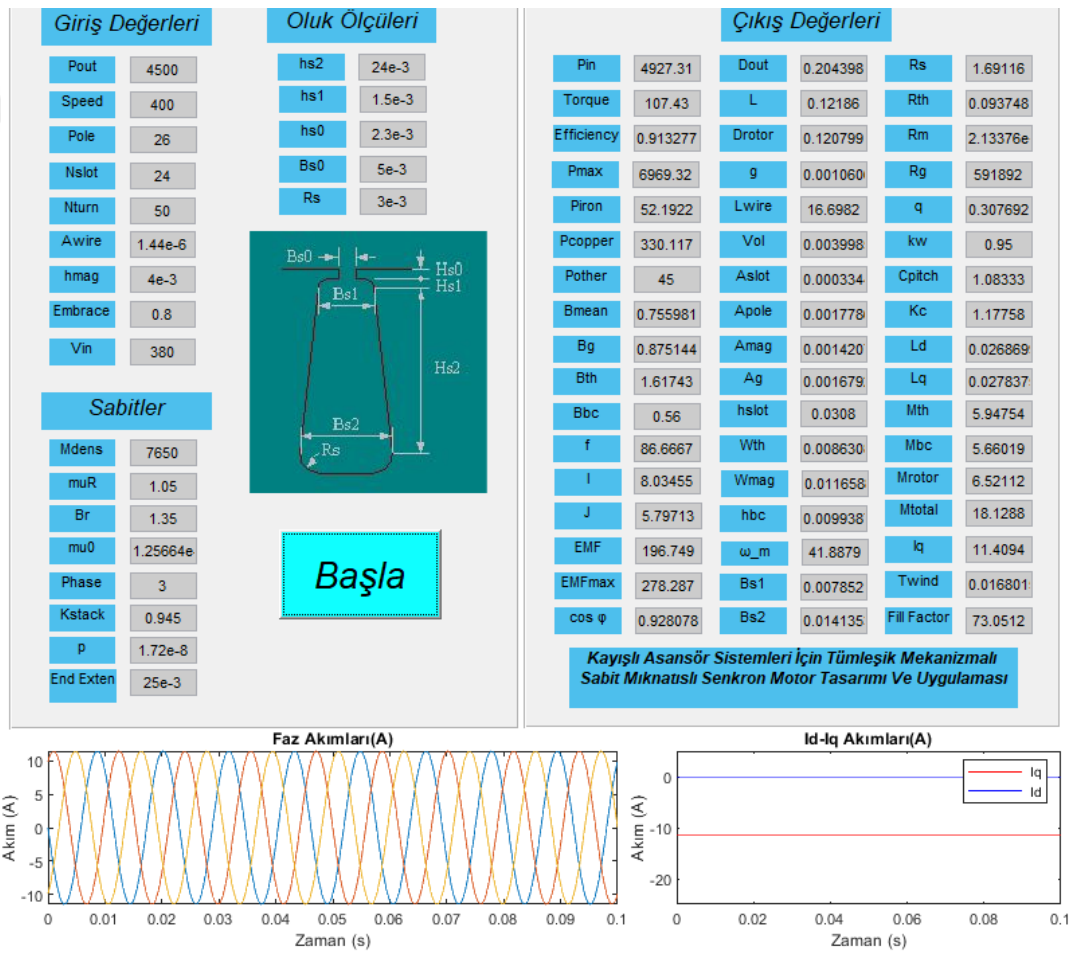
Şekil 4.16. 24/22 optimizasyon sonrası analiz sonuçları; a) Çıkış torku, b) Faz akımı c) Güç d) Elektrik akım yoğ. ve manyetik akı yoğ.

Çizelge 4.16. Şekil 4.16.-d'nin işaret bölgeleri ve değerleri

No	Bölge	Değer	Birim
1	Rotor	1.10	Tesla
2	Ortalama mıknatıs akısı	0.93	Tesla
3	Stator boyunduruğu	0.89	Tesla
4	Ortalama hava aralığı akısı	0.81	Tesla
5	Stator dişi	1.62	Tesla
6	Stator diş ucu	2.32	Tesla
7	Sargı	6.22	A/mm ²
* 0.25 saniyedeki verilerden alınmıştır.			

4.1.6 24/26 Optimizasyon ve Analizleri

24/26 oluk/kutup kombinasyonuna sahip SMSM'nin optimizasyon öncesinde, elde edilen denklemler ve çıkış eşitlikleri kullanılarak analitik bir tasarım oluşturulmuştur. Analitik olarak hesaplanan tasarım MATLAB GUI ara yüzü ile görselleştirilmiştir. Analitik ön tasarım değerleri kullanılarak, verim ve tork dalgalanması iyileştirmek amacıyla Şekil 4.1'de gösterilen ölçülere SEY ile GA yöntemi ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.17'de 24/26 ön tasarımın analitik hesaplamaları yer almaktadır. Çizelge 4.17'de 24/26 oluk/kutup kombinasyonuna ait SMSM'nin optimizasyon verileri gösterilmiştir.

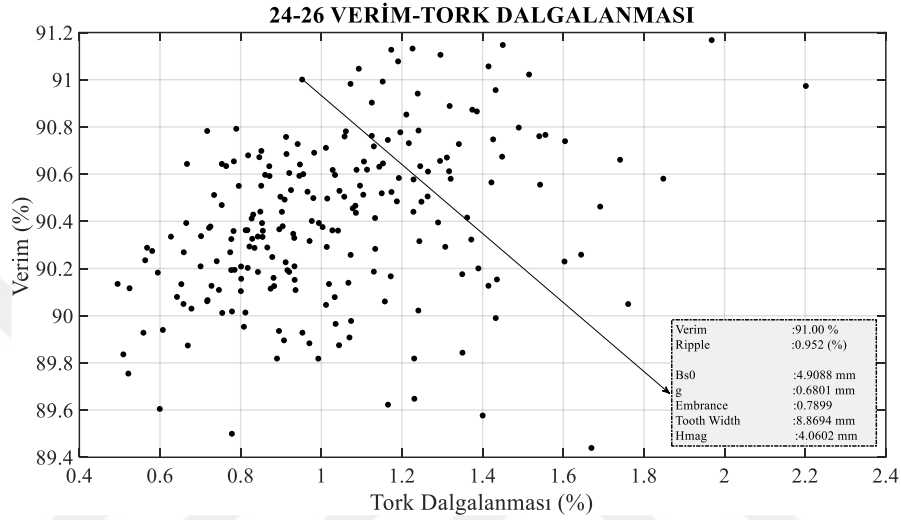


Şekil 4.17. 24/26 ön tasarım analitik belirlenmesi

Çizelge 4.17. 24/26 optimizasyon verileri

Değer	Başlangıç	Minimum	Maksimum	Optimizasyon sonrası	Birim
B_{s0}	5	4	5.5	4.9088	mm
E_m	0.8	0.7	0.8	0.7899	-
h_{mag}	4	3.5	5	4.0602	mm
W_{th}	9	8	9	8.8694	mm
g	1	0.6	1	0.6801	mm

24/26 oluk/kutup kombinasyonuna sahip motor tasarımının verim ve tork dalgalanmasının GA yöntemi ile optimizasyon sonuçları belirlenmiştir. Elde edilen optimizasyon sonuçlarına göre en uygun tasarım verimin %91.00, tork dalgalanmasının %0.952 olduğu değerler belirlenmiştir. Şekil 4.18’de 24/26 tasarımının verim ve tork dalgalanmaları üzerindeki optimizasyon sonuçları gösterilmiştir.



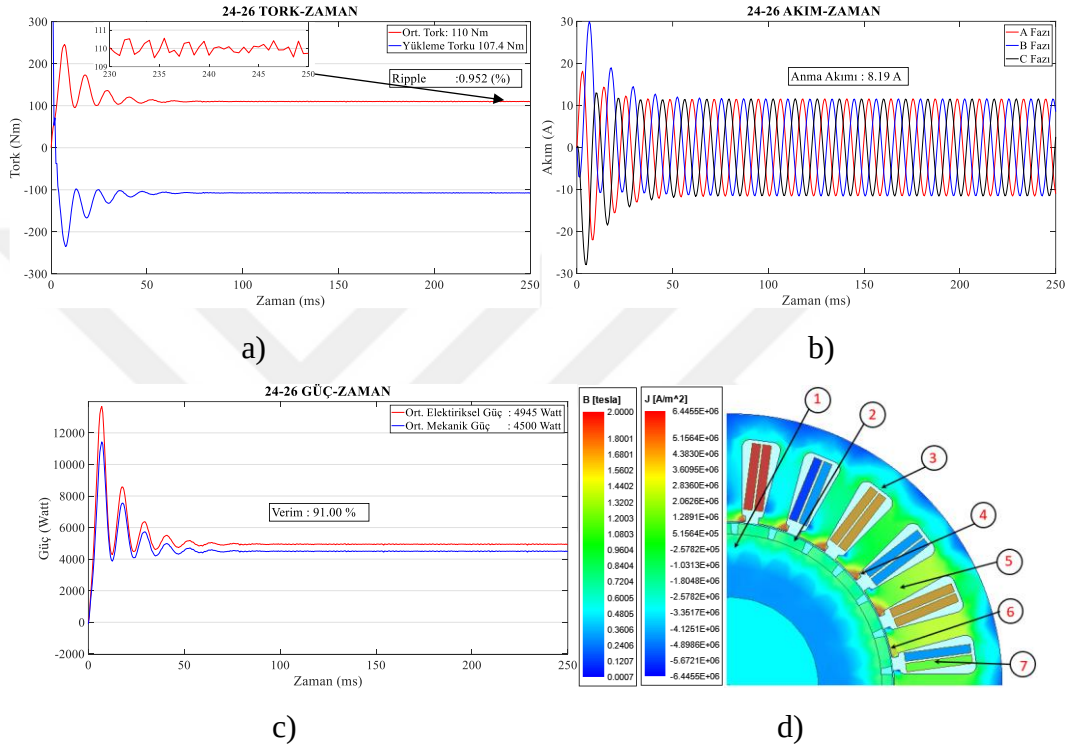
Şekil 4.18. 24/26 verim ve tork dalgalanması optimizasyon sonuçları

Yapılan optimizasyon hesaplamalarında motor verimi ve tork dalgalanması optimizasyon hedef değerlerine ulaşmıştır. Optimizasyon sonucuna göre elde edilen tasarımın ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları Çizelge 4.18’de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.18. 24/26 ANSYS Rmxprt ve 2B SEY analiz sonuçları

Parametre	ANSYS Rmxprt	2B SEY	Birim
Çıkış Gücü (P_{out})	4500	4500	Watt
Giriş Gücü (P_{in})	4925	4945	Watt
Faz akımı (I)	7.81	8.19	Amper
Demir kayıpları (P_{iron})	75	67.4	Watt
Bakır kayıpları (P_{copper})	304.7	332.1	Watt
Mekanik kayıplar (P_{mec})	45	45	Watt
Verim(η)	91.37	91.00	%
Tork dalgalanması (T_r)	-	0.952	%
Doluluk oranı	72	73	%
Akım yoğunluğu (J)	5.07	6.49	A/mm ²
Faz direnci (R_s)	1.66	1.66	Ω
Cos ϕ	0.95	0.91	-

24/26 oluk/kutup kombinasyonuna ait 2B SEY analizleri ile elde edilen tork, tork dalgalanması, akım, güç, verim, elektriksel akım yoğunluğu ve manyetik akı yoğunluğu gibi motor tasarım süreçlerindeki önemli bazı analiz sonuç grafikleri Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Şekil 4.19.-d'de belirtilen işaret bölge isimleri ve değerleri Çizelge 4.19'da verilmiştir.



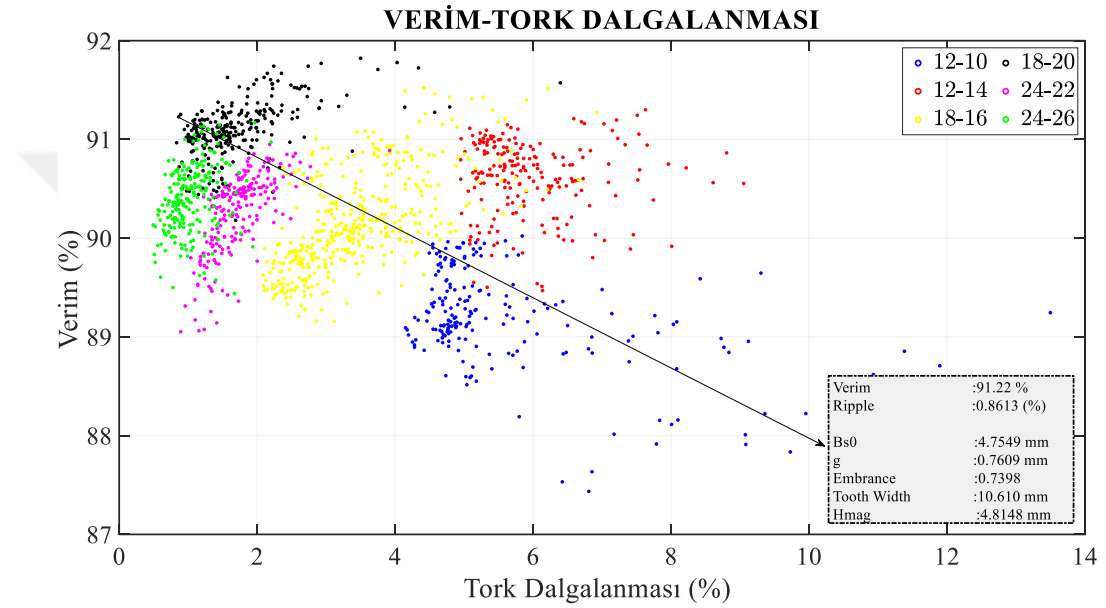
Şekil 4.19. 24/26 optimizasyon sonrası analiz sonuçları; a) Çıkış torku, b) Faz akımı c) Güç d) Elektrik akım yoğ. ve manyetik akı yoğ.

Çizelge 4.19. Şekil 4.19.-d'nin işaret bölgeleri ve değerleri

No	Bölge	Değer	Birim
1	Rotor	0.94	Tesla
2	Ortalama mıknatıs akısı	0.95	Tesla
3	Stator boyunduruğu	0.90	Tesla
4	Stator dış ucu	2.27	Tesla
5	Stator dişi	1.39	Tesla
6	Ortalama hava aralığı akısı	0.83	Tesla
7	Sargı	6.44	A/mm ²
* 0.25 saniyedeki verilerden alınmıştır.			

4.2 Optimizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

ANSYS Maxwell 2B SEY analizleri kullanılarak GA yöntemi ile anma torkunda SEY analiz sonuçları Şekil 4.20’de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre %91 verimin üzerinde ve tork dalgalanması %1 altında olan uygun tasarım belirlenmiştir. Şekil 4.20’de Optimizasyon sonuçları gösterilmiştir. Çizelge 4.20’de Oluk/kutup kombinasyonlarında elde edilen en iyi sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.20. Oluk/kutup SEY analizlerin optimizasyon sonuçları

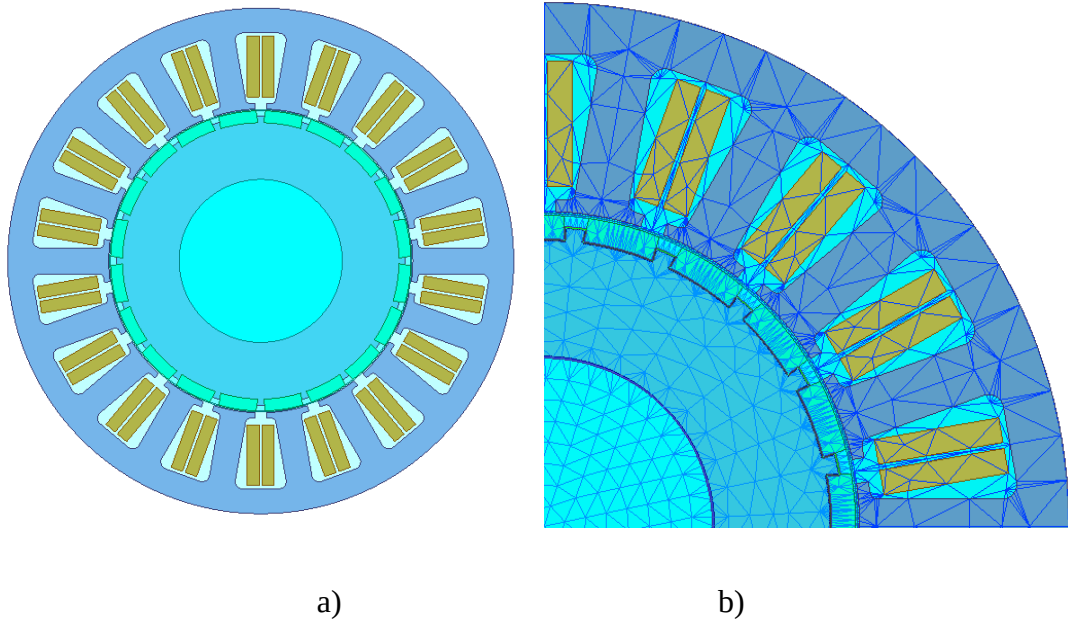
Çizelge 4.20. Optimizasyon sonuçlarının karşılaştırması

Parametre	12/10	12/14	18/16	18/20	24/22	24/26	Birim
Çıkış Gücü (P_{out})	4500	4500	4500	4500	4500	4500	Watt
Giriş Gücü (P_{in})	5003	4945	4945	4932	4977	4945	Watt
Faz akımı (I)	8.46	7.9	8.11	8.07	8.49	8.19	Amper
Demir kayıpları (P_{iron})	51.2	48.4	61.6	59.1	71.3	67.4	Watt
Bakır kayıpları (P_{copper})	406.84	351.1	337.3	327.9	360.1	332.1	Watt
Mekanik kayıplar (P_{mec})	45	45	45	45	45	45	Watt
Verim(η)	89.94	91.0	91.00	91.22	90.41	91.00	%
Tork dalgalanması (T_r)	4.545	4.956	2.852	0.8613	1.224	0.952	%
Doluluk oranı	73	73	73	72.8	73	73	%
Akım yoğunluğu (J)	6.16	5.86	5.8	5.86	6.22	6.49	A/mm ²
Faz direnci (R_s)	1.89	1.89	1.67	1.67	1.66	1.66	Ω
Cos ϕ	0.90	0.96	0.92	0.93	0.89	0.91	-

Optimizasyon çalışmaları doğrultusunda 18/20 oluk/kutup kombinasyonundaki veriler istenilen koşulları en uygun şekilde sağlamıştır. 18/20 oluk/kutup kombinasyonu için, $B_{s0}=4.7549$ mm, $E_m=0.7398$, $h_{mag}=4.8148$ mm, $g=0.7398$ mm ve $W_{th}=10.61$ mm değerleri kullanılmıştır. Buna göre nominal yük altında verim %91.22 ve tork dalgalanması %0.8613 olarak bulunmuştur. Seçilen tasarım 5 kademeli 0-20 dereceli kaykı çalışması tam model 2B tasarımı üzerinde parametrik olarak SEY analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.3 SMSM'nin Kaykı ile Tork Dalgalanmasının Azaltılması

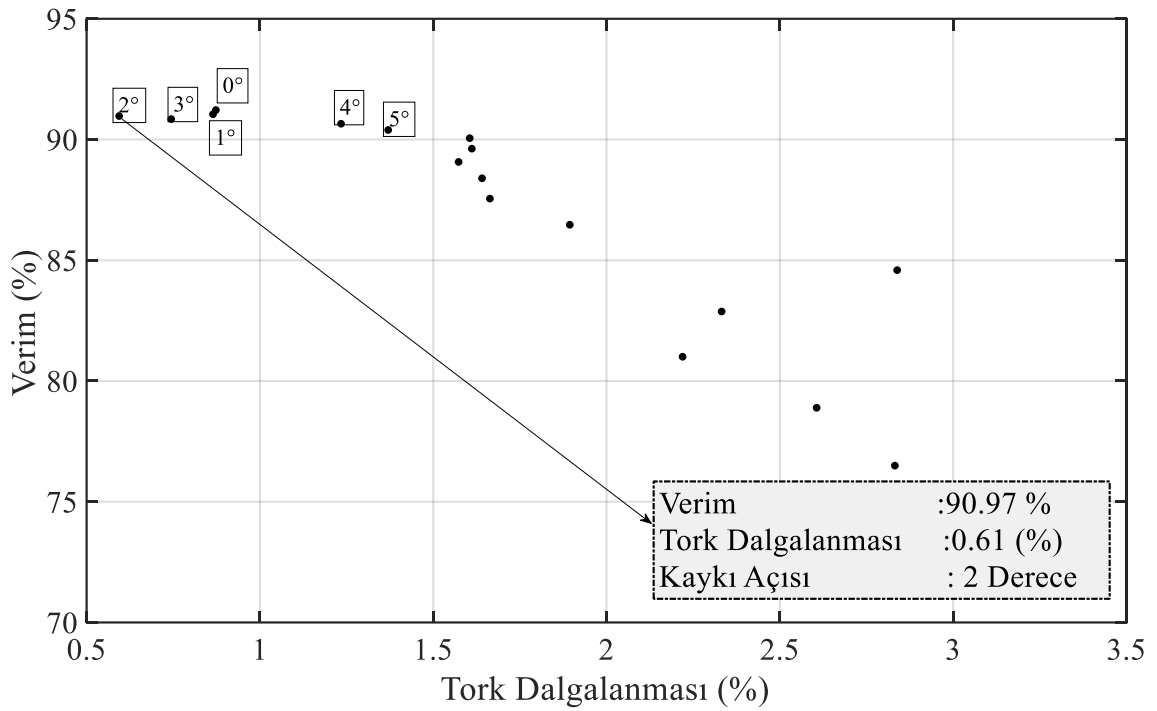
Motor prototipinde adım kaykısı uygulanabilmesi için mıknatısların rotor nüvesine uygun bir şekilde yerleştirilebilmesi gerekir. Bu yüzden mıknatıs montajlarının yapılabilmesi için her bir mıknatısın arasına montaj kanalları eklenmiştir. Bu sayede deneysel çalışmada ortaya çıkabilecek mekanik hataların önüne geçilmiştir. Yapılan bu işlem motorun 2B modeline de tanımlanmıştır. Şekil 4.21'de modelin tasarımı ve ağ yapısı yer almaktadır.



Şekil 4.21. ANSYS Maxwell tasarım gösterimi a) 2B gösterimi b) Ağ yapısı

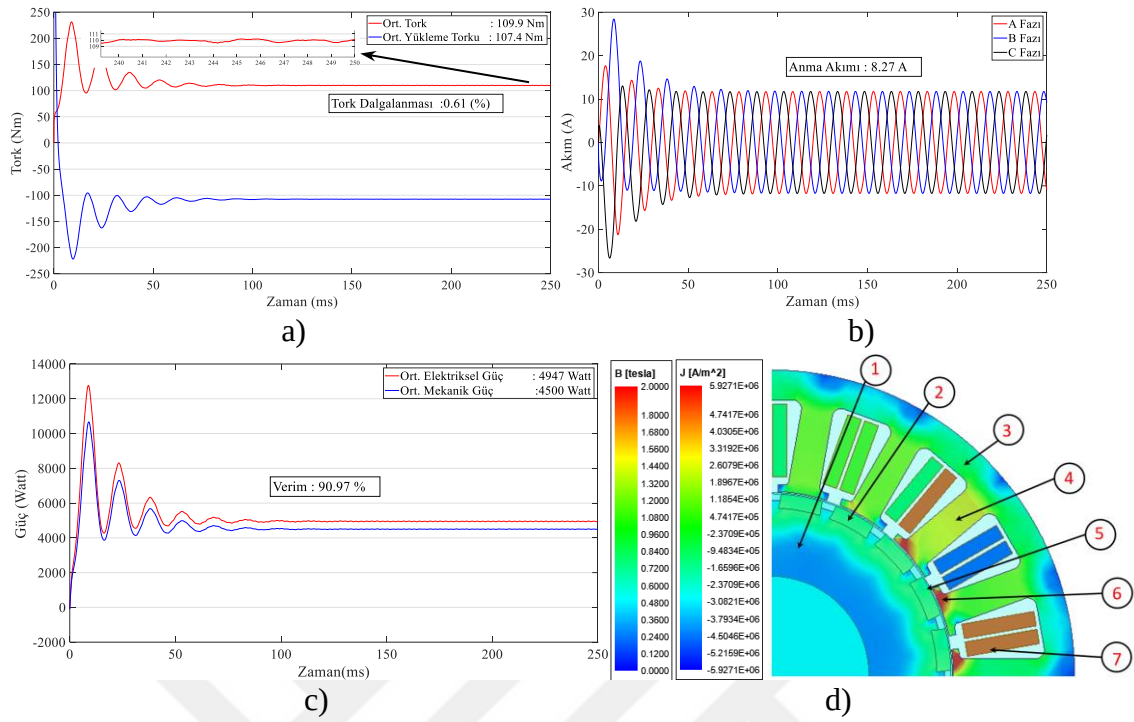
Optimizasyon sonucunda elde edilen motor tasarım parametrelerine göre 2B model oluşturulmuştur. Tasarlanan motor asansör taşıyıcı motor olarak kullanılacağı için özellikle yüksek konfor beklentisi vardır. Bu sebeple yapılan optimizasyon işlemine ek olarak tork dalgalanmasını minimize etmek amacıyla mıknatıslara adım-kaykı uygulanmıştır. Bu işleme göre rotor 5 eşit parçaya bölünmüş ve maksimum kaykı açısı

olan 20 dereceye kadar 1 derecelik kaykılar uygulanmıştır. Bu işlemler sonucunda verimde ihmal edilebilir (%0.25) bir düşüş gözlene de tork dalgalanmasında optimizasyon sonucuna göre %29'luk bir azalma elde edilmiştir. Bu sayede hem optimizasyonda belirlenen verim hedefine yakın bir verim, hem de optimizasyon sonucunda elde edilen tork dalgalanmasının da altında sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.22'de verimlilik-tork dalgalanma adım-kaykısı sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Adım kaykısının verim ve tork dalgalanması üzerindeki etkisi

Elde edilen sonuçlara göre kaykısı çalışmasında analitik hesaplamalar (Eşitlik 3.2-3.3) ile yapılan SEY sonuçları örtüşmüş olup toplamda 2 derece kaykısı da en düşük tork dalgalanması elde edilmiştir. Nihai tasarımın 2B SEY analiz sonuçları Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.23. 18/20 2 derece kayıklı tasarımın 2B SEY analiz sonuçları; a) Çıkış torku, b) Faz akımı c) Güç d) Elektrik akım yoğ. ve Manyetik akı yoğ.

Çizelge 4.21. Şekil 4.23.-d'nin işaret bölgeleri ve değerleri

No	Bölge	Değer	Birim
1	Rotor	1.22	Tesla
2	Mıknatıs	1.22	Tesla
3	Stator boyunduruğu	0.90	Tesla
4	Stator dişi	1.52	Tesla
5	Ortalama hava aralığı akısı	0.80	Tesla
6	Stator diş ucu	2.29	Tesla
7	Sargı	5.92	A/mm ²
* 0.25 saniyedeki verilerden alınmıştır.			

Elde edilen sonuçlara göre 2 derece kaykı uygulaması ile motor verimi %90.97, tork dalgalanması ise %0.61, faz rms akımı 8.27 A ve akım yoğunluğu 5.92 A/mm² olarak belirlenmiştir.

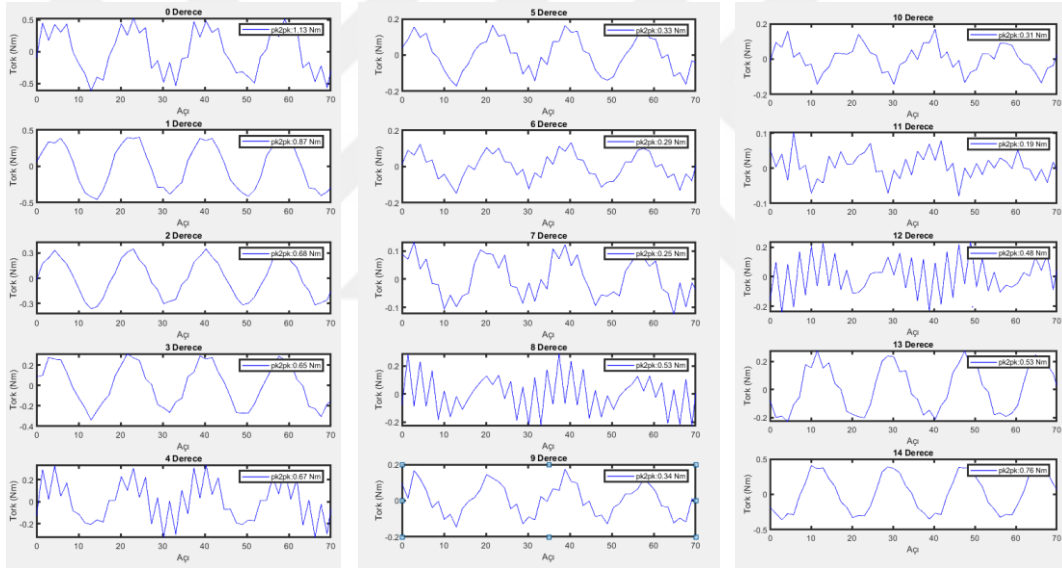
Yapılan oluk/kutup kombinasyonu seçimi, analitik hesaplamaların gerçekleştirilmesi, elde edilen optimizasyon sonuçları ve kayk çalışmalarından sonra asansör makinesi için motor parametreleri Çizelge 4.22’de yer almaktadır.

Çizelge 4.22. Motor parametreleri

	Parametre	Değer	Birim
Motor Özellikleri	Rotor tipi	İçten Rotorlu	-
	Kutup sayısı, N_p	20	-
	Çıkış gücü, P_{out}	4500	W
	Frekans, f	66.66	Hz
	Voltaj, V	380	V
	Anma hızı, ω_m	400	d/d
	Anma Akımı, I_{rms}	8.27	A (rms)
	Anma torku, T_R	107.42	Nm
	Slot sayısı, N_{slot}	18	-
	Rotor malzemesi	St37	-
	Hava aralığı, g	0.7609	mm
Mıknatıs	Mıknatıs kalınlığı, h_{mag}	4.81	mm
	Mıknatıs tipi	N45SH	-
	Geçirgenlik, μ_r	1.05	-
	Mıknatıslanma akısı, B_r	1.35	T
	Mıknatıs/kutup oranı, E_m	0.7398	-
Sargı	Bağlantı tipi	Y	-
	Sargı tipi	Yoğunlaştırılmış	-
	Katman	2	-
Stator ve Rotor	İstifleme faktörü, k_{sf}	0.95	-
	Stator malzemesi	M330-50A	-
	Sargı faktörü, k_w	0.945	-
	Slot açıklığı, B_{s0}	4.7549	mm
	Stator dış çapı, D	204.7	mm
	Stator iç çapı, D_{si}	123	mm
	Rotor dış çapı, D_{ro}	121.4782	mm
	Rotor iç çapı, D_{ri}	66	mm
	Laminasyon boyu, L	122	mm

4.4 SMSM'nin Vuruntu Torku SEY analizleri

Elektrik motorlarında tork dalgalanmaları çeşitli nedenlere bağlı olarak ortaya çıkar. Bunlar arasında vuruntu momenti, PWM akım harmonikleri, ideal olmayan zıt EMK dalga şekli, faz komütasyonu ve DA baradaki dalgalanmalar yer almaktadır. Yüksek hızlarda, motor sisteminin eylemsizliği sayesinde tork dalgalanmaları süzülebilir. Ancak, düşük hızlarda tork dalgalanmaları istenmeyen hız değişimleri, titreşim ve akustik gürültüye yol açarak kabul edilemez sonuçlara neden olabilir (Aydın, 2007). Bu çalışmada SMSM üzerinde herhangi bir yük olmadan oluşan vuruntu momentleri SEY yöntemi ile analiz edilmiştir. Şekil 4.24'te kaykı derecelerine göre oluşan vuruntu moment grafikleri yer almaktadır.



Şekil 4.24. Kaykı derecelerine göre oluşan vuruntu momentleri

Elde edilen SEY sonuçlarına göre en düşük vuruntu momenti 7°'lik kaykıda tepeden tepeye değeri 0.25 Nm olarak gözlemlenmiştir. SEY sonuçlarına göre 7° kaykı ile tork dalgalanması %1.77 ve verim %89.6'dır. Ancak Şekil 4.22'de gösterilen sonuçlara göre en düşük tork dalgalanmasının kaykının 2° olduğu noktada gerçekleşmektedir. 2° kaykıda vuruntu momenti tepeden tepeye değeri 0.68 Nm olarak belirlenmiştir.

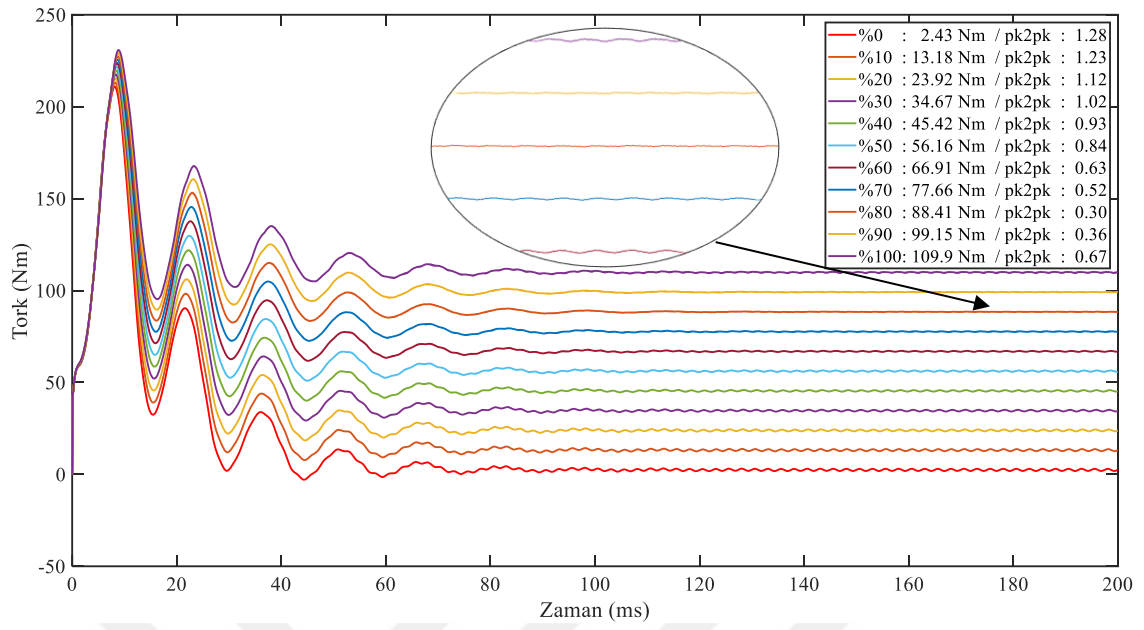
4.5 SMSM'nin Değişken Yüklerdeki SEY Analizi

SMSM'nin tam yük altında istenilen performansı elde edildikten sonra değişken yükler altında giriş gücü, çıkış gücü, faz akımı, kayıplar, tork dalgalanması, verim ve $\cos \phi$ değerleri yükleme değeri %10 artırırlarak Çizelge 4.23'te gösterilmiştir. Analizler 0.1 ms aralıklar ile 0-200 ms aralığında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar 180-200 ms arasındaki değerlerden elde edilmiştir.

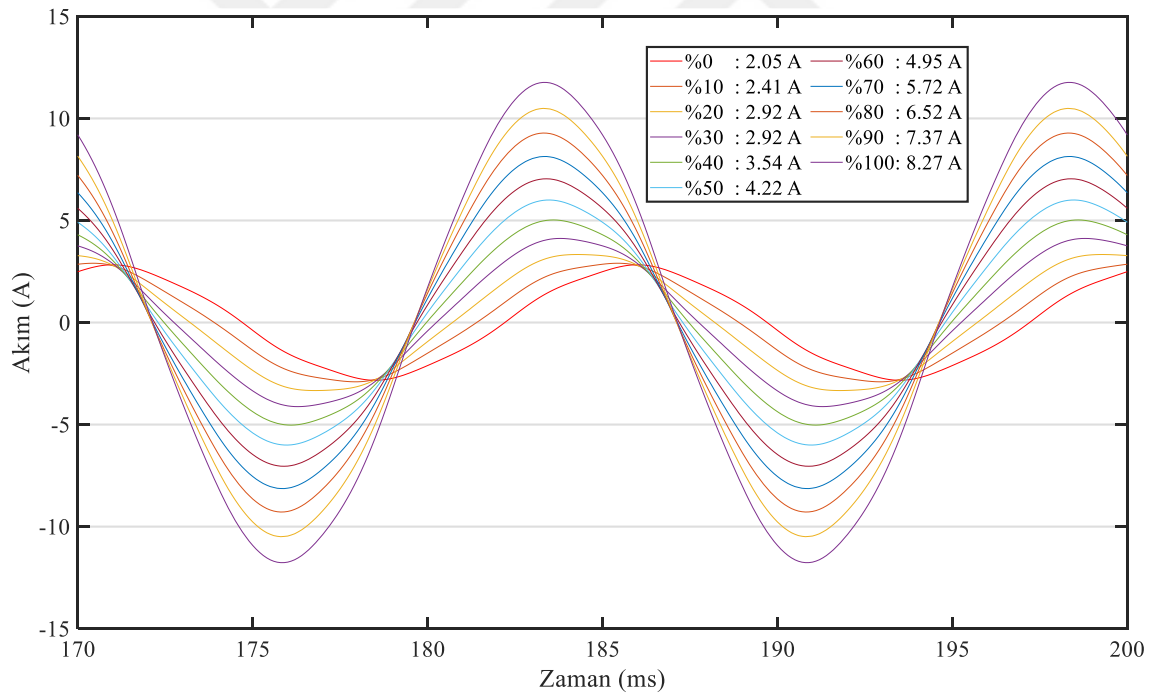
Çizelge 4.23. SMSM'nin değişken yüklemelerdeki 2B SEY sonuçları

Parametre	%10	%20	%30	%40	%50	%60	%70	%80	%90	%100	Birim
Çıkış Gücü (P_{out})	450	900	1350	1800	2250	2700	3150	3600	4050	4500	Watt
Giriş Gücü (P_{in})	581	1039	1502	1972	2448	2931	3421	3920	4428	4947	Watt
Tork (T)	10.7	21.4	32.2	42.9	53.7	64.4	75.2	85.9	96.7	107	Nm
Faz akımı (I)	2.05	2.41	2.92	3.54	4.22	4.95	5.72	6.52	7.37	8.27	Amper
Demir kayıpları (P_{iron})	65.7	65.5	64.9	64.4	63.9	63.2	62.5	61.8	60.9	60.1	Watt
Bakır kayıpları (P_{copper})	21.1	29.2	42.8	63	89.5	123	164	214	273	343	Watt
Mekanik kayıplar (P_{mec})	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	Watt
Verim(η)	77.3	86.5	89.8	91.2	91.9	92.1	92.0	91.8	91.4	90.9	%
Faz direnci (R_s)	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	Ω
Tork dalgalanması (T_{pk2pk})	1.23	1.12	1.02	0.93	0.84	0.63	0.52	0.30	0.38	0.67	Pk2pk
Cos ϕ	0.43	0.65	0.78	0.85	0.88	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91	-
2B SEY analizleri 25 °C göre gerçekleştirilmiştir.											

Çizelge 4.23 incelendiğinde 2B SEY analizlerinde SMSM'nin farklı yüklemelerde değerlerinde de veriminin %77.3 ile %91.8 arasında olduğu gözlemlenmiştir. Tork dalgalanmaları tepeden tepeye 1.237 Nm ile 0.308 Nm arasında olduğu gözlemlenmiştir. Tork dalgalanmaları değişken yükleme değerlerine göre oldukça düşüktür. Farklı yükleme değerlerine göre tork ve akım grafikleri Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da gösterilmiştir.

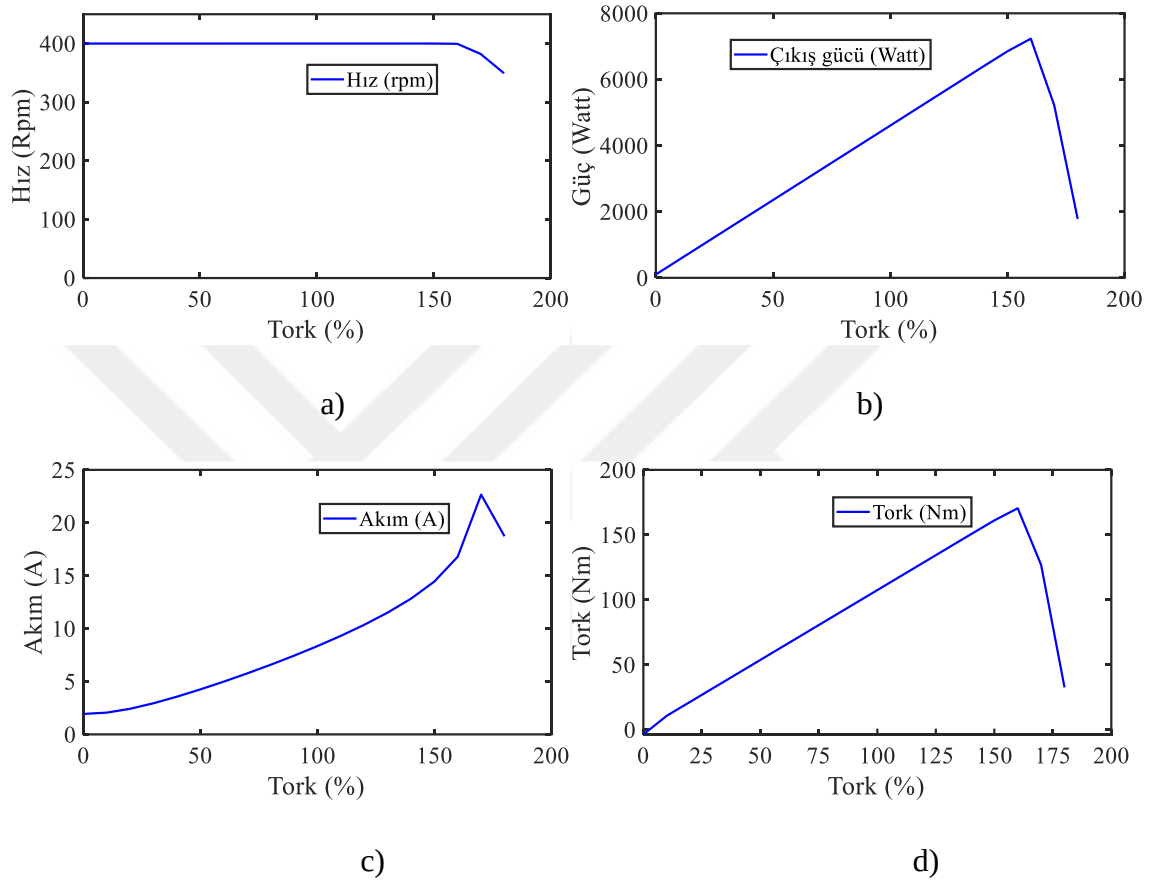


Şekil 4.25. Yükleme değerlerine göre tork grafiği



Şekil 4.26. Yükleme değerlerine göre akım grafiği

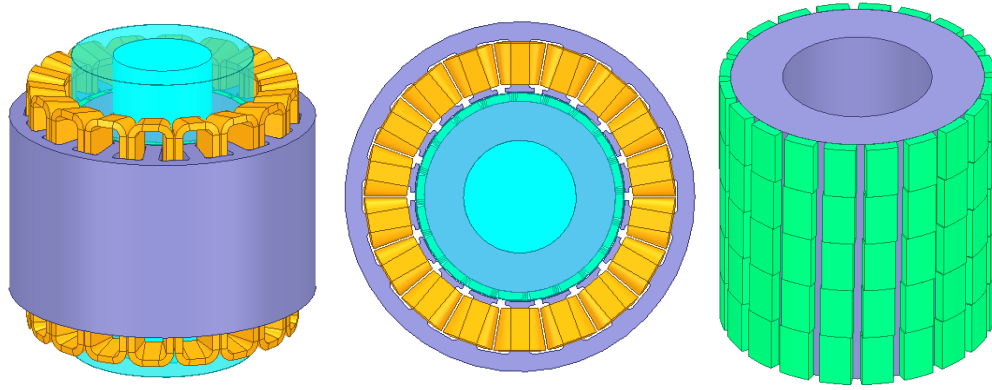
2B SEY ile yapılan yükleme çalışmalarında SMSM'nin %160 (170.44 Nm) yüklemekten sonra senkron hızdan ayrıldığı tespit edilmiştir. Bu değerden sonra akım dalgalanmaları dengesizleşmiş, çıkış gücü ve tork değerlerinde düşme başlamıştır. Şekil 4.27'de yükleme torkuna göre çıkış gücü, akım, hız ve tork grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 4.27. Yükleme grafiği a) yükleme değerine göre hız grafiği b) yükleme değerine göre çıkış gücü grafiği c) yükleme değerine göre akım grafiği d) yükleme değerine göre tork grafiği

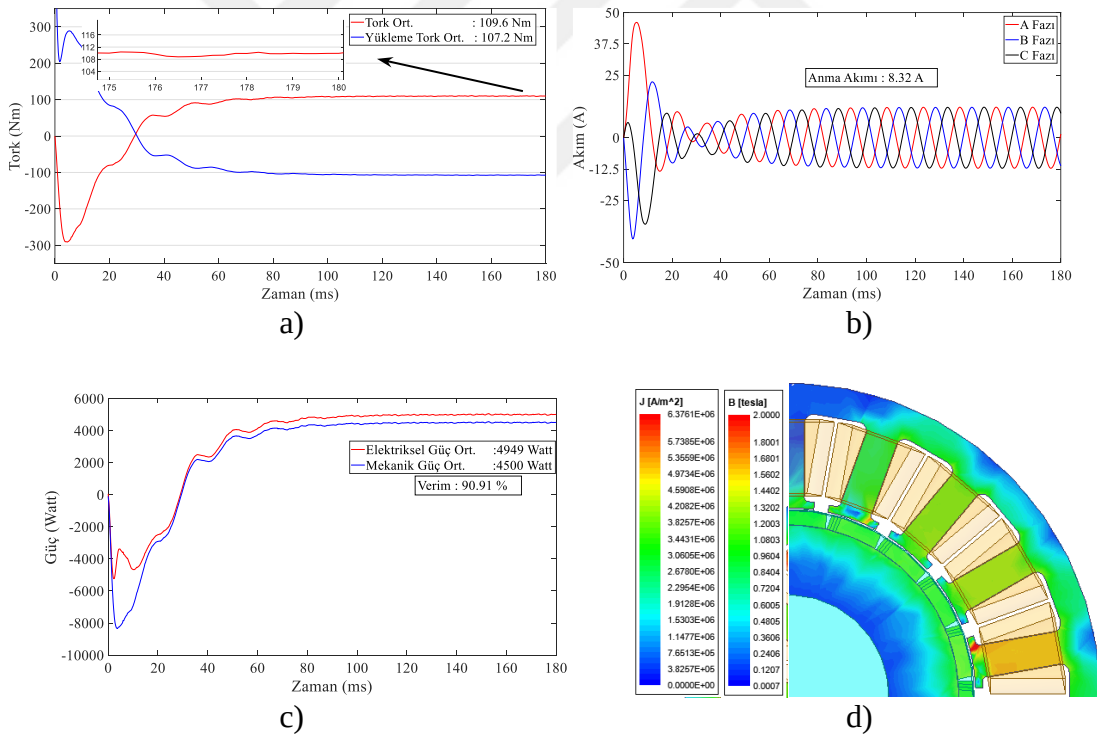
4.6 3B SMSM'nin SEY Analizi

2B SEY analizlerinde elde edilen SMSM'nin 3B olarak doğrulaması bu bölümde sağlanmıştır. 3B SEY analizleri ile gerçekleştirilen doğrulama çalışmalarında 2B sonuçlar ile örtüştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 4.28'de 3B tasarım görülmektedir.



Şekil 4.28. 3B SMSM ve kaykılı mıknatıs görünümü

SEY analizlerine göre 2B sonuçlarda anma akımı 8.27 A iken 3B analizlerde 8.32 A elde edilmiştir. Verim ise 2B analizlerde %90.97 iken 3B analizlerde %90.91 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.29’da 3B SEY analiz sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 4.29. 18/20 2 derece kaykılı tasarımın 3B SEY analiz sonuçları;
a) Çıkış torku, b) Faz akımı c) Güç d) Elektrik akım yoğ. ve Manyetik akı yoğ.

4.7 SMSM'nin Termal Analizi

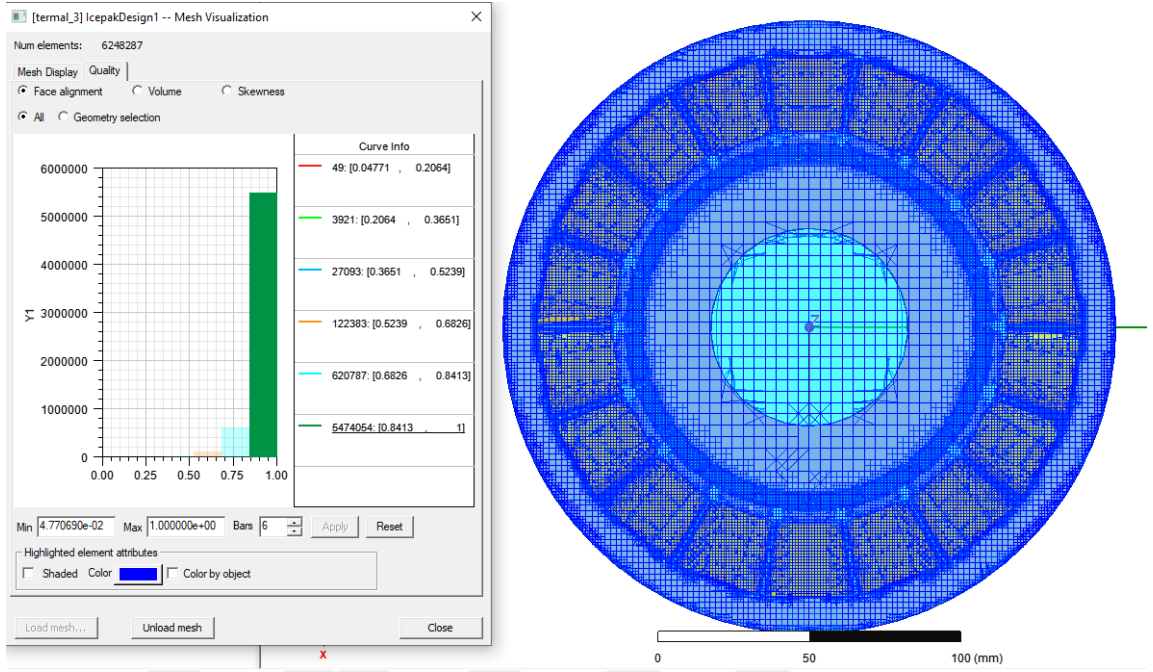
Termal analizlerde, SMSM bileşenlerinin maksimum sıcaklık değerlerinin belirlenmesi için testler yapılmıştır. Motor sıcaklık değerleri arttığında, özellikle motor sargılarının yalıtım kaplamalarının koruma özelliğinin kaybolması ve mıknatısların demagnetizasyon riski ortaya çıkmaktadır. Termal analizler, ANSYS Maxwell ve ANSYS Icepack programlarının entegrasyonu ile gerçekleştirilmiştir. ANSYS Maxwell 3B modülünden elde edilen sonuçlar, ANSYS Icepack bölümüne aktarılmıştır. Çizelge 4.24'te sargı sınıflandırılması ve sıcaklık sınır değerleri paylaşılmıştır (Soyaslan, 2020).

Çizelge 4.24. Motor sargılarının izolasyon sınıfları (Soyaslan, 2020)

Sıcaklık İzolasyon Sınıfı	İzin Verilen Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	Tam Yükte İzin Verilen Sıcaklık Artışı* (°C)	Kızgın Nokta Toleransı (°C)
A	95	60	5
B	110	80	10
F	135	105	10
H	160	125	15
* Ortam Sıcaklığı 22°C kabul edilerek verilmiştir.			

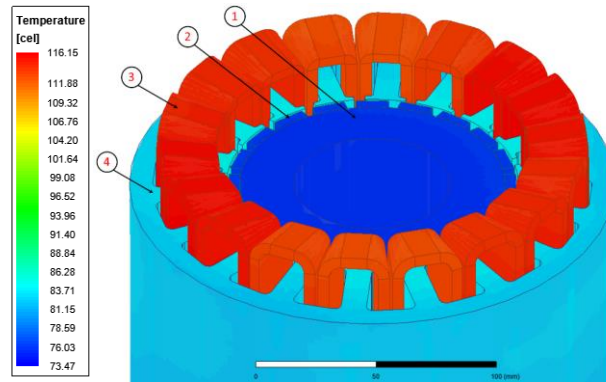
Yapılan analizlerde, motorun H sınıfı izolasyona göre sargıların sarımı belirlenmiştir. Buna göre 22 °C derece oda sıcaklığı kabul edildiğinde 125 °C sıcaklık artışı ve 15 °C tolerans değeri ile birlikte sargılardaki sınır değeri 162 °C olarak belirlenmiştir. Prototip motor için satın alım işlemi gerçekleştirilen teller için üretici tarafından verilen katalog değerlerine göre H tipi bakır emaye tellerin yalıtımı 200 °C'ye kadar koruma sağlayacağı belirtilmiştir (Anonim, 2022b). SMSM'de kullanılan N45SH tipi mıknatısların demagnetizasyon sınır sıcaklık değeri ise 150 °C'dir. Dolayısıyla yapılan termal analizlerde sargıların için 162 °C, mıknatıslar için ise 150 °C sınır kabul edilmiştir.

Asansör motorları S3 görev çevriminde %40 görev döngüsü ile çalışmaktadır (Anonim, 2010). Ek olarak motor yükleri değişken olmaktadır. Buna rağmen yapılan termal analizlerde, tam yük altında ve S1 görev çevriminde (kalıcı termal rejim hali) sıcaklık verileri dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.29'da SEY ile gerçekleştirilen termal analizde kullanılan ağ yapısı gözlemlenmektedir. Toplamda 6.248.287 adet elemana bölünerek çözümleme gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.30. Termal analizlerde kullanılan ağ yapısı

Yapılan analizlerde tam yük altında motor sıcaklığı kalıcı duruma geçmiştir. Şekil 4.31’de ve Çizelge 4.25’te sonuçlar paylaşılmıştır.



Şekil 4.31. Termal analiz sonuçları

Çizelge 4.25. Termal analiz sonuçları

No	Bölge	Sıcaklık (°C)
1	Rotor	75
2	Mıknatıslar	76
3	Sargılar	116
4	Stator	84

Asansör motorlarının S3 görev çevriminde ve değişken yükler altında çalıştığı göz önünde bulundurulduğunda, tam yük altındaki termal rejim durumunda sargıların 116°C sıcaklığa ve mıknatısların 76°C sıcaklığa ulaştığı gözlemlenmiştir. Motor, termal açıdan güvenli bir bölgede çalışmaktadır.

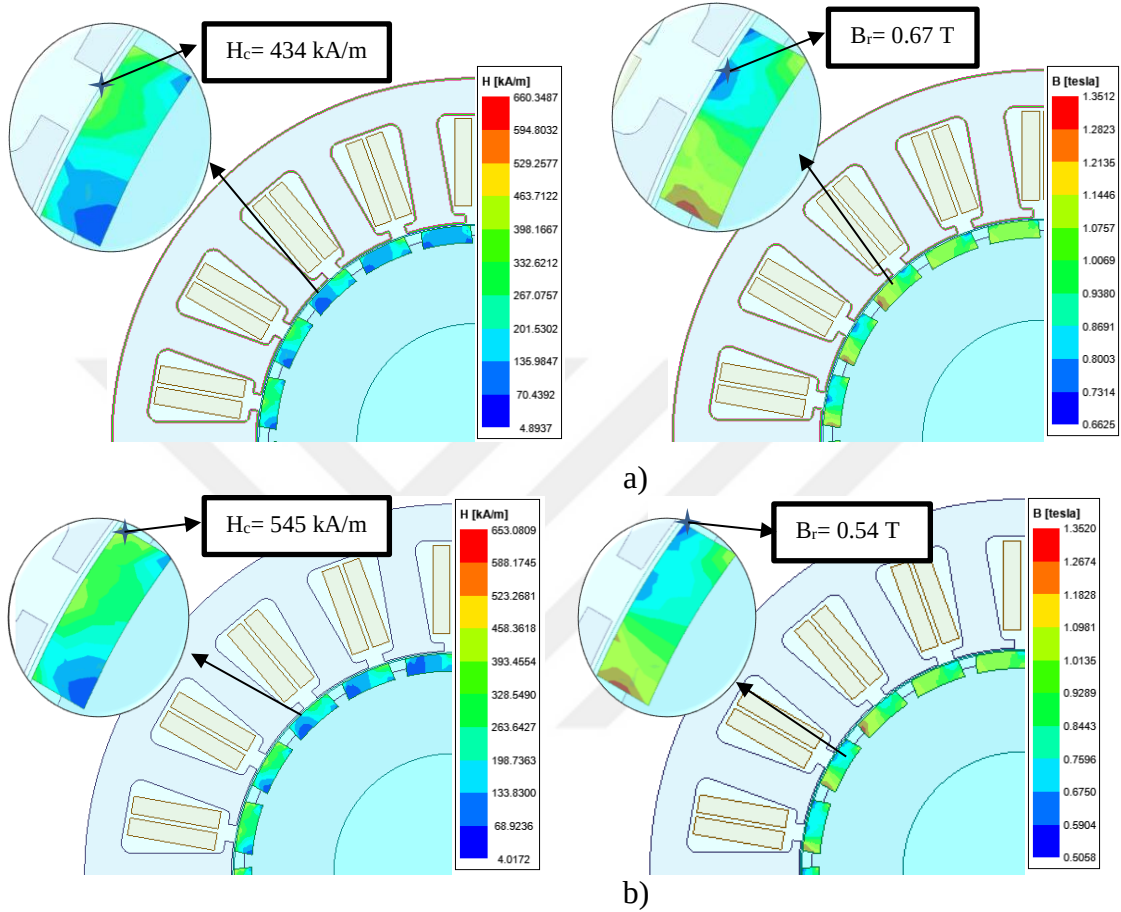
4.7.1 Demagnetizasyon

Demagnetizasyon, mıknatısların manyetik alanının azalması veya tamamen kaybolması anlamına gelir. Aşırı yükleme durumunda, SMSM’de aşırı ısınma, yüksek akım, gerilim dengesizlikleri gibi faktörlere maruz kalabilir. Bu koşullar, mıknatısların demagnetizasyon riskini artırır. Aşırı yüklenme durumunda, motorun ısısı artar. Mıknatıslar, yüksek sıcaklıklar altında manyetik özelliklerini kaybetmeye başlar. Yüksek sıcaklık, mıknatıs malzemesinin manyetik alanın tutulmasını sağlayan içsel manyetik alan düzenini bozabilir. Bu, mıknatısların manyetik özelliğini azaltabilir veya tamamen yok edebilir.

Demagnetizasyon, Şekil 3.14’teki N45SH tipi sabit mıknatısın manyetik özellikleri gösteren B-H eğrisindeki dirsek noktası manyetik akı yoğunluğu değeri ile karşılaştırılarak belirlenebilir. Eğer manyetize etme yönündeki akı yoğunluğu, dirsek noktasındaki akı yoğunluğu değerinden daha yüksek ise manyetize etme yönünde bir demagnetizasyon olmadığı anlamına gelir. Öte yandan, manyetize etme yönündeki akı yoğunluğu, dirsek noktasından daha düşük ise demagnetizasyon oluşabilir (Ma ve ark., 2020).

SMSM’nin tam yükleme ile yapılan termal analizlerde mıknatıslar 76 °C sıcaklığa çıkmaktadır. ANSYS Maxwell Rmxprt yazılımından elde edilen verilere göre 80 °C sıcaklığında mıknatısın demagnetizasyon riski taşıdığı dirsek noktası manyetik akı yoğunluğu 0.371 T’dir. Aşırı yükleme sınırı olan %125 yüklemeye yapılan termal analizler ile mıknatıslar 99.1 °C sıcaklığa çıkmaktadır. 100 °C sıcaklığında mıknatısın demagnetizasyon riski taşıdığı dirsek noktası manyetik akı yoğunluğu 0.311 T’dir. SMSM’nin termal sonuçlarına göre, anma torkuna göre yapılan 2B SEY analizlerinde mıknatısların akı yoğunluğu 0.371 T ve aşırı yükleme değerine göre yapılan 2B SEY analizlerinde mıknatıslar akı yoğunluğu 0.311 T altında kalması halinde demagnetizasyon

riski başlamaktadır. Şekil 4.32’de anma torkunda ve aşırı yükleme altında termal rejim durumuna göre yapılan 2B SEY analizlerinde mıknatısların akı yoğunluğu gösterilmiştir.

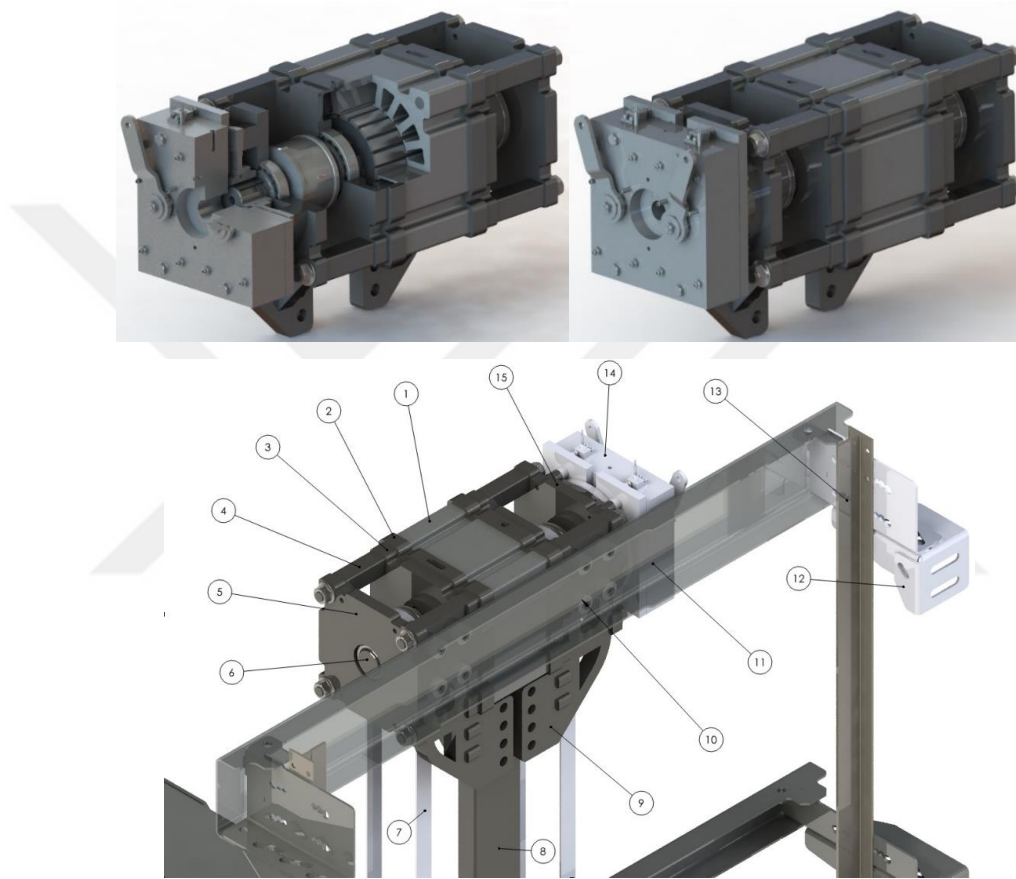


Şekil 4.32. Tam ve aşırı yüklemede mıknatısların akı yoğunluğu a) %100 yükleme b) %125 yükleme

Şekil 4.32 incelendiğinde tam yüklemede termal rejim durumunda en düşük manyetik akı yoğunluğu 0.6625 T olarak belirlenmiştir. Şekil 4.32 incelendiğinde aşırı yüklemede termal rejim durumunda en düşük manyetik akı yoğunluğu 0.5058 T olarak belirlenmiştir. Yapılan tam yükleme ve aşırı yükleme analizlerinde mıknatısların demagnetizasyon riski taşımadığı görülmektedir. Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de gösterilen H_c ve B_r değerleri incelendiğinde, Şekil 3.14’teki N45SH tipi mıknatısın manyetik özelliklerini içeren grafikte tam yük altında ve aşırı yükleme altında sırası ile 80 °C ve 100 °C sıcaklığında demagnetizasyon dirsek bölgesinden uzakta, normal operasyon çizgisi üzerinde çalıştığı gözlenmiştir.

4.8 Nihai Tasarım Modellerinin Oluşturulması

Kayışlı asansör sistemlerinde kullanılmak üzere raya montajlı modüler yapıya sahip asansör makinesinin ve makinenin kuyu bağlantılarının 3B katı model tasarımı Şekil 4.33'te yer almaktadır. Asansör makinesinin kılavuz ray ve konsol bağlantı parçaları Çizelge 4.26'da gösterilmiştir.



Şekil 4.33. 3B Prototip makine tasarımı

Çizelge 4.26. Asansör makinesi montaj parçaları

No	Parça adı	No	Parça adı
1	Stator	9	Ray-Motor-Duvar montaj parçası
2	Stator kapağı	10	SMSM-Konsol montaj noktası
3	Rulman iç kapağı	11	SMSM-Duvar montaj konsolu
4	Kayış boşlukları	12	Duvar bağlantı parçası
5	Dış rulman kapağı	13	Karşı ağırlık rayı
6	Mil	14	Fren
7	Kayış	15	Fren kapağı
8	Merkez ray		

4.9 Asansör Tahrik Makinesinin Yapısal Analizleri

Asansör tahrik makinesinin tasarım sürecindeki bir diğer aşama, makine mukavemeti ve deformasyon miktarlarının belirlendiği yapısal testlerdir. Oluşturulan prototip asansör tahrik makinesinin, üretimine geçilmeden önce yük altındaki performansı doğrulanmalıdır. Bu nedenle, statik etkiler altında kalan makine parçalarının gerilme analizlerinin yapılması gerekmektedir.

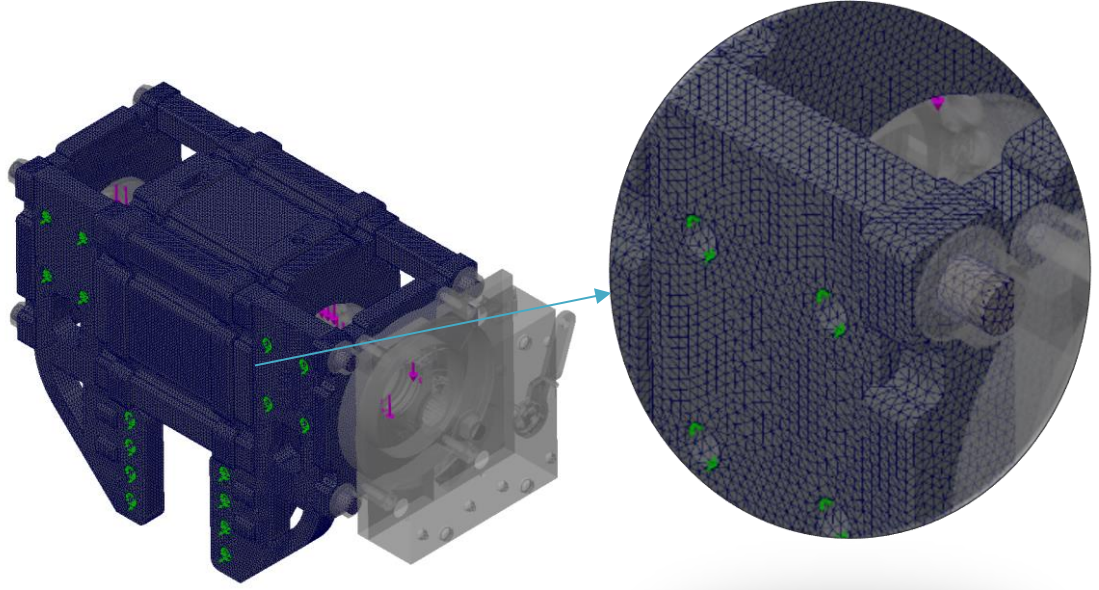
Düşük hızda çalışan motorlarda dönme hızı kritik hızdan çok daha düşük olup, rotor ataletleri de buna bağlı olarak düşük seviyelerde bulunmaktadır. Bu nedenle, düşük hızda çalışan elektrik motorlarında dinamik etkilere bağlı bir problem oluşmamaktadır (Soyaslan, 2020; Tong, 2014). Tasarlanan prototip makinenin hızının 400 d/d gibi düşük bir değerde olması ve motorun sabit hızda çalışacak olması nedeniyle dinamik analizlerin yapılmasına gerek duyulmamıştır.

Gerilme analizleri, Çizelge 3.9'da elde edilen toplam 15 kN statik yük değerinde, asansör makinesinin montajlı tasarımına ve makine miline uygulanmıştır. Burulma analizleri anma torku olan 107.4 Nm tork değeri ile, asansör makine mili ve motor stator dişlerine uygulanmıştır.

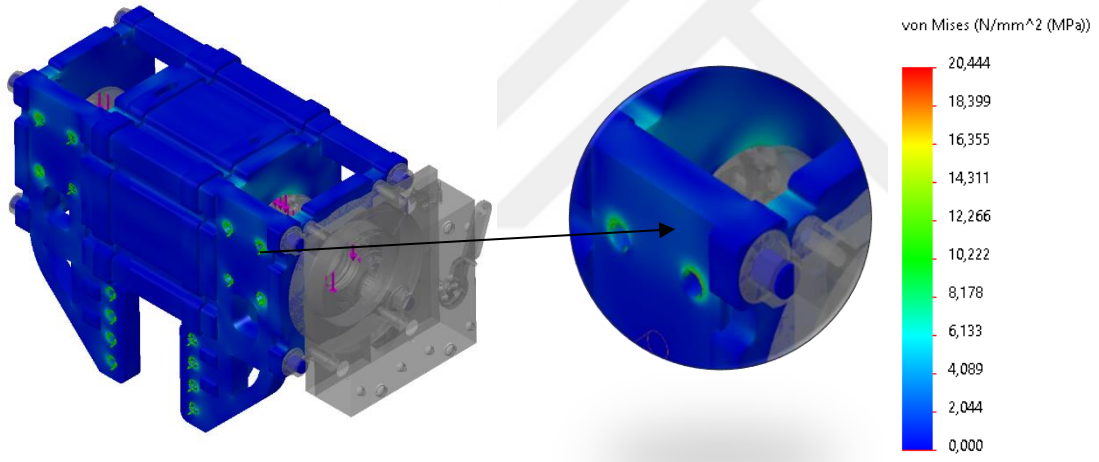
Maruz kalınan gerilmeler altında parçaların dayanımı, deformasyonları ve akma sınırlarına göre güvenlik katsayıları, SEY ile yapılan gerilme analizleri ile test edilmiştir. Tasarım hesaplarında emniyet katsayısı olarak 5 değeri kullanılmıştır (Anonim, 1988).

4.9.1 Asansör Makinesinin Gerilme Analizi

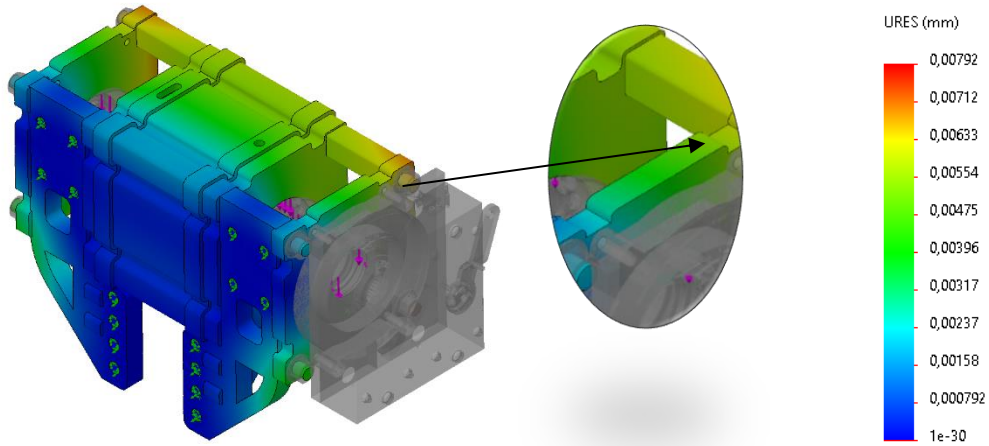
SMSM'nin prototipinin üretiminde mil 42CrMo4 (4140) çeliğinden ve motor kapakları ve bağlantı elemanları için orta karbonlu çeliklerden S235 (St37) malzemesi kullanılmıştır. Sistemin sabitleme bölgeleri duvar ve ray bağlantı noktaları olup, yükleme noktaları ise kasnak milinin temas noktaları olan rulman yataklarına uygulanmıştır. Statik yük olarak 15 kN'dir. Şekil 4.34-4.36'da motor gövdesine uygulanan ağ yapısı, stres ve yer değiştirme analiz sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 4.34. Makineye uygulanan ağ (mesh) yapısı



Şekil 4.35. Makinenin gerilmesi analiz sonuçları

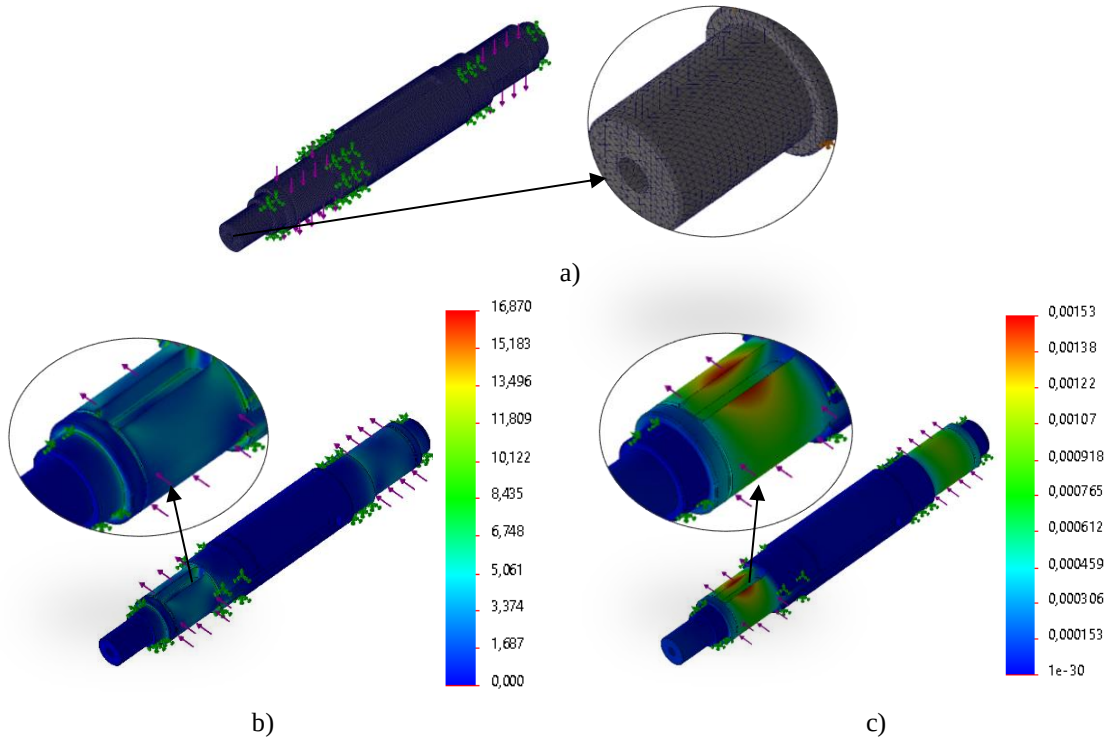


Şekil 4.36. Motor şasisinin yer değiştirme analiz sonuçları

Analizler toplamda 1200109 adet eleman ve 1834347 adet düğüm noktası alınarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre; 15 kN kuvvet uygulandığında motor şasisine etki eden en yüksek stres gerilmesi 20.44 MPa olarak belirlenmiştir. St37 malzemesinin akma sınır değeri olan 235 MPa altındadır. Malzemeler uygulanan yüke göre 11.4 kat güvenlidir. Malzemenin en yüksek yer değiştirme değeri 7.92 μm 'dir. Bu değer sistemin çalışmasını etkilemeyecek düzeydedir. Maksimum gerilmede motor gövdesi güvenli bölgede çalışmaktadır.

4.9.2 Makine Milinin Eğilme ve Burulma Analizi

Asansör kabini, karşı ağırlık ve yolcu ağırlıklarıyla birlikte kasnak üzerindeki halatlara bağlıdır. Bu durum kasnak mili üzerinde bir stres oluşturur. Ayrıca, kasnak mili yükü döndürmeye zorladığından burulma momenti de oluşur. Bu nedenle, kasnak milinin hem burulmaya hem de eğilmeye karşı nasıl tepki vereceği SEY analizleriyle test edilir. Kasnak milinin malzemesi olarak 42CrMo4 isimli ıslah çeliği kullanılması planlanmıştır. Bu malzemenin akma dayanımı 750 MPa olarak belirlenmiştir. Şekil 4.37'de, kasnak milinin yapısal özellikleri, stres dağılımı ve yer değiştirme sonuçları gösterilmektedir.

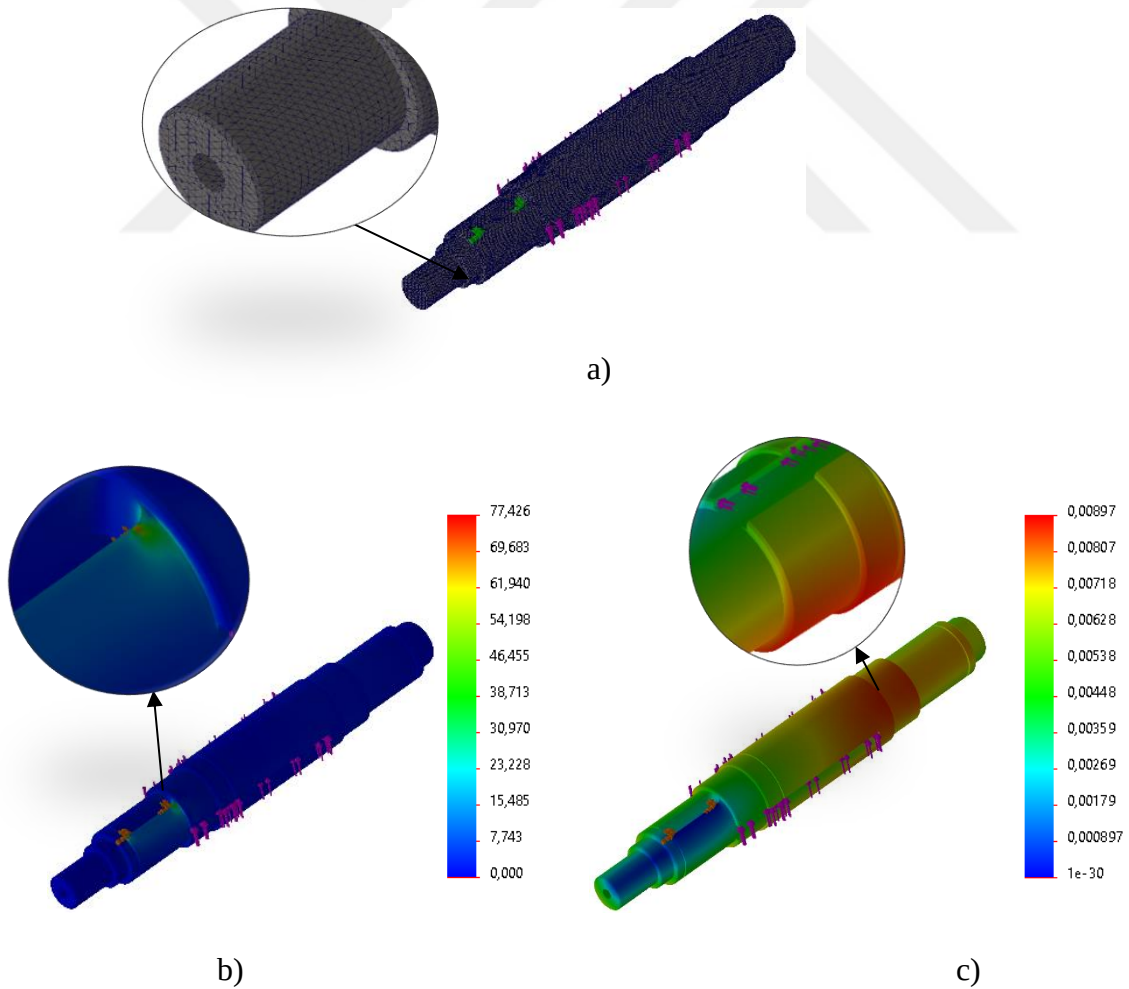


Şekil 4.37. Motor milinin gerilme analizi

a) Uygulanan ağ yapısı b) Stres analiz sonuçları c) Yer değiştirme analiz sonuçları

Analizler, toplamda 555.259 adet eleman ve 786.240 adet düğüm noktası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 15 kN kuvvet uygulandığında kasnak miline etki eden maksimum stres 16.87 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değer, malzemenin akma sınırı olan 750 MPa'nın çok altında olduğundan, malzeme uygulanan yük altında 44.45 kat güvenlidir. Ayrıca, malzemenin maksimum yer değiştirmesi 1.53 μm 'dir ve bu da oldukça düşük bir değerdir. Bu nedenle, kasnak mili maksimum gerilmede güvenli bir şekilde çalışmaktadır.

Kasnak miline ayrıca, SMSM'nin anma torku olan 107.4 Nm'lik bir burulma momenti uygulanmıştır. Kasnak milinin rotor kama yatağına moment uygulanmış ve sabitlemeler kasnak kama yataklarına uygulanmıştır. Uygulanan burulma momentinin, ağ yapısı, stres ve yer değiştirme analiz sonuçları Şekil 4.38'de gösterilmiştir.

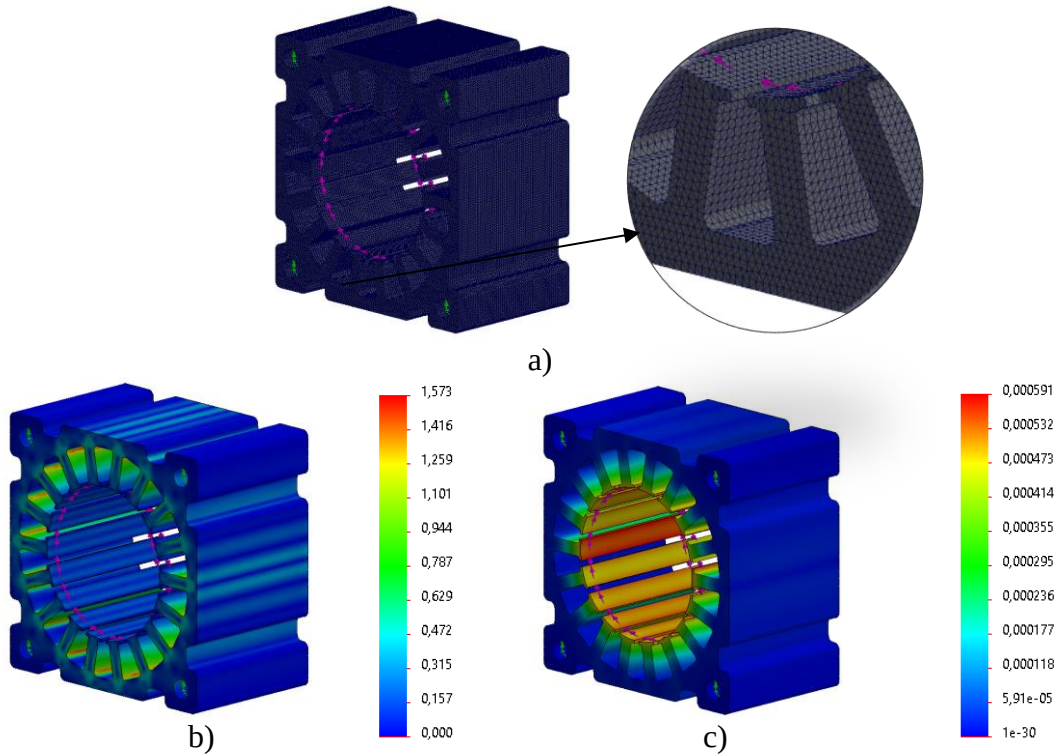


Şekil 4.38. Motor milinin burulma analiz sonuçları a) Uygulanan ağ yapısı b) Stres analiz sonuçları c) Yer değiştirmeye analiz sonuçları

Analizler toplamda 472383 adet eleman ve 669076 adet düğüm noktası alınarak gerçekleştirilmiştir. Anma torku olan 107.4 Nm'lik burulma momenti etkisi altında kasnak milindeki maksimum stres gerilmesi 77.42 MPa olarak belirlenmiştir. Burulma etkisine bakıldığında, malzemenin kayma akma değeri dikkate alınmaktadır. Akma değerinin yaklaşık 0.58 katını burulma değeri olarak kullanılır (Shear Strength, 2007; Soyaslan, 2020). Kasnak milinin burulma momenti etkisi altında, malzemenin akma sınırının 435 MPa olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda kasnak mili, burulma etkisi altında 5.61 kat daha güvenli bir şekilde çalışmaktadır. Ayrıca, yapılan analizler sonucunda milin maksimum yer değiştirmesinin milin uç noktalarında ve 8.97 μm gibi düşük bir değerde olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, kasnak milinin maksimum burulma altında güvenli bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

4.9.3 Stator Dişlerindeki Burulma Analizi

SMSM'nin analizlerinde kullanılan JFE_Steel_50JN350 malzemenin stator dişlerinde oluşabilecek deformasyonların üzerine, stator dişlerine anma torku 107.42 Nm olan tork uygulanmıştır. Şekil 4.39'da dişlerine uygulanan torkun analiz sonuçları gösterilmektedir.



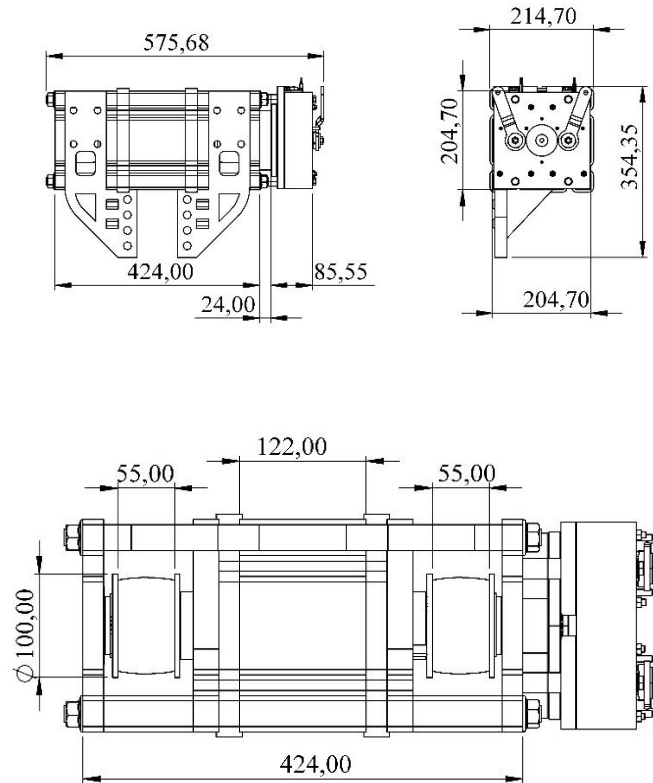
Şekil 4.39. Stator dişlerinin burulma analiz sonuçları a) Statora uygulanan ağ yapısı

b) Stator dişlerini stres sonuçları c) Statorun dişlerinin yer değiştirme analiz sonuçları

Analizler toplamda 1732533 adet eleman ve 2509799 adet düğüm noktası alınarak gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçlara göre akma mukavemeti 389 MPa'dır. Stator saclarının burulma momenti etkisi altında, malzemenin akma sınırının 225 MPa olduğu tespit edilmiştir. Stator 1.573 MPa bir burulma stresi oluşturmaktadır. Bu değerlere göre stator dişlerindeki burulmanın çok düşük olduğu belirlenmiştir. Dişlerdeki yer değiştirmeler 0.5 μm gibi oldukça düşük bir değer belirlenmiştir. Maksimum burulma momentinde stator dişleri güvenli bölgededir.

4.9.4 Asansör Makinesinin Boyutlandırılması

3B tasarım ve analizleri tamamlanan SMSM'nin genel ölçülendirilmesi Şekil 4.40'ta mevcuttur. Asansör tahrik makinesinin toplam kütle ağırlığı 102 kg olup fren dahil uzunluğu 575.68 mm, genişliği 214.7 mm ve yüksekliği 354.35 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.40. 3B makine tasarımının ölçülendirilmesi

4.9.5 Maliyet Hesabı

Asansör tahrik sistemlerinde tasarlanan asansör tahrik makinesinin seri imalata yönelik maliyet hesabı dolar kuru (\$) üzerinden verilmiştir. Seri imalat üretimi için maliyeti belirlenirken işçilik, işletme ve işlem maliyeti ürün maliyetinin %45 olarak temel alınmıştır. Yaklaşık seri imalat maliyet hesabı Çizelge 4.27’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.27. Yaklaşık olarak SMSM’nin seri üretim maliyet hesabı (2021)

Ürün	Marka/Özellik	Birim	Miktar	Birim Fiyatı (\$)	Toplam
Silisli Sac (Stator ve Rotor)	M350	Kg	39,975	2,1	\$ 83,95
Kapak ve Bağlantı Elemanları	St37	Kg	83,897	1,195	\$ 100,26
Mil, Kasnak ve Saplamlar	42CrMo4	Kg	24,78	1,7	\$ 42,13
Emaye Tel	Kavi veya Emsan	Kg	5,83	10	\$ 58,30
Fren	MAYR	Adet	1	250	\$ 250,00
Encoder	FENAC	Adet	1	120	\$ 120,00
Rulman (6009)	ORS	Adet	2	3	\$ 6,00
Rulman (6013)	ORS	Adet	2	5,7	\$ 11,40
Sarf Malzeme	-	Adet	8	0,5	\$ 14,00
Mıknatıs	N45SH	Adet	100	1,261	\$ 126,10
Toplam					\$ 812,13
Üretim ve İşletme Maliyeti					\$ 365,46
Toplam Maliyet (\$)					\$ 1.177,59

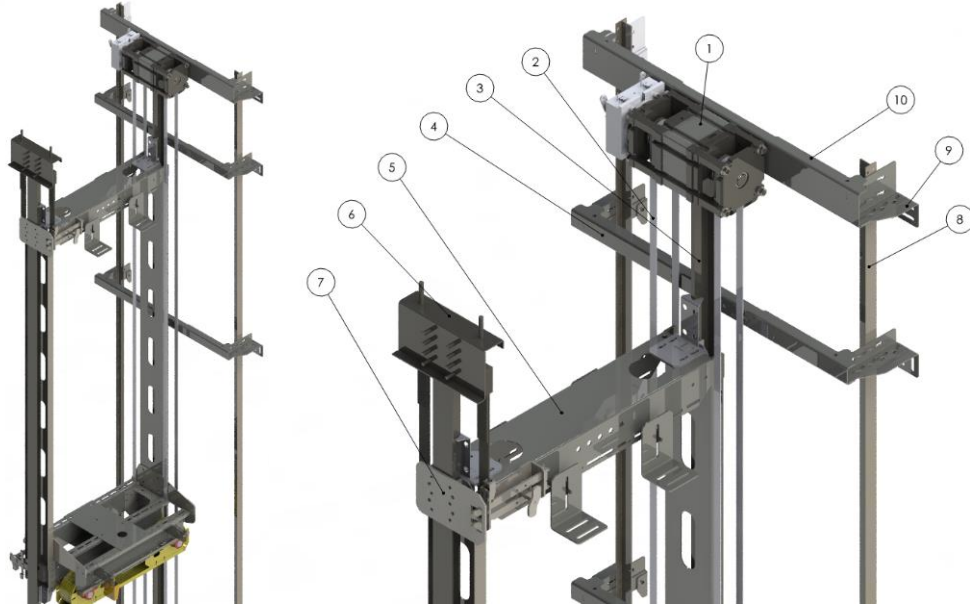
Çizelge 4.26’da verilen maliyet hesabına göre üretilcek asansör motorunun mevcut piyasada satılan asansör motorları ile kıyaslandığında rekabet düzeyi yüksek bir ürün olmaktadır. Prototip asansör tahrik makinesine uygun, sektör tarafından tercih edilen Faxi, Montanari ve Ziehl-Abegg marka motorların fiyat ve genel karşılaştırması Çizelge 4.28’de yer almaktadır.

Çizelge 4.28. Prototip motor ile sektörde bulunan kayışlı makinelerin karşılaştırılması

Asansör Makine	Prototip Makine	Montanati_MDG63	FAXİ_FXPD630	Ziehl-Abegg
Çıkış Gücü (kW)	4.5	4.1	4.4	4.2
Tork (Nm)	107	104	110	105
Akım (A)	8.4	8.7	9	11
Kasnak çapı (mm)	100	100	100	100
Boyular (mm)	575x354x214	638x221x288	565x320x250	581x302x205
Ağırlık (kg)	102	120+Şasi	90+Şasi	110+Şasi
Kutup Sayısı	20	16	16	-
Fiyat (2021)	1177 (\$) (Maliyet)	-	2833 (\$)	3215 (€)

4.10 Asansör Makinesinin Kuyu Montaj Tasarımının Oluşturulması

Asansör tahrik makinesinin elektromanyetik analizleri, termal analizleri, 3B tasarımı ve yapısal analizleri ile asansör tahrik sistemlerinde kullanıma uygunluğu kanıtlanmıştır. Makinenin üretimine geçilmeden önce örnek bir kuyu tasarımının oluşturulması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda tasarlanan asansör makinesi için makine şasisi kullanmadan oluşturulan raya montajlı tasarım görselleri Şekil 4.41’de yer almaktadır. Makinenin alt bağlantıları merkez raya doğrudan bağlanmıştır. Üst bağlantı noktaları ise karşı ağırlık rayları (duvar ile sabitleme konsolları) üzerinden yükü yan raylara aktarmaktadır. Bu şekildeki bir tasarımda makine ve sistemin oluşturduğu yükler eşit olarak dağıtılmıştır.



Şekil 4.41. Asansör tahrik makinesinin 3B kuyu montaj tasarımı

Çizelge 4.29. 3B kuyu montaj parça isimleri

No	Parça adı	No	Parça adı
1	SMSM	6	Kayış bağlantı bloğu
2	Kayış	7	Paraşüt freni
3	Kabin rayı	8	Karşı ağırlık rayı
4	Ray-Duvar montaj konsolu	9	Duvar montaj parçası
5	Kabin süspansiyonu	10	SMSM-Duvar montaj konsolu

Ortaya çıkan kuyu montaj tasarımının yapılan çalışmanın uygunluğunu test etmek amacı ile statik analizlerin yapılması gerekmektedir.

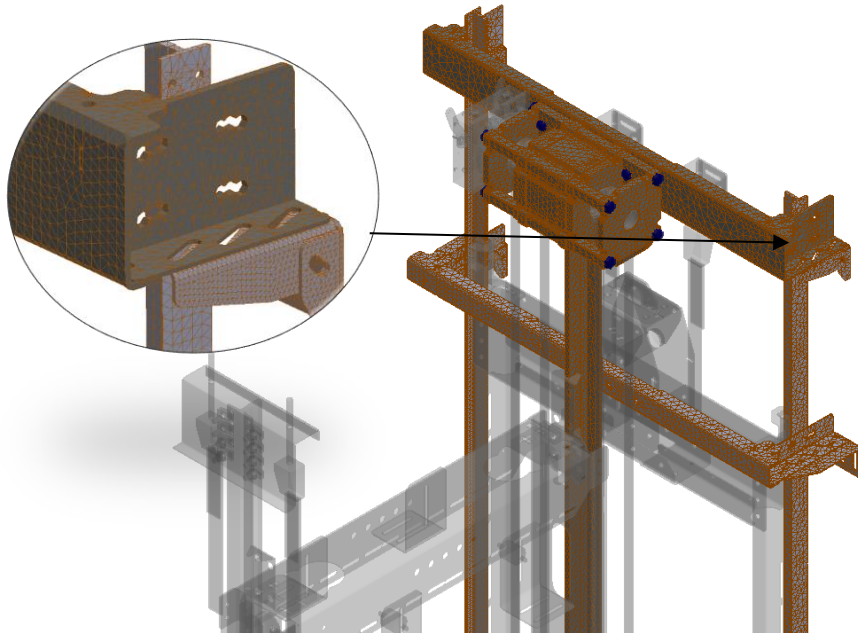
4.10.1 Asansör Tahrik Makinesi Kuyu Montajının Statik Analizleri

Asansör tahrik makinesinin üzerine binen statik yükleri kullanarak kapsamlı bir stres analizi yapılması öngörülmüştür. Kuyu içindeki konsollar kullanılan konstrüksiyon çeliği olan St37 malzemesi kullanılmaktadır. Çizelge 4.30'da kullanılan malzemelerin özellikleri paylaşılmıştır.

Çizelge 4.30. Malzeme özellikleri

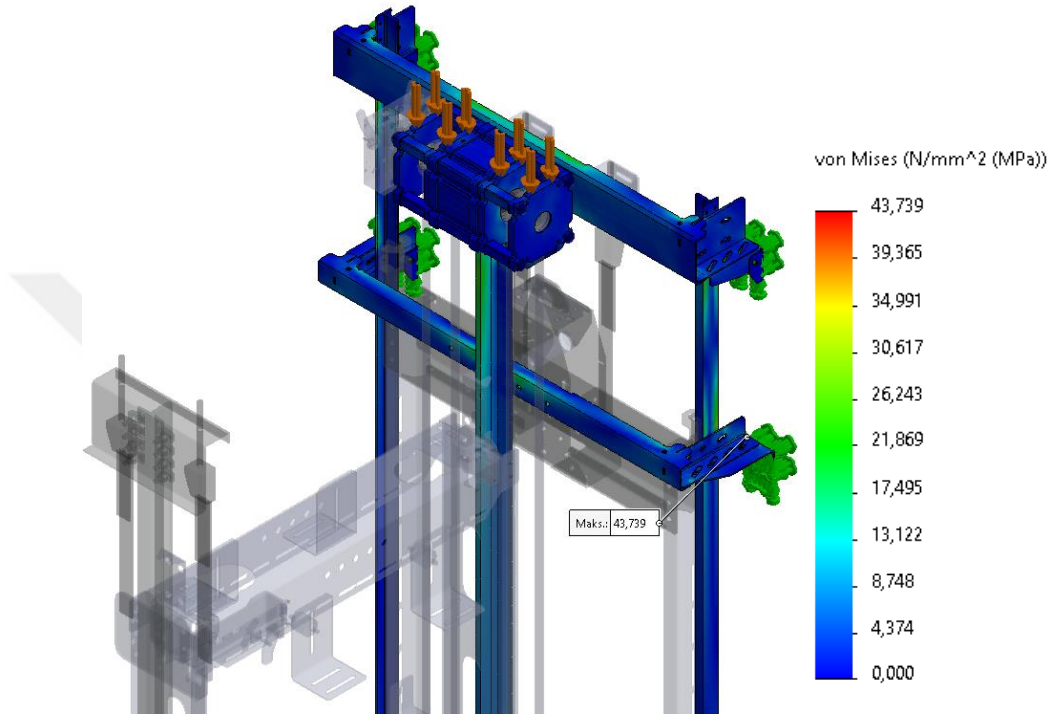
Parça Adı	Malzeme Cinsi	Yoğunluk [kg/m ³]	Akma Gerilmesi [MPa]
Klavuz Ray	St 37	7850	235
Tırnak Civata	Cm 45	7850	530
Konsol	St 42	7850	350
Bağlantı Elemanları	St 37	7850	235

Şekil 4.42'de oluşturulan ağ yapıları gösterilmiştir. Analize dahil edilmeyen parçalar saydam olarak gösterilmektedir. Bu analizler sayesinde, prototip makinenin mukavemet ve dayanıklılık açısından uygun olduğu ve güvenli bir şekilde kullanılabileceği doğrulanmaktadır. Bu doğrulama, asansör motorunun daha güvenli ve verimli çalışmasını sağlayacak önemli bir adımdır.



Şekil 4.42. Kuyu tasarımı ağ görünümü

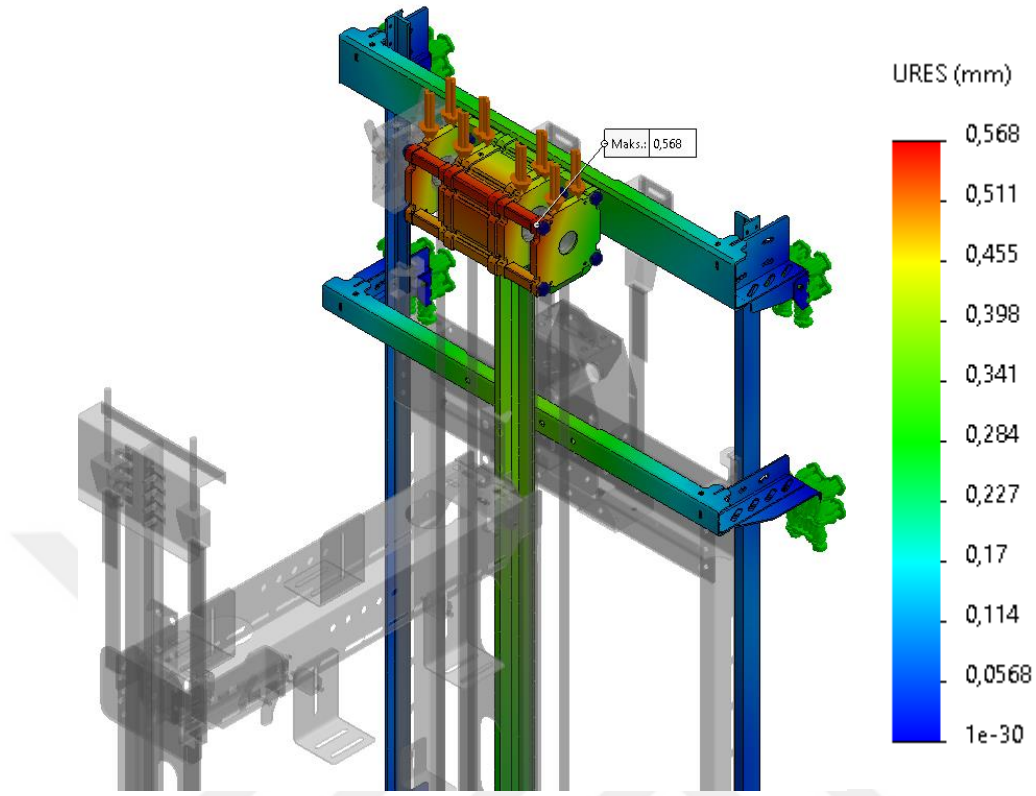
Analizler toplamda 421910 adet eleman ve 156848 adet düğüm noktası alınarak gerçekleştirilmiştir. Asansör makinesinin üzerindeki statik yük dağılımına göre kapsamlı bir stres analizi gerçekleştirilmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar kuyunun konsol ve kılavuz rayları üzerindeki dağılımları ile Şekil 4.43'te gösterilmiştir.



Şekil 4.43. Makina kuyu montajının gerilme analiz sonuçları

Elde edilen analiz sonuçlarına göre, 15 kN kuvvet altında en yüksek gerilme, duvar bağlantı konsolları üzerine oluşmaktadır. Bu statik yük de yaklaşık 43.7 MPa olarak belirlenmiştir. Maksimum gerilmenin olduğu nokta Şekil 4.39'da gösterilmiştir. Kılavuz rayları ve ray bağlantı konsollarına uygulanan gerilim yaklaşık olarak 35 MPa sınırında kalmaktadır. Raylarının akma noktası minimum 235 MPa olduğundan sistemin güvenlik katsayısı 5'in üstünde çıkmaktadır. Akma mukavemetleri dikkate alındığında, duvar bağlantı konsolları 8 kat, raylar ise 6.7 kat daha güvenli olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre kurulan sistem kullanıma uygun ve güvenlidir.

Asansör makinesinin üzerine binen statik yükler kullanılarak gerçekleştirilen kapsamlı yer değiştirme analizine ait sonuçlar Şekil 4.44'te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre toplam yer değiştirme 0.568 mm olmaktadır. Elde edilen bu değer oldukça düşük olup sistemin kullanılmasında herhangi bir engel gözlenmemiştir.



Şekil 4.44. Makina kuyu montajının yer değiştirme analiz sonuçları

4.11 Asansör Makinesinin Üretimi ve Montajı

SMSM'nin tasarımında analitik hesaplamalar ve ANSYS Maxwell yazılımı ile 2 ve 3 boyutlu SEY analiz sonuçlarını doğruladıktan sonra termal ve yapısal analizlere geçilmiştir. Yapılan işlemler ile asansör tahrik makinesi için uygun olduğunu doğrulamıştır. Analiz sonuçlarından alınan veriler ile nihai tasarımı geçilmiştir. Mıknatıslar tasarıma göre özel olarak üretilmiştir. Stator ve rotor sacları M330 özellikli 0.5 mm sacdan kesim işlemleri yapılmış ve paket haline getirilecek sarım işlemi yapılmıştır. Rotora özel olarak açılan mıknatıs kanallarına mıknatıslar yapıştırma yöntemi ile yerleştirilmiştir. Kapak ve bağlantı gibi mekanik parçalar lazer kesim yöntemi ile kesilip, talaşlı imalat yöntemi ile rulman ve merkezleme noktaları hassas olarak CNC frezede işlenmiştir. Şekil 4.45'te SMSM'nin parça resimleri Şekil 4.46'da SMSM'nin montaj resimleri gösterilmiştir.

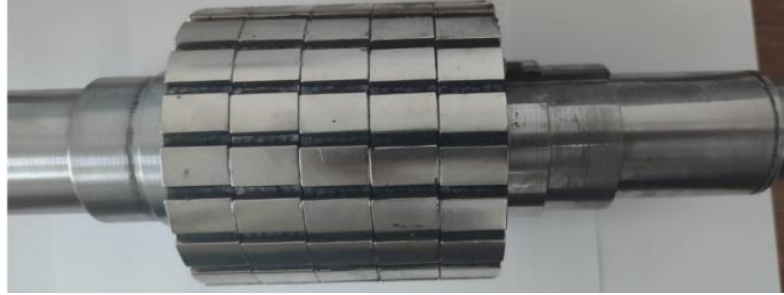


Şekil 4.45. SMSM'nin parça resimleri



Şekil 4.46. Prototip motor montaj işlemleri

Sisteme uygun 2 derece kaykılı rotor üretilmiş olup testler bu rotora göre yapılmıştır. Şekil 4.47’de kaykılı mıknatıs dizilimleri mevcuttur.



Şekil 4.47. Kaykılı rotor görünümü

4.12 SMSM’nin Deneysel Çalışması

Kurulan deney düzeneği ile prototip üretimi gerçekleştirilen asansör tahrik makinesinin zıt EMK, vurutu momenti ve performans testleri gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik olarak elde edilen SEY analiz sonuçlar ile deneysel sonuçlar bu bölümde karşılaştırılmıştır.

4.12.1 Boşta Çalıştırma ve Direnç Değerlerinin Ölçülmesi

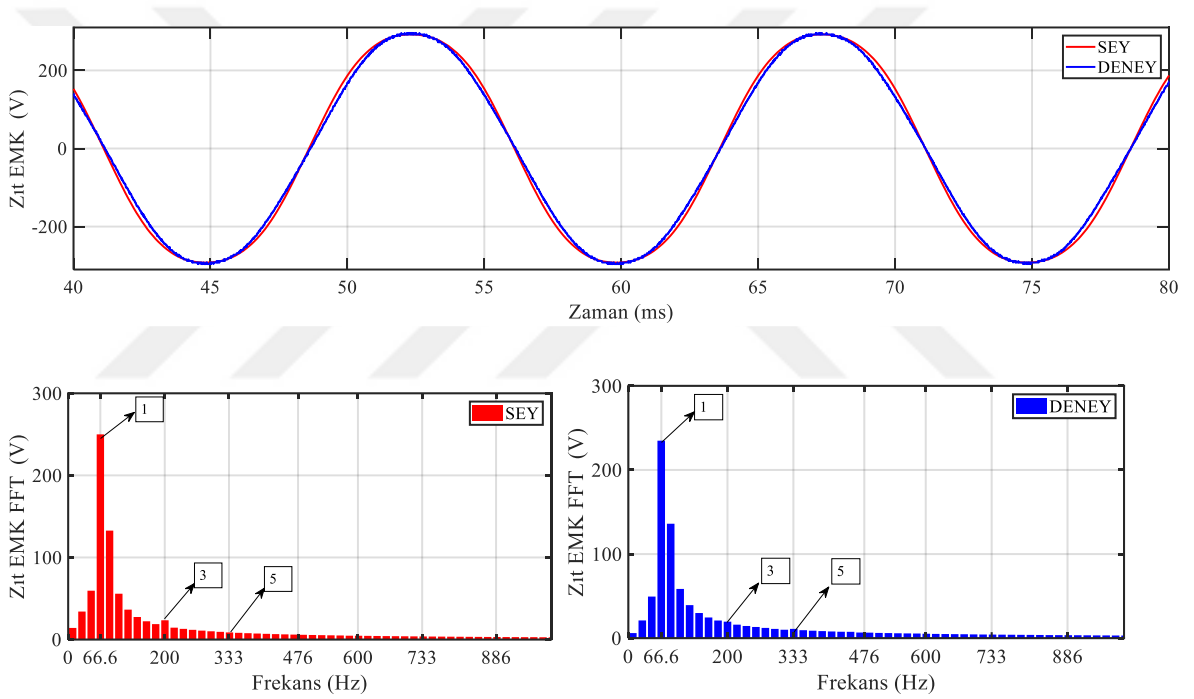
Boşta çalışması esnasında motorun faz akımı, 2.4 A (rms) olarak gözlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre boşta çalışmadaki faz akımı 2.05 A (rms) olarak belirlenmiştir. Bu durum, motordaki mekanik ve rüzgâr sürtünmeleri nedeniyle oluşan yük etkisinden kaynaklanmaktadır. Prototip motorun fazlarının oda sıcaklığındaki dirençleri, analiz ve deney verilerine göre Çizelge 4.31’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.31. SMSM’nin faz dirençleri

Stator sargısı	Analiz Sonucu (Ω)	Deneysel Ölçüm Sonucu (Ω)
1. faz	1.77	1.83
2. faz	1.77	1.84
3. faz	1.77	1.84
* Analizler 40 °C ölçülen motor sıcaklığına göre yapılmıştır.		

4.12.2 Zıt EMK Testi

Zıt EMK testleri Şekil 3.39’da gösterilen deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Test öncesinde motorun sargı uçları sürücünden ayrılmış ve yükleme motoru ile kaplin bağlantısı yapılmıştır. Bu şekilde prototip makine generatör gibi çalıştırılmıştır. Yükleme motoru, prototip motorun anma hızı olan 400 d/d kadar çıkartılmıştır ve prototip motorun faz uçlarında indüklenen gerilim değerleri osiloskop yardımı ile kaydedilmiştir. Şekil 4.48’de indüklenen zıt EMK SEY grafiği ile deneysel verilerden elde edilen zıt EMK grafiği birlikte çizdirilmiştir. Tüm fazların değerleri birbirine yakın olduğu için sadece A fazının grafiği paylaşılmıştır.

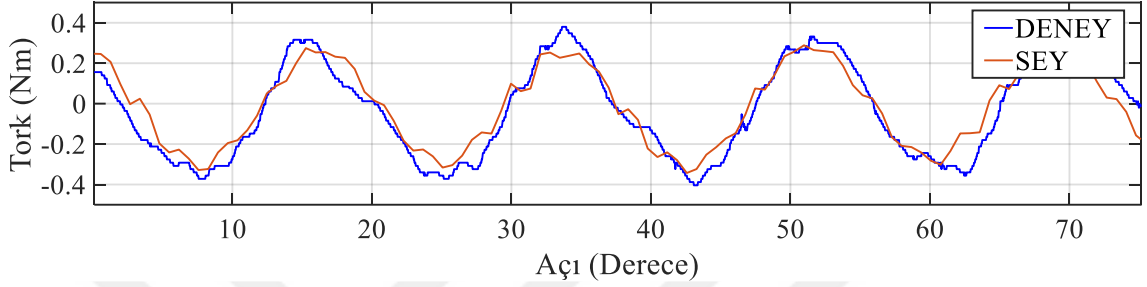


Şekil 4.48. İndüklenen zıt EMK SEY ve deneysel sonuç grafikleri

Şekil 4.48 incelendiğinde, indüklenen gerilimin SEY sonuçlarının test sonuçları ile örtüştüğü ve sinüs formunda olduğu görülmüştür. İndüklenen gerilimin için tepe değeri SEY analizlerinde ve deney sonuçlarında 292 V olarak elde edilmiştir. Şekil 4.44’te ayrıca hem SEY analizleri hem de deneysel sonuçlar için zıt EMK’nın Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) grafiğini göstermektedir. SEY sonuçlarında 3. ve 5. harmonikler sırasıyla 23.46 V ve 8.67 V, deneylerde 19.61 V ve 11.02 V olarak elde edilmiştir. 3. harmonik frekansı 200 Hz, 5. harmonik frekansı ise 333 Hz olarak belirlenmiştir.

4.12.3 Vuruntu Momenti Testi

Tahrik motoru 1 d/d hızında döndürülerek motor üzerinde oluşan tutma tork değerleri NCTE 2300-5-1-A-0-0 5 Nm'lik tork sensörü ile ölçülmüştür. Elde edilen deney sonuçları SEY analizleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.49'da SEY ve deneysel sonuçların karşılaştırmalı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.49. SEY ve deney sonuçlarının vuruntu momenti grafiği

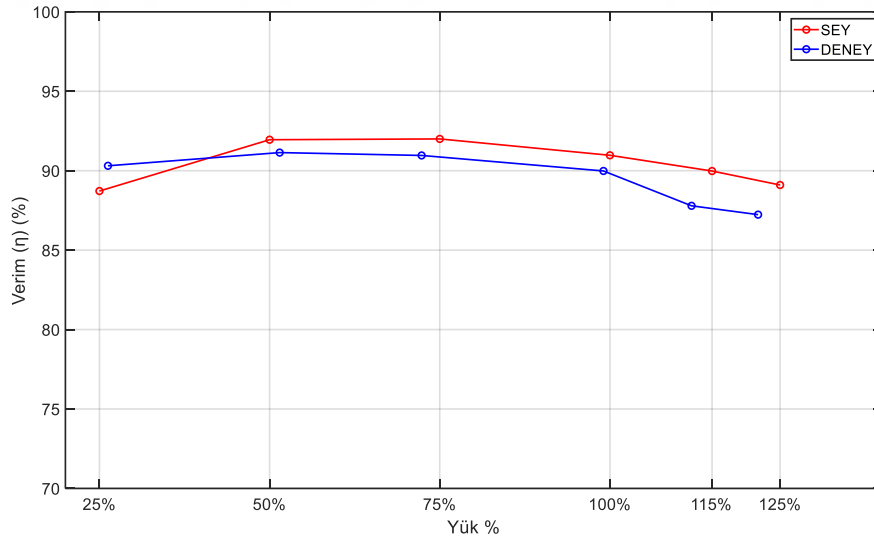
Deney sonuçlarına göre, vuruntu momentinin tepeden tepeye değeri 0.78 Nm SEY sonuçları 0.68 Nm olarak belirlenmiştir. Yapılan karşılaştırmalar da SEY sonuçları ile deneysel sonuçların örtüştüğü gözlenmiştir.

4.12.4 Performans Test Sonuçlarının SEY Sonuçları ile Karşılaştırılması

Prototip makinenin deney sonuçları ile ve 2B SEY analizi sonuçları ile karşılaştırılıp Çizelge 4.32'de gösterilmiştir. Giriş gücü, çıkış gücü, tork, akım, güç faktörü, verim, gibi değerler karşılaştırılmıştır. Veriler karşılaştırmalı olarak Şekil 4.46-4.48'de verilmiştir. Deneyler yaklaşık 40 °C'de sıcaklıkta yapılmıştır. Deneyler sırasında faz direnci 1.84 Ω olarak ölçülmüştür.

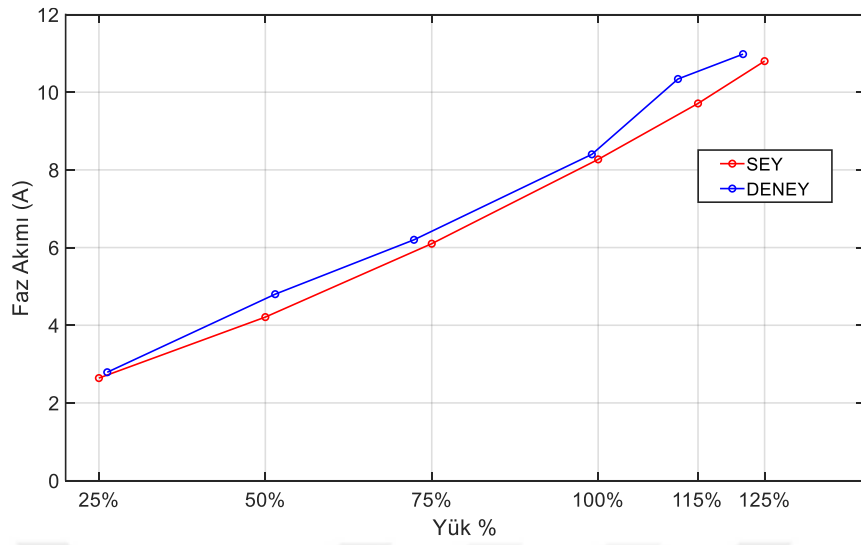
Çizelge 4.32. Prototip motorun SEY ve deney sonuçları

SMSM		%25	%50	%75	%100	%115	%125
Giriş gücü (P_{in}) (W)	SEY	1268	2447	3668	4947	5753	6313
	Deney	1308	2514	3555	4953	5755	6108
Çıkış gücü (P_{out}) (W)	SEY	1125	2250	3375	4500	5175	5625
	Deney	1181	2291	3234	4457	5053	5328
Faz akımı (I) (A)	SEY	2.64	4.21	6.1	8.27	9.71	10.8
	Deney	2.79	4.8	6.2	8.4	10.34	10.98
Voltaj (V)	SEY	380	380	380	380	380	380
	Deney	335	351	369	376	367	367
Demir kayıpları (P_{iron}) (W)	SEY	64.28	62.89	61.03	59.07	57.34	56.55
	Deney	39.22	50.98	64.5	62.07	67.72	69.67
Bakır kayıpları (P_{copper}) (W)	SEY	35.08	89.2	187.45	342.89	474.98	586.24
	Deney	42.97	127.18	212.19	389.49	590.17	665.49
Diğer kayıplar (P_{other}) (W)	SEY	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00
	Deney	44.57	44.57	44.57	44.57	44.57	44.57
Verim (η) (%)	SEY	88.63	91.95	92.00	90.97	89.98	89.10
	Deney	90.31	91.14	90.96	89.98	87.79	87.23
Hız (d/d)	SEY	400	400	400	400	400	400
	Deney	400	400	400	400	400	400
Faz direnci (R_s) (Ω)	SEY	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77
	Deney	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84
Tork (T) (Nm)	SEY	26.86	53.72	80.59	107.42	123.57	134.31
	Deney	28.2	54.7	77.2	106.4	120.50	127.2
Cos ϕ	SEY	0.731	0.883	0.914	0.909	0.900	0.888
	Deney	0.807	0.861	0.896	0.906	0.875	0.875



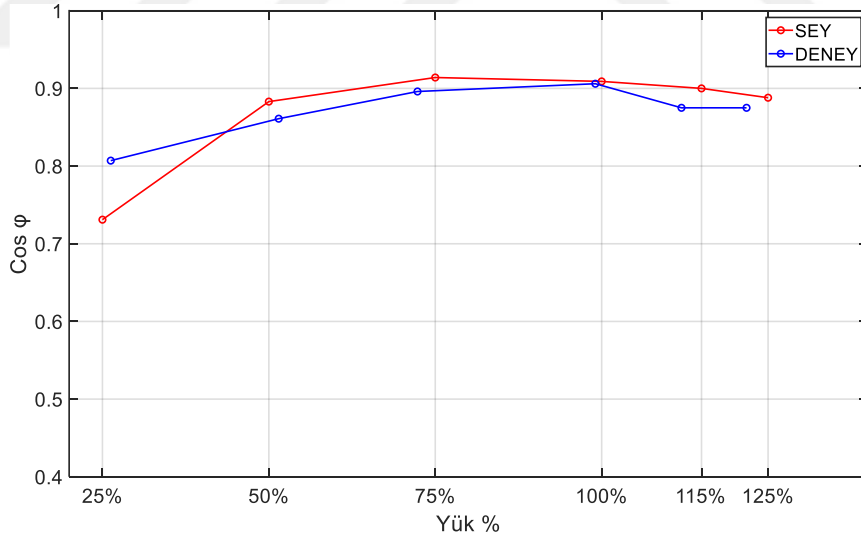
Şekil 4.50. SEY ve deneylerin yükleme-verimliliği grafiği

Şekil 4.50 incelendiğinde deneysel sonuçlara göre tam yükte verim %89,98 olarak belirlenmiştir. Değişken yüklerde verimin %87-92 aralığında kaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.51. SEY ve Deneylerin yükleme-akım grafiği

Şekil 4.51 incelendiğinde motor anma torkunda iken deneysel rms faz akımı 8.4 A olarak elde edilmiştir. Değişken yüklerde rms faz akımları, SEY ve deneysel sonuçlarla örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 4.52. SEY ve Deneylerin sonuçlarının-Cosφ grafiği

Şekil 4.52'de görüldüğü gibi deneysel sonuçlara göre Cosφ tam yükte 0.906 olarak belirlenmiştir. Deney ve SEY sonuçlarının örtüştüğü gözlenmiştir.

5 SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, 4.5 kW gücünde 1 m/s kabin hızında, 630 kg kabin taşıma kapasitesine sahip ve 107.4 Nm anma torkunda, kayışlı asansör tahrik sistemleri için makine konstrüksiyon şasisi olmadan doğrudan raya montajlı tümleşik bir SMSM tasarımı, analizi ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu tez kayışlı bir asansör tahrik makinesi için, motor tasarımından prototip ürüne kadar gerçekleştirilen bütün adımlar ele alınmıştır.

Yapılan literatür araştırmalarında, asansör makinelerinin dişlili asansör makinesi olarak adlandırılan asenkron motor ve bu motora akupule olan redüktör sistemlerinden, doğrudan tahrik yöntemi ile kullanılan SMSM yapılarına evrildiği gözlemlenmiştir. Bu sistemlerin taşıyıcı elemanları çelik halatlardır. Ancak çelik halat çapları nedeni ile standartlar gereği kasnak çaplarının 240 mm'den küçük olmaması SMSM motorlarda düşük hız ve yüksek tork ihtiyacına neden olmuştur. Son yıllarda tek parça halinde çelik halatların kullanılması yerine kauçuk, PU gibi malzemelerden üretilen yassı bir kılıf içinde daha düşük çaplara sahip çelik özlü kayışlar kullanılmaktadır. Bu kayışların içerisinde bulunan çelik halat çapları 2-2.5 mm'dir. Bu sayede kasnak çaplarını 100 mm kadar düşürülmesi imkânı elde edilmiştir. Kayışlı asansör tahrik sistemleri halatlı sistemlere göre daha az gürültülü, yüksek kabin konforlu seyahat imkânı sağlayan, daha verimli ve güncel bir konudur. Ancak literatürde ve mevcut sektörde kullanılan kayışlı asansör makine yapıları birbirlerine benzemektedir. Geleneksel kayışlı tahrik makineleri, şasisi ile birlikte asansör kuyusuna yerleştirilebilen, kasnakların yekpare olarak üretildiği sistemlerdir. Bu sistemlerde asansöre binen yükler aynı zamanda binada uygulanmaktadır. Ayrıca asansör tahrik makineleri karmaşık makine konstrüksiyon şasisi ile birlikte kullanılmaktadır.

Asansör sistemlerindeki gelişmelere paralel olarak önemli bir alternatif haline gelmesi düşünülen makine şasisi olmadan doğrudan raya montajlı olarak tümleşik mekanizmalı yüksek verimli ve düşük tork dalgalanmasına sahip, kayışlı asansör sistemleri için dişlisiz bir SMSM tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Kayıslı asansör tahrik sisteminde kullanılmak üzere SMSM yapıları incelenmiş ve içten rotorlu yüzey mıknatıslı yapı seçilmiştir. Stator ve rotor malzemesi için levha formunda tedarik edilebilen akı yoğunluğu 1.5 T için 3.3 W/kg demir kaybı olan, silisli sac M330-50A olarak belirlenmiştir. Sargılar yüksek sıcaklık değerlerine ulaşabilen H sınıfı izolasyona sahip, çift katlı konsantre sargı yöntemi ile sarılmak üzere bakır tellerden oluşmaktadır. Mıknatıslar, 20 °C manyetik manyetik akı yoğunluğu 1.35 T ulaşabilen NiCuNi alaşımlı kaplama ile N45SH tipi NdFeB malzeme olarak belirlenmiştir.

SMSM'nin performansını doğrudan etkileyen kesirli oluk/kutup kombinasyonları incelenmiştir. Literatürlerden elde edilen bilgilere göre yüksek sargı faktörüne sahip ve tasarladığımız sisteme uygun olan 12/10, 12/14, 18/16, 18/20, 24/22 ve 24/26 yapıları belirlenmiştir.

SMSM'nin elektromanyetik analizleri ve tasarımı için çıkış eşitlikleri ile stator dış çapı, uzunluğu, iç çapı hava aralığı, mıknatıs kalınlığı gibi parametreleri yaklaşık olarak belirlenmiştir. Literatürden elde edilen bilgiler ile SMSM'ye ait matematiksel denklemler kullanılarak MATLAB GUI yazılımı yardımı ile bir ara yüz hazırlanmış ve farklı oluk/kutup kombinasyonları için analitik ön tasarımlar gerçekleştirilmiştir.

Ön tasarımı gerçekleştirilen her bir oluk/kutup kombinasyonları için SEY kullanılarak ANSYS Maxwell 2B analizleri ile optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. SMSM'nin verimi ve asansör konforunda önemli bir parametre olan tork dalgalanmasını doğrudan etkileyen, oluk ağzı açıklığı (B_{s0}), mıknatıs kalınlığı (h_{mag}), mıknatıs oranı/kutup oranı (E_m), stator dış kalınlığı (W_{th}), ve hava aralığını (g) değerleri için GA ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon hedefleri %91'in üzerinde verim, %1'in altında tork dalgalanması olarak tanımlanmıştır. Her bir optimizasyon sonucu için çıkış tork eğrisi, faz akımı eğrisi, güç eğrisi, elektriksel akım yoğunluğu ve manyetik akı yoğunluğu verileri gösterilmiştir. Gerçekleştirilen SEY analizlerine göre optimizasyon hedeflerini 18/20 ve 24/26 oluk/kutup kombinasyonları sağlamıştır. En uygun sonucu 18/20 oluk/kutup kombinasyonuna sahip tasarımda elde edilmiştir.

Motor için belirlenen genel ölçülere göre dış çap 204.7 mm ve paket uzunluğu ise 122 mm olarak belirlenmiştir. SEY analizleri ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçlarına

göre, 18/20 oluk/kutup kombinasyonuna sahip B_{s0} 4.7549 mm, E_m 0.7398, h_{mag} 4.8148 mm, g 0.7609 mm ve W_{th} 10.61 mm olarak belirlenmiştir. Buna göre verim %91.22 ve tork dalgalanması nominal yük altında %0.8613 olarak belirlenmiştir.

Tork dalgalanması ve vuruuntu momentini azaltmak amacı ile 0-20 derece arasında 5 adımlı kaykı çalışması gerçekleştirilmiştir. 2 derecelik kaykı ile verim %90.97 tork dalgalanması ise %0.61 olarak elde edilmiştir. SMSM'nin tam yük altında istenilen performansı elde edildikten sonra değişken yükler altında giriş gücü, çıkış gücü, faz akımı, kayıplar, tork dalgalanması, verim ve $\cos \phi$ değerleri yükleme değeri %10 artırılarak incelenmiştir. 2B SEY analizlerinde SMSM'nin farklı yüklemede değerlerinde de veriminin %77.3 ile %91.8 arasında olduğu gözlemlenmiştir. Tork dalgalanmaları tepeden tepeye 1.237 Nm ile 0.308 Nm arasında olduğu gözlemlenmiştir. Tork dalgalanmaları değişken yükleme değerlerine göre oldukça düşüktür. 2B olarak elde edilen elektromanyetik analiz sonuçların doğrulanması için 3B olarak SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. SEY analizlerine göre 2B sonuçlarda anma akımı 8.27A iken 3B analizlerde 8.32A elde edilmiştir. Verim ise 2B analizlerde %90.97 iken 3B analizlerde %90.91 olarak belirlenmiştir. Çıkan sonuçlar 2B çalışması ile uyumludur.

Elektromanyetik analizleri tamamlanan tasarımın termal analizleri gerçekleştirilmiştir. IEC 60034-1:2010 elektrik motorları için derecelendirme ve performans standardına göre asansör makinesi S3 çevrim görevi ve %40 çevrim döngüsü ile çalışmaktadır. Ancak termal analizler motorun tam yük altında ve S1 çevrimi ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre ortalama sıcaklık sargılarda 116 °C, stator için 84 °C, rotor için 75 °C ve mıknatıslar için 76 °C olarak belirlenmiştir. %125 yükleme altında mıknatıslar 99.1 °C ve sargılar 160 °C sıcaklığa çıkmaktadır. Motor tam yükte ve S1 çevrim tipi ile çalışmasında dahi termal açıdan soğutma gerektirmeden rahatlıkla kullanılabileceği kanıtlanmıştır. Tam yüklemede termal rejim durumunda en düşük manyetik akı yoğunluğu 0.6625 T olarak belirlenmiştir. %125 yüklemede termal rejim durumunda en düşük manyetik akı yoğunluğu 0.5058 T olarak belirlenmiştir. Yapılan tam yükleme ve aşırı yükleme analizlerinde mıknatısların demagnetizasyon riski taşımadığı görülmektedir. Tam yük altında ve aşırı yükleme altında sırası ile 80 °C ve 100 °C sıcaklığında demagnetizasyon dirsek bölgesinden uzakta, normal operasyon çizgisi üzerinde çalıştığı gözlenmiştir.

Elektromanyetik ve termal yönden doğrulanmış asansör makinesi için yapısal olarak doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Asansör makinesinin 2:1 süspansiyon yapısına göre kurulması planlanmıştır. Statik yüklerin belirlenmesinde asansör makinesi ve makine miline binen asansör kuyu bileşenlerinin tahmini ağırlıkları kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar ve güvenlik katsayıları dikkate alınarak rulmanlara, makine gövdesine ve motor miline uygulanacak statik yükler belirlenmiştir. Buna göre asansör makinesi ve miline yaklaşık olarak 15 kN statik yük uygulanmaktadır. Her bir rulmanda ise 3.25 kN statik yük hesaplanmıştır.

Elde edilen statik yük değerlerine göre motor kapakları, rulmanlar, motor mili ve kasnaklar gibi malzemeler belirlenmiştir. Motor kapakları, lazer kesime uygun akma mukavemeti 235 MPa olan St37 olarak seçilmiştir. Motor mili ve kasnaklara gerilme ve burulma yükleri doğrudan uygulandığı için akma mukavemeti 750 MPa olan 42CrMo4 (4140) malzeme seçilmiştir. Rulman olarak ise toplamda 4 adet SKF marka ikili olarak 6009 ve 6013 seri numaralı rulmanlar kullanılmıştır. Fren olarak, motor anma torkunun 2 katından fazla olacak şekilde ve üzerinde enkoder bağlantısı bulunan, 125 Nm x 2 Mary Roba-twinstop marka fren seçilmiştir. Enkoder olarak asansör makinelerinde yaygın olarak kullanılan “Fenac FNC SC2048” marka belirlenmiştir. Seçilen statik yüklere göre kayışların güvenlik katsayısı 12.11 olarak belirlenmiştir. Kayışlar için yapılan hesaplamalara göre 31 mm kayış genişliğinde kayış başına 50 kN minimum taşıma kapasitesine sahip “Brugg” marka kayışlar tercih edilmiştir. Kayış genişliği w_k 31 mm ve güvenli kayış gezme genişliği 24 mm ile toplam 55 mm olarak belirlenmiştir. Kasnakların yüzeyinde kayışların daha iyi hareket edebilmesi için kasnak radyüsü R_k , 100 mm kasnak çapı için 450 mm olarak belirlenmiştir.

Hedeflerimiz doğrultusunda kayışlı asansör motoru tasarımı, IEC 60034-30 standardına göre IE4 verim sınıfında, muadil ürünlere göre düşük tork dalgalanmasına sahip, binalara binen yükler yerine raya montajlı olarak gerçekleştirilen, ek şasi konstrüksiyonu gerektirmeyen, sistemin (motor, yük, kabin, karşı ağırlık ve süspansiyon) toplam ağırlığını dengeli şekilde taşıyıcıyı ve karşı ağırlık kılavuz raylarına dağıtabilen, muadil ürünlere göre düşük hacim ve kütleye sahip, döküm yerine plaka saclardan lazer kesim

yöntemi ile üretilen, minimum talaşlı imalat kullanımı gerektiren bir motor tasarımı ortaya çıkarılmıştır. Ortaya çıkan asansör tahrik makinesinin fren dahil toplam ağırlığı 102 kg olarak belirlenmiştir. Boyutları ise 575x214x354 mm olarak belirlenmiştir.

Yapılan hesaplamalara göre rulmanlara uygulanan kuvvetler dikkate alındığında asansör makinesinin günlük 4 saat tam yükte çalışacağı düşünülürse, 6009 ve 6013 tipi rulmanların sırasıyla yaklaşık olarak 9.2 ve 27.4 yıl bakım gerektirmeden çalışabileceği gözükmektedir. Asansör makineleri değişken yüklerde çalıştığından bu ömrün daha yüksek olması beklenmektedir.

Belirlenen 15 kN statik yük değerinde, makine gövdesi ve motor miline SEY ile gerilme analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre makine gövdesi 20.44 MPa değerinde bir strese maruz kalmıştır. Kapakların akma mukavemeti dikkate alındığında 16.2 kat güvenli çıkmaktadır. Motor mili ise 16.87 MPa değerinde gerilmeye maruz kalmıştır. Milin akma mukavemeti dikkate alındığında 44.45 kat daha güvenli olarak belirlenmiştir. Stator dişleri ve motor miline anma torku olan 107.4 Nm burulmaya göre analizleri gerçekleştirilmiştir. SEY ile yapılan yapısal analizlere göre motor mili 77.42 MPa burulmaya maruz kalmıştır. Motor milinin burulma mukavemeti dikkate alındığında 5.61 kat daha güvenli olduğu ortaya konulmuştur. Stator dişlerindeki burulma değerleri ise 1.573 MPa gibi düşük bir burulmaya maruz kalmıştır. Elde edilen sonuçlara göre üretime uygun bir tasarım elde edilmiştir.

Asansör makinesinin yapısal analizlerinden sonra tasarlanan asansör tahrik makinesinin ray üzerindeki montaj tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan tasarıma raylar üzerindeki gerilmeleri görmek için toplam statik yük değeri olan 15 kN makine gövdesi üzerinden uygulanmıştır. Bu statik yüklemeler ile asansör kuyusundaki bileşenler ve kılavuz rayların bu statik yüklere karşı dayanımı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre maksimum gerilme duvar bağlantı konsolları üzerinde 43.7 MPa olarak belirlenmiştir. Raylar da ise maksimum gerilme yaklaşık olarak 35 MPa olduğu gözlemlenmiştir. Akma mukavemetleri dikkate alındığında, duvar bağlantı konsolları 8 kat, raylar ise 6.7 kat daha güvenli olarak belirlenmiştir.

Asansör tahrik makinesinin 0.5 mm silisli saclardan, stator ve rotor laminasyonları lazer kesim yöntemi ile kesilmiştir. Kesilen stator ve rotor sacları verniklenerek toplanıp

laminyasyon paket haline getirilmiştir. Mıknatıslar zel olarak üretilerek yurt dışından tedarik edilmiştir. Sarım işlemi motor tasarımı parametrelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Mıknatıslar rotor saclarına özel yapıştırıcılar ile yapıştırılmıştır. Makine kapaklarının retiminde St37 malzemeden lazer kesim yöntemi kullanılmıştır. Rulman yatakları ve bağlantı noktaları talaşlı imalat yöntemi ile hassas olarak işlenmiştir. Mil ve bağlantı parçaları belirlenen malzemelere göre üretilmiştir. Fren ve enkoder endüstriyel üretim ve satış yapan işletmelerden tedarik edilmiştir. Tedarik süreci tamamlandıktan sonra makine montaj işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kurulan deney düzeneği ile prototip üretimi gerçekleştirilen asansör tahrik makinesinin zıt EMK, vuruuntu momenti ve performans testleri gerçekleştirilmiştir. Zıt EMK testlerinde motor boşta iken yükleme motoru anma hızında dndrlmştir. İndüklenen gerilimin SEY sonuçlarının test sonuçları ile örtüştüğü ve sinüs formunda olduğu grlmştir. İndüklenen gerilimin için tepe değeri SEY analizlerinde ve deney sonuçlarında 292 V olarak elde edilmiştir. SEY sonuçlarında 3. ve 5. harmonikler sırasıyla 23.46 V ve 8.67 V, deneylerde 19.61 V ve 11.02 V olarak elde edilmiştir. Vuruuntu momenti testinde motor boşta iken yükleme motoru 1 d/d hızında döndürülerek tork sensöründeki veriler, çıkış osiloskop üzerinden okunmuştur. Deney sonuçlarına göre, vuruuntu momentinin tepeden tepeye değeri 0.78 Nm SEY sonuçları 0.68 Nm olarak belirlenmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda vuruuntu momentlerinin SEY sonuçları ile deneysel sonuçların örtüştüğü gözlenmiştir.

Performans testleri IEC 60034-2-1 Dönen elektrikli makineler “Testlerden kayıpları ve verimliliği belirlemek için standart yöntemler” isimli standarda uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Ancak asansör çalışma şartları dikkate alındığında deneyler, termal rejime çıkmadan IEC 60034-1 standardına göre S3 evrimi dikkate alınarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Yükleme testleri 2B SEY analizleri ile yapılarak deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. 2B SEY analizleri tam yük altında verim %90.97 iken deney sonuçları yaklaşık %90 olarak belirlenmiştir. Faz akım değerleri 2B SEY analizlerde 8.27 A iken 8.4 A olarak tespit edilmiştir. Performans testlerinde elde edilen SEY sonuçları ile deney sonuçları ile uyumludur.

Performans testleri sonucunda elde edilen motorun sınıflandırılması IEC 60034-30-1:2014 “Şebeke ile çalışan AC motorların verimlilik sınıfları” standardına göre yapılmıştır. Motor verim sınıflandırılmasında 60 Hz frekansında çalışan ve en fazla 8 kutuplu motorlara göre karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu verilere göre 3.7 kW-5.5 kW arasındaki motorların %88.5 verim ve üzeri değerlerdeki motorlar IE4 sınıfı olarak kabul edilmiştir. Bu standartta 8 kutup üzerindeki motorlar sınıflandırmaya alınmamıştır. Bu durumda 20 kutuplu olan asansör motorunun en az IE4 enerji verimliliği sınıfında olduğu görülmektedir.

Bu tez çalışması ile, halatlı sistemlere göre daha az gürültülü, yüksek kabin konforlu seyahat imkânı sağlayan ve daha verimli olan kayışlı asansör tahrik sistemleri alanında yeni bir tasarım yaklaşımı sunmakla kalmayıp, motorun performansını, verimliliğini ve dayanıklılığını değerlendiren kapsamlı analizlerle desteklenmiştir. IE4 verim sınıfında, düşük tork dalgalanmasına sahip, raya montajlı olarak gerçekleştirilen, makine şasi konstrüksiyonu gerektirmeyen, sistemin (motor, yük, kabin, karşı ağırlık ve süspansiyon) toplam ağırlığını dengeli şekilde taşıyıcıyı ve karşı ağırlık kılavuz raylarına dağıtabilen, düşük hacim ve kütleye sahip, döküm yerine plaka saclardan lazer kesim yöntemi ile üretilen, minimum talaşlı imalat kullanımı sağlayan bir asansör makine tasarımı ortaya çıkarılmıştır. Döküm teknolojilerinin kullanılmaması ilk yatırım maliyetlerini de önemli ölçüde düşürmüştür. Bu sayede, sektördeki araştırmacılara ve mühendislere kayışlı asansör tahrik sistemlerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi konusunda önemli bir referans kaynağı olmuştur. Çizelge 4.32’de Asansör tahrik makinesinin etiket değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 5.1. Prototip motorun SEY ve deney sonuçları

Kayışlı Dişlisiz Asansör Tahrik Motoru			
Frekans	66.6 Hz	Kutup Sayısı	20
Gerilim	380 V	Güç	4.5 kW
Yük	630 Kg	Anma Akımı	8.4 A
Kabin Hızı	1 m/s	Motor Devri sayısı	400 d/d
Süspansiyon	2:1	Moment	107 Nm
cos ϕ	0.906	Fren tipi	Mayr Roba 125
Bağlantı şekli	Yıldız	Enkoder tipi	FNC SC2048

6 KAYNAKLAR

- Akar, M. (2010). *Sabit mıknatıslı senkron motorda yapay zeka yöntemleri ile mekanik hataların teşhisi* [Sakarya Üniveristesi].
https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=YgACVK-jdBfiG_VOioWQIA&no=JupRdYZ9K4rXjTw123XRlA
- Akış, F. (2015). *Sabit mıknatıslı boru tip rotorlu senkron motor*. Türk Patent No. 2015/14894.
- Anand, R. & Mahesh, M. (2016). Analysis of elevator drives energy consumptions with permanent magnet machines. *2016 4th IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering, SEGE 2016*, 186–190.
<https://doi.org/10.1109/SEGE.2016.7589523>
- Anonim. (1988). *Asansörlerin hesap, tasarım ve yapım kuralları (elektrikle çalışan insan ve yük asansörleri için)*, (TS 1812).
- Anonim. (2010). *Rotating electrical machines Part 1: Rating and performance (BS EN 60034-1)*. BSI Standards.
- Anonim. (2014). *Rotating electrical machines Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles) (BS EN 60034-2-1)*. BSI Standards.
- Anonim. (2018). *Thssenkrupp, Product Catalogue PMC125*.
- Anonim. (2020). *Thssenkrupp, Elevator Performance and Duty Application Guideline*.
https://www.tkelevator.com/Media/Products_1/Elevators_4/Elevators/Synergy_100_new/Performance_guideline/Synergy100-Performance-Guideline-Elevator-Factsheet-Ea-En.Pdf (10.05.2022).
- Anonim. (2022a). *Deep groove ball bearings- 6009 | SKF*. SKF.
<https://www.skf.com/tr/productinfo/productid-6009>
- Anonim. (2022b). *Sarkuysan Emaye Tel Kataloğu*.
<https://www.sarkuysan.com/Dosya/Katalog/Katalog-254202358192.Pdf> (20.04.2023).
- Anonim. (2022c). *Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets-N45-SH*. Arnold

- Magnetic. <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N45SH-151021.pdf>
- Anonim. (2023a). *Electrical Steel Sheets: JFE G-Core, JFE N-Core*. <http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/electrical/catalog/f1e-001.pdf>
- Anonim. (2023b). *GEN2*. <https://www.otis.com/en/us/products-services/products/gen2>
- Arkan, M. A. S. (2015). *Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları*. <https://silo.tips/download/sonlu-elemanlar-metodunun-mhendslikte-uygulamaları>
- Atay, S. (2013). *Komple Ray Bağlantı Sisteminin Deneysel Gerilme Analizi* [İstanbul Teknik Üniversitesi]. <http://hdl.handle.net/11527/7806>
- Avsar, Y., Fenercioglu, A. & Soyaslan, M. (2021). Design Optimization of PM Synchronous Motor Used in Belt Drive Elevator Systems. *2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies, GUCON 2021*. <https://doi.org/10.1109/GUCON50781.2021.9573592>
- Aydın, M. (2007). *Eksenel Akı Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarında Vuruntu Moment Minimizasyonu*.
- Aydın, M. (2012). Brushless Permanent Magnet Servomotors [InTech]. In *Serial and Parallel Robot Manipulators - Kinematics, Dynamics, Control and Optimization*. <https://doi.org/10.5772/35266>
- Aydın, M., Ocak, O. & Demir, Y. (2020). Influence of varying magnet pole-arcs and step-skew on permanent magnet AC synchronous motor performance. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 28(6), 3304–3318. <https://doi.org/10.3906/ELK-2003-179>
- Bakhtiarzadeh, H., Polat, A. & Ergene, L. T. (2018). The analysis of different stator designs of a PMSM for elevator application. *2018 6th International Conference on Control Engineering and Information Technology, CEIT 2018*. <https://doi.org/10.1109/CEIT.2018.8751830>
- Bayraktar, Ş. (2015). *Farklı Kesme Yöntemleri İle Üretilen Silisli Sac Paketlerinin Elektrik Makinalarının Performansı Üzerine Etkisi | AVESİS* [Gazi Üniversitesi]. <https://avesis.gazi.edu.tr/yonetilen-tez/62996648-6907-4204-b65b-761d8e95164f/farkli-kesme-yontemleri-ile-uretilen-silisli-sac-paketlerinin->

elektrik-makinalarının-performansi-uzerine-etkisi

- Berber, O. (2016). *Dynamic Modelling and Analysis of Elevator Systems*. İzmir Institute of Technology.
- Boldea, I. & Tutelea, L. (2009). Electric Machines: Steady State, Transients, and Design with MATLAB®. In *Electric Machines: Steady State, Transients, and Design with MATLAB®*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439882979/ELECTRIC-MACHINES-ION-BOLDEA-LUCIAN-NICOLAE-TUTELEA>
- BRUGG Lifting. (2022). “BRUBelt High-tensile galvanized steel cords for elevators”,
Erişim: https://brugglifting.com/wp-content/uploads/2022/06/BRUbelt_EN.pdf.
- Bulgan, D. (2014). A software for analysis of permanent magnet AC motors [Orta Doğu Teknik Üniversites].
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=AVhzakdaXCyHxEAZsGUyWg&no=gC3IF2AChJqz1-ru1AC1ww>
- Çagan, N. (2015). *Design of an Outer-Rotor Brushless DC Motor for Control Moment Gyroscope Applications*. Middle East Technical University.
- Carter, F. W. (1900). Note on air-gap and interpolar induction. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 29(146), 925–933. <https://doi.org/10.1049/JIEE-1.1900.0095>
- Chapman, S. J. (2017). *Elektrik Makinalarının Temelleri*.
- Chen, J. W., Tran, T. N. T. & Tsai, M. F. (2020). Design of Phase Angle Control Strategy for Three-Phase-Current PMSM Elevator. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2020-October, 926–930.
<https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9255212>
- Chung, D. W., Ryu, H. M., Lee, Y. M., Kang, L. W., Sul, S. K., Kang, S. J., Song, J. H., Yoon, J. S., Lee, K. H. & Seo, J. H. (1999). New configuration of drive system for high speed gearless elevator. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 1, 307–310.
<https://doi.org/10.1109/IAS.1999.799972>
- 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.

- Proceedings - 2012 20th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2012*, 1256–1263. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2012.6350037>
- Dalcalı, A. (2013). *Rotatif krayojenik soğutucular için fırçasız doğru akım motoru tasarımı ve optimizasyonu* [Gazi Üniversitesi].
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Demiröz, R., Saroğlu, S., Yaprak, H. & Duru, H. T. (2015). BELTSYS Kayış Tahrikli Yüksek Verimli Asansör Sistemi. *Asansörlerde Enerji Sınıflandırılması ve Verimliliği Artırmak İçin Alınabilecek Tedbirler*, 8.
- Dianov, A., Tinazzi, F., Calligaro, S. & Bolognani, S. (2022). Review and Classification of MTPA Control Algorithms for Synchronous Motors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(4), 3990–4007. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3123062>
- Diñçer, F. & Rüstemli, S. (2011). Asansörlerde Enerji Verimliliği Ve Pratik Çözümler. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.
- Duan, Y. & Ionel, D. M. (2013). A review of recent developments in electrical machine design optimization methods with a permanent-magnet synchronous motor benchmark study. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(3), 1268–1275. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2252597>
- Duane C. Hanselman. (2003). *Brushless Permanent Magnet Motor Design* (Second Edi). Magna Physics Publishing.
https://www.researchgate.net/publication/304129146_Brushless_Permanent_Magnet_Motor_Design
- Duru, T. H. & Demiröz, R. (2008). *Doğrudan Tahrikli Asansör Sistemlerinde Kullanılan Miknatıs Uyarımlı Senkron Motorların Çalışma ve Boyutlandırma İlkeleri*.
- Eker, M. (2017). *Şebeke Yolvermeli Eksenel Akılı Sürekli Miknatıslı Senkron Motor Tasarımı*. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi.
- Ekici, C. (2018). *Asansör Motorunun Konumlandırması ve Sabitlemesi Amaçlı Kullanılan Şaside Geliştirme*. Türk Patent No. 2018/17757.
- Eklund, P. & Eriksson, S. (2019). The Influence of Permanent Magnet Material Properties on Generator Rotor Design. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 1314, 12(7),

1314. <https://doi.org/10.3390/EN12071314>

EL-Refaie, A. M. (2010). Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machines: Opportunities and challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(1), 107–121. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2030211>

Fenercioğlu, A., Soyasalan, M., Avşar, Y., Sarıhan, F. & Atakay, D. (2022). Halatlı ve Kayışlı Sistemlerde Kullanılan Asansör Motorlarının Performans Değerlendirmesi. *4 Th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences, ICAENS 2022*, 713–718.
https://www.researchgate.net/publication/366790702_Halatli_ve_Kayisli_Sistemlerde_Kullanilan_Asansor_Motorlari_nin_Performans_Degerlendirmesi

Ficheux, R. L., Caricchi, F., Crescimbeni, F. & Honorati, O. (2001). Axial-flux permanent-magnet motor for direct-drive elevator systems without machine room. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(6), 1693–1701.
<https://doi.org/10.1109/28.968180>

Fischer, D. (2003). *Driving gear for an elevator and method for installing the driving gear*. European Patent No. EP1741661B1.

Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., Umans, S. D., Burr Ridge, B., Dubuque, I., Madison, I. & New York San Francisco St Louis Bangkok Bogota Caracas Kuala Lumpur Lisbon London Madrid Mexico City Milan Montreal New Delhi Santiago Seoul Singapore Sydney Taipei Toronto, W. (2005). *Electric Machinery Sixth Edition*. McGraw-Hill. www.mhhe.com

Gale, E. L. (1911). *Belt-drive elevator*. US Patent No. US1011423.

Gambhir, R. & Jha, A. K. (2013). Brushless DC Motor: Construction and Applications. *The International Journal Of Engineering And Science*, 2(5), 72–79.

Garcia Oya, J. R., Hidalgo-Fort, E., Munoz Chavero, F. & Gonzalez Carvajal, R. (2020). Compressive-Sensing-Based Reflectometer for Sparse-Fault Detection in Elevator Belts. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(4), 947–949. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.2970832>

Gessner R., T. N. (2013). *Elevator with tubular motor and divided motor mount* (Patent No. European Patent No. EP2871147A1.). European Patent No. EP2871147A1.

- Gieras, J. f. (2010). Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications, Third Edition. In *CRC Press Taylor & Francis Group*. CRC Press.
<http://dx.doi.org/10.1201/9781420064414-c1>
- Güler, S. M. & Şen, S. (2016). Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56–66.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ordubtd/issue/11069/132196>
- Güneri, S. (2015). *Kompresör Uygulaması İçin Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı* [İstanbul Teknik Üniversitesi]. <http://hdl.handle.net/11527/13161>
- Gürdal, O. (2015). *Elektrik Makinalarının Tasarımı*. Bursa Orhangazi Üniversitesi Yayınları.
https://www.researchgate.net/publication/335700632_Elektrik_Makinalarinin_Tasarimi
- 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. <https://doi.org/10.1109/TIA.2012.2209851>
- Heinz G, M. H. D. (2003). *Lift belt and system*. US Patent No. US20030121729A1.
- Huikko R. P., V. P. . H. J. . S. K. (2008). *Rope for a hoisting device, elevator and use*. US Patent No. US20110000746A1.
- İmrak, C. E. & Gerdemli, İ. (2000). *Asansörler ve Yürüyen Merdivenler*. Birsen Yayınevi.
- Islam, R., Husain, I., Fardoun, A. & McLaughlin, K. (2008). Permanent Magnet Synchronous Motor Magnet Designs with Skewing for Torque Ripple and Cogging Torque Reduction. *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, 1552–1559.
<https://doi.org/10.1109/07IAS.2007.240>
- Islam, Rakib, Husain, I., Fardoun, A. & McLaughlin, K. (2009). Permanent-magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(1), 152–160.
<https://doi.org/10.1109/TIA.2008.2009653>
- ISO 25745-2:2015. (2015). *ISO 25745-2:2015 - Energy performance of lifts, escalators and moving walks — Part 2: Energy calculation and classification for lifts*

- (elevators) (p. 11). ISO copyright office. <https://www.iso.org/standard/60951.html>
- Kim, D. Y., Park, M. R., Sim, J. H. & Hong, J. P. (2017). Advanced Method of Selecting Number of Poles and Slots for Low-Frequency Vibration Reduction of Traction Motor for Elevator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(4), 1554–1562. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2017.2695059>
- Kone. (2013). *Ultrarope*. Erişim: <https://www.compositesworld.com/articles/in-super-tall-buildings-carbon-fiber-elevator-rope-rides-to-the-rescue>.
- Krasnov, I. Y., Langraf, S. V., Odnokopylov, I. G., Krokhta, Y. V., Natalinova, N. M., Galtseva, O. V. & Rogachev, A. A. (2017). Sensorless determination of initial position of the rotor of permanent-magnet synchronous motor of the gearless elevator hoist. *2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2017.7998503>
- Küçükçalık, M. M. (2016). Asansörlerde Enerji Sınıflandırılması ve Verimliliği Artırmak İçin Alınabilecek Tedbirler. *Asansör Sempozyumu*, 139–147. https://www.emo.org.tr/ekler/9252ad52cf072dc_ek.pdf
- Latif, R. (2015). *Makine Dairesiz Asansörde Dişlisiz Tahrik Motorunun Kuyu İçine Montaj Tipi*. Türk Patent No. 2015/03607.
- Lei, H., Tian, G., Zhao, H., Mao, Y. & Huang, Z. (2012). Health monitoring for coated steel belts in an elevator system. *Journal of Sensors*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/750261>
- Leu, M. C. (1992). A Complete Model Characterization of Brushless dc Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(1), 172–180. <https://doi.org/10.1109/28.120227>
- Lipo, T. A. (2017). Introduction to AC Machine Design. In *Introduction to AC Machine Design*. Wiley-IEEE Press. <https://doi.org/10.1002/9781119352181>
- Łukaniszyn, M., JagieŁa, M. & Wróbel, R. (2004). Optimization of permanent magnet shape for minimum cogging torque using a genetic algorithm. *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(2 II), 1228–1231. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.825185>
- Ma, Q., El-Refaie, A. & Lequesne, B. (2020). Low-cost interior permanent magnet

- machine with multiple magnet types. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(2), 1452–1463. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2966458>
- Meier, F. (2008). *Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications*.
- Mirnikjoo, S. A., Milad Kazemi Sangdehi, S. & Ehsan Abdollahi, S. (2021). Multi-objective Optimization of a Permanent Magnet Synchronous Motor for Gearless Elevator. *2021 12th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference, PEDSTC 2021*. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC52094.2021.9405830>
- Pyrhönen, J., Jokinen, T. & Hrabovcová, V. (2013). Design of Rotating Electrical Machines. In *Design of Rotating Electrical Machines*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118701591>
- Rangarajan, S. & Agarwal, V. (2021). Novel Active Damping Scheme to Enhance the Performance of PMSM Driven Gearless Elevators by Minimizing their Vertical Vibrations. *2021 National Power Electronics Conference, NPEC 2021*. <https://doi.org/10.1109/NPEC52100.2021.9672457>
- Rangarajan, S. & Agarwal, V. (2022). Novel Active Damping Scheme to Stabilize and Enhance the Performance of v/f Controlled Permanent Magnet Synchronous Motor Driven Passenger Elevator System. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 2022-October*. <https://doi.org/10.1109/IAS54023.2022.9940132>
- Reichert, T., Nussbaumer, T. & Kolar, J. W. (2009). Torque Scaling Laws for Interior and Exterior Rotor Permanent Magnet Machines. *Digital Object Identifier Inserted by IEEE*, 1–4.
- Şahin, A. (2018). *Asansör Askı Halatının Belirsizliğe Dayalı Mukavemet ve Ömür Analizi*. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi.
- Sahin, F. (2001). *Design and development of a high-speed axial-flux permanent-magnet machine*. <https://doi.org/10.6100/IR544267>
- Şahin, İ. (2010). *Measurement of Brushless DC Motor Characteristics and Parameters and Brushless DC Motor Design*. 203.
- Salminen, P. (2004). *Fractional slot permanent magnet synchronous motors for low*

- speed applications* [Lappeenranta University of Technology].
<https://lutpub.lut.fi/handle/10024/31164>
- Savaş, E. (2011). *Asansör kılavuz ray konsollarının bilgisayar destekli gerilme analizi* [Yıldız Teknik Üniversitesi]. <http://dspace.yildiz.edu.tr/xmlui/handle/1/10517>
- Shear Strength. (2007). *Strength of a material or component against the type of yield or structural failure*. Erişim: 12 Aralık 2020,
https://en.wikipedia.org/wiki/Shear_strength.
- Sim, J. H., Ahn, D. G., Kim, D. K., Son, D. K., Kim, S., Hong, J. P. & Lee, T. H. (2018). Multiphysics Design of Triple 3-Phase PMSM for Ultra-High Speed Elevator Applications. *Proceedings - 2018 23rd International Conference on Electrical Machines, ICEM 2018*, 284–290.
<https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8507054>
- Soyaslan, M. (2020). *Asansör tahrik sistemleri için dıştan rotorlu sürekli mıknatıslı bir senkron motor tasarımı* [Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi].
<http://acikerisim.subu.edu.tr/xmlui/handle/20.500.14002/1026>
- Soyaslan, M., Avşar, Y., Fenercioğlu, A. & Sarihan, F. (2023). Design and Production of Belt Drive Elevator Traction Machine: Modelling of Double Side Belt System. *Journal of Polytechnic*. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1187864>
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Başbakanlık Mevzuatı Geliştirme ve Yayın Genel Müdürlüğü* (p. 1).
<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/07/20180728-2.htm>
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2020). *Kamu Binalarının Enerji Verimli Yenilemesine Yönelik Rehber*.
<https://webdosya.csb.gov.tr/db/mesleki hizmetler/icerikler/kamu-b-nalarinin-enerji-verimlili-yenilemesine-neyonelik-rehber-20201014100010.pdf>
- Tanç, G. (2014). *Elektrikli Bisikletler İçin Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarımı Ve Üretimi* [İstanbul Teknik Üniversitesi]. <http://hdl.handle.net/11527/13192>
- Targıt, S. (2011). *Asansörlerin Binayla Teması ve Kılavuzları*.
- TIMKEN. (2017). *Timken Mühendislik El Kitabı*. TIMKEN Company.
<https://www.timken.com/resources/e10424-tr-timken-muhendislik-el-kitabi/>

- Tong, W. (2014). Mechanical design of electric motors. In *Mechanical Design of Electric Motors* (1st Editio). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16863>
- TS EN 81-1. (2011). *Türk Standardı Asansörler-Yapım Ve Montaj İçin Güvenlik Kuralları-Bölüm 1: Elektrikli Asansörler*.
- Ünsal, S. (2022). *Sezgisel tabanlı bulanık mantık denetleyiciler ile sabit mıknatıslı senkron motorun hız kontrolü* [Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi].
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Wang, J., Atallah, K., Zhu, Z. Q. & Howe, D. (2008). Modular three-phase permanent-magnet brushless machines for in-wheel applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(5), 2714–2720.
<https://doi.org/10.1109/TVT.2007.914476>
- Wang, J. H., Tan, F. W. & Jin, R. L. (2005). Research on low-speed gearless permanent magnet synchronous motor for elevator drive. *ICEMS 2005: Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems*, 1, 454–459.
<https://doi.org/10.1109/ICEMS.2005.202568>
- XIN GE. (2014). *Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles* [Chalmers University Of Technology].
<https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/199927/199927.pdf>
- Yan, G. (2009). *Fırçasız Doğru Akım Motor Analizi ve Sürücü Devre Tasarımı*. Marmara Üniversitesi.
- Yao, Y., Liu, C. & Lee, C. H. T. (2018). Quantitative Comparisons of Six-Phase Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Machines for Electric Vehicles. *Energies* 2018, Vol. 11, Page 2141, 11(8), 2141. <https://doi.org/10.3390/EN11082141>
- Yetiş, H. (2017). *Dişlisiz asansör sistemleri için ferrite tabanlı gömülü mıknatıslı senkron makine tasarımı* [Yıldız Teknik Üniversitesi].
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=mNkBR5gMPJWtCHZD5zYyNg&no=8NiFG9IK2hQhpJhimtxPcg>
- Yetiş, H., Mese, E. & Biyikli, M. (2018). Design and Comparison of Ferrite Based IPM and NdFeB Based SPM Synchronous Motors for Gearless Elevator Systems. *Proceedings - 2018 23rd International Conference on Electrical Machines, ICEM*

2018, 635–641. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8506825>

Yıldız, T. (2009). *Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Modellenmesi ve Kontrolü*. Sakarya Üniveritesi.

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

