

**Asansör Tahrik Sistemleri İçin Dıştan Rotorlu Sürekli  
Mıknatıslı Bir Senkron Motorun Tasarımı Ve Prototip  
Üretimi**

**Program Kodu: 1002**

**Proje No: 218M615**

Proje Yürütücüsü:

**Arş. Gör. Mücahit SOYASLAN**

Araştırmacılar:

Prof. Dr. Osman ELDOĞAN

Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU

Öğr. Gör. Yusuf AVŞAR

Ocak, 2020

SAKARYA



## ÖNSÖZ

Elektrikli motor üretimi, enerji bağımlılığımızın azalması ve yerli üretim imkanlarının artırılması açısından ülkemiz için öncelikli bir alan durumundadır. Günümüze kadar, ülkemizde 570.000'in üzerinde asansör tesis edilmiş olup bunların büyük bir bölümü halen çalışmaktadır. Yerli üreticiler gün geçtikçe üretim miktarlarını artırırsa da, tahrik motorlarının büyük bir bölümü yurtdışından ithal edilmektedir. Sektörde hala verimliliği düşük olan asenkron motorların sıklıkla kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, sektörün yerli imkanlarla üretilecek yüksek enerji verimliliği olan dişlisiz motorlara fazlasıyla ihtiyacı vardır.

Ülkemizde Akar Asansör, Akış Asansör, Jupa Asansör, EMF Motor, Arkel gibi bazı yerli firmalar dişlisiz motor üretimi gerçekleştirmektedir. Fakat dıştan rotorlu motorun seri üretimini yapan bir firma tespit edilememiştir. Proje kapsamında üretilen dıştan rotorlu SMSM ile yerli imkanlarla, yüksek enerji verimliliğine ve torca sahip olan özgün bir tasarım elde edilmiştir. Üretilen motorun asansör sistemlerinde kullanılması ile dışa bağımlılığın azaltılması hedeflenmektedir. Dıştan rotorlu SMSM'nin tasarımı esnasında yapılan optimizasyon, parametrik çözüm çalışmaları, sonlu elemanlar analizleri (SEA), yapısal/termal analizler, mekanik iyileştirmeler ve prototip üretimi ile motor tasarımı ve uygulaması konularında güncel literatüre katkıda bulunulmuştur. Dıştan rotorlu SMSM'nin rotorundaki dönme hareketi flanşlı bir mil ile kasnağa aktarılmıştır. Gerçekleştirilen tasarım ile hem halatlı hem de kayışlı motor olarak kullanılabilecek özgün bir mekanik tasarım elde edilmiştir. Asansör sistemlerindeki dıştan rotorlu tahrik motorlarında bu şekilde bir hareket aktarma sistemi ilk defa bu proje kapsamında uygulanmıştır.

Proje konusu alanında yürütülen doktora çalışması, proje desteği sayesinde bitirilme aşamasına gelmiştir. Bu projede yapılan çalışmalar 218M615 numaralı proje ile "1002-Hızlı Destek Programı" kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Projenin gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
ÖZET .....	viii
ABSTRACT .....	ix
1.GİRİŞ .....	10
1.1. Asansör Sistemleri .....	11
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	15
3. GEREÇ VE YÖNTEM .....	18
3.1.SMSM'lerin Özellikleri ve Sınıflandırılması .....	18
3.1.1.İçten ve dıştan rotorlu SMSM'ler.....	21
3.1.2.Stator ve sargılar .....	22
3.1.3.Rotor .....	26
3.1.4.Sürekli (Kalıcı-Daimi) Miknatıslar .....	27
3.2.SMSM'nin Manyetik Devre Modeli.....	30
3.3.Oluk-Kutup Oranının Seçimi .....	34
3.4.Vuruntu Momenti .....	38
3.5.Dıştan Rotorlu SMSM'nin Optimum Tasarımı.....	42
3.5.1.Yapay arı kolonisi algoritması.....	45
3.6.Deney Düzenekinin Tasarımı .....	47
4.BULGULAR VE TARTIŞMA .....	49
4.1.ABC Algoritması İle Optimizasyon Sonuçları.....	49
4.2.Dıştan Rotorlu SMSM'nin Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) Analizleri.....	52
4.3.Dıştan Rotorlu SMSM'nin Yapısal Analiz Sonuçları .....	60
4.3.1.Kasnak mili eğilme ve burulma analizi.....	62
4.3.2.Rotor burulma analizi.....	65
4.3.3.Stator mili burulma analizi.....	67
4.4.Dıştan Rotorlu SMSM'nin Termal Analiz Sonuçları .....	68
4.5.Dıştan Rotorlu SMSM'nin Üretilmesi .....	71



4.6.Dıştan Rotorlu SMSM'nin Test Sonuçları .....	73
4.6.1.Dıştan rotorlu SMSM'nin zıt EMK testi.....	74
4.6.2.Dıştan rotorlu SMSM'nin yüklü çalışma testleri .....	74
4.7.Dıştan Rotorlu SMSM'nin İçten Rotorlu SMSM İle Karşılaştırılması.....	77
5.SONUÇ .....	80
KAYNAKLAR.....	83
EKLER .....	89

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması .....	10
Şekil 1.2. Dişlili ve dişsiz asansör motoru örnekleri .....	12
Şekil 1.3. Kayışla tahrikli asansör sistemleri .....	12
Şekil 1.4. Asansörlerdeki askı tipleri .....	13
Şekil 1.5. En sık kullanılan a) 1:1 ve b) 2:1 askı tipleri .....	14
Şekil 3.1. SMSM'lerin rotor topolojileri.....	19
Şekil 3.2. SM motorların (a) sinüsoidal ve (b) trapezoidal zıt EMK dalga şekilleri .....	20
Şekil 3.3. SM motorların tork-hız karakteristiği .....	21
Şekil 3.4. İçten ve dıştan rotorlu motor topolojileri.....	22
Şekil 3.5. M530-50A tipi silisli saçın B-H grafiği .....	23
Şekil 3.6. M530-50A tipi silisli saçın 50 Hz'deki demir kayıpları .....	23
Şekil 3.7. Lazer ile kesilmiş silisli saçlar ve bu saçlara uygulanan işlemler.....	24
Şekil 3.8. Üretilen prototip motorun çift katmanlı konsantre sarım şeması .....	25
Şekil 3.9. Çift katmanlı sarım yapılmış stator paketi.....	26
Şekil 3.10. Rotor ve mıknatısların rotor üzerine yapıştırılma aşamaları .....	28
Şekil 3.11. N45SH tipi sürekli mıknatısın manyetik özellikleri .....	30
Şekil 3.12. Prototip motorda kullanılan N45SH tipi eğri mıknatıslar .....	30
Şekil 3.13. Dıştan rotorlu SMSM'de manyetik akının izlediği yol.....	31
Şekil 3.14. SMSM'nin manyetik eşdeğer devresi .....	32
Şekil 3.15. Manyetik eşdeğer devrenin sadeleştirilmesi.....	33
Şekil 3.16. Vuruntu momentini azaltma yöntemleri .....	38
Şekil 3.17. Mıknatıs adımının ve kutup adımının gösterimi.....	39
Şekil 3.18. Vuruntu momenti-Hava aralığı pozisyonu grafikleri.....	40
Şekil 3.19. İndüklenen gerilimlerin FFT grafikleri .....	41
Şekil 3.20. Kutup aralığı değeri 0.78 olan motorun vuruntu momenti grafiği.....	42
Şekil 3.21. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Tasarım Algoritması .....	43

Şekil 3.22. Deney düzeneği.....	47
Şekil 3.23. Kurulmuş deney düzeneği .....	48
Şekil 3.24. Matlab Simulink'te hazırlanmış veri toplama ekranı .....	48
Şekil 4.1. ABC algoritması ile verimin iyileştirilmesi .....	49
Şekil 4.2. Dıştan rotorlu SMSM'nin kesit görünüşü .....	50
Şekil 4.3. Dıştan rotorlu SMSM'nin ağ yapısı .....	53
Şekil 4.4. Dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik akı yoğunluğu (B:Tesla) .....	53
Şekil 4.5. Dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik alan kuvveti (H:A/m) .....	54
Şekil 4.6. Dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik vektör potansiyeli (A:Wb/m) .....	55
Şekil 4.7. Dıştan rotorlu SMSM'nin elektrik akım yoğunlukları (J:A/m <sup>2</sup> ) .....	55
Şekil 4.8. Dıştan rotorlu SMSM'nin giriş gerilimi grafiği.....	57
Şekil 4.9. Dıştan rotorlu SMSM'nin akım grafiği .....	57
Şekil 4.10. Dıştan rotorlu SMSM'nin indüklenen gerilim grafiği.....	58
Şekil 4.11. Dıştan rotorlu SMSM'nin çıkış torku grafiği .....	59
Şekil 4.12. Dıştan rotorlu SMSM'nin hız grafiği .....	59
Şekil 4.13. Dıştan rotorlu SMSM'nin verim grafiği .....	60
Şekil 4.14. Dıştan rotorlu SMSM'nin nihai katı modeli.....	61
Şekil 4.15. Dıştan rotorlu SMSM'nin kesit görünüşü .....	62
Şekil 4.16. Kasnak mili ağ (mesh) yapısı ve uygulanan kuvvet (25000 N).....	63
Şekil 4.17. Eğilme etkisindeki kasnak milinin von mises gerilmesi analiz sonuçları (N/m <sup>2</sup> ) ...	63
Şekil 4.18. Eğilme etkisindeki kasnak milinin yer değiştirme analiz sonuçları (mm) .....	63
Şekil 4.19. Kasnak mili ağ yapısı ve uygulanan burulma momenti (240 Nm) .....	64
Şekil 4.20. Burulma etkisindeki kasnak milinde oluşan von mises gerilmesi analiz sonuç .....	64
Şekil 4.21. Burulma etkisindeki kasnak milinde oluşan yer değiştirme analiz sonuçları .....	64
Şekil 4.22. Dıştan rotorlu SMSM'nin ilk iki tasarım denemesi .....	65
Şekil 4.23. Rotor ağ yapısı ve uygulanan burulma momenti (240 Nm) .....	66
Şekil 4.24. Burulma etkisindeki rotorda oluşan von mises gerilmesi analiz sonuçları.....	66
Şekil 4.25. Burulma etkisindeki rotorda oluşan yer değiştirme analiz sonuçları (mm) .....	67
Şekil 4.26. Stator mili ağ yapısı ve uygulanan burulma momenti (240 Nm).....	67

Şekil 4.27. Burulma etkisindeki stator milinde oluşan von mises gerilmesi analiz sonuç.....	67
Şekil 4.28. Burulma etkisindeki stator milinde oluşan yer değiştirme analiz sonuçları .....	68
Şekil 4.29. Termal analizlerde kullanılan ağ yapısı .....	69
Şekil 4.30. Termal analiz sonuçları: a) Sıcaklık dağılımı, b) Toplam ısı akısı .....	70
Şekil 4.31. Dıştan rotorlu SMSM'nin montaj resimleri .....	72
Şekil 4.32. Dıştan rotorlu SMSM'nin ölçüleri .....	72
Şekil 4.33. a) Kasnak mili ve b) Stator mili .....	73
Şekil 4.34. İndüklenen zıt EMK'nın SEY ve deneysel sonuç grafikleri .....	74
Şekil 4.35. Motorun yüklenmesi esnasında kaydedilen tork verisi örneği .....	75
Şekil 4.36. SEY analizlerindeki farklı yükleme değerleri .....	75
Şekil 4.37. SEY analizlerinde farklı yüklerdeki çekilen akım değerleri .....	76
Şekil 4.38. Dıştan rotorlu SMSM'nin test ve SEY sonuçlarına göre elde edilen tork-akım grafikleri.....	77
Şekil 4.39. Dıştan rotorlu SMSM'nin ve içten rotorlu karşılaştırma motorunun tork-akım grafikleri.....	77

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Şekil 1.4'deki askı tiplerinin özellikleri (Jeff Holmes, 2018) .....	13
Tablo 3.1. Uyarım akımlarına ve zıt EMK şekillerine göre SM motorların sınıflandırması ....	19
Tablo 3.2. Sinterlenmiş NdFeB mıknatısların fiziksel özellikleri .....	29
Tablo 3.3. Kutup-faz başına oluk sayısı ( $q$ ) ve sargı faktörü ( $k_{sf}$ ) tablosu .....	36
Tablo 3.4 Oluk ve kutup sayısı kombinasyonlarının en küçük ortak katları .....	37
Tablo 3.5. Oluk ve kutup sayısı kombinasyonlarının en büyük ortak bölenleri .....	37
Tablo 3.6. ABC algoritmasının detaylı akış diyagramı .....	45
Tablo 4.1. Motor parametrelerinin sonuç değerleri.....	50
Tablo 4.2. Dıştan Rotorlu SMSM'nin parametreleri.....	51
Tablo 4.3. Dıştan rotorlu SMSM'nin etiket değerleri .....	52
Tablo 4.4. Motor parçalarının maruz kaldığı gerilmeler.....	61
Tablo 4.5. Motor sargılarının izolasyon sınıfları (Toshiba, 2011) .....	69
Tablo 4.6. Dıştan rotorlu SMSM'nin faz dirençleri .....	73
Tablo 4.7. Dıştan rotorlu SMSM'nin test sonuçları .....	76
Tablo 4.8. Dıştan rotorlu SMSM'nin ve içten rotorlu karşılaştırma motorunun test sonuçları.	78
Tablo 4.9. İçten rotorlu karşılaştırma motorunun ve dıştan rotorlu SMSM'nin bilgileri .....	79





## ÖZET

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

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

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

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

**Anahtar kelimeler:** Asansör tahrik motoru, senkron motor, dişlisiz motor, dıştan rotorlu motor, elektrik motoru tasarımı.



## ABSTRACT

In this project, it is done the design, modelling and prototype production of an external rotor permanent magnet synchronous motor (PMSM) for elevator traction systems. Generally, the inner rotor and gear structures are used for elevator traction systems. The efficiency has increased with the use of gearless PMSMs and the cost of moving mechanisms has fallen considerably.

With external rotor motor design which is realized within the scope of the project, it is aimed to obtain higher efficiency values than inner-rotor gearless elevator traction motors. As a comparison motor, it is selected an inner rotor PMSM with 4 kW power whose detailed analysis and test results are in the literature and sold in the market. Data of produced and comparison motor was compared and 12.17% efficiency increase was obtained in nominal values.

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

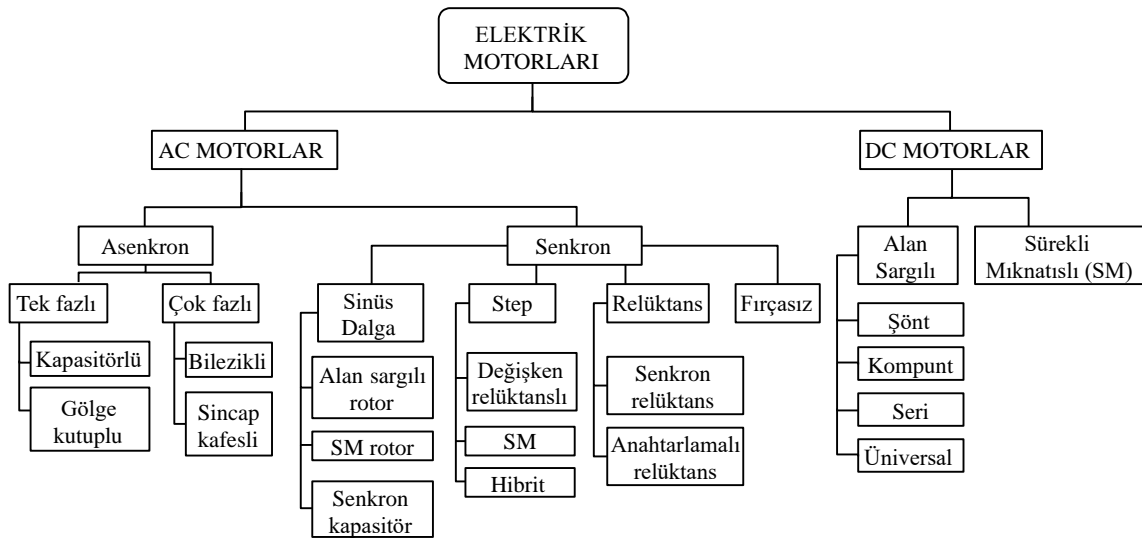
It is aimed to contribute to the competitiveness of our country in the field of elevator motors in the event that the external rotor PMSM presented within in the project is commercialized. This study, which compares internal and external rotor elevator traction motors with the same frame dimensions,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

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

## 1. GİRİŞ

Elektrik motorları günümüz dünyasında her alanda karşımıza çıkmaktadır. Elektronik elemanların ve kontrol birimlerinin hızla gelişmesi yeni tip motorların üretilmesini zorunlu kılmıştır. Sürekli (kalıcı-daimi) mıknatıs teknolojisindeki ilerlemeler motor tasarımı ve üretimine yeni ufuklar açmıştır. Sürekli mıknatıslı motorlar verimli, ucuz ve seri üretime uygun hale geldiklerinden motor teknolojisinde sıklıkla kullanılmaktadır (Yıldız, 2009).

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



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

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

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

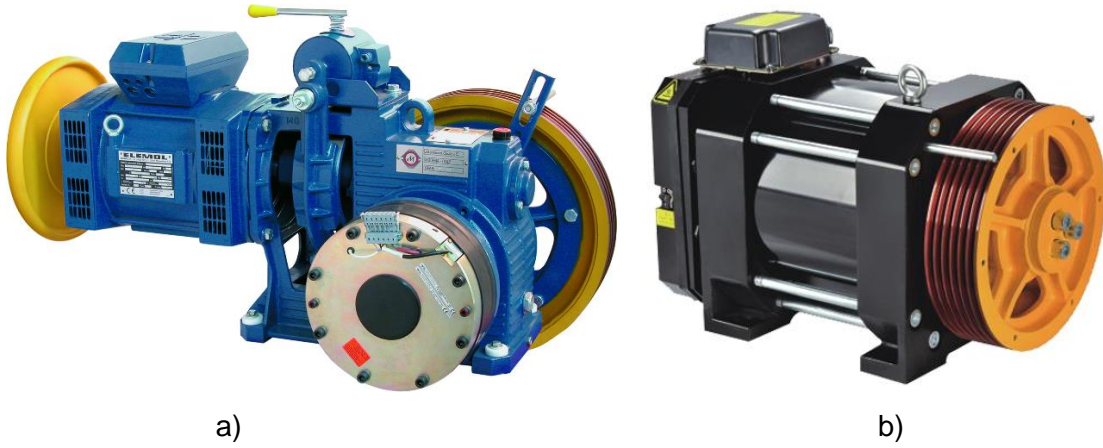
Ek olarak motor boyutuna göre alınan tork değeri daha yüksektir ve bu sebeple alan ve ağırlığın önemli bir etken olduğu uygulamalarda SMSM'ler daha kullanışlı olmaktadır (Bulgan, 2014). Buna karşın SMSM'lerin iki temel dezavantajı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi motor kontrolünün sağlanması için gerekli olan kontrol kartı maliyeti, ikincisi ise rotorlarda yer alan mıknatısların maliyetidir (Yedamale, 2003). Bahsi geçen dezavantajlar, sistem kurulum maliyetleri açısından sorun teşkil etse de uzun vadede sağladığı avantajlar ile SMSM'ler diğer motorlara göre üstünlük göstermektedir. Bu projede asansör tahrik motoru olarak kullanılacak dıştan rotorlu bir SMSM tasarımı üzerinde durulmuştur. Proje konusu motor için dıştan rotorlu SMSM veya prototip motor terimleri kullanılırken, karşılaştırma motoru için içten rotorlu SMSM terimi de kullanılmıştır.

### **1.1. Asansör Sistemleri**

Günümüzde başlıca 4 farklı asansör tipi bulunmaktadır. Bunlar elektrikli asansörler, hidrolik asansörler, pnömatik asansörler ve maglev asansörlerdir. En sık kullanılan asansör sistemleri elektrikle tahrik edilen dişlili (geared) veya dişlisiz (gearless) asansör sistemleridir. Bu sistemler makine dairesi veya makine dairesiz asansörler olarak da anılmaktadır.

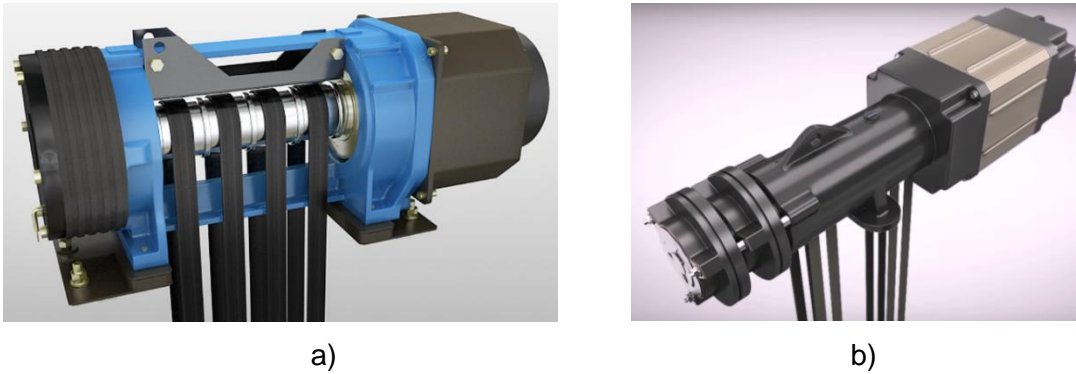
1900 yılında Fransız De Bueren, redüktörsüz (dişlisiz-gearless) asansör makinasının, 1904 yılında ise Otis firması redüktörsüz ve tahrik kasnaklı asansörün kurulumunu yapmıştır. Tahrik kasnaklarındaki oluklar ile halatlar arasındaki basınç hesaplamaları Hymans, Hellborn ve Prof. Donadt tarafından yapılan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

Dişlilili asansörlerde asenkron motorlar kullanılırken dişlisiz asansör sistemlerinde SMSM'ler kullanılmaktadır. Dişlisiz asansör sistemlerindeki tahrik motorları düşük hızlı ve yüksek torkludur. Bu motorlarda tahrik kasnağı motor milinin ucuna direkt olarak bağlanmaktadır. Motor mili ile kasnak arasında herhangi bir redüktör mekanizması yoktur. Dişlisiz asansör sistemlerinin hızları günümüzde 20 m/s'ye kadar ulaşabilmektedir. Dişlilili asansör motorlarının başlangıç maliyetleri dişlisiz asansör motorlarına göre daha düşük, fakat bakım maliyetleri daha yüksektir. Enerji verimliliği açısından ise dişlisiz motorların üstünlüğü bulunmaktadır. Şekil 1.2'de dişlilili ve dişlisiz asansör motoru örnekleri gösterilmiştir.



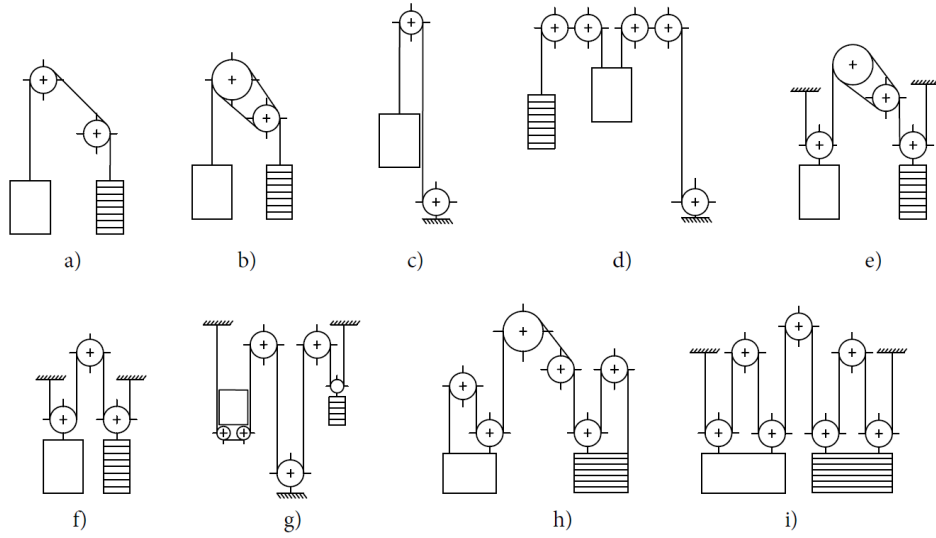
Şekil 1.2. Dişlilili ve dişlisiz asansör motoru örnekleri: a) Montanari Giulio (2014), b) Sag Motor (2016)

Son zamanlarda dişlisiz motorlarda halat yerine kayışlı sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Otis-Gen2, Schindler-Suspension Traction Media, Kone-UltraRope ve ülkemizde de Akar-Beltsys sistemleri kayışlı asansörlere örnek olarak verilebilir ("Traction Elevators", 2018; Akar Beltsys, 2015). Kayışlı asansörler ile motor tahrik kasnaklarının çapları azalmış, daha yumuşak ve sessiz seyahatler elde edilmiş ve enerji verimliliği daha da artmıştır. Şekil 1.3'de kayış tahrikli asansör sistemlerinin bazı örnekleri gözükmektedir.



Şekil 1.3. Kayış tahrikli asansör sistemleri: a) Otis-Gen2 (2019), b) Jardine Schindler (2015)

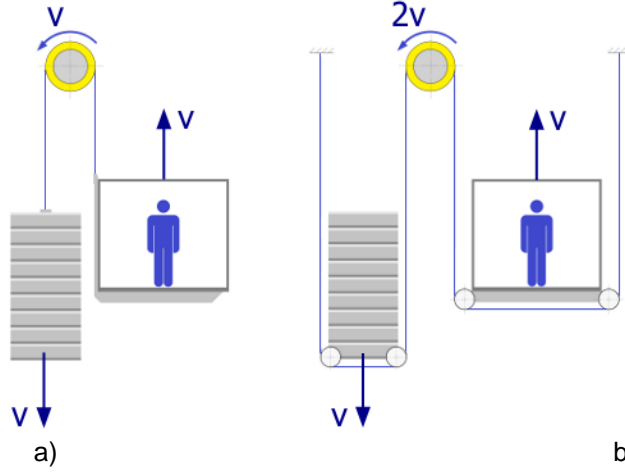
Asansör sistemlerinde taşınacak yüklere ve seçilecek motora göre farklı askı tipleri uygulanmaktadır. Şekil 1.4'de kabin ve karşı ağırlığın birbirine nasıl bağlanabileceğini gösteren farklı askı tipleri, Tablo 1.1'de bu askı tiplerinin özellikleri, Şekil 1.5'te ise en çok kullanılan 1:1 ve 2:1 askı tiplerinin bağlantı şekilleri ve buna bağlı olarak kabin, kasnak ve karşı ağırlık hızları gözükmemektedir. İstenilen kabin hızına bağlı olarak farklı askı tiplerinde dişlisiz motorun hızı da değişmektedir. Dolayısıyla askı tipi seçimi motor tasarımı açısından önemli bir parametredir. Dişlisiz asansör sistemlerinde en sık kullanılan askı tipi 2:1'dir.



Şekil 1.4. Asansörlerdeki askı tipleri (Jeff Holmes, 2018)

Tablo 1.1. Şekil 1.4'deki askı tiplerinin özellikleri (Jeff Holmes, 2018)

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



Şekil 1.5. En sık kullanılan a) 1:1 ve b) 2:1 askı tipleri (Jeff Holmes, 2018)

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

Dişlisiz motorlarda asenkron motorlardaki dişli mekanizmasının ortadan kalkması ile aynı tahrik gücü gereksinimi için %40-%50 oranlarında daha düşük güçlü motor seçilebilmektedir. Böylelikle daha düşük güçlü dişlisiz motorlar ile asenkron motorlarla aynı hız ve taşıma kapasitesine sahip sistemler kurulabilmektedir. Dişlisiz asansör tahrik motorlarının, geleneksel asenkron motorlara göre en önemli üstünlüğü de bu enerji tasarrufudur (Duru ve diğ., 2005). Dişlisiz asansör motorlarında yıllar içinde birçok farklı tasarım piyasaya sürülmüştür. Bu tasarımların çoğu içten rotorlu ve radyal akılı motor yapısını benimserken, bazı tasarımlar dıştan rotorlu veya eksenel akılı olarak da üretilmiştir.

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

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

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

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

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



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

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

Uluslararası patentlerin çoğu, az sayıdaki firmaların çalışmalarından oluşmaktadır. Bu tasarımların bazılarında kasnaklar rotor üzerinde iken (Ningbo Xinda Elevator, 2011; Otis Elevator, 2015) bazılarında kasnak yan tarafta (Changshu Canon, 2016; Mitsubishi Electric, 1990) bulunmaktadır. Fren mekanizmaları ise blok (Swiss Traction Ag, 2005; Ningbo Xinda Elevator, 2011; Changshu Canon, 2016) veya disk (Otis Elevator, 2015) yapılı olarak karşımıza çıkmaktadır. Leroy Somer'in (2005) patentinde çift yönlü dişlere sahip bir stator ve hem içte hem de dışta rotoru bulunan bir motor tasarlanmıştır. İç ve dış rotorlar birbirine bağlıdır, aynı kutup sayısına sahiptir ve beraber hareket etmektedir. Yalıtkan bir destek ile stator ve bobinler bir arada tutulmaktadır. Bu tasarımın amacı motorun güç yoğunluğunu artırmaktır. Buna benzer bir tasarım, Changshu Canon'da (2016) da bulunmaktadır ve farklı olarak hem sağ hem de sol tarafta tahrik kasnakları vardır. Böylelikle tahrik halatları sağdan ve soldan bağlanmakta ve yüksek güçlü bir asansör sistemi ortaya çıkmaktadır. Güç artırma amaçlı bir diğer tasarımda; içte ve dışta stator ve statorların arasında ise bir rotor bulunmaktadır (Leroy Somer, 2009).

Vuruntuyu azaltmak için mıknatısların kademeli yerleştirildiği (Clean Craft KK, 2014), ısınma problemlerini çözmek için mil içinden (Otis Elevator, 2015) veya soğutucu çubuklu (Swiss Traction Ag, 2005) soğutma sistemlerinin bulunduğu tasarımlar tespit edilmiştir. Mıknatısların yataklanması için özel aparatların kullanıldığı (Hyundai Elevator, 2005) veya stator dişlerinin ayrıık üretilerek bir aparatla birleştirildiği (Shenyang Bluelight, 2014) tasarımlar da montaj açısından getirilen bazı yeniliklerdir.

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

- Rotor yapısına göre; İçten rotorlu, dıştan rotorlu olan,
- Fren yapısına göre; Disk frenli (tekli veya çoklu), blok frenli (tekli veya çoklu),
- Kasnak yapısına göre; Harici kasnaklı, rotorunda kasnak olukları bulunan yani rotoru kasnak olan,
- Soğutma sistemine göre; Hava soğutmalı-sıvı soğutmalı, soğutma sistemi olmayan
- Stator-rotor yapısına göre; Tek stator-tek rotoru olan, çift stator-çift rotoru olan, çift stator-tek rotoru olan,
- Kasnak sayısına göre; Tek kasnaklı, çift kasnaklı,
- Mıknatısların yataklamasına göre; Mıknatısları için yataklama bulunan, yataklama olmayan,
- Stator yapısına göre; Stator paketi tek parça olan, stator dişleri ayırık olarak üretilen ve birleştirilen,
- Kaldırma tahrik yapısına göre; Halatla tahrik edilen, kayışla tahrik edilen.

### 3. GEREÇ VE YÖNTEM

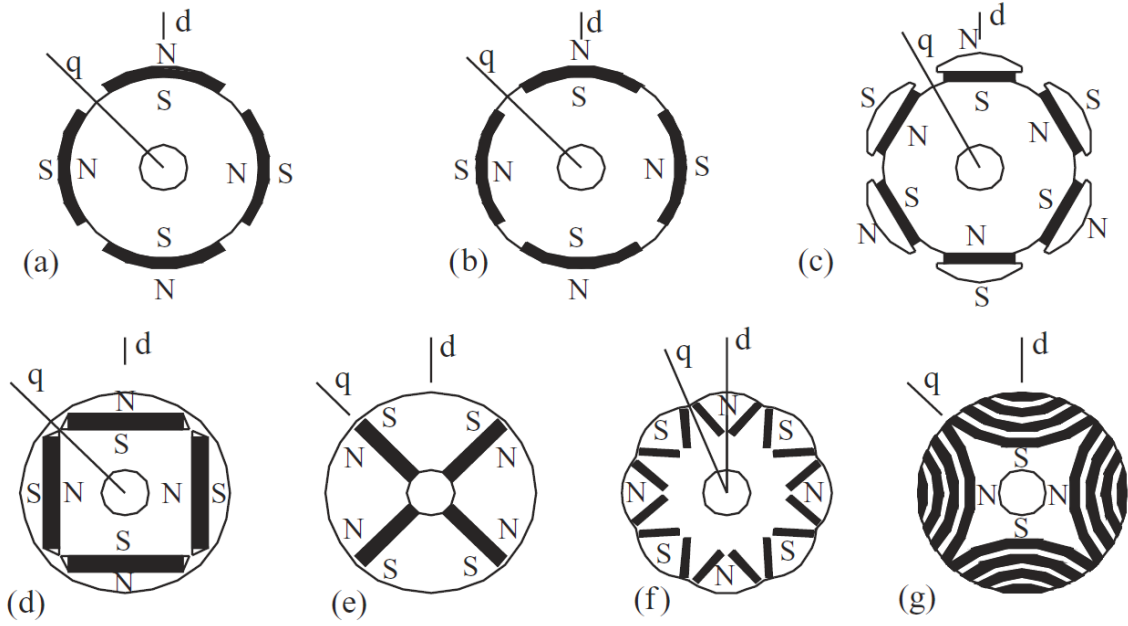
Bu bölümde SMSM'lerin özellikleri, farklı topolojileri, kullanılan malzemeler ve özellikleri, analitik hesaplamaları, manyetik ve elektrik eşdeğer devre modelleri, kayıpları, tasarım süreçleri ve deney düzeneğinin özellikleri yer almaktadır. En uygun oluk-kutup ve kutup aralığı oranları üzerinde özellikle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

#### 3.1. SMSM'lerin Özellikleri ve Sınıflandırılması

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

Literatürde SM motorların farklı sınıflandırmaları mevcuttur. SM motorlar mıknatısların rotordaki yerleşimine göre yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı olarak iki ana gruba ayrılmakla birlikte Şekil 3.1'de en çok kullanılan rotor topolojileri ayrıntılı olarak verilmiştir. Yüzey mıknatıslı motorlarda kutup başına kullanılan mıknatıs miktarı ve dolayısıyla üretilen tork miktarı da artmıştır. Mıknatıs kullanımının artması aynı zamanda motor maliyetlerini de belli ölçülerde artırmaktadır (Aydın, 2012). Yüzey mıknatıslı motorlarda akı, mıknatıs üzerinden doğrudan hava aralığına ve statora geçerken, gömülü mıknatıslı motorlardaki akı ilk önce mıknatıslardan rotor nüvesine geçmektedir.

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

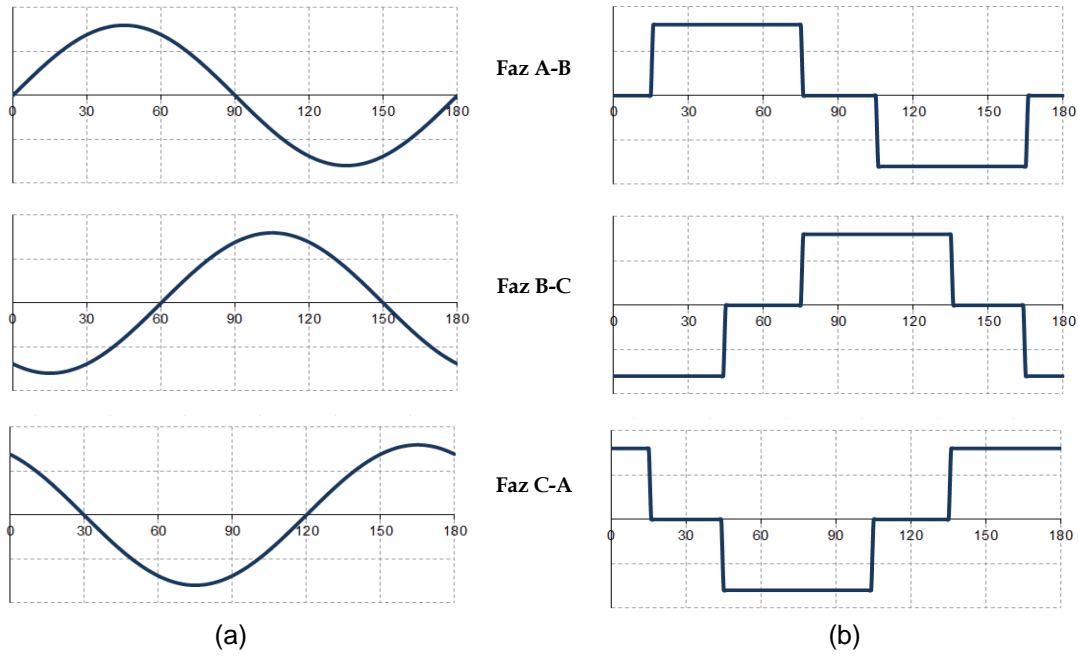


Şekil 3.1. SMSM'lerin rotor topolojileri a) Yüzey mıknatıslı b) Yüzeye gömülü c) Kutup çarıklı (pole shoe rotor) d) Teğetsel gömülü mıknatıslı e) Radyal gömülü mıknatıslı (spoke type) f) V diziliminde kutup başına iki mıknatıslı g) SM senkron relüktans rotor (Pyrhonen ve diğ., 2013)

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

	<b>SMSM</b>	<b>BLDC</b>
Faz uyarım akımları	Sinüoidal	Trapezoidal
Akı yoğunluğu	Sinüoidal	Kare
Faz zıt EMK'sı	Sinüoidal	Trapezoidal
Güç ve Tork	Sabit	Sabit

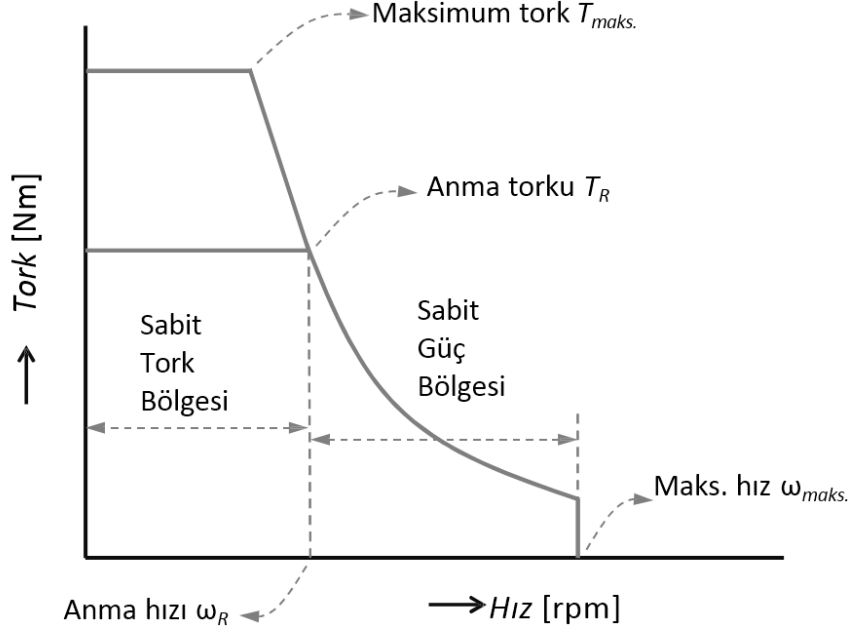
Tablo 3.1'de belirtilen sinüoidal ve trapezoidal zıt EMK dalga şekillerinin faz grafikleri Şekil 3.2'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Zıt EMK dalga şekillerine benzer olarak, SM motorların besleme akımlarının dalga şekilleri de kullanılan sürücüler vasıtasıyla sinüoidal veya trapezoidal olarak üretilmektedir.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



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

SM motorlarda anma (nominal) torku ( $T_R$ ) ve maksimum tork ( $T_{maks.}$ ) olmak üzere iki temel tork parametresi vardır. Ayrıca anma hızı ( $\omega_R$ ) ve maksimum hız ( $\omega_{maks.}$ ) olmak üzere iki temel hız parametresi bulunmaktadır. SM motorların tork-hız karakteristiği Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Anma hızına kadar olan bölge sabit tork bölgesi, anma hızı ile maksimum hız arasında kalan bölge ise sabit güç bölgesi olarak adlandırılmaktadır. SM motorlar anma torkuna kadar olan sabit tork bölgesinde herhangi bir termal problemle karşılaşmadan yüklenebilmektedir. Sabit güç bölgesinde ise çıkış torku düşme eğilimindedir ve hız artışına bağlı olarak çıkış gücü sabit kalmaktadır. SM motorların bir diğer önemli bir parametresi motorun aşırı yük kapasitesini gösteren maksimum yük noktasıdır ve bu parametre özellikle kalkış anında motorun daha yüksek tork ürettiğini göstermektedir (Aydın, 2012).

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



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

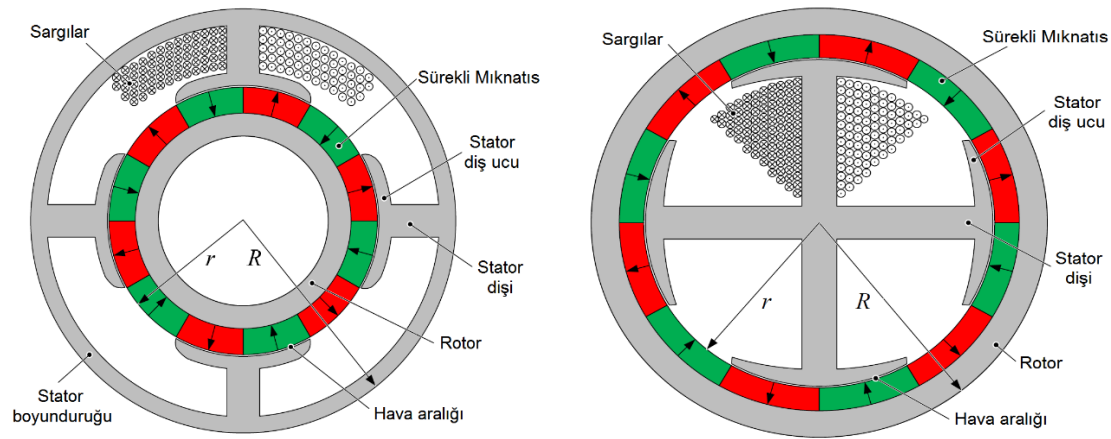
### 3.1.1. İçten ve dıştan rotorlu SMSM'ler

SMSM'lerin dönen kısımları rotor (endüvi-armatür), sargıların yer aldığı kısımları ise stator (endüktör) olarak adlandırılmaktadır. Geleneksel motorların çoğu içten rotorlu motor yapısına sahip iken teker içi motorlar, fan motorları ve rüzgar türbinleri dıştan rotorlu motor yapısına sahiptir. İçten rotorlu motorlarda hareket enerjisi, rotordan bağlı olduğu mile ve milden de kayış, kasnak, zincir, dişli vb. gibi hareket iletim elemanları ile yüke aktarılmaktadır. Dıştan rotorlu motor uygulamalarında ise rotor doğrudan hareketin iletileceği birime bağlanmakta ve herhangi bir hareket aktarma elemanına ihtiyaç duyulmamaktadır. Rotor montajı teker içi motorlarda doğrudan tekerlek jantına, fanlarda doğrudan pervaneye, rüzgar türbininde ise doğrudan kanatlara yapılmaktadır. Böylelikle bu sistemler kompakt bir yapıya kavuşmakta ve hareket aktarma elemanlarından kaynaklanan enerji kayıpları ve ek maliyetler ortadan kaldırılmaktadır. Şekil 3.4'te içten ve dıştan rotorlu motor topolojileri gösterilmiştir. İçten ve dıştan rotorlu motorların birbirine göre bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Dıştan rotorlu motor yapısının sunduğu avantajlar şöyle sıralanabilir (Allied Motion, 2016):

- Yüksek ataletlidirler ve vuruntu momentleri çok düşük seviyededir.
- Hava boşluğu yarıçapının büyük olması, yüksek çıkış torklarının elde edilmesini sağlar.
- Hareket birimi rotora doğrudan monte edilebilir ve kompakt bir yapı ortaya çıkar.
- Yüksek atalet, daha kararlı düşük hız performansı sağlar.
- Yüksek moment, düşük vuruntu ve alçak çalışma sesleri dolayısıyla sessiz ortamlar için idealdir.

- Dıştan rotorlu tasarımlar, aynı performans seviyesi için içten rotorlu tasarımlardan aksenel olarak daha kısadır. Dolayısıyla dıştan rotorlu tasarımlar içten rotorlu tasarımlardan genellikle %15 daha hafiftir (Meier, 2008).
- Stator dişleri dışarı doğru baktığından sargılar içten rotorlu tasarımlara göre daha kolay sarılabilmektedir (Martinez, 2012).

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



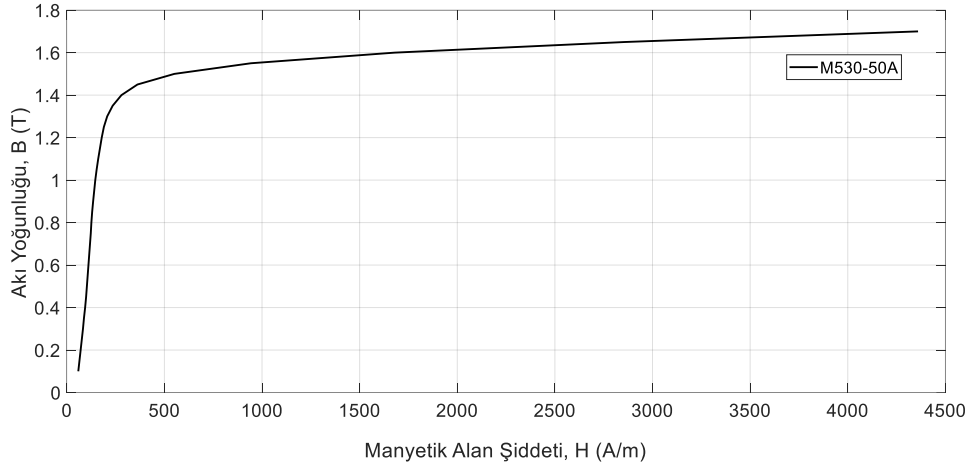
Şekil 3.4. İçten ve dıştan rotorlu motor topolojileri (Reichert ve diğ., 2009)

### 3.1.2. Stator ve sargılar

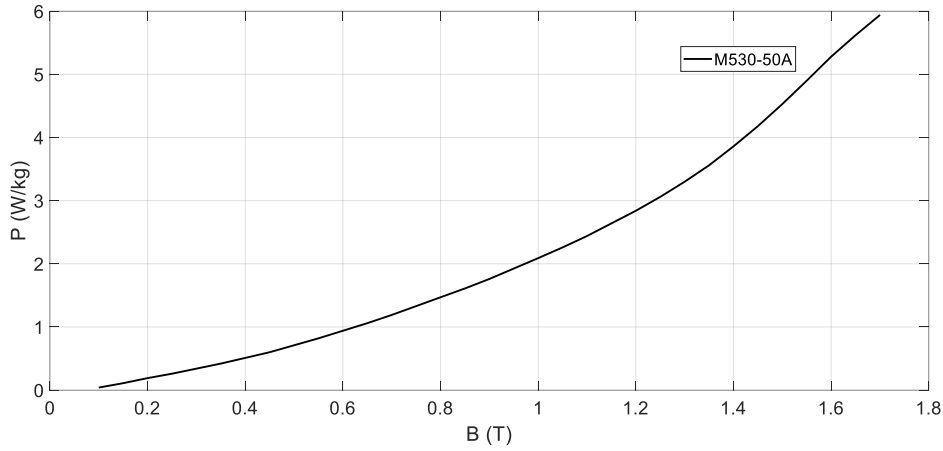
SMSM'lerde stator, makinanın sabit yani duran kısmıdır. Stator, sargıların sarıldığı paketlenmiş ve preslenmiş çelik saç nüvelerden meydana gelmektedir (Yıldız, 2009). Saç nüveler silisli yapıdadır. Bu sayede manyetik kayıplar minimuma indirgenir ve saçların manyetik özellikleri maksimum seviyeye çıkarılmış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

M250-M350 aralığındaki kg başına watt kaybı düşük olan saçlar araştırılmış fakat prototip üretim için uygun olan levha formunda saçlardan bulunamamıştır. Tespit edilen firmaların (Doğuş kalıp, Doğusan Metal, Celsac, Sermetalsac, Arena Metal) genellikle rulo formundaki saçları seri üretim yapan firmalara sattıkları gözlenmiştir. Bu proje çalışmasındaki prototip motor için levha formunda tedarik edilebilen silisli saçlar M530-50A olmuştur. M530-50A tipi silisli saçın manyetik özelliklerini gösteren B-H grafiği Isovac (2018) firmasından alınan değerlere göre çizdirilmiş ve Şekil 3.5'te paylaşılmıştır. Şekil 3.6'da ise M530-50A tipi silisli

saçın 50 Hz'deki demir kayıpları grafiği Watt/Kg cinsinden verilmiştir. Eğrinin büküm bölgesinden sonraki bölümü doyum bölgesi olarak adlandırılmakta ve bu bölgede manyetik alan şiddeti ne kadar artırılırsa artırılсын akı yoğunluğunda bir değişim olmamaktadır. Bu yüzden motorların optimum çalışma noktası, B-H eğrisinin büküm bölgesidir.



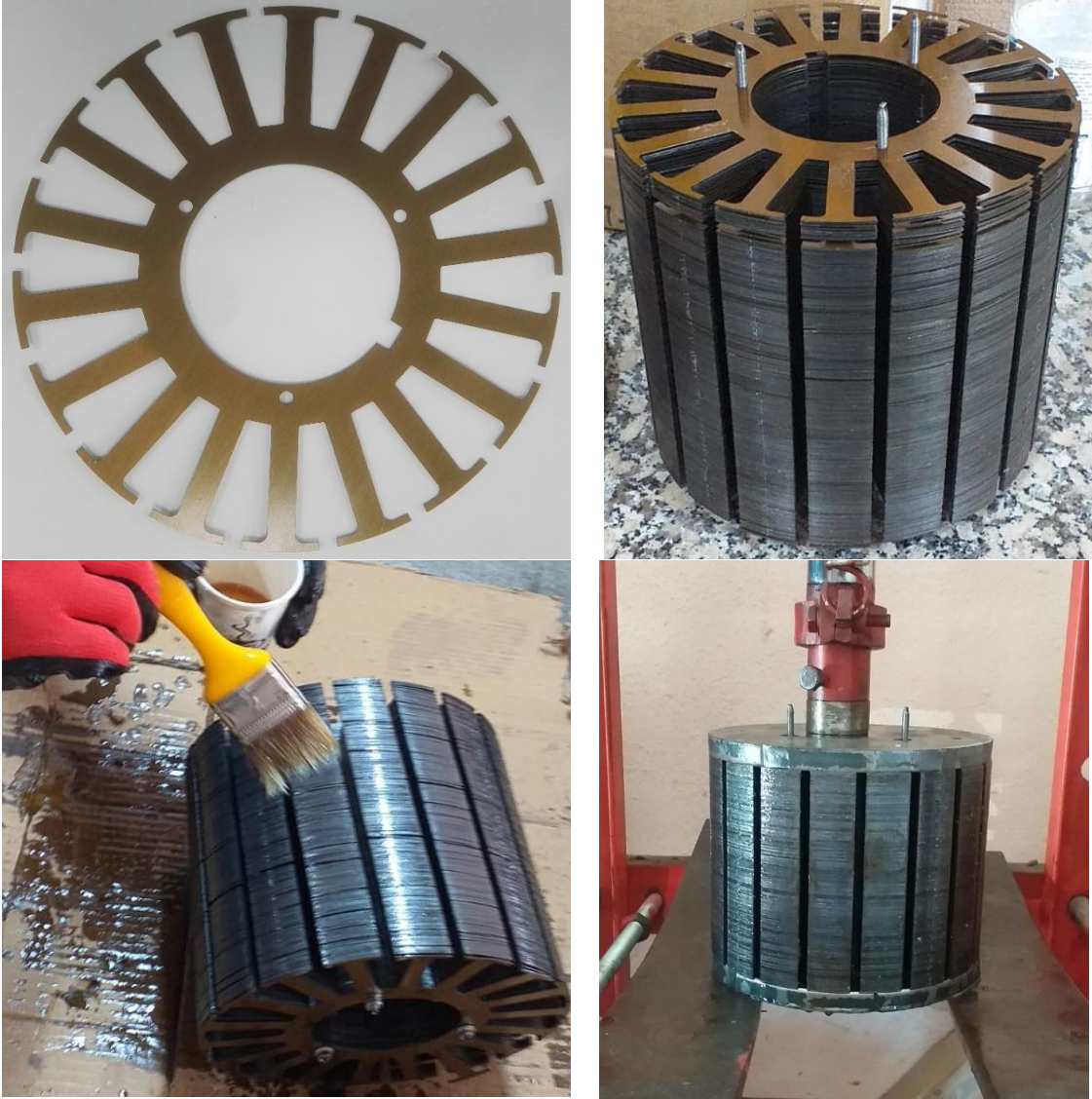
Şekil 3.5. M530-50A tipi silisli saçın B-H grafiği



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

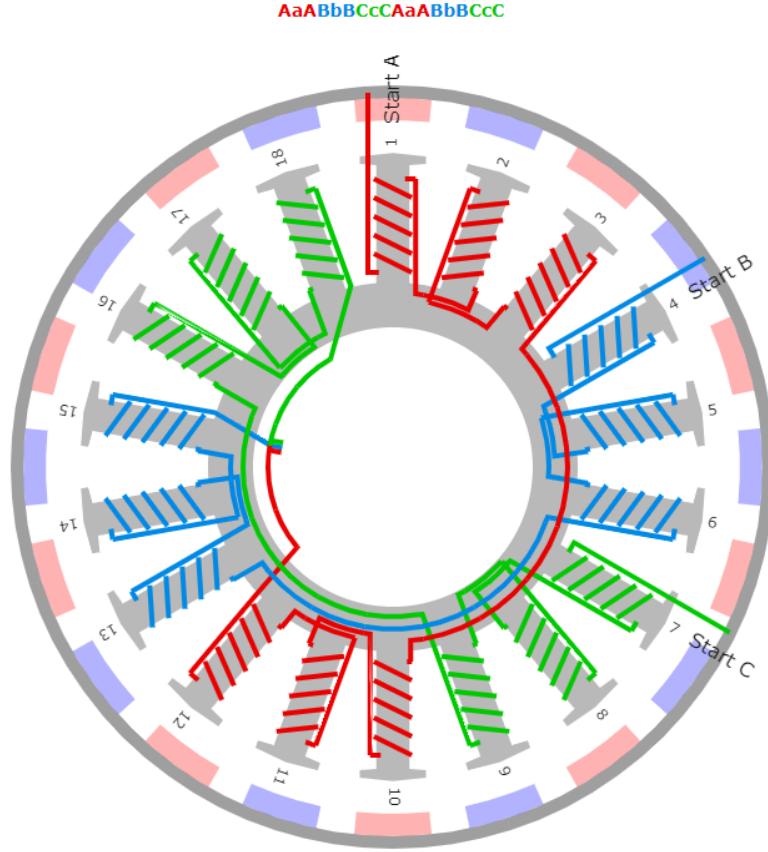
Bu proje çalışması kapsamında, saç nüveler daha az maliyetli olan ve istenilen derecede yüzey hassasiyetlerini verebilen lazer yöntemi ile kesilmiştir. Kesilen nüve parçaları millerden geçirilerek toplanmıştır. Ardından verniklenip preslendikten sonra, stator paketi son halini almıştır. Şekil 3.7'de lazerle kesilmiş silisli saçlar ve bu saçlara uygulanan işlemler gösterilmiştir. M530-50A tipi silisli saç Ansys Maxwell (2019) yazılımında tanımlı olmadığından, analizlerde BH eğrisi ve Watt/kg kaybı bu malzemeye çok yakın olan JFE Steel 50JNE470 tipi malzeme kullanılmıştır.





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

Bu proje çalışmasında fazlar yıldız bağlanmış ve çift katmanlı konsantre sarım yapılmıştır. Şekil 3.8’de prototip motorun Niessen (2013)’in tasarladığı sargı şeması aracı kullanılarak türetilmiş sarım şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Üretilen prototip motorun çift katmanlı konsantre sarım şeması

Sarım işlemi yapılırken sargı yönlerine dikkat edilmelidir. Sağ elin dört parmağı akım yönünü gösterirken başparmak stator dışlarındaki akı yönünü göstermektedir. Örneğin 1 numaralı stator dışındaki akı yönü statorun içine doğru iken, 2 numaralı dışteki akı yönü statorun dışına doğrudur. Manyetik alan kuvvetinin düzgün ve sıralı bir şekilde üretilebilmesi için birbirini izleyen stator dışlarındaki akı yönlerinin zıt yönlerde olması gerekmektedir. Bu yüzden stator sargılarının da bu doğrultuda yapılması gerekmektedir. Hatalı sarım işlemleri sonucu akı yönleri istenilen yönlerde olmayacak ve motorun dönüşünde problemler ortaya çıkacaktır. Bu yüzden sargı yönleri motorun düzgün çalışabilmesi için en önemli adımlardan biridir. Şekil 3.9'da stator paketinin çift katmanlı sarım aşamaları gözükmemektedir. Her bobindeki sargı uçları Şekil 3.8'deki sarım yönlerine dikkat edilerek birleştirilmiş ve sarım işlemi sonucunda 3 faz için 6 adet sargı ucu elde edilmiştir. Yıldız bağlantı olması için motor sargılarının birer ucu kısa devre yapılmış ve diğer uçlar da sürücü çıkışına bağlanmıştır.



Şekil 3.9. Çift katmanlı sarım yapılmış stator paketi

### 3.1.3. Rotor

SMSM'nin rotoru üzerinde sürekli mıknatıslar bulunmakta ve mıknatıs sayıları yani kutup sayıları uygulama yerine göre değişebilmektedir. Kutup sayısının artırılması daha yüksek tork üretilmesini sağlarken maksimum hızın düşmesine sebep olmaktadır. İçten rotorlu tasarımlarda, özellikle yüksek hızlarda rotor üzerindeki mıknatısların merkezkaç kuvvetiyle yerlerinden çıkma tehlikesi bulunmaktadır. Bu yüzden yüksek hızlarda çalışacak içten rotorlu



yapılarda yüzey mıknatıslı yerine yüzeye gömülü veya gömülü mıknatıslı rotor yapısı tercih edilmektedir. Dıştan rotorlu SMSM tasarımlarında mıknatıslar dış taraftaki rotorun iç yüzeyinde yer almaktadır. Böylelikle içten rotorlu motorlarda karşımıza çıkan merkezkaç etkisiyle savrulma riski ortadan kalkmış olmaktadır. İçten rotorlu tasarımlarda sargıların ısı statordan motor gövdesine geçebilmekte ve böylelikle motor ısı gövdeden dışarı atılmaktadır. Dıştan rotorlu motorlarda stator iç tarafta bulunduğu için, eğer ek bir soğutma sistemi yoksa sargılardaki ısının uzaklaştırılması mümkün olamamaktadır. Bu durum stator sargılarının ısınmasına sebep olmakta ve motorun ısı dağılım oranını düşürmektedir. Stator sargılarının konumu nedeniyle, dıştan rotorlu tasarımlar daha düşük çalışma devirlerinde ve daha düşük nominal akımlarda çalıştırılırlar. Buna karşın dıştan rotorlu motor yapısının en büyük avantajı düşük vuru momentleridir (Gambhir ve Jha, 2013).

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

#### **3.1.4. Sürekli (Kalıcı-Daimi) Mıknatıslar**

Sürekli mıknatıslar elde edildikleri malzemeler, çalışma performansları ve maliyetleri gibi çeşitli kısıtlara göre sınıflara ayrılır. Sürekli mıknatıs malzemeler kimyasal kompozisyonlarına göre üç ana grupta incelenebilir (Yıldız, 2009). Bunlar seramik ferritler, metal ve nadir toprak mıknatıslarıdır. Çelik sürekli mıknatıslar, ilk yapılan metal mıknatıslardandır. Daha sonra değişik alaşımlarla Olatin-Kobalt, Bakır-Nikel, Demir-Kobalt-Vanadyum mıknatıslar yapılmıştır. Bu sınıf mıknatıslar genelde Nikel, Alüminyum ve Kobalt'ın alaşımları ile yapılırlar ve ferrit mıknatıslara göre daha pahalıdır. Metal mıknatıslar içerisinde en uygun mıknatıslar AlNiCo (Aluminyum-Nikel-Kobalt) mıknatıslardır. Ferrit mıknatıslar toz metalürjisi yöntemiyle üretilmekte ve seramik yapılarından dolayı sert ve kırılabilir olmaktadır (Ayçiçek, 2009).



Şekil 3.10. Rotor ve mıknatısların rotor üzerine yapıştırılma aşamaları

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

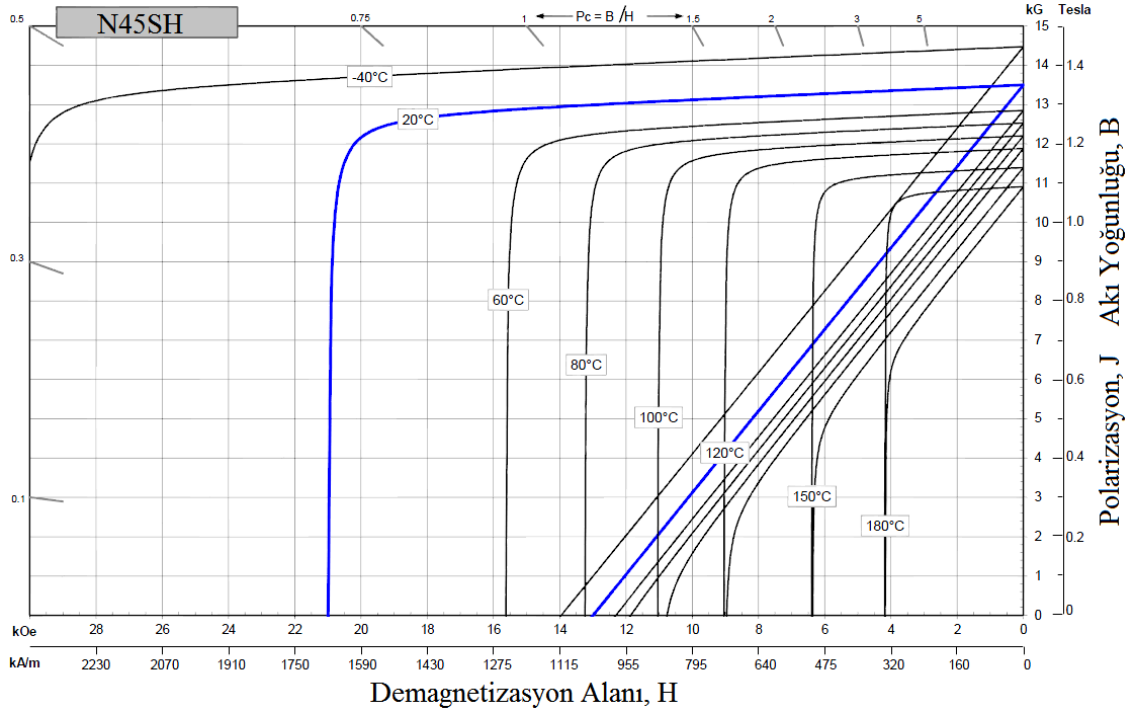
SmCo alaşımlı kalıcı mıknatıslar birçok uygulamada elektromıknatısların yerine geçmiştir. Fakat maliyet bakımından hala elektromıknatıslardan pahalıdır. Daha ucuz bir nadir toprak

mıknatıs çeşidi ise NdFeB'dir. NdFeB tipi sürekli mıknatıslar en yaygın olarak kullanılan mıknatıs çeşididir. NdFeB mıknatıslar üretim yöntemlerine göre üç şekilde sınıflandırılabilir. Bunlar; sinterleme, polimer bağlama ve ısı deformasyonudur (Ayçiçek, 2009). Neodimyum mıknatısların kullanım sıcaklıkları tiplerine göre farklılık göstermektedir. Mıknatısların ortam sıcaklığı kullanım sıcaklığının üzerine çıkarsa mıknatıslarda kararsız bir durum ortaya çıkar ve manyetik özelliklerini kaybederler. Bir kez manyetik özelliğini kaybeden mıknatıs, tekrar oda sıcaklığına gelse bile artık işlevini yerine getiremez. Tablo 3.2'de NdFeB mıknatısların fiziksel özellikleri gözükmemektedir.

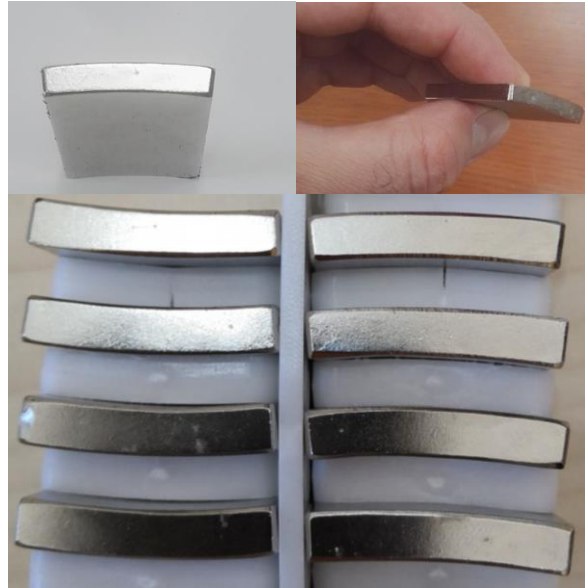
Tablo 3.2. Sinterlenmiş NdFeB mıknatısların fiziksel özellikleri (Advanced Magnets, 2019)

Karakteristik	Simge	Birim	Değer
Yoğunluk	$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	7.3-7.5
Vickers Sertliği	Hv	MPa	500-650
Basma Dayanımı	$\sigma_b$	N/mm <sup>2</sup>	1000-1100
Çekme Dayanımı	$\sigma_{\varphi}$	N/mm <sup>2</sup>	80-90
Eğilme Dayanımı	$\sigma_e$	N/mm <sup>2</sup>	200-400
Termal Genleşme Katsayısı (Mıknatıslanma yönüne paralel)	C//	10 <sup>-6</sup> /°C	3-4
Termal Genleşme Katsayısı (Mıknatıslanma yönüne dik)	C^	10 <sup>-6</sup> /°C	1-3
Elektriksel Direnç	r	$\mu \Omega \cdot \text{cm}$	110-170
Termal İletkenlik	$\lambda$	W/(m·°C)	8-10
Elastisite (Young) Modülü	E	GPa	150-200

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



Şekil 3.11. N45SH tipi sürekli mıknatısın manyetik özellikleri (Arnold Magnetic, 2017)

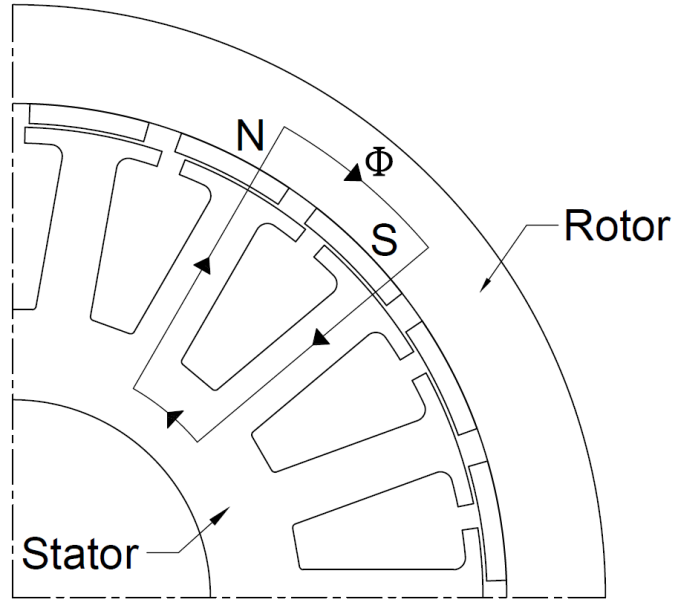


Şekil 3.12. Prototip motorda kullanılan N45SH tipi eğri mıknatıslar

### 3.2. SMSM'nin Manyetik Devre Modeli

Dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik devresi, manyetik akı  $\Phi$ 'nin bir stator nüvesinden hava aralığına, mıknatısa, rotora, diğer mıknatısa, tekrar hava aralığına ve son olarak da diğer stator nüvesine geçmesi ile tamamlanmaktadır. Şekil 3.13'te dıştan rotorlu SMSM'de manyetik akının izlediği yol gösterilmiştir. Burada, yan yana olan mıknatısların magnetizasyon yönlerinin

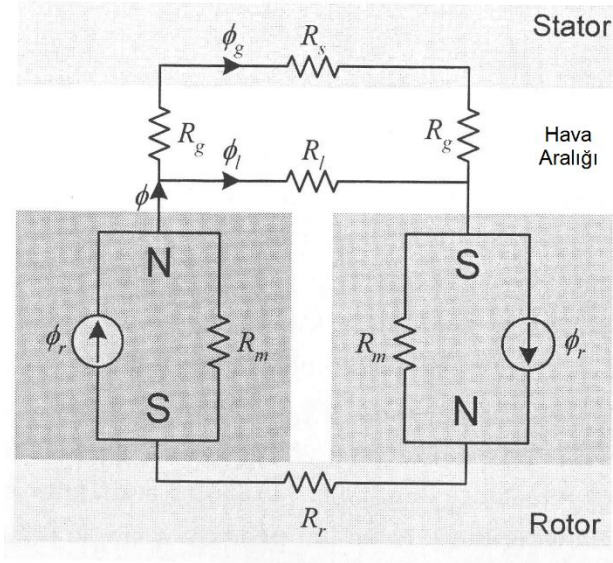
(manyetik polaritelerinin) N-S, S-N olarak sıralı bir şekilde gittiğine dikkat edilmelidir. Bir elektrik motorunun tasarlanması esnasında, motorun manyetik devresinin modeli dikkate alınmalıdır (Çağan, 2015). Bu adım, gerekli olan hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun ve çalışma noktasının (sürekli mıknatısın demagnetizasyon eğrisi ile yük eğrisinin kesişimi) bulunması için büyük öneme sahiptir.



Şekil 3.13. Dıştan rotorlu SMSM'de manyetik akının izlediği yol

Dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik eşdeğer devresi Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Sürekli mıknatıslar kendi içlerinde akı oluşturdukları için akı kaynağı olarak modellenmiş ve  $\phi_r$  ile gösterilmiştir. Mıknatıs relüktansı  $R_m$ , manyetik polariteye dikkat edilerek gösterilmiştir. Rotor ve statorun relüktansları sırasıyla  $R_r$  ve  $R_s$ , hava aralığı relüktansı ise  $R_g$  olarak gösterilmiştir. Akı, mıknatıslardan hava boşluğuna, oradan da stator vasıtasıyla diğer kutba ulaşır. Bir mıknatıstan diğerine doğru akan sızıntı akısı relüktansı ise  $R_l$  olarak modellenmiştir. Mıknatıs akısı  $\phi$ , hava aralığı akısı  $\phi_g$  ve sızıntı akısı  $\phi_l$ 'dir (Hanselman, 2003). Hava aralığı kalınlığı ise  $g$  ile gösterilmektedir.





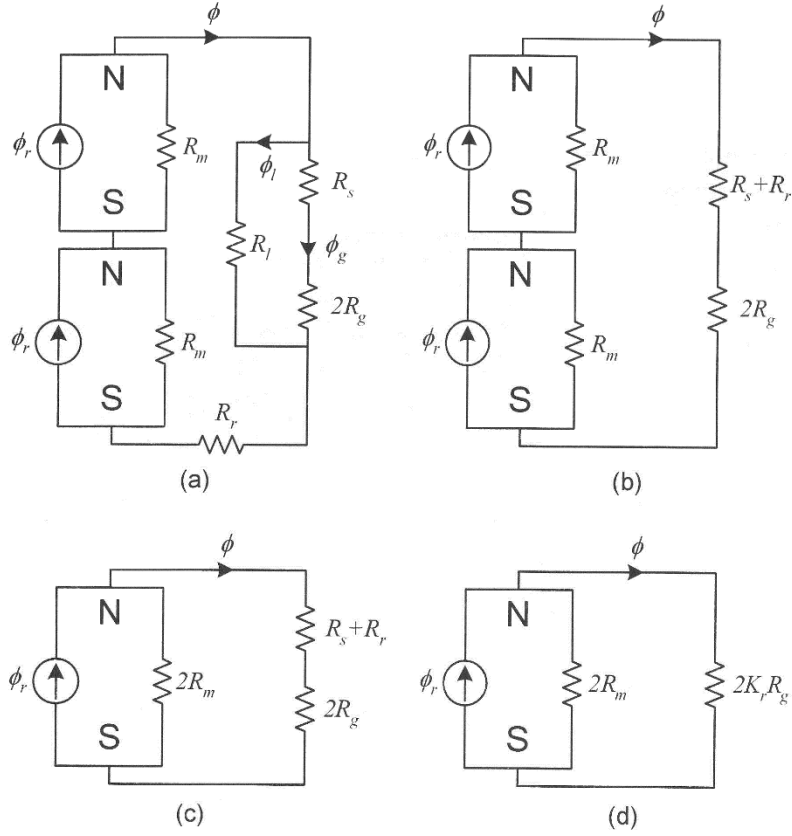
Şekil 3.14. SMSM'nin manyetik eşdeğer devresi (Hanselman, 2003)

Zıt EMK kuvveti belirlenmeden önce SMSM'nin manyetik eşdeğer devresi, hava aralığı akı yoğunluğu olan  $B_g$ 'yi elde etmek için çözümlenmelidir. Şekil 3.14'teki devre, daha kolay bir çözüm yapılabilmesi için Şekil 3.15'teki adımlar izlenerek sadeleştirilebilir. Sadeleştirme işleminde,  $R_l$  sızıntı akı relüktansı çok küçük ve analitik olarak elde edilmesi zor bir değer olduğundan (Hanselman, 2003), bu değer yerine, hava aralığı akısı denklem 3.1'deki gibi  $K_l$  sızıntı faktörü ile çarpılmıştır. Sızıntı faktörünün değeri 1'den çok az küçüktür, yani neredeyse 1'e yakındır.

$$\phi_g = K_l \phi \quad (3.1)$$

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

Manyetik eşdeğer devrenin en sade hali olan Şekil 3.15 (d)'deki mıknatıs akısı  $\phi$ , denklem 3.2'deki gibi ifade edilebilir. Mıknatıs ve hava aralığı relüktansları olan  $R_m$  ve  $R_g$ 'nin sırasıyla denklem 3.3 ve denklem 3.4'teki gibi olduğu bilinmektedir. Bu denklemlerdeki  $h_m$  mıknatıs kalınlığını,  $A_m$  mıknatıslanma yönüne dik olan mıknatıs kesit alanını,  $\mu_r$  mıknatısın bağlı manyetik geçirgenliğini,  $\mu_0$  ise boşluğun manyetik geçirgenliğini temsil etmektedir.  $g'$  Carter katsayısıyla düzeltilmiş hava aralığı kalınlığını ( $g.k_c$ ),  $A_g$  ise hava aralığı kesit alanını ifade etmektedir (Hanselman, 2003).



Şekil 3.15. Manyetik eşdeğer devrenin sadeleştirilmesi (Hanselman, 2003)

$$\phi = \frac{2R_m}{2R_m + 2K_r R_g} \phi_r = \frac{1}{1 + K_r \frac{R_g}{R_m}} \phi_r \quad (3.2)$$

$$R_m = \frac{h_m}{\mu_R \mu_0 A_m} \quad (3.3)$$

$$R_g = \frac{g'}{\mu_0 A_g} \quad (3.4)$$

Verilen eşitliklere göre hava aralığı akısı denklem 3.5'deki gibi yazılabilmektedir. Akı konsantrasyon faktörü denklem 3.6'da, mıknatıs akı yoğunluğu denklem 3.7'de, hava aralığı manyetik akı yoğunluğu denklem 3.8'de, manyetik iletkenlik katsayısı ise denklem 3.9'da verilmiştir (Hanselman, 2003).

$$\phi_g = K_l \phi = \frac{K_l}{1 + K_r \frac{\mu_R g A_m}{h_m A_g}} \phi_r \quad (3.5)$$

$$C_\phi = \frac{A_m}{A_g} \quad (3.6)$$

$$B_r = \frac{\phi_r}{A_m} \quad (3.7)$$

$$B_g = \frac{\phi_g}{A_g} \quad (3.8)$$

$$P_c = \frac{h_m}{g C_\phi} \quad (3.9)$$

Tüm denklemler düzenlenirse, hava aralığından geçen hava aralığı akı yoğunluğu  $B_g$  denklem 3.10'daki gibi yazılabilmektedir. Eğer bir SMSM denklem 3.10'daki hava aralığı akı yoğunluğuna göre tasarlanacaksa;  $K_l$  sızıntı akısı faktörü 0.9 ile 1.0 arasında,  $K_r$  relüktans faktörü 1.0 ile 1.2 arasında, akı konsantrasyon faktörü  $C_\phi$  ise 1.0 olarak alınabilir. Bu durumda değiştirilebilecek tek parametre manyetik iletkenlik katsayısı  $P_c$  olacaktır. Yani mıknatısların ve hava aralığının kalınlıkları, motor tasarım aşamasında önemli bir role sahiptir (Çağan, 2015).

$$B_g = \frac{K_l C_\phi}{1 + K_r \frac{\mu_R}{P_c}} B_r \quad (3.10)$$

### 3.3. Oluk-Kutup Oranının Seçimi

Yüksek performanslı bir motor elde etmek için en önemli parametrelerden biri oluk-kutup oranıdır. Bu oranı belirlerken, dengesiz manyetik kuvvetlerin olmamasına dikkat edilmelidir. Denklem 3.11'de sunulan kutup-faz başına oluk sayısı ( $q$ ) doğru seçilmediğinde, oluk ve sargıların asimetrik yerleşiminden kaynaklanan belirgin dengesiz manyetik kuvvetler ortaya çıkmaktadır (Tanç, 2014). Denklem 3.11'deki  $N_{oluk}$  oluk sayısını,  $p$  kutup sayısını,  $n_f$  ise faz sayısını göstermektedir.

$$q = \frac{N_{oluk}}{p \cdot n_f} \quad (3.11)$$

Bir motordaki kutup-faz başına düşen oluk sayısı 1'den küçükse bu tip motorlar kesirli oluk sargılı motorlar olarak adlandırılmaktadır.  $q$  değerinin 1/2 ile 1/3 arasında olduğu tasarımlar, genellikle yüksek performans üretmekte, vuru momentleri düşük olmakta ve yüksek sargı faktörü ( $k_{sf}$ ) değerlerine sahip olmaktadır (Salminen, 2004). Üretilecek motorun sargı faktörü

temel bileşenin yüksek olması gerekmektedir. Sargı faktörü, faz sargılarındaki etkin olan sarımlar olarak tanımlanmaktadır. Sargı faktörü değeri yüksek olduğunda akım yoğunluğu değeri daha düşük olmakta, böylelikle ısınma, ek kayıplar ve üretilen harmonikler azalmaktadır. Tablo 3.3 incelendiğinde, kutup-faz başına oluk sayısı olan  $q$  değeri 0.5 ve daha küçük olan motorların sargı faktörlerinin istenilen yüksek seviyelerde olduğu görülmüştür. Tablo 3.3'ün satırlarında üstte yer alan değerler  $q$  değerlerini, altta yer alan değerler ise  $k_{sf}$  değerlerini göstermektedir.

Motor akı dağılımının ve moment yoğunluğunun yüksek olması için, oluk ve kutup sayıları mümkün olduğunca birbirine yakın tutulmaya çalışılır. Dengesiz manyetik kuvvetlerin ortaya çıkmaması için faz başına düşen oluk sayısının ( $N_{oluk}/n_f$ ) çift olması gerekmektedir. Buna göre, oluk ve kutup sayıları arasında denklem 3.12'deki gibi bir oran en uygun motor tasarımlarını vermektedir.

$$N_{oluk} = p \pm 2 \quad (3.12)$$

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

Motor tasarımında dikkat edilmesi gereken bir diğer faktör vuruğu momentidir. Vuruğu momenti farklı bir başlık altında incelenecek olsa da, bu bölümde oluk-kutup oranı ile ilişkisinden bahsedilecektir. Vuruğu momenti, rotordaki sürekli mıknatısların sağladığı uyarma akısı ile statorun manyetik direnci arasındaki etkileşimden meydana gelmektedir (Dosiek ve Pillay, 2007). Vuruğu momenti frekansı, kutup sayısı ve oluk sayısının en küçük ortak katı (EKOK) olan  $k_{np}$  ile orantılıdır (Cros ve Viarouge, 2002). Motorun vuruğu momentinin düşük olması için, Tablo 3.4'de EKOK ( $N_{oluk}, p$ ) değeri büyük olan bir oluk/kutup kombinasyonu belirlenmelidir.

Tablo 3.3. Kutup-faz başına oluk sayısı ( $q$ ) ve sargı faktörü ( $k_{sf}$ ) tablosu (Tanç, 2014)

		$q, k_{sf}$																		
Notuk/p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
6	0.5 <b>.866</b>		0.25 <b>.866</b>				0.125 <b>.866</b>		0.1 <b>0.866</b>				0.07 <b>0.866</b>		0.062 <b>0.866</b>				0.05 <b>0.866</b>	
9		0.5 <b>.866</b>	0.375 <b>.945</b>	0.3 <b>.945</b>	0.25 <b>.866</b>						0.125 <b>0.866</b>	0.115 <b>0.945</b>	0.107 <b>0.945</b>	0.1 <b>0.866</b>						0.07 <b>0.866</b>
12			0.5 <b>.866</b>	0.4 <b>.966</b>		0.285 <b>0.966</b>	0.25 <b>0.866</b>								0.125 <b>0.866</b>	0.117 <b>0.933</b>		0.105 <b>0.933</b>	0.1 <b>0.866</b>	
15				0.5 <b>.866</b>		0.357 <b>0.951</b>	0.31 <b>0.951</b>		0.25 <b>0.866</b>										0.125 <b>0.866</b>	
18					0.5 <b>.866</b>	0.42 <b>0.902</b>	0.375 <b>0.945</b>		0.3 <b>0.945</b>	0.27 <b>0.902</b>	0.25 <b>0.866</b>									
21						0.5 <b>0.866</b>	0.437 <b>0.870</b>		0.35 <b>0.953</b>	0.318 <b>0.953</b>		0.269 <b>0.89</b>	0.25 <b>0.866</b>							
24							0.5 <b>0.866</b>		0.4 <b>0.966</b>	0.36 <b>0.958</b>		0.307 <b>0.95</b>	0.285 <b>0.966</b>		0.25 <b>0.866</b>					0.19 <b>0.943</b>
27		$q \geq 1$						0.5 <b>0.866</b>	0.45 <b>0.877</b>	0.36 <b>0.958</b>	0.375 <b>0.945</b>	0.346 <b>0.954</b>	0.321 <b>0.954</b>	0.3 <b>0.945</b>	0.281 <b>0.915</b>	0.264 <b>0.877</b>	0.25 <b>0.866</b>			
30									0.5 <b>0.866</b>	0.45 <b>0.874</b>		0.384 <b>0.936</b>	0.357 <b>0.951</b>		0.312 <b>0.951</b>	0.294 <b>0.936</b>		0.263 <b>0.874</b>	0.25 <b>0.866</b>	
33										0.5 <b>0.866</b>		0.423 <b>0.903</b>	0.392 <b>0.928</b>		0.343 <b>0.954</b>	0.323 <b>0.954</b>		0.289 <b>0.928</b>	0.275 <b>0.903</b>	
36											0.5 <b>0.866</b>	0.46 <b>0.867</b>	0.428 <b>0.902</b>	0.4 <b>0.966</b>	0.375 <b>0.945</b>	0.35 <b>0.953</b>		0.315 <b>0.953</b>	0.3 <b>0.945</b>	0.285 <b>0.966</b>

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

Tablo 3.4 Oluk ve kutup sayısı kombinasyonlarının en küçük ortak katları (Tanç, 2014)

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

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

Tablo 3.5. Oluk ve kutup sayısı kombinasyonlarının en büyük ortak bölenleri (Tanç, 2014)

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

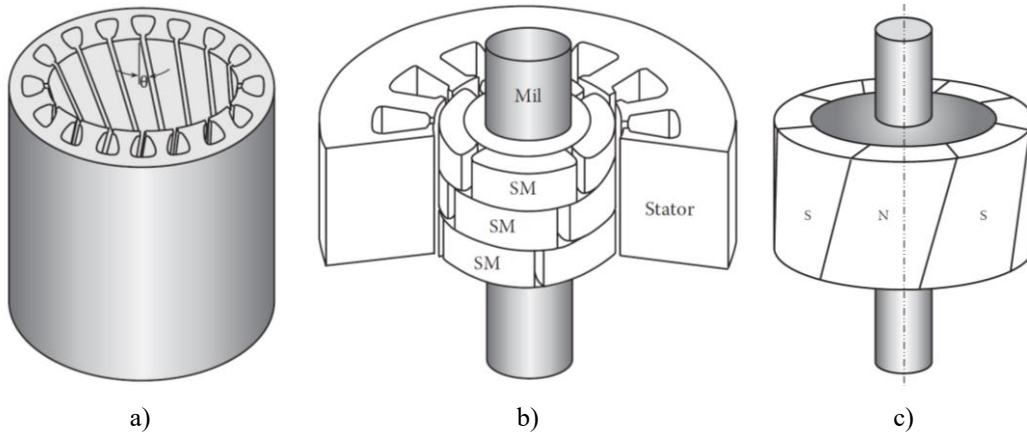
Tasarımı uygun olmayan kombinasyonlar  $k_{sr} \leq 0.866$

Motorun oluk ve kutup sayılarının en büyük ortak böleni (EBOB), sargı dizilimindeki simetri sayısını temsil etmektedir (Meier, 2008). Bu değer, motor simetrisinin ve radyal kuvvetlerin göstergesi olup çift sayı olduğunda motor net radyal kuvveti düşük olmaktadır. EBOB ( $N_{oluk}, p$ ) değerinin bir olduğu durumlarda (genellikle  $N_{oluk} = p \pm 1$  olduğu durumlarda) dengesiz

manyetik kuvvetler ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla net radyal kuvvetlerin düşük olması için, oluk/kutup sayılarının EBOB'u olan  $b_{np}$ 'nin çift sayı olduğu tasarımlar seçilmelidir (El-Refaie ve Jahns, 2005). Tablo 3.5'te EBOB (Noluk, p) değerleri gösterilmiştir. Verilen bilgiler ışığında, prototip motorun boyutları da dikkate alınarak oluk/kutup oranının 18/20 olmasına karar verilmiştir. Böylelikle  $q$  değeri 0.3,  $k_{sf}$  değeri 0.945, EKOK değeri 180, EBOB değeri ise 2 olmaktadır.

### 3.4. Vuruntu Momenti

Asansör sistemlerinde konforlu seyahatler elde etmek için, tahrik motorlarının titreşim ve gürültüsü minimum değerlere düşürülmelidir. Motorlardaki titreşim ve gürültünün en önemli nedeni, vuruntu momenti ve tork dalgalanmalarıdır. Çıkış torkunun kalitesi ve düzgünlüğü, vuruntu momentinin ve zıt EMK harmoniklerinin azaltılması ile iyileştirilmektedir (Islam ve diğ., 2007). Düzgün çıkış torkları elde etmek için farklı teknikler üzerinde çalışılmıştır (Jahns ve Soong, 1996). İlk temel teknikte, ideal trapez veya sinüzoidal dalga formları elde etmek için motorun geometrik tasarımına dikkat edilmektedir. İkinci temel teknik, makinenin veya invertörün ideal olmayan özelliklerinin modifiye edilmesi için uyarma akımı dalga formlarının aktif olarak kontrol edilmesini amaç edinmektedir. Statora veya mıknatıslara kaykı verilmesi (skewing), mıknatısların kademeli olarak yerleştirilmesi (step skewing methods) vuruntu momentini minimize etmek için kesin çözümlerdir; fakat bu yöntemler pahalı ve üretimde bazı zorlukları olan süreçlerdir. Bu yöntemler Şekil 3.16'da gösterilmiştir (Tong, 2014).



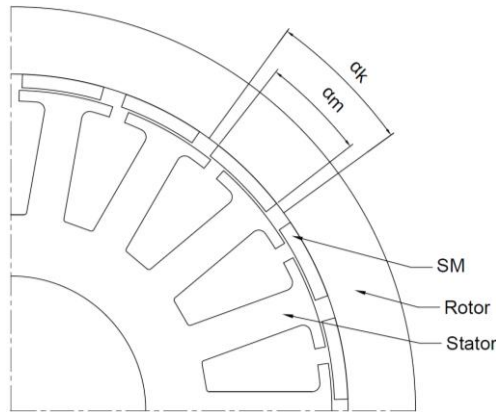
Şekil 3.16. Vuruntu momentini azaltma yöntemleri: a) statora kaykı verilmesi, b) Mıknatısların kademeli yerleştirilmesi, c) Mıknatıslara kaykı verilmesi

Vuruntu momentinin tahmini için konform dönüşümlerden elde edilen analitik çözüm tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiş ve vuruntu momenti sadece hava aralığından değil, oluk bölgesinden de elde edilmiştir (Lin ve diğ., 2009). Lin ve diğerlerinin elde ettikleri sonuçlar SEY sonuçları ile

uyumluluk göstermiş ve analitik yaklaşımın doğruluğu kanıtlanmıştır. Literatürde mıknatısların kademeli yerleştirilmesi, herringbone yöntemiyle ve klasik yöntemlerle denenmiş ve herringbone yönteminin daha fazla vuruğu momenti ve zıt EMK harmoniği ürettiği tespit edilmiştir. Buna karşılık mıknatısların klasik olarak kademeli yerleştirilmesi veya mıknatısların kaydırılması (shifting of magnets) ile tüm EMK harmoniklerinin ve vuruğu momentinin ortadan kaldırılabilmesi görülmüştür (Dosiek ve Pillay, 2007; Fei ve Zhu, 2013; Yokoi ve Higuchi, 2014; Kim ve diğ., 2016).

Maliyeti yüksek olan ve uygulama zorluğu bulunan yöntemlerin yanında oluk/kutup sayısının, oluk açıklığının ve kutup aralığı değerinin optimum seviyede seçilmesi ile vuruğu momenti ve tork dalgalanmaları minimize edilebilmektedir (Sargazi ve diğ., 2014; Ocak ve diğ., 2016; Öztürk ve diğ., 2017). Bu proje çalışmasında vuruğu momentinin ve tork dalgalanmalarının minimize edilmesi için kesirli sargı yapısına sahip bir SMSM en uygun kutup aralığı ( $\alpha_{ka}$ ) bulunarak tasarlanmıştır. Kutup aralığı (embrace) değeri, Şekil 3.17’de gösterilen mıknatıs adımı açısının ( $\alpha_m$ ) kutup adımı açısına ( $\alpha_k$ ) oranı ile elde edilmekte ve denklem 3.13 ile gösterilmektedir.

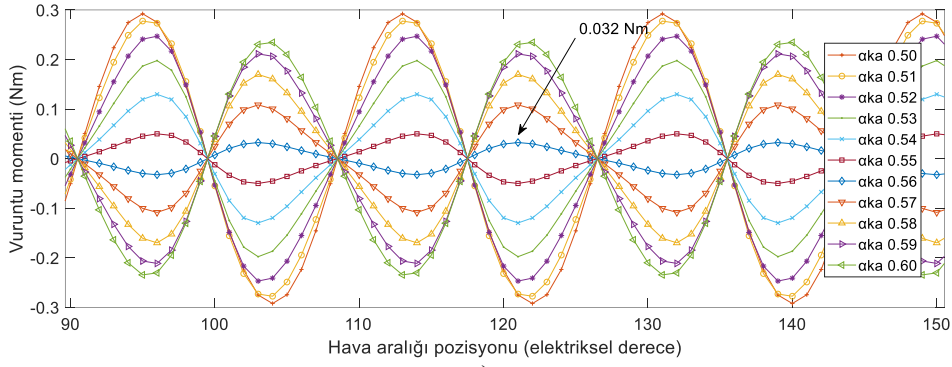
$$\alpha_{ka} = \frac{\alpha_m}{\alpha_k} \quad (3.13)$$



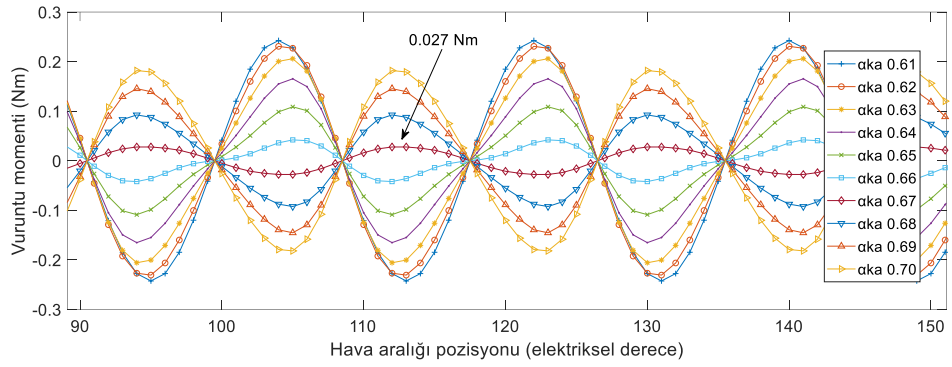
Şekil 3.17. Mıknatıs adımının ve kutup adımının gösterimi

Kutup aralığı değerleri 0.5 ve 0.9 arasında 0.01 aralıklarla değiştirilerek parametrik çözümler yapılmış ve Ansys RMxprt ve Maxwell 2D SEY analizleri ile vuruğu momenti ve zıt EMK’nın FFT (Fast Fourier Transform) grafikleri elde edilmiştir. Şekil 3.18’de vuruğu momentinin 0.5 ve 0.9 kutup aralığındaki tüm değerleri için grafikleri paylaşılmıştır (Soyaslan ve diğ., 2019). Minimum vuruğu momentinin elde edildiği 4 adet kutup aralığı değeri (0.56, 0.67, 0.78, 0.88) SEY analizleri için seçilmiştir. Seçilen değerlerdeki vuruğu momentleri sırasıyla 0.032 Nm, 0.027 Nm, 0.012 Nm ve 0.047 Nm’dir.

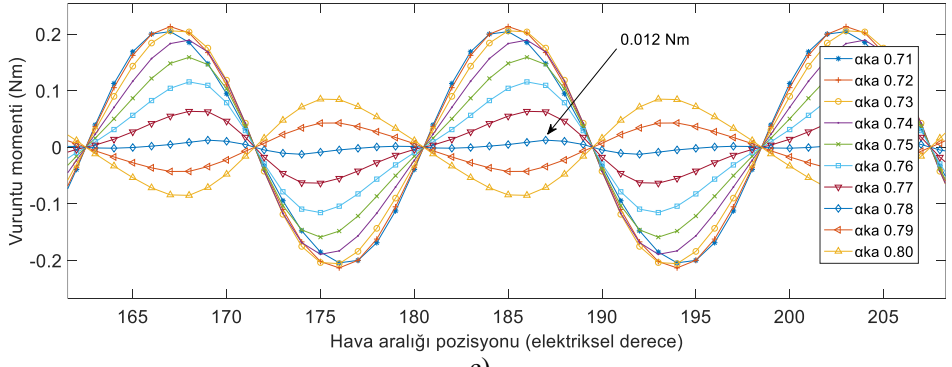




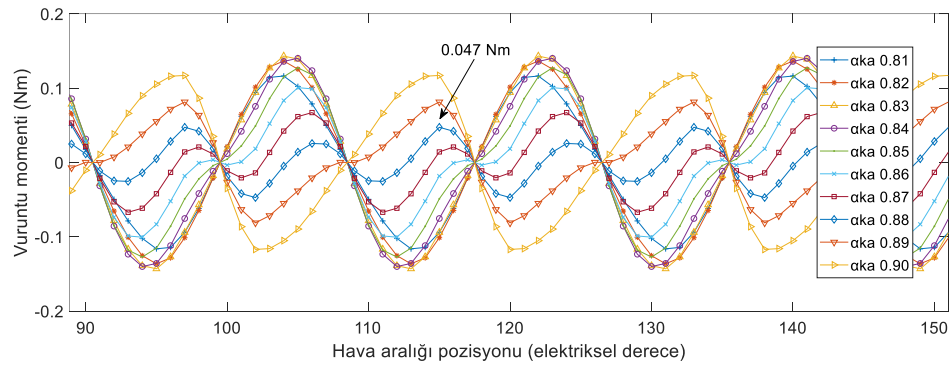
a)



b)

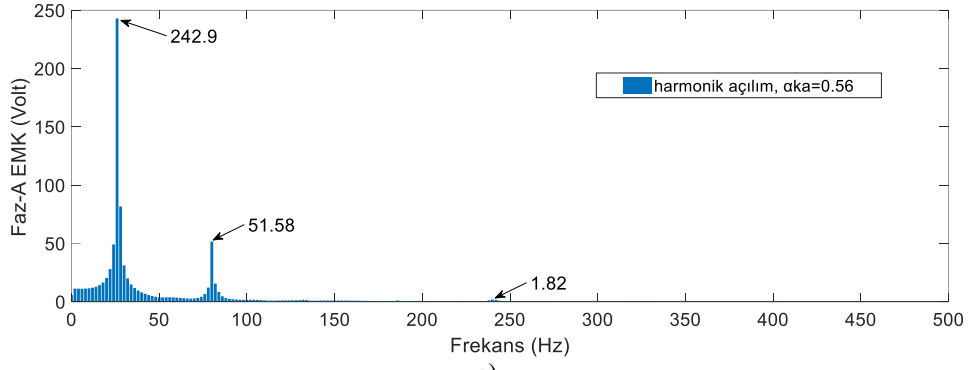


c)

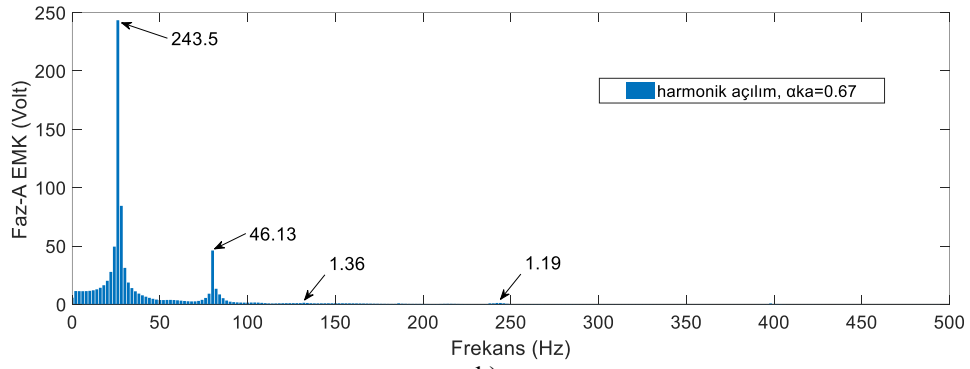


d)

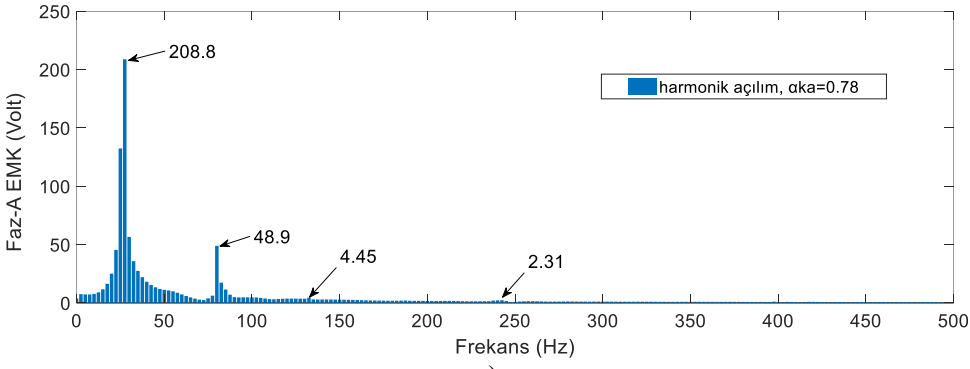
Şekil 3.18. Vuruntu momenti-Hava aralığı pozisyonu grafikleri: Kutup aralığı a) 0.5-06, b) 0.6-0.7, c) 0.7-0.8, d) 0.8-0.9



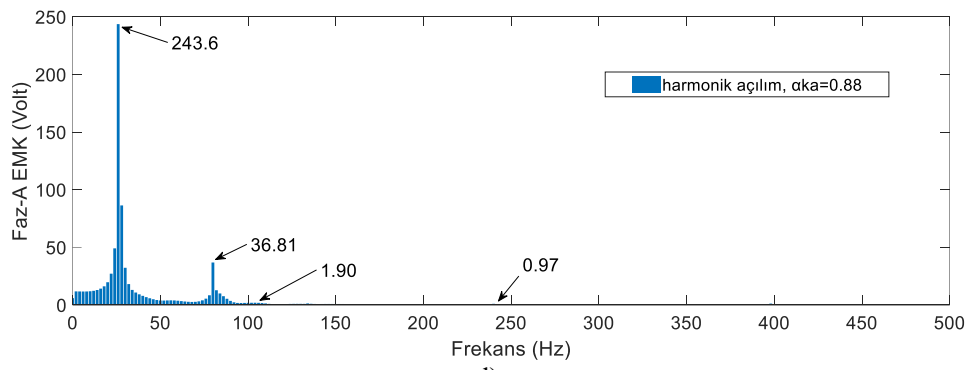
a)



b)



c)

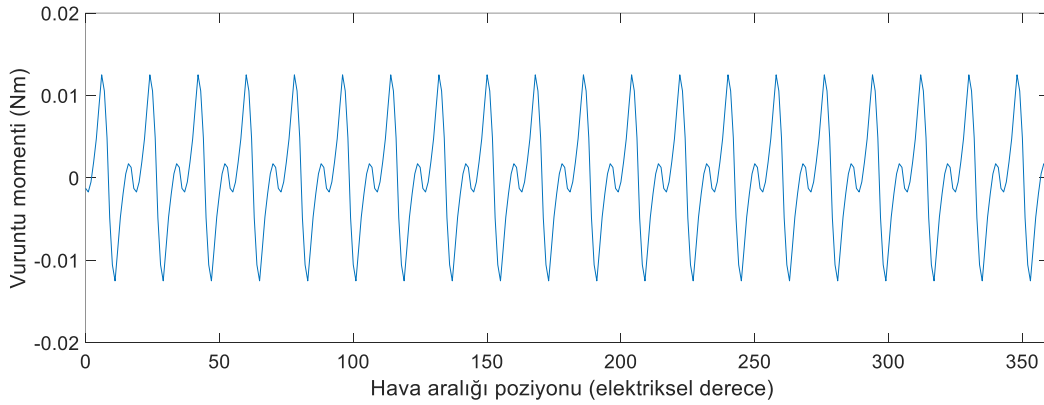


d)

Şekil 3.19. İndüklenen gerilimlerin FFT grafikleri: Kutup aralığı; a) 0.56, b) 0.67, c) 0.78, d) 0.88

Elde edilen vuruuntu momenti değerlerine göre, 2D SEY analizleri gerçekleştirilmiş, indüklenen faz gerilimleri üzerinde FFT analizi yapılmış ve grafikler Şekil 3.19'da paylaşılmıştır. 0.56, 0.67, 0.78 ve 0.88 kutup aralığı değerleri için temel harmonik değerleri sırasıyla 242.9 V, 243.5 V, 208.8 V ve 243.6 V olarak elde edilmiştir. Temel harmonikler motorun çalışma frekansı olan 26.53 Hz'deki değerlerdir.

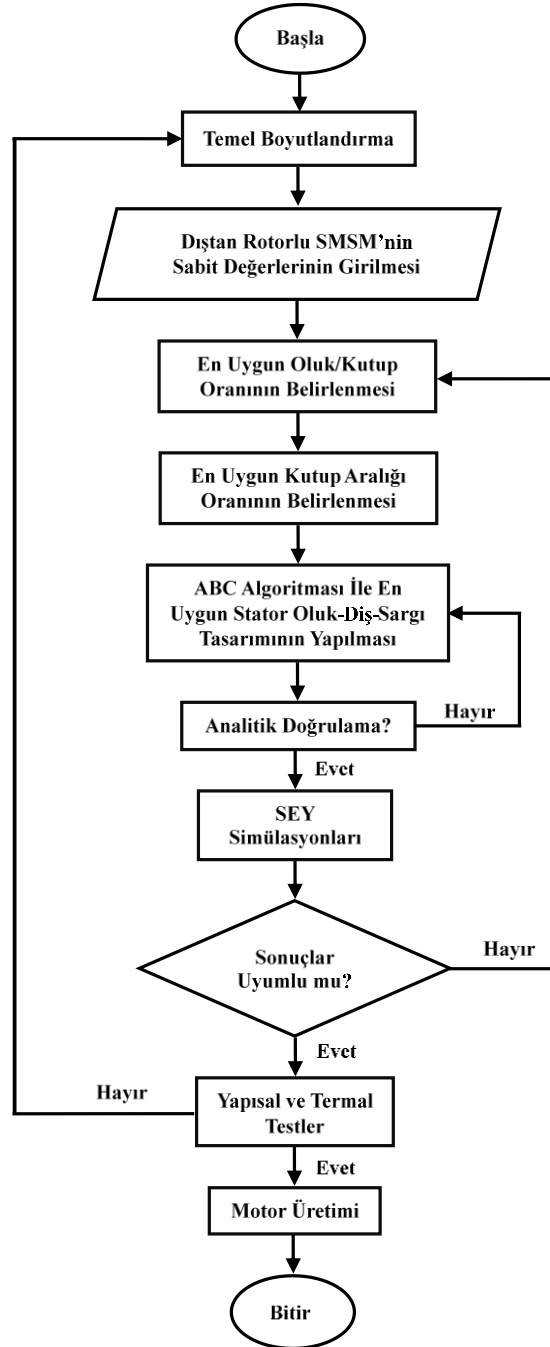
En baskın olan harmoniklerin düşük frekanslı harmonikler olduğu bilindiğinden, minimum tork dalgalanması elde edebilmek için düşük frekanslı harmonik değerlerine dikkat edilmelidir. Şekil 3.19 incelendiğinde, 3. harmoniklerin (frekans=79.59 Hz) sırasıyla 51.8 V, 46.13 V, 48.9 V ve 36.81 V olarak elde edildiği görülmektedir. Bu değerlerdeki tork dalgalanmalarının ise sırasıyla 7.4 Nm, 7.3 Nm, 10.8 Nm ve 19.8 Nm olduğu görülmüştür (Soyaslan ve diğ., 2019). Vuruuntu momentleri, harmonik değerleri ve tork dalgalanmaları incelendiğinde en uygun kutup aralığı değerinin 0.78 olmasına karar verilmiş ve motor tasarımına bu değer üzerinden devam edilmiştir. Şekil 3.20'de 0.78 kutup aralığı değerine sahip motorun vuruuntu momenti grafiği paylaşılmıştır.



Şekil 3.20. Kutup aralığı değeri 0.78 olan motorun vuruuntu momenti grafiği

### 3.5. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Optimum Tasarımı

Motor tasarımında kabul görmüş başlıca tasarım süreçleri n analitik tasarım, SEY tasarımı, yapısal ve termal tasarım ile doğrulama aşamalarıdır. Motor tasarımı temel olarak bu aşamaların etrafında Őekillense de, süreçleri kısaltan ve uygun sonuçların daha hızlı elde edilmesini sağlayan çeşitli optimizasyon yöntemleri de sıklıkla kullanılmaktadır. Bu proje çalışmasında izlenen tasarım süreçleri Şekil 3.21'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.21. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Tasarım Algoritması

İlk önce motor tasarım bilgisine ve literatürdeki çalışmalara dayanarak istenen çıkış torkuna ve gücüne uygun yaklaşık motor ölçüleri belirlenmektedir. Bu ölçüler belirlenirken tasarım sınırları ve varsa sabit değerler dikkate alınmaktadır. Ardından en uygun oluk-kutup oranı ve kutup aralığı oranları sırasıyla amaca uygun bir şekilde seçilir. Bu proje çalışmasında tasarlanan motorun asansör sistemlerinde kullanılacak olması sebebiyle, en önemli amaçlardan biri titreşimsiz ve vuruş momenti düşük bir motor elde etmektir. Dolayısıyla oluk-kutup ve kutup aralığı oranları bu doğrultuda seçilmiştir. Ardından ABC algoritması ile stator sargılarının,

dişlerinin ve oluklarının optimum tasarım sürecine geçilmiştir. Bu aşamada belirlenen sınır değerler içinde amaç fonksiyonuna ulaşmak için optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Elde edilen en iyi analitik sonuçlara göre Ansys Maxwell yazılımında SEY analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçların uyumluluğu karşılaştırılmıştır. Bu aşamayı geçen tasarım en son termal ve yapısal testlere tabi tutulmuş ve motorun nihai tasarımı elde edilmiştir.

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

Genetik algoritmalar ile yapılan optimizasyon çalışmalarında; motor verimi, elektromanyetik performans, termal performans ve malzeme maliyetleri tekli (Cho ve diğ., 2003) ve çoklu (Sooriyakumar ve diğ., 2010) hedef fonksiyonları olarak seçilmiştir. Sarım sayısı, stator iç çapı, stator dış genişliği, stator boyunduruk genişliği, mıknatıs kalınlığı ve mıknatıs genişliği gibi parametreler optimizasyon parametreleri olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmaların çoğunda; ön analitik tasarımlar, ardından genetik algoritmalar ile optimizasyon çalışmaları ve en sonunda elde edilen optimum sonuçlara göre sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir (Mutluer, 2017). Vuruntu momenti optimizasyonu çalışmalarında; mıknatıs şekilleri (Özoğlu, 2017), stator dış yapıları (Putek, 2016), sağa veya sola kaydırmalı oluk tasarımları (Dajaku ve Gerling, 2014), kutup aralıkları, mıknatıs kalınlıkları (Hemmati ve diğ., 2013) vb. gibi parametrelerde yenilikler yapılarak ve farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak iyileştirmeler yapılmıştır. Ayrıca Halbach mıknatıs dizilimlerinin kullanıldığı çalışmalarda düşük vuruntu momentleri ve dalgalanmaları elde edilmiştir (Wang ve diğ., 2015; Güler, 2013; Liu ve diğ., 2015). Parametre tanımlamasında ise sıklıkla parçacık sürü optimizasyonu (Xue ve diğ., 2017; Liu ve diğ., 2011) metodu kullanılmıştır. Diferansiyel evrim algoritmaları (Ouyang ve diğ., 2006) genetik algoritmalara benzer olarak tek ve çok amaçlı motor optimizasyon çalışmalarında kullanılmıştır.

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

### 3.5.1. Yapay arı kolonisi algoritması

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

ABC algoritmasında besin arama sürecinin her çevrimi üç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar; başlangıç besin kaynağı bölgelerinin üretilmesi, görevli arıların besin kaynağı bölgelerine gönderilmesi ve tükenen besin kaynaklarının bırakılarak kâşif arıların üretilmesidir. Kâşif arı sayısı, limit parametresi ile kontrol edilir. Bir besin kaynağını temsil eden çözüm belli sayıda denemelerden sonra hala iyileştirilemiyorsa; bu kaynakta besin kalmadığı ve kaynağın tükendiği varsayılır ve kaynak terkedilir. Böylece bu kaynağa giden işçi arı kâşif arıya dönüşür. Kaynağın besininin tükenip tükenmediği her besin kaynağı için tutulan çözüm geliştirilememe sayacı ile kontrol edilir (Sağ, 2015). ABC algoritmasının detaylı akış diyagramı kullanılan denklemler ile birlikte Tablo 3.6'da paylaşılmıştır (Mutluer & Bilgin, 2016; Karaboğa, 2014). ABC algoritması kullanılarak elde edilen tasarım sonuçları ise Bölüm 4'te paylaşılmıştır.

Tablo 3.6. ABC algoritmasının detaylı akış diyagramı

---

START

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

$$x_{ij} = x_j^{min} + rand(0,1)(x_j^{max} - x_j^{min}) \begin{cases} i = 1, \dots, SN \\ j = 1, \dots, D \\ SN, \text{ besin kaynaklarının sayısı} \\ D, \text{ karar değişkenleri sayısı} \\ x_j^{max}, j. \text{ karar değişkeninin üst sınırı} \\ x_j^{min}, j. \text{ karar değişkeninin alt sınırı} \end{cases} \quad (3.71)$$

---

---

ii. Denklem 3.73'teki gibi limit değeri hesaplanır.

$$limit = (SN * D)/2 \quad (3.72)$$

iii. Amaç fonksiyonu ( $f_i$ ) kullanılarak popülasyonun uygunluk değeri (fitnessi) denklem 3.73'teki gibi hesaplanır (Yani besin kaynaklarının kalitesi hesaplanır).

$$fitness_i = \begin{cases} 1/(1 + f_i), & f_i \geq 0 \\ 1/abs(f_i), & f_i < 0 \end{cases} \quad (3.73)$$

REPEAT

FOR  $i=1$  to  $SN$  DO

iv. Denklem 3.74 kullanılarak  $x_i$  kaynağının işçi arısı için yeni besin kaynağı üretilir ve uygunluk değeri hesaplanır (İşçi arıları besin kaynaklarına gönder).

$$v_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \left\{ \begin{array}{l} i, k = 1, \dots, SN \\ j = 1, \dots, D \\ SN \text{ besin kaynağı sayısı} \\ D \text{ parametre sayısı} \\ \varphi_{ij} = [-1, 1] \\ v_{ij} = \begin{cases} x_j^{min}, & v_{ij} < x_j^{min} \\ v_{ij}, & x_j^{min} < v_{ij} < x_j^{max} \\ x_j^{max}, & x_j^{max} < v_{ij} \end{cases} \end{array} \right. \quad (3.74)$$

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

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

END

vii. Besin kaynaklarının kalitesine yani fitness değerine göre gözcü arılar için olasılık değeri denklem 3.75'teki gibi hesaplanır ( $t = 0$ ,  $i = 1$ ).

$$p_i = \frac{fitness_i}{\sum_{j=1}^{SN} fitness_j} \quad (3.75)$$

REPEAT

IF  $random < p_i$  THEN

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

END IF

UNTIL  $t = SN$

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

ix.  $x_i$ 'yi denklem 3.71 ile elde edilen rasgele bir çözüm (kaşif arı) ile değiştir.

END IF

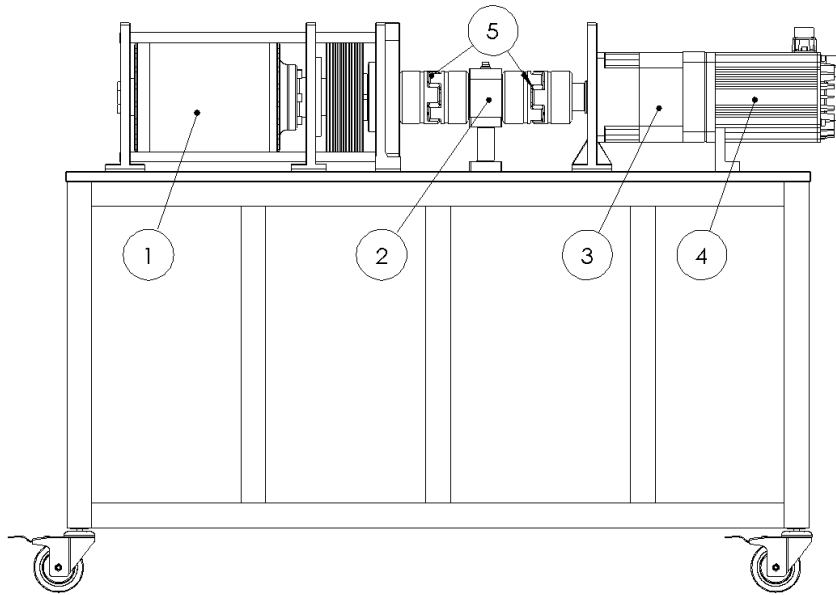
x. Optimum sonucu hafızada tut.

UNTIL (çevrim sayısı = maksimum iterasyon sayısı)

---

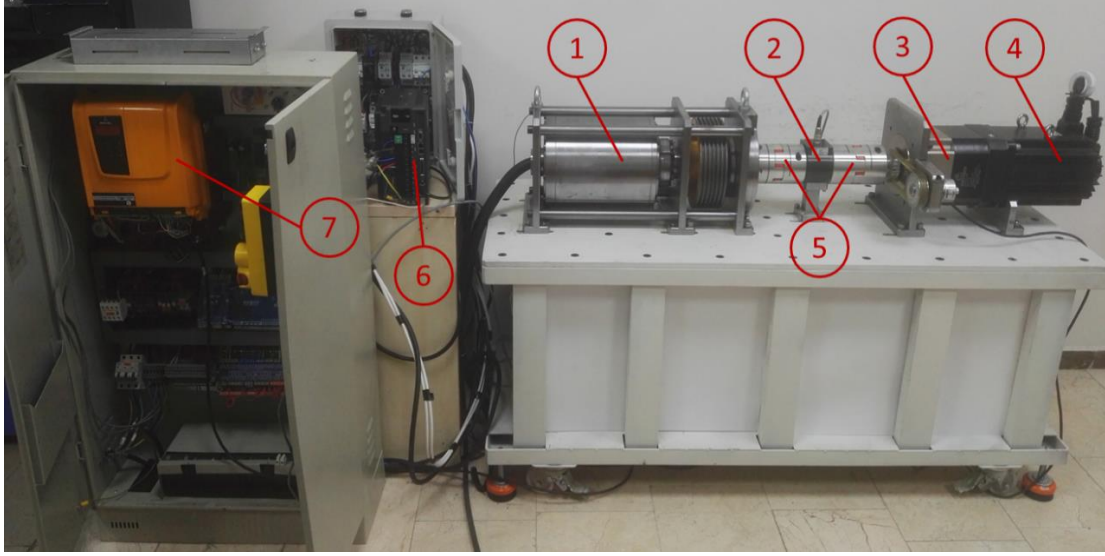
### 3.6. Deney Düzeneğinin Tasarımı

Üretilen prototip motorun testlerinin yapılabilmesi için bir deney düzeneği tasarımı yapılmıştır. Deney düzeneğinin amacı, üretilen prototip motoru uygun koşullarda yükleyerek motorun karakteristik özelliklerini elde etmektir. Üretilen motora yükleme yapmak için eddy akımı frenleri, dinamometreler veya yükleme motorları gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Üretilen motorun anma torku olan 240 Nm değerine uygun dinamometreler araştırılmış ve fiyatlarının çok yüksek olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık yükleme işleminin farklı bir servo motor ve redüktör grubu ile yapılmasına karar verilmiştir. Yükleme işlemi esnasında motor milindeki çıkış torkunu ölçebilmek için bir torkmetre kullanılmıştır. Kullanılan yükleme motoru 5.5 kW'lık DELTA-ECMA-L11855R3 serisi bir motor olup sürücüsü ise DELTA-ASD-A2-5543-M'dir. Uygun hız ve tork değerlerini elde edebilmek için yükleme motoruyla birebir uyumlu LIMING SB 180-010-P2 serisi planet redüktör kullanılmıştır. Böylelikle prototip motoru anma hızı olan 159.2 rpm'de 240 Nm yükleyebilecek deney düzeneği elde edilmiştir. Tork değerlerinin yüksek doğruluk ve hassasiyette ölçülebilmesi için maksimum ölçüm kapasitesi 500 Nm olan Eth-Messtechnik firmasının DRBK-500 tipi tork sensörü tercih edilmiştir. Deney düzeneğinin şeması Şekil 3.22'de, kurulan deney düzeneği ise Şekil 3.23'te paylaşılmıştır. Üretilen prototip motoru sürmek için Arkel Arcode tipindeki sürücü kullanılmıştır. Konum ve hız geribildirim için Fenac FNC SC2048 tipindeki mutlak enkoder, motor freni olarak Mayr Roba-twinstop 250 tipi fren tercih edilmiştir. Yükleme motorunun ve üretilen prototip motorun millerinin tork sensörü ile bağlantılarının yapılmasında ise pilot delikli GS48 tipi Kulkarni marka kaplin kullanılmıştır.



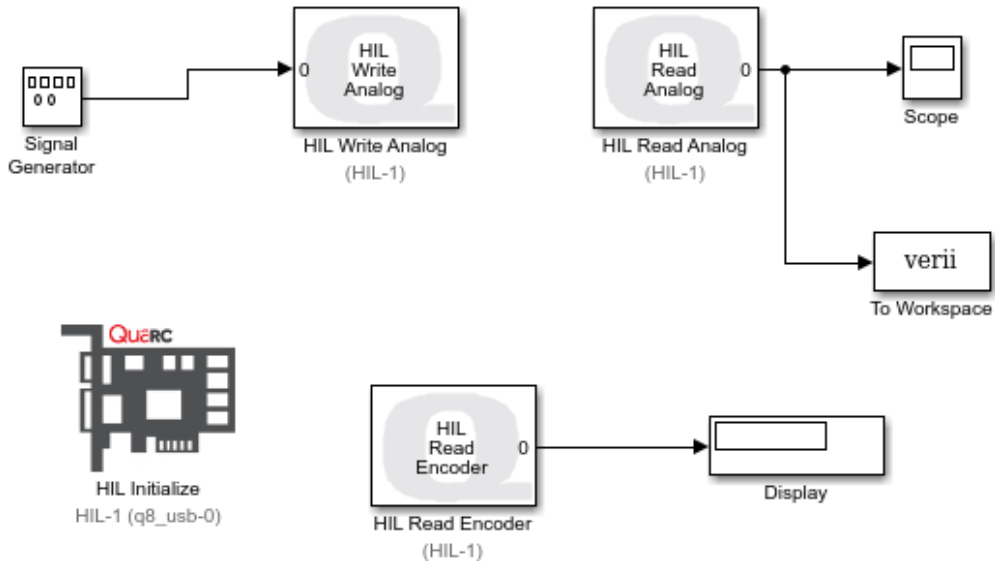
Şekil 3.22. Deney düzeneği; 1) Prototip motor, 2) Tork sensörü, 3) Redüktör, 4) Yükleme motoru, 5) Kaplinler





Şekil 3.23. Kurulmuş deney düzeneği; 1) Prototip motor, 2) Tork sensörü, 3) Redüktör, 4) Yükleme motoru, 5) Kaplinler, 6) Yükleme motoru sürücüsü, 7) Prototip motor sürücüsü

Prototip motor sürücüsünün giriş gerilimleri Yıldırım Elektronik firmasının ayarlı AC gerilim kaynağı üzerinden 220 V RMS değerine ayarlanmış ve sürücünün güç faktörü ( $\cos \phi$ ) değeri Entes EPM-06 güç analizörü üzerinden izlenmiştir. Tork sensöründen gelen veriler, Quanser Q8-USB tipi veri toplama kartı yardımıyla Matlab Simulink yazılımı üzerinden kaydedilmiştir. Şekil 3.24'te Simulink'te hazırlanmış veri toplama ekranı gösterilmiştir. Zıt EMK deneyleri esnasında prototip motorun ürettiği gerilimin dalga şeklinin ve genliğinin izlenmesi gerekmektedir. Bu işlem için OWON SDS 7072 tipi bir osiloskop kullanılmıştır. Osiloskopta elde edilen gerilim grafiği USB bellek ile kaydedilmiş ve zıt EMK dalga şekli Matlab yazılımı ile çizdirilmiştir.



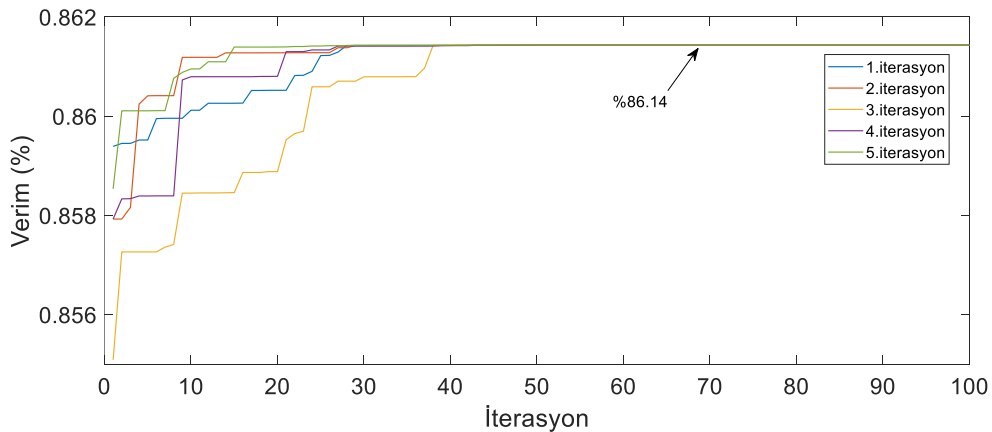
Şekil 3.24. Matlab Simulink'te hazırlanmış veri toplama ekranı

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

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

### 4.1. ABC Algoritması İle Optimizasyon Sonuçları

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



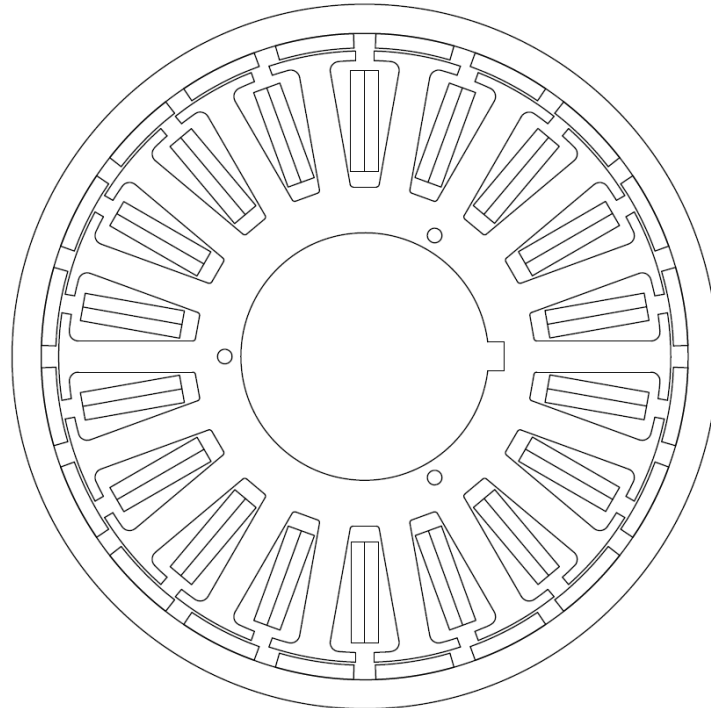
Şekil 4.1. ABC algoritması ile verimin iyileştirilmesi

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

Tablo 4.1. Motor parametrelerinin sonuç değerleri

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

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



Şekil 4.2. Dıştan rotorlu SMSM'nin kesit görünüşü

Tablo 4.2. Dıştan Rotorlu SMSM'nin parametreleri

	Parametre	Değeri	Birimi
Motor Özellikleri	Rotor tipi	Dıştan rotorlu	-
	Kutup sayısı, $p$	20	-
	Motor çıkış gücü, $P$	4	kW
	Frekans, $f$	26.53	Hz
	Gerilim, $V$	380	V
	Nominal hız, $\omega_m$	159.2	rpm
	Nominal akım, $I$	7.18	A (rms)
	Nominal tork, $T_R$	240	Nm
	Motor paketi uzunluğu, $L_p$	150	mm
	Oluk sayısı, $N_{oluk}$	18	-
Rotor	Rotor dış çapı, $D_{ro}$	242	mm
	Rotor iç çapı, $D_{ri}$	222	mm
	Rotor malzemesi	AISI 1050	-
	Hava aralığı kalınlığı, $g$	1	mm
Mıknatis	Mıknatis kalınlığı, $h_m$	5	mm
	Mıknatis uzunluğu, $l_m$	50	mm
	Mıknatis tipi	N45SH	-
	Mıknatisin bağıl manyetik geçirgenliği, $\mu_r$	1.05	-
	Artık mıknatıslanma değeri, $B_r$	1.35	T
	Kutup aralığı (embrace), $\alpha_{ka}$	0.78	-
	Mıknatis adımı açısı, $\alpha_m$	14.04	°
Sargılar	Kutup adımı açısı, $\alpha_k$	18	°
	Bağlantı şekli	Y	-
	Sargı tipi	Konsantre	-
	Sargı katman sayısı	2	-
	Bir stator fazındaki tur sayısı, $N_t$	105	-
	Paralel tel sayısı, $n_{tel}$	3	-
	Tel kalınlığı, $D_{tel}$	0.8	mm
	Oluk sayısı cinsinden bobin adımı, $S_p$	1	-
Statordan taşan sargı sonu uzunluğu, $L_{su}$	25	mm	
Stator Özellikleri	Kutup-faz başına düşen oluk sayısı, $q$	0.3	-
	Stator iç çapı, $D_{si}$	85	mm
	Stator dış çapı, $D_{so}$	210	mm
	Silisi saç kalınlığı	0.5	mm
	Saç yığılma faktörü, $k_{yf}$	0.95	-
	Saç malzemesi	M530-50A	-

Sargı faktörü, $k_{sf}$	0.945	-
Stator boyunduruk kalınlığı, $h_{sb}$	15.9	mm
Oluk boyunduruk yarıçapı, $R_{s1}$	1	mm
Diş ucu kalınlığı, $h_{s0}$	3.3	mm
Oluk diş ucu yarıçapı, $h_{s1}$	3.1	mm
Oluk yüksekliği, $h_{s2}$	39.2	mm
Toplam oluk yüksekliği, $h_s$	43.3	mm
Oluk açıklığı, $B_{s0}$	6.5	mm
Stator diş genişliği, $w_{sd}$	10.7	mm

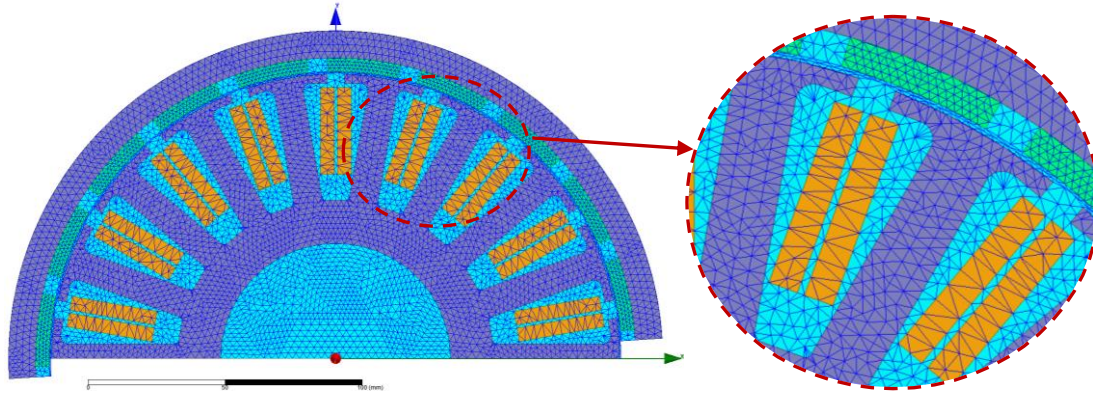
Tablo 4.3. Dıştan rotorlu SMSM'nin etiket değerleri

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

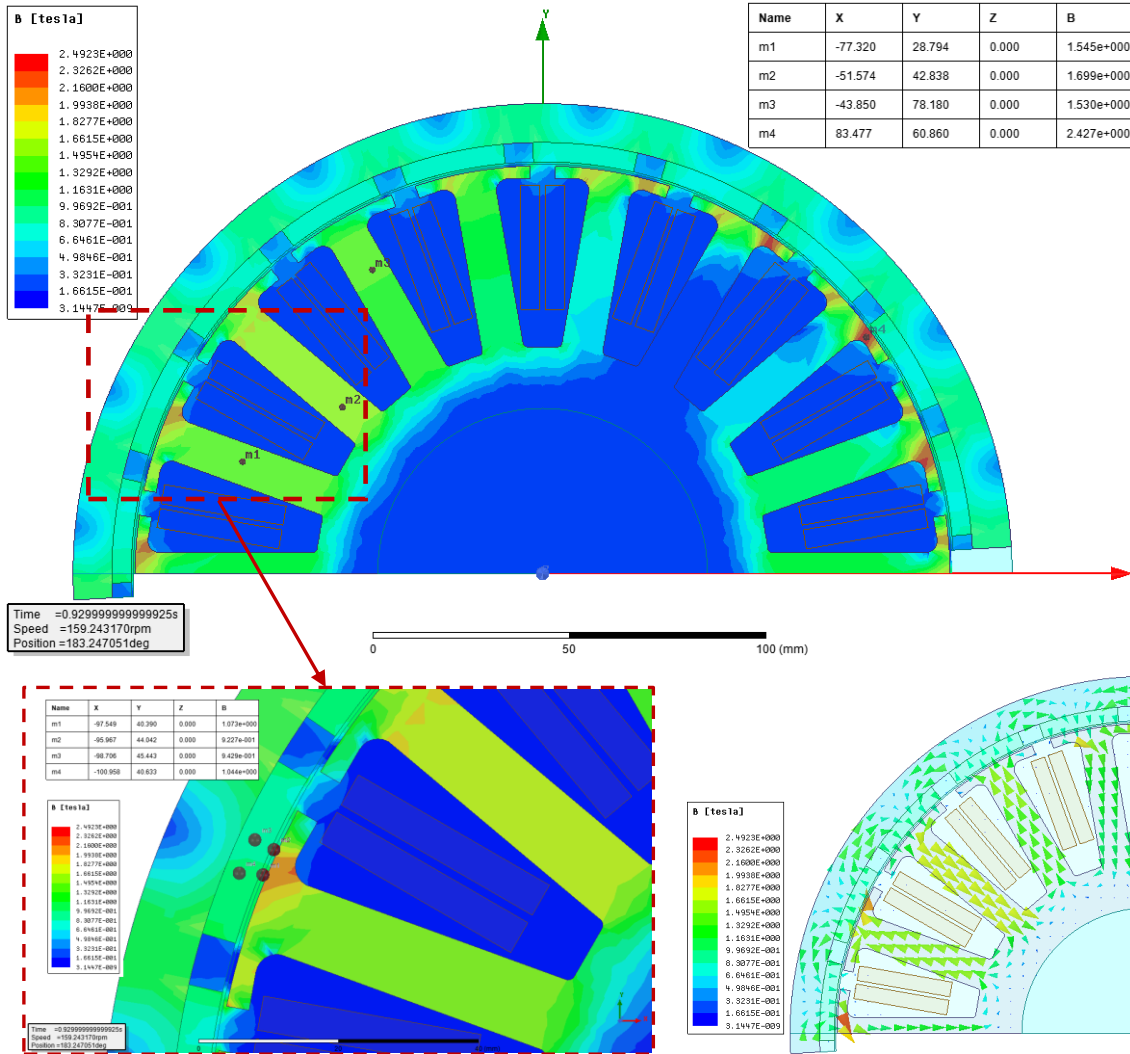
\* Tablo 4.7'nin son iki satırından lineer interpolasyonla elde edilmiştir.

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

Optimizasyon sonuçlarına göre elde edilen parametre değerleri ile motor performansı analitik olarak elde edilmiştir. Elde edilen analitik sonuçların SEY ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması gerekmektedir. Bu bölümde, optimum analitik değerlerin elde edildiği dıştan rotorlu SMSM tasarımı SEY analizlerine tabii tutulmuştur. Bunun için ANSYS Maxwell 2D modülü ile 0-1 saniye aralığında geçici durum analizleri yürütülmüştür. Motor sıfır hızdan anma hızına kadar hızlandırılarak tam yükleme yapılmıştır. Daha hızlı analiz yapabilmek adına motorun yarım modeli kullanılmıştır. Motorun ağ yapısı Şekil 4.3'te paylaşılmıştır. Motor geometrisinde boylamasına bir farklılık olmadığı için 2 boyutlu SEY analizleri yeterli görülmüştür. Ayrıca 3 boyutlu analizler yapılmamıştır. Yapılan SEY analizleri sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4.4 ile 4.8 arasında paylaşılmıştır.



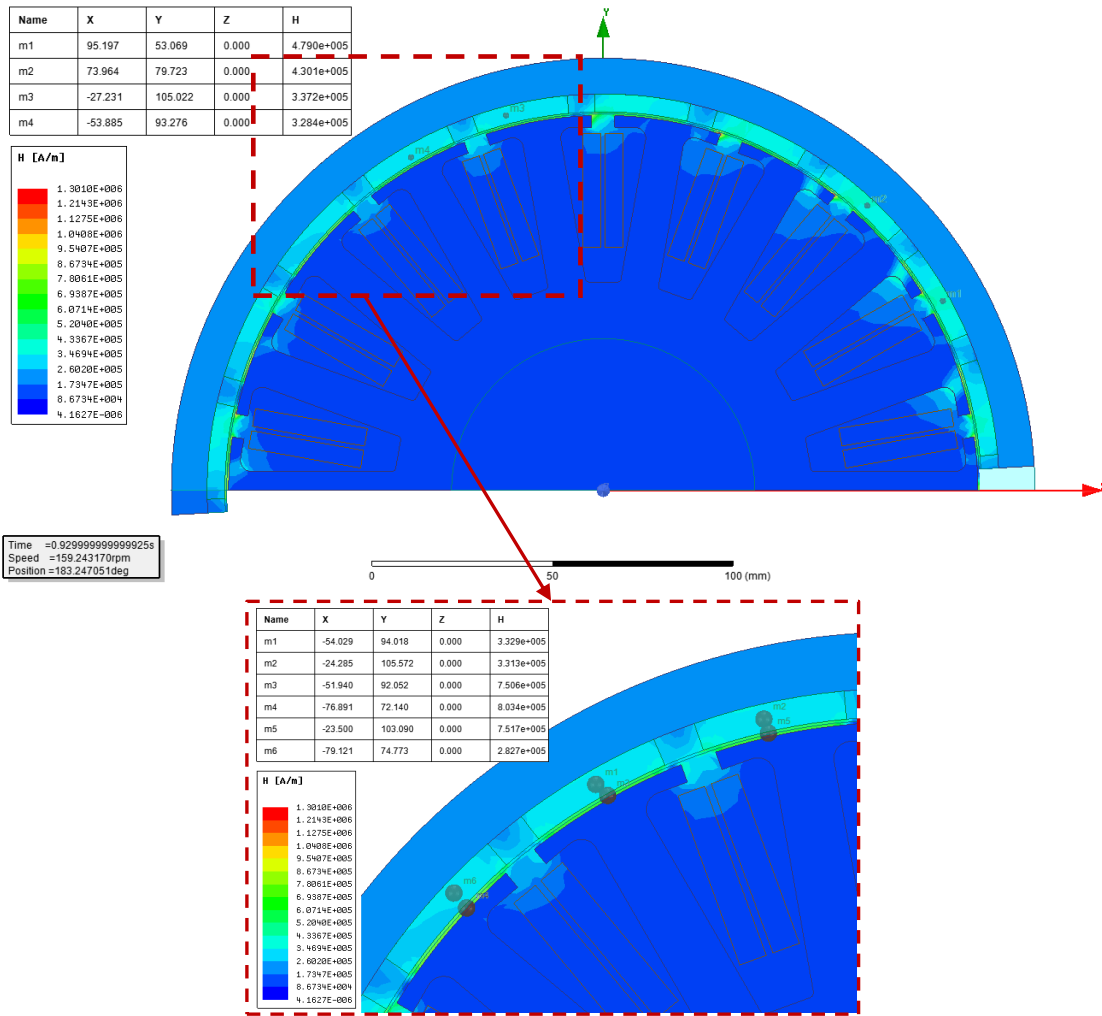
Şekil 4.3. Dıştan rotorlu SMSM'nin ağ yapısı



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

Şekil 4.4'te dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik akı yoğunluğu dağılımı hem genlik hem de vektör olarak gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, stator dışlarındaki manyetik akı

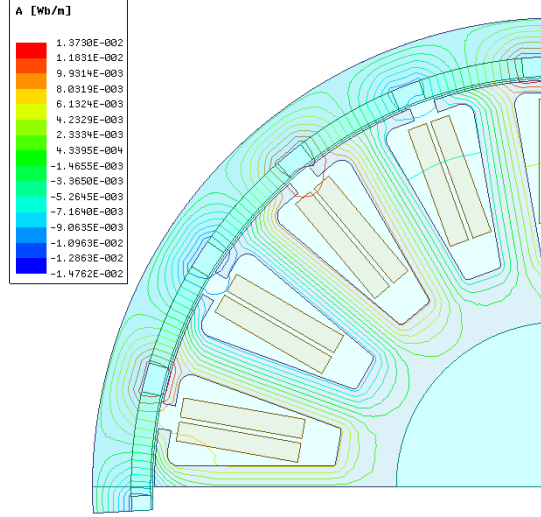
yoğunluğunun ortalama değerinin 1.5-1.6 Tesla olduğu, stator dişlerinin ucunda ise 2 Teslayı aşan değerlerin olduğu gözükmektedir. Stator dişlerindeki manyetik akı yoğunlukları kullanılan silisli saçların doyma noktasının altındadır. Diş uçlarındaki akı yoğunlukları, özellikle köşe dönüşlerinde yüksek değerlere ulaşmış ve göz ardı edilebilir seviyededir. Uyarılmış fazların olduğu bölgelerde stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu 0.9-1.0 Tesla iken, rotorda 1.0-1.3 Tesla civarındadır. Hava aralığı ve mıknatıs akı yoğunluklarının ise 0.92 ile 1.05 Tesla aralığında olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, motorun tam yükte çalışması esnasında doyuma girilmediğini ve B-H eğrisinin büküm bölgesi civarında çalışıldığını göstermektedir.



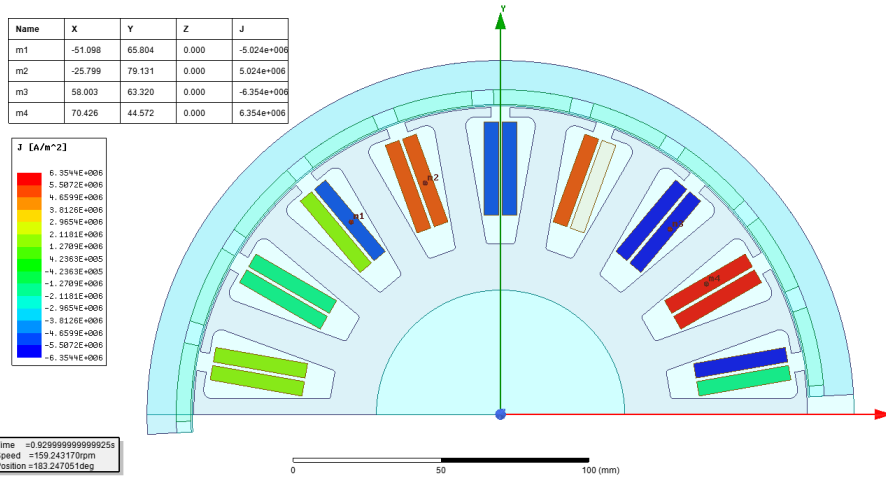
Şekil 4.5. Dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik alan kuvveti (H:A/m)

Şekil 4.5'te dıştan rotorlu SMSM'nin manyetik alan kuvveti A/m cinsinden, Şekik 4.6'da ise manyetik vektör potansiyeli Wb/m (T-m) cinsinden gösterilmiştir. Manyetik alan kuvveti, mıknatısların kuvvetinin etkili olduğu bölgede yoğunlaşmış ve hava aralığında ortalama  $7.5 \times 10^5$  A/m değerlerinde iken mıknatıslar üzerinde ortalama  $3.3 \times 10^5$  A/m değerlerindedir.

Şekil 4.6'daki akı çizgilerinin stator, hava aralığı, mıknatıs ve rotor üzerinden düzgün bir şekilde geçtiği görülmektedir. Az da olsa kaçak akılar olsa da genellikle düzgün bir dağılım mevcuttur.



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



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

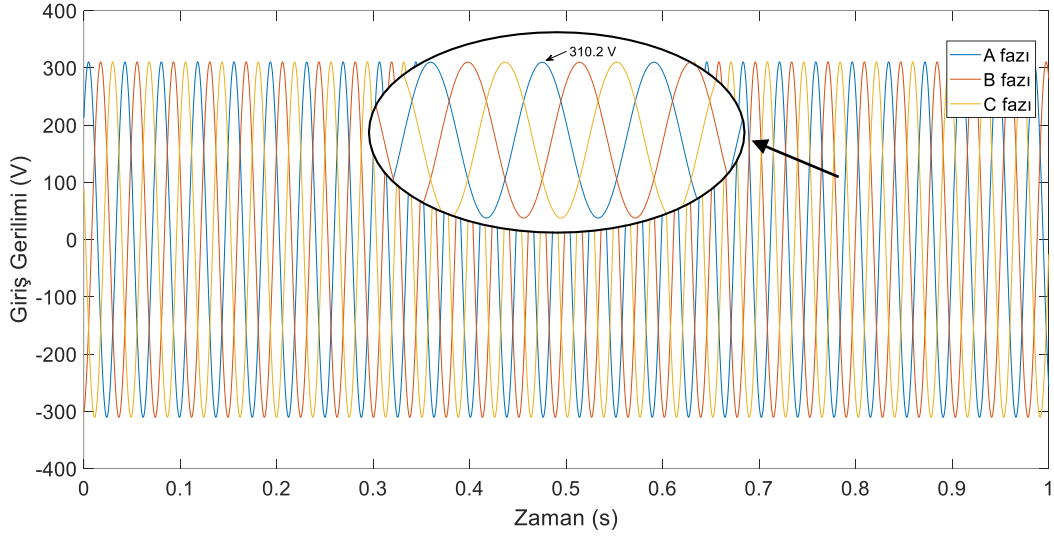
Motor tasarımında akım yoğunluğu ( $J$ ) en önemli tasarım kriterlerinden biridir. Akım yoğunluğu, sargılardan geçen faz akımı RMS değerinin iletkenin kesit alanına bölünmesiyle bulunur. Herhangi bir soğutma sisteminin kullanılmadığı SMSM'lerdeki akım yoğunluğu değerini Lipo (2017) 5 A/mm<sup>2</sup>,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



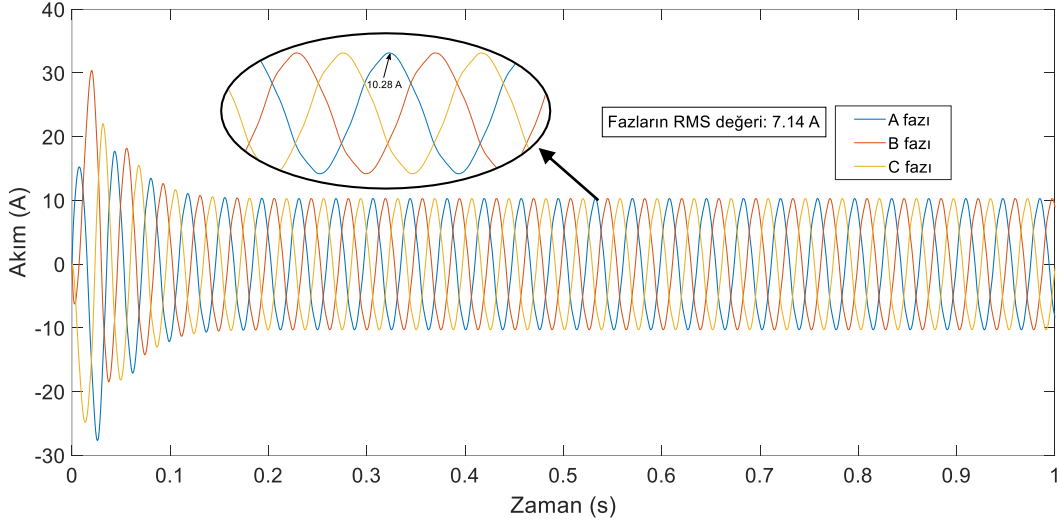
sargıları iç tarafta yer alan dıştan rotorlu SMSM, akım yoğunluğu değeri  $6.5 \text{ A/mm}^2$ 'yi geçmeyecek şekilde tasarlanmıştır.

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

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

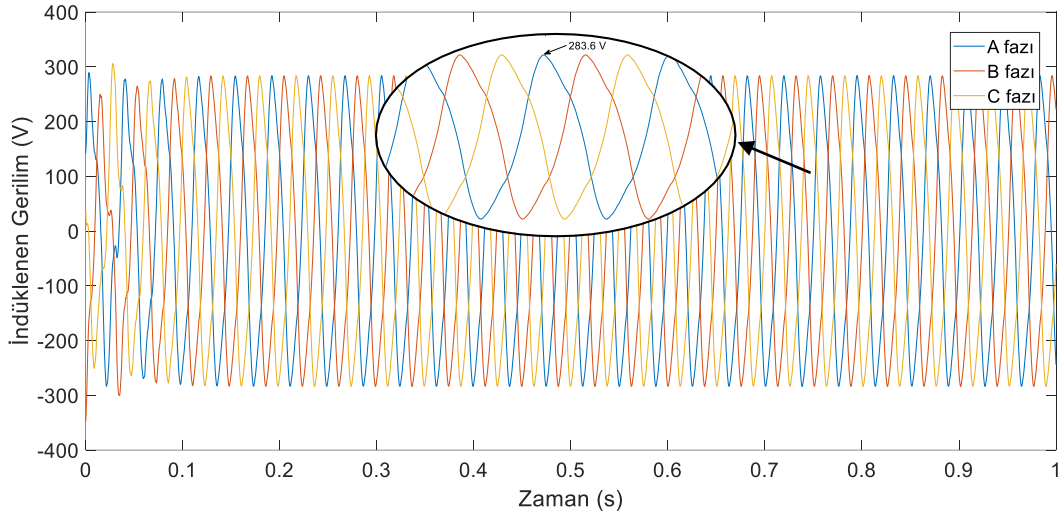


Şekil 4.8. Dıştan rotorlu SMSM'nin giriş gerilimi grafiği



Şekil 4.9. Dıştan rotorlu SMSM'nin akım grafiği

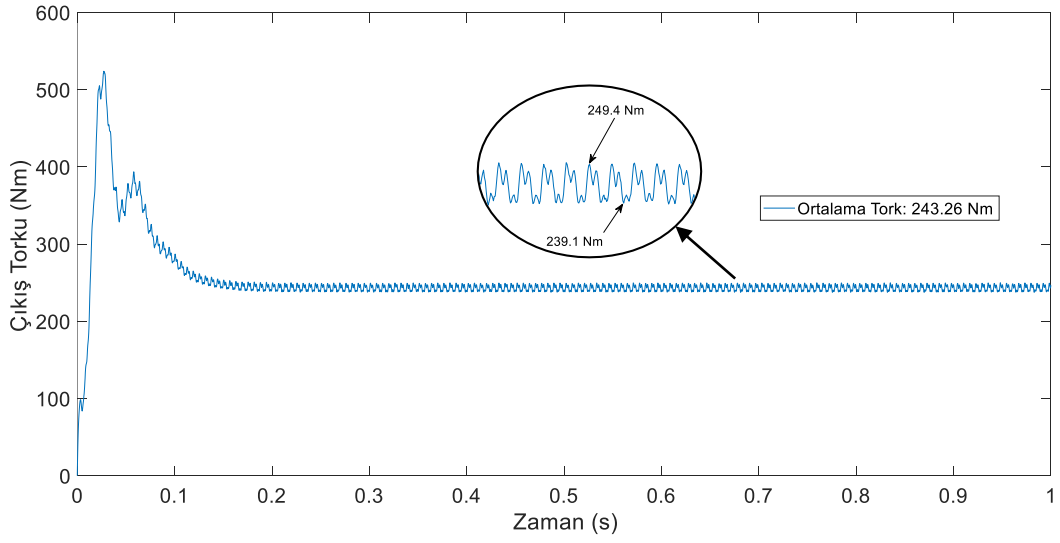
Şekil 4.8'de dıştan rotorlu SMSM'nin gerilim grafiği, Şekil 4.9'da ise akım grafiği paylaşılmıştır. Motor besleme geriliminin faz-nötr arası tepe değerinin 310.2 V, faz akımının tepe değerinin ise 10.28 A olduğu gözükmemektedir. Simülasyon sonucu elde edilen faz gerilimi ve faz akımının RMS değerleri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



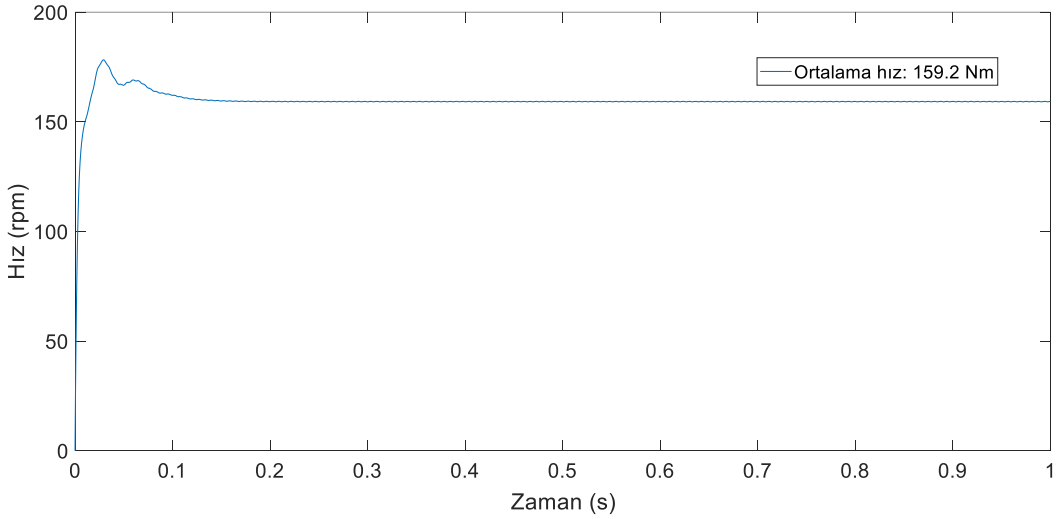
Şekil 4.10. Dıştan rotorlu SMSM'nin indüklenen gerilim grafiği

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

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



Şekil 4.11. Dıştan rotorlu SMSM'nin çıkış torku grafiği



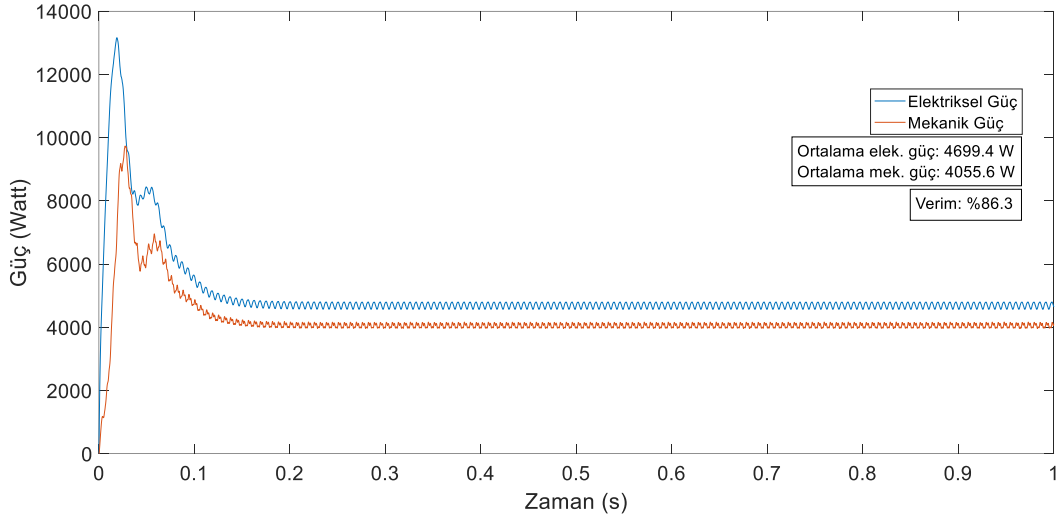
Şekil 4.12. Dıştan rotorlu SMSM'nin hız grafiği

Şekil 4.11'da tam yük altındaki prototip motorun çıkış torkunun simülasyon sonuçları görülmektedir. Çıkış torkunun ortalama değeri 243.26 Nm iken, tork dalgalanmasının çıkış torkuna oranı ise %4.23'tür. Bu boyutlardaki bir motor için tork dalgalanması değeri oldukça düşüktür ve bu durum motorun konforlu çalışması açısından çok önemlidir. Şekil 4.12'de tam yük altındaki motor milinin hız grafiği paylaşılmıştır. Motor hızı kalkıştan itibaren 0.2 s içerisinde anma hızına oturmaktadır. Anma değerlerindeki çıkış torku ve mil hızının (rad/s) çarpımı motorun mekaniksel anma gücünü vermektedir. Motorun çıkış gücü ( $P_M \sim P$ ) 4055.5 W olarak elde edilmektedir. Çıkış gücü Şekil 4.13'te mekanik güç olarak gösterilmiştir. Tüm kayıplarla çıkış gücü toplandığında ise motorun elektriksel giriş gücü ( $P_E$ ) elde edilmektedir. Giriş gücü  $P_E$ , denklem 4.1 ile hesaplanmaktadır. Denklemde yer alan  $U$  fazlar arası gerilimi,  $I$  bir fazdan

çekilen akımın RMS değerini,  $\cos \varphi$  ise güç faktörünü temsil etmektedir. Çıkış ve giriş güçlerinin oranı denklem 4.2'de gözüktüğü gibi motorun verimini ( $\eta$ ) vermektedir.

$$P_E = \sqrt{3} * U * I * \cos \varphi \quad (4.1)$$

$$\eta = \frac{P_M}{P_E} \quad (4.2)$$

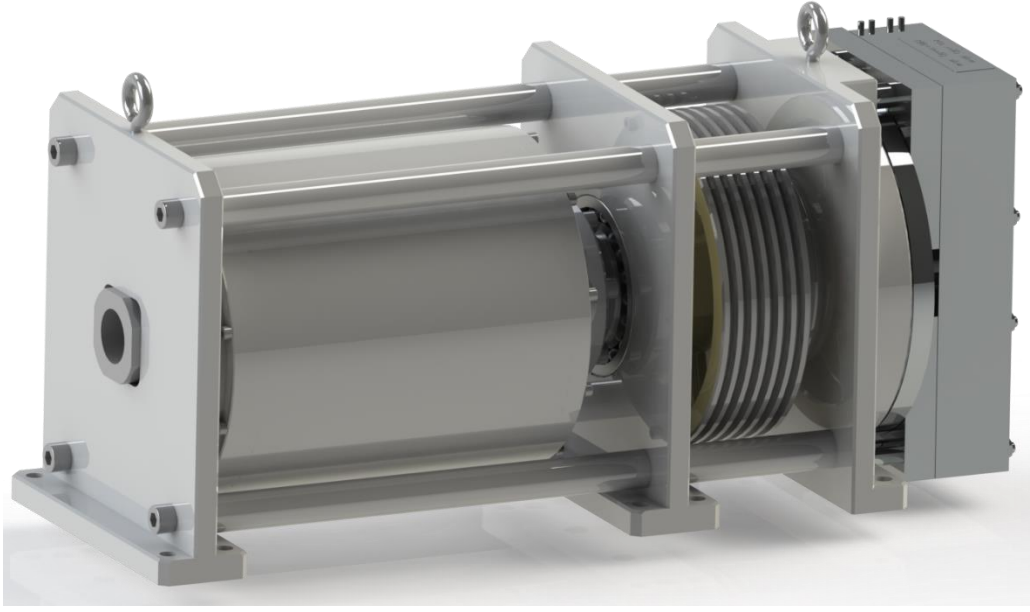


Şekil 4.13. Dıştan rotorlu SMSM'nin verim grafiği

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

### 4.3. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Yapısal Analiz Sonuçları

Dıştan rotorlu SMSM'nin tasarım aşamalarından bir diğeri motor mukavemetinin ve deformasyon miktarlarının ölçüldüğü yapısal testlerdir. Nihai katı modeli Şekil 4.14'teki gibi oluşturulan prototip motorun, üretim aşamasına geçmeden önce yük altındaki davranışlarının doğrulanmalıdır. Bunun için farklı dinamik ve statik etkilere maruz kalan motor parçalarının sonlu elemanlar analizlerinin yapılması gerekmektedir. Motorun dönen kısımlarında üretimden kaynaklanan balans bozuklukları olabilmektedir. Bu bozukluklar, tüm üretim bittikten sonra balans ayarı yapılarak çözülmektedir. Motor parçalarının maruz kaldığı gerilmeler Tablo 4.4'te gösterilmiştir. Bu gerilmeler altında parçaların dayanımı, deformasyon miktarı ve akma sınırları içinde kalıp kalmadığı Solidworks Simulation yazılımı kullanılarak yürütülen SEY analizleri ile test edilmiştir.

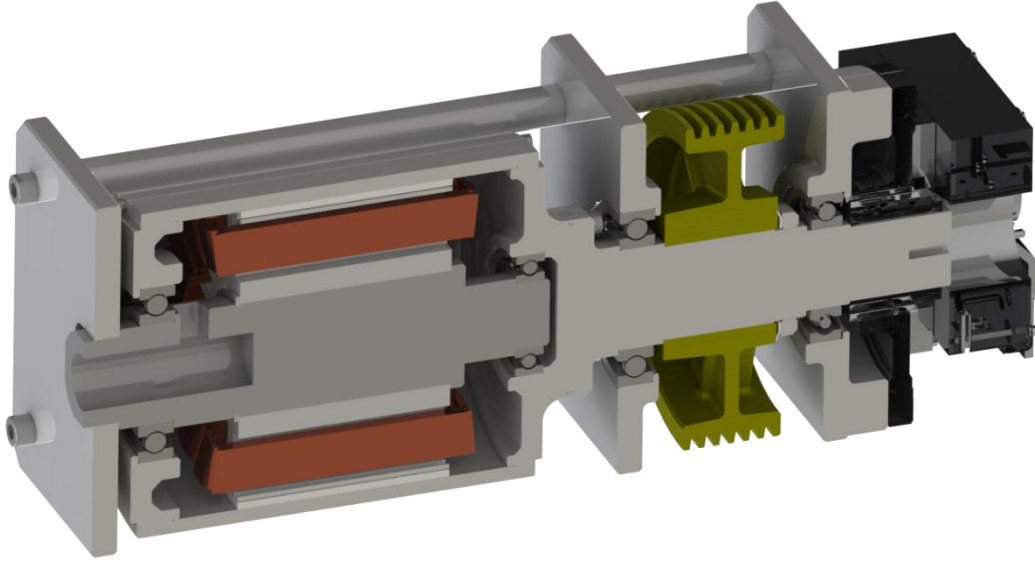


Şekil 4.14. Dıştan rotorlu SMSM'nin nihai katı modeli

Tablo 4.4. Motor parçalarının maruz kaldığı gerilmeler

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

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

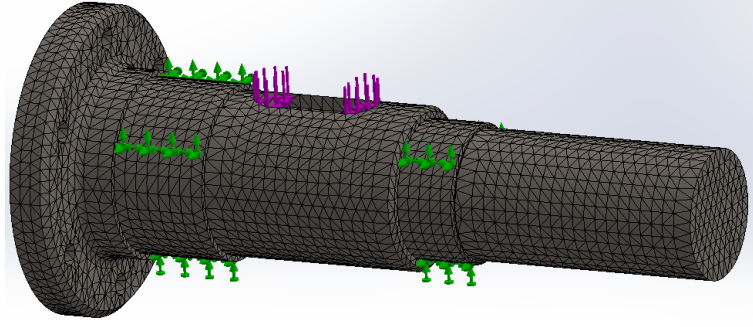


Şekil 4.15. Dıştan rotorlu SMSM'nin kesit görünüşü

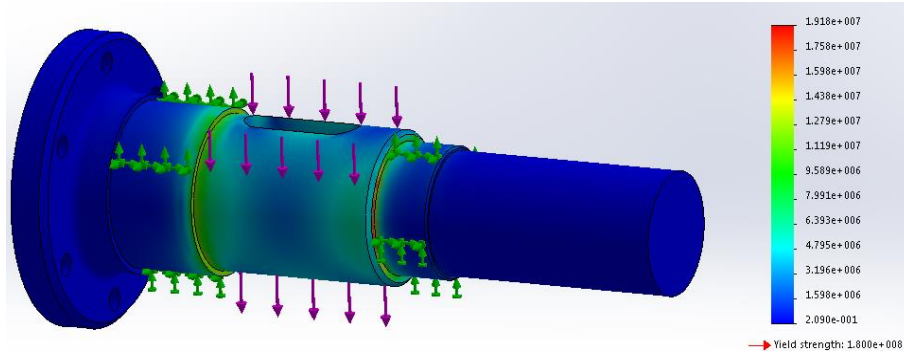
#### 4.3.1. Kasnak mili eğilme ve burulma analizi

Kasnak üzerindeki halatlara bağlı olan asansör kabini, karşı ağırlık ve yolcu ağırlıkları kasnak milinde eğilme momenti etkisi yapmaktadır. Ayrıca kasnak mili, yükü döndürmeye zorladığından üzerinde burulma momenti oluşmaktadır. Dolayısıyla kasnak milinin hem burulma hem de eğilmeye karşı zorlandığında nasıl bir tepki vereceği SEY analizleri ile test edilmiştir. Dıştan rotorlu SMSM'nin prototipinin üretiminde rotor, mil ve şasi elemanları için orta karbonlu çeliklerden AISI 1050 malzemesi kullanılmıştır. Motorun seri üretime geçmesi durumunda daha az maliyetli olan düşük karbonlu çeliklerden AISI 1010 malzemesinin kullanılması daha uygun olacağından, yapılan SEY analizleri AISI 1010 malzemesine göre yapılmıştır. AISI 1010 çeliğinin akma dayanımı AISI 1050 çeliğine göre daha düşüktür. Dolayısıyla SEY analizlerinde güvenli sonuçlar alınması halinde prototip motorun çok daha güvenli olacağı aşikardır. AISI 1010 çeliğinin akma dayanımı 180 MPa'dır (Matweb, 2019). Bu özellikler sıcak haddelenmiş çelik için geçerli olup, soğuk haddelenmiş çeliklerde akma dayanımı değerleri çok daha yüksektir.

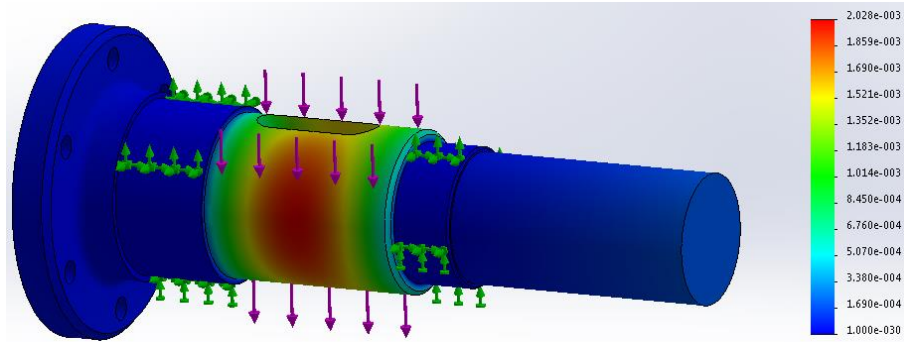
Eğilme gerilmesi için kasnak milinin ağ yapısı ve uygulanan kuvvet Şekil 4.16'da, von mises gerilme sonuçları Şekil 4.17'de, yer değiştirme sonuçları Şekil 4.18'de verilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen şekillerde deformasyon skalası 1 olarak seçilmiştir. Dolayısıyla deformasyon miktarları büyütülmemiş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



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



Şekil 4.17. Eğilme etkisindeki kasnak milinin von mises gerilmesi analiz sonuçları (N/m<sup>2</sup>)



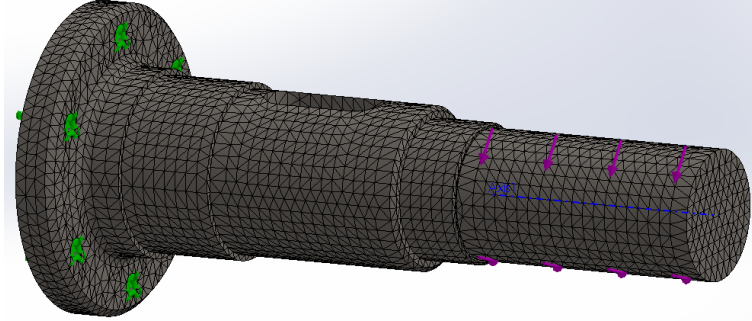
Şekil 4.18. Eğilme etkisindeki kasnak milinin yer değiştirme analiz sonuçları (mm)

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

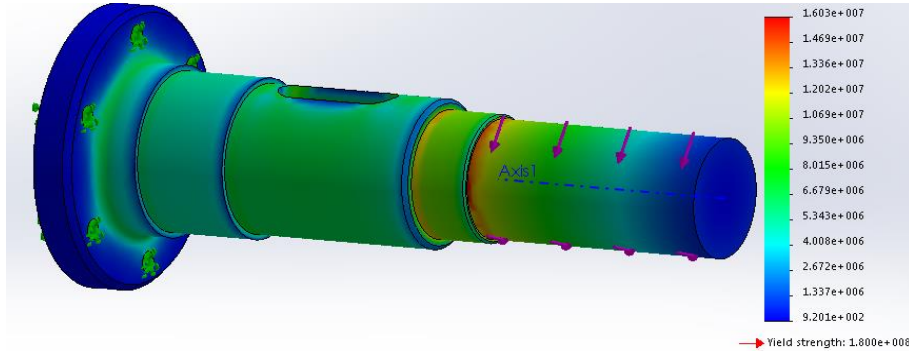
Kasnak miline, motorun maksimum çıkış torku olan 240 Nm'lik bir burulma momenti uygulanmıştır. Kasnak milinin rotor sağ kapağı ile civata birleşim noktaları sabit noktalar olarak alınmış ve burulma momenti kasnak milinin ucundan uygulanmıştır. Uygulanan burulma



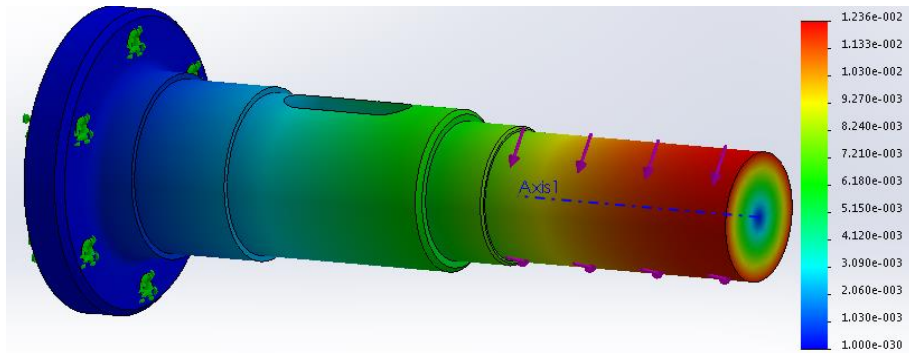
momenti etkisi altındaki kasnak milinin ağ yapısı Şekil 4.19'da, von mises gerilme sonuçları Şekil 4.20'de, yer değiştirme sonuçları ise Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



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



Şekil 4.20. Burulma etkisindeki kasnak milinde oluşan von mises gerilmesi analiz sonuçları (N/m<sup>2</sup>)



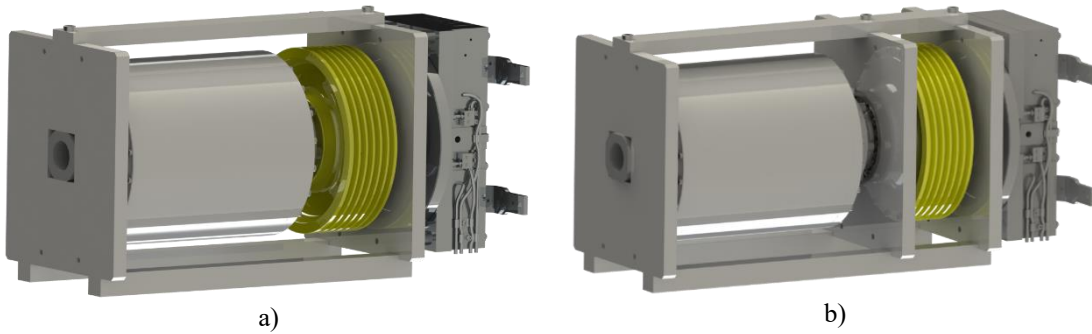
Şekil 4.21. Burulma etkisindeki kasnak milinde oluşan yer değiştirme analiz sonuçları (mm)

Uygulanan 240 Nm'lik burulma momenti etkisi altında kasnak milindeki maksimum von mises gerilmesi 16.03 MPa olarak elde edilmiştir. Burulma etkisi düşünüldüğünde malzemenin kayma akma dayanımı dikkate alınmaktadır. Bu değer de eğilme akma dayanımının yaklaşık 0.58 katıdır (Shear Strength, 2007). Bu durumda malzemenin kayma akma sınırı 104.4 MPa olmaktadır. Böylelikle kasnak mili burulma momenti etkisi altında 6.51 kat güvenli çıkmıştır. Deformasyon analizlerine göre mildeki maksimum yer değiştirme milin uç noktalarında ve

12.36  $\mu\text{m}$  gibi oldukça düşük bir değer olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla maksimum burulma momenti altında kasnak mili güvenli bölgede çalışmaktadır.

#### 4.3.2. Rotor burulma analizi

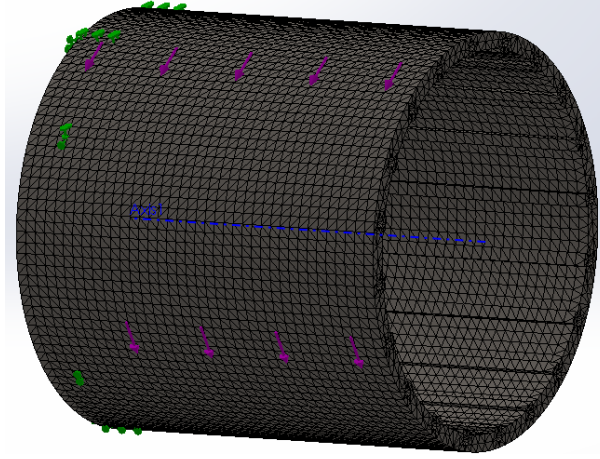
Dıştan rotorlu SMSM'nin dönen kısmı rotordur ve üzerinde mıknatıslar yer almaktadır. Dönme hareketi rotordan kasnak miline aktarılmaktadır. Motor tasarımı yapılırken farklı geometriler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Şekil 4.22'de ortada yer alan şasi elemanının bulunmadığı ilk tasarım denemesinde,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



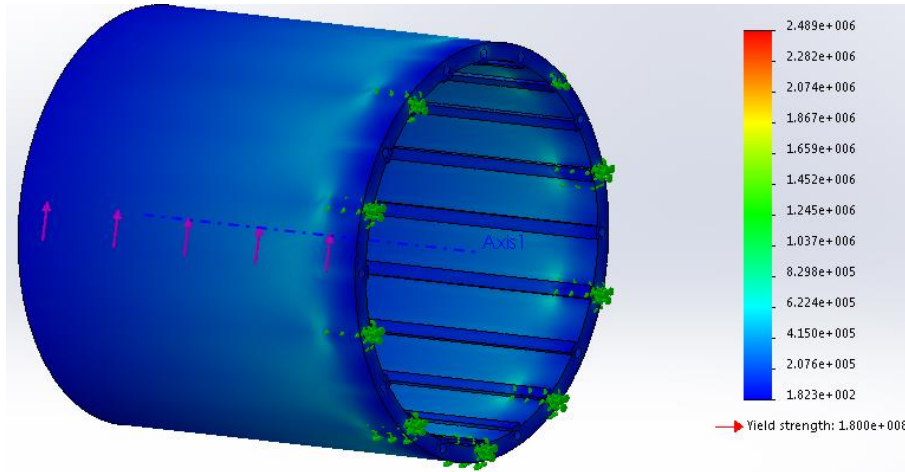
Şekil 4.22. Dıştan rotorlu SMSM'nin ilk iki tasarım denemesi, a) Orta şasisiz b) Orta şasili, dikdörtgen birleştirme profilli

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

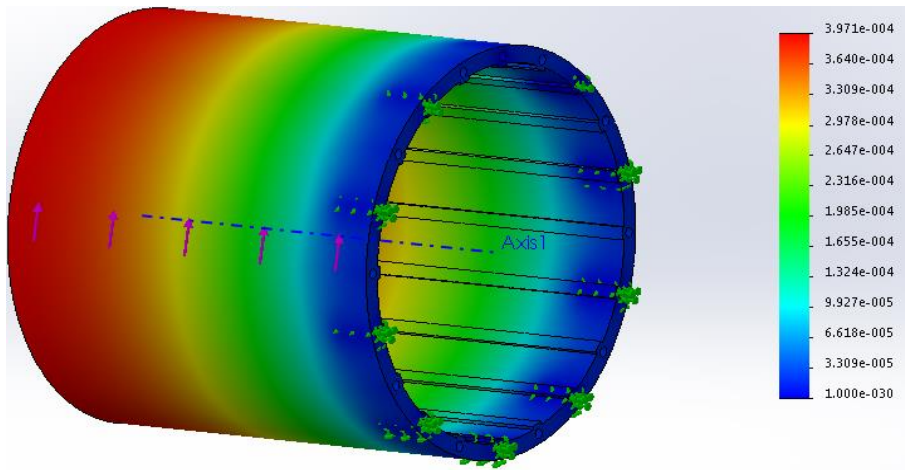
edilmiştir. Analizler rotorda bulunan mıknatıs kanalları varken gerçekleştirilmiştir. Prototip motorun üretim aşamasında rotor içine açılan mıknatıs kanallarına ihtiyaç duyulmamıştır.



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



Şekil 4.24. Burulma etkisindeki rotorda oluşan von mises gerilmesi analiz sonuçları (N/m<sup>2</sup>)

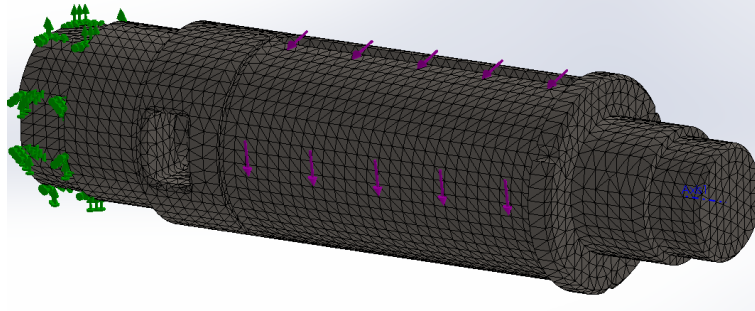


Şekil 4.25. Burulma etkisindeki rotorda oluşan yer değiştirme analiz sonuçları (mm)

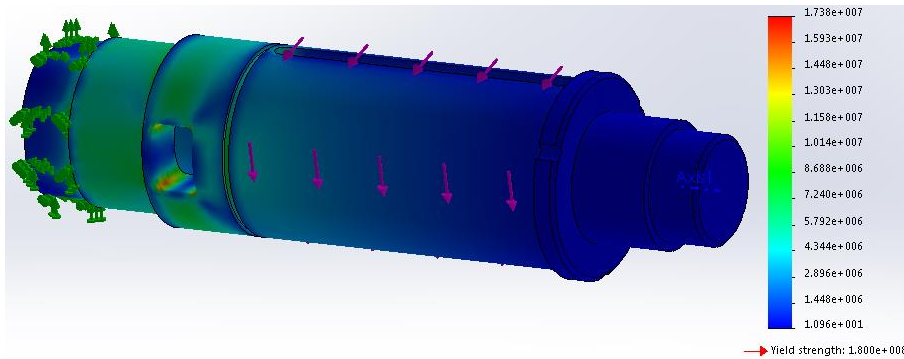
Şekil 4.24'te görüldüğü gibi uygulanan 240 Nm'lik kuvvet altında, rotordaki maksimum von mises gerilmesi 2.48 MPa olarak elde edilmiştir. Şekil 4.25'te ise maksimum yer değiştirme değeri 0.39  $\mu\text{m}$  olarak elde edilmiştir. Kullanılan AISI 1010 çeliğinin kayma akma sınırı baz alındığında, rotorun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

#### 4.3.3. Stator mili burulma analizi

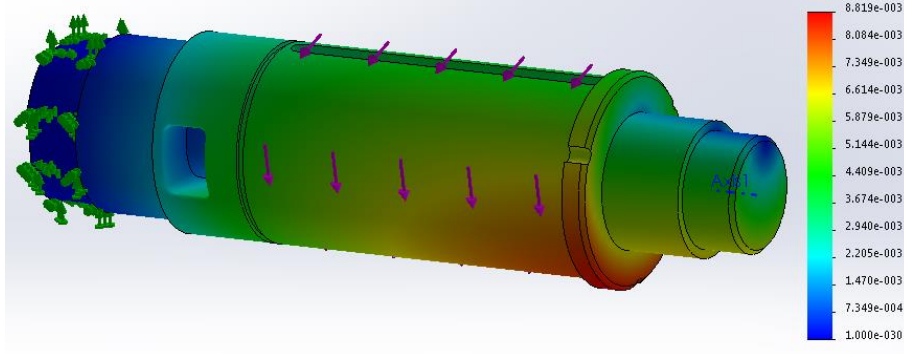
Stator mili sabit olduğundan dönme yönüne ters yönde burulma kuvvetine maruz kalmaktadır. Stator miline ayrıca statorun kendi ağırlığı yük etkisi yapmaktadır fakat stator ve sargıların toplam ağırlığı yaklaşık 28 kg gibi düşük bir değer olduğundan bu bölgede eğilme gerilmesine bakmaya gerek yoktur. Stator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



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



Şekil 4.27. Burulma etkisindeki stator milinde oluşan von mises gerilmesi analiz sonuçları ( $\text{N}/\text{m}^2$ )



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

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

#### 4.4. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Termal Analiz Sonuçları

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

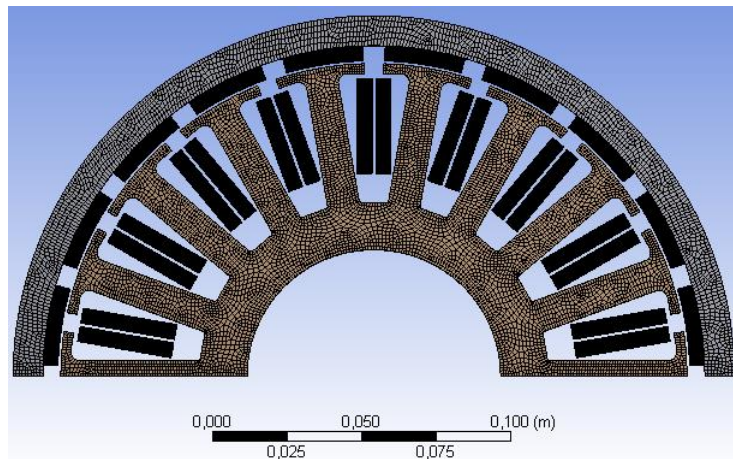


Tablo 4.5. Motor sargılarının izolasyon sınıfları (Toshiba, 2011)

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

\* Ortam Sıcaklığı 40°C kabul edilerek verilmiştir.

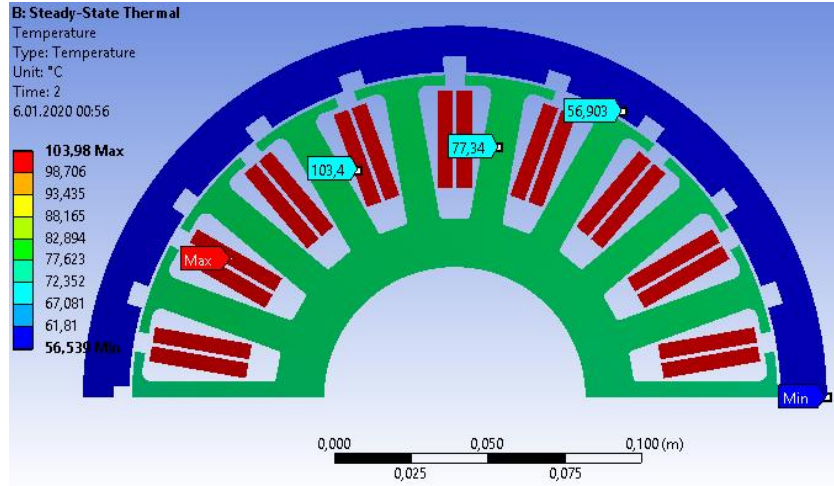
Elektrik motorlarında akımın geçtiği sargılar, sıcaklık değerlerinin en yüksek olduğu bölümlerdir. Mıknatısların sargılar ile direkt bir temasının olmamasından ve rotor ile birlikte dönmesinden dolayı stator sargılarına göre sıcaklıkları daha düşük seviyelerde olmaktadır. Dolayısıyla termal analizlerdeki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



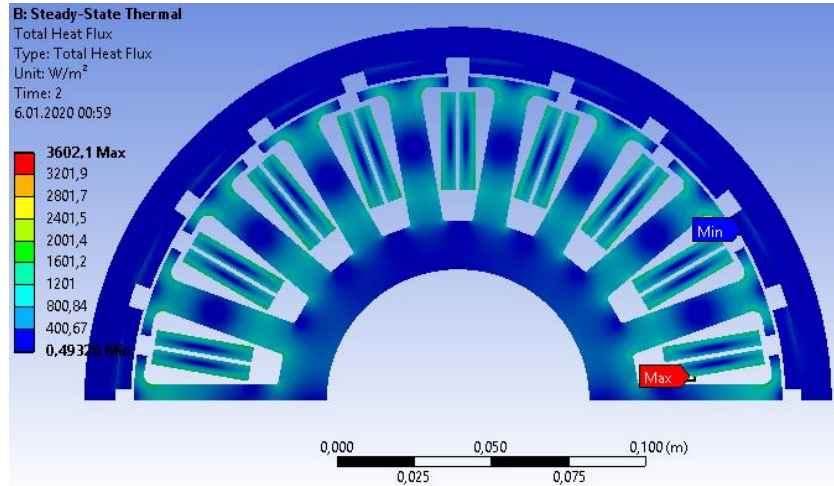
Şekil 4.29. Termal analizlerde kullanılan ağ yapısı

Motor dışına doğru olan ısı yayılımı ve ısı üreten stator sargılarının ısı yayılım tanımlamaları yapılmış ve ortam sıcaklığı 40 °C girilerek analiz gerçekleştirilmiştir. Tam yük altında motor

sıcaklığı kalıcı duruma geçmiş ve termal analizlerde Şekil 4.30'daki sonuçlar elde edilmiştir. Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, sargıların sıcaklığı 103.4 °C, mıknatısların sıcaklığı ise 56.903 °C olarak elde edilmiştir. Motorun sürekli tam yükte değil de S5 görev çevriminde çalıştığı düşünüldüğünde ise sargıların yaklaşık 83.21 °C sıcaklığa sahip olması beklenmektedir. Dolayısıyla motor sürekli çalışma modunda dahi termal yönden güvenli çalışma bölgesindedir.



a)



b)

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

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

#### 4.5. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Üretilmesi

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

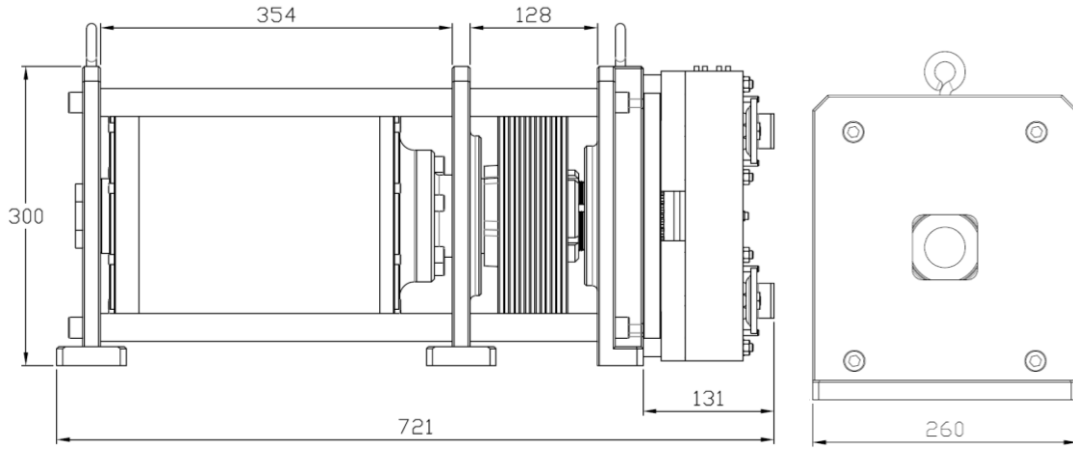
Kasnağın kama ile bağlandığı kasnak mili hem eğilmeye hem de burulmaya maruz kalmaktadır. Mile etkileyen maksimum moment altında, kasnak mili için çap hesabı yapıldığında kasnak milinin çapı 43.35 mm olarak elde edilmiştir (Kayma emniyet gerilmesi 15 N/mm<sup>2</sup>, etkileyen maksimum moment ise 240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

Stator mili ise rotor gövdesinin ve statorun yataklanması için kullanılmıştır. Sol şasi elemanına kare profil ile sabitlenmiş ve sabit bir şekilde durmaktadır. Stator milinin sol orta kısmından bir delik açılmış ve stator sargıları bu delikten dışarı çıkarılmıştır. Motorda kullanılan kasnak, 6 oluklu standart bir 240 mm'lik kasnaktır. Kasnak, mile kama bağlantısı yapılarak bağlanmış, KM14 ve MB14 emniyet somunu ve pulu ile sabitlenmiştir. Şekil 4.31'de montaj aşamaları ve freni ile birlikte prototip motorun son hali paylaşılmıştır. Dıştan rotorlu SMSM'nin prototipi özgün, rijit ve yüksek mukavemetli bir yapıya sahip olarak üretilmiştir. Şekil 4.32'de motorun sınır ölçüleri gösterilmiştir. Şekil 4.33'te ise üretilen kasnak mili ve stator mili paylaşılmıştır.





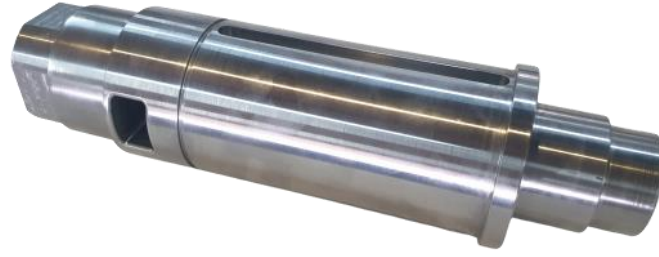
Şekil 4.31. Dıştan rotorlu SSM'nin montaj resimleri



Şekil 4.32. Dıştan rotorlu SSM'nin ölçüleri



a)



b)

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

#### 4.6. Dıştan Rotorlu SMSM'nin Test Sonuçları

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

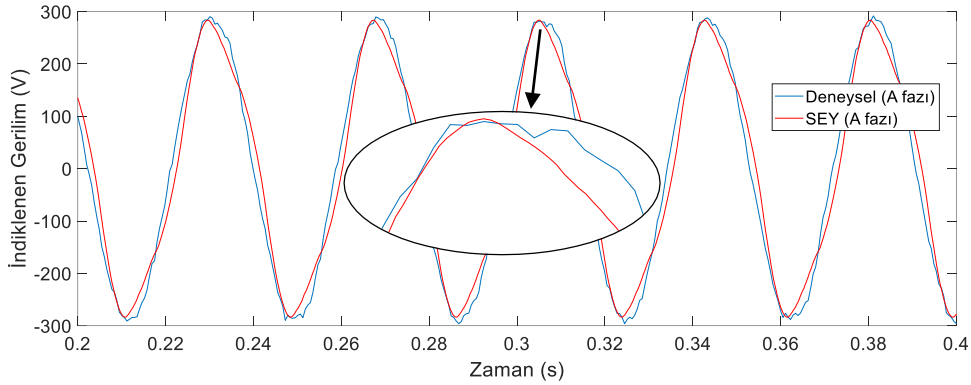
Tablo 4.6. Dıştan rotorlu SMSM'nin faz dirençleri

Stator sargısı	Analiz Sonucu ( $\Omega$ )	Deneysel Ölçüm Sonucu ( $\Omega$ )
1. faz	3.28	3.3
2. faz	3.28	3.3
3. faz	3.28	3.3

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

#### 4.6.1. Dıştan rotorlu SMSM'nin zıt EMK testi

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

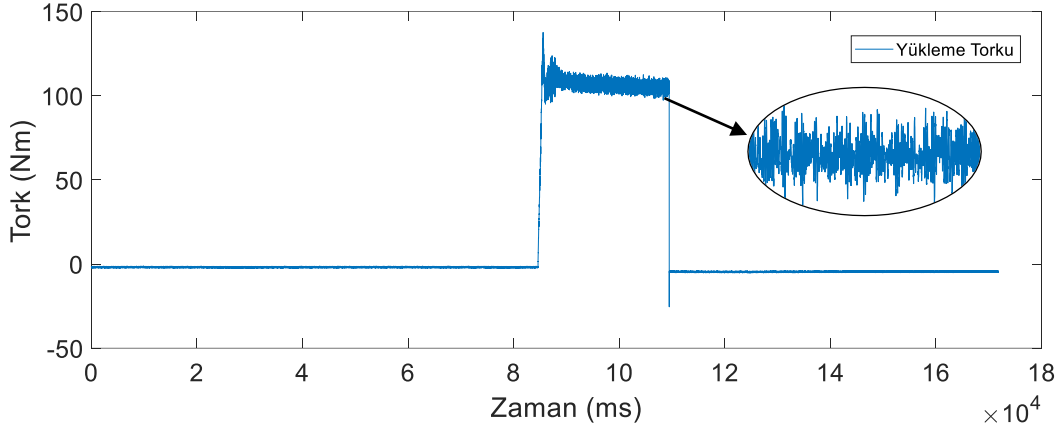


Şekil 4.34. İndüklenen zıt EMK'nın SEY ve deneysel sonuç grafikleri

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

#### 4.6.2. Dıştan rotorlu SMSM'nin yüklü çalışma testleri

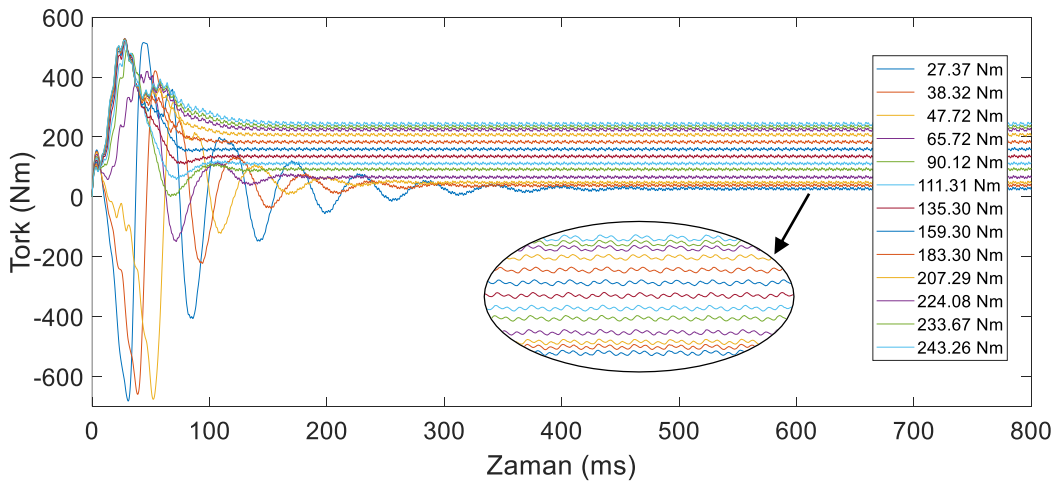
Üretilen prototip motorun yüklü çalışma testleri, motor milinin yükleme motoru mili ile bağlantısının yapılması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Mil bağlantıları kaplinler yardımıyla yapılmış ve millerin arasına bir tork sensörü bağlanmıştır. Böylelikle prototip motorun hangi tork değerlerinde yüklendiği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



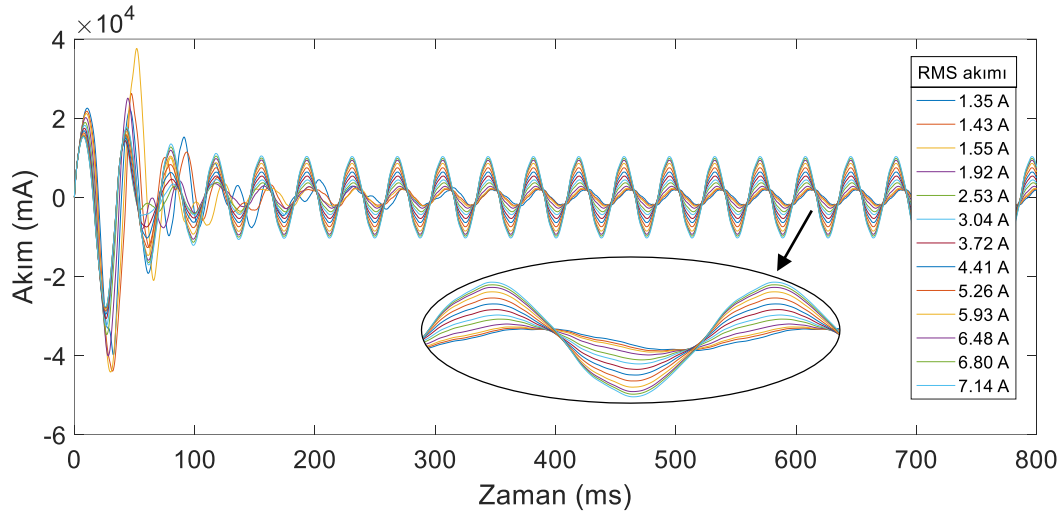
Şekil 4.35. Motorun yüklenmesi esnasında kaydedilen tork verisi örneği

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

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



Şekil 4.36. SEY analizlerindeki farklı yükleme değerleri



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

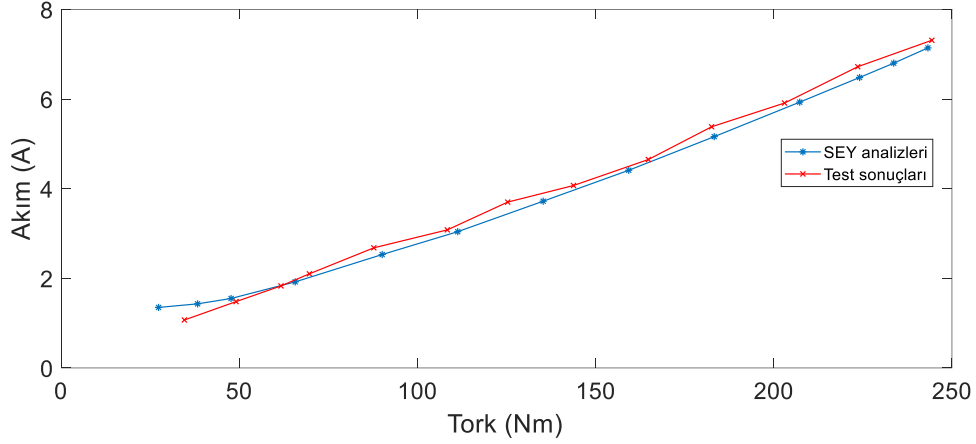
Analiz sonuçlarına göre, motorun 243.26 Nm yüklemadaki verim değeri %86.3 olarak elde edilmiştir. Testler esnasında, dıştan rotorlu SMSM 34.62 Nm'den 244.36 Nm'ye kadar kademeli olarak yüklenmiştir. Yükleme işlemleri için farklı bir elektrik motoru kullanılmış ve bu motor tork modunda çalıştırılarak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

Tablo 4.7. Dıştan rotorlu SMSM'nin test sonuçları

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

Tüm fazlardan çekilen akım değerlerinin birbirine yakın olması sebebiyle Tablo 4.7'de sadece A fazının akım değerleri paylaşılmıştır. Sürücü girişindeki gerilim değerleri (rms) ise, güç analizöründen 220 V, 223 V ve 221 V olarak izlenmiştir. Güç faktörü ( $\cos \phi$ ) değeri motorun düşük yükleme değerlerinde 0.95 iken, yükleme oranı arttıkça 1'e ulaşmıştır. Şekil 4.38'de, SEY analizlerinde ve test sonuçlarında elde edilen tork ve akım değerleri üst üste çizdirilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere, dıştan rotorlu SMSM'nin analiz sonuçları ile test sonuçlarının

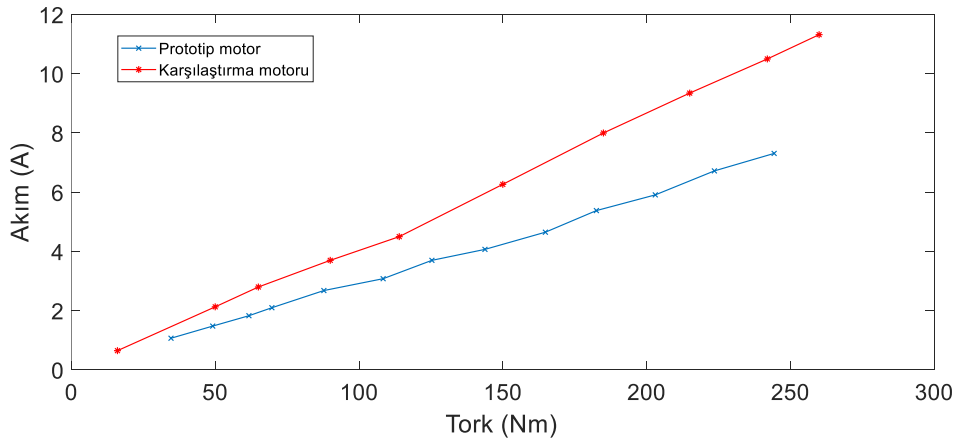
uyumlu olduğu görülmüştür. Test sonuçlarına göre 244.36 Nm yüklemdeki verim değeri %84.67 olarak elde edilmiştir. Böylelikle anma torku civarında, SEY analizlerindeki ve testlerdeki verim değerleri arasında %1.63'lik bir fark oluşmuştur. Ortaya çıkan bu verim farkının, motorun üretimi esnasında oluşan ek sürtünme kayıplarından ve stator sargılarındaki uzunluk farklarından dolayı meydana geldiği düşünülmektedir.



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

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

Yapılan proje çalışmasının en önemli hedeflerinden biri, tasarlanan ve prototip üretimi yapılan dıştan rotorlu SMSM'nin sektörde satışı gerçekleştirilen içten rotorlu bir SMSM ile karşılaştırılmasıdır. Karşılaştırma motorunun testler sonucu elde edilen tüm bilgileri Ek 1'de paylaşılmıştır (Ergene ve diğ., 2018). Daha doğru bir karşılaştırma yapılabilmesi için, içten ve dıştan rotorlu motorların analiz sonuçları değil, test sonuçları karşılaştırılmıştır. Böylelikle üretilmiş motorlar üzerinden, gerçek verilerin karşılaştırılması mümkün olmuştur. Karşılaştırma için seçilen içten rotorlu SMSM'nin ve prototip üretimi yapılan dıştan rotorlu SMSM'nin test sonuçlarından elde edilen tork-akım değerleri Tablo 4.8'de ve Şekil 4.39'da gösterilmiştir.



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

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

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

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

Dıştan rotorlu SMSM'nin sınır ölçüleri, içten rotorlu karşılaştırma motorunun sınır değerleriyle aynıdır. Üretilen prototip motorun, bakır ve mıknatıs ağırlıkları karşılaştırma motorundan daha ağırdır. Dıştan rotorlu motorun rotor çapı daha büyük olduğundan, rotor üzerine yerleşen mıknatısların ağırlığının içten rotorlu motordakinden fazla olması normaldir. Bakır ağırlıklarının ağır olmasının sebebi ise, daha yüksek verim değerlerinin elde edilebilmesi için maksimum oluk alanının elde edilmiş olması ve oluk doluluk faktörünün olabildiğince yüksek tutulmasıdır. Bakır ve mıknatıs ağırlıklarının fazla olması dıştan rotorlu SMSM'nin üretim maliyetleri açısından bir dezavantaj gibi gözükse de, sağladığı %12.17'lik verim artışıyla bu maliyetleri kısa sürede karşılayacaktır.

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

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

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

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

Proje iş paketlerinde önerilen rotor gövdesine geçirilecek kaymalı kasnak tasarımından vazgeçilmiştir. Bunu sebebi, seri üretim düşünüldüğünde standart olmayan bir kasnağın üretiminin maliyetli olması ve kasnak ile rotor gövdesine binecek yüklerin rotor gövdesinde deformasyona sebep olma ihtimalidir. Şu anki tasarımın kayışlı asansör motoruna dönüştürülebilir seçeneğinin olması ve daha mukavemetli bir yapıya sahip olması sebebiyle standart bir kasnak iki şasi arasına yerleştirilmiştir. Ayrıca projeden üretilecek motorun asansör kule sisteminde test edilmesi için destek olacağını belirten firmanın test kulesi inşası henüz tamamlanmadığından prototip motorun testleri sadece deney düzeneğinde gerçekleştirilebilmiştir.



## 5. SONUÇ

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

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

Dıştan rotorlu SMSM'nin tasarım aşamalarında, elektromanyetik analiz yazılımı ile yapay arı kolonisi (ABC) algoritması kullanılarak motor performans verileri iyileştirilmiştir. Bu bağlamda, ilk olarak motorun analitik tasarımı yapılmış, daha sonra ise sonlu elemanlar metodu ile elektromanyetik, yapısal ve termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde içten rotorlu SMSM'lerin ayrıntılı analitik modelleri yer almaktadır. Bu proje çalışmasında içten rotorlu SMSM'lerin analitik modelleri dıştan rotorlu SMSM'ye uyarlanmış ve dıştan rotorlu SMSM'nin analitik denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler kullanılarak girilen parametre değerlerine göre istenilen sonuçları hesaplayan bir program yazılmıştır. ABC algoritması ile yapılan optimizasyonlarda değişken parametreler; stator dış ucu kalınlığı ( $h_{s0}$ ), oluk dış ucu yarıçapı ( $h_{s1}$ ), oluk yüksekliği ( $h_{s2}$ ), stator boyunduruk kalınlığı ( $h_{sb}$ ), stator dış genişliği ( $w_{sd}$ ) ve statorun bir fazındaki tur sayısı ( $N_t$ ) olarak seçilmiştir. Seçilen parametrelerin değişimlerine göre stator

dışlarındaki akı yoğunluğunun ( $B_{sd}$ ) 1.7 Tesla'yı, doluluk faktörü ( $k_{dol}$ ) değerinin 0.57'yi ve akım yoğunluğu ( $J$ ) değerinin 6.5 A/mm<sup>2</sup> geçmemesi istenmiştir. Optimizasyon sonucu elde edilen parametre değerlerine ANSYS Maxwell yazılımı yardımıyla nihai halleri verilmiştir.

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

Yapısal testlerde dıştan rotorlu SMSM'nin kasnak mili, rotoru ve stator mili hem eğilme hem de burulma etkisi altında izlenmiştir. Kasnak mili 25 kN'luk eğilme kuvveti altında 9,38 kat, 240 Nm'lik burulma momenti etkisi altında ise 6.51 kat güvenli çıkmıştır. Dıştan rotorlu SMSM'nin nihai tasarımında kasnak mili iki adet şasi arasında bulunduğu için, kasnak üzerindeki yüklerin rotora ve stator miline bir etkisi olmamaktadır. Bu tasarım sayesinde kasnağın sağ ve sol tarafındaki şasiler ile simetrik bir yük dağılımı elde edilmiştir. Ayrıca kafes yapısı sayesinde motor şasisinin burulma etkisi altındaki deformasyonu da minimize edilmiştir. Dolayısıyla rotor ve stator mili üzerinde sadece burulma etkisi bulunmaktadır. 240 Nm'lik burulma momenti altında, maksimum von mises gerilmeleri rotor ve stator milinde sırasıyla 2.48 MPa ve 17.38 MPa olarak elde edilmiştir. Böylelikle burulma etkisi altında stator mili 6 kat, rotor ise 42 kat güvenli çıkmıştır. Güvenlik katsayısının çok yüksek çıkması, seri üretimin düşünülmesi durumunda kapak bağlantıları da hesaba katılarak rotor kalınlığının bir miktar düşürülebileceğini göstermektedir.

Termal analizlerde motor dışına doğru olan ısı yayılımı ve ısı üreten stator sargılarının ısı yayılım tanımlamaları yapılmış ve ortam sıcaklığı 40 °C girilerek tam yük altında analizler gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, sargıların sıcaklığı 103.4 °C, mıknatısların sıcaklığı ise 56.903 °C olarak elde edilmiştir. Motorun S5 görev çevriminde çalıştığı düşünüldüğünde ise sargıların yaklaşık 83.21 °C sıcaklığa sahip olması beklenmektedir. Dolayısıyla motor sürekli çalışma modunda dahi termal yönden güvenli çalışma bölgesindedir.

Tüm analizlerden başarılı olan dıştan rotorlu SMSM'nin üretim aşamalarında CNC freze ve torna işlemleri uygulanmıştır. Mıknatıslar N45SH tipinde seçilmiş ve özel olarak üretilmiştir. Sargılar çift katmanlı olacak şekilde sarılmış, mıknatıslar ise rotor üzerine yapıştırılmıştır. Dıştan rotorlu SMSM'nin prototipi standart bir kasnak ve fren ile özgün, rijit ve yüksek mukavemetli bir yapıya sahip olarak üretilmiştir.

Kurulan deney düzeneği ile yapılan yükleme testlerinde indüklenen zıt EMK geriliminin SEY sonuçları ile örtüştüğü görülmüştür. İndüklenen gerilimin tepe değeri SEY analizlerinde 283.6 V iken test sonuçlarında 286.3 V olarak elde edilmiştir. Yüklü çalışma deneylerinin tümü, motorun anma hızı olan 159.2 rpm'de gerçekleştirilmiştir. Yükleme torku, gerçek çalışma koşullarının daha iyi simüle edilebilmesi için kademesiz ve doğrudan uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre verim değeri %84.67 olarak elde edilmiştir. Böylelikle anma torku civarında, SEY analizlerindeki ve testlerdeki verim değerleri arasında %1.63'lik bir fark oluşmuştur. Ortaya çıkan bu verim farkının, motorun üretimi esnasında oluşan ek sürtünme kayıplarından ve stator sargılarındaki uzunluk farklarından dolayı meydana geldiği düşünülmektedir.

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

## KAYNAKLAR

- Advanced Magnets, (2019). Typical Physical and Chemical Properties of Some Magnetic Materials. Erişim: 20 Ekim 2019, <http://www.advancedmagnets.com/custom-magnets/>
- Akar-SMT Serisi, (2015). Akar-SMT serisi dişlisiz asansör motoru. Erişim: 11 Mayıs 2019, [http://www.akarasansor.com/Assets/Documents/SMT140AC\\_katalog.pdf](http://www.akarasansor.com/Assets/Documents/SMT140AC_katalog.pdf).
- Akar Beltsys, (2015). Akar-Beltsys® Kayışlı Dişlisiz Sistem. Erişim: 9 Temmuz 2019, <http://www.akarasansor.com/sayfalar.asp?LanguageID=1&cid=3&id=192>
- Allied Motion, (2016). Outer rotor brushless DC motors, technology overview. Erişim: 11 Mayıs 2017, [http://www.koshindenki.com/img/file/KinetiMax\\_TechnologyOvr\\_R3\(scrn\).pdf](http://www.koshindenki.com/img/file/KinetiMax_TechnologyOvr_R3(scrn).pdf)
- Ansys Maxwell, (2019). Electromagnetic field simulation software. Erişim: 15 Aralık 2019, <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
- Arnold Magnetic, (2017). Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets-N45SH. Erişim: 21 Ekim 2019, <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N45SH-151021.pdf>
- Avnet Silica Comp., (2009). *Motor Topologies and Drives*, Motor Control Workbook, 9.
- Aydın, M. (2012). Brushless Permanent Magnet Servomotors, İçinde: Editör: Küçük, S. *Serial and Parallel Robot Manipulators: Kinematic Dynamics Control and Optimization*, First Edition, InTech, Rijeka, pp. 275-294.
- Ayçiçek, E. (2009). Sürekli Miknatis Teknolojisi ve Enerji Verimliliği Açısından Önemi. Erişim adresi (20 Aralık 2016): <https://www.elektrikport.com/makale-detay/surekli-miknatis-teknolojisi-ve-enerji-verimliliği-acisindan-onemi-engin-aycicek/4129#ad-image-0>
- Bakhtiarzadeh, H. (2017). *Design of permanent magnet synchronous motor for elevator application* (Master's Thesis). Istanbul Technical University, Graduate School Of Science Engineering And Technology, İstanbul.
- Bianchi, N., Bolognani, S., Pre, M. D., & Grezzani, G. A. G. G. (2006). Design considerations for fractional-slot winding configurations of synchronous machines. *IEEE transactions on industry applications*, 42(4), 997-1006.
- Changshu Canon, (2016). Outer rotor type permanent-magnet strong-driving gearless traction machine, *China Patent No. CN 104118788 A*.
- Cho, D. H., Kim, J. K., Jung, H. K., & Lee, C. G. (2003). Optimal design of permanent-magnet motor using autotuning niching genetic algorithm. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39(3), 1265-1268.
- Clean Craft KK, (2014). Permanent magnet outer rotor synchronous motor, *Japan Patent No. JP2014147191 A*.
- Cros, J., & Viarouge, P. (2002). Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17(2), 248-253.
- Çağan, N. (2015). *Design of an Outer-Rotor Brushless DC Motor For Control Moment Gyroscope Applications* (Master's Thesis). Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Ankara.
- Duru, H.T., Demiröz, R., Toktaş, Y. (2005). Asansör Sistemlerinde Doğrudan Tahrik ve Miknatis Uyarmalı Senkron Motor Kullanılarak Enerji Verimliliğinin Yükseltilmesi, *1. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli.

- Eker, M. (2017). *Şebeke Yolvermeli Eksenel Akılı Sürekli Miknatıslı Senkron Motor Tasarımı* (Doktora Tezi). Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- El-Refaie, A. M., & Jahns, T. M. (2005). Optimal flux weakening in surface PM machines using fractional-slot concentrated windings. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(3), 790-800.
- El-Refaie, A. M., Zhu, Z. Q., Jahns, T. M., & Howe, D. (2008). Winding inductances of fractional slot surface-mounted permanent magnet brushless machines. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1-8).
- Ergene, L. T., Polat, A., Bakhtiarzadeh, H. (2018). Design of a permanent magnet synchronous motor used in elevators, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture Of Gazi University*, 33(2), 725-737.
- Dajaku, G., & Gerling, D. (2014). New methods for reducing the cogging torque and torque ripples of PMSM. *IEEE 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC)* (pp. 1-7).
- Dosiek, L., & Pillay, P. (2007). Cogging torque reduction in permanent magnet machines. *IEEE Transactions on industry applications*, 43(6), 1565-1571.
- Fei, W., & Zhu, Z. Q. (2013). Comparison of cogging torque reduction in permanent magnet brushless machines by conventional and herringbone skewing techniques. *IEEE Transactions on energy Conversion*, 28(3), 664-674.
- Feyrer, K. (2007). *Wire ropes*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s:198.
- Gambhir, R. and Jha, A. K. (2013). Brushless DC Motor : Construction and Applications, *The International Journal Of Engineering And Science*, vol. 2, no. 5, pp. 72–77.
- Hanselman, D. C. (2003). *Brushless permanent magnet motor design*. 2nd Edition, The Writers' Collective.
- Heikkila, T. (2002). *Permanent Magnet Synchronous Motor For Industrial Inverter Applications, Analysis And Design* (PhD thesis). Lappeenranta University of Technology, Graduate School of Electrical Engineering, Lappeenranta.
- Hemmati, S., ShokriKojoori, S., Ghobadi, R., & Ghiasi, M. I. (2013). A practical approach to cogging torque reduction in a permanent magnet synchronous motor using non-dominated sorting genetic algorithm. *IEEE 4th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)* (pp. 88-92).
- Hirzel, S., Fleiter, T. & Rosende, D. (2010). Elevators and escalators in Germany from an energy perspective. Fraunhofer ISI. Erişim: 10 Ağustos 2019, [http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-1331371.pdf](http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-1331371.pdf)
- Hyundai Elevator, (2005). Stator Structure Of Thin Winch For Elevator, Comprising Plural Core Pin Combining Bodies And Connection Plates Divided Into Plural Numbers, *Korea Patent No. KR20040110131 A*.
- Isovac, (2018). Electrical Steel, isovac 530-50A. Erişim: 29 Ekim 2019, [https://www.voestalpine.com/division\\_stahl/content/download/32777/347273/file/DB\\_isovac\\_530-50A\\_E\\_280715.pdf](https://www.voestalpine.com/division_stahl/content/download/32777/347273/file/DB_isovac_530-50A_E_280715.pdf)
- Islam, R., Husain, I., Fardoun, A., & McLaughlin, K. (2007). Permanent magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction. *IEEE Industry Applications Annual Meeting* (pp. 1552-1559).

- İmrak, C. E. ve Gerdemeli, İ. (2000). *Asansörler ve Yürüyen Merdivenler*. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Güler, F. (2013). *Halbach Dizilimlerinin Fırçasız Doğru Akım Motoruna Uygulanması* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Jahns, T. M., & Soong, W. L. (1996). Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives-a review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 43(2), 321-330.
- JardineSchindler, (2015). Schindler 3300 AP elevator [Video]. Erişim: 9 Temmuz 2019, [https://www.youtube.com/watch?v=f5IIBR\\_YATs](https://www.youtube.com/watch?v=f5IIBR_YATs).
- Jeff Holmes, (2018). What is meant when an elevator has a roping ratio of 2:1? What other possible ratios exist?. Erişim: 9 Temmuz 2019, <https://www.quora.com/What-is-meant-when-an-elevator-has-a-roping-ratio-of-2-1-What-other-possible-ratios-exist>.
- Karaboğa, D., (2005). An Idea Based On Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. (Technical Report TR06), Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department.
- Karaboğa, D. (2014). *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*. Nobel Yayıncılık, İstanbul.
- Kim, S. A., Choi, G. D., Lee, J., & Cho, Y. H. (2016). Optimal rotor shape design of 3-step skew spoke type BLAC motor to reducing cogging torque. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 51(s1), S135-S145.
- Kuphaldt, T. R. (2007). *Lessons In Electric Circuits*. Volume II–AC, pp. 410.
- Küçükçalık, M. M. (2016). Asansörlerde Enerji Sınıflandırılması ve Verimliliği Artırmak İçin Alınabilecek Tedbirler, *Asansör Sempozyumu*, İzmir.
- Leroy Somer, (2005). Electrical machine e.g. synchronous motor, for electrical vehicle, has stator with teeth, where each tooth supports individual coil, and rotors with magnets that have same polarity sides arranged with respect to common polar unit, *French Patent No. FR2852162A1*.
- Leroy Somer, (2009). Electric turning machine e.g. motor, for elevator, has stator placed inside of another stator, and rotor arranged between stators, where rotor includes permanent magnets arranged circumferentially between polar parts, *French Patent No. FR2915033 A1*.
- Leroy Somer, (2017). Gearless for elevators-Z range. Erişim: 14 Aralık 2017, [www.emersonindustrial.com/en-EN/leroy-somer-motors-drives/downloads/Pages/catalogues.aspx](http://www.emersonindustrial.com/en-EN/leroy-somer-motors-drives/downloads/Pages/catalogues.aspx).
- Lin, D., Ho, S. L., & Fu, W. N. (2009). Analytical prediction of cogging torque in surface-mounted permanent-magnet motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(9), 3296-3302.
- Lipo, T. A. (2017). *Introduction to AC Machine Design*. IEEE Press, John Wiley & Sons.
- Liu, G., Shao, M., Zhao, W., Ji, J., Chen, Q., & Feng, Q. (2015). Modeling and analysis of halbach magnetized permanent-magnets machine by using lumped parameter magnetic circuit method. *Progress In Electromagnetics Research*, 41, 177-188.
- Liu, W., Liu, L., Chung, I. Y., & Cartes, D. A. (2011). Real-time particle swarm optimization based parameter identification applied to permanent magnet synchronous machine. *Applied Soft Computing*, 11(2), 2556-2564.
- Martinez, D. (2012). *Design of a Permanent-Magnet Synchronous Machine with Non-Overlapping Concentrated Windings* (Master's Thesis). KTH Royal Institute of

- Technology, Department of Electrical Engineering-Electrical Energy Conversion, Stockholm.
- Matweb, (2019). AISI 1010 Steel, hot rolled bar, 19-32 mm (0.75-1.25 in) round or thickness. Erişim: 22 Mayıs 2019, <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=7573afc5e06c4a518c01efba4690182c>
- Meier, F. (2008). *Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications* (PhD Thesis). KTH Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering-Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm.
- Mitsubishi Electric, (1990). Elevator hoist apparatus with an outer rotor motor, *U.S. Patent No.US4960186 A*.
- Montanari Giulio, (2014). PENTA 830: concentrate of versatility & extremely compact gear, Erişim: 9 Temmuz 2019, <https://www.montanarijulio.com/en/azienda/>
- Murphy, J. (2012). What's the Difference Between AC Induction, Permanent Magnet, and Servomotor Technologies?. Erişim: 11 Haziran 2019, <https://www.machinedesign.com/motors-drives/article/21831709/whats-the-difference-between-ac-induction-permanent-magnet-and-servomotor-technologies>
- Mutluer, M. & Bilgin, O. (2016). An intelligent design optimization of a permanent magnet synchronous motor by artificial bee colony algorithm. *Turkish Journal of Elec Eng & Comp Science*, 24: pp:1826-1837.
- Mutluer, M. (2017). Design of external rotor permanent magnet synchronous motor based on genetic algorithm and differential evolution algorithm. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 5(4), 242-246.
- Niessen, F. (2013). Winding Scheme Calculator. Erişim: 31 Ekim 2019, <http://www.bavaria-direct.co.za/scheme/calculator/>
- Ningbo Xinda Elevator, (2011). Elevator tractor, *Europe Patent No. EP 1642858 B1*.
- Ningbo Xinda Elevator, (2017). Gearless Traction Machine, Erişim: 14 Aralık 2017, [www.xinda-elevator.com/gearless-traction-machine/](http://www.xinda-elevator.com/gearless-traction-machine/).
- Ocak, C., Tarimer, I., Dalcali, A., & Uygun, D. (2016). Investigation effects of narrowing rotor pole embrace to efficiency and cogging torque at PM BLDC motor. *TEM Journal*, 5(1), 25.
- Otis-Gen2, (2019). Gen2® modernization. Erişim: 9 Temmuz 2019, <https://www.otis.com/en/us/modernization/gen2-modernization/>.
- Otis Elevator, (2015). Elevator machine with external rotor and motor within traction sheave, *China Patent No. CN102471028 A*.
- Otis, (2016). SkyMotion™ 800 Machine. Erişim: 12 Temmuz 2019, <https://files.otis.com/otis/en/us/contentimages/SkyMotion%20800%20Machine.pdf>.
- Ouyang, W., Zarko, D., & Lipo, T. A. (2006). Permanent magnet machine design practice and optimization, *IEEE 41st IAS Annual Meeting of the Industry Applications Conference* (Vol. 4, pp. 1905-1911).
- Özoğlu, Y. (2017). New magnet shape for reducing torque ripple in an outer-rotor permanent-magnet machine. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25(5), 4381-4397.
- Öztürk, N., Dalcalı, A., Celik, E., & Sakar, S. (2017). Cogging torque reduction by optimal design of PM synchronous generator for wind turbines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28), 17593-17600.

- Putek, P. A. (2016). Mitigation of the cogging torque and loss minimization in a permanent magnet machine using shape and topology optimization. *Engineering Computations*, 33(3), 831-854.
- Pyrhonen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova, V. (2013). *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons.
- Reichert, T., Nussbaumer, T., & Kolar, J. W. (2009). Torque scaling laws for interior and exterior rotor permanent magnet machines. *IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG)*.
- Rüger, F., Eberhardt, H.D., Hofmann, W. & Milthaler, K. (2014). Energy efficient electrical drives with permanent magnets synchronous external rotor motors for elevator applications. Erişim: 25 Ağustos 2019, <https://www.lift-report.de/index.php/en/42-archive-2014-issue-3/58-energy-efficient-electrical-drives-with-permanent>
- Sag Motor, (2016). Permanent Magnets Synchronous (PMS) Gearless Tracction Machine Catalogue. Erişim: 9 Temmuz 2019, <http://sagmotor.com/en/catalogo/>.
- Sağ, T. (2015). *Sürü Zekâsı Kullanarak Renkli Görüntü Segmentasyon Tekniklerinin Geliştirilmesi* (Doktora Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Salminen, P. (2004). *Fractional Slot Permanent Magnet Synchronous Motors For Low Speed Applications* (PhD Thesis). Lappeenranta University of Technology, Department of Electrical Engineering, Lappeenranta.
- Sargazi, M., Esmaili, M., Jafarboland, M., & Khajavi, M. (2014). Effect of pole embrace on the cogging torque and unbalanced magnetic forces of BLDC motors. *IEEE 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)* (pp. 826-830).
- Shear Strength, (2007). Strength of a material or component against the type of yield or structural failure. Erişim: 10 Aralık 2018, [https://en.wikipedia.org/wiki/Shear\\_strength](https://en.wikipedia.org/wiki/Shear_strength).
- Shenyang Bluelight, (2014). Split combined stator for outer-rotor permanent-magnet synchronous traction machine, *China Patent No. CN203645513 U*.
- Sooriyakumar, G., Perryman, R., & Dodds, S. J. (2010). Design optimisation for permanent magnet synchronous motors using genetic algorithm. *IEEE 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010* (pp. 1-6).
- Soyaslan, M., Avşar, Y., Fenercioğlu, A. & Eldoğan, O. (2019). Cogging Torque Reduction in External Rotor PM Synchronous Motors by Optimum Pole Embrace. *IEEE 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*.
- Swiss Traction Ag, (2005). Gearless, compact drive system comprising an external rotor, *PCT Patent No: WO2005054108A1*.
- Swiss Traction, (2016). Swiss Traction Germany GmbH. Erişim: 14 Aralık 2017, [www.swisstraction.de/english/home.html](http://www.swisstraction.de/english/home.html)
- Tanç, G. (2014). *Elektrikli Bisikletler İçin Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarımı Ve Üretimi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Toshiba, (2011). Toshiba – Tosbec Power Products – Application Guideline #5: Temperature Rise - Insulation Life – Tips. Erişim: 14 Aralık 2018, <http://www.landbelectric.com/download-document/71-motor-temperature-rise.html>
- Traction Elevators, (2018). Erişim: 9 Temmuz 2019, [https://elevation.fandom.com/wiki/Traction\\_elevators#cite\\_note-1](https://elevation.fandom.com/wiki/Traction_elevators#cite_note-1).
- Wang, H. T., Fang, S. H., Guo, B. C., & Lin, H. Y. (2015). A new Halbach arc permanent magnet synchronous motor with three-dimensions air gap used on large telescope. *IEEE*



- International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)* (pp. 478-479).
- Xue, Z., Li, H., Zhou, Y., Ren, N., & Wen, W. (2017). Analytical Prediction and Optimization of Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent Magnet Machines With Modified Particle Swarm Optimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(12), 9795-9805.
- Yedamale, P. (2003). *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. Microchip Technology Application Note-AN885, 1-20.
- Yıldız, T. (2009). *Fırçasız doğru akım motorlarının modellenmesi ve kontrolü* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Yokoi, Y., & Higuchi, T. (2014). Selective elimination of EMF harmonics with stepped skewing for ripple torque reduction in surface-mounted permanent magnet motors. *IEEJ Journal of Industry Applications*, 3(6), 463-469.
- Tong W. (2014). *Mechanical Design of Electric Motors*. CRC Press, Radford, Virginia.
- Ziehl-Abegg-Zasyn, (2017). Elevator motors, ZAsyn. Erişim Adresi (14 Aralık 2017): [www.ziehl-abegg.com/de/en/product-range/drive-technology/elevator-motors/zasyn/](http://www.ziehl-abegg.com/de/en/product-range/drive-technology/elevator-motors/zasyn/).
- Zöhra, B. (2019). *Şebeke Kalkışlı Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Prototip Üretimi* (Doktora Tezi). Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.

## EKLER

### Ek-1: Karşılaştırma Motorunun Deneysel Sonuçları

Karşılaştırma motoruna ait farklı yük akımları için elde edilen deneysel sonuçlar (Ergene ve diğ., 2018)

Akım [A]	Moment [Nm]	Pçıkış [W]	Pgiriş [W]	Verim [%]	cos φ *
0,65	16	266,736	334,5	77,42	0,825
2,13	50	833,55	1128,9	73,84	0,85
2,8	65	1083,615	1484	73,02	0,85
3,7	90	1500,39	1961	76,5	0,85
4,5	114	1900,494	2385	79,68	0,85
6,266	150	2500,65	3320,98	75,3	0,85
8	185	3084,135	4240	72,7	0,85
9,347	215	3584,265	4953,91	72,35	0,85
10,5	242	4034,382	5565	72,5	0,85
11,32	260	4334,46	5999,6	72,24	0,85
13	295	4631,5	6604	70,131	0,814
Ortalama:				74.158	-

\*Giriş gücü hesabına ( $P_{giriş} = \sqrt{3} * U * I * \cos \varphi$ ) göre elde edilen güç faktörü değeridir (Karşılaştırma motorunun faz-faz arası gerilim değeri U=360 V'tur).

### Karşılaştırma motoruna ait genel bilgiler (Ergene ve diğ., 2018)

	60 oluklu Akar SMSM
Oluk sayısı	60
Her oluktaki sarım sayısı	40
Hava aralığı akı yoğunluğu [T]	0,85
Hava aralığı genişliği [mm]	1
Stator dış çapı [mm]	242
Rotor çapı [mm]	168
Motor uzunluğu [mm]	150
Rotor hacmi [m3]	0,003325
Toplam hacim [m3]	0,006899
Bakır ağırlığı [kg]	9,89
Mıknatıs ağırlığı [kg]	2,4
Stator çelik ağırlığı [kg] *	66
Rotor çelik ağırlığı [kg] *	30
Toplam ağırlık [kg]	108,29

\* Ergene ve diğerlerinin verdiği stator ve rotor ağırlıklarının net ağırlıklar değil, hurdası ile birlikte üretim esnasında harcanan (consumption) toplam ağırlıklar olduğu düşünülmektedir. Aksi halde motor gövdesi, milleri, kapakları, motor freni ve kasnak ile birlikte motor ağırlığının etiketinde yazan değer çok daha üstünde çıkması gerekmektedir.

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	MÜCAHİT SOYASLAN
Proje No:	218M615
Proje Başlığı:	Asansör Tahrik Sistemleri İçin Dıştan Rotorlu Sürekli Mıknatıslı Bir Senkron Motorun Tasarımı Ve Prototip Üretimi
Proje Türü:	1002 - Hızlı Destek
Proje Süresi:	9
Araştırmacılar:	OSMAN ELDOĞAN, YUSUF AVŞAR, AHMET FENERCİOĞLU
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER Ü. TEKNOLOJİ F.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/03/2019 - 01/12/2019
Onaylanan Bütçe:	45000.0
Harcanan Bütçe:	44999.42
Öz:	<p>Bu projede, asansör tahrik sistemleri için dıştan rotorlu sürekli mıknatıslı bir senkron motorunun (SMSM) tasarımı, modellenmesi ve prototip üretimi yapılmıştır. Asansör tahrik sistemlerinde genellikle içten rotorlu ve redüktörlü asenkron motorlar kullanılmaktadır. Son zamanlarda dişlisiz (gearless) SMSM'lerin yaygınlaşması ile tahrik sistemlerindeki verimler artmış ve hareket organlarındaki maliyetler ciddi oranda düşmüştür.</p> <p>Proje kapsamında gerçekleştirilen dıştan rotorlu motor tasarımı sayesinde, içten rotorlu dişlisiz asansör tahrik motorlarına göre daha yüksek verim değerlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Karşılaştırma motoru olarak sektörde satışı gerçekleştirilen, ayrıntılı analiz ve test sonuçları literatürde yer alan, 4 kW gücünde içten rotorlu bir SMSM seçilmiştir. Tasarlanan ve üretimi yapılan motor verileri karşılaştırma motoru ile kıyaslanmış ve enma değerlerinde %12.17 verim artışı elde edilmiştir.</p> <p>Dıştan rotorlu SMSM'nin rotorundaki dönme hareketi mile indirgenmiş ve piyasada seri üretimi yapılan tahrik kasnaklarına ve fren mekanizmalarına uygun yeni bir motor tasarımı elde edilmiştir. Dıştan rotorlu SMSM'nin tasarım aşamalarında, elektromanyetik analiz yazılımı ile yapay arı kolonisi (ABC) algoritması kullanılarak motor performans verileri iyileştirilmiştir. Bu bağlamda, ilk olarak motorun analitik tasarımı yapılmış, daha sonra ise sonlu elemanlar metodu ile elektromanyetik, yapısal ve termal analizleri gerçekleştirilmiştir.</p> <p>Proje kapsamında sunulan dıştan rotorlu SMSM'nin ticarileşmesi durumunda, ülkemizin asansör motorları alanındaki rekabet gücüne katkı sağlanması hedeflenmektedir. Aynı çerçeve boyutlarına sahip içten ve dıştan rotorlu asansör tahrik motorlarının karşılaştırıldığı bu çalışmanın, motor tasarımı ve asansör tahrik sistemleri konusunda çalışacak araştırmacılara fayda sağlaması beklenmektedir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Asansör tahrik motoru, senkron motor, dişlisiz motor, dıştan rotorlu motor, elektrik motoru tasarımı
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır